

内 95-4

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

NUMERICAL STUDY OF
UNSTEADY FLOW STRUCTURE IN ROTARY ENGINE

ロータリーエンジンの非定常流れ構造に関する
数値解析研究

申請者

浜井 祐治

Yuji Hamai

機械工学・流体工学

1995年7月

ロータリエンジンは、ピストン、吸排気弁等の往復運動部品によらず、中央部に組み込まれたロータの回転運動のみによって、吸気-圧縮-爆発-排気の四行程を行うことのできる内燃機関である。この形状的な差異は、滑らかなトルク上昇、低い振動・騒音、高い出力等をもたらす。その一方で、吸排気時期に対する制限から来る多量の既燃ガスの新気への混入、扁平な燃焼室形状による低い燃焼速度等の短所があり、軽負荷時、希薄運転時に燃焼・出力変動を起こしやすく、ひいては、燃費率の悪化、排気中の未燃ガス増加につながる。

これらの短所は、近年、炭酸ガス増加による地球温暖化、炭化水素による都市型大気汚染などが社会問題化し、もはや許容され得ざるものとなりつつある。ロータリエンジンのこうした欠点は、古くから認識、研究されているものの、内部の流れに対する情報・理解の欠如から、十分な改善策の考案は困難であった。

一方、スーパーコンピュータ、流れ場の数値解析技術の著しい向上によりロータリエンジンの作動室内流れの数値流体力学的研究も、80年代後半には行われるようになり、ロータリエンジン性能改善のための有力な、しかもこれまでにならない情報を与える道具として期待された。しかし、90年代に入り、レーザ計測技術の発展・普及から、ロータリエンジン作動室内流れの可視化が可能になると、これら計算結果と実験から得られた画像の間にかなりの開きがあることも明らかになり、実験、計算双方とも、作動室形状や、給気方式の違いによる流れ場の構造の変化を捕らえるまでには至らなかった。

こう言った背景の中、本研究では、これまで、内燃機関の流れ解析に用いられたことのない、Chakravarthy Third-Order TVD Schemeを用い、これまでに殆ど計算されたことのない、新気に混入する排気ガスの挙動、流れのサイクル変動等を捕らえるモデルを開発、様々な条件下でのロータリエンジンの流れ場を明らかにすると伴に、出力変動の機構、その抑止の可能性等に系統的検討を加た。

本論文は、全7章とAppendix2章から構成され、まず第1章では、社会的背景と、ロータリエンジン固有の問題を解説し、研究の意義、目的を述べている。

第2章では、現象を記述する圧縮性ナヴィエストーク方程式を一般座標系で記述し、それを解くための数値解析法、計算格子の生成方法について述べている。

ロータリエンジンの場合、2つの隣接する作動室が吸排気行程中に、吸排ポートを介して連通し、急峻な圧力勾配が作動流体中に形成されるため圧縮性ナヴィエストークス方程式を基礎方程式とせざるを得ない。

また、ロータリエンジンは最少単位でも、3つの隣接する作動室から構成され、計算を行うにあって、これら3つの作動室間の作動流体の数値的な漏れを抑えるために、計算格子はロータ上に固定せざるを得ない。従って、格子は、その他の構造物の上を滑ることになり、通常のエンジンとは異なった扱いを要する。

また、乱流モデルを用いても、適正な数値解が過去に得られていないこと、解の係数依存性を避ける必要があることから、計算格子を過去の研究に比して数倍

から数十倍程度細かくし、乱流モデルを用いず直接計算することを選んでいる。

第3章での計算は、3つの作動室中の1つのみを計算領域とした平易なモデルを用いて行われ、それ以降の研究の方向を定めるための予備計算として位置づけられるが、その幾つかの有用な結果についても述べている。

これまでの計算が実験結果を再現していないため、極力小さな計算格子、計算時間間隔、人工粘性、高精度の計算法を採用し、これまで満足することが困難であった巨視的物理法則に従う解が数値的に得られることを実証している。流れ場の大局的な様相は、可視化画像と良く一致しており、また、作動室形状の変更によって点火栓近傍の流れ場を変更できることも指摘している。さらに、実際のエンジンの吸排気ポートの圧力を計測し、クランク角の関数として計算に取り込み、吸排気管を通しての、作動室間の干渉の流れ場に対する影響が、軽負荷時には支配的になり、この干渉を考慮しない場合と流れ場が大きく異なることも指摘している。これらの結果から、より高精度で人工粘性をさらに小さくできる計算方法と、作動室間の干渉を本格的に扱えるモデルによる計算の必要性が結論される。

第4章の目的は、第3章の結論を受けて、モデルの拡張、計算法の改良によって、排気ガスの環流、流れ場のサイクル変動などの現象解明を行うことにある。具体的には、2つの計算領域から全体の計算領域を構成し、一方を3つの燃焼室すべてを含むロータリエンジンにあて、他方を吸排気ポートとそれらを繋ぐ大きな容量内の流れ場の計算にあてた。また、吸気負荷の設定は外部的に計算に与えず、スロットバルブを模擬したスロートを吸排気ポートとエンジンの間に設け、この幅を調整することによって行った。こうすることによって、外部から人為的に与える境界条件は全くなくなり、作動室間の干渉などの物理現象は、すべて基礎方程式にゆだねられることになる。外的要因がすべて排除されているため、流れのサイクル変動が、外部的擾乱から発生しているのか、ロータリエンジンに本来的に備わった性質であるのか、さらに、その発生原因を特定することができる。

また、効率的に排気ガスの挙動を観察するために、燃焼のモデル化は行わず、排気行程に入る直前の作動室内的流体を1計算ステップ間で約1000[K]に加熱することで排気ガスの代用としている。

計算は機関の回転数を6000回転一定とし、2種類のスロート幅即ち、高負荷と軽負荷について6回転づつ実施している。機関の運転に伴い、機関の充填効率はスロート幅を反映して減少し、2回転程度で一定値に安定する様子が観察された。また、圧縮-膨張行程期間中に、質量保存則がほぼ完全に満たされ、圧力もほぼ断熱に近い変化をしていることから、計算の精度の高さが確認された。

排気ガスの認識は、作動流体のエントロピーによって行われた。この結果、軽負荷時に大量の排気ガスの吸排気行程中の作動室内への流入が鮮明に捕らえられた。この現象の単純な抑制は困難であるため、排気の高い運動エネルギーを燃料の微粒化に活用する等、積極的な排気ガスの活用が示唆される。また、圧縮行程後半ま

で、排気ガスは作動室後半に局在化するという興味ある現象も観察された。

さらに、各6,計12サイクルの流速ベクトル場の観察から、吸気行程中の主流を成す大規模な渦は、吸気スロート付近から発生した流れの変動によって、毎回転その方向を変えている様子が捕らえられた。この変動の発生原因は、これは機関の回転、圧力波の反射、スロート部からの渦の放出の3つの周期が各々独立に存在することにあると結論され、流れの変動の一つの機構が明らかにされている。また、点火時期、点火栓近傍の流れ場は、この変動に応じて大きく異なり、燃焼変動の潜在要因であることも指摘されている。これらの変動する流れ場を全サイクルにわたって平均したものはレーザドップラ流速測定から再構成された流れ場に対応するが、それと、個々の流れ場の間で類似性が乏しく、レーザドップラ流速測定結果と数値計算結果の比較に限界があることが結論されている。

続く第5章では、サイクル変動を抑制しつつ、燃費率の飛躍的向上を目指し、圧縮行程前半の作動室内に直接ガス燃料を噴射し、成層状態の形成を狙う低圧直噴燃焼方式を上述のモデルに適用し、計算を行っている。この方式ではスロットルバルブを必要としないため、常に吸排気圧差が極めて小さく、排気が新気に混入せず、また、流れの変動要因も少ないと言う利点を持つ。

計算は、3000[K]、平均有効圧約300[kPa]を想定して2種類の形状の大きく異なるロータで行われ、まず燃料の成層化に適した形状の選定を行っている。この結果、ロータ進み側に深い窓みを設けたロータでは成層化が可能であることが示されている。しかし、計算を行った、全6サイクルの燃料の作動室内分布の観察から、ごくわずかの流れの変動が、毎回安定した成層状態の形成を阻害していること、さらには、成層化された混合気が過剰に濃く、燃焼生成物として、一酸化炭素、炭化水素の大量の放出が予測された。従って、より洗練された燃料供給方式開発のため、シミュレーションの三次元化等の拡張が必要となることが結論される一方、低圧直噴燃焼方式技術の実現可能性が結論された。

第6章では、前章の結論を受け、モデルを三次元に拡張し、流れ場が本質的に三次元的なサイドポート給気方式の流れ場の構造解明を試みている。この本質的に三次元的な流れ場を、これまでに殆ど用いられていない渦管によって表現することにより、吸気-圧縮と行程が進行するにつれて、渦管群が生成、発展、崩壊してゆく様子が鮮明に捕らえられた。また、二次元計算あるいは、可視化実験で確認された渦群は、渦管の断面として再認識され、点火時期近傍に発生するスキッシュ流は、三次元的に発達した渦管を形成していることも確認された。

第7章では、第1章から第6章までの結果、結論を整理して本研究を総括。また、アッペクスシール挙動解析等、今後の研究課題に対する展望を述べている。

開発したシミュレーションによって、設計諸元と性能を結ぶ多くの未知の現象が捉えられロータリエンジンのみならず、通常のエンジンの研究開発に有益な情報が得られ、数値流体力学の内燃機関研究開発に対する有効性が確認された。