

stations), そして経度方向に complementary stations を展開するという計画となっている。

第1表に見られるように、ライダーはオゾン、気温、エアロゾル鉛直分布の測定を担当しており、NDSC の中心的な測器の一つである。ライダーによって、エアロゾルの鉛直分布、高度 35 km 以上のオゾンと気温の鉛直分布、対流圏オゾンの短時間変動など他の手法による観測の困難なデータが長期にわたって得られる予定である。

日本におけるライダー観測は非常に盛んであり、気

象研と環境研でオゾン、気温、エアロゾルを観測している他、日本の10以上の大学・研究機関でエアロゾル等の観測が行われている。ライダー以外の観測については、可視/紫外分光(名大 STE 研, 東大), 赤外分光(気象研, 東大), 赤外ヘテロダイン分光(東北大), マイクロ波(通信総研, 名大)等で研究が進められており、これらのポテンシャルを生かして共同観測を進めるならば、NDSC で行われるような成層圏のモニタリング、プロセス研究の両面で、これまでにない成果が得られると思われる。

501 (雲物理; 航空機観測; 雲粒子; 降水粒子)

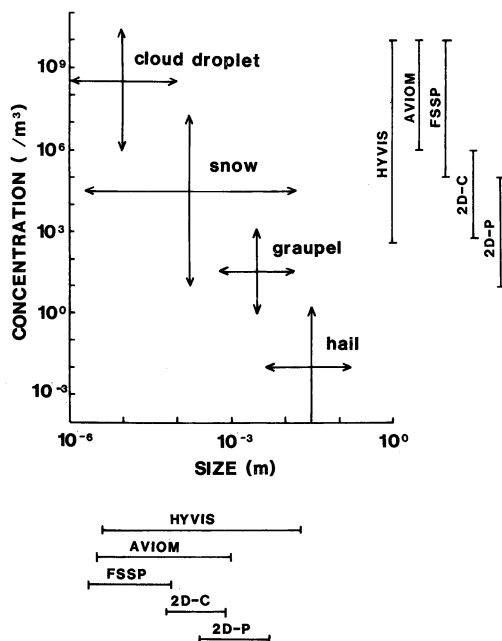
## 6. 航空機及びゾンデによる雲粒子・降水粒子の直接観測\*

村上正隆\*\*

### 1. はじめに

雲の微物理構造の把握は、気流構造の把握とともに、降水の短時間予報の精度向上や更には降水の人工調節法の確立の基礎となる降水機構の解明には必要不可欠である。一方、気候変動に影響を及ぼす雲の放射特性の解明という観点からも、雲の微物理構造が重要視されている。雲の中を見たいというの長い間、気象学者(雲物理学者)の夢であった。最初は、雲のかかる高い山に登って観測し、次第に航空機による観測が行われるようになってきた。航空機観測も最初のころは、オイルを塗ったスライドガラスを機外に露出して雲粒子を採集し、顕微鏡で観察するという具合で、時間的にも空間的にも変化の激しい雲の構造を調べることは難しかった。航空機観測の威力を十分に引き出せるようになったのは、それまでのスライドガラス方式にかわって、ノーレンバークの考案した測器(総称 PMS プローブ)が登場してからだった。

今更、雲粒子・降水粒子の新しい観測方法でもあるまいと思う方もいるかもしれない。しかし、色々な問題があって、2倍~1/2倍の精度で測定できれば良しと

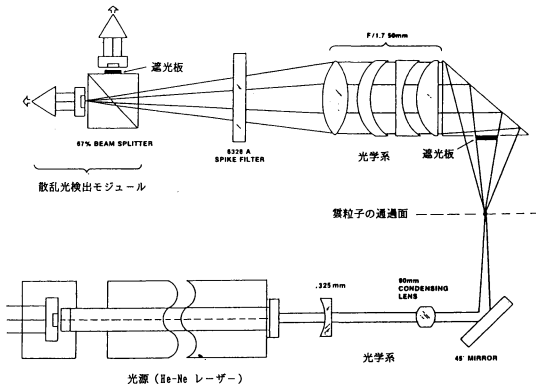


第1図 大気中における雲粒子、降水粒子の粒径及び数濃度の範囲と各測器の測定範囲。

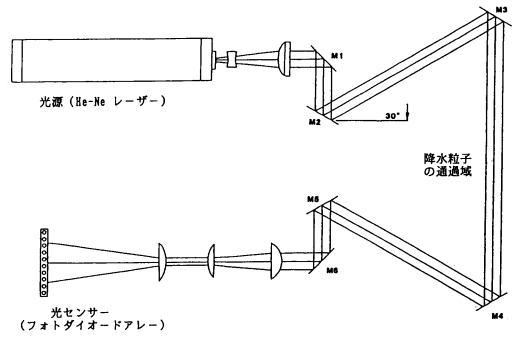
\* Airborne and balloonborne measurements on cloud and precipitation particles.

\*\* Masataka Murakami 気象研究所物理気象研究部。

しなげなければならないのが現状である。第1図に示すように測定の対象となる粒子(エアロゾル粒子と hail を除く)の大きさは  $10^{-6}$  m から  $10^{-1}$  m, その空間濃度

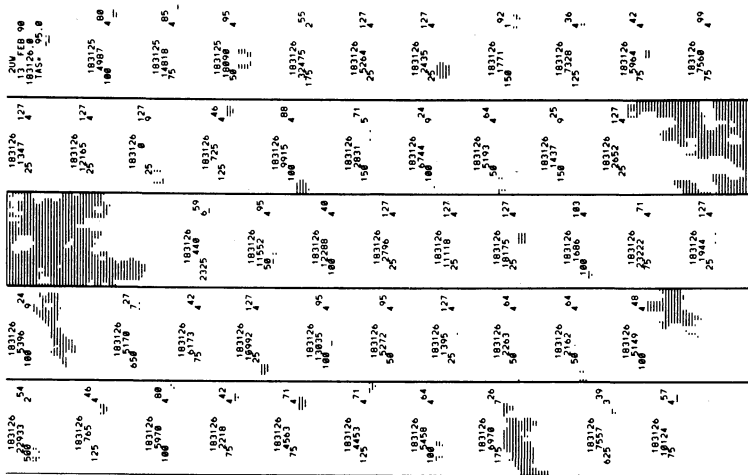


第2図 FSSP の測定原理。(Knollenberg, 1981 の図を改作)

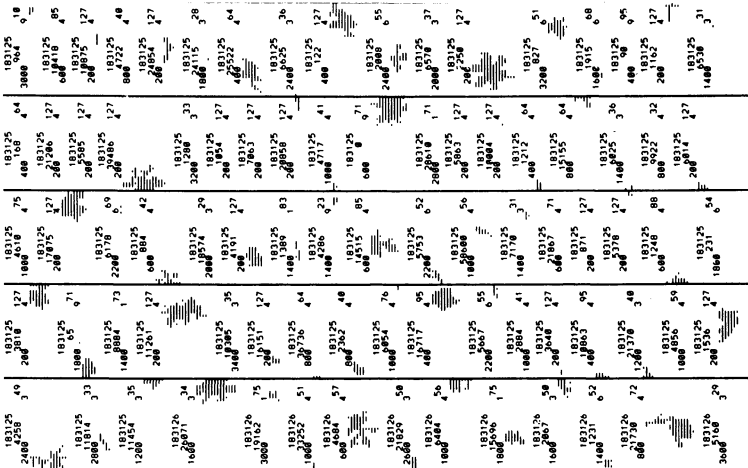


第3図 2D-P プローブの測定原理。(Knollenberg, 1981 の図を改作)

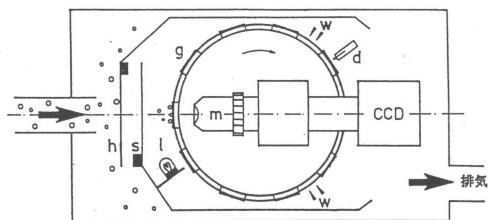
2D-C



2D-P



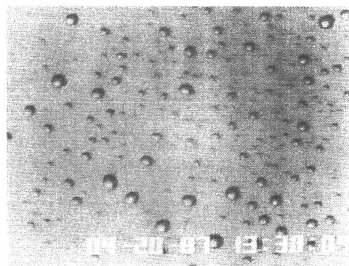
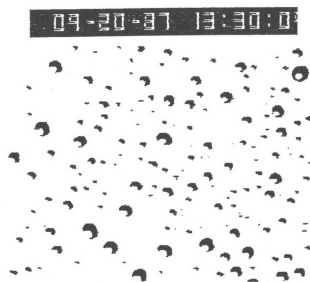
第4図 2D-C, 2D-P プローブによる粒子像の例。



第5図 AVIOM-Cの測定原理. (Tanaka et al., 1989 の図を改作)

は $10^0$ 個/ $m^3$  から $10^{10}$ 個/ $m^3$  と広範囲に渡っており、相も違えば形も違う粒子が自然の雲の中では混在している。ここに挙げた数値からも、限られた数(種類)の測器でこれらの粒子をすべて、正確に測定するのがいかに難しいか想像していただろう。

今回は、十数年前に登場し、現在世界中に広く使われている PMS プロブ (Knollenberg, 1981) と、これらの測器のもつ弱点や航空機観測そのものの制約を克服するために、気象研究所で開発された航空機搭載用雲粒子測定装置 (Airborne Video Optical Micro-



入力ファイル名 ( 1 ) = 87H101.VAL

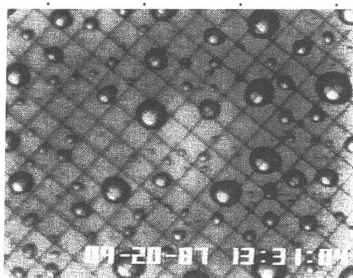
87/10/24 15:42:01

\*\*\*\*\* ヒストグラム \*\*\*\*\* 測定個数 = 104

単位 :  $\mu m$

[最大径]

以上	未満	%	0	10	20	30	40	50	度数
0.000/	5.000:	0.00	.	.	.	.	.	.	0
5.000/	10.000:	0.00	.	.	.	.	.	.	0
10.000/	15.000:	0.00	.	.	.	.	.	.	0
15.000/	20.000:	2.88***	.	.	.	.	.	.	3
20.000/	25.000:	16.35*****	.	.	.	.	.	.	17
25.000/	30.000:	18.27*****	.	.	.	.	.	.	19
30.000/	35.000:	14.42*****	.	.	.	.	.	.	15
35.000/	40.000:	8.65*****	.	.	.	.	.	.	9
40.000/	45.000:	7.69*****	.	.	.	.	.	.	8
45.000/	50.000:	11.54*****	.	.	.	.	.	.	12
50.000/	55.000:	7.69*****	.	.	.	.	.	.	8
55.000/	60.000:	4.81*****	.	.	.	.	.	.	5
60.000/	65.000:	1.92**	.	.	.	.	.	.	2
65.000/	70.000:	2.88***	.	.	.	.	.	.	3
70.000/	75.000:	0.96*	.	.	.	.	.	.	1
75.000/	80.000:	1.92**	.	.	.	.	.	.	2
80.000/	85.000:	0.00	.	.	.	.	.	.	0
85.000/	90.000:	0.00	.	.	.	.	.	.	0
90.000/	95.000:	0.00	.	.	.	.	.	.	0
95.000/	100.000:	0.00	.	.	.	.	.	.	0
100.000/	105.000:	0.00	.	.	.	.	.	.	0
105.000/	110.000:	0.00	.	.	.	.	.	.	0
110.000/	115.000:	0.00	.	.	.	.	.	.	0
115.000/	120.000:	0.00	.	.	.	.	.	.	0
120.000/	125.000:	0.00	.	.	.	.	.	.	0
125.000/	130.000:	0.00	.	.	.	.	.	.	0
130.000/	135.000:	0.00	.	.	.	.	.	.	0
135.000/	140.000:	0.00	.	.	.	.	.	.	0
140.000/	145.000:	0.00	.	.	.	.	.	.	0
145.000/	150.000:	0.00	.	.	.	.	.	.	0
150.000/	155.000:	0.00	.	.	.	.	.	.	0
155.000/	160.000:	0.00	.	.	.	.	.	.	0
160.000/	165.000:	0.00	.	.	.	.	.	.	0
165.000/	170.000:	0.00	.	.	.	.	.	.	0
170.000/	175.000:	0.00	.	.	.	.	.	.	0
175.000/	180.000:	0.00	.	.	.	.	.	.	0
180.000/	185.000:	0.00	.	.	.	.	.	.	0
185.000/	190.000:	0.00	.	.	.	.	.	.	0
190.000/	195.000:	0.00	.	.	.	.	.	.	0
195.000/	200.000:	0.00	.	.	.	.	.	.	0



\*最小\* : 18.8376  
 \*最大\* : 75.3910  
 \*合計\* : 3943.9000  
 \*平均\* : 37.9221  
 \*標準偏差\* : 13.9264

第6図 層積雲中で観測した雲粒のビデオ画像 (右上), 2値化画像 (左上) 及び粒径分布 (左下). 右下の写真はスケールメッシュ付きのガラス面に採用した雲粒 (田中豊顕氏より借用).

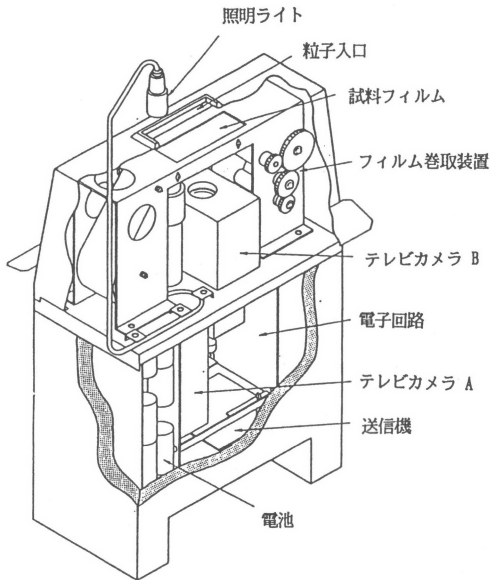
scope for cloud particle measurement ; AVIOM-C) (Tanaka *et al.*, 1989) と雲粒子ゾンデ (Hydrometeor Video Sonde ; HYVIS) (Murakami

and Matsuo, 1990) について紹介する.

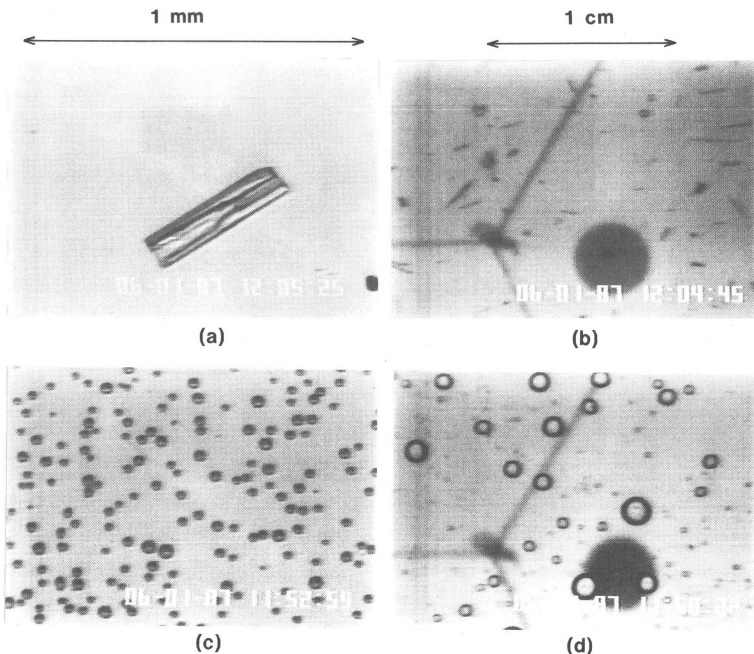
## 2. PMS プロープ

PMS プロープには測定原理の異なる二種類のものがある. 一つは雲粒を測定する装置で, FSSP (Forward Scattering Spectrometer Probe) と呼ばれている. 測定原理は第2図に示すように, レーザー光を雲粒に照射し, 一個一個の雲粒から出てくる前方散乱光の強さと数を測定し, 雲粒の大きさや数濃度に換算するものである. この装置で測定できるものは  $0.5\sim 45\ \mu\text{m}$  の雲粒である.

もう一つは, 氷晶や降水粒子がレーザー光を横切るときにできる影絵を記録するもので, 2-D プロープ (2-Dimensional Optical Array Probe) と呼ばれている. 測定原理は第3図に示すように, レーザー光中を横切る粒子によってできる影を  $25\ \mu\text{m}$  間隔で直線上に並べた32個のフォトダイオードで検出する (最近では64個のフォトダイオードを使用したモデルも登場した). 航空機に相対的な運動をする粒子が  $25\ \mu\text{m}$  移動するのに要する時間間隔 (航空機が  $100\ \text{m/s}$  で飛行している場合,  $0.25\ \mu\text{sec}$ ) で影絵をスライスしてサンプリングし, 後で時空変換して雲粒子・降水粒子の二次元的影絵を再生する装置である. この装置には, 雲粒



第7図 HYVIS の外観図. (Murakami and Matsuo, 1990 の図を改作)



第8図 梅雨前線に伴う層状雲の中で観測したさや状結晶 (a), 針状結晶 (b), 雲粒 (c) と雨滴 (d) の画像 (Murakami and Matsuo, 1990).

子用(2D-Cプローブ)と降水粒子用(2D-Pプローブ)の二つが用意されており、前者は $25\mu\text{m}$ ~ $800\mu\text{m}$ 、後者は $0.2\text{mm}$ ~ $6.4\text{mm}$ の粒子を測定できることになっている。第4図に2D-C, 2D-Pで撮られた粒子イメージの例を示す。2本の平行な横線の間隔はそれぞれ $800\mu\text{m}$ (2D-C)と $6400\mu\text{m}$ (2D-P)で、長さの不規則な縦線(スライスした影絵)の集合として粒子を表現している。影絵のそばの数字は、測定時刻・粒子径等を示す。実用上の粒子の検出限界はそれぞれ、 $100\mu\text{m}$ ,  $0.8\text{mm}$ 程度である。

粒子を自然に浮かんだ状態で測定できることもPMSプローブの特長ではあるが、最大の特長は、そのデータ処理の容易さにある。顕微鏡写真などとは違って、デジタル化された情報がMT等の記憶媒体に収録されるので、大量のデータを比較的短時間に処理することが可能である。

他方、FSSPの欠点は、雲粒と氷晶・雪片を識別できないことである。雲粒と氷晶や雪片が共存するとき、氷晶や雪片から出てくる散乱光も計数し、雲粒濃度を過大評価してしまう。極端な場合には、氷晶と雪片だけで雲粒がない場合でも、かなりの雲粒濃度を示すことがある。従って、氷晶・雪片が共存する場合は、 $0.1\text{g}/\text{m}^3$ 以下の雲粒濃度の議論には注意を要する。

2-Dプローブは、第4図を見てもわかるように $100\mu\text{m}$ 以下の粒子について、雲粒か氷晶かの識別ができないこと、雪粒子のriming(雲粒付き)の程度や微細な結晶形が識別できないという欠点がある。

このようなPMSプローブの欠点を補うために、開発されたのがAVIOM-Cである。

### 3. AVIOM-C

AVIOM-Cの測定原理を第5図に示す。高速気流中で、適当な数の雲粒子をサンプリングできるように、取込み口の直後に2つのシャッター機構を備えている。第1のフードシャッターは第2のサンプリングシャッターを過冷却雲粒による着氷から保護する目的をもっている。フードシャッターが開いている間に、サンプリングシャッターが1/100秒間開き、後方に位置するガラス面上に雲粒子を捕捉する。これらの雲粒子をガラス面の背後から小型ビデオ顕微鏡を用いて機内で観察するとともに、ビデオテープに収録する。雲粒子を捕捉するガラス面は回転ドラム上に10枚配置してあり、雲粒子観察後にワイパーと熱風で表面をきれいにした後、1.4秒間隔で順次露出される。AVIOM-Cの登場に

よって、 $100\mu\text{m}$ 以下の雲粒子と氷晶の識別が可能となった。AVIOM-Cはこれまで、冬季日本海上に発生する雪雲や、太平洋上に発生する層積雲の観測に使用されてきた。第6図に冬季太平洋上に発生する層積雲内で観測した雲粒のビデオ映像、2値化映像及び市販の画像解析装置を用いて求めた粒径分布を示す。

### 4. HYVIS

すでに述べた航空機搭載用のPMSプローブがかかえているいくつかの問題とは別に、航空機観測そのものにもいくつかの制約がある。例えば、飛行の安全性の見地から、積乱雲のような激しい攪乱や、浅い地形性の雲の観測は難しい。又、航空機は水平方向には密な観測が行えるが、鉛直方向は不得意である。更には、高高度に出現する上層雲の観測はごく限られた航空機でしか行えない。このような航空機観測の弱点を補うことと、観測用専用機をもたない日本で簡便に雲の直接観測を行う目的で、雲粒子ゾンデ(HYVIS)が開発された。第7図に示すように、HYVISは倍率の異なる光学系を有する2台の小型ビデオカメラを搭載しており、 $7\mu\text{m}$ の雲粒子から $2\text{cm}$ の降水粒子まで測定可能である。気球によって $5\text{m}/\text{sec}$ で上昇する間にフィルム上に捕捉された粒子を2台のビデオカメラで撮影し、この映像を時分割で地上に電送してくる。フィルム面は撥水処理がしてあり、10秒毎に新しい面が引き出されるようになっている。HYVISによって、地上にいながらにしてリアルタイムで雲の内部の様子を手にとるように観察することができるようになった。Magono and Tazawa (1965)のSnow crystal sondeのように後で回収する必要もない。

通常のレーウィンゾンデをHYVISと一緒に飛揚することで、雲の微物理構造と熱力学構造を同時に測定することができ、雲や降水の形成機構を調べる有力な手段として、種々の雲の観測に使われている。第8図に、HYVISで撮られた雲粒子・降水粒子の画像の例として、梅雨前線に伴う厚い層状雲の中で観測された氷晶(a)、雪結晶(b)、雲粒(c)、雨滴(d)を示す。

### 5. 今後の課題と展望

開発後十数年を経て、現在世界中で広く使用されているPMSプローブでさえ、いまだに問題点や測定値の補正方法に関する論文が掲載されている現実を考えると、誕生して間もないAVIOM-CやHYVISはま

だいくつもの問題点をかかえており、改良を続けていく必要があることは言うまでもないことである。特に、両者に共通した問題としてデータ処理が挙げられる。比較的単純な雲粒の粒径分布はすでに市販の画像解析装置で処理しているが、氷晶や雪片などの複雑な形状の粒子は人間の手作業で処理されているのが現状である。その他にも、AVIOM-Cは着氷対策、HYVISは照明方法の改良等の問題を抱えており、一つ一つ解決していく必要がある。

気象研究所でAVIOM-CやHYVISを開発した後、同様な測器が国内・国外で試作されており、世界中の雲物理学者が共通の認識のもとに新しい測器開発に取り組んでいる。これら新たに開発された直接観測の手法と衛星やドップラーレーダ等の間接観測の手法を有機的に結合した総合観測によって、これまで未解決のまま残されてきた問題が次々と解明される日が近いことを確信している。

#### 参考文献

Knollenberg, R. G., 1981: "Techniques for probing cloud microstructure. CLOUDS-Their formation, optical properties, and effects—". ed., P. V. Hobbs and A. Deepak, Academic Press.

Magno, C. and S. Tazawa, 1966: Design of a "snow crystal sonde". J. Atmos. Sci., **23**, 618-625.

Murakami, M. and T. Matsuo "Development of the hydrometeor video-sonde". J. Atmos. Ocean. Tech., **7**, 1990.

Tanaka, T., T. Matsuo, K. Okada, I. Ichimura, S. Ichikawa and A. Tokuda "An airborne video-microscope for measuring cloud particles". Atmospheric Research, **24**, 1989.

#### コメント

上田 博 (北大理)

遊馬 (北大・理) さんによる、2D-Pプローブ (PMS社製) での雪雲の飛行機観測では明瞭な雪結晶のイメージが得られています。また、今年 (1992年) 1月の石狩湾周辺での雪雲の観測では遠藤 (北大・低温研) さんがHYVISをあげており、北大理学部の直交二偏波ドップラーレーダーとの比較解析結果が待たれるところでです。

しかし、地上から放球するゾンデ方式では、観測機会が制約されるので、飛行機から投下するビデオゾンデの開発と利用に期待したいと思います。

103; 107; 306 (TRMM: 熱帯降雨; エルニーニョ; 南方振動; ENSO)

## 7. TRMM (熱帯降雨観測衛星) 計画について\*

新田 勅\*\*

### 1. はじめに

TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 計画は、1986年6月にワシントンで開催された「宇宙分野における日米科学常設幹部連絡会 (SSLG)」で提案されて以来、1997年の打上げを目指して、日米を中心に観測内容や研究計画の取り組みがなされている。

TRMM計画の特徴は、(1)衛星にレーダを搭載し

て宇宙から直接降雨を測定すること、(2)衛星の軌道傾斜角を35度にし、熱帯を中心とした約37°N~37°Sの地域の降雨の3次元分布を定量的に求めること、(3)日米共同研究であること、である。

本報告では、TRMMの現状と今後の展望について述べる。

### 2. TRMMの目的

熱帯域は、大気大循環を動かす熱機関車の役割を果たしているが、その熱源のほとんどは対流活動による凝結熱放出によっている。凝結過程に伴って、水蒸気

\* On the TRMM Program.

\*\* Tsuyoshi Nitta, 東京大学気候システム研究センター。