琉球大学学術リポジトリ

リュウキュウマツ林の水分特性と乾燥害回避に関する研究(附属演習林)

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 琉球大学農学部 公開日: 2008-02-14 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 山盛, 直, Yamamori, Naoshi メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/4180

リュウキュウマツ林の水分特性と乾燥害回避に関する研究

山　盛　　直*

Naoshi YAMAMORI : Studies on the characteristics of water and silvicultural techniques for avoiding drought damages of Ryukyu – matsu (*Pinus luchuensis* Mayr) stands

目　　次

緒　言…… 574
I　リュウキュウマツの林業的意義…… 576
1　リュウキュウマツの植物学的特徴…… 576
2　リュウキュウマツの造林学的特徴…… 578
1）樹種特性および用途…… 578
2）造林地の環境…… 579
3）造林法の変遷…… 583
4）リュウキュウマツの造林に関する研究史…… 584
3　研究の目的…… 584
II　リュウキュウマツの生長特性…… 585
1　種子の発芽適温…… 585
2　苗木の生長…… 587
3　生長型と伸長量…… 588
4　林分現存量…… 592
5　根系分布…… 595
6　考　察…… 602
III　リュウキュウマツの水分特性…… 603
1　苗木の蒸散係数…… 604
2　苗木の蒸散量およびNWP（針葉の水ポテンシャル）の日変化…… 604
3　水欠差のおこる環境要因…… 606
1）異なる水分条件下で育てた苗木の蒸散量およびNWPの日変化…… 606
2）土壌の乾燥に伴う苗木の蒸散量，NWPおよび含水率の変化…… 607
3）苗木の蒸散作用に及ぼす風の影響…… 608
4　成木の蒸散量およびNWPの日変化と季節変化 …… 608

*　琉球大学農学部附属演習林
琉球大学農学部学術報告　26：573～716（1979）

5　考　　察…… 615
Ⅳ　リュウキュウマツ林分の有効水分の特性…… 617
1　水分の供給要因…… 617
2　水分の損失要因…… 617
1）地表面蒸発量…… 617
2）地表面流出量…… 618
3）リュウキュウマツ林分の蒸散量…… 619
4）根系分布域の土壌水分動態…… 621
3　リュウキュウマツ林分の有効水分の収支…… 624
4　考　察…… 627
Ⅴ　沖縄の自然環境がリュウキュウマツの生長に及ぼす影響…… 632
1　少降水量に起因する干天日の影響…… 633
2　季節風および台風の影響…… 635
3　地形および土壌の影響…… 639
1）地　形…… 640
2）土　壌…… 642
4　リュウキュウマツ林分の成長と立地条件…… 650
5　考　察…… 652
Ⅵ　リュウキュウマツ林分の乾燥害回避と造林技術…… 653
1　更新法および地拵法と幼齢林の生長…… 653
2　仕立法および立木密度…… 656
3　じかまき造林におけるまきつけ時期…… 659
4　林地肥培…… 663
5　保護樹帯の設置…… 666
6　肥料木の混交効果…… 669
7　考　察…… 673
Ⅶ　研究の要約…… 679
引用文献…… 684
Summary …… 688
附　表…… 696

緒　　言

森林の機能は，いわゆる経済的機能と公益的機能がある。わが国の経済成長に伴う木材資源の増強を図ることは，重要な課題であるが，その反面，今日では伐採を含む森林への干渉によってもたらされた環境問題，都市問題をはじめ一連の社会問題が起こってきている。そして，このような環境保護という言葉で表現される森林の維持存続は，国民的要請となっている。このように，森林の公益機能に対する関心が高まるなかで，森林の施業は，森林のもつ各種の公益機能の発揮と木材生産との調和を図りつつなされる方向に進んできている。

振り返って沖縄県の現状をみると，戦後30余年を経た現在，森林の整備は進んでいない。換言すれば，これら各種機能を発揮する森林自体が乏しい状態である。その理由として，甚大な戦災をこうむったことが大きく，また，戦後数年間，住居の90％以上を焼失したといわれる戦災の復興のため，用薪材の過

伐によって，取り残された森林も極度に荒廃した。これに加えて，台風，季節風，少降雨による干害などの気象災害や戦災による土地的環境破壊も自然植生遷移の進行を妨げる原因となったことと思われる。現在，山林奥地の天然生広葉樹林は，ようやく林相を回復しつつあるが，人家に近い里山や特に激戦地になった沖縄本島中南部は，今なお荒れ地が多く，森林らしいものはない。

沖縄県の戦後の林政は，1950年に至って全県的に統一された頃からはじまるが，造林面積の増加は1960年頃からである。その主な樹種は，山地にあってはリュウキュウマツ，平地にあっては保安林としてのモクマオウであった。沖縄県に分布する森林土壌のなかで，適潤性土壌は極めて面積が少なく，弱乾性〜乾性土壌の分布面積が大部分を占める結果，これらの樹種が造林適樹種として用いられた。

リュウキュウマツは，日本に分布する二葉松の一つで，アカマツおよびクロマツと異なる地域で分布している。すなわち，北はトカラ列島から南は八重山群島の与那国島までの亜熱帯が分布域である。これら分布域では，往時より最も主要な造林樹種として，リュウキュウマツが造林されてきた。

リュウキュウマツは，母樹がある場合は天然下種によって荒廃疎林地や裸地に容易に成林する。また，人工造林は主としてじかまきによる方法がとられている。樹種特性として比較的適応性に富み，幼齢時の生長が大きく成林が早いので，荒廃林地の更新樹種として広く造林されてきた。戦災による荒れ地の更新は，地形的，土壌的条件も悪いので，リュウキュウマツは適樹種として造林され，その面積は広がりつつある。その他，耕地防風林，街路樹，環境緑化樹種として植栽面積は拡大の一途をたどりつつあり，将来ともこの傾向は変らないものと考えられる。

一方，その材は古くは大径木が造船用の御用木として利用されてきた。また，地場産業であるカツオ節，陶器および瓦製造用には，欠かせない薪材として古くから重用され，炭鉱坑木材としても移出されていた。最近はパルプ資源として注目され，企業による造林も盛んになってきた。このように拡大造林が進むにつれて，大面積の一斉造林がなされるようになった。

当地方における造林法は，全面刈払い火入れ地拵法によるじかまき法がなされるため，造林団地面積が大きくなる傾向があり，当然保残されるべき稜線の保護樹帯も欠く場合が多い。このような稜線地帯は乾性土壌（$Y_{A,B,g}RY$ I・II）で占められ，適応性の広いリュウキュウマツといえども生長は望むべきものがない。以上のように拡大造林が進むにつれて，造林不成績地が各地に目立つようになった。

他方，林地の培地としての沖縄地方の森林環境をみると，冬季でも降霜をみることなく，年平均降水量も2000㎜以上で，高温多湿な気象条件にあるといえる。しかしながら，降水量の分布は年月によって偏りがあって，少降水量による比較的長期の干ばつのくり返しがみられる。また，沖縄に分布する森林土壌は，黄色土および赤色土が大部分で，これらの土壌は埴質で構造の発達が悪い。土壌は粘質重厚で固相率が高く，孔隙量特に植物に利用されやすい水分を保持する粗孔隙量が小きく，林地土壌は極めて乾燥状態を示す場合が多い。したがって，土壌の水分状態が林木の生長にとって制限因子となるものと予想される。また，台風や冬季の季節風の被害も大きいものが考えられる。

以上のように，荒廃地や疎林地の多い沖縄では，適樹種および木材利用の観点から，リュウキュウマツの造林は一層拡大される情勢にあるが，自然環境の点であらゆる林地に適するものではなくその造林にあたっては，リュウキュウマツの特性と沖縄の自然環境を肥握して効果的な施業がなされなければならない。この研究は，リュウキュウマツの造林および施業の技術体系の確立のための基礎的資料を得ようとするものである。

本研究の内容の概要は次の通りである。

I　リュウキュウマツの植物学的特徴および造林学的特徴を述べ，リュウキュウマツが沖縄における重要な造林樹種であることを述べた。

II　実験および現地調査によって，種子の発芽適温，稚苗の地上部および地下部の生長状況，幼齢林分における生長パターン，林分の現存量調査および根系の分布調査などにより，リュウキュウマツの生

長特性を明らかにした。

Ⅲ　リュウキュウマツの個体としての水分特性を知るため，苗木の蒸散係数，蒸散量およびＮＷＰ（針葉の水ポテンシャル：Needle Water Potential）の日変化などを測定し，また，成木についても蒸散量の日変化および季節変化を測定した。さらに，苗木実験によって，土壌の水分や風などの環境要因が，蒸散量，ＮＷＰおよび針葉の含水率などに及ぼす影響を調べ，水ストレスの起きる環境条件について検討した。

Ⅳ　リュウキュウマツの林分としての水分特性を明らかにするため，現実林分について測定調査した。水分の供給要因としては降水量を，損失要因としては地表面蒸発量，地表面流出量および林分の蒸散量の推定をおこない，あわせて林地土壌の水分動態の測定結果と現実林における水分収支より土壌の水分不足状態を検討した。

Ⅴ　沖縄の林木生長への影響を与えると考えられる降水量，季節風，台風，地形および土壌などの資料より，リュウキュウマツの成長へ及ぼす影響について考察し，各地より得られた調査結果より，林分の地位指数と環境要素との関係について検討した。

Ⅵ　リュウキュウマツ林分の乾燥害回避のための造林技術的問題について，数例の調査結果を挙げて考察した。

以上の研究の成果から，沖縄におけるリュウキュウマツ林分の造成に関して，適地判定の指針ならびに造林方法の技術的改善への１つの方向を示したものである。

本研究をおこなうにあたり，九州大学教授宮島寛博士ならびに同助教授須崎民雄博士より，研究の指針と終始懇切なご指導をいただいた。また，論文のとりまとめにあたり，九州大学教授坂上務博士より懇切なご助言と校閲をいただいた。ここに記して心から感謝の意を表する。

また，琉球大学名誉教授大山保表博士，同教授砂川季昭博士，同教授大宜味朝栄博士には種々のご助言とご鞭撻をいただいた。現地における調査測定には，琉球大学与那演習林助教授平田永二博士，新里孝和氏，田場和雄氏，比嘉達弘氏をはじめ全職員のご協力を得た。さらに，室内における実験測定には，元林学科学生の屋良一洋氏，新垣徹氏，謝花善夫氏，玉寄長賢氏の諸氏のご協力を得た。論文のとりまとめには，新崎光彦氏，砂川佳子嬢の労を得た。記して深謝の意を表する次第である。

Ⅰ　リュウキュウマツの林業的意義

1　リュウキュウマツの植物学的特徴

リュウキュウマツ（*Pinus Luchuensis* Mayr）は，裸子植物門，球果植物綱，マツ目，マツ科，マツ属に属する。

マツ属は，世界で約120種が知られている。その分布域を植物区系界でみると，全北区，旧熱帯区および新熱帯区のみにあって（Mirov　1967），1種を除くすべての種が北半球に分布する。石井（1954）はマツ属の82種について，亜属および節の分類をおこなったなかで，リュウキュウマツはDiploxylon亜属のLariciones節に属するとしている。この節に属する16種のマツのなかで，シベリアを含む東亜中北部およびアジア南部に11種を産し，他は欧州中南部に１種，地中海沿岸に２種，北米東北部に２種が分布している。これらのなかで，東亜区および南支台湾琉球区に産する二葉松は，クロマツ（*Pinus thunbergii*），リュウキュウマツ（*P. luchuensis*），ニイタカアカマツ（*P. taiwanensis*），ホクシアカマツ（*P. tabulaeformis*），タイワンアカマツ（*P. massoniana*），アカマツ（*P. densiflora*），メルクシマツ（*P. merkusii*）などである。これらのマツ類は形質的に近縁であって，針葉は一束二針，受精完了期間は約１年，種子は受粉翌年の秋に裂開により放出，種子翼は開節翼，葉鞘は宿存性などの形質的特徴をもっている。これらの形質は，マツ属の系統上比較的進化した特徴と考

えられている（石井　1954）。

わが国に自生する二葉松はアカマツ，クロマツおよびリュウキュウマツの三種である。アカマツは，青森県の下北半島を北限とし，南は屋久島までみられ，さらに，朝鮮半島，山東半島まで広く分布する。アカマツの分布域は暖帯，温帯，亜寒帯の気候帯にまたがり，暖帯，温帯の中間帯を分布の中心とみなされている。クロマツはアカマツに比較して分布域が狭く，北限は下北半島，南限はトカラ列島，朝鮮半島南部にもみられるが，いずれも海岸地帯に偏って分布する（豊原　1973）。

リュウキュウマツの天然分布は，北はトカラ列島の悪石島から奄美諸島，沖縄群島，宮古群島を経て八重山群島の与那国島までで（初島　1975），その分布は亜熱帯に限られ，アカマツやクロマツに比べると分布域が著しく狭くなっている。リュウキュウマツの中心郷土とみなされる沖縄本島では，主として海岸沿いの低海抜の里山地帯に生育していて，奥地山林地帯における天然分布は少ない。郷土以外におけるリュウキュウマツの人工林は，宮崎県や鹿児島県で会社有林や国有林において試験的に植栽され，好成績を上げている（辻本　1963）。台湾では中北部の低海抜地帯に主として植栽され，面積約2万haにおよび，その生育は極めて良好であるという（林　1961）。

マツ属の種の分類に関して，針葉断面の解剖学的特性が古くから重視され多くの研究が報告されている。アカマツやクロマツなどについてはDoiら（1929），外山（1954）など，リュウキュウマツについては，島袋ら（1956），辻本（1963）などの研究がある。これらの研究からリュウキュウマツの針葉および針葉断面の解剖学的特徴をアカマツ，クロマツと比較して述べると，リュウキュウマツの針葉長は10.0～19.8cmでアカマツ，クロマツよりも長い。針葉の幅は1.21～0.85mmで，クロマツが最も大きく，ついでアカマツ，リュウキュウマツの順である。針葉の（幅／長）×100の形状比は，クロマツが最も大きく，アカマツは中間値で，リュウキュウマツは前両者に比べて著しく小さい値で0.66～0.74を示す。下表皮細胞層は，リュウキュウマツ1～2層であるが大部分は2層，アカマツは1層，クロマツは2層である。樹脂道の位置およびその数については，リュウキュウマツは中位が最も多く，内位，外位，両位も観察され，その数は4～6個，アカマツは外位で2～12個，クロマツは中位で2～15個である。気孔の位置はいずれも背腹両面，その数はリュウキュウマツ6～18個，アカマツ9～20個，クロマツ9～26個で，リュウキュウマツはアカマツ，クロマツに比べて気孔数が少ない。

次にリュウキュウマツの外観的形態について概説すると（初島　1975），樹幹通直，高さ10～20m，胸高直径20～60cm，老大径木では100cm以上に達する。樹冠傘形，樹皮はクロマツに似て上部灰褐色，平滑薄質，下部黒褐色，深く亀裂し剥離する。針葉はアカマツに似て軟弱，冬芽の形状は円筒状，赤褐色でアカマツに類似，球果は卵状円錐形，長さ30～60mm，径25～35mm，果鱗上部はやや肥厚，鱗片露出部はやや突出するが，突出はアカマツより高くクロマツより低い。種子は淡褐色，長さ3～5mmで約3倍長の翼をもつ。種子1kgの粒数は9000～11000粒である。

以上概説したように，針葉断面の解剖学的性質および樹木の形態からリュウキュウマツは，アカマツに共通する特徴とクロマツに共通する特徴を併せもっていて，これらの中間的性質をもつ樹種と考えられる。

アカマツ，クロマツ，リュウキュウマツなどのマツ類は，本来の原植生において条件のよい立地では他樹種との競争に負けるので，普通には二次林や先駆植生として出現する。マツ林は地位級の低い岩石地や稜線地帯，海岸地方の潮風の強い風衝地などに土地的極相林としてみられる。また，人為による伐採，山火事，その他台風，降水などによる土壌侵食崩壊地に二次林または初生林として存在する。さらに，比較的環境適応性が広く生育が旺盛で有用樹種であるところから，積極的に育成する施業がなされるため人為的二次林が増加しつつある。以上のように，リュウキュウマツ林も土地的極相林や初生林として存在したものと考えられるが，現在では二次林や植林が多くなっていて，その分布域を広げつつある。

リュウキュウマツ林の植物社会は，リュウキュウマツオーダーで，亜熱帯マツ林においてアカマツオーダーに対応するものとしている。すなわち，亜熱帯マツ林で土地的極相林，初生林，二次林および植林を含み，リュウキュウマツ，シャリンバイ（*Rhaphiolepis umbellata*），ギイマ（*Vaccinium Wrightii*），ハチジョウススキ（*Miscanthus sinensis* var. *condensatus*），シラタマカズラ（*Psychotria serpens*），ノボタン（*Melastoma candidum*）などの陽性植物を標徴種とし，リュウキュウマツ群団，リュウキュウマツ群集として位置づけられている（豊原　1973）。

2　リュウキュウマツの造林学的特徴

1）樹種特性および用途

リュウキュウマツは，南西諸島における主要な造林針葉樹種であって，藩政時代より今日に至るまで人工造林がおこなわれてきた。特に戦後の荒廃林地の復旧適樹種として終戦数年後より造林が盛んになった。その理由としてリュウキュウマツは，環境に対する適応性が比較的広く，じかまきによって容易に造林が可能であり，かつ生長が早く，種子の入手が容易であることなどがあげられる。沖縄県における戦後のリュウキュウマツの造林実績および分布面積を示すと表1－1および表1－2のとおりである（沖縄県農林水産部　1976）。

Table 1－1 Area of reforestation in Okinawa 1951 － 1975

(ha)

Year	Amount	Ryukyu－matus			
		Sowing	Plantation	Total	%
1951 － 1963	7443	3283	－	3283	44
1964	685	618	5	623	91
1965	624	599	4	604	97
1966	581	548	2	550	95
1967	643	548	15	563	88
1968	593	521	－	521	88
1969	510	449	1	450	88
1970	226	202	－	202	89
1971	318	252	－	252	79
1972	613	472	2	474	77
1973	289	226	8	234	81
1974	134	57	9	66	49
1975	157	40	32	72	46
Total	12816	7815	78	7894	62
%		99	1	100	

Table 1－2 Area of each forest type in Okinawa 1975

(ha)

District \ Forest type	Man－made reforestation				Natural stand			Other area	Left-over area	Amount
	Ryukyu－matsu	Sugi* Inu-maki*	Broad leaved tree	Total	Needle leaved tree	Broad leaved tree	Total			
Northen part of Okinawa－gunto	4624	154	97	4875	4879	34679	39558	2259	746	47438
Central and southen parts of Okinawa－gunto	1063	1	0	1064	2778	6604	9382	628	4040	15114
Miyako－gunto	736	0	421	1157	0	3327	3327	302	2319	7105
Yaeyama－gunto	1234	55	0	1289	0	31335	31335	654	1924	35202
Total	7657	210	578	8385	7657	75945	83602	3843	9029	104859

*{ Sugi : *Cryptomeria japonica* D. Don
Inumaki : *Podocarpus maccophyllus* D. Don

表1－1および1－2に示されたように，全造林面積の約62％がリュウキュウマツであり，全林野面積の16％を占めている。沖縄における他の主要な造林樹種には，針葉樹ではイヌマキ（*Podocarpus macrophyllus*），スギ（*Cryptomeria japonica*），広葉樹ではモクマオウ(*Casuarina equisetifolia*)，センダン（*Melia Azedarach*），エゴノキ（*Styrax japonicum*），タイワンハンノキ（*Alnus formosana*）などがあげられるが，これら樹種の適地は限られた地域あるいは場所になる。沖縄におけるリュウキュウマツの造林が，主として火入れ地拵えによる人工下種造林，すなわち，じかまき造林法が採用されていて，この造林法が簡易なこと，沖縄が戦災および戦後の過伐による荒廃林地が多く，したがって，リュウキュウマツの更新適地面積が広いことなどによって造林面積は遂年拡大されてきた。また，リュウキュウマツは幼齢時の成長が著しく，極めて早く成林するので，農家にとっても造林適樹種となっている。さらに，耐潮性や耐風性にもすぐれているので，古くから防潮林や防風林などの保安林として造林されてきた。以上のように沖縄県における森林の更新，とりわけ林種転換にはリュウキュウマツがおもな更新樹種として取り上げられてきた。佐藤（1964）は沖縄における主要造林樹種を取り上げたなかで，「リュウキュウマツは最も重要な樹種であって，沖縄の森林からこの樹種を取り除いたら何が残るか，熟考すべきである」と述べている。このようにリュウキュウマツは，沖縄にとって最も重要な造林樹種といっても過言ではない。

2）造林地の環境

(1) 地 質

琉球列島は九州と台湾の間にあって，北東から南西方向に孤状をなす琉球地背斜に沿って連なる島島からなる。小西（1965）によると，琉球地背斜は6つの構造累帯に分けることができ，そのなかの4つの構造累帯が琉球列島の母岩地質と関係している。これらの構造累帯は，内側から外側に向けて石垣累帯，本部累帯，国頭累帯，島尻累帯と呼ばれている。これら累帯の岩石的特徴および分布は次のとおりである。石垣累帯は変成岩の結晶片岩類からなり，これを不整合に覆って第三紀中新世の石炭を含む八重山挟炭層が発達している。この累帯には石垣島の北部，西表島，小浜島，久米島などが属する。本部累帯は主として古生代の堆積岩類（石灰岩，チャート，砂岩など）と緑色岩類（輝緑岩，はんれい岩

など）からなり，この累帯には沖縄本島の本部半島，古宇利島，伊江島，伊是名島，伊平屋島，渡名喜島，石垣島の南部，竹富島などが入る。国頭累帯は結晶片岩類や千枚岩類からなり，沖縄本島の北部山岳地帯や慶良間群島などが入る。島尻累帯は，中新世ないし鮮新世の海成の砂岩と泥岩の互層からなり，これらは低い地形を形成し，しばしば琉球石灰岩によって被覆されている。この累帯には沖縄本島中南部や宮古島が入る（野原　1975）。

(2) 地　形

沖縄県は沖縄本島，宮古島，石垣，西表島の主要島を除いては島の規模は小さく，全県の面積も2244㎢ほどである。しかし広大な海域に分布する60余島からなり，よって地形は複雑多様で，特異な地形も少なくない。全体としての地形は，孤状列島の地質構造を反映して古・中世代および第三紀の山地や丘陵を骨格に第四紀の隆起サンゴ礁を含む琉球石灰岩からなる台地，段丘を附加したものである。各島の周囲には，裾礁ないし準堡礁の形態をもつサンゴ礁が発達している。

各地形の全体的な特性をあげると次のようなことがいえる。山地は，県内における最高峰が於茂登岳（石垣島）の525 mしかないことから理解されるように，すべて低山性の小起伏山地からなり面積も小さい。丘陵には山地周辺に発達する大起伏丘陵と第三紀島尻層群からなる小起伏丘陵がある。山地周辺の段丘台地は砂礫層（国頭礫層あるいは相当層）が卓越し，小起伏丘陵地帯には石灰岩が広く分布している。河川が短いことや河川への供給は砂やシルトなど細粒物が多いため，沖積低地は極めて少なく平野に乏しい。琉球石灰岩の広い分布に加え，古生代の石灰岩も露出するためカルスト地形の地域が極めて広い。

以上は地形の一般的特性を述べたが，地形は地質構造と密接な関係が認められる。すなわち，山岳地形はすべて石垣累帯，本部累帯，国頭累帯にあって，山地を取り囲むように砂礫層よりなる丘陵や台地が分布している。沖縄本島北部，石垣島，西表島などがこれに属し，おもな森林地帯となっている。島尻層群を基盤とし琉球石灰岩の被覆がみられる小起伏丘陵や台地は，沖縄本島中南部および宮古島に広く分布し，この地帯は古くから農耕地としての利用開発が進められてきた。また，各島の主要河川の河口付近あるいは海岸の入江周辺には，局所的に沼沢地がみられ，その多くはマングローブ林によって被われている（目崎　1977）。

(3) 土　壌

沖縄県の森林地帯における土壌を林野土壌の分類（林業試験場土壌部　1976）にしたがって，土壌型別の分布面積を示すと表1－3のとおりである。

沖縄県における地質，地形と土壌の分布との関係は密接で，かなり規則性のあることが認められる。すなわち，石垣累帯および国頭累帯に属する山岳地の急峻な地形では，主として黄色土壌が広く分布するが，山岳地を取り囲む丘陵台地および定高性段丘地の稜線地帯や尾根台地には，赤色土壌と表層グライ系赤・黄色土壌が分布する。

乾性～弱乾性黄色土はA0層の発達は弱く，A層の発達も小さく埴質で酸性を呈し，一般的に生産性は低い。弱湿性～適潤性黄色土は，斜面中復部以下の堆積面や谷頭などに点状または線状に小規模に分布するが，A層は団粒状ないし塊状構造が発達する。この土壌は森林土壌のなかで生産性が高く，本県のすべての造林樹種の適地とされている。

赤色土壌は古・中生層の粘板岩，千枚岩，砂岩などに由来し，洪積世に生成された古土壌と考えられている（黒島ら　1969）。この土壌は淡色の薄いA層，赤褐色ないし明赤褐色のB層を持ち，一般に粘土質でカベ状構造を示し，理化学性が悪く生産性が低い。同じ赤色土に属するなかで，火成岩（主として安山岩）に由来する土壌は濁赤色を呈し，塩基に富み生産力が比較的高い（黒島　1972）。

表層グライ系赤・黄色土には，主として沖縄本島北部の東海岸に面する低海抜の尾根平坦部に局部的に分布する。おもに赤色土地帯に偏在するが，黄色土地帯にもみられる。一般に比較的厚いA0層，特

Table 1－3 Area and percentage of forest soil type in private forest, Okinawa

Soil Group	Subgroup	Type, Subtype	Area (ha)	%	Parent material
	R Red soil	RA. B. C	10992	14.2	Diluvium
		RD. D(d)	125	0.2	
RY Red and Yellow soil	Y Yellow soil	YA. B	3527	4.5	Pareozoic starata Tertiary
		YC	19904	25.7	
		YD(d)	7873	10.2	
		YD. E	4750	6.1	
	gRY Surface gleyed red and yellow soil	gRY I•II	10309	13.3	
DR Dark red soil	eDR Eutric dark red soil	eDR C. D－Ca	3635	4.7	Pareozoic and coral limeston
	dDR Dystric dark red soil	dDR C. D	1413	1.8	Igneous rock (Andesite, Granite)
Mixed soil		R－DR	1342	1.7	Mixed red and dark red soil
Im Emmature soil	Im Emmature soil	Im－YC. D(d)	3559	4.6	Lithosols
		Im－s	1110	1.4	Alluvium
		Im－RY	6884	8.9	Altered soil by human
	Er Eroded soil	Er	230	0.3	
G Gley soil	G Gley soil	G	69	0.1	Marine water gley (Mangrove stand)
Rock			1809	2.3	
Total			77531	100.0	

にH層が発達し，表層は薄いA1層，その下に灰青色のA2層の還元層がみられ，順次黄灰色，黄（赤）褐色の土層に推移する。この土壌は全層にわたって堅密で，理学性が悪く，強酸性を呈し塩基に乏しく，取扱い上最も注意を必要とされる土壌である。この土壌は，表層よりも下層は粘土鉄の含量が高い特徴から，かっては亜熱帯性ポトゾル化土壌と呼称されたことがある（竹原 1965）。

岩屑土壌は主として山岳地帯の斜面に分布し，表層の30～50cmは未風化ないし半風化の礫層で占められ，B層はほとんど発達せず基岩へ続く。この土壌は，表層の物理性は悪くないが，全層が浅く腐植に乏しく強酸性を呈し，下層は母岩へと続き，林地に岩盤の露出する場合が多い。林木の生育は甚だ悪い。

暗赤色土は，古生紀石灰岩および琉球石灰岩を母材とする石灰質土壌である。古生紀石灰岩地域の暗赤色土地帯は，山岳地形を形成するが，琉球石灰岩は各島の海岸段丘ないし台地形を形成しているため，地形が緩やかで農耕地として利用される面積が大きい。この土壌は，他の土壌と異なる形態を示し，森林内の自然土壌では，腐植によって表層がかなり深くまで汚染され，暗褐色のA層，濁った赤褐色のB層をもち，pHは弱酸性ないし弱アルカリ性を示し，粘土化が著しく進んで埴質であるが，堅果状構造の

発達が顕著である。急斜面や尾根部では土層が浅く，保水力に乏しいので干害を受け易い。平坦面や凹型緩斜面では土層が深く，これらの地形では比較的生産性は高いと考えられている。

残積性未熟土（泥灰岩土壌）は，沖縄中南部の丘陵地帯にあって，明瞭な層位の分化が認められず，土色は概して灰色ないし黄灰色を呈し，全層アルカリ性を示す。この土壌の分布地帯はほとんど農耕地であって，林業的には耕地防風林，地辺り防止林などの保安林としての利用が考えられる。

海域未熟土は，各島沿岸にサンゴ遺骸の堆積した未熟土で，林地としては海岸防潮林としての利用が大部分である。

各河川の河口付近には，潮の干満によって海水が侵入する塩水性の低湿地土壌がみられこれらの土壌は海水性グライ土と呼ばれている。この土壌地帯はマングローブ林の発達がみられる。

(4) 気　象

沖縄県は亜熱帯に属し，年間気温は比較的高く冬季も降霜をみない。また，夏季は海風によって暑熱が和らげられ，最高気温は本土各地よりむしろ低い。草木は年中緑で花の種類は異なるが絶えることはない。落葉する樹種も数種に過ぎない。

沖縄各地における月平均気温および月平均降水量を表1－4および1－5に示した。

Table 1－4 Monthly and annual air temperature at several location in Okinawa

(℃)

Location	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Year	Period	
Naha	16.0	16.4	18.1	20.8	23.8	26.0	28.2	27.8	27.1	24.1	21.4	18.1	22.3	1941－1970	(Included 1945－51)
Ishigaki	17.8	18.3	20.2	22.6	25.6	27.4	29.0	28.5	27.6	24.9	22.5	19.6	23.7	1941－1970	
Miyako	17.3	17.7	19.4	21.9	24.8	26.7	28.1	27.8	27.2	24.7	22.3	19.3	23.1	1941－1970	(Included 1945)
Yona	13.9	14.7	16.8	20.7	23.5	26.0	28.3	27.8	26.8	23.7	20.1	16.1	21.5	1955－1976	

Table 1－5 Monthly and annual rainfall at several location in Okinawa

(mm)

Location	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Year	Period	
Naha	122.4	116.4	154.3	141.8	243.5	319.8	173.7	253.3	152.0	149.0	150.6	139.5	2,117.7	1941－1970	(Included 1945－51)
Ishigaki	125.2	106.2	127.6	141.2	228.1	259.5	158.1	190.8	219.9	167.6	203.3	169.7	2,097.4	1941－1970	
Miyako	137.5	136.7	137.0	165.9	234.0	298.0	207.3	228.0	191.7	168.2	156.0	173.5	2,247.2	1941－1970	(Included 1945)
Yona	145.1	153.2	146.8	183.1	317.8	375.9	251.4	296.4	222.2	254.4	169.1	141.5	2,656.9	1955－1976	

沖縄本島の那覇では年平均気温は22.3℃であって，北の与那では低く，南の宮古および石垣では高くなるが，その較差は小さく0.6～1.4℃の範囲にある。各気象要素についてもその値に多少相違はあるが，年間の推移はほとんど同じ傾向を示す。

つぎに，沖縄一帯は東アジア季節風地帯に属し，世界でも季節風の卓越する地域といわれている。特に冬季の季節風は強く，8～10m／sec.の平均風速がおよそ12時間ないし24時間吹き続ける（城間

1975b）。これら冬季の季節風の期間は10月中旬から3月中旬頃に相当し，林木の生育に多大の影響があるものと考えられる。また，沖縄一帯は台風の常襲地帯であって，沖縄県内に接近する台風は，年平均3～4個で7～9月に最も多い。沖縄では最大平均風速30 m／sec. 以下の台風は，それほどの強風とはいえず，平均風速20 m／sec. 以下では，人畜や農作物への被害はほとんどない。しかしながら第二宮古島台風（1966 9.5）のような大型台風（最大瞬間風速85.3 m／sec.，最大平均風速60.8 m／sec.，平均風速40 m／sec. 以上の吹走時間10時間）によって，重大な被害を受ける場合もしばしばある。

(5) 森林植生

リュウキュウマツは，天然生広葉樹林の更新樹種として造林される場合が多い。したがって，ここでは森林植生について概説する。

宮脇ら（1971）によれば，沖縄本島北部の森林植生はオキナワシキミースダジイ群集とし，やや乾燥した表層土の浅い立地に生育する群落としている。標徴種および区分種はオキナワシキミ，ヤンバルマユミ，ヤンバルフモトシダ，オナガエビネ，サクラツツジ，リュウキュウチク，オキナワサザンカ，オキナワヤブムラサキなどを含む。

沖縄のおもな森林地帯である石垣島および西表島の植生調査報告によれば（新納ら 1974），山地帯森林植生はスダジイーケナガエサカキ群集とし，ヤブツバキクラスの南限に近く，クラス標徴種のヤブツバキ，ヒサカキなどの頻度が低くなる。この群集に含まれる種群のなかで，アデク，シシアクチ，リュウキュウアオキなど多数の種は，琉球列島のスダジイ林に共通であり，したがってスダジイーリュウキュウアオキ群団に包含されるとしている。

以上は沖縄の森林地帯における自然植生について述べたが，現存する森林は，多かれ少なかれ人為の加わらないものはなく，ほとんど二次林からなっている。リュウキュウマツの造林は，主として広葉樹二次林の更新樹種としてなされてきた。また，山地の開こん跡地や荒廃地などにも，天然生のリュウキュウマツが成林し，その分布面積を広げつつある。

3）造林法の変遷

島嶼からなる沖縄県は，往昔から交通が不便で，木材のような容積の大きいものの需要を県外から移入することは不得策であり，当時の為政者は最も林政に重きを置いたようである。また，資源に恵まれない沖縄の領主達は，外国との中介貿易をおこない国富を増していった（多和田 1972）。この貿易には大洋を航海する大型船が必要であり，リュウキュウマツなど郷土樹種の保育をはかって用材に供したようである。

尚真王（1477～1526）が首里に中央政権を布いた頃から，都市の発達や王城寺院などの建立と相まって，用材林育成が盛んになった。碑文から推察して当時代から経済林の造林がおこなわれている。首里円覚寺松尾之碑文（1501）に「地を卜として松苗一千株を栽培す，永らく円覚寺の修理の用材と為せ…」とあり，これが文献にあらわれた人工造林の嚆矢とされている。

旧藩時代の林政は，蔡温（1681～1766）によって大成した。林政八書のなかの造林技術に関する「杣山法式帳」，「杣山法式仕次」，「樹木播植方法」などは，当時の科学水準からして非常に卓越していたと考えられる。すなわち，地形の組合せによって森林立地の良否を判定している。これらは地形要素と気象要素とを対応させた概念であり，現在の科学水準からみても気象条件の厳しい沖縄に適した施業法といえる。当時のリュウキュウマツの造林法は，樹林播植方法（立津 1937）によると，全面地拵えのうえ，植穴かき起しによるじかまき造林，または天然下種更新であったようである。

明治の廃藩置県から戦前までの記録として残っている沖縄県の林業（粂川 1938）によると，リュウキュウマツの造林は，主としてじかまき造林でなされているが，苗木植栽もかなりの面積にのぼっている。宮古島の大野山林におけるリュウキュウマツの造林は，天然生または育苗による2・3年生大

苗木を鉢付でおこなっていたといわれている。しかしながら大面積造林は全面刈払い植穴かき起しによるじかまき造林法が大部分であったことが類推される。

戦後におけるリュウキュウマツの造林（琉球政府　1972，沖縄県農林水産部　1976）は，1951年から開始され，1964年から急増し，1975までに約7900haの造林実績をあげていて，この面積は全造林面積の62％に相当する。また，造林面積のなかに占めるじかまき造林は99％を占め，したがってリュウキュウマツの造林は，ほとんどじかまき法によるものといえる（表1－1参照）。

戦後におけるリュウキュウマツの造林は，主として里山に近い荒廃林地の復旧を目的としてなされてきた。その造林方法は，まず利用可能な立木を抜き切りし，ついで残存木を皆伐した後一斉に火入れをおこない，地表面かき起しによるじかまき造林法が標準的なものである。この地拵法は，土壌表層の有機物をすべて焼失させ，土壌を悪化させるとともに土壌保全上からも好ましくない。さらに，前植生の伐根や落下した種子なども枯死させるので，有用広葉樹との混交誘導への期待が低く，リュウキュウマツ単純林となる場合が多いので，造林法としては批判されている。

4）リュウキュウマツの造林に関する研究史

リュウキュウマツの造林に関する研究は，旧藩蔡温時代の「樹木播植方法」に記載されている「松仕方様」（立津　1937）が嚆矢とされている。それ以来戦前までは僅かに種子関係の報告（青木 1932）があるだけで，積極的な研究への取り組みはみられない。

戦後，造林樹種としてリュウキュウマツの重要性が認められ，造林面積が拡大するに伴ってその研究も次第に盛んになってきた。とはいえわが国におけるマツ類についての研究報告に比べれば，リュウキュウマツに関する研究は少ない。これまでの報告によると，種子の発芽（山盛ら　1974c），育苗（八重倉ら　1962），造林法（松本ら　1962），生長量および施業（辻本ら　1958，大山 1970），林地肥培（津波古　1966），形態関係（島袋ら　1956），生理関係（田島ら　1955）環境と生長関係（山盛　1977）などがある。これらの報告のなかで，種苗に関する技術的研究，天然生林の林分構成，生長量調査などの調査，幼齢林の肥培試験などは多い。しかしながら，最も基礎的な生理的研究や森林環境と生長との関係などの分野の研究が立ちおくれている。沖縄の厳しい自然環境を考慮した場合，リュウキュウマツが郷土樹種で適応性にすぐれているとはいえ，地形的土壌的に適地範囲があるはずで，実験的な解明と現地における適地の調査が必要と考えられる。

3　研究の目的

戦後実施された造林のなかで，その面積の大半はリュウキュウマツで占められている。このことは，リュウキュウマツの特性として適応性にすぐれた樹種であること，じかまきによって造林が容易であること，比較的生長量が大きいことなどによるものであり，造林面積は逐年拡大されるものと思われる。

しかしながら，各地における造林地をみると，荒廃地化した造林不成績地や極めて生長の悪い林分が多く見受けられる。これら林地を観察すると，造林不成績地は概ね特殊地形や作業法の不備に基づく場合が多い。すなわち，稜線地帯や急斜面地帯の造林地，あるいは保護樹帯の保残されない造林地がそれである。これらの実態から思うに，風衝地形あるいは乾性型土壌における林木は，沖縄の気象条件と相まって，常に物理的風害や生理的乾燥害を受けているものと推察される。現実に沖縄に生育する材木は，樹種，場所のいかんを問わず樹高が15m以上のものはまれであって，これは沖縄における劣悪な森林環境に起因するものと考えられる。このような厳しい環境下にあって，主要造林樹種であるリュウキュウマツの優良林分造成には，適地の範囲と適正な施業技術の解明が必要である。

本研究は，リュウキュウマツ苗木を材料として，生長の減退する環境条件を実験によって推定し，野外におけるこれら環境条件の測定や観測値から現実林の生長の良否を考察し，さらに優良林分造成のための造林技術体系の確立を図ることを目的としておこなうものである。

II リュウキュウマツの生長特性

研究を進めるに際して，研究材料として取り上げたリュウキュウマツの生長特性を把握する必要がある。ここでは，造林および施業技術に関連した種々の生長特性を実験および現地調査結果に基づいて論述する。

1 種子の発芽適温

リュウキュウマツ造林は，ほとんどがじかまき造林によってなされている。種子の発芽には適温と適湿が必須条件であり，したがってじかまき造林法は，自然環境の規制を受けることが大きい。ところで，沖縄におけるリュウキュウマツのじかまき造林は，晩秋頃（11月）から早春（3月）までに実施されているが，この時期は気温の較差が大きく，種子の発芽適温からみた造林適期を把握する必要がある。

1）実験方法

試験温度区分を10℃から5℃毎に35℃までの6区分とした。試験に供した種子粒数は，各温度区とも100粒×5個とし，ろ紙を敷いたシャーレーを発芽床とした。発芽の調査は，毎日定時に健全な幼根のでたものを発芽したものとして記録し，腐敗の判然としたものを腐敗粒として除去した。試験期間は28日とし，残留種子は切断して肉眼による鑑定をおこない，未発芽粒，不発芽粒，腐敗粒，しいな粒などに区分し，未発芽粒のうちその3分の2相当数を発芽粒とみなして発芽率の算定をおこなった（小沢 1958）。但し，10℃区については発芽勢が他区に比べて著しく低いので，試験期間を100日とした。

2）試験結果

温度区分別の発芽試験結果を表2－1に示した。図2－1には試験経過日数と累計発芽率の関係を示した。

Table 2－1 Result of the germination tests of the Ryukyu－matsu Seeds

Temper－ature ℃	Germina－tion term	Percentage of germination					Rotten seeds (%)	Empty seeds (%)	Range of percentage of germination
		14 days (60 days)	21 days (80 days)	28 days (100 days)	Ingermi－nated seeds ×$\frac{2}{3}$	Total			
10	38	(10.0)	(58.8)	(88.6)	(3.2)	(91.8)	(4.0)	(2.6)	(90－97)
15	11	1.6	25.8	66.2	16.7	82.9	7.8	1.0	78－86
20	4	84.2	86.8	87.2	2.3	89.5	7.0	2.4	88－92
25	4	78.2	85.0	86.6	4.0	90.6	5.8	1.6	88－93
30	4	55.4	67.8	76.2	8.1	84.3	11.0	0.6	81－86
35	6	21.2	32.0	41.6	3.6	45.2	51.4	1.6	36－53

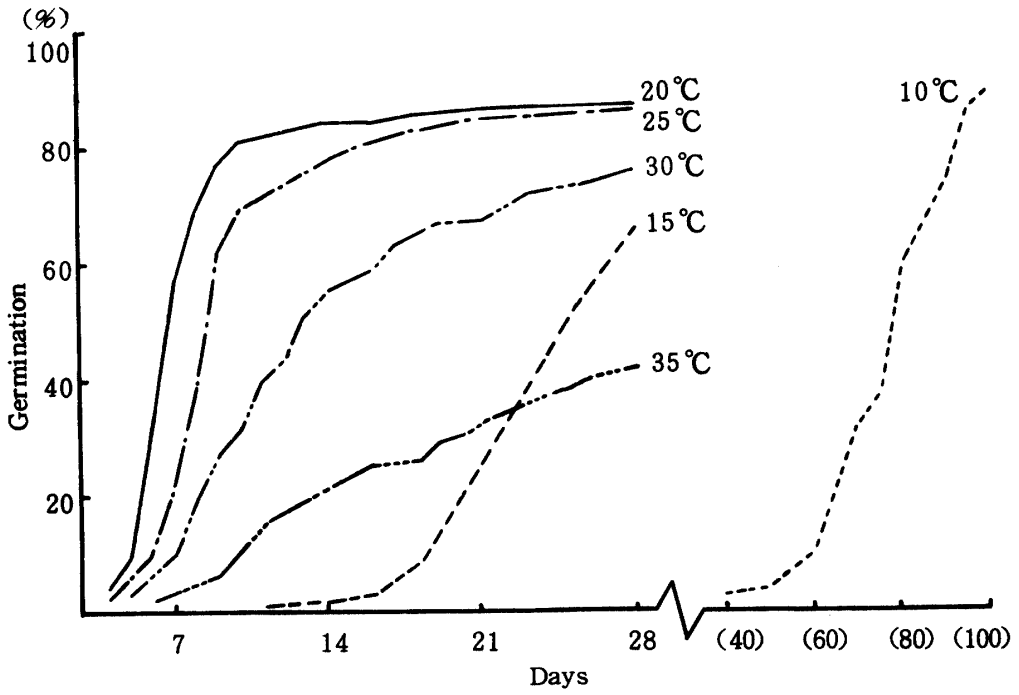

Fig. 2－1 Cumulative percentage of germination of Ryukyu－matsu seeds.

発芽開始日数は20℃，25℃，および30℃においていずれも4日で最も短かった。ついで35℃で6日，15℃で11日，10℃で38日の順に発芽開始日数が長くなった。これらの結果は，温度が20℃以下になると温度の低いほど発芽日数が長くなることを示し，また，35℃の高温でもその日数は若干長くなっている。

試験経過日数と各温度別の発芽率は，14日経過時における最も発芽率の大きい温度区は20℃であって，ついで25℃，30℃，35℃，15℃の順に低下した。この傾向は21日目でも同様であり，28日目では35℃と15℃が逆転するが他は同じであった。

郷（1951）によると，種子の吸水過程に3相があって，物理的吸水時，吸水停止または増加緩慢時および生理的吸水時であるとしている。温度が高ければ吸水速度も大きく，発芽のための栄養分解および細胞分裂も早いことが予想される。また，高温に過ぎると養分の分解が促進され，最大吸水量に達するにつれて種子から養分が外部へ浸出し，腐敗を早めることが考えられる（小沢　1958）。

本試験結果における発芽適温は20～25℃であることがいえる。30℃以上および15℃以下の温度では，20℃および25℃区に比較して発芽勢および発芽率が低下する結果を示した。とくに10℃区の低温では発芽勢が悪く88％の発芽率に達する日数は100日を要し，また35℃区の高温では腐敗粒が多くなり，発芽率は50％にも達しない結果を示した。発芽粒数に未発芽粒の3分の2を加えた総発芽率においても25℃および20℃で90％以上を示し，30℃および15℃で80％台，35℃では50％以下を示した。

腐敗粒は25℃以下では温度との関係は判然としないが，30℃以上になるとその値が多くなる傾向を示した。とくに，35℃では腐敗粒は50％以上にも達した。逆に10℃では100日経過後も腐敗粒は4％で著しく低かった。このことは高温で細菌類の活動が促進され，低温では不活性であったものと考えられる。

2 苗木の成長

苗木の養成あるいはじかまき造林の場合に，稚苗の生育特性を把握することが重要である。苗畑にあっては樹種特性に基づいた育苗法，じかまき造林においては，種苗を諸害から回避するための造林技術を施す必要がある。ここでは，リュウキュウマツ稚苗の発芽後の生育経過を知るため，苗畑において調査をおこなった。

1）調査方法

琉球大学演習林の石嶺苗畑において，1月8日にまきつけた苗木について，月1回50本宛無作為に地際直径と苗高を測定した。そのなかで平均的生長を示した苗木10本を掘り取り，苗木の各形質の測定をおこなった。このほかに発芽当初からの生長状況を知るため，掘り取った苗木の地上部および地下部のスケッチをおこなった。苗畑土壌は泥灰岩風化土壌の埴質土壌で，pHは6.8であった。基肥および追肥は施さなかった。

2）調査結果

図2－2に地上部および直根の生長経過を，表2－2に各形質別の発育経過をそれぞれ示した。

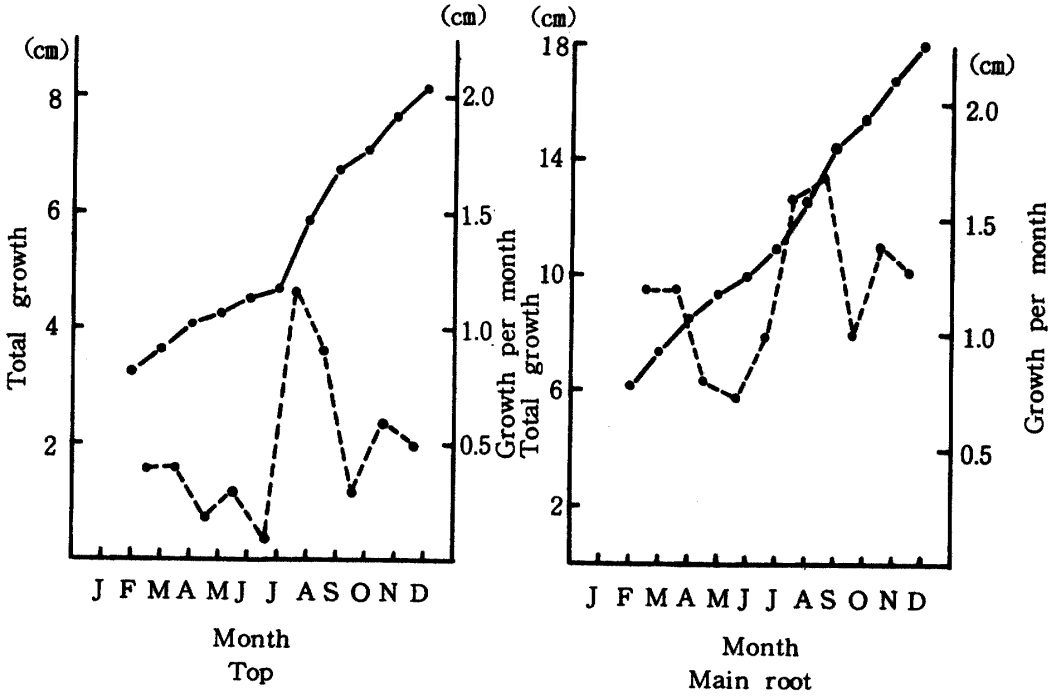

Fig. 2－2 Growth progress of the top and the main root of Ryukyu－matsu seedling.

図2－2によると，地上部は発芽後5ケ月までは除々に成長し6カ月以降になると急速な生長を遂げた。月間生長も6カ月，7カ月，9カ月の順に大きかった。直根の生長は，時期別の差は地上部ほどの明瞭でないが，5カ月頃から急速な生長がみられた。月間生長は発芽後7カ月，8カ月，9カ月の順に大きかった。また，地上部の生長に比較して総生長および月間生長ともに約2倍の生長量であった。

Table 2－2 Growth progress of the Ryukyu－matsu seedling after germinated.

Months	Top length (cm)	Diameter at ground level (mm)	Main root length (cm)	Top weight (g)	Root weight (g)	T－R rate
2	3.7	1.0	7.4	0.13	0.05	2.6
4	4.3	1.0	9.4	0.21	0.09	2.3
6	4.7	1.2	11.1	0.28	0.14	2.0
8	6.8	1.4	14.5	0.61	0.20	3.1
12	8.2	2.0	18.2	1.56	0.38	4.1

表2－2によって稚苗の各形質の発育経過をみると，発芽後6カ月までは直根の伸長に対して地上重が増加せず，したがってT－R率も2程度で小さい値を示した。このことは，根糸に対して地上部の発育が小さいことを示している。8カ月以降になると地上部の発育が急速に増加するので，T－R率も次第に大きくなる結果を示した。

図2－3に発芽当初からの稚苗の生育経過を図示した。

発芽後1カ月までは，地上部はほとんど伸長せず，地下部も直根のみで側根の発達はみられない。2カ月経過時においても地上部および地下部ともまだ貧弱な形態であり，側根の充実してくる時期は6カ月経過後といえそうだ。地上部の伸長も根系の発達が比較的充実した6カ月以降に急速になった。また，側根の発生は地表近くに多く，地下10cm以下では著しく少ないことを示していた。

3　生長型と伸長型

林木の生長過程は周期性をもっていて，1年を通じてみると伸長期，新芽形成期，休止期の3期に分けることができる（須崎　1971）。これらの過程は連続しておこなわれるものではなく，伸長期と新芽形成期は重なる場合が多い。また，土用芽の形成や多相生長（Eggler　1961）と呼ばれるように外囲条件や樹種によって，1生育シーズンに生長が連続的におこなわれる場合もある。リュウキュウマツは幼齢時に年間2，3回芽条を出し伸長することが報告されている（諸見里　1970）。

ここでは，立地条件の異なる箇所のリュウキュウマツ幼齢林に調査地を設け，年間の伸長経過や新芽を出す回数およびその時期などについて調査した。

1）調査地および調査方法

琉球大学与那演習林のリュウキュウマツ3年生林分内に，地形の異なる2個のプロットを設けた。プロットⅠは北斜面にあって北方向の季節風をまともに受ける地形である。プロットⅡは東斜面にあって15m北側に天然生広葉樹林の保護樹帯が設置されている。調査地の概況を示すと表2－3のとおりである。

頂芽および輪枝の伸長は，各プロットより50本を選定して毎月1～3回の測定をおこなった。また，新芽を形成する時期を記録した。針葉の伸長および重量生長は，各プロット内に5本の調査木を選定して，各個体の上枝より毎月1回相当量の針葉を採取して直ちに全重を測定し，実験室に持ち帰って各葉の長さと乾重の測定をおこなった。調査期間は1974年1月より1年間である。

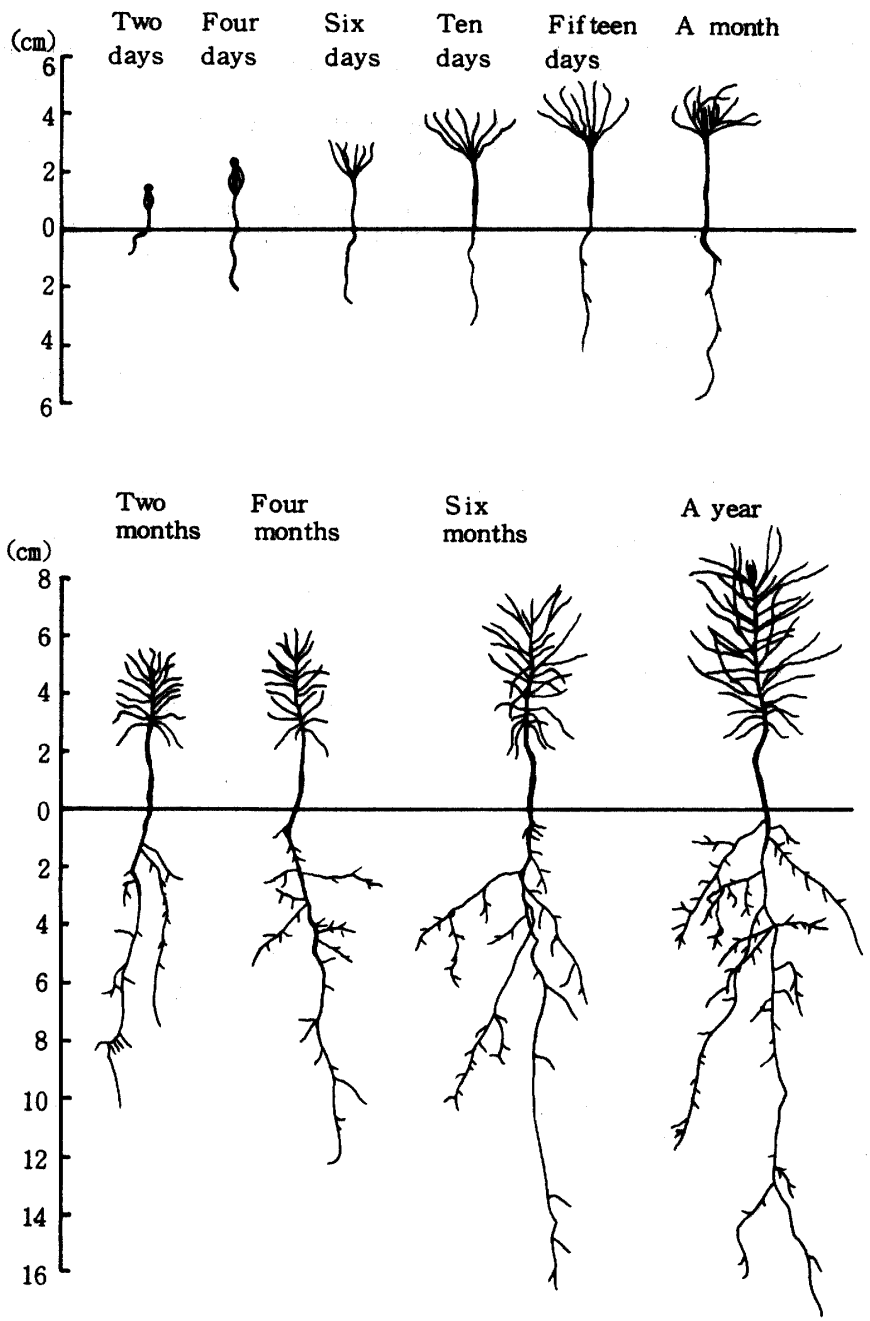

Fig. 2－3 Growth progress of Ryukyu－matsu seedling after germinated.

Table 2－3 Stand condition of the plot.

Plot	Direction of slope	Inclination angle	Plot condition	Height of stand (m)	Age of stand
I	N	32	received northerly wind directly	1.09	3
II	E	35	sheltered from northerly wind by trees nearly	1.10	3

2）調査結果

(1) 頂芽および輪枝の伸長

表2－4にプロット別，月別の平均伸長量，図2－4に総伸長量および月別伸長量をそれぞれ示した。

Table 2－4 Seasonal elongation of terminal shoots and whorl branches

	Plot	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Total
Shoot	I	5.1	12.6	13.3	9.4	3.0	2.7	5.3	2.9	1.1	1.8	1.0	1.6	59.8 cm
		8.5	21.1	22.2	15.7	5.0	4.5	8.9	4.8	1.8	3.0	1.7	2.8	100.0 %
	II	4.3	15.3	16.1	12.9	4.7	4.4	3.3	2.7	1.8	2.4	0.8	2.4	71.1 cm
		6.0	21.5	22.6	18.1	6.6	6.1	4.6	3.7	2.5	3.3	1.7	3.3	100.0 %
Branch	I		8.9	9.0	5.0	1.5	2.0	2.2	1.1	0.7	1.1	0.6		32.1 cm
			27.7	28.0	15.6	4.7	6.2	6.9	3.4	2.2	3.4	1.9		100.0 %
	II		8.1	9.8	6.5	2.2	2.0	2.3	1.3	0.8	1.2	0.5		34.7 cm
			23.3	28.2	18.7	6.3	5.8	6.6	3.7	2.3	3.5	1.6		100.0 %

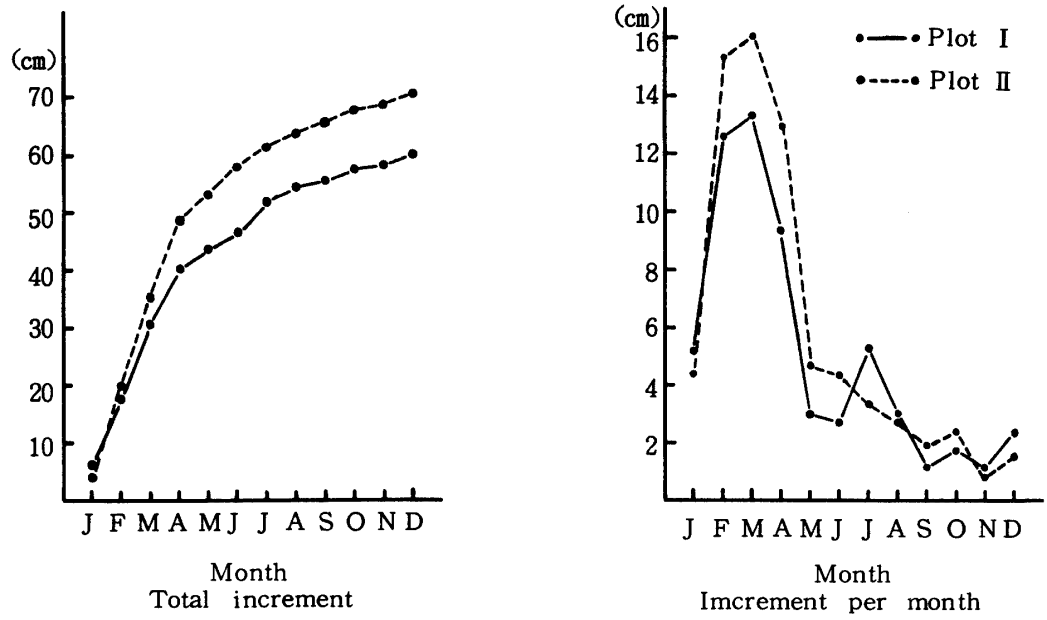

Fig. 2－4 Total increment and increment per month of terminal shoot

頂芽芽の年間の伸長量はプロットⅠで59.8cm，プロットⅡで71.1cmであって，プロットⅡで大きかった。月別の伸長量は，何れのプロットにおいても3月に最大を示し，ついで2月，4月の順でこの3カ月間の伸長量は，プロットⅠで全体の59％，プロットⅡで62％を占めた。頂芽の伸長量は各プロットとも月1cm以上の伸長を示していて，生長が継続的であることがわかった。輪枝の伸長は，プロッ間の伸長差や伸長増加の時期も，頂芽伸長と類似していた。

図2－4の月別頂芽伸長量によると，何れのプロットにおいても，年間最大の伸長期は3月にあって，5月以降の伸長量は急速に減退した。さらに，プロットⅠにおいては7月と10月に伸長のピークがあり，プロットⅡでは3月以降は次第に伸長が減退するが，10月にはプロットⅠ同様伸長ピークが認められた。

諸見里（1970）がリュウキュウマツの1～2年生林について調べた結果によると，生長ピークは年4回あったとしているが，2月と4月のピーク間の伸長は他の月に比べて極めて大きいので2～4月を最大ピークとみなせば，生長ピークは2～4月，7月，10月となって本調査結果とおおむね一致する。したがって，リュウキュウマツ林齢林の生長パターンは，早春の3月が年間最大伸長期であり，さらに7月頃と10月頃にそれぞれ伸長ピークがあって，通年3回の伸長ピークを持つといえる。7月および10月の伸長ピークは，後述の出芽時期と関係するものと考えられる。

(2) 針葉の伸長および重量生長

各プロットにおける月別の針葉の平均長および1本当りの平均乾重を表2－5に示した。

Table 2－5 Growth of length and dry weight of leaves

Plot	Month	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Ⅰ	Length (cm)	0.53	1.42	3.36	4.34	6.92	7.30	8.08	8.77	9.94	10.42
	Weight per leaf (mg)	2.25	4.60	6.65	9.64	16.05	19.71	22.69	23.17	37.87	38.70
Ⅱ	Length (cm)	0.62	1.70	4.01	5.50	7.50	8.62	9.05	10.22	10.24	11.33
	Weight per leaf (mg)	2.41	5.47	9.53	12.87	17.71	22.24	25.62	30.02	37.40	47.94

針葉の伸長は頂芽の伸長よりおくれてはじまる。1～2月頃の針葉は葉鞘部に被覆されていて，3月以降になって針葉部が現れて伸長を開始する。そのため針葉長および重量測定は3月からおこなった。

3月から伸長をはじめた針葉は5月から急速に伸長を増加させ，生育シーズン中継続的な伸長を示した。表2－5により月別伸長量を算出すると，プロットⅠでは7月に最大伸長ピークがあり，5月と11月にそれぞれ小さいピークがみられた。プロットⅡでは5月に最大ピークがあり，7月にやや大きいピークと10月に小さいピークがみられた。針葉の伸長パターンを頂芽のそれと比べると，初めのピークは針葉の伸長開始が頂芽のそれより2カ月おくれるため時期的に一致しないが，第2回目の7月および第3回目の10～11月は，頂芽の伸長ピークと時期的に合致していた。このように針葉の生長パターンも頂芽のそれと類似していて，伸長の増加期と休止期のくり返しのあることが認められた。

(3) 新芽の形成回数

新芽の形成回数をプロット別に5年にわたって調べた結果，表2－6のようになった。

ここで新芽を1回形成する個体は，いわゆる冬芽のみを形成し，その芽は越冬し早春とともに伸びる個体である。また，新芽を2回あるいは3回形成する個体は，冬芽を形成する前に伸長性のある芽を1回あるいは2回形成する個体のことである。

表2－6によれば，各プロットとも林齢による新芽形成回数の差が認められた。すなわち，何れのプ

Table 2－6 Percentage of sprouted times of the terminal shoots in a year

(%)

Plot		I					II				
Age of stand		3	4	5	6	7	3	4	5	6	7
Number of sprouted times	1	0	26	52	66	90	4	30	54	76	92
	2	82	55	48	34	10	90	54	42	22	8
	3	18	19	0	0	0	6	16	4	2	0
	Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

ロットにおいても3年生林分では新芽の形成は2回の頻度が極めて高く，1回および3回形成の頻度はかなり低かった。4年生林分では3年生林分に比べて1回形成の頻度が高くなり，逆に2回形成の頻度が低くなったが，全体のなかでは2回形成個体数が最も多かった。5年生以上の林分においては，1回形成個体が多くなり，全体に占める頻度も最も大きかった。逆に2回および3回形成個体の頻度は低下し，とくに3回形成個体の頻度は著しく低くなり，7年生林分では何れのプロットでも形成がみられなかった。プロット間においては同様な傾向を示し，したがって環境による差はないものとみてよい。

石井（1954）によるとマツ属の伸長型は，単節型と多節型に区分され，リュウキュウマツは単節型としている。京都大学上賀茂試験地におけるマツ属の新梢の伸長期間と伸長型の調査資料によれば，単節型の平均伸長期間は，64日（42～95日）であるが，これに対し多節型では121日（63～183日）であり，多節型は単節型の約2倍の伸長期間を持っている。

本調査では，リュウキュウマツの幼齢林は多節伸長型であるが，林齢が増すにつれて単節伸長型になるものと考えられる。7年生林分で調査数の90％以上が単節型となっていて，林齢が増すにつれて単節型になっている。この調査では，多節型から単節型に移行し終える林齢は，おおよそ7～8年と推定された。これらのことから，頂芽の伸長パターンにおいて，伸長ピークが年間に2～3回表われることも，多節型による伸長のためと考えられる。

4　林分現存量

林分の水分経済を研究する上で，現実の林分の持つ現存量を知る必要がある。とりわけ，同化器官であり，林分からの水分消費に関係する葉量を知ることは重要である。

1）調査方法

琉球大学与那演習林のリュウキュウマツ造林地内の，15年生林分および6年生林分のそれぞれに，風衝地と保護樹帯内側に調査地を設け，Urich第二法によって標本木をそれぞれ3本宛選定した。幹，枝および葉量の調査は，層別刈取法によるが，とくに葉量については葉齢別に調べた。調査は生長休止期に相当する12月におこなった。調査林分の現況を示せば表2－7のとおりである。

Table 2－7 Stand codition of the plots

Plot	Age	Mean		Per hectare	
		TH (m)	DBH (cm)	Volume (m)	Tree number
78－1*	6	3.60	2.61	17.68	11,500
78－2*	6	4.30	3.50	18.28	8,900
79－1*	15	4.51	4.79	70.35	9,100
79－2*	15	6.58	7.25	164.93	7,800

* { 78－1，79－1：Received northerly wind directly
　　78－2，79－2：Sheltered from northerly wind by tree nearly

2）調査結果

調査によって得られた結果を表２－８に示した。図２－５は表２－８を図化したものである。

Table 2－8 Dry matter and water contained in each plot

(ton／ha)

Plot	Age of stand	Dry matter					
		Stem	Branch	Leaves			
				1 year old	2 year old	3 year old	Total
78－1	6	8.083	1.567	2.177	1.028	0.045	3.250
78－2	6	8.382	2.704	2.475	1.672	0.377	4.524
79－1	15	41.778	3.180	2.861	1.195	0.350	4.406
79－2	15	90.215	9.470	4.348	3.417	0.512	8.277

Plot	Age of stand	Water contained					
		Stem	Branch	Leaves			
				1 year old	2 year old	3 year old	Total
78－1	6	12.826	2.812	3.398	1.526	0.069	2.993
78－2	6	12.811	4.041	3.872	2.391	0.539	6.802
79－1	15	42.317	3.886	3.490	1.303	0.382	5.175
79－2	15	99.008	11.622	5.629	3.862	0.579	10.070

Plot	Age of stand	Row weight (Dry matter and water contained)					
		Stem	Branch	Leaves			
				1 year old	2 year old	3 year old	Total
78－1	6	20.909	4.379	5.575	2.554	0.114	8.243
78－2	6	21.193	6.745	6.347	4.063	0.916	11.326
79－1	15	84.095	7.066	6.351	2.498	0.732	9.581
79－2	15	189.223	21.092	9.977	7.279	1.091	18.347

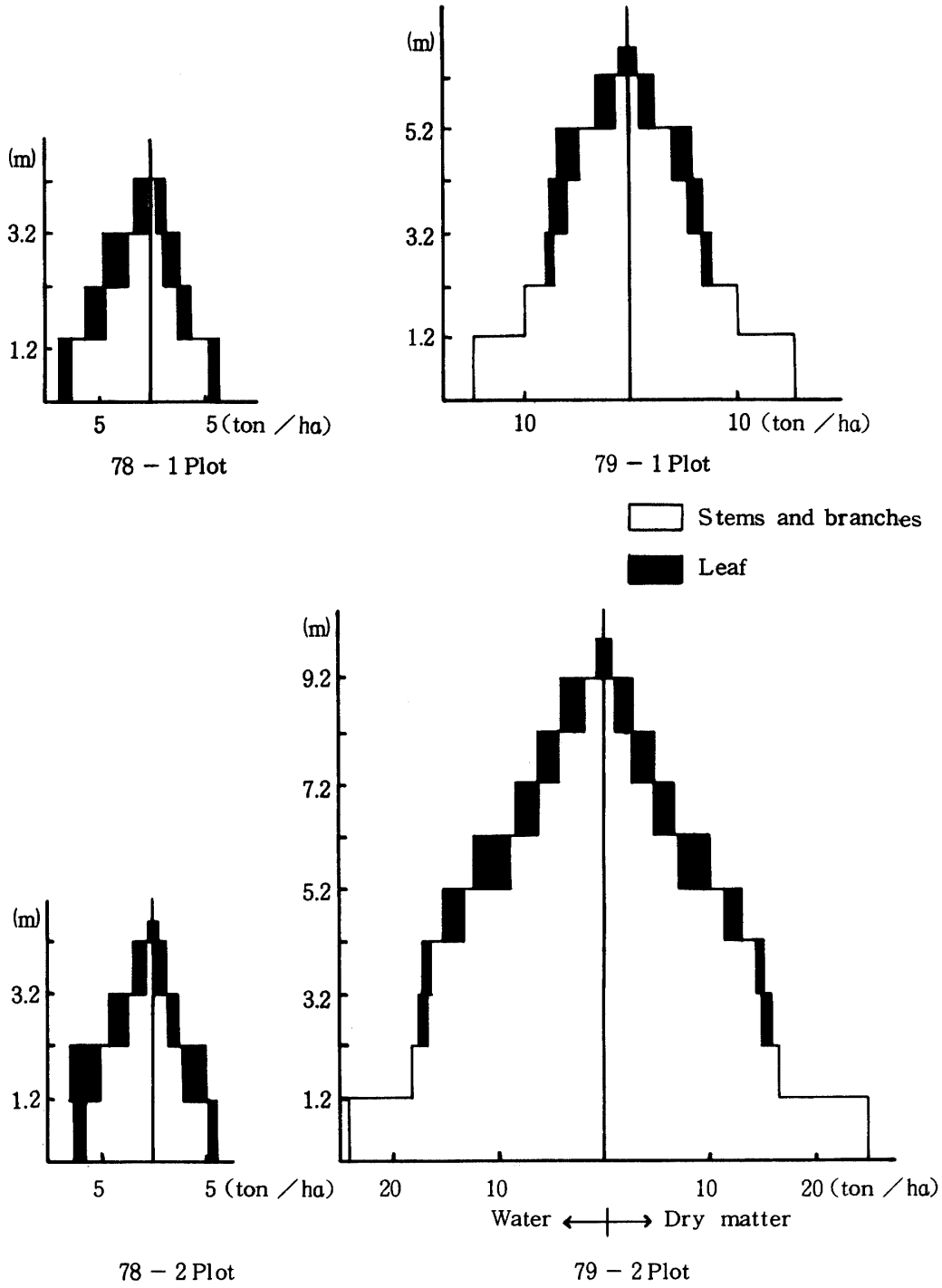

Fig. 2 − 5 Vertical distribution of dry matter and water in each plot of Ryukyu − matsu stand.

乾物の現存量をプロット別に比較検討すると，6年生林分における乾重は何れのプロットでも約8 ton／haで差がない。枝重および針葉重では，風衝地の78−1プロットは保護樹帯内側の78 − 2プロットに比べてやや小さく，地形的影響を示している。15年生林分では，風衝地の79−1プロットは保護樹

帯内側の79－2プロットに比較して，幹および針葉重で約2分の1，枝重で3分の1を示していて明らかに地形的影響があらわれている。

プロット別の幹，枝，針葉に含まれる水分量および生重量は，乾物量とほとんど同様な傾向を示す。

針葉乾物量の葉齢別着葉量をみるため，葉齢別の割合を算定して表2－9に示した。

Table 2－9 Percentage of each age of leaves

Plot \ Age	1	2	3	4
78－1	67	32	1	100
78－2	55	37	8	100
79－1	65	27	8	100
79－2	53	41	6	100

針葉の葉齢別現存量はプロットによって違いがあるが，1年葉で全着葉量の53～67％，2年葉で同様に27～41％，3年葉で1～8％となっている。これらの結果からリュウキュウマツの針葉は，生長期を終了した12月時点で全量の大半は1年葉で占められ，2年葉は30～40％，3年葉は10％以下であって，針葉の寿命はおおよそ2年と考えられる。また，プロット別でみると，78－1および79－1プロットは78－2および79－2プロットに比べて，1年葉の占める割合が大きく，2年葉以上の割合が小さい傾向がみられる。すなわち，風衝地形のプロットでは葉の寿命が比較的短く，落葉が早いものと推定される。

単位面積当りの生重量は，閉鎖林分ではほぼ一定量になるといわれている。アカマツの葉量は佐藤ら（1955）の調査で12～13 ton／ha，丸山ら（1953）は12 ton／haとしている。本調査では，79－2プロットが18 ton／haでやや大きいが，他のプロットでは8～11 ton／haで佐藤らの値にやや近い。また，各樹齢とも生長の大きいプロットほど同化器管である葉量が大きい。

5 根系の分布

植物の水分および養分の吸収は，すべて根系を通しておこなわれる。また，地上部の支持も根系の重要な機能の一つである。したがって，根系の分布の範囲やその量を知る必要がある。

1）調査方法

根系の調査は，林齢の高い林分においては困難を伴い，全体の調査は不可能に近い。よってここでは閉鎖に達した4年生林分において，じかまき造林によるプロットから優勢木，平均木，劣勢木を各1本宛および苗木造林によるプロットから平均木の計4本を調査した。調査は，垂直面は10cm毎に，水平面は20cm毎に掘り下げ，根系のスケッチと生重および乾重の測定をおこなった。

2）調査結果

根系調査をおこなった各標本木の地上部の各形質を表2－10に示した。また，表2－11に水平分布を，表2－12に垂直分布を，図2－6～9に各標本木の水平および垂直分布図をそれぞれ示した。

図表からみて根系の水平分布は，根株を中心に半径20cm以内に多く，根株を離れるにしたがって分布量が小さくなった。根株から40cm以内の分布をみると，86～98％を示し，60cm以内の分布は何れの標本木も90％以上の分布量を示した。しかしながら根系の広がりはNo.4を除いては何れも140 cm以上に達していて，林木間の根系競合のあることがうかがわれる。

根系の垂直分布は，地表から20cm深以内に多く，深さを増すにしたがって分布量は少なくなり，80cm深以上の根系の分布は極めて少なくなった。根の径級別の分布状況をみると，何れの径級の根も地表に

Table 2－10 Measurements of sample trees on investigated roots（4－years）.

	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
Tree heigh (m)	1.9	1.4	0.9	1.6
Diameter at 6－reast high (cm)	3.3	2.3	1.2	1.7
Top weight (g)	2,547.4	1,124.9	238.0	421.3
Stem weight (g)	684.4	371.5	61.3	210.1
Branch weight (g)	394.5	131.1	18.0	35.3
Leaves weight (g)	1,468.5	622.3	158.7	175.9

No. 1 Dominant tree by sowing　No. 2 Mean tree by sowing
No. 3 Inferior tree by sowing　No. 4 Mean tree by planting pot seedlings

Table 2－11 Horizonal distribution of 4－years tree root

Extent	No. 1*		No. 2		No. 3		No. 4	
(cm)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)
0－ 20	503.1	66.3	304.5	87.8	75.3	83.5	89.5	88.8
20－ 40	148.6	19.6	21.2	6.1	4.3	4.8	9.8	9.7
40－ 60	55.6	7.3	8.9	2.6	2.7	3.0	1.1	1.1
60－ 80	18.4	2.4	4.6	1.3	1.6	1.8	0.4	0.4
80－100	11.1	1.5	3.3	1.0	1.2	1.3		
100－120	9.6	1.3	2.7	0.8	1.6	1.8		
120－140	6.2	0.8	0.7	0.2	1.4	1.5		
140－160	3.1	0.4	0.9	0.2	0.9	1.0		
160－180	2.0	0.3			0.6	0.7		
180－200	1.1	0.1			0.4	0.4		
200－220					0.2	0.2		
Total	758.8	100.0	346.8	100.0	90.2	100.0	100.8	100.0

*No. 1 Dominant tree by sowing
No. 2 Mean tree by sowing
No. 3 Inferior tree by sowing
No. 4 Mean tree by planting pot seedlings

Table 2－12 Vertical distribution of 4－years tree root

Depth	Diameter of root	No. 1		No. 2		No. 3		No. 4	
(cm)	(mm)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)
－20	－2	14.5	73.4	17.7	78.1	8.5	67.8	5.7	84.2
	2－10	192.1		67.8		18.0		28.3	
	10－20	96.3		16.9		34.7		16.5	
	20－	254.4		168.3				34.4	
20－40	－2	3.2	16.9	7.4	16.6	1.1	19.6	4.1	12.3
	2－10	54.4		11.1		13.4		8.3	
	10－20	70.4		24.5		3.2			
	20－			14.7					
40－60	－2	2.3	4.0	4.5	4.0	1.8	7.0	0.8	2.6
	2－10	27.9		9.2		4.5		1.8	
	10－20								
	20－								
60－80	－2	2.4	2.5	1.8	1.1	1.5	3.9	0.6	0.6
	2－10	16.4		2.1		2.0			
	10－20								
	20－								
80－	－2	4.2	3.2	0.8	0.2	1.5	1.7	0.3	0.3
	2－10	20.3							
	10－20								
	20－								
Total		758.8	100.0	346.8	100.0	90.2	100.0	100.8	100.0

*No. 1 Dominant tree by sowing　No. 2 Mean tree by sowing
No. 3 Inferior tree by sowing　No. 4 Mean tree by planting pot seedlings

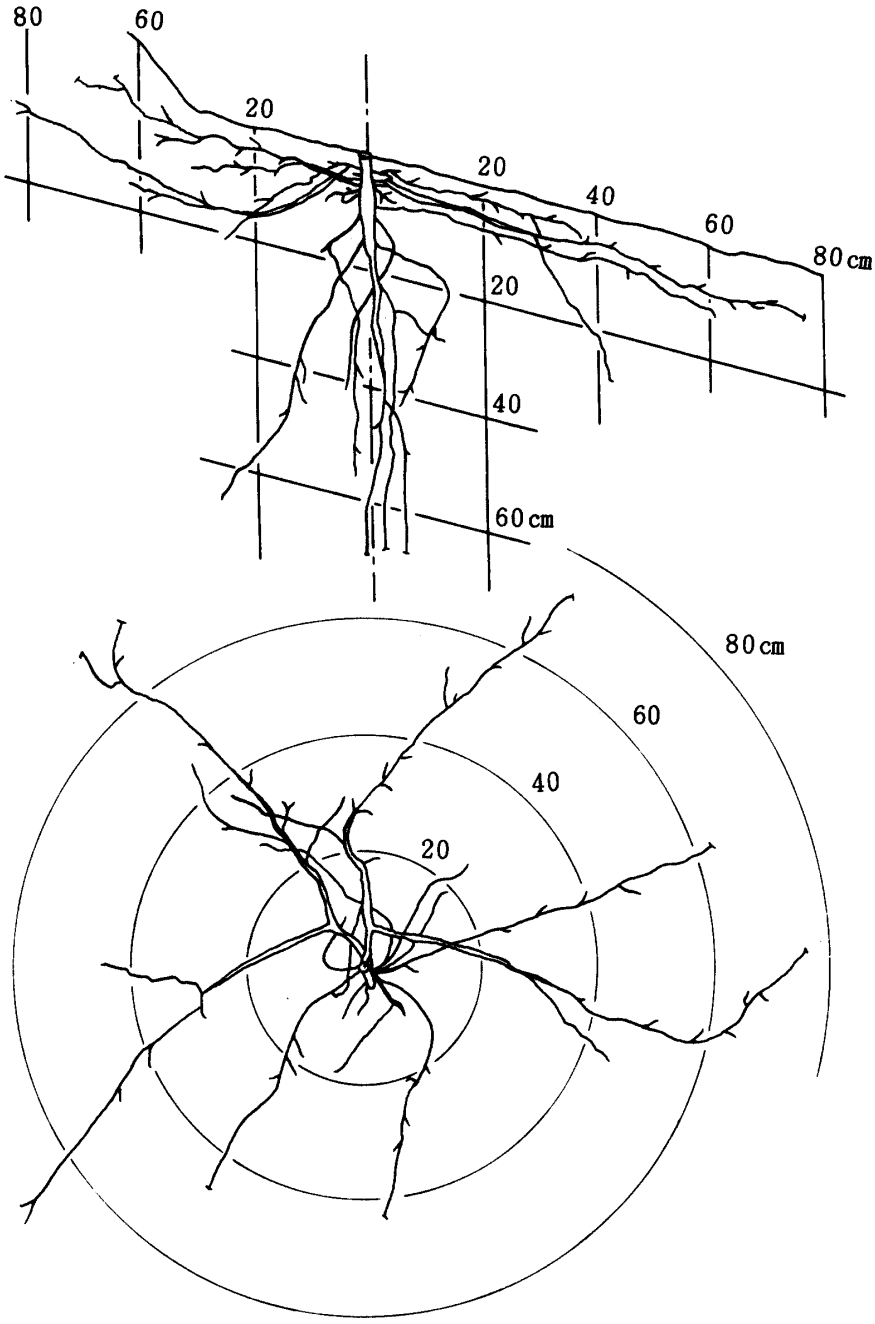

Fig. 2－6 Vertical and horizonal distribution of Ryukyu－matsu tree：(No. 1)dominant tree by sowing.

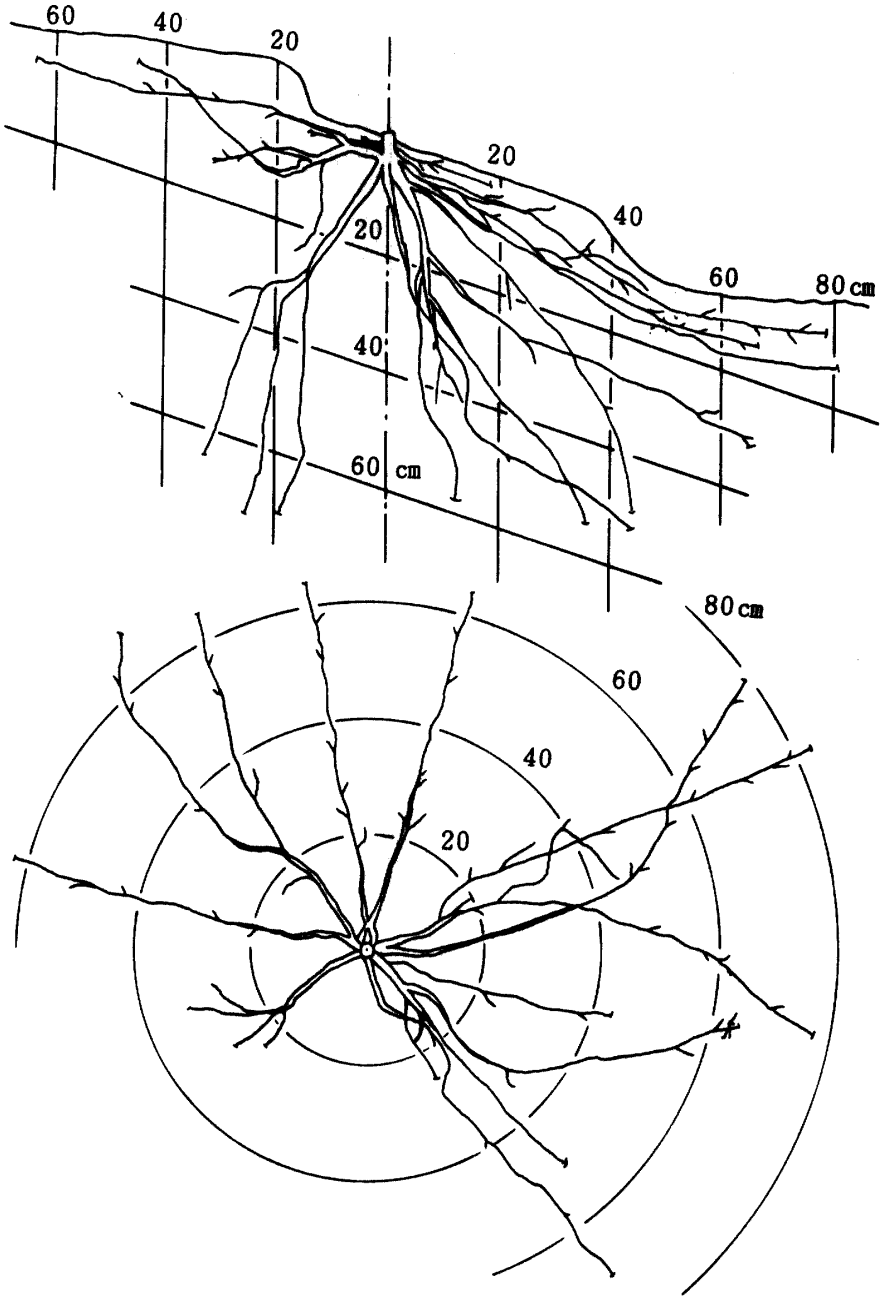

Fig. 2 − 7 Continued (No. 2) mean tree by sowing.

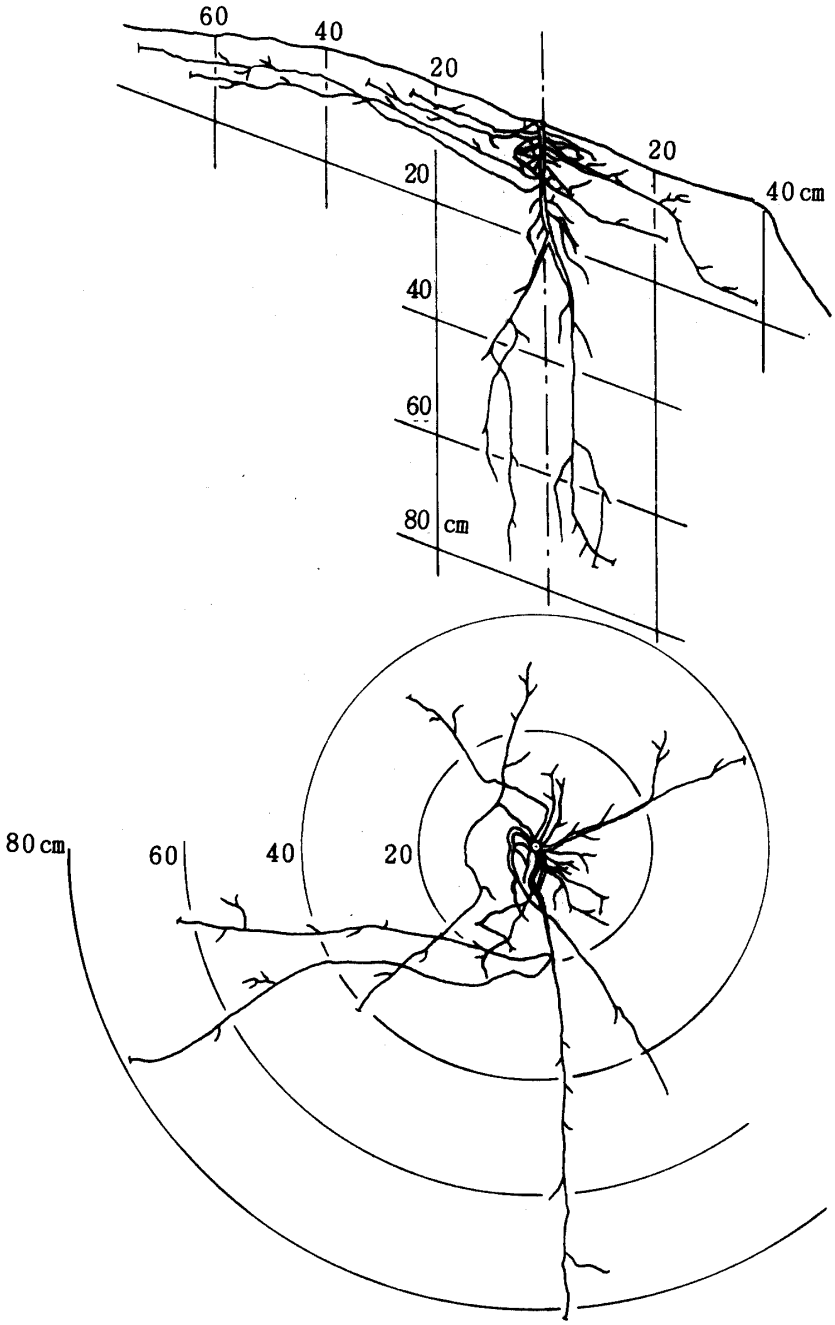

Fig. 2－8 Continued (No. 3) inferior tree by sowing.

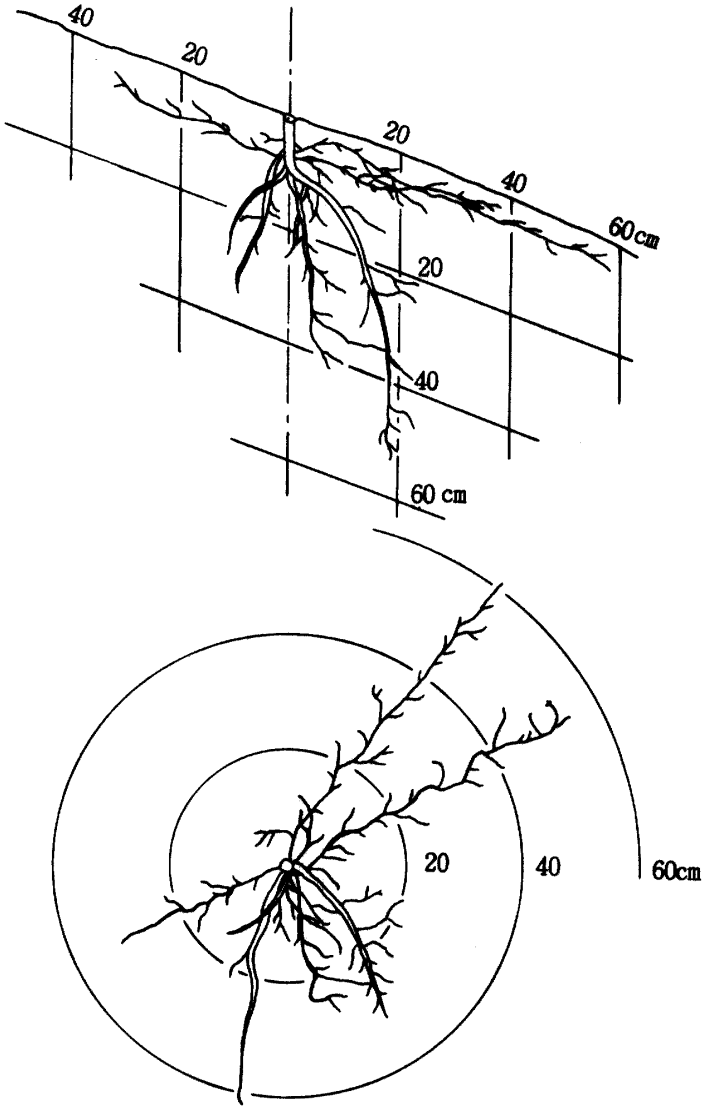

Fig. 2－9 Continued (No. 4) mean tree by planting pot seedlings.

近いほど分布量が大きかった。直径2mm以下の細根は，何れの標本木も比較的深部の80cm以上までもまんべんなく分布していた。2～10mmの小根の分布も比較的深部に達していた。10～20mmの中根は，地表40cm深の比較的浅い場所にみられた。同様に直径20mm以上の太根の分布は，最も地表に近い場所に集中して分布していた。

図2－6～9によると根系の分布は，明らかに水平根と垂直根に区分することができる。水平根は，地表から20cm深程度の範囲を，根株を中心に四方へ広がり，比較的細根が多く養分吸収根と考えられる。垂直根はほぼ根株の直下へ垂直に伸長し，直根を中心に根の分岐がみられるが，これは主として水分吸収根と考えられる。

じかまき林分（No. 1～3）と苗木植栽林分（No. 4）の標本木を図表によって比較すると，No. 4は他の標本木より根系の発達が悪かった。表2－10および表2－11の測定値によって，各標本木のT－R比を計算すると，No. 1が3.64，No. 2が3.24，No. 3が2.64，No. 4が4.18となる。No. 4は他に比べて根系重が

地上重に対して小さい結果を示していた。苗木植栽の場合，根系が切断されるため，再生発達がじかまき林と比べて，おくれるものと思われる（宮崎ら　1965）。

6 考　察

ここでは，研究材料として取り上げたリュウキュウマツの生長特性を知る必要から，造林技術に関連した事項についての実験調査をおこなった。これらの結果から考察すれば，つぎのとおりである。

1）リュウキュウマツ種子の発芽適温は20～25℃であった。これは，アカマツやクロマツの発芽適温と類似している（坂口　1959）。気候表（気象庁　1972）から，那覇における月平均気温が20℃以上を示す月は，4～11月の期間である。しかしながら，4月以降夏季にかけては，高温や土壌の乾燥に伴う水分不足による発芽低下が予想されるし，発芽間もない稚苗の環境への適応性も低いものと考えられる。また，冬季（1～2月）のじかまきは，低温および乾燥期に相当するため，造林成績の悪い結果が報告されている（山盛ら　1974 a）。リュウキュウマツの採種時期が10月（八重山地方）～11月（沖縄本島地方）であり，したがって，採取後可及的早い時期に，まきつけをおこなう必要がある。

2）リュウキュウマツのまきつけ当年の生長は，夏頃までよりも秋口以降の生長が盛んであった。この傾向は，八重倉ら（1962）がおこなった育苗試験における生育経過と類似している。発芽後6カ月頃までは，地上部および地下部ともに発育が十分でなく，乾燥害などの諸害を受け易いと推察される。したがって，早い時期にじかまきをおこない，肥培によって生長の促進を図り，充実した苗木に発育させる必要がある。八重倉ら（1962）および上地（1966）などの結果から類推して，夏季までに苗高10cm，直根長20cm程度の苗木の発育は可能であり，乾燥害回避からみたじかまき初年度夏季における苗木の発育の目標と考えたい。また，稚苗の発育経過からみて，施肥は細根の多い地下10cm以内におこない，育苗時における根切り作業は，細根の発生の多い夏季以降に実施すべきであるといえる。以上のように，発芽適温および稚苗の発育経過からみて，リュウキュウマツのじかまき造林のまきつけは，遅くとも12月初旬頃までおこなう必要がある。

3）マツ属の伸長型は，単節型と多節型があって，リュウキュウマツは単節型とされている。この調査結果では，リュウキュウマツは単節型と多節型の両型の伸長を示すことが分った。この異なる伸長型の発現は，環境による相違はなく，林齢によるものであった。マツ属のなかで多節型は，ソフトパイングループには全くみられず，ハードパイングループの間でもRadiatae節（Pinus Banksiana, P. contorta）のように，球果が未開のまま宿存性の晩生種に固有の性質となるといわれている(石井 1954)。両伸長型を併せもつことは，リュウキュウマツの特性であって，多節から単節への移行林齢は，おおよそ7～8年と推定されるが，なお多くの調査が必要と考えられる。また，宮崎ら（1965）によると，アカマツは4月中旬頃伸長を開始し，6月中にはその大半の生長を終えるとしている。リュウキュウマツは，1月初旬から伸長をはじめ6月頃まで伸長を続けるので，アカマツに比べて伸長期間が極めて長いといえる。リュウキュウマツの幼齢時における生長が著しいことは，多節型伸長をなすことおよび伸長期間の長いことによるものと考えられる。

4）リュウキュウマツ林分の現存量は，地形によって差が認められた。林分葉量は，蒸散量に関連して林分の水収支に影響を及ぼすが，逆の立場から考えれば，林分現存量は環境への適応による結果であり，したがって現存量の小さいほど，立地的に劣るものと考えられる。表2－13は各部器管の現存量割合を示したが，表によると6年生林分は15年生林分に比較して，枝および葉の割合が大きく，幹の割合が小さい。この結果は，佐藤（1973）のアカマツ林における現存量の増加と各部割合との関係で得たものと同様の傾向を示している。現存量調査では，根についての資料を欠くが，多くの場合T－R比はやや一定の値であるので，一般的傾向としては変わらないものと考えられる。表2－14は林分の地上

Table 2－13 Percentage of stems, branches and leaves in each plot.

Plot	Age of stand	stem (%)	Branch (%)	Leaf (%)	Total (%)	Total biomass (ton／ha)
78－1	6	62.4	13.1	24.6	100	33.5
78－2	6	54.0	17.2	28.8	100	39.3
79－1	15	83.5	7.0	9.5	100	100.7
79－2	15	82.8	9.0	8.0	100	228.7

Table 2－14 Percentage of dry matter and water contained in each plot

Plot	Age of stand	Dry matter (%)	Water contained (%)	Total (%)
78－1	6	38.5	61.5	100
78－2	6	39.8	60.2	100
79－1	15	49.0	51.0	100
79－2	15	47.2	52.8	100

部の乾物量と水分量の割合を示したが，表によるとおおよそ6年生林分で40：60，15年生林分で50：50となっていて，林齢の増加とともに乾物量の割合がふえている。一般に葉および枝は幹よりも含水率が高く，また，辺材は心材よりも含水率が高いといわれているので（上村 1971），本調査結果は一般的傾向を示すものと考えられる。

5）リュウキュウマツ林の根系の調査報告は従来皆無であった。ここでは閉鎖した4年生林分について調べたが，根系の垂直分布はほとんどが地表から80cm以内にあった。林齢の増加とともに，土壌深部への根系分布量は増加するものと考えられるが，劣悪な土壌条件および現実林の土壌断面調査結果から推定して，1m深以上の分布は極めて少ないことが予想される。したがって，林地土壌水分を考慮する場合，リュウキュウマツ林は土壌層が比較的浅い中腹以上に分布が多いので，地表から1m以内の水分を対象としても支障がないものと思われる。林分の根系分布は，幼齢時から林齢を追った調査資料の集積が必要と考えられる。

Ⅲ リュウキュウマツの水分特性

植物の生育には，水分は必要不可欠のものであって，植物生理の究明は主として水分生理の解明にあるといっても過言ではない。水分は生体の維持，溶質としての物質の輸送，葉温体温の調節などの機能のほか，光合成による物質生産にも欠かせない重要な要素である。ここでは，リュウキュウマツの個体としての水分特性，特に造林技術に関連した分野においての水分特性を知るため，苗木を材料として環境要素と蒸散量との関係や水ストレスを起こす環境条件の実験，現実林における蒸散量の測定などをおこなった。

1　苗木の蒸散係数

リュウキュウマツの蒸散係数についての測定報告はない。ここではリュウキュウマツのほかに，沖縄の主要造林樹種であるモクマオウ（*Casuarina equisetifolia*）およびセンダン（*Melia Azedarack*）の3樹種について，蒸散係数の測定をおこない，樹種間の違いについて比較検討した。

1）実験方法と材料

実験に用いた苗木は，何れも2年生実生苗で，各樹種とも5本宛である。用土は洪積世の赤色土と石灰岩砂を等量混合したもので，あらかじめ実験によって土壌の水分張力（pF）曲線を描いておいた。蒸散量の測定は重量法による。すなわち，土壌がpF 2.2附近まで乾燥した時に潅水することにし，土壌水をpF 0附近まで戻す。このとき排水があれば潅水量との差を給水量とする。また，土壌面からの水分蒸発を防ぐため透明なビニールシートで被覆した。以上の方法によって，給水量を苗木の蒸散量として推定した。苗木を植え付けた鉢はグリーンハウス内に置き，同一条件のもとに育てた。苗木は3月12日に植え付け，10月4日に掘り取り調査をおこなった。

2）実験結果

測定結果は表3－1に示してある。

Table 3－1 Transpiration coefficent of Ryukyu－matsu, Mokumao and Sendan

spp.	At the start of experiment		At the finish of experiment				
	Row weight (g)	Estimating dry weight (g)	Row weight (g)	Dry weight (g)	Increasing dry weight (g)	Consumption of water (g)	Tanspiration coefficent
Ryukyu－matsu (*Pinus luchuensis*)	11.00	4.02	26.324	9.306	5.286	1,655.6	313.1 ± 17.7
Mokumao (*Casuarina equisetifolia*)	2.08	0.96	9.474	4.402	3.402	815.4	239.2 ± 11.8
Sendan (*Melia Azedarch*)	25.52	10.00	45.268	18.028	8.028	3,228.8	399.5 ± 18.1

蒸散係数は要水量ともいわれ，植物がある生育期間に消費された水分の総量を，その期間内に増加した乾物量で除した値で表わされる。

実験結果によると，蒸散係数は樹種によって違いが認められた。3樹種中センダンが最も大きく約400を示し，ついでリュウキュウマツの313が大きく，モクマオウは最も小さく240の蒸散係数を示した。これらの結果，水利用の効率はモクマオウ，リュウキュウマツおよびセンダンの順であって，樹種間に大きな相違が認められた。

2　苗木の蒸散量およびNWP（針葉の水ポテンシャル：Needle water potential）の日変化

1）　材料と方法

2年生ポット苗木を用いて，重量法によって約5カ月間次のような水分処理をおこなった。乾処理：土壌の水分張力をpF 0－4.0のくり返し，潤処理：pF 0－3.0までのくり返し，湿処理：pF 0－2.0

までのくり返し。蒸散量の測定は切枝法によるが，苗木は枝数が少ないので，苗木の上部から当年生針葉1本を採取し，5分間の減量を測定した。NWPはPC(プレッシャーチャンバー）法によるが，蒸散量測定と同時におこなった。測定は各水分処理とも3ポット宛である。土壌水分条件を同一にするため，各ポットとも測定前夜にpF 0まで戻した。

2）実験結果

実験結果は図3－1に示した。

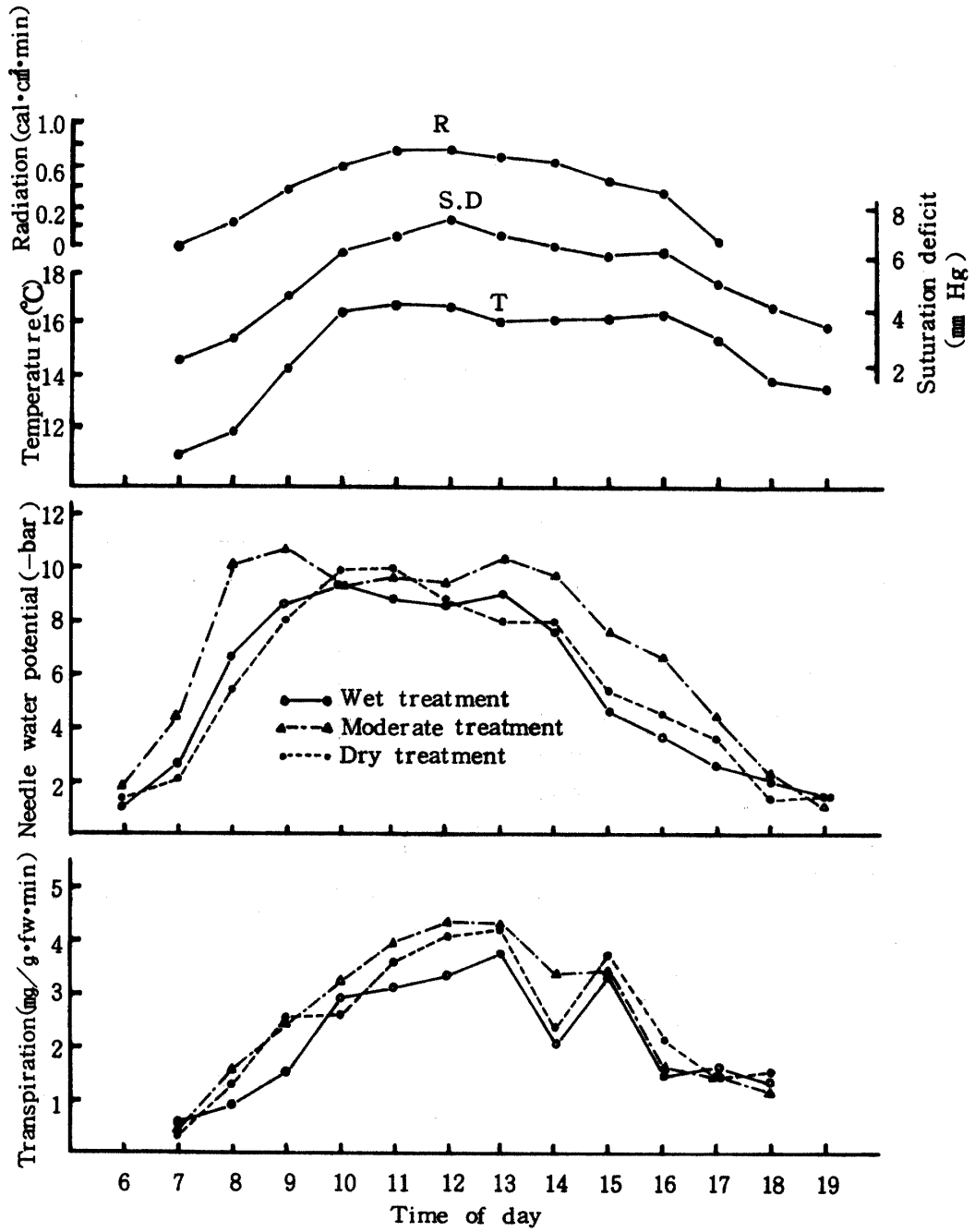

Fig. 3－1 Diurnal variation of transpiration and needle water polential of seedlings.

蒸散作用に直接関係の深い気温，飽差，放射は，経時的にほぼ同じ変化を示した。すなわち，明け方に低く，太陽の上昇とともに何れも次第に高くなり，12～14時に最高値となって，ついで日没に向けて次第に低下した。針葉の蒸散量およびNWPは，これら環境因子の変化に対して鋭敏な反応を示しながら増減した。すなわち，蒸散量は明け方に低く，12時に最高値となり，日没に向けて低下した。NWPは明け方に高く，12～14時に最低値を示し，その後日没に向けて漸増した。NWPは放射，気温および飽差の上昇とともに8～9時に急に低下したが，蒸散量はNWPほど急速な増加をしなかった。NWPが急に低下する傾向は乾処理で大きく，1時間当り最大－6バールにも達したが，潤および湿処理区では差はなく，1時間当り－3～－4バールであった。また，蒸散量は総体的に乾処理で大きかった。

3　水欠差のおこる環境条件

1）異なる水分条件下で育てた苗木の蒸散量およびNWPの日変化

(1)　材料および方法

2年生ポット苗木の土壌水分を，乾（pF 3.3～3.5），潤（pF 2.5～2.7），湿（pF 1.7～2.0）の3通りに区分して，約4カ月間水分管理をおこなった。土壌の水分測定は重量法によった。また，苗木の蒸散量およびNWPの測定は，Ⅲ－2と同じ方法によった。

(2)　実験結果

実験結果は図3－2に示した。図には環境側の要素として飽差の日変化を入れた。

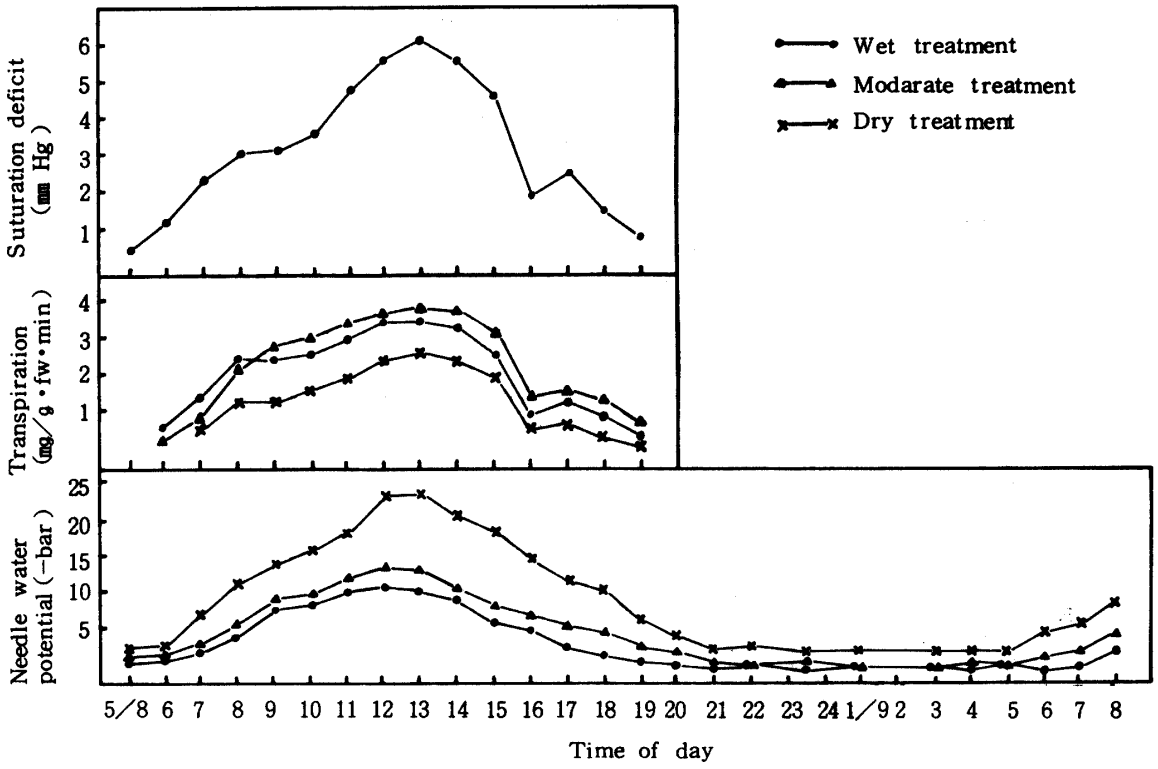

Fig. 3－2 Diurnal variation of needle water potential and transpiration of seedlings.

蒸散量およびNWPの日変化は，規制因子として働く飽差の日変化に追従して変化した。蒸散量を苗木の処理別で比較すると，乾処理は他の処理よりも常に小さかった。潤および湿処理間では，早朝の8時までは湿処理で大きいが9時以降では常に潤処理で大きく，全体的にみて蒸散量は潤，湿，乾の順に大きかった。また，潤および湿処理間の差は小さいが，潤および湿処理と乾処理間の差は大きかった。

苗木のNWPは，乾処理で常に他の処理区よりも低かった。NWPの経時的増減が乾処理では他に比べて急であった。苗木の潤処理および湿処理間では，大きな差はなくやや近似した値を示したが，常に湿処理でNWPは高かった。苗木のNWPは常に乾，潤，湿の処理の順に低いことを示した。また，蒸散がほとんど停止していると考えられる夜間でもNWPが測定され，各処理ともやや一定のNWPを示すが，乾処理で低く約－3.5バール，潤および湿で－1.0～－1.5バールであった。

2）土壌の乾燥に伴う苗木の蒸散量，NWPおよび含水率の変化

(1) 材料と方法

通常に育てたリュウキュウマツ2年生ポット苗木を，ある時期から給水を断ち自然乾燥させ，経時的に苗木の蒸散量，NWPおよび含水率の測定をおこなった。測定方法はⅢ－2と同一方法による。測定は晴天日の12～13時におこなった。

(2) 実験結果

実験結果は，図3－3に示したとおりである。

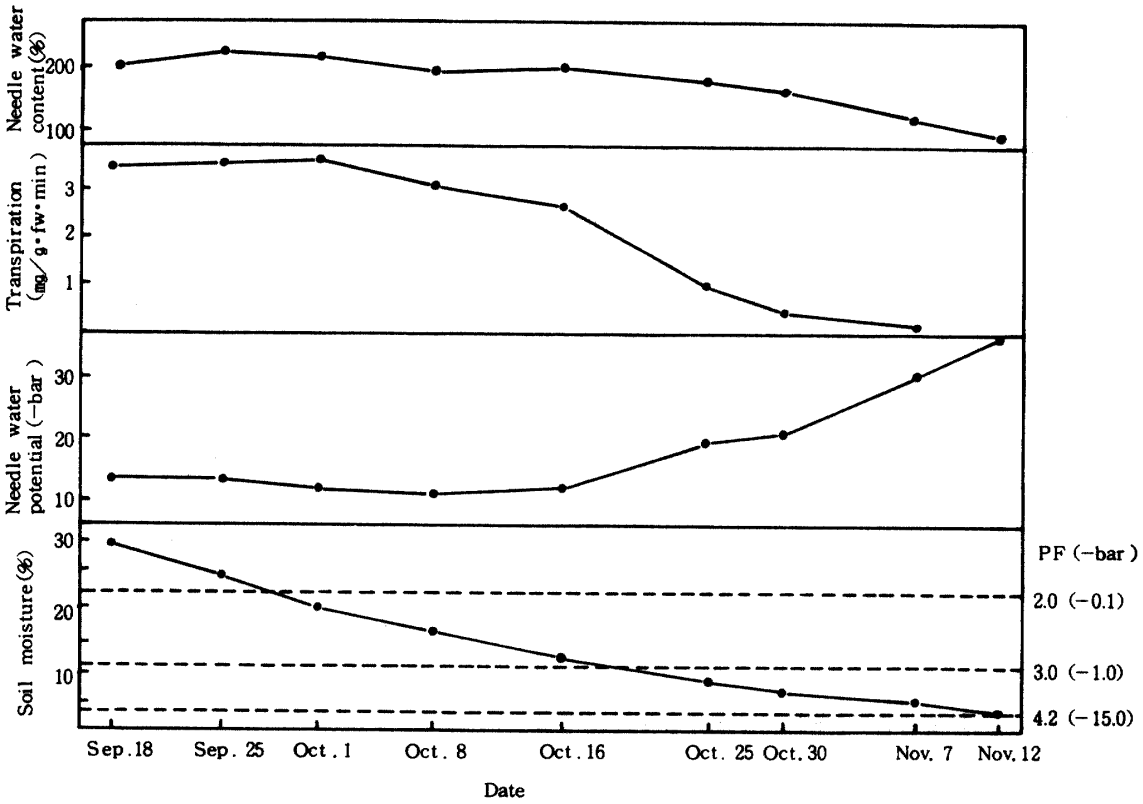

Fig. 3－3 Changes of needle water potential, transpiration and needle water content of seedlings with decreasing soil moisture.

土壌水分の減少に伴う苗木の水分関係は，NWPはpF 2.7（Soil Water Potential －0.5バール：10月16日）までは－10～－13バールの範囲にあって大きな変化はみられない。土壌水のpF 3.3（SWP－1.2バール：10月25日）以降は,土壌の乾燥に伴ってNWPも急減し，初期萎凋点pF 3.9（SWP－7.8バール）附近で－28バールを示し，永久萎凋点pF 4.2（SWP－15バール）附近で－36バールまで低下した。同様に蒸散量についてみると，土壌水のpF 2.7（SWP－0.5バール）までは単位葉重当り3mg内外にあって変化はないが，土壌がpF 3.3（SWP－1.2バール）以上に乾燥すると蒸散量は急減し，初期萎凋点pF 3.9（SWP－7.8バール）附近で蒸散量は0.2mgに低下した。一方針葉の含水率は，土壌水のpF 2.7（SWP－0.5バール）までは200％以上の値を維持するがpF 3.3(SWP－12バール）以上に乾燥すると200％以下となり，初期萎凋点pF 3.9（SWP－7.8バール）附近で135％，永久萎凋点pF 4.2（SWP－15バール）附近では107％まで低下した。これらNWP，蒸散量および針葉の含水率などの土壌の乾燥に伴う変化は，同じような傾向がみられた。

3）苗木の蒸散作用におよぼす風の影響

(1) 材料および方法

Ⅲ－2と同様に乾（土壌の水分張力pF 0～4.0のくり返し），潤（pF 0～3.0のくり返し），湿(pF 0～2.0のくり返し）に水分処理を施した2年生ポット苗木を用いた。実験は温室内に，四方をビニール板で囲んだトンネル型の簡易風洞を作り，換気扇を用いて風速を変化させた。風速は1m／sec.，2m／sec.，4m／sec.および8m／sec.の4通りとした。風速はビラム型風速計を用い，10分間の平均風速を測定した。蒸散量の測定はⅢ－2と同じ方法によって，風曝開始直前（0時），開始後1時間，2時間，3時間，5時間および7時間の各経過時におこなった。実験に用いたポットはそれぞれ3個宛である。

(2) 実験結果

実験によって得られた結果は図3－4に示した。図3－5は図3－4の結果を指数化して図示してある。

図3－4によると，1～2時間毎に測定した結果何れの風速の場合も風曝開始後1時間目に蒸散が最も促進され，その後は下降線をたどるが，3時間経過後からややゆるやかになって，蒸散量は漸減していることが認められた。各風曝別でみると，1時間経過時の蒸散量は，4m／sec.で最も大きく，ついで1m／sec.，2m／sec.，8m／sec.の順に小さくなった。

風曝開始前の蒸散量は，各風曝とも異なる値をとるので，実数での比較は困難である。そこで，風曝開始直前の蒸散量をそれぞれ100とした指数で算出した結果が図3－5である。

蒸散を最も促進させる風曝開始後1時間目で比較すると，風速4m／sec.で蒸散促進が最も大きく，風曝前の2.2～2.6倍を示し，ついで1m／sec.および2m／sec.は近似していて約2倍を示す。8m／sec.では1.3～1.4倍で最も低い。また，風曝開始前の蒸散量，すなわち指数が100以下になる風曝開始後の時間は，1m／sec.で5時間，2m／sec.で約6時間，4m／sec.で約5時間，8m／sec.で約2時間となっていて，特に風速の大きい8m／sec.で短かった。苗木の水分処理別の蒸散量および針葉の含水率は大きな差はなく，一定の傾向がみられなかった。

4　成木の蒸散量およびNWPの日変化と季節変化

1）調査方法

琉球大学与那演習林に設置した地形の異なるプロットにおいて調査をおこなった。調査地はⅡ－3（生長型と伸長型）と同一プロットであって，プロットⅡはプロットⅠに比較し地形的にすぐれていた（表2－3参照）。

測定は，晴天の日の夜明け前から日没後までの間に，1時間間隔でおこなった。蒸散量およびNWP

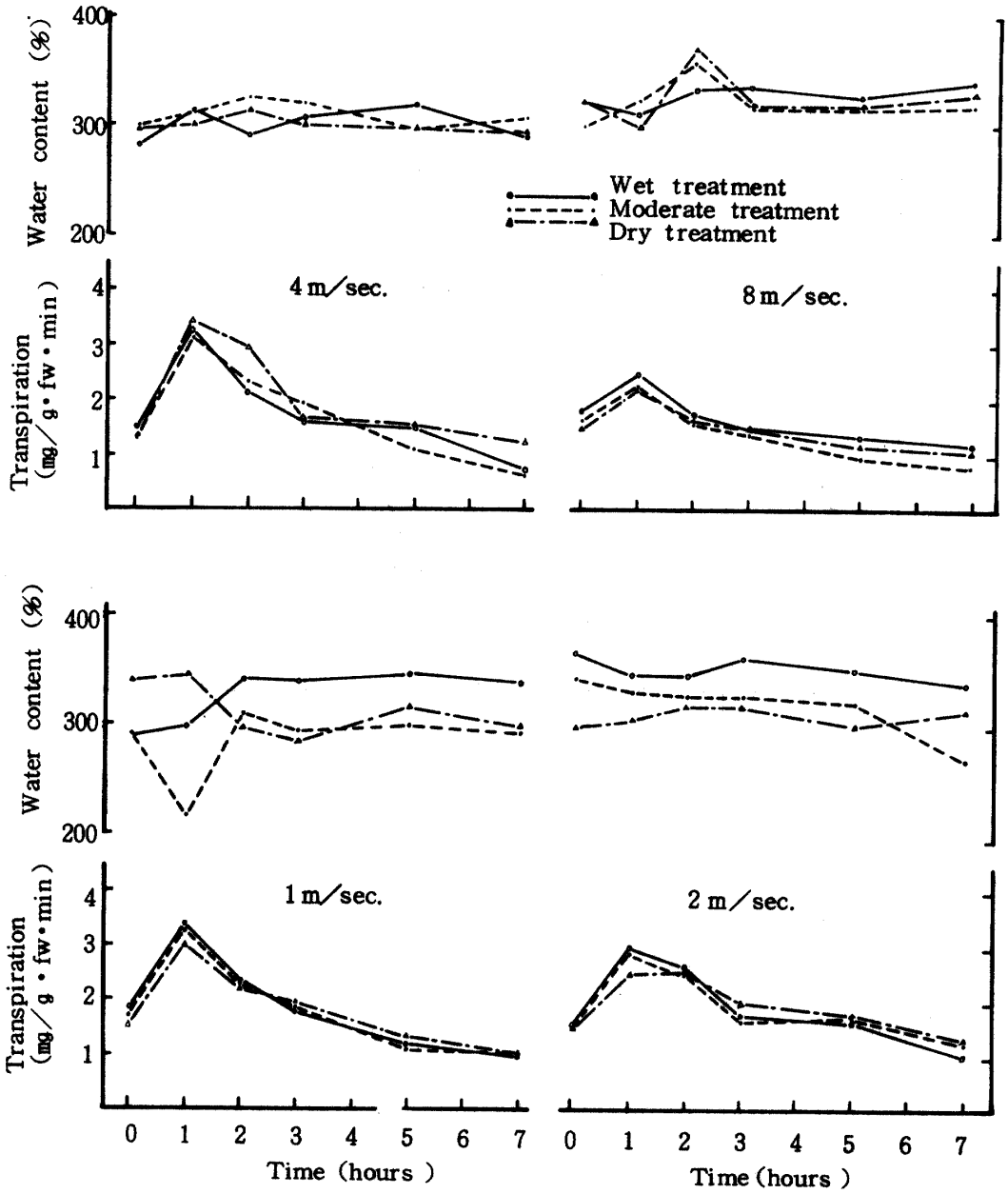

Fig. 3－4 Relation of wind velocity to transpiration and needle water content of seedlings.

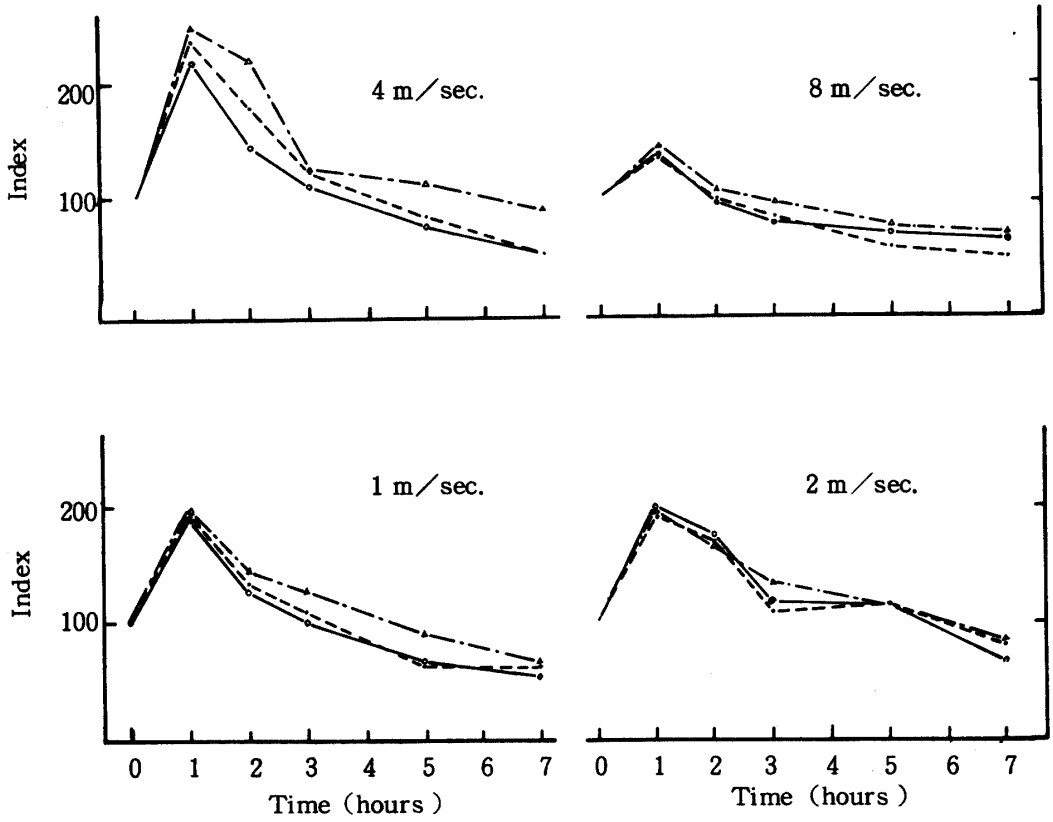

Fig. 3－5 Change to index on transpiration value of fig. 3－4.

の測定方法は次による。すなわち，蒸散量の測定は切枝法によるが，試料の採取は最上部から第2番目の輪枝（前年に出た輪枝）より出た新しい枝で，良く日の当っているものを用いた。測定は5,000mgトーションバランスを使用し，採取直後と5分経過後の重量を読み取り，その後直ちに針葉を取り去って枝部のみを採量し，全量から枝重を差し引いて葉重とした。さらに，枝より取り離した針葉は実験室に持ち帰り，常法によって乾重を測定し針葉の含水率の算出資料とした。

NWPは市販のプレッシャーチャンバーによって測定した。測定に用いた針葉は，蒸散量を測定した枝から取り，3回以上測定して誤差が1気圧以内のもの3本以上の平均値で示した。また，蒸散量およびNWPの同時測定はプロットIで行ない，プロットIIにおいてはNWPのみを測定した。その他の環境要素の測定を記すと，気温および飽差の測定にはアスマン通風乾湿計を，放射の測定はロビッチ型バイメタル式自記日射計をそれぞれ用いておこなった。調査時期は夏季の7月，秋の11月，早春の2月である。

2）調査結果

各時期に測定した結果を表3－2に示した。また，蒸散量およびNWPならびに環境要素として放射，気温および飽差の日変化は図3－6～8に示したとおりである。

図3－6～8によると，葉温に影響する放射，気温および飽差と蒸散量およびNWPとの関係は，一般的傾向が認められた。すなわち，放射，気温，飽差の変化に追従して蒸散量およびNWPは変化した。

表3－2によると，プロットIにおける蒸散量の値とNWPの絶対値は，比較的相関度が高いようにみえる。そこで，これらの値を利用して両者の関係を表わす回帰式と相関係数を求めると次のようにな

Table 3－2 Measurments of needle water potential and transpiration of adult Ryukyu－matsu trees

Time of day	July. 25, 1975			Nov. 21, 1975			Feb. 21, 1976		
	NWP		Tr.	NWP		Tr.	NWP		Tr.
	P－I	P－II	P－I	P－I	P－II	P－I	P－I	P－II	P－I
6	2.9	3.0	0.40	1.4	1.4	0.00	1.2	0.0	0.00
7	3.2	4.9	1.73	2.0	2.1	0.41	1.2	3.6	0.00
8	5.1	5.3	5.03	5.3	3.0	0.78	2.6	8.3	0.13
9	5.6	6.3	5.36	6.2	5.9	1.06	6.9	9.8	0.42
10	5.9	6.0	6.51	4.5	4.4	0.68	8.3	11.9	1.31
11	4.2	4.8	3.68	5.9	7.3	1.17	8.7	12.3	2.13
12	6.4	6.9	7.92	9.6	8.2	1.80	10.8	11.0	2.29
13	6.2	6.2	7.79	10.2	7.5	2.72	11.1	11.5	3.00
14	4.5	4.7	4.49	6.4	7.2	1.51	12.1	10.0	3.21
15	3.6	3.5	3.06	6.2	6.4	1.11	10.2	9.6	1.72
16	3.4	3.1	2.18	3.8	5.9	1.09	8.5	7.4	0.89
17	2.3	3.0	1.56	3.2	3.1	0.89	6.5	5.7	0.84
18	2.1	2.7	0.82	1.4	1.7	0.23	4.1	4.6	0.22
19	2.0	2.6	0.36				1.6	2.3	0.07
20	1.8	2.5	0.25						

NWP：Needle water potential（－ber）
Tr.　：Transpiration（mg／g.fw.min.）

った。

1975, 7, 25.　Tr ＝ 1.947 ＋ 0.587 NWP　r ＝ 0.977
1975, 11, 21.　Tr ＝ 1.303 ＋ 3.658 NWP　r ＝ 0.927　(1)
1975, 2, 21.　Tr ＝ 3.397 ＋ 2.985 NWP　r ＝ 0.907

Tr　：蒸散量
NWP：針葉の水ポテンシャルの絶対値
r　：相関係数

蒸散量とNWPの相関係数は0.902～0.977と高い値を示し，類似した環境下にあってはNWPから蒸散量の推定が可能と考えられる。図3－6～8におけるプロットIIの蒸散量は，これらの推定式を用いて算出した値である。森川ら（1976）も，樹幹部の樹液流速と木部圧ポテンシャルの日変化は，よく対応してその相関係数は0.98と高い値を示すことを明らかにしている。

図3－6～8の蒸散量の値から，区分求積法によって各時期の1日当りの蒸散量を推定すると図3－

9のとおりになった。

1日当りの蒸散量は時期別では7月に最も大きく約3,000 mg／g・dayを示し，ついで2月は約1,000 mg／g・day，11月は約800 mg／g・dayであった。

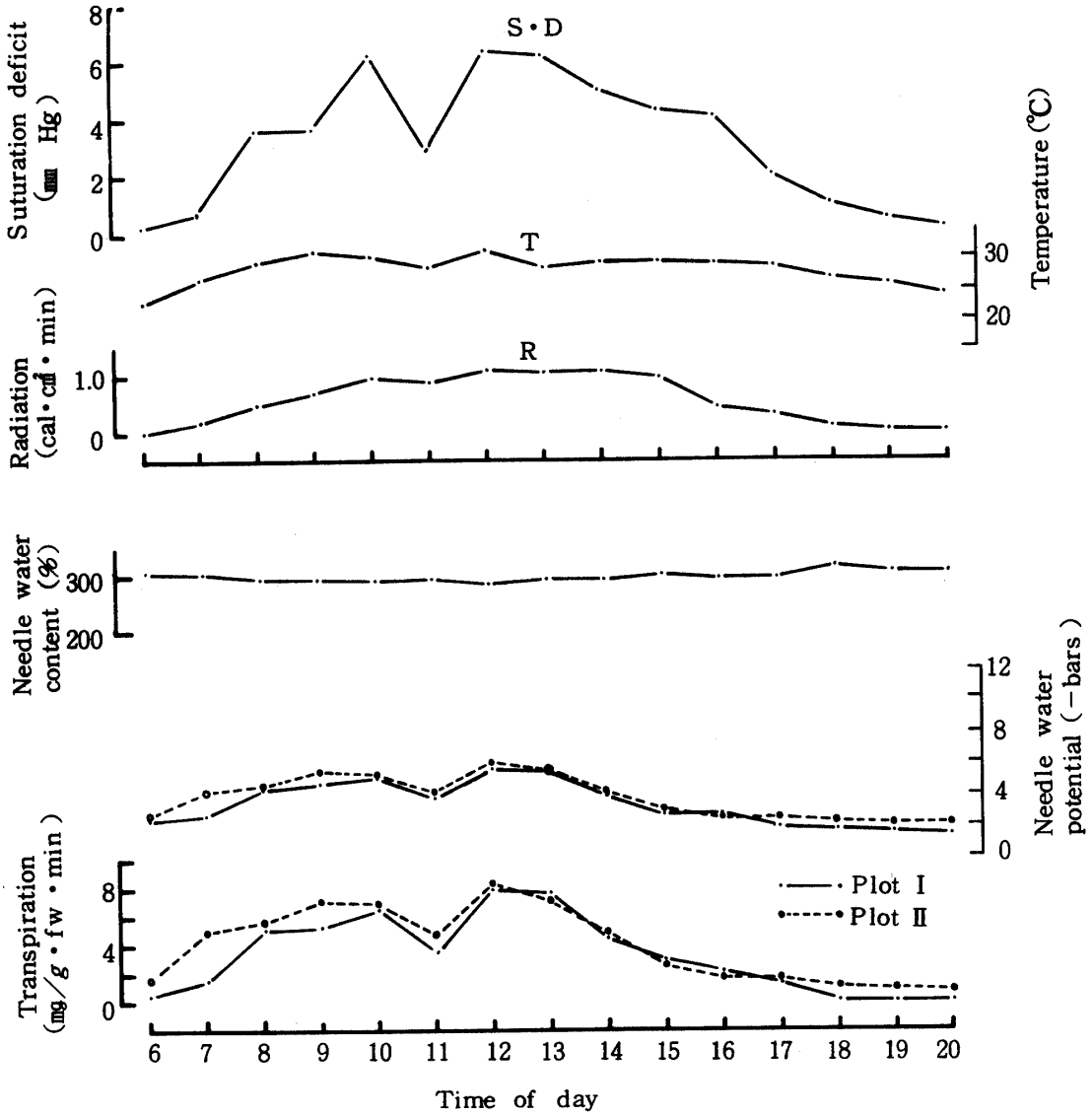

Fig. 3－6 Diurnal variation of needle water potential, transpiration and needle water content (July 25, 1975).

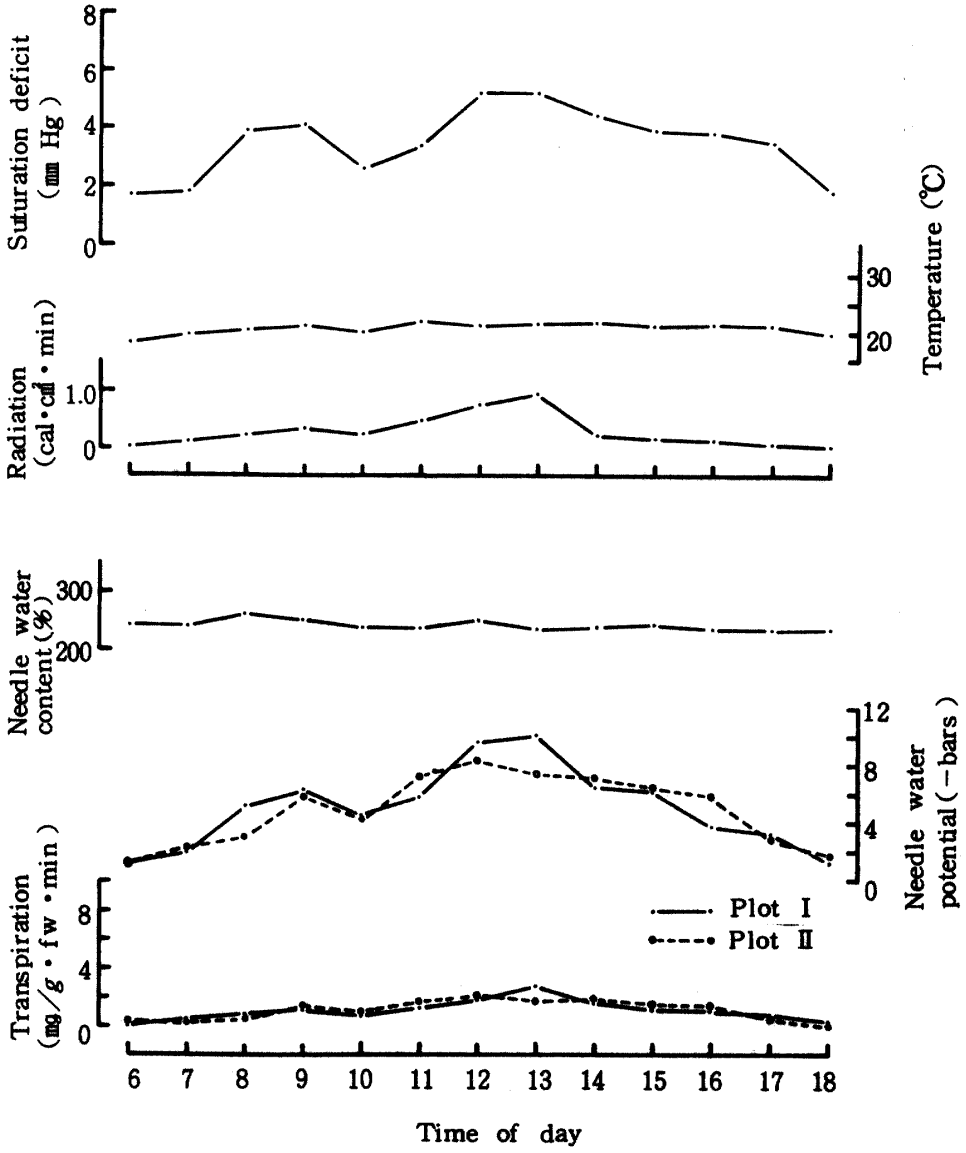

Fig. 3 − 7 Continued (Nov. 21, 1975).

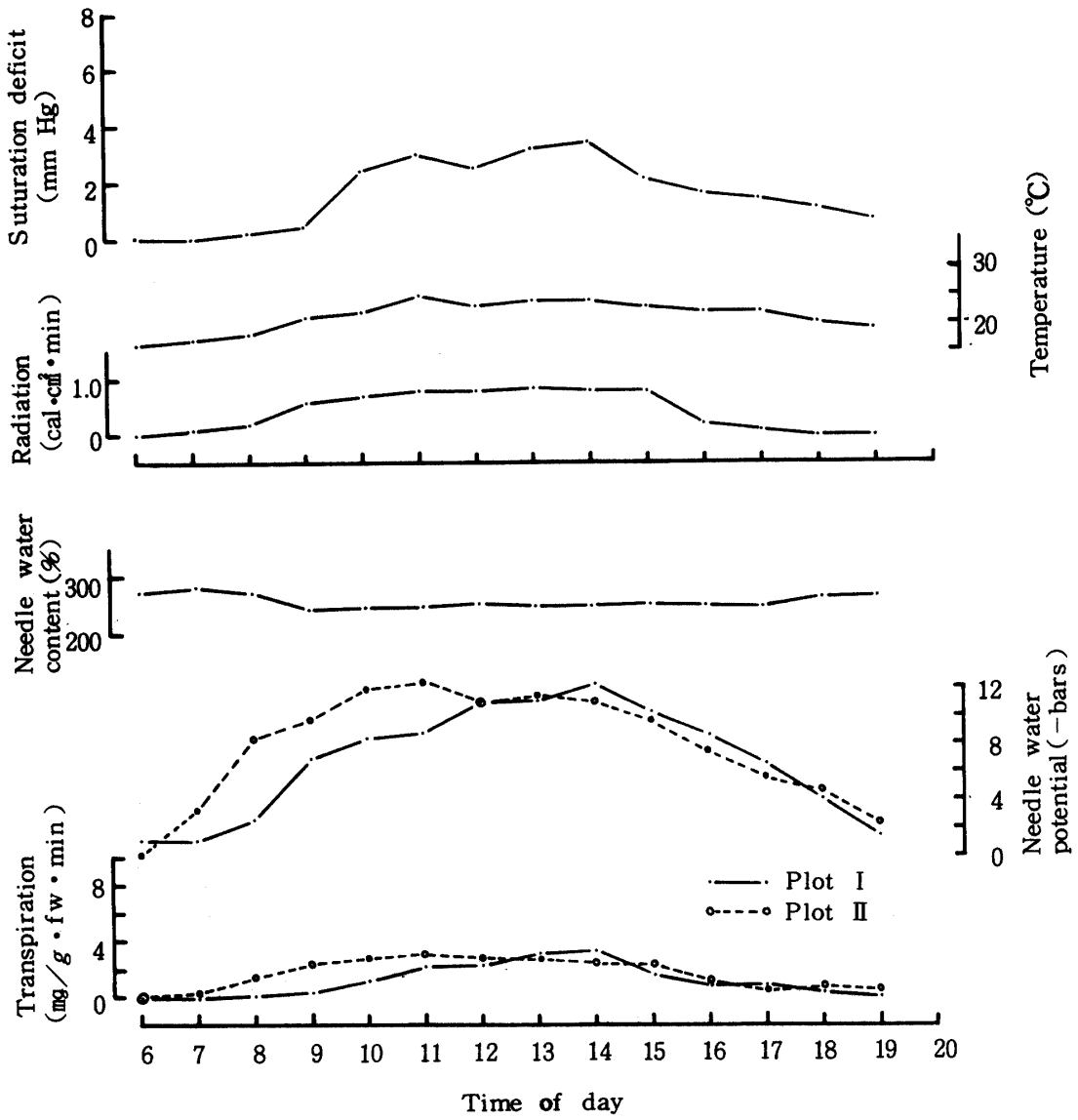

Fig. 3－8 Continued (Feb. 21, 1976).

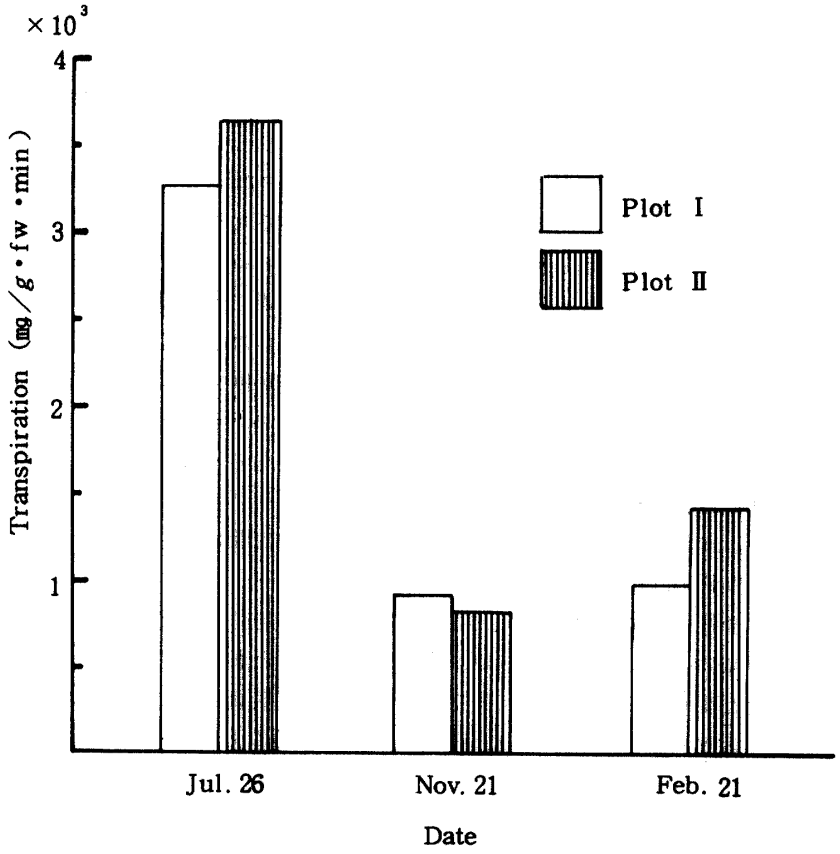

Fig. 3－9 Seasonal variation of transpiration in a day.

5 考 察

従来，リュウキュウマツに関する水分生理的研究はみるべきものがなかった。ここでは，造林技術に関連した分野におけるリュウキュウマツ個体ととしての水分特性を知る必要から，種々の実験をおこなった。

1）まず，蒸散係数は同一樹種であっても報告者によって異なった値がみられる（平田ら 1925～1932），香山 1942）。中村（1964）は，温度の違いによって蒸散係数の異なる結果をみている。本実験は同一条件のもとでおこなったので，樹種間の違いについて比較することには支障がない。実験に用いた樹種のなかで，センダンは湿潤地を適地とするが，モクマオウは海岸砂丘にもよく生長していて，比較的乾燥地に適応性をもつ樹種であって，これら樹種の水利用の特性の違いが，蒸散係数の違いとなってあらわれているものと考えられ，モクマオウの水利用効率がすぐれ，センダンはおとるといえる。リュウキュウマツは比較的適地が広く，海岸から山地まで分布しているが，蒸散係数はセンダンとモクマオウの中間の値を示していて，水利用効率は比較的低いものと考えられる。

2）苗木の蒸散量およびNWPの日変化において，蒸散量およびNWPは，放射，温度および飽差などの環境要素の変化に追従して変化した。NWPの急低下に対して蒸散量の増加におくれを生じたが，樹体内の水ポテンシャルに対する蒸散流のおくれは，森川ら（1976）も報告している。この現象を佐伯（1972）は，苗木での枝や幹に貯えられる水の量が少なく，蒸散が開始されると短時間に体内

の水が消費され，根からの吸水がおくれるためだとしている。苗木の処理間での蒸散量およびNWPの差は判然としなかった。田崎（1974）によると，ヒマワリやトウモロコシに水ストレスを与えた後解除すると，葉の水ポテンシャル，蒸散量および光合成の回復は，おだやかに与えた方がつよく与えたものより早かった。本実験の場合，持続的水ストレスを与えていないので，処理間の差が生じなかったものと思われる。

3）蒸散は放射，温度，飽差，風などの環境要素によって支配されることが多くの研究で認められている。一方，植物への水分を供給する側の土壌も，蒸散を規制する大きな要因となる。植物が根系より吸水して，葉の気孔から大気へ排出する水分移動は，水ポテンシャルの勾配にしたがう（佐伯 1972）。乾,潤および湿に水分処理した苗木のNWPの日変化は，常に乾処理で大きく，反面蒸散量の日変化は常に乾処理で小さかった。土壌水のポテンシャルは乾処理で低く，したがって，NWPを低くしてポテンシャル勾配を急にし吸水をはかるためと考えられる。また，蒸散が停止している夜間においても，NWPは乾処理で－3.5バール，潤および湿処理で－1.0～－1.5バールの値が測定されたが，このことは昼間の水分供給だけでは十分でなく，水不足が夜間にもちこされたものと考えられる。（森川　1974）によれば，同様に樹冠部の蒸散が停止しているにもかかわらず，ヒノキの樹冠部の蒸散流は夜間から翌朝にかけて記録された。本実験の場合も，昼間に生じた水欠差は夜間にも回復されず，樹体内に生じた水欠差の大きいほどNWPの回復がおくれるものと考えられる。

4）土壌水分が一定含量以下に減少すると，植物は水ストレスを生じて気孔閉鎖を起こし，蒸散量の低下や炭酸ガス交換の減少を通じて，生長への悪影響を及ぼすことが考えられる。佐藤（1956）は，土壌水分が野外容水量と萎凋点の間のある点まで減少すると，蒸散量が急減するとしている。図3－3によって検討すると，蒸散量およびNWPの急変点はpF 2.7～3.3（－0.5～－1.2バール）の間にあると考えられる。この値は大山（1970）のリュウキュウマツ苗木の実験ともよく一致する。土壌の細孔隙と粗孔隙の区分の境界がpF 2.7にあり，また，土壌毛管水の移動もpF 2.7を境界に変化するといわれている（真下　1960）。これらのことから考えて，リュウキュウマツ苗木の蒸散量やNWPは，土壌の水分張力pF 2.7（－0.5バール）を境界に急変しはじめるとみてよい。すなわち，土壌水分がpF 2.7（－0.5バール）以上に乾燥すると，苗木は水ストレスを生じ，気孔の開度へ影響し，蒸散の低下へつながるものと考えられる。土壌の乾燥に伴う針葉の水分関係は，正常生育時含水率237%，枯死点含水率107%，枯死点相対含水率45%，正常生育時蒸散量に対する萎凋点蒸散量の割合6%などであって，これらの値は佐藤（1956）の結果とほぼ一致する

5）風速と蒸散量に関する研究は多い。一般に風を当てると，蒸散面の水蒸気圧勾配を急にして一時的に蒸散が促進される。風を当てる時間が長い場合あるいは風が強い場合には，蒸散が増えその結果としての水欠差から気孔閉鎖を導き，逆に蒸散量は低下するといわれている（佐伯　1972）。本実験においても，各風曝区とも同様な結果が認められた。このような状態が続くと，茎葉の重量，葉の数，茎の伸長などに影響があり，したがって，乾物生産量に影響する（Satoo　1948 a, b　1951）。また，風は土壌の乾燥も促進させるので，一層の影響を受けることになる。沖縄は，冬季季節風が卓越するので，風による林木の生長への影響は，大きいものが予想される。

6）林分からの水分消失を知る上で，林分の蒸散量を測定する必要がある。林分の蒸散量の推定には，熱パルス法，熱収支法，切枝法などによって研究がおこなわれてきた。熱パルス法は，熱パルス速度のほかに木質部の密度，含水量，比熱などを知る必要があり，しかもこの3要素とも樹種や季節によって変化するもので困難を伴う。熱収支法は林地が多くの場合傾斜地であること，蒸発散面が極めて不整一であること，測定高が高いことなどのため，測定は理論的，測定技術的に困難が多いとされている（中野　1976）。

切枝法は，樹種により切り取り後の測定時間帯の異なることや樹冠の部位および方位による違いが考

えられる。本実験の場合，予備実験によって蒸散量に変化のない時間帯を確かめた。枝の採取位置は，平均樹冠高よりもやや上部にあり，したがって，蒸散量の推定は多少大きくなることが考えられる。しかしながら，本研究は林分の水分収支を目的とするものではなく，後述するように造林技術と関連した林分の水分損失要因において，林分蒸散量と他の損失要因との比較をしようとするもので，したがって，切枝法による蒸散量の推定で十分と考えられる。

本実験の結果は，苗木における実験と同様に林分内の成木も，葉温に影響する放射，気温および飽差の日変化に追従して，蒸散量およびNWPも変化することが確かめられた。また，一日当り蒸散量の季節変化は，気温が高く生長期の7月に最も大きく，気温が比較的低く生長休止期の11月に最も小きかった。最も気温の低い2月が11月より蒸散量の大きいことは，リュウキュウマツが，1月から生長期に入る特性があるためと考えられる。盛夏に蒸散量が大きいことは，地表面蒸発量も大きいことが予想され，したがって，林分全体の水分消失量の増大することが考えられる。プロット間で比較すると，7月および2月は立地的にすぐれているプロットⅡにおいて蒸散量が大きく，11月には逆の結果を示したが，ほとんど近似した値であった。環境の違いが，樹木の木部圧ポテンシャルや蒸散量に影響することはSucoffら（1974）やWamoltら（1973）によっても報告されている。

Ⅳ リュウキュウマツ林分の有効水分の特性

林分の乾燥害回避のための造林技術を考慮する場合，林分の水収支を試算する必要がある。林分の水収支は，林地に降った雨水を供給源とし，林分からの蒸発散や流出を損失源として計算される。したがって，これらの要因について測定する必要がある。また，水収支において，水不足を生じる時期における実際の林地土壌水分を測定して，林地の乾燥状態を確かめることも必要である。これらのことを調べるため，琉球大学与那演習林において，降水量，地表面流出量，地表面蒸散量，林分蒸散量，林地土壌水分の動態などについて，1976年に測定をおこなった。

1 水分の供給要因

林分の水分供給要因としての降水量は，与那演習林内の気象観測値を用いた。1976年および各年の降水量の月分布は，後述の表4－9，11，12，13のとおりであった。

2 水分の損失要因

1）地表面蒸発量

(1) 測定方法

与那演習林の気象観測所露場内に，林地土壌を入れたポリバケツ（上部径28cm，底部径22cm，深さ28cm)を2個埋め込み，毎日定時に重量測定をおこなった。林地土壌の容器への挿入は，自然状態が破壊されないように注意し，落葉層および植被も自然状態のままにした。蒸発量の計算は，降水量観測値とポリバケツの減量からおこない，同じ露場内に設置されている小型蒸発計で得られた水面蒸発量との関係について検討した。干ばつおよび降雨によって，明らかに異常な蒸発量を示した日は除いた。

(2) 測定結果

2個の容器による蒸発量の間には有意な差は見られず，したがって，両者とも同様な蒸発がおこなわれていたといえる。蒸発量の値は平均値を用いた。

測定期間における月別の一日当りの地表面蒸発量と蒸発計で得た水面蒸発量を表4－1で示した。また，推定式で得られた地表面蒸発量を同時に示してある。表4－1の水面蒸発量と地表面蒸発量との間には，次の関係式が得られ，両者には高い相関が認められた。

Table 4－1 Measured evapolation of the surface of water and land, and estimated evapolation of land surface by using thier relation, per day.

(mm)

Evaporation	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.
Surface of water	5.0	4.3	6.2	4.5	4.0	2.7
Surface of land	3.3	3.2	3.6	2.9	2.6	2.0
Estimated values of the surface of land	3.2	2.9	3.7	3.0	2.7	2.1

$$Es = 0.467\,Ew + 0.85 \qquad r = 0.9956 \qquad (2)$$

ここでEs は地表面蒸発量（mm／day），Ew は水面蒸発量（mm／day）。

式（2）を用いて各年の月別地表面蒸発量を求めると，表4－9，11，12，13のとおりになった。

2）地表面流出量

(1) 測定方法

与那演習林のリュウキュウマツ幼齢林内に簡易流出量測定装置を次の方法で設置した。傾斜20度の東斜面に2m×2mのトタン板による枠を設けた。トタン板は四方とも深さ約40cmを垂直に地中へ差し込んだ。傾斜の下方の枠の内側に雨樋を設置し，枠内の流出水を受け，フタ付のポリバケツに流出水を導入するようにした。また，雨量測定用には，林内に雨量計を置いた。測定は毎朝9時におこなった。

(2) 測定結果

測定期間中に得られた結果は表4－2のとおりである。表4－2の結果は降雨の状態が考慮されていない。本実験では時雨量測定の装置を欠くので，降雨の状態を知る目安として一日当りの降水量を取り上げ，降水量階別に流出率を求めた。降水量階別の流出率の結果は表4－3に示してある。

Table 4－2 The measuring values of the precipitation and water run－off on Ryukyu－matsu stand.

Investgative period	Jun. 11－30	Jul. 1－31	Aug. 1－31	Sep. 1－Oct. 3	Total
Rainfall days	16	17	8	8	49
Precipitation (mm)	331.80	323.10	105.90	273.70	1,034.50
Water run－off (mm)	7.72	13.97	1.68	2.82	26.19
Run－off rate (%)	2.33	4.32	1.59	1.03	2.53

Table 4－3 Water run－off and run－off rate on precipitation class per day.

Precipitation classes (mm)	10＞	10－20	20－50	50＜	Total
Rainfall days	24	12	8	5	49
Total Precipitation (mm)	111.10	169.70	279.00	474.70	1,034.50
Water run－off (mm)	1.23	3.02	6.54	15.40	26.19
Run－off rate(%)	1.11	1.73	2.34	3.24	2.53
Range of run－off rate(%)	0－1.69	0.2－3.22	0.31－4.20	1.00－9.05	

測定結果によると流出率は日降水量が小さいほど低く，50 mm／day 以上の場合においても平均3.2%で比較的低い流出率である。本実験では降雨強度との関係が知られていないので，さらに降雨強度と流出率との関係を調べるため，1976年7月17日台風7号接近時に時雨量と流出量の測定をおこなった。当日は夜明け前から終日断続的な降雨があり，降水量は午前9時までに12mm，午前9時以後149mm，を記録している。測定結果は表4－4に示したとおりである。この結果によると10mm／hr以上で流出率約5%を示し，流出率は比較的低いことがうかがわれる。

表4－3の結果から，各年における月別の地表面流出量を算出すると，表4－9，11，12，13 のとおりになった。

Table 4－4 The measuring valus of the precipitation and water run off in raining time (July 17, 1976).

Time of day	Total precititation (mm)	Rainfall intensity (mm／hr.)	Run－off (mm)	Run－off rate (%)
11：35－11：40	0.92	11.09	0.050	54.35
11：40－11：45	0.70	8.41	0.030	4.29
11：45－11：50	1.11	13.18	0.060	5.41
11：50－11：55	0.57	6.88	0.010	1.76
11：55－12：00	0.48	5.74	0.005	1.04
12：00－12：05	0.41	4.97	0.003	0.73

3）リュウキュウマツ林分の蒸散量

陸上生態系の水分収支における供給は降水が唯一のものであり，消費の大部分は森林からの蒸散だといわれている。森林からの蒸散量の測定は，直接的には不可能であって，蒸散を支配する気象因子による推定がおこなわれている。

中村（1964）は，スギ林の蒸散量（T，ℓ／kg day）と気温（t，℃）との相関から，次のような推定式を用いている。

$$T = -0.269 + 0.046t + 0.003t^2$$

城間（1977）は，パインアップルの蒸散量（E，mg／cm²／day）と気温（T，℃）および水平面日射量（R，ly／day）との関係から，推定式を次のように求めた。

$$E = \frac{10.9}{1 + 1{,}175{,}610e - 0.62T} + (0.00304T - 0.00284)R$$

以上のことは，植物からの蒸散は気温，日射量，飽差などの気象因子と密接な関係にあり，これらの環境因子を知ることによって，蒸散量の推定が可能なことを示している。

既述したように（Ⅲ－2），現地林分におけるリュウキュウマツの切枝の蒸散量は，放射量，気温，飽差と関係が深い。そこで，現地林分で測定された資料表4－5により，蒸散量と平均気温および積算放射量の関係式を求めると次のようになった。

$$Tr = 89.55 + 0.16t \cdot r \qquad (3)$$

ここでTrは蒸散量（mg／g・day），tは平均気温（℃），rは積算放射量（cal／cm²・day）。回帰式の分散分析表は表4－6に示してある。

Table 4－5 Seasonal values of transpiration, air temperature and radiation

Investigated date	Jul. 25	Sep. 8	Oct. 12	Nov. 21	Jur. 17	Feb. 21
Tr.	3,068.4	1,961.5	765.9	806.4	1,704.0	963.0
t.	31.9	26.5	20.8	20.8	14.4	20.5
r.	511.8	475.2	419.4	195.6	385.2	351.0

Tr. : Transpiration (mg／g. fw. day)
t. : Mean air temperature (℃)
r. : Radiation (cal／cm². day)

Table 4－6 Analysis of variance

Source	SS	DF	MS	F
Regression	2,729,049.90	1	2,729,049.90	8.511*
Error	1,282,585.92	4	320,646.48	
Total	4,011,635.82	5		

*Significant at 5% level

林分の蒸散量は，平均気温および積算放射量と着葉量の函数として推定することができる。したがって，これらの因子と知る必要がある。平均気温は与那における気象観測値を，平均積算放射量は城間（1975a）の那覇における日射量を，着葉量は与那にやける15年生および6年生林分の現存量調査による実測結果（表2－8）をそれぞれ用いて計算する。なお，蒸散量は計算に便利な単位mm／monthに書きかえてある。推定式によって算出された1976年におけるプロット別，月別の蒸散量を示すと表4－7のとおりになった。

Table 4－7 Estimated values of transpiration (1976)

Plot	78－1	78－2	79－1	79－2
Jun.	16.6	20.7	18.4	37.0
Feb.	18.1	22.5	20.9	40.2
Mar.	26.4	32.9	30.7	58.8
Apr.	33.7	41.9	39.2	75.1
May	40.2	50.1	46.8	89.6
Jun.	47.2	58.7	54.8	104.9
Jul.	63.9	79.6	74.4	142.3
Aug.	58.4	72.7	67.9	130.1
Sep.	50.8	63.2	59.0	113.0
Oct.	34.4	42.8	39.9	76.6
Nov.	23.6	29.4	27.5	52.6
Dec.	17.3	21.6	20.1	38.5
Year	430.6	536.1	499.6	958.7

各プロットの推定蒸散量は，それぞれ異なる値を示すが，これは各プロットの着葉量から生じた違いである。最も着葉量の多い79－2プロットで年間約960mm，また，最も着葉量の少ない78－1プロットで同様に約430mmの蒸散量を示した。

4）根系分布域の土壌水分動態

(1) 測定方法

与那演習林のリュウキュウマツ林分の各プロットの代表的地点を選定し，水銀マノメーター付テンショメーターを埋設した。埋設した深さは地表より10cm，35cm，60cmである。土壌水分は，水銀柱の高さから，あらかじめ描いておいたpF－水分曲線により算出した。水銀柱の観測は毎週土曜日の9～10時におこなった。観測期間は1976年1月～12月の1年間である。

(2) 測定結果

図4－1は，各プロットにおける年間のpF価の動態を示したものである。土壌の水分状態は，大部分がテンショメーターの作動範囲内（pF 0～2.9）にあったが，干天が続くと水切れ状態になることもしばしばあった。

pF価の動きは一部不明の場合もあるが，大部分は明らかに降水量との関係が深い。全般的にみると，4月下旬から5月上旬にかけて降水量が少なく，したがって，pF価が上昇している。同様に5月中～下

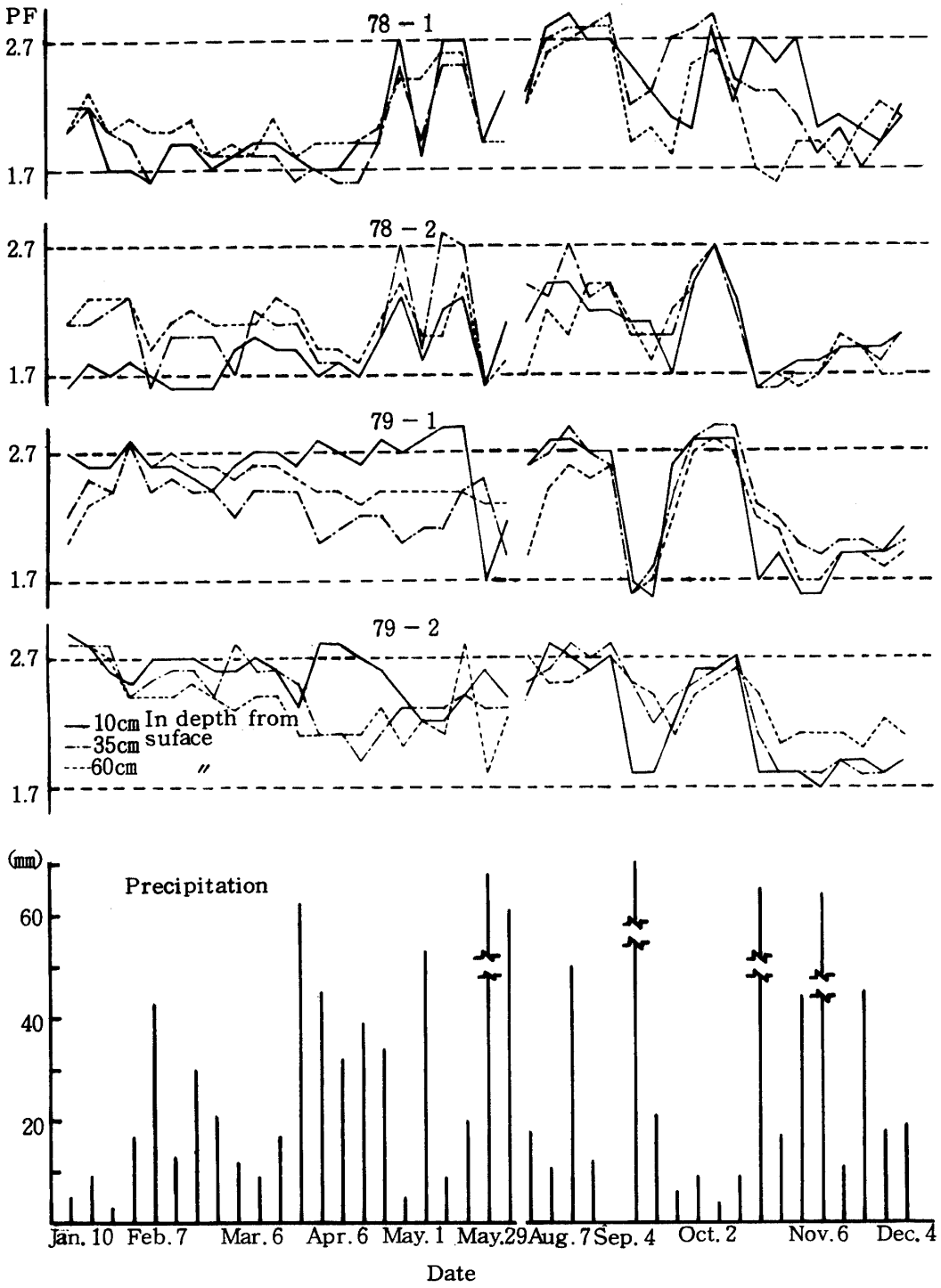

Fig. 4 − 1 Correlation between variance pF value and rainfall in each plot (Jur. − Dec. 1976).

旬，8月上〜中旬および8月末から9月上旬，9月下旬から10月中旬のそれぞれの時期も降水量が少ないためpF価の上昇がみられた。このように，pF価は降水量と密接な関係にあるが，資料を詳細に検討すると，降水によるpF価の変化は，観測前日の降水量5㎜以下ではほとんどみられず，10㎜以上で多少変化を示し，20㎜以上では明瞭な変化がみられた。また，pF価の下降後，無降水の干天日が5日以上続くとおおむねpF価の上昇がみられた。降水および干天に対する変化は，地表に近い箇所ほど鋭敏であった。pF価の範囲は全般的には1.7前後から2.9の間にあるが，水切れ状態の場合は，2.9以上になっているものと考えられる。

測定期間における土壌深度別の各プロットのpF価出現頻度を表4－8に示した。

Table 4－8 Percentage of pF－value in each depth from land surface, etstimated by using Fig. 4－1.

pF	Depth	78－1	78－2	79－1	79－2
2.7－	10	16.9	1.9	33.9	25.4
	35	11.9	6.8	10.2	13.6
	60	5.1	1.7	8.5	8.5
2.5－2.7	10	11.9	0.0	16.9	13.6
	35	6.8	1.7	10.2	18.6
	60	15.3	1.7	16.9	11.9
2.0－2.5	10	27.1	35.8	23.7	27.1
	35	25.4	40.7	55.9	40.7
	60	45.7	45.8	44.1	67.8
1.7－2.0	10	42.4	35.8	15.3	33.9
	35	45.7	27.1	16.9	27.1
	60	27.1	30.5	23.7	11.9
－1.7	10	1.7	26.5	10.2	0.0
	35	10.2	23.7	6.8	0.0
	60	6.8	20.3	6.8	0.0

土壌深度別のpF価の最多出現頻度は，表4－8に示されたとおり79－1プロットの10cm深を除いてはほとんどpFに1.7〜2.5の間にあって，全般的には比較的湿潤状態を保っているといえる。湿った状態と考えられるpF 1.7以下の出現頻度は，78－2プロットで全観測の20〜27％を示し，他のプロットに比較して多い。現地観察によれば，78－2プロットのテンショメーター設置箇所は，微地形的に排水条件が悪いようで，その結果の表われと思われる。

林分の生育に影響を及ぼすと考えられるpF 2.7以上の乾燥状態についてみると，何れのプロットおよび土壌深度においても出現がみられる。特に，79－1および79－2プロットにおいて高く，78－2プロットにおいて低い。また，78－2プロットを除いて何れのプロットにおいても，地表面に近い箇所ほどpF 2.7以上の出現頻度が高い。土壌水分の減少は，重力による水分の移動を除いておもなものは，地表面からの蒸発と植生の根系からの吸水である。また，根系の分布は比較的地表面に近い箇所に多い。したがって，土壌の水分減少は地表面に近い箇所ほど早いものと考えられる。

表4－8によりpF 2.7以上の出現頻度をみると，79－1プロット10cm深で最も高く34％を示し，観測期間中の3分の1は比較的乾燥状態にあることが認められる。79－2および78－1プロットにおいてもpF 2.7以上の頻度は比較的高く，それぞれ25％および17％を示している。

3　リュウキュウマツ林分の有効水分の収支

森林の水収支は，降水を収入とし，流出や蒸発散を支出として計算されるが，地中における貯留（土壌中保留および地下水）も考慮されねばならない。しかしながら，この研究は，厳密な意味の水収支を明らかにする目的でおこなわれるものではなく，ここでは林木の乾燥害回避において造林技術と関連した水収支，すなわち，有効水分の収支について検討する。したがって，有効水分の収支は，供給要因を降水量とし，損失要因として地表面蒸発量，降水時の地表面流出量および林分からの蒸散量を取りあげた。有効水分の収支は次式によって推定できる。

$$\pm W = P - (E + R + T) \qquad (4)$$

ここで，Pは降水量，Eは地表面蒸発量，Rは地表面流出量，Tは林分蒸散量，±Wは水分過不足量である。この式で右辺の各項は，実験的測定値がすでに示され，左辺は計算によって過剰量（＋）あるいは不足量（－）としてさらわされる。各要因の推定は，降水量は与那演習林の観測値を用い，地表面の蒸発量は，森林の状態によって異なるといわれているが（松原ら（1957），ここではすでに述べたように，水面蒸散量からの推定値を用いる。降雨時の地表面流出量は降水量と流出率との関係を示してあり，各月の降水量階分布から計算される。リュウキュウマツ林分の蒸散量は，月平均気温と平均積算放射量による推定式が求められ，さらに，林分着葉量の関係から推定される。このようにして計算された1976年におけるリュウキュウマツ林分の有効水分の収支は，表4－9のようになった。

表4－9によると，与那演習林において，各要因測定を実施した1967年における水分の過不足量は，供給源の降水量が損失源である林分蒸散量，地表面蒸発量および流出量の合計値より少ない1月，4月および8月には負の値となった。また，これらの月以外は，損失量よりも供給量が大きいため，水分は過剰であった。

一方，以上のように算出された水分収支のなかで，水分不足の生ずる各月の現実の林分土壌水分量から，土壌の水湿状態の実態を検討してみる必要がある。

図4－1（根系分布域の土壌水分動態）に示されたテンショメーターによる土壌水分の経時的変化から，各月別深度別の土壌水分量を計算すると表4－10のようになった。ここで，土壌水分は地表面から1m以内に含まれる水分量とし，水分量の算出は土壌深度0～20cm，20～40cm，40～100cmの代表値としてそれぞれ10cm，35cm，60cmのテンショメーターのpF価の月平均値を求め，pF価に対応する含水率から計算した。表示はmmに換算してある。

表4－10によると，リュウキュウマツの生育への影響を及ぼす土壌水分条件であるpF 2.7以上に土壌が乾燥する月および土層は，78－1プロットでは8月が全層，79－1プロットでは0～20cm深で1，4，8月の各月，20～40cm深で8月，79－2プロットでは1月は全層，2月および4月は0～20cmの表層，8月は0～20および20～40cmの各層であった。

表4－9で示された水分消費量が供給量を超過する月は1月，4月および8月の各月であった。これらの月は表4－10に示された土壌水分がpF 2.7以上に乾燥する月とよく対応している。しかしながら，降水量が水分消失量より少ない月，すなわち，水分不足が考えられる月の1月，4月，8月の土壌水分量は水分不足量分の減少を示していない。このことは，土壌水分算出の基礎になった土壌体（地表から1mの深さ）以外からの補給があったものと考えられる。同様に降水量が水分消失量を超過する他の月においても，土壌水分は余剰分の増加はみられず，よって土壌体外へ排出されたものと考えられる。

日下部（1954）は，土壌水分の変化をあらわす方法として，土壌体への水平面および垂直面から

Table 4－9 Available water balance on Ryuku－matsu stands in investgated year (1976)

Month		Jur.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Annual
Precipitation (mm)		34	115	139	112	323	322	384	89	325	163	212	104	2322
Evaporation (mm)		52	58	66	81	93	95	88	116	90	85	64	60	948
Run－off (mm)		0	2	3	2	7	7	9	2	8	4	4	2	50
Tramspi－ration (mm)	78－1	17	18	26	34	40	47	64	58	51	34	24	17	430
	78－2	21	23	33	42	50	59	80	73	63	43	29	22	538
	79－1	18	21	31	39	47	47	74	68	59	40	28	20	500
	79－2	37	40	59	75	90	105	142	130	113	77	53	39	960
Total water loss (mm)	78－1	69	78	95	117	140	149	161	176	149	123	92	79	1428
	78－2	73	83	102	125	150	161	177	191	161	132	97	84	1536
	79－1	70	81	100	122	147	157	171	186	157	129	96	82	1498
	79－2	89	100	128	158	190	207	239	248	211	166	121	101	1958
Deficiency and excess of water (mm)	78－1	－35	37	44	－ 5	177	168	156	－ 87	168	40	120	25	935
	78－2	－39	32	37	－13	173	161	158	－102	163	31	115	20	－127 890
	79－1	－36	34	39	－10	165	155	141	－ 97	155	34	116	22	－127 861
	79－2	－55	15	11	－46	133	115	150	－159	114	－ 3	91	3	－143 632 －263

Table 4 − 10 Soil water content (mm) in each plot, estimated by using Fig. 4 − 1.

Month	Precipitation (mm)	78 − 1 Depth (cm)				78 − 2 Depth (cm)				79 − 1 Depth (cm)				79 − 2 Depth (cm)			
		0−20	20−40	40−100	Total	0−20	20−40	40−100	Total	0−20	20−40	40−100	Total	0−20	20−40	40−100	Total
Jur.	34	62	57	168	287	71	63	176	310	44	50	173	267	51	59	189	299
Feb.	115	64	59	169	292	71	66	182	319	47	51	157	255	51	61	197	309
Mar.	139	63	59	166	288	68	65	179	312	45	51	164	260	52	60	200	312
Apr.	112	61	60	184	305	70	67	187	324	44	52	168	264	50	68	205	323
May	323	59	54	167	280	67	63	181	311	46	55	172	273	53	64	204	321
Jun.	322	60	59	178	297	69	69	192	330	48	54	178	280	54	63	207	324
Jul.	384	60	57	179	296	67	67	191	325	50	54	182	286	57	65	207	329
Aug.	89	53	50	162	265	65	59	176	300	43	46	171	260	51	59	192	302
Sep.	325	60	52	178	290	67	63	181	311	53	53	185	291	57	63	199	319
Oct.	163	55	54	177	286	66	64	182	312	51	47	167	265	55	64	198	317
Nov.	212	60	58	188	306	71	68	192	331	58	54	186	298	61	70	207	338
Dec.	104	59	56	173	288	70	63	186	319	58	53	185	296	59	68	204	331

Underline showed the soil dried avobe pF 2.7

の水分移動量を加味した考え方を示している。丸山（1962）は，水収支の計算に土壌中の水分蓄積量の変化を入れて計算したが，1mまでの土壌水分蓄積量を一定とし100mm値をとっている。森林の蒸散量は比較的大きく，季節によっては100mmをこえる場合が多く，土壌水分蓄積量を100mmと仮定することは過小と思われる。森林地帯の場合は，土壌貯水量を300mmとした改良式が実状によく合うといわれている（吉良　1976）。また，林地は地形的に傾斜面に立地する場合がほとんどで，降雨時における斜面流出量も無視できない。本研究では，水分供給と損失の差を水分の過不足と考え，水分の月収支における消失量が供給量を超過する月の実際の林地土壌水分量は，リュウキュウマツが水ストレスを起こし，生育への障害となる水分条件（土壌水pF 2.7 以上）に達していることを確かめた。すなわち，水分の供給と消失の差が負の値を取る月を危険期と考えた。

以上のような考え方で，与那における過去20年間の統計から，最多雨年（1959），最少雨年（1963）および平年のリュウキュウマツ林の有効水分の収支をそれぞれ求めた。水分収支に必要な各要因は，それぞれの年あるいは20年の平均値を取り入れてある。各プロットの着葉量は，1976年に実測された値を採用した。各年の有効水分の収支計算表は表4－11～13のとおりである。

これらの表によると，与那における最多雨年の1959年は，7月に150mmの降水量があるにもかかわらず，水分消失量が大きく林地土壌の乾燥が予想される。また，このほかに着葉量の大きい79－2プロットでは3月，5月，12月にも同様なことが推定される。最少雨年の1963年では，1月から7月にかけて水分消失量が降水量を超過していて，土壌水分の不足が予想され林分成長への著しい影響のあったことが推察できる。平年では水分供給量は消失量よりも多い。

このように，林地における水分の供給と消失のバランスをみると，多雨年においても降水量の分布によっては，消失量が供給量を超過して土壌水分の不足することが推察される。これらの現象は，冬季～春季にかけては降水量の少ない月にみられ，また，蒸散量の大きい夏季においては頻繁に土壌水分の不足をきたすことが予想される。

4 考　察

リュウキュウマツ林分の水分収支における各要因は，造林技術および施業技術と関連した事項について取りあげた。すなわち，供給要因としては降水量を，損失要因としては地表面蒸発量，地表面流出量および林分蒸散量を実験的に求め，それぞれ推定した。

1）供給要因は気象観測値による降水量を用いた。林内の降水量は林外のそれとは若干異なり．樹幹流下量と樹冠遮断量を考慮する必要がある。このなかで，樹幹流下量は林地内に到達するので水分収入となるが，樹冠遮断量は林地内に到達しない。リュウキュウマツ林分における土壌水分の動きは，テンショメーターによる測定では20mm以上の降水量に対して明瞭であった。中野（1977）によると，降水量の樹冠遮断率は一降雨ごとの降水量の多少によって異なり，降水量が大きくなるにつれて樹冠遮断率は低くなるとしていて，林外－降雨階15～20mmの場合17％であった。沖縄における降水量は，大半が梅雨期および台風によるものであり，したがって，一降雨ごとの降水量は比較的大きくなる。中野の資料によると，岩手県地方のアカマツ林の場合，林外一降雨階20mm以上の降水量が全降水量に占める割合は約40％と計算されるが，沖縄の場合同様に約60％となっている（与那　1976）。したがって，樹冠遮断量は沖縄では比較的少ないものと思われる。本研究では，水分収入は気象観測値を用いたので，実際の林内水分収入よりは多少大きいと考えられ，現実の林地土壌はより一層の乾燥が予想される。

2）地表面からの水分蒸発量の測定には，種々の方法が試みられている。Kittredge（1948）は飽水状態の土壌からの蒸発量は，自由水面からの蒸発量の13％，岩切（1968）は裸地において同様に80％としている。本実験結果によると同様に67％であった。地表面の蒸発散の報告のなかで，丸山（1962）は，千葉県柏市において年間で987mm，日下部（1956）は福岡県において平年で781

Table 4－11 Available water balance on Ryuku－matus stands in rainy year (1959)

Month		Jur.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Annual
Precipitation (mm)		120	217	111	544	129	280	150	216	201	964	319	86	3,387
Evaporation (mm)		64	48	61	56	71	62	98	74	81	54	66	57	792
Run－off (mm)		3	4	2	14	3	6	4	4	5	25	10	2	82
Tramspi－ration (mm)	78－1	13	19	26	32	40	47	64	57	49	33	23	17	420
	78－2	16	24	33	40	49	58	80	71	61	41	29	20	522
	79－1	15	23	30	37	46	54	75	67	57	38	27	19	488
	79－2	29	43	58	71	88	104	143	128	108	73	52	37	934
Total water loss (mm)	78－1	80	71	89	102	114	115	166	135	135	112	99	76	1,294
	78－2	83	76	96	110	123	126	182	149	147	120	105	79	1,396
	79－1	82	75	93	107	120	122	177	145	143	117	103	78	1,362
	79－2	96	95	121	141	162	172	245	206	194	152	128	96	1,808
Deficiency and excess of water (mm)	78－1	40	147	22	215	15	165	－16	81	66	205	218	10	1,183 －16
	78－2	37	141	15	225	6	154	－32	67	54	215	214	7	1,135 －32
	79－1	38	142	18	228	9	158	－27	71	58	195	209	8	1,134 －27
	79－2	24	122	－10	194	－33	107	－95	10	7	205	191	－10	860 －148

Table 4 − 12 Available water balance of Ryuku − matsu stands in average year (1957 − 1976)

Month		Jur.	Fev.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Annual
Precipitation (mm)		145	153	147	183	318	376	251	296	222	254	169	142	2,656
Evaporation (mm)		58	52	65	68	73	73	96	87	79	69	58	53	831
Run − off (mm)		3	3	3	4	8	10	7	7	6	6	4	3	64
Tramspi − ration (mm)	78 − 1	15	16	25	34	40	47	64	58	50	34	22	16	421
	78 − 2	18	21	31	42	49	59	80	73	63	42	28	19	525
	79 − 1	17	19	29	39	46	55	75	68	58	39	26	18	489
	79 − 2	33	37	55	75	88	105	143	130	112	75	50	35	938
Total water loss (mm)	78 − 1	76	71	93	106	121	130	167	152	135	109	84	72	1,316
	78 − 2	79	76	99	114	130	142	183	167	148	117	90	75	1,420
	79 − 1	78	74	97	111	127	138	178	162	143	114	88	74	1,384
	79 − 2	94	92	123	147	169	188	246	224	197	150	112	91	1,833
Deficiency and excess of water (mm)	78 − 1	69	82	54	77	196	187	80	144	83	145	85	70	1,272
	78 − 2	66	82	48	69	188	193	64	129	70	137	79	67	1,192
	79 − 1	67	79	50	72	185	174	69	134	75	140	81	68	1,194
	79 − 2	51	61	24	36	149	169	1	72	21	104	57	51	796

Table 4－13 Available water balance of Ryuku－matsu stands in drought year (1963)

Month		Jur.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Annual
Precipitation (mm)		57	24	69	103	46	113	100	279	225	161	141	385	1,703
Evaporation (mm)		84	66	63	67	91	79	101	93	77	86	59	49	915
Run－off (mm)		1	0	1	3	1	2	2	7	5	4	4	10	40
Tramspi－ration (mm)	78－1	12	14	23	30	40	44	59	54	47	29	20	14	386
	78－2	15	17	29	38	50	55	73	67	59	36	24	17	480
	79－1	14	16	27	35	47	52	68	63	55	33	23	16	449
	79－2	28	31	52	68	89	99	130	121	105	64	43	30	860
Total water loss (mm)	78－1	97	80	87	100	132	125	162	154	129	119	83	73	1,341
	78－2	100	83	93	108	142	136	176	167	141	126	87	76	1,435
	79－1	99	82	91	105	139	133	171	163	137	123	86	75	1,404
	79－2	113	97	116	138	181	180	233	221	187	154	106	89	1,815
Deficiency and excess of water(mm)	78－1	－40	－56	－18	3	－86	－12	－62	125	96	42	58	244	568 －274
	78－2	－43	－59	－24	－5	－96	－23	－76	112	84	35	54	259	544 －326
	79－1	－42	－58	－22	－2	－93	－20	－71	116	88	38	55	237	534 －308
	79－2	－56	－73	－47	－35	－35	－67	－133	58	38	7	35	268	406 －446

mm，干ばつ年で828mm，糸数（1976）は那覇市において平年で1,140mm，干ばつ年で1,190mmなどとしている。これらの値から蒸発散は，気温が高く季節風の卓越する沖縄では本土各地に比較して大きいことを示している。地表面からの蒸発散位と蒸発量を直接比較することはできないが，糸数や岩切の測定値から推定して，本実験結果は妥当な値と考えられる。また，実験値と推定式より求めた値は，かなり近似していて，推定式の信頼度は高いとみてよい。

3）損失要因のなかで地表面流出量は，実験した1976年は年間50mmであって，他の地表面蒸発量および林分蒸散量に比較して小さい値であった。村井ら（1975）によると，地表流下開始時の降雨強度は，地被および地形によって異なるが，アカマツ天然生林地の斜面上部で127mm／hr，中腹で220mm／hr，下部で325mm／hrであった。これらの実験値から推定すると，地表面流出は降雨強度の比較的大きい場合に生ずることになり，本実験における流出率は過小とは考えられない。表面流出は，林分の水分収支に及ぼす影響のほかに，更新当初における地表の土砂や有機質の流亡を伴うので，林地保全および乾燥害防止の立場から林地の裸地化をなるべく避けるような施策が必要と思われる。敷草による土壌の流亡防止，蒸発散抑制，地温上昇の抑止などの効果があり（坂本　1963），地拵えおよび下刈時に生ずる樹木や下草の枝葉は，焼失あるいは除去することなく，林床被覆に利用して敷草の効果を図る必要がある。

4）森林の蒸散量については，多くの報告がある。佐藤（1958）はスギ林で1,227mm，ヒノキ林で1,062mm，アカマツ林では879mmとしている。また，中村（1964）のスギ林の試算によると，最小の1月で1mm，最大の8月で173mm，年間では844mmとしている。リュウキュウマツの蒸散量は，夏季の6～9月に多く，この4カ月間における蒸散量は，年間蒸散量の50％以上に相当する。沖縄における干天日の長期継続日数の発生頻度は，夏季にも比較的高い値を示すので，土壌の乾燥による生長への影響が予想される。

5）根系の分布域におけるリュウキュウマツ林土壌の水分動態は，リュウキュウマツの生長へ障害が予想される土壌水pF 2.7以上に乾燥する場合が比較的多い。テンショメーターの調査期間中に，しばしば水切れ状態が観測されていて，現実林では調査結果以上に乾燥していることが考えられる。テンショメーターによる林地水分の測定例は，有光ら（1964），井上ら（1970），吉岡（1973）などの報告がある。また，真下（1960）は，わが国の森林土壌の数多くの資料から，土壌型ごとの水分状態（pF価）の研究を報告しているが，それによると，褐色森林土では多くの場合土壌の水湿はpF 1.0～2.7の範囲にあった。採取時の土壌水湿がpF 2.7以上の乾燥状態を示す土壌型は，BAおよびBBの乾性型土壌であり，さらにA層で頻度が高かった。

本調査結果では，沖縄における林地土壌は比較的頻繁に乾燥状態に見舞われていて，特に表層でその傾向が大きいことを示した。このことは，土壌の理学性の劣ること（後述）や，高温のため蒸発散量が大きいことなどの原因によるものと考えられる。このような林地土壌の乾燥は，植物への水利用が制限され，生長への影響が予想される。

6）林分の有効水分の収支表（表4－9，1976）において，水分損失源のなかで年間を通じて大きい要因は，地表面蒸発量および林分蒸散量であり，地表面流出量の比重は小さい。全水分損失量に占める地表面蒸発量は48～66％に相当し，同様に林分蒸散量は30～49％，地表面流出量は3～4％と計算される。林分蒸散量は，プロット間の差が認められるが，計算の基礎となった着葉量の違いが，林分蒸散量の相違となってあらわれたものである。ここで，平年における水分の分配の概略を計算すると，表4－14のとおりになった。表のなかの各要因は，降水量，地表面蒸発量および地表面流出量は，表4－9（平年）を用い，林分の蒸散量は多くのアカマツ林の葉の現存量が12 ton／ha（佐藤　1973）であるのでその値を採用した。また，根系の量をアカマツの現存量と各部の割合から（佐藤　1973），全量の20％として推定した。現存量は，79－2プロット（表2－8）の値に，根系を加算した量であ

る。土壌含水量は，表4－10による全プロットの年平均値を用いた。

Table 4－14 Water balance of Ryukyu－matsu stands in average year（1957－1976）.

	Supply(mm)	Loss (mm)	Storage(mm)	
Precipitation	2,656（100％）			
Evaporation		831		
Run－off		64		
Transpiration		630		Estimated the leaf biomass with 12 ton／ha.
Total		1,525（57％）		
Soil water content			300	Average content within 1 m depth.
Crop water content			15	Estimated the top biomass with 285 ton／ha and the root with 20％ of top biomass.
Total			315（12％）	
Infiltration, others		816（31％）		

表4－14によると，水分供給源である降水量のなかで，林地および林分を通して消失される水分量は57％，地下1m以内および林木の組織内に保留される水分量は12％，地下流亡その他で林木に利用されない水分は31％と計算される。これらのなかで，地表面蒸発量，林分蒸散量などの占める割合が大きく，これらの水分損失を抑制する技術的施策が必要と考えられる。林分の着葉量は，林分からの水分損失源となるので，適正な密度管理が必要であり，また，地表面蒸発量や流出量の抑止には，更新時における適切な林地処理，林分閉鎖を早期に図る施策，蒸発散の促進要因となる風を防止する施業などを考慮する必要がある。

V　沖縄の自然環境がリュウキュウマツの生長に及ぼす影響

林木の生育は，土壌的条件，気象的条件，土壌や気象に影響を及ぼす地形的条件など環境要素の総合された支配を受ける。特に，沖縄の自然環境は，全県が島嶼性を持ち林木の生長には厳しい環境下にあるものと考えられている。現実に沖縄は，いわゆる異常気象と呼ばれる干ばつや台風の被害が頻繁に生じている。

また，リュウキュウマツは，弱乾性～乾性型土壌に造林される場合が多い。沖縄における林地土壌のなかで，適潤性～弱湿性土壌型の分布面積は比較的小さく（表1－3参照），これら土壌型林地は，スギ，イヌマキ，センダンなどの有用樹種の造林に供される場合がほとんどである。したがって，リュウキュウマツ造林地の立地環境は比較的悪く，林分の生長にとって気象，地形，土壌などの影響を受けやすい環境下にあるといえる。

ここでは，沖縄における気象，地形，土壌などの自然条件を林木の生長との関連で概説し，リュウキュウマツ林分の生長とこれら自然条件との関係について検討する。

1 少降水量に起因する干天日の影響

降水量が少なく干天日が続くと，土壌中の水分は次第に減少し，遂には植物の生理に障害を及ぼす結果になる。一般には，土壌の水湿状態がpF 4.2を萎凋点とされ，土壌有効水分の上限とみなされているが，これは植物が土壌から吸水し得る範囲を示すもので，正常生育の水分状態ではない。ウンシュウミカンは土壌水分がpF 2.7～3.0で果実の肥大が抑制され，ブドウは水分当量（pF 2.7）附近で生長が停止し，一般に畑作物は飽和容水量の60～80％が生長に好適土壌水分といわれている（中川 1976）。本研究においてもリュウキュウマツは，土壌水分がpF 2.7以上になると水ストレスを受け，針葉の水ポテンシャルの低下および蒸散量の低下がみられた。したがって，リュウキュウマツの正常生育のための土壌水分条件はpF 2.7以下とみなされる（Ⅲ－3）。また，降水量が土壌からの水分消失量に達しない月において，現地土壌水分はpF 2.7以上に減少する結果を示した（Ⅳ－3）。ここでは，統計資料から得られた少降水量による干天日の継続日数の頻度やその現われやすい時期，降水量不足から土壌乾燥を招きやすい季節などについて検討する。

干ばつを表わす指標として，無降水日の継続日数の頻度が用いられている（日下部 1958）。ここでの無降水日とは，日降水量がⅣ－2－1で得られた地表面蒸発量と同量以下の日を指す。地表面蒸発量と同量以下の降水量は，土壌水分の増加につながらないとみなしたからである。

図5－1は与那における無降水日数が10日以上におよぶ頻度についてあらわした。10日以上の無降水日数の継続する頻度は比較的多く，継続期間が長くなればその出現頻度は急減し，特に，26日以上継続することはまれである。

図5－2は無降水継続期間がいつごろ現われやすいかを知るため，10日以上，15日以上，20日以上の無降水継続日に含まれる月毎の頻度を求め，図示したものである。

この図からみると，10日以上の無降水継続日数期間は，1月下旬～2月中旬（平年雨量の少ない季節），4月下旬～5月中旬（梅雨期前），6月下旬～8月（梅雨あけから盛夏），9月下旬～11月（秋ばれの季節）にあらわれやすい。このなかで，最もあらわれやすい時期は盛夏の気温の高い時期であり，林分からの蒸発散量の最も多い時期と一致することは，土壌の乾燥を招きやすく，林分への悪影響が推察される。

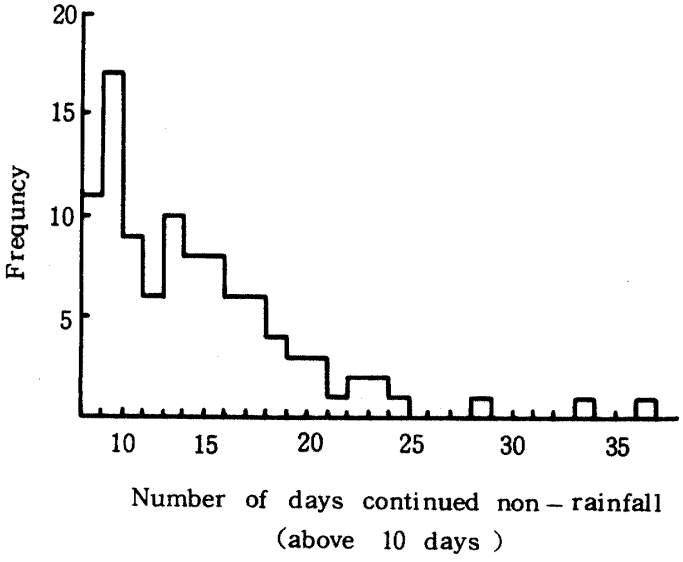

Fig. 5－1 Frequncy of number of days continued non－rainfall in Yona (1957－1976).

次に，15日以上の無降水日数の継続期間の頻度は，10日以上のそれと比較して減少するが，特に，7月～11月にかけてあらわれやすく，1月および4～5月にもあらわれやすいことを示している。20日以上の無降水日数の継続期間は，盛夏の7～8月および秋の10～11月に現われやすいが，その頻度は減少する。

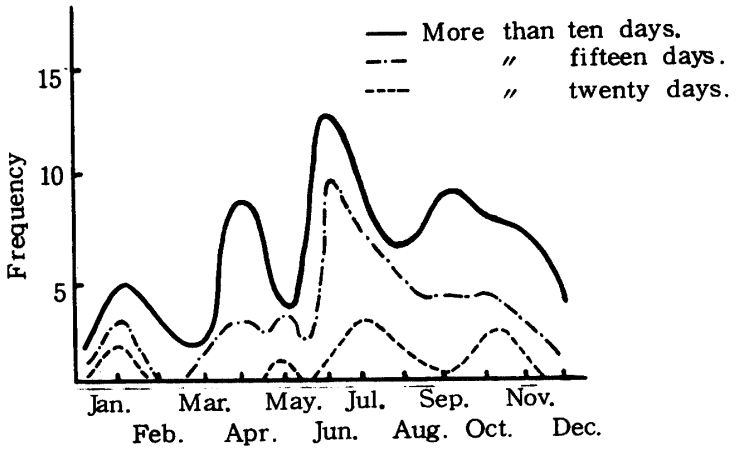

Fig. 5－2 Seasonal frequency of days continued non－rainfall in Yona（1957－1976）.

このように，与那における年間降水量は十分に恵まれた量であっても，年間の降水分布にむらがあり，10日以上の無降水継続日数は，夏から秋にかけて2年に1度の割合で現われることを示している。城間（1977）によると，干天日を日降水量5㎜以下として求めると，那覇における15日以上の干天日の続く割合は，各季節とも2年に1回になり，夏や秋にはほとんど毎年のように15日以上の干天日が続くことになるといわれている。

与那における気象統計資料から，過去20年間（1957～1976）に降水量が林地土壌の消失水分量に達しない月の頻度を示すと表5－1のとおりになった。

表によると，7月に水分不足のおきる頻度が最も高く，55％を示し2年に1回の割合で水分不足をきたしていることがうかがわれる。同様に4月，3月，9月などの時期においても，水分不足のおきる割合が高く，それぞれ30％以上を示している。

さらに，城間（1977）の資料から期間降水量についてみると，那覇における1901年から65年間の統計によれば，年間の各半旬を含んで前後30日，45日などの期間の降水量が，同期間の平均値の50％に達しない頻度は，30日間および45日間については10～11月に特に大きかった。これについで6月～8月および4月の順であった。

以上示されたように，降水量不足によるリュウキュウマツ林分の生長への影響が考えられる時期は，梅雨あけから盛夏にかけての7～8月に最もあらわれやすく，ついで，10～11月の秋季，梅雨前の4～5月である。特に春から夏に

Table 5－1 Frequncy occured water deficiency in Yona, Okinawa（1957－'76）

Month	Water loss from stand (㎜)	Frequncy	(％)
Jur.	79	3/20	15.0
Feb.	77	3/20	15.0
Mar.	107	6/20	30.0
Apr.	133	9/20	45.0
May	157	4/20	20.0
Jun.	173	2/20	10.0
Jul.	219	11/20	55.0
Aug.	187	4/20	10.0
Sep.	160	6/20	30.0
Oct.	132	5/20	25.0
Nov.	97	4/20	20.0
Dec.	67	1/20	5.0

かけてはリュウキュウマツの生長期に相当し，水分要求度も最も高い時期であり，この時期に乾燥害に遭遇すれば生長への障害も大きいものと推察される。したがって，農耕地における潅概のように干ばつ対策を施し得ない林地においては，常に乾燥被害を避けられるような施業が必要と考えられる。

表５－２は昭和元年以来の沖縄地方にあらわれた干ばつの記録を示した。表に示された年は大干ばつの年に相当し，農作物への被害が甚大であった（坪井ら 1976）。

Table 5－2 Record of drought in Okinawa

Year	Drought period	Total rainfall for drought period (% to average)				Area of major damage
		Daito	Naha	Miyako	Ishigaki	
1929	Feb. – Apr.				165.9 (44)	Yaeyama Miyako
1931 – 32	Dec. – Feb.		195.9 (52)		186.8 (47)	Okinawa group
1939	Jur. – Mar.				206.4 (57)	Yaeyama
1946	Jur. – Apr.		228.3 (43)	212.3 (37)	234.0 (47)	Okinawa group
1948	Jur. – May	340.0 (55)	499.3 (64)	436.1 (54)	509.6 (70)	Okinawa group
1948	Oct. – Nov.			87.2 (27)	131.0 (35)	Yaeyama Miyako
1950	Jun. – Sep.				433.5 (52)	Yaeyama
1952	Sep. – Oct.	103.7 (36)	184.9 (62)	143.8 (40)	207.4 (54)	Okinawa group
1958	Mar. – May				208.6 (42)	Yaeyama
1963	Jur. – Aug.	604.2 (55)	577.9 (37)	524.5 (32)	461.9 (32)	Okinawa group
1967	Jur. – Mar.		265.3 (67)			Okinawa group
1971	Mar. – Sep.	833.0 (75)	597.0 (42)	402.0 (27)	565.0 (43)	Okinawa group

2 季節風および台風の影響

風による林木への影響は著しいものがあると考えられている。地形的に常風の強く当たる尾根筋や風衝地では，林木の樹冠は風下にのみ広がる旗型樹冠を示す場合がよくみられる。暴風は葉の破損脱落，幹枝の折損，湾曲，根系の根返りなどの被害をもたらす。

一方生理的には樹体からの蒸散の促進と樹体温度の低下であり，間接的な土壌水分蒸発促進による林地の乾燥など水分と関連した影響である。風による蒸散の影響は多くの実験で認められており，風を当てると一時的に蒸散が急激に促進される。しかしながら，風を当てる時間が長くなると逆に蒸散は低下

する。最も蒸散の促進される風速は樹種によって差があり（佐藤　1955），リュウキュウマツでは4 m／sec. であった（山盛　1976b）。このように風による影響は樹体の乾燥，蒸散の低下，樹体温度の低下などを生じて光合成へ影響し，生長低下を招く結果となる。さらに，風によって林地土壌を乾燥させることは，一層の影響を大きくすることになる（佐藤　1955）。

沖縄一帯は東アジア季節風地帯に属し，世界的にも最も季節風の卓越する地域といわれている。そのため冬季は強い北東～北西の乾燥した季節風が7～8日間隔で吹いてやる。その吹き出しは強く，8～10 m／sec. の平均風速の風がおおよそ12～24時間も吹き続ける。この冬季の季節風の期間は10月中旬頃から3月中旬頃に相当する（城間　1975b）。

夏季における南東の季節風は冬季の季節風ほどではない。夏季における風害は低気圧による暴風害が主である。沖縄一帯は台風銀座と称せられ，赤道附近で発生した低気圧は沖縄南方海上で台風に発達し，沖縄近海で最も勢力を強める。沖縄近海を経過する台風は毎年3～4個であるが7～8個にのぼる場合もある。

沖縄各地における月別の最多風向を表5－3に，平均風速および最大風速とその風向を表5－4に示した。

Table 5－3 Direction of prevailing wind at some location in Okinawa

Location	Jur.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Year	Period
Naha	N	NE	N	N	SSW	SSW	S	E	E	NE	NE	NE	NE	1953－1970
Miyako	NNE	NNE	NNE	NNE	S	SW	S	SSE	E	NNE	NNE	NNE	NNE	1951－1970
Ishigaki	NNE	NNE	NNE	E	SSW	SSW	SSW	E	ENE	NE	NE	NNE	NNE	1951－1970
Yona	N	N	N	S	SE	S	S	SE	SE	N	N	N	N	1955－1976

Table 5－4 Average wind valocity, maximum wind velocity and its derection at some location in Okinawa.

Location	Jur.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Year	Period
	6.3	5.9	5.5	5.0	5.0	5.3	5.5	5.0	5.3	5.9	5.7	5.5	5.5	1960－1970
Naha	21.7	23.7	21.8	21.2	19.0	49.5	46.4	42.5	47.0	44.8	45.2	26.8	49.5	) 1927－1970
	N	NNE	NNW	SW	SW	ENE	NNE	NNE	SW	WNW	N	NNE	ENE	
	4.5	4.5	4.3	4.0	3.8	4.1	4.7	4.5	4.8	4.6	4.9	4.5	4.5	1955－1970
Miyako	18.6	17.9	17.6	18.0	22.2	41.2	44.3	46.5	50.3	39.6	28.5	19.0	50.3	) 1897－1970
	S	SSE	SSE	SE	S	SE	S	SE	S	ESE	NNW	WNW	S	
	6.6	6.2	5.9	5.1	5.0	5.2	5.4	4.9	5.9	6.7	6.9	6.6	5.9	1961－1970
Ishigki	20.0	20.4	19.0	20.3	33.6	45.1	38.2	36.0	60.8	32.6	35.9	28.2	60.8	1938－1970
	N	N	NE	NE	NNE	NNE	ENE	WSW	NE	N	S	N	NE	) (Included 1945)

何れの地方においても月平均風速は比較的大きい。那覇での月平均風速5 m／sec. 以上，年平均風速5.5 m／sec. を示し，那覇に比べて宮古島ではやや大きく石垣島でやや小さい。これを九州地方と比較すると那覇は福岡市（年平均風速3.1 m／sec. ）の約1.8倍，熊本市（年平均風速2.2 m／sec. ）の2.5倍に相当し（気象庁　1972），沖縄地方では比較的強い風が吹いていることがいえる。季節別での平均風速は，那覇で10～3月にかけて大きく4～9月にかけて小さい。

日最大風速10 m／sec. 以上の日数を表5－5に示した。

Table 5－5 Number of day of daily wind velocity 10 m／sec. or more

Location	Jur.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Year
Naha	17	13	12	7	9	1	9	8	9	12	11	12	120
Miyako	17	14	13	7	8	8	8	8	9	15	17	15	139
Ishigaki	2	2	2	1	2	3	6	6	6	4	4	3	41

日最大風速10 m／sec. 以上の日数を指標としてみると，那覇で年間120日，宮古島で139日に達しており，これは3日に1日以上の割合になる。日最大風速10 m／sec. 以上の日数は10～3月の間に多く，何れの月も10日以上の日数となっている。同様なことを福岡市および熊本市と比較すると，福岡市で年間41日，月平均1～6日の日数であり，熊本市では年間15日，月平均1～2日の日数となっている。

以上のことは，沖縄地方が季節風のすこぶる卓越した位置にあって，年間の平均風速は大きく，特に，冬季の季節風の風速が大きい。冬季の季節風は湿度が低く，風速の強さと相まって林木および林地土壌の乾燥をさらに促進させ，林木に著しい影響を及ぼしているものと考えられる。

林地内における季節風的風速の分布や垂直的風速の分布を調べるため，与那演習林のリュウキュウマツ林分内で風速測定をおこなった。風速計は自記三杯風速計を用い，記録紙から1時間毎の風速を読みとった。風速計の設置箇所は海岸からの距離2.5 km，海抜高50 mの山地中腹部にある。

測定結果を示すと表5－6のとおりになった。また，冬季の1月，夏季の6月および台風の襲来した9月の各月における風速階別頻度を図5－3に示した。

Table 5－6 Distribution of wind velocity on each wind velocity classes in Ryukyu－matsu stand in Yona.

(%)

wind velocity (m／sec.)	Jur.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Year
－ 1	26.4	24.6	26.7	36.2	35.4	38.2	35.2	33.2	36.8	39.0	34.6	32.4	33.2
－ 2	20.5	21.9	18.9	32.4	32.3	31.6	24.6	28.4	20.6	34.8	28.9	20.1	26.3
－ 3	19.4	20.0	17.2	18.2	17.5	14.8	16.8	14.2	17.7	13.3	15.2	18.4	16.9
－ 4	15.3	18.3	17.4	8.1	9.6	8.2	7.2	8.4	8.9	8.8	11.0	15.5	11.4
－ 5	10.9	8.5	5.0	5.1	5.2	6.8	6.7	6.6	6.6	8.7	6.2	7.8	7.0
－ 6	6.8	6.3	0.2			0.4	5.3	5.0	2.6	0.4	3.9	5.8	3.7
－ 8	0.7	0.4					1.1	3.9	1.2		0.2		1.3
－ 10							1.7	0.3	3.5				1.8
10 －							1.4		2.1				1.8
Average wind velocity (m／sec.)	2.4	2.3	1.7	1.6	1.7	1.7	2.3	2.1	2.3	1.7	1.9	2.1	2.0

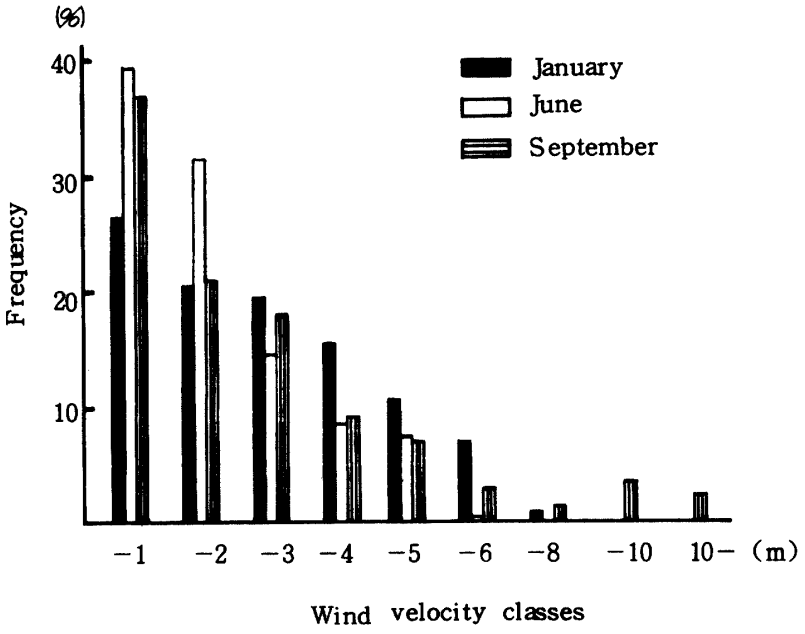

Fig. 5 − 3 Fequency of wind velocity classes at January (winter), June (summer) and October (typhoon passing nearly) in the Ryukyu−matsu stand.

林地の風速階別頻度分布は冬季と夏季では異なった型を示し，冬季は夏季に比べて風速階の大きい頻度が高くなる。これは，冬季の季節風の強いことを示している。図によって1月と6月を比較すると，冬季の1月は3 m／sec. 以上の風速頻度が夏季の6月より著しく増加している。なお7月，8月，9月の各月に強風分布のあることは，それぞれ台風の影響であった。測定位置が海岸より離れた山塊のなかにあるため，月平均風速は余り大きくない。

次に，リュウキュウマツ林分内の各プロットの地上高別の風速を測定し，基準地点（定点）の風速と比較した。その結果を図5－4に示した。

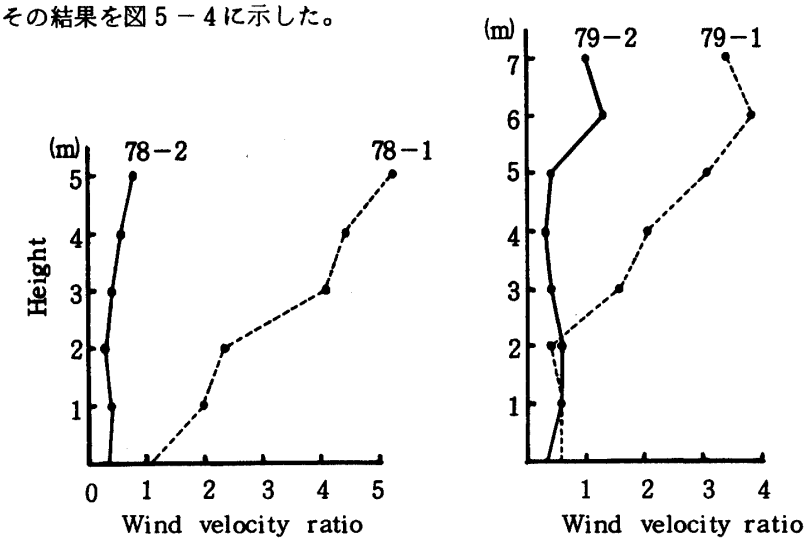

Fig. 5 − 4 Distribution of wind velocity in Ryukyu−matsu stand under two difference condition of the stand.
78−1, 79−1 : Received northerly wind directly.
78−2, 79−2 : Sheltered from northerly wind by trees nearly.

78－1および79－1プロットは風衝地で北風を受けやすく，78－2および79－2プロットは保護樹帯の内側に位置している。

図5－4によって風速比を比較すると，78－1プロットは78－2プロットよりも，何れの高さにおいても風速比が大きい。78－1プロットでは高さが増すにつれて風速比も増加するが，78－2プロットではほとんど増加しない。79－1および79－2プロットの比較でも同様なことがいえる。すなわち，このことは保護樹帯の防風効果の大きいことを示している。

防風林の減風効果は佐藤ら（1952），飯塚ら（1950），大神ら（1973），その他多くの報告で認められている。また，沖縄は四方海に囲まれていて海風による空中塩分量が多く，林木生育に影響があると考えられる。これら塩分の濾過効果も大きいものがあると考えられる（幸喜　1969）。

表5－7は，沖縄附近を通過した台風の数を示した。

Table 5－7 Number of typhoon passing through each location within 300 km

Location	Jur.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Total	Period
Naha	－	－	－	1	2	7	18	32	26	11	9	3	109	1941－1970
Miyako	－	－	－	3	3	12	28	28	25	13	8	4	124	1941－1970
Ishigaki	－	－	－	2	4	9	26	26	30	7	7	2	113	1941－1970

沖縄に接近する台風の個数は，那覇では7～9月に多く，そのなかで8月が最も多い。4月あるいは12月に接近することもある。宮古島，石垣島でも那覇と同じ傾向を示している。

台風は強風を伴い林木に直接の被害をもたらす。暴風の被害は，梢，幹，枝条の折損，葉の破損および変色，根部の根返りなどの被害のほか，林分閉鎖の破壊，雨を伴う場合の地表面流出による表層の土砂，有機質の流去，山地破壊などがあげられる。雨を伴わない場合は海風中に含まれる塩分の被害も多発している。記述したように，沖縄地方は季節風の卓越する地帯であり，また，台風の接近も多く，林木は常風害および強風害にさらされているものといえる。したがって，林分の造成に際しては，これらの被害の防止を考慮した施業をおこなう必要がある。

3 地形および土壌の影響

林木の成長と地形との関係は，光，気温および水との関わりと考えられる。受光量および気温は緯度，山地傾斜の方位，傾斜角などに規制される（山田　1955）。土壌水分養分の集積性（供給）は集水面積と起伏量が関係する。水分の損失源となる蒸発散は風，受光量，温度条件に関する地形因子と密接に関係する（竹下　1964），これらの地形因子は海抜高，傾斜方位および角度，起伏量，保護度などであって，地形図によって定量化された地形因子と林地生産力の推算が試みられている（竹下ら1966）。

また，土壌型と林木の成長との関係については多くの報告がある。一方土壌型と地形，地質は密接な関係があり，さらに，林木の生長と土壌の理化学性では，土性，深度，水湿が重要視されてきたが，孔隙量（竹下　1964），透水指数（真下　1960）などの理学性や土壌断面における形態的特徴と地位指数との関係の報告が多い。土壌の化学性については，置換酸度（大政　1951），置換性塩基類（山本　1962）と林木の生長について報告が多い。土壌の理学性と化学性は関係が深く（真下1960），理学性の良好な土壌は化学性にもすぐれている。

ここでは，林木の生長と関係のある地形，土壌因子について取りあげた。地形因子については沖縄全県の森林地域についての計測結果を，土壌因子についてはリュウキュウマツ林の土壌調査と沖縄県でおこなわれた適地適木調査（沖縄県　1973～76）資料を加えて形態的特徴および理化学性について述べる。

1）地　形

地形要素としての海抜高，起伏量，傾斜量，傾斜方位などについては，5万分の1の地形図を用いメッシュ法により計測をおこなった。メッシュの大きさは1cm方眼とした。

表5－8に海抜高分布，表5－9起伏量分布，表5－10に傾斜量分布，表5－11に傾斜方位分布をそれぞれ示した。

Table 5－8 Distribution of altitude in forest land

(%)

Location \ Altitude (m)	0－50	50－100	100－150	150－200	200－300	300－400	400－	Total
Northern part of Okinawa	11	30	24	17	16	2	0	100
Central and southern part of Okinawa	24	52	17	5	2	0	0	100
Miyako	75	25	0	0	0	0	0	100
Yaeyama	8	20	23	15	23	11	0	100
Total	14	30	22	14	15	5	0	100

Table 5－9 Distribution of relief in forest land

(%)

Location \ Relief (m)	0－50	50－100	100－150	150－200	200－300	300－	Total	Forest area (ha)
Northern part of Okinawa	8	31	45	13	3	0	100	64,550
Central and southern part of Okinawa	30	27	29	10	4	0	100	16,650
Miyako	79	21	0	0	0	0	100	4,550
Yaeyama	5	13	45	21	16	0	100	36,050
Total	13	25	41	15	6	0	100	121,800

Table 5 − 10 Distribution of inclination angle in forest land

(%)

Location \ Inclination angle	0 − 3	3 − 8	8 − 15	15 − 20	20 − 30	30 − 40	40 −	Total
Northern part of Okinawa	1	5	32	23	31	8	0	100
Central and southern part of Okinawa	4	9	18	18	28	12	1	100
Miyako	43	19	22	6	8	1	1	100
Yaeyama	2	3	31	30	30	4	0	100
Total	3	5	31	24	29	7	1	100

Table 5 − 11 Distribution of direction of slope in forest land

(%)

Location \ Direction of slope	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Flat	Total
Northern part of Okinawa	11	15	8	16	14	13	7	16	0	100
Central and southern part of Okinawa	10	8	12	11	20	11	11	13	4	100
Miyako	8	6	9	4	12	7	7	4	43	100
Yaeyama	16	15	7	11	14	12	5	18	2	100
Total	12	14	8	14	15	12	7	15	3	100

地域別の海抜高分布は地形的特徴をよくあらわしていて，おもな山岳地帯である沖縄本島北部地方，石垣島，西表島を含む八重山群島などでは比較的海抜高の大きい分布がみられ，沖縄本島中南部や宮古群島では海抜高の小さい分布が多い。特に，宮古群島では100m以下の海抜高であって，山岳地がないことを示している。

起伏量分布は，沖縄本島北部および八重山群島の山岳地帯でも150 m以下に集中するが，150 m以上の起伏量の分布も他に比較して大きく，地形的特徴をあらわしている。平地地形の多い宮古群島，沖縄本島中南部の起伏量は100 m以下に集中する。

地域別の傾斜区分は，宮古群島を除いた他の地域は8〜30度の間に大部分が含まれ，8度以下および30度以上の傾斜の分布は著しく少なくなる。宮古群島は大半が8度以下の傾斜で，15度以上の傾斜地の分布は極めて少なくなる。このことは，地形的な性質をよくあらわしているといえる。

傾斜方位についてみると，地域別に特徴的なことはあらわれていないが，宮古群島では平坦地形が多いことがいえる。

以上地形的な要素の計測結果を述べたが，地域的な特徴として海抜高の比較的大きい林地の分布は，沖縄本島北部と八重山群島地域にあって山岳地形を形成し，したがって，起伏量の比較的大きい分布がみられる。沖縄本島中南部と宮古群島は，全般に低海抜高分布が多く，山岳地形のないことを示すが，沖縄本島中南部では宮古群島と比較して急斜地が多く，小起伏の多い地形を示し，宮古群島は平坦地～緩斜地の地形であることがいえる。したがって，林地の取扱いは，おおまかにいって，沖縄本島北部および八重山群島は山岳地的に，沖縄本島中南部および宮古群島は平地的に取扱う必要がある。

2）土　壌

沖縄における土壌型別の分布状況は既述したが，ここでは形態的特徴や理化学性について述べる。

形態的特徴については，各土壌群別に土色，A層の厚さ，推移状況，硬度（堅密度）を取りあげ，本土における森林の一般的土壌群である褐色森林土と比較検討した。検討に用いた資料は黄色土62点,赤色土28点，暗赤色土22点，褐色森林土104点である。褐色森林土は，八女地方（山盛　1966），背振地方（宮島ら　1966），その他の九州地方（西日本技術開発株式会社　1974a，b）の資料を用いた。これらの結果は，図5－5および表5－12～14に示したとおりである。

Table　5－12　Average thickness of A－horizon in each forest soil type

(cm)

Soil type / Soil subgroup	A	B	C	D(d)	D	E	F
Yellow soil	10	9	11	14	17		
Red soil	11	14	13	13	15		
Dark red soil	－	11	17	4	29		
Brown sorest soil	16	14	－	34	38	65	58

土色は黄色土では10 YRに属するものがA層で約80％，B層で70％であった。赤色土および暗赤色土はバラツキはあるが，A層は赤色土，暗赤色土ともに7.5 YR，B層では赤色土が2.5～7.5 YR,暗赤色土は5～10 YRの間にあった。褐色森林土では7.5 YRに属するものが多く，A層で60％，B層で約50％がこれに属していた。

土色の彩度，明度については，黄色土のA層は大部分のものが彩度，明度ともに3～4に属し，B層では彩度6～8，明度4～6に含まれる。赤色土ではA層で彩度4～6，明度3～5，B層で彩度8，明度4～6に属し，暗赤色土ではA層で彩度，明度ともに3～4，B層で彩度4～8であるが6が多く，明度は3～5に属している。褐色森林土ではA層で彩度，明度とも2～4，B層で彩度4～6，明度3～5である。黄色土，赤色土，暗赤色土は褐色森林土に比べてAおよびB層ともに彩度，明度の値が大きく，有機質含量が少ないと考えられ，一般的に乾性土壌の傾向が強いことを示している。

A層の厚さの平均値は，黄色土の$Y_{A\cdot B\cdot C}$で9～11 cm，$Y_{D(d)\cdot D}$で14～17 cm，赤色土の$R_{A\cdot B\cdot C\cdot D}$で11～15 cm，暗赤色土の$DR_B$で11 cm，$DR_C$で17 cm，$DR_D$で29 cmを示し，土壌の水湿状態との関係が深いことが認められる。褐色森林土では$B_{A\cdot B}$で14～16 cm，$B_{D(d)\cdot D}$で34～38cm，B_Eで65 cmで，沖縄における森林土壌は各土壌型とも明らかにA層の厚さが小さい。また，リュウキュウマツ林地では

A層を欠く土壌がしばしば見受けられる。

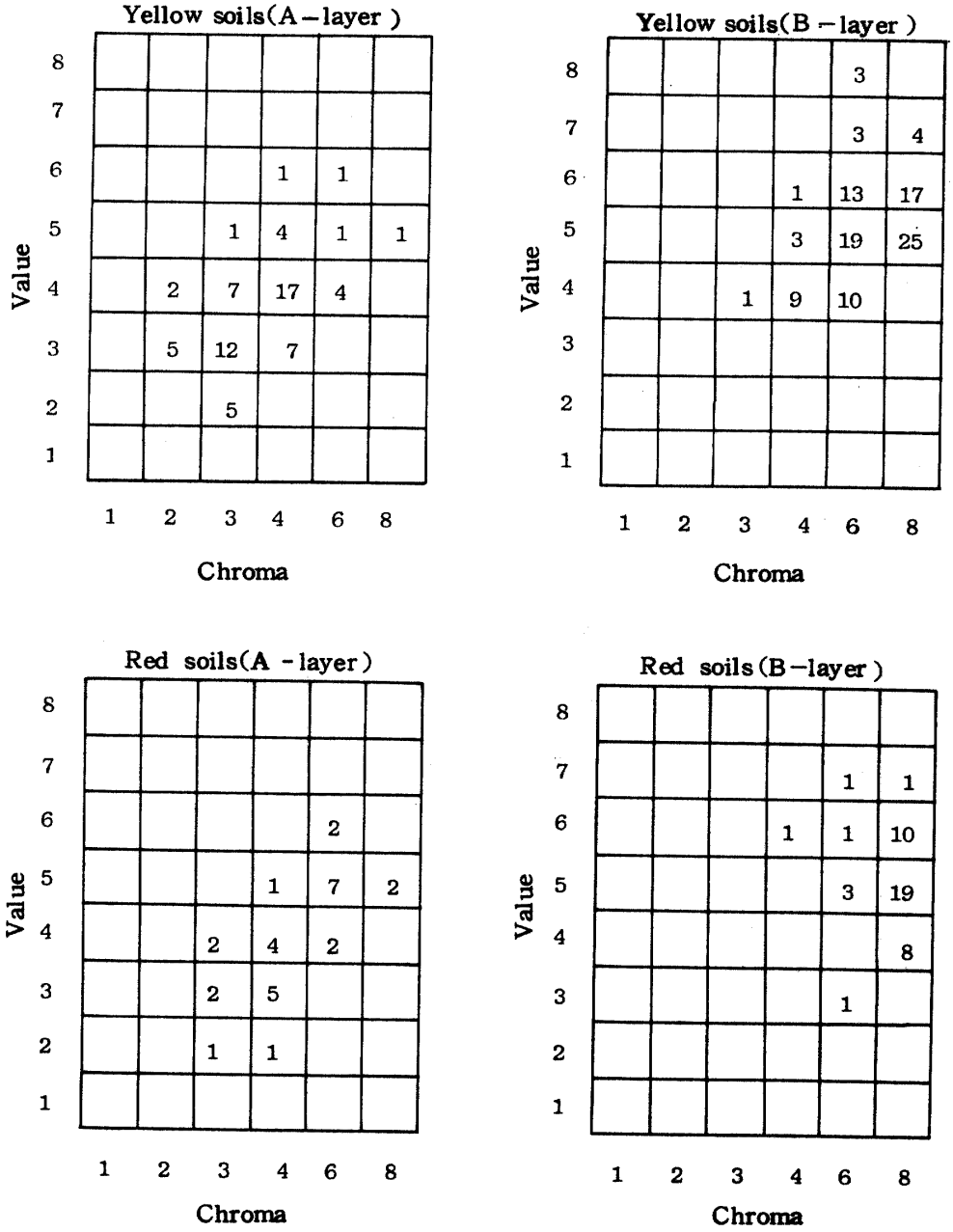

Fig. 5－5－a Appeared number of the chroma and value of soil color in each soil subgroup sample.

Dark red soils (A-layer)

Value \ Chroma	1	2	3	4	6	8
8						
7						
6						
5				1		
4		1	2	4		
3		1	5	5	1	
2		2	2			
1						

Dark red soils (B-layer)

Value \ Chroma	1	2	3	4	6	8
8						
7						
6					1	
5				1	2	1
4				4	11	4
3				1	1	
2						
1						

Brown forest soils (A-layer)

Value \ Chroma	1	2	3	4	6	8
8						
7						
6						
5					1	
4		2	7	2	2	
3		5	11	10		
2	2	4	13	1		
1	7					

Brown forest soils (B-layer)

Value \ Chroma	1	2	3	4	6	8
8					1	
7					1	
6				1	6	3
5				7	14	6
4			2	8	7	1
3			1	10	3	
2		1	4			
1						

Fig. 5-5-b Continued

Table 5 − 13 Parcentage of horizon sequence of soil in each soil type.

Yellow soil

Horizon sequence \ Soil type	A	B	C	D(d)	D
Abrupt boundary to	67	80	60	31	−
Clear boundary to	33	20	32	31	25
Gradual boundary to	−	−	8	38	75
Total	100	100	100	100	100

Red soil

Horizon sequence \ Soil type	A	B	C	D(d)	D
Abrupt boundary to	34	57	55	40	100
Clear boundary to	33	14	9	20	−
Gradual boundary to	33	29	36	40	−
Total	100	100	100	100	100

Dark red soil

Horizon sequence \ Soil type	A	B	C	D(d)	D
Abrupt boundary to	−	29	−	100	17
Clear boundary to	−	43	64	−	67
Gradual boundary to	−	28	36	−	16
Total	−	100	100	100	100

Brown forest soil

Horizon sequence \ Soil type	A	B	C	D(d)	D
Abrupt boundary to	100	57	−	13	4
Clear boundary to	−	36	−	75	46
Gradual boundary to	−	7	−	12	50
Total	100	100	−	100	100

土壌層位の推移状態は，黄色土のYA•B•Cでは明が多く60％以上を示し，YD(d)は明，判，漸ともに出現率がやや似ている。赤色土のRは特徴的な傾向が判然としない。暗赤色土のDRは各土壌型とも判がやや多い。褐色森林土のBA•Bでは明が多く，BD(d)およびBDでは判と漸が多くなり，BEではすべてが漸であった。これらのことから，沖縄に分布する黄色土，赤色土，暗赤色土は，有機質の侵透が悪いことがいえる。

堅密度は野外調査では6段階にわけられているが，ここでは山中式硬度計を併用し，堅密度と硬度範囲の関係は真下（1973）の基準によって区分した。

Table 5－14 Frequency of soil consistency (hardness) in each soil subgroup.

(%)

Soil sub-group	Horizon	Consistency / Hardness (mm)	Loose －8	Mild 9－13	Slightly compact 14－17	compact 18－21	Very compact 22－25	Solidity 26－
Yellow soil		A	3	50	10	4	2	－
		B	－	19	5	44	25	18
		A. B	－	9	4	4	1	－
Red soil		A	3	16	3	6	－	1
		B	－	9	1	11	12	6
		A. B	－	5	－	1	－	－
Dark red soil		A	4	15	5	5	－	5
		B	1	1	7	12	－	3
		A. B	1	1	－	1	－	－
Brown forest soil		A	9	14	5	2	－	－
		B	8	12	12	3	－	－
		A. B	－	1	－	－	－	－

調査結果によると，黄色土のA層は硬度が8～25までの広い範囲に硬さを示すが，全体の50％が堅密度軟に相当する9～13の硬度である。B層では同様に堅密度堅～頗る堅に相当する18～25の硬度の土壌が多い。赤色土および暗赤色土においても各層ともに黄色土と似た傾向を示すが，何れの土壌群でも堅密度固結に相当する硬度26以上の土壌も比較的多い。褐色森林土では，A層で硬度13以下の軟および軟が多く，B層では硬度9～17までの軟およびやや堅の土壌が多い。

以上述べた土壌の形態的特徴は，土壌の性質をよく表わしているものと考えられる。沖縄のような高温多湿地帯では細菌の活動は盛んであり，有機質の分解が早いが養分の流亡も早い。また，沖縄に分布する土壌は，褐色森林土に比べて，かなり堅密な条件下にあり，腐植の浸透が悪くA層の厚さが小さい。これらの形態的特徴は土壌の理化学性も悪いことが推察される。

表5－15は，土壌型別の理化学的性質をかかげた。土壌の理学性は容積重，土壌の水分と関係の深い三相分布および孔隙量を，化学性はpHと炭素含量をそれぞれ取り上げた。資料は土壌の形態的性質に用いたものと同一である。また，比較した褐色森林土の理学性は，真下（1960）の資料を用いた。

容積量は全般的にみて各土壌型および層位とも大きい値を示し，数例を除いてほとんどの資料が100以上の値である。褐色森林土では，容積量が100以上の値を示す場合はごく少なく，乾性土壌はいく分

Table 5－15 Physic and chemistry property in each frest soil type

Soil type	Horizon	Volume weight		Solid (%)		Water (%)		Air (%)		Fine pore space		Coarse pore space		pH (H_2O)		Carbon (%)	
		Range	Average	Range	Average	Range	Average	Range	Average	Range	Average	Range	Average	Range	Average	Range	Average
YA	A	83－114	97	34－46	40	21－42	32	12－38	28	29－45	37	9－30	23	4.1－5.1	4.6	3.0－7.5	5.5
	B	113－137	126	45－54	29	21－37	29	9－34	22	27－36	32	10－28	19	4.5－4.0	4.8	0.0－1.9	1.3
YB	A	95－140	111	41－53	46	14－45	29	14－43	25	28－47	35	9－24	19	4.3－6.4	5.5	3.5－6.3	5.0
	B	106－142	125	43－54	48	27－42	32	7－32	20	29－45	34	9－28	18	4.6－5.9	5.1	0.8－1.5	1.0
YC	A	83－148	108	34－55	44	16－44	29	16－40	27	22－50	35	13－28	22	4.2－6.6	5.3	1.8－7.3	4.3
	B	113－144	132	46－56	51	24－41	33	7－25	16	24－45	32	9－23	17	4.5－6.6	5.0	0.3－1.6	1.1
YD(d)	A	94－127	118	38－54	46	16－34	29	14－29	25	22－45	31	15－36	23	4.8－6.1	5.5	2.1－8.4	4.1
	B	104－151	135	43－56	53	21－49	32	8－18	15	22－48	31	9－22	16	4.9－5.5	5.2	0.5－2.3	1.4
YD	A	92－124	91	37－60	46	33－52	35	11－28	19	22－47	32	16－40	22	4.7－6.5	5.8	2.6－5.0	3.9
	B	112－147	128	41－56	50	34－51	40	8－20	10	23－47	35	7－22	15	4.8－6.1	5.4	0.8－1.9	1.1
RB	A	95－129	108	37－49	43	28－39	35	11－31	22	32－39	37	15－24	20	4.6－5.1	4.9	2.1－5.3	3.0
	B	123－167	144	48－61	54	24－40	35	5－17	11	24－48	35	9－17	11	4.4－5.0	4.8	0.7－1.2	0.9
RC	A	85－125	101	31－48	43	23－37	28	12－38	29	34－44	38	16－27	19	4.4－6.3	5.5	1.9－9.9	3.6
	B	116－160	139	40－65	50	29－38	34	11－24	16	35－44	40	9－25	10	4.8－6.0	5.3	0.3－1.6	1.0
RD(d)	A	76－104	91	33－45	37	25－41	33	19－36	30	38－45	42	11－33	21	4.8－6.6	5.9	2.6－6.9	4.7
	B	117－126	123	44－49	47	29－38	35	12－28	18	35－44	40	5－20	13	5.2－6.2	5.5	0.5－1.3	1.1
DRB	A	70－135	104	28－50	41	22－51	31	6－40	28	32－40	36	18－34	23	5.3－7.2	6.7	4.0－4.9	4.5
	B	107－134	121	37－49	44	29－48	39	11－25	17	30－53	41	11－28	15	5.3－7.0	6.4	1.3－2.8	2.0
DRC	A	79－145	111	31－56	44	19－46	32	8－34	24	33－45	37	17－25	19	5.0－6.1	5.5	1.6－5.0	3.3
	B	99－154	120	38－58	46	26－44	35	13－26	19	33－48	40	11－25	14	4.4－5.8	5.3	0.6－3.4	1.7
DRD(d)	A	96－121	108	36－48	42	24－43	34	12－30	24	31－35	33	18－32	25	4.8－5.9	5.5	2.2－6.0	4.1
	B	105－137	121	33－53	43	46－50	48	6－11	9	41－53	47	8－12	10	5.0－6.6	5.8	1.2－1.4	1.3
gRYI－II	A	91－121	106	39－46	42	27－46	35	8－34	23	36－40	38	14－25	20	4.9－6.2	5.8	1.8－6.2	3.4
	B	119－156	135	45－59	51	28－44	36	11－17	13	30－39	36	3－23	13	4.8－5.3	5.0	0.5－1.5	1.0

大きいが，多くの試料では50～80の範囲にあった。層位別の容積量を比較すると，表層のA層は下層のB層よりも容積重が小さい。土壌型別では，はっきりした傾向がみられない。

次に，三相分布について検討すると，固相は多くの土壌型で40～50％にあり，A層はB層よりもやや小さい値を示し，容積重の傾向と似ている。液相は約30～40％の間に多く，気相は10～30％に集中している。層位別では液相はA層よりもB層で大きい傾向を示し，気相は逆にB層よりもA層で大きい。これら三相分布を褐色森林土でみると，液相はBAを除いてほとんどの土壌型および層位とも40～50％にあり，一方気相は20～40％の間に多い。これらのことから，沖縄に分布する黄色土，赤色土，暗赤色土などの土壌は，褐色森林土に比べて固相部分の占める割合が大きく，液相および気相部分の占める割合は小さいということができる。

素焼板による脱水によって求めた細孔隙量と，全孔隙量と細孔隙量の差より求めた粗孔隙量は表5－15に示したとおりである。

各土壌型別の細孔隙量は，バラツキはあるが黄色土のA層は，平均値では31～37％，B層は平均値で31～35％の範囲にある。同様に赤色土はA層で37～42％，B層では35～40％の間にあり，赤色土は黄色土より各層ともやや大きい値である。暗赤色土ではA層で33～36％，B層で40～47％であって，A層では黄色土と類似し，B層では他よりも大きい。

表5－15により粗孔隙量をみると，黄色土のA層の平均値で19～23％，B層の平均値で15～19％をしめして，A層はB層よりやや大きい。赤色土ではA層で19～21％，B層で10～13％となっている。暗赤色土はA層で19～25％，B層で10～15％である。粗孔隙量は何れの土壌群においてもA層で大きく，B層で小さい。これら土壌の粗孔隙量を褐色森林土と比較すると著しく小さく，真下（1973）の区分した「中」（25～35％）以上の土壌は極めて少なく，大部分が「小」（15～25％）の区分に入り，「極めて小」（15％以下）に相当する土壌も多い。

土壌の化学性としてのpH（H_2O）は，各土壌群，土壌型，層位ともに類似していて，特別に強酸性であるような土壌はない。しかしながら，暗赤色土群のなかで琉球石灰岩に由来する土壌は，アルカリ性を示す例があった。

炭素含水量については，全般的にA層はB層よりも含有率が高く，このことは有機質量が多いからと考えられる。土壌群別，土壌型別では判然とした傾向は表われていない。褐色森林土と比較すると，沖縄に分布する土壌は全般的にA層，B層とも炭素含有率が低い。

以上は，沖縄に分布する黄色土，赤色土，暗赤色土の土壌の断面形態および理化学性について述べたが，これらの土壌の性質は，褐色森林土と比較すると，概して良好ではないといえる。土壌体の各鉱物質の比重はやや近い値をとるので（船引　1964），容積重の大きいことは土壌容積に占める固相部分が大きいということになる。逆にいえば孔隙量が小さく，したがって，孔隙に含むことができる水や空気の量は少ないことになる。孔隙のなかで，粗孔隙に含まれる水分量（pF 2.7以下），特に圃場容水量以下の水分量（pF 1.7～2.7）が重要とみなされる。そこで，各資料の採取時含水量の値が，いかなる水湿状態にあるかを検討してみた。

三相分布のなかの液相は採取時含水量（容積）で表わされ，素焼板脱水法によって粗孔隙量（pF 2.7以下の孔隙量）が示されている。また，全孔隙量は液相と気相の合計値あるいは細孔隙と粗孔隙の合計値で表わせる。したがって，採取時の気相≧粗孔隙の時は，土壌含水量≦pF 2.7と判断される。断面の形態的特徴に用いた資料の調査結果によって，採取時含水量がpF 2.7以上に乾燥している調査区を拾いだしてみると，表5－16のとおりになった。

表5－16によると，検討に用いた資料のなかのほとんどの土壌型で，採取時の土壌含水量がpF 2.7以上に乾燥した水湿状態を示す例がみられる。土壌型別の調査数に不均衡にあるが，全般的にみて乾性～弱乾性土壌に表われる率が高い。調査数に対するpF 2.7以上の乾燥土壌の表われた場合は，黄色土で59

Table 5 − 16 Environment condition for the moisture of forest soil dried above pF 2.7

Soil type	P_1^*	P_2^*	%
Y_A	3	2	67
Y_B	9	7	78
Y_C	18	11	61
Y_D(d)	6	2	33
Y_D	5	2	40
	41	24	59
R_A	1	0	0
R_B	5	3	60
R_C	9	6	67
R_D(d)	4	4	100
R_D	1	0	0
	20	13	65
DR_B	8	4	50
DR_C	6	3	50
DR_D(d)	2	0	0
DR_D	1	1	100
	17	8	47
$gRY_{I \cdot II}$	4	1	25
Total	82	46	56

Horizon	P_1	P_2	%
A	74	37	50
B	82	29	35
Total	82	46	56

Physiography	P_1	P_2	%
Residual deposit	30	16	53
Superfical deposit	44	26	59
Colluvial deposit	8	4	50
Total	82	46	56

Podition of slope	P_1	P_2	%
Ridge	24	13	54
Upper slope	13	11	85
Midslope	22	13	59
Lower slope	16	6	38
Valley	7	3	43
Total	82	46	56

Direction of slope	P_1	P_2	%
N	12	8	67
NE	15	11	73
E	6	4	67
SE	9	4	44
S	13	4	31
SW	9	5	56
W	9	5	56
NW	9	5	56
Total	82	46	56

Parent material	P_1	P_2	%
Lime ston	14	10	71
Igneous rock	17	10	59
Tertial sandston alluvial doposit	16	9	56
Pareozoic sand-ston and phyllite	35	17	49
Total	82	46	56

*P_1 : Number of investigated Plot.
P_2 : Number of the Plot in which soil moisture dried above pF 2.7

%，赤色土で65%，暗赤色土で47%，全体で56%であった。以上のことから沖縄における森林土壌は常時乾燥条件下にあることが推察できる。

このような乾燥状態を示す箇所の土壌，地形，地質的条件を検討してみると，表5－16に示すとおりになった。

表5－16によると，採取時含水量がpF 2.7以上を示す環境条件は，土壌の層位別では表層のA層に多く，下層のB層においても出現している。堆積様式では残積土，歩行土および崩積土とも出現率が高い。斜面の位置では，斜面の中腹以上で高く谷や沢筋では低い。斜面の方位別ではN，NE，Eで特に高い。地質別では何れの地質においても出現しているが，特に石灰岩，火成岩土壌で高い。

乾燥状態を示す土壌の出現と土壌，地形，地質的条件は一般的傾向を表わしていると考えられる。すなわち，植生，温熱，風などの影響による土壌水分の減少は表層ほど早いと考えられる。堆積様式および斜面位置は，水分の集積性と関係が深く，水分の損失要因となる風の影響も斜面の位置との関係が深い。また，山頂，尾根あるいは斜面の上部ほど土壌の水湿条件は悪くなると考えられる。斜面方位におけるN～E方向が乾燥しやすいことは，明らかに季節風の影響と考えられる。琉球石灰岩地帯に乾燥土壌の多いことは，地形的に台地を形成し凸地形であるため，常に風にさらされているものと考えられる。

4　リュウキュウマツ林分の生長と立地条件

リュウキュウマツ林分の生長状況と森林の立地条件の関係をみるため，沖縄本島，宮古島，石垣島，西表島などで調査をおこなった。調査は地質，地形および土壌型を参照に61個の調査地を設け，林分の毎木調査および土壌の断面調査をおこなった。また，18本の標準木を伐倒して樹幹解析をおこない，地位指数算定の資料とした。地位指数は，林齢20年における林分平均樹高をもって表わし，立地条件として7因子を取りあげ，地位指数との関係について検討した。その結果は，図5－6に示したとおりである。

地質と地位指数との関係は火成岩（安山岩）で地位指数が最も大きく，古生層（粘板岩，砂岩，チャート）がこれにつぎ，石灰岩（琉球石灰岩，古生紀石灰岩），国頭礫層（洪積層），第三紀砂岩の順となっている。また，斜面位置では，地位指数は尾根で小さく斜面を下るにしたがって大きくなる。土壌型別ではDR（暗赤色土，火成岩由来）で特に大きく，ついでYC•D(d)（弱乾性黄色土），YA•B（乾性黄色土）の順で，RA•Bg RY（乾性赤色土および表層グライ系赤黄色土）およびDRB•C•Ca（乾性～弱乾性暗赤色土，石灰岩由来）は，地位指数がやや似ていて最も小さい。

A層の厚さと地位指数の関係は，A層の厚さ階別にバラツキはあるが10～20cmが最も大きく，ついで21cm以上，1～10cmの順になっているが，A層を欠く場合も比較的大きい地位指数を示す。傾斜度別では11～20度で大きく，31度以上がこれにつぎ，0～10度および21～30度では大差はないが，地位指数が小さくなる。傾斜方位別では，バラツキが大きく調査点数の少ないこともあって明瞭でない。

地質母材と土壌型は対応し，また，土壌型は斜面位置や堆積様式によって出現の傾向がやや定まってくる。地質のなかで最も生長のよい火成岩（主として安山岩）に由来する暗赤色土は，比較的塩基に富んでいて生産性が高いとみなされている（松坂ら　1971）。赤色土の国頭礫層や表層グライ系赤黄色土は，一般に酸性が強く塩基に乏しく生産性が低い。これらの土壌は，定高性段丘の上部にあって比較的季節風の影響も受けやすく，乾燥しやすい地形である。表層グライ系土壌は，地形的に排水条件の悪い所に分布し，土壌の物理性が不良とみなされる。石灰岩土壌は塩基含量は多いが，分布地域が台地形を形成していて，風害や乾燥害の起こりやすい地形である。また，石灰岩地帯のリュウキュウマツ林は防風林として植栽されたものが多い。第三紀砂岩は主として西表島に分布するが，西表島における造林は島の周縁部にあって海風の影響を受けていることが予想される。

土壌型と地位指数の関係は一般的傾向を示し，乾性土壌で小さく弱乾性～適潤性土壌で大きい。堆積

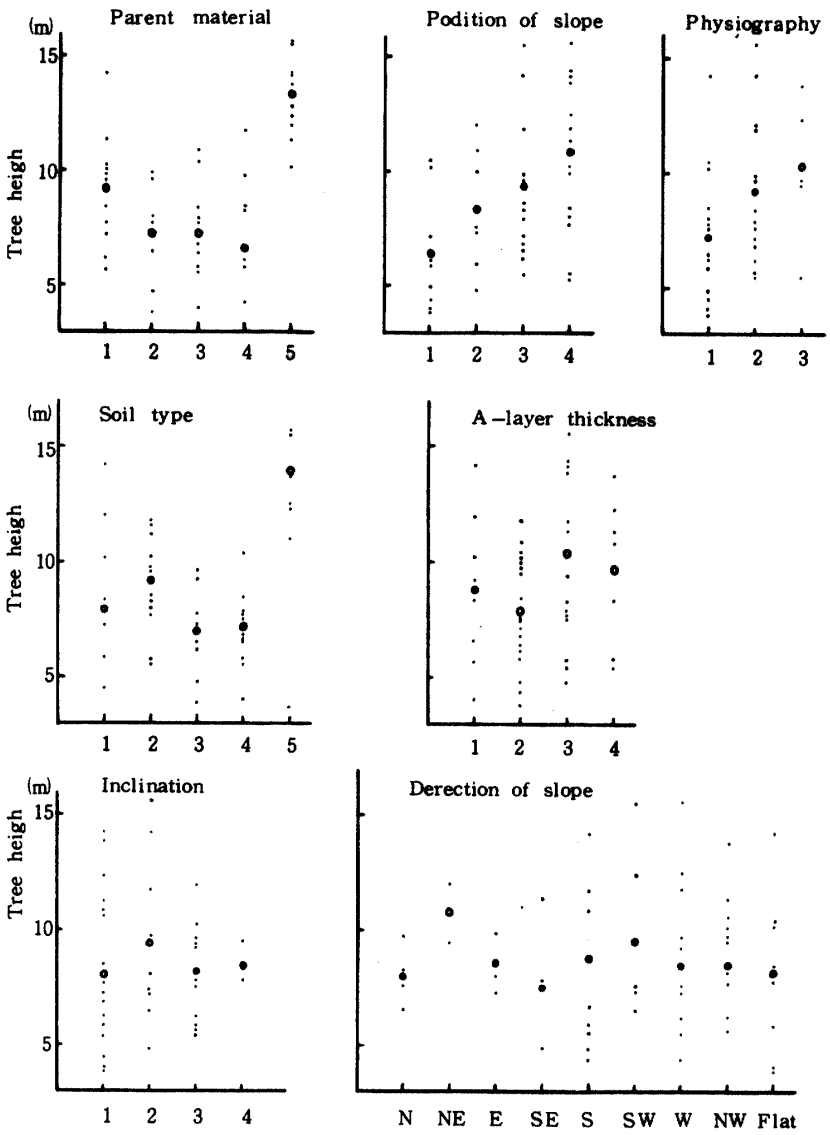

Fig. 5 − 6 Relationship between environmental condition and site index (20 years) of Ryukyu -matsu.

No.	1	2	3	4	5
Mather rock	Pareozoic rock	Kunigami gravel	Limestone	Tertial sandstone	Andesite
Podition of slope	Ridge	Upper slope	Midslope	Lower slope	
Physiography	Residual deposit	Superfical deposit	Colluvial deposit		
Soil type	YA•B	YC •D(d)	RA•B •gRY	DRB•C −Ca	DRC•D
A −layer thickness (cm)	Nothing	1 − 10	11 − 20	20 −	
Inclination	0 − 10	11 − 20	21 − 30	31 −	

様式と斜面の位置においても土壌型の出現箇所と対応して斜面の下方の崩積土地帯で生長がよく，斜面上方の尾根または残積土地帯になるにしたがって生長が劣る。このことは，斜面の上部よりは下部の方ほど土壌の理化学性は一般的に良好であるので，それぞれに対応した生長を示しているものと考えられる。図5－7に代表的土壌型別に，各調査地におけるリュウキュウマツ造林木の樹高生長を示した。

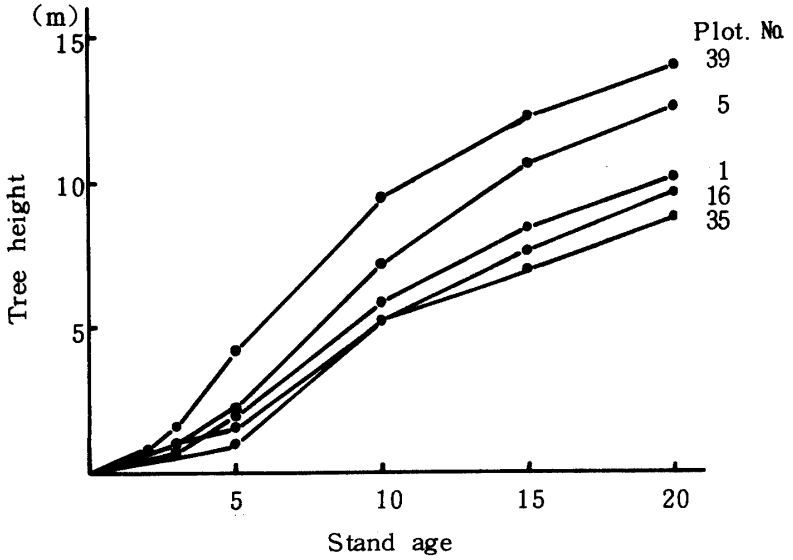

Fig. 5－7 Height growth curve of Ryukyu－matsu artifical forest in each soil types in average.

plot No 39 : DRD Andestic.
plot No 5 : YC Paleozoic.
plot No 1 : DRB Ryukyu limeston.
plot No 16 : RA Kunigami gravel.
plot No 35 : YC Tertiary sandston.

5 考　察

林分の生長にかかわる自然環境は，気象的要素と立地的要素に大別される。そして，沖縄のこれら自然環境は，比較的厳しい条件下にあるということができる。沖縄における自然環境が，リュウキュウマツの生長へ及ぼす影響を考察すれば次のとおりである。

1）降水量は，その総量ではなく期間降水量および干天日の継続する期間が問題となる。与那における期間降水量の少ない時期の発生は，夏季において多かった。また，夏季は高温による林分蒸散および地表面蒸発の最も盛んな時期であり，さらに生長期に相当するため林分にとって水分を最も必要とする時期と重複することは，林木への一層の悪影響が考えられる。

2）林木への風の影響は，直接的には生理的乾燥害，物理的障害および塩害などである。また，間接的には，土壌からの蒸発を促進させることによって生ずる土壌の乾燥の影響である。沖縄地方は，季節風が卓越し，台風の来襲も多く，その上全県が島嶼性をもっていて，これら風による生長への影響は大きいものと思われる。常風の林木への影響は，過大な蒸散によって起こる水欠差，葉温低下および気孔閉鎖など一連の生理現象を通じて生ずる光合成の低下である（牛島　1972）。また，土壌乾燥を伴うことによって生ずる林木への生理的影響である。さらに，季節風および台風時の海水飛沫による塩害も多いことが考えられる（幸喜　1969）。台風のような強風の被害を防止することは不可能と思わ

れるが，比較的弱い常風の場合は，保護樹帯の設置によって風速を減殺させ（佐藤ら 1952），あるいは，造林木の耐風性の強化を図る施業法によって，風の影響を抑制する方法を考慮する必要がある。

3）地形および土壌の影響は，林木にとって水分に関連して最も大きいものが考えられる。沖縄に分布する土壌は，断面的特徴および理学性，特に水分に関連した性質は，劣悪なものであった。リュウキュウマツは，山地斜面の中腹以上の乾性～弱乾性型土壌に生育している場合が多く，乾燥害を受けていることが予想される。表5－17は，土壌調査資料のなかから，リュウキュウマツ林分54点について検討した結果をかかげた。

表5－17によると，土壌群，土壌型別の調査数の偏りはあるが，乾燥状態にある土壌の出現は，いずれも高い頻度を示していて，調査数の3分の2以上が乾燥状態にある。層位別では表層で頻度が高く，堆積様式では崩積土で高く，残積土および歩行土で低い頻度を示していて，一般的傾向と異なるが，いずれも高い頻度である。斜面位置においても，乾燥状態の出現頻度は立地条件と一致しない面もあるが，いずれも頻度が高い結果を示している。斜面方位では，N，NE，E方位において，他よりも出現頻度が高い。沖縄における冬季の季節風の方向が，N～E方位に最も多いことから（表5－3参照），これは明らかに季節風の影響と考えられる。地質別では，資料数に均衡を欠くが，石灰岩や第三紀層および洪積層で高く古生層で低くなっているがいずれも高い出現頻度である。

これらリュウキュウマツ林地土壌の水分条件の悪いことは，土壌の理学性の劣ることや地形的条件の悪いことがあげられる。沖縄に分布する土壌の特性として，本土に多い褐色森林土と比較して容積重が著しく大きく，したがって固相部分が大きく孔隙量が小さいことであった。このことが土壌の硬度（堅密度）の高い結果として現われ，土壌の構造の発達を悪くしているものと考えられる。また，孔隙量が小さいことは，水分保持量が小さいことにつながる。リュウキュウマツに水ストレスを生じて，生育への障害を生ずる土壌水分はpF 2.7であった。林地土壌の採取時含水量がpF 2.7以上になる乾燥状態を示す場合が，林分調査数の3分の2以上にも達し，リュウキュウマツ林土壌の水分条件は，常に乾燥状態にあるといえる。また，造林地が主として水分条件の悪い乾性～弱乾性型土壌にあり，さらに，地形的にも山地斜面の中腹以上に多く，水分条件にマイナス要因となる季節風の影響も著しいものがあると考えられる。したがって，林地の乾燥を可及的に抑制するような造林法，保育法，施業法を講ずる必要がある。

Ⅵ リュウキュウマツ林分の乾燥害回避と造林技術

既述したように，林木にとって沖縄の自然環境は劣悪な環境下にあり，特にリュウキュウマツの自然的，人工的生育分布は乾性土壌に多く，常に乾燥害に曝されているといっても過言ではない。リュウキュウマツは比較的立地適応性が大きく耐乾性のある樹種とみられているが，実験結果では土壌水分がpF 2.7以上に乾燥した時水ストレスを生じて，生長への影響が予想された。したがって，林分の生長増進のためには，造林地の環境を乾燥害から回避し得る技術的方法が必要となってくる。ここでは，2・3の造林技術の問題を取り上げ，試験や調査結果に基づいた技術的方法について述べる。

1 更新法および地拵法と幼齢林の生長

リュウキュウマツの造林は，従来伐跡地の全面刈払いをおこない，数週間放置して伐倒木を乾燥させた後，全面火入れによって地拵えを実施してきた。更新は主としてじかまきによる方法，すなわち，人工下種によってなされている。その理由として，苗木の活着の悪いことや植付時期にあたる12月～3月に比較的少降水量期間が多いなどの気象条件の悪いことなどがあげられる。一方地拵経費が安価であることも理由の一つになっている。このような火入地拵法は，土壌表層の有機物をすべて焼失させ，土壌

Table 5 − 17 Environment condition for the moisture of Ryukyu − matsu forest soil dried above pF 2.7

Soil type	P_1^*	P_2^*	%
YA	3	2	67
YB	9	7	78
YC	18	11	61
YD(d)	3	2	67
	32	22	69
RA	1	0	0
RB	4	2	50
RC	4	4	100
	9	6	67
DRB	7	6	86
DRC	2	2	100
	9	8	89
gRY I•II	3	1	33
Total	54	37	69

Horizon	P_1	P_2	%
A	34	31	91
B	54	22	41
Total	54	37	69

Physiography	P_1	P_2	%
Residual deposit	25	16	64
Superfical deposit	27	19	70
Colluvial deposit	2	2	100
Total	54	37	69

Podition of slope	P_1	P_2	%
Ridge	17	13	76
Upper slope	11	6	56
Midslope	21	13	62
Lower slope	5	5	100
Total	54	37	69

Direction of slope	P_1	P_2	%
N	6	9	83
NE	9	8	89
E	6	5	83
SE	6	3	50
S	6	3	50
SW	5	4	80
W	8	5	63
NW	8	4	50
Total	54	37	69

Parent material	P_1	P_2	%
Lime ston	11	8	73
Igneous rock	3	3	100
Tertial sandston alluvial doposit	11	9	82
Pareozoic sand-ston and phyllite	29	17	59
Total	54	37	69

*P_1 : Number of investigated Plot.

P_2 : Number of the Plot in which soil moisture drid above pF 2.7

の悪化の一因になるとともに土壌保全上からみても，良い方法とはいえない。さらに，火入地拵法は，前植生の伐根や地表に落下した種子までも枯死させるので，有用広葉樹との混交林誘導への期待が低く，リュウキュウマツ単純林となる恐れが多いので，生態的にみても好ましくない。しかしながら，一方では火入地拵法は，地表上層を焼土することによって物理性をよくし，その結果リュウキュウマツの生長が著しくよいという説も聞かれる。そこで，苗木植栽とじかまきや地拵えの違いが，リュウキュウマツ幼齢林の生長へ及ぼす影響を明らかにするため，実地試験をおこなった。

1）試験方法

更新をじかまきと苗木植栽の2通りとし，じかまき法における地拵法を1）全面焼払い法，2）植穴焼法（植穴部分だけを焼く），3）標準法（全然火入れをおこなわない）の3通りに区分した。苗木植栽に用いた苗木は，ペーパーポットによって育苗した1年生苗木（山盛ら 1976）である。試験地における種子のまきつけは1974年1月におこない，同時期にまきつけたポット苗木は1年間苗畑で養成し，翌1975年2月に現地へ植栽した。試験地は与那演習林にあって，30度前後の東斜面で全面積0.4 ha，各試験区は4等分にした0.1 haである。

2）結 果

試験開始後1年毎の地際直径および樹高の生長経過を図6－1に示した。

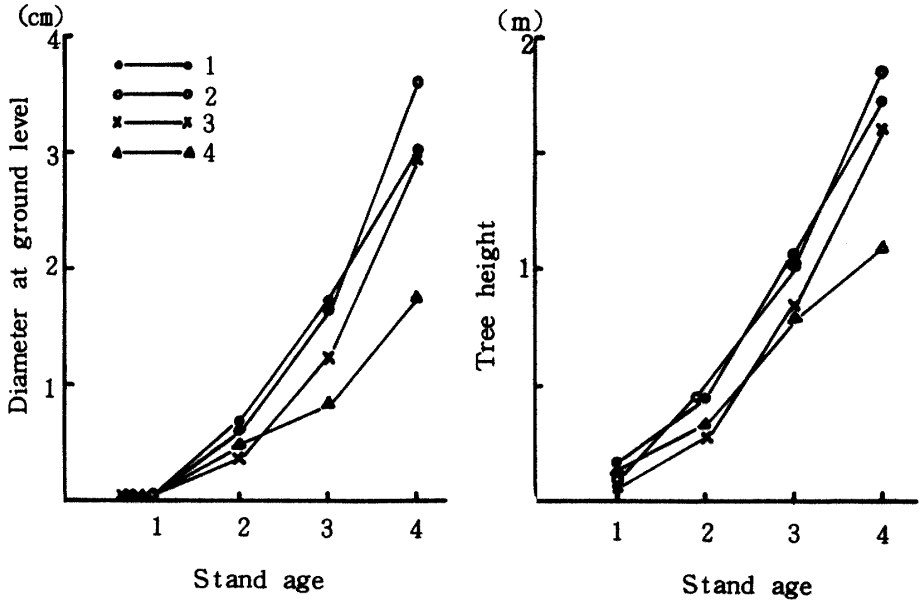

Fig. 6－1 Growth curve of diameter at ground level and tree height on experiment of regeneration and land preperation.

1：Standerd land preperation and sowed seeds.
2：All burning land preperation and sowed seeds.
3：Spot burning land preperation and sowed seeds.
4：Standerd land preperation and planted pot seedlings.

じかまきおよび苗木植栽の違いによる生長経過は，地際直径および樹高ともに苗木植栽区において劣っている。地際直径の生長は2年目まではじかまき区と差はないが，3年および4年目には生長差が大きくなってきている。樹高成長では，3年目まではじかまき区とやや同じ生長を示しているが，4年目で生長差が表われている。

次に，地拵法別の生長経過を比較すると，地際直径および樹高生長ともに地拵法の違いによる差はほ

とんどみられない。強いていえば全焼区で生長がやや良好で，穴焼区でやや劣るが三者間には大きな差はない。

ポット苗木の養成は，根の発育がポット内に制限されるため，根切り的効果を示すことが考えられる。一度切断された根は，十分な根系を拡張するまでには比較的長期間を要するものと思われる。根系調査を実施した資料（Ⅲ－3）によっても苗木植栽木の根系は，水平的，垂直的に分布量が比較的小さかった。スギ幼齢木の根系形態からみても，苗木植栽木は株を中心に余り広くない範囲での発達形態をみせている（須崎　1968）。

火入地拵えは焼土によって地表部の理化学性を良くするので，林木の成長によいといわれている（原田ら　1951）。焼土によって表層の物理性がよくなるといっても，ごく地表層に限定されるし，植物養分となる無機物の増加は林木の生育に速効的結果をもたらすことが考えられるが，持続的なものではない。むしろ有機物を消失せしめ，地表を裸にすることによって表土の流去が増加するなど土壌保全上からの逆効果の方が大きく，林地をせき悪化させるものと考えられる。本実験結果は4年間の成績に過ぎないが，ほとんど生長に差がなく，地力の維持増進の上からも，火入地拵法は回避すべきことを示唆している。林地の水分維持上からも，地被物を残存せしめて地表面からの蒸発量を可及的に低下させる必要がある。そのためにも林地内の有機物の焼失や除去は，絶対避けるべきだと考えられる。

2　仕立法および立木密度

森林の保育は，森林の生産目標に対して経済的に有効に育成していくことにある。といっても林分の構造は極めて複雑であって，林木自体のもつ性質や生育に関与する環境によっても種々の変化を示す。リュウキュウマツは，一般に枝張りが大きく暴れ木的性状があるが（大山　1970），一方立木密度が高くなると，むしろ貧弱な形態を示し，共倒れ型の林相になる場合もしばしば見受けられる。

ここでは，リュウキュウマツ林分の幼齢林における仕立法の違いや成木林での除伐によって立木密度を変えた場合，生長がどのように変化するかを現実林分で試験した。

1）試験方法

与那演習林の林齢3年生の幼齢林で，植穴あたりの仕立本数の異なる試験地を設けた。仕立法は一穴あたり1本区，2本区，3本区および放置区（5～6本）の4通りとした。

成木林における密度試験は，じかまき造林によって成林した林齢8年生の林分のなかに，立木密度を基準区（収穫表による立木密度），疎区，密区，放置区（除伐るおこなわない）の4通りに区分し，立木の除伐整理をおこなった。試験地設定当初のha当りの立木密度は，放置区：13,200本，密区：6,400本，基準区：5,100本，疎区：2,900本であった。

以上のような各試験地は各々3回くり返しになっている。林分の形質測定は，毎木の胸高直径，樹高，枝下高および立木数などについておこなった。

2）結　果

幼齢木の仕立法試験の結果を表6－1に示した。図6－2は表6－1を図化したものである。

Table 6－1 Results of clearing cutting treatment on 3 years Ryukyu－matsu stand.

Year after treatment	D. B. H (cm)				Tree height (m)				Clear lenght (m)				Number of tree per a			
	1	2	3	c*	1	2	3	c*	1	2	3	c*	1	2	3	c*
At start	2.0	1.9	1.6	1.8	1.5	1.5	1.3	1.4	0.3	0.3	0.3	0.3	45	93	109	151
2	2.9	2.5	2.2	2.5	3.1	3.0	2.6	3.1	0.6	0.7	0.6	0.7	45	83	104	138
3	4.0	3.3	3.2	3.0	4.3	4.1	4.1	4.1					45	81	102	130
4	6.5	6.0	6.0	5.6	5.6	5.7	5.8	5.7	1.4	1.4	1.7	2.0	45	81	101	123

*1：A tree　　3：Three trees per clump
2：Two trees per clump　　c：Left in nature (five－six per clump)

Table 6－2 Test of significance

Fastors	D. B. H	Tree height	Clear lenght
Clearing cutting	14.9904**	5.2953*	3.0568
Progress of the year	56.5207**	133.2358**	74.0721**

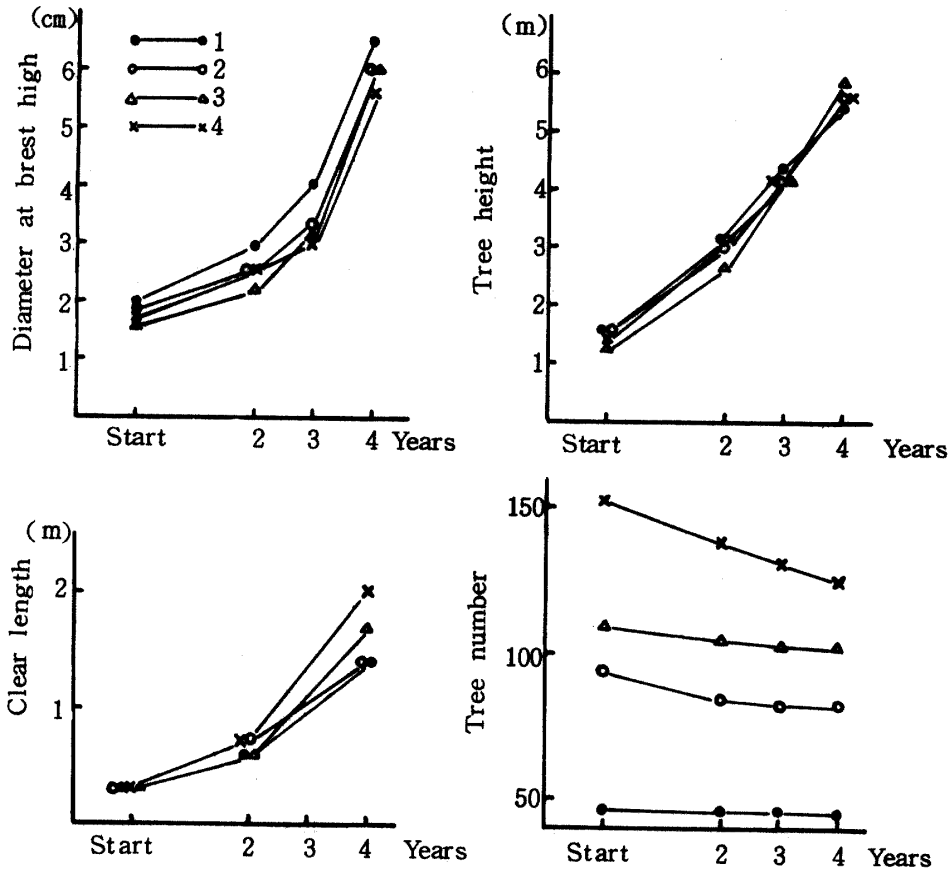

Fig. 6－2 Changes of diameter at brest high, tree height, clear lenght and tree number on experiments of cleaning cutting.

1 : A tree.
2 : Two trees per clump.
3 : Three trees per clump.
4 : Left in nature (five－six per clump).

胸高直径は，1本区は他に比較して生長が比較的大きく，2本区および3本区はほとんど同様の生長経過であり，放置区の生長が最も劣っている。樹高生長は各区ともほとんど同じ成長をしていて差がない。枝下高は試験開始後2年目まではほとんど変らないが，4年目には放置区，3本区の順に大きく，2本区および1本区は同じ大きさで前二者に比べて小さい。立木本数の減少状況は，放置区で直線的に急激な減少がみられ，3本区および2本区では放置区に比べて減少率が小さく，1本区では本数減少は

みられない。

成木林の密度試験の結果を表6－3および図6－3に示した。

Table 6－3 Result of the experiment of stand density in 8 years Ryukyu－matsu stand.

Year after treatment	D. B. H (cm)				Tree height (m)				Clear lenght (m)				Number of tree per a			
	c	h	s	l*	c	h	s	l*	c	h	s	l*	c	h	s	l*
At start	3.6	4.8	4.8	5.0	4.0	4.6	4.4	4.1	1.2	1.2	1.1	1.2	132	64	51	29
2	5.5	6.0	5.9	6.2	5.1	5.9	6.0	6.5	2.1	2.0	1.9	1.5	97	59	47	27
3	5.7	6.4	6.6	7.2	5.6	6.6	6.1	6.9					82	57	46	27
4	6.2	7.3	7.7	8.6	7.5	8.4	8.2	8.6	3.2	3.2	3.2	2.4	81	53	44	25

*c : Left in nature　　s : Standerd density
h : High density　　l : Low density

Table 6－4 Test of significance

Factors	D. B. H	Tree height	Clear length
Tree density	9.6890**	1.2953	0.0904
Progress of the year	392.7326**	667.5361**	2.3351

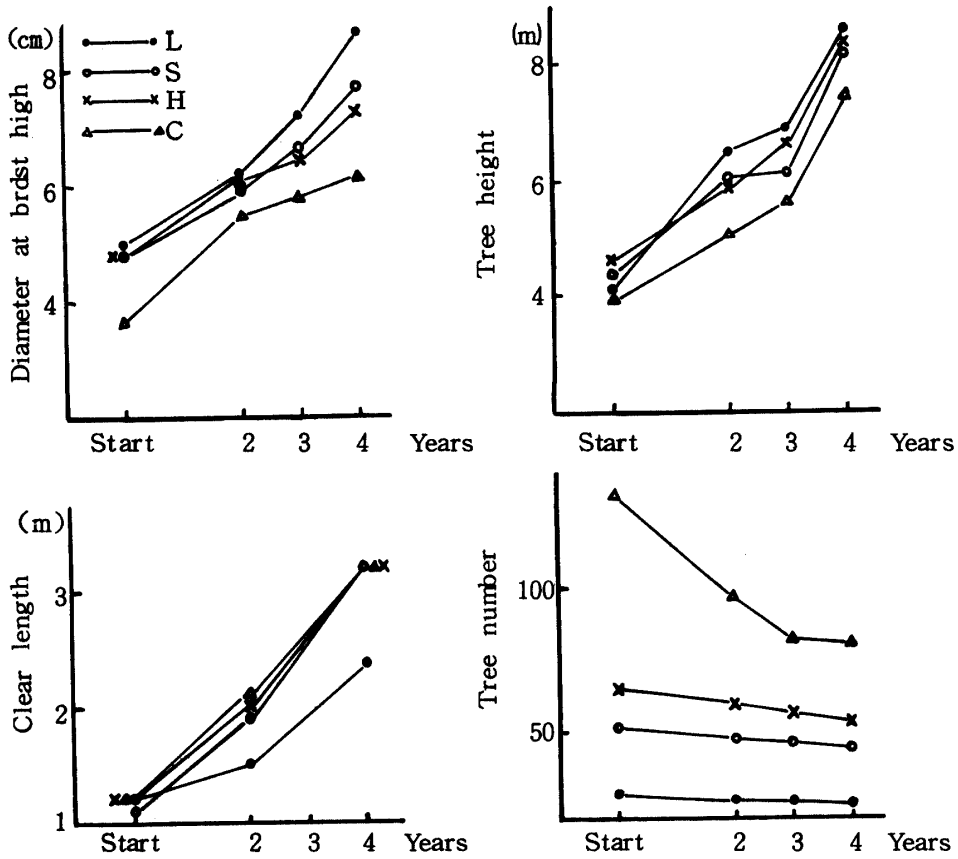

Fig. 6－3 Changes of diameter at brest high, tree height, clear length and tree number on experiments of stand density.

L : Low density.　　H : High density.
S : Standerd.　　C : Left in nature.

表6－3～4，図6－3によって密度試験の結果を検討すると，胸高直径の生長経過は立木密度の小さい区ほど生長量が大きくなっている。基準区および密区はやや類似しているが，疎区では他に比べて生長量が大きく，放置区では最も小さく試験開始後3年目から生長カーブが緩やかとなり，明らかに生長減退が認められる。樹高生長は各区ともほとんど同様な傾向を示しているが，3年目に生長が減退していることは，台風による梢頭部の折損などの被害があったためである。枝下高では放置区，密区，基準区の各区では疎区に比べて明らかに枯れ上がりが大きいことを示している。立木本数の減少状況は，放置区で最も急であり，他はおおむね類似した減少経過を示すが，疎区における本数減少が最も小さい。

立木密度と林分の生長との関係については多くの報告がある。佐藤ら（1955）は，立木密度と各部量との関係をとりまとめたなかで立木密度が低いほど大きいものとして平均胸高直径，単木の幹材積および生長量，クローネの大きさ，クローネ率などをあげている。また，立木密度が高いほど大きいものは，枯損率，単位面積あたりの幹材積など，立木密度に影響されないものとして樹高，単位面積あたりの幹と枝の合計材積および葉の量としている。

本実験では，試験開始後4年間の結果であるが，すでに密度効果が表われていることを示している。すなわち，仕立法試験において立木密度の高い放置区で立木本数が急減し，立木本数のあまり減少しない他の区においても枝の枯れ上がりが急速に高くなりつつある。胸高直径には明瞭な変化はみられない。密度試験区においても立木本数および枝の枯れ上がり高について同様なことがいえる。密度試験区における胸高直径は，放置区で生長が低下し始めていて，明らかに過密であることが認められる。

リュウキュウマツの現実林分収穫予想表（辻本　1963）によると，立木本数は5年で8,000本，10年で5,000本，15年で2,640本であった。これを基準密度として各試験区と比較すると，仕立法試験区の2本仕立区が基準密度となり，密度試験区では基準区がこれに相当する。何れの試験区の放置区を除いた基準密度より大きい区，すなわち，3本仕立区および密度試験区の密区は，胸高直径の低下もみられず，立木本数の減少も比較的小さいので，過密であるとはいえない。林分の水収支から考慮して，地表面の蒸発量の低減やマイナス要因となる林内への風の吹き込みを防止する立場から，林分が十分閉鎖していることが望ましい。リュウキュウマツは枝の拡張が著しいので，林木の形質生長からもやや密の状態での林分構成を図って，枝条の拡張を抑制するような密度管理が望ましいものと考えられる。

3　じかまき造林におけるまきつけ時期

沖縄におけるリュウキュウマツの造林は，ほとんどが人工下種によるじかまき造林である。じかまき造林の得失として，長所は1）林地に直接まきつけるので，根系の発達が自然である。2）稚樹は発生の当初より造林地の環境に順応して生育がよい。3）多数の稚苗を生育させることができるので，自然淘汰によってすぐれた形質のものの残る機会が多い。また，短所としては1）多量の種子を必要とする。2）成林までに下刈などの保育を十分におこなう必要がある。3）乾燥，風などの気象害，島類，ネズミなどの動物の被害を受けやすいなどのことがいえる（高原　1965）。

リュウキュウマツの種子は11月頃に成熟し裂開する。発芽に適温である20～25℃の温度では，4日目から発芽を開始し2週間で約80％が発芽する（山盛ら　1974c）。したがって，自然条件下では，12月頃には林地内で稚樹が発生しているものと考えられる。沖縄の自然環境は発生間もないこれら稚樹にとって，乾燥，風，高温などの気象被害が十分予想される。

ここでは，じかまきによる林地へのまきつけ適期を調べるために試験をおこなった。

1）試験方法

試験地は与那演習林にあって，海抜高170 m，傾斜25°～31°のNW～W斜面で，天然生広葉樹林の伐跡地である。地拵えは全面巻き落し法によった。植穴は1.4 m×1.4 m（5,000穴／ha）とし，各穴とも半径20cm，深さ20cmの掻き起しをおこなった。種子のまきつけ時期は12月5日，12月28日，1月

28日，2月28日，3月31日の5区に分けた。1区の大きさは2～4列とし，5回くり返しの試験区を設けた。種子のまきつけは1穴あたり10粒宛おこなった。

生育本数および枯損本数の調査は，発芽開始後約30日間は1週間毎に，その後は約1月毎におこなった。生育状況については，初年度の生長期をほぼ完了した12月に苗高を測定した。

2）結　果

植穴あたりの発芽本数を表6－5に示し，表6－6に分散分析表を示した。また，試験期間の気象状況を知るため，与那演習林における観測値から，降水量と平均気温の季節変化および累計発芽本数を図6－4に示した。

Table 6－5 Germinated number of Ryukyu－matsu in reforestation by sowing (per sowing hole)

Date of sowing \ Repetition	1	2	3	4	5	Average
Dec. 5	3.34	2.85	2.34	2.93	3.31	2.90
Dec. 28	0.76	1.01	1.23	0.58	0.94	0.90
Jur. 28	1.68	1.82	2.74	3.11	3.03	2.50
Feb. 28	2.48	2.14	3.61	5.04	1.57	2.90
Mar. 31	2.88	7.26	5.68	5.15	3.35	4.90

Table 6－6 Analysis of variance

Source	SS	DF	MS	F
Date of sowing	40.871	4	10.217	10.036**
Repetition	4.413	4	1.103	1.084
Error	16.299	16	1.018	
Total	61.583	24		

発芽本数は3月31日まきが最も多く，12月28日まきが最も少ない。他の3区はその中間の値を示している。特に12月28日まきが少なく，1穴あたり平均1本にも達しない。図6－4から与那の気象状況をみると，1月には15℃以下の低温期と降水量の少ない時期が重なっている。リュウキュウマツの種子の発芽は，15℃以下になると発芽開始日数が長くなり，発芽勢，発芽率も低下した(山盛ら 1974 c)。同じ低温，乾燥期に遭遇したと考えられる1月あるいは2月区は3月～4月頃に発芽本数が急増したが，12月28日区では発芽本数の増加はみられなかった。このことは，種子内への吸水，乾燥，低温のくり返しがあっても発芽力を失い，発芽本数の低下となったものと思われる。3月31日区では，種子のまきつけ時期にはすでに20℃以上の発芽適温期の気温であり降水量も比較的多く，発芽本数が増加したものと考えられる。

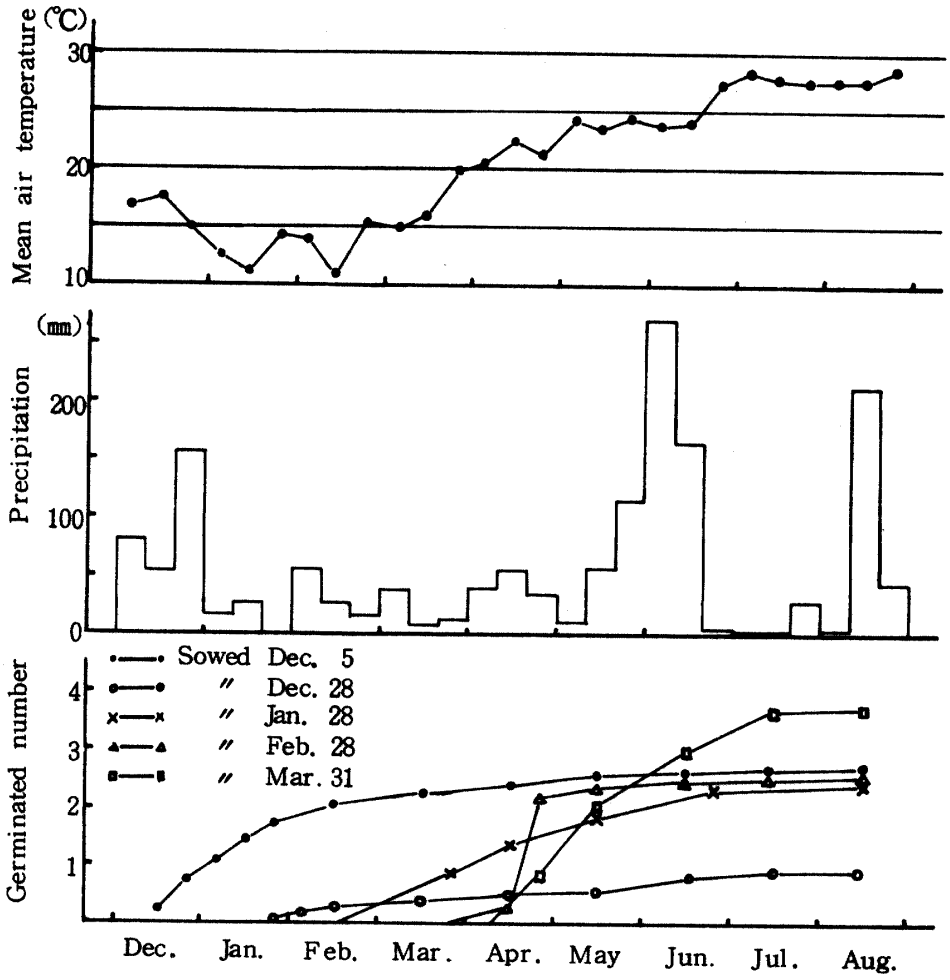

Fig. 6－4 Relationship between germinated number per sowing hole and meteorogical condition (mean air temperature and percipitation).

表6－7は，1生育期を終えた12月における植穴あたりの生育本数を示してある。

Table 6－7 Number of Ryukyu－matsu seedling in reforestation by sowing (per sowing hole)

Date of sowing \ Repetition	1	2	3	4	5	Average
Dec. 5	1.27	1.06	0.97	1.22	1.38	1.00
Dec. 28	0.58	0.74	0.72	0.47	0.31	0.50
Jur. 28	0.85	1.12	1.92	1.97	1.44	1.50
Feb. 28	1.48	1.78	2.62	3.94	1.19	2.20
Mar. 31	1.51	5.70	3.83	2.89	2.41	3.40

Table 6－8 Analysis of variance

Source	SS	DF	MS	F
Date of sowing	21.615	4	5.403	7.588**
Repetition	4.762	4	1.190	1.650
Error	11.543	16	0.721	
Total	37.920	24		

生育本数は3月31日区で最も多く，1穴あたり約3本を示し，ついで2月28日区で2本，1月28日区1.5本，12月5日区1本の順で，最も少ない12月28日区は1穴あたり約0.5本であって，約半数の植穴が無株状態を示している。

表6－9は，1生育期を終えた12月における稚苗の苗高を，表6－10には分散分析表を示した。

Table 6－9 Average height of Ryukyu－matsu seedling in reforestation by sowing at one year after sowed.

(cm)

Date of sowing \ Repetition	1	2	3	Average
Dec. 5	15.42	14.62	12.55	14.20
Dec. 28	0.58	0.74	0.31	0.54
Jur. 28	0.85	1.12	1.44	1.14
Feb. 28	1.48	1.78	1.19	1.48
Mar. 31	0.85	1.79	1.27	1.30

Table 6－10 Analysis of variance

Source	SS	DF	MS	F
Date of sowing	412.1026	4	103.0257	200.4781**
Repetition	1.1625	2	0.5813	1.1312
Error	4.1112	8	0.5139	
Total	417.3763	14		

表6－10によると，まきつけ時期別に有意差があって，くり返しによる試験区に有意差はない。したがって，地形的影響はなかったものと判断してもよい。まきつけ時期別の平均苗高を比較すると，12月5日区のみ特に大きく14cmの伸長を示すが，他の区では何れも著しく生長が悪く，特に12月28日区で劣っている。リュウキュウマツのまきつけ苗の根の伸長は，苗畑における調査によると，発芽後1カ月で約6cmに伸長し，2カ月で約7cm，4カ月で約9cm，6カ月で約11cmに伸長した（表2－2）。細根の発生も発芽後6カ月以降に多くなった。また，林地土壌は苗畑土壌に比較して理化学性に劣ると考え

られるから，根系の発達は苗畑よりおくれると推察される。まきつけ時期がおくれると，根の発育が十分おこなわれず，生長のおくれとなるものと考えられる。

以上の試験結果から，林地におけるじかまき造林のまきつけ時期は，採種後可及的早期におこない，根の発育を十分にして，夏季および秋季の乾燥期にも耐性を備えさせるようにする必要がある。したがって，比較的気温の高い11月～12月初旬頃までにまきつけをおこない，低温期の持続する12月下旬以降のまきつけは避けるべきだといえる。

4 林地肥培

一般に林地肥培は，林分の健全性をはかり生長や閉鎖を促進させ，あわせてこれに伴う下刈経費の節減効果や伐期時の収量増ないし伐期短縮をはかるなど，実用的効果を生みだすことにあるといわれている（塘 1962）。

林木を乾燥害から回避するためには，水分消失要因になる林地および林分からの蒸発散を抑制することにある。そのためには，可及的早期に林分閉鎖をはかって地表の庇陰と下草の繁茂を抑制し，林内への風の吹き込みを減少させることにあり，このことは肥培目的と全く一致する。

リュウキュウマツはごく陽性であり，下草の庇陰による稚苗枯損を避けるために，下刈手入れに多くの経費を必要としている。したがって，肥培によって林分生長を増進させて速やかな林分閉鎖をはかることは，林分を乾燥害，風害，高温害などの気象害から回避することへ直接結びつくことになると同時に，下刈経費の節減にもなり，林地肥培は極めて有効な造林技術の一つといえる。

1）試験方法

与那演習林内に肥培試験地を設置した。試験地はSW方向の15～25度の斜面にあって，上部は稜線に接し下部は斜面中腹部に位置している。地質は古生紀砂岩に属し，土壌は斜面上部YA（残積）型，下部はYC～D(d)（歩行）型である。半径30cmの十分掻起しをおこなった植穴を5,000本／ha相当設け，1穴あたり20粒の種子を2月14日にまきつけた。播種後40日を経過した3月25日から施肥をおこなった。施肥法および施肥量の組合せは表6－11に示したとおりである。肥料は植穴床面にばらまいた。なお施肥に用いた肥料は窒素（N）が硫安，燐酸（P_2O_5）が過石，加里（K_2O）が塩化加里である。

Table 6－11 Design of the experiment of fertilizer apprication on young age stand of Ryukyu－matsu.

Mark	Date of fertilization	Amount of fertilizer (g／m²) N	P_2O_5	K_2O	Block	Method of fertilization	Podition of slope
A_1	Mar. 25, 1966.	28	20	20	I (Double)	A_1	Upper・Lower
						A_1C	Lower
A_2	Jun. 31, 1966.	28	20	20		A_1A_2	Lower
B	Nov. 22, 1966.	280	200	200		A_1A_2C	Upper・Lower
						A_1A_2B	Upper・Lower
C	Aug. 1, 1967.	280	200	200		A_1A_2B C	Upper・Lower
						A_1B C	Upper・Lower
A′	Mar. 25, 1966.	14	10	10	II (Standerd)	A′	Upper・Lower
						A′C′	Upper・Lower
B′	Nov. 22, 1966.	140	100	100		A′B′	Upper・Lower
						A′B′C′	Upper・Lower
C′	Aug. 1, 1967.	140	100	100	III (Unfertilization)		Upper・Lower

Table 6－12 Mean height of trees (cm) for 5 years afer fertilization.

Block	Method of fertilization	Podition of slope	Nov. 1966		Dec. 1967		Jur. 1969		Mar. 1970		Fev. 1971	
			Height	Index*	Height	Index	Height	Index	Height	Index	Height	Index
I	A	Upper	9.5	128	14.3	99	31.0	174	79.0	182	135.0	199
		Lower	11.8	159	69.7	484	98.0	551	237.2	545	303.9	447
	A_1C A_1A_2	Upper	16.6	224	72.4	503	106.9	601	249.4	574	312.7	460
		Lower	15.3	207	78.9	548	135.7	762	458.3	594	331.4	487
	A_1A_2C	Upper	7.3	99	14.8	103	27.3	153	96.0	221	160.6	236
		Lower	13.6	184	81.8	568	148.0	831	252.5	580	362.5	533
	A_1A_2B	Upper	15.3	207	51.0	354	70.7	397	220.0	506	300.0	441
		Lower	14.9	201	91.7	637	143.9	808	245.0	563	304.0	447
	A A B C	Upper	15.0	203	45.4	315	87.2	490	188.8	434	259.4	381
		Lower	12.8	173	96.1	667	161.6	908	288.7	664	403.1	593
	A B C	Upper	9.3	126	17.0	118	26.0	146	85.0	195	140.0	206
		Lower	10.1	136	73.8	513	134.6	756	239.5	551	298.9	440
II	A′	Upper	9.2	124	10.8	75	20.4	115	40.0	92	48.0	71
		Lower	18.6	251	57.5	399	97.3	547	182.2	419	227.3	334
	A′C′	Upper	9.8	132	14.0	97	21.3	120	51.3	118	82.0	121
		Lower	20.3	274	50.4	350	79.0	444	165.2	380	200.4	295
	A′B′	Upper	17.2	232	40.5	281	76.2	428	124.0	285	216.3	318
		Lower	19.5	264	43.2	300	78.8	443	157.3	362	192.1	283
	A′B′C′	Upper	13.0	176	37.8	263	62.8	353	141.3	325	167.2	246
		Lower	16.0	216	52.5	365	96.0	539	203.0	467	244.5	360
III	Unferti-lization	Upper	7.4	100	14.4	100	17.8	100	43.5	100	68.0	100
		Lower	10.7	145	24.7	172	40.3	226	109.2	251	145.1	213

* Index : III block upper slope as 100

2）結 果

各調査時における樹高を試験区別に表6－12に示した。

各施肥法別，調査年別の樹高は極めてバラツキが大きい。指数で比較すると最小は1971年A′斜面上区の71，最大は1969年A_1A_2BC斜面下区の908の広い範囲にまたがっている。傾向として斜面下の区は斜面上の区より指数が大きく，基準区のⅡブロックは倍量区のⅠブロックより指数が小さい。また，施肥のくり返しの多いほど指数が大きい。

以上のような傾向をなお明瞭にするためにとりまとめたものが表6－13および表6－14である。

Table 6－13 Comparision of mean height of trees (cm) on block and podition of slope for 5 years after fertilization.

Block	Podition of slope	Nov. 1966		Dec. 1967		Jur. 1969		Mar. 1970		Fev. 1971	
		Height	Index*	Height	Index*	Height	Index*	Height	Index*	Height	Index*
Ⅰ	Upper	12.8	173	31.0	215	56.0	315	141.0	326	208.7	307
	Lower	13.2	178	83.1	577	136.7	768	285.0	655	339.0	499
Ⅱ	Upper	12.3	166	25.8	179	45.2	254	89.2	205	128.4	189
	Lower	18.6	251	50.9	353	87.8	493	167.9	386	216.1	318
Ⅲ	Upper	7.4	100	14.4	100	17.8	100	43.5	100	68.0	100
	Lower	10.7	145	24.7	172	40.3	226	109.2	251	145.1	213

*Index：Ⅲ block upper slope as 100

Table 6－14 Comparison of mean height index of trees on podition of slope and method of fertilization at 5 years after fertilization.

Block	Ⅰ							Ⅱ				Ⅲ
Method of fertilization	A_1	A_1 C	A_1 A_2	A_1 A_2 C	A_1 A_2 B	A_1 A_2 B C	A_1 B C	A′	A′ C′	A′ B′	A′ B′ C′	Unfertilization
Upper slope	199	–	–	236	441	381	206	71	121	318	246	
				292					189			
						241						100*
Lower slope	209	216	228	250	210	278	206	157	138	132	169	
				228					149			
						189						100*

*Index is Ⅲ block as 100

表6－13によると，各ブロックの各調査年における斜面下の樹高指数は，斜面上より常に大きい。斜面の上，下別にみると施肥基準量区のⅡブロックは，倍量区のⅠブロックに比較してほとんどの区において指数は小さい。また，対照区のⅢブロックでは施肥区のⅠ，Ⅱブロックに比べて常に小さい。

表6－14によって，5年経過後の樹高指数を比較すると，斜面上のA′区を例外としてほとんどの試験区で対照区より樹高指数が大きく施肥量，追肥回数，追肥時期では判然とした結果がみられないが，平均値で比較すると倍量区で樹高指数が大きい。基準区で対照区の約2倍，倍量区で約3倍の平均値を示している。

斜面下区で樹高指数を比較すると，倍量区のⅠブロックでは基準区のⅡブロックより各試験区とも樹高指数が大きい。また，追肥回数の多い区に樹高指数の大きい傾向がみられる。平均値でみると，施肥基準量区は対照区の約1.5倍，倍量区で2.3倍の指数を示している。全体として斜面上区は斜面下区よりも肥効が大きい結果を示している。

以上のことから，リュウキュウマツ幼齢林の肥培効果は著しいことが認ゆられた。また，施肥区と無施肥区は形態的に大きな違いが見受けられ，施肥区では輪枝の発育が著しく，3年目の秋には林分が閉鎖して下刈りの必要がなくなった。反面無施肥区では，特に斜面上区で5年後もなお林分は閉鎖せず，輪枝の発達は極めて悪かった。山内（1971）のリュウキュウマツ肥培試験においても同様な結果をみていて，4年目から下刈りを省くことができたとしている。

塘（1971）がおこなったアカマツ幼齢林の肥培試験（3回くり返し施肥で6年生林分の結果）によれば，無施肥区を100とした指数で算定すると，施肥区の樹高は113～148であった。これに比べて本試験では，基準量区で71～318，平均189，倍量区で199～441，平均272を示し肥効の著しいことが認められた。

与那演習林の資料によれば，リュウキュウマツの下刈りは普通4年目まで実施されている。このことは，下刈りのおこなわれている間は，十分な林分の閉鎖がなされていないことになる。林分の乾燥害からの回避のためには，速やかな林分閉鎖をはかることにあり，本試験の結果から林地肥培は，極めて有効な手段になるといえる。

5　保護樹帯の設置

沖縄では古く蔡温時代から更新地の周縁に，保護樹帯（抱護）を設置することを令達によって義務づけられていた。抱護の立地的特性は地形要素と気象要素とを対応させた考え方で，特に谷風を防止して林分湿度の保持に留意した概念であって，気象条件の厳しい沖縄に適した施業法と考えられる。

戦後の拡大造林によって，数haにもおよぶ広い面積の一斉造林がおこなわれるようになり，保護樹帯の設置がみられなくなった。リュウキュウマツの造林不成績地は，経費節減から派生した手入れ不足も原因となっているが，適地範囲以上に広げたことと保護樹帯の設置を無視したことがおもな原因とみなされている。保護樹帯の設置による効用は，主として季節風の吹き込みを防止することにある。このことは，林内湿度を高め，林木の過剰な蒸散を低下させ，地表面および植生からの蒸発散を減少させて，乾燥害などの気象害を防止する手段となる。

与那演習林のリュウキュウマツ林分に設置したプロットは，それぞれ季節風をまともに受ける風衝地のプロット（78－1および79－1）と保護樹帯によって季節風の影響が少ないプロット（78－2および79－2）であった。これらの対照的なプロットによって調査された結果は既に述べたが，とりまとめて記述すると次のようになる。

調査事項	78－1，79－1（風衝地）	78－2，79－2（樹帯により保護）
頂芽の伸長量	小	大
輪枝の伸長量	小	大
針葉の伸長，重量成長	小	大
林分現存量	小	大
日当り蒸散量	小	大

調査事項	78－1，79－1（風衝地）	78－2，79－2（樹帯により保護）
林分蒸散量	小	大
土壌層内（0～1 m）の水分量	小	大
林内風速	大	小

林分現存量調査に用いたウーリッヒ第二法によって選定された標本木（優勢木）の樹幹解析により求めた樹高，胸高直径，材積の生長量を図6－5～7に示した。

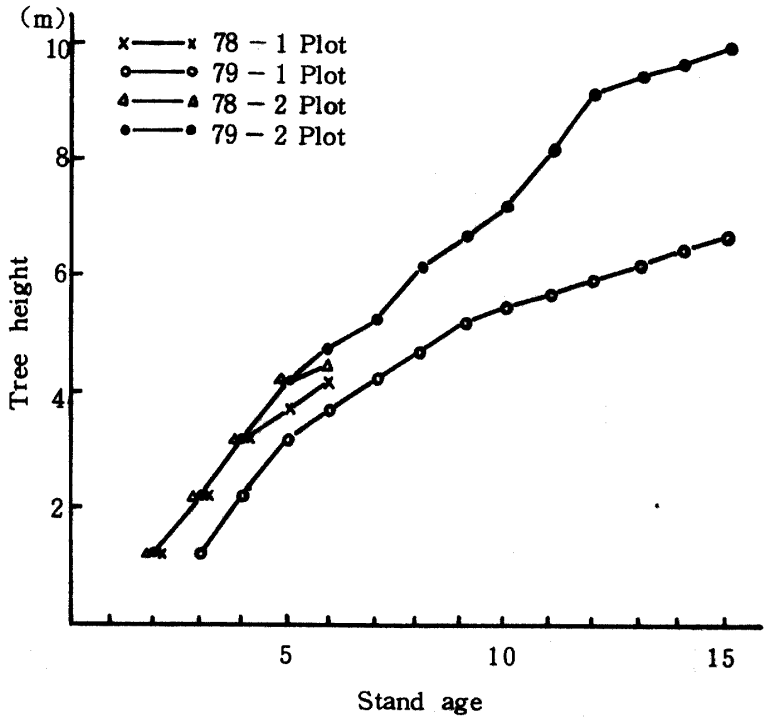

Fig. 6－5 Comperision of growth of tree height on dominant tree.

78－1 plot, 79－1 plot } Received northerly wind derectly.

78－2 plot, 79－2 plot } Sheltered from northerly wind by tree nearly.

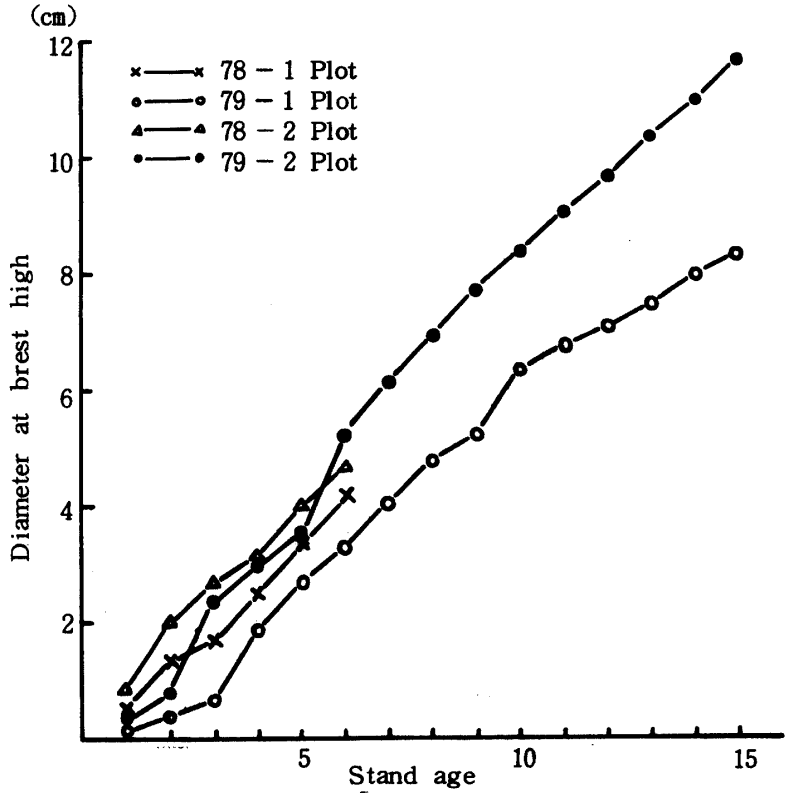

Fig. 6 − 6 Comperision of growth of diameter at brest high on dominant tree.

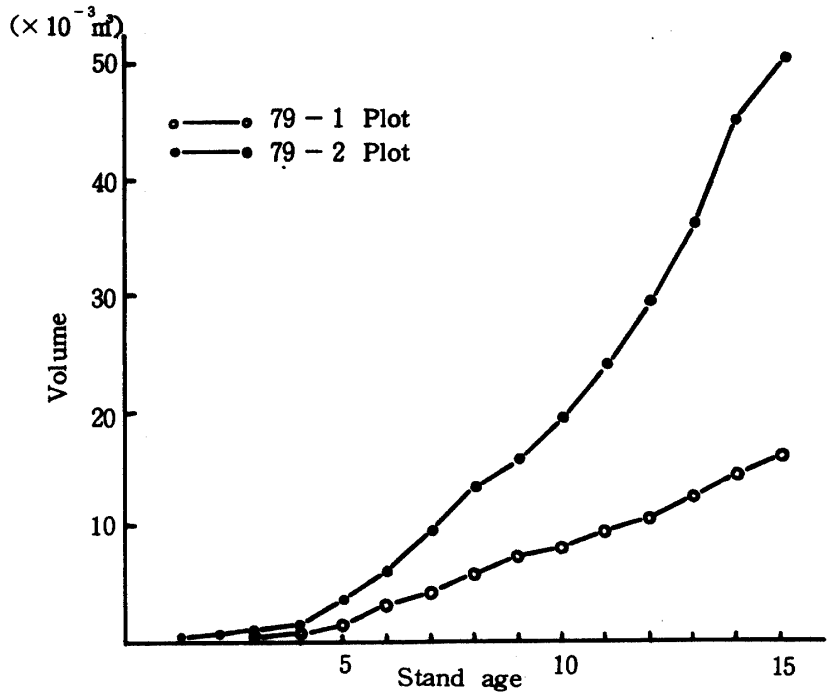

Fig. 6 − 7 Comparision of growth of volume on dominant tree.

図によって樹高生長を比較すると，幼齢林の78－1および78－2では4年目まではほぼ等しい生長量を示しているが，5年目以降から風衝地の78－1プロットは生長が低下してきている。79－1および79－2においては，幼齢時より生長差を生じていて，この傾向は6年頃より大きくなり15年では3m以上の樹高差となり，風衝地における生長低下の著しいことが認められる。同様に，直径生長および材積成長は，風衝地と樹帯に保護された林地とでは，何れにおいても風衝地で著しく生長が悪い。このことは，林分の生長に季節風が大きく影響していることを示している。

風は一時的に蒸散を高めるが，時間が長くなると樹体内で生理的乾燥をおこし，その結果蒸散量は低下してくる（佐藤　1955）。さらに，風の林内吹き込みは樹体温度，林内温度および湿度の低下や林分および地表面からの蒸発散を促進させて土壌の乾燥などを招く結果となり，林分成長へ悪い影響を与えるものと考えられる。

6 肥料木の混交効果

地力低下の防止あるいは地力増進をはかる方法として，樹種混交の問題が古くからいわれてきた。単純林，特に針葉樹の単純林では，落枝葉の分解がおそく，したがって，林地への養分還元がおくれることになり，これに広葉樹を混交して有機物の分解を容易にし，土壌中への養分の補給を促進することに混交林のおもな目的がある。さらに，単純林は気象災害への抵抗が弱く，病虫害に対しても，森林生態系内の生物相を単純化するために，危険視されてきた（四手井　1960）。

マツ類の落葉の含有成分量は少なく，分解も悪く，土壌への成分還元量は極めて少量で肥料的効果はほとんど期待できないとの報告がある（中島　1970）。したがって，落葉のN分が多く，分解も早い肥料木の混交をはかることによって，土壌の理化学性の改善，広葉樹の誘導促進，下床植生の改良等が期待される。

また，マツ類の林分では，おおむね下木として広葉樹の侵入がみられ，マツを上木とし広葉樹を下木とした二段林，あるいは中林形式の林型に遷移する場合が多い（井上　1960）。

ここでは，リュウキュウマツとソウシジュの混交林の調査結果から，肥料木の混交効果を検討する。

1）調査地の概要

調査地は，沖縄本島北部今帰仁村有林のリュウキュウマツ展示林内にあって，海岸からの距離2km，海抜高60mの地点にある。地形は，上方鞍部より全般的に北西方向に傾斜し，上方斜面は緩やかであるが，下方で約30度の斜面となり川岸に至っている。地質は古生紀結晶質石灰岩よりなる。村役場によれば，当該地は展示林設置以前は"松も生えない山"と称されていたようで，稜線附近には矮形のリュウキュウマツが孤立状に散在し，下層はコシダ，ワラビその他ごく陽性の低木広葉樹が密生していたようである。また，野火による焼失も数回くり返された。

展示林の全面積は2.5haで，地拵えは全面焼払い法による。造林は，リュウキュウマツが1962年12月に，ha当り6,000穴のじかまき造林によって実施され，ソウシジュは翌年3月に1年生苗木を用い，リュウキュウマツ同様ha当り6,000本植栽で，リュウキュウマツ播種穴の対角交点上に，すなわち交互方型植栽法によって植栽された。ソウシジュは苗木不足により一部植栽がなされていない。なお補播補植はおこなわれなかった。

保育は，川岸より約30m附近の斜面下部は雑草の繁茂が著しいので年4回，その他の林分は年2回の下刈りを植栽後4年間実施した。下刈時に，一穴当り仕立本数を2本残存するように計画したが，実行不徹底であった。肥培は一切おこなわれていない。なおソウシジュ植栽地域で，ソウシジュが全く生育していない場所があり，その減少消滅状況の経過は調査されていない。

2）調査方法

(1) 予備調査

展示林内で主として地形およびソウシジュの混交割合による生長状態を調べるため，傾斜に対する直向ベルトおよび平行ベルトを設けた。直向ベルトは川岸より約50m斜面を上昇した地点で，斜面方向にやや直角に幅10m，長さ90mの調査区を設けた。平行ベルトは，直行ベルトから斜面下方に幅10m，長さ40mのベルトを地形に応じて3個設置した。そのほかに対照区としてリュウキュウマツの単植地に，幅10m，長さ40mの平行ベルトを設けた。一調査区の大きさを10m×10mとし，したがって，調査区は合計25個になる。この調査では各区毎に樹種別の立木本数を調べ，主としてソウシジュの混交による広葉樹の侵入状況を検討した。

(2) 標準区調査

予備調査の結果をもとに，林相の違い（ソウシジュの混交割合）および地形の違い（斜面の上方および下方）によって次に述べる7個の標準調査区を選定した。

1. 斜面上部で混交割合が低い区
2. 斜面下部で混交割合が低い区
3. 斜面上部で混交割合が高い区
4. 斜面下部で混交割合が箇い区
5. 斜面上部でソウシジュが消滅し生育していない区（以下消滅区と称する）
6. 斜面下部で対照区
7. 斜面上部で対照区

以上の調査区における測定は，胸高直径，樹高のほか地床植生，A_0層および土壌断面調査，平均木の樹幹解析などをおこなった。

3）調査結果

(1) 予備調査

予備調査の結果，ソウシジュの混交本数別の各樹種の平均立木本数を表6－15に示した。

Table 6－15 Condition of the stand mixed Soshiju (*Acasia confusa*) in the Ryukyu－matsu (9 years old stand)

Number of Soshiju per ha	Number of plot	Number of tree per ha				Main species of broad leaved (No/a)
		Ryukyu－matsu	Soshiju	Broad leaved	Total	
－1,000	7	5,500	400	1,900	6,800	*Schima Wallishii* ssp *liukiuensis* (12) *Mallotus japonicus* (12) Others (4) (Total 19)
1,000－2,000	4	2,400	1,400	2,800	6,600	*Schima Wallichii* ssp *liukiuensis* (6) *Mallotus japonicus* (12) Others (10) (Total 128)
2,000	5	2,300	2,500	2,200	7,000	*Schima Wallichii* ssp *liukiuensis* (7) *Mallotus japonicus* (13) Others (2) (Total 22)
Ungrowing Soshiju	5	7,200	0	1,500	8,700	*Schima Wallichii* ssp *liukiuensis* (12) *Elaeocarpus sylvestris* (1) Others (2) (Total 15)
Unmixed	4	8,000	0	700	8,700	*Schima Wallichii* ssp *liukiuensis* (3) *Mallotus japonicus* (1) *Schefflera octophylla* (1) Others (2) (Total 7)

表によると，ソウシジュ混交のない対照区および消滅区ではリュウキュウマツの立木本数が混交区に比較して多く，広葉樹の立木本数および種数はソウシジュ混交区で多い。広葉樹のなかで最も本数の多い樹種の順位は，イジュ，アカメガシワ，タラノキ，フカノキ，タブ，カクレミノ，エゴノキなどである。そのなかで，アカメガシワやタラノキはごく陽性で植生遷移が進行すれば消滅するものと考えられる。イジュ，タブ，エゴノキその他の有用樹種はリュウキュウマツの下木として発生生育しているが，それらはソウシジュ混交区において増加する傾向が認められ，混交効果のあることがうかがわれる。

(2) 標準地調査

ソウシジュの混交割合および地形によって区分した標準地における樹種別の林分平均樹高および平均胸高直径を表6－16に示した。

Table 6－16 Investigated results of the stand mixed Soshiju in Ryukyu－matsu.

Plot*	Mean height (m)				Mean D. B. H (cm)				Number of tree (ha)			
	Ryukyu-matsu	Soshiju	Broad leaved	Average	Ryukyu-matsu	Soshiju	Broad leaved	Average	Ryukyu-matsu	Soshiju	Broad leaved	Average
1	5.95	7.00	5.14	5.81	4.98	6.65	4.06	4.84	6,800	200	1,700	8,700
2	5.78	5.95	4.82	5.61	4.58	4.71	3.84	4.31	7,700	900	1,400	10,000
3	5.59	6.22	4.46	5.43	5.40	6.04	4.72	5.39	2,400	2,300	2,300	7,000
4	6.67	6.68	5.28	6.24	6.83	5.16	3.90	5.33	2,400	2,500	2,200	7,100
5	5.32	－	4.62	5.17	4.43	－	3.86	4.31	4,900	－	1,300	6,200
6	4.95	－	4.43	4.88	4.74	－	4.13	4.67	6,100	－	900	7,000
7	5.15	－	4.95	5.15	4.17	－	4.35	4.18	11,600	－	200	11,800

*Plot 1 : Mixed rate low in upper slope.
2 : Mixed rate low in lower slope.
3 : Mixed rate high in upper slope.
4 : Mixed rate high in lower slope.
Plot 5 : Ungrowing Soshiju in upper slope.
6 : Unmixed in lower slope.
7 : Unmixed in upper slope.

表によると，リュウキュウマツの樹高生長は，ソウシジュ混交区は対照区および消滅区に比べて，何れの調査区においてもすぐれている。混交割合および地形による傾向は判然としない。ソウシジュおよび広葉樹の樹高生長もリュウキュウマツのそれと同じ傾向を示している。一方樹種間で比較すると，何れの調査区においてもソウシジュの樹高生長が最も良く，ついでリュウキュウマツ，広葉樹の順に小さくなる。

主林木であるリュウキュウマツの平均木の樹幹解析の結果，樹高および胸高直径の生長経過を図6－8に，斜面下方の調査区3区について示した。

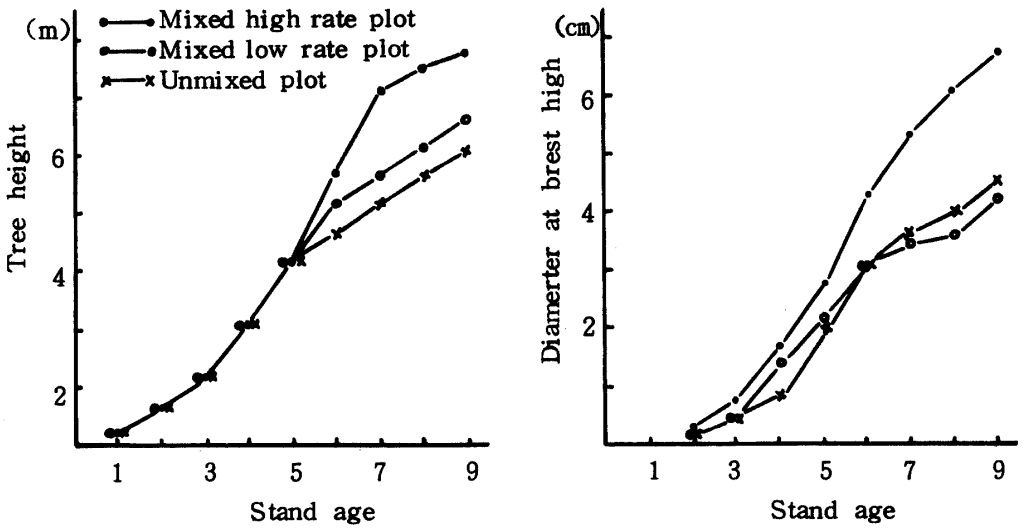

Fig. 6－8 Comparision of growth of tree height and diamerter at brest high on mean tree of Ryukyu－matsu mixed soil improving trees (*Acacia confusa*).

図6－8によると，樹高曲線は5年目までは何れもほぼ同一曲線上にあって，樹高生長の差は6年目以降に現われている。樹高生長はソウシジュの混交割合の多い区，混交割合の少ない区，対照区の順にすぐれている。胸高直径生長は，ソウシジュ混交割合の多い区でとくに著しく，他の混交割合の少ない区おかび対照区では大差がない。直径生長は立木密度に左右されるので，これら3区の上層木（リュウキュウマツおよびソウシジュ）の立木本数をみると，混交割合の多い区で4,900／ha，となっていて，これらは立木密度の相違による生長差と考えられる。

表6－17は，標準地調査区におけるA₀層の組成，A層の厚さおよび有機物含量を示したものである。

Table 6－17 Composition of A－horizon, thickness of A－horizon and Oganic matter in A－horizon of the plots.

Plot	A－horizon (ton／ha)				Thickness of A－horizon(cm)	Oganic matter in A－horizon(%)
	L	F	H	Total		
1	4.11	3.45	1.08	8.64	18.0	4.91
2	3.39	－	－	3.39	14.0	5.18
3	3.92	－	－	3.92	19.0	5.55
4	3.66	－	－	3.66	17.0	6.19
5	2.97	3.61	17.7	8.35	12.0	4.71
6	5.03	3.15	32.9	11.47	9.0	4.81
7	6.27	7.48	31.7	16.92	7.0	3.36

表6－17によると，A0層の組成がプロットによって変化のあることがみられる。すなわち，ソウシジュ混植区ではL層の集積量が少なく3.4～4.1 ton／haであるが，対照区では5.0～6.3 ton／ha でL層の集積量が著しく増える傾向がみられる。また，FおよびH層は，混植区では斜面上部のソウシジュ混植の少いIプロットを除けば，集積がほとんどみられなかった。しかしながら，対照区および消滅区では，FおよびH層の発達がみられ，特に対照区の斜面上部のF層の発達が大きい。A0層全体の量は，対照区で大きく，混植区で小さい傾向を示している。

A層の厚さは，一般的傾向として混植区で大きく，対照区および消滅区で小さい。また，A層の有機物含有量は，混植区で大きく対照区および消滅区で小さい。さらに，混植区のなかでは，ソウシジュ混植の多い区で大きく，混植の少ない区で小さい。

その他の調査事項である土壌断面調査，土壌資料の物理性および化学性について検討した結果では，プロット間にソウシジュ混植による改善された傾向は見出せなかった。

以上の結果から，ソウシジュ混植区と対照区の相違点は，広葉樹の侵入状況，生長とくに樹高生長，A0層における落葉の分解速度，土壌A層の厚さおよび有機物含有量などの点であって，明らかにソウシジュ混植による効果があったものと思われる。

肥料木の混交効果は植村（1964）によると，窒素分の多い落葉落枝が林地で容易に分解還元され，土壌の物理的，化学的および微生物的条件を改善し，とくに有機物の分解促進と林地の窒素分の増加にあるといわれている。針葉樹林に肥料木が混植される場合は，林床の分解しにくい針葉樹の落葉落枝に，養分の多い肥料木の落葉落枝が添加されることによって，土壌微生物の活動を促し，その結果，有機物の分解が著しく促進されることは一般に認められていることである。

7　考　察

リュウキュウマツ林分の乾燥害回避のための造林技術における基本的な問題は，林分からの水分消失を抑制することおよび林地の理学性を改善して土壌水分条件を良くすることにある。沖縄は，本土各地に比較して夏季～秋季の平均日射量が大きく（城間　1975a），月平均気温も高く，さらに季節風の風速は大きい（気象庁　1972）。これらの気象要素は，林木および林地からの水分消失要因となるものであり，したがって，これらマイナス要因を抑制する技術的措置が必要となる。また，一般にリュウキュウマツは地形および土壌条件の悪い立地に生育している場合が多いので，水分条件と関連する土壌の理化学性の改善に留意し，地力の維持増進をはかることが重要である。以上の観点にたって，造林技術上の問題を考察する。

1）更新法および地拵法の試験においては，短期間の結果であって，明快な解答を得るまでには至っていないが，一般におこなわれている全面火入法は，他の植穴焼法や巻落し法に比較して，リュウキュウマツの幼齢時の生長は差がみられなかった。更新法および地拵法における乾燥害回避の造林技術は，更新初期数年間における林地地表面からの蒸発量および流出量を抑制することにある。実験による推定によれば，林分における水分の消失要因のなかに占める地表面蒸発量および流出量は約57％と計算され，その比重は大きい（表4－14参照）。林分の閉鎖に至るまでの期間は，林地は裸地状態に近いと考えられるので，土壌表層は日射および風などへ直接さらされていて，地表面蒸発を増大させ，土壌の乾燥を招いているものと推察される。これらのことから，火入地拵法は，地上の有機物を焼失し，林床を完全に裸地化することになるので，乾燥害回避にとって不得策な方法といえる。さらに，地表面流出に伴って，土壌表層を流去させるなど土壌保全上からも不利な面が多い。坂本（1963）によれば，ミカン園における敷わら区は清耕裸地区に比べて，流出水量，土壌流去量および地温などを低下させ，土壌水分状態および土壌の理化学性などが好転した。したがって，地拵え時および下刈時において，枝葉や刈り取った下草などは，地表面を被覆して地表面からの蒸発を抑止するなど，マルチング効果を図る

べきである。また，広葉樹との混交林誘導を図るうえからも，伐根や落下種子を焼失させる火入地拵法は避けるべきだといえる。

苗木植栽区はじかまき区に比較して生長の劣る結果を示したが，植栽苗木は根系が切断されるためその発達がじかまきに比較して悪く（Ⅲ－3），生長がおくれるものと考えられる。しかしながら，苗木植栽造林は，苗木養成期間中の下刈省力が可能であること，形質のすぐれたものを選択することができること，じかまき造林が初年度の稚樹の時期に気象害を受け易いことなどから，苗木植栽を考慮する必要がある。ポット苗木の造林実績によると苗木活着も良好であった（山盛ら　1976）。沖縄におけるリュウキュウマツの育苗技術の確立は，リュウキュウマツの造林にとって最も重要なことである。

2）立木密度と水分関係は，葉量による蒸散量の多少が問題となるが，葉量の管理は，技術的には立木密度管理によって可能となる。仕立法および密度試験では，密度の高い自然放置区は，自己間引現象が著しく，形態的にも貧弱な樹体を示し，共倒れの恐れがあった。したがって，適宜に整理伐をくり返して適正な密度を維持する必要がある。じかまき造林においては，一穴当り数本以上の稚樹が発生生育する場合が普通で，ある時期に本数整理をおこなう必要がある。林地乾燥を防止する上で，林分閉鎖を早期に図る必要があり，したがって，幼齢林の本数整理は林分閉鎖に至った後に実施すべきだといえる。林分閉鎖を生じた時期に実施した仕立法試験およびある程度成林した林分でおこなった密度試験の結果は，収穫法（辻本　1963）による立木密度より多少密な試験区，すなわち，仕立法の3本区および密度試験の密区は過密とは考えられなかった。整理伐を実施するにあたっては，水分損失の要因となる下層植生の繁茂および林内への日射量や風の吹き込みの多くなるような過伐を避け，枝条の拡張を抑制して林木形質を高めるうえからも，多少密な状態が望ましい。試験結果からいって，じかまき造林後林分閉鎖に至る3～4年目に，一穴当り3本仕立（約10,000本／ha）の整理伐をおこない，さらに，8～10年目に約6,000本／ha相当に立木を整理する必要がある。

3）じかまき造林におけるまきつけ時期については，まきつけ時期が越年すると，生育本数の減少や生長への悪影響が著しい。まきつけ当年の稚苗の根系の発達は，比較的深部へ達する期間が発芽後約6カ月以上を要するので，まきつけ時期がおくれると，夏季～秋季の少降雨期に乾燥害を被ることが多くなるものと思われる。したがって，まきつけはなるべく早期におこない，稚樹は乾燥に耐え得る程度に生長させる必要がある。本研究や八重倉ら（1962）の結果から，12月初旬にまきつけた場合，6月下旬の梅雨明け頃までには，苗高10cm，直根長20cm以上に生長が可能であり，この程度の樹苗であれば乾燥期にも十分耐え得るものと考えられる。沖縄における月別の気温分布およびリュウキュウマツの採種時期が10～11月であることなどから，じかまき造林のまきつけは，比較的気温の高い11～12月初旬頃までにおこない，低温期の持続する12月下旬以降のまきつけは避けるべきだといえる。

4）肥培は幼齢木の生長を促進させて乾燥への耐性を強化させ，林分の閉鎖を早めることにより，林床への日光直射を防ぎ，下層植生の繁茂を抑制し，林内への風の吹き込みを抑止するなど，林分からの水分損失要因を制御することになるので，林木の乾燥害回避にとって有効な手段となる。肥培試験結果（表6－12～14）によれば，リュウキュウマツ幼齢林の肥培効果は著しいものがあった。じかまき造林は，まきつけ当年における発芽後間もない稚樹の乾燥害が最も大きいものと予想されるので，生長の促進を図って夏季～秋季の乾燥期に耐え得る苗木に育てる必要がある。実生苗の生長経過からみて（Ⅱ－2），地下部特に細根は発芽後2カ月目頃から発達するので，早春の2月～3月に要素量にして植穴当りN（硫安）2g，P_2O_5（過石）およびK_2O（塩加）をそれぞれ1～1.5g施用する。施肥は連用（2～3回）すれば効果が大きいといわれているが，この場合前回の20～40％増量がおおよその基準となる（塘　1971）。2回目の施肥は，まきつけ翌年の11月～12月，すなわち，頂芽伸長が1月初旬に開始される直前に，植穴当りN：3g，P_2O_5およびK_2O：2gをそれぞれ施す。3回目は苗木の大きさを勘案して（塘　1971），まきつけ翌々年の11月～12月に植穴当りN：8g，P_2O_5およびK_2O：

5 gをそれぞれ施用する。施肥法は肥料成分の流出を考慮して斜面上方に，植穴を中心に半円状に表面撒布あるいは地表から2～3cmの深さに施す。以上のように施肥による生長促進を図ることによって，造林初年目で苗高約13～16cm，(肥効175～216％)，2年目約70～90cm，(486～625％) 3年目約130～160cm，(730～898％) 程度の生長が十分期待でき，3年目で林分の閉鎖が十分可能である。

林分閉鎖に至った後，整理伐をおこなう必要があるが，除伐あるいは間伐後における林相の回復を図るうえで，施肥の必要がある。成木林の施肥は，リュウキュウマツの試験例はないが，地上部現存量がアカマツはスギの約半分量である（佐藤 1973）ことから，塘（1971）のスギ林分施肥例より類推して，4年～5年目の整理伐時にha当りN：30～40kg，P_2O_5およびK_2O：20～25kgを施用し，以後の整理伐においてもそれぞれ20～40％増量の施肥をおこない，林相の早期回復を図る必要がある。

5）沖縄は全県が島嶼性をもち，あらゆる気象災害にさらされているといえよう。林分の水分収支に大きなマイナス要因となる季節風，特に冬季の季節風は著しく卓越するので，沖縄で往時よりおこなわれてきた保護樹帯（立津（1937）の設置の必要がある。樹帯で保護された林地は，風衝地のそれに比較してすべての面で林分状態がすぐれていた。したがって，造林地周辺に地形に応じた保護樹帯を設置することによって，風の吹き込みを防いで過大な蒸散や林地土壌の乾燥を防止し，林内湿度を高めるなど（橋本 1973），造林木の乾燥害その他の気象害から回避させることが可能と考えられる。リュウキュウマツは天然生広葉樹林の林種転換樹種として，造林がなされる場合がほとんどで，造林に際しては地形に応じて稜線地帯に在来林分を残存させて保護樹帯とすることは容易であり，是非実行する必要がある。

6）リュウキュウマツ林へソウシジュを混植した場合，リュウキュウマツの生長，広葉樹の侵入，土壌のA層および有機物の増加など混植の効果が認められた。

肥料木の混植がマツ類の生長へ及ぼす影響を調査した報告例は多い。多くの場合，禿赭地において肥料木を混植した時に，主林木であるマツ類の生長が促進されるとしている（山田ら 1954，柴田 1954)。アカマツ落葉の各種養分含有量は少なく，落葉の分解も悪く，土壌への還元量も極めて少量であったが，肥料木類の落葉は窒素分が多く，分解率も高く，土壌への養分還元量も極めて多く，したがって，土壌酸度の緩和，理学性の改善などの効果が期待される（中島 1970）。葉に含まれる全窒素含有量は，肥料木で2.7～3.7％であるのに対して，スギ，ヒノキ，アカマツなどの針葉樹は0.8～2.0％であった（植村 1964，中島ら 1966）。

以上のように肥料木を混交した場合，窒素その他養分の多い肥料木の落枝葉の混入によって，その分解を促進し，有機物の土層への浸透を図り，A層の発達あるいは土壌構造の発達を促すことが考えられる。この結果，土壌の理学性を改善することによって，土壌体における水分保持量を増加させ，林地の水分条件を良好にする効果が期待される。

7）以上述べた結果に基いて，リュウキュウマツの乾燥害回避のための造林技術の体系化を試みる。

(1) 適地の範囲

沖縄に分布する森林土壌は，理化学性に劣り，特に水分条件が悪く，常に乾燥状態を示す土壌が多い。したがって，乾性土壌（YA•B，DA•B，DRA•Bなど）におけるリュウキュウマツの生長は期待し得ず，造林不成績地もこれらの土壌に多く見受けられる。また，これら乾性土壌の分布は，地形的に稜線附近，尾根，台地の凸地などに多く，風衝地となる場合がほとんどで，これらの地帯はむしろ在来林分を保残させて，保護樹帯としての活用を図るべきである。以上のことからリュウキュウマツの適地は，黄色土ではYC•D(d)•D，赤色土ではRC•D(d)•D，暗赤色土ではDRC•Dなどが考えられる。

(2) 皆伐面積の小規模化と保護樹帯の設置

リュウキュウマツは，天然生広葉樹の林種転換樹種として造林されてきた。おもな造林地帯である沖縄本島北部や石垣島，西表島の山岳地帯では，山塊規模が小さく地形が複雑であるので，局所地形や

林況に応じた小面積皆伐跡地の造林が必要である。この場合，地形に応じて稜線地帯には在来林分の保護樹帯の設置を必ず実行すべきである。特に，林分からの水分消失要因となる風当りの強い立地では，皆伐面積は一層狭小にする必要がある。

(3) 地拵法

地拵えに際して留意することは，土壌水分の蒸発を抑制して林地の乾燥を防止すること，土壌の物理性を増進させて，土壌水分保持量を増加させることなどである。そのためには，伐採後の枝条葉はできるだけ林地に残し，地被物を多くして地表面蒸発や下層植生の繁茂を抑制し，地表の保護を図ることにある。以上の観点から，従来おこなわれてきた全面火入地拵法は避けるべきである。また，巻落し法は刈られたものを谷間の方に落すのが普通であり，全面清掃状態になって林地に残る有機物量は比較的少なくなる。林地の乾燥防止および土壌保全の立場からの地拵法は，枝条葉全面撒布法である。急傾斜地や斜面が長い場合は，ある間隔で横に枝条末木を積み重ねた棚積み地拵えを併用する（渡辺 1965)。枝条葉が地表を被覆し，棚積みによって有機物を林地に残存させることは，土壌水分の蒸発をおさえ雑草の繁茂を抑制して林地からの蒸発散を減少させる結果となる。また，地表流出水の流下速度を低下させて土壌侵食を防止し，さらに土壌有機物源となって土壌の理化学性を改善し，水分保持力や無機養分を増加させることによって，地力の維持増進を図ることが可能となる。

(4) 更新法

従来おこなわれてきたじかまき造林においては，夏季〜秋季に頻発する乾燥期に対処するため，まきつけは比較的気温の高い11月〜12月初旬頃までに実施する必要がある。また，じかまき造林は，造林当年の発生間もない稚樹の被害が最も大きいので，1年生苗木の植栽造林を考慮する必要がある。

(5) 肥　培

リュウキュウマツの幼齢林の肥培効果は著しいものがあった。施肥は，2〜3月頃に植穴当りN（硫安）：2g，P_2O_5（過石）およびK_2O（塩加）：1〜1.5gを，植穴の斜面上部に半円状に地表面を2〜3cm掻き起して施用する。発芽間もない稚苗の生長促進，特に根系の発達は，土壌の比較的深部からの吸水が可能となり，耐乾性を強化することができる。また，施肥の連用効果を図るため，播種翌年の11〜12月頃にN：3g，P_2O_5およびK_2O：2g，さらにその翌々年11〜12月にN：8g，P_2O_5およびK_2O：5gを施用し，生長を促進させて林分の早期閉鎖を図ることは，林地の被覆，下層植生の繁茂の抑制および風の吹き込みをおさえるなど乾燥害回避の効果が期待できる。さらに，整理伐後の林相の回復を促進するため，初回（4〜5年目）にha当りN：30〜40kg，P_2O_5およびK_2O：20〜25kgをそれぞれ施用し，以後の整理伐においてもそれぞれ前回の20〜40％増量の施肥をおこなう。

(6) 下　刈

下層植生は造林木を被圧して生長を減退させ，林地からの過大な蒸散を促すので下刈作業の必要がある。沖縄地方は温暖湿潤の気候下にあって，下層植生の繁茂が著しい。与那演習林の資料によれば，リュウキュウマツは造林当年2回，2年目2回，3年目2回，4年目1回，計7回実施されている。下刈の時期は年2回の場合は初夏の5〜6月と秋の9〜10月，年1回の場合は初夏の5〜6月に実施することが基準となっている。なお苗木植栽および肥培などによって，下刈回数の削減を図る必要がある。

(7) 密度管理

じかまき造林においては，一穴当りの稚苗の発生が数本〜十数本におよぶので適宜整理をおこなう必要がある。地表の被覆および下層植生の繁茂を抑制するうえから，本数の整理は林分閉鎖後におこなう。したがって，初回目の整理伐は造林後3〜4年目に10,000本／ha程度，2回目は8〜10年目頃に6,000本／ha程度となるように実施し，過伐は避け収穫表（辻本　1963）における立木本数よりも多少密な程度の密度を維持することが望ましい。

(8) 混交林への誘導

単純林，特にマツ類など針葉樹の単純林では，落枝葉の分解がおそく，林地への有機物や無機養分の還元がおくれる。また，単純林は気象災害や病虫害に対する抵抗力が弱いといわれている（四手井 1960）。したがって，有用広葉樹との混交を図って，有機物の分解を容易にし，土壌への有機物および養分の供給を促進して土壌の水分保持量を増加させることは，造林木の乾燥害回避への手段となる。

広葉樹の林種転換にリュウキュウマツが造林される場合は，前生樹の伐根から発生する萌芽や落下種子による稚樹の発生によって，容易に広葉樹との混交がなされている。この場合リュウキュウマツの下木として有用な広葉樹を主として保残させるよう整理伐をおこなう必要がある。沖縄本島北部地方のリュウキュウマツ林で，下木混交の有用広葉樹をあげると，イジュ，コバンモチ，フカノキ，ホソバシャリンバイ，モチノキ類，モツコク，タブなどである。これらの樹種のなかで，特にイジュは天然による侵入も旺盛であり，生長もすぐれているので，リュウキュウマツ混交樹種として最も有望であり，イジュを下木とした二段林造成の研究も必要と考えられる。なお，リュウキュウマツの生長促進を図るための肥料木，すなわちソウシジュ，モクマオウ，ヤマモモ，ハンノキ，その他アカシア類などとの混交林の試験研究もおこなう必要がある。

8）リュウキュウマツの造林に際して，適地の選択を誤らず，適切な施業が実行された林分の生長量の予測をつぎに試みる。

現実林の調査結果から，林齢と樹高の関係をプロットすると，図6－9のとおりになった。

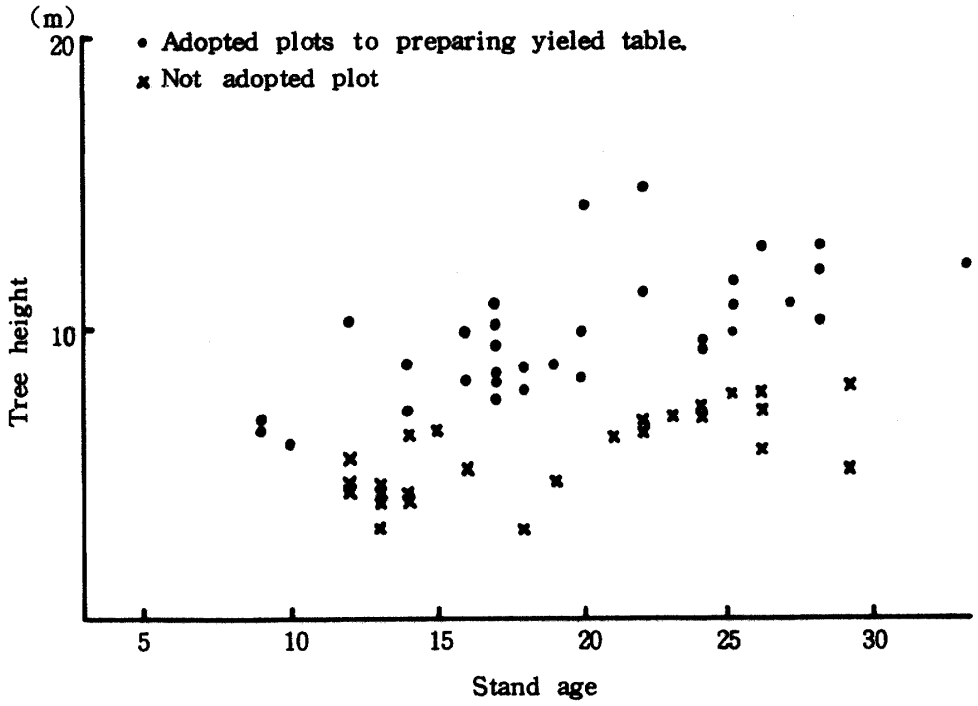

Fig. 6－9 Relationship between stand age and tree height of Ryukyu－matsu in each plot.

図6－9のなかで，環境条件が悪く樹高成長の劣る調査地は，生長量予測の資料から棄却した。棄却資料の調査地は，不適当な環境条件を示す場合が大部分を占めていた。すなわち，風衝地形で，尾根または斜面上部に位置し，堆積様式は残積土が多く，現地土壌の水分がpF 2.7以上の乾燥状態を示すな

ど，リュウキュウマツの造林に適切な環境とはいえない。

図6－9によって，良好な樹高生長を示す34個の調査地の資料より，適地における人工林分の収穫予想表を表6－18に示した。収穫予想表の構成値は，林齢との関係から求めたが，林齢（A）と平均胸高直径（D），平均樹高（H），ha当り立木本数（N）およびha当り幹材積（V）との関係式は次のとおりである。

$$\log D = A/(5.8107 + 0.5922A)$$
$$\log H = -0.0823 + 1.1572\log A - 0.2567(\log A)^2 \qquad (5)$$
$$\log N = 5.0602 - 1.4269\log A$$
$$\log V = 0.0795 + 2.4291\log A - 0.6266(\log A)^2$$

図6－10は，辻本（1963）の主として奄美諸島の資料から得られた天然生林分の収穫表，高江洲ら（1973）の沖縄における天然生林の収穫表および表6－18に示された収穫表から図示したものである。

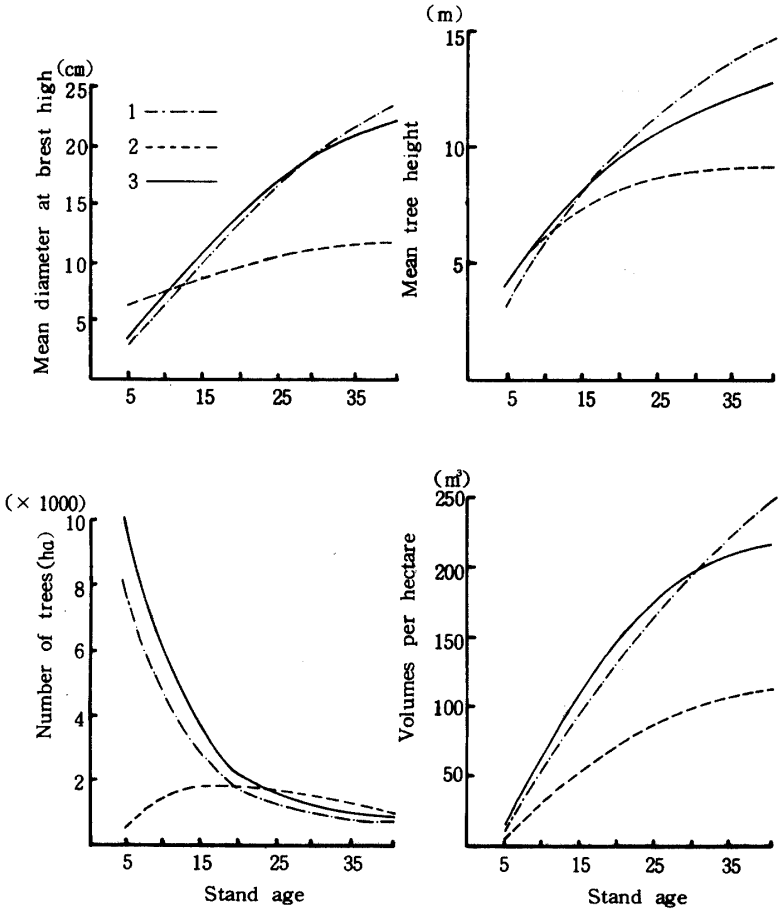

Fig. 6－10 Comparision of mean diameter at brest high, mean tree height, trees number and volume per hectare drew some yield tables Ryukyu－matsu forests.

1：Natural forest in Amami district (quoted from Tsujimoto, references number 100).
2：Natural forest in Okinawa district (quoted from Takaesu et al. references number 87).
3：Artificial forest on right site in Okinawa district (quoted from table 6－18 in this paper).

Table 6－18 Actual stand yield of artificial forest of Ryukyu－matsu

Age of stand	Mean D. B. H (cm)	Mean height (m)	Stand density (ha)	Volume (ha)		
				Ryukyu－matsu (m³)	Broad leaved tree (m³)	Total (m³)
5	3.7	4.0	10,000	20	4	24
10	7.1	6.6	6,000	60	8	68
15	10.5	8.4	2,700	107	16	123
20	13.6	9.7	1,900	148	25	173
25	16.3	10.8	1,500	180	33	213
30	18.7	11.7	1,200	203	39	242
35	20.8	12.4	1,000	220	45	265
40	22.7	13.0	900	233	50	283

図6－10によると，表6－18に示された各生長量は，奄美諸島に比較して幼齢林で大きく，高齢になるにつれて小さくなる傾向があり，奄美諸島の林分は壮齢（30年）以降も比較的生長量の大きい結果を示している。また，沖縄における天然生林分は，表6－18の値に比較して小さいが，このことは生長不良な調査地の資料を含むからと考えられる。高江洲らの収穫表のなかで，ha当り立木本数が林齢の低い箇所で減少することは，資料が胸高直径4cm以上の利用可能材について得られたからである。表6－18および図6－10によると，幹材積は適地に造林した場合20年で約150 m³，30年で200 m³以上を示し，生長不良林分を含む天然生林に比較してそれぞれ約2倍の生長量である。

表6－18に示された収穫予想表は，現実林分から得られた資料によって調整されたものである。本研究で示されたように，水分関係が最も悪い環境条件下の沖縄においては，造林木を乾燥害から回避させて，林分生長量の増大を図るためには，適地において適切な造林法および保育法や肥培および肥料木などの混植による生長促進などを実施することが必要である。これらのことが実行されることによって，リュウキュウマツ林分の生長を増大させることは可能であり，表6－18に示された値以上の生長量の実現は，十分可能なことと考えられる。

Ⅶ 研究の要約

本研究は，リュウキュウマツ造林の技術体系を確立する一環として，生長へ最も影響の大きい水分問題を取り上げ，リュウキュウマツ個体並びに林分の水分特性を解明し，沖縄における森林環境，特に水分に関連した環境が林分生長へ及ぼす影響を考察し，乾燥害回避のための造林技術問題についていくつかの問題点を取り上げ，その実験的な結果にもとづいて論及したものである。研究の成果を要約すれば次のとおりである。

1 リュウキュウマツの樹種としての重要性

リュウキュウマツは，日本のなかで亜熱帯地域にのみ分布するマツであって，同地域における主要造林樹種である。戦後の沖縄における造林面積の約62％，全林野面積の約16％，がリュウキュウマツで占められ，さらに，リュウキュウマツを適樹種とする戦災荒廃地（未立木地）や過伐による疎悪林地が

取り残されている現状から，リュウキュウマツの造林は一層拡大されることが予想される。

2　リュウキュウマツの生長特性

1）種子の発芽適温

種子の発芽適温は，実験結果によると20～25℃であった。適温以上の温度では発芽率は低下し，特に35℃では腐敗粒が増し，発芽率は著しく低かった。適温以下の温度では発芽勢および発芽率が低下し，特に10℃の低温では発芽勢が極めて悪くなった。

2）苗木の成長経過

発芽後の稚苗の成長経過は，地上部および地下部とも発芽後6カ月経過した頃より急速な伸長がみられた。側根の発生は地表部近くに多く，地下10cm以下では著しく少なかった。これらのことから稚苗は，夏季における乾燥害にかかり易いと考えられるので，地拵えを十分になして，種子のまきつけを早期（12月初旬まで）におこない，施肥によって生育の促進を図るなどの必要がある。

3）生長型と伸長量

幼齢林の頂芽および輪枝の伸長は，1月より開始され3月に最も伸長量が大きく，5月からの伸長は急に減少した。しかしながら，7月と10月に伸長ピークが見られが，このことは新芽の伸長によるものであった。

針葉の伸長は，頂芽よりややおくれて開始されるが，頂芽と同様に伸長ピークがみられた。

幼齢林の新芽の形成回数は，1回，2回および3回の3つのタイプに分けられる。これらの形成回数は，個体および環境による違いは認められず，林齢の経過とともに大部分の個体が年1回出芽タイプに変化した。すなわち，リュウキュウマツは幼齢時は多節型であって，したがって，生長が早くおおよそ7～8年で単節型になるものと考えられる。

4）林分現存量

6年生林分および15年生林分のha当り生重量，乾物量および水分量を標本木調査により推定した。林分現存量は，林分生長量の大きいプロットほど，また，地形的にすぐれたプロットほど大きい値を示した。葉齢別着葉量からリュウキュウマツの針葉の寿命は2年と推定されるが，地形的に劣るプロットでは落葉が早くなる結果を示した。

5）根系の分布

4年生林分の根系の水平分布は，株を中心に半径40cm以内に集中するが，地表面に近い水平根は140cm以上に達し，林木間の根系競合のあることが認められた。根系の垂直分布は，地表から20cm以内に多く，深さを増すにしたがって分布量が減少し，80cmの深さ以上の根系分布は極めて少なかった。また，ポット苗造林木はじかまき造林木に比較して，根系の発達の悪い結果を示した。

3　リュウキュウマツの水分特性

1）リュウキュウマツの蒸散係数

リュウキュウマツの蒸散係数を他の2樹種と比較すると，センダンより小さく，モクマオウより大きいことが判明した。このことは，樹種間の水利用の特性の違いによるものと考えられ，水利用の効率はモクマオウ，リュウキュウマツおよびセンダンの順に低い結果を示した。

2）苗木の蒸散量およびNWPの日変化

リュウキュウマツ2年生ポット苗木の蒸散量およびNWPの日変化は，規制因子である気温，飽差および放射の日変化に鋭敏に反応して変化することが認められた。

3）水欠差のおこる環境条件

(1) 異なる水分条件下で育てた苗木の蒸散量およびNWPの日変化

苗木の乾，潤および湿に区分して育てた苗木の蒸散量の日変化は，乾で常に小さく，湿および潤の順に大きい値を示した。NWPの日変化は，乾で常に低く，潤および湿の順に高かった。蒸散の停止した後の夜間におけるNWPは，湿および潤で－1.5バール，乾で－3.5バールを示した。これらの値の違いは，水ストレスの受け方の強弱を示しているものと考えられる。

(2) 土壌の乾燥に伴う苗木の蒸散量，NWPおよび含水率の変化

通常に育てた苗木に対して給水を断ち自然に乾燥させると，日数の経過に伴って蒸散量，NWPおよび針葉の含水率の低下が認められた。これらの低下現象は土壌水のpF 2.7附近までは徐々に，pF 2.7以上になると急激になった。したがって，リュウキュウマツが水ストレスを受けて蒸散量が低下して生長減退のはじまる土壌水分条件は，pF 2.7附近であることが推定された。また，永久萎凋点pF4.2附近でのNWPは－36バール，針葉の含水率は107％であった。

(3) リュウキュウマツ苗木の蒸散作用におよぼす風の影響

風曝による蒸散量の一時的促進は，一時間毎に測定した場合4／sec.で最も大きく，4 m／sec.以上および以下の風曝では小さかった。風曝時間が長くなると蒸散量は逆に減少してくるが，風曝開始前と同等の蒸散量になるまでの時間は，8 m／sec.で特に短く2時間を示し，他は4～5時間であった。

4）成木の蒸散量およびNWPの日変化，季節変化

成木の蒸散量とNWPとの相関は極めて高いことが認められた。したがって，季節別に関係式を求めておくと，NWPの測定のみで蒸散量の推定が可能である。季節別の蒸散量は，盛夏の7月に最も大きく，新芽の伸長期に相当する2月がこれにつぎ，伸長衰退期の11月に最も小さかった。

4 リュウキュウマツ林分の有効水分の特性

リュウキュウマツの水分経済において，水分の供給要因としての降水量は，気象観測値を用いた。水分の損失要因については，次に述べるような実験により推定した。

1）地表面蒸発量

気象観測露場内でおこなった実験によると，地表面蒸発量と水面蒸発量との間には高い相関が認められた。したがって，これらの関係式によって地表面蒸発量の推定をおこなった。

2）地表面流出量

リュウキュウマツ林内に設置した測定装置によって自然降雨時の地表面流出量を測定した。流出量の算定は，1日当りの降水量階毎の流出率から月毎の流出量を推定した。

3）リュウキュウマツ林分の蒸散量

リュウキュウマツの切枝法による蒸散量と気温および放射との相関は高いので，蒸散量（Tr：mg／g・fw・day）と平均気温（t：℃）および積算放射量（r：cal／cm²・day）の関係式を求めると次式を得た。

$$Tr = 89.55 + 0.16t \cdot r$$

したがって，林分の蒸散量は，平均気温および積算放射量と林分の着葉量との函数として推定することができる。平均気温および平均積算放射量は気象観測値により，林分着葉量は現存量調査によって得られた実測値をそれぞれ用いて計算し，林分の蒸散量を推定した。

4）根系分布域の土壌水分動態

テンションメーターによる林地水分の測定をおこない，土壌深度別の水分動態について検討した。リュウキュウマツの生長への影響を及ぼすと考えられる土壌水pF 2.7以上の乾燥状態の出現する頻度は比較的高いことが認められた。また，このような乾燥状態は土壌の表層ほど多く，特に立地的に劣る箇所，

例えば風衝地は測定期間中の約3分の1が乾燥状態を示した。これらの結果からみて，沖縄における林地土壌は比較的頻繁に乾燥に見舞われていて，特に表層でその傾向が大きいことが推察された。

5）リュウキュウマツ林分の有効水分の収支

リュウキュウマツ林分の有効水分の収支について供給要因を降水量，損失要因を地表面蒸発量，地表面流出量および林分蒸散量として推定をおこなった。これらの月毎の水分収支と現地で測定された地下1m以内の水分量は，よく一致した傾向を示した。すなわち，少降水量による供給量が損失量よりも少ない月および降水量は比較的多いが夏の高温のため損失量が増大して供給量を超過する月などは，林地土壌水分がおおむねpF 2.7以上の乾燥状態を示すことが判明した。以上の考え方で，過去20年間における与那の気象統計資料から最多雨年，最少雨年および平年の水分収支を計算すると，年降水量としては十分な量に達しても，月別の降水量に偏りがあり，最多雨年においても，降水量の不足を来たす月のあることが判明した。

平年における水分（降水量）の分配は，林地および林分を通して消失される水分量が最も大きく全体の57％を占め，地下1m以内の土壌中および林木に保留される水分量12％，地下流亡その他の水分量31％と計算された。これらのなかで，地表面蒸発量および林分蒸散量などの占める割合が特に大きかった。

5　沖縄の自然環境がリュウキュウマツの生長に及ぼす影響

1）少降水量に起因する干天日の影響

与那における気象資料から，無降水継続日数の出現頻度について解析した。10日以上の無降水継続日数の頻度は比較的多く，最も現われやすい時期は盛夏（6月下旬～8月）の気温の高い時期であり，林地および林木からの蒸発散量の多い時期と一致することは，土壌の乾燥を招きやすく，林分生長への影響が予想される。

2）季節風および台風の影響

沖縄および九州各地の気象統計資料より，月別および年間の平均風速や10m／sec.以上の平均風速の日数などから，沖縄地方が極めて季節風の強い環境下にあることを解析した。また，現実林分内での観測によって，冬の季節風が他の季節の風よりも大きいことおよび保護樹帯が季節風の減殺効果の大きいことなどを実証した。

3）地形および土壌の影響

林木の生長と関係の深い海抜高，傾斜方位および角度，起伏量，保護度などの地形要素について，地域別にその特徴を明らかにした。

沖縄に分布する黄色土，赤色土，暗赤色土などの土壌の形態的特徴および理化学性について，褐色森林土のそれと比較検討した。その結果，沖縄に分布する土壌は次のような特徴のあることが分った。①土色の明度および彩度の値が大きく，明るくあざやかであることがいえる。②A層の厚さが小さい。③土壌の硬度は極めて高く，特にB層では堅～固結に相当する土壌が大半を占めた。④容積重が著しく大きく，各土壌型および層位ともほとんど100以上の値を示した。⑤三相分布は固相が大きく，液相および気相が小さい。すなわち，孔隙量が小さい。⑥孔隙量のなかで，植物の生育に最も有効な水分を保持する粗孔隙量が著しく小さい。⑦pH（H_2O）は，特に強酸性である土壌はないが，母岩の種類によって弱アルカリ性を示す土壌がある。⑧炭素含量は，全般的に各層とも低い。⑨採取時含水量がpF 2.7以上の乾燥状態を示す場合が大半を占め，その環境条件は土壌型では乾性型土壌，層位ではA層，堆積様式では残積土～歩行土，斜面位置では斜面上部，斜面方位ではN～E方位，地質では石灰岩および火成岩などで乾燥状態の出現率の大きい傾向を示した。

以上のことから，沖縄に分布する土壌は理化学性に劣り，特に土壌水湿に関する条件の悪いことが判

明した。また，リュウキュウマツ林分調査地では，大部分の造林地が斜面の中部以上に位置するため，土壌の性質の一般的傾向よりさらに悪い条件下にあることが分った。

4）リュウキュウマツ林分の生長と環境条件

沖縄県内各地で得られた61箇所の調査資料から，各環境要素とリュウキュウマツの地位指数との関係について検討した。その結果，地質では安山岩および古生層，斜面位置では斜面下部，堆積様式では崩積土，土壌型でDRおよびYC•D(d)，A層の厚さでは10cm以上の厚さなどの環境条件の調査区で地位指数が大きい傾向を示した。

6 リュウキュウマツ林分の乾燥害回避と造林技術

1）更新法および地拵法と幼齢林の生長

種子のまきつけから林分閉鎖に至る4カ年間の試験結果は，じかまき造林における全面火入地拵法，植穴火入法および標準法（火入れをおこなわず巻落し法による）の各地拵法の間に，樹高および直径の生長量の差が認められなかった。しかしながら，火入地拵えは土壌表層を直接外気にさらし，有機物の土壌への還元を減少させ，土壌表層の流去を増加させるなど，乾燥害回避，土壌保全および広葉樹との混交誘導などの造林技術的見地から避けるべき方法といえる。

更新法別では，苗木植栽区はじかまき区に比較して，樹高および直径生長量が小さかった。

2）仕立法および密度試験

試験開始後4カ年間の結果は，仕立法および密度試験ともに，自然放置区で立木本数の低下，枯れ上りの増加，胸高直径の低下などの密度効果がみられた。乾燥害からの回避をはかるためには，水分の損失要因となる下層植生の繁茂や林内への風の吹き込みを抑制し，林内湿度を高く保持するなど適正な立木密度を管理する必要がある。リュウキュウマツ現実林分収穫表（辻本 1963）の林齢に対応する立木数よりもやや密度の高い試験区である仕立法の3本仕立区および密度試験の密区は，胸高直径の低下および立木本数の減少も比較的小さいので，過密とは考えられず，したがって，林分の乾燥害回避および林木の形質生長の見地から，多少密な状態での林分構成が望ましい。

3）じかまき造林におけるまきつけ時期

12月初旬から約1カ月毎の3月下旬までの間にまきつけた現地試験の結果は，発芽本数および生育本数ともに低温期に遭遇した12月下旬まきつけが最も少なかった。年間の苗高生長は，12月初旬まきが最も大きく，他は著しく小さかった。まきつけ時期が遅れることは，稚苗の間に夏季～秋季における乾燥期に遭遇して，生長の遅れる結果になるものと思われる。これらの結果から，林地におけるじかまき造林のまきつけは，発芽適温期の11月～12月初旬までに，なるべく早期におこなう必要のあることが分った。

4）林地肥培

更新初期における乾燥害の回避のためには，林分閉鎖を早期にはかることにあり，そのために林地肥培は有効な手段といえる。リュウキュウマツ幼齢林の肥効は著しく，3年目には林分が閉鎖した。5年経過後の樹高生長量は，対照区に比較して基準区で1.5～2.0倍，倍量区で2.3～3.0倍を示した。また，下刈期間を1年短縮するなど，省力的効果が認められた。

5）保護樹帯の設置

風衝地と保護樹帯の設置された各林分について，種々の調査を試みた。調査項目は，頂芽および輪枝の伸長量，針葉の伸長量および重量生長量，林分現存量，林分蒸散量，土層内（0～1m）の水分量，林内風速，標本木の樹高，胸高直径および材積各生長量などである。これらの結果，保護樹帯を設置することは，林分の生長に良い影響のあることが判明した。このことは，風衝地の林分は風の吹き込みによって，樹体温度，林内温度および湿度の低下，地表面からの蒸発散の促進による土壌乾燥，さらには

樹体内での生理的乾燥などを招く結果と考えられ，保護樹体の設置は林木の乾燥害回避には有力な手段になるものと思われる。

6）肥料木の混交効果

リュウキュウマツと肥料木としてのソウシジュの混交効果について検討した。その結果，対照区に比較して混交区では，有用広葉樹の侵入が多いこと，樹高生長および胸高直径生長が大きいこと，A_0層の集積量が少なく落枝葉の分解が早いこと，A層の厚さおよびA層の有機質含量が大きいことなどが判明した。肥料木の混交は，土壌への有機物量を増加させ，A層の発達あるいは土壌構造の発達を促すことによって土壌の理学性を改善し，土壌体における水分保持量を増加させ，林地の水分条件を良好にする効果が期待される。

7）造林技術の体系化

以上の研究結果から，リュウキュウマツの乾燥害回避のための造林技術の体系化を試み，各事項について論及した。すなわち，適地の範囲，皆伐面積の小規模化，地拵法，更新法，肥培，下刈，密度管理，混交林への誘導などについて具体的に論じた。

8）リュウキュウマツ人工林の現実林分収穫予測

適地に生育し生長の比較的良好な調査地の資料より，リュウキュウマツ人工林分収穫予想表（表6－18）を調製した。本研究で明らかにしたように，リュウキュウマツが適地に造林され，林木を乾燥害からの回避を図る適切な技術的施策がなされることによって，林分生長の増大を図ることは十分可能である。したがって，表6－18に示された収穫表以上の生長量の実現は期待され得るものと考えられる。

引　用　文　献

1. 青木繁　1933　オキナワマツの毬果並びに種子に関する調査（1），Sylvia，**4**（3）：83～207
2. 有光一登・松井光瑤　1964　簡易なテンションライシメーターによる土壌水分の動的研究，日林誌　**46**：208～213
3. Doi Tohei and Kinichi Morikawa 1929 Analytical Key to the Species of the Genus pinus, Based on the Anatomical Characters of Leaves, Journal of the Department of Agiculture, Kyushu Imperial University, **2**（6）：149～198
4. Eggler, W. 1961 Stem Elongation and Time of Cone Initiation in Southern Pines, Forest Sci, **7**（2）：149～159
5. 船引真吾　1964　土壌，**55**　朝倉書店，東京
6. 郷正士　1951　二・三林木種子の吸水経過，東大演報，**39**：57～60
7. 原田泰・柳沢聡雄　1951　山火跡未立木地の環境とその造林法に関する研究，1～50 帯広営林局
8. 橋本与良　1973　森林立地編・土壌（林業技術史　第3巻），423～424，日林協，東京
9. 初島住彦　1975　琉球植物誌，214　沖縄生物教育研究会
10. 平田徳太郎・神保宰雄　1925～32　樹木の通発水量測定試験成績，森林気象彙報，**10～12**
11. 飯塚肇・玉手三棄寿・高桑東作・佐藤正　1950　防風林による海風中の塩分減少効果，林試研報，**45**：1～15
12. 井上輝一郎・岩川雄幸　1970　林地における土壌水分の動態（1），日林誌，**52**：238～243
13. 井上由扶　1960　アカマツ林の中林作業法に関する研究，九大演報，**32**　1～265
14. 石井盛次　1954　マツ属分類の再検討，アカマツに関する論文集，111～142
15. 糸数昌文　1976　沖縄における水収支，九州の農業気象，**12**：35～43

16. 岩切敏 1968 南九州における裸地面蒸発量について，農業気象，**23**：151～158
17. 上村武 1971 木材の含有水分，林業百科辞典，926～927 丸善，東京
18. 香山信夫 1942 主要造林樹種の幼苗時における蒸散作用（予報），日林誌 **24**：1～9
19. 気象庁 1972 日本気候表，その2，807～936
20. Kittredge 1948 Forest Influence（中村義司 1964より再引用）
21. 小西健二 1965 琉球列島（南西諸島）の構造区分，地質学雑誌，**71**（840）：437～457
22. 幸喜善福 1969 海岸附近の樹木と付着塩分量について（1），防風林の潮風濾過効果，沖縄農業，**8**（2）：61～63
23. 吉良竜夫 1976 陸上生態系（生態学講座2），30，共立出版，東京
24. 粂川保治 1938 沖縄県の林業，84～85，沖縄山林会
25. 黒鳥忠・小島俊郎 1969 沖縄の森林土壌概説，日林誌，**51**（8）：227～230
26. ——— 1972 沖縄の地勢と風土，森林防疫，**21**（7）：4～7
27. 日下部正雄 1954 土壌水分の季節的変化，農業気象，**9**（2）：29～31
28. ——— 1956 蒸発散位よりみた福岡の干ばつ，農業気象，**12**（2）：69～72
29. ——— 1958 蒸発散位からみた福岡の無降水継続期間，農業気象，**14**（2）：54～56
30. 丸山岩三・佐藤正 1953 林木および林分の葉量に関する研究（1），岩手県地方のアカマツについて，林試研報，**65**：1～10
31. 丸山栄三 1962 水収支による土壌面蒸発の推定（5），農業気象，**18**（1）：33～35
32. 真下育久 1960 森林土壌の理学的性質とスギ，ヒノキの成長に関する研究，林野土調報，**11**：1～82
33. ——— 1973 硬度計による森林土壌の堅密度の区分および粗孔隙の予知，森林立地，**xv**(1)：22～24
34. 松原茂・奥田節夫・川合信子 1957 波状砂面からの蒸発速度について，農業土木研究，**25**：177～178
35. 松本当三・津波古充清 1962 リュウキュウマツ幼齢林の疎密が成林状態並びに生長に及ぼす影響，琉球林試報，**6**：1～10
36. 松坂泰明・音羽道三・山田裕・浜崎忠雄 1971 沖縄本島，久米島の土壌の分類について，農技研報 B，**22**：305～397
37. Mirov, V. T. 1967 The Genus Pinus 22
38. 目崎茂和 1977 地形区分とその性状等の概要（土地分類図付属資料沖縄県），1～5，国土庁土地局
39. 宮崎榊・佐藤亨 1965 苗木の発育生理（苗木の育て方）110～124，地球出版，東京
40. 宮島寛・汰木達郎 1966 背振村有林適地適木調査，1～46，佐賀県背振村
41. 宮脇昭・藤原一絵・原田洋・楠直・奥田重俊 1971 逗子市の植生，日本の常緑広葉樹林について，113，逗子市教育委員会
42. 森川靖 1974 ヒノキの樹液の流れ 林木の水分収支と関連して，東大演報，**66**：251～297
43. ———・佐藤明 1976 幹の樹液流速と樹冠部の木部圧ポテンシャル，日林誌，**58**：11～14
44. 諸見里秀宰 1970 リュウキュウマツの生長，沖縄農業，**9**（2）：28～32
45. 村井宏・岩崎勇作 1975 林地の水および土壌保全機能に関する研究（1），森林状態の差異が地表流下，浸透および侵食に及ぼす影響，林試研報，**274**：23～84
46. 中川行夫 1976 干害の生態と生理（異状気象と農業），131～137，朝倉書店，東京
47. 中村義司 1964 スギの林木ならびに林分の水分経済に関する研究，九大演報，**38**：161～238

48. 中野秀章　1976　森林水文学，95～120，共立出版，東京
49. 中島幸雄・辻田昭夫・穂井泰行　1966　肥料木の機能に関する研究（V），肥料木林における養分の吸収と還元，愛媛大演報，**4**：17～28
50. _____　1970　肥料木の機能に関する研究（VI），落葉の分解に伴う組成の変化，愛媛大演報 **7**：3～12
51. 新納義馬・宮城康一・新城和治・島袋昿　1974　八重山群島の植生（琉球列島の自然とその保護に関する基礎的研究1），5～36，文部省科研特定研究報告
52. 西日本技術開発株式会社　1974a　北九州地区植生調査報告書，148～155
53. _____　1974b　川内地区植生調査報告書，242～265
54. 野原朝秀　1975　沖縄の地質（沖縄資料集成），19～22，Green－life 社，那覇
55. 大神又三・幸喜善福　1973　沖縄における農地防風林造成の基礎的研究（II），砂丘研究，**20**（1）：81～86
56. 沖縄県農林水産部　1976　沖縄の林業，6～8
57. 沖縄県林業試験場　1973～76　民有林適地適木調査報告書，**1**～**3**
58. 大山保表　1970　リュウキュウマツの造林並びに施業に関する基礎的研究，琉大農学報，**17**：1～161
59. _____・砂川季昭・山盛直・平田永二・高江洲重一　1971　リュウキュウマツに対するソウシジュの混交効果試験，琉大農学報，**18**：267～286
60. 大政正隆　1951　ブナ林土壌の研究，林野土調報，**1**：1～243
61. 小沢準二郎　1958　林木のタネとその取扱い，88～142，日本林業技術協会
62. 林文鎮　1961　琉球松の育苗と植栽造林について，蔡温叢書，**4**，琉球政府
63. 林業試験場土壌部　1976　林野土壌の分類（1975），林試研報，**280**：1～28
64. 琉球政府　1972　沖縄の林業，蔡温叢書，**12**：15～22
65. 佐伯敏郎　1972　水の交換と輸送（植物生理講座5），112～140，朝倉書店，東京
66. 坂口勝美　1959　育苗，43，朝倉書店，東京
67. 坂本辰馬　1973　温州ミカン園の土壌ならびにその管理に関する研究，愛媛県果樹試場報，**3**：1～115
68. 佐藤敬二・加藤退介・田町正誉・高田雄之・寺田一彦・坂上務・渡辺恵弘・岩崎松之助　1952　耕地防風林に関する研究，1～201，日本学術振興会
69. _____　1964　琉球の造林とその推進に関する提言，29，琉球林業協会
70. Satoo Taisitiroo　1948a　Effect of Wind on Transpiration of New and Old Leaves of Some Trees. Bull. Tokyo Univ. Forests **36**：30～34
71. _____　1948b　Effect of Wind and Soil Moisture on Growth of Seedling of *Robinia Pseudoacacia*. Bull. Tokyo Univ. Forests **36**：36～40
72. _____　1951　Leaf Temperature in Relation to the Influence of Wind on Transpiration of Plants I, II, III Bull. Tokyo Univ. Forests **39**：31～54
73. 佐藤大七郎　1955　クヌギの葉の乾物重の増加に及ぼす風の影響，東大演報，**50**：21～26
74. _____　1956　ヒノキ，スギ，アカマツのマキツケナエの耐乾性，東大演報，**51**：1～108
75. _____　1958　森林の蒸散量，科学，28：205
76. _____　1973　陸上植物群落の物質生産，la，42～69，共立出版，東京
77. _____・中村賢太郎・扇田正二　1955　林分生長論資料（1），立木密度のちがう若いアカマツ林，東大演報，**48**：65～90

78. 柴田信男 1954 アカマツ林の肥培に関する2・3の実験的考察，アカマツに関する研究論文集 1～16
79. 四手井綱英 1960 混交林について，林業技術，**221**：10～13
80. 島袋俊一・諸見里秀宰 1956 琉球松針葉の形態学的研究，琉大農学報，**3**：215～245
81. 城間理夫 1975a 沖縄における日射量について，九州の農業気象，**12**：3～5
82. _____ 1975b 沖縄の気象（沖縄資料集成）23～29，Green－life 社，那覇
83. _____ 1977 沖縄におけるパインアップル作の農業気象学的研究，琉大農学報，**24**：283～412
84. Sucoff, E. and Hong, S. G. 1974 Effect of Thinning on Needle Water Potential in Red Pine, Forest Sci. **20**：25～29
85. 須崎民雄 1968 造林場面における除草剤の利用に関する研究，九大演報，**42**：99～233
86. _____ 1971 林木の発生，生育（新造林学）82～91，地球出版，東京
87. 高江洲重一・玉城功・安里練雄・仲間清一・安次富長政 1973 天然生リュウキュウマツの現実林分収穫表調整，沖縄林試報，**16**：1～25
88. 高原末基 1965 人工造林（造林学），100～127，朝倉書店，東京
89. 竹原秀雄 1965 南西諸島の亜熱帯性森林土壌（II），非石灰質母材の赤黄色土について，日林誌，**47**（1）：1～8
90. 竹下敬司 1964 山地の地形形成とその林業的意義，福岡林試時報，**17**：1～109
91. _____・福島敏彦・萩島幸弘・斉城巧 1966 林地生産力（林分材積）に関する立地解析とその分布推定，福岡林試時報，**18**：41～76
92. 田崎忠良 1974 植物の水ポテンシャルとその光合成，蒸散速度に及ぼす影響，日林誌，**56**：303～304
93. 田島良男・迫静男・小原康夫 1955 リュウキュウマツ幼植物の日長反応について，鹿大農学報 **4**：137～139
94. 立津春方 1937 林政八書，35～47，東京図書，東京
95. 多和田真惇 1972 沖縄の林業史（旧藩時代），1～20，琉球林業協会
96. 外山三郎 1954 林木育種に関する新知見，林試研報，**66**：57～227
97. 豊原源太郎 1973 マツ林の植物社会，植物社会学，48～53，共立出版，東京
98. 坪井八十二・根本順吉 1976 異常気象と農業，202（付表），朝倉書店，東京
99. 津波古充清 1966 林地肥培に関する研究，琉球林試報，**9**：49～62
100. 辻本克己 1963 リュウキュウマツの重量生長に関する研究，鹿大農学報，**13**：1～88
101. _____・砂川季昭 1958 沖縄列島におけるリュウキュウマツ林の施業について，鹿大，琉大共同学術調査団研究速報
102. 塘隆男 1962 わが国主要造林樹種の栄養および施肥に関する基礎的研究，林試研報，**137**：1～130
103. _____ 1971 苗畑施肥と林地肥培，193，地球出版，東京
104. 上地豪 1966 リュウキュウマツ育苗における用土の適否試験（2），琉球林試報，**9**：9～26
105. 植村誠次 1964 肥料木と根粒菌，5～6，地球出版，東京
106. 牛島忠良 1972 水の交換と輸送（植物生理講座5），141～148，朝倉書店，東京
107. Wambolt, C. L. 1973 Conifer Water potential as Influenced by Stand Density and Environmental Factor. Can. J. Bot. **51**：2333～2337
108. 渡辺資仲 1965 地ごしらえ（造林ハンドブック），628～637，養賢堂，東京

109. 八重倉優・勇幸治 1962 リュウキュウマツの育苗に関する研究，鹿児島県大島林業指導所報告 **1**：3～26
110. 山田昌一 1955 微細地形解析に関する森林立地学的研究，147～161，林野共済会，東京
111. 山田藤吾・中島幸雄・伏見知道 1957 笠岡市および呉市周辺の既成砂防造林地土壌について，日林誌，**39** 303～306
112. 山盛直 1966 2・3スギ品種の生長と土壌条件，琉大農学報，**13**：108～117
113. _____・大山保表 1974a リュウキュウマツの造林法の研究Ⅰ，播種時期および施肥法の違いによる生育試験，琉大農学報，**21**：609～619
114. _____・_____ 1974b _____ Ⅱ，幼齢林の肥培試験，琉大農学報，**21**：621～632
115. _____・_____ 1974c リュウキュウマツ種子の発芽適温，琉大農学報，**21**：603～607
116. _____・_____ 1976 ペーパーポットによるリュウキュウマツの育苗試験，沖縄農業，**14**（1）：33～37
117. _____ 1976a リュウキュウマツ苗木の蒸散量と葉の水ポテンシャルの日変化，琉大農学報，**23**：403～407
118. _____ 1976b リュウキュウマツ苗木の蒸散作用に及ぼす風の影響，琉大農学報，**23**：409～412
119. _____ 1977 沖縄の森林立地とリュウキュウマツの生長，日林九支論集，**30**：127～128
120. _____ 1978 2・3樹種の蒸散係数，日林九支論集，**31**：121～122
121. 山本肇 1962 土壌の性質とトドマツの生長，林野土調報，**12**：157～233
122. 山内孝平 1971 亜熱帯におけるリュウキュウマツの林地肥培試験，森林と肥培，**67**：6～10
123. 吉岡二郎 1973 森林土壌の土壌水分に関する研究（1），長期にわたる野外の土壌水分測定用装置の考察と若干の測定例，林試研報，**250**：35～52

Summary

This study, as a part of establishing a technical system for the silviculture of Ryukyu-matsu (*Pinus luchuensis* Mayr), elucidated the water characteristics of the individual tree and stand of Ryukyu-matsu by examining the water problems which were most influential on the growth, discussed the effects of Okinawan forest environment, especially the environment related to water, on the stand growth, and discussed, further, the experimental results obtained on some problems of silvicultural techniques for avoiding drought damages. The results of the study were summarized in the following sections.

1 The importance of Ryukyu-matsu as tree species

The distribution of Ryukyu-matsu in Japan is limited to only a sub-tropical region, in which it is an important silvicultural species. From the facts that, in post-war Okinawa, about 62% of the planting area or about 16% of the total forest area is covered by Ryukyu-matsu and, furthermore, the present status shows the presence of the war-damaged ruin area (un-stocked area) and the

devastated forest land due to overcut, to which Ryukyu-matsu is considered as right species, the planting of Ryukyu-matsu is expected to be enlarged furthermore.

2. The growth characteristics of Ryukyu-matsu

1) Optimum temperature for seed germination

The experimental results showed that the optimum temperature for seed germination was 20-25°C. When the temperature was increased beyond the optimum temperature, a germination percentage decreased and was extremely low at 35°C due to an increase in the number of rotten seeds. When the temperature was lower than the optimum temperature, the germination energy and the germination percentage decreased and especially the germination energy dropped to exceedingly low value at 10°C.

2) The growth progress of seedlings

The growth progress of seedlings observed at the top and root portions increased rapidly beyond 6 months after germination. Lateral roots appeared largely near the surface and extremely less at 10 cm from the surface or deeper. Since these observations sugested that seedlings would receive drought damages easily in the Summer, the growth enhancement would be required by enough land preparation, early sowing (before December), and fertilizing.

3) Elongation types and growth

The growth of the terminal shoots and whorl branches of a young forest started in Janauary, increased to the highest level in March, and dropped rapidly in May or later months. Nevertheless, growth peaks were observed in July and October. This would be caused by the growth of new buds.

Although the growth of the needles started slightly later than that of the terminal shoots, it had the same growth peak with the latter.

The sprouting numbers of the new shoots of a young forest were grouped into three types, i.e., single, double, or triple. These sprouting numbers were not dependent on individuals or their environment. The most of the individuals, nevertheless, transferred to the single sprouting type as the aging of the forest proceeded. Accordingly, Ryukyu-matsu at young stages was in a multi-phase growth-type and it was considered to grow rapidly, transferring to a single-phase growth-type in about 7-8 years.

4) Stand biomass

Fresh weight, dry weight and water content of a 6-year forest and a 15-year forest per ha were estimated by the sampletree method. The stand biomass gave higher values in plots with greater values of stand growth or in plots with better topographical conditions. Although the life time of needles of Ryukyu-matsu was estimated as 2 years from the data of classifying leaf mass by needle ages, it was shortened in the plots with bad topographical conditions.

5) The distribution of root system

Although the horizontal distribution of the root system of 4-year forest was limited within a

40-cm diameter, the horizontal roots distributing near the land surface extended up to 140 cm and created root competition among trees. The vertical distribution of the root system was mainly observed within 20 cm from the land surface and decreased with increasing depth, showing exceedingly small distribution at 80 cm or deeper. The development of root system was poorer in the trees by planting pot seedlings than in the trees by sowing.

3. The characteristics of water of Ryukyu-matsu

1) The transpiration coefficient of Ryukyu-matsu

Comparing with other two tree species, the transpiration coefficient of Ryukyu-matsu was smaller than that of Sendan *(Melia Azedarch)* and greater than that of Mokumao *(Casuarina equisetifolia)*. This would be attributed to a variation in the characteristics of water utilization among tree species. The efficiencies of water utilization by the tree species, therefore, were in decreasing order, Mokumao, Ryukyu-matsu, and Sendan.

2) Daily variation in the transpiration and needle water potential of seedlings

Daily variation in the transpiration and needle water potential of the two-year pot-seedlings of Ryukyu-matsu were observed to respond clearly to their controlling factors such as the daily variations of temperature, saturation deficit, and radiation.

3) The environmental conditions causing water stress

(1) The daily variation in the transpiration and needle water-potential of the seedlings grown under various water conditions

The daily variation of the transpiration of the seedlings grown under dry, moderate, or wet conditions was always small under dry condition and increased in the order of wet condition and moderate condition. The daily variation of the needle water-potential was small under the dry condition and increased in the order of the moderate condition and the wet condition. The needle water-potentials at night after the cease of transpiration were -1.5 bar at the moderate condition and the wet condition and -3.5 bar at the dry condition. The variations in these values were considered as the indications of the susceptibility to water stress.

(2) The transpiration, needle water-potential, and water content of seedlings under decreasing soil moisture

When the seedlings grown under the normal conditions were dried by stopping water supply, the transpiration, needle water-potential, and needle water-content decreased as day went by. These decreasing phenomena occured gradually at near pF 2.7 of the soil water and rapidly at the range greater than pF 2.7. The water condition at which the growth-retardation occured due to a decrease in transpiration caused by the water stress on Ryukyu-matsu was estimated as around pF 2.7. Furthermore, the needle water-potential at around pF 4.2 of the permanent wilting point was -36 bar, and the needle water-content at the point was 107%.

(3) The effect of wind on the respirative action of the seedlings of Ryukyu-matsu

Temporal enhancement in the transpiration by wind, measured hourly, was the greatest at a wind

velocity of 4 m/sec and decreased at the wind velocity greater or smaller than 4 m/sec. As an exposure to wind was prolonged, the transpiration decreased inversely. The time required for recovering the transpiration equivalent to the state previous to an exposure to wind was 2 hr., which was extremely short, at 8 m/sec and 4-5 hr. at other wind velocities.

4) The daily variation and seasonal variation of the transpiration and needle water-potential of mature trees

The correlationship between the transpiration of mature trees and needle water-potential of mature tree needles was high. Thus, by obtaining the equations of the relationship in various seasons, the transpiration could be estimated by only measurement of the needle water-potential. The seasonal transpiration was the greatest in July, the mid-summer, next in February, corresponding to the elongation period of new buds, and the least in November of the period of reduced elongation.

4. The characteristics of the available water in Ryukyu-matsu forests

In the water economy of Ryukyu-matsu, the rainfall as water-supply factor was obtained from the data provided by meteorological observations. The water-loss factor was estimated by the method stated below.

1) Land-surface evaporation

According to the experiments carried out in the exposed land for meteorological observations, there was a high correlation between the land-surface evaporation and the water-surface evaporation. Thus, the equations expressing this correlationship were used for the estimation of the land-surface evaporation.

2) Land-surface run-off

The land-surface run-off in rainfall was determined with the measuring equipment set in Ryukyu-matsu forests. The amount of run-off was estimated monthly from the run-off rates at each daily rainfall classes.

3) The transpiration of Ryukyu-matsu stands

Since the correlation between the transpiration of Ryukyu-matsu, determined by the method of branch bit, and temperature or radiation was high, the following correlation equation was obtained between the transpiration (Tr: mg/g·fw·day) and the average temperature (t: °C) and the integrated radiation (r: cal/cm^2·day):

$$Tr = 89.55 + 0.16t \cdot r$$

Thus, the transpiration of the stand could be estimated as function of the average temperature, integrated radiation, and the leaf mass of the stand. The transpiration of the stand was calculated by using the average temperature and average integrated radiation obtained from meteorological observation data and the leaf mass of the stand, the measured value obtained by the survey on the amount actually existed.

4) The soil moisture status at the depth of root distribution

The soil moisture status at the various depths of the soil was examined by measuring the water in the forest and using the tensiometric method. It was observed that the probability of the occurence of dry status over pF 2.7, at which the growth of Ryukyu-matsu would be endangered was high. This dry status was observed more frequently at the surface of the soil. Furthermore, the area of un-proper water status such as the stand receiving wind directly was in this dry status for one-third of the measured period. From these observations, the forest land in Okinawa was subjected to dry state in relatively higher frequency and especially at the surface layer with a greater tendency.

5) The balance of available water on Ryukyu-matsu stands

The balance of available water in Ryukyu-matsu stands was estimated by taking rainfall as a supply factor and land-surface evaporation, land-surface run-off, and stand transpiration as loss factors. These monthly water balances showed the same tendency to the amount of water observed within the depth of 1 m in the spot. That is, the forest-land water with dry status of about pF 2.7 or higher was observed in the month in which the supply was less than the loss due to small rainfall and the loss exceeded the supply due to a high temperature inspite of a greater rainfall. On the calculation of the stand balance for the years of the largest rainfall, the smallest rainfall, or the average rainfall over the past 20 years in Yona using meteorological data and the above estimation method, there was the month of insufficient rainfall even in the year of the greatest rainfall due to in-uniform monthly distribution of rainfalls in spite of sufficient yearly rainfall.

The partition of water (rainfall) in an average year was calculated as 57%, the largest fraction, for the water loss due to forest land and forest stand, 12% for the water stored within the depth of 1 m from the land surface in the forest soil and trees, 31% for the water of infiltration and others. Among them, land-surface evaporation and stand transpiration occupied extremely large fractions.

5. The effects of natural environment on the growth of Ryukyu-matsu

1) The effects of drought day due to small rainfall

The probability of the occurance of continued non-rainfall days were analyzed by the meteorological data obtained in Yona. The continued non-rainfall days for more than 10 days occured in a comparatively high frequency and in the largest frequency in the mid-summer (late June-August) in which temperature was high, in agreement to the period of greater evaporation and transpiration in forest lands and trees, would indicate that the stand growth could be affected by the high drought tendency of the soil.

2) The effect of northerly winds and typhoons

Using monthly and yearly average wind velocities and the number of the days of the wind velocity of 10m/sec or more from the meteorological data of Okinawa and all prefectures in Kyushu, it was shown that Okinawa was in the environment with extremely strong northerly wind. Also, by the measurements in the actual stand, it was demonstrated that winter northerly wind was greater than any other seasonal winds and the northerly wind was remarkably reduced by the presence of

sheltering tree belt from wind.

3) The effect of topography and soil

The topographical factors intimately related to the growth of trees such as altitude, direction of slope and inclination, relief, and angle of topographic closing were characterized for each regions. The morphological characteristics and physicochemical properties of yellow soil, red soil, and dark red soil distributed in Okinawa were compared with those of brown forest soil. As the results, Okinawan soils had the following characteristics: (1) bright and clear due to large soil-color value and chroma, (2) thinner A layer, (3) extremely high soil hardness especially having about one-half of compact - solidity in B layer, (4) exceedingly large volume weight showing the values of 100 or more in all soil types and layers , (5) large solid with small water and air in three-phase distribution, indicating small pore space, (6) extremely small coasse porosity, which could reserve the water used most effectively among the various pore spaces for the growth of plants, (7) pH (H_2O) with no strong acids and with weak alkali depending on the kinds of parent materials, (8) generally low values of carbon content in all layers, and (9) drought status of pF 2.7 or more in water content at the time of sampling in more than half samples. The environmental conditions such as the dry-type soil in soil type, A layer in horizon, residual deposit - superficial deposit in physiography, top slope in slope position, N-E direction in the direction of slope, lime stone and eruptive rock in geological structure gave high probability of the occurance of drought status.

From the above points, Okinawan soils were poor in physicochemical properties, especially in the conditions related to soil water. Also, since the most of the planting land was located at the midle or higher on the slope in the survey area of Ryukyu-matsu stand, the conditions were in poorer than those of the general tendency of the nature of soils.

4) The growth of Ryukyu-matsu stand and environmental conditions

On 61 samples obtained at various regions in Okinawa, the relationship between each environmental factors and site index of Ryukyu-matsu were examined. As a result, the environmental conditions of survey areas such as Andesite and Pereozoic formation in geological structure, bottom slope in slope position, colluvial soil in physiography, $DR_{C \cdot D}$ and $Y_{C \cdot D}$ (d) in soil type, thickness of 10 cm or more in the thickness of A layer gave a tendency of greater site indexes.

6. Silvicultural techniques avoiding the drought damages of Ryukyu-matsu stands

1) The methods of regeneration and land preparation and the growth of young stands

The experimental results covering a 4-year period from sowing to crown closure showed no difference in the growth of tree height and diameter among each land preparations such as whole burning, spot burning, and standard (not-burning) in reforestation by sowing. Nevertheless, Whole burning should be discarded from the view point of silvicultural techniques such as avoiding drought damages, aiming soil conservation, and inducing the mixture with broad leaved trees, since it exposed soil surface directly to external air and increased the run-off of the surface layer of the soil.

Among the regeneration methods examined, the growth of tree height and diameter was smaller

in the plot by planting than in the pot by sowing.

2) The tests of the methods of cleaning cutting and stand density

The results obtained for 4 years after the initiation of testing indicated that cleaning cutting and the test of stand density showed density effects in the natural un-cultivated spot, such as a decrease in the number of standing trees, an increase in clear length and a decrease in diameter at breast heigh. In order to avoid drought damages, a proper stand density had to be controlled by inhibiting the factors for water loss such as the growth of lower vegetation and wind blow into the forest. Since a decrease in the diameter at breast high and a decrease in the number of standing trees were relatively small, the plot of three-tree cleaning cutting, the method of cleaning cutting, in which the density was slightly higher than the number of standing trees corresponding to the stand age of the actual yield table of Ryukyu-matsu (Tsujimoto, 1963) and the high density plot in density testing would not be considered to be in over density. Thus, the stand composition of rather high density was desirable from the view point of avoiding drought damages in the stand and the development of the quality of trees.

3) Sowing time in reforestation by sowing

The results of spot tests with monthly sowing from early December to late March indicated that sowing in late December, which encountered a low-temperature period, was the least in the number of germinated seeds and the number of growing trees. Sowing in early December was the greatest and others were extremely small in the annual growth of seedling height. The late sowing was considered to cause growth retardation due to the overlap of the drought season in the summer - autum with the period of young seedlings. From these results, the sowing time in the forest by the method of the reforestation by sowing was necessary to be carried out as early as possible by November - early December, the period of the optimum temperature for germination.

4) Forest fertilization

Since crown closure had to be done early in order to avoid drought damages in the early period of reforestation, forest fertilization would be said as an effective means. The fertility of the young age forests of Ryukyu-matsu was extremely high, leading to the crown closure in the third year. The growths of tree height after 5 years comparing to the control plot were 1.5-2.0 times greater in the standard plot and 2.3-3.0 times higher in the double fertilization plot. Laborsaving was also observed by shortening of a weeding period in one year.

5) The establishment of shelter belts against northerly wind

Various surveys were carried out on the stand receiving northerly wind directly and the stand in which shelter belts against northerly wind were established. The survey items included the elongation of terminal shoot and whorl branch, the elongation and weight growth of needles, stand biomass, stand transpiration, the water content in the soil layer (0-1 m), wind speed in the stand, the height of sample trees, the diameter at brest high, and volume growth. The results indicated that the establishment of the shelter belts gave good effects on the growth of the stand. This would mean that the establishment of the shelter belts against northerly wind was effective means for avoiding the drought damages of the forest trees since the wind blowing into the stand receiving northerly

wind directly would result in a decrease in tree-body temperature and the stand temperature and humidity, soil drought due to an enhancement in evapotranspiration from the soil surface, and physiological drought in the tree body.

6) The effect of mixing with soil-improving trees

The effect of mixing Ryukyu-matsu with soshiju as soil-improving trees was examined. The results indicated that the mixed plot with respect to the control plot gave a high probability of the invasion by useful broad leaved trees, larger growths of tree height and diameter at breast high, low accumulation of A_0 layer with fast litter degradation, large values of the thickness of A layer and the content of the organic matter in A layer. The mixing with soil-improving trees would be expected to improve physical conditions, to increase water reservation in soil body, and to improve water condition of the forest land by increasing the amount of organic matter in the A layer and enhancing the development of A layer and soil structure.

7) The systematization of silvicultural techniques

From the above results of the present study, the systematization of silvicultural techniques for avoiding drought damages of Ryukyu-matsu was tried and discussed for each items concerned. That is, the range of right sites, the minimization of clear cutting area, stand preparation, regeneration, forest fertilization, brush cutting, density control, and induction of mixed forest were discussed in detail.

8) The estimation of the actual stand yield of the artificial forest of Ryukyu-matsu

From the data of the survey spot in which trees grew comparatively well due to right-site growing, the table of actual stand yield (Table 6-18) was prepared. As shown in this study, the enlargement of stand growth of Ryukyu-matsu was quite possible by planting at a proper site and carrying out a proper technical measure for avoiding drought damages of the trees. Thus, it would be well considerable that the realization of the growth greater than the value shown in the table of yield (Table 6-18) would be expected.

Appennded table 1 Condition of investegated plot of Ryukyu – matsu forest

Plot No.	Location	Stand of age	Mean D. B. H (cm)	Mean height (m)	Number of trees (ha)	Volume (m³/ha)			Site index (m) –A : 20–
						Ryukyu – matsu	Broad leaved tree	Total	
1	Ozato, Itoman – shi	24	17.3	7.0	600	49	32	81	5.8
2	Canekodan, Gushikawa – shi	20	9.9	7.2	1,240	143	7	150	7.2
3	Ginbaru, Kin – son	19	6.3	4.4	2,800	35	1	35	4.7
4	Yona, Kunigami – son 1	22	12.4	11.3	1,080	97	102	200	9.2
5	Yona, Kunigami – son 2	22	13.7	11.8	1,270	138	37	174	9.5
6	Yona, Kunigami – son 3	13	8.3	8.8	2,400	81	50	131	9.7
7	Yona, Kunigami – son 4	13	4.0	4.3	10,300	67	0	67	7.2
8	Yona, Kunigami – son 5	25	9.8	9.9	2,000	104	70	173	10.2
9	Yona, Kunigami – son 6	25	11.6	12.7	2,400	226	61	287	7.7
10	Yona, Kunigami – son 7	13	5.7	6.3	8,900	147	19	167	11.8
11	Kina, Yomitan – son	18	5.6	3.1	2,300	18	0	18	3.8
12	Jahana, Motobu – cho 1	29	12.7	8.1	1,250	104	0	104	4.0
13	Jahana, Motobu – cho 2	29	6.2	5.2	4,000	87	0	87	5.6
14	Oku, Kunigami – son 1	12	4.3	4.5	8,500	70	6	77	8.0
15	Oku, Kunigami – son 2	12	4.5	5.6	10,500	79	8	87	9.5
16	Oku, Kunigami – son 3	24	17.6	9.3	930	128	56	184	7.6
17	Karadake, Ishigaki – shi	17	14.0	8.2	2,050	167	4	171	9.5
18	Sakieda, Ishigaki – shi 1	16	14.3	8.2	2,200	238	3	242	12.0
19	Sakieda, Ishigaki – shi 2	16	13.8	9.9	2,500	228	5	233	10.2

Appended table 1 Continued

Plot No.	Location	Stand of age	Mean D. B. H (cm)	Mean height (m)	Number of trees (ha)	Volume (m³/ha)			Site index (m) −A：20−
						Ryukyu − matsu	Broad leaved tree	Total	
20	Inoha, Motobu −cho 1	25	10.7	7.8	1,730	44	0	44	6.5
21	Inoha, Motobu −cho 2	27	13.9	10.9	1,380	163	55	218	7.8
22	Bannadake, Ishigaki − shi	42	36.2	17.7	530	390	5	394	8.4
23	Uehara, Ōgimi − son	24	7.1	7.3	3,800	124	26	150	5.8
24	Arakawa, Ishigaki − shi	20	22.3	14.2	780	211	65	276	14.2
25	Ōnogoshi, Hirara −shi 1	33	26.7	11.0	700	265	8	274	6.7
26	Ōnogoshi, Hirara −shi 2	28	20.9	10.3	680	250	18	268	7.1
27	Onna, Onna − son	22	8.1	6.9	3,600	118	6	124	6.1
28	Yābaru, Ueno − son 1	28	22.1	11.1	850	181	0	181	7.7
29	Yābaru, Ueno − son 2	28	21.8	11.9	800	185	7	192	8.4
30	Toyohara Hateruma, Taketomi − cho 1	17	11.0	6.9	2,200	105	0	105	8.3
31	Toyohara Hateruma, Taketomi − cho 2	17	10.0	8.3	2,300	104	1	105	9.7
32	Ohara Muraboka, Taketomi − cho 1	26	9.2	7.2	2,000	101	3	103	4.4
33	Ohara Muraboka, Taketomi − cho 2	26	7.0	5.8	1,200	213	7	220	5.4
34	Hunaura, Taketomi − cho 1	23	7.8	7.0	6,500	210	10	219	5.8
35	Hunaura, Taketomi − cho 2	22	6.7	6.3	7,700	210	3	214	5.5
36	Medorima, Ozato − son	15	10.0	6.9	1,400	45	8	53	6.2
37	Zaha, Itoman − shi 1	22	9.6	6.6	3,300	106	0	106	10.4
38	Zaha, Itoman − shi 2	19	12.8	8.7	2,700	151	0	151	7.9

Appended table 1 Continued

Plot No.	Location	Stand of age	Mean D.B.H (cm)	Mean height (m)	Number of tree (ha)	Volume (m³/ha) Ryukyu-matsu	Broad leaved tree	Total	Site index (m) -A: 20-
39	Takaya, Ishigaki-shi	22	18.6	15.4	800	328	12	340	13.8
40	Yōn, Ishigaki-shi 1	17	17.9	10.8	1,700	238	5	243	12.4
41	Yōn, Ishigaki-shi 2	12	11.6	10.2	2,600	117	5	182	15.5
42	Yōn, Ishigaki-shi 3	9	9.6	6.9	3,800	122	4	126	14.2
43	Hedo, Kunigami-son	26	14.2	7.8	1,200	80	0	80	4.9
44	Ginama, Kunigami-son	9	6.4	6.5	4,400	47	2	59	13.7
45	Hentona, Kunigami-son	16	6.0	5.2	2,400	22	6	28	6.8
46	Ie, Kunigami-son 1	13	3.9	4.4	4,200	15	9	24	7.3
47	Ie, Kunigami-son 2	13	3.9	3.1	4,100	12	4	16	5.6
48	Ie, Kunigami-son 3	13	4.1	3.6	4,100	15	3	18	6.4
49	Sosu, Kunigami-son	14	8.6	7.1	2,800	59	18	77	10.2
50	Arime, Higashi-son	13	3.9	3.0	4,900	18	2	20	5.4
51	Taiho, Ogimi-son	17	11.3	9.4	2,000	108	8	116	10.8
52	Oku, Kunigami-son 1	24	13.8	9.6	1,800	149	32	181	7.8
53	Oku, Kunigami-son 2	26	14.2	11.8	1,100	108	48	156	9.1
54	Ginama, Kunigami-son	12	5.6	4.5	5,600	42	6	48	8.0
55	Banna, Ishigaki-shi	17	17.1	10.1	2,400	286	0	286	11.6
56	Takada, Ishigaki-shi	10	6.5	6.0	5,600	59	0	59	11.8
57	Kuura, Ishigaki-shi 1	25	21.3	10.8	1,400	246	0	246	8.4
58	Kuura, Ishigaki-shi 2	20	14.2	8.3	1,700	114	6	120	8.3
59	Oku, Kunigami-son	14	4.5	4.2	2,800	14	10	24	6.7
60	Hentona, Kunigami-son 1	18	10.6	8.6	2,000	80	16	96	9.5
61	Hentona, Kunigami-son 2	18	10.8	7.9	1,900	68	8	76	8.8

Appended table 2 Environmental condition and character of soil profil in each plot

Plot No.	Slope types	Derection of slope	Inclination angle	Podition of slope	Parent material	Deposit types	Thickness of A_0 – horizon (cm)	Thickness of A, B – horizon (cm)
1	Raised land	N	5	Ridge	Ryukyu limestone	Residual	L : 2 F : + H : +	^{27}A / ^{140}B
2	Ridge in terrace	NE	10	Ridge	Kunigami gravel	Residual	L : 4 F : + H : +	^{6}A / ^{40}B
3	Raising curve	SE	16	Upper	Kunigami gravel	Residual	L : 3 F : + H : 0	^{12}A / $^{18}B_1$ / $^{22}B_2$
4	Equilibrium (Straight)	W	24	Middle	Paleozoic sandstone	Superfical	L : 5 F : 1 H : 0	^{+}g / ^{66}B
5	Equilibrium (Straight)	NE	28	Lower	Paleozoic sandstone	Superfical –colluvial	L : 4 F : 1 H : 0	^{8}A / $^{23}B_1$ / $^{25}B_2$
6	Equilibrium (Straight)	NE	10	Middle	Paleozoic sandstone	Superfical	L : 3 F : 1 H : +	^{6}A / $^{35}B_1$ / $^{15}B_2$
7	Raising curve	W	19	Ridge	Paleozoic sandstone	Residual	L : 4 F : 1 H : +	^{10}A / $^{25}B_1$ / $^{26}B_2$
8	Descending curve	NW	26	Lower	Paleozoic sandstone	Superfical –colluvial	L : 4 F : 1 H : 0	^{5}A / ^{58}B
9	Eqilibrium (Straight)	NW	22	Upper	Paleozoic sandstone	Superfical	L : 8 F : 2 H : +	^{15}A / $^{11}B_1$ / $^{40}B_2$
10	Equilibrium (Straight)	W	15	Middle	Paleozoic sandstone	Superfical	L : 2 F : 1 H : +	^{42}A / ^{32}B
11	Ridge in terrace	S	4	Ridge	Kunigami gravel	Residual	L : 2 F : + H : 0	^{3}A / $^{7}B_1$ / $^{12}B_2$
12	Raising curve	NE	6	Ridge	Paleozoic limestone	Residual	L : 3 F : 2 H : +	^{70}B
13	Equilibrium (Straight)	NW	21	Lower	Paleozoic limestone	Superfical	L : 1 F : 0 H : 0	^{70}B
14	Raising curve	E	12	Lower	Kunigami gravel	Residual	L : 3 F : + H : +	^{27}A / $^{19}B_1$ / $^{32}B_2$
15	Equilibrium (Straight)	NE	34	Middle	Paleozoic phyllite	Superfical	L : 3 F : 2 H : +	^{1}A / $^{22}B_1$ / $^{27}B_2$

Appended table 2 Continued

Plot No.	Slope types	Derection of slope	Inclination angle	Podition of slope	Parent material	Deposit types	Thickness of A_0 – horizon (cm)	Thickness of A, B – horizon (cm)
16	Raising curve	SW	29	Ridge	Kunigami gravel	Residual	L: 10 F: 3 H: +	15 A / 65 B
17	Equilibrium (Straight)	NW	28	Middle	Paleozoic phyllite	Superfical	L: 4 F: 2 H: +	18 A / 45 B
18	Raising curve	NE	21	Upper	Granitic	Superfical	L: 3 F: + H: +	17 B_1 / 45 B_2
19	Raised land	SE	6	Ridge	Granitic	Residual	L: 3 F: 0 H: +	25 B_1 / 50 B_2
20	Raising curve	SE	13	Ridge	Paleozoic limestone	Residual	L: 2 F: 0 H: 0	27 B_1 / 40 B_2
21	Equilibrium (Straight) Descending curve	SE	38	Lower	Paleozoic limestone	Superfical –colluvial	L: 2 F: + H: +	2 A / 70 B
22	Raised land	SE	7	Lower	Paleozoic limestone	Residual	L: 4 F: + H: +	28 B_1 / 35 B_2
23	Raising curve	S	26	Upper	Paleozoic phyllite	Residual	L: 3 F: 2 H: +	1 A / 36 B_1 / 32 B_2
24	Raised land	N	4	Ridge	Paleozoic phyllite	Residual	L: 3 F: + H: 0	19 B_1 / 35 B_2
25	Equilibrium (Straight)	S	8	Middle	Paleozoic limestone	Superfical	L: 2 F: 0 H: +	7 A / 50 B
26	Equilibrium (Straight)	E	13	Middle	Paleozoic limestone	Superfical	L: 2 F: 0 H: +	6 A / 50 B
27	Equilibrium (Straight)	W	18	Middle	Paleozoic phyllite	Superfical	L: 2 F: + H: +	0.2 g / 1 A / 35 B_1 / 20 B_2
28	Raised land	N	6	Ridge	Paleozoic limestone	Residual	L: 4 F: 1 H: +	1 A / 59 B
29	Raised land	S	4	Ridge	Paleozoic limestone	Residual	L: 3 F: 1 H: +	22 A / 43 B
30	Equilibrium (Straight)	N	33	Middle	Tertiary sandstone	Superfical	L: 3 F: 0 H: 0	10 A / 52 B
31	Descending curve	N	16	Lower	Tertiary sandstone	Colluvial	L: 5 F: 0 H: 0	22 A / 38 B

Appended table 2 Continued

Plot No.	Slope types	Derection of slope	Inclination angle	Podition of slope	Parent material	Deposit types	Thickness of A_0-horizon (cm)	Thickness of A, B-horizon (cm)
32	Raising curve	W	5	Ridge	Tertiary sandstone	Residual	L: 4 F: + H: 0	13 A / 42 B
33	Descending curve	W	24	Lower	Tertiary sandstone	Colluvial	L: 9 F: 0 H: 0	20 A / 40 B
34	Raising curve	S	10	Ridge	Tertiary sandstone	Residual	L: 4 F: 0 H: 0	2 A / 22 B_1 / 30 B_2
35	Equilibrium (Straight)	S	7	Middle	Tertiary sandstone	Superfical	L: 6 F: + H: +	20 A / 40 B
36	Raising curve	SW	25	Ridge	Tertiary sandstone	Residual	L: 1 F: + H: 0	2 A / 22 B_1 / 30 B_2
37	Raised land	S	5	Ridge	Ryukyu limestone	Residual		2 A / 20 B
38	Equilibrium (Straight)	S	10	Middle	Ryukyu limestone	Superfical		25 A / 55 B
39	Descending curve	NW	5	Lower	Andesite	Colluvial		20 A / 50 B
40	Descending curve	SW	5	Lower	Granitic	Colluvial		25 A / 45 B
41	Equilibrium (Straight)	SW	20	Middle	Granitic	Superfical		15 A / 60 B
42	Equilibrium (Straight)	S	17	Middle	Granitic	Superfical		A 14 – B_1 / 40 B_2
43	Equilibrium (Straight)	SE	27	Middle	Paleozoic phyllite	Superfical	F, F-H	8 A / 18 B
44	Equilibrium (Straight)	E	22	Upper	Paleozoic phyllite	Superfical	F	10 A / 28 B
45	Flat	SW	9	Top	Kunigami gravel	Residual	–	20 A / 53 B
46	Equilibrium (Straight)	NE	28	Upper	Paleozoic phyllite	Superfical	L	7 A / 35 B
47	Flat	NE	4	Top	Paleozoic phyllite	Residual	L, F	6 A / 11 B

Appended table 2 Continued

Plot No.	Slope types	Derection of slope	Inclination angle	Podition of slope	Parent material	Deposit types	Thickness of A0-horizon (cm)	Thickness of A, B-horizon (cm)
48	Equilibrium (Straight)	NE	26	Middle	Paleozoic phyllite	Superfical	L, F	6 A / 40 B
49	Equilibrium (Straight)	W	32	Middle	Paleozoic phyllite	Superfical	L, F	18 A / 15 B
50	Equilibrium (Straight)	SW	30	Middle	Paleozoic phyllite	Superfical	–	4 A / 45 B
51	Equilibrium (Straight)	NE	14	Upper	Paleozoic phyllite	Superfical	L	10 A / 20 B
52	Equilibrium (Straight)	W	34	Middle	Paleozoic phyllite	Superfical	L, F–H	12 A / 40 B
53	Equilibrium (Straight)	E	27	Middle	Paleozoic phyllite	Superfical	F–H	8 A / 24 B
54	Raising curve	E	16	Top	Paleozoic phyllite	Residual	L	3 A / 26 B
55	Descending curve	SW	22	Middle	Chert		L	25 A / 47 B
56	Raising curve	E	15	Upper	Granitic		L	8 A / 44 B
57	Flat	SW	5	Top	Paleozoic		L	10 A / 50 B
58	Equilibrium (Straight)	NE	34	Middle	Paleozoic		–	9 A / 64 B
59	Raising curve	N	32	Top	Paleozoic		L, F, H	6 A / 23 B
60	Raising curve	NE	31	Upper	Paleozoic sandstone		–	10 A / 38 B
61	Raising curve	NW	24	Upper	Paleozoic chert		L	10 A / 34 B

Appended table 3 Character of the soil profile in each plot

Plot No.	Horizon	Gravel (%)	Color	Soil structure	Soil moisture	Hardness index (mm)	Soil texture	Soil type
1	A	0	7.5YR 3/4 Dark brown	Granular	Moist	19	C	DRB-Ca
	B	0	7.5YR 4/4 Brown	Blocky	Moist	20	C	
2	A	0	10YR 3/3 Dark brown	Blocky	Moist	18	SL	RB
	B	0	7.5YR 5/6 Light brown	Massive	Moist	25	C	
3	A	0	10YR 5/6 Yellowish brown	Nutty	Moist	15	L	RB
	B_1	0	10YR 5/8 Yellowish brown	Massive	Moist	18	SL	
	B_2	0	7.5YR 5/8 Light brown	Massive	Moist	25	CL	
4	*g*	0	10YR 4/2 Grayish yellow brown		Dry			*g* RYI
	B	5	10YR 6/8 Light yellow brown	Blocky	Dry	20	CL	
5	A	5	10YR 3/3 Dark brown	Crumb	Dry	14	L	YC
	B_1	25	7.5YR 5/8 Light brown	Massive	Dry	22	CL	
	B_2	25	7.5YR 5/8 Light brown	Massive	Dry	22	CL	
6	A	3	10YR 3/3 Dark brown	Crumb	Moist	15	L	YC
	B_1	3	10YR 5/6 Yellowish brown	Massive	Moist	23	CL	
	B_2	0	10YR 6/6 Light yellowish brown	Massive	Moist	22	CL	
7	A	0	10YR 3/4 Dark brown	Crumb	Dry	20	L	YB
	B	10	10YR 5/8 Light yellowish brown	Massive	Dry	26	CL	
	B_2	15	10YR 7/6 Grayish yellow brown	Massive	Dry	27	CL	
8	A	3	10YR 6/4 Yellowish orange	Blocky	Moist	18	CL	YC
	B	25	5YR 8/5 Pale orange	Massive	Moist	22	C	

Appended table 3 Continued

Plot No.	Horizon	Gravel (%)	Color	Soil structure	Soil moisture	Hardness index (mm)	Soil texture	Soil type
9	A	3	10YR 4/5 Brown	Crumb	Dry	21	CL	Yc
	B1	20	10YR 8/5 Light yellow orange	Massive	Dry	20	C	
	B2	20	7.5YR 8/5 Light yellow orange	Massive	Moist	23	C	
10	A	15	10YR 4/4 Brown	Crumb	Moist	Mild	CL	Yc
	B	30	10YR 6/8 Light yellowish brown	Massive	Moist	Compact	C	
11	A	0	7.5YR 2/3 Very dark brown	Nutty	Dry	17	CL	RB
	B1	0	7.5YR 5/8 Light brown	Massive	Dry	22	C	
	B2	0	2.5YR 3/6 Dark red brown	Massive	Moist	23	C	
12	B	0	2.5YR 4/8 Reddish brown	Massive	Moist	21	C	DRB－ca
13	B	0	5YR 4/8 Reddish brown	Massive	Moist	24	C	DRC－ca
14	A	0	10YR 4/3 Yellowish brown	Crumb	Dry	22	L	Yc
	B1	5	10YR 5/8 Yellowish brown	Massive	Dry	26	C－CL	
	B2	5	10YR 5/8 Yellowish brown	Massive	Dry	27	C	
15	A	0	10YR 4/3 Yellowish brown	Blocky	Moist	18	CL	Yc
	B1	5	10YR 6/8 Light yellowish brown	Blocky	Moist	25	C	
	B2	3	7.5YR 5/8 Light brown	Massive	Moist	26	C	
16	A	0	10YR 4/6 Brown	Crumb	Moist	13	L	RA
	B	3	7.5YR 5/8 Light brown	Massive	Moist	18	CL	
17	A	15	7.5YR 4/3 Brown	Granular	Moist	14	L	Yc
	B	30	7.5YR 4/6 Brown	Massive	Moist	24	C	

Appended table 3 Continued

Plot No.	Horizon	Gravel (%)	Color	Soil structure	Soil moisture	Hardness index (mm)	Soil texture	Soil type
18	B_1	5	7.5 YR 4/4 Brown	Massive	Dry	25	C	Y_B
	B_2	0	7.5 YR 5/6 Light brown	Massive	Dry	28	C	
19	B_1	20	10 YR 4/6 Brown	Massive	Dry	25	C	Y_B
	B_2	30	7.5 YR 5/8 Light brown	Massive	Dry	20	C	
20	B_1	10	10 YR 6/6 Light yellowish brown	Blocky	Dry	24	CL	DR_B-ca
	B_2	10	5 YR 4/8 Reddish brown	Blocky	Moist	27	C	
21	A	0	10 YR 3/3 Dark brown	Crumb	Dry	11	L	DR_B-ca
	B	20	5 YR 4/8 Reddish brown	Massive	Moist	23	CL	
22	B_1	3	10 YR 5/4 Yellowish brown	Massive	Dry	20	CL	Y_B
	B_2	20	7.5 YR 4/6 Brown	Massive	Dry	21	CL	
23	A	0	10 YR 3/2 Brownish black	Crumb	Dry		L	Y_A
	B_1	0	10 YR 6/6 Light yellowish brown	Massive	Dry	26	CL	
	B_2	0	7.5 YR 5/8 Light brown	Massive	Moist	27	CL	
24	B_1	0	7.5 YR 4/4 Brown	Blocky	Dry	26	C	Y_B
	B_2	0	7.5 YR 4/6 Brown	Massive	Dry	27	C	
25	A	0	7.5 YR 2/2 Brownish black	Blocky	Dry	26	CL	DR_B-ca
	B	0	7.5 YR 4/6 Brown	Massive	Moist	24	C	
26	A	0	7.5 YR 2/2 Brownish black	Blocky	Dry	26	CL	DR_B-ca
	B	0	7.5 YR 4/6 Brown	Massive	Moist	24	C	
27	*g*	0	10 YR 5/2 Grayish yellow brown					gRY_I

Appended table 3 Continued

Plot No.	Horizon	Gravel (%)	Color	Soil structure	Soil moisture	Hardness index (mm)	Soil texture	Soil type
27	A	0	7.5 YR 4／2 Grayish brown	Crumb	Dry	17	L	
	B_1	3	10 YR 7／4 Yellowish orange	Massive	Dry	28	SiL	
	B_2	3	7.5 YR 5／8 Light brown	Massive	Dry	26	CL	
28	A	0	7.5 YR 3／3 Dark brown	Blocky	Dry	29	CL	DR_B－ca
	B	0	5 YR 4／6 Reddish brown	Massive	Dry	17	C	
29	A	0	7.5 YR 3／3 Dark brown	Blocky	Dry	29	CL	DR_B－ca
	B	0	5 YR 4／6 Reddish brown	Massive	Dry	17	C	
30	A	20		Crumb	Moist	Mild	L	Y_C
	B	30		Blocky	Moist	Mild	SL	
31	A	5		Crumb	Moist	Mild	CL	Y_D(d)
	B	10		Massive	Moist	Mild	C	
32	A	0		Crumb	Moist	Mild	SL	Y_B
	B	5		Massive	Moist	Mild	SL	
33	A	5		Crumb	Moist	Mild	SL	Y_D(d)
	B	20		Massive	Moist	Mild	C	
34	A	0		Crumb	Moist	Mild	SL	Y_B
	B	0		Massive	Moist	Compact	C	
35	A	0		Crumb	Moist	Mild	SL	Y_C
	B	0		Massive	Moist	Compact	C	
36	A	0	10 YR 3／3 Dark brown		Moist		SiL	Im－ca

Appended table 3 Continued

Plot No.	Horizon	Gravel (%)	Color	Soil structure	Soil moisture	Hardness index (mm)	Soil texture	Soil type
36	B_1	0	2.5YR 4/2 Grayish red	Blocky	Moist	15	C	
	B_2	0	7.5YR 5/1 Brownish gray		Moist	16	C	
37	A	0			Moist	12	L	DR_B-ca
	B	0			Moist	21	CL	
38	A	0				12	L	DR_C-ca
	B	0				24	CL	
39	A	3				11	SiL	DR_D
	B	0				16	SL	
40	A	0				10	L	DR_C
	B	0				18	SL	
41	A	0				13	L	DR_C
	B	5				17	SL	
42	AB	0				18	L	DR_C
	B	0				28	SL	
43	A		10YR 3/3 Dark brown	Nutty	Moist	Mild	C	Y_C
	B		7.5YR 5/8 Light brown	Massive	Moist	Compact	C	
44	AB		10YR 3/4 Dark brown	Granular	Moist	Mild	C	Y_D(d)
	B		7.5YR 5/8 Light brown	Massive	Moist	Compact	C	
45	A		10YR 4/6 Brown	Nutty	Moist	Mild	C	R_B
	B		7.5YR 5/8 Light brown	Massive	Moist	Compact	C	

Appended table 3 Continued

Plot No.	Horizon	Gravel (%)	Color	Soil structure	Soil moisture	Hardness index (mm)	Soil texture	Soil type
46	A		7.5 YR 4/4 Brown	Nutty	Moist	Mild	C	YB
	B		10 YR 5/8 Yellowish brown	Nutty	Moist	Compact	C	
47	A		7.5 YR 4/4 Brown	Nutty	Moist	Mild	C	YA
	B		7.5 YR 6/8 Orange	Nutty	Moist	Compact	C	
48	A		7.5 YR 4/4 Brown	Granular	Moist	Mild	CL	YC
	B		7.5 YR 5/8 Light brown	Nutty	Moist	Compact	C	
49	A		10 YR 5/4 Dull yellowish brown	Granular	Dry	Mild	CL	RC
	B		7.5 YR 5/8 Light brown	Massive	Moist	Solidity	CL	
50	A		7.5 YR 3/3 Dark brown	Nutty	Moist	Mild	CL	RC
	B		7.5 YR 5/8 Light brown	Massive	Moist	Very compact	C	
51	A		7.5 YR 5/6 Light brown	Nutty	Dry	Mild	CL	RC
	B		7.5 YR 5/8 Light brown	Massive	Moist	Very compact	C	
52	A		10 YR 3/4 Dark brown	Blocky	Moist	Mild	C	RC
	B		7.5 YR 6/8 Orange	Blocky	Moist	Mild	C	
53	A		10 YR 5/4 Dull yellowish brown	Nutty	Moist	Mild	C	YC
	B		7.5 YR 5/8 Light brown	Nutty	Moist	Compact	C	
54	B_1		10 YR 4/6 Brown	Nutty	Moist	Mild	C	YC
	B_2		7.5 YR 5/8 Light brown	Nutty	Moist	Compact	C	
55	A		7.5 YR 2/3 Very dark brown	Blocky	Moist	Mild	CL	YC
	B		10 YR 5/6 Yellowish brown	Blocky	Moist	Mild	CL	

Appended table 3 Continued

Plot No.	Horizon	Gravel (%)	Color	Soil structure	Soil moisture	Hardness index (mm)	Soil texture	Soil type
56	A		7.5YR 4/3 Brown	Nutty	Moist	Mild	C	Y_C
	B		7.5YR 5/8 Light brown	Massive	Moist	Compact	C	
57	A		10YR 4/2 Granish yellow brown	Granular	Dry	Compact	SiL	gRY_{II}
	B		5YR 5/8 Bright reddish brown	Massive	Dry	Compact	SiL	
58	A		10YR 3/3 Dark brown	Nutty	Dry	Compact	SiL	$Y_D(d)$
	B		10YR 5/6 Yellowish brown	Nutty	Dry	Compact	SiL	
59	A		10YR 4/4 Brown	Nutty	Moist	Mild	CL	Y_A
	B		10YR 6/6 Light yellowish brown	Nutty	Moist	Mild	C	
60	A		10YR 4/3 Dull yellowish brown	Nutty	Moist	Mild	C	Y_B
	B		10YR 5/6 Yellowish brown	Massive	Moist	Compact	CL	
61	A		7.5YR 3/4 Dark brown	Nutty	Moist	Mild	C	Y_C
	B		5YR 5/8 Bright reddish brown	Nutty	Moist	Compact	C	

Appended table 4 Physical and chemical property of soil in each plot

Plot No.	Horizon	Volume weight	Maxmum water capacity (%)	Pore space (%)		Minimum air capacity (%)	Volume composition (%)			pH(H_2O)
				Fine	Coarse		Solid	Water	Air	
1	A	103	50	40	19	9	41	30	29	7.2
	B	120	44	42	14	4	44	41	15	7.0
2	A	123	50	32	19	1	49	40	11	5.1
	B	123	52	37	15	0	48	40	12	4.8
3	A	94	49	39	24	14	37	37	26	4.9
	B_1	167	33	24	15	16	61	20	19	4.7
	B_2	162	36	32	9	15	59	24	17	4.7
4	B	119	41	30	23	12	47	36	17	4.9
5	A	114	36	24	26	14	50	32	18	4.8
	B_1	134	36	36	15	15	49	31	20	4.8
	B_2	132	38	34	17	13	49	32	19	4.5
6	A	103	44	35	22	13	43	38	19	4.8
	B_1	119	35	32	19	18	47	33	20	4.7
	B_2	126	38	31	20	13	49	32	19	4.8
7	A	112	37	28	28	19	44	33	23	5.3
	B_1	125	35	35	19	19	46	30	24	4.9
	B_2	123	33	29	24	20	47	30	23	4.8
8	A	102	38	36	21	19	43	32	25	5.4
	B	113	37	34	20	17	46	31	23	5.0
9	A	104	36	32	24	20	44	33	23	5.4

Appended table 4 Continued

Plot No.	Horizon	Volume weight	Maxmum water capacity (%)	Pore space (%)		Minimum air capacity (%)	Volume composition (%)			pH (H_2O)
				Fine	Coarse		Solid	water	Air	
	B_1	115	43	40	17	14	43	38	19	4.9
	B_2	117	31	30	22	21	48	27	25	4.9
10	A	83	45	36	29	21	34	26	40	5.4
	B	128	44	28	23	7	49	29	22	5.1
11	AB	148	42	29	16	3	55	32	13	4.5
	B	139	47	30	17	0	53	37	10	4.4
12	B	109	45	44	15	14	41	38	21	4.8
13	B	99	55	47	11	4	41	44	15	4.7
14	A	83	45	38	28	21	34	26	40	5.3
	B_1	128	44	31	18	5	49	29	22	5.0
	B_2	126	46	39	16	9	48	30	22	5.0
15	B_1	141	28	26	18	16	56	24	20	4.8
	B_2	138	30	27	19	16	54	25	21	4.8
16	A	88	64	25	30	− 2	38	49	13	4.8
	B	124	44	28	25	9	47	37	16	4.6
17	A	122	42	27	27	12	46	22	32	6.3
	B	131	54	39	14	− 1	47	41	12	6.0
18	B_1	106	44	40	19	15	41	27	32	5.7
	B_2	122	41	41	13	13	46	30	24	5.2
19	B_1	140	31	31	14	14	55	28	17	5.8

Appended table 4 Continued

Plot No.	Horizon	Volume weight	Maxmum water capacity (%)	Pore space (%)		Minimum air capacity (%)	Volume composition (%)			pH (H_2O)
				Fine	Coarse		Solid	water	Air	
	B_2	138	31	38	9	16	53	28	19	5.3
20	B_1	112	38	37	17	16	46	29	25	5.6
	B_2	124	40	41	13	14	46	31	23	5.0
21	AB	98	42	36	24	18	40	26	34	5.8
	B	128	44	40	12	8	48	32	20	5.0
22	B_1	136	31	24	21	14	55	28	17	6.6
	B_2	142	34	29	17	12	54	29	17	6.5
23	B_1	128	47	33	18	4	49	34	17	4.8
	B_2	120	47	35	19	8	45	33	22	4.5
24	B_1	108	41	31	28	18	41	33	26	6.3
	B_2	136	38	33	16	11	51	28	21	5.7
25	A	110	63	38	19	−6	43	51	6	7.1
	B	127	54	42	13	1	45	44	11	7.0
26	A	122	42	36	18	12	46	22	32	7.2
	B	131	54	43	11	0	46	41	13	7.0
27	AB	136	37	35	12	10	53	33	14	4.8
	B	142	38	36	10	8	54	35	11	4.4
28	AB	114	46	36	19	9	45	25	30	6.9
	B	110	63	32	28	−3	40	30	30	6.9
29	AB	135	45	32	18	5	50	30	20	7.0

Appended table 4 Continued

Plot No.	Horizon	Volume weight	Maxmum water capacity (%)	Pore space (%)		Minimum air capacity (%)	Volume composition (%)			pH (H_2O)
				Fine	Coarse		Solid	water	Air	
	B	134	50	30	22	2	48	39	13	7.1
30	A	134	43	35	13	5	52	21	27	6.0
	B	141	41	35	13	7	52	25	23	5.1
31	A	117	49	38	16	5	46	30	24	5.9
	B	147	46	28	16	−2	56	34	10	5.0
32	A	117	40	32	21	13	47	14	39	5.6
	B	109	51	33	24	6	43	42	15	5.4
33	A	127	50	33	17	0	50	28	22	5.6
	B	145	48	22	22	−4	56	35	9	5.4
34	A	107	46	43	16	13	41	18	41	5.7
	B	116	45	34	23	12	43	32	25	5.3
35	A	122	50	33	19	2	48	26	26	5.7
	B	144	47	25	21	−1	54	39	7	5.2
36	A									
	B_1									
	B_2									
37	A									
	B									
38	A									
	B									

Appended table 4 Continued

Plot No.	Horizon	Volume weight	Maxmum water capacity (%)	Pore space (%)		Minimum air capacity (%)	Volume composition (%)			pH (H_2O)
				Fine	Coarse		Solid	water	Air	
39	A									
	B									
40	A									
	B									
41	A									
	B									
42	AB									
	B									
43	A	91	36	33	28	27	37	32	29	4.3
	B	146	42	36	8	2	56	36	3	4.8
44	AB	94	55	37	25	7	38	38	24	5.3
	B									
45	A	95	53	37	24	8	39	30	31	4.6
	B	137	41	34	9	3	57	38	5	5.0
46	A	95	57	47	12	2	41	45	14	5.1
	B	125	51	41	11	1	48	42	10	3.4
47	A	114	40	45	9	14	46	42	12	4.3
	B	137	38	36	10	8	54	37	9	4.9
48	A	97	44	40	11	7	49	31	20	5.1
	B	132	40	36	13	9	51	35	14	4.8

Appended table 4 Continued

Plot No.	Horizon	Volume weight	Maxmum water capacity (%)	Pore space (%)		Minimum air capacity (%)	Volume composition (%)			pH (H_2O)
				Fine	Coarse		Solid	water	Air	
49	A	125	45	29	23	7	48	25	27	5.3
	B	160	30	33	2	5	65	30	3	5.2
50	A	92	42	30	31	19	39	28	33	5.5
	B	150	37	26	22	11	52	29	19	5.0
51	A	100	43	26	35	18	39	23	38	4.7
	B	137	43	31	18	6	51	23	16	5.1
52	A	107	40	30	24	14	45	25	29	4.4
	B	137	44	38	9	3	53	38	9	5.0
53	A	110	43	27	28	12	45	25	30	4.8
	B									
54	B	125	45	37	11	3	52	28	20	5.0
	B	180	43	32	14	3	54	34	12	5.0
55	A	96	52	40	17	5	43	40	17	5.9
	B	113	41	24	20	3	56	41	3	5.6
56	A	102	55	47	13	5	40	44	16	4.7
	B	165	20	13	29	22	58	14	28	4.5
57	A	91	49	36	25	12	39	37	24	5.8
	B	156	39	38	16	4	57	22	21	5.0
58	A	114	47	31	21	5	48	32	20	6.1
	B	138	39	29	17	7	54	30	16	5.2

Appended table 4 Continued

Plot No.	Horizon	Volume weight	Maxmum water capacity (%)	Pore space (%)		Minimum air capacity (%)	Volume composition (%)			pH(H_2O)
				Fine	Coarse		Solid	water	Air	
59	A	93	36	29	30	3	41	21	38	4.1
	B	113	50	27	28	5	45	21	34	4.5
60	A	115	40	41	9	10	50	34	16	6.0
	B									
61	A	104	47	42	13	8	45	43	12	6.6
	B	125	50	44	8	3	48	46	6	6.2