

【 169 】

氏 名	石 井 隆 次 いし い りゅう じ
学位の種類	工 学 博 士
学位記番号	工 博 第 393 号
学位授与の日付	昭 和 49 年 11 月 25 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 5 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	工 学 研 究 科 航 空 工 学 専 攻
学位論文題目	Nonequilibrium Nozzle Flows (非平衡ノズル流れ)

論文調査委員 (主査) 教授 神元五郎 教授 玉田 玠 教授 桜井健郎

論 文 内 容 の 要 旨

極超音速風洞では、ラバール型ノズルを用いて、高エンタルピの岐点状態にある空気を膨張させ、ノズル出口において極超音速流を得ているが、気体が二原子分子気体の場合、岐点温度の高さによっては、気体は分子振動励起の平衡状態にあるか、さらに解離・電離の平衡状態にある。このような状態の気体がノズル内を流れる場合、分子振動緩和や解離・電離再結合の緩和過程によって、ノズル下流の流れは熱力学的に非平衡流れとなる。本論文はこのような非平衡ノズル流れを解析的に明らかにし、その非平衡度を求め、さらにノズル内流れの臨界流量とエントロピの役割などについて詳細に述べたもので、緒言、4章および結言よりなっている。

緒言においては、従来本研究に関連して行なわれた研究は、ライトヒルの理想解離気体の再結合過程や電離アルゴンなどの電離再結合過程を伴う非平衡ノズル流れが個々に取扱われているのに対して、著者は分子振動緩和過程をも含めて統一的な立場から、これらの非平衡ノズル流れを研究する必要があることに着目して、その問題点を明らかにしている。

第1章においては、単一非平衡モードをもつ気体のノズル流れについて、擬一次元、定常、断熱非粘性流れの仮定の下に基礎方程式を展開し、緩和過程を表わす緩和方程式を一般化し、ノズル内流れの臨界流量を決定するスロート近傍の音速点の位置について詳細な議論が述べられている。

一般に物理化学的な過程を伴うノズル流れの解析には、分子振動、解離、電子励起、電離などを支配する緩和方程式自身が複雑であること他に、ノズル形を与えてそのスロート近傍の特異点の位置を決め、その臨界流量を求める解析法そのものに困難さがある。著者は、反応過程の両極限の場合、すなわち無限大の反応速度をもつ平衡流れと零の反応速度をもつ凍結流れにおける音速の定義から流れのマッハ数を定義し、この平衡流れ、凍結流れおよび一般の非平衡流れにおける臨界条件（音速点を決める）を求め、臨界流量を決定する方法を提案している。

この方法を、振動緩和と二原子気体、理想解離気体および一価電離原子気体のおおのこの場合に適用し

て、与えられた岐点状態の下における非平衡臨界流量が、平衡臨界流量より大きく凍結臨界流量より小さい範囲にあることを示した。またおのおのの単一非平衡モードにある気体の平衡・凍結臨界流量比を、岐点状態の広い範囲に亘って数値的に明らかにし、さらに臨界流量と流れの非平衡度およびエントロピの間の関係式を導いている。

第2章においては、特に振動緩和を伴う二原子分子気体の非平衡ノズル流れについて解析が詳細に行なわれ、具体的には O_2 , N_2 気体について数値計算例が示されている。

一般に非平衡ノズル流れは、近平衡領域、近凍結領域および平衡流より凍結流への遷移領域の3つの領域からなっている。ブレイはこれに着目して、平衡一凍結流れの近似を提案した。著者はこの近似を完全な解析解の形で表わす方法の他に、複雑な振動緩和方程式を適当な近似式で表わして、非平衡流れを解析する方法とを示した。

前者の平衡一凍結流れの近似による方法では、放物線状のノズル・スロート近傍の形状の下に、スロート上流の平衡流と下流の凍結流とを接続させる解を導き、その結果岐点温度が分子の振動特性温度の $1/4$ 以下であれば、分子振動緩和の流れに及ぼす非平衡度は無視できるほど小さいなどの計算例を示している。

また後者の非平衡流れの解析においては、ブレイが理想解離気体の解析に用いた非平衡助変数を分子振動緩和気体の場合に適用した式を導き、この非平衡助変数の岐点温度に対する分布から、完全平衡流れを基礎とする近似緩和方程式を提案している。その数値計算にあたっては、漸近展開法、鞍点法を採用して詳細に計算し、また平衡スロート近似法の精度を検討し、この近似法も十分信頼できることを示した。

第3章では、前章の非平衡ノズル流れにおける理論解析から、流れに対するエントロピの役割を体系的にまとめている。

分子振動緩和を含めて一般に化学反応を伴うノズル内の流れには必然的にエントロピの増大がおこる。前章までの非平衡ノズル流れの解析によって、臨界流量と臨界点におけるエントロピとの関係を明らかにし、さらに平衡一凍結流れの近似法を検討し、その遷移領域における実際の経路を示した。またノズル形状と寸法とを示す常数 K と岐点密度 ρ_0 とから決まる助変数 \sqrt{K}/ρ_0 (m^2/kg) を提案し、この助変数の値を与えて、ノズル流れにおける振動エネルギーとエントロピとの分布を O_2 , N_2 について計算し、さらにノズル下流無限遠におけるこれらの極限值をも明らかにした。

第4章においては、ノズル上流の岐点からスロート近傍の音速点までの亜音速領域における詳細な解析を述べている。

解析には、理想解離気体に対してフリーマン型の緩和方程式を用い、解離特性温度に対する臨界温度の比 ε は小さいとし、流れの物理量を ε の昇べき級数の形に展開した逐次近似法 (P. L. K 法) を採用した。その結果は第2次近似において R. K. G 法による厳密な数値計算の結果とよく一致することを示した。

結言においては以上の結果を要約している。

論文審査の結果の要旨

緩和過程を伴う非平衡ノズル流れの研究は、理想解離気体の極超音速ノズル流れの研究に始まって、電離気体、振動励起状態にある二原子分子気体のノズル流れなど多くの研究が行なわれて来たが、これらの気体の緩和過程を伴うノズル流れが個々に解析され、数値計算が行なわれているに過ぎない。

本論文は、分子振動、解離、電離再結合過程などの緩和過程を支配する緩和方程式を一般化した形で表わし、擬一次元定常、断熱非粘性流れの基礎方程式とともに解析し、種々の岐点条件の下に平衡流れ、凍結流れおよび非平衡流れの非平衡量（質量比、温度など）、エントロピおよび臨界流量との間の関係を解析的に明らかにし、特に分子振動緩和を伴う二原子分子気体（ O_2 、 N_2 ）について詳細な解析と数値計算を行なうなど、得られた多くの成果のうち、とくに注目すべき点は次のようである。

(1) 緩和過程を伴う非平衡ノズル流れの臨界流量の解析において、種々の緩和過程を一般化した緩和方程式を用いて非平衡ノズル流れの臨界流量を決定する臨界条件を明らかにし、この条件から平衡ノズル流、凍結ノズル流の両極限の場合と非平衡ノズル流の場合の臨界流量の関係を明らかにした。

(2) 理想解離気体の非平衡ノズル流れにおける平衡凍結流れの近似を、分子振動緩和を伴う場合に適用して解析し、この近似の物理的意義とその成立する基準を示した。

(3) さらに理想解離気体の流れにおける非平衡助変数を、分子振動緩和を伴う場合に拡張して、精度の高い近似緩和方程式を導入する方法をも展開し、ノズル前方の多くの岐点条件下でのノズル流れ内の非平衡量を数値的に求めた。

(4) 非平衡ノズル流れにおけるエントロピと上記の臨界流量および流れの非平衡量との間の関係を明らかにし、その関係を数値的に明らかにした。

以上要するに、この論文は緩和過程を伴う二原子分子気体の非平衡ノズル流れについて詳細な解析を行ない、 O_2 、 N_2 気体について多くの数値計算例を示したもので、極超音速風洞用ノズルの設計のみならず、一般に高温気体のノズル流れの解析にも役立つものであって、学術上は勿論工業上寄与するところが少なくない。よって、本論文は工学博士の学位論文として価値あるものと認める。