

**航空機と地球大気 (Aviation and the Global Atmosphere)**  
**IPCCワーキング・グループIとIIIのための特別報告書**

ニール・リアリー

IPCC シンポジウム用プレゼンテーション  
日本、東京  
1999年7月1日

**序説**

今年5月、IPCCは「航空機と地球大気」に関する特別報告書を発行した。本報告書は、国際民間航空機関と、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に基づいて作成されたものである。この報告書は、過去と将来において、地球の気候と大気中オゾンに航空機が与える影響についての知見について評価を行っており、また航空機が気候と成層圏のオゾンに与える悪影響を緩和するための、様々な選択肢に関係する、科学的、技術的、社会的、経済的問題について考察を行っている。

他のIPCC報告書と同様、航空機に関するこの特別報告書は、科学、技術の専門家、そしてIPCC参加国家の政府による幅広いレビューを受けている。30カ国の大学、研究所、企業グループ、政府機関、その他が、この報告書のレビューに参加している。このレビューにより、航空機と地球大気に関する知見についての評価が、強化され、よりバランスの取れたものとなった。このようなレビューは、IPCCの報告書が総括的で、科学的に有効な評価を行っており、他機関が科学的に支持できる見解とは異なった発表をする際釣り合いが取れるということを、IPCCに保証させる重要なものである。

**影響の概説**

航空機は直接ガスや微粒子を対流圏上部及び成層圏下部に排出し、大気の構成や放射強制力、気候を変化させる。1m<sup>2</sup>あたりのワット数で表される放射強制力は、気候に対して地球大気の組成変化が与える影響の大きさを計る尺度である。放射強制力がプラスの値であれば、気候が温暖化し、マイナスの値であれば、気温は低くなる。

航空機からの排出には、二酸化炭素、水蒸気など、放射強制力と温暖化を直接増加させる温室効果ガスが含まれている。窒素酸化物など航空機によるその他の排出物は、温室効果ガス、オゾン、メタンを生産もしくは破壊して気候に間接的な影響を与える。これは放

射強制力と気候への効果にも相当する。硫黄と煤の分子が航空機から排出されると、水蒸気と一緒に凝結した航跡または飛行機雲と呼ばれる筋状の白い雲を形成するきっかけとなる。飛行機雲はプラスの放射強制力であり温暖化を増す。これらの排出はより大きな巻雲 (cirrus cloud) を発生させることもあり、これは温暖化を助長する。しかしそのプロセスはよくわかっておらず、もし航空機による排出の影響があるとすれば、どのくらい巻雲が増加するのかということはまだ明らかではない。

オゾンは温室効果ガスであるだけでなく、紫外線を吸収し、生物学的に害のある放射線から地表を保護している。このような吸収のほとんどは成層圏で起こるが、対流圏オゾン(tropospheric ozone)もこのプロセスにおいて重要である。様々な人工的化合物(クロロフルオロカーボンやハロンなど)が、大気中のオゾン破壊を起こしてきたのである。オゾン破壊によって、地表に届く紫外線の量は増加する。

地表における紫外線の増加は数々の悪影響をもたらし、それには、皮膚ガン発症の増加、白内障形成の加速(多くの開発途上国で盲目の原因としてトップである)、人間の免疫システム低下の可能性、農業など、地上及び水中生態系の生産性減少などが含まれる。

航空機からの排出は、オゾンの形成と破壊に関わっている。ガスが排出される高度、その他の要因によっては、航空機による排出はオゾン形成したり、または破壊したりするのである。地表 9 キロから 13 キロにある対流圏上部及び成層圏下部で、亜音速の航空機から排出される亜酸化窒素は、オゾンを増加させ、それにより地表に到達する紫外線量を減らすとされている。この高さにおける排出は、地表で同量の排出がなされた場合に比べ、対流圏上部におけるオゾン形成に有効である。

一方、成層圏内 17 キロから 20 キロ以上の高度における超音速飛行の場合、この高度における窒素酸化物排出は、成層圏のオゾン層を破壊するとされている。その結果、地表の紫外線は増加することになる。

## 気候と紫外線に対する航空機の現段階における影響

1992 年、全人間活動による全放射強制力が  $1.4\text{Wm}^{-2}$  であると推計された。これには、 $2.7\text{Wm}^{-2}$  という温室効果ガスからのプラスの強制力と、エアロゾールからの  $-1.3\text{Wm}^{-2}$  というマイナスの強制力が含まれている。報告書の中では、航空機による様々な排出が大気構成にあたる影響が推計されている。1992 年の放射強制力への航空機寄与分総量の推計は  $0.05\text{Wm}^{-2}$  である。巻雲形成に対する影響の可能性は非常に不確かなため、この推計には含まれていない。これは全人間活動のうち、全体のおよそ 3.5%にあたる。

正確な寄与の割合ははっきりしていないが、航空機による放射強制力は  $0.01$  から  $0.10\text{Wm}^{-2}$ の間であろうという説が  $67\%$ 、つまり  $3$ 分の $2$ の確立で正しいと見積もられている。ということは逆に、 $3$ 分の $1$ の確立で、航空機の寄与する割合が、この高度範囲の上下それぞれより、高いか低い可能性があるということである。

個々の構成要素を見た場合、 $1992$ 年では、航空機から排出された二酸化炭素は、 $0.018\text{Wm}^{-2}$ であった。

航空機からの窒素酸化物排出は、二つの温室効果ガス濃度に影響を与える。亜音速の航空機から排出される窒素酸化物は、飛行高度  $9\sim 13$  キロにおいて、オゾン濃度を高めていたと推計されている。航空機が無かった場合、 $1992$ 年のオゾン濃度増加は、北半球でおおよそ  $6\%$ であり、同半球における全オゾン量(total column ozone)の増加は  $0.4\%$ である。南半球での増加はそれより少なく、オゾン増加が放射強制力を  $0.023\text{Wm}^{-2}$ 増加させると推定されている。窒素酸化物の排出はまた、 $1992$ 年にはメタン濃度を約  $2\%$ 減らしており、これにより放射強制力はマイナスの値の  $-0.014\text{Wm}^{-2}$ となっている。

窒素酸化物による二つの相反する影響の程度は、おおよそ等しい。しかし、オゾンへの影響は北半球に集中しており、メタンへの影響は全地球的である。つまり、地域ごとの放射強制力に対する二つの影響は相殺しないのである。

飛行機雲の寄与割合は  $0.02\text{Wm}^{-2}$ であると推計されている。この影響は規模の点で航空機による二酸化炭素及びオゾンへの影響に近いが、より高い不確実性にさらされている。水蒸気、硫酸塩、煤による直接的影響は  $1992$ 年には少量であったと推計されている。また、航空機からの排出は巻雲の発生範囲を広げ温暖化を助長する。しかし、このプロセスはよく理解されていないので、巻雲による放射強制力の推計は航空機による全強制力の推計には含まれていない。

### **オゾンとUV-B に対する現段階の影響**

航空機の窒素酸化物排出によるオゾン増加はまた、地表に到達する紫外線の量を減らしている。オゾン濃度変化は緯度や季節によって異なる。既に述べたように、航空機による窒素酸化物排出は、 $1992$ 年7月の北緯  $45$  度地点で、オゾン濃度を  $6\%$ 上昇させたことと推計されている。その結果、紫外線照射計測尺度であり、いかに日焼けに効果があるかによって決まる赤斑線量率(erythemal dose rate)が、 $0.5\%$ 減っていたと推計されている。これに比べて、 $1970$ 年から  $1992$ 年の間に人工の塩素及び臭素化合物によって引き起こされたオ

ゾン破壊は、赤斑線量率を 4%増加させたと推計されている。

## 排出量は増加する

世界経済が成長するにつれ、航空機は急速に拡大してきた。1960 年以来、乗客輸送は年間平均にして 9%近く、世界の GDP 成長率の 2 倍以上の伸び率で上昇し続けてきた。伸び率はここ数年停滞しているものの所得の伸びをしのぎつづけており、今後もそうであることが期待されている。その結果、放射強制力に対して航空機が寄与する割合は、他の排出源に比べ将来伸びていくと思われる。

特別報告書の中では、1990 年から 2050 年までの航空機排出に関する将来のシナリオが展開されている。将来における航空機からの排出は、航空機輸送、燃料消費と乗客マイルあたりの排出量を減らすような技術改良、そして航空機輸送運営の効率性における成長と共に、多様化していくであろう。報告書に展開されているシナリオには、現在製造されている航空機と比べて、2050 年までに 40 から 50%燃料効率を上げる技術革新が盛り込まれている。シナリオではまた、航空機輸送の運営における改善が、20 年以内に航空機の燃料燃焼を 8 から 18%減じることになるだろうとしている。

これらの技術上、運営上の改善にも関わらず、航空機による今後の排出は増えるであろうと予想されている。例えば、2050 年までに、二酸化炭素の排出量は 1.6 も伸び、1992 年レベルの年間 0.14GtC の 10 倍になるであろうと予想されている。

気候とオゾンに対する影響の評価及び比較のための参考シナリオとして、7 個のシナリオのうち一つが選ばれた。参考シナリオでは、2050 年までに二酸化炭素の排出量は 3 倍増加し、0.40Gt-C/yr になるという。これは、同年、全人間活動から予測される全二酸化炭素総量の 3%に当る。1992 年、航空機からの二酸化炭素排出量は、全活動からの総排出量の 2%であった。

## 気候に対する亜音速飛行の将来的影響

将来の排出量に関する参考シナリオでは、2050 年、放射強制力に対して航空業が全体でどのくらい寄与するかに関しての推計は、 $0.19\text{Wm}^{-2}$ である。これは、1992 年の航空機寄与分から比べて、3.8 倍の増加となる。航空機に帰せられる全強制力の割合は、1992 年の 3.5%から、2050 年には 5%に増加する。

航空機が、地上の大気とその影響を変容していくプロセスが不確実であるため、正確な

航空機寄与分は明確ではない。報告書の中では、参考シナリオで予想されているように、2050年までに放射強制力が $0.1$ から $0.5\text{Wm}^{-2}$ 増加する確立は、67%であると推定されている。

もし将来の排出に関する不確実性が考慮に入れられているなら、航空機による放射強制力の変化しうる範囲は拡大する。七つの排出シナリオそれぞれから出されたベストの放射強制力推計は、 $0.13$ から $0.5\text{Wm}^{-2}$ と幅がある。

それぞれのガスや微粒子は、1992年時と同様、2050年にも同じ比率で全放射強制力に寄与する。二酸化炭素、オゾン、飛行機雲は、やはり航空機によるほとんどのプラスの強制力に寄与することとなり、メタンの削減は重要なマイナスの強制力になるのである。

### **オゾンとUB-B に対して超音速飛行が与える今後の影響**

亜音速航空機からの窒素酸化物排出量は、2050年までに北半球でオゾンを13%増加させ、1992年当時の航空機による効果の2倍以上になると推計されている。全オゾン量の増加は1.2%である。予想されるオゾン濃度の増加は、地表に到達する紫外線量をさらに減じることになるであろう。紅斑線量率は、1.3%減少すると推定されている。

### **超音速輸送が与える今後の影響**

航空機が大気に与える将来の影響が非常に不確かであることの原因は、超音速航空機の役割にある。現在、約12,000機の民間航空機があるが、その中で超音速航空機は13機しかない。報告書では、超音速航空機が2015年から増加し始め、2040年までに1000機に達するという仮定事例を調査している。これらの超音速航空機は、亜音速航空機のシェアに取って代わるのである。

超音速航空機は、亜音速航空機よりも8キロ高い、高度19キロで飛行する。この高度の違いは大気に対して多いに異なる影響を与えることになる。参考シナリオでは、民間超音速航空機による放射強制力は、それにとって代わられた亜音速の航空機よりも約5倍大きくなると推計されている。

1000機の超音速航空機が与える影響は、2050年に全航空機からの全放射強制力を、推定値にして $0.19\text{Wm}^{-2}$ から $0.27\text{Wm}^{-2}$ まで増加させるであろうというものである。この増加のほとんどは、成層圏における水蒸気の蓄積によるものである。強制力の増加は40%以上になる。航空機の気候に与える影響が、超音速航空機の民間航空機導入に非常に影響を受

けやすいことは明白である。

民間超音速航空機導入による効果はまた、成層圏のオゾンを減らし、地表に到達する紫外線量を増加させる。超音速航空機は、7月の北緯45度地点でオゾン量を1.3%減じ、亜音速航空機はオゾンを0.9%増加させる。全航空機による正味効果は、0.4%のオゾン削減と、0.3%の紫外線紅斑線量増加である。一方、亜音速航空機のみでは、オゾンの正味増加となると推計されている。

## 排出量削減のオプション

報告書の中で航空機からの排出量を削減する幅広い選択肢が調査されており、その中には、航空機とエンジン技術の変化、燃料中の硫黄含有量削減、運転技術の改善、規制的・経済的方策などが含まれている。

先に述べたように、航空機輸送管理における著しい技術的進歩及び改善により乗客マイル飛行当りの排出量が削減されるということが、排出シナリオに既に盛り込まれている。そしてそれでもなお、こういった変化を支配する乗客の需要増加が予想され、多くの航空機による排出が将来増加することが見積もられる。

排出量を一層削減するための政策オプションには、より厳しい航空機エンジン排出規定、環境に対しネガティブな影響をもたらす助成金や優遇措置の廃止、環境税、排出量取引、自主協定、研究プログラム、航空機に代わる鉄道、バスなどの利用が含まれる。地球大気に対する航空機の影響を緩和するための決定には、コストや、これらの選択肢の効果に関する一層の調査が必要である。

## 報告書のコピー申し込み

「航空機と地球大気」に関する IPCC 特別報告書は、以下の出版社で注文を受け付けています。

Cambridge University Press, 40 West 20<sup>th</sup> street, New York, NY 10011-4211

フリーダイヤルの電話番号は 1-800-872-7423 です。