

地球一括計上

課題名	アジア・オセアニア域における長寿命・短寿命気候影響物質の包括的長期観測		
担当研究機関	国立研究開発法人 国立環境研究所		
研究期間	平成24-28年度	合計予算額 (当初予算額 ベース)	111,802千円 (うち28年度 17,110千円)
研究体制	国立研究開発法人国立環境研究所		
研究概要	<p>1. 序 (研究背景等)</p> <p>二酸化炭素以外に加えて、それ以外の長寿命・短寿命温室効果物質 (メタン、亜酸化窒素、オゾン、ブラックカーボン等) は、地球温暖化への寄与も大きく、それらを合計すると二酸化炭素の大きさにほぼ匹敵することが知られており、対策の上でも重要な物質である。直接的に温室効果に寄与する物質以外にも、一酸化炭素などの反応性ガスは大気中の水酸 (OH) ラジカルとの反応を通じて、メタンや代替フロンの大気中濃度に影響を与えることから、これらの物質について大気中濃度の空間分布や時間的推移を把握することは極めて重要である。</p> <p>東アジア・東南アジア地域には急速な発展を遂げつつある国が複数存在しており、人口の増加、産業・経済の発展に伴う当該物質 (直接・間接温室効果気体、粒子状物質) の発生量増加、あるいは土地利用変化による発生源そのものの変化が懸念されている。燃料使用統計や単位燃料あたりの物質放出ファクターに基づく排出量推定 (ボトムアップ型エミッションインベントリ) は最も広く行われている温室効果物質・大気汚染物質の排出推計手法であるが、その推定値には非常に大きな不確実性があるといわれている。この不確実性をより小さくするための有効な手法の一つに、大気中濃度の観測データを用いて逆推計計算 (インバースモデル) を行って放出量を推定するトップダウン的な手法がある。この手法にはモデルの精度を上げるためにできるだけ多くの観測データが必要とされるが、アジア・オセアニア地域における温室効果物質の観測は極めて限られている。より高い精度で排出量推定を行うためには、これらの物質の大気中濃度を地域的規模でモニタリングする観測網の整備が急務である。</p> <p>本研究では西部太平洋上の日本-東南アジア航路、日本-オセアニア航路を航行する2隻の定期貨物船舶を用いて洋上大気中の微量温室効果気体の連続観測を行うことにより、観測データに乏しいアジア・オセアニア地域におけるデータを取得する。定期貨物船舶を用いた観測は定点で観測を行う地上観測ステーションに対して、広範囲を系統的に網羅できることが利点であり、地上ステーションを多数設けるコストよりも、コストと効率の両面において有利である。一方、日本-オセアニア航路の貨物船観測では、陸域から遠く離れたバックグラウンド的な大気観測が可能であり、2隻の特徴的な船舶観測を対比させることによって東アジア・東南アジア地域からの温室効果物質の放出影響をより良く理解することができる。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>長寿命温室効果ガスとして、メタン、亜酸化窒素を対象とし、貨物船でのボトルサンプリングによる持ち帰り分析で、洋上大気中濃度を計測する。貨物船航路は、国立環境研究所地球環境研究センターのモニタリング事業で維持している太平洋域の貨物船観測と併せて、北緯53度から南緯40度におよぶ広域の観測が可能であるので、全球規模の分布と時系列トレンドの把握を行う。加えて、アジア大陸の沿海を航行する東南アジア航路でも同様な観測を行い、大気分布から大陸上の発生源からの影響を把握する。</p> <p>一方、より短寿命のガス成分であるオゾンや一酸化炭素は、全球分布が比較的均一な長寿命温室効果気体と異なり、その短い大気中寿命のために、地域規模の特徴的な空間分布を生じる。特に、一酸化炭素は不完全燃焼など比較的低温度の燃焼からの放出による寄与として、生物燃料利用やバイオマスバーニング (森林火災、焼き畑) が大きな発生源であり、東・東南アジア地域からの排出量が大いと考えられている。一酸化炭素とオゾン、そしてブラックカーボンについては、連続計測で高密度</p>		

な観測を行って、広域な濃度分布や季節変化を明らかにするだけでなく、より地域的な発生源の寄与を明らかにすることを目的とする。

本研究では、清浄な「バックグラウンド大気」である外洋（オセアニア航路）における観測と、地域的汚染を含んだ「ルーラル大気」であるアジア沿海域（東南アジア航路）における観測を組み合わせ、社会経済活動、農地の拡大、あるいは森林火災による温室効果ガスの放出が急増している可能性がある東アジア・東南アジア地域からの放出量変化を早期に検出することを可能にする観測ネットワークの構築を行い、微量温室効果ガス観測データの大きな空白域を埋めることを目標とする。

### 3. 研究の内容・成果

本研究では、放射強制力を有する微量温室効果ガスであるメタン、亜酸化窒素、対流圏オゾンの長期観測を行う。また、温室効果ガスと同様に温暖化に寄与しアジアからの排出が多いブラックカーボンの連続観測も行う。さらに、OHラジカルとの化学反応を通じてメタンや代替フロンなどの大気中寿命に影響を及ぼすとともに、メタン、ブラックカーボンの人為発生源からの放出量を推定する際にリファレンス兼トレーサーとなる一酸化炭素の測定も行う。

#### (1) 東南アジア航路・オセアニア航路の定期貨物船舶による大気観測

アジア・オセアニア航路の典型的な航路を示す（図1）。本課題では、東南アジア航路の貨物船 FUJITRANS WORLD 号（株式会社鹿島船舶所有）を利用した大気観測を行っている。FUJITRANS WORLD 号は、東シナ海と南シナ海にわたるアジア沿海域を航行する自動車運搬船であり、日本、中国、タイ、マレーシア、シンガポール、インドネシア、およびフィリピンの各港に寄港し、4週間で一周する定期運行を行っている。東南アジア航路に加えて、オセアニア航路を航行する TRANSFUTURE 5 号（トヨフジ海運所有）を利用した大気観測を継続している。TRANSFUTURE 5 号は、南北両半球にわたる西部太平洋とタスマン海を航行する自動車運搬船であり、日本、オーストラリア、ニュージーランドの各港の寄港し、6週間で一周する定期運行を行っている。この2隻が、本課題の主要な観測プラットフォームである。



図1 アジア・オセアニア航路における典型的な観測ルート

#### (2) アジア・オセアニア域におけるメタンおよび一酸化炭素の分布と変動

東南アジア航路およびオセアニア航路におけるボトルサンプリングで得られた $\text{CH}_4$ および $\text{CO}$ の大気中濃度を、4つの緯度帯（ $10-16^\circ\text{N}$ ,  $5-10^\circ\text{N}$ ,  $0-5^\circ\text{N}$ ,  $5-0^\circ\text{S}$ ）に分けて比較解析を行ったところ、 $\text{CH}_4$ はいずれの緯度帯においても増加トレンドが観測された（図2）。2007年以降の平均増加率を求めると、オセアニア航路で $7.1 \pm 0.1$  ppb/yr、東南アジア航路で $6.9 \pm 0.2$  ppb/yrであった。東南アジア航路とオセアニア航路で観測された濃度を比較すると、いずれの緯度帯でも東南アジア航路で高濃度となり、特に緯度帯 $0-5^\circ\text{N}$ の東南アジア航路で非常に高濃度の $\text{CH}_4$ が観測された。これは、カリマンタン島北西沿岸やマレー半島南東沿岸の沖合における洋上油田・ガス田からの $\text{CH}_4$ の放出や、泥炭地火災の影響によると考えられた。

一方、CO はいずれの緯度帯においても明瞭な増加・減少トレンドは認められなかった。オセアニア航路とは対照的に、東南アジア航路では極端に高いCO濃度がしばしば観測された。東南アジア航路の季節変化は、オセアニア航路における濃度より常に高くなっており、特に緯度帯 0-5°N では平均値でも 100 ppb 以上高濃度となる場合があった。CO は主に不完全燃焼過程で発生することから、バイオマス燃焼などからの放出が東南アジアの熱帯域で多く、一酸化炭素濃度に大きな影響を及ぼしていることが示唆された。

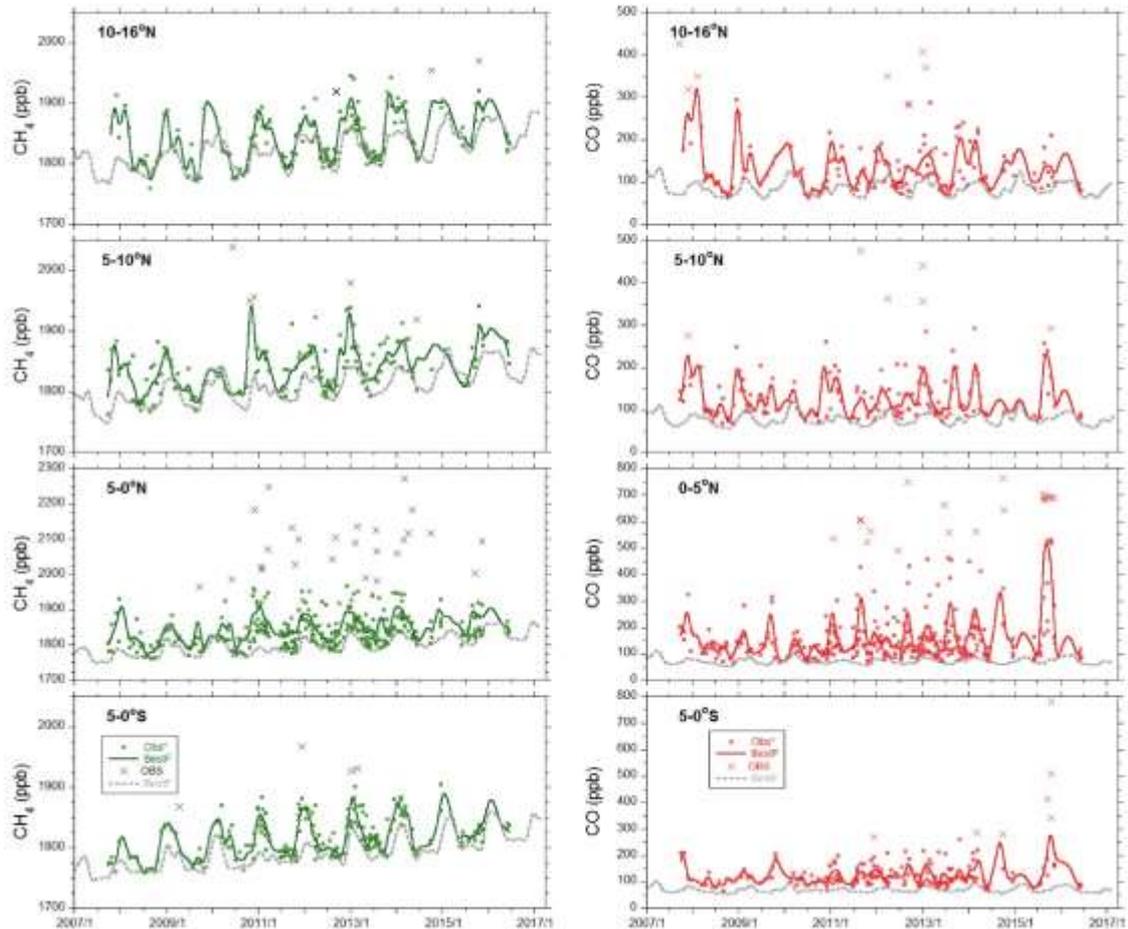


図2 日本-東南アジア航路および日本-オセアニア航路によるボトルサンプリングで得られた(左)CH<sub>4</sub>および(右)COの時系列。実線および破線は時系列解析によって求められた東南アジア航路およびオセアニア航路に対するベストフィット曲線をそれぞれ表す。黒丸は東南アジア航路での測定値、バツ印は時系列解析の際に異常値(>3σ)として解析から除いた測定値を表す。

### (3) アジア・オセアニア域におけるオゾンの分布と変動

東南アジア航路およびオセアニア航路における連続測定で得られた対流圏オゾンの大気中濃度を緯度帯により比較解析したところ、オセアニア航路では北半球の中緯度帯において明瞭な季節変化が見られた(図3)。中緯度帯から亜熱帯を経て熱帯に近づくにつれて季節変化の振幅は小さくなり、熱帯域では非常に小さな振幅しか示さなかった。濃度レベルも熱帯では低く、これは太平洋上の清浄な大気中でオゾンがネットに消失傾向にあることを示しているものと考えられた。対照的に、中緯度帯では濃度レベルが高く、またその変動も大きい。窒素酸化物や揮発性有機化合物を前駆物質として、特に春季に正味でオゾンが生成していることが示唆される。オセアニア航路とは対照的に、東南アジア航路では、北緯10度以南の熱帯域でオゾン濃度が高く、東南アジア航路におけるオゾン濃度は概してオセアニア航路よりも高い値を示していた。一方、

北緯 10 度以北では、オゾン濃度が太平洋上の濃度とほぼ一致していた。前駆物質濃度が低いためオゾンが正味で消失となっているオセアニア航路とは対照的に、前駆物質濃度が高く、豊富な太陽光が一年を通じて得られる東南アジア航路ではオゾンが正味で生成となり、全体的に高いオゾン濃度をもたらしていると推測された。

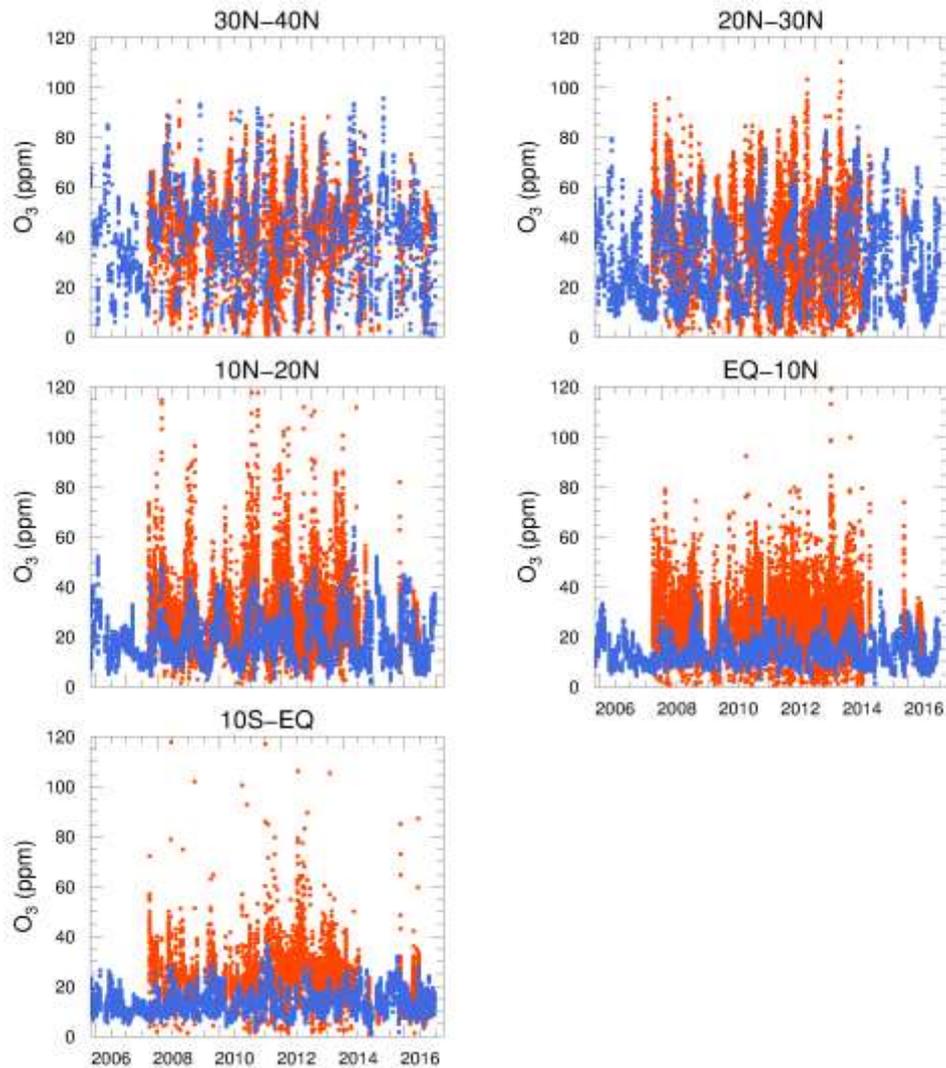


図3 オセアニア航路（青色）と東南アジア航路（赤色）で観測されたオゾン濃度の比較

#### （4）東南アジアにおけるオイルリグからのメタン放出

キャビティリング分光分析計による連続観測から、東南アジア航路沿いの赤道以北地域において、特に、マレー半島東海岸沖およびボルネオ北西海岸沖の2地域に集中して、顕著なCH<sub>4</sub>ピークが多数観測された。観測されたCH<sub>4</sub>ピークは数分～1時間の時間であったが、その濃度増加は顕著であり、例えば、東南アジア地域のベースラインレベルを上回り、約1100 ppbにも達するピークであった。また、CH<sub>4</sub>ピークと同時にCO<sub>2</sub>ピークが観測され、CO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>に見られた正の相関関係から、これらのガスが局所的かつ非生物起源の共通排出源から出ていることが示唆された。

CH<sub>4</sub>排出源を特定するために、米国海洋大気庁（NOAA）が提供する夜間可視衛星観測データを調べ、CH<sub>4</sub>ガスをフレアリングにより主な排出物として活動する沖合プラットフォームの位置を特定した。その結果、観測された高濃度ピークは、主に沖合プラットフォームからの排出を捉えていたことが分かった（図4）。マスバランス法を用いて、排出量を推計したところ、東南アジア地域の沖合プラットフォームからのCH<sub>4</sub>年間総排出量は約0.1 Tg y<sup>-1</sup>（不確かさの範囲は0.02～0.32 Tg y<sup>-1</sup>）と推定され、沖合のCH<sub>4</sub>排出量は、東南アジア地域の石油／ガス生産に由来する総排出量の約8%（0.29 Tg y<sup>-1</sup>）を占めることが考察された。こうした石油／ガス生産用の沖合施設は、東南アジアの他にも、北海、ペルシャ湾、ギニア湾、メキシコ湾に多数存在している。そこで地球

全体での排出量を単純推計すると、世界全体の沖合石油／ガスプラットフォームからのCH<sub>4</sub>排出量は1～2 Tg y<sup>-1</sup>であると示された。このことは沖合排出源からの排出量が山火事や永久凍土などの小規模な自然排出源からの排出量と同程度である可能性があることを示唆するものとなった。

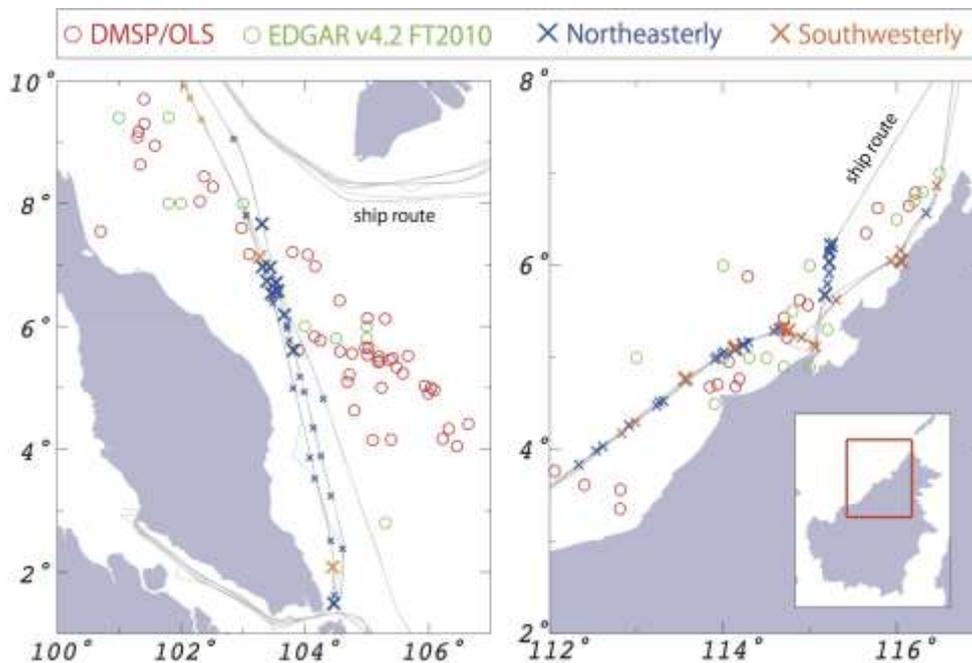


図4 東南アジア航路で観測されたCH<sub>4</sub>ピーク分布と、マレー半島東海岸沖の沖合プラットフォーム（左）とボルネオ北西海岸の沖合プラットフォーム（右）。×印はCH<sub>4</sub>ピークの観測場所で、×印の色はそれぞれのCH<sub>4</sub>ピークが観測された時の風のパターン（青色：北東風。橙色：南西風）。○印は2010年のプラットフォームの場所で、赤色はDMSO/OLSデータに基づき特定されたもの、緑色はEDGAR v.4.2 FT2010データベースで報告されているものである。灰色の実線は貨物船のルートを表す。

#### 4. 考察

本研究課題では、日本－オセアニア航路・日本－東南アジア航路の両航路においてボトルによる大気採取・分析と、オゾン・一酸化炭素の連続観測を実施するとともに、キャビティリングダウン式分光計による二酸化炭素・メタンの高確度・高精度な連続観測も実施した。

5年間にわたる取り組みで、ボトルサンプリングされているメタン、亜酸化窒素などのガス成分に加えて、連続観測されてきたオゾン、一酸化炭素、PM<sub>2.5</sub>およびブラックカーボンの短寿命大気汚染成分について緯度分布や季節性が明らかになるとともに、東南アジア地域からの一次排出の様子が明瞭に捉えられた。また、東南アジア地域ではオゾンの光化学生成が活発に起こっていることが示唆された。大気中寿命が短い成分は濃度変動が大きい、地域代表性のあるデータが確実に取得されていることが示された。長寿命ガス成分でも、東南アジア航路海域のメタン、亜酸化窒素の大気濃度は太平洋上のバックグラウンド濃度より大幅に高いことが明らかとなり、メタン、亜酸化窒素、一酸化炭素などについて、熱帯に特有な発生源が存在することが明瞭に示唆された。具体的には、東南アジア航路におけるメタン、一酸化炭素および亜酸化窒素の大気中濃度がオセアニア航路に比べて有意に高く、特に赤道付近の緯度帯において濃度差が最大となることが分かった。このことはカリマンタン島北西沿岸やマレー半島南東沿岸の沖合で洋上油井・ガス井からのメタンの漏出が起きていることを確認した事実や、スマトラ島におけるバイオマス燃焼にともなうメタンや一酸化炭素の大規模ピークを検出した事実と整合するものであり、これらの放出が年平均値の変化を生じるほど大規模な放出になっていることを示唆するものであった。

ハードウェア面でもキャビティリングダウン分光分析法による船舶観測への応用が確立された。連続測定とボトル分析によるQA/QCから、運用に問題がないことが示された。このキャビティリン

グダウン分光分析法によるメタンの連続計測からは、東南アジア地域におけるバイオマス燃焼からの温室効果ガスの放出や、洋上オイル・ガス採掘プラットフォームからのメタン放出など、従来のボトル分析では捉えられなかった放出源を捉えることができたことは大きな成果である。これらの結果から、現在の化学輸送モデルに広く使用されている排出インベントリにおける排出量が過小評価されて可能性が指摘された。

このように、アジアからの温室効果ガスの排出状況をより良く推定するためには今後も多成分を包括的に連続測定する計測機器の搭載が有効であることが明らかとなった。

#### 5. 波及効果

本研究課題のように対流圏大気中の温室効果ガスを直接観測する観測研究プログラムは、宇宙航空研究開発機構・国立環境研究所他が実施しているGMGG (Global Monitoring of Greenhouse Gases) を構成し、全球規模で二酸化炭素やメタンの濃度分布を明らかにする計画において、地表大気濃度を検証する役割を担っている。

また、メタン、亜酸化窒素、一酸化炭素等の温室効果ガスおよび大気汚染物質の排出インベントリ整備は今後途上国にも拡大する必要があり、特に、成分相互間の濃度比は発生源比を明らかにし得るので、この研究課題は途上国周辺域における大気観測のネットワーク化の一環として期待されている。