

29. 東シナ海域を対象とした大気エアロゾルの衛星リモートセンシング

REMOTE SENSING OF AEROSOL OPTICAL THICKNESS ON THE EAST CHINA SEA

長谷川 就一* ・ 太田 幸雄** ・ 村尾 直人** ・ 山形 定**

Shuichi HASEGAWA*, Sachio OHTA**, Naoto MURAO**, Sadamu YAMAGATA**

ABSTRACT; Aerosol optical thickness on the East China Sea was evaluated by using radiances observed by Terra-MODIS. We measured optical and chemical properties of aerosols such as scattering and absorption coefficient, chemical composition, and optical thickness in Fukue Island, Nagasaki Prefecture. The optical thickness was calculated from the single scattering albedo, phase function, and reflectance of sea surface based on the measurement synchronized with Terra-MODIS. The evaluated optical thickness at the wavelength of $1\mu\text{m}$ agreed well with that observed in Fukuoka. The optical thickness on the coastal sea of Korea Peninsula was larger than that on off the shore. This suggested that it is also important to determine the surface reflectance on the coastal sea that eutrophication or flowage of sand from rivers may occur.

KEYWORDS; direct effect, remote sensing, aerosol optical thickness, optical properties, surface reflectance

1 はじめに

温室効果気体の増加による地球温暖化に伴って、地表気温の正確な予測が各種の対策のために不可欠な課題となっている。近年この予測には温室効果気体による昇温効果に加え、大気エアロゾルによる太陽放射の散乱・吸収効果を考慮する必要があることが指摘されている¹⁾。このような大気エアロゾルの気候影響を評価するためには、大気エアロゾルの光学的厚さ(大気中のエアロゾル総量に比例する量)と光学的特性(粒径分布、複素屈折率、存在形態)を把握する必要がある。最近人工衛星の輝度データから大気エアロゾルの光学的厚さの全球分布が求められつつある^{2,3)}が、その解析において、現状ではある仮定された光学的特性値が用いられていることから、光学的厚さを正確に求めるためには測定に基づいた適切な光学的特性値を与える必要がある。

一方、経済発展に伴って東アジアの大気汚染が深刻化することが予想され、地域スケールでの大気エアロゾル分布を衛星リモートセンシングによって詳細に把握することも重要となる。また、沿岸海域の

*; 北海道大学大学院工学研究科 環境資源工学専攻 Division of Environment Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido Univ. (現所属 国立環境研究所 National Institute for Environmental Studies)

**; 北海道大学大学院工学研究科 環境資源工学専攻 Division of Environment Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido Univ.

富栄養化や河川からの土砂流出などによる海洋汚濁に関しても、その状況の把握には衛星リモートセンシングが有効な手段である。しかし、汚濁状況を定量的に把握するためには、大気補正(大気中の空気分子やエアロゾルによる輝度データへの影響を取り除くこと)を正確におこなうことが不可欠となる。

そこで本研究では、東シナ海域を例として、長崎県福江島において大気エアロゾルの地上観測をおこない、それを基に大気エアロゾルの光学的特性と海面反射率を決定し、Terra-MODISの放射輝度データを用いて波長 $1\mu\text{m}$ での光学的厚さ(大気混濁係数 β)の分布を求めた。

2 大気エアロゾルの地上観測

観測は、長崎県五島列島の福江島において、2000年4月20日～5月9日の20日間おこなった。福江島の位置を図1に示す。主な観測項目は、散乱係数、吸収係数、化学組成、光学的厚さである。以下に各項目の測定方法等について具体的に述べる。

2.1 散乱係数および吸収係数の測定

散乱係数については Integrating Nephelometer (Radiance Research 社, Model M903) を、また吸収係数については Particle Soot / Absorption Photometer (Radiance Research 社;以下 PSAP)を用いてそれぞれ測定した。測定波長については、散乱係数は $0.530\mu\text{m}$ 、吸収係数は $0.565\mu\text{m}$ であり、平均化時間はいずれも5分とした。これらの測定の試料空気については、流量 $20\text{L}/\text{min}$ での50%分離径が $2\mu\text{m}$ のサイクロンを用いて粗大粒子を除去した後、内径 100mm のマニホールドに導入し、各々の装置に採気した。測定系の概略を図2に示す。

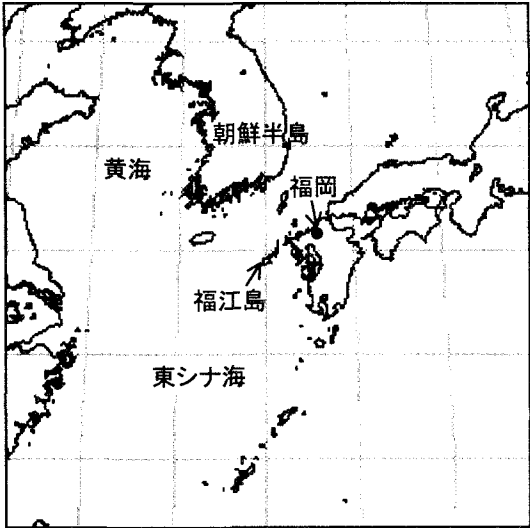


図1 福江島とその周辺の地図

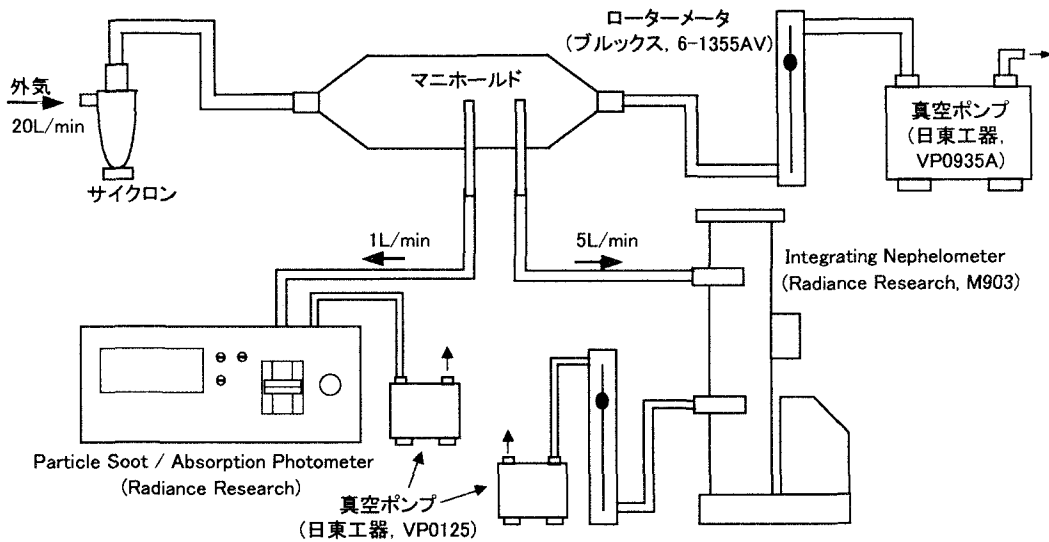


図2 散乱係数および吸収係数の測定系

2. 2 フィルター捕集および化学分析

流量 20L/min での 50%分離径が $2\mu\text{m}$ のサイクロンを用いて粗大粒子を除去し、微小粒子を石英フィルター(Pallflex 2500QAT-UP, 47mm ϕ)ならびにテフロンフィルター(住友電工 FP-1000, 47mm ϕ)に捕集した。これらのフィルターサンプルを化学分析し、大気エアロゾルの化学組成を求めた。なお、捕集時間については6~24時間を基本とした。

炭素成分の分析は、NCアナライザー(住友化学, SUMIGRAPH NC-80)およびGC-FID(島津, GC-14A)を用い、試料をメタナイザーによってメタン化しておこなった。分析においては、まず、石英フィルターを数等分に切断し、捕集されたままのサンプルから全炭素(Total Carbon;以下 TCと呼ぶ)を分析した。一方、同じサンプルを電気炉で300℃の空气中で30分間加熱して有機炭素(Organic Carbon;以下 OC)を除去し、残った黒色純炭素(Elemental Carbon;以下 EC)を分析した。そして、TCからECを差し引くことでOCを求めた。なお、エアロゾル中の有機物濃度については、 $(C+H+O)/C=1.2^4)$ として求めた。

水溶性成分(SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , Na^+ , NH_4^+)の分析には、イオンクロマトグラフ(横河アナリティカルシステム, IC7000)を用いた。テフロンフィルターに捕集されている水溶性成分を、超音波洗浄器を用いてイオン交換水に抽出し、その抽出水を分析した。なお、海塩粒子濃度は、海塩中の Na^+ の割合を0.306⁵⁾として求めた。

土壌成分の指標であるAlの分析には、ICP-MS(横河アナリティカルシステム, HP4500)を用いた。テフロンフィルターに捕集されているAlを硝酸およびフッ化水素酸に抽出し、これを超純水で希釈した試料液を分析した。土壌粒子濃度は、土壌中に含まれるAlの割合を8.13%⁵⁾として求めた。

2. 3 光学的厚さの測定

サンフォトメータ(英弘精機, MS-120)を用いて気柱内の全光学的厚さを測定した。測定は出来るだけ安定して快晴が続いた日中に、約1時間ごとにおこなった。

3 光学的厚さの算出

本研究では、米国の地球観測衛星TerraのMODISが観測したLevel 1B Calibrated Radiance 1kmデータを利用し、光学的厚さの算出にはバンド11(0.526~0.536 μm)を用いた。バンドごとに収められている各画素の輝度カウント C を、 $I = Scales(C - Offsets)$ の関係式を用いて放射輝度 I [$\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}/\text{sr}$]に換算した。ここで $Scales$ と $Offsets$ は、データセットの中で与えられている値を用いた。

次に、データセットに収められている各画素における太陽天頂角、太陽方位角、センサー天頂角、センサー方位角を用い、地上観測から得られたエアロゾルの光学的特性を与えて、大気上端における上向き放射輝度を計算し、MODISが観測した放射輝度 I と一致するようなエアロゾルの光学的厚さを算出した。放射伝達計算についてはDiscrete Ordinate Methodを用いておこない、計算波長は0.530 μm 、大気層は1層とした。また、エアロゾルの光学的特性は大気層内で一様であるものとし、対象とする領域全体にわたっても一様であるものとした。0.530 μm における単一散乱アルベドについては、衛星観測時の福江島における散乱係数および吸収係数の測定値から得られたものを与えた。散乱光角度分布関数については、エアロゾルが黒色純炭素、有機物、硫酸アンモニウム、硝酸アンモニウム、海塩、土壌の6成分から構成されるものとして、衛星観測時に捕集されたサンプルから分析された各成分濃度を用いてMie散乱理論によって計算した。

本研究では計算対象を海域とし、海面はランベルト反射面を仮定した。海面反射率については、直

接測定したデータがないため、福江島においてサンフォトメータによって測定されたエアロゾルの光学
的厚さを与えて大気上端における上向き放射輝度を計算し、それが福江島の数 km 沖合の地点にお
ける画素の放射輝度と一致するような海面反射率を求め、その値を対象とした海面ですべて一定であ
ると仮定した。なお、画像内の陸地と雲の判別については近赤外域のバンド 16(0.862~0.877 μ m)を
用いておこなった。

以上の計算を画像内の各画素についておこない、波長 $\lambda=0.530 \mu$ m におけるエアロゾルの光学的厚
さ τ から、 $\tau=\beta \lambda^{-\alpha}$ によって 1μ m における光学的厚さに相当する大気混濁係数 β に換算した。この
ときのオングストローム係数 α は福江島におけるサンフォトメータによる測定から得られた値を用いた。

福江島において地上観測をおこなった 20 日間のうち、衛星データを利用して光学的厚さの分布を求
めるのに適していたのは、5 月 3 日 11:20-11:25(日本標準時)のデータのみであった。そこで、この 5
月 3 日のケースについて、光学的厚さの分布を求めた。計算に用いた福江島における太陽天頂角、単
一散乱アルベド、海面反射率、福江島におけるエアロゾルの光学的厚さ、オングストローム係数を表 1
に示す。また、観測期間中に捕集されたサンプルから分析されたエアロゾルの成分濃度を図 3 に示す。
5 月 3 日のサンプルは、No.10 である。

なお、当日の気象庁福江測候所の地上観
測原簿データによれば、黄砂は観測されてい
なかった。本観測においても、当日の化学分
析から土壌成分は検出されておらず、また、
Optical Particle Counter (RION, KC-01C)
を用いて粒径 0.3μ m 以上、 0.5μ m 以上、 1
 μ m 以上、 2μ m 以上、 5μ m 以上の粒子数を
測定したが、粗大粒子の増加は観測されなか
った。

表1 光学的厚さの算出に用いた各パラメータの値

福江島における衛星通過時の太陽天頂角	21.9°
エアロゾルの単一散乱アルベド*	0.842
海面反射率*	0.0223
福江島におけるエアロゾルの光学的厚さ*	0.234
オングストローム係数	1.03

* 波長 0.530μ mでの値

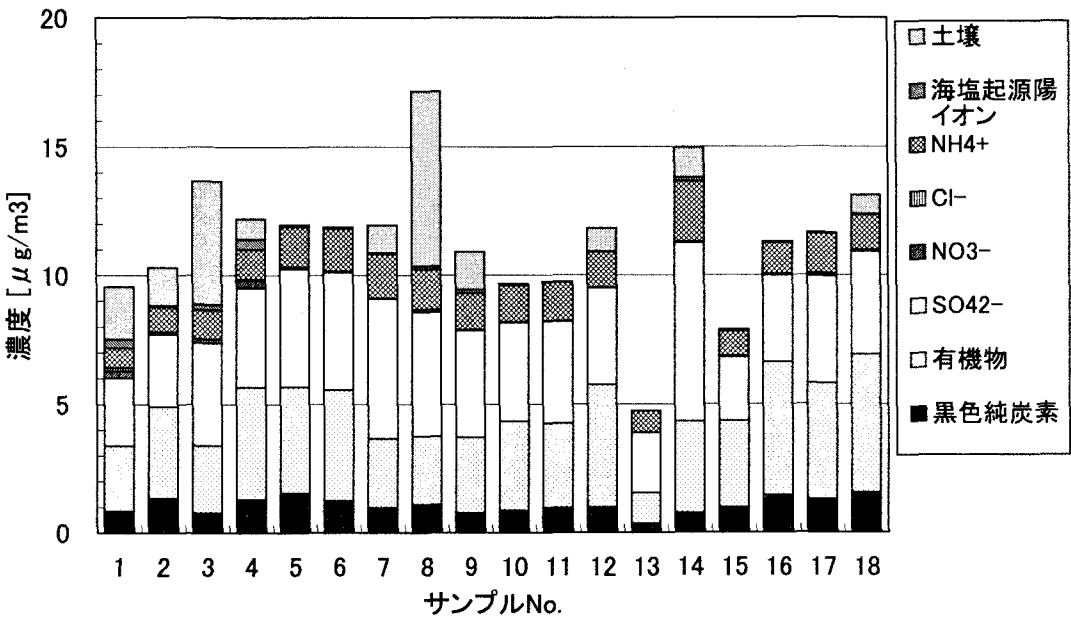


図3 2000年4月23日~5月9日の福江島における
大気エアロゾルの各成分濃度

4 結果と考察

図 4 に 5 月 3 日の東シナ海域における大気混濁係数の分布を示す。白い部分は陸地もしくは雲である。東シナ海域には大気混濁係数 0.12 以下の範囲が大きく広がっていて、陸地から離れるほど低くなる傾向が見られる。朝鮮半島沿岸は 0.12~0.20 となっていて、高いところでは 0.30 に達している(ただし、朝鮮半島の東部沿岸から対馬列島付近にかけて値の高い部分が広がっているが、この部分は大気の窓領域(赤外域)における画像から、雲に覆われていると考えられるので考察の対象としない)。また、図 4 の左端の黄海から中国大陸沖合にかけても 0.12~0.20 の部分が広範にわたって存在している。

当日の気象庁による直達日射観測から求めた大気混濁係数⁶⁾は、福岡で 0.18 であった。図 4 では、福岡の沿岸で 0.16~0.20 程度の値が見られ、両者はほぼ一致している。したがって、求められた大気混濁係数の分布は妥当なものであると考えられる。

しかし、図 4 の領域のようなスケールになると、実際には海面反射率が一定であるとは考えにくく、特に沿岸海域では赤潮の発生、河川からの土砂の流出などによって海面反射率が外洋域とは異なっていることが考えられる。たとえばプランクトン濃度が高くなれば、海面直上における波長 $0.530\mu\text{m}$ での上向き放射輝度は小さくなっていく⁷⁾。す

なわち富栄養化していれば海面反射率はより小さくなる。したがって、衛星センサーが同じ放射輝度を観測したとき、単一散乱アルベドが 0.8~0.9 程度の散乱性の強いエアロゾルが存在すれば、海面反射率がより小さい方が大気混濁係数は大きくなる。一方、火山灰や黄砂などの土砂が流出している場合は、清浄な場合に比べて海面直上における波長 $0.530\mu\text{m}$ での上向き放射輝度は逆に大きくなる。すなわち土砂が流出していれば海面反射率はより大きくなるので、衛星センサーが同じ放射輝度を観測したとき、土砂流出域の大気混濁係数はより小さく見積もられる。

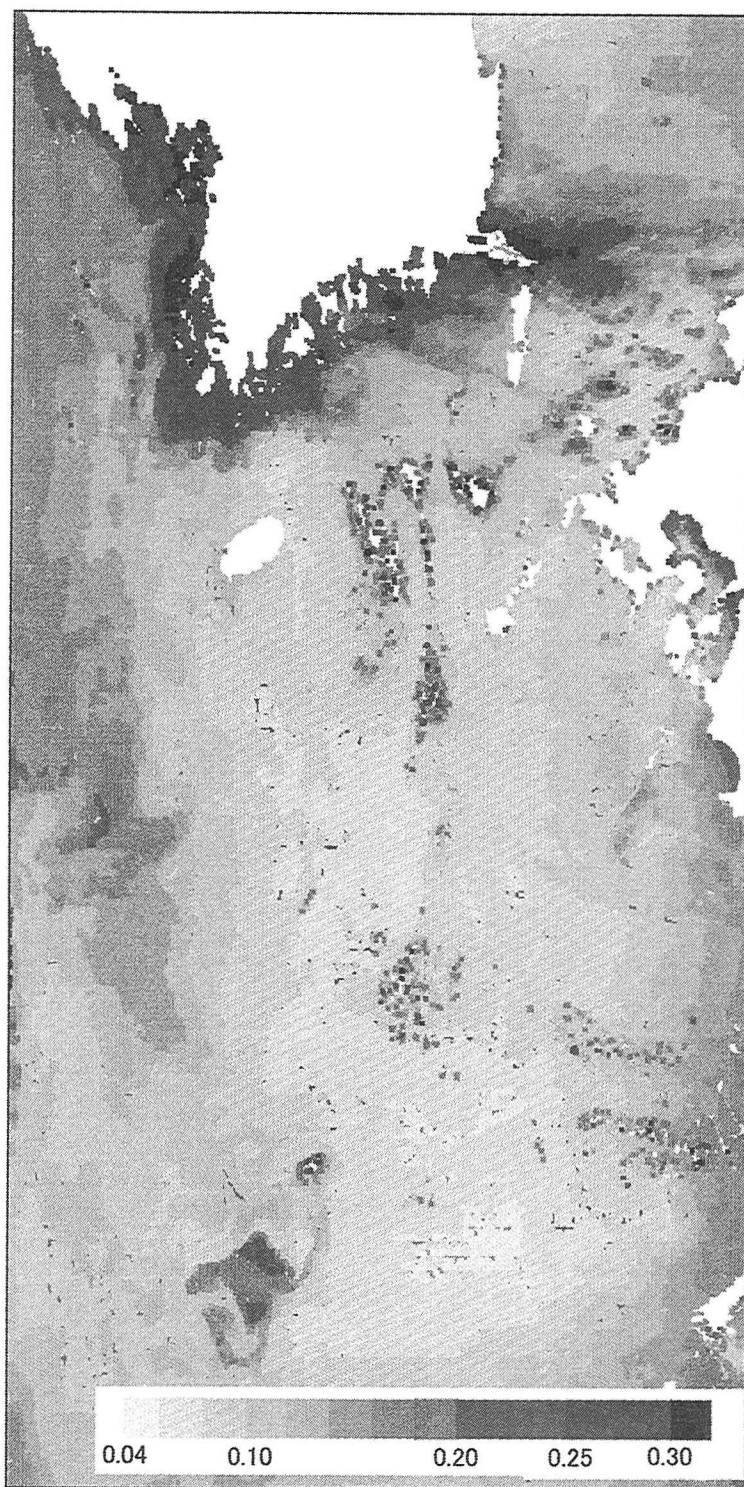


図4 2000年5月3日の東シナ海域における大気混濁係数
(波長 $1\mu\text{m}$ での光学的厚さ)の分布

本研究で用いた海面反射率は、福江島において観測した大気エアロゾルの光学的厚さと光学的特性から決定した。福江島付近の海の状況から見て、赤潮や土砂流出などによって汚濁されているとは考えにくく、かなり清浄な海域の状態に近いと思われた。よって図4の場合、仮に朝鮮半島沿岸海域が富栄養化していたとすれば、この部分の大気混濁係数の値は過小評価していることになり、黄海から中国大陸沖合にかけて黄河や長江から土砂が流出していたとすれば、この部分の大気混濁係数は過大評価していることになる。これらを明確にするためには、中国大陸や朝鮮半島の沿岸海域で放射計を用いて海面反射率を実際に測定するか、または中国大陸や朝鮮半島の沿岸でも大気エアロゾルの光学的厚さと光学的特性を測定して、衛星の放射輝度データから海面反射率を求めることが必要である。

また、波長 $0.60\sim 0.68\mu\text{m}$ ではプランクトン濃度にかかわらず海面反射率はほぼ同じになり、かつ非常に小さくなるので、この波長のバンドを用いて光学的厚さを求める方法もある。本研究で用いたMODIS センサーにも $0.670\mu\text{m}$ 付近のバンドが存在するが、うまくデータが取得できていなかったため用いることができなかった。今後データが利用できれば、このバンドで光学的厚さを求めることが必要である。

5 まとめ

長崎県福江島において大気エアロゾルの地上観測をおこない、それを基に大気エアロゾルの単一散乱アルベド、散乱光角度分布関数、ならびに海面反射率を決定し、これらの値と Terra-MODIS の放射輝度データを用いて東シナ海域における波長 $1\mu\text{m}$ での光学的厚さ(大気混濁係数)の分布を求めた。福岡において求められた光学的厚さの値は、当日実測された値と一致していた。朝鮮半島沿岸海域の値は東シナ海外洋域と比べて高い値を示していた。沿岸海域では、富栄養化や土砂流出などによって海面反射率が外洋域と異なっている可能性もあることから、沿岸海域において実測に基づいて海面反射率を決定することが重要である。

参考文献

- 1) IPCC (1996) : Climate Change 1995, Cambridge University Press
- 2) Nakajima and Higurashi (1998) : A use of two-channel radiances for an aerosol characterization from space. Geophysical Research Letters, Vol.25, No.20, pp3815-3818
- 3) Stowe et al.(1997) : Development, validation, and potential enhancements to the second-generation operational aerosol product at the National Environmental Satellite, Data, and Information Service of the National Oceanic and Atmospheric Administration. Journal of Geophysical Research, Vol.102, No.D14, pp16923-16934
- 4) Countess et al.(1980) : The Denver winter aerosol: A comprehensive chemical characterization. Journal of the Air Pollution Control Association, Vol.30, No.11, pp1194-1200
- 5) Mason, 松井・一國 訳 (1970) : 一般地球化学, 岩波書店
- 6) Yamamoto et al. (1968) : Hemispherical distribution of turbidity coefficient as estimated from direct solar radiation measurements. Journal of Meteorological Society of Japan, Vol.46, No.4, pp287-300
- 7) 小林(1999) : 沿岸汚濁海域における海色リモートセンシングに関する基礎的研究, 北海道大学博士論文