いそ しま のぶ ゆき
氏　　名　磯 島 宣 之
研究科，専攻の名称　東北大学大学院工学研究科（博士課程）航空宇宙工学専攻

学 位 論 文 題 目　Study of a Data Exploration Method for Flow Control and Design
（気流制御及び設計のためのデータ探査法に関する研究）

論 文 審 査 委 員　主査　東北大学教授　大林　茂　　東北大学教授　澤田　恵介
東北大学教授　山本　悟　　東北大学准教授　下山　幸治

論文内容要約

第１章　序論

1990 年代以降，数値流体対力学(Computational Fluid Dynamics: CFD)を含めて計算機援用工学(Computer Aided Engineering: CAE)は本格的に産業界での導入が進んできた。この間，市販ソフトウェアが三次元解析をサポートし始めるとともに，スーパーコンピュータ，PC クラスタ，ワークステーションといった計算機処理能力が飛躍的に向上したことにより，産業界でのシミュレーション技術が大きく向上してきた。現在では産業界のほぼ全ての分野で CAE が設計・開発に活用され，製品やシステムを通じて我々の快適な生活，安全安心な社会インフラの構築，環境の保全等に貢献している。

近年の CFD では，(1)実機を再現する詳細な形状を有する三次元モデルを対象とした解析対象の大規模化と，(2)非定常解析のニーズが高くなってきたことにより，解析結果データ容量が急速に増加するとともに，複雑な流動現象の解釈の難易度が高まってきている。大規模で複雑な現象を伴った解析結果データの解釈と分析は容易ではなく，現状ではまだまだ物理的な洞察力を身につけたベテランの設計者や研究者に依存するところが大きく，例えば近年注目を集めているビッグデータ解析に用いられる情報科学や機械学習の技術の応用適用がこうした課題の解決に期待されている。そこで本研究では，大規模で複雑な現象を伴った解析結果データを対象に流動上特徴的な領域や設計上重要な領域を抽出するべくデータ探査法を開発することで，大規模な流体解析の製品設計での活用を向上することを目的とした。

第２章　Blu-ray Disc 対応光ディスク装置の冷却構造の開発

光ディスク装置の光ピックアップに搭載されるレーザダイオードの冷却は，製品の安定動作，寿命を保持する上で製品設計上重要な項目となっているが，記録・再生速度の飛躍的な高速化に伴って，従来から行われてきた実機実験ベースでの構造検討だけでは目標とする温度以下に温度上昇を抑えることが困難となりつつあった。また光ディスク装置は量産品であり，他社との競合の観点からも例えばファンを設置するようなコストの増加を伴った実装構造は設計上好ましくない。

そこで直交格子を用いた非定常乱流解析を実施し，詳細に流動構造を検討し，レーザダイオード冷却を促進する構造案の創出を試みた。直交格子を用いた解析システムを用いることで複雑な内部形状を有する光ディスク装置についても 20 分程度で，自動で格子生成が可能である。解析結果を検討した結果，(1)ディスクを載置するトレイのディスク外側の特定部にディスク上面に生じる低圧力領域が局所的に張り出していること，(2)当該トレイ部の下方に冷却対象となるレーザダイオードが設置されること，を見出した。当該トレイ部に通気用の穴を設けたところ，トレイ表裏面の圧力差によって上向きの二次流れが発生し，従来構造で通風風速の小さかったトレイ下側のレーザダイオード設置部周辺の通風が増加することを解析で確認した。ディスク連続書き込み試験で実機評価した結果，レーザダイオードの最大温度上昇を約 2K 低減する効果を確認した。装置内部温度に対してレーザダイオードの温度上昇を 10～15K 程度で設計されることの多い光ディスク装置では，2K の温度低減は大きな効果である。また着手からの検討期間３カ月で，それ以前には解決が困難とされていた冷却実装をコストの増加を伴わない方法で実現し，製品の実装構造開発の大幅な期間短縮に貢献した。開発構造は 2006 年 7 月に製品化され，当時世界で初めての Blu-ray Disc 4 倍速記録の達成に貢献した。

大規模な非定常 CFD 解析の結果データの詳細な検討から，実験を元にした検討だけからでは考え付かない冷却実装構造が創出可能なこと，さらに開発期間の短縮が合理的なプロセスで実現できることが示された。

第 3 章　Proper Orthogonal Decomposition (POD)を用いたデータ探査法の開発

設計候補の構造群に対して，実設計での設計上の手がかりを見出すために，POD を用いたデータ探査を検討した。先行研究として大山等は大規模な進化計算によって得た非劣解の集合に対して POD を適用することで，得られた展開係数ベクトルの分布に基づいた非劣解のグルーピングと，流動上の特徴構造とが対応することを示した。部品配置や構造変更を伴う一般的な冷却実装設計問題では，構造の自由度が高いために設計変数の数が多くなりすぎ，進化計算等の多目的設計探査の実行自体が容易ではなく，非劣解の集合を得ることが難しく，それらを元にした POD 解析の実行は困難である。むしろ現設計や新たに盛り込まれるアイデアを基にした比較的少数の設計素案としての劣解の集合から，性能を向上させる上での「狙いどころ」としての特徴・設計変数がどこにあるのかを見つけ出すことが重要な場合が多い。したがって大山等の検討での「多数の非劣解の集合を得た上で特徴構造を見出す」のとは丁度逆方向に「少数の劣解（設計素案）の集合から特徴構造を見出し，構造変更により性能を向上していく」検討が設計の流れとして自然であり，有用である。

そこで第 2 章で検討対象とした光ディスク装置について，開口位置の異なる 15 個のモデルを用意し，時間平均化した三次元速度ベクトルデータについて，POD 解析を実施し，第２章で得られた特徴構造が抽出できるかを検証した。POD 解析を行うにはデータの格子点数，位置が一致していることが前提となる。開口位置が異なるトレイのような対象について，一般的な構造格子や非構造格子を用いた境界適合型の格子では，格子数と位置を全モデルで統一することは困難であるが，同一条件で生成する直交格子を用いることで，トポロジー変化を伴

う場合を含めて格子数と位置を揃え，設計素案群に対して POD 解析を実施することができる。

本章では穴の構造的な位置から暫定的な順番で番号付けした設計素案群に対して POD 解析を実施し，まず展開係数ベクトルを取得した。非劣解の集合のようにある程度揃った特性順に番号付けしていないため，一見するとランダムな分布を示す展開係数ベクトルが出力されるが，１次および 2 次の展開係数ベクトルと，穴の位置座標とを元に, クラスタ解析を行うことで類似の展開係数ベクトル特性を持ち, 位置の近いモデル同士が集められ, 設計素案群は５つにグループ化された。5 つのグループがそれぞれ特徴領域を表しており，実際の光ディスク装置の設計知見と比較すると，このうちの 2 つが光ディスクのレーザダイオード冷却に有効な構造と一致していることが確認された。POD を用いた方法では，3 次元の詳細な流動構造を実際に可視化ソフトなどで可視化することなく，機械的な処理で特徴構造を分類・抽出でき，構造や流動現象の複雑さに起因した見落としのリスクを抑える効果がある。

第４章　スパース構造学習を用いた複数の非定常流体解析結果の変化領域検知

非定常流体解析の結果データ，特に Reynolds 数の高い乱流解析について，構造の異なる 2 つのモデルの解析結果を比較して性能指標値の優劣をみることは，基本的な設計検証の一つであるが，2 つのモデルの結果違いに及ぼす寄与がどの部分によるものかを定量的に評価することは，あまり行われていない。特に流れ自体の変動による変化と，構造の違いによる変化との識別が難しく，どの部分がどれだけ寄与しているかについては曖昧なまま，時間平均化した特定の性能指標値の優劣を元に構造検討が行われている場合が現状では少なくないと考えられる。

本章では機械学習の一つであるスパース構造学習を非定常流体解析結果データの分析に適用し，構造の異なる 2 つの遷音速二次元翼周りの流れの違いに，どの部分がどれだけ寄与しているかを定量的に求めた。解析対象は 3%コード長に乱流遷移トリップ有・無が異なる二次元 RAE2822 翼型とした。直交格子積み上げ法を用いて，構造の変化によらず同じ位置，数の格子分割で空間を離散化し，2 つの構造を比較した。自由流マッハ数 0.729, 迎角 2.31° 条件で，非定常圧縮性粘性解析を実施して得た，翼表面圧力分布の時系列データを解析対象とした。

時間平均化処理をした揚力，抗力特性に大きな変化はなく，また時間平均化処理をした圧力分布等からは乱流遷移トリップ部に小さな衝撃波が生じることと，衝撃波位置が僅かに異なることとを除いて大きな変化は確認できなかった。

本章で行ったスパース構造学習では，それぞれの構造について個別に，時系列の翼面圧力分布データについて平均値0, 分散1とする標準化処理を行った後, 共分散構造行列を生成する。さらにGraphical Gaussian Modeling (GGM)を適用し，評価点についてデータの分布を正規分布に最尤推定し，それぞれの構造についての確率分布を求める。乱流変動に伴うノイズ的な変動に対しても安定に最尤推定を行うため，ペナルティ項による L_1 正規化を含んだ Graphical LASSO アルゴリズムを使用した。GGM により得られる精度行列は共分散行列の近似的な逆

行列となるが，評価点間の時系列の変化の様子が類似していない場合，条件付き独立とみなし，該当要素の値は 0 となる。変化の様子が類似している要素については精度行列の該当要素に相関の大きさを表す値が入る。ペナルティ項の調整により精度行列内の非ゼロ要素の数は変化する。このスパースな精度行列を求めることから，スパース構造学習と呼ばれる。乱流遷移トリップ有無の 2 つの構造についてそれぞれ GGM により精度行列を求める。評価点において，２つの構造についての確率分布同士の距離を情報論的距離の一つである Kullback-Leibler divergence から求めることで，2 つの構造についての流動の変化への寄与度分布を求めた。尚，Kullback-Leibler divergence は 2 つの精度行列から解析的に求められる。

乱流遷移トリップ有・無について寄与度を求めた結果，乱流遷移トリップ直後の上面 3.64%位置と，トリップ位置 3%コード位置が支配的な寄与を示し，圧力変動データ等の可視化結果とも一致した。3.64%位置ではトリップ有時にトリップを越えて翼面に再付着する流れが乱流遷移を開始しており，下流の広い範囲にわたってその変動が相関を持つために寄与度が高いことが精度行列の変化から分析できた。次に寄与しているのは下面 4.63%位置でトリップ有時には位置がほぼ固定されている下面側の乱流遷移点が，トリップ無し時にはこの付近でわずかに前後に移動し遷移に遅れが生じていることが要因となっている。寄与度分布と精度行列の変化状態から，流動の相違に寄与している領域とその要因が求められた。特に衝撃波と乱流境界層内の渦との干渉による現象の周波数の変化，乱流遷移点の変化に起因した詳細な流動の変化についても本手法は検出しており，変動の大きい乱流についても流動の違いと寄与度の分布を適切に評価していることが示された。

第 5 章　結論

本研究では大規模な流体解析の製品設計での活用を向上に向けて，大規模で複雑な現象を伴った解析結果データを対象に流動上特徴的な領域や設計上重要な領域を抽出するデータ探査法について開発と検証を行った。

第 2 章では，光ディスク装置のレーザダイオード冷却問題について非定常流体解析を実施し，その分析結果から，簡単で冷却効果の高い構造を新規で考案し，大規模な流体解析結果が製品設計に活用できることを示した。

第 3 章では，劣解となる設計素案群に対して POD 解析とクラスタ解析とを併用したデータ探査法を構築し，その有効性を検証した。光ディスク装置冷却構造問題に対して，5 領域を抽出し，そのうちの 2 領域は実設計でも冷却効果が高い領域を抽出していることを示した。

第 4 章では，スパース構造学習を用いた複数の非定常流体解析結果データの変化領域検出法を構築し，その有効性を検証した。形状が異なる乱流遷移トリップ周辺の寄与が大きいこと，それ以外に下面での乱流遷移点の移動，衝撃波と境界層との干渉の差異による寄与を検出していることを示した。