

博士（地球環境科学） 坂本 愛

学位論文題名

The behavior of marine biogases with feedback effect
of the global warming in the North Pacific

(地球温暖化の促進／減速を制御している北太平洋生物起源ガスの
定量化及び、その潜在的影響力に関する研究)

学位論文内容の要旨

近年の研究から、人為起源による温暖化もしくは自然起源の気候変化由来と考えられる海洋環境の変化が報告されている。特に、北太平洋では、表層密度の低下によって混合層(MLD)の発達が弱まり、下層からの栄養塩の供給が減少している。これにより、表層の生物は少ない栄養塩を効率良く摂取するために、大型から小型へとシフトする。一方で、海洋表層は大気化学において重要なガス成分 (N_2O (亜酸化窒素), DMS (硫化ジメチル), CO_2) の供給源/除去源として機能する役割がある。このことから、海洋表層で起きている環境変化は、海洋生物及びその起源ガスの存在量にも直接的あるいは間接的に影響していると考えられる。例えば、DMS は大気化学において、近年の温暖化を抑制する効果 (雲形成による間接効果とエーロゾル自身の直接効果) があるだろうと考えられている代表的な海洋生物起源ガスである。生物種によってその前駆体である DMSP (ジメチルスルフォニオプロピオネート) の生産効率が異なり、珪藻類のような大型植物プランクトンよりも渦鞭毛藻や円石藻のような小型植物プランクトンのほうがその生産効率が高い。よって、生物種のシフトにより、DMS の海洋表層濃度および大気への flux 量は増加している可能性があるといえる。一方で、 N_2O は代表的な温室効果气体である。これは、硝化細菌と脱窒細菌によって海洋内で主に硝化・脱窒過程を経て生成されている。それぞれ、光抑制と酸素抑制を受け、海洋表面での生成はなく、有光層下部と無光層上部で最も生成効率が上がる。つまり、海洋表面で検出される N_2O 濃度は、混合層下部からの希釈混合由来の物であるといえる。よって、混合層発達の弱化は海洋表層にもたらされる N_2O の量を減少させ、結果大気への flux も減少すると考えられる。しかし、大気中では農業活動由来 (硝化過程) の N_2O 供給量が除去量を上回り、年々増加傾向にある。このため、海洋表層の飽和 N_2O 濃度も高まり、結果 flux も増加し得る。このような、大気化学において重要な成分のバランスが海洋と海洋生物を介してどのように変化しているかを理解することは重要な課題のうちの一つである。

そこで本研究は、海洋生物起源ガスでかつ温室効果/冷却効果をもつ成分, N_2O , DMS, CO_2 , の海洋から大気への flux が北太平洋において過去35年間で変化しているかを定量的に明らかにすることを目的とする。また、DMS はその測定法の問題から一部改良の必要性があるため、本研究はその改良実験を試みた研究結果についても含めて、博士論文を構成してた。

はじめに、北太平洋における N_2O を時系列で測定するとともに、復元アルゴリズムを作成し、北太平洋表層の N_2O を見積もった。

$$\Delta N_2O = 0.12 AOU + 0.97 \quad (R^2 = 0.74, n = 685, p \text{ 値} < 0.0001) \quad (1)$$

$$\ln(N_2O_{surf} - N_2O_{sat}) = 2.29 \ln N_2O_{bottom} - 6.07 \quad (R^2 = 0.53, n = 32) \quad (2)$$

結果、北太平洋の N_2O flux は $1.61 - 9.54 \mu\text{mol} / \text{m}^2 / \text{day}$ (全海洋平均 N_2O flux $0.54 - 2.71 \mu\text{mol} / \text{m}^2 / \text{day}$) と季節変化がみられ、MLD の発達と共に増減していることが示唆された。さらに、

N_2O の長期変動を把握するため、長期時系列観測点（気象庁 41-30N line, 東部亜寒帯北太平洋 stn. Papa, 亜熱帯北太平洋ジャイア stn. ALOHA）における 1970s – 2000s の変動に基づいて、北太平洋の MLD 及び表層 N_2O の変化率を見積もった。

$$\text{変化率} (\% / \text{yr}) = \text{各観測点の anomaly} / \text{各観測点の平均値} (1970 - 2004 : \text{line fit}) \quad (3)$$

MLD の変化率は $-0.16 \% / \text{yr}$ となり、この結果を World Ocean Atlas 2005 (WOA05) の気候値をベースにして得られた北太平洋 ($1^\circ \times 1^\circ$ grid) の MLD 結果に 35 年分の変化量を均して、適用範囲 ($25^\circ\text{N}-55^\circ\text{N}$, 沿岸湧昇もしくは脱窒域を除く) における海洋表層 N_2O 濃度変化量を見積もった。結果、MLD に伴う N_2O flux は 35 年間で 2.9% 低下していたが、大気 N_2O 濃度を加味すると正味 $10.8\% (\pm 1.9\%)$ 増加していることが示唆された。一方で、AOU は北太平洋の過去 40 年間ににおいて $0.47 \mu\text{mol/kg/yr}$ の増加傾向にあると報告されていることから、 $\Delta\text{N}_2\text{O}$ は約 0.06nmol/kg/yr で増加することが予測され、海洋から大気中への N_2O の放出を示唆した。

DMSについても、 N_2O と同様に長期変動を把握するため、DMS を時系列で測定するとともに、既存の DMS アルゴリズム (Watanabe, Sakamoto, et al., 2007) を使用して、長期時系列観測点の表面水温 (SST) と表面硝酸塩濃度 (SSN) の変動に基づき、北太平洋の表層 DMS の変化量を見積もった。本研究の一過程として、現在保存が困難な DMS の長期保存を含めた測定法 (DMS-SPME 長期保存法) の確立も行った (20 日間保存率 : $97.6 \pm 0.1\%$; 保存-非保存関係 : $DMS_{pre} = -0.01 + 1.03 DMS_{unpre}$ ($R^2 = 0.95$, $n = 11$, p 値 < 0.0001))。この測定法は、従来の測定法に比べ簡易で、複雑な装置を必要とせず、大型観測船の使用等という条件がなくなるため、小・中型船を使用して、より多くの DMS データ入手することが可能であると示唆された。DMS は 35 年間で $4.9\% (\pm 30\%)$ (平均 : 表層濃度 2.3nM ; flux $0.56 \mu\text{mol/m}^2/\text{day}$) 濃度及び flux とともに増加傾向にあることが示唆された。現在、近年の海水温上昇や栄養塩減少が報告されており、これらの生物への影響が、より多くの DMS を大気中に放出させるという可能性を示した。

CO_2 は北太平洋に適用可能なアルゴリズムが存在しないため、Takahashi et al. (2002) の月別結果をベースに使用して、近年大気及び海洋で研究報告されている CO_2 の濃度変化をそれら全体に均して、35 年間の変化量を見積もった。結果、flux が $-5.80 \text{ mmol/m}^2/\text{day}$ から $-5.39 \text{ mmol/m}^2/\text{day}$ へと低下し、北太平洋の大気 CO_2 吸収力がこの間に $7.1\% (\pm 10\%)$ 減少していることが示唆された。

また、各々の簡易放射強制力見積り式を用いて、これらの結果を相互比較させ、それぞれの成分に対する海洋の供給・除去源としての効力の変化がどの程度、大気に影響するのかを調べた。結果、 N_2O , DMS, CO_2 各々の変化量を放射強制力で表すと、 $0.00275 \text{ W/m}^2/35 \text{ yr}$, $-0.081 \text{ W/m}^2/35 \text{ yr}$, $0.089 \text{ W/m}^2/35 \text{ yr}$ であった。

以上をまとめると、近年、北太平洋で研究報告されている温暖化による影響は、海洋生物を介して、直接・間接的にこれら海洋生物起源ガスの表層濃度および flux にも及び、変動していることを、定量的に明らかにした。さらに、これらガス成分は、大気にて地球温暖化を促進/減速を制御する重要な役割を持つことから、これらの温室/冷却効果ガスの收支バランスが今後の気候変動に大きく関わってくると示唆される。

学位論文審査の要旨

主査 教授 乗木 新一郎

副査 教授 吉川 久幸

副査 准教授 渡辺 豊

副査 准教授 角皆 潤 (大学院理学研究院)

学位論文題名

The behavior of marine biogases with feedback effect of the global warming in the North Pacific

(地球温暖化の促進／減速を制御している北太平洋生物起源ガスの
定量化及び、その潜在的影響力に関する研究)

海洋表層は大気化学において重要なガス成分 (N_2O (亜酸化窒素), DMS (硫化ジメチル), CO_2) の供給源/除去源として機能する役割があり、それらガス成分の存在量は、近年、研究報告されている海洋環境の変化によって、直接的あるいは間接的に海洋生物を介して影響を受けていると考えられる。

そこで本研究は、これらガス成分の海洋から大気への flux が北太平洋において過去 35 年間で変化しているかを定量的に明らかにすることを目的とした。また、DMS はその測定法の問題から一部改良の必要性があるため、本研究はその改良実験も試みた。

はじめに、北太平洋における N_2O を時系列で測定するとともに、復元アルゴリズムを作成し、北太平洋表層の N_2O を見積もった。

$$\Delta N_2O = 0.12 AOU + 0.97 \quad (R^2 = 0.74, n = 685, p \text{ 値} < 0.0001) \quad (1)$$

$$\ln(N_2O_{surf} - N_2O_{sat}) = 2.29 \ln N_2O_{bottom} - 6.07 \quad (R^2 = 0.53, n = 32) \quad (2)$$

結果、北太平洋の N_2O flux は $1.61 - 9.54 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ (全海洋平均 N_2O flux $0.54 - 2.71 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$) と季節変化がみられ、MLD の発達と共に増減していることが示唆された。また、 N_2O flux は 35 年間で正味 $10.8 (\pm 1.9)\%$ 増加していることが示唆された。

DMSについても、 N_2O と同様に長期変動を把握するため、DMSを時系列で測定するとともに、既存のDMSアルゴリズム(Watanabe, Sakamoto, et al., 2007)を使用して、長期時系列観測点の表面水温 (SST)と表面硝酸塩濃度 (SSN)の変動に基づき、北太平洋の表層DMSの変化分を見積もった。本研究の一過程として、現在保存が困難なDMSの長期保存を含めた測定法 (DMS-SPME長期保存法) の確立も行った (20日間保存率 : $97.6 \pm 0.1\%$; 保存-非保存関係 : $DMS_{pre} = -0.01 + 1.03 DMS_{unpre}$ ($R^2 = 0.95, n = 11$, p 値 < 0.0001))。この測定法は、従来の測定法に比べ簡易で、複雑な装置を必要とせず、大型観測船の使用等という条件がなくなるため、小・中型船を使用して、より多くのDMSデータ入手することが可能であると示唆された。DMSは35年間で $4.9 (\pm 30)\%$ (平均 : 表層濃度 2.3nM ; flux $0.56 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$) 濃度及びfluxともに増加傾向に

あることが示唆された。現在、近年の海水温上昇や栄養塩減少が報告されており、これらの生物への影響が、より多くのDMSを大気中に放出させるという可能性を示した。

CO₂は Takahashi et al. (2002)の月別結果をベースとして使用し、近年大気及び海洋で研究報告されている CO₂ の濃度変化をそれら全体に均して、35 年間の変化量を見積もった。結果、flux が -5.80 mmol/m²/day から -5.39 mmol/m²/day へと低下し、北太平洋の大気 CO₂ 吸収力がこの間に 7.1 (± 10) % 減少していることが示唆された。

また、各々の簡易放射強制力見積り式を用いて、これらの結果を相互比較させ、それぞれの成分に対する海洋の供給・除去源としての効力の変化がどの程度、大気に影響するのかを調べた。結果、N₂O, DMS, CO₂ 各々の変化量を放射強制力で表すと、0.28, -5.0, 8.9×10^{-2} W/m²/35 yr であった。

以上をまとめると、近年、北太平洋で研究報告されている温暖化による影響は、海洋生物を介して、直接・間接的にこれら海洋生物起源ガスの表層濃度および flux にも及び、変動していることを、定量的に明らかにした。さらに、これらガス成分は、大気にて地球温暖化を促進/減速を制御する重要な役割を持つことから、これらの温室/冷却効果ガスの收支バランスが今後の気候変動に大きく関わってくると示唆される。

審査委員一同は、これらの成果を高く評価し、また研究者として誠実かつ熱心であり、大学院博士課程における研鑽や修得単位などもあわせ、申請者が博士（地球環境科学）の学位を受けるのに充分な資格を有するものと判定した。