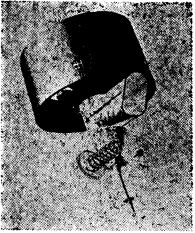


宇宙から見た気象——No. 44



ひまわり3号

雲影による雲頂高度の算出

井上 豊志郎*

1. はじめに

雲頂高度の衛星による算出法は、赤外データを用い、雲域を代表する観測輝度温度に大気補正を行い、温度・高度変換テーブルにより高度に変換する（輝度温度法）のが一般的である。その他の方法として、2つの衛星によるステレオ観測によるもの（ステレオ法）、雲影を利用するもの（雲影法）等がある。ステレオ法では、2つの衛星データを処理しなければならないこと、撮像時間を合わせなければならないこと等が問題点として挙げられる。一方、雲影法の適用は、地表面に雲影を認識できる条件の大陸上あるいは海面が太陽光を反射して輝いて見えるサングリント域等地表面の反射率が比較的高い領域のみに限られてしまう。

極軌道衛星 NOAA は太陽同期衛星で、撮像範囲の東西方向の西側約1/3にサングリント域が見られる。口絵写真1に気象衛星センター伝送第二課で受信した1軌道分の可視画像のハードコピー2例を示す。衛星資料解析装置の強調画像を用いれば、日中のどの軌道でも日本付近での雲影の認識は可能である。これに対し、“ひまわり”の画像でのサングリント域は、季節・海表面の状態に依存するが、衛星直下点が赤道にあるため、低緯度に限られる。口絵写真2に“ひまわり”によるサングリント（見難いが、ボルネオ島とミンダナオ島付近にある）の例を示す。

今回、極軌道衛星 NOAA-7 に搭載された AVHRR の可視画像に現れた雲影を使って黒体域を含む積乱雲のアンビルを対象として、雲影法による雲頂高度と、黒体域の輝度温度を変換した高度との比較を試みた。雲影法の利点のひとつは、絹雲についても影が認識でき（口絵

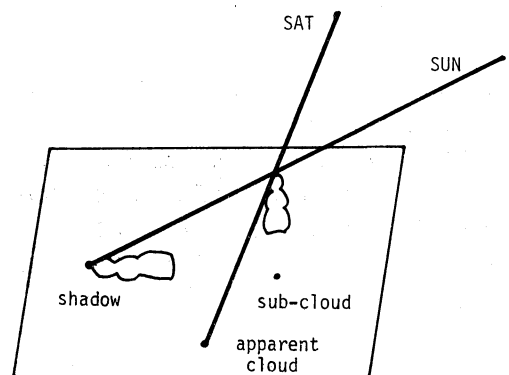
写真3）、その雲頂高度が有効に算出できる点である。絹雲のような射出率が1.0未満の雲に対しては、観測輝度温度が絹雲自身の温度を示していないため、輝度温度法は適用できない。

2. 雲頂高度算出法

雲影を使った雲頂高度の算出については、Smith・Reynolds (1976)、神子 (1976)、井上 (1984) 等の報告がある。ここでは、井上 (1984) に従って簡便な手法を示す。

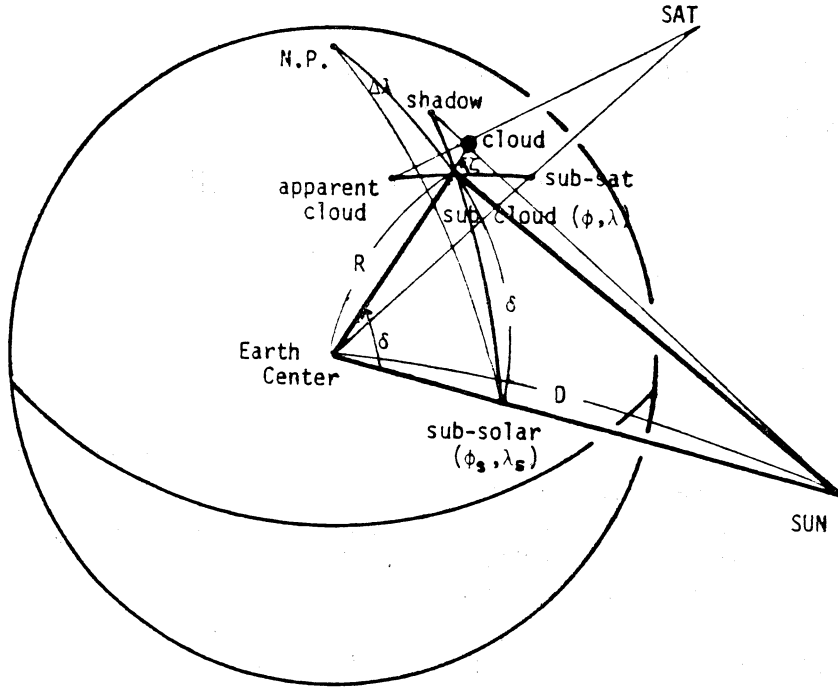
衛星による見かけの雲の位置、太陽による影の位置および雲の直下点の位置関係を第1図に示す。

地球を球と仮定した時のこれらの位置関係を第2図に示す。また、太陽、雲、影および地心を通る面での位置関係を第3図に示す。



第1図 衛星による見かけの雲、影、雲の直下点の位置関係。

* Toshiro Inoue, 気象研究所台風研究部。



第2図 球面上での位置関係.

第3図で雲頂の高さを H 、雲の直下点での太陽天底角を ζ (雲頂での太陽天底角も ζ と近似する.)、地球の半径を R 、影と雲の直下点が地心に対して張る角を α とすると雲頂の高さ H は次式で表せる.

$$H = \frac{R \sin \alpha}{\tan \zeta} - R(1 - \cos \alpha) \quad (1)$$

α は、影および雲の直下点の緯度・経度が分かれば球面三角の公式で算出できる.

第2図で、雲の直下点、太陽の直下点の緯度・経度をそれぞれ (ϕ, λ) 、 (ϕ_s, λ_s) とし、太陽と地心の距離を D 、太陽の直下点と雲の直下点の張る角を δ とする.

ζ については太陽、地心、雲の直下点を結ぶ平面三角形について正弦則から、

$$\zeta = \sin^{-1} \left(\frac{D \sin \delta}{\sqrt{R^2 + D^2 - 2R \cdot D \cos \delta}} \right) \quad (2)$$

と表せる.

また δ は球面三角の公式により次式で表せる.

$$\delta = \cos^{-1} (\sin \phi \sin \phi_s + \cos \phi \cos \phi_s \cos (\lambda - \lambda_s)) \quad (3)$$

影の位置は衛星の画像から決定され、太陽の位置、距離については天体暦から決定される. 従って雲頂高度は、雲の直下点の位置が分かれば (1), (2), (3) 式を使って太陽の直下点、雲影の位置から算出できる. この算出法を以後方法Aと呼ぶ. 全く同様に、雲の直下点分かれば、衛星の直下点、見かけの雲の位置から雲頂高度が算出できる. この算出法を以後方法Bと呼ぶ.

雲の直下点は、太陽直下点および影の位置を通る大円と衛星直下点および見かけの雲の位置を通る大円の交点として求まる. しかし、実際には各位置の決定に誤差が含まれているため、2つの大円の交点として求めた雲の直下点を使って、A, Bの2方法で求めた雲頂高度は一致しないことが多い.

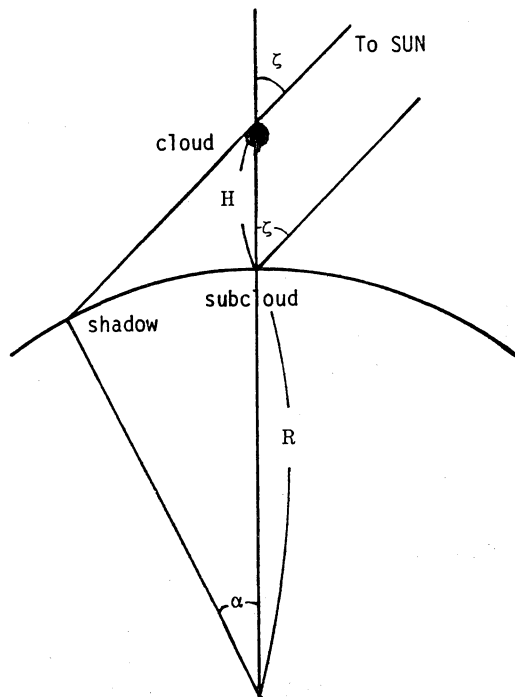
そこで直下点の位置を適当に与え、その位置に対する雲頂高度を方法Aおよび方法Bによって算出し、その値を比較する. 真の雲の直下点に対してはどちらの雲頂高度も同じ値になるはずである.

雲の直下点は、見かけの雲の位置と衛星の直下点を結

第1表 走査線上に与えられた雲の直下点に対し計算された雲頂高度。雲頂高度コラムの上段は方法A、下段は方法Bによる。最下段に雲の直下点を2つ大円の交点として求めた場合を示す。

雲頂高度	雲の直下点	
	緯度	経度
23.8 0.0	20.781	143.191
20.5 0.0	20.780	143.185
19.4 0.0	20.779	143.180
18.1 0.0	20.778	143.175
17.8 0.0	20.777	143.169
16.5 5.0	20.776	143.164
15.7 6.2	20.775	143.159
15.0 6.2	20.774	143.153
14.2 6.2	20.773	143.148
12.9 8.0	20.772	143.143
12.0 8.7	20.771	143.137
11.5 9.4	20.770	143.132
10.0 10.7	20.769	143.126
10.0 12.4	20.768	143.121
8.8 13.4	20.767	143.116
8.8 13.4	20.766	143.110
5.7 14.7	20.765	143.105
5.7 16.0	20.764	143.099
4.6 16.8	20.763	143.094
3.3 17.5	20.762	143.089
3.3 18.6	20.761	143.083
0.0 19.3	20.760	143.078
0.0 20.6	20.759	143.072
0.0 21.2	20.758	143.067
11.6 10.1	20.770	143.131

ぶ走査線上にある。今回は、このことを利用し、雲の直下点を全く任意に与えるのではなく、走査線に沿って与えた。与えられた各直下点についてA、B 2つの方法での雲頂高度値を比較し、最も近くなる場合を、雲の直下点及び雲頂高度と算定した。第1表に算出例を示す。



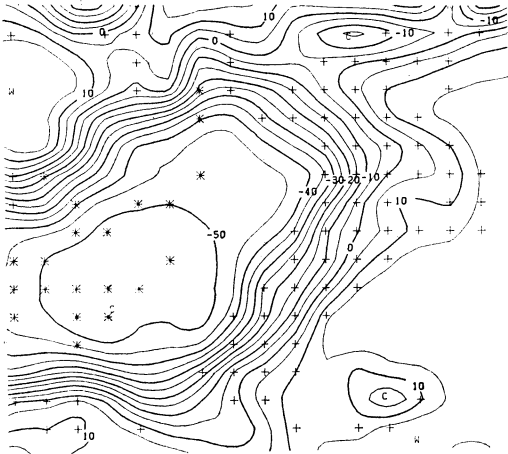
第3図 太陽、雲、影および地心を通る面での位置関係。

3. 実例

第4図に、1982年8月6日の例を示す。(a)に、おおよそ40 km×40 kmの領域での積乱雲とアンビルの輝度温度分布図を示す。*は11 μmと12 μmの輝度温度差の無い黒体の雲領域、+は輝度温度差の大きい絹雲域(氷晶雲では11 μmと12 μmでの射出率が異なるため輝度温度に差が出る)を示す(Inoue, 1985; 井上, 1984)。特徴ある絹雲部分および対応する影を、衛星資料解析装置のディスプレイ上で人間が5点指定した。第4図(b)の表に各5点について方法A(SUN)および方法B(SAT)による雲頂高度値を示す。これらを平均すると雲影法による雲頂高度は11.3 kmと算出される。一方輝度温度法では、衛星の観測時刻は05Zであるが、第4図(b)に近傍のラジオゾンデの観測値を示すように、黒体域の輝度温度-50°Cは~11.7 kmの高度に相当し、今回の雲影法とよい一致を示している。

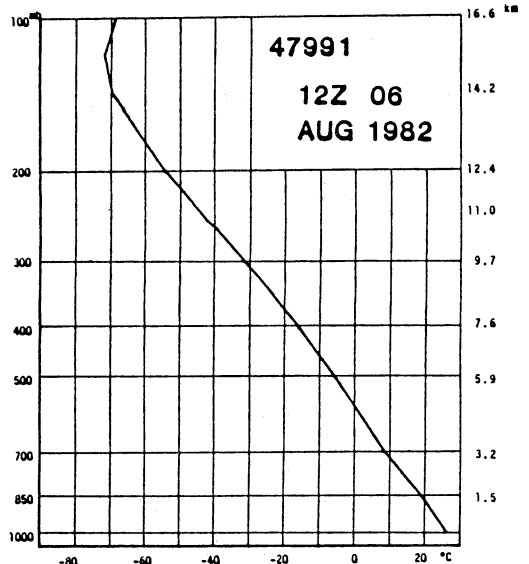
4. 誤差について

(1)式について、影の位置にΔdの誤差を与えた時の雲頂高度算出に与える影響を考えてみる。(1)式より



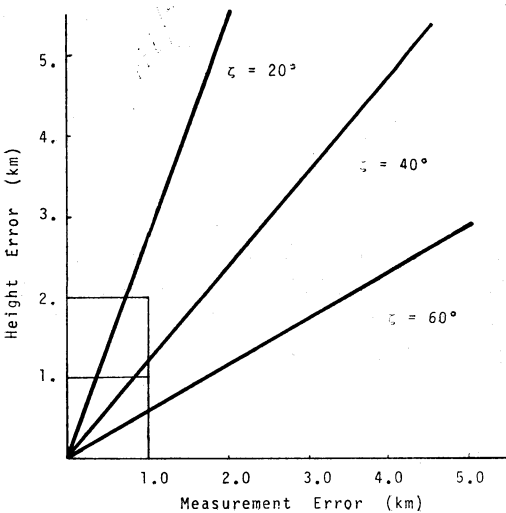
第4図(a)

- 第4図 (a) 11 μmでの輝度温度分布図を示す。領域の大きさは 40 km×40 km。*で黒体域，+で絹雲域を示す。
- (b) 1982年 8月 6日 12Z の マーカスでの気温の高度分布および人間が指定した5点について方法A (SUN)，方法B (SAT) で算出した雲頂高度 (km) を示す。



SAT	SUN
10.0	11.4
11.4	11.3
11.9	11.8
10.2	10.9
12.1	11.5

第4図(b)



第5図 高さ 10 km の雲に対する影の位置誤差が雲頂高度算出に与える影響を各天底角について示す。

$$H = \frac{R}{\tan \zeta} \sin\left(\frac{d}{R}\right) - R \left[1 - \cos\left(\frac{d}{R}\right)\right] \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Delta H &= \frac{\partial H}{\partial d} (\Delta d) \\ &= \left[\frac{1}{\tan \zeta} \cos\left(\frac{d}{R}\right) + \sin\left(\frac{d}{R}\right) \right] \Delta d \quad (5) \end{aligned}$$

第5図に $H=10$ km の雲に対する影の影響を示す。これによると、雲頂高度を 1 km の精度で算出するには、位置決定が同程度の精度で必要なことが分かる。

AVHRR の 1 画素は直下点で 1 km で周辺部へ行くほど大きくなる。雲、影の位置指定は画素単位であるため 0.5 画素の誤差はある。1つの雲に対し数点を指定すること、また、今回の手法は方法A，方法B 2つの情報を使っており、輝度温度法との比較では良好な結果を示して

いる。

5. おわりに

極軌道衛星では、サングリントを背景に雲影が良く認識できる。この雲影を利用した、幾何学的な雲頂高度算出法を示し、雲影法と輝度温度法の比較を試みた。

静止衛星でも、サングリントの領域は小さいが、雲影をもう1つの衛星による見かけの雲の位置と考え、ステレオ法 (Fujita, 1982) 等) が応用できる。

雲影法によって算出された高度情報と赤外データとの比較により、射出率等、雲の情報を得ることも可能である。

文献

Fujita, T.T., 1982 : Principle of stereoscopic height computations and their applications to strato-

spheric cirrus over severe thunderstorms, J. Meteor. Soc. Japan, Special Issue, **60**, 355-368.

Inoue, T., 1985 : On the temperature and effective emissivity determination of semi-transparent cirrus clouds by bi-spectral measurements in the 10 μm window region, J. Meteor. Soc. Japan, **63**, 88-99.

Smith, E.A. and D.R. Reynolds, 1976 : Comparison of cloud top height determinations from three independent sources: Satellite IR measurements: Satellite viewed cloud shadows: Radar, Proceedings of the Symposium on Meteorological Observations from Space: Their contribution to the FGGE, COSPAR **XIX**, 237-244.

井上豊志郎, 1984 : 赤外2チャンネル (11 μm , 12 μm) で見た絹雲, 天気, **31**, 757-759.

———, 1984 : 衛星可視画像の雲影による雲高の算出, 日本気象学会秋季大会予稿集.

神子敏朗, 1976 : 衛星写真上の陰から雲高を求める方法, 日本気象学会春季大会予稿集.

短期・中期数値予報の国際シンポジウムのお知らせ

標記シンポジウム (WMO/IUGG International Symposium on Short and Medium Range Numerical Weather Prediction) が下記要領で行われます。

時 期 : 1986年 (昭和61年) 8月4日~8月8日

場 所 : 東京, 気象庁

使用言語 : 英語

主 催 : WMO (気象庁), IUGG

共 催 : 日本気象学会, アメリカ気象学会

このシンポジウムでとり上げる話題は次の通りです。

1. Objective analysis, data assimilation, observing systems experiment.
2. Balance of the atmosphere and initialization.
3. Parameterization of physical processes.
4. Numerical schemes.
5. Global prediction models.
6. Limited area models.
7. Analysis and prediction of meso-scale phenomena.
8. Numerical weather prediction in the tropics, in-

cluding tropical cyclone prediction.

9. Orography: treatment and effects.

10. Forecast errors: evaluation, interpretation, predictability limitations.

シンポジウムに論文発表を希望の方は、200~400語のabstractを1986年1月31日までに下記に送付して下さい。

Secretary-General, WMO

41 Giuseppe Motta, Case Postale No. 5

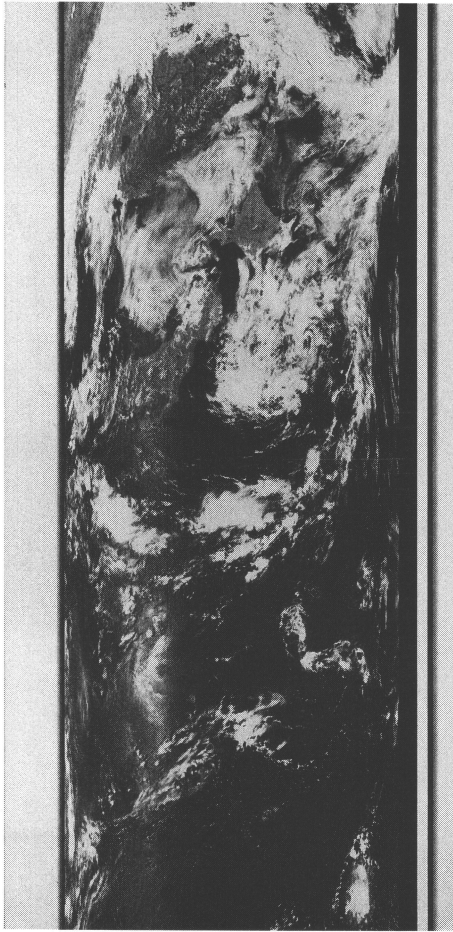
CH-1211, Geneva 20

Switzerland

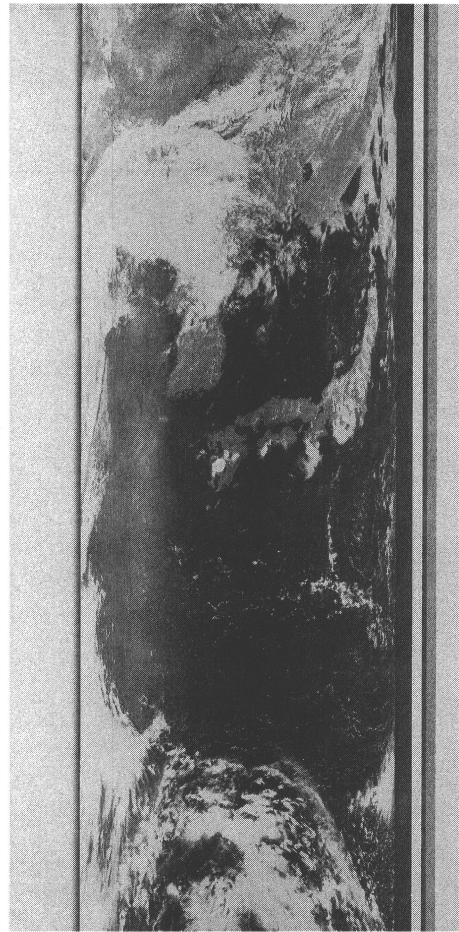
なお、国際プログラム委員会のメンバーとして気象庁を代表して仙台管区気象台・山岸米二郎(0222-91-8171)、日本気象学会を代表して東京大学・松野太郎(03-812-2111, 内線 4294)が参加しております。また、シンポジウムのプロシーディングスは、気象集誌特別号として日本気象学会から刊行される予定です。

宇宙から見た気象 雲影による雲頂高度の算出

(説明は435～439ページ参照)



(a)



(b)

写真1 衛星センター伝送第二課で処理したハードコピー。サングリント域（海洋上で白っぽい領域）が東西方向の西側½に、また南北方向に長く伸びていることが分かる。1982年8月6日 (a) と1984年8月9日 (b) の例。

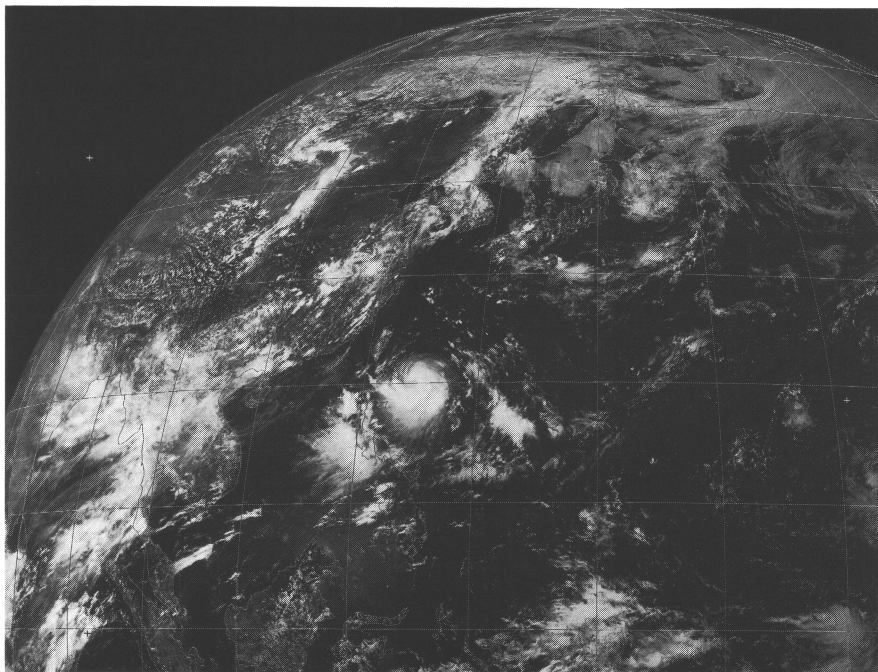


写真2 「ひまわり」で見られるサングリント。1982年8月6日06Zの可視画像。ボルネオ島北側にサングリントが見られる。

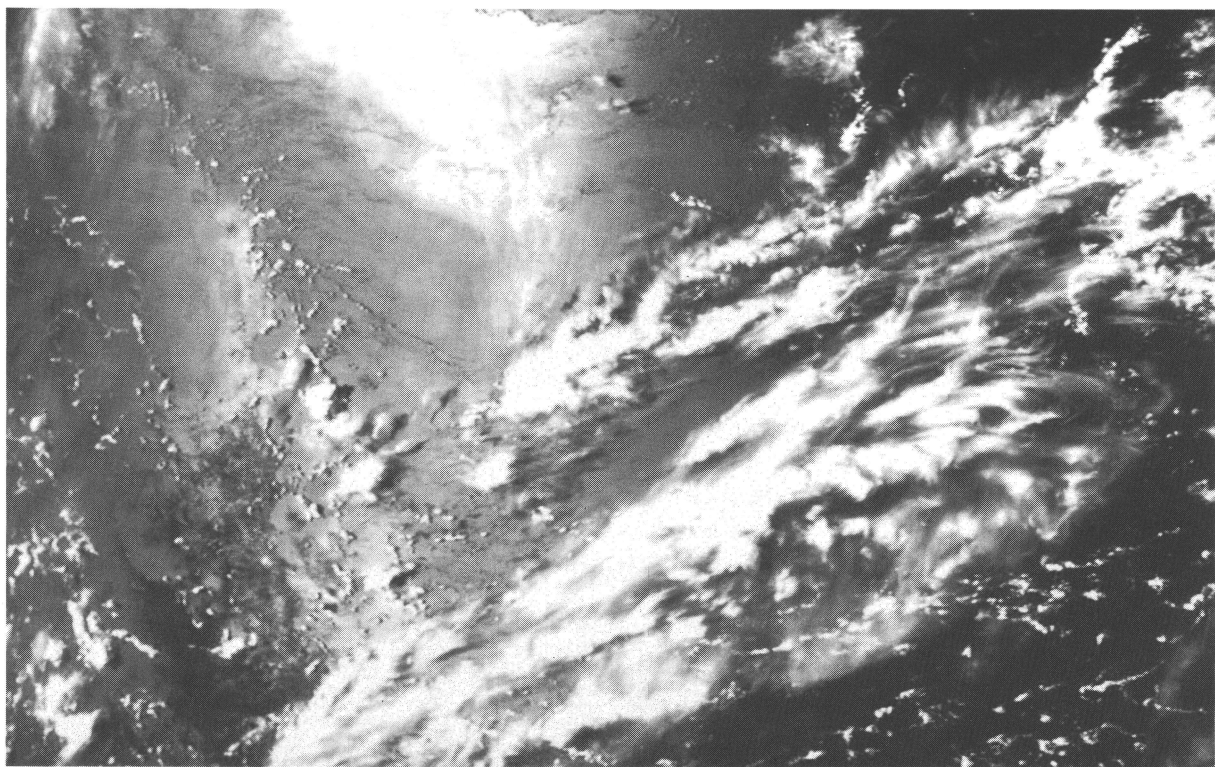


写真3 (a) 衛星資料解析装置で処理した1982年8月6日05ZのAVHRR可視画像(写真1(a)参照).おおよそ(21° N, 147° E)を中心とした500km×800kmの領域.

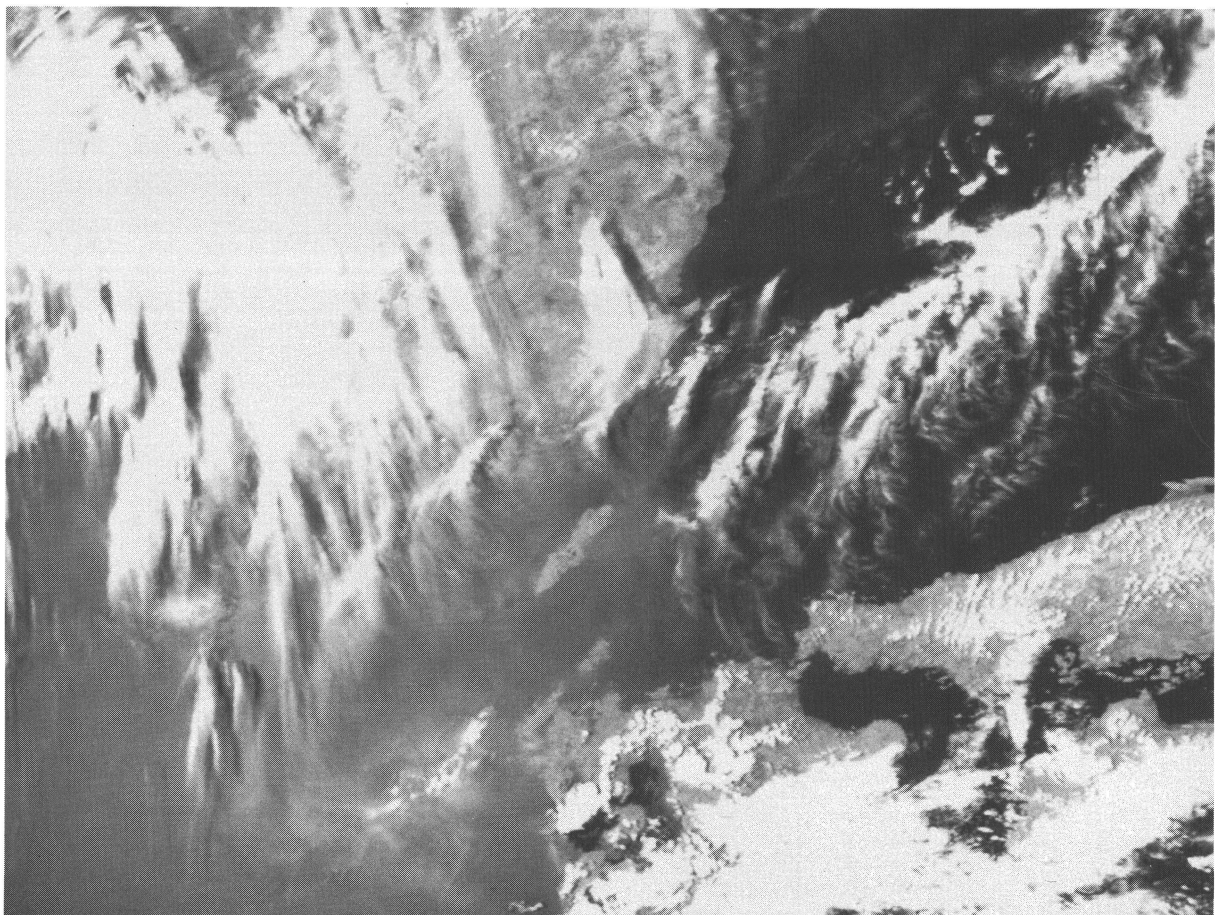


写真3 (b) 1983年6月5日06ZのAVHRR可視画像(対馬を中心に600km×800kmの領域). 絹雲の影が東支那海のサングリント上, 朝鮮半島上に見られる.