



航空機排出ガスに関する規制と環境影響評価\*

早乙女 拓 海\*\*

1. はじめに

航空機による人及び貨物の輸送量は、1960年代にジェット旅客機が開発されて以降、急速に増加し、今後も新興国を中心に年間2.6～6.2%の割合で増加し続けると予想されている<sup>1)</sup>。

航空機の環境問題は、これまで国際民間航空機関(ICAQ: International Civil Aviation Organization)を中心として、実態調査や対策及び規制の内容等が検討されてきた。ICAQにおける検討が開始された当初は、当時社会問題であった航空機騒音に関する検討が中心であったが、1970年頃になると特定の空港周辺の大気汚染が深刻化し、ICAQ第18回総会(1971年7月)において、航空機エンジン排出ガスを含めた航空機環境問題全般についての活動方針が見直された<sup>2)</sup>。その後、1981年6月にエンジンから排出される窒素酸化物(NOx)、炭化水素(HC)、一酸化炭素(CO)、Smokeを対象とした規制が制定され(ICAQ Annex

16 Vol. II)、そのうち、NOxについては段階的に規制が強化されてきた。現在は、粒子状物質(PM)の数に着目した規制や、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)に関する規制について検討が進められている。

本稿では、航空機エンジンから排出される主な大気汚染物質の概要、及びそれらを対象とした排出規制の内容を概説するとともに、飛行場周辺の大気環境影響評価の例として環境省における調査結果を紹介する。

2. 航空機から排出される大気汚染物質

航空機エンジンから排出されるガス中には、自動車や船舶等の石油燃料を使用する移動体と同様にCO、NOx、HC、二酸化硫黄(SO<sub>2</sub>)、煤煙(Smoke)等の大気汚染物質が含まれている<sup>3)</sup>(図1)。航空機に使用するジェット燃料は、灯油型の「ケロシン系」と灯油留分にナフサを混合する「ワイドカット系」があり、一部の寒冷地を除いて旅客機の多くはケロシン系の燃

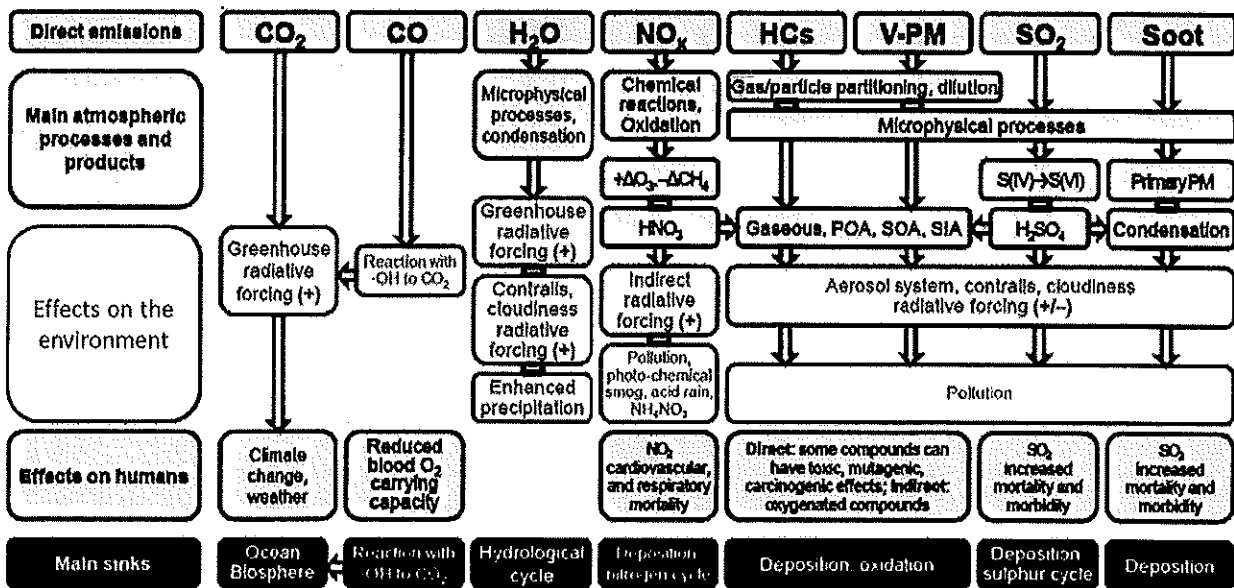


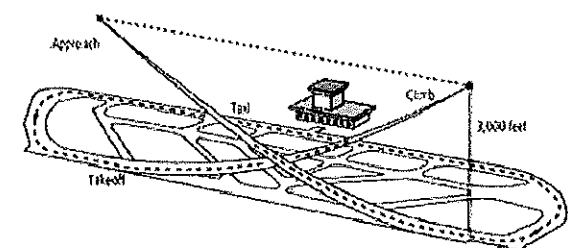
図1 航空機エンジンから排出される大気汚染物質等(文献3を一部加筆修正)

\*原稿受付 平成26年8月29日。  
\*\* (株)環境計画研究所(東京都府中市高町2-15-13)。

料である JetA を使用している<sup>4)</sup>。ケロシン系ジェット燃料の硫黄分は重量比で 0.3%以下であるため、A 重油・C 重油を使用する船舶と比較して硫黄酸化物 (SO<sub>x</sub>) の排出量は小さいが、エンジンの燃焼効率が高いため NO<sub>x</sub> は生成され易い。NO<sub>x</sub> の多くは一酸化窒素 (NO) として排出され、それらが移流する過程で酸化して二酸化窒素 (NO<sub>2</sub>) となる。

各大気汚染物質の燃料消費量あたりの排出量はエンジンの出力によって異なり、CO 及び HC は出力が高い程小さくなるが、逆に、NO<sub>x</sub> は出力が高い程多く排出される<sup>5)</sup>。航空機の場合、低出力の陸上走行やアイドリング時は CO・HC が排出され易く、最大出力に達するテイクオフやクライム時は NO<sub>x</sub>・Smoke が排出され易い等、運行モードによる違いが顕著である。

これら航空機起源の大気汚染物質が、周辺的一般大気環境に与える影響を評価する場合、概ね大気境界層高度に対応する高度 3000 フィート (約 920m) より下層の LTO サイクル (図 2) における総排出量を使用される。エンジン出荷段階における物質別・LTO サイクル別排出量は、ICAO のウェブサイト<sup>6)</sup>に公表されている<sup>7)</sup>。



Thrust setting	Rated output (%)	Time in mode (min.)
Takeoff	100	0.7
Climb	85	2.2
Approach	30	4.0
Taxi/Idle	7	26.0

図 2 LTO サイクル<sup>6)</sup>

### 3. 航空機排出ガスに関する規制

#### 3.1 現在の規制

民間航空に関する環境対策技術・手法や具体的な規制内容は、1944 年に締結された国際民間航空条約 (通称シカゴ条約) に基づき、ICAO にて検討・策定されている。航空機エンジンの排出ガスに関する規制は、1981 年に制定された Annex 16 vol.II に記載されており、国内においても「航空法」によってこれに準じた規制がなされている。対象物質は、HC、CO、NO<sub>x</sub>、Smoke であり、HC 及び CO は現在でも制定当時の規

制値から変更されていない。

#### 【一酸化炭素 (CO) の規制値】

$$D_p / F_{00} = 118 \text{ g/kN}$$

D<sub>p</sub>: 排ガス質量 (g), F<sub>00</sub>: 定格出力 (kN)

※1986 年以降に製造されたエンジンを対象とする。

#### 【炭化水素 (HC) の規制値】

$$D_p / F_{00} = 19.6 \text{ g/kN}$$

D<sub>p</sub>: 排ガス質量 (g), F<sub>00</sub>: 定格出力 (kN)

※1986 年以降に製造されたエンジンを対象とする。

NO<sub>x</sub> は、前述した高度 3000 フィートまでの LTO サイクルにおける総排出量を対象とした規制が設けられており、これまで段階的に強化されてきた (図 3)。なお、NO<sub>x</sub> の具体的な総排出量の算出方法や対策技術については、山本 (2012)<sup>8)</sup>にて詳しく解説されているため、そちらを参照されたい。

粒子状物質である Smoke は、排気ガスをフィルターに噴出し、汚れたフィルターの反射率を測定する方法 (SN: Smoke number) により規制されている。具体的には、米国 SAE (The Engineering Society for Advancing Mobility Land Sea Air and Space) により指定された方法で、所定のフィルター 1m<sup>2</sup> あたりに 16.2kg の排気ガスを通過させ、以下の式により算出する<sup>10)</sup>。

$$SN = 100 \times (1 - R_s / R_w)$$

R<sub>s</sub>: 排気ガス通過後のフィルターの反射率

R<sub>w</sub>: 通過前のフィルターの反射率

#### 【煤煙 (Smoke) の規制値】

$$SN = 83.6 (F_{00})^{0.274} \text{ または } 50 \text{ の低い方}$$

SN: Smoke number (-), F<sub>00</sub>: 定格出力 (kN)

※1983 年以降に製造されたエンジンを対象とする。

排出ガスの測定は、航空機の場合、実際の運行中 (飛行中) の排ガスを直接測定するのは困難であるため、出荷段階のエンジン単体運転や静止運転時の測定結果が使用される。

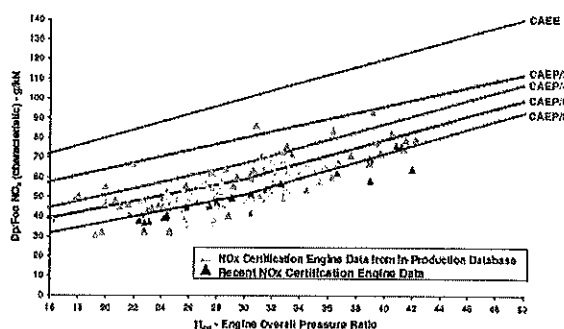


図 3 NO<sub>x</sub> の排出規制値<sup>8)</sup>

### 3.2 今後の見通し

航空機エンジンから排出される粒子状物質の排出規制は、SmokeとしてAnnex 16 Vol.IIにおける規制値が変更されることなく使用されてきたが、近年、ICAO航空環境保全委員会（CAEP：Committee on Aviation Environmental Protection）において不揮発性PMの数（粒子数）に着目した規制を設ける方向で検討が進められている。従来のSNによる評価では、粒子の総重量によって決定されるため、粒径の大きい粒子が多い程高くなるが、健康へ影響を考える場合、微小粒子状物質（PM<sub>2.5</sub>）の様な粒径の小さい粒子の数が重要となる。ICAOでは、当初2013年より規制する方針であったが、科学的知見の不足等により現時点でも検討段階にあり、各国で測定調査を中心とした調査・研究が進められている。

一方、温室効果ガスである二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）の航空機の寄与率は、全世界で約2%と算出されている<sup>13)</sup>。ICAO第37回総会（2010年）では、地球温暖化対策として2%/年の燃料効率の改善を図ることが決定され、将来的にAnnex 16 Vol.IIIを新設してCO<sub>2</sub>の規制を設ける方向で検討が進められている。

## 4. 国内における飛行場周辺の環境影響評価

環境省では、国内の主要な港湾及び飛行場周辺の大気環境を把握するため、「船舶・航空機排出大気汚染物質削減に関する検討調査」（以降、「環境省調査」という）を平成22年度から実施している<sup>12)</sup> <sup>13)</sup> <sup>14)</sup> <sup>15)</sup>。環境省調査では、調査開始時点で活用可能な国内・外における航空機排出ガスの環境影響評価に関する先行調査・研究事例が殆どなかったため、影響評価の枠組みを構築することから着手し、滑走路近傍における実測調査や大気拡散シミュレーション等を実施することで知見を蓄積してきた。

以降、環境省調査における航空機排出ガスに関する調査の概要と、そのうち、成田国際空港における実測調査の結果を整理した早乙女ら（2013）<sup>16)</sup>の概要を紹介する。

### 4.1 滑走路近傍における実測調査

前述したとおり、ICAO CAEPにて粒子状物質の数に着目した規制を設ける方向で検討が進んでいるものの、実際に測定した事例はなかった。そこで、環境省は、2011年12月に成田国際空港のA滑走路近傍（滑走路中央から約170m）に測定小屋を設置し、実測調査を行った<sup>13)</sup> <sup>16)</sup>（図4、図5）。測定物質は、環境基準が設定されているCO、NO<sub>x</sub>、PM<sub>2.5</sub>に加え、粒

径別粒子数計（SMPS：Scanning Mobility Particle Sizer）を設置して粒子数を測定した。測定期間中の航空機の通過状況は、ビデオカメラを設置し、撮影することで確認した。ここでは、例として滑走路方向からの風が卓越した、2011年12月16日の粒径別粒子数の測定結果を示す。図6は、横軸に粒子の粒径、縦軸に粒子数をプロットしたグラフであり、時間帯ごとの粒径別・粒子数分布を示している。航空機の運航時間外である0～6時までは粒子数濃度が非常に低い（図6上）、その後は徐々に増加し、16～17時にはピーク粒径（0.016μm）の1時間積算値が約4.5×10<sup>6</sup>個/cm<sup>3</sup>程度まで達した（図6下）。粒径のピークは、全時間帯で0.02μm以下であり、滑走路近傍の実測地点では非常に小さい粒子を含むプルームが通過していたことになる<sup>16)</sup>。

なお、実測地点の詳細、その他の測定物質に関する結果等は、環境省（2012）<sup>13)</sup>、早乙女ら（2013）<sup>16)</sup>を参照されたい。



図4 測定地点と滑走路の位置関係<sup>13)</sup>



図5 実測地点の風景（1/2）<sup>13)</sup>

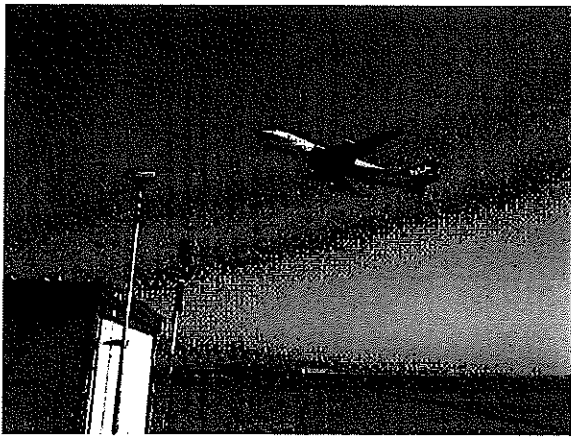


図5 実測地点の風景 (2/2) 13)

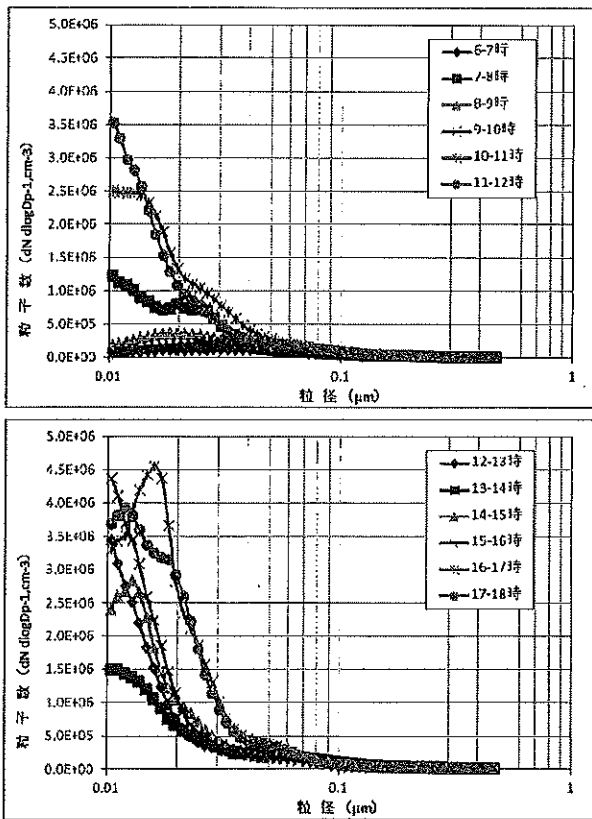


図6 滑走路近傍における粒径別粒子数 13)

4.2 シミュレーションによる影響評価

実測調査により滑走路近傍における航空機排出ガスの特性に関する知見は得られたが、周辺の大気環境への影響範囲、発生源別の寄与度等については実測調査のみでは把握することが困難であった。そこで、環境省は、平成24年度及び平成25年度の調査<sup>14) 16)</sup>において、米国連邦航空局 (FAA : Federal Aviation Administration) によって開発された空港関連排出ガス専用のモデルである EDMS (Emissions and

Dispersion Modeling System) を使用し、空港内の各発生源の影響を組み込んだ大気拡散シミュレーションを実施した。EDMS は、米国環境保護庁 (EPA : US Environmental Protection Agency) 推奨モデルの一つであり、滑走路や空港ターミナル、道路等のレイアウトを地図や航空写真を基にして詳細に設定することが可能である (図7)。また、航空機以外にも、空港内作業車、燃焼施設 (ボイラー棟やゴミ処理場等)、自動車等 (一般道、駐車場) の発生源を設定することが可能であり、より実環境に即した条件で空港全体の発生源別の環境影響を評価することが可能である (図8)。

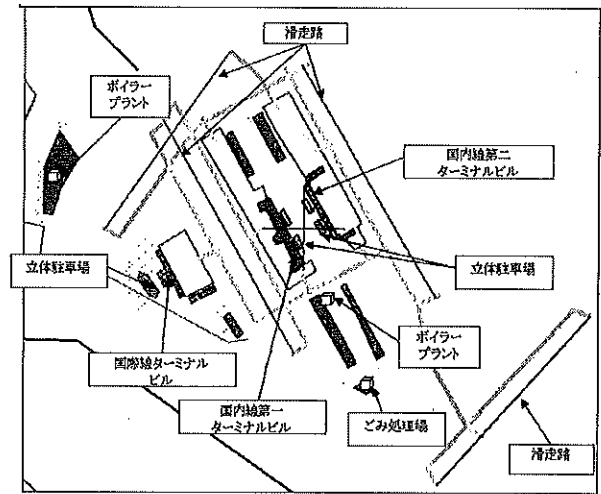


図7 EDMS モデルの構築例 (発生源マップ) 16)

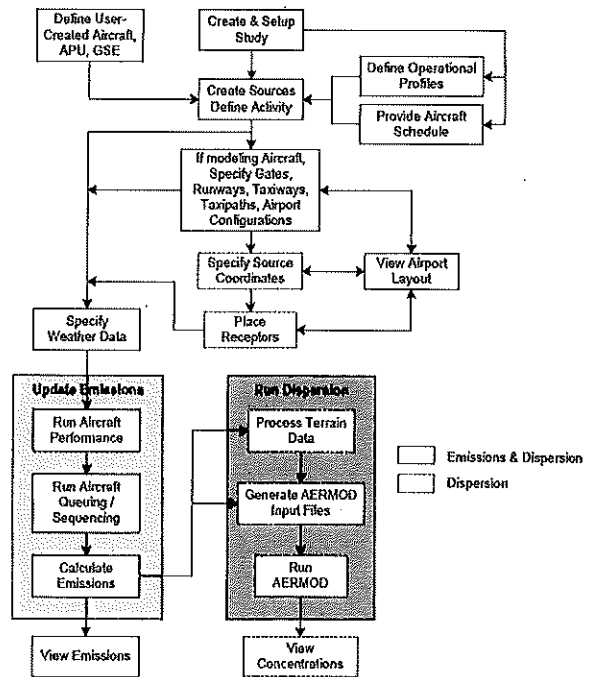


図8 EDMS による計算フロー 17)

環境省調査では、これまで成田国際空港及び羽田空港を対象に EDMS によるシミュレーションを実施してきた。空港周辺の大气環境における、航空機排出ガスの影響度合（寄与率）を把握するためには、空港内にある様々な発生源や空港周辺の自動車、工場等の発生源を考慮する必要がある。環境省調査では、航空機以外の発生源として、空港内作業車、ごみ処理場、発電施設、自動車（空港周辺の主要な一般道）、駐車場、航空機整備場を空港内外における主要な発生源として設定し、計算を実施した。計算結果の例として、空港周辺の CO 濃度分布を図 9 に示す。

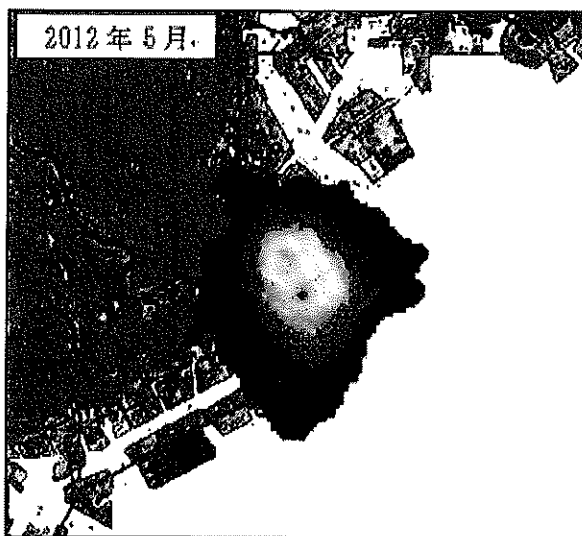


図 9 飛行場周辺の濃度分布の例 (CO 濃度) <sup>15)</sup>

ここでは、成田国際空港を対象としたシミュレーション<sup>14)</sup>により得られた主な知見を以下に示す。

- ・ 本稿 4.1 にて紹介した実測結果と比較して、NO<sub>x</sub> 濃度は時間変化傾向やピークの出現時刻が比較的よく一致しており、短時間スケールでは精度よく再現されることが確認された (図 10)。
- ・ NO<sub>x</sub> 以外の物質は、大部分をバックグラウンド濃度が占める結果となった。
- ・ NO<sub>x</sub> は滑走路直近で航空機排出ガスの占める割合が高く、80%以上の寄与があった。また、航空機排出ガスは、空港内作業車等の他の発生源と比較して遠方まで輸送される傾向がみられた。
- ・ 航空機から排出される NO<sub>x</sub> の寄与率は、最も影響が大きくなる季節（夏季）の風下側の約 10km 地点で約 30%、15km 地点で約 20%、25km 地点で約 10%であった。

これらの調査により、EDMS によるシミュレーションが、空港に関連した排出ガスの大气環境影響評価の

ツールのひとつとして有効であることが示された。

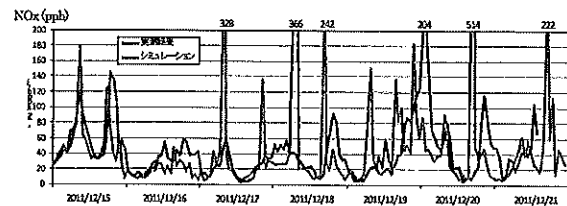


図 10 実測結果とシミュレーション結果の比較 (NO<sub>x</sub>) <sup>14)</sup>

## 5. まとめ

本稿は、航空機エンジンの排出物と規制の内容について概説するとともに、環境影響評価に関する国内の先進的な事例として環境省における調査の概要を紹介した。不揮発性 PM 及び CO<sub>2</sub> については、今後、新たな規制が設けられる方向で検討が進んでおり、各国の研究機関等で調査・研究が進められている。

航空機排出ガスの環境影響評価について、空港内には空港内作業車や発電施設、駐車場等の様々な発生源があるため、それらの影響を考慮した総合的な手法により評価することが重要である。他方、実際に運航中の航空機から排出される大气汚染物質を対象とした測定事例については、未だ知見が不足しており、今後の更なる調査が望まれる。

## 参考文献

- 1) ICAO, Outlook for Air Transport to the year 2025.
- 2) 柴田正夫, 航空環境研究, No.1, (1997), 56-67.
- 3) M. Masiol, R.M. Harrison, Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: A review, Atmospheric Environment, vol.95, (2014), 409-455.
- 4) JX 日鉱日石エネルギー ウェブサイト:  
<http://www.noe.jx-group.co.jp/binran/part05/chapter01/section03.html>
- 5) 日本航空広報部, 航空実用ハンドブック, (2005).
- 6) ANA ホールディングス株式会社ウェブサイト  
<http://www.ana.co.jp/eng/aboutana/corporate/csr/stakeholders/environment/pollution.html>
- 7) ICAO Aircraft Engine Emissions Databank  
<http://www.icao.int/environmental-protection/pages/aircraft-engine-emissions.aspx>
- 8) ICAO Doc 9887, (2006), ICAO.

- 9) 山本武, 日マリ学誌, 47-6 (2012), 58-63.
- 10) 町田と藤原, 航空環境研究, No.15, (2011), 32-36.
- 11) ICAO ENVIRONMENT REPORT 2010.  
<http://www.icao.int/environmental-protection/Pages/EnvReport10.aspx>
- 12) 環境計画研究所, 平成 22 年度船舶・航空機排出  
大気汚染物質削減に関する検討調査報告書, (2011).
- 13) 環境計画研究所, 平成 23 年度船舶・航空機排出  
大気汚染物質削減に関する検討調査報告書, (2012).
- 14) 環境計画研究所, 平成 24 年度船舶・航空機排出  
大気汚染物質削減に関する検討調査報告書, (2013).
- 15) 環境計画研究所, 平成 25 年度船舶・航空機排出  
大気汚染物質削減に関する検討調査報告書, (2014).
- 16) 早乙女ら, 航空環境研究, No.17, (2013), 37-43.
- 17) FAA, FAA-AEE-07-01, (2013).

### 著者紹介

早乙女 拓海

- ・ 1984 年生.
- ・ 株式会社 環境計画研究所
- ・ 筑波大学大学院
- ・ 気象学