

報告番号	甲 第 14523 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 **Modulation and moderation of shock wave front by unsteady interaction with grid turbulence**
 (格子乱流との非定常干渉による衝撃波面の変調と緩和)

氏 名 福嶋 岳

論 文 内 容 の 要 旨

圧縮性流体力学の重要課題である衝撃波－乱流干渉では、乱流の速度擾乱の影響を受けて衝撃波が変調し、衝撃波背後過剰圧の局所的な増加や緩和が発生する．この衝撃波変調は、超音速飛行による衝撃波が引き起こす地上騒音問題（ソニックブーム）をはじめ、実用上重要な工学的課題に深く関連するため、現象の基礎的な理解が必要である．本博士論文では、衝撃波－乱流干渉における衝撃波の変調現象について実施した実験研究および考察をまとめた．

第 1 章では、衝撃波－乱流干渉に関して、過去に行われた研究を整理し、本研究の位置付けと目的を示した．本研究が対象とした衝撃波－乱流干渉における衝撃波面状態の変調については、これまで主に数値解析によって研究が進んでおり、不連続的な状態量変化を伴う衝撃波面に、連続的な状態量変化が局所的に発生する波面の「崩壊」現象や、衝撃波による不連続性が全域的に消失する波面の「消失」現象など、大規模な衝撃波面の変調が報告されている．しかしながら、数値解析では衝撃波を計算区間にとどめるための人工的な外力を与える境界条件の適用や、実現が困難な非常に強い強度の乱流が使用されるなど、数値解析研究によって得られた結果が実現象に適応できる保証は無く、現実の衝撃波と乱流の干渉において、衝撃波面の「崩壊」や「消失」現象が起こるかどうかは未解明であった．一方で、実験研究においては、実験系構築の難しさもあり、衝撃波－乱流干渉における衝撃波面状態の変化について、衝撃波マッハ数や乱流マッハ数といったパラメータが衝撃波面状態に及ぼす影響について、系統的な調査を行った例はなかった．上記の課題を残

す衝撃波－乱流干渉における衝撃波変調の研究について、本研究では世界的にもユニークな実験装置である「対向衝撃波管」を活用し、衝撃波を格子乱流中に非定常的に伝播させ、伝播に伴う衝撃波面の変調、緩和現象を評価することで、当該現象に新たな知見を提供することを目的とした。具体的には、衝撃波管における衝撃波形成特性の取得による実験系の確立、平面衝撃波と格子乱流の干渉における衝撃波面変調に対するパラメータ評価、衝撃波面「消失」現象の実験実証と理論モデル構築を実施した。

第2章では、対向衝撃波管による衝撃波－乱流干渉実験の実施へ向けた基礎研究として、衝撃波形成装置である衝撃波管において、高圧気体と低圧気体を隔てるセロファン隔膜の破断過程を高速度撮影し、隔膜の開口過程と衝撃波形成との関連を調査した。隔膜に作用する破断前応力が 23.7 MPa より大きい場合、撃針による作用点を中心にセロファン隔膜が複数の花卉を形成しながら破断し、その後花卉が開口運動する様子が確認された。花卉状の破断が発生する応力条件では、セロファン隔膜を破断するとき裂伝播速度は圧力差や衝撃波管サイズ、低圧側の湿度を変えても約 855 m/s で一定であり、形成される花卉の数は破断前応力のみの線形関数で決定されるという実験則を得た。花卉状に破断したセロファン隔膜の開口運動を運動方程式モデルによって解析し、衝撃波の形成過程との関連を調査した結果、衝撃波形成過程に影響を及ぼす隔膜の開口過程は、開口過程の初期過程（投影開口度約 20%までの過程）であることが明らかとなった。これは、セロファン隔膜の実効的な開口時間が短く、衝撃波の形成にとって効果的であることを示している。このように、本章では衝撃波管において、セロファン隔膜の破断法則と開口過程を可視化し、セロファン隔膜の開口運動と衝撃波形成の関連を明らかにした。これらの成果は、圧力差が小さい状態で隔膜を開口させる必要がある、低圧作動の衝撃波管実験において、特に重要な知見となった。

第3章では平面衝撃波と格子乱流の干渉実験を、試験部に対して左右から衝撃波および対向流を形成することができる対向衝撃波管によって実施し、光学可視化法によって格子乱流中を伝播する衝撃波を可視化することで、衝撃波マッハ数、乱流マッハ数、衝撃波と乱流の干渉距離が、衝撃波の横投影光学可視化画像に及ぼす影響を評価した。実験では、衝撃波マッハ数が高いほど乱流との干渉によって生じる衝撃波の波面変形は小さくなる傾向が得られた。同じ衝撃波マッハ数の衝撃波に対しては、乱流マッハ数が高いほど衝撃波面の変形量が大きくなった。またこれらの波面変形は干渉距離の増加とともに増加する非定常性が見られ、干渉距離が格子乱流の積分スケールの 20 倍程度となると、衝撃波面の変形量が一定値となる傾向が得られた。衝撃波マッハ数と乱流マッハ数（可視化観測部での代表値）の組み合わせが $(1.01, 0.014)$, $(1.01, 0.009)$, $(1.03, 0.014)$ といった衝撃波マッハ数が比較的低く、乱流マッハ数が比較的高い条件では、シュリーレン可視化画像上で衝撃波が部分的に消失する現象が見られ、数値解析による先行研究において衝撃波面の「崩壊」と分類されている、衝撃波の不連続性が局所的に失われる現象が確認された。この衝撃波の「崩壊」が発生する条件については、直接数値計算による先行研究で提唱されている衝

衝撃波マッハ数と乱流マッハ数の条件をいずれも満たすものであり、良い一致が確認された。このように本章では、数値解析で提唱されている衝撃波の「崩壊」現象が発生することを可視化実証し、発生指標を初めて実験によって検証した。さらに、衝撃波の「崩壊」条件を満たしていても、実験では格子乱流の積分スケールの 20 倍程度の干渉距離を経なければ衝撃波面の「崩壊」には至らず、衝撃波の波面状態に対し非定常性を表すパラメータである干渉距離が大きな影響を与えていることが明らかになった。

第 4 章では近年の数値解析研究によって報告された、従来不連続的な物理量変化を示す衝撃波面が全域的に連続的な変化に遷移する、衝撃波面の「消失」現象について、シュリーレン光学可視化法による実験実証と、衝撃波と流れ場の一次元干渉理論であるリーマン問題の解に基づいた解析を実施した。実験では、衝撃波マッハ数 1.006, 1.013 の衝撃波が乱流マッハ数 0.025 の乱流を伝播していくと、干渉前にははっきりと不連続を示していた衝撃波が、干渉距離の増加に伴って可視化画像上において次第に消えていき、乱流の積分スケールの 10 倍程度の干渉距離を経ると衝撃波面が全域的に消失する現象が観測され、衝撃波面の「消失」現象が生じることを初めて実験によって示した。一方で、衝撃波マッハ数が比較的高い 1.034, 1.046 の条件では、乱流中を伝播することで衝撃波の大規模な変形が確認されたものの、干渉距離が増加しても衝撃波が可視化画像上で消失することは確認されなかった。さらに、得られた衝撃波面の「消失」現象を理解するため、一次元の系で衝撃波と速度場の干渉をリーマン問題によって定式化し、干渉によって衝撃波の圧力上昇が無くなる、もしくは膨張波に遷移して圧力が低減するための条件を導出した。一次元解析で得られた結果を、乱流中の速度分布の確立密度をガウシアン仮定し多次元系に拡張することで、乱流中を伝播する衝撃波面が「消失」する指標を、衝撃波マッハ数と乱流マッハ数を関数として提唱した。導出された条件と実験結果の比較を行った結果、実験結果との良い一致が確認された。このように本章では、衝撃波が乱流中を伝播していく過程で破面が消失する指標を初めて提唱し、流れ場との干渉による衝撃波緩和への応用へ向けても重要な知見が得られた。

第 5 章では、本研究で実施した衝撃波管における衝撃波形成特性の調査と、対向衝撃波管を使用した平面衝撃波と格子乱流の干渉実験で得られた成果について、以下のようにまとめた。(1)衝撃波管においてセロファン隔膜は一定値以上の応力を与えれば、花卉状に破断・開口した。また隔膜開口の初期過程が衝撃波形成を決定づけており、これは弱い衝撃波の形成にとって有効な特性であった。(2)平面衝撃波と格子乱流の干渉では、衝撃波マッハ数 1.03 以下の弱い衝撃波に対して、乱流マッハ数 0.014 以上の場合、積分スケールの 20 倍程度の干渉距離を経れば、数値解析研究で見られていた衝撃波面の「崩壊」と呼ばれる連続的な状態量変化が衝撃波面上に局所的に発生する波面状態が生じた。波面崩壊の発生条件についても、先行研究で提唱された条件と良い一致を示した。(3)さらに乱流強度が高い乱流マッハ数 0.025 の場合、衝撃波マッハ数 1.013 以下の衝撃波は乱流との干渉によって波面の不連続性が失われる箇所が増加し、積分スケールの 10 倍程度の干渉距離を経れば、

衝撃波の不連続性が全域的に消失した．この衝撃波の伝播に伴う「消失」現象の発生条件は，衝撃波と流れ場の一次元干渉理論であるリーマン問題の解に基づいて本研究独自に導出した発生条件と良い一致を示した．これらの成果は，非定常的な要素である干渉距離が衝撃波面の変調と緩和に影響を及ぼしていること示しており，衝撃波－乱流干渉における非定常性の重要性を示すものである．またリーマン問題の解を用いた解析では，衝撃波は流れ場との干渉によって圧力上昇が緩和され，不連続的な状態から連続的な状態へと遷移されることが示され，実験でも衝撃波の波面が消失することが確認された．この成果は，今後の流れ場による衝撃波の積極的な緩和手法の確立，そしてソニックブームなどの実問題への応用展開へ向けて重要な足掛かりになることが期待できる．