

機関番号：13904

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21760128

研究課題名（和文）

空間発達自由剪断乱流場におけるスケール不変性の数値的検討

研究課題名（英文） Numerical analysis on scale invariance in a spatially developing turbulent free shear flow

研究代表者

光石 暁彦（MITSUISHI AKIHIKO）

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：90456715

研究成果の概要（和文）：円形噴流において、乱流モデルに欠かせない概念の一つであるスケール不変性の適用限界を明らかにすることを目的として直接数値解析による研究を行い、噴流が浮力を受ける場合（ $Ri = 0.01$ ）は、等温噴流の場合と比べて噴出孔直径の40倍程度以上下流において乱流構造の非等方性が増すことが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：Aiming at verification of scale invariance, which is the core concept of modern turbulence modeling, direct numerical simulation of free circular jet flow is conducted to reveal that anisotropy of turbulence is augmented at downstream of 40 times jet orifice diameter under the assist of buoyancy force of  $Ri = 0.01$ .

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：数値流体力学

## 1. 研究開始当初の背景

近年の計算機性能の向上や数値計算ソフトウェア技術の整備を背景として、工業機器の熱流体設計や乱流熱物質輸送の研究における数値解析手法は、レイノルズ平均操作を施した支配方程式を解く RANS (Reynolds-averaged Navier Stokes) から、計算コストは高いが計算精度と柔軟性に優れた LES (Large-eddy simulation) にシフトしつつある。LES で直接扱うのは、局所空間平均操作（フィルタ操作）を施された物理量である。この時、フィルタ幅以下のスケールの変動は、SGS (subgrid scale, 格子以下スケール) 応力としてモデル化する必

要がある。

SGS モデルの中で最も代表的なのは、渦粘性の概念を採り入れた Smagorinsky モデルである。その後、Smagorinsky モデルのモデル係数を、解析中の流れ場のデータからダイナミックに算出する手法が考案された。これにより、ad hoc なパラメータを設定する作業から実質的に解放されたことが、近年の LES の普及に拍車をかけている。最初の提案から20年近くたった現在でも、国内外で多くの研究者がこの動的手法を拡張したモデルの開発を行い、ついには汎用流体解析ソフトにもダイナミックモデルが組み込まれた（ANSYS® FLUENT®,

Advance/FrontFlow<sup>®</sup>など)。

動的手法の定式化は、流れ場の至る所でスケール不変性が成り立つという仮定の下に構築されている。乱流場におけるスケール不変性とは、或るスケールの運動が、異なるスケールにも同様な特徴を持って保持されるという性質である。主に、速度変動スペクトルの慣性小領域に相当するスケールが、この性質を持つと考えられている。しかし、慣性小領域は非常に高いレイノルズ数でしか実現せず、格子乱流においてテイラーマイクロスケールで定義されるレイノルズ数が  $50 < Re_\lambda < 473$  において明確な慣性小領域が確認できなかったとする報告もある。そもそもそのような非常に高いレイノルズ数の流れ場の解析においては、慣性小領域を格子で解像することは現実的とは言えない。また、スケール不変性の仮定は、等方性乱流においては良くあてはまるものの、平均的な剪断、密度成層、回転などの存在する一般的な流れ場では、適切ではないと報告されている。

## 2. 研究の目的

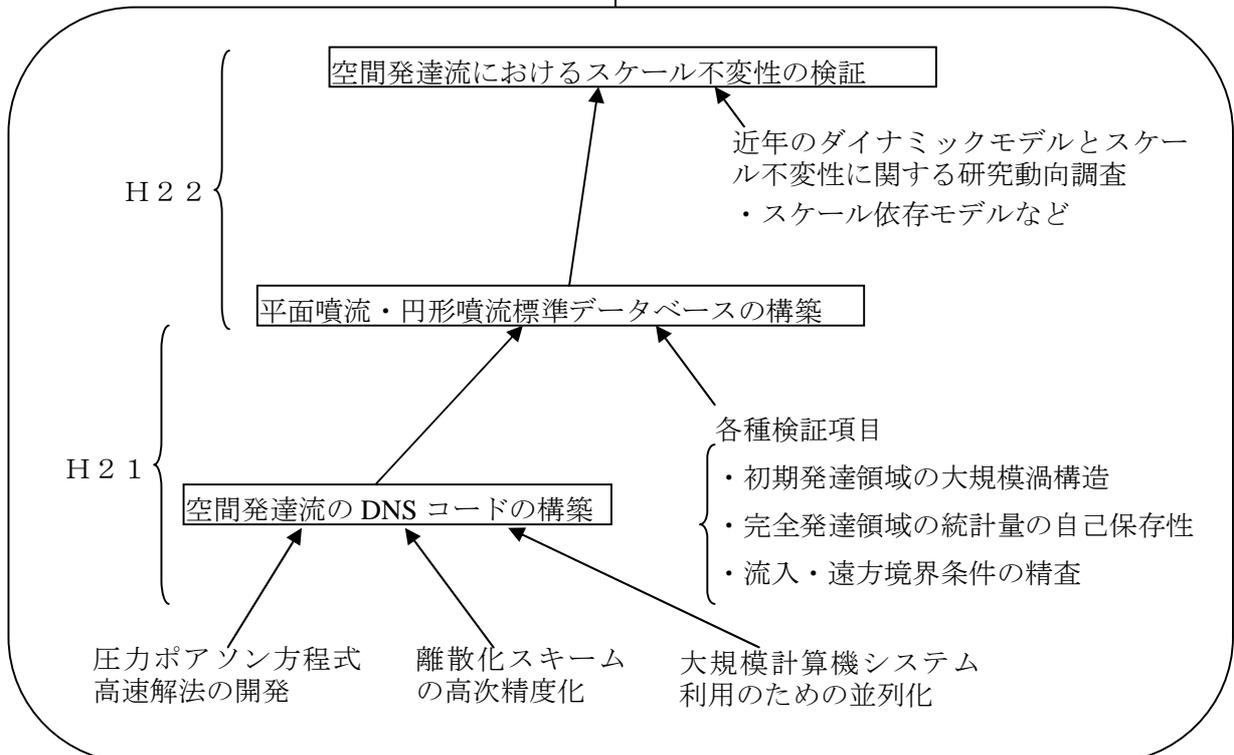
本研究の目的は、円形噴流・平面噴流などに代表される空間発達自由剪断乱流場において、乱流モデルに欠かせない概念の一つであるスケール不変性の適用限界を明らかにすることにある。この性質は、LES における SGS 応力のモデリングにおいて主流となりつつある動的手法の根幹を成しており、その正当性の検証・適用範囲の特定は LES の適切な利用と信頼性の確保、ひいて

は実用上重要な高レイノルズ数乱流の乱流混合の予測精度の向上のために非常に重要である。

## 3. 研究の方法

本研究で行うべき研究項目を段階ごとに下図に示す。研究は、ほぼこの図の矢印に従って進行するため、年度ごとの作業もこの図に従う。これによると研究計画は、空間発達流の DNS コード作成、標準的な平面・円形噴流データベースの構築、スケール不変性の検証という三段階に分けることができる。これらに付随して、以下の副次的研究項目が追加される。

まず、空間発達流の DNS コード作成には、後述するポアソン方程式高速解法や、高次精度離散化スキーム構築、そして高レイノルズ数の解析を視野に入れ、コードの並列化などが必要になってくるものと思われる。しかし、高速高精度な DNS コードを構築するのみでは、スケール不変性の検証に必要な標準的データベースを構築することはできない。そこで次に、解析結果の妥当性を保証するために、噴流数値解析における適切な流入・遠方境界条件の精査、噴流初期領域の渦構造から自己保存領域の乱流統計量までの過去の文献との比較、そして自由剪断流の乱流境界層理論解との比較検証を行う。最後に、得られたデータベース若しくは瞬時三次元速度データより、本研究の目的でもある空間発達自由剪断乱流におけるスケール不変性の検討を行う。ここでは、近年のダイナミックモデルの開発とス



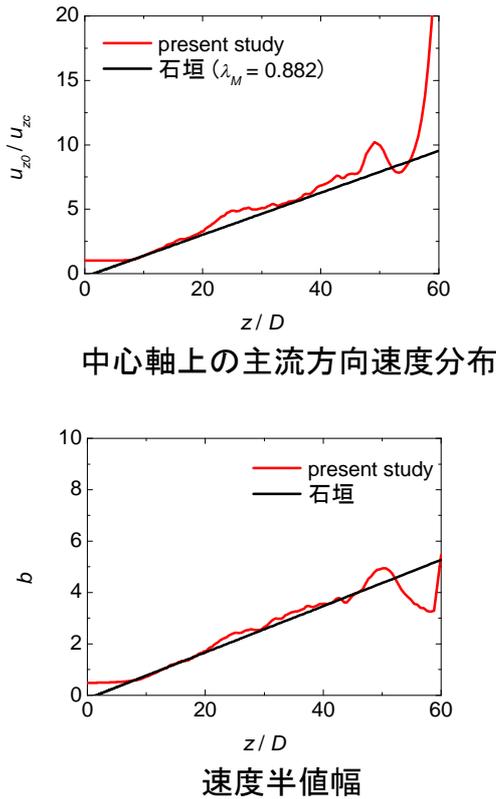


図1 噴流の減衰・広がり特性

ケール不変性検証の動向調査を行う必要がある。

方法は主に自作の数値流体解析コードを用いる。これは、研究にかかるコストを抑え、かつ計算スキーム構築に伴う曖昧さをできる限り排除するためである。

#### 4. 研究成果

初年度の研究成果として、上記計画内容の中で高精度差分スキームの導入以外は達成した。まず、流体の運動方程式の数値解析の有名なボトルネックであるポアソン方程式の解法に、計画調書にも記したFFTと非定常反復解法を組み合わせた手法を用い、簡便な定常反復解法の場合と比べて10倍～100倍の高速化を達成した。また、解析コード全体に並列化を施すことで、近年マルチコア化の進むサーバ用CPUを有効に利用し、全体として高速に解が得られるようになった。

次年度の研究成果、自由噴流の初期領域までは信頼性の高いデータを獲得した。図1は初期領域の瞬時渦構造を青い等値面で可視化したものである。渦構造の抽出には変形速度テンソルの第二不変量を用いた。この図から明らかに、噴出孔から連続的に放出される渦輪構造の存在を確認する事が出来る。

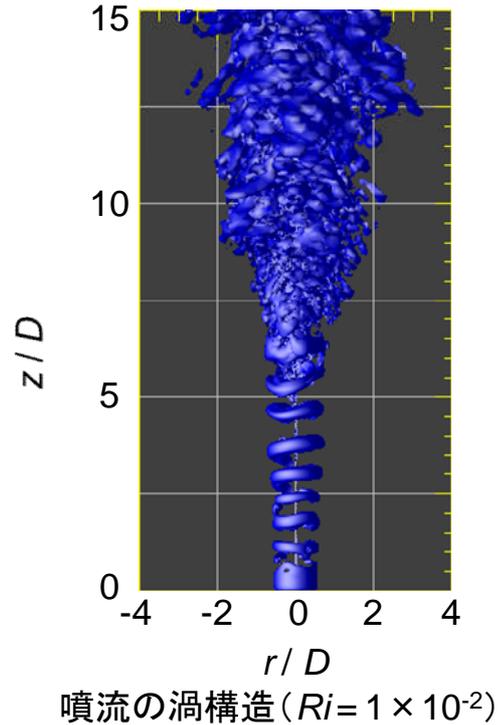


図2 瞬時渦構造の可視化

遠方の自己保存領域については、一次のモーメントについては有意な分布を得た。図2は中心軸上の平均速度の逆数と速度分布の半値幅の空間発達を示している。赤線による本研究結果は噴出孔直径の50倍程度下流まで、過去の実験整理式をよく支持していることが分かる。しかし、高次のモーメントに関しては研究期間内に十分に収束した分布を得ることができなかった。これは、下流における速度減衰に伴う空間発達の遅滞や時間的に収束し難い低波数変動の存在などが原因である。

一方、空間発達を促すために鉛直上方への噴出流体を周囲流体より高温として浮力の影響下で解析を行ったところ、等温噴流と比較して、噴出孔直径の40倍程度下流の半値幅周縁部において乱流の一次元非等方

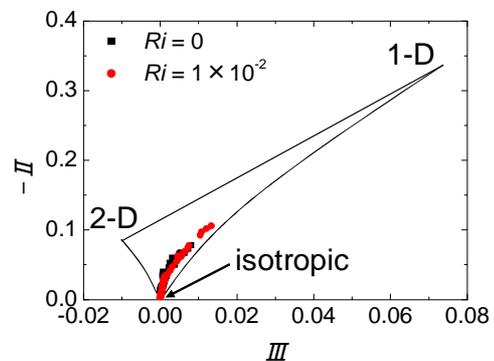


図3 乱流の非等方性 ( $z/D = 40$ )

性が増すことが明らかとなった。このことは、例えば工場煙突から排出される大気汚染物質の濃度分布の予測には、噴出孔直径の50～100倍程度遠方まで正確な解析を行う必要があることを示している。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計2件)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

○取得状況(計0件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

光石 暁彦 (MITSUISHI AKIHIKO)

豊橋技術科学大学・機械工学系・助教

研究者番号：90456715

##### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：