

達した雲の上部は氷雲になっていることを考えると、衛星データによる氷雲の評価方法を確立することが重要であると考えられる。その意味で、人工衛星による氷雲の評価方法開発の現状と見通しについて早坂会員に質問して、コメントに替えさせていただきたい。

参考文献

Goldenberg, S. B., R. A. Houze, Jr. and D. D. Churchill, 1990: Convective and stratiform components

of a winter monsoon cloud cluster determined from geosynchronous infrared satellite data, *J. Meteor. Soc. Japan*, **68**, 37-63.

菊地勝弘, 1993: 都市の豪雪災害の予測と軽減・防除に関する研究, 文部省科学研究費重点領域研究「自然災害の予測と防災力」研究成果, 609 pp.

住 明正, 竹内謙介, 藤谷徳之介, 上田 博, 高橋 劭, 中沢哲夫, 1993: TOGA-COARE 計画について, *天気*, **40**, 791-809.

5013 (衛星観測; レーダ)

5. 雨の衛星リモートセンシング*

中 村 健 治**

1. はじめに

近年, 地球規模の気候変動が人間社会へ与える影響が増大し, また人類が気候変動を引き起こしている可能性があることが世界的に認識されてきた。この気候変動のメカニズムを明らかにするためには, 気候変動に影響を及ぼす大気・海洋の諸物理量を地球規模で把握する必要があり, そのための最適な手段として衛星搭載リモートセンサの重要性が高まっている。大気・海洋の諸物理量のうち, 降雨はその空間的・時間的変動が大きいため特に測定が困難なものであり, これまで可視・赤外及びマイクロ波放射計を用いた split window 法等, 種々の方法が提案・試験されているものの未だ不十分である。例えば, split window 法では低い積雲に対して誤差が大きい。

降雨センサとしては雲を通し, 直接雨を見ることのできるマイクロ波センサが原理的に可視・赤外センサよりもすぐれている。マイクロ波放射計は米国で ESMR, SMMR そして現在の多周波の SSM/I と進歩してきている。マイクロ波放射計は, 低い周波数(通常は10 GHz から35 GHz 程度)では降雨からの熱放射温度から降雨強度を推定する。この場合には背景が冷たい必要があるため, 海上降雨では使えるが, 陸上で

は適用できない。80 GHz の高い周波数では散乱が強くなるので, 強大な積雲では雲頂部が冷たい宇宙を反射することから冷たく観測される。この場合には陸上でも適用可能であるが, 雲頂付近の散乱を使うため誤差が大きい。この放射計も多周波の利点を生かし(というよりも多周波でなければ他の物理量の影響を除くことができない), 海面水温, 海上風, 雲水量等の推定にも用いられる。

同じマイクロ波センサでも降雨レーダは降雨の3次元分布を背景(陸地, 海洋)とは無関係に測定できる特長があり, 衛星からの定量的降雨観測の実現に重要な役割を担うものとしてその開発が期待されている。以下では衛星搭載の降雨レーダについて述べる。

2. 熱帯降雨観測衛星 (TRMM: Tropical Rainfall Measuring Mission)

本衛星は世界で初となる予定の衛星搭載降雨レーダを搭載した衛星であり, 降雨を軌道傾斜角35度で熱帯域を中心に観測し, 5度×5度の領域の1か月毎の総降雨量を測定することを第一の目的としている。また, 降雨の日周変化による誤差を避けるため太陽非同期となっている。この衛星計画は日米対等の計画として進められており, 平成9年度の打ち上げを目指している。

衛星搭載のマイクロ波レーダは合成開口レーダ, マイクロ波散乱計, マイクロ波高度計等すでにいくつもあるが, 降雨レーダは未だに無い。これは, 降雨から

* Rain measurement from space.

** Kenji Nakamura, 名古屋大学大気水圏科学研究所.

© 1995 日本気象学会

の弱い散乱を検出するには高感度が要求されること、降雨の立体構造を観測するためには映像レーダ方式は使えず、アンテナ走査が必要となるが、マイクロ波帯の大きなアンテナでは地球表面を走査することが困難であること等による。TRMM 搭載の降雨レーダは、14 GHz という降雨レーダとしては比較的高い周波数、phased array 方式による電子走査を取り入れることによりこれらの問題を解決している。TRMM 搭載レーダは衛星直下点で0.7 mm/h の降雨を S/N 比 0 dB で受信できる感度を持つ。

3. TRMM 衛星以降

TRMM の寿命は3年であり、TRMM の観測を継続するために TRMM 後継機の検討も始まっている。TRMM の次の降雨観測衛星としては、より観測域を広げるため、軌道傾斜角を TRMM の35度よりも大きく、55度程度とする方向にある。これは、例えば、ユーラシア大陸の積雪がモンスーンの強弱に関係しているというように、温帯域の降雨も重要であるからである。軌道傾斜角が大きくなると、観測域が広がるため、衛星の走査域もそれにつれて大きくすることが要求される。走査域を大きくするには衛星高度を上げることが最も簡単である。衛星高度を上げると、走査域が広がると同時に、大気抵抗が減り、衛星寿命も増える。その一方、レーダにとっては、ターゲットまでの距離が長くなり、ハードウェア上辛くなる。降雨の日周変化は大きく、TRMM と同様に日周変化のバイアスを避けるために太陽非同期が望まれる。

TRMM 以降の衛星搭載降雨レーダとしては下のような候補が考えられよう。

(1) TRMM 搭載レーダの高軌道への適用を考えた upgrade

(2) マルチパラメータレーダ

多周波レーダ、偏波レーダ、ドップラレーダ

以下でそれぞれについて述べる。

(1) TRMM upgrade

次期衛星はより高い軌道を取り、より広い走査幅を持つものと考えられる。そこで TRMM 降雨レーダをより高い軌道に合わせたものを考える。例として、高度500 km と TRMM 衛星の1.5倍の高さの軌道を考える。するとターゲットまでの距離もほぼ1.5倍となるので、レーダには2倍以上の感度が要求される。また、フットプリントの大きさを TRMM と同じ衛星直下点で約4 km を想定すると、アンテナビーム幅は

TRMM 用レーダよりも細いビームが要求される。この要求を満足するにはアンテナの大きさを1.5倍にする必要がある。アンテナの大きさは打ち上げロケットのフェアリングの大きさによるが、H-IIロケットの大型衛星収納用フェアリングならば大型のアンテナを収容できよう。

(2) マルチパラメータレーダ

マルチパラメータレーダとしてまず候補に挙がるのは2周波レーダである。2周波レーダは航空機実験により通常の散乱強度からの降雨強度推定のみならず降雨減衰を利用した降雨強度推定が可能であることが実証されており将来性は高い。さらに、2周波レーダでは散乱そのものの周波数依存性から降水粒子の相(雨滴、雪、氷晶、等)を識別できる可能性もある。

偏波レーダは二つの偏波により降雨を観測し、散乱強度、そしてその偏波間の差から降雨強度推定を行なうものである。地上設置レーダでは大いに有力であるが、衛星搭載としては、ZDR(水平送信水平受信と垂直送信垂直受信の場合の受信電力比)測定では斜めに電波を放射するため、ターゲットまでの距離が長くなりまたアンテナサイドロープの影響で表面エコーが降雨エコーに混入してくること、分解能が劣化すること等の問題がある。LDR(水平送信垂直受信と水平送信水平受信の場合の受信電力比)観測では nadir 観測はできるものの like-polarization に比べて cross-polarization では受信電力が15 dB 以上低下するため、送信電力等に余裕のない衛星搭載レーダでは不利である。偏波間の correlation を用いる方法には可能性がある。

ドップラ機能は、ハードウェア的にはシステムをコヒーレントにすればよく、比較的簡単であるが、衛星は7 km/sec という高速で移動しており、レーダアンテナビームは有限の幅を持っているため、静止ターゲットに対してもドップラ幅が広がってしまい、意味のあるデータになり難い。

次期 TRMM 衛星搭載降雨レーダとしては350 km という低い高度の衛星は今後は考え難いこと、データの継続性を考えてできるだけ早い時期の実現が望まれることから、TRMM レーダを高軌道用に upgrade したものが有力となる。しかし、レーダ技術開発の面や新しい降雨強度推定アルゴリズムの開発の面からは2周波レーダが魅力的である。

4. 降雨強度の推定法

TRMM のみの観測では特にレーダ観測のみではサ

ンプリング誤差が大きく平均降雨量観測には不十分である。このため TRMM による降雨観測の基本は nadir 付近はレーダ、放射計による観測を行い、その結果をレーダよりも広い走査幅を持つ放射計のデータに適用して、放射計データのみの領域の降雨強度推定精度を向上させる。さらに、それを SSM/I また GMS に広げていくことも必要になる。

TRMM 搭載降雨レーダによる降雨強度推定は、地上降雨レーダと同様にいわゆる Z-R 関係を用いて受信電力を降雨強度に換算する手法である。しかし、降雨強度が大きくなると使用周波数が14 GHz と高いため降雨減衰が大きくなるため、降雨減衰補正が必要となる。降雨減衰補正は降雨減衰が小さい時には精度の良い補正が可能であるが、大きいときには補正量の誤差が大きくなりそのままでは適用が難しい。この場合には、地・海面からの散乱強度を使う手法が考えられている。雨域内では地・海面からのエコーは降雨減衰を受けた量が返ってくる。降雨減衰量は実エコー強度を無降雨時のエコー強度と比較することにより見積れる。総降雨減衰量が与えられれば、大きな降雨減衰に対しても降雨減衰補正が適用できるようになる。

TRMM の第一目標は500 km×500 km の1か月降雨量の測定である。平均降雨量を求めるには単に観測値を積分したのではサンプリング誤差がかなり入ってくると予想されている。このためある一定の降雨強度以上の領域の積分面積と平均降雨量の相関が大きいことを利用した threshold 法が提案されている。

推定降雨の誤差はスナップショットの誤差と平均降雨量の誤差とに分かれる。スナップショットの誤差は地上降雨レーダ観測と同様に雨滴粒径分布の変動等によりかなりの誤差があると考えられる。それに加え、衛星からの降雨観測では水平分解能がかなり悪いために、フットプリント内の降雨の非一様性による誤差も

生じる。

5. グランドトルース

衛星からの地球観測では衛星データからの推定値を検証、検定するためにグランドトルースが必要である。TRMM では熱帯域にいくつかのグランドトルース地点が予定されている。日本の AMeDAS データも期待されている。また、つくば域において複数レーダによる降雨観測実験も予備実験段階ながら1993年秋に行われた。航空機搭載降雨レーダによる観測も TRMM シミュレータとして、海上降雨観測として、また次世代宇宙機用降雨レーダ開発のための基礎実験として重要である。航空機に関しては各種の観測機器を搭載できかつ、高高度、長距離を飛行でき、世界とまでは言わなくともアジアの各地で総合観測ができるような十分に大きな航空機への期待が大きい。米国では TRMM のためのグランドトルース実験を本腰を入れて計画しており、日本においても GEWEX/GAME に絡めたようなグランドトルース実験が必要であろう。

6. おわりに

宇宙からの雨観測について、特に降雨レーダによる観測について述べた。衛星による観測は地球規模で一律な質のデータを提供できる大きな利点がある。特に、海上降雨はデータの信頼性が低く、TRMM への期待は大きい。その一方、時間的連続性また詳細観測には不十分な点がある。TRMM においても、その空間分解能からはメソ γ スケールの現象の構造観測は難しいと思われる。また日周変化についてもサンプリング頻度から1か月程度では十分には日周変化は出せないと思われる。特徴を生かし、またその限界を把握しての利用が期待される。

1052 : 5012 : 5013 (雨滴粒径分布 ; 降雨日周期)

6. 「雨の衛星リモートセンシング」に対するコメント*

沖 大 幹**

1. はじめに

雨や雪などの降水は多様な大気現象の最終成果物で

あり大気科学過程を診断する重要な観測指標である一方、地球表面での水循環過程を駆動する重要な外力で