

論文の内容の要旨

論文題名 航空機排気成分の成層圏オゾンに及ぼす影響に関する基礎研究

氏名 中谷 辰爾

1970年代に Crutzen や Johnston らによって航空機の排気成分が成層圏オゾン(O_3)を破壊すると警告されて以来、高高度を飛行する航空機などの排気ガスの高層大気に及ぼす影響が危惧され始めた。航空機の排気ガスには一酸化炭素(CO)、二酸化炭素(CO_2)、窒素酸化物(NO_x)、水素酸化物(HO_x)および硫酸化物(SO_x)が含まれるが、これらの成分が及ぼす影響としては、温室効果、エアロゾルや巻雲の形成、 O_3 の破壊など様々な影響が考えられる。排気成分の中でも、 NO_x や HO_x は触媒的な反応機構により O_3 を大きく破壊すると考えられている。これらの排気成分が成層圏 O_3 に及ぼす影響に関する研究は、地球規模の数値シミュレーションを中心に数値的に研究されてきた。これらの数値シミュレーションには様々なモデルが含まれており、結果はこれらのモデルに依存するために様々な不確実性が含まれる。これらのモデルの不確実性は実測による研究の欠如によるものと考えられる。

航空機の排気ガスが成層圏 O_3 に及ぼす影響に関する実測的な研究としては、ER-2やコンコルドの排気プルームを直接計測した研究や大気成分を測定した研究以外はほとんど行われていないのが現状である。また、ノズルから噴射された直後の排気プルーム中の O_3 と排気成分の反応に関しては翼端渦の影響を取り入れた計算やExpanding Box法を使用したいくつかの数値計算が行われているが、それらの研究は希である。排気直後の排気成分の挙動を詳細に調べるためにもさらなる数値計算および実験的研究が必要であると考えられる。

本研究は、航空機排気成分が成層圏に及ぼす影響に関する基礎的な研究として、実験および数値計算を通じて行う。排気成分の挙動および成層圏における O_3 濃度を測定する手法として二つの計測法を提案する。一つは排気プルーム中に含まれる NO_2 をNd:YAGレーザによって光解離させ、生じたNO分子をLIF法で追跡することにより速度を測定する流速測定法であり、もう一つは大気中に存在する O_3 に対しNO希釈ガスを徐々に導入し、NOと O_3 が完全に反応させそのNO分子をLIF法で計測することで O_3 濃度を測定するという気相滴定法である。流速測定法は非接触で計測を行えるのに加え、流速の乱れ成分および平均速度成分を測定できる利点を持つ。 O_3 の気相滴定法は、微小成分を測定するために、吸収法などのように長い光路長を必要とせず高精度でコンパクトに計測でき、LIF法を用いることにより高精度に測定することが可能である。本研究ではこれらの計測法を提案する

のに加え、成層圏における NO_x , HO_x および O_3 反応系を詳細に調べる。実験によりこれらの反応系を調べるために、真空チェンバ内に低圧水銀ランプを設置し、光化学反応を含む NO_x , HO_x および O_3 反応系に対して NO , NO_2 , HNO_3 , O_3 の濃度を LIF 法, フーリエ変換赤外吸収分光法, 紫外吸収法を用いることによって計測した。十分化学種が拡散しているという条件下において計測を行った。アメリカ標準大気において O_3 濃度が最も大きくなるという高度 25km, およびコンコルドなどの超音速機が飛行している高度 21km に相当する圧力である 2.67kPa と 5.34kPa の圧力雰囲気において計測を行った。光化学反応を含む反応系において NO_x および O_3 などの挙動を実験的に調べたのに加え、化学反応計算を同時に行った。化学反応計算においては感度解析を同時に行うことにより、反応系を詳細に解析し、それらの反応機構を明らかにした。これらの化学種による O_3 破壊機構を明らかにした。また、成層圏環境におけるこれらの反応系の数値計算を行うのに最適なパラメータを決定した。

上記計測によって、化学反応計算の妥当性を検証した後、成層圏環境における圧力雰囲気および温度環境において、光解離定数を日周期的に変化させることにより成層圏環境における NO_x , HO_x および O_3 反応系の挙動を詳細に調べた。また、感度解析を同時に行うことにより、日周期における各々の化学種の O_3 濃度に及ぼす影響を詳細に調べた。その結果、成層圏環境における日周期的な O_3 の挙動および排気に含まれる化学種の背景レベルの濃度での挙動を明らかにした。 HO_x が O_3 減少に及ぼす影響は NO_x 存在下においては小さく、逆に NO_x を NO_y に変換することにより O_3 濃度の減少を緩和する方向に働いていることがわかった。

これらの日周期的な挙動を計算した後、これらのデータを使用することにより、**Expanding Box** 法を使用することにより、排気プルームが拡散していく中における O_3 破壊機構を詳細に調べた。周囲の雰囲気の挙動は上記の日周期的な変動に従うとし、プルームの成分が周囲と混合することによって反応し変化していく様子を計算した。またプルームの排気時間の影響を調べるために、日中の 4 条件において排気を行い排気時間の影響を詳細に調べた。感度解析も同時に行うことにより排気直後の化学種の挙動を詳細に調べた。その結果排気プルーム中における上記化学種の O_3 反応系における挙動が明らかになった。 OH などの活性種が直接排気される場合においても、 HO_x は NO_x の O_3 の減少作用を緩和していることがわかった。

また、実験室内において、大型真空チェンバを用いることで、チェンバ内で O_3 を含む雰囲気中に NO 希釈ガスを噴射することにより、プルーム中における NO と O_3 の反応を詳細に調べた。同時に 3 次元反応性流体の計算を行うことによりこれらのプルーム中における反応を詳細に調べた。実験室内においてプルーム中での NO および O_3 の反応を調べることにより、それらの反応挙動の特性を把握することができた。数値計算と実験の結果、定性的に良い一致が見られ、3次元の流体計算が概ね妥当であることが示された。さらに、より排気ガスに近い排気成分を含むガスを、成層圏に排気した場合の数値計算を同時に行った。

その結果排気プルーム中での NO_x 、 HO_x および O_3 の分布が得られ、Expanding Box 法による結果の妥当性を検証したのに加え、プルーム中での反応機構を理解することができた。航空機の排気ガスによる O_3 の減少機構およびそれらの化学種の挙動に関して重要な知見が得られた。

本研究を通じ、成層圏プラットフォームにおけるいくつかの計測法が提案され、またそれらが実際に成層圏環境において適用可能であることが示された。また、航空機の排気に含まれる NO_x や HO_x の挙動を実験および数値計算によって詳細に調べることにより、成層圏背景レベルでのそれらの化学種の挙動および特性、また成層圏環境において航空機の排気プルーム中におけるそれらの挙動および特性に関して基礎的な知見が得られた。