

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2009

課題番号：19540463

研究課題名（和文）2スケールモデルを用いた雨滴粒径分布パラメータの推定

研究課題名（英文）Estimation of raindrop size distribution parameter using 2-scale model

研究代表者

古津 年章 (KOZU TOSHIAKI)

島根大学・総合理工学部・教授

研究者番号：00314617

研究成果の概要（和文）：レーダによる降雨リモートセンシングにおいて、雨滴粒径分布（DSD）のモデル化とそのパラメータ推定は、精度向上に重要である。これまで行われてきたモデル化と降雨強度推定アルゴリズムの経緯を踏まえ、DSDの2スケールモデル化を提案した。DSDパラメータの時系列データを解析する手法を開発し、世界各地における実測の雨滴粒径分布データを統計解析して、その特性を明らかにした。また衛星搭載レーダのデータ解析から、地球規模でDSDパラメータ推定が可能であることを示した。さらに2周波大気レーダによる高度方向のDSDパラメータプロファイル推定アルゴリズムを開発した。

研究成果の概要（英文）：The modeling and its parameter estimation of raindrop size distribution (DSD) are important for the accuracy improvement in radar remote sensing of rainfall. Based on past studies on DSD modeling and radar rainfall estimation algorithms, the concept of “2-scale” DSD model was proposed. A new method for the DSD parameter estimation was developed. This method was applied to several locations in the world and statistical properties of DSD parameters were elucidated. In addition, it was confirmed that DSD parameters can be estimated from spaceborne radar measurements. A dual-frequency atmospheric radar algorithm was developed to estimate vertical profile of DSD.

交付決定額

（金額単位：円）

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2007年度 | 1,100,000 | 330,000 | 1,430,000 |
| 2008年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 2009年度 | 1,200,000 | 360,000 | 1,560,000 |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 総計     | 3,300,000 | 990,000 | 4,290,000 |

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・気象学

キーワード：気象，リモートセンシング，降雨レーダ，雨滴粒径分布

## 1. 研究開始当初の背景

雨滴粒径分布（DSD）は、単位体積中に含まれる雨滴の直径に関する密度分布を表すものであり、レーダや放射計を用いた降雨の

リモートセンシングでは、極めて重要な情報である。これは、レーダや放射計で測定されるレーダ反射因子（ $Z$ ）や輝度温度と降雨強度（ $R$ ）の関係がDSDによって変化するため、

測定量から  $R$  を推定するための関係式を変化させるためである。特に  $Z$ - $R$  関係 (通常  $Z = aR^b$ ;  $a$  及び  $b$  はそれぞれ  $Z$ - $R$  関係の係数と指数) は  $DSD$  に対して大きく変化するため、レーダ気象学の創成期から、 $DSD$  や  $Z$ - $R$  関係の情報をすることは重要な問題であった。 $Z$  や  $R$  のみならず、気象学やマイクロ波通信などで用いられる体積含水量や降雨減衰係数などの降雨パラメータは、一般に積分降雨パラメータ (Integral Rainfall Parameter; IRP) と呼ばれる。IRP 間の統計的關係 (以下“IRP 関係”) は、実用的にも、一種の  $DSD$  を表すパラメータとしても非常に重要である。

そのため、これまで  $DSD$  パラメータを、降雨のマクロ特性 (層状性・対流性の区分け、降雨構造、時間変動特性など通常のレーダ観測で観測可能な特性) と関係付け、 $DSD$  のマクロ特性依存性を考慮したモデル化を行う試みがなされてきた。しかし、このなかで“マクロ”の定義、すなわちどのような時間、空間スケールで IRP 関係を求めればよいか、ということが常に問題となってきた。マクロ的に降雨特性が一定ということは、統計的に定常な状態と考えられる。この定常な状態が、従来は主観的に定義されてきたのである。

## 2. 研究の目的

本研究では、上に述べたような  $DSD$  パラメータや IRP 関係の変動を、確率モデルを使った解析を通して、グローバルに明らかにすることを目的とする。 $DSD$  パラメータを、時間的に速いスケールのランダム変動と降雨イベント毎のステップ状の変動に分離できることが様々な研究で示唆されている。これを一般化して、 $DSD$  パラメータを非定常な確率過程と考える。ただし、非定常性は時空間で時々ステップ的に生じる、言い換えれば時空間で“2スケール”の変動をする確率過程とモデル化する。それをもとに、 $DSD$  パラメータや IRP 関係の変動を推定する手法を開発する。開発されたアルゴリズムをもとに  $DSD$  パラメータなどの統計的特性を求める。また、2スケール  $DSD$  モデルを衛星搭載レーダ観測に適用し、地球規模での  $DSD$  パラメータ推定を試みる。これらの結果は、以下のような応用に対して有効であるものとする。(1) 衛星からの降雨リモートセンシングにおける適切な IRP 関係およびその統計的性質の提供、そして(2)  $DSD$  を生み出す雲物理過程の Climatology の明確化、である。

## 3. 研究の方法

### (1) $DSD$ のモデル化

衛星搭載降雨レーダへの応用を念頭に、2スケールの雨滴粒径分布モデルを構築する。従来、熱帯降雨観測衛星 (TRMM) 搭載降雨レーダ (PR) のために、類似の  $DSD$  モデルが採用されていたが、それを整理・一般化して、論文化する。

### (2) TRMM 搭載降雨レーダ (PR) による $DSD$ パラメータ推定の試み

PR による雨滴粒径分布推定は、これまで PR 降雨強度推定アルゴリズムのなかで実効的に行われてきた。今回の研究では、推定結果にどの程度の妥当性があるのかを、様々な観点から調べ、PR による  $DSD$  パラメータ推定の可能性を評価することを目指す。

### (3) $DSD$ モデルパラメータの推定アルゴリズムの開発

$DSD$  パラメータや IRP 関係のステップ状変化を自動検出し、定常性の保たれる範囲で 2スケール  $DSD$  モデルパラメータを推定するアルゴリズムを開発する。

### (4) 世界各地の $DSD$ パラメータ統計の導出

(3)で述べたアルゴリズムを用いて、世界各地の 2スケール  $DSD$  パラメータや IRP 関係を求め、それらの統計的特性を明らかにする。

### (5) 2周波大気観測レーダによる $DSD$ パラメータ導出の試み

真上方向を観測する 2周波大気レーダデータから  $DSD$  プロファイルを推定するアルゴリズムを開発する。それを用いて、 $DSD$  パラメータの高度プロファイル特性を調べ、幅広い高度範囲における 2スケール  $DSD$  モデルの妥当性を検討する。

## 4. 研究成果

### (1) $DSD$ のモデル化

$DSD$  は一般に3つのパラメータを持つガンマ分布でモデル化される。これら3つのパラメータのうち、形状パラメータ ( $\mu$ ) は、実用的には一定値においても差し支えないと言われている。この場合、 $DSD$  は2つの自由パラメータを持つガンマ分布で表現できる。2スケール  $DSD$  モデルは、これら2つのパラメータのうちのひとつが時空間で速く変動し、もうひとつはマクロな降雨特性が一定の時空間では変化せず、時々ステップ状の変化をする、というモデルである。その拡張として、ある時空間において、対数スケールで表した  $Z$  と  $R$  の関係が直線上に変化することも2スケール  $DSD$  モデルとみなすことができる。この場合、傾きと切片という2つの自由度を持つが、それらがマクロな降雨特性が一定の時空間では変わらず、マクロな降雨特性が変わるとともに2次元空間でステップ状に変化するようなモデルである。 $Z$ - $R$  関係がこのような変化を示すことは経験的にも知られている。

以上の考えを元に、ひとつの直線的  $Z$ - $R$  関係の存在を、ある定常状態における  $DSD$  の変化と考え、 $Z$ - $R$  関係をもとに  $DSD$  のモデルを構築した。その結果、 $Z$ - $R$  関係は、通常使われるガンマ  $DSD$  モデルのパラメータ (振幅パラメータ  $N_0$  とスケールパラメータ  $A$ ) と降雨強度  $R$  との関係として定式化された。この  $Z$ - $R$  関係を元にした  $DSD$  モデルを用いる

と、降雨減衰とレーダ反射因子の関係など、他の IRP 関係の推定も精度よく行えることを実測の DSD データを用いて示した。

(2) PR による DSD パラメータ推定の評価

PR で推定される 2 スケール DSD モデルのパラメータとして、Z-R 関係  $Z = aR^b$  の係数  $a$  と次式で関係付けられる  $\varepsilon$  がある。

$$a = 1672x^2 - 851.8x + 184.2 \quad (1)$$

ここで  $x = \log_{10}\varepsilon$  である。世界各地のディストロメータデータで求められた  $a$  と、PR で推定された  $a$  の比較は良好であり、その他、日周変化、降雨頂高度や発雷数と  $\varepsilon$  の関係などからも、PR で推定される DSD パラメータが妥当であることが示された。それをもとに、1998 年から 2007 年までの 10 年間のデータを用いて、地球規模の  $\varepsilon$  分布を求めた。その結果を図 1 に示す。ここで、小さい  $\varepsilon$  (青系色) には粒径が大きな DSD が、また大きな  $\varepsilon$  (赤系の色) には粒径が小さな DSD が対応する。このように、衛星搭載レーダによる DSD パラメータ推定は、様々な誤差を含んでおり、特に陸上においては、ある程度“定性的”と考えられるものの、地球規模の DSD マッピングの評価は初めての成果と言える。

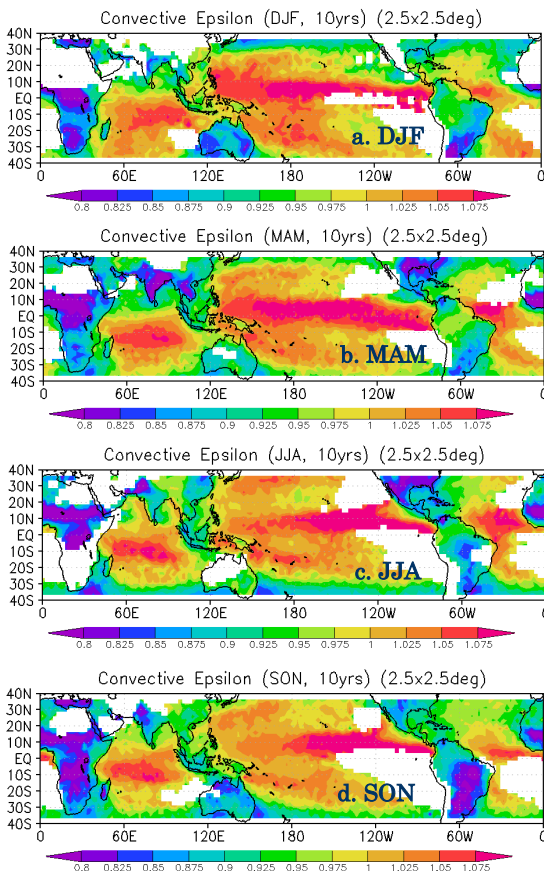


図 1. TRMM 搭載 PR で推定された DSD パラメータ ( $\varepsilon$ ) の統計値 (10 年平均 2.5 度 grid)。

© Copyright 2009, Meteorological Society of Japan (MSJ)

(3) DSD モデルパラメータの推定アルゴリズムの開発

DSD モデルや IRP 関係式パラメータのステップ状変化を自動抽出し、定常性の保たれる範囲で、それらのパラメータを推定するアルゴリズムを、状態空間モデルを用いて開発した。そのブロック図を図 2 に示す。

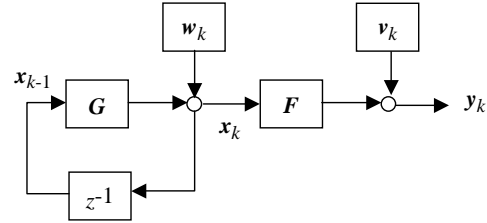


図 2. 状態空間モデルのブロック図。  $x_k$ :  $k$  番目の状態ベクトル (DSD もしくは IRP 関係式パラメータ),  $y_k$ :  $k$  番目の観測ベクトル,  $w_k$ :  $k$  番目の状態推移雑音,  $v_k$ :  $k$  番目の観測誤差,  $F$ : 観測行列,  $G$ : 状態推移行列,  $z^{-1}$ : 1 ステップ遅延演算子。

ここで、 $x_k$  は  $k$  番目の観測における状態ベクトルである。本研究では、 $x$  を 2 スケール DSD パラメータとして推定を行った。1 次元モデルとしては、最近よく使われる規格化 DSD の振幅パラメータ  $N_0^*$  の常用対数の推定を試みた。 $N_0^*$  が大きい DSD では、小さな雨滴が卓越し、 $N_0^*$  が小さな DSD は、大きな雨滴の割合が多い分布である。また 2 次元モデルとしては、 $Z = aR^b$  をデシベル表示して次式とした場合の係数

$$dBZ = a \, dBR + 10b \quad (2)$$

$x = (a, b)^T$  の推定を試みた。また状態推移雑音としては、時々生じるステップ状変化を表現するためガウス分布より裾野の広いコーシー分布を採用した。観測雑音としては通常仮定されるガウス雑音を採用した。1 次元 (DSD パラメータ推定)、2 次元 (Z-R 関係式パラメータ推定) の場合の、状態空間モデルの表現を表 1 にまとめる。

表 1. 本研究で採用した 1 次元および 2 次元状態空間モデル

| 項目  | DSD パラメータ推定      | IRP 関係式パラメータ推定        |
|-----|------------------|-----------------------|
| $x$ | $\log_{10}N_0^*$ | $(a, b)^T$ (see Eq.2) |
| $y$ | $Fx + v$         | $dBZ = Fx + v$        |
| $w$ | 1 次元コーシー分布       | 2 次元コーシー分布            |
| $v$ | 1 次元ガウス分布        | 同左                    |
| $G$ | 1                | 2 次元単位行列              |
| $F$ | 1                | $(dBR, 1)$            |

このような状態空間モデルをもとに、逐次にベイズ推定を行うプログラムを作成し、テストデータを用いて、予測、ろ波、平滑化の3種類の最尤推定を行った。その結果、平滑化推定値が最も精度がよいことがわかり、以後実際のデータを用いる場合でも平滑化最尤推定を行うこととした。

(4) 世界各地の DSD パラメータ統計の導出

1 次元状態空間モデルを用いて、世界各地（インド、スマトラ、シンガポール、日本（鹿嶋）、パラオ）の雨滴粒径分布データを解析した。パラメータ推定の例を、図 3 (a) に示す。比較のため、状態推移雑音としてガウス分布を用いた場合の結果を図 3 (b) に示すが、コーシー分布の方が、ステップ状に変化する現象を適切に推定できることがわかる。なお、図中に示した  $c$  および  $\sigma_w$  は、それぞれコーシー分布のスケールパラメータおよびガウス分布の標準偏差である。

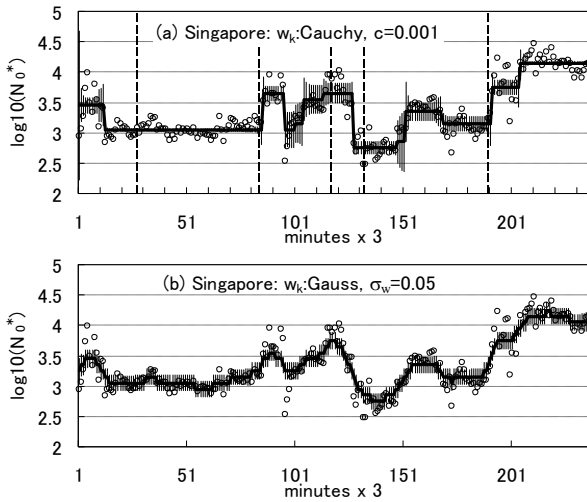


図 3. シンガポールで観測された DSD から直接計算した  $\log_{10}N_0^*$  (白丸), ならびに平滑化最尤推定値 (実線) と推定精度 (縦棒). (a) および (b) は、それぞれ状態推移雑音としてコーシー分布, ガウス分布を用いた場合. (a) 中の縦破線は降雨イベントの区切りを示す.

© Copyright 2009, American Meteorological Society

次に各地での推定結果を統計処理し、 $\log_{10}N_0^*$  のヒストグラムを求めた。その結果を図 4 に示す。この結果から、各地の  $N_0^*$  は、海洋性の土地であるパラオ以外ではほぼ類似していること、これまで典型的な DSD における  $N_0^*$  と考えられてきた JT, MP, JD 分布における値の間に概ね分布していることがわかる。なお、簡便な方法として降雨イベント毎に  $N_0^*$  を推定した場合と比較すると、今回の方法によりイベント内のステップ状変化も検知した場合の方が、極端に大きなあるいは小さな  $N_0^*$  がなくなり、JT 分布と JD 分布における  $N_0^*$  の間にまとまる傾向が見られた。

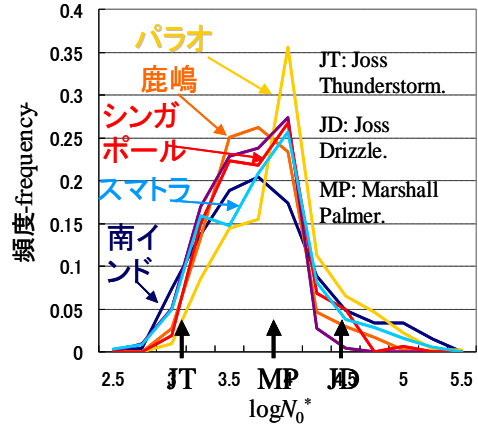


図 4. 世界各地の  $\log_{10}N_0^*$  のヒストグラム. 観測期間は、各地で異なるが 1~3 年間. JT, MP, JD は、それぞれ粒径が大きな DSD, 標準的、粒径が小さな DSD の典型的な値.

2 次元状態空間モデルによる Z-R 関係パラメータ自動推定については、プログラムを開発し、シンガポールの雨滴粒径分布データを用いて、妥当な推定が行えることを確認した。その結果の例を図 5 に示す。しかし、切片  $b$  に比べて、傾き  $a$  の推定精度が良かった。この改善については更に検討が必要である。

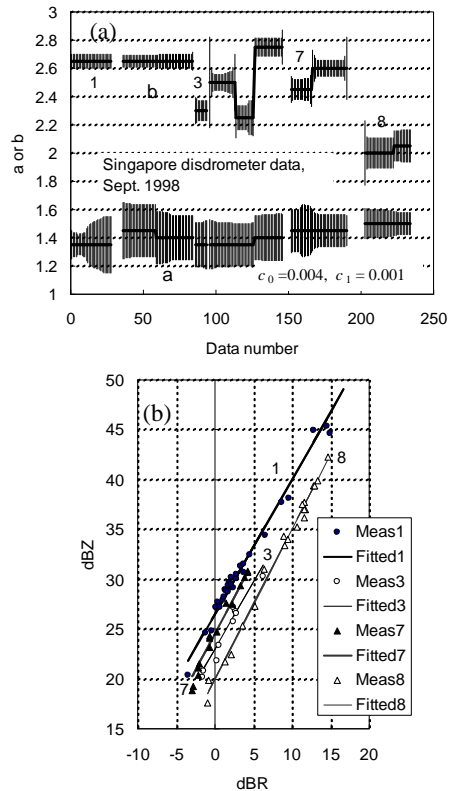


図 5. (a) 約 700 分間の dBZ と dBR から Z-R 関係パラメータ (a,b) を推定した結果の例. (b) (a) のいくつかの時間スロットでの観測値 (Meas) およびそれらの平滑化推定 (a,b) による Fitting 結果 (Fitted).

#### (5) 2周波大気観測レーダによる DSD 推定

DSD パラメータ鉛直プロファイルを精度よく推定するために、スマトラ島に設置された大気観測レーダデータを用いたアルゴリズムを開発した。鉛直方向に大気が静止していれば、真上を指向したドップラレーダにより測定された雨粒からの反射スペクトルの解析によって DSD を推定できる。しかし実際は、鉛直方向の大気の動きがあり、大気の屈折率の乱れからの反射と雨粒からの反射のドップラスペクトルを分離して同時に測定できるシステムが必要である。

従来主に VHF 帯の大気レーダによってこれらを測定し、DSD の推定が行われてきた。しかし VHF レーダは、大気に比べて雨粒に対する感度が低いという欠点があった。そのため本研究では、近接して設置された 1GHz 帯大気レーダと VHF 大気レーダを両方使う方法を採用した。これによって、前者を用いて感度よく雨粒からの反射を受信し、一方後者を用いて感度よく大気からの反射を受信するという両者の長所を兼ね備えたアルゴリズムを構成することができた。

本研究では、DSD モデルとしてガンマ分布を仮定し、その3つのパラメータを推定するパラメトリックな手法を用いたプログラムを開発し、いくつかの降雨イベントについて、その推定結果の妥当性を確認した。

以上、本研究により得られた成果は次のようにまとめられる。

- ・これまでレーダによる降雨強度推定に用いられてきた DSD モデルの概念を“2スケール”モデルとしてまとめた。特に、Z-R 関係を基礎にした DSD モデルの有効性を示した。
- ・TRMM 衛星搭載降雨レーダにより、地球規模の DSD パラメータ推定がある程度可能であることを新たに確認した。
- ・状態空間モデルを、2スケール DSD パラメータ推定に新たに適用し、そのアルゴリズムを開発した。
- ・状態空間モデルを用いて、世界各地の DSD パラメータの統計的特性を明らかにした。
- ・2周波大気レーダを用いて DSD 高度プロファイルを推定するアルゴリズムを開発し、いくつかの降雨イベントで、その推定結果の妥当性を確認した。

#### 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)

[雑誌論文] (計 5 件)

① Kozu, T., K. Masuzawa, T. Shimomai, and N. Kashiwagi, Estimation of  $N_0^*$  for 2-scale gamma raindrop size distribution model and their statistical properties at several locations in Asia, J.

Appl. Meteor. Climatol., 49, 印刷中, 査読有.

② Kozu, T., T. Iguchi, T. Kubota, N. Yoshida, S. Seto, J. Kwiatkowski, and Y. N. Takayabu, Feasibility of raindrop size distribution parameter estimation with TRMM Precipitation Radar, J. Meteor. Soc. Japan, 87A, 53-66, (2009), 査読有.

③ Kozu, T., T. Iguchi, T. Shimomai, and N. Kashiwagi, Raindrop size distribution modeling from a statistical rain parameter relation and its application to the TRMM Precipitation Radar rain retrieval algorithm, J. Appl. Meteor. Climatol., 48, 716-724, (2009), 査読有.

[学会発表] (計 10 件)

① 古津 年章, 柏木 宣久, 状態空間モデルを用いた降雨パラメータ関係式の自動推定, 日本リモートセンシング学会第 47 回学術講演会, A21, 2009 年 11 月 27 日, 名古屋市.

② Vonnisa, M., T. Kozu, T. Shimomai, and H. Hashiguchi, Estimation of Raindrop Size Distribution Using Equatorial Atmosphere Radar and Boundary Layer Radar, 第 3 回赤道大気レーダーシンポジウム, 2009 年 9 月 10 日, 京都大学生存圏研究所, 宇治市.

③ 古津 年章, 柏木 宣久, 増澤 和浩, 下舞 豊志, 2スケール雨滴粒径分布モデルパラメータの自動推定, 2009 年電子情報通信学会総合大会, B-1-38, 2009 年 3 月 19 日, 松山市.

④ 古津 年章, 井口 俊夫, 久保田 拓志, 高薮 縁, 瀬戸 心太, TRMM 降雨レーダによる地球規模の雨滴粒径分布マッピング, 日本気象学会 2008 年度春季大会, TRMM 専門分科会 B164, 2008 年 5 月 18 日, 横浜市.

⑤ 古津 年章, 柏木 宣久, 井口 俊夫, 2スケールモデルによる雨滴粒径分布特性解析, 電子情報通信学会 2007 年ソサエティ大会, B-1-27, 2007 年 9 月 11 日, 鳥取市.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

古津 年章 (KOZU TOSHIAKI)

島根大学・総合理工学部・教授

研究者番号: 00314617

##### (2) 研究分担者

柏木 宣久 (KASHIAWAGI NOBUHISA)

統計数理研究所・データ科学研究系・教授

研究者番号: 50150032

下舞 豊志 (SHIMOMAI TOYOSHI)

島根大学・総合理工学部・助教

研究者番号: 30325039

##### (3) 連携研究者

井口 俊夫 (IGUCHI TOSHIO)

(独) 情報通信研究機構・電磁波計測研究センター・研究センター長

研究者番号: 20358980