航空機搭載用マルチバンドスキャナー (AMSS) の開発

The development of AMSS (Airborne Multi Spectral Scanner)

小熊 宏之

Hiroyuki OGUMA

Abstract: The Airborne Multi-Spectral Scanner (AMSS) is an airborne scanning spectrometer which provides spectral information similar to that which will be provided by the Global Imager (GLI) scheduled to be launched on the ADEOS-II platform in 2000. The AMSS acquires high spatial resolution imagery in the range of 0.40 to 12.45 microns, and a cross track scan width of ± 35 degrees. This paper introduces the outline of AMSS and the result of image quality check using Integrating Sphere and Black body. As a result, it was confirmed that the data of visible and near-infrared region has yet meet to the specifications and insufficient for scientific use.

1. はじめに

AMSS (Airborne Multi Spectral Scanner) は、可視域から熱赤外にわたり多数の観測チャンネルを持つ汎用型航空機搭載用マルチバンドスキャナーである。主に2000年に打ち上げが予定されている ADEOS-II/GLI (Global Imager) のアルゴリズム開発用データの取得を始め、将来型光学センサの観測諸元決定に資する目的で開発された。本報告は AMSS の開発及び性能評価について述べたものである。

2. 開発の経緯

地球環境問題の多様化に伴い、多岐に渡る物理量を衛星リモートセンシングにより広域・継続的に計測することが期待されている。このような背景から、各対象毎に最適化された観測バンドを持ち、複数の対象・物理量を同時に観測可能とする多バンド光学センサの

重要性が高まっている。光学センサのデザイン上重要となるのが、分光バンド数、中心波長、分光波長幅の決定である。衛星センサ以上に多数の観測バンドを持つ航空機センサを用いたデータ取得は、分光バンドの決定上非常に有効な手段であり、かつ衛星センサ打ち上げ前のシミュレーションデータとしてアルゴリズム開発に資するなど、今後のセンサ開発に必要なプロセスと考えられる。しかしながら国内においては、これらの要求を満足させる航空機センサが存在しなかったことから、1) 可視域から熱赤外に至る広範囲の波長帯をカバーし、データの同時収録が可能であること、2) 衛星センサの分光バンドの決定に際し、航空機センサが離散的なバンド構成では十分な検討が不可能であることから、可視域から短波長赤外域は連続分光、いわゆる Hyper Spectral (超連続多波長) を指向すること、3) 海面から雪氷面までの観測のダイナミックレンジを確保し、かつ海色観測に実用となる高い信号対雑音比 (SNR) を達成すること、といった設計目標を掲げ、新規に航空機搭載型光学センサ AMSS の開発を行った。ここで2) の Hyper Spectral データは、JPL 開発による AVIRIS の運用が開始されて以来、その有効性が認められ、陸域・海洋生態系、鉱物分野を始め数多くの研究がなされているが、日本においてはデータ取得の手段が存在しなかった。AVIRIS は可視～短波長赤外までの連続分光観測を可能とする

が、1) に示すように AMSS では熱赤外バンドを加えることで、より新しい知見が得られると期待されていた。AMSS の開発は中日本航空株式会社及び株式会社ジルコによって行われた。計画当初、可視域から 2 μm までの短波長赤外域を AVIRIS 同様に10nm 程度の連続分光とする予定であったが、部品調達上の問題など諸般の事由により、1000nm 以下の可視-近赤外域のみの連続分光に止まり、短波長赤外域は離散バンドとなっている。

3 . AMSS の概要

表 1 に AMSS の設計時における基本性能を示す。写真 1 は AMSS 本体である。以下に AMSS の主要部分について説明する。

3.1 スキャナー本体

図 1 に走査光学ユニットの概念を示す。AMSS の走査は45度固定角ミラーの回転により行われ、有効な走査角は約70度である。入射光は反射鏡による軸はずし光学系により集光され、ダイクロイックミラーを経て可視近赤外領域と短波長～熱赤外領域に分かれる。可視近赤外領域は 3 基のグレーティングにより連続分光され、オプティカルファイバーによりディテクターに到達する。ディテクターとしてヘッドオンタイプの超小型フォトマルチプライヤー（以下「PMT」。）が40バンド分と、高 SNR を要求されるバンドのため、サイド

写真 1 スキャナー本体

オンタイプの大型高感度 PMT を10バンド分用いている。観測中心波長及びバンド幅の設定は各 PMT に挿入するファイバーの変更によって行われる。ヘッドオンタイプの超小型 PMT には 2 本、それ以外のサイドオンタイプの PMT には 4 本までのファイバーが挿入可能である。ここで各オプティカルファイバーには、半値幅10nm、5 nm ステップで分光された入射光が導かれているため、最高10nm 連続の分光データが取得可能であり、中心波長も 5 nm 単位で設定可能である。1 μm 以上熱赤外領域までのバンドはダイクロイックミラーと干渉フィルターの組み合わせによる分光方式とし、基本的に ADEOS-II/GLI に準拠したバンド構成となっている。ディテクタには 1～2 μm の短波長赤外領域に InGaAs のフォトダイオード、3.7 μm が InSb の光起電力素子で、その他の熱赤外領域は HgCdTe の光導電素子を用いる。表 2 には AMSS の最終的な諸元を示した。

表 1 AMSS の設計時における基本性能

観測高度	500-8000m			
観測波長	観測波長	波長分解能	SNR,NE Δ T	IFOV
	400-1000(nm)	10nm連続	800(*)	2.5mrad
	1050	20	800(*)	5.0mrad
	1240	20	800(*)	5.0mrad
	1650	200	800(*)	5.0mrad
	2250	200	800(*)	5.0mrad
	3.715(μm)	0.3(μm)	0.1k at 300k	5.0mrad
	7.5	0.5	0.1k at 300k	5.0mrad
	8.6	0.5	0.1k at 300k	5.0mrad
	10.8	1.0	0.1k at 300k	5.0mrad
	12.0	1.0	0.1k at 300k	5.0mrad
走査角	40°以上			
量子化	14bit			

* SNR の規定は、アルベド 2 % (大気無し) の観測を想定する。

3.2 データ処理・データ収録

スキャナーからの出力はサンプリングを行った後 A/D コンバータへ入力される。サンプリングには一定走査角(1024画素/70度)で行うモード(タンジェント補正無し)と、走査角内における観測視野の地表面投影面積変動を補正するためサンプリング周期を走査角度毎に変えて収録する(タンジェント補正あり) 2 つのモードがある。更にオプティカルジャイロにより、機体のローリング角の補正を同時に行う。次に14bit に量子化された後、S-VHS テープを記録媒体とする METRUM 社の VLDS(データレコーダ) に収録される。これにより約10Gbyte(44分の観測時間に相当) のデータ収録が可能である。なお、データレートの関係

図1 走査光学系の概念図

表2 AMSS の観測バンド構成の一例

走査方式	45°固定角ミラーによる機械走査		
走査角			
観測波長			
中心波長	波長分解能	IFOV	
405.3～765.6nm	10nm×30band	2.5mrad	
784.2～941.3	15～20nm×7band	2.5	
1050.8	16.1nm	5.0	
1239.8	20.5	5.0	
1631.8	217.5	5.0	
2233.4	198.3	5.0	
3.716μm	0.34μm	5.0	
7.482	0.53	2.5	
8.246	0.56	2.5	
10.764	1.01	2.5	
11.959	1.08	2.5	
収録バンド	46バンド		
量子化	14bit		
観測高度	500～8000m		

上全観測バンドは収録できず、予め選択した46バンドを収録することとなる。

3.3 地上処理装置

取得データは地上処理装置によりフォーマット変換され、最終的に exabyte8mm テープへ BIL 形式にて格納される。更にこの時点で、1) 進行方向のオーバースキンをライン間引若しくはライン方向の加算平均によるサンプリングを行うフットプリント補正、2) タンジェント補正(実観測時タンジェント補正なしでデータ収録を行った場合のみ)、3) 画素の縦横比及び偏流角補正を行う V/H 補正、4) 地上校正データを基準とした観測値の分光放射輝度変換、を行うことが可能である。

3.4 校正機器

航空機センサは観測の度に、大気中の水蒸気・エアロゾル等の付着による走査ミラーの反射率が低下し、更に運用時には機体の振動等の厳しい運用環境に曝される。そのため観測の前後における校正が必要不可欠

である。AMSS の地上校正源として大型積分球、平面黒体炉を整備しており、定常的に地上校正を行う。また大型積分球による校正は AMSS 本体を機体に装着した状態でも可能である。

4. データ評価

4.1 標準積分球を用いた可視近赤外バンドの SNR 評価

1998年3月に名古屋空港格納庫において、AMSS の校正が行われた。その際、積分球の観測データを5000ライン分取得した。校正時 AMSS は機体に装着した状態で運用し、機体電源ではなく地上電源を用いた。AMSS はスキャン方向に1024画素(カラム)を持つが、積分球の開口の中心が、AMSS 画像の中心である512カラムに位置するよう調整した。次に512カラム目×5000ライン分のデータを輝度値に変換した後、次式により SNR を計算した。

SNR = 平均輝度値 / 標準偏差 (1)

図2に可視近赤外バンドの SNR と積分球の観測輝度値、更に積分球の輝度値との比較のため AMSS で取得した河口湖面上約400画素分の平均輝度値を示した。地上で積分球を観測するといった非常に理想的な

図2 可視近赤外バンドの SNR と SNR を求めた時の積分球の分光放射輝度値、参考として AMSS 観測による湖面上の上向き放射輝度を併せて示す。

図3 入射光を遮断した状態での、可視近赤外バンドのノイズ出力

条件にもかかわらず、各バンドの SNR は低い値となった。500nm より長波長側では積分球の輝度値が湖面上の輝度値を上回るが、湖面を始め水域の観測では図2に示す以上の SNR を得る事は困難であると言える。SNR の最高値はバンド34(848nm)の28であるが、これは積分球による入射光量が高いためである。更に3項で述べたようにバンド19(667nm)より長波長側の数バンドは大型の高感度 PMT を用いているが、SNR 上大きな改善にはなっていない。次に暗時のノイズレベルについて評価するため、AMSS の開口部を塞いだ状態でのデータを取得し、511カラム目×5000ライン分のノイズ出力を求めた(図3)。暗時条件下では短波長側のバンドで約0.2w/m²/sr/μm のノイズが存在するが、長波長側で増大する傾向にあり、最大で4w/m²/sr/μm のノイズが存在した。原因としては、図1に示すように長波長側の入射光は検出器に至る過程で数段のダイクロイックミラーにより減衰を受けるため増幅器のゲインを上げているが、同時に電氣的ノイズまでも増幅し暗時のノイズレベルを大きくしているものと考えられる。以上の事から可視近赤外バンドの SNR は基本要求性能に遠く及ばない事が判明した。

4.2 NEΔT

AMSS の熱赤外バンドの評価には1997年10月に行われた観測実験と直後の地上校正時のデータを用い

表 3 内部参照黒体データから求めた熱赤外バンドの NE Δ T

AMSS/TIR band	NE Δ T@20°C
band42	1.2051
band43	0.1183
band44	0.0925
band45	0.1169
band46	0.2309

AMSS/TIR band	NE Δ T@50°C
band42	0.3520
band43	0.0410
band44	0.0422
band45	0.0714
band46	0.1230

図 4 熱赤外バンドによる内部参照黒体 (50°C) の100ライン分の観測値

た。熱バンドの校正は外部基準黒体を用い、0～70°Cまで10°C間隔のデータを収録しAMSSのDigital Number(DN)に対する温度換算式を求める。AMSSのDNから輝度温度への変換は以下の手順による。まずDNから放射エネルギーへ二次の回帰式によって変換した後、放射エネルギー値からプランクの放射式により輝度温度へ変換する。AMSSは内部に高温側が50°C、低温側が20°Cの参照黒体を備えている。観測実験で取得した100ライン分の内部参照黒体(50°C側)のDNを輝度温度へ変換したプロファイルを図4に示す。本来50°Cであるはずの内部黒体の平均観測温度が各バンドによって変動しており、温度変換式の誤差を大きく上回ることから、実観測時に何らかの原因でセンサ出力の変動が生じたものと思われる。表3に内部参照黒体観測出力の5000ライン分から得たNE Δ Tを示した。バンド42(3.7 μ m)の20°C観測時以外は概ね要求仕様を満足させるものである。しかしながら、図5に示すように、バンド42(3.7 μ m)の20°C側参照黒体を5000ライン分観測したプロファイルでは最大～最小値で10°C程度の差が存在するなど画素単位での観測温度は非常に不安定なものと言える。

5. 取得画像の紹介

写真2は1996年9月12日ハヶ岳付近で取得された画

図 5 バンド42による内部参照黒体 (20°C) の5000ライン分の観測値

像の一部である。可視域の画像に比較して、SNRが低下する近赤外バンドの画像は非常にノイズ成分が多いことが分かる。データ取得条件は飛行高度15000ft、取得時間は10:56～11:02で、完全快晴であった。本画像はタンジェント補正までを施しており、V/H補正、フットプリント補正は行っていない。

6. まとめ

AMSSの概要と性能評価の一部について紹介した。校正用積分球を用いた可視近赤外域バンドのSNR評

701.1nm (10.2nm)

942.8nm (14.0nm)

写真2 観測画像の一例()内は波長分解能

価の結果、現状では低い値である事が判明した。実観測時の内部参照黒体データを用いた熱赤外バンドのNEΔTの評価からは、 $3.7\mu\text{m}$ バンド以外は概ね要求性能を満たしていることが分かった。本稿執筆時点では短波長赤外バンドの校正データが未入手であったが、入手次第、評価を継続する予定である。なお、AMSS データの一部は ftp://ftp.eorc.nasda.go.jp/cdroms/ADEOS2_GLI-1/ あるいは [ADEOS2_GLI-2/](ftp://ftp.eorc.nasda.go.jp/cdroms/ADEOS2_GLI-2/) からダウンロード可能である。またダウンロードが困難な場合、宇宙開発事業団地球観測データ解析研究センターではAMSSのサンプルCD-ROMを配布しているのでこちらも入手可能である。関心のある方は是非データを入手して評価して頂きたい。現状のAMSSは残念ながら要求性能を全て満足していると

は言えないが、可能な限り多数のユーザからの評価をフィードバックしつつ、完成させていく必要があると考えられる。

(受付日1996.9.12, 受理日1998.7.16)

参考文献

宇宙開発事業団地球観測センター技術資料 HE93093
航空機搭載用マルチスペクトロスキャナー(MSS)技術要求書, 1993

JPL Publication 87-38 Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) A Description of the Sensor, Ground Data Processing Facility, Laboratory Calibration, and First Results Nov. 15, 1987