

ILAS で観測された大気圏外太陽可視スペクトル (753-784nm) の解析

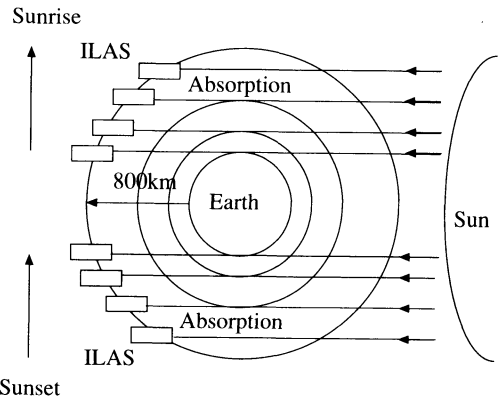
日下部 智 一*・大 森 彩 子*・古 田 直 紀*

1. はじめに

1996年8月17日, 種子島宇宙センターから, 日本の宇宙開発事業団(NASDA)により, 地球観測プラットフォーム技術衛星 ADEOS (Advanced Earth Observing Satellite) が打ち上げられ, 打ち上げ後「みどり」と命名された. この衛星は地球温暖化, オゾン層の破壊, 熱帯雨林の減少, 異常気象の発生等の地球環境問題に対応した全地球規模の観測データを取得し, 国際協力による地球環境観測に役立てると共に, 次世代地球観測に必要なプラットフォーム・バス技術, 軌道間データ中継技術等の開発を目的としており, 観測を行うために8つのセンサーが搭載されている.

その中の1つのセンサーである, 改良型大気周縁赤外分光計 (ILAS: Improved Limb Atmospheric Spectrometer) は, 南北両半球の高緯度地域の対流圏上部から成層圏全体にわたる高層大気中の化学過程や力学過程を解明することを目的にオゾン, 窒素酸化物, 水蒸気等の大気微量成分, エアロゾル, 極成層圏雲 (PSC: Polar Stratospheric Cloud) さらに気温・気圧分布などのデータを取得している (Sasano *et al.*, 1995). 成層圏オゾン層破壊は, 南極域で見いだせるオゾンホールばかりでなく, 最近では, 北極域や南北両半球の中緯度域でも進行していることが報告されている. そこで ILAS のデータを総合的に把握することで, オゾン層破壊の主因として考えられているクロロフルオロカーボン (CFC) に含まれる塩素によるオゾン層破壊化学反応に対して新しい知見が得られるのではないかと期待されている.

本研究の目的は, この ILAS センサーにより観測さ



第1図 地球 (Earth) の周りを回っている衛星 (ILAS) が衛星から見た日の出 (Sunrise) と日の入り (Sunset) において太陽 (Sun) の太陽光スペクトルを測定する様子 (太陽掩蔽法).

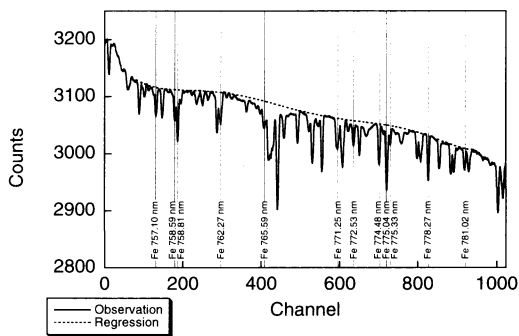
れる大気圏外太陽可視スペクトルを解析することで ILAS 測器の長期安定性を調べ, 環境庁国立環境研究所で行われている大気微量成分の高度分布の解析に役立てていくことである.

2. 測定原理

ILAS は, 太陽からの光が地球縁辺の大気層を通過するときに受ける吸収量をスペクトル解析して測定するという太陽掩蔽法 (第1図) を原理としている (Suzuki *et al.*, 1995).

ILAS は太陽を光源とすることから, 衛星軌道の関係によって, 測定対象領域は南北両半球の高緯度地域の上空に限られる. また ADEOS は1日に地球の周りを約14周し, 地球を1周するにつき衛星から見た太陽の日の出・日の入り時の測定をするので, 1日に日の出・日の入りを一組として14回の測定が可能である. さらにその中で, 1回の測定につき暗宇宙のバックグ

* 中央大学理工学部応用化学科.
—1997年12月8日受領—
—1998年7月7日受受理—



第2図 1996年9月18日にILAS可視分光計により観測された日の出における太陽光スペクトルとFeフラウンホーファー線の吸収波長。実線は実測値で、破線は7次の回帰曲線を示す。

ラウンド (0%レベル) 測定と、地球の大気層を通過しない状態の太陽光 (100%レベル) のスペクトル測定を行う。バックグラウンド測定や100%太陽光のスペクトル測定では、大気の影響を直接受けることはない。したがって理論的には大きな変化を示すことはない。したがって長期間にわたり0%と100%レベルのスペクトルを解析することで測器の安定性を調べることができる。ILASの可視分光計 (測定波長範囲753-784 nm, 1024チャンネル (ch) のMOS型フォトダイオードアレー検出器を使用) では0%レベルのバックグラウンドは観測期間中に2048.9 countsから2050.5 countsまでわずか1.6 counts変動しただけで目立った変化は見られなかった。一方100%レベルデータは3279 countsから3154 countsまで変化しており、この変動約150 countsに比べて0%レベルデータの変動1.6 countsは十分に小さい。したがって以下の解析では、バックグラウンドを差し引かずに100%レベルのスペクトル (フラウンホーファー線を含む) を用いて装置の安定性を調べた。

3. 100%レベルデータの解析

第2図の実線は、1996年9月18日に観測された100%レベルのスペクトルで、このスペクトル中にはフラウンホーファー線が観測されている。フラウンホーファー線とは、太陽から発せられた連続スペクトルが太陽の周囲を包む気体の部分を通過する時、自己吸収により、元素特有の波長の光を吸収するために生ずる吸収線であり、各々の吸収線ピークより正確な波長を知ることができる。今回の研究では、Feの吸収線を主に解析しているので、第2図にはこの範囲におけるFe

吸収波長を示しておく。点線は、太陽光が太陽周辺の元素により吸収を受けなかった場合を想定した、太陽スペクトルそのものの発光強度 (純太陽光強度) を示したものである。これは可視領域内 (753-784 nm) で吸収線がないと思われるチャンネルを使用し、7次の回帰曲線で求めたものである。

4. 可視スペクトル測定波長領域とドリフト係数

ILASの装置安定性についてまずは測定波長領域について考察する。第1表と第2表は、それぞれ日の出と日の入りにおけるフォトダイオードアレー検出器により観測される波長領域を示している。第1列は観測日で、日付けの後ろのRとSはそれぞれ日の出 (R: Sunrise) と日の入り (S: Sunset) を表わしている。次の第2列と第3列は、測定波長内の短波長側の2本のフラウンホーファー線 (Fe: 753.32 nmとNi: 755.77 nm) と長波長側における2本のフラウンホーファー線 (Fe: 781.02 nmとFe: 783.44 nm) をそれぞれ用いて計算した、0 chと1023 chの波長である。第4列と第5列は、第3図の100%Drift lineについて、傾き (a) と切片 (b) を算出した結果である。第3図は、ある測定チャンネルにおける、日の出、日の入りの時系列データを模式的に表したものである。図中の太線部分は、ILAS測器が大気層を通過した太陽光を測定している部分を表わす。今回の解析にはこの部分の平均値を用いた。また、100%Drift lineとは、100%データにおける太線部分の回帰直線であり、それを破線で示した。

日の出と日の入りの測定波長領域で、波長の違いが確認できる。これは約1 ch分の波長の違い (0.03 nm程度) であり、これは、以下の計算からわかるように、ドップラー効果が影響していると思われる。

ADEOS衛星は、対地表速度7.42 km/sで地球を回っており、この時の太陽方向成分は6.69 km/sである (第4図)。

光源 (太陽) が静止していて、観測者 (衛星) が光源に背を向けて動いている場合のドップラー効果は

$$\frac{c}{\lambda} = \frac{c}{\lambda_0} \left(1 - \frac{v}{c}\right) \quad (1)$$

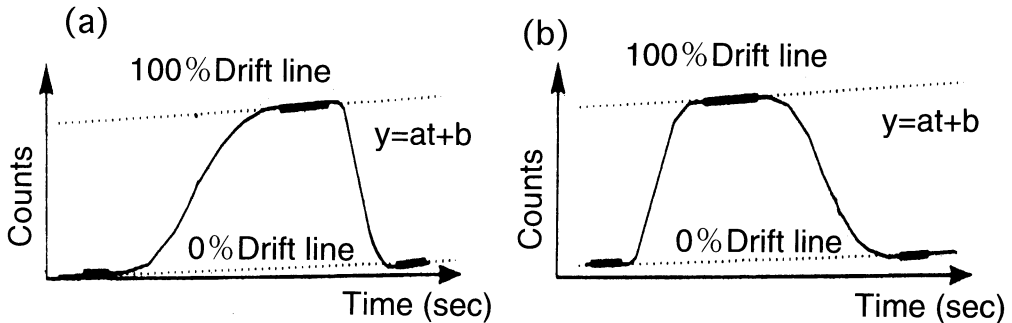
となる。ここで、 λ_0 は光源の波長、 c は光速、 v は観測者の速度、 λ が観測波長である。これを変形し、光速 $c = 3.00 \times 10^5$ km/s、 $v = 6.69$ km/s を代入すると、以下のようなになる。

第1表 日の出の測定波長領域とドリフト係数

日付	波長 領域		ドリフト 係数	
	0chの波長 [nm]	1023chの波長 [nm]	傾き (a) [counts/Sec]	切片 (b) [count]
96.11.05.R	752.943695	784.021008	0.00593159	3126.300
96.11.14.R	752.943695	784.021008	0.00574412	3125.903
96.12.04.R	752.943695	784.021008	0.00682976	3132.576
96.12.17.R	752.943695	784.021008	0.00476624	3144.642
96.12.31.R	752.943695	784.021008	0.00571328	3142.229
97.01.01.R	752.943695	784.021008	0.00463759	3143.983
97.01.07.R	752.943695	784.021008	0.00480996	3144.575
97.01.17.R	752.943695	784.021008	0.00507275	3142.186
97.01.22.R	752.943695	784.021008	0.00543722	3139.971
97.02.05.R	752.943695	784.021008	0.00506136	3128.759
97.02.13.R	752.943695	784.021008	0.00543888	3124.911
97.02.18.R	752.943695	784.021008	0.00384441	3126.109
97.02.26.R	752.943695	784.021008	0.00522840	3119.307
97.03.02.R	752.943695	784.021008	0.00510379	3115.599
97.03.05.R	752.943695	784.021008	0.00463389	3112.095
97.03.13.R	752.943695	784.021008	0.00458776	3103.870
97.03.24.R	752.943695	784.021008	0.00467716	3088.974
97.03.31.R	752.943695	784.021008	0.00308910	3087.177
97.04.12.R	752.943695	784.021008	0.00436182	3078.142
97.04.17.R	752.943695	784.021008	0.00348587	3072.117
97.04.19.R	752.943695	784.021008	0.00437628	3067.918
97.04.24.R	752.943695	784.021008	0.00503628	3066.537
97.04.27.R	752.943695	784.021008	0.00296298	3068.805
97.04.30.R	752.943695	784.021008	0.00228316	3074.092
97.05.01.R	752.943695	784.021008	0.00262007	3072.309
97.05.04.R	752.943695	784.021008	0.00343161	3069.454
97.05.10.R	752.943695	784.021008	0.00384048	3064.079
97.05.14.R	752.943695	784.021008	0.00446833	3060.279
97.05.20.R	752.943695	784.021008	0.00367301	3062.757
97.05.28.R	752.943695	784.021008	0.00325386	3059.193
97.06.04.R	752.943695	784.021008	0.00271187	3057.637
97.06.11.R	752.943695	784.021008	0.00203422	3058.672
97.06.18.R	752.943695	784.021008	0.00160826	3056.034
97.06.25.R	752.943695	784.021008	0.00155445	3055.724
平均値	752.943695	784.021008	0.00418548	3096.792

第2表 日の入りの測定波長領域とドリフト係数

日付	波長 領域		ドリフト 係数	
	0chの波長 [nm]	1023chの波長 [nm]	傾き (a) [counts/Sec]	切片 (b) [count]
96.11.05.S	752.911961	783.998609	-0.0005935	3130.745
96.11.14.S	752.911961	783.998609	0.0005938	3129.006
96.12.04.S	752.917250	783.998609	0.0021953	3135.420
96.12.17.S	752.917250	783.998609	0.0056754	3134.942
96.12.31.S	752.917250	783.998609	0.0005326	3143.880
97.01.01.S	752.917250	783.998609	-0.0001635	3144.931
97.01.07.S	752.917250	783.998609	0.0025585	3140.392
97.01.17.S	752.917250	783.998609	0.0002834	3141.157
97.01.22.S	752.917250	783.998609	0.0018793	3138.956
97.02.05.S	752.917250	783.998609	-0.0011447	3133.322
97.02.13.S	752.917250	783.998609	0.0000881	3127.657
97.02.18.S	752.917250	783.998609	-0.0008845	3127.022
97.02.26.S	752.917250	783.998609	-0.0009978	3123.787
97.03.02.S	752.917250	783.998609	0.0000000	3117.264
97.03.05.S	752.917250	783.998609	-0.0035427	3121.014
97.03.13.S	752.911961	783.998609	-0.0022296	3112.403
97.03.24.S	752.911961	783.998609	-0.0015773	3096.250
97.03.31.S	752.911961	783.998609	-0.0015394	3089.855
97.04.12.S	752.911961	783.998609	-0.0005525	3082.122
97.04.17.S	752.948577	783.998609	-0.0002722	3078.954
97.04.19.S	752.948577	783.998609	-0.0012209	3075.867
97.04.24.S	752.948577	783.998609	0.0004329	3072.936
97.04.27.S	752.948577	783.998609	-0.0015326	3073.976
97.04.30.S	752.948577	783.998609	-0.0015909	3075.592
97.05.01.S	752.948577	783.998609	-0.0011908	3075.470
97.05.04.S	752.948577	783.998609	0.0012238	3069.120
97.05.10.S	752.948577	783.998609	-0.0007902	3070.403
97.05.14.S	752.948577	783.998609	-0.0014612	3070.993
97.05.20.S	752.948577	783.998609	0.0002875	3066.964
97.05.28.S	752.948577	783.998609	0.0007788	3061.383
97.06.04.S	752.948577	783.998609	-0.0001130	3061.433
97.06.11.S	752.948577	783.998609	0.0000764	3060.097
97.06.18.S	752.948577	783.998609	-0.0000030	3057.295
97.06.25.S	752.948577	783.998609	-0.0003963	3056.926
平均値	752.930137	783.998609	-0.0002183	3099.927



第3図 ILAS 可視分光計のあるチャンネル (ch) で観測された日の出 (a) と日の入り (b) の時系列データを模式的に表したものである。縦軸 (y) は測定強度 (Counts) で、横軸 (t) は測定時間 (Time) である。

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \lambda \times \frac{v}{c} = \lambda \times \frac{6.69}{3 \times 10^5} \quad (2)$$

ドップラー効果は日の出と日の入りで反対方向に作用するので、短波長側 (753 nm) と長波長側 (784 nm) での $\Delta\lambda$ はそれぞれ次のように求められる。

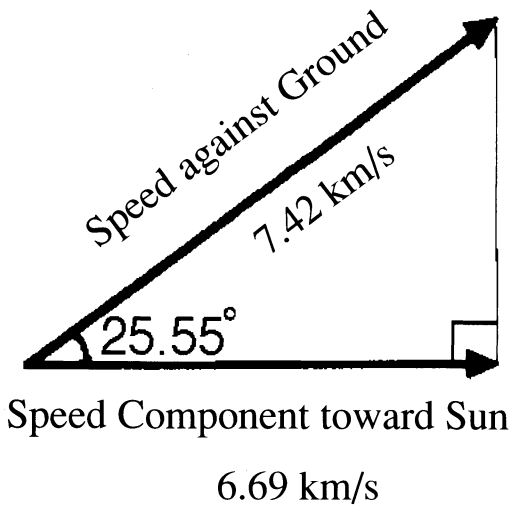
$$753 \text{ nm} : \Delta\lambda \times 2 = 0.0336 \text{ nm} \quad (3)$$

$$784 \text{ nm} : \Delta\lambda \times 2 = 0.0350 \text{ nm} \quad (4)$$

この値は、1 ch 分の波長である 0.03 nm にほぼ等しい。これにより、日の出と日の入りとで生じる波長領域の

違いは、衛星の進行によって起きた光のドップラー効果が原因であるといえる。日の出方向では測定波長が短波長側にシフトするので、フォトダイオードアレー検出器でより長波長領域が測定できることになり、反対に日の入り方向では、測定波長が長波長側にシフトするので、フォトダイオードアレー検出器でより短波長側が測定できるようになる。

100%太陽光データについて日の出と日の入りのスペクトルデータを比較してみると、各ブラウンホーファ線線の吸収チャンネルに約 1 ch ずつのズレがある。第5図にその例を示す。この約 1 ch ずつのズレは、



第4図 ADEOSの対地表速度と太陽方向成分速度。

他のすべてのスペクトルにおいても観測されている。これも、光のドップラー効果による影響であると考えられる。

100% Drift lineの傾きについては、日の出側の方が日の入り側に比べて傾斜が大きくなっていることがわかる。これについては、ADEOSは日の出側では太陽から見た地球の裏側、つまり温度の低いところから昇って装置内の温度がだんだん上昇してくるのに対し、日の入り側になると、観測前から観測後まで常に太陽に当たっており、装置内の温度はほぼ一定であると考えられるので、この差が傾きに現れているのではないかとと思われる。つまり、日の出の方が装置内の温度の変化が大きく、そのために Drift lineの傾きが大きくなっていると考えられる。

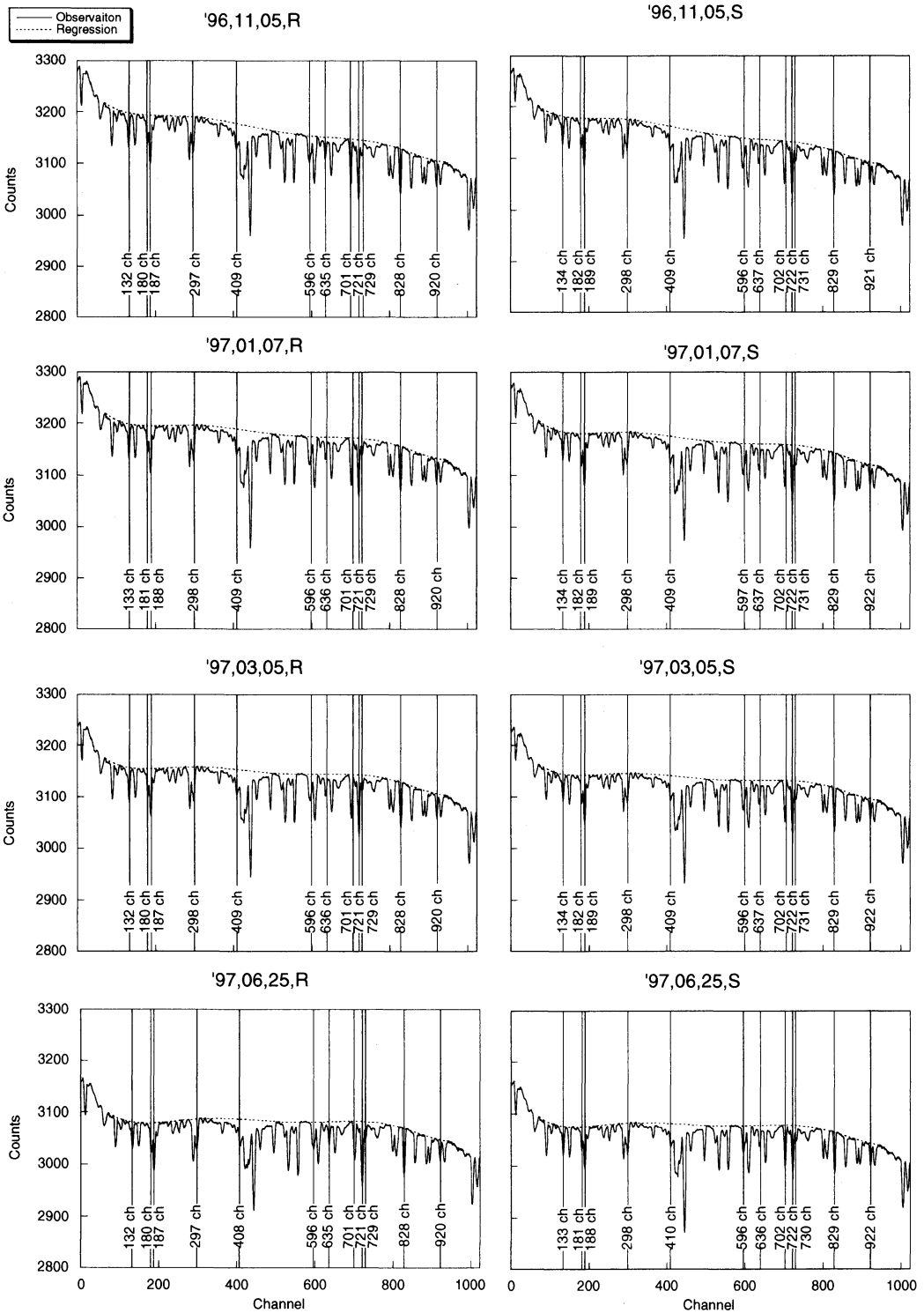
5. 観測開始時と運行停止直前との比較

第5図に示してあるのは、ILAS 測器が安定したと考えられている1996年11月5日と、後で述べるが、放射強度のもっとも大きい1997年1月7日、観測期間の半ばに相当する1997年3月5日、そして運行停止直前の1997年6月25日の日の出 (R) と日の入り (S) の大気圏外太陽光スペクトルである。図中に示されている数値は、第2図にも載せてある Fe の12本のフラウンホーファー線について、それぞれの吸収ピークが観測されたチャンネルを示している。ここで観測開始時から運行停止直前までのフラウンホーファー線吸収ピークを比較してみると、各フラウンホーファー線の吸収

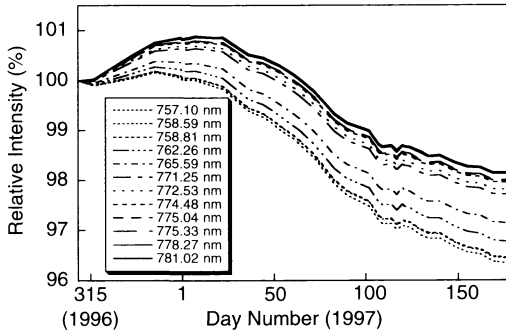
チャンネルにはほとんど変化が見られないことが分かる。

次に100%太陽光スペクトルの変化について考察する。第5図は全て同じスケールで表されているので直接比較が可能である。ここで注目すべきは、日の出と日の入りの両方とも同様な変化をしているということである。1996年11月5日の方が1997年6月25日よりも全体的に測定された放射強度が大きく、さらに詳しく見ると、短波長側の方が長波長側よりも変化率が大きくなっているのが分かる。

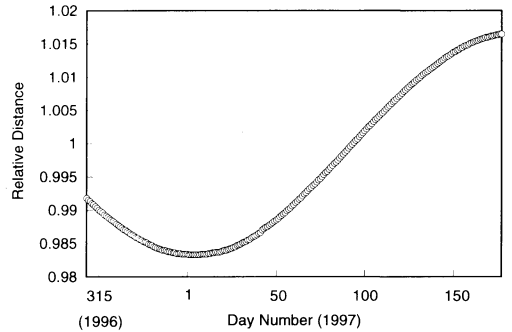
第6図は、縦軸に太陽縁辺の元素に吸収されていない、つまり太陽そのものの放射強度 (純太陽光強度) の1996年11月5日のデータを100%とした変化率を、横軸に1997年1月1日を Day Number 1とした季節変化をプロットしたものである。第6図を見ると、冬期に放射強度が増加し、1997年1月7日に放射強度が最大となり、そのあと徐々に減少している。観測視野角が観測物体の大きさより、十分に小さい場合 (太陽の視野角が32分に対して ILAS の視野角は2分で十分に小さい)、センサーの捕えている太陽の放射強度には本来変化がないはずである。第7図は ADEOS 内における ILAS 測器の取り付けられている基盤の温度の変化を、第6図と同様に季節変化としてプロットしたものである。第7図を見ると、温度についても第6図の純太陽光強度の変化と同様な変化が起きていることが分かる。この原因として第8図に示したように、太陽-地球間の距離が冬期に最短になることが挙げられる。太陽との距離が近くなっても、本来 ILAS 測器に取り込まれる放射強度は変わらないが、衛星自身に照射される太陽の光量は強くなり、それで測器の温度を上昇させる。反対に太陽-地球間の距離が大きくなると、衛星に照射されている太陽光は弱くなり測器の温度を低下させているのではないかとと思われる。以上のように考えるのも、これら3種のグラフの増減が、ほとんど同様に見えるからである。そこで、この3つのグラフについての相関を調べてみる。第9図の (a) は、純太陽光強度の変化と ILAS 測器の温度変化の相関を、(b) においては太陽-地球間距離の逆数と ILAS 測器の温度変化の相関を示している。これを見ると、(a) と (b) 共にプロットされた点が回帰直線からあまり外れておらず、それぞれ相関係数が0.9以上である。したがって、放射強度と ILAS 測器の温度変化はお互いに正の相関があり、また、ILAS 測器の温度変化と太陽地球間の距離の逆数についても同じことが言える。以上の結果よ



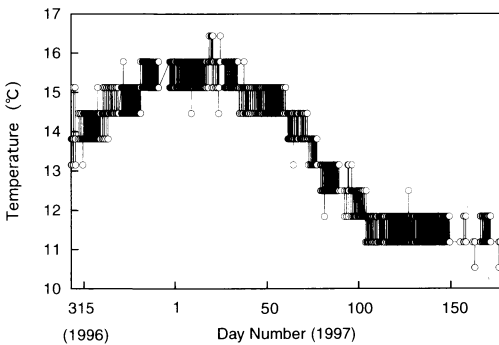
第5図 1996年11月5日, 1997年1月7日, 1997年3月5日, 1997年6月25日に観測された日の出と日の入りにおける太陽光スペクトル. チャンネル (ch) は Fe フラウンホーファー線の観測位置を示す.



第6図 Fe フラウンホーファー線の吸収波長位置での太陽そのものの放射強度 (純太陽光強度) の推移.



第8図 ILAS センサーの観測期間における太陽-地球間距離の推移. 太陽-地球間距離の年平均 (1.496×10^8 km) を1とする.

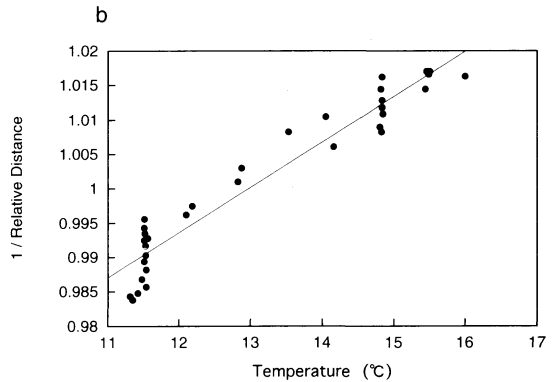
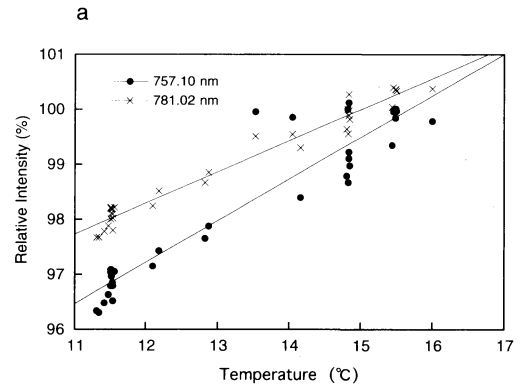


第7図 ADEOS の中で ILAS が取り付けられている部分の基盤の温度の推移. 異なる時間間隔で送られてきた温度データ (○) を折れ線グラフで表示してある.

り, 太陽の放射強度と ILAS 測器の温度との間には正の相関があり, この変化の原因としては太陽-地球間距離が深く関係していると考えられる.

6. 結論

測定開始時 (1996年11月5日) から運行停止直前 (1997年6月25日) までに観測された大気圏外太陽可視 (753-784 nm) スペクトルを解析した. フォトダイオードアレー検出器で測定される波長領域およびフラウンホーファー線の吸収チャンネルには, ほとんど変化が見られなかった. このことより, ILAS は波長に関しては安定したデータを与えていたといえる. しかし, 本来変化すべきではない太陽の放射強度には, 測定開始時と運行停止直前を比べると大きな変化が見られた. 放射強度の変化に合わせて ILAS 測器の温度もまた同様に変化していることが分かった. この観測事実より, 太陽の放射強度と温度には正の相関があるといえ,



第9図 (a) 純太陽光強度と ILAS 測器の温度変化との相関図. ●: 757.10 nm, 相関係数は0.941. ×: 781.02 nm, 相関係数は0.983. (b) 太陽-地球間距離の逆数と ILAS 測器の温度との相関図. 相関係数は0.965.

ILAS 測器の温度変化による測器の特性の変化が放射強度の大きな変化の原因であると推察される. また, ILAS 測器の温度変化については, 太陽-地球距離が季節変動するために衛星に照射されている太陽の光量が

変化するためであると推察される。

深く感謝いたします。

謝 辞

この論文で用いられたデータは、環境庁により開発され NASDA により打ち上げられた ADEOS 衛星に搭載された ILAS により得られたデータであり、国立環境研究所の ILAS データ処理運用施設 (ILAS DHF) により処理されたデータを使っている。

観測データを提供していただき、かつ原稿にコメントをいただいた国立環境研究所の ILAS プロジェクトリーダーの笹野泰弘博士、ならびに ILAS サイエンスチームの関係者の方々のサイエンスチームでの議論に

参 考 文 献

- Sasano, Y., M. Suzuki, T. Yokota and H. Kanzawa, 1995 : Improved limb atmospheric spectrometer (ILAS) project : ILAS instrument, performance and validation plan, SPIE Proceedings Ser., 2583, 193-204.
- Suzuki, M., A. Matsuzaki, T. Ishigaki, N. Kimura, N. Araki, T. Yokota, Y. Sasano, 1995 : ILAS, the Improved Limb Atmospheric Spectrometer on the Advanced Earth Observing Satellite, IEICE Trans. Commun., E78-B (12), 1560-1570.

Analysis of Extraterrestrial Solar Visible Spectrum (753-784 nm) Observed by ILAS

Tomokazu Kusakabe*, Ayako Omori**, Naoki Furuta**

* (Corresponding author) Faculty of Science and Engineering, Department of Applied Chemistry, Chuo University, 1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan

** Faculty of Science and Engineering, Department of Applied Chemistry, Chuo University

(Received 8 December 1997 ; Accepted 7 July 1998)

Abstract

Extraterrestrial solar visible spectra (753-784 nm) observed by ILAS (Improved Limb Atmospheric Spectrometer) from 5 November, 1996 through 25 June, 1997 were analyzed. The wavelength coverage due to a photodiode array and the absorption channels of Fe Fraunhofer lines were constant during the whole observation period. Then, it can be said that the ILAS provided stable data with respect to wavelength. However, a large time variation was found in the solar emission intensity which should not change. The time variation of the solar emission intensity had a positive correlation with that of temperature measured at the ILAS instrument. From the positive correlation between the solar emission intensity and the temperature, it can be estimated that the large variation was caused by the change of characteristics of the ILAS instrument due to its temperature change. The reason of the temperature change can be explained by the solar irradiance change due to the seasonal change of the distance between the sun and the earth.