

1.1. 人・自然・地球共生プロジェクト 課題3-2. 諸物理過程のパラメタリゼーションの高度化
 課題代表者： 日比谷 紀之（東京大学大学院理学系研究科）hibiya@eps.s.u-tokyo.ac.jp

研究課題の目的

本研究では、地球温暖化予測の大きな不確定要因となっている、海洋中の乱流拡散、対流・サブダクション、海氷、大気中の乱流拡散、エアロゾル・雲、さらには、海洋中の炭素収支等についてのパラメタリゼーションを厳密かつ詳細に行うため、各種の観測・モニタリング、数値実験、室内実験等による素過程の解明を進める。得られた研究成果を、共生プロジェクト・研究課題1、研究課題2でそれぞれ開発される「大気海洋結合モデル」および「生態系統合モデル」に組み込むことで、地球温暖化予測の精度向上に貢献する。

1. 海洋および大気におけるサブグリッドスケールの物理過程のパラメタリゼーションの研究

東京大学 大学院理学系研究科 日比谷 紀之

海洋の中・深層における乱流拡散、海洋表層における対流・サブダクション、海氷の力学過程、大気の大気圏および大気境界層における乱流拡散など、地球シミュレータで実現される10kmの格子の高解像度モデルでも表現できないサブグリッドスケールの物理現象を詳細に観測・解析し、その実態を把握する。さらに、観測された現象を地球シミュレータを用いて直接シミュレーションすることで、現象を支配する物理機構を明らかにする。最後に、この物理機構に基づいて高精度で信頼できるパラメタリゼーションを開発し、気候変動予測モデルに組み込むことで、温暖化予測の精度を格段に向上させる。ここでは紙面の制限もあるので、具体的に、新しいパラメタリゼーションの方式が提案され、実際に気候予測モデルへの組み込みが開始された二つの研究課題に焦点を絞り、その研究成果を報告する。

【海洋中における乱流拡散のパラメタリゼーションに関する研究】

東京大学 大学院理学系研究科 日比谷 紀之

1.1 研究の目的

約1500年の歳月をかけて全球海洋を巡る深層海洋

大循環は、表層海洋大循環に匹敵する熱輸送を伴い、大気との相互作用を通じて、長期の気候変動を支配している。この深層海洋大循環を精度よくモデル化するには、その最大の不確定要素である密度躍層内での鉛直乱流拡散係数のグローバルな空間分布を明らかにすることが必要不可欠な課題となっている。

1.2 研究の方法

この鉛直乱流拡散係数のグローバルな空間分布の解明に向けた第一歩として、我々は、投棄式流速計(XCP)を使用して、深さ約1.5kmまでの水平流速の鉛直シア構造の観測を、北太平洋から、南太平洋、南極海、南インド洋に展開し、得られた鉛直10mスケールのシア強度 S_{10} を Gregg (1989) の実験式、

$$K_v = 0.2 \times 7 \times 10^{-6} \times N_0^{-2} (S_{10}^2 / S_{GM10}^2)^2 \text{ (cm}^2\text{s}^{-1}) \quad (1)$$
 $(S_{GM10}: GM \text{スペクトルにおける鉛直10mスケールの流速シア、} N_0=3\text{cph})$

に代入することで各観測点での密度躍層内における鉛直乱流拡散係数を間接的に見積もってきた。本研究では、まず、現在までに集積した XCP 観測の結果に基づいて、各緯度・経度における鉛直乱流拡散係数を予報する経験的な式を、その場の内部潮汐波エネルギー密度の関数として作成した。さらに、数値モデルから予報した各緯度・経度における内部潮汐波エネルギーの値を、この経験式に代入することで、鉛直乱流拡散係数のグローバルな分布を求めた。

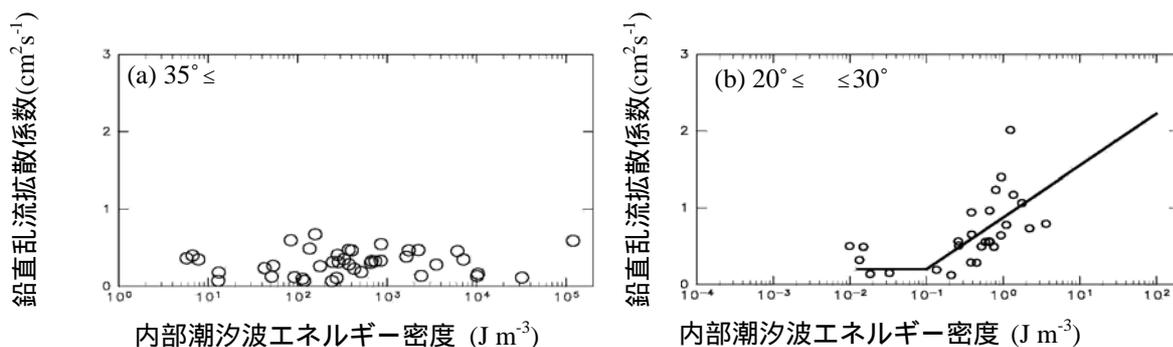


図1. 鉛直乱流拡散係数と内部潮汐波エネルギー密度との関係

1.3 研究の成果

Hibiya et al. (2002) によれば、 M_2 内部潮汐波の周波数が局所的な慣性周波数の2倍以下となる緯度 35° の海域では、深層の内部波スペクトル内での主要なカスケード機構である parametric subharmonic instability が働かない。このため、図1(a)にみられるように、海嶺や海山上で多くの内部潮汐波エネルギーが与えられても、鉛直乱流拡散係数の観測値は小さいままである。一方、 20° 緯度 30° においては、parametric subharmonic instability が働くようになるため、図1(b)にみられるように、内部潮汐波エネルギー密度の増加とともに、鉛直乱流拡散係数の観測値は大きくなる。緯度 $< 20^\circ$ では、磁気赤道の存在などのため、XCPの使用が困難となるが、Gregg et al. (2003)によれば、赤道域で直接観測された鉛直乱流拡散率は小さく、特に、赤道での鉛直乱流拡散率は分子拡散のレベルとなる。以上の知見から、密度躍層内における鉛直乱流拡散係数 K_v (cm^2s^{-1}) の大きさを予報する経験的な式は、各緯度・経度における内部潮汐波エネルギー $E(\phi, \lambda)$ (ϕ : 緯度、 λ : 経度) の関数として(2)式のようにまとめることができる。

$$\begin{aligned}
 K_v(\phi, \lambda) &= (F(\phi, \lambda) + 0.2) \times (E(\phi, \lambda) / 20) && \text{for } 0^\circ < \phi < 20^\circ \\
 K_v(\phi, \lambda) &= F(\phi, \lambda) + 0.2 && \text{for } 20^\circ < \phi < 30^\circ \quad (2) \\
 K_v(\phi, \lambda) &= F(\phi, \lambda) \times ((35 - \phi) / 5) + 0.2 && \text{for } 30^\circ < \phi < 35^\circ \\
 K_v(\phi, \lambda) &= 0.2 && \text{for } 35^\circ < \phi < 90^\circ
 \end{aligned}$$

但し、

$$\begin{aligned}
 F(\phi, \lambda) &= 0.67 \times \log_{10}(E(\phi, \lambda) / 0.1) && \text{for } 0.1 \text{Jm}^{-3} < E(\phi, \lambda) \\
 F(\phi, \lambda) &= 0. && \text{for } E(\phi, \lambda) < 0.1 \text{Jm}^{-3}
 \end{aligned}$$

ここで (2)式中の各緯度・経度における内部潮汐波のエネルギー密度 $E(\phi, \lambda)$ は、数値モデルを用いて計算することが可能である。実際に、現実的な海底地形、密度成層、潮汐流の空間分布を考慮した3次元の高解像度数値実験から得た内部潮汐波エネルギーのグローバルな空間分布の情報を(2)式に代入することで、深層における鉛直乱流拡散係数のグローバル分布は図2のように求めることができる。「乱流ホットスポット」が、緯度 30° より赤道側の海嶺や海山上に存在する様子が明瞭に再現されている。

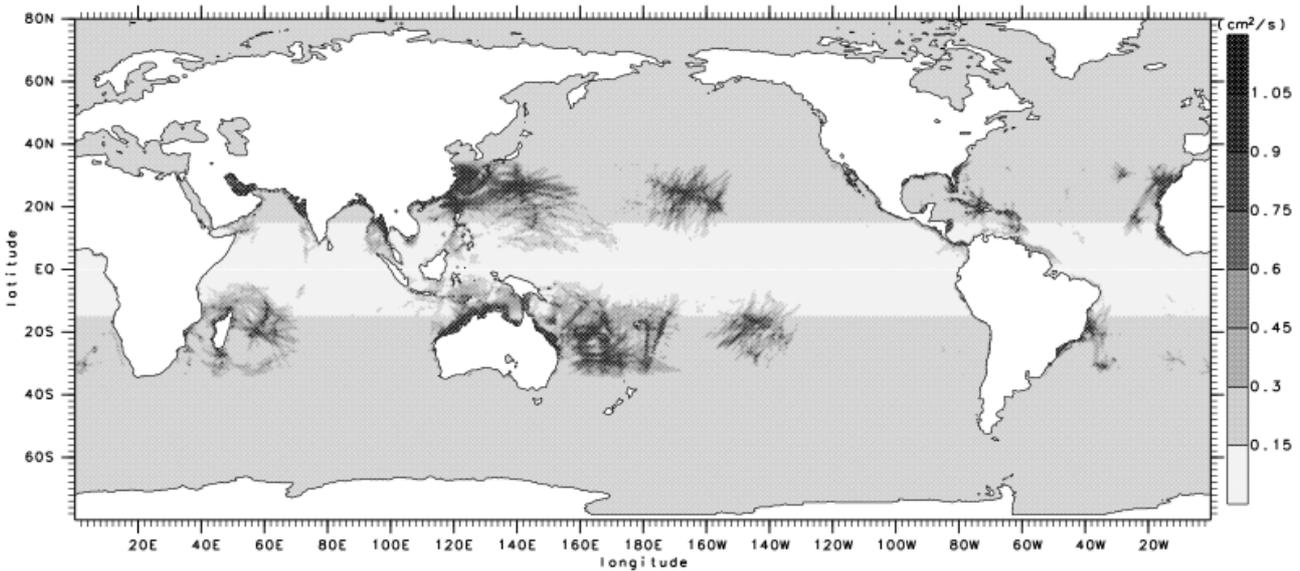


図2. 深層における鉛直乱流拡散係数のグローバルな分布

1.4 今後の課題

本研究によって、潮汐起源の乱流拡散係数のグローバルな空間分布を解明することができた。しかし、従来の研究によれば、深層海洋大循環の維持に必要な乱流拡散のエネルギーの約半分は、大気擾乱によって供給されると見積もられている (Watanabe and Hibiya, 2002)。

すでに述べたように、大気や潮汐によって供給されるエネルギーの乱流スケールへのカスケードダウンは、parametric subharmonic instability に支配されているため、外力エネルギーの周波数帯が、局所的な慣性周波数の2倍を超えていない限り、強い乱流拡散は発生しない。これを考えると、主に、緯度 $40^\circ \sim 45^\circ$ のストームトラックを通過していく大気擾乱

により励起された近慣性波エネルギーは、parametric subharmonic instability が働く 緯度 20 ° よりも赤道側にまで伝播した時点で乱流拡散をひきおこしているものと推察される。ところが、このような低緯度域では、地球磁場の鉛直成分が極端に小さくなってしまいうため、従来、我々が展開してきた XCP 観測では、この大気起源の乱流拡散は捉えられていない。

今後は、この大気起源の乱流拡散に注目することによって、XCP観測の空白域として残された低緯度域における乱流拡散の空間分布を解明していく必要がある。その方法としては、まず、西部太平洋赤道海域など、具体的に実験海域を定め、数値実験を通じて見積もられる大気起源の内部波エネルギーと、深海乱流計で直接観測された乱流散逸率との定量的な関係を調べることによって、低緯度域における乱流拡散のパラメタリゼーションの式を求める。さらに、このパラメタリゼーションの式に、各緯度・経度における大気起源の内部波エネルギーの計算値を代入することで、低緯度域における乱流拡散係数の空間分布を明らかにしていく。その結果を、本年度までの研究で見積もられている潮汐起源の乱流拡散係数の空間分布とあわせることで、気候変動の予測に不可欠な深層海洋大循環の高精度化に貢献していく予定である。

1.5 成果文献 (抜粋)

Hibiya, T., M. Nagasawa and Y. Niwa, 2002: Nonlinear energy transfer within the oceanic internal wave spectrum at mid and high latitudes, *Journal of Geophysical Research*, **107**(C11), 3207, doi:10.1029/2001JC001210.

Hibiya, T. and M. Nagasawa, 2004: Latitudinal dependence of diapycnal diffusivity in the thermocline estimated using a finescale parameterization, *Geophysical Research Letters*, **31**(1), L01301, doi:10.1029/2003GL017998.

Nagasawa, M., T. Hibiya, Y. Niwa, M. Watanabe, Y. Isoda, S. Takagi and Y. Kamei, 2002: Distribution of fine-scale shear in the deep waters of the North pacific obtained using expendable current profilers, *Journal of Geophysical Research*, **107**(C12), 3221, doi: 10.1029/2002JC001376.

Niwa, Y. and T. Hibiya, 2004: Three-dimensional numerical simulation of M_2 internal tides in the East China Sea, *Journal of Geophysical Research*, **109**(C4), C04027, doi:10.1029/2003JC001923.

Watanabe, M. and T. Hibiya, 2002: Global estimate of the wind- induced energy flux to inertial motions in the surface mixed layer, *Geophysical Research Letters*, **29**(8), doi: 10.1029/2001GL014422.

【高精度の大気・海洋乱流境界層モデルの開発】

東京大学海洋研究所 新野 宏

1.1 研究の目的

大気境界層の乱流運動によって地表面から自由大気に運ばれる顕熱や潜熱は、地表面に達する日射のエネルギーの約30%に及んでおり、私たちが生活する地表面近くの気温の決定や自由大気の運動の駆動に重要な役割を演じている。また、大気・海洋境界層における運動量・熱・水蒸気(塩分)輸送は、海洋の風成循環や熱塩循環の駆動にも支配的な役割を演じている。従って、様々な条件下で大気・海洋境界層の乱流輸送を精度良く表現する境界層乱流モデルの構築は、信頼できる気候予測に不可欠である。

本研究では、大気・海洋境界層の乱流の物理機構を明らかにし、信頼できる境界層乱流モデルを開発して、気候モデルに提供することを目的とする。

1.2 研究の方法

本研究では、まず乱流を再現する数値モデルとして最も信頼性が高い3次元ラージ・エディ・シミュレーション(LES)モデルを用いて、様々な成層状態における大気境界層の乱流のデータベースを作成する。次に、このデータベースに基づいて Mellor-Yamada (1974) の乱流モデルにおける乱流長さスケールの新しい定式化と普遍定数の改訂を行い、従来のモデルより格段に高精度の乱流境界層モデルを開発する。

1.3 研究の成果

本研究で開発した乱流モデルを用いて夜間から早朝にかけての湿潤境界層の時間発展を再現したところ(図3c)、従来のMellor-Yamadaモデル(図3b)では夜間に乱流が弱く地表面が冷えすぎた点や、日の出後の対流混合層の発達が遅すぎた点が、LESモ

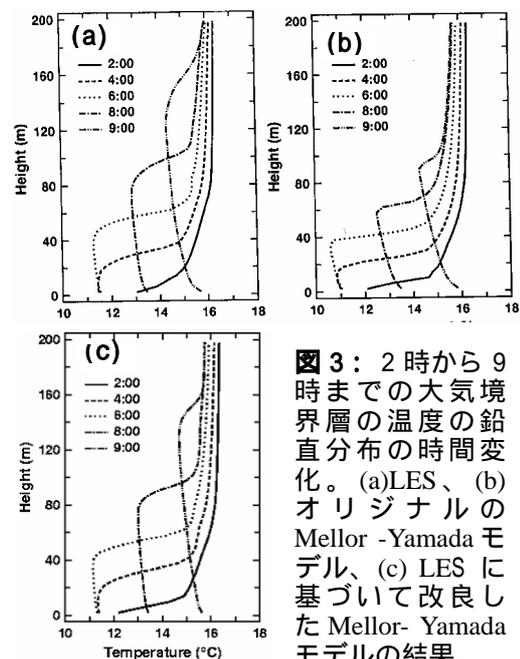


図3: 2時から9時までの大気境界層の温度の鉛直分布の時間変化。(a)LES、(b)オリジナルのMellor-Yamadaモデル、(c)LESに基づいて改良したMellor-Yamadaモデルの結果。

デルの結果（図3a）と比較しても遜色ないほど改善されることがわかった。現在、この乱流モデルを共生第1・第4課題の大気・海洋モデルにサブルーチンとして提供しその性能を検討して頂いている。

1.4 今後の課題

今後は更に大規模なLESモデルを用いて、より信頼度の高い境界層の乱流データベースを作成するとともに、境界層乱流の物理機構を明らかにし、第1・第4課題での試用の結果も考慮して、乱流モデルのさらなる改善を行うことを予定している。

1.5 成果文献（抜粋）

Nakanishi, M. and H. Niino, 2004: An improved Mellor-Yamada level 3 model with condensation physics : Its design and verification, *Bound.-Layer Meteor.*, **112**, 1-31.

Yanase, W. et al., 2004: A polar low over the Japan Sea on 21 January 1997: Part II. Numerical simulation, *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1552-1574.

2. 地球温暖化にかかわる大気組成変動予測のための研究

海洋研究開発機構地球フロンティア 秋元 肇

2.1 研究の目的

地球温暖化に最も重要な影響を及ぼしている温暖化関連物質である(1)二酸化炭素・メタン、(2)対流圏オゾン、(3)エアロゾル・雲、について東アジアにおける観測を行い、二酸化炭素・メタンの全球における収支、対流圏オゾンの空間分布・時間変動と光化学的変質過程、エアロゾル・雲による放射影響などを定量的に明らかにすることにより、大気組成-気候結合モデルの高度化に資する。

2.2 研究の方法

(1) 二酸化炭素・メタン

トップダウン法を用いて地球表層におけるCO₂とCH₄の収支を推定するため、以下の研究を行う。

地上基地に加え、航空機と船舶を用いてCO₂とCH₄の濃度および同位体比の観測を実施する。

広域にわたる変動と分布の実態を明らかにし、モデルへの入力データとして用いるため、過去に取得されたデータと結合し、総合的な解析を行う。

長期にわたる循環解析を可能にするため、過去40年間の客観解析データを全球3次元大気輸送モデルに組み込む。また、全球生態系モデルを大気輸送モデルに結合させる。

メタン循環については、濃度及び炭素同位体比について、3次元大気輸送モデルを用いたフォワード法による放出シナリオの検討を行う。

(2) 対流圏オゾン

対流圏オゾンの現在及び将来の空間分布・時間変動を明らかにし、放射強制力の推定・大気化学モデルの高度化を行うため、以下の研究を行う。

中国の汚染地域において、地域代表性があると思われる山岳地点にO₃及びCOの連続測定装置を設置し通年観測を行う。観測データに基づき化学-気候結合モデルに組み込む化学輸送モデルの検証を行う。

国内において、OH、HO₂ラジカル及びO₃、NO_x、CO、VOC等の前駆体ガス、エアロゾル、紫外線光量の同時集中観測を行い、得られた結果の解析から対流圏光化学理論の検証を行う。

温室効果ガス・大気汚染ガス・エアロゾルに関し、アジアにおける2000年および2020年までの将来予測放出量の推定を行う。

(3) エアロゾル・雲

エアロゾルと雲の物理・化学特性、および、地表面放射収支を明らかにするため、以下の研究を行う。

アジアの数地点および船舶において、測定するステーションとデータ自動転送システムを確立し、放射観測とエアロゾル・サンプリングを行う。得られた地上観測データと衛星データとの比較を行う。

雲レーダーとライダーの同時解析アルゴリズムを実データに適用することで、雲微物理パラメータの推定を行う。

MRI/NPD/NHM-HUCM非静力学雲モデルとCCSR/NIES+SPRINTARSエアロゾル気候モデルを用いて観測値と比較する。

2.3 研究の成果

(1) 二酸化炭素・メタン

スバル諸島ニールスン基地と南極昭和基地での地上観測、日本上空とシベリア上空の航空機観測、日本-北米と日本-オセアニア、日本近海での船舶観測を継続、また中国においては、Mt. Taishan、Mt. Huangshan、FukangでCO₂とCH₄の濃度およびCO₂の¹³Cの測定を行い、データの蓄積を図った。

仙台市近郊で得られたCO₂とO₂の濃度の変動を基に推定された1999年5月～2003年11月の平均的なCO₂収支として、海洋による吸収2.8GtC/yr、陸上生物圏による吸収0.5GtC/yr、大気残留3.4GtC/yrが得られた。ただし、データの期間がまだ短いために、解析結果が濃度にみられる年々変動の影響を受けており、レコードの長さを変えて解析すると結果が多少異なることが判明した。

気候や大気輸送が大気中のCO₂変動に及ぼす影響を明らかにするため、全球生態系モデルBiome-BGCを大気輸送モデルに結合させ、1960-2003年のNCEP/NCAR再解析データを用いてシミュレーションを行った。シミュレーションは、風の場の変化の

みを考慮した場合、気候変動によって生ずる陸上生物圏のCO₂フラックスのみを考慮した場合、同時に両者を考慮した場合について行った。その結果から大気中のCO₂濃度の年々変動は、気候変動に伴う陸上生態系-大気間のCO₂交換の変化によって主に生じており、特に北半球高緯度では大気輸送の年々変動の寄与が重要であることが判明した。

(2) 対流圏オゾン

Taishan, Huashan, Huangshan (中国)およびMondy (ロシア)におけるO₃, COの通年観測データの蓄積が図られた。観測データから、中国のルーラル地点であるTaisahanのオゾン濃度の最大値は4、5、6月にそれぞれ約100、120、160 ppbvに達し、我が国の首都圏における光化学スモッグ高濃度日のレベルに匹敵していることがわかった。

こうした観測データによる化学-気候モデルの検証の手初めてとして、全球化学-気候モデルCHASERの出力を境界条件として用いた領域モデルの計算結果と、中国における既存の観測データとの比較を行ったところ、リモート地点においては、モデルの計算結果は観測値を非常に良く再現しているが、汚染地域においては計算結果と観測データには乖離が見られることがわかった。

OH,HO₂測定装置を北海道の利尻島に設置し、集中観測を行った。実測された濃度と、対流圏化学反応メカニズム(RACM)に基づいたシミュレーション濃度とを比較したところ、HO₂のモデル計算値が観測された値より有意に高い結果となり、現在のモデルには反応理論に含まれていない何らかのHO₂消失過程があることが推定された。

(3) エアロゾル・雲

SKYNET サイトであるSri-Samrong(タイ)、Hefei(中国)、奄美大島、福江島、宮古島サイトからのより効率的な自動データ収集システムを確立して、データ収集を図った。

雲レーダーとライダーのデータの同時解析アルゴリズムを開発して、小金井観測点、および、観測船「みらい」から得られたデータに適用した。その結果、氷晶雲粒の融解に伴い、有効粒子半径が120ミクロン以下の水粒子が急速に落下を始める様子が観測された。GCMでは粒子融解に伴いむしろ落下速度が遅くなるパラメタリゼーションが使われており、モデルの過大な気候感度の一因と考えられる。

MODISデータの自動解析システムを確立した。この結果、日々のエアロゾルと雲パラメーターがセミリアルタイムで得られるようになり、衛星から得られる光学的厚さとオングストローム指数の地上観測値との比較が開始された。また、NOAA/AVHRR衛

星搭載イメージャーデータを使った長期解析の手法を確立した。この結果、1981年から22年間にわたるエアロゾルの光学特性の全球分布を海上で導出することが可能になった。

2.4 今後の課題

(1) 二酸化炭素・メタン

トップダウン法を用いてCO₂やCH₄の収支を推定するには、広域かつ長期にわたる系統的な濃度や同位体比のデータセットが不可欠である。そのため、独自の観測を継続・強化し、データの蓄積を図るとともに、他の研究機関のデータを収集し、標準物質の相互検定を実施することによってその利用を積極的に推進する必要がある。

(2) 対流圏オゾン

対流圏オゾンによる将来の温暖化影響の推定には、アジアの大気汚染物質の主要発生地域である中国とインドにおける将来排出量の精度の高い推定が入力パラメーターとして必要である。また、化学-気候モデルを用いた対流圏オゾンの放射強制力計算の不確定度を抑制するために、全球モデルの出力を境界条件とした領域モデルの計算結果と観測データを比較するなどして、高分解能化した全球モデルの精度を高める必要がある。

(3) エアロゾル・雲

エアロゾル・雲のパラメタリゼーションの信頼性を高めるため、今後さらに解析例を追加する必要がある。特に、観測されたエアロゾルの化学組成では光学的に観測された一次散乱アルベドを説明できないという問題点を解決する必要がある。

2.5 成果文献 (抜粋)

- Fujita, D., et al., 2003: Inter-annual variability of the atmospheric carbon dioxide concentrations as simulated with global terrestrial biosphere models and an atmospheric transport model, *Tellus* **55B**, 530-546.
- Aoki, S., et al., 2003: Carbon dioxide variations in the stratosphere over Japan, Scandinavia and Antarctica, *Tellus*, **55B**, 178-186.
- Pochanart, et al. 2003: Regional background ozone and carbon monoxide variations in remote Siberia/ East Asia, *J. Geophys. Res.*, **108**(D1), 4028, doi: 10.1029/2001JD001412.
- Pochanart P., et al., 2004: Eurasian continental background and regionally polluted levels of ozone and CO observed in northeast Asia, *Atmos. Environ*, **38**, 1325-1336.
- Nakajima, et al., 2003: Significance of direct and indirect radiative forcings of aerosols in the East China Sea region. *J. Geophys. Res.*, **108**(D23), 8658, doi: 10.1029/2002JD003261.

3. 太平洋における炭素循環モデルの高度化

東京大学海洋研究所 植松 光夫

3.1 研究の目的

太平洋に供給される陸起源降水のうち、特に、炭素を中心とする海洋中での物質循環過程を階層毎のプロセスの解明から総合的に掌握し、温暖化シナリオに果たす役割を解明する。また、生態系を含めた炭素循環の素過程を支配するパラメータの構築を研究船を用いた海洋観測を中心に行い、日本モデルの海洋生態系モデル高精度化に資する。

本サブグループは大気フラックス、微量元素、有機物の3つのチームから構成されている。ここでは、共生課題2グループとの研究交流から、物質循環過程の早急に必要重要なパラメータとして要望された大気フラックスのプロセスについて焦点を絞って報告する。

東アジア地域は、経済の発展と人口の増加が急激に進行している。このことは、工業や農業活動の発展に伴う大気汚染物質、農薬・肥料の使用量の増加を意味する。中国、日本、韓国の3つの国に囲まれた東シナ海は、東アジア大陸から外洋上へ輸送される人為起源エアロゾルや鉱物エアロゾルの影響を強く受け、それらが海表面に沈着することにより水質や生態系に影響を与えることが考えられる。

これまで長江や黒潮の湧昇がこの海域での栄養素の主な供給源であり、そのため生物活動が活発であるといわれてきたが、大気からの供給を考慮した研究例やモデル研究はほとんどない。

本研究では、大気エアロゾル中のアンモニウム塩と硝酸塩の乾性沈着によるフラックスの見積もりを行い、大気を経由した栄養塩、窒素化合物の供給の重要性について検討を行った。

3.2 研究の方法

本研究は、東京大学海洋研究所研究船白鳳丸 (KH02-3次航海Leg2) により、2002年9月26日から2002年10月9日の間、日本及び韓国側経済水域における大気の連続観測を行った。

3.3 研究の成果

(1) 大気中の粒子状窒素化合物濃度変化

図4にアンモニウム塩と硝酸塩濃度の時系列変化を示す。本観測では、外洋上で主に4回の人為起源のプルームが確認された。太平洋側の観測時では、南風で主に清浄な海洋大気の影響を受けていたが、東シナ海 (9/30以降) では、主に陸起源物質の影響を受けていた。アンモニウム塩と硝酸塩粒子の粒径分布は大きく異なり、アンモニウム塩の89%以上は微小粒子に、硝酸塩の 62 93 % (平均83 %) は粗大粒子に存在していた。

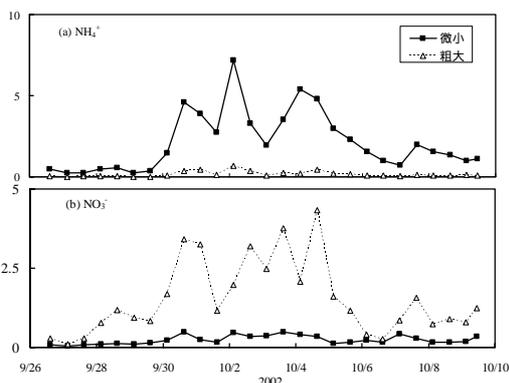


図4 アンモニウム塩と硝酸塩濃度の時間変化

微小粒子 (<2.5 μm)、粗大粒子 (>2.5 μm)

(2) 窒素化合物の海洋へのフラックス

大気からのアンモニウム塩と硝酸塩濃度のフラックスを近似的に次式で求めた。

$$F_s = V_d \times C_s$$

但し F_s : 乾性沈着によるフラックス ($\text{g N m}^{-2} \text{day}^{-1}$)
 V_d : 沈着速度 (cm s^{-1}) C_s : 大気中濃度 (mg N m^{-3}) である。

太平洋側や、東シナ海の観測時においても、粒径分布に変化がなかったため、沈着速度はほとんど変化がなかった。しかし、東シナ海におけるアンモニウム塩、硝酸塩のフラックスは、太平洋側のそれぞれ、8.0倍、2.8倍程度高くなっており、陸域の影響を受けているときと清浄な海洋大気の影響を受けているときとで大きな違いが見られた。また、太平洋側、東シナ海ともに、大気中濃度 (全粒子) は、アンモニウム塩の方が高いが、乾性沈着によるフラックスは、硝酸塩が高く、硝酸塩による窒素の供給が大きいことがわかった。これは、図4に示すように、粒径分布の大きな違いに起因するものである。

太平洋側と東シナ海の秋季に限られた観測結果を平均した値から計算した大気からのフラックスは、アンモニウム塩、硝酸塩が、それぞれ 160 Gg N yr^{-1} 、 270 Gg N yr^{-1} であった。また、長江から東シナ海に流入する水量とアンモニウム塩、硝酸塩の平均濃度から計算した河川からのフラックスは、それぞれ 190 Gg N yr^{-1} 、 430 Gg N yr^{-1} であった。これらのことから、大気からのアンモニウム塩、硝酸塩の沈着量が、長江からの流入量に匹敵していること、すなわち、大気が栄養素の重要な供給経路であることが明らかになった。大気からの栄養素の供給も海水や生態系に影響を与えていることが考えられる。

(3) 大気からの窒素化合物の供給による海洋の新生産

大気から海洋への窒素の供給は、海洋生物によっ

て取り込まれ、海洋内で再生産を行う循環にあらたな生物生産を付け加えることになる。この窒素源を取り込んで増加する一次生産によって、東シナ海では年間約 2.5 Tg C y⁻¹ の炭素が固定される計算になる。東シナ海での新生産は 23-270 Tg C y⁻¹ (Chen and Chen, 2003)と報告されているので、全新生産の最大10%程が大気からの寄与と推定されることになる。

海洋への河川の流入の影響は、沿岸域、縁辺海周辺域の限られた海域にみられる。一方、大気からの窒素源は、風下の海洋の広範囲に供給されることになる。特に亜熱帯など成層化の進んだ貧栄養海域での栄養塩の供給源、ひいては、炭素固定や循環に無視できない過程である。

3.4 今後の課題

海洋表層での炭素循環は二酸化炭素だけではなく、大気との物質循環と密接なリンケージを保っている。

このプロセスの変化は海域による特徴を把握するだけではなく、長期にわたる大気海洋ブイなどによる定常的観測や、陸上域も含んで連携させた長期の観測網が必要である。

3.5 成果文献 (抜粋)

Nakamura et al., 2004: "Chemical characteristics of aerosols transported from Asia to the East China Sea: An evaluation of anthropogenic combined nitrogen deposition in autumn" submitted to *Atmos. Environ.*

Uematsu et al., 2004: "Chemical characteristics of marine aerosols over the East China Sea affected by outflow of anthropogenic substances from the Asian continent" submitted to *Geochem. J.*

	太平洋側 (n=7)			東シナ海 (n=20)		
	NO ₃	NH ₄	NO ₃ の割合	NO ₃	NH ₄	NO ₃ の割合
乾性沈着による Flux (μg N m ² day ⁻¹)	50	66	83	720	450	64
沈着速度 (cm s ⁻¹)	1.7	0.19	-	1.7	0.22	-
大気中平均濃度 (μg N m ² day ⁻¹)	0.17	0.30	36	0.48	2.3	17

表1 乾性沈着によるフラックスと平均沈着速度

* 粒径分布と Duce et al. (1991)による沈着速度 (微小粒子: 0.1 cm s⁻¹, 粗大粒子: 2 cm s⁻¹)