地球現象論: 太陽放射, 地球放射

地球流体電脳倶楽部

1996 年 8 月 2 日

目 次

1 太陽放射 **2**
- 1.1 太陽定数 . . . 3
- 1.2 太陽定数の測定誤差 . . . 3
- 1.3 スペクトル分布 . . . 4
- 1.4 緯度別年変化 . . . 6

2 地球放射 **7**

3 アルベド **8**

4 放射収支の年変化 **9**

5 Nimbus 7 計画 **10**
- 5.1 Nimbus 7 の形 . . . 10
- 5.2 Nimbus 7 の軌道 . . . 10
- 5.3 Nimbus 7 計画について . . . 11

6 参考文献 **14**

Abstract

ここでは, 太陽から地球に到達する太陽放射, 地球から射出される地球放射, 並びに地球のアルベドについて記す. ただし, ここで取り上げる太陽・地球放射とは, 地球の観測衛星軌道において太陽から向かってきた放射と地球から向かってきた放射のことを指す. 地球放射には固体地球, 大気の射出した放射に加えて太陽放射が反射したものも含まれている.

1　太陽放射

ここでは, 地球大気上端に届く太陽放射について,

- 太陽定数 — 単位時間単位面積あたり放射エネルギーの全波数についての積分値
- 太陽定数観測の誤差について
- スペクトル分布
- 単位時間単位面積あたり放射エネルギーの年変化・緯度分布

を示す.

1.1　太陽定数

太陽定数とは, 太陽から太陽地球間の平均距離だけ離れた位置における, 単位時間単位面積を通過する太陽放射エネルギーのことである.

太陽定数の値は, 基本量のところでも示したように, $1367 \pm 7(\mathrm{W/m^2})$ である. これは WMO が 1980 年の会議で勧告した値である. しかし, 次にコメントしているように, この値が信頼に足るものであるとは言えない. 因みに気象庁では, $1382\mathrm{W/m^2}$ という値を基準値として使っている. なお, 太陽定数は, あとで示す太陽放射のスペクトルから得られる太陽の表面温度 (約 5762K), ステファンボルツマン定数 ($5.67 \times 10^7 \mathrm{W/m^2K^4}$), 地球太陽間平均距離 (1.5×10^8 km), 太陽半径 (70×10^4 km) を用いて,

$$5.67 \times 10^{-8} \times 5762^4 \times \left(\frac{70 \times 10^4}{1.5 \times 10^8} \right)^2 \cong 1360(\mathrm{W/m^2})$$

と概算できる.

1.2　太陽定数の測定誤差

太陽定数の値については, 最近では人工衛星による観測により決定されている. 観測データから, 太陽定数の他, 太陽放射の地球による反射, 地球放射がわかるので, 原理的には太陽定数や地球の放射収支が得られる.

太陽そのものの放射が変化せず, 地球が熱的に 1 年周期で変化しているとみなせて, かつ測定誤差がないと仮定する. このとき, 太陽定数はどの観測においても同じ値をとり, 1 年平均の地球の放射収支は 0 に近い値をとると予想される.

しかし, 実際には, 太陽定数の値は各観測毎に $\pm 20\mathrm{W/m^2}$ 程度異なっている. 年平均放射収支も 0 ではなく, 約 $20\mathrm{W/m^2}$ 程度の, 太陽定数に比べて必ずしも小さくない値になることがある. これらの主たる原因は現在のところ測定誤差であるとされている[1].

測定誤差以外の原因としては, 太陽定数自体の変化も考えられる. しかし, 現在の技術水準では, 測定誤差が大きすぎて (約 $1 \sim 2$ % 程度.), 太陽定数が変化しているのかどうかはよくわからない.

[1] 放射収支の年平均が 0 に近いかどうかが, その測定システムそのものの正しさの判定材料になっているほどである.

1.3　スペクトル分布

図 1, 2 に太陽放射のスペクトル分布を示す. 図 1 は幅広い波長域における太陽放射の波長 - 放射束密度分布であり, 図 2 はそのごく一部の, 放射束密度の大きい波長域における太陽放射の波長 - 放射束密度分布である. 可視域から遠赤外域にかけては 5762 K の黒体放射のそれに近い. しかし, 可視域より短い波長の領域においては, それよりもはるかに高温の黒体放射のスペクトルに近くなっている[1].

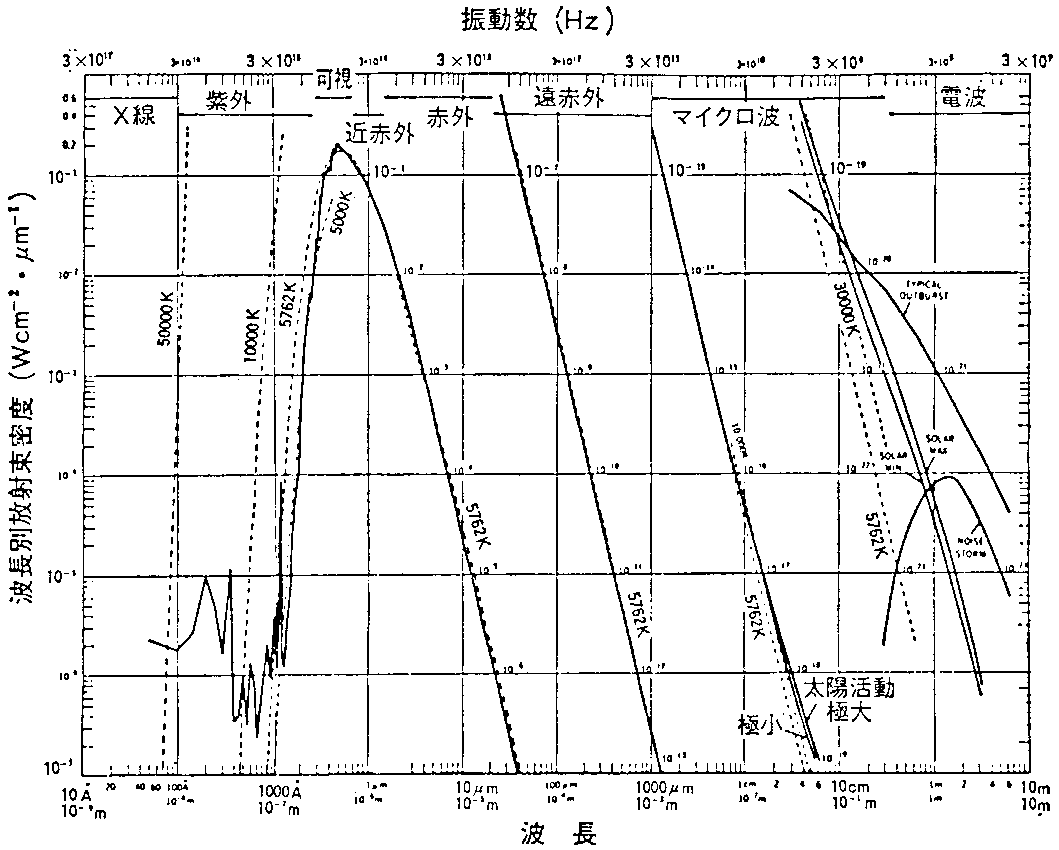

図 1.2　地球大気外における太陽放射のスペクトル．点線は相当温度の黒体放射のスペクトルを示し，中心付近では 5762 K の黒体放射に相当する．(NASA，1971；テカエカラ，1973)

図 1　地球大気外における太陽放射のスペクトル. 横軸に波長をとり, 各波長毎の放射束密度を示している. 波長域は $10^{-9}\mathrm{m} \sim 10\mathrm{m}$ である. 縦軸の単位は, $\mathrm{Wcm}^{-2}\mu\mathrm{m}^{-1}$ である. (MKS 単位系に比べ, 4 桁小さい数値になっていることに注意.) 点線は, 数字の示す温度の相当黒体放射のスペクトルをあらわす. なお, この図の元になっているデータは NASA(1971)[2] である. (会田, 1982)

[1]太陽放射については, ほぼ 6000 K ($\cong$ 5762 K) の黒体放射とみなされていることが多い. これからのずれが生じるのは, 太陽は, 表面 (この温度が約 6000 K と思われる) のみならず, 温度の異なる様々な深さから外側へ射出していて, それが太陽内部で吸収されることなく太陽から出るため, と予想されている.

[2]未確認である.

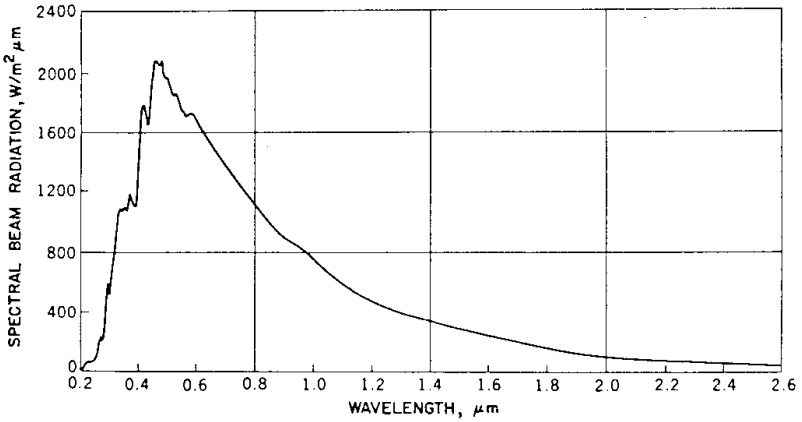

Figure 1.3.1 The NASA (1971) Standard spectral irradiance at the mean sun-earth distance and a solar constant of 1353 W/m^2.

図 2　地球大気外における太陽放射のスペクトル. 横軸に波長をとり, 各波長毎の放射束密度を示している. 波長域は, $0.2 \times 10^{-6}\mathrm{m} \sim 2.6 \times 10^{-6}\mathrm{m}$ である. 縦軸の単位は, $\mathrm{Wm}^{-2}\mu\mathrm{m}^{-1}$ である. なお, この図の元になっているデータは NASA(1971)[1] である. (Duffie, and Beckman, 1974)

[1]未確認である.

1.4　緯度別年変化

図 3 は地球に達する 1 日あたりの太陽放射エネルギーの緯度別年変化を示したものである. 天文学的諸量と太陽定数から, 各緯度において大気上端に届く 1 日あたりの太陽放射エネルギーを計算した.

図を見て目立つところを挙げる.

- 冬の極では日射が 0 になる. (図 3 の斜線部)
- 6, 12 月は冬極で日射量最小 (0), 夏極で日射量が最大となる. このときの夏極における日射量は, あらゆる緯度, 季節における日射量の中で最大である.

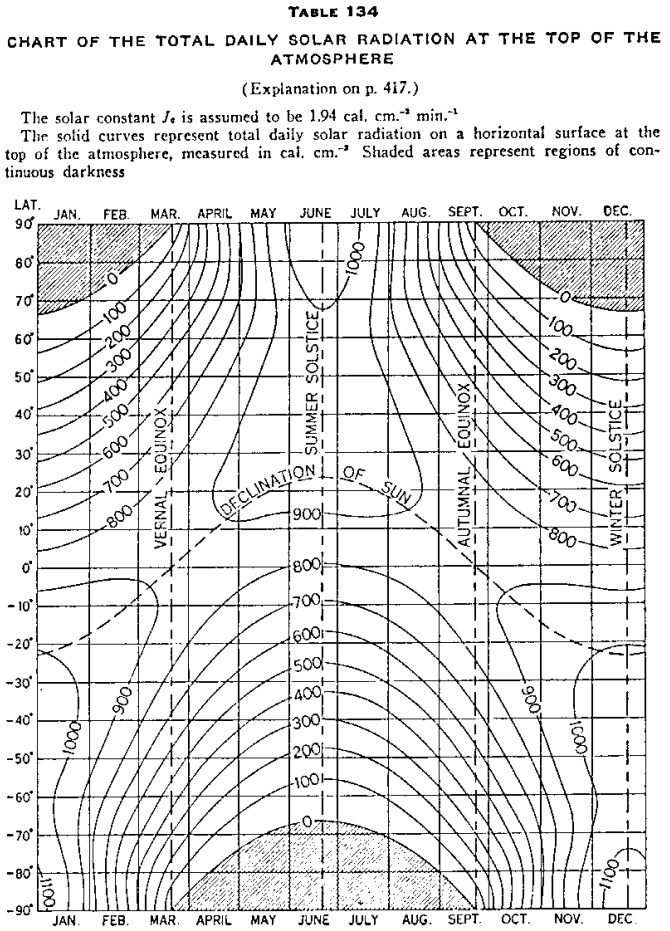

図 3 大気上端に届く太陽放射エネルギーの緯度・季節変化. 各緯度, 月において, (仮に大気がないとしたときに) 地表 $1\mathrm{m}^2$ が 1 日に受ける太陽放射エネルギーの量を示した. 単位は cal である. ただし, 太陽定数を $1.94\mathrm{cal/cm}^2\mathrm{min}$ ($= 1.35\mathrm{kW/m}^2$) として計算した. (List, 1971)

なお原典は, Leighly,J.B. の private comunication (1948) である.

2　地球放射

図 4 は, 人工衛星により地球外で観測された地球放射のスペクトル分布の例である.

- 波数 $850 \sim 1000\mu\mathrm{m}^{-1}$ の放射は雲がない場合にはあまり大気の吸収を受けない. このことから, この波長帯におけるスペクトル分布から得られる相当黒体放射温度 $\mathrm{T_{BB}}$ が地上温度だと推定される.
- 雲がある場合には波数 $850 \sim 1000\mu\mathrm{m}^{-1}$ の放射も吸収を受けている様子が見られる.
- 波数 $600 \sim 800\mu\mathrm{m}^{-1}$ の放射は $\mathrm{CO_2}$ による吸収・放射の影響を受けている[1].
- 波数 $600\mu\mathrm{m}^{-1}$ 以下の放射は $\mathrm{H_2O}$ による吸収・放射の影響を受けている.

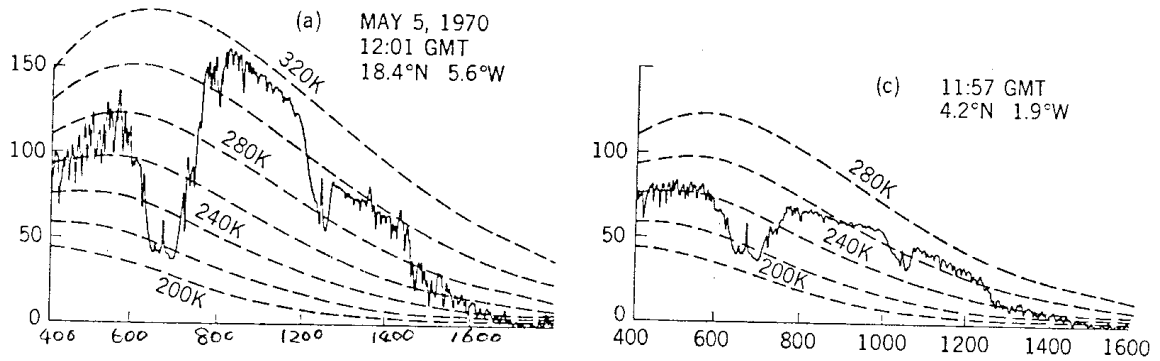

図 4　衛星観測による地球放射のスペクトル分布. Nimbus 4 に搭載された マイケルソン干渉計 により観測された赤外放射のスペクトルである. 横軸は波数 (400-1600 cm^{-1}) である[2]. 縦軸の単位は, $\mathrm{erg \cdot cm^{-2} ster^{-1}/cm^{-1}}$ である. 点線は, 地上が数字で示された温度で黒体放射していて, かつ大気による吸収がないときに大気圏外で観測される放射スペクトルを示す. (Hanel, *et al.*, 1972)

2 つの図の観測時期, 地点は次の通りである.

(a) 1970 年 5 月 5 日, 12:01GMT に, 18.4°N, 5.6°W (北アフリカ) で観測されたスペクトル.

(c) 1970 年 5 月 5 日, 11:57GMT に, 4.2°N, 1.9°W (北アフリカ) で観測されたスペクトル. 波数 $850 \sim 1000\mu\mathrm{m}^{-1}$ の放射が雲によって吸収されている様子が見える.

[1] この波長帯におけるスペクトル分布から得られる相当黒体放射温度 $\mathrm{T_{BB}}$ はほぼ成層圏下部における温度に対応するらしい.

[2] 図 1, 2 に示した太陽放射のスペクトルは横軸が波長であったことに注意せよ.

3　アルベド

図 5 は, 衛星観測に基づく, 惑星アルベドの緯度分布と地球が吸収した太陽短波放射と, 地球の射出した地球放射の緯度分布である.

アルベドは, 低緯度で小さく, 高緯度で大きいことがわかる. 全球平均では, 約 0.3 である[1].

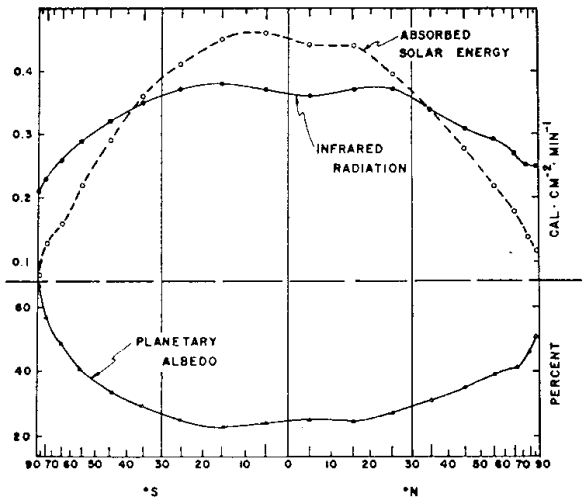

FIG. 1. Mean meridional profiles (averages within latitude zones) of components of the earth's radiation budget measured during the period 1962–66. The abscissa is scaled by the cosine of latitude.

図 5　アルベド, および放射収支の緯度分布. 下の図は惑星アルベドの緯度分布である. 縦軸の目盛は%である. 上の図は放射収支の緯度分布図である. 1 分, 地表 $1\mathrm{m}^2$ あたりの地球の吸収した太陽放射エネルギー, および地球放射エネルギー量が示されている. これらは, 1962-66 に衛星 TIROS IV, ESSA III, Nimbus II によって観測されたデータを元にして作成された. (Vander Haal, and Suomi, 1971)

[1] '地球に関する基本的な数字' 参照

4　放射収支の年変化

図 6 は, 衛星データの解析, およびモデルによる入射太陽放射, 惑星アルベド, 太陽放射の地球による吸収, 外向き長波放射, net の放射の年変化を示している[1].

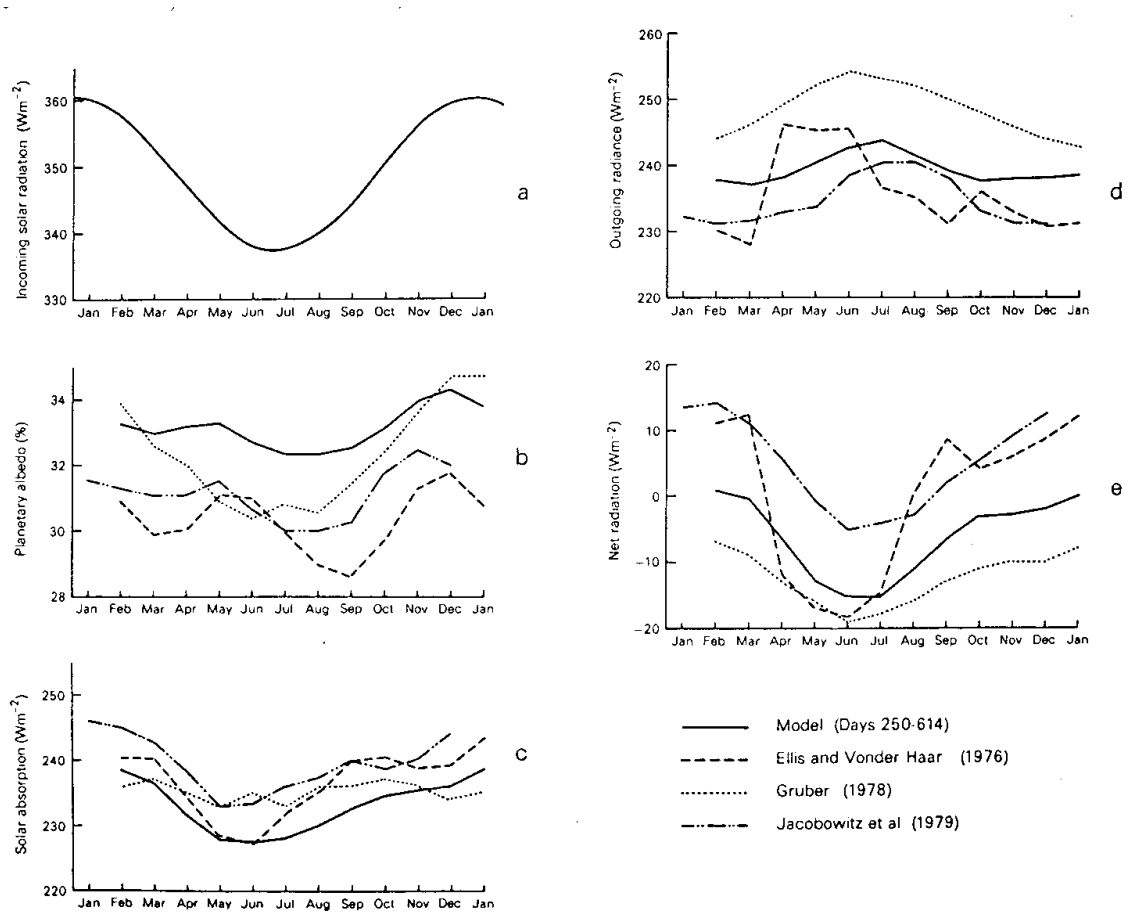

Figure 1. Seasonal variation of the components of the global mean radiation budget derived from satellite observations and from the model. (a) Incoming solar radiation (b) Planetary albedo (c) Solar absorption (d) Outgoing flux (e) Net radiation.

図 6　放射収支の年変化. a は入射太陽放射, b は惑星アルベド, c は太陽放射の地球による吸収, d は外向き長波放射, e は全放射収支 (入射を正とする) の図である. 実線はモデルによる. その他の点線は衛星観測の解析による. (Slingo(1982))

[1]これより新しい同様の図として, Hartmann, *et al.* (1986) がある. これには Nimbus 7 のデータを解析したものも加わっている. しかし, Slingo (1982) に比べて, 外向き長波放射の図が抜けているのでここでは省いた. また, Nimbus 7 のデータを解析したさらに詳しいものとしては, Jacobowits, *et al.* (1984) があり, 南北半球別等々の図がある. しかしこれにも外向き長波放射の図はない.

5　Nimbus 7 計画

ここでは, 人工衛星 Nimbus7 による観測計画について記す.

5.1　Nimbus 7 の形

図 7 は Nimbus 7 の外観図である.

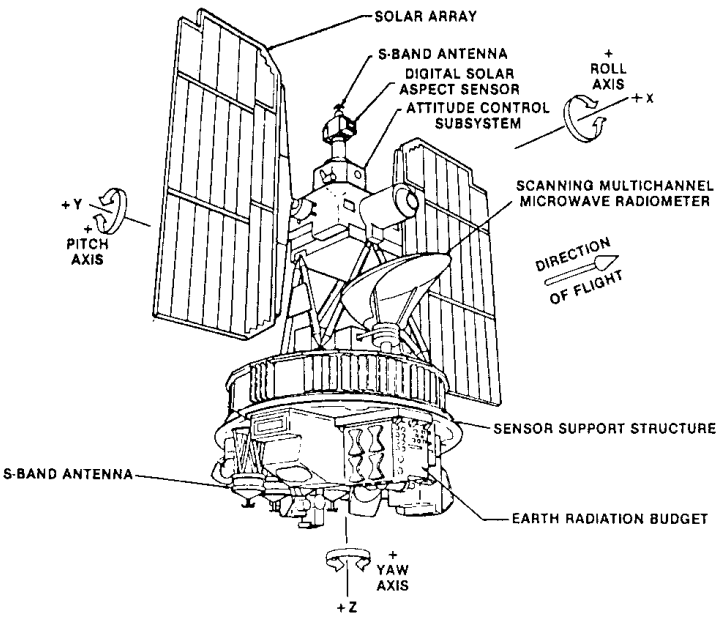

Fig. 1. The NIMBUS 7 observatory, launched October 24, 1978. Note the earth radiation budget experiment (bottom right) with the 10 solar channels ($+X$ axis) and four wide field of view channels ($+Z$ axis).

図 7　Nimbus 7 の形. (Ardanuy *et al.*, 1984)

5.2　Nimbus 7 の軌道

22
Nimbus 7 は, 1978 年 10 月 24 日に打ち上げられ, 1990 年現在でもまわっている. ただし, 今では電池は止まっていて, データはとっていない.

Nimbus 7 はほぼ円形で (大体) 太陽同期の極軌道を描く. 地上から見て local time で (大体) 12:00 に南から北へ向かい, (大体) 0:00 に北から南へ向かう. 周期 2 時間弱 (104 分) で地球を 1 周し, 1 日に約 1 4 周することになる. 軌道高度は, 打ち上げ時は最高 953km, 最低 940.5km であった[1].

[1]最高, 最低というのは, 楕円軌道のためで, 固体地球半径を加えるとそれぞれ長半径, 短半径になる. なお, 軌道高度は打ち上げの後少し上昇して, 1979 年 5 月の時点でそれぞれ高度 959, 944.5km になっている.

5.3　Nimbus 7 計画について

ここでは Nimbus 7 に関する計画例を 2 つ挙げる[1].

- 全球放射収支観測計画 (ERB　Earth Radiation Budget 実験)

地球の放射収支— 太陽入射エネルギーと地球放射エネルギー — を測定する計画である. 様々な周波数の放射を測定できるように, 22 個のチャンネルが用意されている. 各チャンネルは測定可能な周波数帯やフィルター, 視野角 (FOV　field of view) 等が異なっている.

太陽放射を計るチャンネルは 10 個 (channel 1∼10) ある. 地球放射 (太陽放射の反射したものも含む) を計るチャンネルは 12 個 (channel 11∼22) あって, そのうちの 4 個 (channel 11∼14) が視野角の広い wide field of view, 残りの 8 個 (channel 15∼22) が視野角が狭く scan のために用いられる narrow field of view である. 表 1,2,3 が各々の特性を示している.

TABLE 1. Characteristics of ERB Solar Channels

Channel	Wavelength Limits, μm	Filter	Noise Equivalent Irradiance, W m^{-2}
1	0.2–3.8	Suprasil W	1.77×10^{-2}
2	0.2–3.8	Suprasil W	1.77×10^{-2}
3	(0.2 to) 50	None	1.43×10^{-2}
4	0.536–2.8	OG530	1.94×10^{-2}
5	0.698–2.8	RG695	1.91×10^{-2}
6	0.395–0.508	Interference Filter	3.58×10^{-2}
7	0.344–0.460	Interference Filter	5.73×10^{-2}
8	0.300–0.410	Interference Filter	7.55×10^{-2}
9	0.275–0.360	Interference Filter	0.94×10^{-2}
10C†	(0.2 to) 50	None	2.39×10^{-2}

The unencumbered FOV for all channels is 10°; the maximum field is 26° for channels 1 through 8 and 10C. The maximum FOV for channel 9 is 28°. All are types of Eppley wire-wound thermopiles. Values obtained from adjusted NIMBUS 6 results.

*Channels 1 and 2 are redundant. Channel 1 is normally shuttered and is open periodically to adjust value of channel 2.

†Channel 10C is a self-calibrating cavity channel added to NIMBUS 7 and replacing a UV channel on NIMBUS 6.

表 1 太陽放射測定用チャンネル特性. 各チャンネル毎の波長特性, フィルターの種類, ノイズ特性 (放射輝度に換算してある) を示す. FOV は通常は 10° である. (Jacobowitz, Soule, *et al.*, 1984)

[1]これだけで全てではない. 他に例えば, 高さ方向に積分して得られる O_3 の水平分布を測定する TOMS (the Total Ozon Mapping Spectrometer) 実験や, CZCS (Coastal Zone Color Scanner) 実験, SRUV 実験, SAMS 実験, SMMR 実験 がある. この他にもあるかどうかは未調査である.

TABLE 2. Characteristics of ERB Fixed Wide-Angle FOV Channels

Channel	Wavelength Limits, μm	Filter	Irradiance Range Anticipated, W m^{-2}	Noise Equivalent Irradiance, W m^{-2}
11	<0.2 to >50	None	−200 to +600	6.55×10^{-3}
12*	<0.2 to >50	None	−200 to +600	6.55×10^{-3}
13	0.2 to 3.8	Two Suprasil W hemispheres	0 to 450	6.55×10^{-3}
14	0.695 to 2.8	RG695 between two Suprasil W hemispheres	0 to 250	6.65×10^{-3}

All channels have type N3 thermopile sensors. All channels have an unencumbered FOV of 121° and a maximum FOV of 133.3°. Channel 12 has an additional FOV selection of 89.4° unencumbered, 112.4° maximum. Output of these channels is a 3.8-s integral of the instantaneous readings.

*Channels 11 and 12 are redundant channels. Channel 11 has black-painted baffles and is used for in-flight calibration of channel 12. Channel 12 has polished aluminum baffles as did both channels 11 and 12 on NIMBUS 6.

表 2　地球放射測定用 WFOV チャンネル特性. 各チャンネル毎の波長特性, フィルターの種類, 推定放射輝度, ノイズ特性 (放射輝度に換算してある) を示す. FOV は通常は 121° である. (Jacobowitz, Soule, *et al.*, 1984)

TABLE 3. Characteristics of ERB Scanning Channels

Channel	Wavelength Limits, μm	Filter	Noise Equivalent Radiance, W cm^{-2} sr^{-1}	NEP, W $H_z - \frac{1}{2}$	FOV, deg
15–18	0.2–4.8	Suprasil W	3.7×10^{-5}	6.65×10^{-9}	0.25×5.12
19–22	4.5–50	Deposited layers on diamond substrate	1.8×10^{-5}	1.73×10^{-9}	0.25×5.12

表 3　地球放射測定用 NFOV チャンネル特性. 各チャンネル毎の波長特性, フィルターの種類, ノイズ特性 (放射輝度に換算してある), NEP (不明), FOV を示す. FOV については, 衛星から地上の真下の点と測定点を結ぶ向きが 0.25°, その垂直方向が 5.12° であることを示す. (Jacobowitz, Soule, *et al.*, 1984)

- 近赤外成層圏測定計画 (LIMS　the Limb Infrared Monitor of the Stratosphere 実験)

1978 年 10 月 24 日から 1979 年 3 月 28 日までなされた, 成層圏の高さ方向の構造 (温度, O_3 , H_2O , CO_2 , NO_2 , HNO_3 分布等.) を測定する計画である. 衛星から地球に引いた接線に沿って測定し, 鉛直方向には狭い視野角をもっているので高さ方向の分解能は優れている. 各気体毎の放射特性にあうように, (少なくとも) 6 つのチャンネルが用意されている. 表 4 は各々のチャンネルの特性をあらわしている.

TABLE 1. Characteristics of LIMS Channels

Channel	Emitting Gas	Bandpass 5% Relative Response Points, cm^{-1}	Field of View at Limb, km		Noise Equivalent Radiance, (W/m^2 sr)
			Vertical	Horizontal	
1	NO_2	1560–1630	3.6	28	0.00055
2	H_2O	1370–1560	3.6	28	0.0023
3	O_3	926–1141	1.8	18	0.0037
4	HNO_3	844–917	1.8	18	0.0015
5	CO_2W	579–755	1.8	18	0.0055
6	CO_2N	637–673	1.8	18	0.0014

表 4　LIMS のチャンネル特性. 対象とする気体, 波長特性, 視野角, ノイズ特性 (放射輝度に換算してある) をあらわす. (Gille *et al.*, 1984)

6　参考文献

Ardanuy,P.,J.Rea, 1984 : Degradation Asymmetries and Recovery of the NIMBUS 7 Earth Radiation Budget Shortwave Radiometer. *J.Geopys.Res.*, **89**, 5039-5048.

Duffie,J.A., W.A.Beckman, 1974 : Solar energy thermal processes. John-Wiley & Sons, 386pp.

Gille,J.C., J.M.Russel III , 1984 : The Limb Infrared Monitor of the Stratosphere : Experiment Description, Performance and Results. *J.Geopys.Res.*, **89**, 5125-5140.

Hanel,R.A., B.J.Conrath, V.G.Kunge, C.Prabhakara, I.Revah, V.V.Salomonson, G.Wolford, 1972 : The Nimbus 4 Infrared Spectroscopy Experiment 1. Calibrated Thermal Emission Spectra. *J.Geopys.Res.*, **77**, 2629-2641.

Hartmann,D.L., Ramanathan,V., Berroir,A., Hunt,G.E., 1986 : Earth Radiation Budget Data and Climate Reseach. *Rev.Geophis.*, **24**, 439-468.

Jacobowits,H., H.V.Soule, H.L.Kyle, F.B.House, and The NIMBUS 7 ERB Experiment Team, 1984 : The Earth Radiation Bubget (ERB) Experiment : An Overview. *J.Geopys.Res.*, **89**, 5021-5038.

Jacobowits,H., Tighe.R.J., and The NIMBUS 7 ERB Experiment Team, 1984 : The Earth Radiation Bubget Derived From the NIMBUS 7 ERB Experiment. *J.Geopys.Res.*, **89**, 4997-5010.

List,R.J., 1971 : Smithsonian Meteorological Tables. Smithsonian Institution Press, Washington,D.C., 527pp.

Slingo,J.M. 1982 : A study of the earth's radiation budget using a general circulation model. *Quart.J.Roy.Meteor.Soc.*, **108**, 379-405.

Vander Haal,T.H., V.Suomi, 1971 : Measurements of the Earth's Radiation Budget from Satellites During a Five-Year Period. Part I: Extended Time and Space Means. *J.Atmos.Soc.*, **28**, 305-314.

会田 勝, 1982 : 気象学のプロムナード 8 大気と放射過程. 東京堂出版, 280pp.

日本気象学会, 1982 : 気象研究ノート 第 145 号 衛星資料の利用. 日本気象学会, 381pp.

謝辞

本稿は 1989 年から 1993 年に東京大学地球惑星物理学科で行なわれていた, 流体理論セミナーでのセミナーノートがもとになっている. 原作版は保坂征宏による「地球現象論」

(90/9/4) であり, 林祥介によって地球流体電脳倶楽部版「地球現象論」として書き直された.
構成とデバッグに協力してくれたセミナー参加者のすべてにも感謝しなければならない.