

報告番号	甲 第 13621 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 **Statistical investigation of local strength and deformation of a shock wave interacting with turbulence**
(乱流と干渉した衝撃波の局所的な強さと変形に関する統計調査)

氏 名 田中 健人

論 文 内 容 の 要 旨

衝撃波と乱流の干渉は様々な現象の中で発生し、双方の特性変化に対して重要な役割を果たすといわれている。例えば、超音速飛行する物体から発生した衝撃波は大気の流れと干渉する。そのほかにも超新星爆発に伴って発生した衝撃波と周囲の流れとの干渉などがあり、物理学や工学において注目されている現象である。その中でも超音速飛行する物体と大気乱流との干渉はソニックブームという現象において重要な役割を果たす。ソニックブームは衝撃波によって爆発音が観測される現象で、過去に運用されていた超音速旅客機であるコンコルドが退役する要因にもなった。そのため、次世代の超音速旅客機の開発・運用において最重要な課題の一つとみなされている。ほかにも、2013年にロシアのチェリャビンスク州に落下した隕石によって衝撃波が発生し、多くの人々がけがを負っただけでなく、窓ガラスの破損といった建造物への深刻な被害も多数報告された。これらの衝撃波による被害を予測するためには、地上で観測される衝撃波による圧力の変化を正確に予測する技術が必要であり、その予測技術を確立するためには伝播する過程で干渉する大気乱流の影響を考慮しなければならない。

乱流との干渉により衝撃波に生じる変化として、衝撃波による圧力上昇の変動や衝撃波面の変形が先行研究において報告されてきた。本研究ではこれらの特性変化に関して統計的に解析を行って、新たな知見を得ることを目的としている。衝撃波による圧力上昇の変動は実験的に再現される準一様等方性乱流である格子乱流と球面衝撃波の干渉実験において報告され、乱流の速度変動と相関があることが明らかになった。また、波面の変形に関

するモデルが提案され、圧力上昇の変動と速度変動との関係が説明された。しかしながら、衝撃波面の局所的な曲率を計測することが困難であったため、モデルに関して直接的な証拠を示すまでには至っていない。また、波面の変形に関しては、主に数値計算を用いた研究において、衝撃波面の可視化を行うことで報告されてきた。そのなかで、衝撃波の特徴である不連続的な変化が部分的に消滅する場合があることなどがわかっているが、波面の変形に関して統計的な解析が行われておらず、定量的な特性に関しては明らかにされていない。このような衝撃波の変化に関しては衝撃波マッハ数と乱流マッハ数という 2 つのマッハ数が重要であることが示唆されている。しかしながら、実験的研究において、衝撃波が乱流と干渉した距離を意味する干渉距離によって波面の変形が成長することが示されたことで、2 つのマッハ数だけでなく、干渉距離の影響も考慮する必要があることが明らかになった。ところが、この実験においても可視化による定性的な評価にとどまったため、波面の変形が干渉距離に対してどのように成長していくのかを定量的に解析する必要がある。このような遷移的な状態は従来の数値計算では考慮されてこなかったが、大気乱流は間欠的な乱流であることが知られているため、大気を伝播した衝撃波の特性を考えるうえでは重要な過程であると考えられる。これらの問題を解決するために、本論文では衝撃波と乱流の干渉に関する直接数値計算を行った。大気という流れ場は非常に複雑な流れ場であり、それを完全に再現して数値計算を行うことは現在でも実現できていない。本研究では、理想的かつ単純化された乱流である一様等方性乱流と垂直衝撃波の干渉に関する直接数値計算を行い、乱流との干渉によって生じる衝撃波の特性変化に関して研究を行った。本論文の構成と得られた主な結果は以下の通りである。

第一章では上述したような本研究の背景について述べ、関連する既往研究の紹介と課題の説明を行った。

第二章では密度変動がほとんど存在しない低乱流マッハ数の一様等方性乱流と垂直衝撃波との干渉に関する直接数値計算を行い、衝撃波面背後の圧力上昇の変動を解析することによって衝撃波の局所的な強さを調査した。この計算は、全方向周期境界条件のもと一様等方性乱流を時間発展させるステップと衝撃波を入射させ、衝撃波と乱流の干渉を発生させるステップの 2 つのステップで構成される。計算スキームとして衝撃波近傍を WENO 法で五次精度化された Roe 法で、それ以外の領域を六次精度中心差分によって空間的に離散化を行い、四段四次の Runge-Kutta 法によって時間積分を行った。圧力上昇の変動に関して調査するために衝撃波面法線方向の圧力分布と衝撃波の初期条件である Rankine-Hugoniot の関係から局所の圧力上昇を定義した。その後、定義された圧力上昇の変動に関する統計的な解析を行い、圧力上昇変動がガウス分布に近い分布をとることや大スケールの変動が支配的であることを明らかにした。続いて、乱流の変動との関係を調査するために、圧力上昇変動と衝撃波面法線方向の速度変動との相関係数を計算した。この相関係数の分布から、相関が負であること、相関が最大になるのは衝撃波面から乱流の積分スケール程度後方の位置であること、波面の接線方向に対しては積分スケール程度の範

囲の速度変動と相関があることがわかった。ここで、負の相関は衝撃波面に対して対向する向きの速度変動と干渉した場合に圧力上昇が大きくなり、それとは逆向きの速度と干渉すると圧力上昇は小さくなることを示している。また、相関が衝撃波面よりも後方の位置で最大となるということは、干渉してから圧力上昇の変動に影響が生じるまでにある程度の時間を要するというを示している。これらの結果は実験によって報告された結果と定性的に一致しており、数値計算においても衝撃波の圧力上昇と乱流の速度変動の関係を再現できることがわかった。一方で、接線方向の相関の分布は新たな知見であり、衝撃波が影響を受ける速度変動がどの程度の範囲に存在しているのかを明らかにすることができた。さらに、過去の実験研究で提案されたモデルに関して検討するため、衝撃波面の形状と速度せん断の関係を調べた。乱流マッハ数が小さいため、衝撃波面の可視化から変形を確認することができない。そこで、圧力勾配の向きから局所的な衝撃波面の伝播方向を定義し、その分布から衝撃波面の微小な変形が生じていることを確かめた。さらに、そのように定義した衝撃波の伝播方向と乱流の速度せん断との結合確率密度関数を計算したところ、提案されているモデルを支持する結果が得られた。

第三章では局所的な乱流と垂直衝撃波の干渉に関する数値計算を行い、衝撃波面の変形に関する統計的解析によって、干渉距離に対してどのように波面の変形が成長するか調査した。本章の計算は(i) linear forcing を用いて乱流を時間発展させ、乱流の初期条件を生成するステップ、(ii) 衝撃波を静止流体中を伝播させて、衝撃波の初期条件を生成するステップ、(iii) 時間発展させた乱流と衝撃波が干渉する 3 つのステップで構成される。乱流の時間発展の計算 (ステップ i) では支配方程式は八次精度中心差分によって空間離散化され、五段四次の Runge-Kutta 法によって時間積分される。衝撃波の伝播(ステップ ii)と乱流との干渉 (ステップ iii) には第二章で用いられた計算コードをもとに MPI を用いて並列化したコードを用い、WENO 法によって五次精度化された Roe 法によって空間離散化し、四段四次 Runge-Kutta 法によって時間積分した。波面の変形に関して解析するためには、まず波面を検出する必要がある。本研究においては、衝撃波が圧力波であることを利用し、圧力勾配の最小値を用いて波面の位置を検出し、波面の位置の変動を衝撃波面の変形と定義した。波面の変形を衝撃波の平均位置に対してプロットした結果から、乱流との干渉が始まると波面の変形が成長し始め、今回調査した乱流マッハ数と衝撃波マッハ数の範囲内ではそれらによらず、積分スケールの 10 倍程度伝播すると変形が統計的に定常になることがわかった。これは衝撃波面の安定性と乱流による波面の変形が釣り合うことで達成されると考えられる。一方で干渉距離ではなく干渉時間に対して波面の変形をプロットすると、変形が統計的に定常になるまでの時間は条件によって異なるが、変形が成長する遷移過程においては変形の時間変化率が条件によらず一定であることがわかった。過去の数値計算による研究では衝撃波面を固定し、乱流を超音速で流入させるという手法をとっており、このような遷移過程を解析することが困難であった。加えて、実験では衝撃波の局所的な変形を測定することが困難であるため、定性的な評価にとどまっていた。したがって、こ

の遷移過程に関する知見は本研究の重要な独自性の一つである。また、波面の変形量の確率密度分布とエネルギースペクトルは圧力上昇の変動に関するそれらの統計量と同様の傾向にあることがわかった。また、波面の変形と局所の衝撃波の強さを調べたところ、波面が平均の衝撃波位置よりも後方に位置している場合に衝撃波は強くなり、前方に位置している場合に弱くなることがわかった。

第4章では、本論文の総括を行った。本研究の成果として、衝撃波による圧力上昇の変動と波面の変形に関して、定量的な特性を明らかにすることができた。衝撃波背後の圧力上昇の変動と関係のある乱流の変動が明らかになったことでソニックブームに対して影響を及ぼす乱流の速度変動に関する知見を得ることができた。衝撃波面の変形に関して、遷移的な状態の挙動を明らかにできたことで、間欠性の強い大気乱流による影響を考えるうえで重要な知見を得ることができた。また、本研究で得られた知見は、物理量の不連続性が消滅する衝撃波面の崩壊を考えるうえでも重要になることが期待される。