

平成21年 5月14日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2008

課題番号：18560781

研究課題名（和文）衛星搭載センサの紫外線劣化に対する光洗浄法の有効性評価

研究課題名（英文）Feasibility estimate for UV-light cleaning against the output signal degradation of earth observing sensors on orbit.

研究代表者 伊藤 信成（ITOH NOBUNARI）

三重大学・教育学部・准教授

研究者番号：60344272

研究成果の概要：

本研究は、人工衛星搭載センサから送られる地球観測データに見られる経年劣化現象の原因として有力視されている分子ガスの吸着に注目し、室内実験及び実際のセンサ出力変動との比較により原因究明を図ったものである。センサの主観測帯である紫外～赤外の波長域における分光劣化特性について系統的かつ定量的な評価を行った。本研究により、地球観測センサの分光劣化特性について、室内実験と軌道上データを結びつけることが可能になったと考える。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,700,000	0	1,700,000
2007年度	900,000	270,000	1,170,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	540,000	4,040,000

研究分野：リモートセンシング

科研費の分科・細目：総合工学・地球・資源システム工学

キーワード：人工衛星, 較正, ガス吸着, 劣化, 透過率

1. 研究開始当初の背景

温暖化に代表される地球規模での環境変動の把握は、今後の地球上での気候変動、ひいては人類の居住環境の変動を予測する上で不可欠である。広域かつ継続的な測定が可能な地球観測衛星は、この目的に対し、理想的な測定手段と言える。観測衛星に搭載される光学センサには、紫外域から赤外域に多数の観測波長が設定され、検出器からの出力値が地上に転送される。

この衛星搭載センサからの出力値は、通常、

検出器からの出力電圧を A/D 変換したデジタル値に過ぎない。したがって、センサ出力を環境変数に変換するためには、輝度較正が必要となる。多くの地球観測センサでは、放射輝度が既知の較正基準光源（ランプ、太陽、月、等）を用い、基準光源測定時と観測対象測定時の検出器出力の比較から、観測対象の分光放射輝度を推定している。基準光源の出力値は、較正基準となるため、安定性が強く求められ、その変動は、較正結果としての分光放射輝度の信頼性に直接効いてくる。しかしながら、実際の較正では、ほとんど全ての地球

観測センサで、搭載光源の出力値が時間と共に低下するという現象が報告されている。環境観測技術衛星みどり2号に搭載された地球観測センサであるグローバルイメージャの例を図1に示す。この例からは、基準光源の変動が10ヶ月で最大20%に達し、その変動量は波長依存性が極めて大きいことがわかる。

このため、基準光源の出力値変動要因の解明と変動量の軽減は、現在の地球環境を正確に把握し、将来に渡る環境変動を考える上で、不可欠な課題と言える。基準光源出力低下現象の原因は、幾つか挙げられてはいるが、系統的な原因究明は行われておらず、明確な原因究明は出来ていない。また、原因究明が出来ていない現状では、科学的根拠が希薄なため、補正方法に起因する誤差推定が難しく、光量低下現象の原因を解明しない限り、有意な物理量の導出は困難であると考えられる。原因究明のためには、提唱されている個々の要因に対して定量評価を行うことが不可欠である。

なお、衛星軌道上でのガス付着現象に関する研究は、人工衛星という特殊性もあり、米国航空宇宙局(NASA)や欧州宇宙機関(ESA)といった限られた機関で行われて来ているに過ぎない。ただし、そこでの計測も、衛星あるいはセンサ構成部品からのガス放出量あるいは放出ガス種の特定であり、光学面へのガス付着による分光透過・反射率の変動という観点から行われている研究は僅少である。またその測定例においても、吸着量制御をしていないため、透過率変動をはじめとする光学パラメータとガス吸着量との定量関係の把握は出来ていない。国内においては、衛星センサに対する汚染ガス吸着による分光特性変動という観点での測定は例がない。従って本研究が国内における初の試みとなる。本研究は、今後ますます重要になってくる衛星からの地球観測において、基盤となる校正技術に直接影響するため、重要な意味を持つと考える。

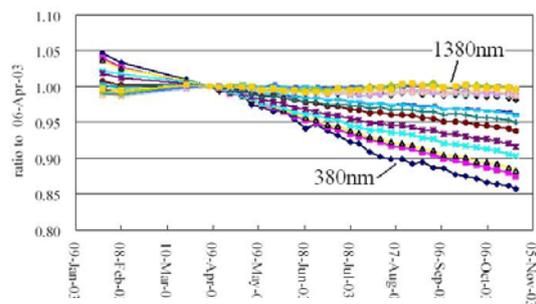


図1: 衛星搭載の地球観測センサの1つであるグローバルイメージャで観測された基準光源変動(最大20%/10ヶ月)

2. 研究の目的

軌道上での出力低下現象の有力要因としては、大きく以下に示す3種のプロセスが考えられている。

- 1) 地上作業時に衛星筐体に付着した微粒子、あるいはセンサの駆動機構部での発塵が光学系に付着し、光路を遮蔽することによって発生する光学系の透過率低下現象。
- 2) 軌道上の真空状態で発生するアウトガスが光学面に吸着することによって生じる光学系の劣化。
- 3) 上記2)と関連するが、光学系への吸着ガスが軌道上での紫外線によって変性し、不透明膜を生成することによって生じる劣化。

我々はこれまで、1)のプロセスについて、衛星保管環境下でのデータ収集、実験室での透過・散乱特性の計測を行ってきた。しかしながら、この2種のプロセスのみでは、波長依存性も含め、軌道上での観測センサの劣化現象を定量的に説明できていない。そこで本研究では残る2種の効果について影響評価を行う。さらに軌道上で運用された地球観測センサの出力値変動と実験室での測定データを比較することにより、ガス吸着のセンサ出力変動への寄与を定量的に評価する。

3. 研究の方法

本研究の特徴として、まず分光観測が挙げられる。地球観測センサは可視から赤外域にかけて多くの観測バンドを持つ。特に紫外～近赤外域では、1つの観測バンド幅が8~10nmと非常に狭い。このような狭いバンド幅の場合、ガス吸着に伴う分子吸収バンドが少しでも観測波長帯に掛かるだけで、吸収の影響を大きく受けることになる上、太陽紫外線により有機膜が形成された場合には、単にガス分子の吸収帯のみならず、広い波長域に渡って影響を受けることになる。これまで、有機材料からのガスの放出率の測定については報告があり、衛星の温度管理の観点から、赤外線域での熱吸収率の変動についての測定も行われている。しかし、光学センサの劣化現象解明に不可欠と考えられる分光感度の変動については、報告例は僅少である。本研究では紫外～近赤外域にかけては1nm、赤外域では0.4cm⁻¹の分解能で計測を行うため、高い波長精度で透過率変動を測定できる。また、観測波長域も0.3μm~25μmと広く、現在運用あるいは計画されている地球観測センサの観測波長をほとんどカバーしている。図2に測定システムの概念図と紫外・可視域測定装置の写真を

示す。使用するガス種としては、衛星の組み立て過程で実際に使用されている部材から基本的なガス種を用いることで、軌道上で実際に発生しているであろう吸着条件を再現することが可能であると考える。

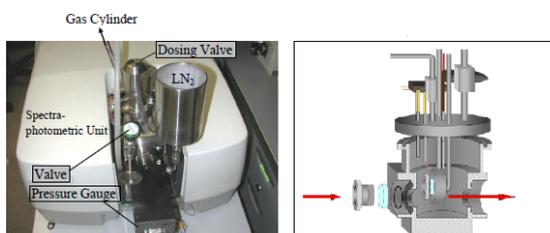


図 2：紫外・可視域用測定システム(左)と赤外用ガス吸着セルの構造図(右)

4. 研究成果

研究成果としては大きく 3 点を挙げる。

①水分子吸着

軌道上でのガスコンタミネーション源としてセンサ開発者から最も関心を寄せられているのが水である。水分子吸着による透過特性変動を計測した結果、a) 光学面上での吸着水分子の相変化を確認でき、b) 吸着と脱離の各過程で透過特性が異なることを検出した (図 3)。c) 脱離過程で透過率低下が増幅されることは、軌道上でのベーキング・プロセスを考える上で無視できない現象である。さらに、c) 光学面上での結晶成長をモデル化し、観測結果を説明することに成功した (図 4)。本計測は冷却光学系における吸着減少を念頭においたものであるが、結晶成長による散乱光の増加は可視光学系へも影響するものであり、可視光学系へのフィードバックも可能となる。

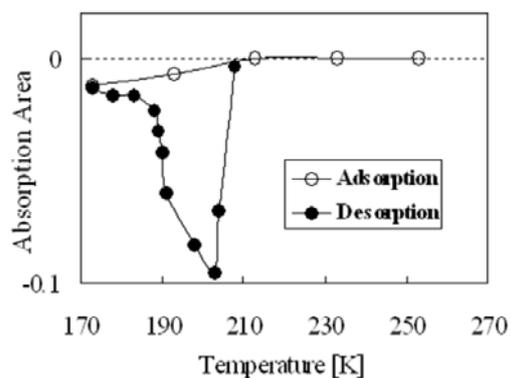


図 3： $\lambda=3.1\mu\text{m}$ における水分子吸収線の透過面積の変化。吸着過程(白丸)と脱離過程(黒丸)で透過率の変化傾向が異なり、脱離過程で透過率が急激に低下する領域がある。

② 3 種の有機ガス吸着による透過率変化

軌道上で発生するガス種は多岐に及ぶため、すべてのガス種について計測を行うこと

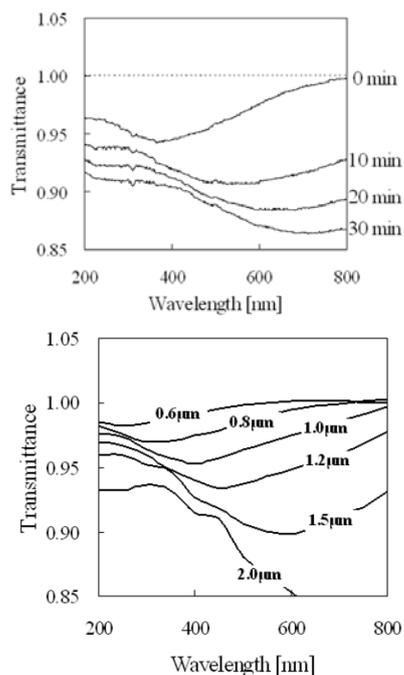


図 4：SiO₂ 表面への水分子吸着による分光透過率の時間変化 (上) と結晶成長による散乱をモデル化した数値計算結果 (下)。吸着後の時間経過とともに透過率の極小値が長波長側にシフトする現象がモデルで再現出来ている。

は現実的ではない。そこで、基本的なガス種 3 種を選択し、そのガスの吸着による透過率の変動を測定した。選択したガス種は 2-プロパノール、酢酸エチル、ジクロロメタンで有機塗料の溶剤として広く使用されている (図 5)。各ガス種に対する計測の結果、紫外-可視域においては、ガス分子の結合が分光特性に大きく寄与していることがわかった (図 6)。さらに軌道上で運用されている光学センサの劣化の分光特性と比較したところ、a) 独立して組立・試験を行ったセンサにもかかわらず、劣化の分光特性が非常によく一致していることが確認された。この結果は、劣化がセンサ共通の原因によって発生していることを示すものである。また b) 室内でのガス吸着実験結果と比較したところ、 π 結合を有するガス種よりも σ 結合のみのガス種の吸着の方がよりセンサの劣化特性と良い一致を示した。この結果は軌道上で光学系に吸着するガス種を特定する糸口となると考える。

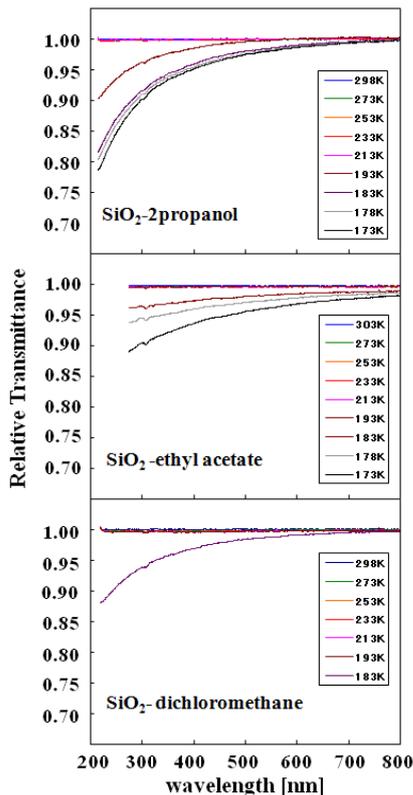


図5：SiO₂への有機ガス吸着による透過率の変化。色の違いは吸着温度の違いを表す

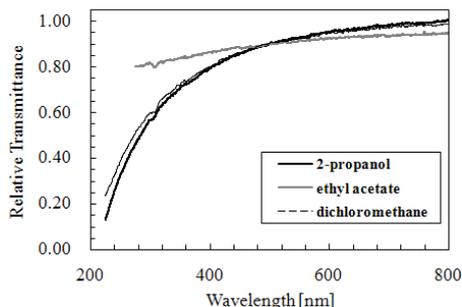


図6：3種のガス種の相対分光透過率。分子内結合の種類により透過率特性が異なる。

③軌道上で運用されたセンサ間の分光劣化特性および室内実験結果との比較

室内実験で得られた分光透過率の結果を、軌道上で運用されているセンサの出力特性と比較した。比較に用いたセンサは、宇宙航空研究開発機構によって開発され、環境観測技術衛星「みどり2号」に搭載されて2002年に打上げられた光学撮像センサ Global Imager (以下 GLI)、および米国航空宇宙局によって開発された光学撮像センサ MODIS である。これらのセンサは観測対象およびセンサ仕様が類似しており、比較が行いやすい。なお MODIS は 1999 年に打上げられた地球観測衛星 Terra および 2002 年に打上げられた地球観測衛星 Aqua に各 1 機ずつ搭載されているので、前者を MODIS/Terra、後者を MODIS/

Aqua と区別し、計 3 機のセンサの出力を比較した(図7)。その結果、センサ間の分光劣化特性が極めて良い一致を示すことが確認できた。独立に製造・組立が行われたセンサ間で類似の劣化特性を占めたことは、軌道上での劣化がセンサ固有ではなく、共通する原因で発生していることを示すものである。さらに室内実験との結果と比較したところ、図6で示したようにガス種毎に透過特性がことなることから、センサ劣化の場合には、σ結合をもつガスの吸着により大局的な劣化特性が説明できることがわかった。

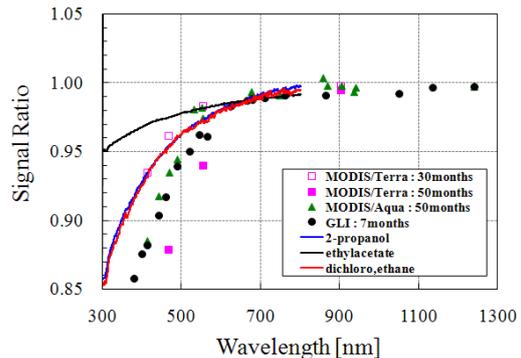


図7：3種のセンサ(GLI, MODIS/Aqua, MODIS/Terra)の出力信号劣化の分光特性と室内実験結果の比較

④センサ出力から軌道上での分子膜厚

センサ出力の分光劣化特性は、軌道上での経過時間とともに進行する。この劣化が吸着したガスの膜厚変化であり、吸着ガスの種類が時間によらず一定だと仮定すると、軌道上における分子膜厚の成長率を推定することができる。図8はMODIS/Terraのデータを用い、打上~30ヶ月までと30ヶ月~50ヶ月までの成長率の比を波長ごとに計算した結果である。上記仮定が正しければ、膜厚の成長率は波長によらず一定になるはずである。図からは900nmで誤差が大きいものの、膜厚変化モデルと矛盾しない結果を得ることが出来た。

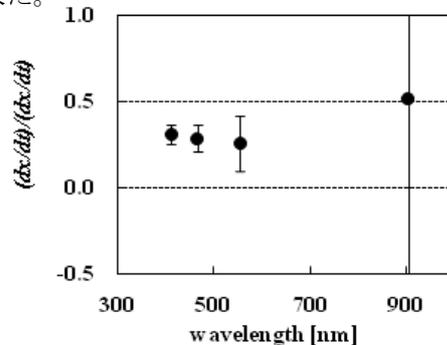


図8：MODIS/Terraのデータから求めた軌道上での膜厚成長率の変化。すべての波長で同じ成長率が得られた。

同様の手法を GLI のデータにも適用し、より短い時間間隔での膜厚成長率の変化を計算した結果を図 9 に示す。GLI には光学系の最前面に両面鏡（以降、走査鏡と呼ぶ）が設置されており、異なる 2 面の鏡を用いて地球からの反射光をセンサ光学系に導入している。図では操作鏡の各面毎に解析を行った結果を示しているが、互いに矛盾しない結果となっている。図中の実線は指数関数での最小二乗を適用した結果を示しているが、膜厚成長率が時間とともに減少していることがわかる。センサ躯体からのガスの放出は時間とともに減少することが地上実験からわかっており、この結果もこれまでの考えと矛盾しない結果となっており、軌道上でのセンサ躯体からのガス放出現象を間接的に確認したものとなっている。

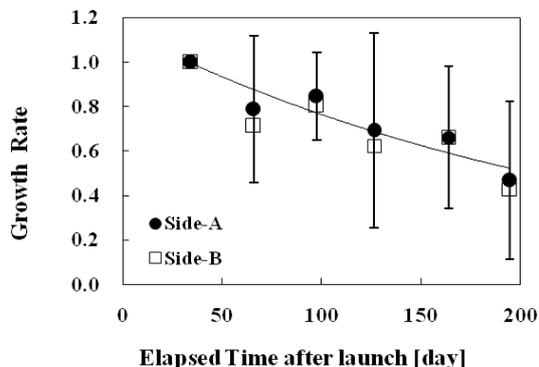


図 9 : GLI のデータから求めた膜厚成長率の時間変化

以上より、本研究ではセンサ光学系へのガス吸着の影響について、定量的に評価する基盤を構築することが出来た。今後はより現実的な状況を再現することにより、軌道上でのセンサ劣化現象のより詳細な解明を図っていききたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① 伊藤信成・加藤雅裕・岡野伸章: 水分子吸着による人工衛星光学硝材の透過率変動計測, 日本航空宇宙学会論文集, vol.57(No.660), pp.18-24,(2009) , 査読有
- ② 伊藤信成・加藤雅裕・岡野伸章: 衛星光学系への有機系汚染物質の影響-有機分子吸着による光学硝材の透過率変動, 計測自動制御学会論文集, vol.44(No.6), pp.1-9, (2009), 査読有

③ N. Itoh, M. Katoh, N. Okano: Comparison of spectral transmittance degradation due to organic gas contamination with onorbit degradations of launched sensors, Proc. SPIE, vol. 7149, 71490F, (2008), 査読有

④ M. Katoh, N. Okano, T. Horikawa, T. Tomida, N. Itoh : First Study on Molecular Contamination of Surface of Optical Materials, International Journal of Modern Physics B, 20 pp.3860-3865 (2006), 査読有

⑤ 伊藤信成・加藤雅裕・岡野伸章: 光学系への分子ガス吸着による透過率変動計測装置の開発, 日本リモートセンシング学会誌, vol.26 (No.5) pp.384-390, (2006), 査読有

[学会発表] (計 13 件)

1) N. Itoh, M. Katoh, N. Okano : Comparison of spectral transmittance degradation due to organic gas contamination with on orbit degradations of launched sensors, Asia-Pacific Remote Sensing 2008, La Meridian / New Caredonia, 2008 年 11 月 27 日

2) M. Katoh, N. Mori, H. Toshihide, T. Tomida: Liquid Phase Synthesis of N,S-containing Titanium Dioxide Powders with Photocatalytic Activity under UV and Visible Light, International Symposium on Surface Science and Nanotechnology (ISSS-5), Waseda Univ., Tokyo/Japan, 2008 年 11 月 12 日

3) 伊藤信成, 加藤雅裕, 岡野伸章: 地球観測センサに見られる信号劣化現象の原因解明への取り組み, 第 52 回宇宙科学技術連合講演会, 淡路夢舞台国際会議場, 2008 年 11 月 7 日

4) 吉田貴則, 加藤雅裕, 堀河俊英, 富田 太平: 臭気発生の低減をめざしたゼオライト系水蒸気吸着材の探索, 第 22 回日本吸着学会研究発表会, 九州大学, 2008 年 10 月 24 日

5) M. Katoh, A. Imayama, N. Mori, H. Toshihide, T. Tomida : Evaluation of Photocatalytic Activity of Nitrogen and Fluorine co-doped TiO₂, Prepared using of Various pH Solutions, International Conference on Advanced Materials, Development and Performance 2008, Beihang Univ., Beijing/China, 2008 年 10 月 13 日

6) M. Katoh, N. Mori, H. Toshihide, T. Tomida: Effect of pH on the Microstructures and Photocatalytic Activity of N,S-containing Titanium, Dioxide Powders Prepared by Liquid Phase Synthesis, International Conference on Advanced Materials, Development and Performance 2008, Beihang Univ., Beijing/China, 2008年10月13日

7) 伊藤信成, 加藤雅裕, 岡野伸章: ガス吸着に伴う衛星光学系の透過率低下の検証, 日本リモートセンシング学会, 東京工業大学, 2008年5月22日

8) 森得祐, 福本祐介, 加藤雅裕, 堀河俊英, 富田太平: N,S含有二酸化チタンの液相合成に及ぼすpHの影響, 2007年日本化学会西日本大会, 岡山大学, 2007年11月10日

9) 加藤雅裕, 小田倫義, 堀河俊英, 富田太平: 水蒸気吸着材の吸着特性と臭気発生メカニズムの解明, 第21回日本吸着学会研究発表会, 東京大学, 2007年9月27日

10) 伊藤信成: 地球観測におけるコンタミネーション管理, コンタミネーション管理研究会, 物質・材料研究所(つくば市), 2007年9月7日

11) 福本祐介, 加藤雅裕, 堀河俊英, 富田太平: 窒素とフッ素を含む可視光応答型光触媒の調製と光触媒特性, 化学工学会徳島大会, 徳島大学, 2006年10月28日

12) 加藤雅裕, 天堤慎也, 堀河俊英, 富田太平, 大平 学: 地域のバイオマスを原料とする炭を分散した塗料によるガスの吸着除去, 第20回日本吸着学会研究発表会, 大阪教育大学, 2006年9月20日

13) 加藤雅裕: 光触媒表面で起こる吸着現象の赤外分光法による解析, 第20回日本吸着学会研究発表会奨励賞受賞招待講演, 大阪教育大学, 2006年9月20日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 信成 (ITO NOBUNARI)

三重大学・教育学部・准教授

研究者番号: 60344272

(2) 研究分担者

加藤 雅裕 (KATOH MASAHIRO)

徳島大学・大学院

ソシオサイエンス研究部・准教授

研究者番号: 80274257

(3) 連携研究者