

GMS-5搭載の新センサーの気象解析への利用

—米国海洋大気庁に出張して—

Utilization of New Sensors on Board GMS-5 for Weather Analysis and Forecast.

Visiting the National Oceanic and Atmospheric Administration of the United States of America.

藤田由紀夫*

Yukio Fujita

1. はじめに

平成6年度打ち上げ予定の次期静止気象衛星5号(GMS-5)には、現在の赤外域の10.5~12.5 μm の波長帯を二分割したスプリットウィンドウチャンネル(10.5~11.5 μm と11.5~12.5 μm)と波長6.5~7.0 μm の水蒸気の吸収帯に観測域を持つ水蒸気チャンネルのセンサーが新たに搭載される。気象衛星センターではこれらの新センサーにより得られるデータを用いて、新規プロダクトの作成と現行プロダクトの改良を予定している。このために、平成3年度より3ヶ年計画で、これらセンサーの利用実績のあるヨーロッパやアメリカ合衆国に職員を派遣し、必要な情報の収集を行ってきた。この一環として、平成5年10月3日から11月28日にかけて、筆者がアメリカ合衆国に出張する機会を得た。訪問先は同国海洋大気庁(NOAA:National Oceanic and Atmospheric Administration)の環境気象衛星資料情報局(NESDIS:National Environmental Satellite Data and Information Service)、気象センター(NMC:National Meteorological Center)、ハリケーンセンター(NHC:National Hurricane Center)、シビアストーム予報センター(NSSFC:National Severe Storms Forecast Center)の四機関で、10月4日から15日にかけて、フロリダ州マイアミにあるNHC、10月18日から11月19日にかけて、ワシントンD.C.にあるNESDIS、NMC、11月20日から26日にかけて、ミズーリ州カンザスシティに

あるNSSFCに滞在した。

今回の訪問の目的は水蒸気及びスプリット画像から大気現象の実況把握と予報に役立つ情報の抽出方法に関する調査及び研修で、各機関毎の主な目的は以下のとおりである。

NESDIS

- 衛星画像を用いた気象状況の把握と予報に利用可能な情報の抽出方法
- 客観的な雲型判別手法
- 降水域、降水強度の推定方法

NMC

- 衛星画像を用いたシノプティックスケール、メソスケール現象の把握・予測

NHC

- 衛星画像を用いたハリケーンの位置・強度の解析及び進路・強度の予測

NSSFC

- 衛星画像を用いた雷雨・トルネードの監視・予測

今回の訪問により、水蒸気画像やスプリット画像の利用技術に関する情報をNOAAの研究者、現業者から得ることができた。また、実際にこれらの画像、特にその動画を見る機会を得たことは、画像解析に関する技術の習得に有益であった。以下に、NOAAの研究者、現業者から得た情報及び筆者が実際に画像を見て気付いた点を報告する。

なお、訪問したNOAAの諸機関における業

務の内容については、大島(1989)、三田(1990)に詳しいので、これらを参照されたい。

2. 水蒸気画像の利用

2. 1 概要

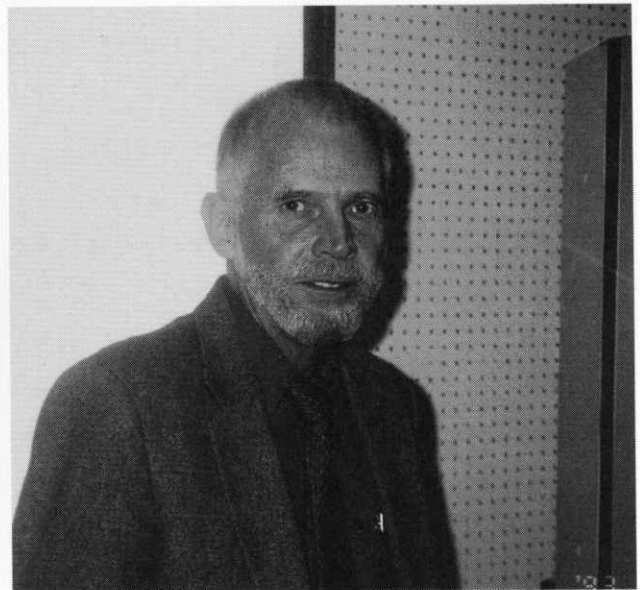
「雲は我々が衛星で見ることのできるもののほんの一部でしかない。我々は雲は見ないでジェット気流や気圧系を見る。雲のことは最後に考える。我々は天気予報の助けとなる画像パターンやその変化を見るのである。」とは、NESDISのWeldon氏の水蒸気画像の利用方法に関する言である。この言葉通り、NOAAでは水蒸気画像は対流圏上層の大気の流れの把握に利用されている。その結果は数値予報と比較され、数値予報のチェックを行っている。利用に際しては、動画を用いてジェット気流の位置を含む定性的な流れや高低気圧、トラフ、リッジ等の位置と移動に関する情報を得ている。予報官はこれらの情報を数値モデルと比較し、トラフの進み遅れや発達程度等をチェックし、予報に反映させている。NHCとNSSFCでは、可視、赤外(以下、これまでGMSに搭載されている赤外域の波長帯のセンサーによるデータを示すのに、赤外という言葉を使用する)画像も使用して、上層の高低気圧、トラフ、リッジ、ジェット気流、地上前線、偏東風波動等の位置と移動をワークステーション上で測定している。その結果は、Satellite Interpretive Message(SIM)として、1日3~4回米国内外の気象官署に配信されている。SIMは気象衛星センターの衛星気象解析報を電報で送れるよう簡略化したものと考えてよく、受信官署ではこれを現況把握及び数値予報のチェックに利用している。

筆者が見た限りにおいても、水蒸気画像はこれまで赤外画像の雲の分布と動きから、あるいは時間的、空間的に疎な高層気象観測データか

ら推定するしか手段がなかった雲のない場所の上層の流れが、定性的とはいえ時間、空間的に広範囲に把握できること、また、気流系同士のダイナミックな相互作用の様子も見せてくれること等非常に有用な情報を与えてくれることがわかった。さらに、画像パターン(特に暗域)とその変化を認識することにより、その後の短時間に起こりそうな現象やその場所を推測するのに役立つ情報が得られることがわかった。

なお、水蒸気画像の解析技術習得のための参考書としては、上述のWeldon氏らが著述し、気象衛星センターが平成4年度末に翻訳、出版したNOAAのテクニカルレポート57号「水蒸気画像—天気解析と予報のための解釈と応用」が最良のものであることを多くのNOAAの職員から指摘された。

2. 1 動画の重要性



「水蒸気画像—天気解析と予報のための解釈と応用」の著者、NESDISのRodger Weldon氏

可視、赤外画像の動画は、静止画ではわかりにくい情報を与えてくれ、雲解析に欠かせないものである。水蒸気画像でも動画は有効なものであるが、その有効性は可視、赤外画像以上に大きいと思われる。これは画像の大部分を占め、上層の湿潤域に対応する中間輝度の部分の移動

は静止画の比較では不可能であり、動画にしてはじめて認識できると考えられるからである。中間輝度の部分には、狭い範囲内の水蒸気分布の不均一に由来すると思われる輝度分布のむらがある。また、数百～千km程度の長さの水蒸気量の変化の大きい場所に対応した、比較的輝度差の大きい領域が見られる。これらの特徴があるために、その移動が推定できるのであるが、

これらはあまり目立つものではなく、その追跡は静止画の比較では困難であろう。

水蒸気画像の最大の利点である上層大気の流れの把握は、中間輝度部分の移動の認識による部分が大きい。したがって、この利点を享受するためには時間間隔の短い画像による動画が不可欠なものである。



NESSDIS、NMCの入っている
World Weather Building

2. 2 シノプティック、 メソスケールの現象

トラフの把握

赤外画像では把握できないトラフが水蒸気画像で認識できることは従来から言われている。筆者が見た例では、高層実況図や数値予報では一つのトラフとしか表現していないものが、実際には700～800km程度離れて二つのトラフが存在していた場合があった。この例の赤外画像では、先行するトラフの前面に地上低気圧があって、それに対応する雲域が見られた。しかし、後側のトラフは巻雲(Ci)を伴っておらず、その存在がわからなかった。このため、これらに対応する雲域は、一つの

トラフに対応する、一部解釈の難しい部分を伴った雲域としか認識できなかった。水蒸気画像でははっきりと二つのトラフの存在がわかり、雲域もそれぞれのトラフに対応する二つの雲域として解釈が容易になったとともに、後側のトラフの存在により、先行するトラフに対応する地上低気圧の発達も、数値予報より遅れたことが推測された。

強風軸、強風核の把握

後に述べるように強風軸、強風核は地上低気圧の発生、発達と密接に結びついており、その把握は重要である。これらは暗域の境界と一致することが多いが、暗域がはっきり見えないことも多い。このような場合には、中

間輝度の部分の流れの速い所が比較的輝度差の大きい部分の変形の様子からわかることが多い。強風核の把握は難しい場合が多いが、これも比較的輝度差の大きい部分の変形の様子からわかることがある。

系の把握

南北に連なった複雑な雲域を複数のジェット気流の系に対応していると推定する場合がよくあるが、水蒸気画像ではジェット気流に対応する暗域により、複数の系の存在がはっきりとわかることが多い。

地上低気圧の発生、発達

傾圧リーフ*1から低気圧が発生するか否か、発達中の低気圧が成熟状態まで到達できるか否かはその雲域と後面から近づく強風核、強風軸との位置関係を認識することにより推定できる。強風核が西または南西方向から傾圧リーフの変曲点や地上低気圧の中心を指向するときは地上低気圧の発生、発達が見られるが、その他の場合は発生、発達を阻害する。滞在中、カस्प*2が形成され、コンマ形に移行しつつある発達傾向を示していた雲域の上層雲が急に先行しはじめ、地上低気圧がさほど発達しなかった例があった。この時の水蒸気画像では、強風核がコンマの頭の先端部分にぶつかった後に、それにつられるように上層雲が先行を始めており、あたかも後面から来た強風が既に存在している低気圧の流れを破壊または一部を切断して持ち去ったようにみえた。この他にも後面から来た強風域が既に存在する流れや雲域を変化させたと思われる例が見られた。

暗域の認識

発達前のトラフの後面のジェット気流、特に、ポーラー系のジェット気流対応の暗域は、

変形場や高気圧による下降気流に対応する暗域より、周囲との輝度差が少なく見落としやすい。また、ブロッキング高気圧により形成された暗域は、高気圧の消滅後もかなりの期間暗域として存在している。暗域の上に、より上層の湿りがかかってきた時には、残った暗域を下降流に対応した暗域と間違えないよう注意する必要がある。

地形の影響

山脈の風下側では、山越気流による下降流のために暗域となることがある。したがって、トラフが山脈付近を通過している時はその暗化がトラフの強まりによるものか、山脈によるものか、動画によりチェックする必要がある。

数値予報との比較

客観解析を含む数値予報の上層のトラフや高・低気圧の位置と、水蒸気画像から得られるトラフや高・低気圧性循環の中心位置を比べてみると、実況データの少ない海上で数度くらい異なっている場合があった。

2. 3 ハリケーン

強度

相対的な強度の変化は、ハリケーン周辺の下層流の変化を通して、周辺の暗域の変化に反映される。

位置予報 (1)

ハリケーン周辺の湿り域の動きから指向流を推定する。推定された指向流は定性的なものであり、直接、予報に反映されるものではないが、数値予報の結果がモデル間でばらついている時は、大きな比重を占める参考資料となる。

位置予報 (2)

D v o r a k (1984)は水蒸気画像に現れる暗域により、24時間以内のハリケーンの転向を予測する方法を開発している。この方法の改良版はNOAAの熱帯低気圧と衛星画像に関するワークブックに収録されている。NH Cのハリケーン予報官のこの方法に対する評価はあまり高いものではなく、的中率は50%程度とのことであった。一方、D v o r a k氏は、この方法にさらに改善をほどこしている最中であり、それを前記ワークブックの改訂版に掲載予定とのことであった。これは的中しなかった(転向しなかった)例について、その水蒸気画像上の特徴を調べて、転向則を適用できるか否かを判断する処理を設けた事、一連の作業を強度解析におけるD v o r a k法のようにワークシート化した点、画像上の特徴点の位置と動きから転向までの時間を推算するノモグラムが作成されている点がこれまでと異なっている。

2.4 シビアストーム

暗域の認識

雷雨、ひょう、トルネード等のシビアストームをもたらす積乱雲(C b)は水蒸気画像の暗域で発生しはじめることが多い。したがって、暗域、特に暗くなりつつある暗域の位置や動きを数値予報または実況の下層の暖湿気移流、安定度等とともに重視している。

C bの発生場所

C bは、不安定度が強い時は暗域の進行方向の先端で、それほど強くない不安定な時は暗域の進行方向後端で発生しはじめる事が多い。

C bによる暗域

C bの風上側に、C bに沿って細い暗域ができることがある。これは風上の流れがC bにより堰き止められて、下降するため、対流活動が活発なことを示している。この暗域が見られるようなC bは雨量も多く、長時間にわたって存在することが多いとの事である。なお、暗域ができるような強いC bにもかかわらず、C iにおおわれて暗域が見えないことも多いので、注意が必要である。

C bの連続的発生

トラフの底の暗域でC bが発生すると、通常は、暗域はC bで覆われてしまうが、トラフが強いと、C bの風上側に新たに暗域ができ、そこで新たなC bが発生を始める。この暗域は、前項の暗域とは異なり、ある程度の広がりを持っている。この過程を何度も繰り返し、C b域全体としては停滞またはゆっくり東進という状態となって、長時間の強雨をもたらす。したがって、C bの風上側に新たに暗域ができる時は注意が必要である。なお、筆者が見た例では、C bは二つの強風軸の合流場の右後面という、C bの発生に好適な場所に位置したことも重要であると考えられるが、この合流の様子も水蒸気画像上の細長い暗域によりはっきり認識できた。

上層湿潤域で発生するC b

C bは暗域だけではなく、湿潤域に対応する中間輝度の領域でも発生する。NE S D I SのS c o f i e l d氏は、水蒸気プルーム(W V P : Water Vapor Plume)と呼ぶ北から北東へ向かって延びる湿潤域の下で大雨、特に短時間のうちに洪水をもたらすような大雨が多いこと、W V Pと下層の相当温位の正の移流の軸の位置関係により、C bの発生及び大雨のポテンシャルの高い所を推定できることを述べている。また、W V Pの北側にド

ライサージ*3による暗域が発生し、それがWVPと接触した時にWVP内にCbが発生することがよくあり、Cb発生予測のてがかりとなるとのことであった。

2. 5 その他

晴天乱気流

暗域はシビアストームだけでなく、晴天乱気流の起こりやすい場所として、数値予報結果から計算した晴天乱気流指数とともに、航空予報官署では注目している。

地形性Ci

地形性Ciは赤外画像の動画より水蒸気画像の動画のほうがCbと区別をつけやすい。

流れの把握

湿潤域の動きから上層の流れを把握できるが、赤外画像と異なって、輝度によって高度が決定できないことから、高度の違う流れを同一高度の流れとして、誤って把握する可能性がある。

経過の把握



マイアミの民間ビルの6階にあるNHCの現業室

前項や残留乾燥気塊の解釈の間違ひは、それまでの経過を動画で把握すること及び天気図の併用により防げる場合が多いと思われる。

3. スプリット画像の利用

3. 1 概要

画像上のパターン認識やその変化から気象状況の把握や予報に資する情報を抽出するという観点からのスプリットデータの利用は、NOAAではあまりなされていない。スプリット画像については、NSSFCで火山が噴火した時に火山灰の検知に使用しているのみである。一方、NESDISでは $11\mu\text{m}$ と $12\mu\text{m}$ の輝度温度から可降水量を計算し、それを画像化したものをNMC、NHC、NSSFCに配信している。この可降水量は下層の湿潤域の実況を示すものとしてシビアストームの予測等に必要と考えられる。NSSFCでは実際にこれを活用しているが、利用できるのは限られた場合のみということであった。

NOAAで $12\mu\text{m}$ のデータを利用した画像があまり利用されていないのは以下の理由による。スプリット画像の主な利用方法としては、赤外画像では見えなかった夜間の霧の検知や熱帯低気圧の位置決定の改善などの下層雲の検知と下層の湿潤域の把握が考えられる。前者については $11\mu\text{m}$ と $12\mu\text{m}$ のスプリット画像よりも $3.7\mu\text{m}$ と $11\mu\text{m}$ のスプリット画像のほうが有効であること、さらに熱帯低気圧の位置決定については国防気象衛星(DMSP: Defence Meteorological Satellite Program)のマイクロ波データが利用できることから $11\mu\text{m}$ と $12\mu\text{m}$ のスプリット画像を使う必要がないことがあげられる。また、後者については雲に邪魔をされて可降水量が算出できない場合が多いこと、国土が広く比較的密な実況データが入手できること、特に地上デー

タについては1時間毎に入手できること等により可降水量画像の価値が相対的に低いことがあげられる。

NSSFCの予報官によれば、米国において可降水量画像が最も有効なのは春季に寒冷前線が南下している場合であり、前線の南側の晴天域において、大陸上の乾湿の分布や移動の様子がわかり、これと水蒸気画像との併用により、Cb発生の可能性の高い場所が特定できるということであった。また、メキシコ湾から流入する湿りの把握については、海洋上でデータが少ないため、比較的重要性が高いとのことであった。なお、これらの現象についても、雲があっても湿潤域を推定できるマイクロ波のデータが有効であることが示されているとのことであった。

我が国は四方を広大な海に囲まれており、入手出来る実況値は米国よりはるかに少ないため、スプリット画像は下層湿潤域の監視役としての利用価値が高いと思われる。無論、雲があれば利用できないが、太平洋高気圧縁辺の暖湿流の日本付近への入り込み等、現象によっては重要なデータとなるとと思われる。

3. 2 可降水量画像

画像によるばらつき

2時間前にはそれほど湿っていなかったのに1時間前の画像では湿潤域となり最新の画像では、また2時間前と同じ状態ということがよくあるようである。したがって、前画像からの変化が実際に起こっているかどうかは、長時間の動画により確認する必要がある。

エンハンス

エンハンスの方法にもよるのであろうが、白黒の画像では、パターンや輝度の変化が追いつく。カラーエンハンスが不可欠と思わ

れる。

下層湿潤域の把握

フロリダ半島南端に位置する弱い地上低気圧の南にあった湿潤域が湿りを増しながら、低気圧のまわりを回ってフロリダ半島に侵入する様子をはっきりと見られた。これは、可降水量画像による下層の湿潤域監視の有効性を如実に示した例と言えよう。

不連続分布

海岸線を境に陸と海で不連続な分布となることがある。

可降水量画像とスプリット画像の比較

下層湿潤域の把握のためには、国土の広い米国では地面温度の影響を除去するために可降水量への変換は不可欠である。一方、我が国では、温度変化が少なく、可降水量の推算精度が悪い海洋上での監視が主になると考えられることから、スプリット画像をそのまま使えるものと思われる。しかしながら、海面水温の水平傾度の比較的大きい黒潮周辺ではスプリット画像にどの程度影響するか、把握しておく必要があるかもしれない。

4. 雲型の自動判別、降水域・降水強度の推定



カンザスシティの政府ビル17階にあるNSSFCの入口

これらについては、現在、衛星センターで実施または計画しているような現業的な作業はNOAAでは行われていない。研究部門では気候学的立場から雲量、多層構造の雲域の把握、降水量の推定が行われている。降水の推定に関してはマイクロ波を用いたものが主流となっている。

現在、気象衛星センターで現業的に算出している降水強度指数の改善にはC_i域の排除が重要であるが、この件及び客観的な雲型判別法について、Cloud from AVHRR (CLAVR) と呼ばれる、NOAAで開発中の軌道衛星のデータを用いた雲型判別手法が一部参考になる。CLAVRでは11 μ mと12 μ mの輝度温度差の大小でC_iの判定を行っている。判定のためのしきい値は11 μ mの輝度温度の四次関数として設定している。しきい値を決める関数の形や係数そのものについては最終的にはGMS-5に対応した独自のものを求める必要があるが、開発初期の参考として利用できるであろう。なお、NESDISのDavis氏によれば、C_i判別にはこれだけでは不十分で、3.7 μ mと11 μ mのスプリットデータのほうが効率良く判別でき、この方法との併用が望ましいとのことであった。また、CLAVRでは、3.7 μ mと11 μ mのスプリットデータを夜間の霧・層雲の判別にも用いている。

降水強度の推定については、NESDISでメソスケール対流系による降水量の見積りを、赤外画像を用いて現業的に行っている。この方法はNESDISのScofield氏によりVISSR大気サウンダー(VAS: VISSR Atmospheric Sounder)の実用化以前に開発されたもので、その後、VASの利用による改良の可能性が同氏により示唆されていた。しかし、現在の方法は初期の方法に斜面の効果と下層水蒸気量の多寡による補正をほどこすよう修正したものであること、下層水蒸気量はスプリットデ

ータから得られたものではなく実況値を使用しており、定量的には水蒸気、スプリットを含むVASのどのセンサーのデータも利用していないとのことであった。

5. 感想他

水蒸気画像の利用価値は高く、NOAAでは可視、赤外画像とともに、気象業務になくってはならないものになっていることが感ぜられた。訪問したどの官署においても、会報の際には必ず、現況把握のためにこれら三種類の画像の動画を使用して説明をしていた。予報においては、数値予報の結果が大きな比重を占めているが、衛星画像、特に水蒸気画像は新しい数値予報がでるまでの現況と予報との違いのチェックに使われており、その役割は大きい。我国でも、今後、米国のように予報業務になくってはならないものになっていくものと思われる。

2章でも述べたように、水蒸気画像では、静止画の比較では得難い情報が多い。したがって、1日2回しか水蒸気画像を見ることのできない地方官署では、限られた情報しか得られないと思われる。また、本庁では3時間毎の水蒸気画像が配信されるが、その動画の質は1時間毎の衛星センターの動画に比べて劣ると考えられる。これらの事から、気象衛星センターから配信する雲解析情報図による情報が今まで以上に重要になってくるものと思われる。また、表現方法等、雲解析情報図の作成上の制約を考えれば、本庁予報部に平文で提供する衛星気象解析報も同様に、より重要なものとなるだろう。

スプリット画像はNOAAではあまり利用されていないが、四方を広大な海に囲まれた我が国では、入手できる実況データが少ないことから下層湿潤域の把握において、その有用性は米国より大きいと思われる。特に、日本の南海上の下層湿潤域の把握には役立ちそうである。

NOAAでは衛星画像解析にワークステーションを1989年に導入し、McIDASと呼ばれるソフトウェアを使用して解析を行っている。これにより複数の種類の動画を切り換えたり、数値予報、実況値あるいは他の種類の画像を重ねあわせたりという操作が簡単かつ迅速に行える。これらの操作は現在の気象衛星センターの計算機システムでは不可能または非常に時間がかかる。しかし、平成7年度に予定されている計算機の更新、ワークステーションの導入により、これらが可能となれば解析能力の向上に大きく寄与するものと思われる。

アメリカの静止気象衛星GOESは30分間隔でデータを取得しており、シビアストーム発現時には15分間隔で観測を行っている。30分間隔の動画では、より細かい雲の変化の様子がわかり、メソスケール現象やシビアストームに関する情報抽出には短時間間隔の観測が必要であることを感じた。

NOAAでは静止気象衛星だけではなく、軌道衛星のデータも利用して気象解析を行っている。特にDMSPのマイクロ波データは現業で簡単に見られるようになっており、熱帯低気圧等の解析に利用されている。また、マイクロ波だけでなく、 $3.7\ \mu\text{m}$ のデータの有効性も多くの研究者、現業者から指摘された。予報現場に、より質の高い情報を提供するためには、気象衛星センターでもこれらのセンサーを搭載したNOAA、DMSPのデータを受信、活用すべきであろう。

今回の出張に際して、NESDISのEnomoto氏をはじめとする関係官及び気象庁、気象衛星センターの関係官の方々には大変御世話になりました。また、NESDISのHolt、Scotfield、Weldon、NMCのUccellini、NHCのJarrell、NSSFCのMosherの各氏をはじめ

として、多くのNOAAの研究者、現業者の方々に忙しい中時間を割いて貴重な情報を提供していただきました。ここに感謝の意を表します。

脚注

*1 傾圧リーフ：NESDISのWeldon氏が提唱している用語で、傾圧帯での擾乱の発生期に現れる特有の形をした雲域または湿り域のこと。形が木の葉に似ていることから名付けられている。

*2 カスプ：低気圧の雲域または湿り域のうち、低気圧前面の高気圧性曲率を持った境界の一部から突出するくさび状の雲域または湿り域。傾圧リーフからコンマ形の雲域への遷移の過程で現れる。

*3 ドライサージ：トラフの発達に伴い、その後方で乾燥域が急速に広がってくる状態を示す用語。

参考文献

- 大島 隆、1989：アメリカ合衆国海洋大気庁を訪問して、気象衛星センター技術報告、第18号、35-44。
- 三田 昭吉、1990：アメリカ合衆国ウィスコンシン大学及び海洋大気庁を訪問して、気象衛星センター技術報告、第21号、19-24。
- Dvorak, V., 1984 : Satellite Observed Upper Level Moisture Patterns Associated with Tropical Cyclone Movement. Postprints of the 15th Conf. on Hurricane and Tropical Met., 1984, 163-168.

Corrigendum

The following corrections should be made in the article "A tentative view on development of tropical disturbances" by Nobuyoshi Shimizu issued in December 1993 (Vol.No.27) of the Meteorological Satellite Center Technical Note.

1. At page 14, right side and line 5,

$$\Delta U = \frac{U_1 + U_3}{2} \rightarrow \Delta U = \frac{U_1 - U_3}{2}$$

2. At page 17, left side and line 28,

$$\ln \theta e / \partial p \rightarrow \partial \ln \theta e / \partial p$$

3. At page 18, right side and line 2,

stimation → estimation