

温室効果気体センサ “IMG”

Interferometric Monitor for Greenhouse Gases

下田 陽久
SHIMODA Haruhisa

中島 南海夫
NAKASHIMA Namio

亀田 芳彦
KAMEDA Yoshihiko

人類の活動により温室効果気体が大気中に放出され、地球全体の平均気温が急激に上がり始めている現象のことを地球温暖化と言う。大気中に微量に含まれる二酸化炭素 (CO₂)、メタン (CH₄)、亜酸化窒素 (N₂O)、フロンなどが温室効果気体と言われ、これらの気体濃度が増加することにより地球規模で気温が上昇し、その結果、海面の上昇など地球は新たな異常気候に直面すると懸念されている。

これらの背景を基に、通商産業省の委託により温室効果気体センサ IMG (Interferometric Monitor for Greenhouse gases) の開発が始まり、地球観測プラットフォーム技術衛星 “ADEOS” に搭載された。IMG は、フーリエ変換赤外分光放射計であり、マイケルソン干渉計を搭載して温室効果気体などを観測する世界初の観測装置で、磁気軸受を採用した走査鏡、大口径の光学系、高安定度、高精度かつ小型・軽量化 He-Ne レーザなどの要素技術により、高感度、高波数分解能を達成した。

Rising levels of greenhouse gases are expected to cause climate change, and there is evidence that humanity's greenhouse gas emissions may already be having an effect. Carbon dioxide, methane, nitrous oxide, and chlorofluorocarbons (CFCs) are so-called greenhouse gases. As a result of their effect, the mean sea level is expected to rise and the Earth will face new climatic stresses.

These conditions have led to the development of the interferometric monitor for greenhouse gases (IMG) under a contract with the Ministry of International Trade and Industry (MITI). The IMG was loaded on the Advanced Earth Observing Satellite (ADEOS), which was launched by the National Space Development Agency of Japan (NASDA) on August 17, 1996. The IMG is a Fourier transform infrared radiometer employing a Michelson type interferometer. The results obtained by the IMG's performance are supported by key technologies such as a magnetically suspended traveling mirror, large optics, and a stable and precise He-Ne laser.

1 まえがき

1997年12月、地球温暖化防止京都会議 (COP3) が開催された。地球温暖化は、人類の活動により温室効果気体が大気中に放出され、地球全体の平均気温が急激に上がり始めている現象のことをいう。大気中に微量に含まれる CO₂、CH₄、N₂O、フロンなどが温室効果気体と言われ、これらの気体濃度が増加することにより地球規模で気温が上昇し、その結果、海面の上昇や異常気候が懸念されている。

リモートセンシング (遠隔探査) により、世界的な温室効果気体分布を把握し、上記問題の解明、科学的知見への貢献などを目的として IMG (図1) の開発が89年に開始された。なお、この論文は助資源探査用観測システム研究開発機構が通商産業省からの受託研究として実施した成果の一部を含めて取りまとめたものである。

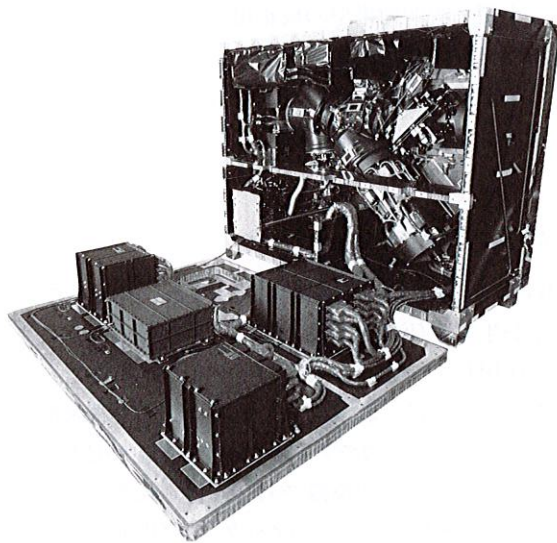


図1. IMG の内部構造 IMG は電子機器パネル、光学機器パネルおよび中央構体から成る。写真は電子機器パネルを開いた状態を示す。
Internal view of IMG engineering model

2 IMG の概要

IMG は、地表および大気の赤外放射スペクトルを高精度

に測定することができる。放射スペクトルとは簡単に言えば波長とエネルギーの関係を示すものである。一般的に、物質の温度と放射スペクトルの関係はプランクの輻射則に従うが、CO₂などの温室効果気体は分子の振動および回転運動により特定の波長領域で複雑な放射、吸収現象を示す。なお、波長が10 μm 付近の赤外光は大気の吸収がなく、大気の窓と呼ばれ、地表、海表面の温度を計測することができる。

IMG のミッションには、①温室効果気体の水平分布の観測、②気温と水蒸気の垂直プロファイルの観測、③オゾン全量の水平分布の観測、④赤外熱放射スペクトルの精密測定、⑤地表および海面温度の精密測定の検出などが挙げられる。

IMG は、3.3~14 μm の波長帯、換言すれば 3,030 cm⁻¹ から 714 cm⁻¹ の波数域を 0.1 cm⁻¹ の分解能で観測することができる（この単位 cm⁻¹ は周波数に相当するもので、1 cm 当たりの波の数を示す）。

気体の吸収／放射プロファイルは特有の波長帯においてある程度の広がりをもつので、複数のチャンネルでデータを解析することにより逆に特定の気体の濃度が計算できる。

IMG の特長を列挙すると次のとおりである。

- (1) 観測波長帯を赤外線領域 (3.3~14 μm) とするフーリエ変換赤外放射計
- (2) 光学系、電気系を一つのユニットに収納した一体型構成
- (3) 干渉計の走査鏡部には磁気軸受を採用し、10 cm ストロークによる高波数分解能の実現、非接触により長寿命化
- (4) 小型、高安定な He-Ne レーザ開発により波数軸の高精度化を実現
- (5) 小型・空洞効果型の校正用黒体の開発により、エネルギー軸の高精度化を実現
- (6) 半導体赤外線検出器および大口径 (10 cm) 光学系の採用により高感度を実現

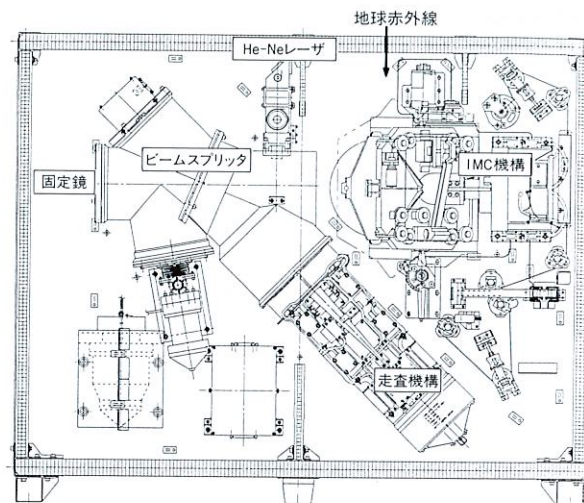


図2. IMG 光学機器パネル機器の配置 地球からの赤外線は図の右上(矢印)から入射し、IMC (イメージの移動を補償する機構)を経由して左の干渉部へと進む。

Layout of instrument panel

IMG の光学機器パネルの機器配置を図2示す。

光学系は、SN比を向上させるために口径を10 cmと地上機器でも例が少ない大口径化を図っている。特に、ビームスプリッタはGeの薄膜で、KBrで保持する形となっており、打上げ環境に耐えるために保持方法にくふうをこらした。

IMC (Image Motion Compensator) は、地球、深宇宙および搭載黒体の3方向の視線切換えならびに地球の自転による像の動きを補正する機構である。IMCで反射された赤外線は干渉計に入り、ビームスプリッタで走査鏡側、固定鏡側に分岐され、再度ビームスプリッタを経由して集光鏡に入射し検出器に集光される。

走査鏡の軸受は、無潤滑で長寿命および電氣的に角度調整可能という特長に着目し、磁気軸受を採用した(図3)。

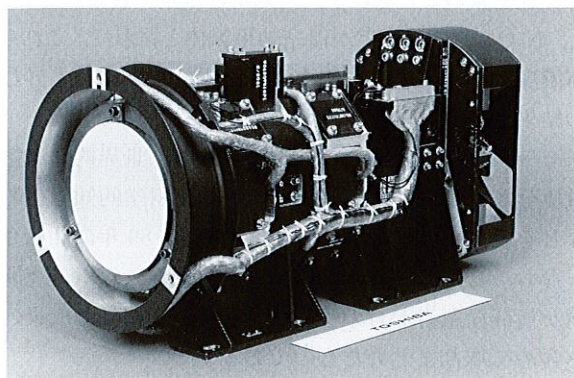


図3. 磁気軸受走査鏡機構 マイケルソン干渉計の走査鏡を磁気軸受で浮上および保持し、直線距離100 mmを10秒間で直線移動させる機構である。

Magnetic traveling mirror

3 主要構成要素

IMG は光の波動性を積極的に利用する。入射光を分岐し、光路差が生ずる仕組みを経た後に、再度干渉を起こさせる方法を採用している。方式はマイケルソン干渉計と呼ぶものである。これは、数学的には周波数分布を機械的にフーリエ変換をしているのでフーリエ分光法とも呼ばれる。IMG は機械式のフーリエ変換器であり、得られたデータを地上で逆フーリエ変換すると元のスペクトル(周波数-振幅分布)が得られる。地上機器はFTIR (Fourier Transform Infrared Radiometer) として有名であり、化学物質の同定などに広く使用されている。

走査鏡は鉄系のヨークに取り付けられており、このヨークを磁気浮上させる。走査鏡は距離 10 cm を移動させるが、この直線運動はムービングマグネット型のリニアモータにより行う。

走査鏡の高精度指向角度制御を行うために、レーザ光を使用したダイナミックアライメントも併用している。ダイナミックアライメントは、磁気浮上用センサ誤差、磁気軸受制御ダイナミック誤差を補償するため、1 走査時間内で連続してアライメントを制御する。

He-Ne レーザ (図 4) は、マイケルソン干渉計の走査鏡の位置を高精度に検出するために波長安定度の高い単色光を発振するよう、特に温度安定度に注意を払った。また、搭

載用として小型・軽量化を図った。出力は 0.2 mW、発振波長は 633 nm、発振波長安定度は 3×10^{-7} である。

検出器は、短波長側の第一、第二バンドに InSb の光起電圧型を、長波長側の第三バンドに HgCdTe の光導電型を採用している。校正用の黒体は、空洞効果による放射率向上を図り高精度を達成した。

4 IMG の主要特性

IMG の主要特性を表 1 に示す。

表 1. IMG の主要特性

Major characteristics of IMG

項 目	特 性
波長域	3.3~14 μm
バンド数	3
波数分解能	0.1 cm^{-1}
安定度	<0.38 K(1 σ)
データレート	882 kbps
消費電力	149 W
質 量	129.7 kg
寸法	1,150×930×650 mm

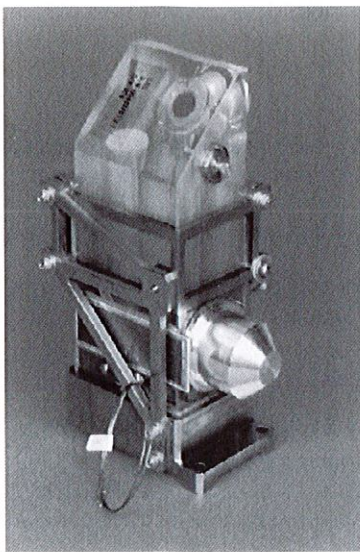


図 4. He-Ne レーザ 東芝が開発したレーザで高性能、超小型化を実現した。
He-Ne laser

5 成果

約 8 か月にわたる観測で得た貴重なデータは(財)資源・環境観測センターから内外の研究者に配布され、成果の一部

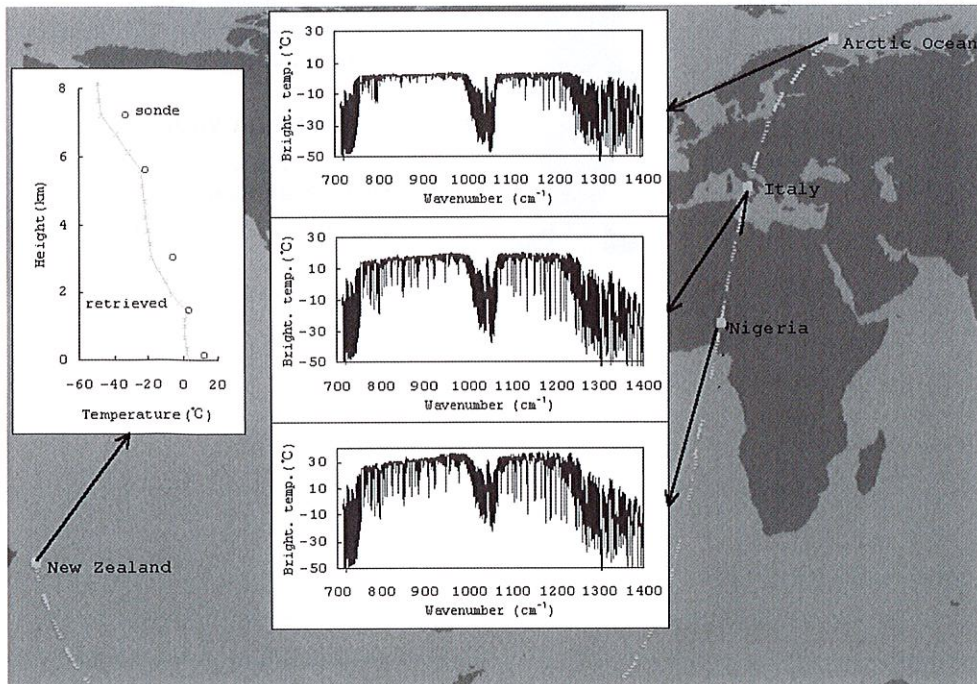


図 5. 初観測データ 世界で初めて取得した高分解能データを示す。(資料提供：資源・環境観測解析センター)

First data gathered by IMG

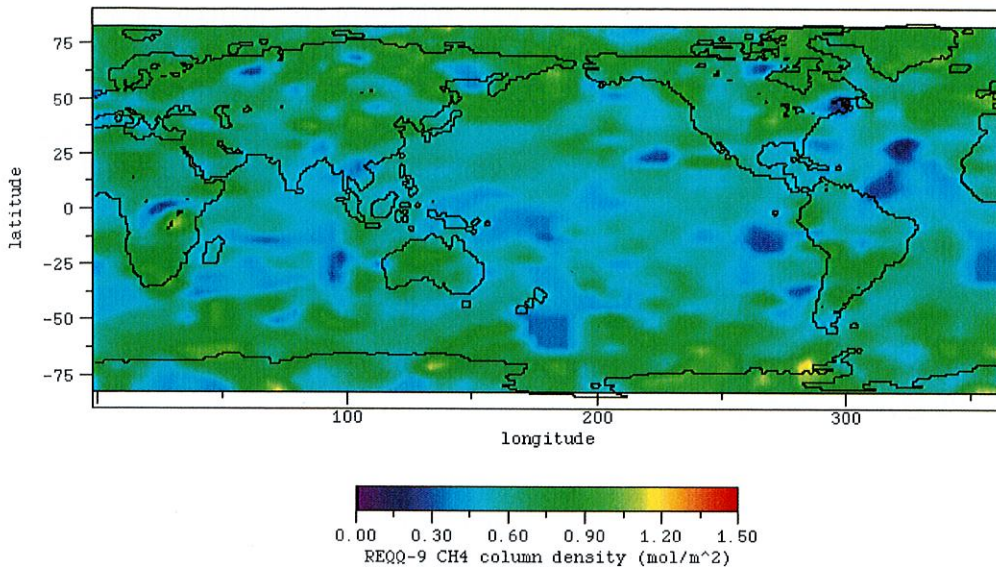


図6. 全球メタンマップ 97年6月の全球メタンマップを示す。メタン濃度は黄色の部分が高く、濃紺の部分が高いことを示している。(資料提供：資源・環境観測解析センター)

Global methane map obtained by IMG

はインターネットでも公開され、現在も解析が進められている。図5は初観測で得たデータで、北極からヨーロッパ、アフリカを通過する軌道である。図の中心に各地のスペクトルが示されている。図の左の部分は高次レベル処理によって得たニュージーランド沖の温度垂直分布である。

図6は、高次処理後のグローバルなメタンマップである。

- (3) 今須良一, IMG インタフェログラムデータの位相補正手法と位相誤差の反転解析結果への影響について, 日本リモートセンシング学会誌, 17, 5, 1997, p.114-121.
- (4) Kobayashi, H. IMG PROGRAM REPORT. The Third ADEOS Symposium, 1998, p.65-82.
- (5) 奥村英輔, 他, インタフェロメトリ原理を適用した IMG センサー技術, 計測と制御, 135, 9, 1996, p.679-682.

6 あとがき

IMG は世界初の宇宙用高分解能 FTIR を実現し、グローバルな温室効果気体の分布を観測することができた。

また、この開発が契機となり、宇宙用フーリエ変換赤外放射計に関する国際ワークショップが定期的開催されていることを書き添える。

文献

- (1) 小川利敏, ADEOS 衛星搭載用 IMC, 天気誌, No1, 1993, p.38-42.
- (2) 下田陽久, ADEOS サイエンスプログラムの現状, 日本リモートセンシング学会誌, 17, 5, 1997, p.1-6.



下田 陽久 SHIMODA Haruhisa, D.Eng.

東海大学教授, 宇宙開発事業団招聘研究員, 工博。画像情報工学, リモートセンシングなどの研究に従事。Tokai University and NASDA Earth Observation Research Center



中島 南海夫 NAKASHIMA Namio

資源探査用観測システム研究開発機構主幹。リモートセンサの開発に従事。Japan Research Observation System Organization



亀田 芳彦 KAMEDA Yoshihiko

小向工場 宇宙プログラム担当主幹。宇宙機搭載機器技術推進業務に従事。Komukai Works