

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月6日現在

機関番号：13102

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2010～2011

課題番号：22686023

研究課題名（和文） 都市－地球サブスケールのふく射伝熱機構の実態解明

研究課題名（英文） Elucidation of radiative heat transfer mechanism  
in urban-earth subscale atmosphere

研究代表者

山田 昇（NOBORU YAMADA）

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号：90321976

研究成果の概要（和文）：

本研究では、都市－地球サブスケールにおけるふく射伝熱機構の実態解明を目指して、ふく射熱流束センサを搭載した GPS ラジオゾンデを新たに開発した。ゾンデの特性評価試験等を行った後、都市域においてゾンデ飛揚観測を実施し、高度約 15km までの赤外ふく射収支プロファイルを計測できた。本ラジオゾンデは従来より低コストであり今後も継続的に観測を実施することが可能である。また、実測データを「解」とする逆問題ふく射伝熱解析から、大気の実質的なふく射物性値（吸収率・放射率など）を導く手法を構築することができた。

研究成果の概要（英文）：

GPS radiosonde with radiation flux sensors was newly developed in order to elucidate radiative heat transfer mechanism in urban-earth subscale atmosphere. After characterization and calibration of the radiosonde were carried out in temperature-controlled room, balloon observation tests were conducted in urban area and vertical profiles of upward and downward infrared radiation heat flux were successfully obtained. The developed radiosonde is low cost as compared to the conventional observation device, hence, is suitable for long-term observation. Furthermore, inverse analysis method was also developed in order to evaluate radiative properties of the atmosphere from the observation data.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	7,100,000	2,130,000	9,230,000
2011 年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
年度			
年度			
年度			
総計	12,100,000	3,630,000	15,730,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：ふく射（輻射）、都市温暖化、地球温暖化

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

### 1. 研究開始当初の背景

近年、地球温暖化や都市温暖化が顕在化し、その動向を示す学術データが国内外における政策決定の重要資料となっている。しかし、これらメガスケール現象に関する観測値の蓄積やシミュレーションモデルの信頼性は学術的に未だ十分とは言えない。なかでもふく射伝熱機構については、温室効果を司る機構であるにもかかわらず、実測データに裏付けられた緻密なモデル化に至っていない。とくに大気下層の都市域を含む都市スケールと地球スケールの中間スケール（以下、都市-地球サブスケール：図1参照）でのふく射伝熱現象は、都市温暖化と地球温暖化の双方に少なからず影響を及ぼしていると考えられる領域であるが、気候学・気象学・建築学の研究ギャップ領域となっており、国内外において学術的知見が不足している。

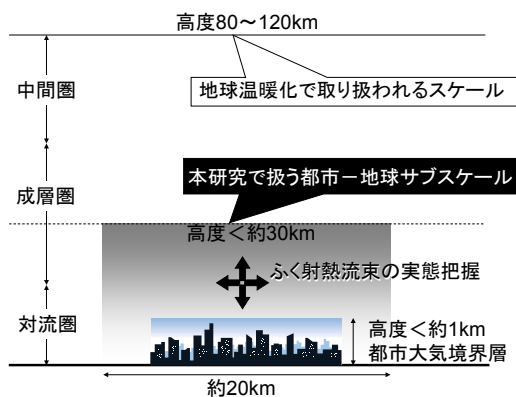


Fig.1 Target of the present research

さらに、機構解明へのアプローチについても限界がある。従来のアプローチでは、まず、各種の温室効果ガス濃度などの詳細な観測データを蓄積し、それらを解析モデルへの入力として、現象をある程度の確度で再現し、それに基づいて、たとえばCO<sub>2</sub>濃度倍増時の予測をするという手法が主流である。しかし、この手法“のみ”に依存すると、数え切れないほどある影響因子に対する必要十分な観測値が得られるまでに長い年月を要し、問題の核心に迫る情報がなかなか得られない恐

れがある。実際、温室効果において核心となるべき、大気中の場所・時間毎の正味ふく射伝熱量の実態に関する情報を、膨大な論文・資料から容易に見つけることができない。

### 2. 研究の目的

そこで本研究では、都市-地球サブスケールにおけるふく射伝熱機構の実態解明を目指す。まず、ふく射熱流束センサを搭載したGPSラジオゾンデを新たに開発し、ゾンデの特性評価試験等を行った後、都市域においてゾンデ飛揚観測を実施し、高度約30km未満の赤外ふく射収支プロファイルを取得する。さらに、実測データを「解」とする逆問題ふく射伝熱解析から、大気の実質的なふく射物性値を導く手法を構築する。さらに、その観測値が「解」として得られる大気のみく射物性値を逆問題解析により導出する。ここで導かれる大気のみく射物性値は、実際に大気中に存在する個々の影響因子（温室効果ガスによる放射・吸収、雲や微細粒子による散乱など）の重ね合わせ効果を内含する“マクロみく射物性値”であり、このマクロみく射物性値と個々の影響因子が及ぼしうる理論値とのオーダー比較等により、現実のみく射伝熱機構において主体となっているメカニズムを浮き彫りにできると考えている。

### 3. 研究の方法

信頼性の高い実測をコスト・時間的に効率良く、できるだけ多く実施することが本研究目的達成の鍵となる。まず、気象観測において長年の実績があるラジオゾンデ（高精度GPS測位方式）にふく射熱流束センサを搭載し、図2に示すように複数のゾンデで都市上空を上昇飛行させ、各種測定データを逐次テレメート受信する。また、ゾンデ観測と並行して、高度5km未満において小型航空機（セスナ機を想定）によるふく射熱流束の観測を行う。これらの観測をできるかぎり多数回行い、高度20m~30km程度のふく射熱流束の

空間分布を整理・視覚化する。さらに、ふく射熱流束の観測データを「解」とする逆問題ふく射伝熱解析を実行し、解析結果として得られる大気のみく射物性値を詳細に比較・考察し、ふく射伝熱機構の実態解明に繋がる知見を得る。

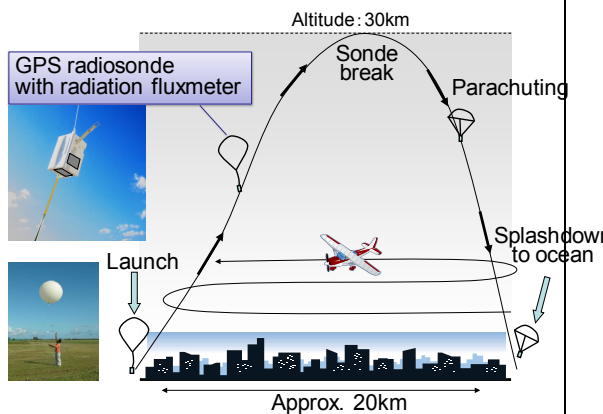


Fig.2 Outline of balloon observation with GPS radiosonde for measurement of radiation flux profile.

#### 4. 研究成果

図2に新たに開発したふく射熱流束センサ付き GPS ラジオゾンデの概略とこれを観測用気球につり下げた様子を示す。このゾンデは、GPS 測位情報を1秒毎に、また、測定データを0.5秒毎に送信できる。図のようにゾンデの上面および下面に搭載されたふく射熱流束センサは、黒体面と反射面との起電力差からふく射熱流束のみを検知するタイプであり、赤外波長に感度を有する。ゾンデ上面側のセンサは大気の下向き赤外放射フラックスを検出し、ゾンデ下面のセンサは上向き赤外放射フラックスを検出する。なお、センサ面から気球までは16m離れており、形態係数は十分に小さい。開発にあたり、ラジオゾンデ技術に長年の実績を有する明星電気(株)の技術者にゾンデ開発へのご協力を頂いた。なお、小型航空機による観測については、航空機会社と詳細に検討を重ねたが、当初の見積もり以上の過大なコストがかかるためやむをえず取り止めた。

まず、試作ゾンデの機器類の動作確認を行うために各種の特性評価試験を行った。図3

に恒温室内で実施したセンサ校正試験の様子を示す。恒温室内の温度を $-20^{\circ}\text{C}$ として、擬似黒体面にふく射熱流束センサを正対させ、黒体面温度をヒーター制御しながら校正を行った。使用したセンサは広範な温度範囲でリニアな電圧出力特性を有していること

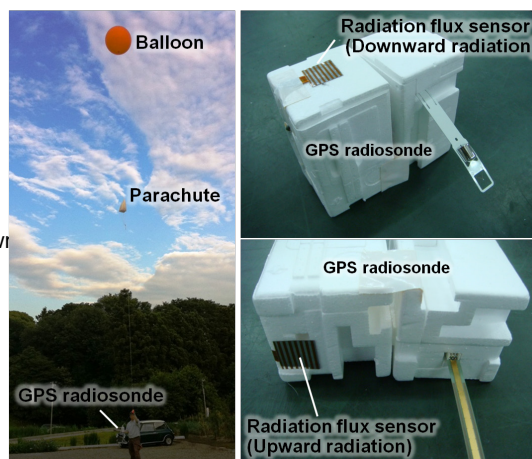


Fig.2 Photos of balloon and GPS radiosonde equipped with radiation flux sensors.

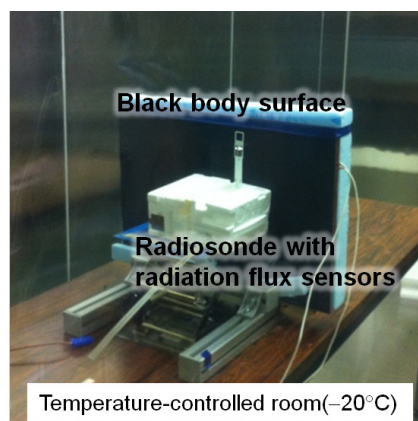


Fig.3 Characterization and calibration of GPS radiosonde with radiation flux sensors.

が確認できた。また、実際にふく射熱流束センサをゾンデに取り付けた状態でも同様の試験を行い、電波を送受信し、センサ単体から得られる出力値が受信できることを確認できた。さらに、相対湿度が高い大気中においてセンサ面に液滴が付着した際の感度への影響を確認するために、 $-20^{\circ}\text{C}$ の恒温室内(東北大学流体科学研究所圓山/小宮/岡島研究室)において超音波加湿器からの微粒子水蒸気ミスト、霧吹きによるミストをセンサ表

面に噴霧してみた。超音波加湿器からのミストによる影響は見られなかったが、霧吹きミストを複数回噴霧し、センサ表面に水膜が生じる状態ではふく射熱流束が検出できないことを確認した。つまり、相対湿度の高い大気中におけるデータについては液滴付着による不確実性を有することに注意しなければならないことが明らかとなった。その後、技術的な不を修正し、動作の確実性を高めた後に、テスト飛揚を行った。

図4および図5に茨城県守谷市で行ったテストゾンデ飛揚におけるゾンデの到達高度および位置の時間変化を示す。ゾンデは飛揚開始から76分後に高度約16kmに到達した直後にバーストし、パラシュート降下した。守谷市から西に横切るように流れ、最終的に太

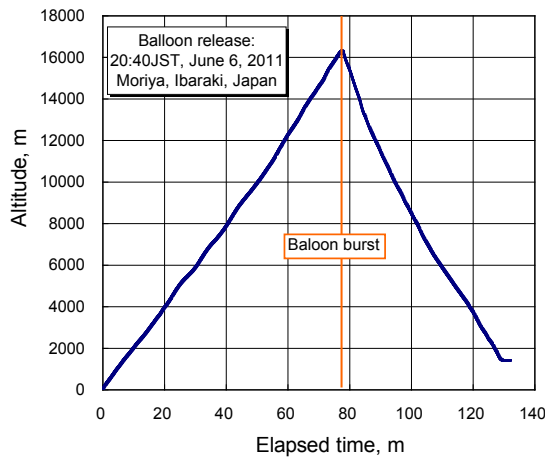


Fig.4 Flight altitude of GPS radiosonde released from Moriya city, Ibaraki prefecture, Japan.

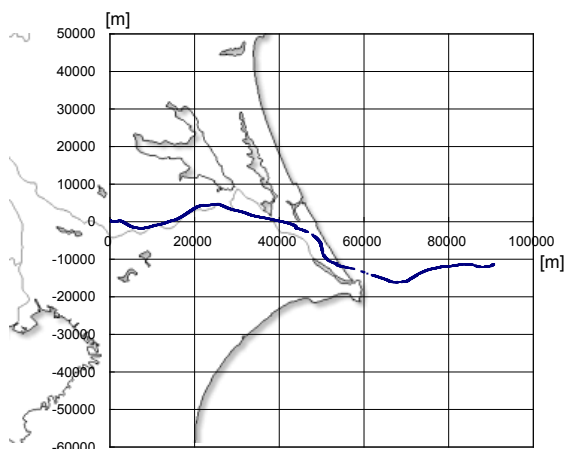


Fig.5 Horizontal flight path of GPS radiosonde corresponds to Fig.4.

平洋に落下したものと思われる。なお、ゾンデ観測を行う際には、飛揚地点を管轄する国土交通省航空局、自衛隊等に事前にノータム申請を行い、打ち上げ時も逐次状況連絡を行う必要がある。また、ゾンデを新幹線線路等や重要施設内に落下させた場合には損害賠償等の恐れがあるため、通常は偏西風が卓越する初冬から春先までの期間に観測が限定されてしまう。

図6に本テスト飛揚で取得された気温、相対湿度、上向き赤外放射フラックス、下向き赤外放射フラックス、および正味フラックスの鉛直分布を示す。これらの計測値はフラックスを除き PC 画面上でリアルタイムでモニタリングできる。高度14km付近以上の高度では気温変化が無くなり、成層圏に到達していることがわかる。また、得られた各放射フ

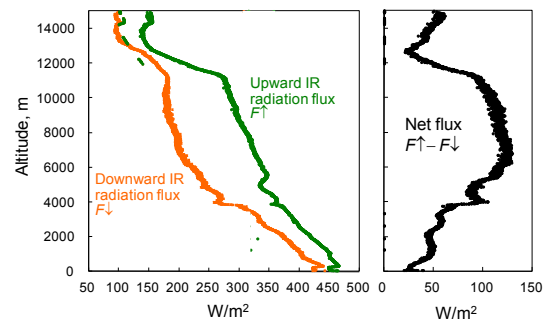
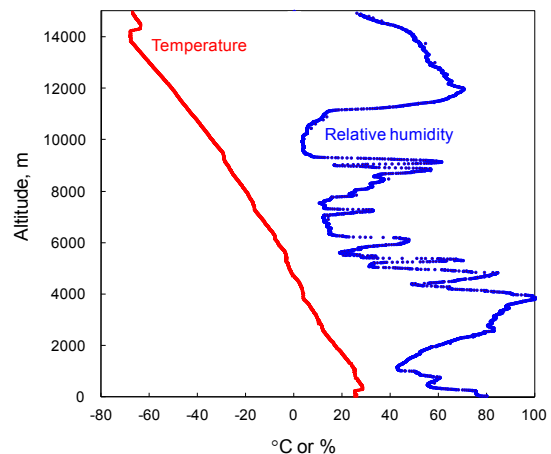


Fig.6 Vertical profile of temperature, relative humidity, and upward/downward IR radiation flux, and net IR radiation flux obtained by the present GPS radiosonde.

ラックスの値は、過去に行われた地上観測用日射計と赤外放射計を搭載した大型ゾンデ観測（高コストのため継続的観測は困難と思われる）による結果に近く、妥当な計測値が得られた。以上より、当初予定していた30km未満の観測が十分に行えることが実証された。なお、今回使用したものより大きめの直径の気球を使用すれば30kmへの到達も可能であると考えている。

開発したGPSラジオゾンデを用いて都市域における観測を計画した。人口密度が高い大都市で、太平洋に面し、かつ飛行ルートに都市域と田園地帯との境界が存在する都市であり、さらに飛行制限が比較的緩和な都市として、仙台市を想定し、市街地（東北大学流体科学研究所）からの複数の飛揚観測を計画した。しかし、残念ながら、東日本大震災のために計画は1年以上延びてしまった。この間、観測データ（気温、相対湿度）を用いて、水蒸気を温室効果ガスとして考慮したPlane-Parallelモデルおよび非灰色モデルによる赤外放射フラックスの解析手法を構築し、これにより算出した赤外放射フラックスが観測されたフラックスとほぼ一致することを確認できた。さらにこのモデルをベースとする逆解析モデルを構築できた。2012年春には複数台のふく射熱流束センサ付きGPSラジオゾンデを同時に仙台市街地から飛揚させ、貴重なデータを取得できた。観測結果と解析結果がまとめ次第、別途成果発表する予定である。

以上のように、本研究ではふく射熱流束センサを搭載したGPSラジオゾンデを新たに開発し、高度約15kmまでの赤外ふく射収支プロファイルを計測できた。震災により観測回数が当初計画よりも制限されたが、本ラジオゾンデは従来ものものよりも格段に低コストなことから今後も継続的に観測を実施することが可能であり、ふく射伝熱機構の実態解明に資するものである。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

投稿準備中

〔学会発表〕(計2件)

1. Noboru Yamada, Atsushi Sakurai, Atsuki Komiya, Shigenao Maruyama, Energy Transfer Simulation and Analysis on Mega-scale Environment, Proceedings of the 10th International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration (AFI/TFI2010), Sendai International Center (Nov. 1-3, 2010), pp.72-73.
2. Noboru Yamada, Atsushi Sakurai, Atsuki Komiya, Shigenao Maruyama, Energy Transfer Simulation and Analysis on Mega-scale Environment, Proceedings of the 11th International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration (AFI/TFI2011), Sendai (Nov. 9-11, 2011), pp.160-161.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

〔その他〕

新聞報道：2012年5月5日 河北新報「電磁波ピピッ！温暖化測定」



## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山田 昇 (NOBORU YAMADA)  
長岡技術科学大学・工学部・准教授  
研究者番号：90321976

### (2) 連携研究者

圓山 重直 (SHIGENAO MARUYAMA)  
東北大学・流体科学研究所・教授  
研究者番号：80173962