

全球雨量マップ作成のための雲赤外データ利用の検討について

牛尾知雄^{*1}・岡本謙一^{*1}・井上豊志郎^{*2}・重 尚一^{*1}・橋爪 寛^{*3}・飯田泰久^{*1}

On the Use of Geo-IR Data for the Microwave Radiometer Based Global Precipitation Map

Tomoo USHIO^{*1}, Ken'ichi OKAMOTO^{*1}, Toshiro INOUE^{*2}, Shoichi SHIGE^{*1},
Hiroshi HASHIZUME^{*3} and Yasuhisa IIDA^{*1}

Precipitation estimates from microwave imagers have been the best to draw the global precipitation map. However these sensors are on low earth orbit (LEO), thus temporal sampling is a major drawback. A simple technique to interpolate rain rate observed from LEO microwave imagers or to fill the gaps which microwave data are not available is presented by using moving vectors from geo-IR data. The technique is evaluated using Radar AMeDAS data sets near Japan. The results show that the moving vector technique reduces the error by 0-30% compared to a simple linear interpolation.

Keywords : IR, precipitation map, microwave radiometry

1. はじめに

降雨は、全球的なエネルギー循環における重要なパラメータの一つであり、高時間高空間分解高精度の全球雨量マップは、多くの科学的分野での応用が期待されている。例えば、水文学や気候学などの分野で基礎的なデータを提供する一方、数値予報の初期値として有用であるばかりでなく、また予報値の検証などにも用いることが出来る。しかしながら、空間的に高分解能で常時、全球の降水を直接測定する手段があるわけではない。そのため、静止気象衛星からの雲の可視・赤外画像を雨量に変換するアルゴリズムの開発、あるいは、低軌道衛星搭載のマイクロ波放射計アルゴリズムによる雨量を、合成する手法の開発など、何らかのアルゴリズム処理を行い、全球の降水マップを作成する必要がある。

このような試みの代表として、GPCP (Global Precipitation Climatology Project) がある¹⁾。GPCP では、1 度×1 度グリッド、一日の分解能で、降水分布を求めているが、常時観測が可能な静止気象衛星からの可視・赤外画像データを直接雨量に、低軌道衛星搭載のマイクロ波放射計データを参照して、TMPI (Threshold-Matched Precipitation Index) と呼ばれるヒストグラムマッチングの手法により変換している²⁾。この手法では、雲の下層の降雨の有無に関わらず、

雲の上層からの放射輝度温度を測定しているため、層状性の無降雨雲を雨域と判別する傾向が顕著で、原理的なエラーの元となっている²⁾。

一方、全球の降水を複数のマイクロ波放射計により高精度、高分解能で観測する衛星計画として、GPM (Global Precipitation Measurement) 計画が NASA/JAXA を中心とする諸機関で検討されている。この計画では、降雨からのマイクロ波放射を観測するマイクロ波放射計を多数の低軌道衛星に搭載し、地球上の一点における観測時間間隔がおおよそ 3 時間となる予定である。この計画が実現される頃には、より高精度、高分解能な、例えば 1 時間以下、0.1 度グリッド程度の降水マップの作成が求められている。しかし、可視・赤外輝度温度を雨量に直接変換する手法を用いた降水マップでは、上述のような無降雨性層状雲を雨域と判別する傾向が存在し、1 時間、0.1 度グリッド程度の高分解能マップでは、マイクロ波放射計データのみを用いたマップに比して、高精度を保証することが難しくなる。

本研究では、より高精度、高分解能の降水マップを作成するため、静止気象衛星の赤外画像データから算出される雲移動ベクトル利用して、サンプリング間隔が数時間存在するマイクロ波放射計データを補間する手法の検討を行う。実際の衛星搭載マイクロ波放射計データでは、衛星によりアルゴリズムが異なることによる系統的誤差の差異、また、領域により観測時間間隔が異なるなどの問題が存在

(2004. 6. 23 受付, 2005. 5. 13 改定受理)

^{*1} 大阪府立大学大学院工学研究科
〒599-8531 大阪府堺市学園町 1-1

^{*2} 気象研究所
〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1

^{*3} 科学技術振興機構 (JST)
〒332-0012 埼玉県川口市本町 4-1-8 川口センタービル

^{*1} Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University, 1-1 Gakuencho, Sakai, Osaka 599-8531, Japan

^{*2} Meteorological Research Institute, 1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052, Japan

^{*3} Japan Science and Technology Agency, 4-1-8 Honmachi, Kawaguchi, Saitama 332-0012, Japan

するので、手法自体の検討を行うため、日本付近で高時間、高分解能の降水分布が得られるレーダアメダスデータを間引き、静止気象衛星の赤外画像データを用いて補間する。そして、間引く前のレーダアメダスデータと比較し、同手法の有効性の検討を行う。TMPI では、赤外領域での輝度温度を雨量に変換しているが、移動ベクトルを用いた本手法では、輝度温度は雨域の移動方向を算出する目的にのみ用いており、輝度温度-降水量の直接変換を行っていないところに違いがある。第2章では、本研究で用いるデータ及び手法と解析手順について記述し、3章で結果及び議論を行い、4章で結論とする。

2. データ・解析

本研究では、雨量マップを一時間の分解能で作成するため、静止気象衛星の赤外画像データを用いて補間する手法の検討を行う。降水強度は、赤外輝度温度と直接関係はないが、雲の赤外画像は、降水を伴う雲システムの水平移流及び高度に関する情報を定量的に表しているため、本研究では、降水の移動を赤外画像から推定し、利用することを検討する。そのため、静止気象衛星の赤外画像データから推測される雲移動ベクトルと同方向に、レーダアメダスによって観測された雨量ピクセルを移動させ、サンプリングの間を補間する。用いるデータは、マイクロ波放射計データの代替としてレーダアメダス合成図を用い、静止気象衛星の赤外画像データは、実際の静止軌道衛星からのデータを使用する。現在のSSM/I, Aqua 衛星などのマイクロ波放射計がサンプリングを行う平均サンプリング間隔であるため、想定しているサンプリング間隔は6時間とする。また、移動ベクトルを用いて1時間毎に雨量マップの作成を行い、レーダアメダスと比較を行う、さらに、一日の日本付近の雨量マップにおいても6時間毎のレーダアメダスデータのみを用いた一日の雨量マップと比較し、検証を行うこととする。

レーダアメダス合成図は、日本付近をカバーするよう250×660の斜軸ランベルト座標系から成っており、各格子点に1時間毎の降水強度データが格納されている。本研究では、0.1度、1時間の降水マップを考えているため、このレーダアメダスデータを0.1度×0.1度グリッド毎の1時間降水量に変換し、解析を行う。

一方、用いる赤外データは、Goddard Data Archive Center (Goddard DAAC)^{*}から配布されている、全球0.0363度グリッドの分解能を有する1時間毎の全球赤外画像合成データを用いる。本研究では、レーダアメダスの観測範囲を解析領域とするため、使用する衛星は、GMS となる。その赤外領域(11μm)の画像を使用する。

解析のフローチャートをFig. 1に示す。レーダアメダス合成図により、まず、雨域ピクセルを同定し、各雨域ピクセルに対応する赤外画像上のピクセルを特定する。このピ

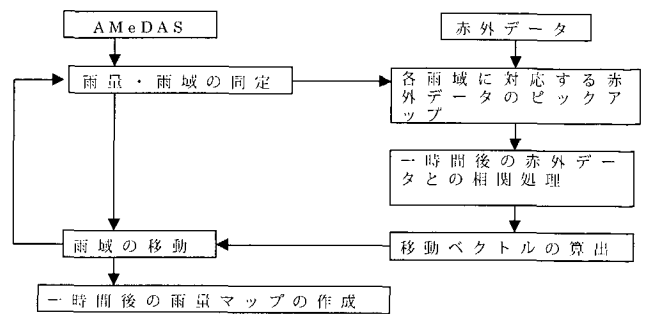


Fig. 1 Flow chart of our algorithm for this analysis.

クセルを中心とした赤外画像を、東、西、南、北方向にずらしながら、一時間後の赤外画像との2次元相関係数を順次、算出する。そして、その相関係数が最大値を示した移動ピクセル数により、移動方向を決定している。対象としている雲域の大きさにより、移動方向が適切に算出されない場合があるため、雲域全体が含まれるよう0.7度、1.45度、2.2度の各大きさに相当する赤外画像について、上記の2次元相関処理を行い、その相関係数が最も大きな値を示す移動ピクセル数を移動ベクトルとしている。以上の処理をレーダアメダスによる各降雨ピクセル全てにおいて行い、各雨域の移動方向を得る。このようにして得られた移動ベクトルを元に、レーダアメダスの各雨域の移動を行う。雨域の移動は、赤外画像データにより算出された雲上部の移動速度に比べて遅く、米国のレーダ観測網によって算出された移動速度と赤外画像からの算出速度には、緯度によりその大きさは異なるものの、6割程度の差が生じる。そのため、算出された移動速度の0.6倍を用いている。

以上のようにして、1時間後の雨量マップの推定が行われ、次の雨量が得られる6時間後まで計5回の内挿を順次行う。そのため、次第にエラーが大きくなっていくが、この内挿を、時間的に逆方向に、即ち、6時間後のレーダアメダス画像を、算出された移動ベクトルを逆方向に用いて、雨域の移動を行い、順方向及び逆方向の算術平均を行って、4時間後、5時間後のエラーを低減させている。そして、最後に、隣接するセル同士、一つのセルにおける±1時間で移動平均を行い、雨量の調整を行っている。

このようにして作成した日本付近の1時間毎の雨量マップを、1時間毎のレーダアメダス及び、6時間毎に間引いたレーダアメダスのみからの一日雨量マップと相関係数及び相対誤差において比較し、本手法の有効性を検証する。

3. 結果と議論

本研究では、6時間毎に雨量が得られると仮定しており、その雨量が得られる間の時間における雨量を赤外画像データを用いて補間を行い、レーダアメダスデータと比較する。Fig. 2に示すのは2000年11月20日0時(JST)の

^{*} <http://lake.nascom.nasa.gov/data/dataset/TRMM/index.html>

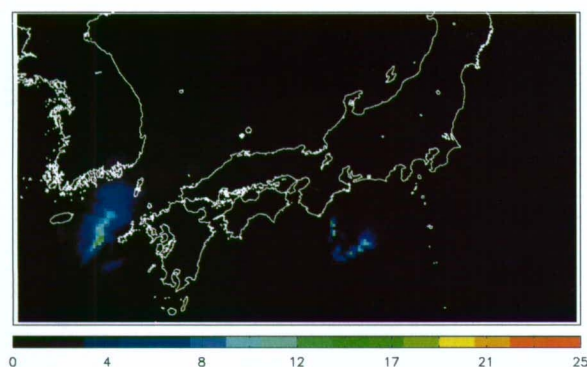


Fig. 2 Precipitation distribution at 0:00 (JST) 11/20, 2000, observed by Radar AMeDAS in mm/h units.

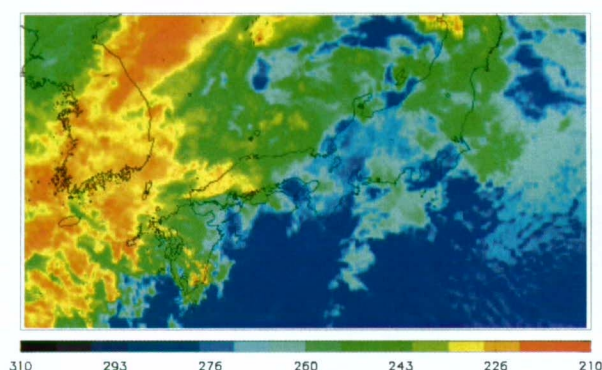


Fig. 3 IR image at the same time as in Fig. 2 in Kelvin units.

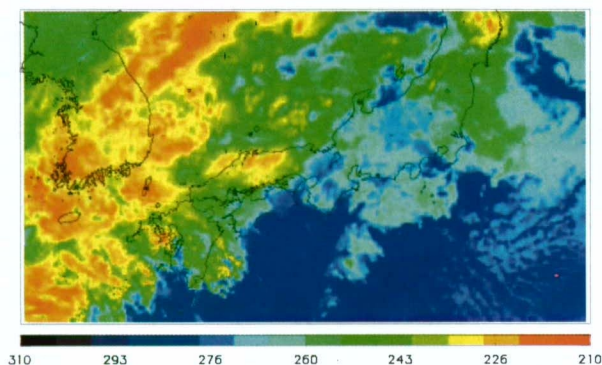


Fig. 4 IR image one hour after from the time in Fig. 3 in Kelvin units.

レーダアメダスによる日本付近の雨量マップであり、同時刻における雲赤外画像データを Fig. 3 に示す。輝度温度の低い領域に対応して雨域が存在する傾向が認められるが、その対応は明瞭ではなく、GPI (Global Precipitation Index)¹⁾や TMPI などの単純な輝度温度・雨量変換のアプローチが大きな誤差を伴うことが容易に見て取れる。さらに一時間後の雲赤外データを Fig. 4 に示す。日本付近を覆う大きな輝度温度のパターンはあまり変化していないが、より

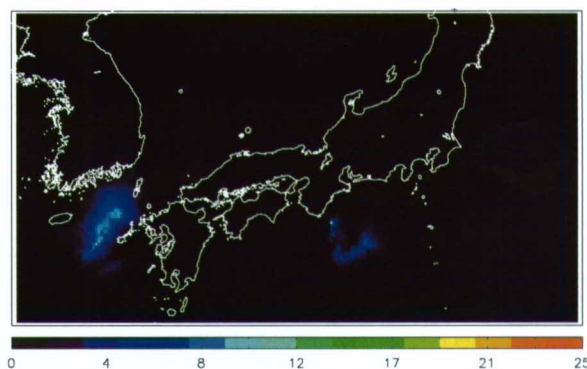


Fig. 5 Predicted precipitation map one hour after in Fig. 2. The unit is mm/h.

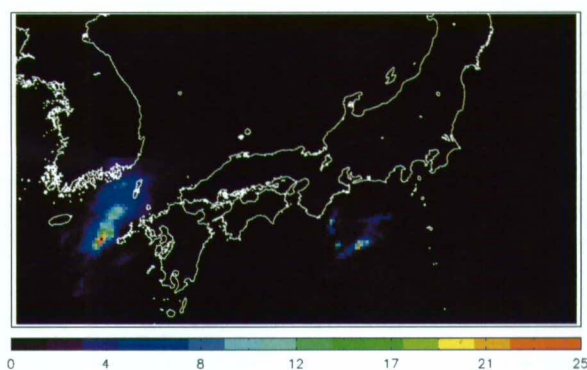


Fig. 6 Observed 'true' precipitation distribution one hour after in Fig. 2. The unit is mm/h.

細かなスケールにおける輝度温度のパターンは、変化しており、この変化分を2次元相関処理を施すことにより、移動ベクトルとして得ている。この両画像から移動ベクトルを算出し、上記アルゴリズムによって生成した一時間後の推定雨量マップを Fig. 5 に、実際に観測されたレーダアメダス合成図を Fig. 6 に示す。Fig. 5 と Fig. 2 の比較において、例えば、対馬付近において、この降雨システムの形状及び雨量が変化していることが示されている。その変化は顕著ではないものの、北東方向へ数ピクセルほど雨域が広がる傾向にあること、降雨量そのものの変化はあまりないことが示されている。一方、Fig. 6 の同地方においては、同様に移動が認められるものの、その絶対値である雨量そのものは、顕著な増加が認められる。この移動ベクトルによる手法では、雨域の移動に伴う変化はある程度表現可能であると考えられるが、一方、雨域の発達や衰退に関しては、本手法で表現するのは難しい。また、この両図の雨量の相関係数は、0.84 であり、標準偏差は約 0.3 mm/h である。これは、一時間のスケールを設定した場合、雲の移動を追うことによる雨量の補間が、偏差 0. 数 mm/h 程度の誤差において可能であることを示している。

本研究では、6 時間毎に雨量が得られると仮定しており、上記の処理を繰り返す行うため、時間が経過するに従い、

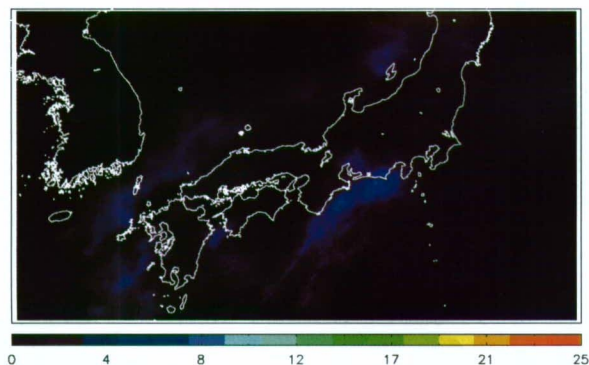


Fig. 7 The precipitation distribution predicted by the moving vector technique. The distribution is for one day in mm/h units.

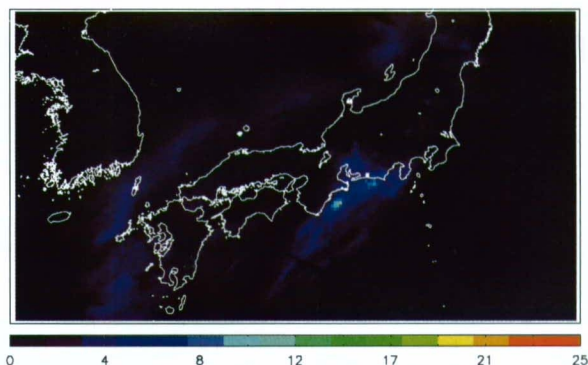


Fig. 8 Observed true precipitation distribution on the same day as in Fig. 7. The unit is mm/h.

相関係数は低くなり、逆方向の内挿により 6 時間後に向けて、再び相関係数は大きくなる。始めの一時間が最も相関係数が大きく（相関係数 0.84）、次第に相関が悪くなる傾向（2 時間後は相関係数 0.67）があるが、4 時間後には再び大きくなる（相関係数 0.69）。これは、6 時間後の雨量が得られた後、時間を遡って同様な移動ベクトルによる内挿を行っているためで、最も相関係数が低いのは、この雨量が得られる時間間隔の中間である 3 時間後となる。

さらに、これらの処理を繰り返し行うことにより、一日の平均雨量マップを作成した図を Fig. 7 に示す。また、レーダアメダスによる雨量マップを Fig. 8 に示す。両図の相関係数は 0.91 である。本研究では、数時間程度のサンプリング間隔のマイクロ放射計データを静止衛星の赤外画像データを用いて内挿する手法の有効性の検証を目的としているため、マイクロ放射計データのみを用いた一日の雨量マップあるいは、各グリッドにおける 6 時間毎の雨量を一時間毎に線形内挿を行った雨量マップに比べてその推定精度が同等若しくは良くなければならない。6 時間毎に間引いて作成した一日雨量マップと赤外画像データを用いて内挿した雨量マップとのレーダアメダスに対する RMS 相対誤差の差は、約 37% で、赤外画像データを用いた方が優れていた。この差は、日本付近に比較的多く雨域の出現した、2000 年 9 月 11 日、2000 年 8 月 4 日のいずれの場合においてはそれぞれ、23%、10% となっており、本手法は赤外画像データによる補間を行わない場合に比べて十数から数十%程度有効であることを示している。

4. まとめと結論

本論文では、より高精度、高分解能の降水マップを作成するため、IR データから算出される雲移動ベクトル利用して、サンプリング間隔が数時間存在するマイクロ放射計データを補間する手法の検討を、日本付近の一時間、0.1 度グリッドのレーダアメダスデータを用いて行った。3 日間のケースについて解析を行ったその結果、移動ベクトルを用いて雨量補間を行った方が、平均約 20% 前後、一日

ベースで雨量の推定精度が良いことがわかった。しかし、雨域の発達、衰退などの効果の補正は、今後の検討課題である。

謝辞：本研究は、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業、水の循環系モデリングと利用システム「衛星による高精度高分解能全球降水マップの作成」の助成を受けて成されたものであり、ここに謝意を表します。また、本研究を行うにあたり、貴重な議論を賜った情報通信研究機構 井口俊夫氏、高橋暢宏氏、気象研究所 青梨和正氏をはじめとする「衛星による高精度高分解能全球降水マップの作成」研究チームの方々に、感謝いたします。

参考文献

- 1) Adler, R., G. Huffman, and P. Keehn : Global tropical rain estimates from microwave-adjusted geosynchronous IR data, *Remote Sensing Rev.*, 11, 125-152, 1994.
- 2) Huffman, G., R. Adler, M. Morrissey, D. Bolvin, S. Curtis, R. Joyce, B. McGavock, and J. Sussind : Global precipitation at one-degree daily resolution from multisatellite observations, *J. Hydrometeorol.*, 2, 1, 36-50, 2001.

[著者紹介]

●牛尾 知雄 (ウシオ トモオ)

所属：大阪府立大学大学院工学研究科航空宇宙工学分野。
 1969年8月生。'93年大阪大学工学部電気工学科卒。'95年同大学大学院博士前期課程修了。'98年同大学院博士後期課程修了(工学博士)。同年アメリカ航空宇宙局(NASA)マーシャル宇宙飛行センター Global Hydrology and Climate Center USRA 研究員。2000年大阪府立大学大学院工学研究科航空宇宙工学分野助手。電波リモートセンシング、地球環境計測などの研究に従事。気象学会、日本リモートセンシング学会、大気電気学会、電気学会、電子情報通信学会、IEEE、AGU 会員。
 E-mail : ushio@aero.osakafu-u.ac.jp

●岡本 謙一 (オカモト ケンイチ)

所属：大阪府立大学大学院工学研究科航空宇宙工学分野。
 1946年2月生。1968年東京大学教養学部基礎科学科卒。1973年同大学大学院理学系研究科相関理化学専攻博士課程卒。1973年郵政省電波研究所(現 情報通信研究機構)入所。1993年同地球環境計測部長、1999年同総合研究官、2000年同退職。同年大阪府立大学大学院工学研究科航空宇宙工学分野教授。地球環境の電波リモートセンシングの研究に従事。IEEE GRS Society 会員、電子情報通信学会会員、日本リモートセンシング学会会員、日本気象学会会員。1990年日本リモートセンシング学会論文賞、1993年日本気象学会堀内基金奨励賞、1994年日本リモートセンシング学会優秀論文発表賞、1995年郵政大臣表彰、1998年前島賞、2002年武田賞。
 E-mail : okamoto@aero.osakafu-u.ac.jp

●井上 豊志郎 (イノウエ トシロウ)

所属：気象庁気象研究所気象衛星・観測システム研究部。
 気象衛星データ(特に分割窓領域(Split Window))からの雲パラメータや気象要素抽出法の開発、気象衛星データを用いた気候や熱帯気象・モンスーンなどの研究に従事。日本気象学会、日本リモートセンシング学会、アメリカ気象学会会員。理学博士。

●重 尚一 (シゲ ショウイチ)

所属：大阪府立大学大学院工学研究科航空宇宙工学分野。
 2001年京都大学大学院理学研究科博士後期課程修了。博士(理学)。1999~2001年日本学術振興会特別研究員、2001年~2004年宇宙開発事業団(現 宇宙航空研究開発機構)招聘研究員。2004年より大阪府立大学大学院工学研究科航空宇宙工学分野助手。熱帯降雨観測衛星(TRMM)搭載降雨レーダ(PR)の潜熱加熱アルゴリズム開発に従事する。日本気象学会、米国気象学会、米国地球物理学連合、日本リモートセンシング学会。
 E-mail : shige@aero.osakafu-u.ac.jp

●橋爪 寛 (ハシヅメ ヒロシ)

所属：科学技術振興機構(JST)。
 '96年金沢大学工学部機械システム工学科卒業。'98年北海道大学大学院地球環境科学研究科修士課程修了。'01年同大学大学院博士課程修了(博士(地球環境科学))。'01年~'03年米国NASAジェット推進研究所客員研究員。現職、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業研究員。衛星リモートセンシングデータを用いた、大気と海洋の様々な時間空間スケールの物理現象の解明に関する研究に従事。現在は、衛星搭載マイクロ波放射計を用いた降雨推定に関する研究を行う。所属学会：日本気象学会、米国気象学会。
 E-mail : zume@aero.osakafu-u.ac.jp

●飯田 泰久 (イイダ ヤスヒサ)

所属：大阪府立大学大学院工学研究科航空宇宙工学分野。
 1979年3月生。'02年大阪府立大学工学部航空宇宙工学科中退(飛び級)、'04年同大学大学院工学研究科航空宇宙工学分野博士前期課程修了、現在同大学大学院博士後期課程在学。人工衛星による降雨観測のためのサンプリングシミュレーションの研究に従事。日本気象学会会員。
 E-mail : iida@aero.osakafu-u.ac.jp