琉球大学学術リポジトリ

一滴の連続的な落下による土塊の破壊試験(農業工学科)

メタデータ	言語:
	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: 翁長, 謙良, 宜保, 清一, Onaga, Kenryo, Gibo, Seiichi
	メールアドレス:
	所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/4249

一滴の連続的な落下による土塊の破壊試験*

翁 長 謙 良** 宜 保 清 一**

Kenryo ONAGA and Seiichi GIBO : Disintegration test of the soil block using continuous falling of a water drop

I 緒 言

雨滴による地面侵食は土壌面と雨滴の衝突現象であり，定量的には人工降雨等による土塊の崩壊試験によってある程度土の侵食性について知ることができる。しかし雨滴の土塊上面落下時の運動が非定常で瞬間的であることは破壊機構の力学的な解明をより困難にしている。従来から一滴の水滴による侵食に関する研究はかなり行なわれているが，[3,4,6,7] 一滴の連続的落下による土塊の破壊現象と含水状態，運動エネルギー相互の関係については皆無である。そこでこれらについて実験を行ない，土構造の安定度と侵食性の判別について検討した結果を報告する。

II 水滴発生装置と水滴

1 水滴発生装置

Fig. 1は水滴発生装置でいわゆるマリオットの器を応用したものであり，注射針の太さにより水滴の大きさを適宜変えることができる。これを種々の高さにセットし，直径11.5 cm の鉛ビパイプに連結し，水滴を落下させる。落下高さ 2.5 m， 6.5 mにおける設置場所はビル内の階段の吹抜を利用し，水滴発生個所から落下地点まで装置外の空気の流れの影響がないよう工夫した。また落下高さ1.0mおよび 0.5 mにおける実験と個々の水滴重の測定は室内で行なった。なお実験には蒸留水と蒸留脱気水を，注射針は1種類（直径 0.45 mm）用いた。

2 水滴落下点の分散

Fig.2は落下高さをそれぞれ2.5 m， 6.5 mにしたときの各実験ごとの水滴落下点のばらつきの変化である。数字はそれぞれのマス目に落下した水滴の数でO点は水滴発生点（注射針の先端）の鉛直下方の点である。落下距離が大きくなるとO点よりの偏位が大となり，各実験ごとに個々のマス目の数値が変動する。偏位の生ずる主な要因は水滴が落下する際に受ける空気力学上の力による変形，振動や回転等であるといわれている。[2] 本実験においては落下高さが2.5 mの場合は水滴の殆んどが1個のマスに集

* 昭和52年度 農業土木学会九州支部講演集 259～260，261～264
** 琉球大学農学部農業工学科
琉球大学農学部学術報告 24 : 439～448（1977）

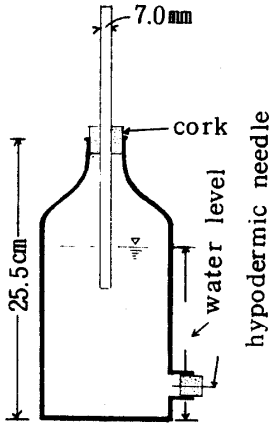


Fig. 1. Apparatus for water drops

中して落下するが，6.5 m の場合は水滴の95%以上が4個のマスに分散している。従って例えば供試体（円柱）が4個のマス（4cm²）を殆んどカバーできる場合，隣り合った4個のマス目（正方形）の数字の和が最大になるような個所に供試体を据えるとよい。なお落下高さ1.0 m，0.5 m についても同様な落下試験を行なったが偏位はみられず水滴の全てが供試体上に落下した。

1			2			3		
7			21			5		
90	3		76	3		92	1	
						2		
0			0			0		

height of fall : 2.5m
water level : 14. 2 cm

1*				2				3**				4			
14	24	1		21	36			17				22	46	1	
19	37			10	32			23	22			19	11		
2					1			1	3			1			
	0				0				0				0		

height of fall : 6.5 m
water level : 14.1cm

Fig. 2. Variance of the falling point for 100 drops.
water temperature : 28℃. relative humidity : 65%
* drops : 97, ** drops : 96

3　水滴の落下間隔

Fig. 1において水位がガラス管の下端まで下がる間は注射針からの流れは不変とみなされるが[9]，流れが不連続（水滴として落下する）の場合は単位時間当りの落下水滴数がいくぶん変化する(Table. 1)。特に温度差による影響は大で，温度が高い程単位時間当りの滴下数が増大する。また水温が室温とほゞ同じになると滴下数の変動の幅が減少する傾向にある。これらのことは水分子の活動の状態や容器内の空気圧の変動によるものと思われる。従って水滴発生の条件が全て同じではなく，そのために個々の水滴重にも差異が生ずるものと思われる。

Table 1. Falling time of 100 drops by water temperature

water temperature(℃)	16.5	18.0	25.5		34.5	32.5
water level (cm)	14.2	14.1	14.2	14.1	14.2	14.1
falling time of 100 drops (sec)	277.2	271.3	209.6	210.3	155.5	166.7

3 水滴の重さ

水滴の重さもまた落下間隔と同じように水温に支配される。Table 2 は蒸留脱気水による実験結果である。測定方法は20個の秤量ビンに各1滴ずつの水滴をとり，100 分の1 mgまで測定し，各滴の重さのばらつきを平均自乗誤差（m.e)で表わし，1滴の重さの平均値は1滴ずつ測定した平均（①欄)，20滴の重さから求めた2回測定の平均(②欄)で示した。Table 2 をみると水温の上昇に伴い平均値は下降するが，①欄と②欄の平均値の大小関係は26° および34° において逆転している。また水滴重のばらつきは室温附近が少ない値を示している。前者は水滴の蒸発の差，後者は室温と水温の差によるものと思われる。

Table 2. Variance of water drops by water temperature

water temperature (℃)	water level (cm)	relative humidity (%)	mean ① *	mean ② **	m, e. of mean ①
16.5	14.4	80	36.31	35.80	0.09
20.2	14.2	83	35.94	35.77	0.09
26.0	14.0	75	33.55	33.92	0.07
34.0	14.2	80	31.87	32.10	0.10

* mean of each 20 mass
** mean of sum 20 masses

4 水滴のエネルギー

本実験は雨滴のエネルギーを重視する立場から水滴の大きさを直径 3.0 ～ 4.0 mmとし，それにより落下高さを約 6.5 m にしたのであるが，それでもまだ 3.0 mmの水滴が経速度（8.06 m/s)を得る高さに達していない[2,5]。1滴の水滴のエネルギーは空気の抵抗を無視すると，落下高と質量によって決まり，$E = \frac{1}{2} mv^2$ によって計算される。Table 2 の26 ℃における水滴重（33.92 mg，直径 4.0 mm）を用いて落下

高さ1.0 m，2.5 m，6.5 m の水滴の運動エネルギーを求めると，それぞれ3.14×10^3，6.52×10^3，11.3×10^3エルグとなる。また直径4.5mmおよび5.0mmの水滴が11.3×10^3エルグのエネルギーをだすための必要な高さはそれぞれ3.2 m，2.0 mである。以上のことからエネルギー的には水滴径を変えることにより高さの過不足をカバーできるが，自然降雨との関連および水滴の落下位置のばらつきの度合などを考慮した水滴径と落下高さが重要な課題となる。

Ⅲ 実験方法

供試土塊と乾燥処理　受食性の国頭礫層土（Yagaji, Kin）と崩壊性の泥岩風化土[1,8]（Tomigusuku）の2000μフルイ通過試料を十分風乾し，底に小穴を設けた円筒（内径26mm，有効高38mm）に均一に詰めた。また練返しの場合は液性限界測定器の落下回数13回に相当するペーストを気泡を追い出しながら詰めた。それらを蒸溜水中で飽和させた後，所定の水分状態まで乾燥させた。供試土塊の水分設定は[1]蒸気圧法によったが，実際面を考慮して自然乾燥処理を併用した。

土塊の破壊試験　水滴発生装置と風防筒の直下に据えた供試土塊据付け台の上下に飛散土と崩落土受けを取り付け適時採取できるようにし，滴数を時間から換算する方法を採用したため毎回試験前後に100滴に要する時間と水温をチエックした。採取は原則として40，100，180，280，400，600滴に相当する時間と，急激な変化が起る時点に行なわれたが，倒壊および完全崩壊の場合には直ちに中止した。なお各滴下回数毎に飛散，崩落積算乾土重量を求め，全乾土重量に対する百分率をもってその破壊率とした。

Ⅳ 結果と考察

1　土塊の破壊率と水滴数の関数

Fig 3 に示すように，水滴による土塊の破壊は土の種類，乾燥の程度によってある決まった変化をする。そこで0～600の範囲の滴数と0～25％の範囲の破壊率において終了時の供試土塊の形態をいくつかの破壊のタイプに分類を試みたのがFig. 4であり，3試料の代表的なものをTable 3に示す。

タイプa：破壊率が0.5以下，土塊上面ではほとんど穿孔作用がなく水滴の飛散がおこるのみである。この水の飛沫は水平に近い角度で飛び，わずかに細粒を含む。水滴の運動エネルギーに対して構造的に安定の状態。

タイプb：0.5～7.5％の範囲の破壊率を示し，衝撃による穿孔と飛散現象が認められ，その量も水滴数に比例して漸次増大するが，少ない。土塊上面において吸水・浸潤作用による拡散が緩慢であるため，小さな穿孔跡に水がたまり，その後の衝撃エネルギーを減じる。土構造は未だ安定である。

タイプc：7.5～25％の破壊率，穿孔・飛散現象が盛んにおこり，湛水深・量共に増大する傾向がある。

タイプd：600以下の滴数で破壊率が25％に達する。穿孔・飛散現象が一般と激しくなり，その量も大きい。

タイプe：300～600の範囲の水滴で倒壊，分散性や崩壊性の土および高PF領域においてスレーキング現象のおこる土は土塊の上部および周面からの水の拡散によって軟弱化するので，保持および支持力の低下をきたし，偏心的な水滴の打圧によって土塊は傾くか倒壊する。したがって，構造的に不安定な状態といえる。

タイプf：0～300の範囲の水滴で倒壊，分散性のsiltyな土塊ではタイプeにおけるよりも早い水の拡散によって下部は安定を欠き，水滴の打圧によって倒壊する。

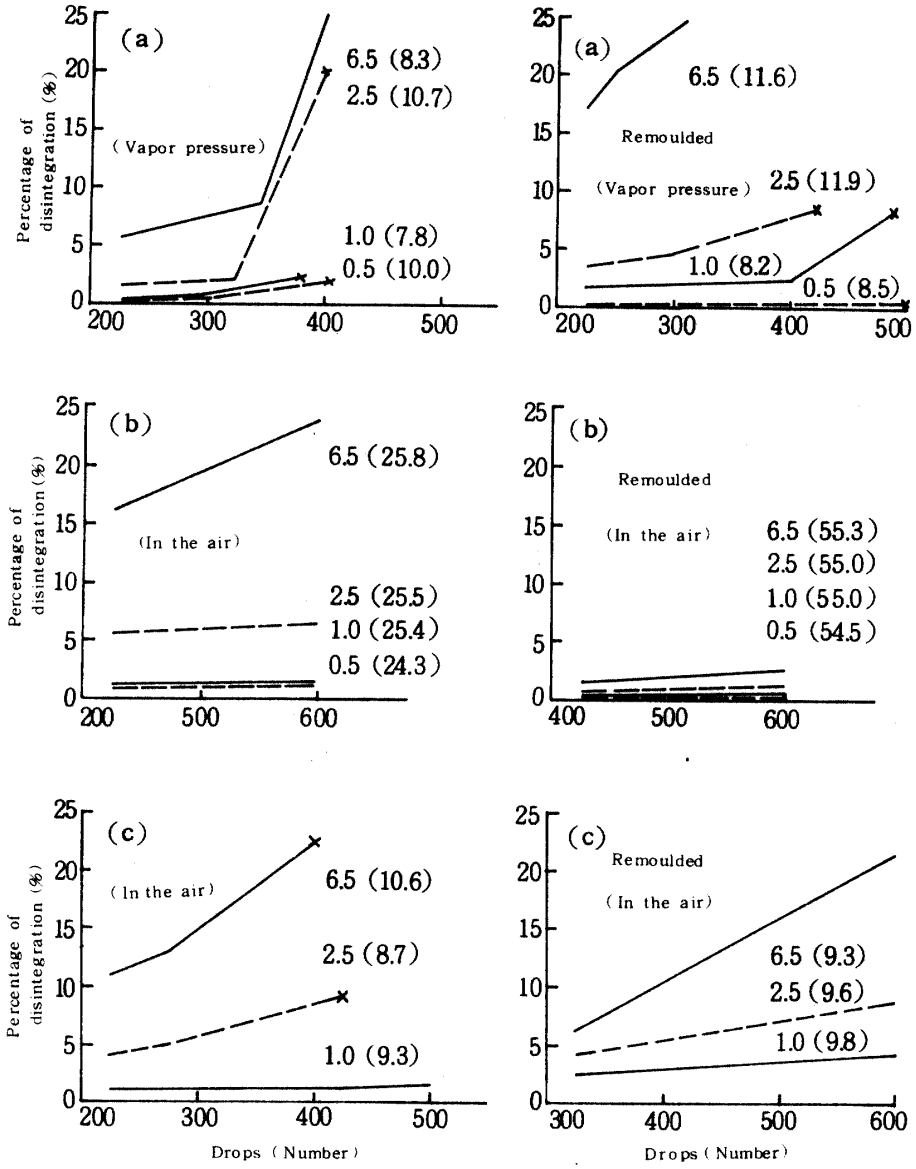


Fig. 3. Relation between percentages of disintegration and number of water drops (a: Yagaji, b: Kin, c: Tomigusuku)

Yagaji の蒸気圧法による乾燥処理供試土塊はほとんどタイプeに属し，その自然乾燥処理土塊では低PF領域がタイプfに属する。練返した場合でもほとんどタイプeであるが，一部の低PF領域はタイプa～cにあり，水滴の衝撃エネルギーに対して安定している。Kinは全体的に破壊が少なく，一部PF 5.5前後の自然乾燥土塊だけがタイプd・eの性質を示す。Tomigusukuの自然乾燥土塊では一部を除き，タイプa～cに属し，構造的にやや安定している。結局，この分類から，水滴の運動エネルギーに対する土構造の安定度はYagaji で低く，Kin と Tomigusuku で一部を除いて高いことが分る。このことは人工降雨の衝撃作用による土塊の崩壊試験結果とほとんど一致する[1)]。

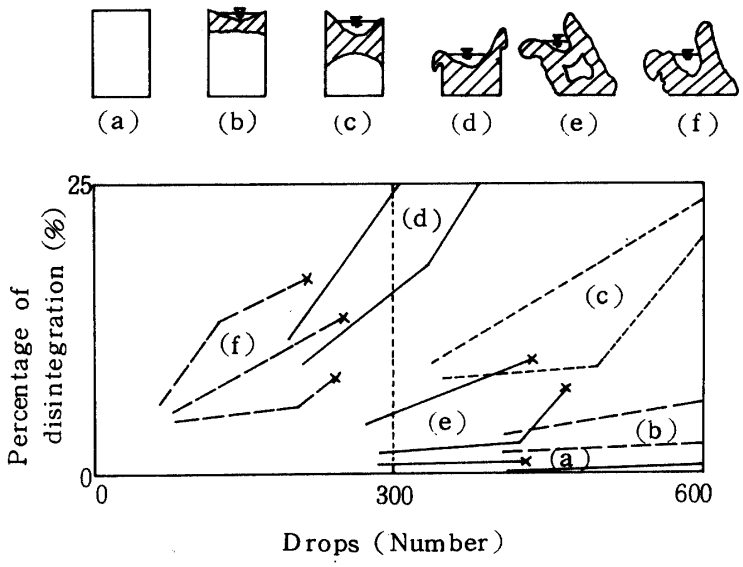


Fig. 4. Type of disintegration

Table 3. Relation between type of disintegration and height of falling (m), initial soil water content (%)

Type	Falling height	Yagaji								Remoulded Yagaji					
		Vapor pressure					In the air			Vapor pressure				In the air	
a	0.5														48.0
	1.0														45.0
b	0.5									1.5					
	1.0									1.5					
	2.5														47.0
	6.5														
c	6.5														45.9
d	6.5	0.9		8.3	20.4					0.7	4.0	11.0	19.0	6.4	
e	0.5	1.7	4.9	10.0	19.3		6.7				3.9	8.5	18.0	6.8	
	1.0	1.3	4.5	7.8	20.7		6.0				4.5	8.2	17.6	6.7	
	2.5	1.3	4.3	10.7	20.5		5.7			1.5	4.4	11.9		6.2	
	6.5		3.8				6.3								
f	0.5							30.0							
	1.0							29.6							
	2.5							29.0							
	6.5							28.6							

Table 3. Continued

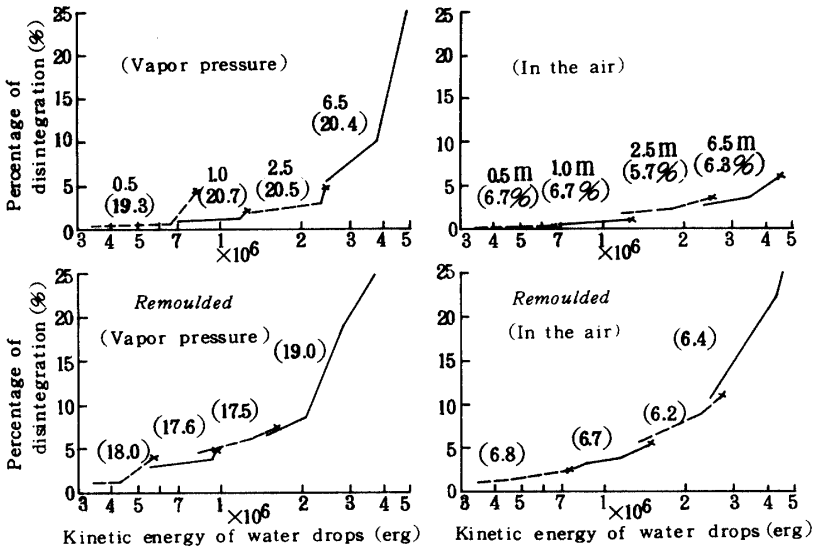
Type	Falling height	Kin							Remoulded Kin						
		Vapor pressure			In the air				Vapor pressure			In the air			
a	0.5	6.4	23.2		7.5	11.8			6.3	23.6		7.0	10.5	54.5	
		6.3	21.5						6.3			7.6	11.0	55.0	
b	0.5							24.3							
	1.0							25.4		22.5					
	2.5	6.0	21.5					25.5	6.7	22.0			12.6	55.0	
	6.5													55.3	
c	6.5	5.7	22.8					25.8	4.7	23.6			9.4		
d	6.5				6.5	13.0						6.8			
e	1.0				6.3	13.6									
	2.5				5.5	12.2									

Table 3. Continued

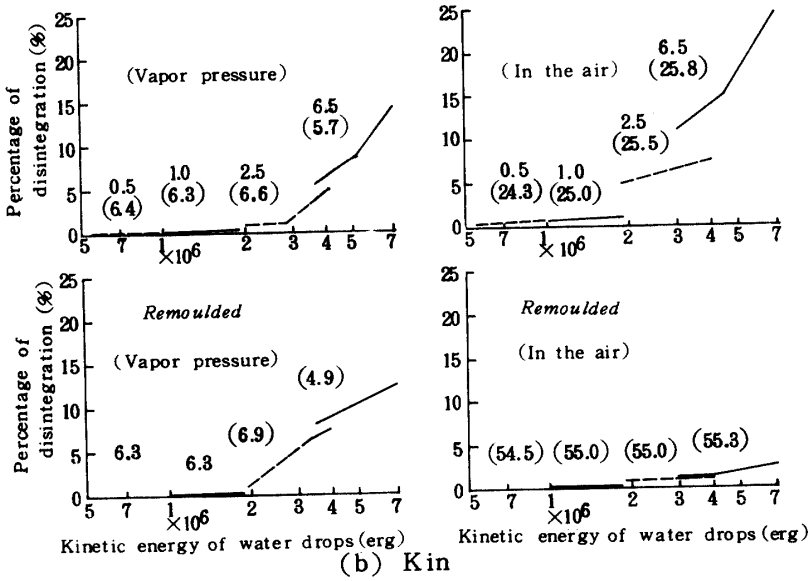
Type	Falling height	Tomigusuku				Remoulded Tomigusuku			
		In the air				In the air			
a	1.0							34.0	
b	1.0	7.0	9.3	26.9		8.9	9.8		50.1
	2.5		10.9	25.6					49.6
	6.5							32.6	
c	6.5						9.3		50.6
d	6.5	6.0					10.6		
e	2.5	8.7							
	6.5								
			10.6	23.7					

2 破壊率と水滴の運動エネルギーの関係

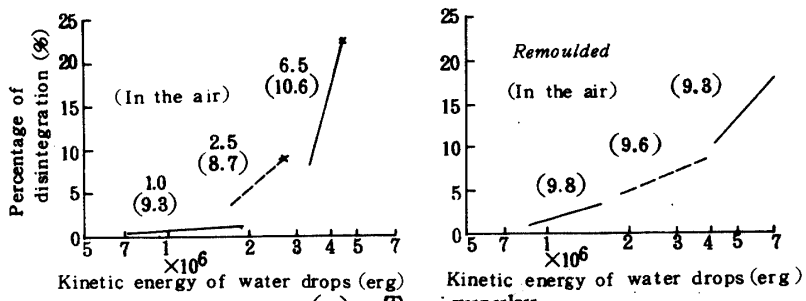
水滴の衝撃力を運動エネルギーで表わし，破壊率との関係を求めた。同一水滴数であっても落下高さによって速度が異なるので運動エネルギーは異なる。Fig.5（a，b，c）は300～600の範囲の滴水をエネルギーに換算した場合の破壊率の変化を示す。各折れ線上の×印は倒壊を意味しており，それに対



(a) Yagaji



(b) Kin



(c) Tomigusuku

Fig. 5. (a, b, c) Relation between percentage of disintegration and kinetic energy of water drops

応する破壊率と運転エネルギーは落下高さによって大きく異なるけれども全体として一様な傾向を示す。一部の土塊において倒壊点が曲線（もし一つの曲線で結んだならば）からはみ出しているが，これは倒壊の判定に微妙な時間差があるために生じた実験誤差であろう。倒壊のある場合でも倒壊前の測定値を結べば無倒壊の場合と同様それらの組み合わせ曲線は一定の形を示す。土壌の侵食量Vは水滴の運動エネルギーEとの間に $V=aE^b$（a，b は定数）の関係にあるといわれるが，[3,4,7] 本実験では 0.5 ～ 6.5 m の結果が片対数紙において曲線を描いているので，破壊率を P_d とすれば $P_d=\sum_1^n a_i(\log_{10}E)^{b_i}$（$a_i, b_i$ は定数）が成り立つようである。

倒壊に要する運動エネルギーは落下高さによって異なるが，これは土塊上面における水滴落下位置の変動，水滴の落下間隔と土塊の吸水能および湛水状況との関係等に原因していると思われる。6.5 m の場合は，落下速度（4.0㎜径で 8.20 m/s）が終速度（4.0㎜径で 8.83 m/s）に近い値であるため実際的であるが，空気抵抗によってたえず打撃位置が変動する。0.5 m 1.0 m では小運動エネルギーであることと土塊上部における湛水が破壊現象に大きく影響する。したがって，土の侵食性・安定性について試験するには，水滴の運動エネルギー，土塊の吸水能，湛水面の形成等から落下高さを検討する必要があり，本実験結果によると2.5 m の高さで十分やれることが分った。

V 結　　論

一滴の連続的落下による土塊の破壊試験を行ない，破壊率と含水比および水滴の運動エネルギーとの関係を調べた結果 2,3 の知見を得た。①水温が高いほど単位時間当りの水滴数は増加し，水滴径は小さくなる。したがって，エネルギー的には水滴径を大きくすることによって落下高さの過不足を補うことができる。②破壊率と土塊の初期含水比および水滴数の関係を 6 つのタイプに分類することによって水滴の衝撃に対する土構造の安定度の判別が容易になる。③一滴の連続的落下試験は人工降雨による結果とよい一致をみた。④破壊率と水滴の運動エネルギーの間には相関関係がある。⑤水滴（4㎜径）による土塊の破壊試験には 2.5 m 前後の落下高さがよいようである。

おわりに，本研究の遂行にあたり，大城修・玉城松政の両氏の御協力があったことを付記し謝意を表します。

参 考 文 献

1. 宜保清一　1976　受食性土塊の崩壊と乾燥の関係，第47回農土学会九州支部シンポジウム "沖縄の特殊土壌" 21 ～ 33
2. Gunn, R. and kinzer, G. D. 1949 Terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air, J. Met. **6**：243 ～ 248
3. 岩垣雄一，土屋義人　1956　水滴による地面侵食に関する二，三の実験，土木学会論文集 **35**：55 ～ 63
4. 河野洋，小谷佳人，内田勝利　1973　大山火山灰土地帯の農地保全と圃場整備，"特殊土壌地帯の農地整備に関する研究" 九州大学農学部土質理工研報　**17**：1 ～ 14
5. Laws, J. O. 1941 Measurement of the fall－velocity of water－drops and rain drops. Trans. Am. Geophys. Un. **22**：709 ～ 727
6. 三原義秋　1951　雨滴と土壌侵食，農業技術研究所報告 A (1)：1 ～ 59
7. 中崎昭人　1950　水滴による土壌面破壊について，農業土木研究　**18**(3)：1 ～ 4
8. 翁長謙良　1976　沖縄本島土壌の侵食性について，第47回農土学会九州支部シンポジウム "沖縄

の特殊土壌" 14～20
9. ペレリマン著／藤川健治訳 1970 続おもしろい物理学，P 143，東京，教養文庫

Summary

Disintegration tests of small soil block using falling water drops were made in order to investigate the relation between percentage of disintegration and the change of moisture contents, the kinetic energy of water drops.

The apparatus for producing drops is shown in Fig. 1 and the height of hypodermic needle from the testing soil were 6.5m, 2.5m, 1.0m and 0.5m respectively. Distilled water was employed and the three testing soils (YAGAZI-silty KIN-clayey, TOMIGUSUKU-clayey) were used in this investigation.

The results of the investigation were as follows:

1. The higher the water temperature the more increase the number of drops per unit time.

2. The mass of a drop was influenced by water temperature and higher of the water temperature the smaller the mass of a drop.

3. By enlarging the size of drop, the lack of kinetic energy-falling height- was made up.

4. The relation between percentage of disintegration and number of drops can be classified into six types as sown in Fig. 4, and this makes easy the judgment of stability of soil against the impact of drops.

5. The test result by continuous falling of a water drop resembles by artificial rainfall closely.

6. There were correlation between the percentage of disintegration and the kinetic energy of water drops.

7. 2.5 meters high of falling water drops will fit in this investigation.