

定期民間航空によるCO₂排出量の現状と将来予測に関する基礎的研究*

Preliminary Analysis on Current and Future CO₂ Emissions from Scheduled Civil Aviation*

鈴木崇正**・室町泰徳***

By Takamasa SUZUKI**・Yasunori MUROMACHI***

1. はじめに

現在、航空機起源のCO₂排出量は運輸部門におけるその約13%を占めており、自動車に次いで2番目に大きい¹⁾。今後も航空輸送の成長が予想され²⁾、輸送量増加に伴うCO₂排出量増加がさらに進む可能性があることから、航空機からのCO₂排出量を予測し、その削減方法を検討することは環境負荷低減の観点から有意義である。

これまで、特に米国や欧州では、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。各研究における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。各航空便について、発着地や飛行時間等航空機の運航データ、航空機種情報を航空時刻表やレーダー追跡データ等から取得する。その各機種について、単位時間あたりの燃費・排出データを排出量データベースから取得することにより、各フライトの燃料消費量や排出物排出量が算出される。これを世界の全フライトについて積算することで、全世界における燃料消費量や排出物排出量が算出される。

米航空宇宙局(NASA)による研究の先駆けの1つであるLandau et al.⁴⁾は、1990年におけるジェット航空機による燃料消費量およびNO_x・CO・HCの各排出量の算出に加え、超音速旅客機の就航を想定した2015年におけるそれらの排出量予測を実施した。この研究を基礎として、Baughcum et al.⁵⁾は1992年の、Sutkus et al.⁶⁾は1999年の、それぞれ世界の定期民間航空便を対象とした燃料消費量や各排出物排出量の算出を行っている。また、過去や将来予測に関する研究としては、2020年を対象として予測を行ったSutkus et al.⁷⁾、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ったBaughcum et al.⁸⁾がある。

NASA以外においても、FAA¹⁾による2000～2004年を対象とした分析、欧州民間航空協議会・ANCAT/EC2⁹⁾による1991/92年と2015年を対象とした分析、欧州委員会

AERO2Kプロジェクト¹⁰⁾による2002年と2025年を対象とした分析などが行われた。国内では三菱総合研究所¹¹⁾が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ている。

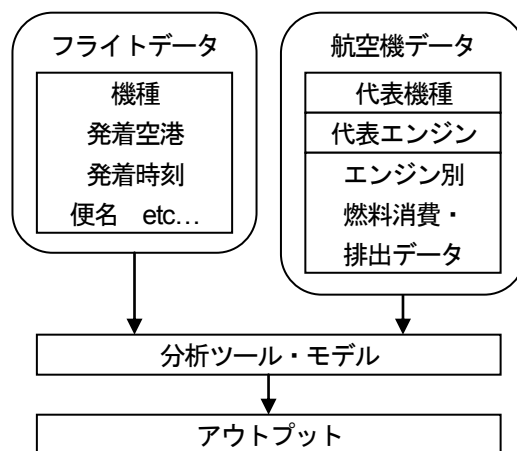


図1. 燃料消費量・排出量算出のスキーム

上述の研究の多くはNO_xやCOを分析対象とし、CO₂を直接分析対象とした研究は少ない。しかし、各研究では燃料消費量が計算されていることから、この値に排出係数(EI: Emission Index, 3.155kg/燃料kg)を乗ずることによってCO₂排出量を求めることが可能である¹⁹⁾。

より長期的な将来予測として、Olsthoorn¹²⁾は2050年を対象としたCO₂排出量の変化を、GDPと燃料価格の推移から予測した。予測に用いたGDPの将来成長シナリオの違いにより、1980年におけるCO₂排出量を100とした場合の2050年におけるその予測値は600から1300まで大きく変化する可能性が指摘されている。またVedantham et al.¹³⁾は、2100年における航空からのCO₂排出量は1990年比でおよそ8倍になると予測した。しかしここでも、分析に用いるシナリオによって結果が大きく左右されることが述べられている。

本稿ではこれら既往研究に基づき、はじめに全世界における定期民間航空機からの2005年のCO₂排出量の現況分析を行う。次に2050年までを対象として、全世界の国内線および国際線の航空需要予測を行うとともに、それに基づいて予測した将来のCO₂排出量を示す。既往研究に対して、個々の国別リンクや航空需要・CO₂排出量の地理的分布を考慮している点が特徴的である。

*キーワード：交通行動分析、公共交通運用、交通流

**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
TEL: 045-924-5606、e-mail:suzuki.t.bb@m.titech.ac.jp)

***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

2. 2005年におけるCO₂排出量の算出

2005年の民間定期航空によるCO₂排出量を算出する。全世界の民間定期航空便を掲載した2005年版OAG時刻表¹⁴⁾に含まれる旅客・貨物フライト全便を対象とし、機種、運航時間、発着地の各フライトデータを抽出した。

図2に示すとおり、各フライトの運航モードを、降下・アイドル・離陸・上昇の4モードからなる高度3,000フィート未満の離着陸サイクルと、それ以上の高度における巡航モードに分割する。離陸滑走以外の地上滞在は全て『アイドル』に含まれる。各モードの所要時間はICAOが定める値(降下240秒、アイドル1560秒、離陸45秒、上昇132秒)とし、時刻表上の所要時間から離着陸サイクル所要時間を減算したものを巡航時間とした。フライト時間が離着陸サイクルの総和32.8分に満たないものは32.8分に切り上げ、巡航時間は0分とした。これらの値は元々ジェット機を対象としたものであり、プロペラ機等においては値が異なる可能性がある。しかし本稿においては、これらの値を一律にすべての航空便に適用した。またフライトの遅延は考慮していない。

OAG収録の2005年に運航された210機種の燃料消費量は、各機種に搭載されているエンジンの単位時間当たり燃料流量データから算出する。ここで、機種によっては複数のエンジン種を採用しているものも存在するが、これらについては航空会社に関係なく、各機種において最も採用数の多いエンジン種をその機種の代表エンジンとした。エンジン別・離着陸時の4運航モード別の1秒当たり燃料流量が記載されているデータベース^{15)・17)}に基づき、この値に搭載エンジン数を乗じたものを各機種の燃料流量とした。また巡航時の燃料流量はEurocontrol¹⁸⁾を用いたが、このデータベースに収録されているエンジン種は本分析におけるそれよりも少ない。そのため、まずEurocontrolに収録されている各エンジンについて、巡航時の燃料流量をその他の3データベースに記載の離陸時の燃料流量と比較したところ、巡航時の燃料流量は離着陸時のその平均約36%であった。このことから、巡航時の燃料流量は離陸時のその36%であると仮定した。また、燃料流量は外気温や気圧、湿度などの影響を受ける可能性があるが、ここでは考慮していない。以上述べた各フライトの燃料流量に基づくCO₂排出量の算出モデルは式(1)の通りである。

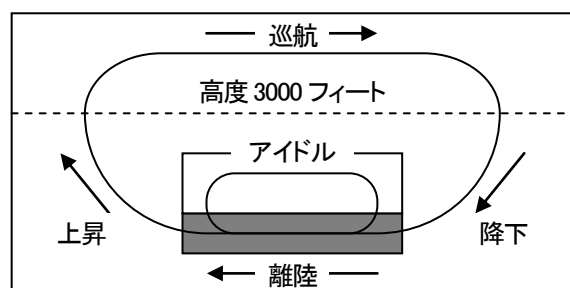


図2. 航空機運航モードの概念図

$$Q = F \cdot \sum (T_m \cdot W_{m,p}) \quad (1)$$

Q: CO₂排出量 (g)

T: 運航時間 (h)

W: 燃料流量 (燃料g/h・機)

m: 運航モード

p: 航空機種

F: CO₂排出係数(3.155 (CO₂g/燃料g))

以上より、2005年における全世界の民間定期航空CO₂排出量は630.3Tgと算出された。この値を既往研究における算出値と比較すると、ほぼ同等な結果が得られている。

3. 2050年までを対象とした将来CO₂排出量予測

次いで、CO₂排出量の将来予測のために、始めに全世界の国内線および国際線における旅客・貨物需要予測を別々に行い、続いてその結果に基づきCO₂排出量予測を行う。基本的なCO₂排出量算出手法は2005年現況算出に用いたものと同一であるが、次の点が異なる。第一に需要予測では国内線と国際線を別々に扱っている点、第二に需要予測は国単位で実施している点である。

OAG時刻表に収録の、2005年の民間定期便就航国・地域数は223であるが、後に述べる人口・GDPデータベースにデータがなかったことから、クリスマス島・ココス諸島・ノーフォーク島はオーストラリアに、マヨットはコモロに統合した。このため予測に用いられたのは合計219ヶ国・地域である。旅客便は全219ヶ国に、貨物搭載可能な旅客便と貨物専用便は214ヶ国に就航している。これ以降、貨物を対象とした将来予測においては旅客機による貨物輸送を含むものとする。民間定期便が就航していない国の大半は、空港設置に十分な国土を有していないか政治的情勢から定期便が就航できていない国であり、将来の定期便就航の可能性も低いと不確実であると考えられることから、将来においても定期便就航国は不変とした。

将来需要予測には各国の人口、GDPの予測データ、各国間の大圏距離を説明変数とする重力モデルを用いた。2050年までの人口予測データはUNPD¹⁹⁾(台湾のみUSCB²⁰⁾)、2005年のGDPデータはUNSD²¹⁾を用いた。また2050年までのGDPは、各国の1990-2005年のGDP成長率が将来も持続すると仮定して算出した。各国間の大圏距離の算出には各国の位置座標が必要であるが、ここでは各国における国際線旅客数が最多の空港の位置座標をその座標とした。多くの国では首都が該当するが、米国はニューヨーク、カナダはトロント、ドイツはフランクフルトなど、首都と一致しない場合も存在する。各航空機種の定員および最大貨物積載量はOAG時刻表に記載のとおりとした上で、旅客搭乗率と貨物積載率の双方とも70%と仮定した。

以下の需要予測は、2010年から2050年まで5年間隔、計9ケースについて行った。需要予測結果は2050年についてのみ示し、CO₂排出量推定結果は全9ケースについて示す。

(1) 国内線需要予測

分析に用いる219ヶ国中、国内線が就航しているのは旅客便が150ヶ国、貨物便が110ヶ国である。本稿では、国内線就航国は将来に渡って不変であるとする。

国内線需要予測は、式(2)に示すモデルに基づいて行う。まず2005年における人口・GDP・距離データを用いてパラメータ推定を行い、次いでそのパラメータを用いて将来需要予測を行う。ここで平均フライト距離とは、各国国内線における総旅客キロ・総貨物トンキロを総旅客数・総貨物トン数で除したものである。また、米国のみ国内線需要が突出しており他国とは異なる需要傾向を示すため、定数項については米国以外と米国の2つの場合を分けるダミーとした上で、米国と他国で同一のモデルが使用できるよう配慮した。

2005年におけるデータをこの式に適用して推定されたパラメータと、算出された2050年国内線輸送量は表1および表2の通りである。人口、GDP、距離の各パラメータはいずれも有意水準5%で有意であった。旅客と貨物の双方において、このモデルは90%以上の説明力を有している。2050年における国内線需要予測においては、2005年からの45年間で約1.6～2.7倍の伸びが示された。

$$Q_y = \exp[\alpha_1 \ln(P_y) + \alpha_2 \ln(G_y) + \alpha_3 D + \alpha_4] \quad (2)$$

Q_y : 対象年 y の旅客数(人)・貨物輸送量(t)

P_y : 各国の対象年 y の総人口(人)

G_y : 各国の対象年 y のGDP(USD/人)

D : 平均フライト距離(km)

y : 対象年

$\alpha_1 \sim \alpha_4$: パラメータ

表1. 国内線需要予測におけるパラメータ推定結果

パラメータ	旅客	(t値)	貨物	(t値)
人口	.636*	9.187	.624*	5.460
GDP	.691*	8.219	.497*	4.032
距離	.002*	3.928	.002*	3.434
定数(米国以外)	-3.376*	-2.520	-5.725*	-2.586
定数(米国)	-2.254	-1.016	-4.668	-1.447
R^2	.987	-	.962	-
観測数	150		110	

*: 有意水準5%で有意

表2. 2050年国内線需要予測結果

予測対象	2005年	2050年	率
旅客(10億人)	1.4	3.5	247.5%
旅客(1兆人km)	1.4	3.8	270.3%
貨物(100万t)	37.3	61.5	165.0%
貨物(10億t-km)	50.0	96.9	193.7%

(2) 国際線需要予測

国際線需要予測の手順を図3に示す。先に述べたとおり、国際線の分析は各航空路線を国対国のリンクに置換して実施する。2005年においては、組み合わせ可能な219x218=47,742通りの国際線リンク(往復を別リンクとして扱う)のうち、旅客ネットワークとして4,684リンク、貨物ネットワークとして4,070リンクが存在している。ここで、OAG時刻表から直接求められる旅客・貨物輸送量は全て各国間の断面輸送量であり、正確な各国間OD交通量を示すものではないことに注意しなければならない。図4に示すとおり、国XY間の断面交通量には国XY間のOD交通量の他に、第3国から、あるいは第3国へのOD交通量も含まれている可能性がある。さらに図中の破線で示すように、それら第3国を発着するODが国XY間リンクを経由しなくても成立する場合、これら第3国を発着し国XY間リンクを経由するODはその全てではなく一部である可能性もある。以上から、国際線の将来需要予測にあたっては各国の社会経済属性や距離データから各国間のOD交通量を求め、さらにそれを踏まえて各国間断面交通量を推定することが必要である。本稿では国際線将来需要予測にあたり、まず任意の2国間に国際線リンクが張られる可能性を推定して、予測対象年における旅客と貨物の国際線ネットワークを構築する。次に各国間のOD交通量を予測し、ダイヤル法²²⁾²³⁾を用いて各リンクに配分する。ダイヤル法はある2点間の交通があるネットワーク内の任意のリンクを経由する確率を計算するものである。こうして求められた各リンク断面交通量を全ての各国間ODペアについて積算し、各国間断面交通量を算出する。なお、2005年時点で存在するリンクは将来にわたって存在するものとする。

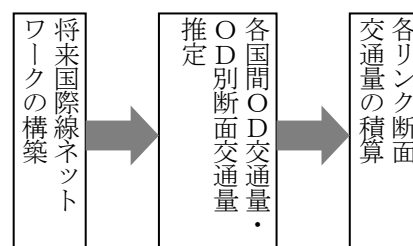


図3. 国際線需要予測の手順

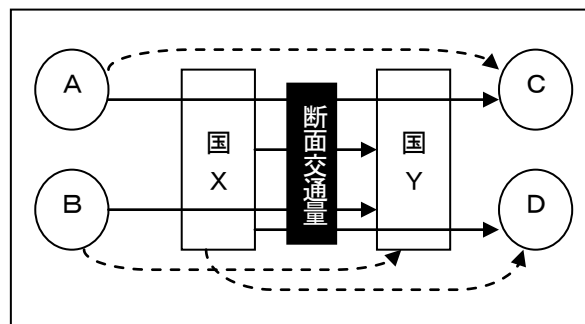


図4. 国XY間断面交通量の概念

任意の2国間にリンクが張られる可能性は式(3)に示すロジットモデルによって算出する。そしてモデルにより判定された2005年におけるリンクの有無と同年の実際のリンクの有無が一致しているリンク数を全リンク数で除した値をリンクの再現率とし、その再現率の最も高い L_{ij} の値を、将来予測においてリンクの張られる確率の閾値とする。説明変数には各国の人口とGDPの予測値、および各国間の距離を用いた。ここで定数項は、総人口が突出して多い中国とインドの影響を明示的に考慮するため、2国の人口合計が10億人未満およびそれ以上を分けるダミーとした。なお、2005年にはリンクが存在しない2国間における将来のリンク出現を考慮していることから、2国間距離はOAGに記載された運航距離ではなく各国の位置座標から球面三角法を使用して算出した。

パラメータ推定結果を表3に示す。このパラメータを用いて2005年航空ネットワークを再現した結果、旅客・貨物ともに $L_{ij}=0.50$ の場合に再現率が最高であり、その値は旅客で90.2%、貨物で92.8%であった。よって将来の各国の社会経済属性予測データを用いて L_{ij} が0.50以上となるリンク、および2005年時点で存在するリンクにより予測対象年における国際線旅客・貨物ネットワークを構築した。2050年におけるリンク数は旅客8,356、貨物7,754である。

$$L_{ij} = \frac{\exp(V)}{\exp(V) + 1} \quad (3)$$

$$V = \beta_1 \ln(P_i P_j) + \beta_2 \ln(G_i G_j) + \beta_3 D_{ij} + \beta_4$$

L_{ij} : 国ij間にリンクが張られる確率

P_i : 国iの人口(人)

G_i : 国iのGDP(USD/人)

D_{ij} : 2国ij間距離(km)

$\beta_1 \sim \beta_4$: パラメータ

表3. 国際線リンク予測におけるパラメータ推定結果

パラメータ	旅客	(t値)	貨物	(t値)
人口	.734*	37.582	.797*	44.241
GDP	.608*	38.120	.680*	38.979
距離	-.590e-03*	-60.682	-.509e-03*	-61.401
定数(10億人以下)	-17.367*	-42.728	-19.709*	-52.262
定数(10億人超)	-17.883*	-37.530	-20.313*	-46.703
初期尤度	33,092.233		31,595.035	
最終尤度	8,890.972		8,353.029	
観測数	4,684		4,070	

*: 有意水準5%で有意

続いて断面交通量予測を行う。国XY間の断面交通量は、任意の2国間のOD交通量にそのOD交通量が国XY間リンクを通過する確率を掛けたものを、全ての2国間ODについて積算したものである。この確率はダイヤル法を用いて算

出した。その際、シータの値は100とした。また各フライトの所要時間(h)は、2005年実績に基づきフライト距離から算出し、さらに搭乗手続き・乗換抵抗として各フライトの所要時間に2時間を加算した。ダイヤル法を用いた各リンク断面交通量算出モデルは式(4)の通りである。このモデルでは2国の人口、GDP、距離から2国間OD交通量とOD別リンク交通量を算出し、それを全2国間ODについて行うことによって各リンクの合計交通量が算出される形式となっている。このモデルおよび2005年実績断面交通量を用いて推定されたパラメータと、推定されたパラメータを使用して算出された2050年国際線旅客・貨物輸送量を表4および表5に示す。2050年における国際線輸送量は、旅客数および貨物トン数ベースで2005年と比べて約11倍、人キロ・トンキロベースで2005年と比べて約16-17倍であった。旅客におけるモデルの説明力が60%を超えた一方、貨物におけるそれは39%と低いものであった。旅客機には貨物搭載スペースも存在し、旅客と同時に貨物の輸送も担っているが、Oster et al.²⁴⁾は、旅客機の運航は旅客流動に最適化されていて、貨物流動を十分に反映していないことを述べている。このことから、旅客と貨物の双方に対して同一のモデルを適用することは、貨物輸送の予測に対して説明力低下の一つの要因になっているものと考えられる。また説明力が比較的低かった別の要因として、空港の厳密な位置を考慮せず1国1ノードとして計算を行ったことが考えられる。この結果、例えば欧米路線では過少に、日米路線では過大に予測がなされている可能性がある。

$$Q_{ij} = \sum_{A, B} C_{ABij} \cdot (P_A P_B)^{\gamma_1} \cdot (G_A G_B)^{\gamma_2} \cdot \exp(\gamma_3 D_{AB}) \cdot \gamma_4 \quad (4)$$

Q_{ij} : 国ij間リンクの断面交通量

C_{ABij} : 国AB間の交通が国ij間リンクを通る確率

P_A, P_B : 国A,Bの人口(人)

G_A, G_B : 国A,BのGDP(USD/人)

D_{AB} : 国A,B間の航空路距離(km)

$\gamma_1 \sim \gamma_4$: パラメータ

表4. 国際線需要予測におけるパラメータ推定結果

パラメータ	旅客	(t値)	貨物	(t値)
人口	.793*	76.318	.816*	22.933
GDP	.760*	49.180	.841*	17.067
距離	-.294e-03*	-57.469	-.773e-04*	-6.447
定数(10億人以下)	.323e-12*	2.295	.234e-15	0.713
定数(10億人超)	.208e-12*	2.286	.249e-15	0.709
R^2	.613		.390	
観測数	4,684		4,070	

*: 有意水準5%で有意

表5. 2050年国際線需要予測結果

予測対象	2005年	2050年	率
旅客 (100万人)	803.5	8942.5	1112.9%
旅客 (1兆人km)	2.2	36.1	1608.6%
貨物 (100万t)	42.5	466.0	1095.9%
貨物 (10億t-km)	175.0	3048.3	1741.7%

(3) CO₂排出量予測

将来のCO₂排出量予測には、以下の4ステップを用いる。まず各国の国内線および各国際線リンクに対し代表機種を割り当てる。次に、先に算出した需要予測値およびその代表機種の旅客定員に基づき、各国内線および国際線リンクにおける航空便数を算出する。さらに、旅客便で運送できる貨物容量より予測された貨物輸送量が大きかった場合、そのリンクに対し貨物専用便を補完的に設定する。以上のプロセスにより、各リンクに割り当てられた機種および便数に基づき、CO₂排出量を算出する。

はじめに各リンクにおける代表機種を選択する。通常、各航空路における航空便は複数の機種で運航されており、その機種選択は航続距離や輸送量などに依存する。しかしここでは計算の簡略化のため、将来にわたって使用される航空機種を7機種選出し、そのうちのいずれかの機種が各リンクにおいて代表機種として使用されると仮定した。選出された7機種はA380-800、B777-300ER、A340-300、A321-100、B737-700、ERJ-170およびB747-400Fである²⁵⁾²⁷⁾。これらのうち貨物専用機であるB747-400F以外は旅客および貨物の双方を輸送することが可能である。これらの機種の選出基準はキャパシティおよび航続距離が互いに異なっていること、一般的に使用されている機種であること、比較的新しい機種であり現在も生産が続いていることである。各リンクにおける代表機種の選択にあたっては、各リンクの平均フライト距離から機種を推定し、そのリンクにおける代表機種とした。

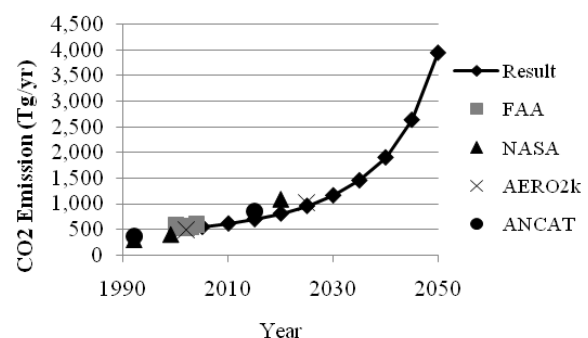
次に、選出された各リンクの代表機種の定員に旅客平均搭乗率の0.7を乗じ、1便あたりの輸送力を算出する。この値で各リンクの予測旅客輸送量を除することにより、各リンクにおける予測便数が計算される。生じた端数は切り上げる。

これまでは旅客について注目したが、各リンクには貨物輸送も存在する。まず先に指定した各代表機種の最大貨物積載量に積載率0.7を乗じ、1便あたりの貨物輸送力を求める。この量に先ほどの予測便数を乗じたものが各リンクにおける予測貨物輸送力であり、この値が各リンクの予測貨物需要を上回っていれば、貨物は全て旅客とともに輸送できるものとみなす。一方輸送力が輸送量を下回っている場合には、上記予測便数のみでは輸送できない貨物が発生することになる。この場合、輸送力を超過した貨物を輸送できる分だけ貨物専用便を設定する。貨物専用便は全てB747-400Fが用いられるものとし、その貨物積載率は最大積載量

の0.7倍であるとして貨物専用便の便数予測を行った。

最後のステップとして、これまでに予測してきた各リンクにおける機種および便数から、式(1)(4)を用いて将来のCO₂排出量を算出する。ここで、将来の燃費改善を考慮しなければならない。Balashov et al.²⁸⁾は、2010年までの航空燃費の改善率は年間2.5%であると予測し、Greene²⁹⁾も、同じ期間における改善率は年間1.3%であると述べている。本稿では、2050年までの全ての年にわたってGreeneによる燃費改善率を適用した。最終的に求められた2050年までのCO₂排出量予測値を、既往研究による値とともに図5に示す。2050年における全世界の航空からのCO₂排出総量予測値は3944.2Tgであった。この値は2005年からの45年間で6.3倍の伸びに相当する。特に国内線が1.5倍であったのに対し国際線は8.9倍であり、全体に占める国際線の割合も2005年における65%から2050年の92%に増加している。2025年までの予測値については、本稿における算出結果は既往研究におけるそれより若干低く、2015年においてANCAT⁹⁾より20%、2025年においてAERO2k¹⁰⁾より8%、それぞれ小さい値となった。この理由として、将来の使用機種を新鋭の7機種に限定したことや、2国間の最短の大圏距離をフライト距離として用いたことなどが考えられる。また、先述のとおり実際には旅客便の運航は貨物輸送には必ずしも最適化されていない一方で、本分析では旅客機で最大限貨物輸送が行われていると仮定しており、実際より輸送効率を過大評価している可能性があることもその理由であると考えられる。

以上の予測は45年もの長期を対象にしたものであり、かつ将来の人口とGDPが別々に予測されていることから、この予測における不確実性は比較的大きいものと考えられる。そこで将来の人口とGDPの予測値の変化によるCO₂排出量予測値の変化を確認するため、感度分析を行った。将来の人口予測値を10%増減させた結果、CO₂排出量の予測値は2030年において約14%、2050年において約16%、それぞれ増減した。また、GDPを10%増減させた場合のCO₂排出量予測値の増減幅は、人口におけるそれとほぼ同等であった。このことから、将来予測に用いる人口やGDPのシナリオの違いにより、CO₂排出量の将来予測値に大きな差が生じる可能性が示されたと言える。

図5. CO₂排出量の将来予測値

4. CO₂排出量の地理的考察

2005年におけるCO₂排出量の現状と2050年における排出量予測値の地理的分布をそれぞれ図6、図7に示す。これらの図は、算出されたCO₂排出量を緯度1度・経度1度のグリッドごとに配分したものである。2005年では、航空からのCO₂排出量は北米、ヨーロッパ、東および東南アジアに集中している。また大西洋横断航空路およびユーラシア大陸横断航空路における排出量も多い。その一方で中南米やアフリカ、オセアニアなどではCO₂排出量は比較的少ない。これらの地域では航空による旅客・貨物輸送量が少ないことから、航空機の使用も希薄であることが推察される。

2050年におけるCO₂排出量分布は、2005年におけるそれとは大きく異なる。まず、図7で示したように2050年におけるCO₂排出量は2005年と比較して大幅に伸びている。全体としてCO₂排出量が多い地域が著しく増加し、排出量が100,000kg/日を超えるようなグリッドも2005年の2,778グリッドから12,446グリッドへと約4.5倍となった。これら排出量が特に多い地域はこれまでの北米やヨーロッパ等にとどまらず、アジアやアフリカにも集中している。将来における航空需要の伸びやそれに伴うCO₂排出量の増加が、特定の地域に限られたものではなく全世界的な傾向として広まる可能性があることが示唆される。

図8には、2005年から2050年までのグリッドごとのCO₂排出量の変化を示す。欧米のみならずアジアやアフリカなどにおける排出量の増加が顕著であり、2005年から2050年までの間に中国で28倍、インドで14倍、ナイジェリアで11倍の伸びであった。一方日本と米国は2.7倍であった。特にアフリカでは、急激な人口の増加と途上国における経済水準の向上により、将来大幅に航空需要が増加すると予測されている。また、これまで距離が長く国際便が就航していなかった2国間においても、人口増加やGDP上昇とともに航空路で結ばれると予測されるケースがみられる。例えばアジアと南米とを結ぶ航空路がそれに該当する。これらの路線では、技術向上とともに航続距離のより長い航空機が生産されることにより、2国間を直接飛行する航空便が実現するものと考えられる。

アジアにおけるCO₂排出量増加の主要因の1つが、中国とインドにおける急速な経済成長である。この2国では将来にわたって大幅な経済成長が見込まれているほか、人口についても中国で1億人が、インドでは5億人が今後45年間で増加するものと予測されている。この2国を含め、人口の多いアジア国家における経済成長がさらなる旅客・貨物需要をもたらし、結果としてCO₂排出量を増加させる大きな要因になるものと考えられる。

以上の点から、次のことが指摘できる。第一に、年間1.3%の燃費向上を考慮しても、2050年までに6倍ものCO₂排出量増加が予測される。人口増加も今後数十年にわたっ

て継続すると予測されている^{19,20}ことから、例えば高速鉄道など航空機に対抗しうる交通機関の導入など、CO₂排出量を抑制する強い方策が不可欠である。第二に、特に途上国において将来のCO₂排出量増加が顕著である。これらの国々では燃費効率の悪い古い機材を現在でも使用しているケースが多いと考えられることから、より効率的な新しい機材への更新が排出量抑制に効果的であると考えられる。また、将来の輸送量増加に対応し、平均搭乗率や貨物積載率を向上させ輸送効率を改善することも必要である。

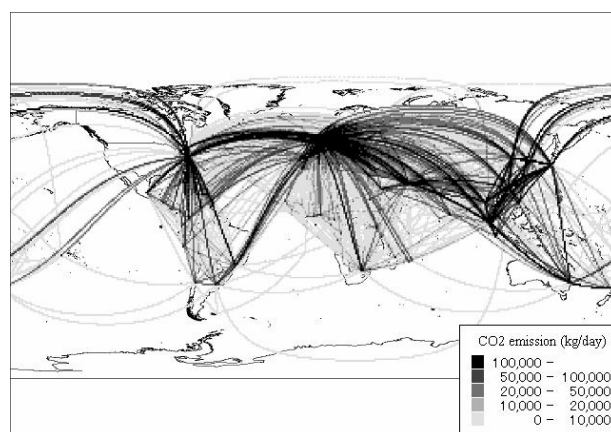


図 6. 2005 年における CO₂ 排出量分布

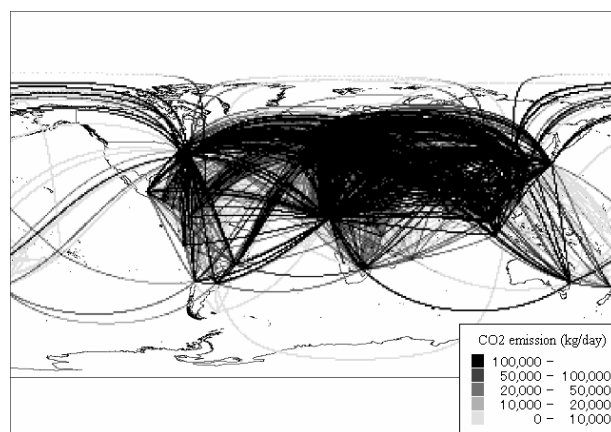


図 7. 2050 年における CO₂ 排出量分布

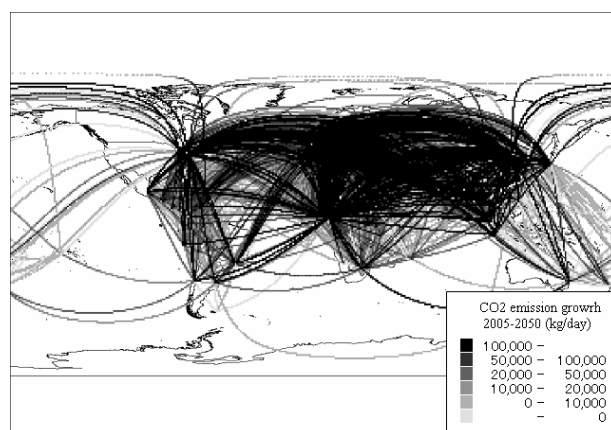


図 8. 2005 年から 2050 年までの CO₂ 排出量変化

5. おわりに

本稿では、2005年における航空によるCO₂排出量を算出するとともに、2050年までの将来における航空需要予測、およびその結果に基づくCO₂排出量の予測を行った。その結果、航空からのCO₂排出量は2005年で630.3Tg、2050年で3944.2Tgであると予測された。地理的分析においては、特にアジアやアフリカにおける将来のCO₂排出量の著しい伸びが示唆された。

今回の分析では、旅客と貨物に同一のモデルを適用しているが、貨物におけるパラメータの妥当性が旅客におけるそれと比して小さいものであった。前述のとおり、航空機の運用は旅客流動に最適化されていることが多く、貨物流動を十分に反映していない可能性が考えられることから、特に貨物輸送についてより妥当性の高いモデルの導入の検討が必要である。また、将来の人口やGDPの異なる予測シナリオを排出量予測に用いることによって、異なる排出量予測結果が示される可能性がある。特に、GDP成長率に関して今後45年間にわたって過去の伸び率と同一であるという仮定は、将来の経済構造・成長の変化等を考慮に入れて見直さなければならない。さらに、今後は新技術の導入等によって航空機の経済性は向上し、CO₂排出量原単位は削減されることが期待されている。技術向上に伴う燃費改善等についても予測に含めることが、より正確なCO₂排出量の将来予測には不可欠である。また、本研究で示したモデルの妥当性検証のために、過去の航空時刻表等に表示された需要と本モデルによる予測需要との照合が有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) Airbus Industrie: Global Market Forecast: The Future of Flying 2006-2025. Airbus S.A.S., Blagnac Cedex, France, 2006.
- 3) Boeing: Current Market Outlook 2006. Boeing Commercial Airplanes, Seattle, WA, USA, 2006.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) Evers, C.J. et al.: AERO2k Global Aviation Emissions Inventories for 2002 and 2025. Report to European Commission, QINETIQ, Farnborough, Hampshire, United Kingdom, 2004.
- 11) 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.
- 12) Olsthoorn, X.: Carbon dioxide emissions from international aviation: 1950-2050, Journal of Air Transport Management, Vol. 7, pp. 87-93, 2001.
- 13) Vedantham, A. and Oppenheimer, M.: Long-term scenarios for aviation: Demand and Emissions of CO₂ and NO_x, Energy Policy, Vol 26, No. 8, pp. 625-641, 1998.
- 14) Official Airline Guide: OAG Worldwide Timetable, 2005.
- 15) ICAO: ICAO Engine Exhaust Emission Databank, 1995.
- 16) Swedish Defense Research Agency (FOI): Confidential Database for Turboprop Engine Emissions, 2007.
- 17) Swiss Federal Office of Civil Aviation (FOCA): Aircraft Piston Engine Emissions Data, 2007.
- 18) Eurocontrol Experimental Centre: Aircraft Performance Summary Tables for the Base of Aircraft Data, 2004.
- 19) UN Population Division: Annual Estimates and Projections, 2007.
- 20) US Census Bureau: International Data Base, 2006.
- 21) UN Statistics Division: National Accounts Main Aggregates, 2007.
- 22) Dial, R.B.: A probabilistic multipath traffic assignment model which obviates path enumeration, Transportation Research, Vol. 5, No. 2, pp. 83-113, 1971.
- 23) Sheffi, Y.: Transportation Networks. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1985.
- 24) Oster, Jr., C.V. and Miles-Mclean, R.: Air cargo: Impacts of adapting to deregulation, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No.

- 1147, pp. 25-33, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC, USA, 1987.
- 25) Airbus S.A.S.: Aircraft Families. www.airbus.com/en/aircraftfamilies/. Accessed Jul. 31, 2008.
- 26) Boeing: Commercial Airplane Products. www.boeing.com/commercial/products.html. Accessed Jul.31, 2008.
- 27) Embraer: Embraer Commercial Jets. www.embraercommercialjets.com/english/content/hme_ejets/. Accessed Jul. 31, 2008.
- 28) Balashov, B. and Smith, A.: ICAO analyses trends in fuel consumption by world's airlines, ICAO Journal, Vol. 47, No.8, pp. 18–21, 1992.
- 29) Greene, D.I.: Energy-efficiency improvement potential of commercial aircraft, Annual Review of Energy and the Environment, Vol. 17, pp. 537–574, 1992.

定期民間航空によるCO₂排出の現状と将来予測に関する基礎的研究*

鈴木崇正**・室町泰徳***

本研究では、航空機からのCO₂排出量削減研究に資する基礎的分析として、2005年における定期民間航空機からのCO₂排出量の算出を行うとともに、2050年までを対象とした将来のCO₂排出量の予測を行った。分析の結果、2050年までの45年間でCO₂排出量がおおよそ6.3倍になることが示された。CO₂排出量の地理的分布の考察では、現在ではヨーロッパや北米における排出の集中が確認されたが、将来にわたっては特にアジアやアフリカなどにおける急速な航空需要の高まりに伴うCO₂排出量の著しい増加が示唆された。

Preliminary Analysis on Current and Future CO₂ Emissions from Scheduled Civil Aviation*

By Takamasa SUZUKI**・Yasunori MUROMACHI***

We first calculate the total CO₂ emission from scheduled civil aviation in 2005 and then the future forecast of CO₂ emission for every five years towards 2050 is conducted. The estimation of future traffic is followed by the calculation of the future CO₂ emission. The estimated total CO₂ emission in 2005 and 2050 is 630.3 Tg and 3944.2 Tg respectively. The distribution of CO₂ emission is discussed from the geographical perspective. The current CO₂ emission is concentrated in North America, Europe, and Asia; however, a significant increase in CO₂ emission is expected in Asia and Africa.
