

航空によるCO2排出に関する研究レビュー*

A Review on CO2 Emission from Aviation*

鈴木宗正**・馬場健太郎***・室町泰徳****

By Takamasa SUZUKI**・Kentaro BABA***・Yasunori MUROMACHI****

1. はじめに

動力付航空機の初飛行からおよそ100年、航空輸送は長距離・高速移動手段として急速な成長を遂げた。現在でも航空旅客輸送量は有償旅客キロベースで年5%前後の成長を続けており、このペースは少なくとも2020年ごろまでは持続するものと予測されている¹⁾²⁾。

現在、航空機起源のCO2排出量は世界総排出量の約2%を、運輸部門におけるその約13%をそれぞれ占めており、これは運輸部門では自動車に次いで2番目に大きい³⁾。またNOxやCH4など航空機を起源とするその他の排出物による環境への影響も無視することができない(表1)。今後、航空輸送がさらに成長するならば、これらの排出量はさらに増加する可能性がある。このことから、航空機によるCO2排出量の現況把握および将来予測を行い、その削減方法を検討することは地球環境の持続可能性の観点から意義のあることである。

表1. 交通起源の主たる排出物の環境への主な影響⁴⁾

排出物	影響の対象
二酸化炭素 (CO2)	気候
一酸化炭素 (CO)	人体健康
メタン (CH4)	気候
粒子状物質 (PM)	人体健康
ベンゼン (C6H6)	人体健康
二酸化硫黄 (SO2)	人体健康、農作物、森林、建築
窒素酸化物 (NOx)	人体健康、農作物、森林、建築

これまで、特に米国や欧州では世界規模での航空機による燃料消費量・各排出物排出量の算出および予測に関する研究が実施されてきた。各研究において集計対象

*キーワード: 航空、燃料消費、二酸化炭素排出

**学生員、工修、東京工業大学大学院総合理工学研究科
人間環境システム専攻
(神奈川県横浜市緑区長津田町4259、
TEL045-924-5606、FAX045-924-5574)

***工修、三菱UFJ証券株式会社
(東京都千代田区丸の内2-4-1、
TEL03-6213-4568、FAX03-6213-6864)

****正員、工博、東京工業大学大学院総合理工学研究科
人間環境システム専攻
(神奈川県横浜市緑区長津田町4259、
TEL045-924-5606、FAX045-924-5574)

排出物やデータの出典等に違いがみられるが、燃料消費量や排出量の算出方法に大差はなく、およそ図1に示すスキームの通りである。本稿では既往研究の中から、特に民間航空機を対象とした現況分析および中期的将来予測に重点を置いた主要な研究を取り上げ、それらの内容についてレビューするとともに、2005年の現況について計算した結果について示す。

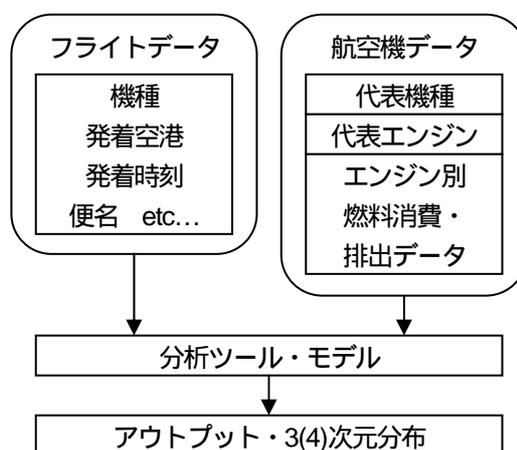


図1. 燃料消費量・排出量算出のスキーム

2. これまでの研究の展開と分析手法

NASA (米航空宇宙局) による初期の研究の一つである Landau et al.⁵⁾ では、1990年におけるジェット航空機からの各排出物排出量の算出と、超音速旅客機の就航を考慮した2015年におけるそれらの予測を実施した。これを受け、Baughcum et al.⁶⁾ による研究は、1992年における世界の定期民間航空便を対象とした燃料消費量、NOx・CO・HCの各排出量の現況算定を行い、さらにそれらを緯度1度・経度1度・高度1kmの3次元グリッドに分布させ、地域や高度による排出量の差異を明示した。

この研究を1999年における現況データとしてアップデートしたのが Sutkus et al.⁷⁾ である。分析対象はジェット旅客機、ターボプロップ旅客機、およびジェット貨物機による定期民間航空輸送であり、算出対象は燃料消費量、NOx・CO・HCの各排出量である。フライトデータは1999年に発行された3か月ごとのOAG時刻表を

使用し、フライトデータの無い月についてはそれらのデータからの予測が行われた。それぞれの航空便は発着空港間を大圏航路で飛行するものとしている。使用機種は86機種のジェット機と大中小3カテゴリのターボプロップ機の内計89機種にまとめられ、それぞれに代表エンジン種別が割り当てられている。エンジンごとの燃料消費量および排出物排出量算出にはICAO⁸⁾を用いている。年ベースでの分析が行われているほかの研究とは異なり、本研究における分析は月ベースで実施された。

NASAによる民間航空機の燃料消費量・排出物排出量の過去・将来予測に関する研究としては、2020年をターゲットとした予測を行ったSutkus et al.⁹⁾、過去に遡って1976年と1982年における燃料消費量・排出物排出量の予測を行い、NASAとの比較から経年トレンド分析を行ったBaughcum et al.¹⁰⁾が挙げられる。

FAA³⁾は、世界の民間ジェット機・ターボプロップ機による燃料消費量、HC・NO_x・CO₂・H₂O・SO₂の各排出量を算出した。分析ツールにはSystem for Assessing Aviation's Global Emissions (SAGE) 1.5を用いている。フライトデータはOAG時刻表およびETMS (Enhanced Traffic Management System: レーダーデータ) に基づき、それら各フライトが実際の航空路をモデルとしたFlight Chord上を飛行するとして運航距離が算出されている。本研究は将来予測を含まない。

ヨーロッパでは、欧州民間航空協議会 (ECAC) ・ ANCAT/EC2による研究が行われた¹¹⁾。この研究では、1991/92年における民間ジェット航空機および軍用機による燃料消費量およびNO_x排出量算出、および2015年におけるそれらの排出量予測を、PIANO (Project Interactive Analysis and Optimisation) を用いて行っている。計算結果は同じく3次元グリッドによって表現されている。フライトデータに実際のATC (Air Traffic Control: 航空管制) データを用いていることが本研究の特徴である。59カ国におけるデータはATCによるものであり、これは米国以外における全フライトのおよそ半分にあたるが、米国におけるATCデータはセキュリティ上の理由によりない。それらATCデータのない国については、OAG等の時刻表によってフライトデータの補完が行われている。代表航空機種は16種類であり、それぞれに代表エンジンが割り当てられている。エンジンごとの燃料消費・排出物排出データはICAO⁸⁾による。将来予測は2015年をターゲットとして実施されている。

また、欧州委員会AERO2Kプロジェクトにおいて行われた研究¹²⁾においても、民間航空機と軍用機の双方による燃料消費量、NO_x・H₂O・CO₂・CO・HCの各排出量が4次元グリッドとしてまとめられ公開されている。フライトデータにETMSレーダーデータを用いており、より実態に近い分析が行われている。使用機種は85機

種であり、それぞれに代表エンジン種別が割り当てられている。本研究でもエンジン別燃料消費量等のデータとしてICAO⁸⁾が適用されている。分析ツールはANCATと同じくPIANOが用いられている。出力3次元グリッドにおいては、本研究のみ高度が500feetごとである。本研究における将来予測のターゲットは2025年であり、中期的将来予測としては最も遠いものである。

三菱総合研究所¹³⁾は、航空機による排出ガス対策に関する各国の取り組みをレビューするとともに、空港における排出物排出量に着目し、成田・羽田・関西・伊丹の国内主要4空港における排出量の実態を示した。これによると、NO_x・CO₂の排出量が最も多いのは成田空港であり、それぞれ2394.3トン/年、577,775.9トン/年であった。特に航空機の地上滞在時に使用されるAPU (補助電源装置) も分析対象としており、特徴的である。

各研究における分析結果をまとめたものを以下に示す。軍用機も分析対象に含まれる研究については、民間航空機についてのみ示す。なお燃料消費量とともにNO_x排出量が主要な分析対象となっているが、本稿では燃料消費量についてのみ述べる。CO₂排出量は排出指数 (EI: Emission Index) を用いて燃料消費量から計算が可能であり、その値はおおよそ3150-3155g/燃料kgである³¹⁾。

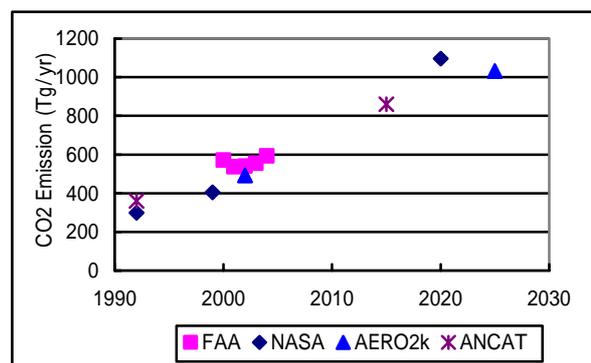


図2. 各年のCO₂排出量

図2に示すとおり、分析対象の相違や経年変化などにより、各研究による算出値には誤差があるものの、各研究による現況のCO₂排出量はおよそ300~590Tg/年である。また中期的将来予測値は、2015年~2025年においておよそ860~1100Tg/年であり、これは年間で約3.2~4.8%の増加に相当する。但し将来予測値は今後の経済状況、技術革新等により大きく変化する可能性がある。

高度別のCO₂排出量分布について、図3に示す。最も排出量が多いのは高度10-13kmであり、次いで地表付近である。この理由としては、高度10-13km付近が標準巡航高度として頻繁に使用されていること、地上におけるタキシングや離着陸といったいわゆるLTOサイクル、あるいは離着陸の順番待ちにより燃料が多く消費されていることが考えられる。

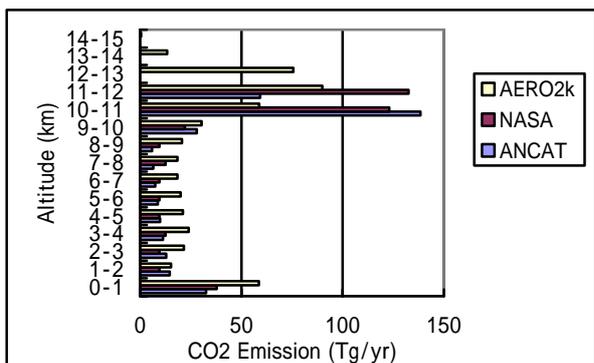


図3．高度別CO2排出量

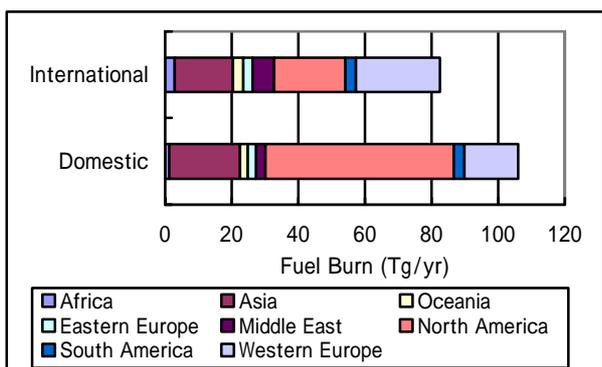


図4．2004年地域別燃料消費量³⁾

地域別の差異について、FAA³⁾による世界の8地域別の燃料消費量を取り上げ図4に示す。これは国内線・国際線それぞれ燃料消費量を各便の出発地に帰した上での算出値である。北米国内線による燃料消費量は国内線全体の約53%を、北米発国際線によるそれは国際線全体の約25%をそれぞれ占め、北米全体の燃料消費量は世界の約41%に達する。次いで西ヨーロッパが約22%、アジアが約21%と続く。この3地域だけで世界全体の84%を占める。

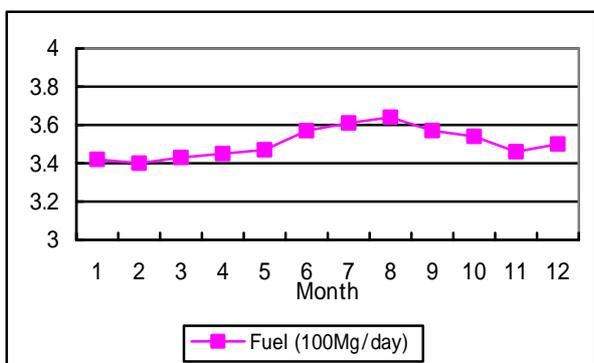


図5．1999年月別燃料消費量⁷⁾

図5にはNASA⁷⁾による月別計算結果を示す。燃料消費のピークは8月にあり、逆に2月において最も減少し、両者の差はおよそ7%である。前述のとおり航空機によ

る燃料消費は北半球に大きく偏っていることから、北半球の国々において夏季に航空輸送需要が増大し、冬季に減少することがこの背景にあるものと考えられる。

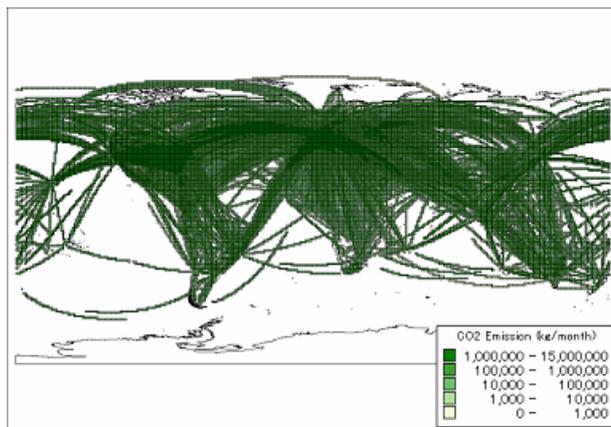


図6．高度10-11kmにおけるCO2排出量分布 (ANCAT¹⁰⁾のデータに基づき作成)

緯度1度・経度1度・高度1kmのグリッドで表現された燃料消費量の算出結果について、ANCAT¹⁰⁾に基づき作成した1992年4月の高度10-11km帯におけるCO2排出量分布を図6に示す。全体として航空便の大半が北半球で運航されており、それによって燃料も北半球で多く消費されていることがこの図からもうかがえる。特に北米、北大西洋横断回廊、西ヨーロッパにおいて燃料消費量が非常に多く、航空輸送およびそれによる燃料消費が特定の地域に集中している現状が視覚的に理解できる。

3．CO2排出量削減の取り組み

第1章および第2章に示した通り、将来の航空CO2排出量の年伸び率は航空輸送量のそれを若干下回る。これは、各研究において将来の技術革新による燃費や空力性能の向上、旧型機の引退と新造機の導入に伴う効率向上を考慮に入れているためである。しかし、これらによる燃料消費量や排出物排出量削減効果には限界がある¹⁴⁾として、その対策について検討している研究もある。Hennigan et al.¹⁴⁾は法的規制の緩和あるいは強化による排出物排出量の変化に関する検討を行っており、またArthur Andersen¹⁵⁾やWit et al.¹⁶⁾は排出権取引を航空に適用することによる効果について検証している。

4．2005年における現況排出量の予備的算出

既往研究における分析をもとに、2005年におけるデータを用いて当年の民間航空CO2排出量の予備的算出を行う。航空機の運航モードをアプローチ・アイドル・離陸・上昇の4段階からなる高度3,000m以下のLTOサイクルとそれ以上の高度における巡航モードに分け、そ

れぞれに対して以下の算出式を適用する。

$$Q = (t_{i,k} \times w_{i,j} \times n_j) \times f \quad (1)$$

Q: CO₂排出量 (g) t: 運航時間 (h)
w: 燃料流量 (燃料g/h) n: エンジン基数
i: 運航モード j: 航空機種 k: 路線
f: CO₂排出係数 (3.15 (CO₂g/燃料g))

このうちi、j、k、n、巡航中のtの特定には2005年度版OAG時刻表を使用した。巡航中のwはBase of Aircraft Data (BADA)¹⁷⁾の最大巡航高度における燃料流量を、LTOサイクル時のwとtはICAOが定める値(アプローチ240秒、アイドル1560秒、離陸45秒、上昇132秒)を用いた。また各エンジンの燃料流量はICAO⁸⁾を参照した。対象はジェット機129種、ターボプロップ機64種、レシプロ機23種の合計216機種である。

以上の手続きにより、2005年における全世界の民間航空CO₂排出量は570Tgと算出された。この値を図3に示す既往研究における算出値と比較すると、2005年のCO₂排出量算出結果は概ね妥当な結果である。

5. おわりに

本稿では、航空による燃料消費量および各排出物排出量の分析に関する主要研究をレビューするとともに、2005年のデータを用いて当年における航空CO₂排出量の予備的算出を行った。今後は、より信頼性の高い中長期将来予測手法を確立するとともに、現況算出や将来予測値に基づく燃料消費量や各排出物排出量削減のための具体的方策の提案が重要課題である。

参考文献

- 1) Airbus Industrie: Global Market Forecast: The Future of Flying 2006-2025. Airbus S.A.S., Blagnac Cedex, France, 2006.
- 2) Boeing: Current Market Outlook 2006. Boeing Commercial Airplanes, Seattle, WA, USA, 2006.
- 3) Kim, B. et al.: System for Assessing Aviation's Global Emissions (SAGE) Version 1.5: Global Aviation Emissions Inventories for 2000 through 2004. FAA-EE-2005-02. FAA Office of Environment and Energy, Washington, DC, USA, 2005.
- 4) Schipper, Y.: Chapter 5: Emissions. In Environmental Costs and Liberalization in European Air Transport. Edward Elgar, Cheltenham, UK, 2001.
- 5) Landau, Z.H. et al.: Jet Aircraft Engine Exhaust

Emissions Database Development – Year 1990 and 2015 Scenarios. NASA/CR-4613. NASA Langley Research Center, Hampton, VA, USA, 1994.

- 6) Baughcum, S.L. et al.: Scheduled Civil Aircraft Emission Inventories for 1992: Database Development and Analysis. NASA/CR-4700. NASA Langley Research Center, Hampton, VA, USA, 1996a.
- 7) Sutkus, D.J. et al.: Scheduled Civil Aircraft Emission Inventories for 1999: Database Development and Analysis. NASA/CR-2001-211216. NASA Langley Research Center, Hampton, VA, USA, 2001.
- 8) ICAO: ICAO Engine Exhaust Emission Databank, 1995.
- 9) Sutkus, D.J. et al.: Commercial Aircraft Emission Scenario for 2020: Database Development and Analysis. NASA/CR-2003-212331. NASA Langley Research Center, Hampton, VA, USA, 2003.
- 10) Baughcum, S.L. et al.: Scheduled Civil Aircraft Emissions Inventories for 1976 and 1984: Database Development and Analysis. NASA/CR-4722. NASA Langley Research Center, Hampton, VA, USA, 1996b.
- 11) Gardner, R.M. (Ed.): ANCAT/EC2 Global Aircraft Emissions Inventories for 1991/92 and 2015. Report by the ECAC/ANCAT and EC Working Group, 1998.
- 12) Evers, C.J. et al.: AERO2k Global Aviation Emissions Inventories for 2002 and 2025. Report to European Commission, QINETIQ, Farnborough, Hampshire, United Kingdom, 2004.
- 13) 三菱総合研究所: 平成11年度空港環境保全対策検討調査報告書, 2000.
- 14) Hennigan, J.F. et al.: Regulatory and Market-Based Mitigation Measures. In Penner, J.E. et al.: Aviation and the Global Atmosphere, Chapter 10. Intergovernmental Panel on Climate Change / Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 1999.
- 15) Arthur Andersen: IATA Emission Trading for Aviation Workstream 3: Key Findings and Conclusions, 2001.
- 16) Wit, R.C.N. et al.: Giving Wings to Emission Trading. CE, Delft, The Netherlands, 2005.
- 17) EUROCONTROL Experimental Centre: Aircraft Performance Summary Tables for the Base of Aircraft Data (BADA), 2004.
- 18) 馬場健太郎: 航空によるCO₂排出量削減に関する研究. 東京工業大学修士論文, 2006.