Osaka University Knowledge Archive

Title	Modeling and simulation of nonlinear thermoacoustic oscillations based on the boundary-layer theory
Author(s)	清水, 大
Citation	大阪大学, 2008, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/49636
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

Osaka University

【45】

氏　　名	清　水　　大（しみずだい）
博士の専攻分野の名称	博　士（工　学）
学　位　記　番　号	第　２２５５５　号
学位授与年月日	平成 20 年 11月２５日
学位授与の要件	学位規則第４条第１項該当 基礎工学研究科機能創成専攻
学　位　論　文　名	Modeling and simulation of nonlinear thermoacoustic oscillations based on the boundary-layer theory （境界層理論に基づく非線形熱音響振動のモデリングとシミュレーション）
論　文　審　査　委　員	（主査） 教　授　杉本　信正 （副査） 教　授　辻本　良信　　教　授　河原　源太

論　文　内　容　の　要　旨

管路に沿って温度勾配を与えると，その内部の気体中を伝播する音波は，管壁との間の相互作用によって熱エネルギーと力学的エネルギーの変換をうけることが知られている．このエネルギー変換が熱音響効果である．熱音響効果の代表的な現象として，開放端と閉端を持ついわゆる1/4波長管において，閉端を室温に保った状態で開放端を極低温にすることにより，管壁に沿って温度勾配が発生し，結果として管内のヘリウムの気柱が自励振動する現象がTaconisによって1949年に報告されている．これは，温度差のある環境さえ存在すれば，熱エネルギーを可動部なしに有用な力学的エネルギーに変換できる極めてシンプルな熱機関(原動機)が構築できる可能性を示している．しかしながら，このエネルギー変換が発生するメカニズムは巨視的な熱力学の観点を除いては解明されておらず，特に非線形現象も含めた自励振動に至る過渡現象の解明はなされていない．そこで，管内音波の不安定化から非線形性による飽和に至る自励振動を説明し得る新たなモデルが待望されている．

本論文では流体力学的な視点から非線形熱音響振動のモデル化を行い，タコニス振動を例に取って数値シミュレーションを行った．境界層理論を適用して境界層外縁の管内向き法線方向速度を履歴積分で表わすことで，３次元の基礎方程式を管断面にわたって積分した１次元の新しい基礎方程式を導出し，このモデルが管内気柱の不安定化から非線形性による振動の飽和，飽和後の定常的な振動に至るまでの熱音響自励振動を記述できることを示した．これにより，KramersやRott以来，熱音響現象は境界層近似では説明できないとの考えを覆し，1次近似の範囲内で定式化した新しいモデルの有効性を示した．また，過渡振動と定常振動時の音場と平均エネルギー流束を調べることで，不安定化のメカニズムを境界層理論によって明らかにした．

論　文　審　査　の　結　果　の　要　旨

近年，熱音響現象を利用した新しい熱機関の研究が，環境・エネルギー問題の観点から盛んに行われている．熱音響現象自体は古くから知られているが，熱と音と流れが複雑に絡み合った現象であるため十分解明されているとはいい難い．多くの関心は熱機関の構築であり，熱力学システムとしてエネルギーの流れや熱効率が議論されている．これに対し，そこで発生している現象を流体力学の立場から温度勾配下での熱流体の不安定現象として捉える研究は少ない．不安定化の臨界条件の導出の研究は，ヘリウムで観測されるタコニス振動に対してロットによって６０年代後半に行われたが，その後特に非定常な非線形問題への拡張は殆ど行われていない．

熱機関の出力や効率を上昇させるには，現象の本質を捉えた議論が必要となる．このためには現象の流体力学の立場からのモデル化とシミュレーション結果に基づく理解が必須である．熱音響現象のもっとも簡単な例であるタコニス振動でさえ，ロットの臨界条件の導出以来ほとんど研究されておらず，振動発生のメカニズムも実は十分には理解されていないのが現状である．

そこで本研究は，様々な熱音響自励振動のうち，タコニス振動など古くから知られている現象は境界層理論によって説明できるのではないかと考え，現象を流体力学の枠組みでモデル化し，導出した方程式を解くことによって現象のシミュレーションを行った．境界層理論は，タコニス振動の臨界条件を最初に導出しようとしたクラマースによって考えられたが，この理論では臨界条件が求めることはできないことがロットによって指摘されてきた．しかしながら，本研究の先行研究によって，クラマース，ロットらによる境界層厚さが薄いとした正則摂動法が適切ではなく，特異摂動法を用いれば臨界条件はもとまり，しかも滑らかな放物型の管軸方向温度分布に対して解析的に導出可能であることが最近示されてきた．この結果をふまえ，タコニス振動のような非線形現象にも実は境界層近似が適応できるのではないかと予想した．

境界層近似を非線形理論に取り込んだモデルを構築し，これに基づくシミュレーションの結果から，実験で観測されるような温度分布に対して，管の中の気体が不安定化し発振することが確認された．また，時間経過とともに振幅が大きくなるため，非線形性による高調波の発生により不安定化に伴う増幅が押さえられ，結果として一定振幅で飽和した自励振動が発生することがシミュレーションの結果得られた．これは現実の現象とは定性的に一致しており，モデルは現象の本質を捉えていると考えられる．実験面では、タコニス振動における気体中の圧力や速度の測定が，極低温での困難さのために行われておらず，信頼できる測定結果は報告されていない．そこでごく最近，流体力学の方程式をそのまま解く数値流体力学の手法を用いた研究が始まりつつあり，その結果との比較が待たれる．

以上のように，本研究は，熱音響現象の典型例であるタコニス振動をとりあげ，非線形領域にわたるモデル化に基づくシミュレーションを実施したものであり，世界で最初の試みである．また，これまで境界層理論は熱音響現象には使えないとの誤った認識を拭い去り，有用であることを示した点でも価値がある．境界層理論を用いると発振のメカニズムの理解が極めて容易になるなど，熱音響現象の解明に一つの考え方を提供するものである．こうした点からも，本論文は博士（工学）の学位論文として価値のあるものと認める。