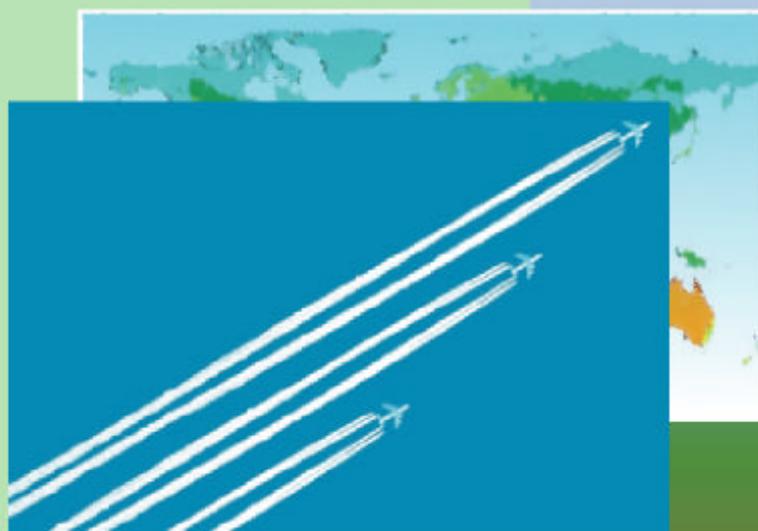




INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE



IPCC 特別報告書

航空機と地球大気

政策担当者向けサマリー

政策担当者向けサマリー

航空機と地球大気

編集責任者

ミシガン大学、Joyce E. Penner 国防研究・評価庁、David H. Lister

英国気象庁、David J. Griggs 大学共同大気研究、David J. Dokken

デュポンフッ化製品、Mack McFarland

IPCC 作業部会 I と の特別報告書

協力

オゾン層破壊物質に関するモントリオール議定書・科学評価パネル

気候変動に関する政府間パネル向け

目次

まえがき

序

1．はじめに

2．航空機が気候やオゾン層に与える影響

3．航空機排出の今後の増加予測

4．亜音速航空機が、放射強制力や紫外線放射へ与える影響の現状と将来

4．1 二酸化炭素

4．2 オゾン

4．3 メタン

4．4 水蒸気

4．5 飛行機雲

4．6 絹雲

4．7 硫酸塩とすすのエアロゾル

4．8 亜音速航空機が気候に与える全般的な影響

4．9 亜音速航空機が紫外線放射（UV-B）に与える全般的な影響

5．超音速航空機が、放射強制力・紫外線放射に与える影響の現状と将来

6．排出と影響を削減するためのオプション

6．1 航空機とエンジン技術のオプション

6．2 燃料のオプション

6．3 運行上のオプション

6．4 規制上のオプション、経済オプション、その他のオプション

7．将来の課題

まえがき

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)は、世界気象機関(WMO)と国連環境計画(UNEP)が、1988年に共同で設立した機関であり、その目的は：(i)気候変動の緩和・適応オプションの影響や経済性、および気候変動に関し利用可能な情報の科学的な評価、(ii)要請に基づき、国連気候変動枠組条約(UNFCCC)の締約国会議(COP)に科学的、技術的、社会経済的助言を提供、である。IPCCは設立以降、一連の評価報告書、特別報告書、技術報告書、方法論その他の報告書をまとめてきており、これらは、広く政策立案者や科学者、その他、専門家の標準参考書となっている。

本特別報告書は、国際民間航空機関(ICAO)とオゾン層破壊物質に関するモントリオール議定書締約国からの要請を受けて、作成されたものである。亜音速飛行機と超音速飛行機の両方に関して、大気の科学、航空技術、緩和オプションに伴う社会経済的な問題が、どれだけ理解されているかを、評価し、報告している。航空機輸送が、成層圏でのオゾン破壊や地球規模気候変動に与えた影響、および将来の影響可能性についても、取り上げている。しかし局地的な航空機の環境影響は、考察の対象としていない。本報告書では、将来的な影響を緩和するオプションにどのようなものがあるか、またその特性が、どのようなものかを考え、その結果を取りまとめている。

通常のIPCC報告書と同じく、この報告書でも、その作成を成功させるには、世界中の関連しつつも異なる専門分野をもった専門家による熱意と協力にかかるところが、何よりも大きい。

われわれは、全ての協調的代表執筆者、代表執筆者、寄稿執筆者、査読編集者、および専門査読者に謝意を表したい。これらの人々は、この報告書作成のために非常に多くの時間と努力を払われたのであり、我々は、IPCCのプロセスに対するこれらの方々の献身に大変感謝している。

また次の専門家の方々にも心よりの感謝を伝えたい。

- IPCC議長でありモントリオール議定書科学的評価パネルの共同議長である Robert Watson
- IPCC作業部会IとIIIの共同議長である、John Houghton, Ding Yihui, Bert Metz, Ogunlade Davidson
- モントリオール議定書科学的評価パネルの共同議長である Daniel Albritton
- この特別報告書コーディネーターの David Lister, Joyce Penner

- この特別報告書の科学的スティアリング委員会の Daniel Albritton, John Crayston, Ogunlade Davidson, David Griggs, Neil Harris, John Houghton, Mack McFarland, Bert Metz, Nelson Sabogal, N. Sundararaman, Robert Watson, Howard Wesoky
- David Griggs, David Dokken, を始めたとした作業部会 I および II のテクニカル・サポート・ユニットで、Mack McFarland, Richard Moss, Anne Murrill, Sandy MacCracken, Maria Noguer, Laura Van Wie McGrory, Neil Leary, Paul van der Linden, Flo Ormond, Neil Harris を含む、協力者
- IPCC の事務局長の N. Sundararaman とそのスタッフ、Rudies Bourgeois, Cecilia Tanikie, Chantal Etori

G.O.P.Obasi
世界気象機関事務総長

K. Tüpfel
国連環境計画専務理事
ナイロビ国連オフィス事務所長

序

IPCC は、国際民間航空機関(ICAO)より、航空機エンジンからの温室効果ガス排出影響の評価を要請されたのを受けて、モントリオール議定書の科学的評価パネルと協力し、特別報告書「航空機と地球大気」を作成することを、IPCC 第 12 回セッション(1996 年 9 月 11 - 13 日、メキシコシティ)で、決定した。当初は IPCC 作業部会 I と II が共同で作成の責務に当たっていたが、作業部会の担当範囲条件が変更(IPCC 第 13 回セッション、1997 年 9 月 25 - 28 日、モルディブ)されたことから、IPCC 作業部会 I と III に作成責任を移し、運営のサポート責任は、作業部会 I と II のテクニカルサポートユニットに残された。

動力つきの飛行機が初めて飛行してから、まだ 100 年もたっていないが、航空機輸送産業は、急速に成長しており、現代社会に欠かすことのできない重要な要素となっている。政策による干渉がない限り、この部門はこれからも成長し続ける可能性が高い。このため、航空機エンジンからの排出が、現在の大気にどのような影響を与えており、また、将来どの程度の影響をおよぼす可能性があるかを検討することは、非常に有意義である。この報告書のユニークな点は、大気研究の科学者のほかに、航空会社や機体およびエンジンの製造会社などの航空機産業企業から、技術専門家の本格的な参画を得たことである。このことこそ、この報告書が、これまでで最も総合的な地球大気への航空機輸送の影響に関する評価報告書と自負できるものとなる上で、欠かせないことであった。この特別報告書のように、産業部門の中の一分野を取り上げた報告書を作成したのは、IPCC として初めてであるが、他の分野も、同じように報告書を作成する価値がある。

この報告書では、大気圏の上部で、航空機から排出される全てのガスおよび粒子について考察しており、こういったガスや粒子が、大気の化学的組成を変えたり、飛行機雲や絹雲の形成を促したりする上で果たす役割についても検討している。その上で、報告書は、(a) 大気の放射強制力が、どのように変化するのか、それが気候変動へと結びつく可能性があるか、(b) オゾン層はどのように変化するのか、それにより地表に到達する紫外線に変化があるのかを検討している。また、航空機技術や、航空機の運航、規制、経済の枠組でおこる変化により、将来の排出がどのような影響を受けるかも調べている。ただしこの報告書では、エンジンからの排出が、地表近くの局地的な大気の質に与える影響については扱っていない。

この特別報告書の目的は、航空輸送産業や専門家、そして政策立案者のために、正確で、偏りのない、政策関連情報を提供することである。報告書は、現在の知見を説明するとともに、どの分野の理解が不十分であり、このためさらなる研究を早急にすすめる必要があるかを特定している。この報告書自体は、IPCC の慣習にしたがい、政策提案を行ったり、

望ましい政策を示唆することはしないものとする。

この報告書は、18ヶ国107名の代表執筆者がまとめたものである。報告書の原稿は、作成されるごとに、専門家査読のため配布され、続いて各国政府と専門家による査読がおこなわれた。100名以上の寄稿執筆者からは、原稿用の文書や情報が、代表執筆者に提供され、150名以上の査読者からは、査読プロセスを通して、価値のある内容改善が提案された。受理したコメントは全て、慎重に分析され、1999年4月12-14日にコスタリカのサンホセで開催されたIPCC作業部会IとIIIの合同会議で検討された上で改正版に組み入れられた。検討作業では、政策担当者向けサマリーを、詳細にわたり採択し、その基と成っている報告書を承認した。

われわれは、報告書のコーディネーターを務めた David Lister と Joyce Penner に心よりの感謝を述べたい。また、その専門知識、勤勉さ、忍耐力で、この報告書の成功を確かなものとした、調整役代表執筆者、代表執筆者、査読編集者の全員にも、感謝申し上げたい。さらに、貴重な熱意と労力を、惜しみなくささげられた、多数の寄稿者、査読者にも感謝の意を表したい。報告書の作成作業を通して、賢明なる助言と指導をされたスティアリング委員会に感謝する。また次の方々にも感謝する。

- ・報告書の最初のスコーピング会議（概観会議）と最終稿会議を主催し、政策担当者向けサマリーをアラビア語、中国語、フランス語、ロシア語、スペイン語に翻訳した ICAO（ICAO は必要な技術的インプットも提供した）
- ・最初の草稿会議を主催したトリニダードトバゴ国政府
- ・第2回草稿会議を主催した国際航空輸送協会（IATA）
- ・政策担当者向けサマリーを行ごとに採択し、その基となった評価報告の承認を行った、IPCC 作業部会IとIIの合同セッション（1999年4月12日から14日にサンホセで）を主催したコスタリカ政府

特に、ICAO の John Crayston、トリニダードトバゴ政府の Steve Pollonais、IATA の Leonie Dobbie、コスタリカ政府の Marx Campos には、こういった会議のアレンジに大きな負担を引き受けられたことに感謝する。

また作業部会Iテクニカルサポートユニットの Anne Murrill、作業部会IIテクニカルサポートユニットの Sandy MacCracken にも、この報告書の作成を通し、明るいユーモアで疲れを知らないサポートをしてこられたことに感謝する。このほか、Richard Moss, Mack McFarland, Maria Noguera, Laura Van Wie McGrory, Neil Leary, Paul van der Linden, Flo Ormond を含め、作業部会IとIIのテクニカルサポートユニットのメンバーには、多くの支

援をいただいた。IPCC事務局の Rudie Bourgeois, Cecilia Tanikie, Chantal Ettori にも、全ての政府窓口や、途上国および経済移行国の専門家の旅行に対し、ロジスティックな面でのサポートをいただいた。

Robert Watson、IPCC 議長

John Houghton、IPCC 作業部会 I 共同議長

Ding Yihui、IPCC 作業部会 I 共同議長

Bert Metz、IPCC 作業部会 III 共同議長

Ogunlade Davidson、IPCC 作業部会 I 共同議長

N.Sundararaman、IPCC 書記

David Griggs、IPCC 作業部会 I - TSU

David Dokken、IPCC 作業部会 II - TSU

政策担当者向けサマリー

航空機と地球大気

気候変動に関する政府間パネル・作業部会 I と II の特別報告書

このサマリーは、IPCC作業部会 I と II の合同セッション（1999年4月12-14日、コスタリカのサンホセにて開催）で、その詳細の承認を受けたものであり、航空機と地球大気についての現在の理解に関する、IPCCの正式合意内容を示している。

下記執筆者が作成した原稿をベースにしている：

David H. Lister, Joyce E. Penner, David J. Griggs, John T. Houghton, Daniel L. Albritton, John Begin, Gerard Bekebrede, John Crayston, Ogunralde Davidson, Richard G. Derwent, David J. Dokken, Julie Ellis, David W. Fahey, John E. Frederick, Randall Friedl, Nail Harris, Stephen C. Henderson, John F. Hennigan, Ivar Isaksen, Charles H. Jackman, Jerry Leis, Mack McFarland, Bert Metx, John Montgomeru, Richard W. Neidzwiecki, Michael Prather, Keith R. Ryan, Nelson Subogal, Robert Sausen, Ulrich Schumann, Hugh J. Somerville, N. Sundararaman, Ding Yihui, Upali K. Wickrama, Howard L. Wesoky

1. はじめに

この報告書は、航空機が気候と大気中オゾンに与える影響を評価するものであり、IPCCの報告書としては初めて、特定の産業部門を対象としている。この報告書は、IPCCが、国際民間航空機関（ICAO¹）の要請に応える形で、オゾン層破壊物質に関するモントリオール議定書の科学的評価パネルと協力し、航空機からの排出ガスの潜在的な影響についてまとめたものである。航空機からの排出ガスは、大気の大気圏上層部および成層圏下部に直接堆積される人為的排出としては、最も大きな影響を与えるものである。

航空機輸送は、世界経済の発展とともに、急速に成長してきた。旅客輸送（旅行者一人1kmあたりの収入²で表す）の伸び率は、1960年以後、年率9%近くと、国内総生産（GDP）の平均伸び率の2.4倍を示している。航空機貨物輸送の約80%は、旅客用航空機を使って輸送されているが、全体の輸送量も、同じ期間に増加している。航空機輸送産業自体の成熟化とともに、旅客輸送の伸び率は下がっており、1997年以後は年率5%に減速している。しかし、航空機による排出ガスの総量は増加しており、これは、技術改良や運航管理方法の改善を継続して行うことによる比例排出³の削減を、航空機輸送の需要の伸びが上回っているからである。需要に歯止めがかからない限り、この報告書で扱う評価期間中の旅客輸送は、GDPの伸びを越える勢いで成長すると見られる。

この報告書では、現在の航空機輸送がもたらす影響と、航空機輸送（旅客、貨物、軍事を含めた）の増加予測に制約がかからない場合の影響範囲について研究している。第2世代の超音速商業用航空機による影響可能性も含まれている。また、この報告書では、現在の航空機技術、運航管理方法や、地球大気に対する航空機の将来の影響緩和オプションにも触れている。ただし、この報告書では、航空機エンジンからの排出による局地的な環境影響や、空港での地上輸送の消費エネルギーなど航空輸送の運航に関する間接的な環境影響については、考察していない。

2. 航空機が気候やオゾン層に与える影響

航空機は、対流圏上層と成層圏下層にガスや微粒子を直接排出し、大気の組成に影響を与える。こういったガスや微粒子は、二酸化炭素（CO₂）、オゾン（O₃）、メタン（CH₄）といった大気中の温室効果ガスの濃度を変える。また、航空機雲形成の引き金となったり、

¹ ICAOは、環境保護の面を含めた国際民間航空の各分野での、グローバルな基準設定や、実施要項の推奨、指針作成などを担当する国連の特殊機関である。

² 旅客一人あたりの収入は、商業用航空機輸送で、その交通量の目安となっている値である。一人の旅客を1km運ぶごとに得られる収入で表される。

³ 比例排出とは、一人あたりの収入/kmのような交通単位当たりの排出量である。

絹雲を増大させる可能性があり、これら全てが気候変動に影響する。(ボックスー 1 参照)

航空機からの主要排出物質には、温室効果ガスである二酸化炭素や水蒸気 (H_2O) が含まれており、その他に、一酸化窒素、二酸化窒素 (両方をあわせて窒素酸化物 NO_x とよぶ)、硫黄酸化物 (SO_x)、すすがある。この報告書で評価に用いる重要なパラメータの中で、比較的數字がはっきりしているものは、航空燃料の総燃焼量、航空機からの二酸化炭素、 NO_x 、および水蒸気の総排出量である。

航空機輸送の結果として排出または生成されるガスや微粒子が、気候におよぼす影響は、排出そのものよりも数値化するのが難しい。しかし、相互を比較することは可能であり、また放射強制力⁴の理念を用いるなら、他の部門の気候影響と比較することも可能である。二酸化炭素は、大気中での滞留時間が長く (100 年)、大気全体で混ざり合うことから、航空機からの二酸化炭素の排出を、他の排出源から排出された同量の二酸化炭素と区別することはできない。他の気体 (例、 NO_x 、 SO_x 、水蒸気) と微粒子は、大気中の滞留時間が短く、主に北半球中緯度上空の航空路付近に濃縮されたままとなっている。こういった排出は、地球規模に混ざりあう排出気体 (例、二酸化炭素、メタン) とは異なり、一部の気候構成成分 (例、オゾンや飛行機雲) による、航空路付近の局地的な放射強制力発生につながる可能性がある。

気候変動の地球平均は、放射強制力の地球平均でかなり良く表すことができ、たとえば、地球平均気温や海面水準の上昇に対する航空機輸送の寄与度なども、これで示すことができる。しかし、放射強制力に対する航空機輸送の影響の大半は、北半球の中緯度に位置していることから、局地的な気象システムの反応は、放射強制力の地球平均から生じるものと、異なる可能性がある。航空機が、局地的な気象に与える影響は重要かもしれないが、この報告書での評価には含まれていない。

オゾンは、温室効果ガスである。と同時に、地球表面を有害な紫外線放射から保護する物質でもあり、また、一般的な大気汚染物質でもある。航空機から排出される NO_x は、オゾンの化学反応に関係する。亜音速の航空機は、対流圏上層部や成層圏下部を飛行するが (高度 9~13km)、超音速飛行機は、それよりも上層の成層圏内 (高度 17~20km) を、巡航する。対流圏上層や成層圏下部では、オゾンは NO_x の増加に伴い増加する一方で、メタンの増加に伴って減少すると考えられる。より高い高度では、 NO_x の増加は、成層圏のオゾン層の減衰につながる。これらの層での、オゾン前駆体 (NO_x) の滞留時間は、高度が高く

⁴ 放射強制力とは、可能性のある気候変動メカニズムがどれだけの重要性をもっているかを測る目安である。地球大気システムのエネルギーバランスの変動や変化を、1平方メートル当たりのワット数 (Wm^{-2}) で表している。放射強制力が正の値であることは、実質的な温暖化を意味し、負の値であれば、寒冷化を意味する。

なるにつれて長くなる。このため、航空機によるオゾンの変動は、 NO_x の排出が行われる高度によって異なり、また対流圏では局地的に、成層圏では地球規模で変化する。

ボックスー 1 気候変動の科学

1995年に刊行されたIPCC第二次評価報告書の作業部会 政策担当者向けサマリーでは、その主な結論の一部として、次のような、気候変動に対する全ての人為的排出の影響に関するものが示されている。

- ・産業革命前以来の温室効果ガスの濃度上昇は、気候に対し正の放射強制力を生じ、地球表面を暖める傾向があると同時に、他の気候変動ももたらす。
- ・温室効果ガスの中でも、二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素(N_2O)の大気濃度は、かなり上昇しており、それぞれ、30%、145%、15% (1992年の値)の増率となっている。こういった傾向は、主に、化石燃料の使用、土地利用の変化、農業などの人間活動に起因している。
- ・温室効果ガスの多くは長期にわたり大気中に滞留する(二酸化炭素や亜酸化窒素では、数十年から何世紀にもおよぶ)。このため、二酸化炭素の排出が、ほぼ現在(1994年)に近い水準で推移したとすると、少なくとも2世紀にわたって大気中濃度が、ほぼ一定の割合で増加し、21世紀の終わりには550ppmv(産業革命前の280ppmvのほぼ二倍)に達する。
- ・化石燃料の燃焼や、バイオマスの燃焼などで発生する対流圏内のエアロゾルは、負の放射強制力をもたらし、気象パターンにも、特定の地域や準大陸地域で多少偏りはあるが、大陸規模とか半球規模で影響を与える。滞留時間の長い温室効果ガスとは対照的に、人為的なエアロゾルの大気滞留時間は極めて短く、このため、その排出の増減は、速やかに放射強制力に反映する。
- ・現在までの気象観測データでは、地球規模気候システムに人間活動が与える影響を定量化するには、能力上限界がある。これは、気候変動を予感させるシグナルが、自然の気象の多様性という雑音の中から、ようやく聞き取れ始めた段階に過ぎないこと、そして主要な要因に不確実性があるためである。ここでいう不確実性要素には、長期的な自然の気象変化の大きさやパターン、温室効果ガスやエアロゾルの濃度変化による変化や、それに対応する経時変化のパターン、そして陸地表面の変化が含まれている。いずれにしても、証拠とのバランスをとるなら、人間活動が、地球規模気候システムに影響を与えているのは明らかである。

- ・ IPCC では、1999 年から 2100 年の期間の、人口や経済成長、土地利用、技術革新、エネルギーの利用可能性、そして燃料構成などに関し、設定した仮定条件を基に、将来の温室効果ガス濃度やエアロゾル前駆体の排出を予測した、IS92 の a-f というシナリオを作成している。地球規模の炭素循環と、大気内の化学反応により、これらの排出予測値から温室効果ガスやエアロゾルの大気濃度や、自然の放射強制力の変動を予測することができる。そうすれば、気象モデルを使って将来の気候を予測することが可能となる。
- ・ IS92 シナリオでは、地球表面の平均気温が、2100 年までに、1990 年比で +1 から 3.5 の範囲で上昇すると予測している。どのシナリオでも、平均の温度上昇率は、ここ一万年で最大のものとなる。地域的な気温の変化は、地球平均とかなり異なる可能性があり、一年単位から十年単位の実変化には、自然の変動がかなり含まれてくる。全般的な温暖化により、極端に暑い日が多くなったり、極端に寒い日が少なくなったりすると見られる。
- ・ 平均の海面水準は、温暖化による海洋の膨張と、氷河や氷床の融解で、上昇すると見られる。IS92 シナリオでは、2100 年での海面水準は、1990 年比 +15cm から 95cm の範囲で上昇すると予想している。
- ・ 気温の温暖化は、水の循環をより活発にする。これは、さらに深刻な旱魃や洪水が起きる地域もあれば、旱魃や洪水の程度が和らぐ地域も出てくることを示している。いくつかのモデル研究から、降水量の集中度の増大が指摘されており、より極端な降水現象が多くなる可能性が示唆されている。

水蒸気、 SO_x (硫酸塩粒子を生成する)、すす⁵は、気候変動やオゾンの化学反応に直接的・間接的な役割を持つ。

3. 航空機排出の今後の増加予測

旅客一人あたりの移動 km あたりの収入で測られる国際旅客航空輸送量は、1990 年から 2015 年の間に、年率 5%の伸びを示すと予想されるが、旅客、貨物、軍事目的⁶を含めた航空輸送の燃料消費は、同期間で年率 3%の伸びとなると予想されており、この差は、主に航

⁵ 大気中の硫酸塩粒子とすす粒子は、大気中に滞留する顕微鏡大の粒子をすすエアロゾルの典型である。

⁶ 民間の航空輸送(旅客+貨物)と軍事目的の飛行の燃料消費割合は、1976年で64%対36%、1992年では82対18であった。これは、2015年には93対7、2050年には97対3になると予想される。

空機の燃料効率の向上に起因する。この期間を超えると、予測の不確実性が増すため、報告書では、将来制約がなかった場合に、排出シナリオがどういう範囲をとるかについて検討した（表 1 と図 1 を参照）。これらのシナリオでは、どれも、技術革新の結果、旅客一人あたりの移動 km あたりの収入が、将来も削減し続けると仮定しており、飛行可能な空間（つまり、理想的な航空交通管制スペース）も、2050 年までに最適化されると仮定している。このような改善が実現しなかった場合には燃料の消費と排出は増大する。また、航空機の機体数や、空港の数、関連する社会基盤整備も、増大し続けて、航空機輸送の需要の伸びに制約がかからないと仮定しているが、仮定しただけの社会基盤が整備されなかった場合には、シナリオが示すような航空機輸送の伸びは、実現しない。

シナリオ名	航空機輸送の平均伸び率 (1990-2050)	燃料燃焼率の平均伸び率 (1990-2050)	平均経済成長率	平均人口増加率	航空機輸送の比率 (2050 対 1990)	燃料燃焼の比率 (2050 対 1990)	備考
Fa1	3.1%	1.7%	2.9% 1990-2025 2.3% 1990-2100	1.4% (1990-2025) 0.7% (1990-2100)	6.4	2.7	ICAO の予測・経済サポートグループ (FESG) の参照シナリオ、IPCC(1992 年)の中程度経済成長率、燃料効率向上と NO _x 削減技術を組み入れる。
Fa1H	3.1%	2.0%	2.9% 1990-2025 2.3% 1990-2100	1.4% (1990-2025) 0.7% (1990-2100)	6.4	3.3	Fa1 の輸送と技術シナリオに、一部亜音速航空機の超音速飛行機への転換を組み入れたシナリオ
Fa2	3.1%	1.7%	2.9% (1990-2025) 2.3% (1990-2100)	1.4% (1990-2025) 0.7% (1990-2100)	6.4	2.7	輸送は Fa1 シナリオ、技術面は NO _x 削減に重点をおき、燃焼効率改善は多少小さくとる。
Fc1	2.2%	0.8%	2.0% (1990-2025) 1.2% (1990-2100)	1.1% (1990-2025) 0.2% (1990-2100)	3.6	1.6	FESG の低成長率シナリオ。技術は Fa1 シナリオと同じ
Fe1	3.9%	2.5%	3.5%	1.4%	10.1	4.4	FESG の高成長率

			(1990-2025) 3.0% (1990-2100)	(1990-2025) 0.7% (1990-2100)			シナリオ。技術は、Fa1 シナリオと同じ
Eab	4.0%	3.2%			10.7	6.6	IS92a を基にした環境防衛基金(EDF)の輸送成長シナリオ。技術面では NO _x がかなり低くなると仮定
Edh	4.7%	3.8%			15.5	9.4	高い輸送伸び率を想定した EDF シナリオ。技術面では NO _x がかなり低くなると仮定。

注1：輸送平均伸び率は、旅客一人あたり移動 km あたり収入。注2：燃料燃焼平均伸び率は、旅客・貨物・軍用の全航空輸送。

IPCC (1992 年)⁷では、1990 年から 2100 年の期間で、人口増加、経済成長、土地利用、技術変革、エネルギー資源利用可能性、燃料構成に関して仮定したものを基にして、温室効果ガスと、エアロゾル前駆体の排出の将来予測を行い、IS92a-f のシナリオを開発した。IS92a シナリオは、中位の排出シナリオである。将来の排出シナリオが、将来の予測というわけでは決していない。シナリオは本質的に不確実である。これは、シナリオというものが、異なった仮定条件を基に将来を考えているからであり、時間枠を長くとればとるほど、不確実性が増してくる。この報告書で作成された、航空機の排出シナリオでは、IS92 シナリオの範囲内で経済成長率や人口増加を仮定している(表1と図1を参照)。次の章では、シナリオ Fa1 を用いて航空機の影響可能性を検証しており、この Fa1 シナリオを、以後参照シナリオと称する。参照シナリオの仮定条件は、IS92a の仮定条件と関連したものとなっている。他の航空機排出シナリオも、IS92a-e の人口予測や経済成長予測範囲を使って、作成されたものである。これらのシナリオは、現実的な航空輸送の成長範囲を示しており、気候モデルの感度分析のベースとなっている。ただし、産業の現状や開発計画の予定を考えると高成長シナリオである Edh となる可能性は低く、一方、低成長シナリオの Fc1 を上回る可能性は高いとみられている。

4. 亜音速の航空機が、放射強制力および紫外線照射に与える影響の現状と将来

⁷ IPCC、1992 年：気候変動、1992：IPCC 科学評価書の補足報告書 [Houghton, J.T.、B.A. Callander、S.K Varney

航空機のエンジンからの排出が、放射強制力に与える影響を、図 2 と図 3 に示した。図 2 にあるように、これらの影響の一部には、かなり大きな不確実性がある。

4.1 二酸化炭素

航空機からの二酸化炭素の排出は、1992 年で 0.14 Gt-C / 年であった。これは、1992 年時点での人為的な二酸化炭素排出量の約 2%、運輸部門の全二酸化炭素排出量の約 13% に相当する。航空機からの二酸化炭素排出量は、この報告書で検討されたシナリオの範囲では、増え続けるものと見られており、2050 年までには、0.23 - 1.45 Gt-C / 年になると思われる。参照シナリオの Fa1 では、航空機からの排出が、2050 年で現在の 3 倍の 0.4 Gt-C / 年となる。これは、IPCC の中位 排出シナリオ (IS92a) における二酸化炭素排出予測量全体の 3% に相当する。シナリオの範囲内での二酸化炭素排出の増加幅は、2050 年で 1992 年比 1.6 倍から 10 倍となると見られる。

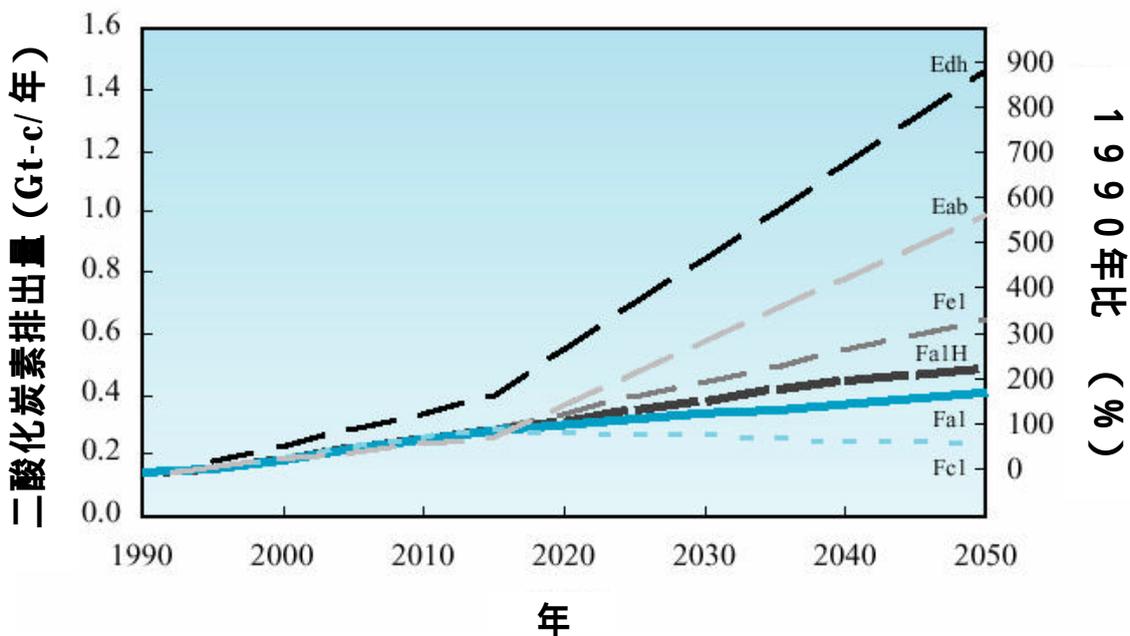


図 1 航空機燃料の使用に関する 6 つのシナリオにおける航空機起源二酸化炭素排出量。排出量は 1 年当たりのギガトン炭素 (GtC : 炭素 10 億トン) で表される。GtC を Gt CO₂ に変換するには、3.67 をかけると良い。右軸は、1990 年から 2050 年の伸び率を % で表している。化石燃料からの二酸化炭素排出の総量に対する航空機起源の二酸化炭素排出量の割合は、1992 年で 2.4% であり、これは人為的炭素排出量の 2% に相当する。(注 : Fa2 は、Fa1 と図に表わされるほど顕著な差がないため、ここには示さなかった。)

今日の二酸化炭素の濃度や放射強制力というのは、実は過去 100 年間ほどの間に排出され

たものの累積である。航空機起源の二酸化炭素の濃度は、1992 年で 1 ppmv であり、これは、人為的な原因による二酸化炭素濃度増加分の 1%を少し上回るくらいにすぎない。このように、排出量の割合（2%）に比べて、濃度の割合（1%）が低いのは、（航空機起源の排出が）起きたのが、過去 50 年間だけであるためだ。図 1 に示したシナリオの範囲では、航空機に由来する大気中の二酸化炭素の累積量が、次の 50 年間で 5 から 13ppmv の範囲まで増加すると予測されている。参照シナリオ（Fa1）の場合、IPCC の中位シナリオ（IS92a）で仮定する人間の活動全体の 4%を占めることとなる。

4.2 オゾン

1992 年の亜音速の航空機からの NO_x 排出により、北半球中緯度巡航高度でのオゾン濃度は、航空機からの排出がなかった場合と比較して 6%程度増加したと推定されている。参照シナリオ（Fa1）の場合、オゾン濃度の増加は、2050 年には 13%位にまで上がると予測されている。世界の他の地域では、オゾン濃度に関する影響が、これよりもかなり低くなっている。オゾンの増加は、平均すると地球表面を温めることになる。

航空機からの NO_x の排出は、地表での同量の NO_x 排出より、対流圏上層部でのオゾン生成の効果が大きい。対流圏上層部のオゾン増加は、より低い高度での増加より、放射強制力を増大させる効果が高い。このような増加の結果、北半球の中緯度では、オゾンの層が、1992 年で約 0.4%、2050 年で約 1.2%成長するとみなされている。しかし、航空機からの成層圏内へ硫黄や水蒸気の排出は、オゾンを破壊する傾向があり、NO_x によるオゾンの増加を一部打ち消してしまうことになる。このような相殺効果は、まだ数量化できていない。このため、亜音速航空機が成層圏オゾンに与える影響については、さらなる研究が必要である。航空機起源の排出で、最大のオゾン濃度増加がおきるのは圏界面付近であると計算されているが、ここは大きな自然変動が生じる所でもあるため、このようなオゾン濃度の変化は現時点において、観測によって明確にされているわけではない。

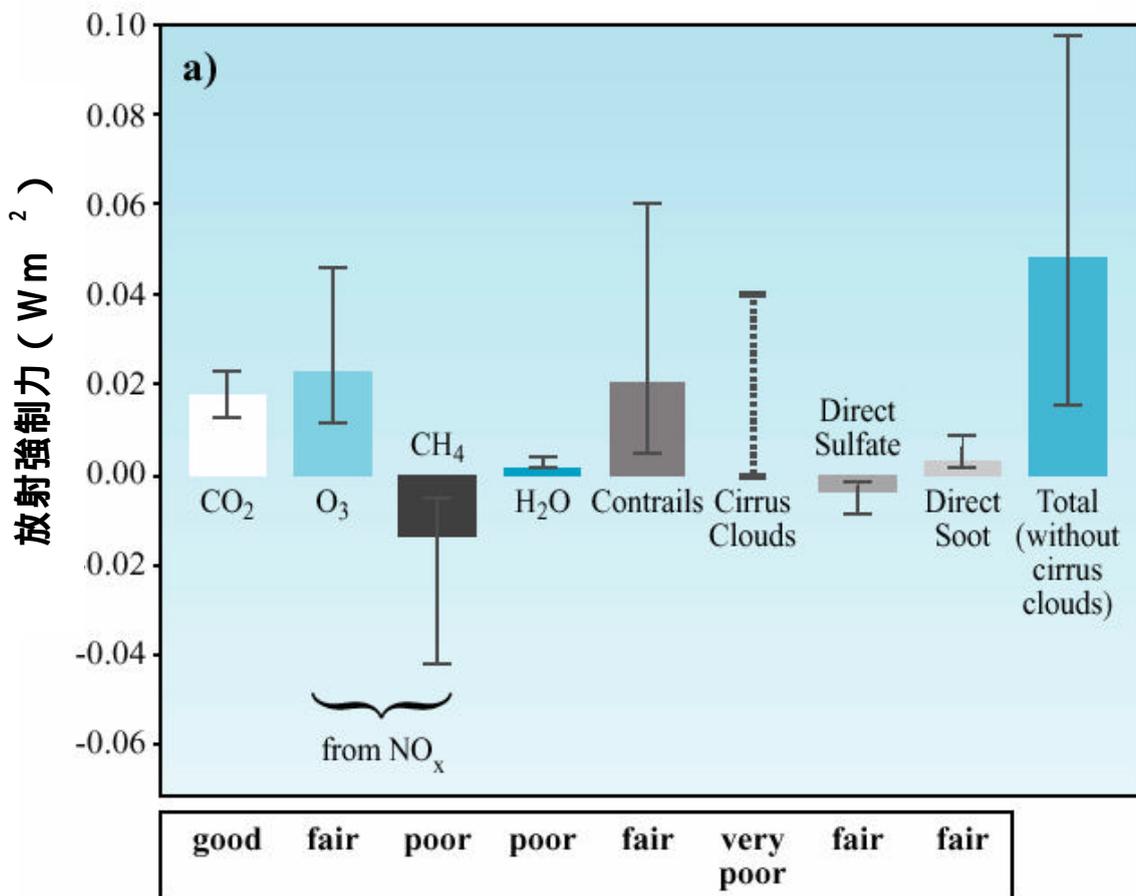
4.3 メタン

航空機からの NO_x 排出は、対流圏内でのオゾン濃度上昇の他に、温室効果ガスの 1 つであるメタンの濃度を減らす効果があると見られている。メタンの減少は地球表面を寒冷化する方向へ向かわせる。1992 年でのメタン濃度は、航空機なしの場合の大気中濃度と比べ、約 2%少なくなっていると、この報告では推測している。産業革命前から現在までで 2.5 倍となったメタン濃度全体と比べると、航空機によるメタン濃度の削減は、微々たるものである。メタンの発生源や吸収源は不確実なところがあるため、メタン濃度への航空輸送の影響を大気観測から検証することはできない。参照シナリオ（Fa1）では、2050 年でのメ

タン濃度が、航空機なしの場合と比較して、5%少なくなると計算している。

対流圏内において、オゾンの変化は大部分が北半球でおきているが、一方でメタンの変化は地球規模となっている。このため、(オゾンとメタン)の放射強制力(への影響)は、地球規模では同程度の強さで、しかも正負が逆となっているが、それぞれの緯度によって、その(大気)組成が異なるため、地域で見た場合には、(オゾンとメタン)それぞれの放射強制力の影響度合いが、必ずしも相互に消し合うとは限らない。

2 - a 飛行機に因する放射制力、1992年



Contrails: 飛行機雲
 Cirrus Clouds: 絹雲
 Direct Sulfate: 直接排出硫酸塩
 Direct Soot: 直接排出すす
 Total (without cirrus clouds): 合計 (絹雲を除く)

2 - b 飛行機に起因する放射強制力、2050年

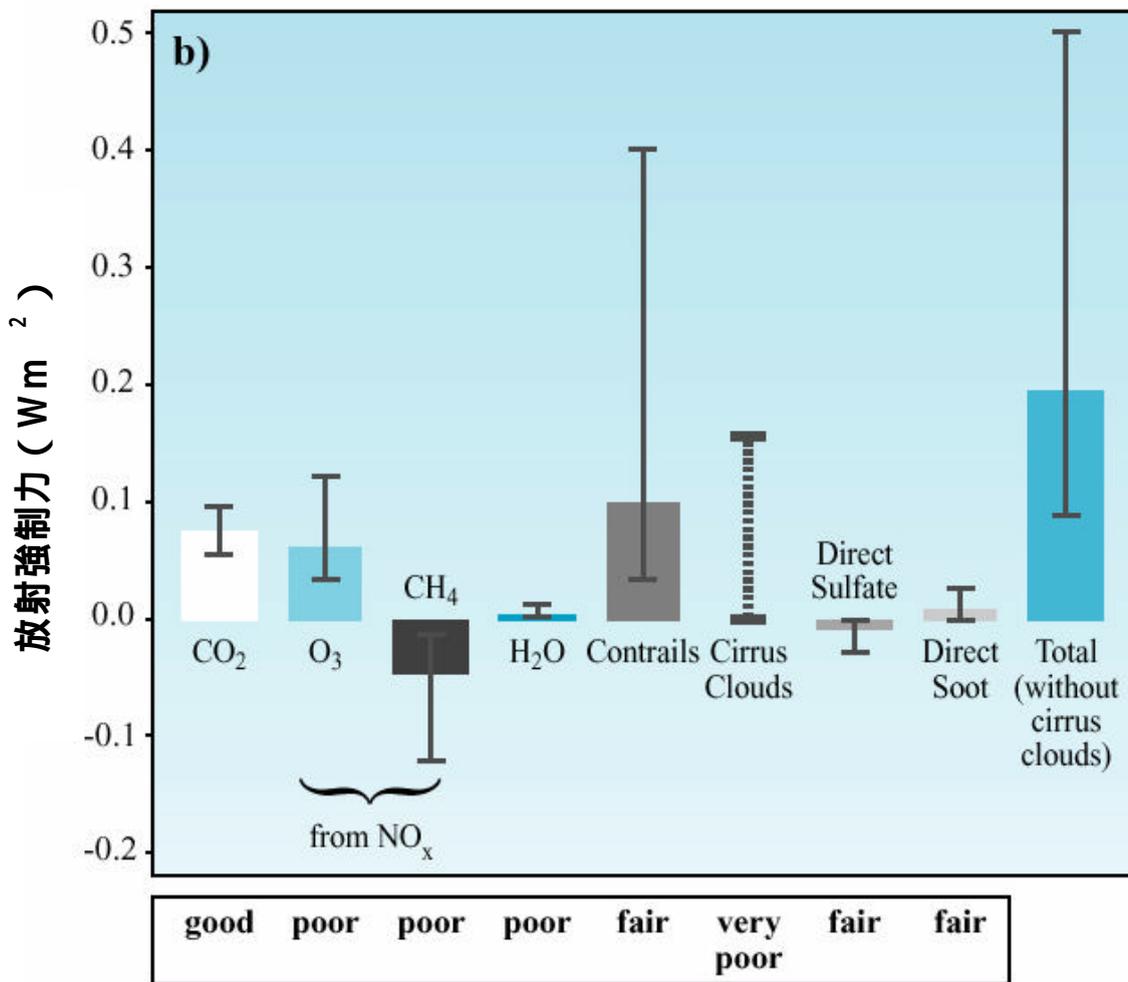


図 2 亜音速の航空機の排出による放射強制力の地球平均・年平均推定値 (Wm⁻²) (脚注 4 参照)。1992 年(2a)と Fa1 シナリオでの 2050 年(2b)の数値。図 2-b の方が図 2-a の 4 倍ほどの目盛となっている。棒で示した部分は、強制力の最善の推定値で、各棒に描かれた線は、現在ある最善の知識やツールで測った不確実性要素の 3 分の 2 を表す。(不確実性の 3 分の 2 ということは、67%の確率で、実際の値が、表示した範囲に入ることである。) 絹雲の場合、最善の推定値や不確実性の範囲を求めるには情報が不足している。点線で示したのは、可能な範囲での最善の推定値である。強制力の合計には、絹雲の変化の影響を盛り込んでいない。絹雲をのぞく強制力の合計の不確実性の推定値は、各項目の上限と下限を平方し、その合計の平方根で計算した。グラフの下に示した (Good, fair, poor, very poor) は、各項目に対する比較評価であり、科学的理解のレベルを示している。これは、推定値や不確実性を予測するために使用可能な根拠の量、科学文献での共通認識の程

度、分析範囲を基にしたものであり、線で表した不確実性の範囲とは別のものである。ここでの表示方法は、「気候変動 1995 年：気候変動の科学」で使われた同様のグラフが示す信頼度水準とは異なっており、より意味のあるものとなっている。

4.4 水蒸気

亜音速の航空機から排出される水蒸気は、その大半が対流圏に放出され、1,2 週間のうちに、降水として、速やかに取り除かれてしまう。水蒸気のごく一部は、成層圏下層部に放出され、そこで濃縮される可能性がある。水蒸気は温暖化ガスの一つであるため、水蒸気の増加は、地球の表面を暖める。ただし、亜音速の航空機からの水蒸気の影響は、他の排出ガスである二酸化炭素や NO_x の影響よりも小さい。

4.5 飛行機雲

1992 年において、航空機による線状の飛行機雲が、年平均で地球表面の 0.1%を覆い、地域的にはより大きな値となると評価されている。飛行機雲は、高層の薄雲と同様に、地球表面を暖める傾向をもつ。飛行機雲が空を占める割合は、参照シナリオ (Fa1) の場合で、2050 年に 0.5%にまで増加すると予測されており、この増加率は、航空燃料消費の増加率を上回る勢いである。飛行機雲の割合がこのように急速に伸びると予想されているのは、飛行機雲が生成されやすい対流圏上層部での航空機輸送が増加すると見込まれているためであり、また航空機の燃料効率向上の結果、飛行機雲が生成されやすくなるということもありうる。飛行機雲は、航空機から排出される水蒸気によって引き起こされ、その光学的な特性は、放出された粒子や、航空機の翼で作られる粒子、そして周りの大気の状態により異なる。飛行機雲の放射効果は、その光学特性と地球全体の雲の状況という、不確実なものによって変化する。飛行機雲は、上空の航空交通が混雑している場所では、人工衛星からも線状の雲として観察することができ、1996 年と 1997 年の中央ヨーロッパでは、空の平均 0.5%が飛行機雲で覆われていた。

4.6 絹雲

飛行機雲が繰り返し生成された後で、かなり発達した絹雲が生じることが観察されている。研究の件数は限られているが、(線状の飛行機雲以上と思われる)絹雲が、航空機からの排出と正比例して増加するとの知見が得られている。地球の約 30%は、絹雲で覆われている。絹雲の雲量増加は、平均すると、地球表面を温める傾向がある。航空機に誘発された絹雲の雲量増加分は、1990 年後半で地球表面の 0-2%の範囲となっていると推定される。Fa1 シナリオでは、これが 2050 年には 4 倍(0-8%)に増加する可能性があるとしているが、(航空機排出と)絹雲の雲量増大との相関メカニズムは、未詳であり、さらに研究する必要がある。

ある。

4.7 硫酸塩とすすのエアロゾル

1992 年における航空機に由来するエアロゾルの質量濃度は、地表面からのエアロゾル発生源と比べると小さな割合でしかない。航空燃料の使用で、エアロゾルの蓄積は進むと見られるが、2050 年でも、航空機起源のエアロゾル質量は、地表起源のものと比較して濃度割合は依然小さいと予測されている。すすが増加すると、地球表面の温暖化につながり、硫酸塩が増加すると、寒冷化につながる。航空機から排出される硫酸塩とすすのエアロゾルは、他の排出物と比べて、直接的な放射強制力（への影響）が小さい。エアロゾルは、雲の生成に影響をするため、航空機起源のエアロゾルの蓄積は、雲の生成促進や、放射特性の変化に、何らかの役割を果たす可能性がある。

4.8 亜音速航空機が、気候に与える全般的な影響

各種の人為的排出が気候に与える影響は、放射強制力の概念を使って比較することができる。航空機に由来する放射強制力の最善の推定値は、1992 年の時点で 0.05Wm^2 、全ての人為排出による放射強制力全体の 3.5% である。参照シナリオ (Fa1) の場合、2050 年における航空機に由来する放射強制力は、 0.19Wm^2 で、これは IS92a の中位シナリオでの放射強制力の 5% に当たる（1992 年の値の 3.8 倍）。この報告書で研究されたシナリオの範囲では、強制力は、2050 年には 0.13 から 0.56Wm^2 の範囲で伸びると予想されており、これは、Fa1 シナリオと較べると 1.5 分の 1 から 3 倍、1992 年の値と比べると、2.6 から 11 倍となる。このような強制力の推定値は、二酸化炭素、オゾン、メタン、水蒸気、飛行機雲、そしてエアロゾルの濃度変化による影響を組み合わせたものだが、絹雲の変動可能性は含まれていない。

図-2 に示したのは、多様な構成要素から生じる放射強制力の 1992 年の値と、参照シナリオ (Fa1) を用いて求めた 2050 年での値である。各構成要素の強制力推定値で最善のものと 3 分の 2 の範囲の不確実性が示されている。⁸ 不確実性の範囲を求めるに当たっては、専門家による科学的な判断がなされており、また観測統計モデルも組み入れている。ここに示した放射強制力の不確実性範囲は、温暖化ガスとエアロゾルによる大気の変化計算における不確実性と、放射強制力そのものの計算上の不確実性を、組み合わせたものである。絹雲の増加については、最善の推定値の範囲だけを示し、放射強制力の合計には含めていない。

⁸ 不確実性範囲の 3 分の 2 とは、実際値がこの範囲内に入る確率が 67% あることを意味する。

各構成要素については、その科学的な理解の状況を評価した。ここでの評価は、以前の IPCC 文書に示された信頼性水準と同一ではない。不確実性の範囲ではなく、各構成要素に関する科学的理解の相対評価であり、最善の推定値と、その不確実性を予測するために使用可能な根拠の量、科学文献での共通認識の程度、そして分析範囲に基づいたものである。1990 年から 2050 年の期間での、航空機利用の伸びに関する 6 つのシナリオ各々の放射強制力合計を、図 3 に示した。

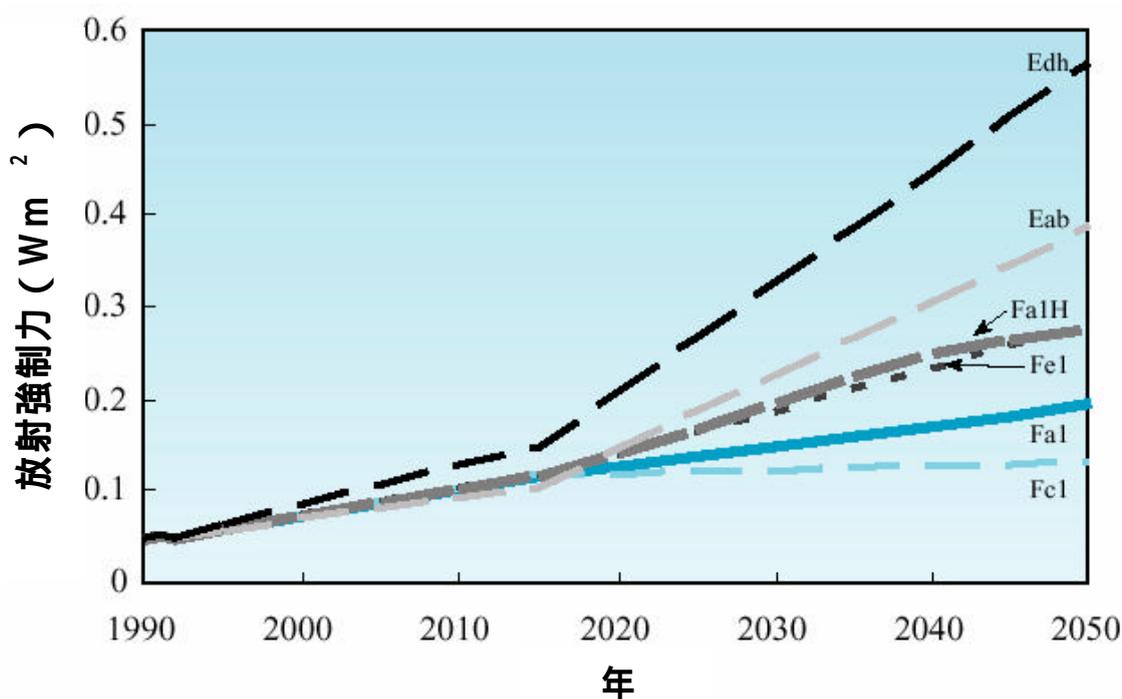


図 3 1990 年から 2050 年の間の航空輸送増加に関する 6 つのシナリオでの航空機起源排出による放射強制力合計（絹雲を除く）の地球規模での年平均推定値。（Fa2 シナリオは Fa1 シナリオと区別できないため、描かれていない。）

航空機輸送に由来する放射強制力の合計（絹雲の増加による強制力を除く）は、1992 年において、0.01 から 0.1Wm²の範囲をとる可能性が高く、そのうち不確実性が最も高いのは、飛行機雲とメタンである。最善の推定値と比べた放射強制力の合計は、5 分の 1 から 2 倍の範囲となる。2050 年では、どのシナリオにおいても、放射強制力の不確実性の幅が 1992 年よりも多少広くなる。しかし予想される放射強制力のもっとも大きな変動幅は、シナリオ自体の幅広さからきている。

この報告書にあるどのシナリオでも、1992 年から 2050 年の期間では、航空機起源の放射

強制力の合計（絹雲の変化を除く）は、航空機起源の二酸化炭素排出だけから生じる放射強制力の、2 から 4 倍となっている。全ての人間活動による放射強制力合計は、二酸化炭素の排出による放射強制力に対し、最大 1.5 倍であると考えられる。

NO_x の排出は、メタンやオゾンを変化させ、それぞれの放射強制力に対する影響同程度で、プラス・マイナスの符号が逆となっている。しかし、前述したように、航空機からの排出によるオゾンの強制力の変化は、メタンの排出による強制力の変化より、かなり地域的に偏ったものとなっている。

気候に対する航空機の影響は、他の人為的な温室効果ガスの排出や、その他の粒子の排出、そして、その背景にある自然変動に、追加的なものである。航空機輸送から生じる放射強制力は、1992 年では、全ての放射強制力の約 3.5% を占めている。航空機輸送（または同じような放射強制力をもつ部門）による地球気候変動への影響と、他の人間活動による変動とを区別することはできない。航空機が地球規模の変動にどれだけ寄与するかは、航空機が放射強制力にどれだけ寄与するかにほぼ比例する。

4.9 亜音速の航空機が紫外線放射（UV-B）に与える全般的な影響

オゾンは、その大半が成層圏に滞留しており、太陽からの紫外線放射を遮断する効果がある。紫外線の照射で、どれだけ効率的に日焼けが生じるかによって定義される紅斑量率は、航空機の影響により、1992 年 7 月の北緯 45 度の地点で、0.5% ほど減少したと評価されている。これとは逆に、オゾン層の破壊によって、1970 年から 1992 年の間に、7 月の北緯 45 度地点での紅斑量率が約 4% 以上増加したと計算されている。⁹ 亜音速の航空機による影響は、主に航空機起源の NO_x 排出により、オゾンの鉛直分布を実質的に増大させ、紫外線照射を減少させていると考えられる。この効果に比して、飛行機雲やエアロゾル、そしてそれに誘起される雲による紫外線照射量の変動は非常に小さい。南半球では、航空機からの排出による紅斑量率への影響は北半球の 4 分の 1 程度と計算されている。

参照シナリオ（Fa1）では、航空機の影響がゼロの場合のシミュレーションと比較して 7 月の北緯 45 度での紅斑量率の変化が 2050 年でマイナス 1.3% となっている（3 分の 2 の不確実性範囲では、マイナス 0.7% からマイナス 2.6%）。これに対し、航空機以外を起源とするトレース元素の濃度変化は、1970 年と 2050 年の間に、北緯 45 度付近での紅斑量率を、マイナス 3% とすると計算されている。この紅斑量の減少は、次の二つの相反する影響効果が相殺しあった結果である。つまり(1) 超寿命のハロゲン化合物が持続的に存在することにより、成層圏オゾンが 1970 年レベルへ完全には戻らないこと(2) 対流圏内オゾンを生成する

⁹ この値は人工衛星による観測とモデル計算を基にした。参照：WMO

ような、寿命の短い汚染物質が、より多く地球表面から排出されること、である。

5 . 超音速の航空輸送が、放射強制力や紫外線照射に与える影響の現状と将来

将来の可能性の一つとして、第2世代の超音速民間用旅客機(HSCT)の開発が上げられるが、そのような航空機が実際に開発されるかどうかは、かなり不確実である。これらの超音速航空機は、亜音速の航空機の高度よりも8000m高い19000mの高度で巡航すると予想されており、二酸化炭素や水蒸気、NO_x、SO_x、すすを成層圏内に排出すると考えられる。超音速航空機からのNO_x、水蒸気、SO_x排出は、どれも成層圏内のオゾン層の変化に寄与する。Fa1Hシナリオでは、民間の超音速航空機から生じる放射強制力が、それにとって代わられる亜音速の航空機を起源とする放射強制力の5倍になると推定している。超音速航空機の放射強制力の数値は、モデル研究の中での水蒸気やオゾンの取り扱い方によって変わる。この効果を現在のモデルでシミュレーションすることは難しく、不確実性も大きい。

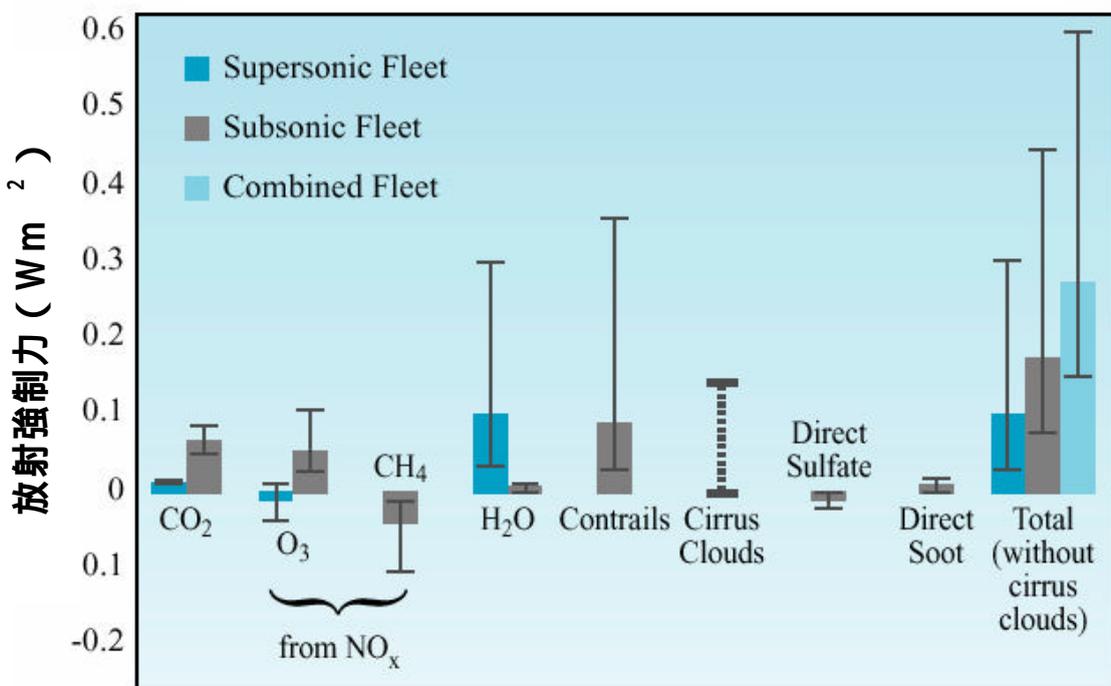
FA1Hシナリオは、民間用の超音速航空機導入を組み入れたものであり、その運航は2015年に開始し、2040年には最大1000機導入されると想定している。参考までに、1997年末での民間用亜音速航空機は、約12000機となっている。このシナリオでは、(超音速)航空機がマッハ2.4で巡航するよう設計されるとしており、燃料キログラム当たりのNO₂排出も5グラム(現在の民間用亜音速航空機の22グラムという数字よりも小さい)を維持すると想定している。これらの超音速航空機は、亜音速航空機の一部(シナリオFa1の排出量で言えば、11%程度)を置きかえると見られている。超音速航空機は、亜音速航空機と比べて、旅客一人、単位移動距離(km)当たりで、2倍以上の燃料を消費する。2050年までに、両方の航空機導入の場合(シナリオFa1H)シナリオFa1の場合と比して、放射強制力が0.08Wm⁻²(42%)から0.19Wm⁻²増加すると予想される(図4参照)。放射強制力の増分は、その大半が成層圏内の水蒸気蓄積による。

民間の超音速航空機導入と、亜音速の航空機との組み合わせ(シナリオFa1H)では、成層圏のオゾンが削減され、紅斑量率が増加する。航空機なしの場合と、亜音速航空機と超音速航空機の組み合わせを比べた場合の効果計算では、北緯45度の7月のオゾン垂直分布が、2050年ではマイナス0.4%となる。超音速航空機による変化は、マイナス1.3%、亜音速航空機による変化は、プラス0.9%である。

こういった(超音速と亜音速)航空機の組み合わせによる、紅斑量率の変化は、北緯45度の7月において、航空機なしの場合と比べて、2050年にはプラス0.3%となる。航空機の組み合わせシナリオの不確実性は、3分の2の不確実性範囲で、マイナス1.7%からプラス

3.3%である。これは、Fa1 シナリオで予測されているマイナス 1.3%の変化と比較可能である。航空機の（巡航）高度が上がることは、オゾン垂直分布の減衰につながるが、高度が下がれば、オゾン垂直分布の減衰幅は小さくなり、成層圏の最も低い層で飛行するなら、オゾンの垂直分布を増加することになる可能性がある。さらに、超音速機の北半球成層圏内飛行での排出は、南半球に運ばれ、そこでオゾン層の破壊をもたらすことになる。

図 - 4 2050 年での超音速飛行機も含めた航空機からの放射強制力



Supersonic Fleet: 超音速機
 Subsonic Fleet: 亜音速機
 Combined Fleet: 両方の組み合わせ
 Contrails: 飛行機雲
 Cirrus Clouds: 絹雲
 Direct Sulfate: 直接排出硫酸塩
 Direct Soot: 直接排出すす
 Total (without cirrus clouds): 合計（絹雲を除く）

図 - 4 Fa1H シナリオにおける、超音速および亜音速飛行機の組み合わせにおける温室ガスやエアロゾル、飛行機雲の変化により生じる地球規模放射強制力の年平均推定値（2050

年)。この Fa1H シナリオでは、亜音速飛行機の一部（シナリオ Fa1 の排出量という意味では、11%）が、超音速機になると仮定している。棒グラフ部分は、強制力の最善の推定値を示しており、それにつけられている線は、最善の知識と現在利用可能なツールを使って求められた 3 分の 2 の不確実性範囲を示している。（3 分の 2 の不確実性範囲とは、実際の値がその範囲内をとる確率が 67%あることを意味する）絹雲に関する情報は、最善の推定値や不確実性の範囲を決めるには十分でないため、強制力の合計推定値には、絹雲の変化の影響を含めていない。絹雲の点線は可能な範囲での最善の推定値を示す。放射強制力合計（絹雲を除く）の不確実性は、各項の上限と下限の範囲を平方したものを合計し、その平方根を求める形で計算される。超音速機の各項目に関する科学的な理解のレベルは、二酸化炭素は「良好」、オゾンは「不足」、水蒸気についても「不足」となっている。

6 . 排出と影響を削減するためのオプション

航空機からの排出影響を削減するためのオプションには、航空機やエンジンの技術革新、燃料、運航方法、規制や経済対策といったものが含まれる。こういったオプションは、単独でも、また、組み合わせても実施が可能であり、また、公共部門・民間部門いずれでも実施することができる。この報告書に述べられている航空機やエンジン技術の発達、航空管制面での改善は、すでに相当量、気候変動の予測計算上に用いる航空機排出のシナリオに盛り込まれている。それ以外のオプションで、排出削減の可能性のある運航対策とか、代替燃料オプションは、シナリオに盛り込まれていない。技術がさらに発展するなら、燃料や排出の面でより多くの削減が可能となるだろう。実際、こういった技術のうちのいくつかは、商業的な理由から、実用化を期待されている。規制オプションや経済オプションなどを、どのタイミングで導入するか、そしてその適用範囲をどのくらいにするかは、こういった技術導入に影響を与える。また航空輸送の需要にも影響を与えることとなる。水蒸気や雲に関する緩和オプションは、十分検討されたとは言えない。

航空業界で、新しい航空機の購入や、工学上・運航上の変革を検討する際に最も関心を集めるのは、運航上の安全性や運航上および環境上の実績とコストである。航空機の運用寿命は、25年から35年である。技術の進歩や技術に関する政策オプションで航空機からの排出削減を評価する際には、こういった点を考える必要がある。

6.1 航空機とエンジンの技術オプション

技術の進歩により、旅客一人-1 km 当たりの排出は、かなり削減されるが、まだ改善する余地もある。どんな技術革新でも、ある範囲の環境への影響の中でのバランスの問題を含んでいる。

現在製造されている亜音速の航空機は、40年前の航空機と比べ、旅客一人-1 km 当たりの燃料効率が、70%以上改善されている。効率向上の大部分は、エンジンの改良によるもの

であり、残りは機体設計の改善である。燃料効率は、今日製造されている航空機と比べると、2015年には20%、2050年には40-50%向上すると予測されている。この報告書のシナリオでは、2050年の時点での燃料消費や排出の予測に、こういった燃料効率の向上を取り入れている。エンジンの効率改善は、燃料消費を削減するとともに、ほとんどの排気物質の量を削減するが、飛行機雲の生成は多くなり、また燃焼技術が進歩しなかった場合は、NOxの排出も増加する。

未来の航空機のエンジンや機体設計には、複雑な政策決定プロセスがからんでくると同時に、多くの要素（例 二酸化炭素排出、地上および高高度でのNOx排出、水蒸気の排出、飛行機雲や絹雲の生成、騒音など）のバランスが係わってくることになる。この報告書では、必ずしもこういった要素が適切に分類され、量的評価をされているわけではない。

多くのエンジン研究プログラムが国際的に進められており、2010年までには、着陸 離陸 サイクル（LTO）でのNOx排出を現在の規制基準より70%まで削減すること、また、エンジンの燃料消費についても近年製造のエンジンより8-10%向上することを目標としている。巡航高度でのNOx排出削減は、必ずしもLTOと同等とはいかないが、実施されるだろう。しかし、これらの目標が達成されたとしても、こういった技術を新規生産の航空機の多くに適用するには、通常、10年ほどかかる。超音速航空機からのNOx排出についても、研究が進められている。

6.2 燃料オプション

ケロシンをベースにした（現在の）商業用ジェット燃料に代わるような代替燃料は、ここ数十年間、でてきそうにない。ケロシンの硫黄分を削減することで、SOxの排出や、硫酸塩粒子の生成を少なくすることができる。

ジェット機、特に長距離飛行のジェット機には、エネルギー密度の高い燃料が必要である。水素のような他の燃料オプションも、長期的には実用性がでてくるかもしれないが、全く新しい航空機設計と燃料供給用の新たなインフラストラクチャーが必要となる。水素燃料の利用は、航空機からの二酸化炭素排出を排除することになるが、水蒸気の排出は増加する。水素燃料や他の代替燃料の生産や利用に関する、全般的な環境影響や、環境の持続可能性は、まだ明確になっていない。

航空機の排気からの硫酸塩粒子の生成は、エンジンや羽の特性により異なるが、燃料の硫黄成分の量が下がるほど、低下する。燃料からほとんどすべての硫黄分を取り除く技術はあるが、除去することで潤滑度特性の低減を招く結果となる。

6.3 運航上のオプション

航空管制(ATM)の改善や、他の運航手続きの改良により、航空燃料の燃焼を8から18%削減することが可能である。こういった削減の大半(6から12%)は、ATMの改善により可能と見られており、これからの20年間で完全実施が期待されている。この結果、エンジンからの排出が削減できる。ここで取り扱ってきた航空機排出シナリオはすべて、ATMの改善による削減を組み込んだものである。どれだけ早くATM改善を導入するかは、国際レベルの機構整備という必要条件が、いつ実現できるかどうかにかかってくる。

航空管制システムは、航空機の運航について、誘導、間隔どり、調整、管制を行うためのシステムである。現在の国内・国際航空管制システムには、限界があり、その結果、たとえば、空中待機(着陸許可待機のため行われる、定められた飛行パターンでの飛行)、非効率な航路、最適ではないフライトパターンが現実には起こっている。こういった限界が存在することは、過剰な燃料燃焼や、その結果としての過剰な排出を生むことにもなる。

現在利用されている航空機や、運航方法であっても、前に述べたような航空管制システムの限界の中で対応策をとれば、燃料の燃焼を6から12%節減できる。組織上や規制上必要な調整を、適切なタイミングで行うことで、これから20年間の間に、こういった燃料の燃焼節減に必要な改善を全て実施できるものと期待されている。この報告書で見てきたシナリオでは、燃料消費の推定値の計算で、こういったATMの改善を見込んでいる。

旅客一人当たり-1km当たりの燃料燃焼量を削減するような運航対策としては、この他にも搭載量(一つの航空機の搭載旅客人数または貨物量)の増加、不要重量の除去、航空機の速度の最適化、副次的電力消費の制限(例、暖房用、換気用)そして、タキシング(地上走行)の削減などがある。こういった運航対策での改善可能性により、燃料の燃焼や排出を2-6%ほど節減することが可能である。

6.4 規制・経済・他のオプション

航空機とエンジンの技術向上や、航空管制の効率化により、環境上の便益がもたらされる。しかしこれによって、予想される航空業界の成長に伴う排出増加の影響を、完全にうち消せるわけではない。さらに排出を削減する政策オプションとしては、航空機エンジンからの排出に対する規制強化、環境上、負の影響を与える補助金やインセンティブの排除、環境上の対策(課税や課料)や排出権取引、自主(規制)協定、研究プログラム、航空機から鉄道やバスへの移行といったものが考えられる。こういったオプションの大半は、航空

輸送のコストや料金の値上げにつながるものである。こういったアプローチの一部は、十分研究されているとは言えず、航空輸送での実験も行われていないことから、その成果がどれだけ期待できるかは、不明である。

エンジンの排出量認証というのは、排出率を削減する一つの方法である。航空輸送の担当行政官庁は、現在この方法で、一酸化炭素、炭化水素、NO_x、煙霧の排出規制を行っている。国際民間航空協定（ICAO）では、現在のNO_xやその他の排出に関するLTO（離着陸時）基準を補う意味で、巡航高度での航空機排出基準のニーズを評価する作業を始めている。

環境税（課金、税金）や排出権取引のような市場本位のオプションは、技術革新を促し、効率を改善する可能性がある一方、航空旅行の需要を減らすかもしれない。こういったアプローチの多くは、まだ全面的に検討されたわけではなく、航空業界として実験が試みられたわけでもない。このため、その成果は不確実である。

環境税（課金、税金）は、より効率的な航空機の開発と利用に即ちその刺激を与えるものであり、また航空輸送の需要の伸びを抑えて、航空機よりの排出の増加を減衰させる手段ともなりうる。（これに関する）研究では、環境上有効な課税を、国際的な枠組みで考える必要があることが、示されている。

航空輸送からの排出を緩和するため検討する必要があるアプローチとしては、もう一つ排出権取引という市場本位のアプローチがある。これは、参加者が相互に協力して排出削減費用を、最小にするものである。排出権取引は、米国で二酸化硫黄に適用されており、またモントリオール議定書でのオゾン層破壊物質にも適用できるが、航空業界では試行されていない。このアプローチは、京都議定書上、付属書B諸国に適用される条項の一つである。

自主的取り組みに対する協定というアプローチも、航空輸送部門での排出削減を達成する手段として、現在検討されている。そのような合意は、他の部門でも、温室効果ガス排出の削減や、吸収の促進のために用いられてきている。

この他、検討される手法としては、環境上マイナスの効果をもたらす助成金やインセンティブの排除とか、研究プログラムといったものがある。

鉄道やバス輸送への切り替えにより、旅客一人 1km 当たりの二酸化炭素排出を削減することが可能性である。こういった削減ができるのは、バス輸送や鉄道でつなぐことのでき

る短距離でしかも高密度の輸送ルートに限られている。ヨーロッパの旅行者のうち 10%までは、航空機の利用から高速鉄道へ振り替えるとの結果が示されている。このような代替輸送の可能性を探る上では、広い範囲の環境影響（例、騒音問題、局地的な大気の質、地球大気への影響）で、どのような代償を払わなければならないかを含めて、さらに分析する必要がある。

7. 将来的な問題

この報告書は、2050年までの期間において、航空機に由来する気候やオゾン層の変化が、どれだけのものとなる可能性があるかを異なったシナリオを用いて評価したものである。この報告書では、一定のタイプの航空機排出については、その影響が十分理解されている一方で、科学的な不確実性がのため、効果が不明なことがあることも明らかにしている。地球大気に対する航空輸送の影響も含め、人間の活動が与える影響はどういったものか、その特性の理解は徐々に深まってきている。この報告書では、このほか、技術の発展や、社会基盤の増強、航空輸送の排出削減に向けての規制対策や市場本位政策についても検討した。科学的な不確実性やそのほかの不確実性を小さくし、排出削減オプションへの理解を深め、政策決定者に対し、より良く情報を提供して、航空輸送の需要に関わる社会的、経済的な問題への理解を深めるには、さらに研究することが必要である。

航空輸送が気候やオゾン層へ与える影響を予測上で、予測を限定的なものにしてしまう多くの重要な科学的な不確実性が存在する。

- ・ 絹雲に対する飛行機雲やエアロゾルの影響
- ・ オゾン濃度やメタン濃度の変化に関する NO_x の役割
- ・ 化学プロセス変化を誘起するエアロゾルの能力
- ・ 対流圏上層と成層圏下層における大気中の気体や微粒子の移動
- ・ 地域的な（放射）強制力や成層圏の乱れに対する気候システムの反応

これに加えて、より明確な定義付けが必要な社会・経済的、そして技術的問題が、いくつかあり、その主なものには次のものが含まれる。

- ・ 空港や航空路の基盤による制約と、それに伴う技術変革を含め、民間航空輸送サービスの需要特性を見極めること
- ・ 規制策オプションや市場本位策オプションでの外部コストと環境上の便益の評価手法
- ・ 緩和策から生じる航空業界の排出削減によるマクロ経済的な影響の評価
- ・ 飛行機雲の生成と雲量の増加につながるような排出削減技術能力と運航上の手法
- ・ 可能性ある安定化シナリオ（温室効果ガスの大気濃度安定化）を達成することによる経

済上、環境上の影響への理解。これには、航空輸送からの排出を削減する対策など、多様な交通手段の相対的な環境影響といった問題が含まれる