

機関番号：17701

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2009～2010

課題番号：21686056

研究課題名(和文) 全天候型の波長別日射量推定モデルの開発と標準年気象データへの応用

研究課題名(英文) Development of spectral solar radiation model and application to test reference year data

研究代表者

曾我 和弘(SOGA KAZUHIRO)

鹿児島大学・理工学研究科(工学系)・准教授

研究者番号：00336322

研究成果の概要(和文)：建物のエネルギーシミュレーションにおいて、日射の分光特性を考慮するために、標準年気象データから波長別日射量を推定する計算法を開発した。これらの計算法は、任意天候における波長別全天日射量と波長別天空日射量を可視から近赤外域まで計算できる。350～1700nmの計算波長間隔は2nm間隔である。1700nm～3000nmでは、波長積分した近赤外域日射量を計算できる。標準年気象データから波長別日射量を計算できるように、気温、湿度、全天・直達・天空日射量の5つの気象要素が計算の入力データに使用されている。

研究成果の概要(英文)：Two models for estimating global spectral solar radiation and diffuse spectral solar radiation from TRYs (test reference years) data have been developed in order to consider an effect of spectral distribution of solar radiation in building energy simulation. These models can output spectral solar radiation in wave range from visible to near infrared under all weather conditions. The wavelength interval of the calculation is 2 nm in wave range from 350nm to 1700nm. Also an integrated near infrared solar radiation can be calculated in wave range from 1700nm to 3000nm. Five weather parameters, such as temperature, humidity, global solar radiation, beam solar radiation and diffuse solar radiation, are used as input data of the models so that the spectral solar radiation can be calculated from TRYs data.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度			
2007年度			
2008年度			
2009年度	7,100,000	2,130,000	9,230,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	8,100,000	2,430,000	10,530,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備

キーワード：波長別日射量、波長別全天日射量、波長別天空日射量、晴天指数、近赤外域日射量、全天候、標準年気象データ

1. 研究開始当初の背景

1970年代以降、建物の空調消費エネルギーをはじめ、室内の熱・空気・光環境の挙動

をシミュレートする様々なプログラムが開発されてきた。その実行には建物の立地点付近の気象データが必要なため、平均的な1年

間の毎時気象データとして、全国 842 地点の標準年気象データが整備されている。しかし、これらに収録の日射量データは、全て波長積分値であるから日射の分光特性が含まれていない。そのため標準年気象データを用いて、遮熱ガラスや遮熱塗料等の日射の波長選択性の高い建材の省エネルギー効果をシミュレートしようとしても、分光特性を考慮した合理的な計算を実施できないのが実情である。近年、波長選択性の高い建材は、建築の省エネルギー対策のみならず、都市表面の高温化抑制によるヒートアイランド対策としても普及が期待されており、その導入効果の定量的評価は急務の課題であるが、それには建材の反射率・透過率・吸収率が日射の波長域（紫外、可視、近赤外等）により異なる点と日射のスペクトル分布を同時に考慮しなければならない。様々な天候の波長別日射量データが必要である。また、ガラス建築、昼光照明、ソーラーシステム、太陽光発電システムあるいは作物栽培温室の環境計画・設計でも、太陽光の分光特性を考慮したシミュレーションに対するニーズは着実に高まっている。このような課題やニーズに対応するには、様々な天候における日射の分光特性を表現した波長別日射量データが必須であり、それを含んだ気象データの開発が必要となっている。

2. 研究の目的

本研究は、建物の室内環境やエネルギー消費シミュレーション、居住者の快適性・健康性評価、および建材の耐久性評価において、日射の分光特性を詳細に考慮したシミュレーションや評価を可能にするために、全国各地の標準年気象データに波長別日射量と紫外線データを推定・補充することを目的とする。研究の全体構想としては、

(1) 波長域 350~3000nm の可視から近赤外の波長別日射量の全天成分と天空成分の推定モデル

(2) 波長域 315~400nm の紫外線 (UV-A) の全天成分と天空成分の推定モデル

(3) 波長域 280~315nm の紫外線 (UV-B) の全天成分と天空成分の推定モデルを開発し、標準年気象データに時別の波長別日射量と紫外線データを補充することを目指している。そのうち本研究課題は、(1)の開発に焦点を絞り研究を行うものである。すなわち、350~3000nm までの可視から近赤外域を対象として、快晴のみならず曇天も含む全天候の波長別日射量を詳細に推定するモデルを開発し、それを全国 842 地点の標準年気象データに応用して時別の波長別日射量を整備する。

3. 研究の方法

(1) 波長別日射量の測定

本研究は、波長が 350~1700nm までの波長



図 1 広帯域分光放射計の外観

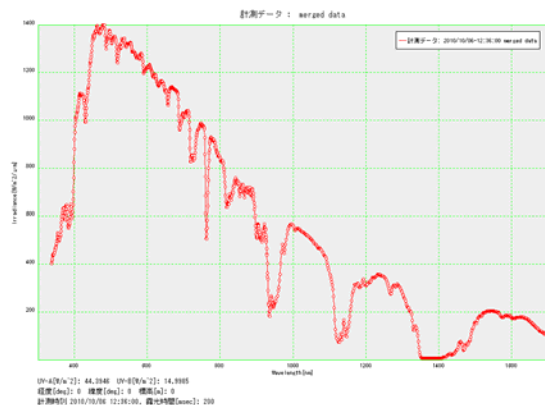


図 2-1 波長別全天日射量(2010/10/06)

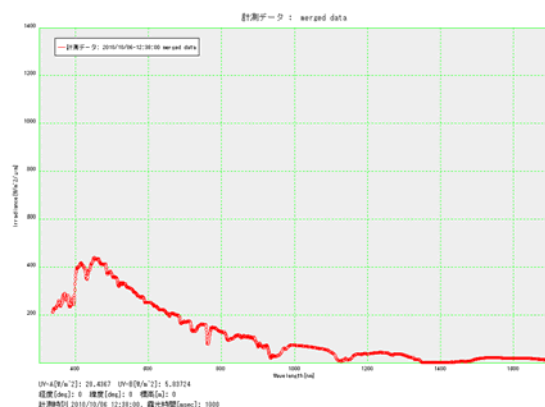


図 2-2 波長別天空日射量(2010/10/06)

別日射量の全天成分と天空成分を任意の天候下において連続測定し、これを統計的に分析することにより波長別日射量の推定モデルの作成を試みる。その際、標準年気象データに収録されている波長積分された日射量を利用して統計的に波長別日射量を推定可能なモデル作成を目指す。そこで、波長別日射量と波長積分された全天日射量および天空日射量を同時計測する測定システムを構築した。その測定システムの中核となる装置として、2009年10月にEKOの広帯域分光放射計のMS-710およびMS-712を導入し、350~1700nmまでの波長別日射量の測定を可能にした。また、2009年12月には帯域分光放

射計に直射光を遮蔽して天空光を測定可能にするローティンギングシャドウブレード PRB-100 を取り付けて、波長別全天日射量と波長別天空日射量を交互に測定可能な計測システムを独自に構築した。以上の計測システムにより、2009年9月から波長別全天日射量の測定を開始した。2010年1月1日からは波長別全天日射量に加えて、波長別天空日射量の連続測定も開始した。図1に広帯域分光放射計の外観を示す。また、図2-1および図2-2に波長別全天日射量と波長別天空日射量の測定例を示す。

(2) 波長別全天日射量のモデル化の方法

地表における水平面全天日射量 I_g は、晴天指数 K_t が既知であれば、法線面大気外日射量 I_0 を水平面に換算し、晴天指数 K_t 、すなわち水平面大気外日射量が地表に到達する割合を乗じて算定することができる。この関係が波長 λ における大気外日射量 $I_{0\lambda}$ および水平面全天日射量 $I_{g\lambda}$ についても成り立つと仮定すると、波長別水平面全天日射量 $I_{g\lambda}$ は波長 λ における晴天指数 $K_{t\lambda}$ と波長別大気外日射量 $I_{0\lambda}$ の積として、式(1)のように表現できる。

$$I_{g\lambda} = K_{t\lambda}(I_{0\lambda} \sinh) \quad (1)$$

ここで h は太陽高度である。ただし、この関係に基づく波長別日射量の算定には、波長別の大気外日射量と任意の天候における波長別晴天指数が必要である。そのうち波長別大気外日射量 $I_{0\lambda}$ については、例えば ASTM による ASTM E-490 データを参照すれば既知となる。一方、任意天候の $K_{t\lambda}$ は十分な資料が整備されていないため、通常は未知数である。したがって、波長別水平面全天日射量を得るには、任意の天候状態における波長別晴天指数 $K_{t\lambda}$ を推定しなければならない。そこで、本研究では、波長別水平面全天日射量 $I_{g\lambda}$ を推定するために、波長別晴天指数 $K_{t\lambda}$ を統計的に推定する方法を検討した。なお、本推定法は標準年気象データへの応用を前提としているので、既往の標準年気象データに収録の気象要素に基づいて、波長別晴天指数 $K_{t\lambda}$ を推定する手法を検討する方針とした。

(3) 波長別天空日射量のモデル化の方法

水平面大気外日射量のうち地表に到達する天空日射量の比率 K_d が既知であれば、地表の水平面天空日射量 I_d は、水平面大気外日射量に K_d を乗じて算定することができる。本研究では、この関係が波長 λ における大気外日射量と波長別水平面天空日射量 $I_{d\lambda}$ についても成り立つと仮定して、式(2)により波長別天空日射量を推定する方法を考える。

$$I_{d\lambda} = K_{d\lambda}(I_{0\lambda} \sinh) \quad (2)$$

式(2)による推定では、波長別大気外日射

量のうち、地表に到達する波長別天空日射量の比率 $K_{d\lambda}$ が任意天候において必要となるため、本研究では、 $K_{d\lambda}$ を統計的に推定する方法を検討した。

4. 研究成果

(1) 波長別全天日射量の推定モデルの作成

本研究では K_t と $K_{t\lambda}$ の相関関係に着目して、 K_t を用いた $K_{t\lambda}$ の近似式の作成を試みた。 $K_{t\lambda}$ は K_t の増加に比例する特徴があり、両者には概ね直線的な相関関係が認められた。ただし、直線の傾きは波長 λ によって異なることが分かった。また、950nm のように、 $K_{t\lambda}$ のバラツキが大きい波長が見られたため、 K_t と $K_{t\lambda}$ の関係に影響を及ぼす要因について検討した。本検討では、350~1700nm の波長別日射量を検討対象としているので、日射の減衰としては、散乱減衰と吸収減衰を検討する。その際、散乱減衰に關係する要因としては太陽高度 h のサイン (\sinh)、吸収減衰に關係する要因としては水蒸気量を表す可降水量 W を取り上げる。なお、可降水量 W は気温、湿度から算定可能である。日射吸収には水蒸気以外にも O_3 、 NO_2 、 O_2 、 CO_2 による吸収も知られているが、これらは水蒸気吸収に比べて影響が小さいので、本研究では考慮しないことにした。

K_t 、 \sinh および W を指標としてデータを分類し、 $K_{t\lambda}$ の平均値を波長 λ ごとに算出した。波長別日射量が地表から地表に到達する比である $K_{t\lambda}$ は、日射が大気により散乱あるいは吸収されて減衰する様子を総合的に表すものと考えられる。 $K_{t\lambda}$ の平均値から、 K_t は全ての波長において $K_{t\lambda}$ に影響を及ぼし、 K_t の増加に伴って $K_{t\lambda}$ も増加することが分かった。また、 K_t が快晴に近づくほど 750nm より短波長では \sinh が小さくなるにつれて、 $K_{t\lambda}$ は低下する傾向が見られた。これは太陽高度 h が低下すると、日射の大気通過距離が長くなり、散乱減衰の影響が大きくなるためだと考えられる。また、短波長での減衰が大きくなる傾向は、光の波長 λ の 4 乗に逆比例した空気分子によるレイリー散乱に起因したものと推測される。可降水量 W による $K_{t\lambda}$ の変化を調べた結果、700nm より長波長において、選択的に W の増加により日射の吸収減衰が生じ、特に 950nm 付近での $K_{t\lambda}$ の低下が大きいことが分かった。そこで、 K_t 、 \sinh 、 W をパラメータとして、以上のような $K_{t\lambda}$ の変化を再現する近似式の作成を試みた。種々検討した結果、以下のような晴天指数 K_t 、太陽高度 h 、可降水量 W による $K_{t\lambda}$ の近似式を得た。

$$K_{t\lambda} = (a_{1\lambda} + a_{2\lambda} \sinh + a_{3\lambda} K_t) K_t \times \exp(a_{4\lambda} + a_{5\lambda} W) \quad (3)$$

本研究では、2009年10月から2011年4

月までの波長別水平面全天日射量の測定値に基づいて、式(3)の係数 $a_{1\lambda} \sim a_{6\lambda}$ を 2nm の波長間隔で最小二乗法により同定した。その際、大気外日射量に対する地表の直達日射量の比 K_b を用いて天候を分類し、 $K_b < 0.1$ と $K_b \geq 0.1$ の場合に分けて、係数を同定した。なお可降水量による吸収減衰を表す係数 $a_{5\lambda} \sim a_{6\lambda}$ は、700nm より長波長における水蒸気吸収波長帯において与えられるものであり、それ以外の波長帯では係数は 0 となる。式(3)の $K_{t\lambda}$ に波長別大気外日射量を乗じて、式(1)により 2nm 間隔で $I_{g\lambda}$ を推定し、測定値と比較した。また、 $I_{g\lambda}$ の RMSE と MBE を 2nm ごとに算定した。RMSE は、波長が 900nm 以下の帯域では、 $I_{g\lambda}$ の測定値の平均に対する RMSE の割合、すなわち RMSE% が概ね 10% 以内に収まっていることを確認した。一方、900nm を超える波長域では、RMSE% が 10% を超える場合が見られたが、RMSE は概ね $20[\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}]$ 以下に収まっていることを確認した。

(2) 波長別天空日射量の推定モデルの作成

本研究では、 K_d と $K_{d\lambda}$ の相関関係を調べて、 K_d を用いた $K_{d\lambda}$ の近似式の作成を検討した。 K_d と $K_{d\lambda}$ の相関図を調べた結果、 $K_{d\lambda}$ と K_d には正の相関が見られるが、短波長域では両者の関係にバラツキがあり、例えば K_d が 0.1 のとき、 $K_{d\lambda}$ は約 0.1 と約 0.25 のデータに分離していることが分かった。この原因として、同じ K_d であっても異なる天候状態が混在している可能性が考えられたため、 K_d と晴天指数 K_t の相関関係を調べた。その結果、例えば K_d が 0.2 のとき、 K_t は 0.1~0.8 の範囲で変化する傾向が確認されたことから、 K_d が同じ値であっても、曇天と快晴の天候状態が混在する可能性があることが分かった。そこで、天候を分類する指標として、新たに大気外日射量に対する地表の直達日射量の比 K_b を加える方針として、近似式を再検討した。種々検討した結果、天候状態を $K_b < 0.1$ と $K_b \geq 0.1$ の場合に分けて、次の近似式を得た。

$$K_b < 0.1 \text{ のとき} \\ K_{d\lambda} = b_{1\lambda} \exp(b_{2\lambda} + b_{3\lambda} W) K_d \quad (4)$$

$$K_b \geq 0.1 \text{ のとき} \\ K_{d\lambda} = \left[\sum_{i=0}^4 (c_{i\lambda} K_b^i) K_d + c_{5\lambda} \right] \exp(c_{6\lambda} + c_{7\lambda} W) \quad (5)$$

本検討では、鹿児島大学における 2010 年 1 月から 2011 年 4 月までの波長別天空日射量の測定値に基づいて、式(4)および式(5)の係数 $b_{1\lambda} \sim b_{3\lambda}$ 、 $c_{0\lambda} \sim c_{7\lambda}$ を 2nm の波長ごとに最小二乗法により同定した。なお、可降水量による吸収減衰を表す係数 $b_{2\lambda} \sim b_{3\lambda}$ 、 $c_{6\lambda} \sim c_{7\lambda}$ は、700nm より長波長における水蒸気吸収波長において与えられるものであり、それ以外

の波長帯では係数は 0 となる。

式(4)、式(5)に波長別大気外日射量を乗じて、式(2)により 2nm 間隔で $I_{d\lambda}$ を推定した。 $I_{d\lambda}$ の測定値の平均に対する RMSE の割合、すなわち RMSE% は、900nm 以下の波長帯においては 10% 以内に収まっていることを確認した。900nm より長波長帯域では、RMSE% が 10% を超える場合が見られたが、RMSE は概ね $10[\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}]$ 前後に収まっていることを確認した。

(3) 波長別直達日射量の推定

以上により波長別水平面全天日射量 $I_{g\lambda}$ と波長別水平面天空日射量 $I_{d\lambda}$ の推定が可能となるが、さらに $I_{g\lambda}$ の推定値から $I_{d\lambda}$ の推定値を差し引くことにより、波長別の水平面直達日射量の推定値も算定することが可能となった。

(4) 近赤外域の全天・天空日射量の推定

以上で提案した波長別全天日射量および波長別天空日射量の推定モデルは、350nm~1700nm の波長分布特性を与えるものであるが、これらのモデルによる波長別日射量の推定値を 350nm~1700nm まで波長積分し、これを水平面全天日射量 I_g あるいは水平面天空日射量 I_d から差し引けば、おおむね $1700\text{nm} < \lambda \leq 3000\text{nm}$ の波長範囲における近赤外域全天・天空日射量の波長積分値を近似的に算定することが可能となった。

(5) 今後の展望

本研究課題では、標準年気象データに含まれる 5 つの気象要素（気温、湿度、全天・直達・天空日射量）を入力データに用いて、全天候における波長別全天・天空日射量を推定するモデルを開発した。今後は、本推定モデルを斜面の波長別日射量の推定に適用し、その信頼性を検討することが望まれる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 5 件)

- 1) 竹内聡, 曾我和弘, 窪田真樹: 波長別日射量の推定法に関する基礎的研究 その 4 波長別の晴天指数を用いた波長別全天日射量の推定法, 学術講演梗概集, D-2, 環境工学 II, pp. 495-496, 2010 年 7 月 20 日
- 2) 竹内聡, 曾我和弘, 窪田真樹: 波長別日射量の推定法に関する基礎的研究 その 7 波長別の晴天指数を用いた波長別全天日射量の推定法, 日本建築学会研究報告. 九州支部. 2, 環境系 (49), pp. 141-144, 2010 年 3 月 1 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

曾我 和弘 (SOGA KAZUHIRO)

鹿児島大学・理工学研究科（工学系）・准
教授
研究者番号：00336322