第5章　衛星データの利用
(Satellite data processing and utilization)

5.1　NOAA衛星データ処理プログラムと利用法*
(TIROS-N, NOAA series satellite data processing)

5.1.1　序

物理法則に基づく長期予報や気候変動予測を不確かなものにしている要素の一つに，雲に関する物理過程の扱いが不備である点をあげることができる。このため，WCRP（World Climate Reserach Program：世界気候研究計画）の中では，雲の空間分布と時間変動の実態及び雲と太陽放射・地球放射の相互作用の把握は，重要な課題として位置づけられている。この課題の遂行のため，ISCCP（International Satellite Cloud Climatology Project：国際衛星雲気候計画），GEWEX（Global Energy and Water Cycle Experiment：全球エネルギー・水循環研究計画）等，世界的に様々な取り組みが実行・計画されている。これらの研究計画において，衛星搭載の測器は全球の均質なデータを取得できる唯一の手段であり，衛星データの利用は重要課題となっている。

気候形成にとっての雲-放射のフィードバック機構がどのように作用しているかよく分かっていないが，「放射的に矛盾がない」雲と放射収支のデータセットがないことも研究の進展を妨げている一因と考えられる。現在，雲のパラメータとしては，例えば，ISCCP では雲量，雲頂高度，雲頂温度，（可視の）光学的厚さなどが赤外と可視のそれぞれ1チャネンルの衛星データから抽出されている（Schiffer and Rossow, 1983)。これらは重要であるが，これらだけでは，全波長にわたった放射収支の評価には不十分である。放射収支を正確に（精度良く）見積れる雲パラメータの抽出が望まれている。

特別研究「雲の放射過程に関する実験観測及びモデル化の研究」においても，衛星データの利用を計画した。一つは，航空機観測及び地上観測において，観測対象の雲物理特性と放射特性の解析に使用する計画である。もう一つは，放射モデル，大気大循環モデルの検証用のデータの作成に利用する計画である。前者の研究は衛星からのリモート・サウンディングに対する検証ということにもなり，後者の研究において作成されるデータに物理的基礎を与えることになる。本研究においての衛星データの利用は，前者の利用を行うことができ成果をあげることができたが，モデルと比較できるような具体的な検証用のデータの作成には至らなかった。しかし，NOAA衛星のデータ抽出のためのプログラムが整備され，容易に利用できるようになり，今後広い利用が

＊　内山明博（A. Uchiyama)，青木忠生（T. Aoki)

期待される。

この章では，NOAA衛星搭載のデータの概要，本研究で開発された処理プログラムの概要，利用例を示す。

5.1.2　TIROS-N, NOAAシリーズ衛星

TIROS-N，NOAAシリーズ衛星は，米国NOAAによって，打ち上げられ運用されている現業用の気象衛星である。1978年10月にTIROS-N，1979年6月にNOAA-6が打ち上げられて以来，今日まで常に二機の衛星が運用され，現在NOAA-11，NOAA-12が運用されるに至っている。NOAA衛星は気象庁気象衛星センターを含め国内に数カ所直接受信している施設があり，容易にデータを入手できる衛星であることと10年以上にわたって同じ種類のセンサーで観測を継続しており，気候研究のデータを作成するのに適した衛星である。また，数は，多くないが多波長の観測を行っており，より多くの情報の抽出の可能性がある。これらの理由から，NOAA衛星のデータを気象研究所においても利用できるようにすることは有益である。

TIROS-N，NOAA衛星搭載の測器についての説明は，Schwalb (1978, 1982) によって詳しく記述されている。利用できるデータについては，Users Guide (Kidwell, 1988) に述べられている。ここでは，AVHRR, HIRS, SSU, MSUについて簡単に述べる。

(1)　Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)

AVHRRは，画像を得るための測器である。各衛星の観測波長域をTable 5.1.1に示した。測器の特性をTable 5.1.2に示した。AVHRRデータは，APT（アナログ・ファクシミリ）や，HRPT (High Resolution Picture Transmission，デジタルデータ) として利用できる。AVHRRは，走査型の放射計でTable 5.1.1に示したように4または5の波長域で観測している。TIROS-N, NOAA-6, -8, -10は4チャンネル，NOAA-7, -9, -11, -12は5チャンネルである。画像データであるが，ch. 3～ch. 5を利用した海面水温の推定や，ch. 1とch. 2による植生分布の指標など定量的にも使われている。

Table 5.1.1　Spectral characteristics of the TIROS-N/NOAA instruments.

channel no.	Band width (μm)			IFOV
	TIROS-N	NOAA-6,-8,-10	NOAA-7,-9,-11	(milliradians)
1	0.55 ～ 0.90	0.58 ～ 0.68	0.58 ～ 0.68	1.39
2	0.725 ～ 1.10	0.725 ～ 1.10	0.725 ～ 1.10	1.41
3	3.55 ～ 3.93	3.55 ～ 3.93	3.55 ～ 3.93	1.51
4	10.50 ～ 11.50	10.50 ～ 11.50	10.30 ～ 11.30	1.41
5	ch.4 repeated	ch.4 repeated	11.50 ～ 12.50	1.30

Table 5.1.2　Instrument parameters for AVHRR.

Instrument parameter	Value
Calibration	Stable blackbody and space background for IR channels. No inflight visible channel calibration other than space.
Cross-track scan angle	±55.4° from nadir
Line rate	360 line per minute
Field of view	1.3 milliradians
Ground resolution	1.1 km diameter at nadir
Infrared channel NE△T*	< 0.12 K at 300 K
Visible channel S/N**	3:1 at 0.5% albedo

* : Noise equivalent differential temperature
** : Signal to noise ratio

(2)　TIROS Operational Vertical Sounder (TOVS)

TOVSは，三つの測器から成っている。これらは，大気の鉛直温度，水蒸気分布の推定に使われる。これらの三つは，

(a)　High resolution Infrared Radiation Sounder (HIRS/2)

(b)　Stratospheric Sounding Unit (SSU)

(c)　Microwave Sounding Unit (MSU)

である。

(a)　High resolution Infrared Radiation Sounder (HIRS/2)

Nimbus-6に搭載されたHIRS/1を改良したもので，19の赤外域の波長と1つの可視域の放射を測定する走査型の放射計である。CO_2の15 μm帯，CO_2の4.3 μm帯，H_2Oの6.3μm帯の大気からの放射を主に観測している。これらの観測放射から，鉛直温度分布，水蒸気分布を測定するための測器である。走査幅は，±49.5°（±1120 km）で，1ライン56ステップで観測しており地球の大部分をカバーしている。Table 5.1.3にSSU, MSUとともに測器の特性を示した。Table 5.1.4に波長特性を示した。

(b)　Stratospheric Sounding Unit (SSU)

SSUは，英国で開発された測器でCO_2をセルにいれ選択的に吸収させる方法をとっている。weighting functionのピークは，セル内のCO_2の圧力によって決まる。SSUのチャンネルの特性をTable 5.1.5に示した。測器の特性をTable 5.1.3に示した。

(c)　Microwave Sounding Unit (MSU)

MSUは，受動型のマイクロ波放射計である。55GHz域の酸素の吸収線を観測する。雲域での鉛直温度分布の推定に使用される。Table 5.1.3, Table 5.1.6に特性を示した。

Table 5.1.3 Instrument parameters for TOVS Sensors.

TOVS Instrument parameter	HIRS/2	SSU	MSU
Calibration	Stable 2 blackbodies, space background	Stable blackbody, space	Hot reference body, space background, scan cycle
Cross-track scan angle from nadir	±49.5 °	±40.0 °	±47.35 °
Scan time	6.4 sec	32.0 sec	25.6 sec
Number of steps	56	8	11
Angular FOV	1.25 °	10.0 °	7.5 °
Step angle	1.8 °	10 °	9.47 °
Step time	0.1 sec	4.0 sec	1.84 sec
Ground IFOV at nadir (diameter)	17.4 km	147.3 km	109.3 km
Ground IFOV at end of scan (cross-track)	58.5 km	244 km	323.1 km
(along-track)	29.9 km	186.1 km	178.8 km
Swatch width	± 1120 km	± 737 km	± 1174 km
Data rate (bits per second)	2880	480	320
Step and dwell time	0.1 sec	4.0 sec	0.1 sec

Table 5.1.4 HIRS/2 spectral characteristics.

HIRS channel number	Channel central wavenumber (cm^{-1})	central wavelength (μm)	Half power bandwidth (cm^{-1})	Maximun scene temperature (K)	Specified NEΔN ($mW/(sr\, m^2 cm^{-1})$)
1	669	14.95	3	280	3.00
2	680	14.71	10	265	0.67
3	690	14.49	12	240	0.50
4	703	14.22	16	250	0.31
5	716	13.97	16	265	0.21
6	733	13.64	16	280	0.24
7	749	13.35	16	290	0.20
8	900	11.11	35	330	0.10
9	1030	9.71	25	270	0.15
10	1225	8.16	60	290	0.16
10a	797	12.55	16	290	0.20
11	1365	7.33	40	275	0.20
12	1488	6.72	80	260	0.19
13	2190	4.57	23	300	0.006
14	2210	4.52	23	290	0.003
15	2240	4.46	23	280	0.004
16	2270	4.40	23	260	0.002
17	2360	4.24	23	280	0.002
17a	2240	4.13	28	330	0.002
18	2240	4.00	35	340	0.002
19	2660	3.76	100	340	0.001
20	14500	0.69	1000	100% A	0.10% A

Channel 10a and 17a are used on NOAA-11.
Channel 10 and 17 are used on TIROS-N, NOAA-6 ~ -10.

Table 5.1.5　SSU channel characteristics.

channel number	Central wavenumber (cm^{-1})	Cell pressure (mb)	Pressure of weighting function peak (mb)	NEΔN ($mW/(sr\ m^2\ cm^{-1})$)
1	668	100	15	0.35
2	668	35	5	0.70
3	668	10	1.5	1.75

Table 5.1.6　MSU channel characteristics.

Instrument parameter	Value
channel frequencies	50.3, 53.74, 54.96, 57.95 GHz
channel band width	200 MHz
NEΔT	0.3 K

5.1.3　データの抽出・較正

HRPT データから必要なデータの抽出・較正については，Lauritson *et al.* (1979)，Plenet (1988)，中島・青木(1983)に記述されている。ここでは，簡単に述べる。

(1)　データの入手

日本国内に現在HRPT直接受信できる施設は，気象庁気象衛星センターをはじめ数カ所ある。定常的に受信している施設は，気象衛星センター，東北大学大気海洋変動観測研究センター，東京大学生産技術研究所などがある。それぞれ，保存しているHRPTデータのフォーマットに違いがあり，使用に際しては注意が必要である。本研究では，気象衛星センター，東北大学，国立極地研究所の保存データを入力して処理するプログラムを開発した（国立極地研究所はTOVSデータのみ)。東京大学生産技術研究所のデータは，東北大学のフォーマットへ変換可能である。HRPT のオリジナルデータは10ビット/1ワードであるが，どの保存データも受信段階で，16ビット/1ワード（2バイト/1ワード）に変換してある。

データの入手は，気象衛星センターまたは，東北大学から入手するのが容易である。ただし，気象衛星センターは，二機の衛星のうち一つしか受信していない。一方，東北大学では，主に日本の上空を通過する軌道のみを受信しているので全てのデータがあるわけではない，また，データの配布はボランティアで行われており多量のデータの取得はむずかしい。その他のデータの入手方法としては，NOAA Satellie Data Service Division から直接入手が考えられる。南極域のデータについては，国立極地研究所を通して入手できるが AVHRR は画像変換したデータとなる。HIRS, SSU, MSU のデータは，オリジナルデータを利用できる。

(2)　データ抽出

HRPTのデータは，もともと10ビット/1ワードであるが，受信段階で16ビット/1ワード（2バイト/1ワード）に変換されている。1 HRPT minor frameは，AVHRRの1ライン分に相当する。このうち，520ワードにTIPデータが入っている。TIPデータは，HRPT major frame(minor frame 3つ）内では同じデータが入っている。HRPT minor frame内のTIPデータは5つのTIP minor frameを構成している（すなわち，104ワードで1 TIP minor frameである)。TIP dataは8ビット/1ワードで，HRPT minor frameに組み込まれるとき，LSB側に2ビットデータを付加されている。HIRS/2は，TIP minor frameを1 elementとして64個のelementsで1ライン分のデータを構成している。キャリブレーション用のデータは，40ラインに1回（256sec毎に）宇宙空間，内部低温ターゲット，内部高温ターゲットを1ラインづつ測定してデータを取得する。

MSUのデータは，TIP minor frame内に8ビットワードで4つある。MSUデータは8ビットのデータを二つ合わせて16ビットで1ワードである。1ラインは，512ワードであるが，112ワードだけが有効データである。8ワードで1グループを構成し14グループが1ライン分に相当する。12，13番目に宇宙空間，内部ターゲットのデータが入っている。

SSUのデータは，16ビット/ワードで，1つのTIP minor frame内に3つデータがある。1スキャンに32秒かかり，1 TIP major frame（320 TIP minor frame分）のデータが必要である。1ラインは，4秒のdwell periodで8回行う。TIP major frame 0及びminor frame 0ではじまるラインは，キャリブレーション用のデータを取得するラインで宇宙空間及び内部ターゲットを観測する。

(3)　データ処理

気象衛星センターのFACOM 230-75のシステム（1987年2月まで）で使用されていたHRPTデータ編集・較正（NVA000）プログラムを気象研究所で使用できるようにした。気象衛星センターの保存用HRPTデータを入力し，指定したAVHRRの1チャンネル，HIRS, SSU, MSUのデータの抽出・較正を行う（Fig. 5.1.1参照)。

気象衛星センターから常にデータの入手ができるとは限らないので，上記プログラム以外に別のプログラムを作成した。AVHRRデータの抽出・較正は，HRPTのminor frameが1ラインに対応しているのと，10ビット/1ワードのデータを16ビット/1ワードに変換してあるのでデータ処理にはほとんど問題はない。

TOVSデータの処理では，入手先データ毎にHRPTデータのフォーマットやTIPデータのワード位置が違うので，まずTIPデータの抽出を行いそれ以降のデータ処理を共通にした（Fig. 5.1.2参照)。TIPデータの抽出の際には，HRPT minor frame内では，同じデータが繰り返される

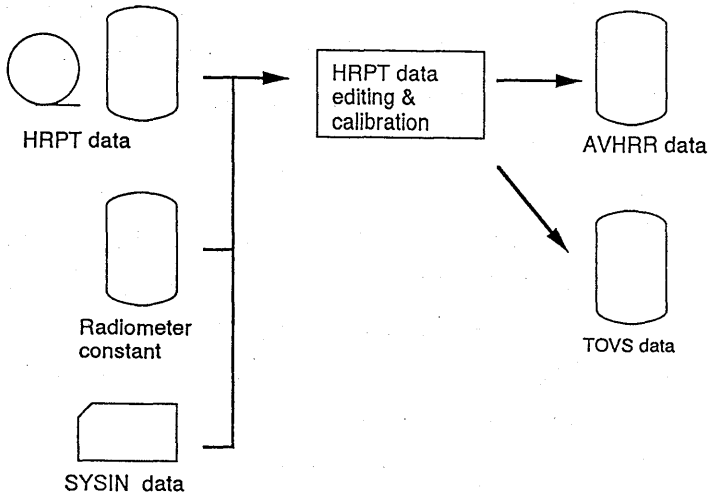

Fig. 5.1.1 AVHRR and TOVS data extraction and calibration processing for HRPT data archived by the Japan Meteorological Agency, Meteorological Satellite Center.

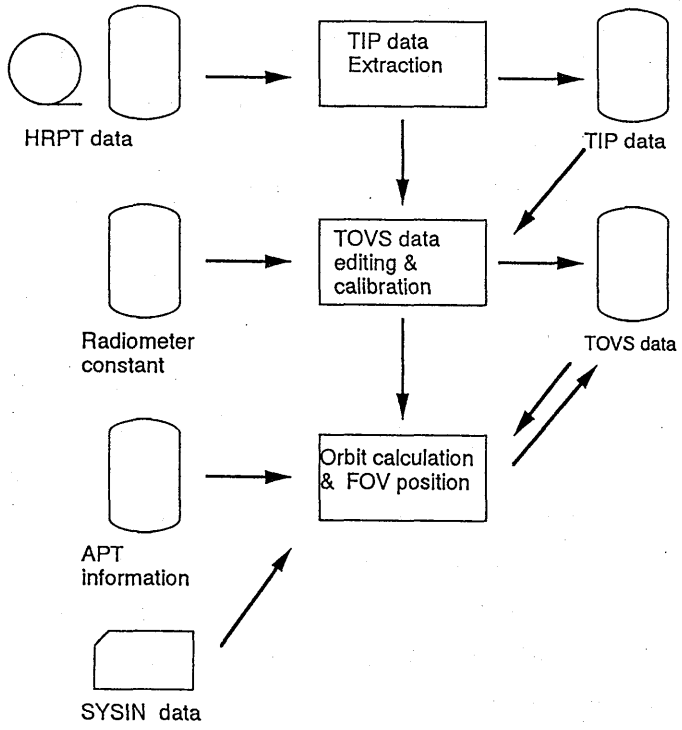

Fig. 5.1.2 Diagram of processing for TOVS data extraction and calibration. Tip data are extracted from HRPT data before the processing of TOVS data extraction and calibration. Satellite orbital data and the table of FOV positions are added to TOVS data.

のでデータのチェックを行う。また，TIPデータは，LSB側に2ビット付加（1ビットは常に1）し，even parityのデータとしてあるので，parityのチェックを行う。このようにして一度抽出したTIPデータを入力してTOVSデータの抽出・較正を行う。

(4)　軌道計算

衛星搭載の各センサーがどこを見ているのかを知るためには，衛星がいつどこにあるかという情報が必要である。NOAA衛星の軌道情報（APT情報）は，GTS回線を通じて米国のNOAAから配信されている。気象衛星センターでは，そのデータを累積保存している。衛星の位置は，APT情報の中のPart IVの軌道6要素を用いて，NOAA Technical Memorandum NESDIS 16（Nagle, 1986）のAppendix C（Brouwer-Lyddane model）を用いて計算できるようにした。このモデルによる計算は，理論とAPT情報内の6要素が適合していないため若干の誤差がある。このための補正方法がNagle（1986）によって示されている。Nagleの方法で補正を行って，APT情報のPart IIの軌道情報と比べた結果では，補正を行っても著しく精度が向上するということはなかったので，ここでは特に補正は行わない。

ここで開発したプログラムにおいては，APT情報をもとに計算した衛星位置と各センサーのFOVの位置の情報をHRPTから抽出したデータに付け加えデータ利用の際の利便を図った。軌道情報は，10秒間隔の衛星位置をデータに付加した。FOVの位置は，AVHRRの場合100ラインおきに1ライン10ピクセルぐらいで位置を計算し，テーブルとしてデータに付加した。衛星位置の内挿，FOV位置の内挿方法はAppendix 5.1.A, 5.1.Bを参照されたい。

5.1.4　利　用　例

(1)　AVHRR, HIRSの表示例

上記のプログラムによって，HRPTから較正済みでFOVの位置が計算できるデータセットができる。これらを利用することによってAVHRR画像などを容易に描ける。クイック・ルック用にAVHRR等のデータを表示するプログラムを作成したので，それによる出力例を以下に示す。

横軸にスキャン方向，縦軸にライン方向をとって表示した図をFig. 5.1.3に示した。図には緯度・経度線を重ねて表示してある。FOVの位置のテーブルを使って（ライン，ピクセル）と（緯度，経度）の変換ができるので元のデータを任意の地図に重ねて表示することもできる。Fig. 5.1.4に1989年6月22日の13：00（JST）に日本上空を南から北に通過して行ったNOAA-11によるAVHRR及びHIRSの観測値を地図に重ねて示した。

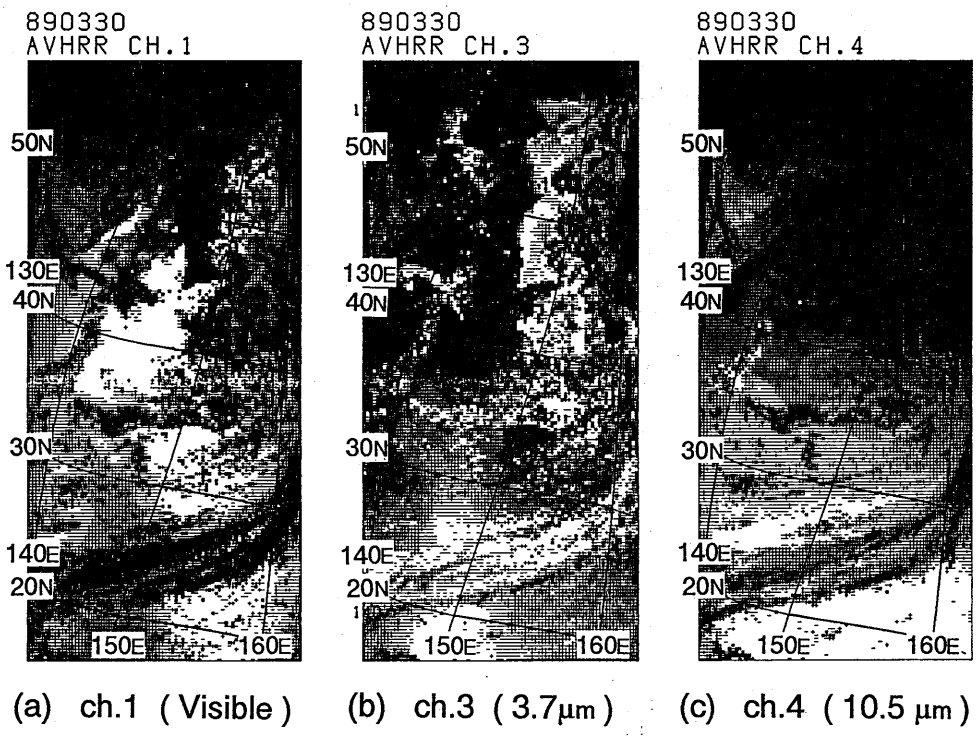

Fig. 5.1.3 Examples of AVHRR image. The abscissa is the scan direction and the ordinate is the direction of satellite movement. The brightness levels in the images are relative values. (a) AVHRR ch. 1 (visible), (b) AVHRR ch. 3 (3.7 μm), (c) AVHRR ch. 4 (10.5 μm). In the image (a), the darker parts mean higher reflectance. In the images (b) and (c), the darker parts mean lower brightness temperature. Latitude and longitude lines are drawn on the image.

(2) 軌道計算プログラムの利用例

HRPTデータ編集・較正プログラムとともに作成した軌道計算プログラムは精度はそれほど良くないが簡単に計算できるので，航空機観測，地上観測の際NOAAの軌道，通過時間，通過方向の予測に利用し観測の実施方法の決定の資料にした。例えば，1989年6月22日のNOAA-11の軌道（sub-satellite pointの位置）を示すとFig. 5.1.5のようになる。実線で囲まれた領域はAVHRRの観測域，破線で囲まれた領域はHIRSの観測域である。図の中の時刻はUTCである。

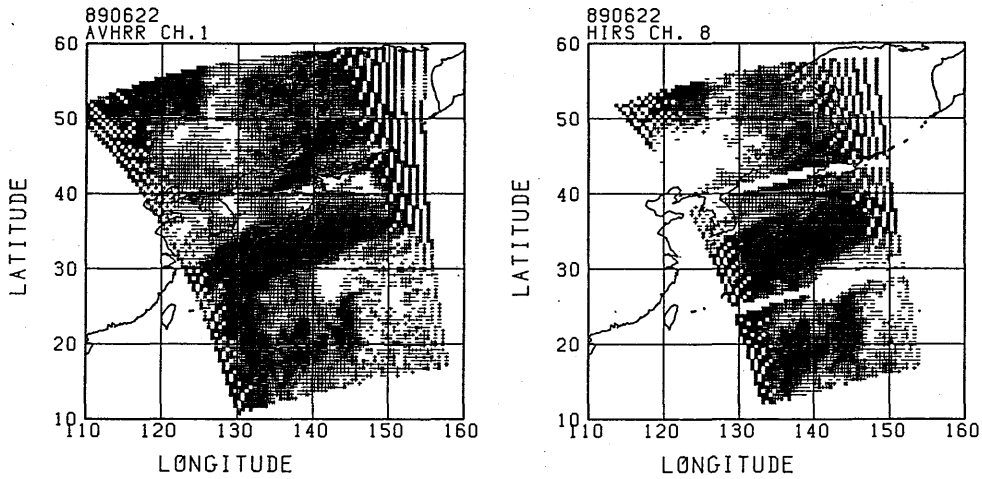

Fig. 5.1.4 AVHRR ch. 1 image and HIRS ch. 8 image. The resolution of image is reduced to 0.25° × 0.25° (longitude × latitude). The images are projected onto the geographical map. The (line, pixel) position is converted to (longitude, latitude) position using the precalculated table and the method shown in Appendix 5.1.B.

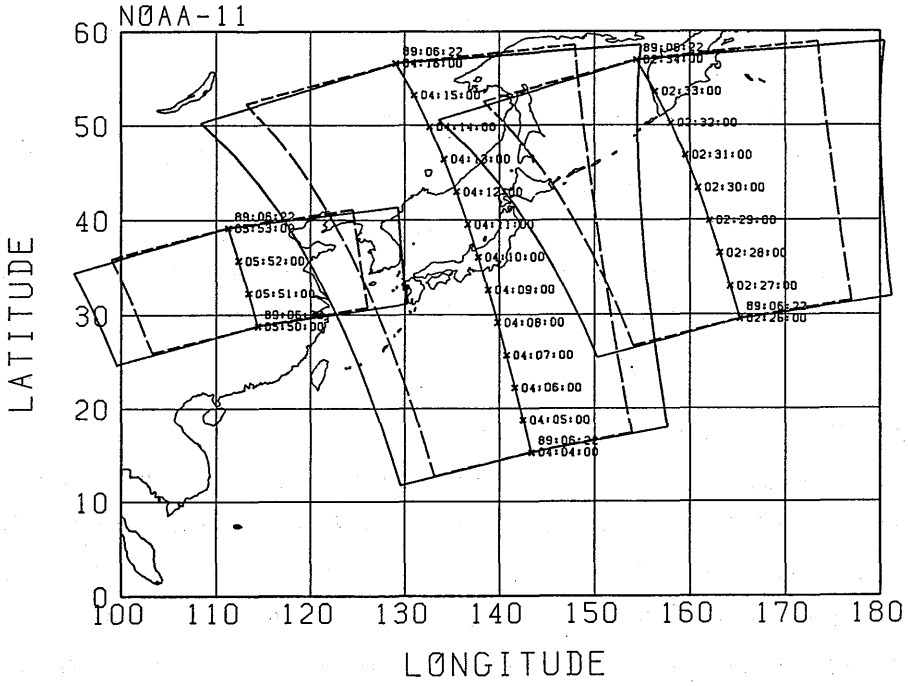

Fig. 5.1.5 An example of NOAA-11 orbital sub-satellite points once every minute. The unit of time is UTC. The area enclosed with solid lines and broken lines can be observed by the AVHRR and the HIRS sensors, respectively.

5.1.5 まとめ

NOAA衛星のデータは，容易に入手でき，継続性があり，多チャンネルのデータである等の利点があり，その有効利用を図ることは気候研究にとって有益であるので，そのデータを扱うためのプログラムの整備を行った。

現在，日本国内でHRPTデータの入手が比較的容易な気象衛星センター，東北大学大気海洋変動観測研究センター，国立極地研究所のHRPTの保存データの処理ができるようになった（ただし，国立極地研究所のデータはTOVS処理のみ)。同時に，FOVの観測位置を計算するためのプログラムも開発した。これにより，AVHRR, HIRS等のデータを定量的に利用できることになった。今後，ここで開発されたプログラムによるデータ利用を進める必要がある。

Appendix 5.1.A　衛星位置の内挿

時刻 t_1 と t_2 の衛星位置を$\overrightarrow{V_{ST1}}$，$\overrightarrow{V_{ST2}}$とする。t_1 と t_2 の時間間隔は，短いとする。軌道面を$\overrightarrow{V_{ST1}}$と$\overrightarrow{V_{ST2}}$を含む平面とする。時刻t（$t_1<t<t_2$）の衛星の方向は，$\overrightarrow{V_{ST1}}$を$\Delta\theta$だけ軌道面上で回転した方向とする。$\Delta\theta$は，$\overrightarrow{V_{ST1}}$と$\overrightarrow{V_{ST2}}$のなす角を時間に比例させ配分する。衛星高度も，時間に対して線形に内挿する。

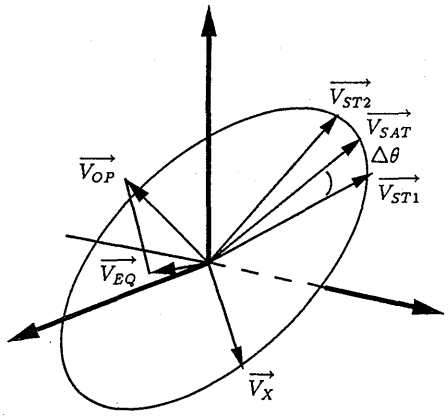

Fig. 5.1.A.1 Interpolation of satellite position. $\overrightarrow{V_{OP}}$ is a vector perpendicular to the orbital plane. $\overrightarrow{V_{EQ}}$ is the projection of $\overrightarrow{V_{OP}}$ onto the plane of the equator. $\overrightarrow{V_X}$ is a vector lying along the intersection of the orbital and equatorial planes. The direction of satellite position $\overrightarrow{V_{SAT}(t)}$ is calculated by rotating the $\overrightarrow{V_{ST1}}$ vector by $\Delta\theta$ on the orbital plane.

軌道面の回転は，次のようにして行う。軌道面に垂直なベクトル$\overrightarrow{V_{OP}}$は次のように与えられる。

$$\overrightarrow{V_{OP}} = \frac{\overrightarrow{V_{ST1}} \times \overrightarrow{V_{ST2}}}{|\overrightarrow{V_{ST1}}| \cdot |\overrightarrow{V_{ST2}}|}$$

$\overrightarrow{V_{OP}}$ の赤道面への斜影を $\overrightarrow{V_{EQ}}$ とすると，次の式で表せる。

$$\overrightarrow{V_{EQ}} = (V_{OP}(1), V_{OP}(2), 0).$$

赤道面と軌道面の交線の方向は，次の式で表せる。

$$\overrightarrow{V_X} = \frac{\overrightarrow{V_{OP}} \times \overrightarrow{V_{EQ}}}{|\overrightarrow{V_{OP}}| \cdot |\overrightarrow{V_{EQ}}|}$$

$\overrightarrow{V_X}$，$\overrightarrow{V_{OP}}$ に垂直な単位ベクトルは，次の式で与えられる。

$$\overrightarrow{V_Y} = \overrightarrow{V_{OP}} \times \overrightarrow{V_{EQ}}$$

A, Rot を以下のように定義する。

$$A \equiv \begin{pmatrix} V_X(1) & V_Y(1) & V_{OP}(1) \\ V_X(2) & V_Y(2) & V_{OP}(2) \\ V_X(3) & V_Y(3) & V_{OP}(3) \end{pmatrix}, \qquad Rot \equiv \begin{pmatrix} \cos\Delta\theta & -\sin\Delta\theta & 0 \\ \sin\Delta\theta & \cos\Delta\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

これらを使って，内挿した方向は，次式で与えられる。

$$\overrightarrow{V_{SAT}} = A \cdot Rot \cdot A^t \cdot \overrightarrow{V_{ST1}},$$

ここで，A^t は行列 A の転置行列である。$\Delta\theta$ は，次式で与える。

$$\Delta\theta = \frac{t-t_1}{t_2-t_1}\theta,$$

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{\overrightarrow{V_{ST1}} \cdot \overrightarrow{V_{ST2}}}{|\overrightarrow{V_{ST1}}|\ |\overrightarrow{V_{ST2}}|}\right).$$

衛星高度は，次式で与える。

$$r = \frac{t-t_1}{t_2-t_1}(|\overrightarrow{V_{ST2}}| - |\overrightarrow{V_{ST1}}|) + |\overrightarrow{V_{ST1}}|$$

Appendix 5.1.B　視野方向の内挿

視野（FOV：Field of View）方向の内挿は，100ラインおきに，1ラインあたり10程度のピクセルに対してFOVの位置を計算し，テーブルとしてAVHRRデータファイルに付け，そのテーブルを内挿することによってFOVの位置を計算する。1ピクセル毎にFOVの位置を正確に計算することは時間がかかり無駄であるので，テーブルを内挿する。

ライン間の内挿は線形に行っても誤差は問題になる程度でないが，スキャン方向の位置は，多

少工夫を要する。J_1 ライン上の I_1 ピクセルと I_2 ピクセルの間の I ピクセルの位置を内挿するとする。地球の中心と衛星を結ぶ方向と地球の中心と地球上の FOV の位置を結ぶ方向のなす角を $\beta(I)$ とする。この $\beta(I)$ を重みに FOV の方向を内挿する。

$$\frac{\boldsymbol{r}}{|\boldsymbol{r}|}=\frac{\beta(I)-\beta(I_1)}{\beta(I_2)-\beta(I_1)}\cdot\frac{\boldsymbol{r}_2}{|\boldsymbol{r}_2|}+\frac{\beta(I_2)-\beta(I)}{\beta(I_2)-\beta(I_1)}\cdot\frac{\boldsymbol{r}_1}{|\boldsymbol{r}_1|}.$$

$\beta(I)$ は，ノミナルな高度または，問題としている時間内の平均高度を使い，地球を球と仮定してあらかじめ計算しておく。この方法による内挿誤差は1ピクセル以内である。

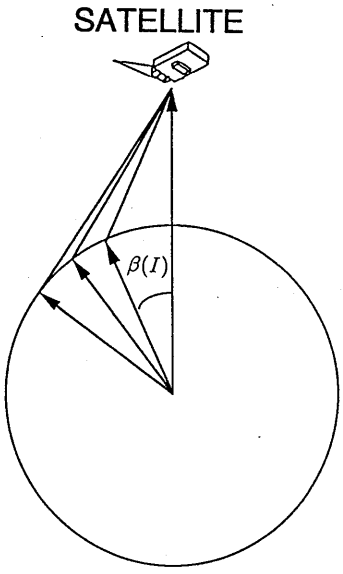

Fig. 5.1.B.1 Relation between the satellite position and FOV on the earth. β is an angle between the satellite position vector and FOV position vector.

参 考 文 献

中島 忍・青木忠生，1983：HRPT データの編集・較正．TOVS データ処理システムの解説（第3章），気象衛星センター技術報告特別号，25-48.

Kidwell, K. B., 1988：NOAA Polar orbiter data (TIROS-N, NOAA-6, NOAA-7, NOAA-8, NOAA-9, NOAA-10, NOAA-11) users guide. NOAA NESDIS, National Climate Data Center, Satellite data Services Division, Washington, D. C.

Lauritson, L., G. J. Nelson and F. W. Porto, 1979：Data extraction and calibration of TIROS-N/NOAA radiometers. NOAA Technical Memorandum NESS 107, NOAA NESS Washington, D. C.

Nagle, F. W., 1986：A description of prediction errors associated with the T-BUS-4 navigation

message and a corrective procedure. NOAA Technical Memorandum NESDIS 16, 28pp., NOAA NESDIS, Washington, D. C.

Plenet, W. G., 1988 : Data extraction and calibration of TIROS-N/NOAA radiometers. NOAA Technical Memorandum NESS 107-Rev.1, 120pp., NOAA NESDIS, Washington, D. C.

Schwalb, A., 1978 : The TIROS-N/NOAA A-G satellite series. NOAA Technical Memorandum NESS 95, 75pp., NOAA NESS, Washington, D. C.

Schwalb, A., 1982 : Modified version of the TIROS-N/NOAA A-G satellite series (NOAA E-J)-Advanced TIROS-N (ATN). NOAA Technical Memorandum NESS 116, 23pp., NOAA NESS, Washington, D. C.

5.2　衛星の赤外域の波長でみた雲*
(Infrared view of clouds using the instruments on NOAA series satellite)

5.2.1　序

巻層雲など上層の氷雲を対象とした地上観測では，観測を実施したときは，NOAA等の衛星データを収集・解析し，巻層雲からの上向き放射の特性を調べた。巻雲の総合観測の際に得られた衛星データは，雲の放射特性を明らかにするためだけでなく，リモート・サウンディングの研究の基礎資料ともなる。現在，雲のパラメータとしては，例えば，ISCCPでは雲量，雲頂高度，雲頂温度，(可視の) 光学的厚さなどが赤外と可視のそれぞれ1チャンネルの衛星データから抽出されている (Schiffer and Rossow, 1983)。一般に，衛星からのリモート・サウンディングは，観測対象の光学的性質の違いを利用して行う。衛星に到達する電磁波は伝達していく途中で地表面・海面，大気中に浮遊する物質，大気と相互作用しながら衛星に到達する。そのため一波長だけで途中の光路の影響を取り除いて観測対象についてだけの情報を抽出することは困難である。より正確により多くの情報を得るには多波長による観測が不可欠である。

ここでは，1989年6月30日の地上観測の際に得られたNOAA衛星のデータについて，定量的な解析の前段階としてNOAA衛星のサウンディング用のチャンネルではどのように見えているか，すなわち，赤外域の多波長による観測値に雲の物理特性 (粒径，相 (水・氷)，雲水・雲氷量など) の違いを反映した差が検出されているかどうかという視点で，赤外チャンネルによる雲パラメータの抽出の可能性について調べた。

5.2.2　NOAAシリーズに搭載されているサウンディング用放射計の特徴

サウンディング用の測器は，TOVS (TIROS Operational Vertical Sounder) と呼ばれ三つの測器から成っている。それらの三つとは，HIRS/2 (High resolution Infrared Radiation Sounder)，MSU (Microwave Sounding Unit)，SSU (Stratospheric Sounding Unit) である。TIROS-N, NOAAシリーズのサウンディング用の放射計の各チャンネルの特徴について簡単にまとめたものがTable 5.2.1 (Smith *et al.*, 1979) である。これらの測器はもともとは大気の鉛直温度・水蒸気分布を推定するための機器であり，これらがすべて雲パラメータの推定に役立つわけではない。MSUは雲域での鉛直温度分布の推定 (即ち，雲の影響をあまり受けない)，SSUは成層圏の温度分布の推定のための測器であるので，ここではMSUとSSUのデータについては調べない。

＊　内山明博 (A. Uchiyama)

HIRSのch. 1～ch. 7は，CO_2の15 μm帯の中心から10 μmの大気の窓にかけてCO_2の吸収がだんだん弱くなるように選ばれた鉛直温度分布推定用のチャンネルである。Ch. 8は，赤外域の大気の窓のチャンネルであり，ch. 9はオゾンの9.6 μm帯のチャンネルである。Ch. 10～ch. 12は，水蒸気の鉛直分布とCO_2のチャンネル，窓のチャンネルに対する水蒸気の補正のためのチャンネルである。Ch. 13～ch. 17は，CO_2の4.3 μm帯の中心へ向かって吸収が大きくなるよう選ばれた鉛直温度分布推定用のチャンネルである。Ch. 18, ch. 19も，吸収の少ない窓であるが，日中は太陽放射の影響を受ける。Ch. 20は，可視域のチャンネルである。

Table 5.2.1　Characteristics of TOVS channels (Smith *et al.*, 1979).

HIRS Channel number	Channel central wavenumber	Central wavelength (μm)	Principal absorbing constituents	Level of peak energy contribution	Purpose of the radiance observation
1	668	15.00	CO_2	30 mb	*Temperature sounding.* The 15-μm band channels provide better sensitivity to the temperature of relatively cold regions of the atmosphere than can be achieved with the 4.3-μm band channels. Radiances in Channels 5, 6, and 7 are also used to calculate the heights and amounts of cloud within the HIRS field of view.
2	679	14.70	CO_2	60 mb	
3	691	14.50	CO_2	100 mb	
4	704	14.20	CO_2	400 mb	
5	716	14.00	CO_2	600 mb	
6	732	13.70	CO_2/H_2O	800 mb	
7	748	13.40	CO_2/H_2O	900 mb	
8	898	11.10	Window	Surface	*Surface temperature* and cloud detection.
9	1 028	9.70	O_3	25 mb	*Total ozone* concentration.
10	1 217	8.30	H_2O	900 mb	*Water vapor sounding.* Provides water vapor corrections for CO_2 and window channels. The 6.7-μm channel is also used to detect thin cirrus cloud.
11	1 364	7.30	H_2O	700 mb	
12	1 484	6.70	H_2O	500 mb	
13	2 190	4.57	N_2O	1 000 mb	*Temperature sounding.* The 4.3-μm band channels provide better sensitivity to the temperature of relatively warm regions of the atmosphere than can be achieved with the 15-μm band channels. Also, the short-wavelength radiances are less sensitive to clouds than those for the 15-μm region.
14	2 213	4.52	N_2O	950 mb	
15	2 240	4.46	CO_2/N_2O	700 mb	
16	2 276	4.40	CO_2/N_2O	400 mb	
17	2 361	4.24	CO_2	5 mb	
18	2 512	4.00	Window	Surface	*Surface temperature.* Much less sensitive to clouds and H_2O than the 11-μm window. Used with 11-μm channel to detect cloud contamination and derive surface temperature under partly cloudy sky conditions. Simultaneous 3.7- and 4.0-μm data enable reflected solar contribution to be eliminated from observations.
19	2 671	3.70	Window	Surface	
20	14 367	0.70	Window	Cloud	*Cloud detection.* Used during the day with 4.0- and 11-μm window channels to define clear fields of view.

MSU	Frequency (GHz)	Principal absorbing constituents	Level of peak energy contribution	Purpose of the radiance observation
1	50.31	Window	Surface	*Surface emissivity* and *cloud attenuation* determination.
2	53.73	O_2	700 mb	*Temperature sounding.* The microwave channels probe through clouds and can be used to alleviate the influence of clouds on the 4.3- and 15-μm sounding channels.
3	54.96	O_2	300 mb	
4	57.95	O_2	90 mb	

SSU	Wavelength (μm)	Principal absorbing constituents	Level of peak energy contribution	Purpose of the radiance observation
1	15.0	CO_2	15.0 mb	*Temperature sounding.* Using CO_2 gas cells and pressure modulation, the SSU observes thermal emissions from the stratosphere.
2	15.0	CO_2	4.0 mb	
3	15.0	CO_2	1.5 mb	

荷重関数（weighting function）は，Fig. 5.2.1（Smith *et al.*, 1979）の様になっている。HIRSのch. 1～ch. 3, ch. 17は，圏界面付近より上からの寄与が大きく対流圏の雲の検出には使えないことが推測できる。Ch. 4, ch. 5, ch. 12などは，下層に雲があっても検出できないことになるが，このことは逆に，下層に雲があってもその影響を受けることなく上層の雲だけを観測できることになる。

NOAA-11, -10のAVHRRとHIRSの各チャンネルの応答関数（responce function）を図示すると，Fig. 5.2.2 (a), (b), (c)の様になる。NOAA-11のHIRSのch. 10とch. 17は，Table 5.2.1の位置とは違っておりそれぞれ波数796 cm^{-1}（波長12.6 μm）と波数2416 cm^{-1}（波長4.14 μm）の

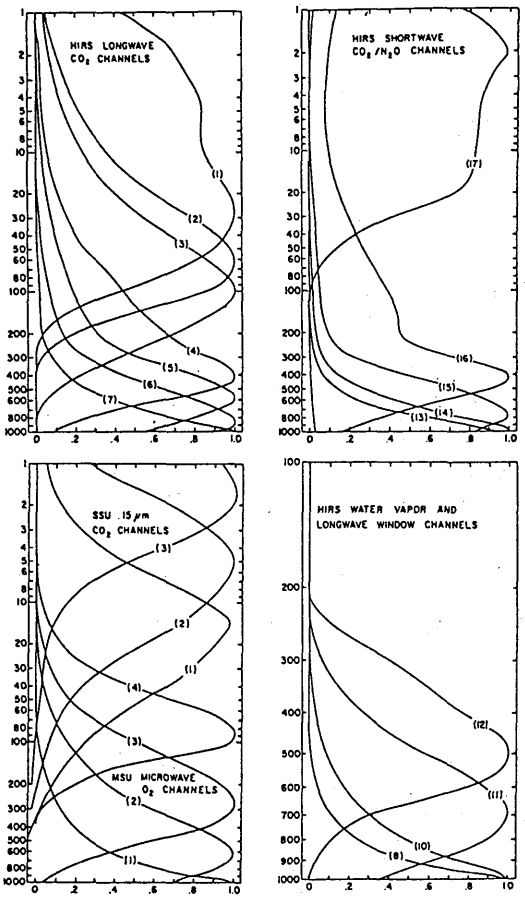

Fig. 5.2.1 Weightings function of TOVS channels (Smith *et al.*, 1979).

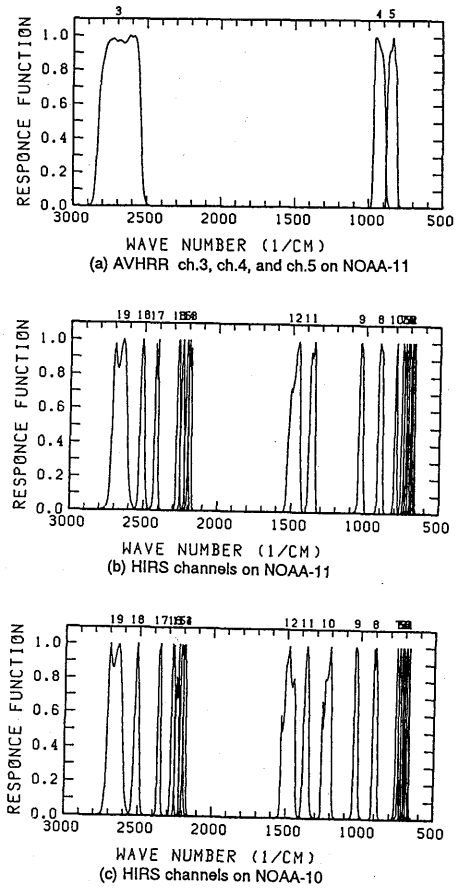

Fig. 5.2.2 Response functions of the sensor on NOAA-11 and NOAA-10. (a) AVHRR ch. 3, ch. 4 and ch. 5 on NOAA-11, (b) HIRS channels on NOAA-11, (c) HIRS channels on NOAA-10.

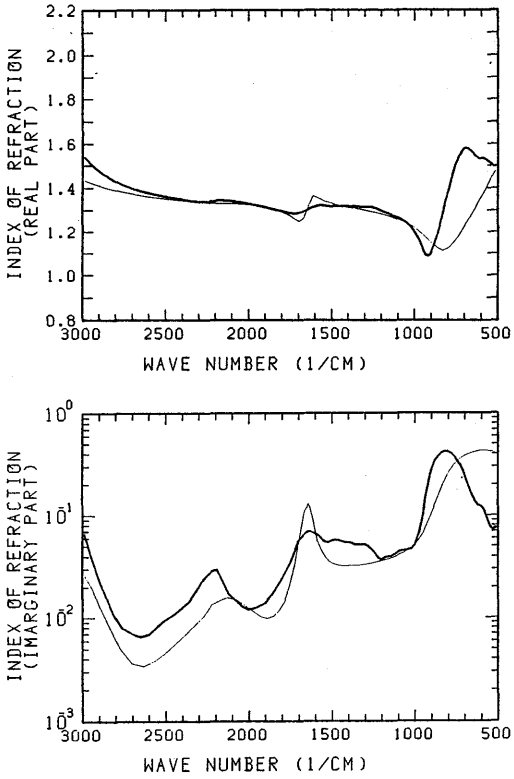

Fig. 5.2.3 Index of refraction. The upper is the real part of refractive index and the lower is the imaginary part. Thick solid line is refractive index of ice (Warren, 1984) and thin solid line is that of water (Hale and Querry, 1973).

位置にある（TIROS-N, NOAA-6～10はTable 5.2.1の位置である）。AVHRRのch. 3～ch. 5の応答関数も示したが，ch. 3はHIRSのch. 19に，AVHRRのch. 4, ch. 5はHIRSのch. 8に相当する。

雲の光学的性質を決める要素の一つである水・氷の複素屈折率（虚数部は，吸収に関与する量）をFig. 5.2.3に示した。AVHRRのch. 4とch. 5の位置は，屈折率が大きく変化する領域にあり少ないチャンネルで情報を抽出するには，よい組合せである。HIRSのch. 4～ch. 7は，チャンネル間の波数間隔が狭いが水と氷で屈折率の変化のしかたが違うので，水雲と氷雲の識別に役に立つかも知れない。

5.2.3　観測例（1989年6月30日）

1989年6月30日13時25分頃（日本時間）日本上空を南から北へ通過したNOAA-11の例について衛星から上層の氷雲がどのように見えるか調べる。この日は，筑波で巻層雲の地上観測を行っ

ており，確かに筑波上空を含め日本付近に巻層雲がでていた。Fig. 5.2.4 (a), (b), (c) に，その時のAVHRRのch. 4, ch. 1, ch. 3の観測値を地図に重ねて示した（表示は8階調の相対値である)。Fig. 5.2.4 (a), (c) は，黒いほど輝度温度（T_{BB}）が低い。Fig. 5.2.4 (b) は，可視画像で黒いほど反射光の強度が強い。この図から分かるように関東，北陸，中国地方にかけて上層の雲がかかっており筑波では巻層雲が観測された。この時HIRSで観測された値をFig. 5.2.5に示した（表示は8階調の相対値であり，黒いほど輝度温度（T_{BB}）が低い)。横軸がスキャン（ピクセル）方向，縦軸が進行（ライン）方向である（図の上方が北，下方が南，左方が西，右方が東)。図の途中にある白い帯は放射計の較正のためのデータ（宇宙空間と内部ターゲットを見ている）を取っているためデータがない。

HIRSのch. 1, ch. 2では圏界面より上しか見えないので雲はほとんど見えない。成層圏は上ほど温度が高いのでLimbほど輝度温度が高く（白く）なっている。また，圏界面付近は極に近いほど温度が高いので図の上ほど輝度温度が高く（白く）なっている。Ch. 3では一部雲が図の中央部に見えてくる。Ch. 4, ch. 5, ･･･, ch. 8とすすむにつれてだんだん下層までが見えるようになる(図は相対値で示してあるのでだんだん下まで見える様子はあまりはっきりしない)。Ch. 4～ch. 8の観測値は，Limbの輝度温度が低い（黒い)。これは対流圏では上層ほど気温が低いからである。HIRSのch. 8は，前述のようにAVHRRのch. 4, ch. 5に相当する。HIRSのch. 9はオゾンの9.6 μm帯を観測しているが，かなり下層大気の影響を受けている。HIRSのch. 11, ch. 12は，水蒸気の影響を受けるので，全体に雲の輪郭がはっきりしない。HIRSのch. 13～ch. 16は徐々に上しか見えなくなる。HIRSのch. 18, ch. 19は表面まで見えるチャンネルである。Ch. 19の図の左下方の輝度温度が高い（白い）ところは，太陽放射が海面によって反射されているところである（Sun glint)。

Fig. 5.2.4の中の経度130° Eと134° E，緯度35° Nと37° Nで囲まれた領域について詳しく見てみる。この領域の中には筋状の比較的光学的に厚い部分とその周りに光学的に薄い部分や晴天域が見られる。この領域の中をFig. 5.2.4 (a) と (b) で見比べると，赤外で輝度温度が低い（黒い）にもかかわらず可視で反射が小さく，巻層雲の特徴がよく見える。AVHRRのch. 4とch. 5の輝度温度の差（$\Delta T_{BB} = T_{BB}$ (ch. 4)$-T_{BB}$ (ch. 5)）を取ってFig. 5.2.6に示した（黒いほど差が大きい)。この図より分かるように筋状の部分の南側に差が大きいところがあり最大約8°Kである，筋状の部分での輝度温度の差は小さく最大2～3°Kである。

この領域について，横軸にch. 4の輝度温度，縦軸に輝度温度差（T_{BB} (ch. 4)$-T_{BB}$ (ch. 5)）をプロットしたものをFig. 5.2.7に理論計算値とともに示した。この様なプロットでは，雲の微物理量が変わないとき光学的厚さの変化とともにアーチ状の曲線上に点が乗ることが知られている（Yamanouchi *et al.*, 1987; Inoue, 1985; Prabhakara *et al.*, 1988)。Fig. 5.2.7の点は二つのグループに分けられる。一つは，ch. 4のT_{BB}が250～260K付近にΔT_{BB}が2～3°Kの最大値を持つ

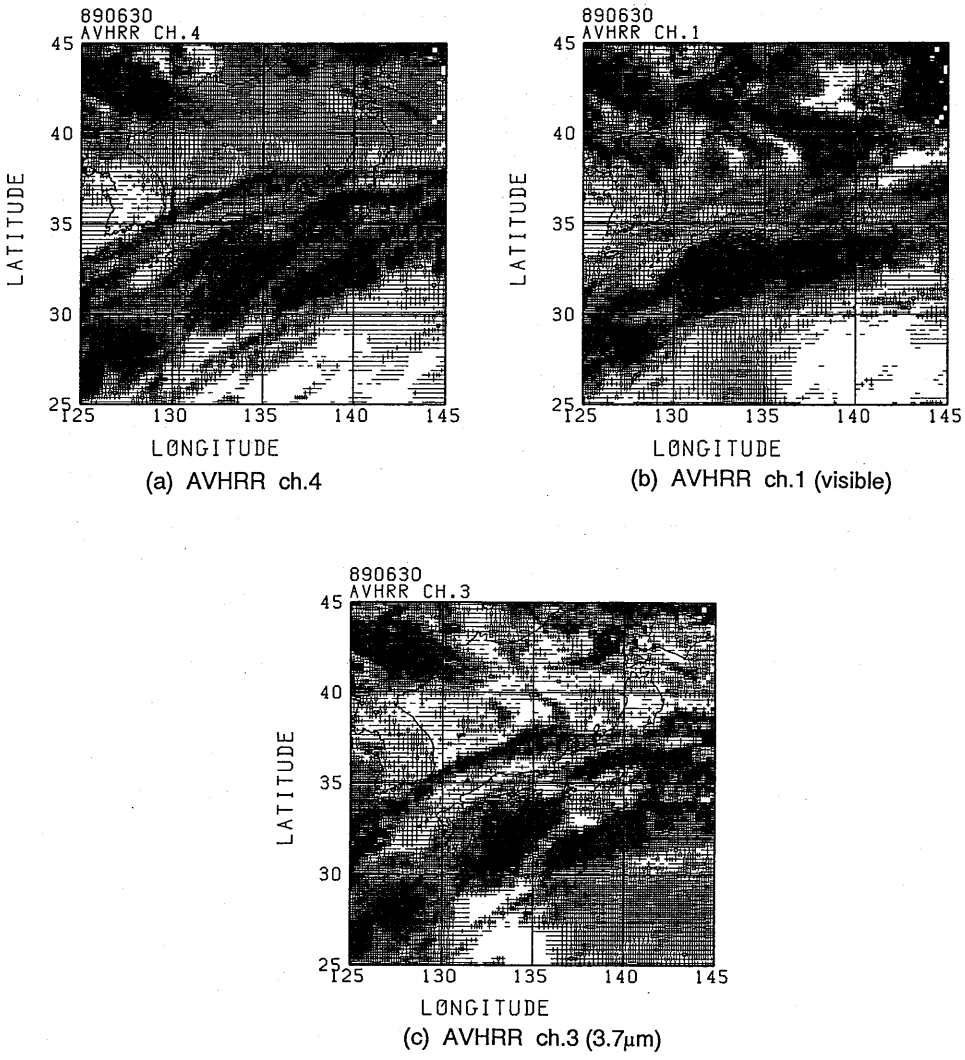

Fig. 5.2.4 AVHRR ch. 4, ch. 1 and ch. 3 images in the region of 125° E to 145° E and 25° N to 45° N. In the images of (a) and (b), the darker parts mean lower brightness temperature. In the image of (c), the darker parts mean higher reflectance. The rectangular region (130° E to 134° E, 35° N to 37° N) in the image is investigated in detail. (a) AVHRR ch. 4, (b) AVHRR ch. 1 (visible), (c) AVHRR ch. 3 (3.7 μm).

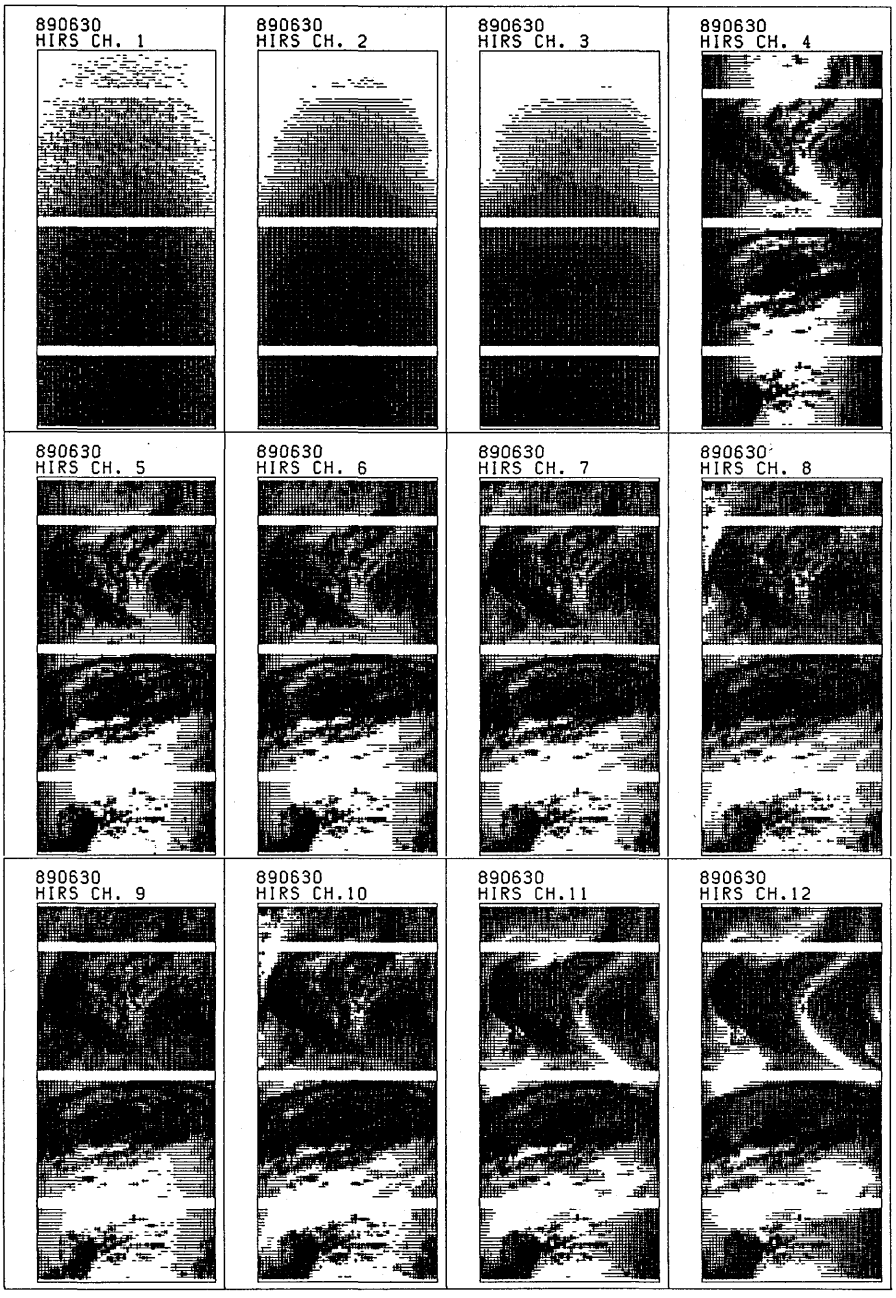

Fig. 5.2.5 NOAA-11 HIRS channels brightness temperature images. The darker parts mean more lower brightness temperature. The abscissa is the scan direction and the ordinate is the direction of satellite movement. The brightness levels in the images are relative values and the differences among the peaks of weighting functions cannot be clearly recognized. The last figure shows the longitude and latitude lines.

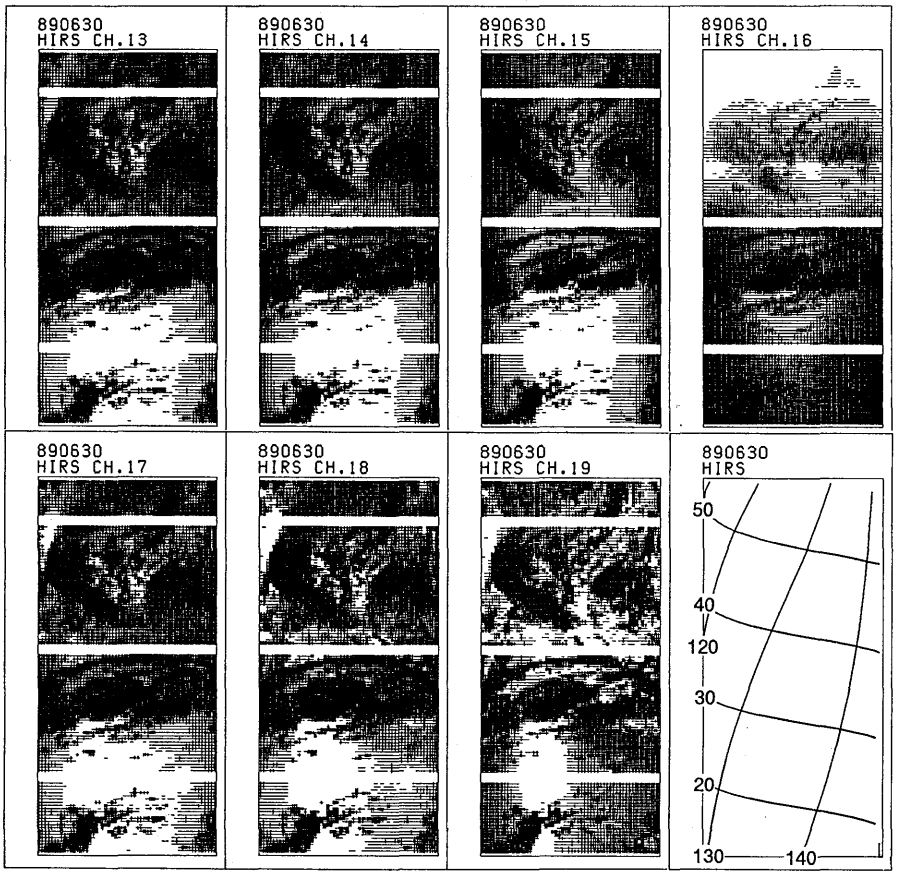

Fig. 5.2.5　(Continued.)

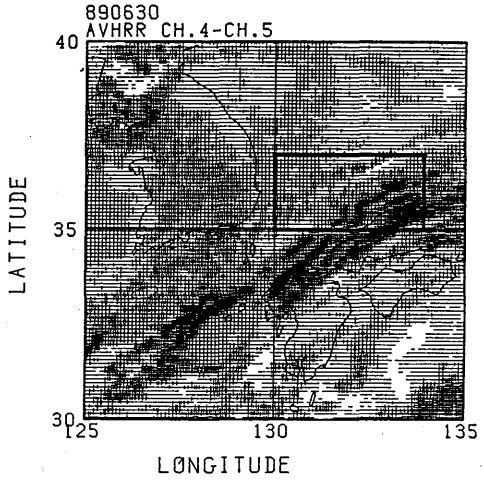

Fig. 5.2.6 The T_{BB} differences between AVHRR ch. 4 and ch. 5. The daker parts mean more large difference of T_{BB} ($\Delta T_{BB} = T_{BB}$ (ch. 4)$-T_{BB}$ (ch. 5)).

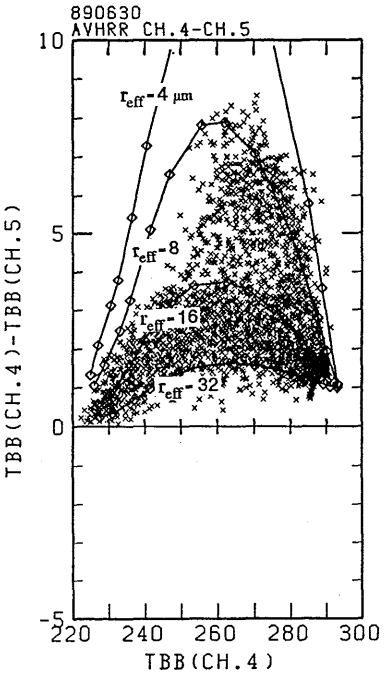

Fig. 5.2.7 Scatter plot of T_{BB} and ΔT_{BB} in the region of 130° E to 134° E, 35° N to 37° N. The abscissa is T_{BB} of the AVHRR ch. 4 and the ordinate is the difference of T_{BB} between ch. 4 and ch. 5. The AVHRR data in 3 lines × 3 pixels are averaged. Solid lines with diamonds are values calculated theoretically. r_{eff} is an effective radius of the log-normal size distribution.

アーチと，もう一つはch. 4のT_{BB}が265K付近にΔT_{BB}が約8°Kの最大値を持つアーチ（こちらのアーチはch. 4の輝度温度が低いところには点が無い）の二つがある。前者のアーチは筋状の雲に対応したものであり，後者のアーチは筋状の雲の南側の雲域に対応したものである。理論計算値と比べると，前者は有効半径r_{eff}=16 μmとr_{eff}=32 μmで計算したものの間に点があり，後者は8 μmの計算値の前後にある。このように，この二つのグループの存在は，雲の物理特性の違いに起因するもので，以下では，このような差違がHIRSの各チャンネルの輝度温度の差にも見えるかどうかという視点で調べる。波長の位置が多少ずれているが，AVHRRのch. 4とch. 5に対応している組合せはNOAA-11のHIRSではch. 8とch. 10である。横軸にch. 8の輝度温度，縦軸に輝度温度差（T_{BB} (ch. 8)−T_{BB} (ch. 10)）をプロットするとFig. 5.2.8のようになる。HIRSのch. 10の波数位置ではAVHRRのch. 5より吸収が大きいので晴天域に対応したところで温度差が大きい（約4～5°K）が同じように二つの部分に分かれる。

同様の図を隣合ったチャンネルごとに作るとFig 5.2.9の様になる。横軸は基準とするチャンネルの輝度温度，縦軸は基準とするチャンネルの輝度温度から比較するチャンネルの輝度温度を引

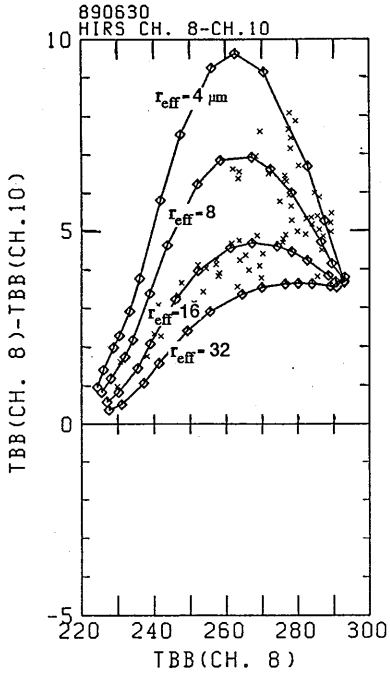

Fig. 5.2.8 As in Fig. 5.2.7 but for HIRS ch. 8 and ch. 10. The abscissa is T_{BB} of the HIRS ch. 8 and the ordinate is the difference of T_{BB} between ch. 8 and ch. 10.

いたものである。隣合ったチャンネルの差を取るのは，大気の影響を減じるためであるが，荷重関数のピークに差があるので，晴天域に対応したところでもかなりの差がある。Ch. 9は，オゾンの影響を受けているので，ch. 9は基準のチャンネルには使わず，ch. 10を基準にしてch. 8と比較した。Ch. 1～ch. 3にはもともと雲の情報がほとんどないので，狭い範囲にデータが固まっている。T_{BB} (ch. 4)$-T_{BB}$ (ch. 3)になると雲の情報が含まれるようになり二種類の雲に対応してデータが分散するようになる。T_{BB} (ch. 5)$-T_{BB}$ (ch. 4)，T_{BB} (ch. 6)$-T_{BB}$ (ch. 5)，T_{BB} (ch. 7)$-T_{BB}$ (ch. 6) となるにつれてデータが二つのグループに分かれるのがはっきりしてくる。すなわち，AVHRRのch. 4とch. 5の輝度温度差に見られたようにHIRSのチャンネル間にも同様の差がみられる。これらの差の傾向は，独立した情報か，それとも冗長な情報でしかないのか，今後調べる必要がある。T_{BB} (ch. 8)$-T_{BB}$ (ch. 7)の値はばらついており，はっきりとは二つのグループに分けることはできない。これは何か別の情報を含んでいる可能性がある。T_{BB} (ch. 8)$-T_{BB}$ (ch. 9)は，二つに分かれているがch. 9を解析に使うにはオゾンの鉛直分布が必要になる。T_{BB} (ch. 11)$-T_{BB}$ (ch. 10)は，二つに分かれているが，T_{BB} (ch. 12)$-T_{BB}$ (ch. 11)は，二つのグループに分けることはできない。Ch. 11, ch. 12は，水蒸気の鉛直分布にも依存するので，水蒸気の空間分布

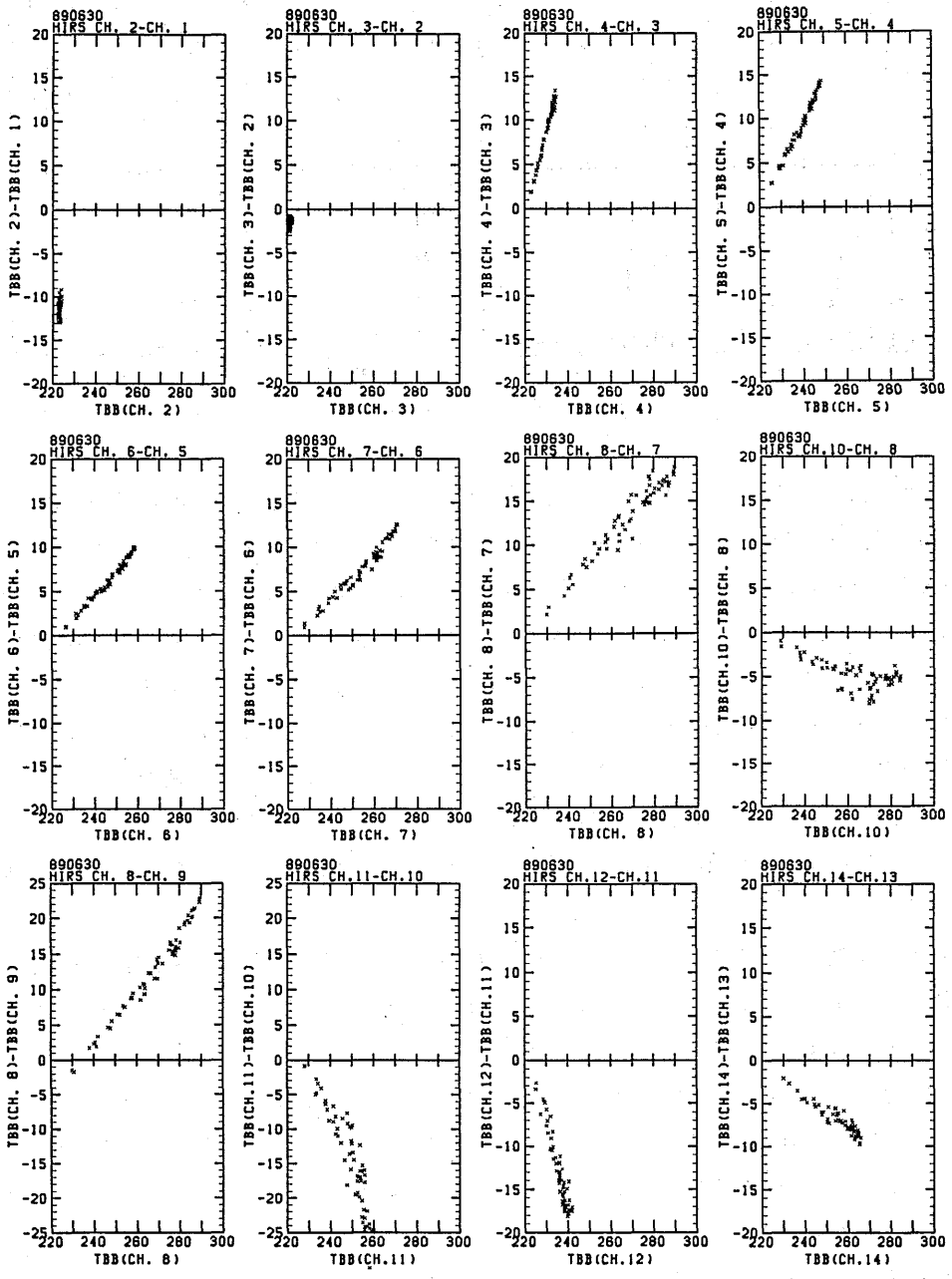

Fig. 5.2.9 Scatter plot of T_{BB} and ΔT_{BB} for HIRS channels. Brightness temperature differences between the adjacent channels are calculated in order to reduce atmospheric effect. $\Delta T_{BB} = T_{BB}$ (ch. 12)$-T_{BB}$ (ch. 13) and $\Delta T_{BB} = T_{BB}$ (ch. 17)$-T_{BB}$ (ch. 16) are not shown because of large differences of T_{BB}.

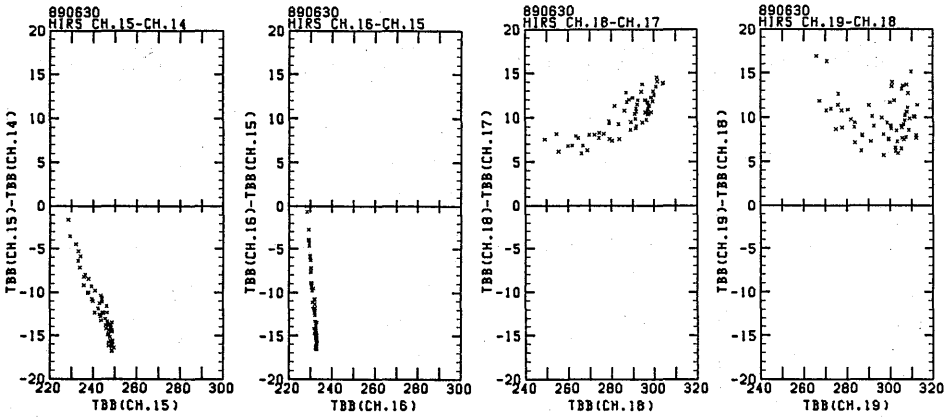

Fig. 5.2.9　(Continued.)

の違いのために生じるデータのばらつきも重なりグループ分けできないものと思われる。T_{BB} (ch. 14)$-T_{BB}$ (ch. 13)，T_{BB} (ch. 15)$-T_{BB}$ (ch. 14)にも二つのグループに対応したデータのばらつきがあるようだが，二つ以上のグループがあるようにも見える。T_{BB} (ch. 16)$-T_{BB}$ (ch. 15) は，ch. 16への成層圏からの寄与も大きいためグループ分けできない。Ch. 19とch. 18の観測輝度はかなり太陽放射の影響を受けており，T_{BB} (ch. 19)$-T_{BB}$ (ch. 18)の図はデータが散在している。これから雲パラメータが推定できるかどうかはわからない。しかし，Fig. 5.2.4 (c) の AVHRR の ch. 3の輝度温度の分布図は，AVHRR の ch. 1 や ch. 4とはかなり違った様相を呈している（例えば，上層の雲からの太陽放射の反射はほとんど目立たないが，下層の雲からの反射は大きい等)。このことは3.7 μm 域のチャンネルが雲のパラメータの推定に役立つ可能性があることを示している。

Fig. 5.2.10に同じ領域について NOAA-10 の T_{BB} (ch. 10)$-T_{BB}$ (ch. 8) の輝度温度差を示した（NOAA-10は，6月30日の8時30分頃（日本時間）日本上空を通過した。）Ch. 10の波長位置は，波長約8.3 μmのところである。アーチ状の点列のほかに数点アーチから外れた点がある。晴天域（横軸の ch. 10 の T_{BB} が高いところ）では，ch. 10 の方が吸収が大きいので，T_{BB} (ch. 10)$-T_{BB}$ (ch. 8) の輝度温度差は負の値，雲の厚いところでは ch. 8 の吸収が大きいので輝度温度差は正の値となる。晴天域と曇天域で吸収の波長依存の傾向が違うのでこの二つのチャンネルは上層の雲の検出に有効かもしれない。

横軸にT_{BB}，縦軸にΔT_{BB}をとって図示し，雲の物理特性の違う状態が観測されているかどうか調べた。近接した領域であるので雲以外の大気温度，表面温度などの観測放射への影響は同じ程度で二つのグループの差は雲の物理特性の差だけである。定量的に解析したわけではないが微物理量の違い，雲水・雲氷量の違い，屈折率の波長依存などを反映した放射が HIRS の各チャンネルで観測されている。

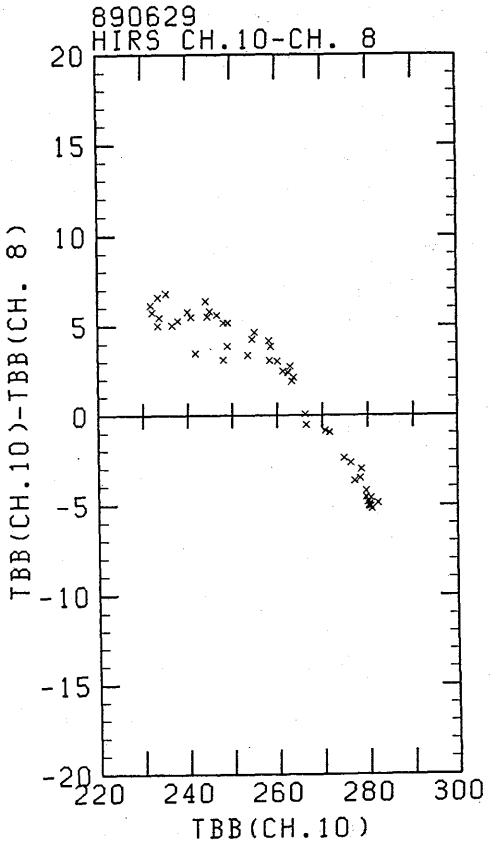

Fig. 5.2.10　Scatter plot of T_{BB} and ΔT_{BB} for HIRS channels on NOAA-10 in the same region as in Fig. 5.2.9. The abscissa is T_{BB} of the HIRS ch. 10 and the ordinate is the difference of T_{BB} between ch. 8 (11.1 μm) and ch. 10 (8.3 μm) on NOAA-10. NOAA-10 passed over Japan at 8:30 (JST) on 30 June, 1989. The combination of these two channels is effective to detect the upper level clouds.

5.2.4 まとめ

近接した領域で雲の物理特性の違う状態が観測されていた例で，横軸に T_{BB}，縦軸に ΔT_{BB} をとって，多波長のチャンネルの利用による雲パラメータの推定の可能性について調べた。その結果，利用できるチャンネルとしては，ch. 4～ch. 10（ch. 9は除く）が考えられる。また，NOAA-10のch. 8とch. 10の様に10μmと8μmの組合せが上層雲の検出に使えること，ch. 19の様に3.7μm域の太陽光の反射を水の相の識別等に使えることが分かった。

今後，地上観測の際に得られた他のデータとあわせて総合的に解析して，ここで示された T_{BB} の差の波長依存が説明可能なものなのか調べる必要がある。特に，FTIR（Fourier Transform Infrared Spectrometer）による観測は，観測方向は逆である点を除けば，衛星と同様のデータが得られるので，FTIR の観測値を詳細に解析する必要がある。

気候形成にとっての雲－放射のフィードバック機構がどのように作用しているかよく分かっていないが，「放射的に矛盾がない」雲と放射収支のデータセットがないことも研究の進展を妨げている一因と考えられる。現在，ISCCP を通して雲の気候値の作成が進んでいるがISCCPの雲パラメータだけではかならずしも放射場を表現できない。ISCCP の次の世代の雲気候値としては，雲の放射場も見積れる雲パラメータの気候値が必要でありそのためのリモート・サウンディングの技術開発が必要である。

参 考 文 献

Hale, G.M. and M. R. Querry, 1973 : Optical constants of water in the 200-nm to 200-μm wavelength region. *Appl. Opt.*, **12**, 555-563.

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. Met. Soc. Japan*, **63**, 88-99.

Prabhakara, C., R. S. Fraser, G. Dalu, Man-Li C. Wu, R. J. Curran and T. Styles, 1988 : Thin cirrus clouds : Seasonal distribution over oceans deduced from Nimbus-4 IRIS. *J. Appl. Meteor.*, **27**, 379-399.

Schiffer, R. A. and W. B. Rossow, 1983 : The International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) : The First Project of the World Climate Research Programme. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **64**, 779-784.

Smith, W. L., H. M. Woolf, G. M. Hayden, D. Q. Wark and L. M. McMillin, 1979 : The TIROS-N Operational Vertical Sounder. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **60**, 1177-1187.

Warren S. G., 1984 : Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave. *Appl. Opt.*, **23**, 1206-1225.

Yamanouchi, T., K. Suzuki and S. Kawaguchi, 1987 : Detection of clouds in Antarctica from infrared multispectral data of AVHRR. *J. Met. Soc. Japan*, **65**, 949-962.