

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560720

研究課題名(和文) 気候変動に適応可能な建築・設備の計画支援を目的とする将来気象データの開発

研究課題名(英文) Research on future weather data for designing building and equipment which are adaptable to climate change

研究代表者

曾我 和弘 (SOGA, Kazuhiro)

鹿児島大学・理工学研究科・教授

研究者番号：00336322

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：地球温暖化に適応可能な建築物を建設するためには、建築設計者が、建物の熱環境シミュレーションを用いて、将来の気候変動の影響を考慮することが有効である。気候変動下の建物の熱環境シミュレーションを実行するためには、その入力データとして将来の気候変動を含む将来気象データが必要となる。本研究では、特別の将来気象データを作成する手法を提案する。本手法は、現在の特別気象データに気候モデル出力を合成するものである。833地点の特別将来気象データを作成し、日本のオフィスビルの空調熱負荷計算に応用した。

研究成果の概要(英文)：It would be useful for building designers to consider future climate change by using building thermal simulation to construct an adaptable building to global warming. Future weather data including future changes to climate is needed as an input data to conduct building thermal simulation under the future climate. In this study, a method to produce hourly future weather data is presented. The method combines real present hourly weather data with result from climate models. Hourly future weather data at 833 stations have been developed and applied to heat load calculation of office buildings in Japan.

研究分野：建築環境工学

キーワード：気候変動 シナリオ 将来気象データ 気象データ 建築環境 建築設備 シミュレーション

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 気候変動に関する政府間パネルの指摘

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)は、IPCCの第4次評価報告書の中で、気候システムの温暖化には疑う余地がない。このことは、大気や海洋の世界平均気温の上昇、雪氷の広範囲にわたる融解、世界平均海面水位の上昇が観測されていることから今や明白である。温室効果ガスの排出が現在以上の割合で増加し続けた場合、21世紀にはさらなる温暖化がもたらされ、世界の気候システムに多くの変化を引き起こされるであろうと指摘している。また、IPCCの第4次評価報告書で使われた複数の気候モデルの将来予測によると、日本の平均気温は、21世紀末に、1980～1999年の平均気温と比較して、温室効果ガス排出シナリオがA2の場合で4.0、A1Bの場合で3.2、B1の場合で2.1上昇する可能性が示されている。

未来の暮らしを安全・安心なものにするためには、このような温暖化に伴う気候変動が、我々の暮らす地域や建物および居住者に及ぼす影響を予想し、その影響への対策を事前に考える必要がある。

### (2) 気候変動の緩和策と適応策の推進

IPCCの指摘する未来の気候変動によって何らかの影響が生じる場合に、それによる損害を和らげ、あるいは回避するための対策、すなわち気候変動への適応策の必要性が高まっている。これは、今後数十年間の更なる気候変動の影響を避けることはできないと考えられているためである。これまで、建築分野では、気候変動対策として、主に温室効果ガス排出を削減する対策、すなわち気候変動の緩和策が推進されてきたが、今後は、それと同時に、気候変動への適応策の推進が求められる。

我々の暮らす建物内部の居住環境は、その周辺の気候に影響を受けて形成されるので、未来の気候が変化すれば、それに応答して居住環境も変化する。もし、未来において暑熱日や熱波の頻度が増せば、建物内部では、居住者の熱的ストレスが増え、冷房需要や非冷房時の熱中症のリスクが高まる。また、豪雨や台風などの極端な気象現象の頻度が増せば、建物や都市に甚大な被害をもたらす可能性がある。これらの温暖化や極端気象現象への適応策をとるためには、科学的な根拠に基づいて、気候変動の影響の種類や大きさを予想して、対策の具体化に結び付ける必要がある。そのため、何らかの方法で未来の気候変動が建物や居住者に及ぼす影響を評価しなければならない。

### (3) 未来の気候変動が建築環境に及ぼす影響の評価に向けて

これまで建築分野では、地域の気候に適した建築・設備の計画を支援するため、建物内部の熱、空気、光環境などの建築環境や建築設備のエネルギー消費をシミュレートする実用的なプログラムが種々開発されてきた。

また、気温、湿度、日射量、降水量、風速などの気象観測値に基づく気象データベースが整備されたことによって、過去から現在までの気候条件下の建築環境のシミュレーションが可能になった。しかし、未来の気候変動下のシミュレーションを実現するためには、未来の気候変動を考慮した新たな気象データベースの開発が必須の課題となる。つまり、今後、未来の気候変動が建築環境に及ぼす影響の評価を実用化するためには、気候モデルで予測した未来の気候データ、すなわち気候変動シナリオを利用して、将来の気象データベースを新たに作成し、それを建築環境のシミュレーションプログラムに取り込むことが求められる。

## 2. 研究の目的

以上の背景を踏まえ、本研究は、気候変動に適応できる建築・設備の計画や設計を支援することを目的として、将来の気候変動下の室内環境や建物のエネルギー消費、CO<sub>2</sub>排出等を予測可能にするため、気象庁の気候変動シナリオを利用して、建築環境シミュレーションに利用可能な未来の特別将来気象データを開発する。具体的には、A2の温室効果ガス排出シナリオに基づく2031～2050年と2081～2100年の特別将来気象データに、近未来気候とA1Bの排出シナリオに対応した特別将来気象データを追加すること、未来の波長別日射量を追加すること、特別将来気象データに基づいて将来の標準年気象データと設計気象データを作成する手法を開発することを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では、研究目的を達成するために、気象庁の公開する「地球温暖化予測情報」と呼ばれる日本の気候変動シナリオを、既存の建築環境シミュレーションプログラムに利用できる入力気象データに翻訳する手法を開発する。ここにいう翻訳とは、気象観測値と統計的な手法を駆使して、気象庁の気候変動シナリオに、波長積分日射量、波長別日射量や大気放射量などの必要な気象要素の推定と補充、データの時間間隔の細分化、気候モデルの予測値の系統誤差の補正を施して、これを建築環境シミュレーションプログラム用の特別気象データに変換することを意味する。この研究手法は、統計的ダウンスケーリング手法に位置づけられる。

本研究では、これらからを実現する独自の統計的ダウンスケーリング手法の開発を試みた。この手法は、気象庁の気候変動シナリオである「地球温暖化予測情報第6巻」と「地球温暖化予測情報第8巻」に加え、その他の気候変動シナリオにも適用可能な手法であり、少ない計算負荷で多地点の特別将来気象データを作成可能にするものである。次章では、本研究で開発した統計的ダウンスケーリング手法の主な成果について述べる。

#### 4. 研究成果

##### (1) 気候変動下の日積算日射量の推定法

地球温暖化予測情報への日射量の補充を目的として、地球温暖化予測情報に収録された雲量から、統計的に日積算全天日射量を推定するモデルを作成した。日積算全天日射量は、日積算大気外日射量に日別晴天指数を乗じて推定する。本モデルでは、日別晴天指数が、無降雨日には大気中の可降水量に依存して減衰すること、および降雨日には降雨強度に依存して減衰することが考慮されている。

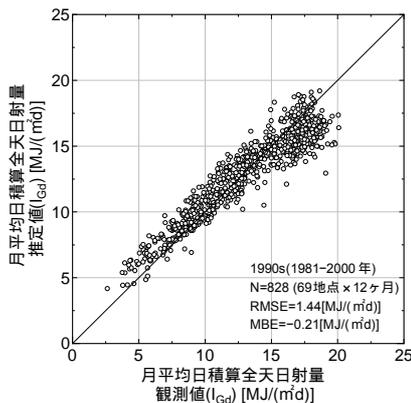


図1 月平均日積算全天日射量の推定値と観測値の比較

地球温暖化予測情報のアメダスの4要素観測地点に対応した833地点を対象に1990s、2040sおよび2090sの日射量の補充を行った。具体的には、地球温暖化予測情報の1990s(1981~2000年)の日別再現実験値、2040s(2031~2050年)および2090s(2081~2100年)の日別予測実験値から日平均雲量(上層、中層、下層)、日平均気温、日平均比湿、日積算降水量を用いて、各年代の日積算全天日射量を推定した。その際、日平均雲量には、地球温暖化予測情報の上層、中層、下層の日平均雲量のうち最大の雲量を与えた。また、太陽定数は4.9212[MJ/(m<sup>2</sup>h)]とした。

以上で補充した日積算全天日射量の推定値のうち、1990sの推定値と気象官署の観測値を比較し、推定値の不確実性を確認した。比較は、気象庁の日射量観測地点のうち69箇所の気象官署を対象とした。図1に1990s(1981~2000年)の20年間で平均した月平均日積算全天日射量の推定値と観測値の比較を示す。図1の推定値には日射量推定式の不確実性に加え、推定式に入力した地球温暖化予測情報の日別再現実験値の不確実性も含まれる。これらを含む総合的な不確実性として、図1の月平均日積算水平面全天日射量の観測値に対する推定値のRMSEとMBEを算定した。RMSEは1.44[MJ/(m<sup>2</sup>d)]、MBEは-0.21[MJ/(m<sup>2</sup>d)]となった。

##### (2) 気候変動下の日平均大気放射量の補充法

本研究では、近藤らの日平均大気放射量の推定式を用いて地球温暖化予測情報に日平均大気放射量を補充する手法を採用した。補

充の対象地点は、地球温暖化予測情報のアメダスの4要素観測地点に対応した833地点、補充期間は1990s、2040sおよび2090sとした。日平均大気放射量の計算には、地球温暖化予測情報の気象要素のうち、各年代の日平均気温、日平均比湿、日平均雲量(上層、中層、下層)および日積算降水量を入力データとして使用した。その際、全雲量には上層、中層、下層の日平均雲量のうち、最大の雲量を与えた。以上の条件を与えて、大気放射量を推定した場合の不確実性を確認するために、大気放射量の推定値と観測値を比較した。比較は、気象庁の大気放射量の観測地点のうち、1990s(1981~2000年)の観測値が存在する、つくばの高層気象台(館野)を対象に行った。図2に1990sの年別、月別に計算した月平均大気放射量の推定値と観測値の比較を示す。推定値の単位は観測値に合わせた。図2の推定値には、推定式の不確実性に加えて、推定式に入力した地球温暖化予測情報の日別再現実験値の不確実性も含まれる。これらを含む大気放射量の総合的な不確実性として、図2の月平均大気放射量の観測値に対する推定値のRMSEとMBEを算定した。MBEは、0.088[MJ/(m<sup>2</sup>h)]となり、推定値は観測値よりも大きく予測される傾向が見られた。一方、RMSEは0.108[MJ/(m<sup>2</sup>h)]となった。

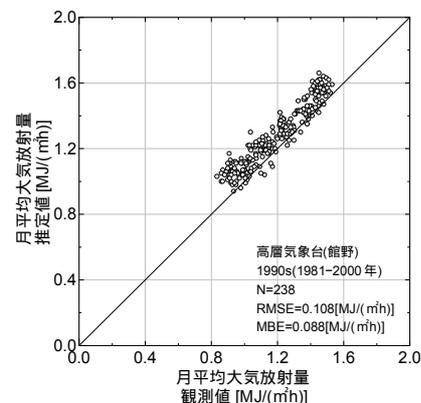


図2 月平均大気放射量の推定値と観測値の比較

##### (3) 時別の将来気象データの作成法

本研究では、気象要素の月平均値の将来変化量を利用して、基準期間(1990s)の日別と時別の気象データを変形し、将来期間の時別の将来気象データを作成する手法を採用した。その変形法には、Belcherらのmorphing法を応用するが、日別値で構成される地球温暖化予測情報に適合するように変形法に変更を加えた。また、作成する時別の将来気象データの気象要素は、気温、絶対湿度、日射量、大気放射量、風速および降水量の6要素とし、基準期間の日別と時別の気象データには、1981~2000年のEA気象データを用いた。

##### (a) 基準期間の日別値を将来期間の日別値へ変形する方法

図3に金沢の12月における1990sと2090s

の日平均気温のヒストグラムの比較例を示す。図3では、2090sの日平均気温は、1990sに対して、月平均値が高温側に3.37シフトすると同時に、2090sの標準偏差が1990sに対して0.5小さくなっている。本研究では、このような月平均値のシフトと標準偏差の伸縮を基準期間の日別値に加え、将来期間の日別値を作成した。具体的には、基準期間の日別値に月平均値の将来変化量を加算する。さらに、月平均値に対する日別値の偏差の将来変化量を加算することで、標準偏差の将来変化を再現し、将来期間の日別値を作成した。

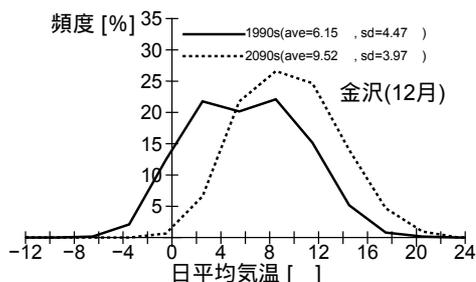


図3 1990sと2090sの日平均気温のヒストグラムの比較例

(b) 将来期間の日別値の時別値への変形方法

将来期間の日平均気温、日平均絶対湿度および日平均大気放射量に、基準期間の日別値に対する時別値の偏差、すなわち気象要素の1時間ごとの変動成分を加算して、将来期間の時別値を作成した。その際、絶対湿度と大気放射量の将来期間の時別値の毎時変動成分は、基準期間から変化しない扱いとした。これは地球温暖化予測情報第6巻の時間解像度が日単位に制約され、毎時変動の将来変化に関する予測情報が得られないためである。気象要素の毎時変動の将来変化の有無については、時別の予測実験値を含む気候変動シナリオに基づいた判断が必要であり、今後の検討課題とする。

一方、気温に関しては日別将来気象データに日平均気温のほかに、日最高気温と日最低気温が収録されているので、これらのデータから気温日較差の将来変化を考慮することができる。本研究では、日平均気温に対する日最高気温の偏差の月平均値、日平均気温に対する日最低気温の偏差の月平均値を求め、これらの月平均値の将来変化率を求めた。さらに、この将来変化率を用いて日平均気温に対する時別気温の偏差を伸縮変形し、それを日平均気温に加算して、将来期間の時別気温を作成した。

以上の時別将来気象データの作成法の再現性を確認するため、地球温暖化予測情報に基づいて、金沢の1981~1990年の時別気温の観測値を1991~2000年の時別気温に変形した。1991~2000年の金沢における12月の時別気温の推定値と観測値の比較例を図4に示す。図から推定値の分布は観測値とよく

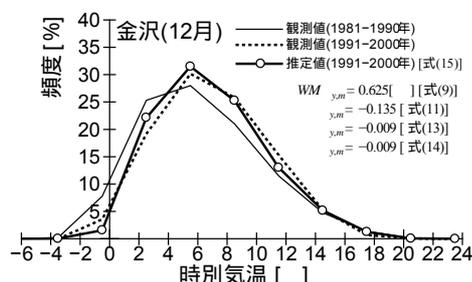


図4 時別気温の推定値と観測値のヒストグラムの比較

対応することを確認した。

(c) 月平均値の将来変化率を考慮した変形方法

日射量、風速、降水量の3要素については、気象現象が観測されない時、観測値は0となり、不連続データとなる。これら3要素に(a)や(b)による変形法を適用すると、マイナス値が生成される等の論理エラーが生じる場合がある。本研究では、これを回避するため、上記3要素は、月平均値の将来変化率に基づき、基準期間の時別値を伸縮変形して将来期間の時別値を作成した。

以上の変形法に基づき、時別の将来気象データを作成した。また、2040sと2090sの20年間の時別将来気象データを用いて、各年代を代表する平均的な1年間の時別気象データとして、時別標準年将来気象データを作成した。本研究では、その作成の際、平均月の選択法として、EA-DWT法を使用した。また、平均月は、2040sと2090sの年代ごとに、1月から12月までの各月について、20年分の月から選択した。

RCMによって力学的にダウンスケールされた気候変動シナリオに、統計的なダウンスケールを適用することで時別将来気象データを作成する本手法は、計算負荷が小さく、多地点の時別将来気象データを少ない計算資源で作成できる。時別の将来気象データと標準年将来気象データは、現実の地点の観測に基づく基準期間の時別気象データに気象要素の月別の将来変化を合成して作成されているので、気候変動を想定した時別の建築環境シミュレーションの入力気象データとして利用できる。また、基準期間の時別気象データと将来期間の時別将来気象データに基づく建築環境シミュレーションの結果を比較することで、将来の気候変動が建築環境に及ぼす影響を月別に分析できる。

新たに整備された将来気象データと、既存の過去や現在の気象データを、同一の建築環境シミュレーションプログラムに入力すれば、日本全域を対象に、過去から現在、そして未来にいたるまで一貫して建築環境をシミュレートできる。また、将来気象データに基づくシミュレーション結果を、過去や現在の気象データに基づくシミュレーション結果と比較することによって、未来の気候変動

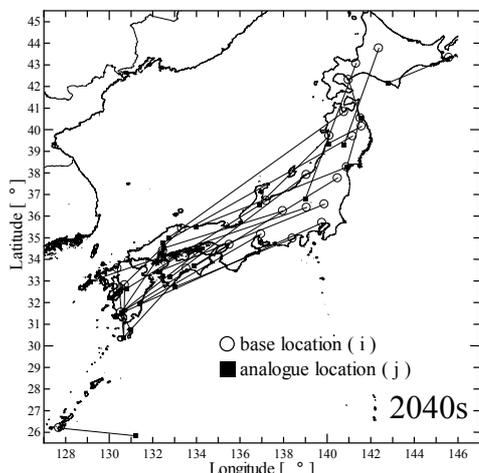


図5 将来の年間空調熱負荷に類似した年間空調熱負荷を持つ現在地点の選定結果の例

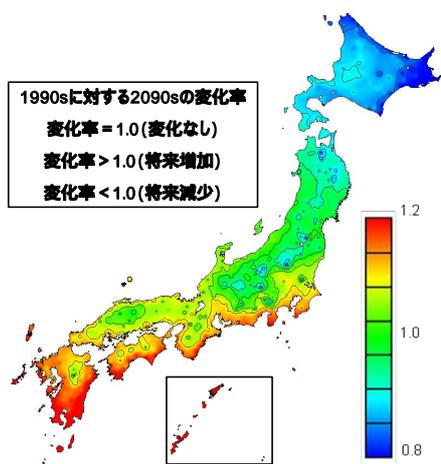


図6 1990s に対する 2090s の年間冷暖房負荷の変化率の例

が建築環境に及ぼす影響の種類や大きさを客観的に評価できると考えられる。

#### (5) 標準年将来気象データの空調熱負荷計算への応用

標準年将来気象データを年間空調熱負荷計算に応用することを想定して、気候変動下の年間空調熱負荷の予測と分析を試みた。

1981～1990年の特別EA気象データからGWP6を利用して1991～2000年の特別将来気象データを作成し、1991～2000年のオフィスパルの年間空調熱負荷を予測した。また、同期間のEA気象データに基づく年間空調熱負荷を真値と考え、予測値と比較した。これらの予測値と真値は良く対応することから、地球温暖化予測情報から作成した特別将来気象データは、将来の年間空調熱負荷予測の入力気象データや標準年将来気象データのデータソースとして利用可能であることを確認した。2040sと2090sの標準年将来気象データに基づく年間空調熱負荷の予測値は、各年代の20年平均値に良く対応することが分かった。したがって、標準年将来気象データ

を用いることで、2040sと2090sの平均的な年間空調熱負荷を算出可能になる。

現在と将来の833地点の特別標準年気象データを応用して、ある地点の将来の年間空調熱負荷が、現在のどこの地点の年間空調熱負荷に類似するのか、日本全域を対象に探索する方法を検討した。833地点の現在と将来の標準年気象データを応用して、将来の年間空調熱負荷が、現在のどこの地点の年間空調熱負荷に類似するのかを定量的に示す、熱負荷距離を提案し、これを指標に用いることで、年間空調熱負荷の類似地点の探索が可能になることを示した。これにより、将来の年間空調熱負荷を現在の年間空調熱負荷の地域分布の中に位置づけることが可能となり、気候変動に伴う年間空調熱負荷の将来変化を身近に捉え易くなると考えられる。

オフィスパルを想定し、熱負荷距離を応用して、2040sの将来の年間空調熱負荷に類似した年間空調熱負荷を持つ現在地点を選定した結果の例を図5に示す。この図から、将来の東京、鹿児島 of 冷暖房負荷と類似する冷暖房負荷を持つ現在の都市を探索してみると、将来の東京の冷暖房負荷は現在の鹿児島周辺、将来の鹿児島は現在の沖縄周辺の冷暖房負荷に近づく可能性が読み取れる。

図6に現在(1990s)に対する将来の冷暖房負荷の変化率の例を示す。寒冷地では、暖房負荷の減少が冷房負荷の増加を上回り、冷暖房負荷に減少傾向が見られた。反対に、温暖地では、冷房負荷の増加が暖房負荷の減少を上回り、冷暖房負荷に増加傾向が見られた。

#### (6) 波長別全天日射量の簡易推定法

未来の気候変動下の波長別日射量を推定可能にするため、将来気象データに含まれる気象要素から波長別日射量を推定するモデルを作成した。これは、全天候下の水平面における波長別全天日射量を、波長積分全天日射量、気温、湿度の3要素から統計的に推定する回帰式である。この推定法による推定値を測定値と比較し、推定値の信頼性を調べた。

本研究では、広帯域分光放射計による波長別全天日射量と、全天日射計による波長積分全天日射量の同時測定値に高い相関があることを明らかにした。この相関関係を利用して、波長積分全天日射量を説明変数、波長別全天日射量を従属変数とする原点を通る回帰直線を350nm～1700nmまで5nm間隔で作成し、これを波長別全天日射量の推定式とした。

この回帰直線の回帰係数を全天日射量のスペクトル係数と定義した。また、全天日射量のスペクトル係数は、波長、晴天指数、エアマス、可降水量に依存して変化することを明らかにした。天候状態を晴天指数で4分類、エアマスで3分類、可降水量で3分類し、これらの分類を組合せた計36通りの天候状態の全天日射量のスペクトル係数( $R_{\lambda,K,AM,W}$ )を求めた。0.35～1.7 $\mu\text{m}$ の波長域において、スペクトル係数に基づく波長別全天日射量の

推定値の RMSE は、図 7 のように 0.23 ~ 27.7 [W/m<sup>2</sup>/μm] の範囲となった。

スペクトル係数に基づく波長別全天日射量の波長積分推定値、すなわち 0.35 ~ 1.7 μm の全放射量、0.38 ~ 0.78 μm の可視放射量、0.4 ~ 0.7 μm の光合成有効放射量、0.75 ~ 1.7 μm の近赤外放射量の RMSE は、各波長積分値の測定平均値の 4% 以内に収まった。

スペクトル係数に基づく冬季および夏季快晴時の波長別全天日射量の推定値は、波長別全天日射量の測定値および Bird モデルによる推定値と良く対応することを確認した。冬季快晴時の波長別全天日射量の推定値と測定値、Bird モデルの推定値の比較例を図 8 に示す。

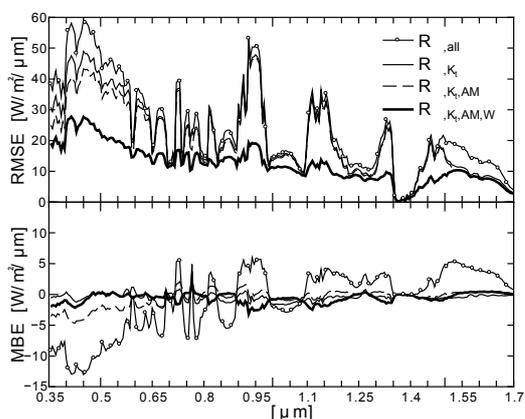


図 7 波長別全天日射量 ( $I_g$ ) の推定値の RMSE と MBE (2011 年)

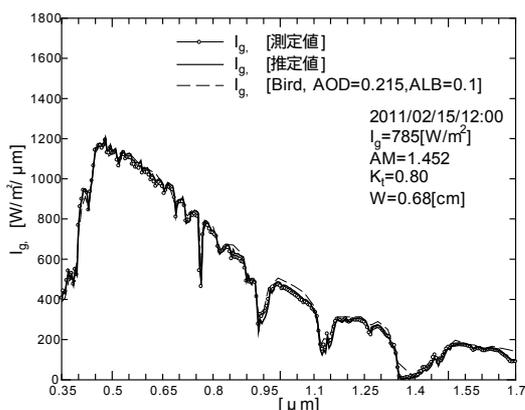


図 8 冬季快晴時の波長別全天日射量 ( $I_g$ ) の推定値と測定値の比較例(2011 年)

以上の(1) ~ (6)の統計的ダウンスケーリング手法に関する研究成果は、日本建築学会環境系論文集の論文 2 件、日本建築学会技術報告集の論文 1 件にまとめて公表した。また、これらの研究成果を気象庁の「地球温暖化予測情報第 6 巻」と「地球温暖化予測情報第 8 巻」に適用することで、複数の温室効果ガス排出シナリオと年代を想定した気候変動下の日本各地の特別将来気象データ(気温、湿度、日射量、大気放射量、風速、降水量)と

標準年将来気象データを作成した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

曾我和弘、波長別全天日射量の簡易推定法の開発 全天候下の波長別日射量の簡易推定法に関する研究、日本建築学会環境系論文集、査読有、第 80 巻、第 714 号、2015、印刷中

曾我和弘、地球温暖化予測情報第 6 巻に基づく標準年将来気象データの空調熱負荷計算への応用、日本建築学会技術報告集、査読有、第 21 巻、第 47 号、2015、pp.177-182

曾我和弘、地球温暖化予測情報を用いた将来気象データの開発:気候変動に適應可能な建築・設備の計画支援を目的とする将来気象データに関する研究、日本建築学会環境系論文集、査読有、第 79 巻、第 703 号、2014、pp.803-812

〔学会発表〕(計 6 件)

曾我和弘、任意天候下の波長別日射量の簡易推定法に関する研究、太陽/風力エネルギー講演論文集、pp.321-324、2014 年 11 月 14 日、いわき文化センター(福島県・いわき市)

三池もも子、曾我和弘、気候変動に適應可能な蒸暑地域の住宅仕様に関する基礎的研究:その 1 開口部の仕様が冷房負荷と PMV に及ぼす影響、日本建築学会学術講演梗概集 2014、環境工学 II、pp.143-144、2014 年 9 月 14 日、神戸大学(兵庫県・神戸市)

曾我和弘、気候変動に適應可能な建築・設備の計画支援を目的とする将来気象データに関する研究:特別将来気象データに基づく空調熱負荷計算、日本建築学会学術講演梗概集 2014、環境工学 II、pp.23-24、2014 年 9 月 12 日、神戸大学(兵庫県・神戸市)

曾我和弘、気候変動に適應可能な建築・設備の計画支援を目的とする将来気象データの開発、太陽/風力エネルギー講演論文集、pp.511-514、2013 年 11 月 29 日、沖縄県市町村自治会館(沖縄県・那覇市)

曾我和弘、将来の気候変動が太陽光発電に及ぼす影響、日本建築学会学術講演梗概集 2013、環境工学 II、pp.1343-1344、2013 年 8 月 30 日、北海道大学(北海道・札幌市)

曾我和弘、他、建築環境予測のための将来気象データの開発と応用、日本建築学会第 42 回熱シンポジウム、2012 年 11 月 17 日、日本建築学会建築会館(東京都・港区)

〔図書〕(計 1 件)

曾我和弘、日本建築学会、建築雑誌 Vol.130 No.1667、未来の気候変動の建築環境への影響、2015 年、pp.20-21

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

曾我和弘 (SOGA, Kazuhiro)

鹿児島大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 00336322