

# 琉球大学学術リポジトリ

## 屋外温熱環境指標としてのグローブ温度の計算

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学工学部 公開日: 2007-08-23 キーワード (Ja): キーワード (En): Outdoor Thermal Environment, Globe Temperature, Sol-Air Temperature, Prediction 作成者: 仲松, 亮, 堤, 純一郎 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12000/1485">http://hdl.handle.net/20.500.12000/1485</a>

# 屋外温熱環境指標としてのグローブ温度の計算

仲松 亮\*      堤 純一郎\*\*

## Calculation of Globe Temperature as an Outdoor Thermal Sensation Index

Ryo NAKAMATSU\* and Jun-ichiro TSUTSUMI\*\*

### Abstract

Developments and examinations of the methods of calculating globe temperature set outside are the main purposes of this paper. Globe temperature is regarded as an outdoor thermal sensation index, though it is usually used indoors. Globe temperature is tried to be calculated from basic meteorological data, air temperature, wind speed, solar radiation and so on. Calculated values are to be compared with measured data to examine the accuracy. Field measurement was carried out in two elementary schools in Naha city. General meteorological data observed at Okinawa Meteorological Observatory were also used for the calculation to generalize the globe temperature as a thermal sensation index. Some combinations of the field data and the general data were tested. The calculation of globe temperature needs shape factors and surface temperatures of the surroundings. Shape factors were calculated by ray tracing method. Sol-air temperatures were used as the surface temperatures. If all the field data were used, the calculated values agree well with the measured data. However, since the sol-air temperature changes too sharply against the actual surface temperature, the calculated values are sometimes higher in the daytime and lower in the nighttime than measured data. If only the wind speed data are the field data, the accuracy is almost the same level as the calculation with full field data, though all the general data could not make good results.

**Key Words:** Outdoor Thermal Environment, Globe Temperature, Sol-Air Temperature, Prediction.

### 1. はじめに

現在、都市の温熱環境の評価法としては、各気象要素の測定や、リモートセンシングデータを利用するものなどが主流である。しかし、これらの手法は現実に存在する空間を評価する方法であり、これから形成されるであろう都市空間、変化していく都市空間の温熱環境を評価するのは難しい。つまり、温熱環境の変化を考慮した種々の計画を行なうためには、短期間、低コストでできる簡単な温熱環境の評価法が必要である。

本研究ではこのような観点から、温熱環境の評価指標にグローブ温度を選択し、仮想した市街地の温熱環境状態を予測方法を開発する。また、開発した予測方法を、実際の市街地において測定した結果と比較、検討することで、その有効性を確かめる。

## 2. 小学校における熱環境の実測調査

### 1) 測定場所

屋外の温熱環境に関する実態の把握するため、熱

環境に関わる気象要素の実測を行なった。実測の対象とする場所として、建物や植栽などの多様性と、市街地に位置する点を考慮して、那覇市内の小学校を選択した。実測対象の小学校は、那覇市の市街地に位置する神原小学校、壺屋小学校の二校である。神原小学校の建物および植栽の概略を図2.1に示す。各小学校に示した①～④点は測定点である。①～④の各点はそれぞれ、運動場中央(測定点①)、中庭中央(測定点②)、校舎の隅角部(測定点③)、小さな林の中(測定点④)である。

### 2) 測定方法

神原小学校、壺屋小学校の各校毎に定めた①～④の4つの測定点において、乾球温度、湿球温度、グローブ温度、風速を測定する。乾球温度、湿球温度はアスマン通風温湿度計、グローブ温度は直径15cmの銅製黒球、風速は測定点付近で熱式微風速計(アネモマスター)により測定する。測定点の高さは1.2mで、アスマン通風温湿度計と銅製黒球をその高さに設置する。アネモマスターによる風速の測定も1.2m付近で行う。また、それ以外に測定点付近の地面、壁面および樹木の表面温度を赤外線放射温度計により測定している。さらに、実測日の気象要素を得るために、神原小学校、壺屋小学校の各校の屋上付近において日射量と風向・風速を測定してい

受理: 1999年6月7日

\* 理工学研究科総合知能工学専攻  
(Graduate Student, Complex Intelligent Systems Engineering)

\*\* 環境建設工学科  
(Dept. of Civil Engineering and Architecture)

る。日射量は日射計、風向・風速はプロペラ型風速計を用いて測定し、データロガーに自動記録している。神原小学校において行なった測定のインターバルは12:00~21:00までが10分毎、21:00~0:00までが30分毎である。風速については測定時刻の前後で3回測定し、その平均を測定時刻の風速とした。その他の気象要素については、各測定時における瞬時値を読み取っている。屋上付近における測定は10分毎である。

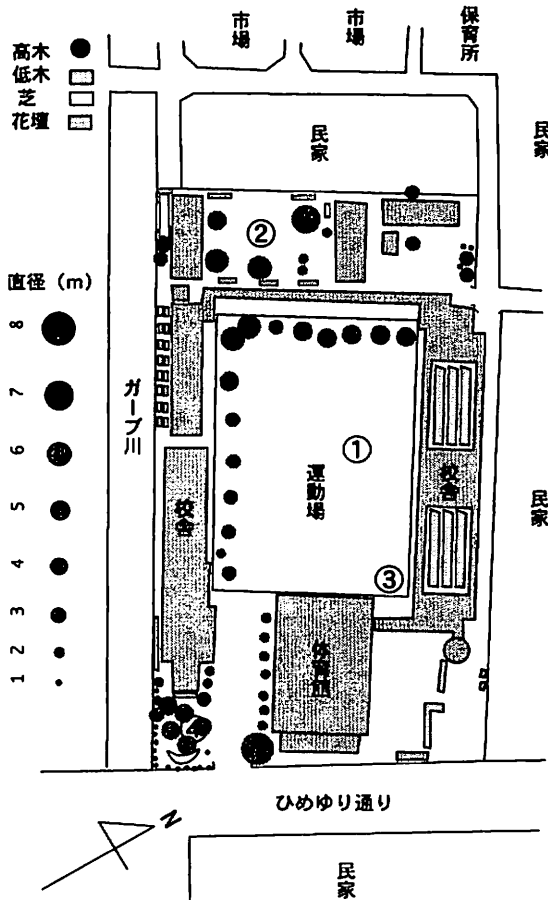


図 2.1 神原小学校の概況図

3) 実測結果

神原小学校で行なった実測の結果を示す。運動場中央である測定点①が最も気温が高い。測定点③は、運動場側でありながら気温が低い値で推移している。これは、測定点③の地点が、体育館と校舎に挟まれた場所であり、他の点と比較して風速が大きくなっているためである。この実測日は沖縄に台風が接近中であったため雲量が多く、13:00~15:00頃までの間、気温やグローブ温度の低下がみられる。また、夜間は小雨まじりの天候となった。測定点④は上空を樹木で蔽われているため、測定期間中、温度、グローブ温度とも低い値で推移するが、16:00頃に温度上昇がみられる。夕方、西の低い高度にある太陽からの日射が、樹木に蔽わ

れていない側面から、樹木下に侵入したためである。

日射量を沖縄気象台で観測されたデータと比較する。神原小学校で測定した日射量は17:30頃に急速に低下しており、気象台データと推移の仕方が異なる。これは神原小学校においては、日射量の測定点を屋上に設置しているものの、夕方太陽高度が低くなると測定点の西側にある屋上植栽の花壇とコンクリート手すりが日射を遮ることに原因がある。

3. グローブ温度の計算方法

1) 概要

温熱環境の評価指標として、グローブ温度の計算方法を示す。グローブ温度はグローブ表面の平均温度と考えることができるので、そのグローブの表面温度は、グローブ温度計表面の熱収支から求めることができる。

グローブ表面の熱収支を構成する要素には、短波長放射、長波長放射、対流熱伝熱がある(図3.1)。短波長放射は直達日射、天空日射、そしてグローブ温度計を囲む面からの反射日射の光による熱伝達である。長波長放射は、グローブ温度計を囲む各面からの放射熱と大気放射およびグローブ自身からの熱放射がある。各面からの放射熱は各面の表面温度により求められる。ここで使用する各面の表面温度は、各面上において日射や長波長放射から計算される相当外気温を使用する。厳密にはこれは表面温度ではないが、それに近いものとして便宜的に用いる。大気放射は大気からの放射熱であり、水蒸

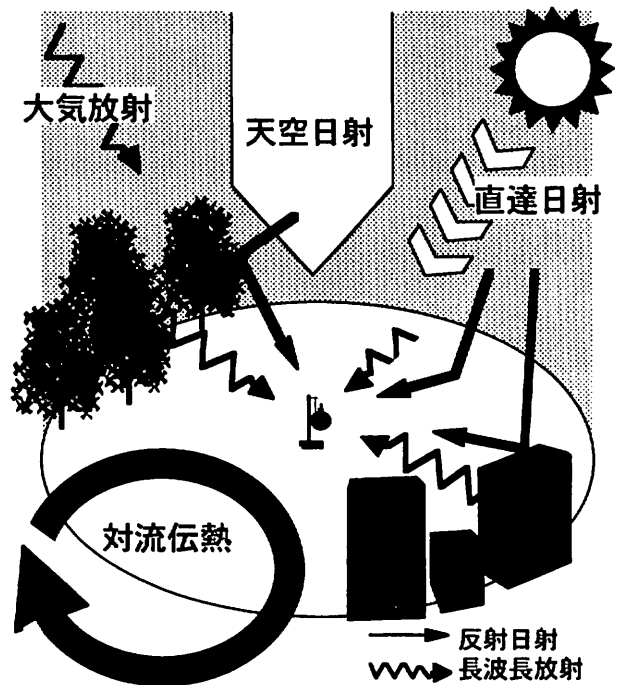


図 3.1 グローブ温度計算の概要図

気に依存するところが大きい放射である。対流伝熱は、風速と気温に関係するグローブと周囲大気との熱のやりとりである。これらすべての構成要素からグローブ表面の熱収支式をたてる。

グローブに流入する方向を正とするすべての放射成分の合成値を  $R_{net}$  ( $W/m^2$ ) とすると、

$$R_{net} = \alpha_c (\theta_g - \theta_a) \quad (3.11)$$

ここで、 $\alpha_c$  はグローブ表面の対流熱伝達率 ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ )、 $\theta_g$  はグローブの表面温度 ( $^\circ C$ )、 $\theta_a$  は気温 ( $^\circ C$ ) である。 $\alpha_c$  は球体の強制対流による熱伝達率として、次の式から求める。

$$\alpha_c = \frac{\lambda}{D} (2 + 0.3 Re^{0.566}) \quad (3.12)$$

ここで、 $D$  はグローブ温度計の直径 (0.15m)、 $\lambda$  は空気熱伝達率 ( $0.0257 W/m^2 \text{ } ^\circ C$ )、 $Re$  はグローブ温度計の直径、風速  $V$  および空気の動粘性係数  $\nu$  ( $0.156 \times 10^{-4} m^2/s$ ) から求められるレイノルズ数  $Re = DV/\nu$  である。この実験式は直径0.15mの球に対して、風速が  $0.18 m/s \sim 15 m/s$  程度の場合に適用されるので、一般的な条件では常に適用可能である。

$R_{net}$  はグローブの単位表面積当りの放射熱をすべて考慮するので、以下の式より計算される。

$$R_{net} = \epsilon_s (I + \sum_i J_{r_i}) + \epsilon_l (J_a + \sum_i E_i - \sigma T_g^4) \quad (3.13)$$

ここで、 $\epsilon_s$ 、 $\epsilon_l$  はグローブ表面の短波長放射吸収率および長波長放射吸収率、 $I$ 、 $J_a$  はグローブに直接入射する日射量 ( $W/m^2$ ) および大気放射量 ( $W/m^2$ )、 $J_{r_i}$ 、 $E_i$  は  $i$  番目の周囲面要素からの反射日射量 ( $W/m^2$ ) および長波長放射量 ( $W/m^2$ ) である。 $\sigma$  はステファン・ボルツマン定数 ( $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$ )、 $T_g$  はグローブ温度 ( $K$ ) である。なお、長波長放射率  $\epsilon_l$  は長波長吸収率としても用いられる。大気放射量  $J_a$  ( $W/m^2$ ) は主として空気中の水蒸気に関係し、

$$J_a = \epsilon_a \sigma T_d^4 \quad (3.14)$$

$$\epsilon_a = 0.526 + 0.076 f^{\sqrt{f}} \quad (3.15)$$

で表わすことが出来る。 $\sigma$  はステファン・ボルツマン定数 ( $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$ )、 $T_d$  は気温 ( $K$ ) である。 $\epsilon_a$  は大気の射出率と呼ばれ、水蒸気圧  $f$  (mmHg) を用いれば、式 (3.15) のブランド (Brunt) の式で表わせる。

上記の式 (3.11)、式 (3.13) を連立させることでグローブ温度が求められるが、これは4次式となるので、実際には収束計算によって求められる。

日射および放射に関しては、天空率や周囲の面要素の形態係数、表面の放射率などを考慮しなければならない。形態係数は全球に対する値を使用する。また、面からの放射、反射日射を求めるために、1つの面要素に対して、直達日射を受ける日向部分とそれ以外の日陰部分の2種類の形態係数を算出している。

## 2) 形態係数および直達日射判定

グローブ周辺の各面から受ける影響を知るために必要である形態係数を、予測点周辺面データから求める。同時に表面温度を算定するために、面への直達日射の有無の判定も行なう。図3.2に入力した神原小学校の面データを示す。

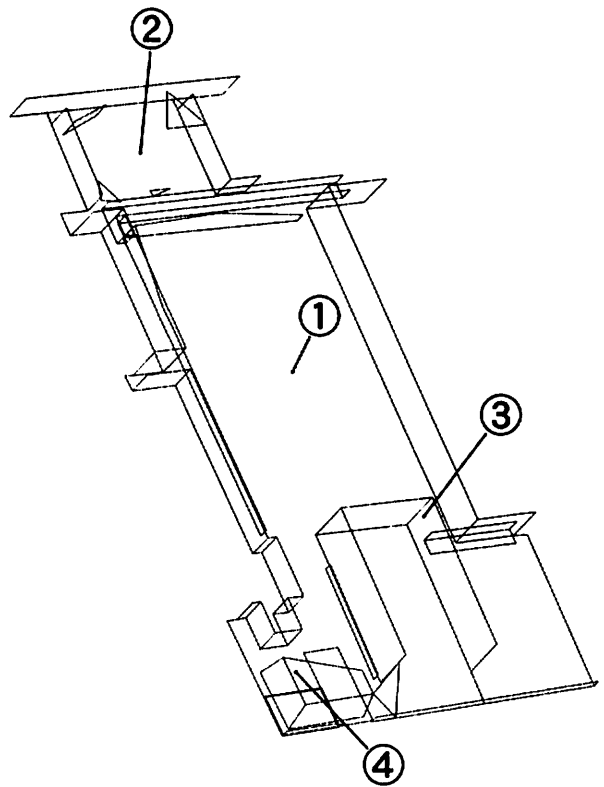


図3.2 入力した面データ (神原小学校)

形態係数の算定およびグローブ周辺面の直達日射判定を行なうには、レイトレーシングのアルゴリズムを利用した手法を用いている。図3.3に手法の概要を示す。

半球と立体角投射面を仮定し、立体角投射面の中心  $C_w$  とグローブ温度の予測点を一致させる。半球上の任意の点  $SE'$  と立体角投射面の中心  $C_w$  を結ぶベクトルと視線ベクトル  $\vec{SE}$  とすれば、任意の点  $SE'$  に対応する立体角投影面上の点  $P_w$  の値は、視線ベクトル

$\vec{SE}$  の延長線上の面の有無によって決定される。視線ベクトル  $\vec{SE}$  の延長線上に交差する面がない場合、点  $P_w$  の値は天空を示す。交差する面がある場合、その面が点  $P_w$  の値となる。このようにして立体角投射面全体の値を求め、立体角投射面におけるそれぞれの面の割合を求めれば、それが各面の形態係数となる。

直達日射判定のアルゴリズムは、形態係数を算定する場合と同様の方法である。ただし、直達日射の判定には、視線ベクトル  $\vec{SE}$  ではなく、太陽の方向ベクトル  $\vec{SN}$  が必要となる。直達日射の判定には、視線ベクトル  $\vec{SE}$  と交差する面がある場合に行なう。交差した面上の点から太陽の方向ベクトル  $\vec{SN}$  をとり、その延長線上に面があるならば、対応する点  $P_w$  は日陰となる。逆に延長線上に面がない場合、点  $P_w$  は天空を示す。

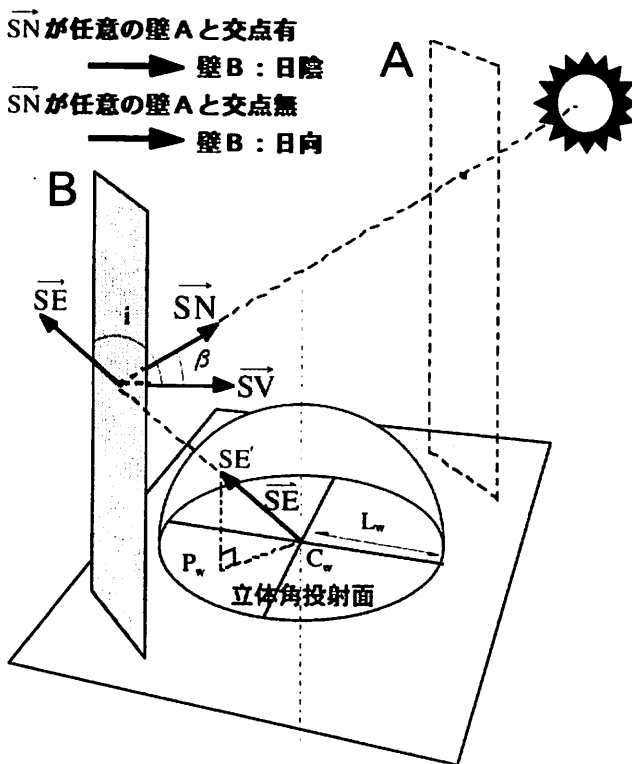


図 3.3 形態係数算定と直達日射判定の概略

### 3) 周辺面の表面温度

グローブを囲む周壁の表面温度を、その面の相当外気温度と仮定し、相当外気温度と表面温度として長波長放射量などの計算に用いる。相当外気温度は気温の他に日射等の放射の影響を考えた温度である。日射放射の影響を考慮するためには、各面において日向、日陰の判定をする必要がある。相当外気温度を  $\theta_{sat}$  (°C) とおくと、

$$\theta_{sat} = \theta_0 + (a_1 - \epsilon (\sigma T_0^4 - J_a) F_s) / \alpha_0$$

ここで、 $\theta_0$  は外気温度 (°C)、 $T_0$  は外気温度 (K) である。 $a$ 、 $\epsilon$  は、それぞれ各面の短波長および、長波長放射の吸収率である。 $\sigma$  はステファン・ボルツマン定数 ( $5.67 \times 10^8 \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ )、 $a_0$  は外表面の総合熱伝達率 ( $\text{W/m}^2 \text{ K}$ ) である。 $I$ 、 $J_a$  は日射量 ( $\text{W/m}^2$ ) および大気放射 ( $\text{W/m}^2$ ) である。 $F_s$  は面から天空をみる形態係数、すなわち天空率である。各面に入射する日射量  $I$  は、日向、日陰により変化する。入射する日射量は直達日射  $J_d$  ( $\text{W/m}^2$ )、天空日射  $J_s$  ( $\text{W/m}^2$ )、地物からの反射日射  $J_r$  ( $\text{W/m}^2$ ) に分けられるから、面の日向部分では、3成分すべて、日陰部分では、直射日射を除いたものとなる。

### 4. グローブ温度の計算結果

一般的な気象データからグローブ温度の推定ができれば、実測データなしで熱環境の予測が可能となる。ここでは実測データを用いた計算の他に、気象台で観測されたデータによる計算および実測データと気象台データを併用したグローブ温度の算定を試みた。これら入力値の組み合わせパターンを便宜的に下記のように決めておく。また、実測データのみで算出した計算値を基準値とおく。

- a. 実測データのみ (基準値)
- b. 気象台データのみ
- c. 実測データの日射量、風速および気象台データの気温、湿度
- d. 実測データの風速および気象台データの日射量、気温、湿度

#### 1) パターン a

神原小学校の測定点①および②における実測値と基準値の比較を図 4.1、図 4.2 に示す。実測値と基準値の変動はほとんど一致しており、14:00 ~ 17:00 にかけては値も良く一致する。しかし、13:00 ~ 14:00 にかけて日射が直接入射する測定点①点では、基準値が実測値の値を上回る。また、13:00 ~ 14:00 にかけて日陰となる測定点④は実測値より低い値を示す。測定点①では 17:30 ~ 19:00 頃、基準値が実測値より大きく下回っているが、日射量の測定場所の地形に問題がある。また、17:00 頃の温度低下において基準値は実測値と比較して 10 ~ 20 分ほど早く温度低下が始まっている。これは使用した面データと実際の測定点では若干場所が異なるので、建物による日射遮蔽の時間に面データと実際とで差が生じたためである。夜間は①~④いずれの測定点でも基準値が実測値より低い値を示し、その差は 2 ~ 3

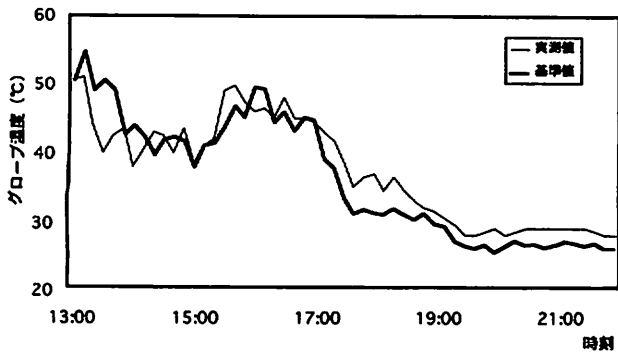


図 4.1 グローブ温度の比較 a\_①

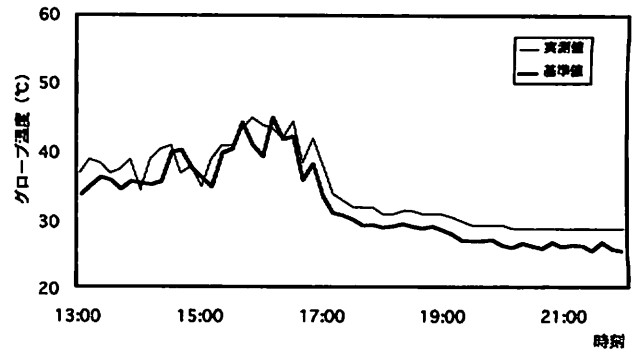


図 4.2 グローブ温度の比較 a\_④

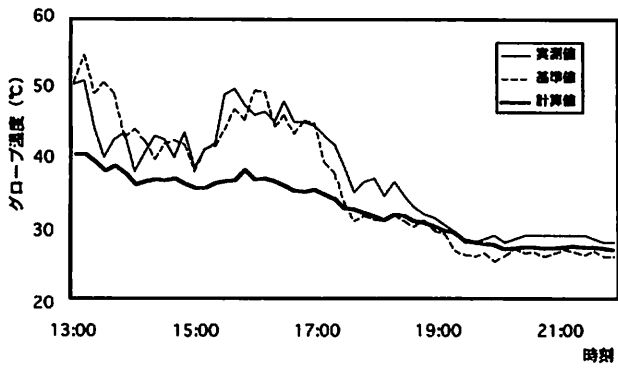


図 4.3 グローブ温度の比較 b\_①

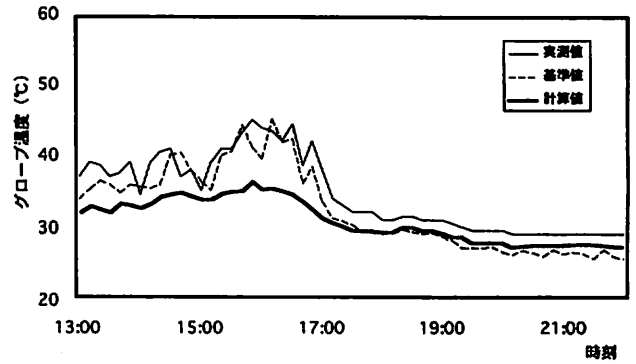


図 4.4 グローブ温度の比較 b\_④

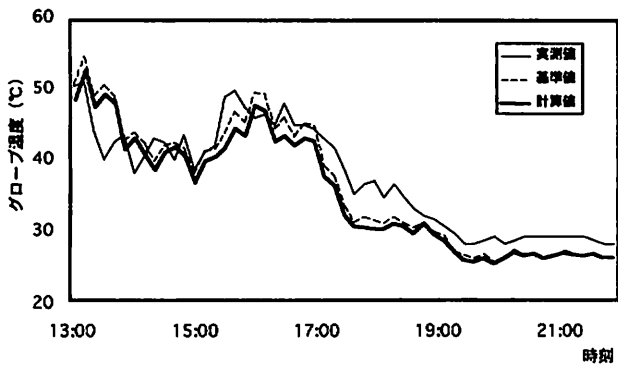


図 4.5 グローブ温度の比較 c\_①

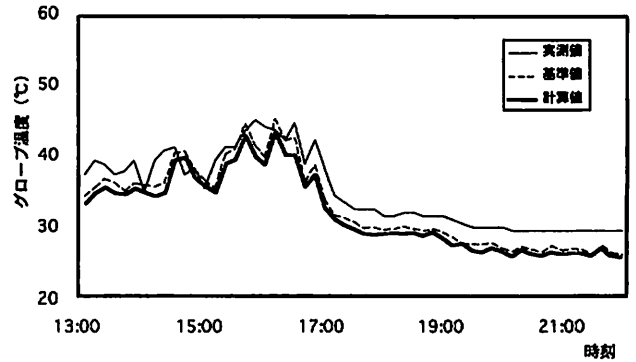


図 4.6 グローブ温度の比較 c\_④

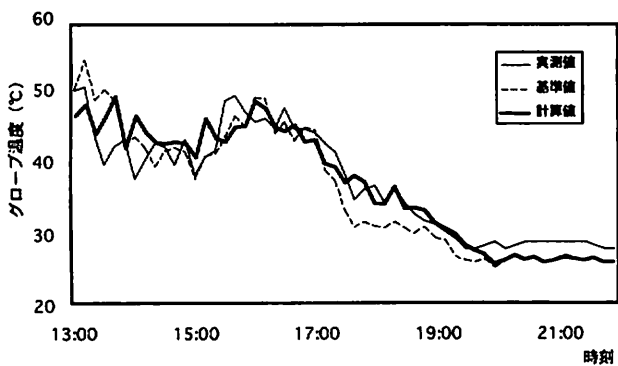


図 4.7 グローブ温度の比較 d\_①

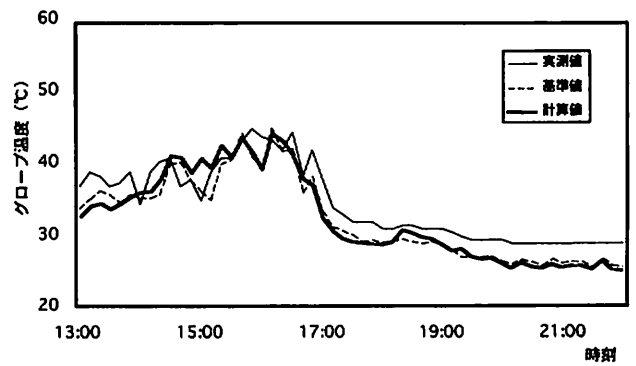


図 4.8 グローブ温度の比較 d\_④

℃程度ある。

## 2) パターンb

神原小学校の測定点①および②における気象台データによる計算値と実測値および基準値との比較を図4.3、図4.4に示す。夜間は基準値よりやや実測値に近い値を示すが、昼間は、実測値および基準値の変動と一致しない。

## 3) パターンc

測定した気象データの日射量および風速と、気象台で観測された気象データの気温、湿度を組み合わせ、グローブ温度の算定を行なった。求めた計算値と実測値および基準値との比較を図4.5、図4.6に示す。計算値は基準値とほぼ同様に変動するが、その値は実測値と比較して低い。夜間の計算値は、基準値と比較して1~2℃低く、実測値との差は1~3℃程になる。太陽高度が高い時刻のグローブ温度は、基準値よりも実測値に近づくが、高度が低い場合には逆に実測値との差が大きくなってしまっている。日中も測定データのみの場合と比較して低い値で変動している。しかし、夜間を除けば各測定点とも実測値に近い値を示している。

## 4) パターンd

実測データから使用する要素を風速のみとし、残りの3要素に気象台データを使用してグローブ温度の算定を行なった。求めた計算値と基準値および実測値との比較を図4.7、図4.8に示す。夜間の計算値は、実測値より低く、その値は基準値とほぼ同程度で変動している。17:00~19:00に測定された日射量は、日射計が建物の影に入ったために基準値では大きな温度差が出たが、この計算では実測値に非常に近い計算結果が出ている。測定点④では13:00~15:30において、実測値よりも低い値となっている。夜間は実測値よりも常に低い値で変動しているが、全体的には基準値と同等の相関を示す。

## 5. 結論

実測データと気象台データを組み合わせた4つの入力データのパターンについて検討を行なった。その結果、予測点の気象要素のうち、日射量および風速あるいは風速だけが得られれば、その点におけるグローブ温度の予測が可能であると分かった。ただし、形態係数を算出に inputsする面データと実際の形状との微妙な違いで、計算値と実測値の差が大きくなる可能性がある。

4パターンいずれの場合も正午前後に計算値が実測値よりも高い値を示す。また、夜間は実測値よりも低い値を示している。これは表面温度の近似的な値として使用した相当外気温度が、日射に敏感であり、また夜間には通常気温よりも低くなる性質を

持っているためである。

今後の課題は、総合的な熱環境指標としてのグローブ温度をより正確に予測することにあるが、具体的には第1に相当外気温で近似している表面温度の改善が上げられる。また、植栽、コンクリート面、地面などの材料の違いは、現在、日射反射率および長波長放射率の文献からのデータ流用にすぎない。このようなデータの適合性や材質の特性を表わすその他のデータについて検討が十分とは言えない。以上のような点について基礎的なレベルからの再検討が必要である。

## 謝辞：

本研究では、森田大教授、渡嘉敷健助手並びに砂川恒雄技官には数多くの助言と協力を戴いた。また、平成10年当時の琉球大学大学院生の新川亮樹、幸喜科子、当山真由美、堤研究室卒論生の石村由樹、仲尾次弘をはじめ現在、各方面で活躍しているであろう卒業生の皆様には、本研究の昼夜半日にもおよぶ長時間の測定に協力いただいた。ここに記したこれらの諸氏に深謝する。

## 参考文献：

- 1) 大井元、石井昭夫ほか2名：地表面被覆材料の違いが垂直温度分布に及ぼす影響に関する実測調査、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp643-644、1998.9
- 2) 梅干野晃、浅野耕一、金丸剛久：熱画像を用いた建物外表面からの顕熱流量の解析、日本建築学会計画系論文集No.500、pp43-50、1997.10
- 3) 片山忠久ほか2名：温熱効果を考慮した街路樹の最適配置に関する研究、平成7・8年度科学研究費補助金（基礎研究（B）（2））研究成果報告書
- 4) 萩島理、片山忠久ほか2名：建築一都市一地域連成系モデルによる都市高温化予測、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp673-674、1998.9
- 5) 斎藤平蔵：建築気候、共立出版株式会社、1974.5
- 6) 片山忠久ほか2名：放射環境下における気温およびグローブ温度の測定精度に関する実験的研究、日本建築学会計画系論文報告集No.381、pp20-26、1987.11
- 7) 成田ほか2名：街路空間の気流性状と熱環境、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp553-556、1996.9
- 7) 浦野良美ほか20名：建築環境工学、森北出版株式会社、1996.6
- 8) 松尾陽ほか3名：空調設備の動的熱負荷計算入門、日本建築士協会、1980.3
- 9) 田中俊六ほか3名：最新建築環境工学、森北出版株式会社、1992.9
- 10) Leendert Ammeraal 著、臼井支郎監訳、池野英利訳：Cによるグラフィクス技法、オーム社、1993.1
- 11) 小堀研一、春日久美子：基礎から学ぶ図形処理、工業調査会、1996.3
- 12) Herbert Schildt 著、石田晴久監修、SE編集部訳編：独習C、翔泳社、1994.9
- 13) 新居雅行：Macintoshアプリケーションプログラム上巻、株式会社ディー・アート、1995.12