

報告番号	甲 第 11595 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 **Characteristics of grid turbulence and turbulence modulation after interacting with a shock wave**
(格子乱流の特性および衝撃波干渉による乱流変調機構)

氏 名 北村 拓也

論 文 内 容 の 要 旨

乱流は、我々の生活に密接した様々な流れ、気象やダイナモなどの地球物理現象、太陽風や降着円盤などの宇宙物理現象など様々な場面で見られる現象である。それゆえ、乱流現象を理解することは理学・工学の幅広い分野に渡って重要である。またグローバル化が進む現在、JAXA を中心に次世代 超音速旅客機(SST)の開発が推進されているが、環境問題において重要な騒音問題(ソニックブーム)問題が解決されていないため、SST の飛行は未だに実現されていない。これは、衝撃波-乱流干渉における相互作用が未解明であることが原因として挙げられる。そこで本研究では、基礎的な乱流場である格子乱流の特性およびそれとの衝撃波干渉による乱流変調機構を解明することを目的として、実験的・理論的研究を実施した。本論文の構成は以下の通りである。第一章は緒論であり、格子乱流、衝撃波-乱流干渉に関するこれまで行われた研究についてまとめた。第二章では、一様等方性乱流の基礎理論および Rapid distortion theory についてまとめた。第三章では、現実に生成される基本的な格子乱流場の実験による現象解明を行い、第四章では、格子乱流に衝撃波が及ぼす影響を実験的に調べ、第五章では、RDT を用いて衝撃波の影響を受けた乱流の変化を解析的に調べた。そして、第六章では、本研究のまとめである。以下、本研究で行われた内容を第三章、第四章、第五章、第六章の順に記す。

第三章は、格子乱流の実験的研究である。一様等方性乱流の統計理論に基づくと、乱流エネルギーの減衰率は、大きいスケールの動力学に関連している。減衰乱流の理論では、初期条件によって乱流エネルギーの減衰率が決定づけられるので、初期の低波数域のエネルギー

スペクトルの形(k のべき乗)に依存する。スペクトルのべき指数は様々な値が考えられるが、物理的な意味をもつ Saffman 型および Batchelor 型が有力視されている。初期に線形運動量が卓越すると、Saffman 型の乱流場が生成される一方で、角運動量が卓越した場合に、Batchelor 型の乱流場が生成される。数値計算では、初期条件において様々な初期条件が設定可能であるが、実際の乱流(格子乱流)などでは、どのような流れ場が格子によって生成されているのかは、学術的に興味深い。本研究は、異なる格子レイノルズ数および異なる格子(角柱および円柱)をパラメータとし、熱線流速計を用いて、流れ方向および鉛直方向の速度変動を計測し、エネルギー減衰率や不変量を調べた。低乱風洞のテストセクション入口に格子を設置することにより、乱流を生成し、流れ方向速度変動の計測は、上流 $x=500\text{mm}$ から下流 2350mm まで、鉛直方向の速度変動の計測は、上流 $x=500\text{mm}$ から下流 2100mm まで 50mm 間隔で計測を行った。その結果、乱流レイノルズ数が低い場合、 A (標準 $k-\varepsilon$ モデルの定数)は Reynolds 依存性があることを示した。一方で、十分大きな乱流レイノルズ数では、エネルギー減衰の減衰指数、積分スケールおよび Taylor スケールは Saffman の理論値に近い値を取ることが分かった。また、不変量も Saffman 乱流の特徴を満足する傾向を持つことが分かった。形状による影響(角柱または円柱)に関しては、エネルギー減衰率、渦スケールおよび不変量は、レイノルズ数が同じ場合と同様の値を持つ傾向があり、円柱の方がより周期的な構造を持ち、角柱の場合に比べて不変量が一定となる領域は十分長い距離必要であることがわかった。なお本実験で得られた結果は、RDT 解析においてモデルとして使用される。

第四章の内容は衝撃波と乱流の干渉に関する実験的研究である。衝撃波・乱流干渉の実験を遂行するために、Sasoh et al (2014)にて用いられていた無隔膜衝撃波管を再設計し、自動運転・制御できるようにプログラミングし、装置の開発を行った。製作した無隔膜衝撃波管を定量的に評価するため、衝撃波を 200 回形成し、衝撃波の過剰圧を計測した。その結果、過剰圧の標準偏差/平均過剰圧=0.01%であることから、製作した衝撃波管は、再現性の良い衝撃波管であると言える。また、衝撃波管高圧室の初期圧力を $200\text{kPa}[\text{gauge}]$ から $900\text{kPa}[\text{gauge}]$ の範囲でシュリーレン法を用いて、衝撃波の可視化を行い、衝撃波が下流から上流に伝播している様子を確認した。また、格子をテストセクション入口に設置し、乱流を生成した場合でも衝撃波がきちんと伝播していることを確認している。本論文では、衝撃波の影響を受けた乱流の構造変化を調べるため、熱線流速計を用いて流れ方向速度の変化を調べた。衝撃波管高圧室の初期圧力は $900\text{kPa}[\text{gauge}]$ に固定し、無風時における速度の計測位置における衝撃波マッハ数は、1.05 である。Taylor スケールに基づいた乱流レイノルズ数をパラメータとし、乱流の変化について調べた。ここで、流れ方向速度の測定時間は、乱流の特性時間より長くなるように設定した。一回の計測では、測定時間が短いため、250 回の計測を行い、アンサンブル平均を用いて統計量を評価した。その結果、速度変動 r.m.s 値が増加すること及び積分スケールが減少することがわかった。これは、既往の研究と定性的に一致する。また、乱流の変化はレイノルズ数依存性があり、速度変動 r.m.s

値はレイノルズ数が増加するにつれ、一定の値を取る傾向を持つことがわかった。一方で、積分スケールは、レイノルズ数が小さくなるにつれ、減少が著しいことがわかった。直交 wavelet 変換を用いたスペクトル解析により、高波数域のエネルギーが増加することがわかった。これは、速度変動 r.m.s 値の増加は、高波数域のエネルギー増加が原因であることを示唆する。一方連続 wavelet 変換を用いて時間-周波数解析を行った結果、衝撃波が熱線プローブを通過する前(干渉前)、すなわち、格子乱流では、時間に対して、周期的に同じ大きさの正負の値が低周波数域に見られるが、衝撃波が熱線プローブを通過した直後(干渉後)では、速度変動に明らかな変調が見られた。衝撃波干渉後では、低周波数域から高周波数域においてエネルギーが分布しており、これは、衝撃波背後で小さいスケールの渦が形成されていることを示唆する。また、本論文の特色である非圧縮性乱流と圧縮性乱流の違いに関して、異なるメカニズムが生じる点を現象論に基づいて議論した。さらに、運動学的な側面から、衝撃波が干渉する際、渦が衝撃波面に対して平行な方向に渦が大きくなることを考察した。

第五章で記された内容は理論的研究である。衝撃波により影響を受けた乱流の変化をより深く理解するために、RDT を用いて解析的に調べた。既往の RDT で用いられたように、衝撃波により誘起される一次元圧縮を対象とし、実験と同じような solenoidal 成分が初期に卓越している場合に対する解析解を求めた。特に本論文では、Andreopoulos et al. (2000) によって提起されている衝撃波-乱流干渉における 5 つの未解明の問題を線形理論の枠組みで答えることを試みた。解析の結果、衝撃波により誘起される圧縮方向および圧縮方向に対して垂直な速度変動 r.m.s 値は増加することが示された。これは、本実験を含め既往の実験および DNS においても定性的に一致する。乱流エネルギーと同様に、衝撃波に誘起される圧縮方向及び圧縮方向に対して垂直な渦度も増加する。ただし、衝撃波により誘起される圧縮方向に対して垂直な渦度は著しく増加するものの、圧縮方向の渦度は、わずかに増加するだけである。これは角運動量保存の観点から説明される。また、速度分散に比べ渦度分散の増加が著しいのは、Rankine-Hugoniot 関係式から決定される密度比の二乗のオーダーで渦度の分散が速度の分散より大きいためである。さらに、乱流エネルギーの変化および渦度分散比の変化は、DNS の空間解像度が増加するにつれ、RDT の結果に定量的に近づくことが示された。これは、本実験を含め既往の実験および RDT 解析におけるスペクトルからわかるように、大きいスケールのエネルギーに比べて小さいエネルギーの増加が著しいためである。一方渦のスケールは、ほとんどの場合減少したが、この傾向は、本実験を含め多くの実験結果と一致するものであった。また、衝撃波の影響により乱流のエネルギー散逸率は増加するが、これは動粘性係数が衝撃波の強さに比例して減少するのに対してそれ以上にエンストロフィーが増加するためであることがわかった。さらに、大気乱流などを想定した非等方な流れ場を模擬する軸対称の新しいモデルスペクトルを考案し、非等方性の影響についても考察した。その結果、流れが非等方な場合の速度分散および渦度分散は、等方な場合に比べてより増加することが明らかになった。このことは、角度依存性が重要なパラメータであることを示唆するものであった。以上のように、RDT による解析を行うこ

とによって、実験の定性的な評価および衝撃波-乱流干渉における未解明の問題を線形理論の枠組みで明らかにした。

第六章は結論であり、本研究で得られた結果を総括するとともに、今後の課題を提示した。