

主 論 文 の 要 約

論文題目 Shock Wave Modulation by
Local-Disturbance/Turbulence
(局所的な擾乱/乱流による衝撃波の変調)

氏 名 丹波 高裕

論 文 内 容 の 要 約

圧縮性流体力学において、衝撃波と擾乱との干渉についての多くの未解決問題がある。衝撃波は背後に高圧力領域を伴い、その発生自体が、超音速旅客機の揚抗比低下や飛行に伴うソニックブーム、爆発が誘起する爆風被害といった工学的な問題に直結している。その作用の大きさは背後圧力レベルとその変動の度合いに依存するが、これらは波面の挙動と密接に結びついている。衝撃波が伝播する過程で擾乱が作用すると、相対衝撃波マッハ数が局所的に変化し、衝撃波背後の圧力場は変調する。本論文ではこれを「衝撃波の変調 (shock wave modulation)」と記述する。衝撃波の変調を引き起こす擾乱は温度・密度擾乱と速度擾乱に大別される。温度・密度擾乱の例として、局所的な気体加熱によって生じる高温・低密度領域が挙げられる。速度擾乱としては、平板上に発達する境界層や自由噴流といった周囲との速度勾配や、乱流中の速度変動が挙げられる。こうした擾乱との干渉は衝撃波の関わる現象を複雑にする一方で、擾乱を用いて衝撃波背後の高圧力場を制御する可能性を秘めている。本研究では、このような積極的な利用も視野に入れつつ、擾乱との干渉が衝撃波の変調に与える影響を評価することを目的とした。

まず、衝撃波-境界層干渉に対して局所的な温度・密度・速度擾乱が及ぼす影響について評価を行った。実験は主流マッハ数 1.92 の大気吸い込み式超音速風洞に、境界層が発達する円柱部と衝撃波を発生させるフレア部を有する軸対称模型を設置して行った。高速度カメラを用いてシュリーレン法による可視化を行い、得られたグレースケール可視化画像の各点での輝度値時間履歴を周波数解析することで、衝撃波の振動周波数を評価した。速度擾乱の一種である境界層と衝撃波が干渉した場合には、非定常な流れ場が誘起され、衝撃波の振動が確認された。この衝撃波の振動スペクトルは広帯域に分布しているものの、10

kHz 以下の低周波数帯に強いピークを持つものであった。このような流れ場に対し、高繰返しパルスレーザーで生成した周期的な温度・密度・速度擾乱を人為的に供給した。30 kHz 以下の周波数で擾乱を与えた場合には、衝撃波の振動スペクトルは擾乱を供給する周波数で強いピークを示した。一方で、40 kHz 以上で擾乱を与えた場合には、衝撃波の振動スペクトルは擾乱の周波数でピークを持たず、20 kHz 以下の比較的低い周波数での振動が支配的となった。このとき連続する 2 つの被擾乱領域は互いに接触しており、それらの相互干渉が衝撃波の変調に影響したと考えられる。

つぎに、局所的な乱流が爆風（爆発による衝撃波および背後流れ、以降「ブラスト波」）背後の圧力場に与える影響を調査した。球状衝撃波の 3 次元性が背後圧力場に与える影響を抑制するため、火薬爆発によって生じるブラスト波を屋外で長距離伝播させることで、弱い準平面衝撃波を実験に用いた。送風機とダクト、格子から成る乱流源を設置し、圧力測定点で 0.7 m/s 程度の速度変動 rms をもつ乱流を生成した。圧力測定には乱流源の中心軸に対して対称に設置した 4 台のマイクロホンを用い、ブラスト波の背後圧力場を無風状態、乱流と干渉した状態のそれぞれについて計測し、統計処理した。無風状態の大気中を伝播してくるブラスト波の衝撃波マッハ数は 1.003 であり、ピーク過剰圧力の標準偏差は平均値の 2% であった。一方で、乱流と干渉した場合には、乱流中の速度変動が相対衝撃波マッハ数の局所的な変化をもたらし、ブラスト波の圧力波形ならびにピーク過剰圧力に測定点ごと、ショットごとの不規則な変動をもたらした。ピーク過剰圧力の標準偏差は平均値の 11% となり、乱流との干渉によって 7 倍増大することが明らかとなった。

さらに、平面衝撃波と格子乱流を様々な条件下で干渉させることが可能な新たな装置「対向衝撃波管」を開発し、これを用いて平面衝撃波の波面が格子乱流との干渉で受ける影響を評価した。衝撃波管で時間同期された平面衝撃波の生成を実現するために、セロハン隔膜とエアシリンダーを用いた能動破膜機構を開発した。これを備えた高圧室を低圧室両端に 2 つ独立に設置することで、衝撃波と対向流れの干渉をそれぞれの条件を独立に設定して実施できる衝撃波管を実現し、作動実証試験を行った。能動破膜機構の作動誤差は干渉点の誤差に換算すると衝撃波管全長の 1/169 以下であり、十分な精度を有していることを確認した。加えて、作動領域を拡大するために、多孔平板を積層した多孔質体で衝撃波を減衰する機構を開発し、衝撃波マッハ数 1.01 の垂直衝撃波を生成できることを実証した。これらの装置を用い、格子乱流が垂直衝撃波の波面に与える影響を高速度カメラを用いたシャドウグラフ可視化法から評価した。衝撃波が乱流に対して相対的に弱い場合には、相対衝撃波マッハ数の局所的な変化により波面に凹凸が生じ、干渉距離とともに衝撃波の実効厚みが増大した。また、特定の条件下では、可視化画像上で衝撃波面が部分的に消滅している状態を捉えており、相対衝撃波マッハ数が局所的に 1 を下回り衝撃波面が崩壊していることが示唆された。一方で、衝撃波が相対的に強い場合には、こうした変調は小さかった。

以上のように、本研究では様々な形態の擾乱が衝撃波の変調に及ぼす影響を評価し、以

下の結論を得た。(1)衝撃波が境界層との干渉によって背後流れに周期的な変動をもたらす系に対して、温度・密度・速度擾乱を規則的に与えた場合、低周波数の擾乱に対しては与えた擾乱の周波数に等しい衝撃波振動が誘起された。しかし、擾乱の周波数をより高くすると、衝撃波システムの自励的変動が抑制されるのみならず、擾乱源の周波数と等しい振動も抑制することができた。また、衝撃波が速度変動場と干渉した場合には、衝撃波背後圧力場の不規則な変調が誘起された。(2)平面衝撃波と対向流との干渉を相互同期を取って実施することができる「対向衝撃波管」を開発した。これにより、平面衝撃波と格子乱流の干渉について、衝撃波の乱流中伝播距離を変化させた実験が可能となった。衝撃波が速度変動場と干渉した場合、干渉の影響は衝撃波と速度変動の強弱関係に依存した。相対的に弱い衝撃波の変調はより顕著であり、変調の大きさは干渉距離と正の相関があった。