

報告番号	甲 第 13158 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 **Change in characteristics of a shock wave
caused by interaction with turbulence**
(乱流との干渉による衝撃波の特性変化)

氏 名 猪熊 建登

論 文 内 容 の 要 旨

衝撃波は圧縮性流体力学の代表的な現象であり、工学・科学の様々な分野でみられる。衝撃波に関連する重要な問題の一つとして、「衝撃波・乱流干渉」が挙げられる。航空工学においては、航空機の超音速・遷音速飛行に伴う衝撃波が、機体やエンジン、翼周りの乱流境界層と相互作用する際に、衝撃波・乱流干渉が観測される。干渉によって、衝撃波面の非定常的な運動や変形、衝撃波背後の圧力、密度などの変動が引き起こされ、航空機の空気力学的な飛行性能の低下をもたらすことが知られている。また、超音速飛行によって生じる衝撃波による騒音（ソニックブーム）の圧力波形が大気乱流との干渉で大きく変化することも実機試験などで確認されている。一方で、乱流の特性と、それとの干渉によって衝撃波に起こる変化の関係について詳細に調べられた研究例が少なく、航空機が生じる衝撃波に対する乱流の影響を適切に評価することができていない。ゆえに、乱流の影響を受けた衝撃波についての基礎研究を行い、その特性を十分に理解することが、超音速旅客機などの次世代航空機の開発や飛行性能の向上、音響公害に対する基準設計において必要不可欠である。

これまで、実験室レベルで衝撃波・乱流干渉の基礎研究が行われてきたが、装置の制約などを受け、衝撃波の統計解析に必要な実験回数を確保することや、乱流や衝撃波の条件を正確に測定して干渉に与える影響を評価することは難しく、系統的な調査が十分にできていない。数値計算では、主に衝撃波の影響を受けた乱流の特性変化に主眼をおいて衝撃波・乱流干渉の研究がなされているうえ、多くの研究では、大きな密度・温度変動を伴う圧縮性乱流を用いており、乱流の速度変動が衝撃波に与える影響を評価することができていない。

本論文では、衝撃波・乱流干渉において、乱流の速度変動の影響を受けた衝撃波の特性を系統的に調査することを目的とした。コンピュータで自動制御されたピストン駆動式衝撃波管の開放端から放った球面衝撃波を、風洞内に生成した乱流場中に伝播させる実験を複数回（一つの実験条件につき 400~500 回）行い、衝撃波の統計特性の解析を行った。また、乱流の速度変動と干渉した衝撃波に関する理論モデルを構築し、実験結果と比較することで物理的考察も行った。

本論文の構成は以下の通りである。まず、第一章は緒論であり、衝撃波・乱流干渉問題の学術的意義やこれまでに行われてきた研究、その問題点についてまとめた。本論文では、衝撃波・乱流干渉の未解明な問題から次の 3 点を取り上げた。

1. 乱流および衝撃波の強度に関する条件と干渉によって生じる衝撃波の背後過剰圧変化の関係
2. 乱流の瞬間的な速度の空間分布と、それとの干渉によって得られる衝撃波の背後過剰圧の関係
3. 乱流速度の統計的な非一様性が衝撃波の背後過剰圧に与える影響

これらの解決を目指し、乱流中を伝播する衝撃波の背後過剰圧特性に関する実験および理論モデルを用いた考察（第二章）、乱流の速度変動と衝撃波の過剰圧の同時計測（第三章）、非一様性乱流の速度とそれを伝播する衝撃波の過剰圧の同時計測（第四章）を行った。第五章は本研究のまとめである。以下に第二章、第三章、第四章で行った具体的な研究内容を示す。

第二章は、球面衝撃波と格子乱流の干渉に関する風洞実験であり、乱流の速度変動の影響を受けた衝撃波の圧力波形を計測した。格子乱流は準一様等方性乱流の代表として知られており、衝撃波に対する乱流速度分布の非一様性の影響を排除し速度変動の大きさのみの影響を調査するのに適している。本研究では乱流マッハ数 $\sim 10^{-2}$ ほどの非圧縮性格子乱流を用いることで、乱流の密度変動・温度変動などの影響も排除した。衝撃波は衝撃波管の開放端から放出された後、球面状に広がりながら格子乱流中を伝播し、圧力センサによって圧力波形が計測される。衝撃波マッハ数と乱流マッハ数を変化させ、様々な強度の衝撃波と乱流を用いて実験を行うことで、これらのパラメータに対する衝撃波の圧力特性の依存性を評価した。本研究では、球面衝撃波が伝播に伴って減衰することを利用し、衝撃波管の開放端と圧力計測部の距離を調整することで圧力センサの位置での衝撃波マッハ数を変化させた。また、格子乱流は、風洞のテストセクション内に格子を設置することで生成しており、格子のサイズや平均流速、格子と圧力計測部との距離を調整することで、圧力計測部における乱流マッハ数を変化させた。実験条件として、乱流マッハ数・衝撃波マッハ数の組み合わせについて、8 条件を考えた。実験の結果、衝撃波の背後過剰圧ピーク値の平均値は、衝撃波マッハ数が同じとき、本研究で考えた範囲で乱流マッハ数を変えても、

その変化は2%以下に留まり、大きく依存しないことがわかった。一方で、過剰圧ピーク値の変動の標準偏差と平均値の比は、乱流マッハ数の増加に伴って増加し、衝撃波マッハ数の増加に伴って減少することがわかった。また、過剰圧ピーク値の変動の歪度、尖度は、本研究で考えた実験条件では、それぞれ0, 3に近い値をとり、ガウス分布に近くなることもわかった。さらに、乱流と干渉した衝撃波についての理論モデルも構築し、考察を行った。このモデルでは、乱流の速度変動によって衝撃波が局所的に変形し、衝撃波マッハ数・背後過剰圧が変化することを考えた。モデルで考えた背後過剰圧変動は、実験値とよく一致し、衝撃波の変形が過剰圧の変動特性に対して大きく影響している傍証を得た。

続いて第三章では、球面衝撃波・格子乱流の干渉実験において、衝撃波の圧力のみならず、衝撃波と干渉する乱流の速度も同時に計測し、乱流の速度の瞬間的な特性と衝撃波の圧力特性の関係を調査した。速度の計測には熱線流速計を用いた。本研究では、格子のサイズや主流の平均速度を変えることで、4種類の実験条件を考えた。熱線流速計で計測された速度の時系列データから Taylor の凍結仮説によって見積もられた格子乱流の主流方向空間分布と、それに干渉した衝撃波の過剰圧特性の関係を評価した。乱流の速度変動と衝撃波背後過剰圧の変動の相関係数を計算した結果、衝撃波の伝播方向の逆向きに乱流の速度が増加したとき、それに干渉する衝撃波の背後過剰圧が増加することがわかった。相関係数の計算において、乱流の速度変動の位置や長さスケールをパラメータとして考えた結果、衝撃波が衝撃波管の開放端から圧力センサに到達するまでの波線上で干渉した乱流の速度変動と衝撃波の過剰圧変動が強く相関することや、乱流の積分スケールオーダーの長さスケールの速度変動が過剰圧変動に対して与える影響が大きいこともわかった。さらに、圧力計測部から積分スケールほど離れた位置で干渉した乱流の速度変動に対して、衝撃波の過剰圧変動が最も強く相関することがわかり、衝撃波が乱流と干渉し、その影響が過剰圧に表れるまでに有限の応答時間を要することを示唆する結果が得られた。乱流の速度変動による衝撃波面の変形に関するモデルを用いることで、速度変動の符号と過剰圧の増減の関係や、過剰圧変動の応答時間について示すことができた。

さらに、第四章では、非一様性乱流と衝撃波の干渉に関する実験を行い、乱流の非一様な速度特性が干渉する衝撃波の統計的特性に与える影響を調べた。本研究では、非一様乱流として円柱後流を用いた。円柱は、風洞のテストセクションの内部の上下に2本設置しており、衝撃波は、上側の円柱 (Reference Cylinder: RC) の後流と下側の円柱 (Disturbance Cylinder: DC) の後流を通過し、圧力センサで圧力波形が計測される。この際に、RCの後流の速度を熱線流速計で同時に計測した。DCの設置位置を変えることで、風洞内の鉛直方向に速度分布の平均や変動の非一様性を与え、RCの速度と衝撃波の背後過剰圧の関係に対する影響を調べた。また、これらの結果を、衝撃波を層流と干渉させた場合および格子乱流と干渉させた場合の結果と比較し、速度分布の非一様性の効果を評価した。衝撃波背後過剰圧のピーク値の平均は、層流や格子乱流など、統計的に一様な流れ場を伝播する場合はほとんど変化せず、速度変動の標準偏差の大きさに依存しない結果とな

った。一方で、円柱後流中を伝播する場合は、円柱後流の速度欠損が大きくなるにつれて減少することがわかった。これは、速度欠損によって衝撃波の波面が伝播方向に凸状に変形し、衝撃波が通過する局所的な流路が拡大することで衝撃波背後の圧力が減少したためであると考えられる。また、背後過剰圧ピーク値の標準偏差は、DC の速度変動の標準偏差が大きくなるにつれて増加した。さらに、RC の後流とピーク過剰圧の相関係数を計算した結果、DC の後流の速度変動の標準偏差の増加に伴って、相関係数が減少することがわかった。衝撃波の伝播経路上のある点で干渉する乱流の速度変動が衝撃波の背後過剰圧に与える影響は、その後により大きい速度変動と干渉すると小さくなることを示す結果であり、乱流の速度変動分布の非一様性が衝撃波の特性変化に与える影響を確認できた。

以上のように本論文では、乱流の影響を受けた衝撃波の統計に関する基礎研究を、風洞内に生成した乱流と衝撃波の干渉に関する実験および理論モデルの構築によって行った。結論として、衝撃波背後のピーク過剰圧の変動の標準偏差が乱流マッハ数と衝撃波マッハ数の関数で整理されることや、衝撃波が乱流の速度変動と干渉し、その影響が背後過剰圧変動に現れるまでに応答時間を要すること、乱流の速度の平均・変動分布の非一様性は、衝撃波背後の過剰圧の平均値・標準偏差にそれぞれに大きく影響することなどを得た。