

氏名	由比政年
生年月日	
本籍	石川県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博乙第149号
学位授与の日付	平成9年9月30日
学位授与の要件	論文博士(学位規則第4条第2項)
学位授与の題目	固体-流体連成系の理論および数値解析に関する研究
論文審査委員	(主査) 石田 啓 (副査) 岡島 厚, 川村 満紀, 北浦 勝, 石井 隆次

## 学位論文要旨

### Theoretical and Numerical Analysis of Gas-Solid and Liquid-Solid Two-Phase Flows

This paper describes the theoretical and the numerical analysis of gas-solid and liquid-solid two-phase flows.

The Part-1 is concerned with a numerical study of axisymmetric gas-solid two-phase flows. Underexpanded sonic jet, steady and unsteady supersonic flows around bluff bodies are numerically simulated on a supercomputer. The gas phase is treated as a continuum medium and the solid particle phase is treated as a discrete one. By comparing in detail the dusty results with the dust-free ones, the effects of the presence of particles on the flow field are clarified. Also an attempt to correlate the particle behavior is made with universal parameters such as the Stokes number and the particle loading ratio.

In the Part-2, the dynamic responses of the seabed to ocean surface waves are analyzed theoretically on the basis of the mixture theory. The seabed is treated as the aggregate of the compressible liquid and the poro-elastic solid. First, the characteristics of the two dilatational waves and one rotational wave in the seabed are investigated and the fully dynamic solutions for the seabed response are obtained in closed forms. Next, the effects of anisotropy of the seabed are studied in detail for both a fully saturated and a slightly unsaturated seabed.

本論文では、固体-流体の連成系である、固気二相流体および固液二相流体の運動を対象として、理論的および数値的な検討を行った。まず、第1編では、固体相が多数の微粒子から成り、気体中に分散して存在するような固気二相流体を考え、気体相が超音速で、流れ場の内部に衝撃波のような強い不連続が存在するような状況下における、固体粒子相と気体相との相互干渉や流れ場の内部の粒子軌道に関する詳細な数値解析を行った。次に、第2編では、多孔質の固体骨格の内部に間隙流体が存在するような固液二相流体を考え、波浪に対する海底地盤の動的な応答の問題を取り上げて、理論的

な検討を加えた。以下、この研究で得られた主要な成果を要約する。

## 第1編 固体微粒子を含む気体の超音速流れ場の数値解析

固気二相流体の流れ場における粒子の軌道や固体粒子相と気体相の相互干渉を予測することは、固体ロケットエンジンのノズル内流れや噴霧の燃焼の解析、各種工業フィルターの設計などにおいて極めて重要である。これまでに、多くの理論的、数値的および実験的研究が進められてきたが、その多くは気体相の非圧縮性を仮定したものであり、気体の持つ圧縮性が非常に重要となる超音速領域での解析は少ない。そこで、本論文の第1編では、固体微粒子を含む圧縮性（超音速）気体の流れ場を対象とし、気体流体場内部での粒子軌道および粒子相の存在が気体相の流れ場に与える影響に関して詳細な検討を行った。

第1編で得られた主要な成果は以下の通りである。

### I. 固気二相の音速噴流の数値解析

まず、ノズルから排出される固気二相の音速自由噴流および音速逆推進噴流に関する数値解析を行い、流れ場の中の粒子軌道や粒子相の存在が気体相の流れ場に及ぼす影響を明らかにした。ここで得られた知見を自由噴流および逆推進噴流それぞれの場合について要約する。

#### ・ 固気二相の音速自由噴流の数値解析

- (1) 噴流のマッハディスク衝撃波背後では、気体相と粒子相の速度および温度の緩和が顕著に見られる。また、マッハディスク衝撃波背後の滑り線に囲まれる領域の気体流体場は、時間的に変動する性質を持ち、粒子の運動もそれに追従して複雑な粒子軌道を見せる。
- (2) 噴流境界の近傍に粒子の強い集中が見られる場合が存在する。
- (3) マッハディスク衝撃波前方の粒子軌道の特徴は、Stokes 数  $\Psi$  により整理することができる。 $\Psi \gg 1$  の場合には、粒子はほぼ直線的な軌道をとって移動する。 $\Psi \ll 1$  の場合には、粒子の半径方向の分散率は噴流気体の膨張率と等しくなる。 $\Psi = o(1)$  の場合には、噴流気体が粒子を捕らえて噴流境界の外側に放出する場合がある。
- (4) 固気二相自由噴流においては、粒子相と気体相の相互作用により、噴流の半径方向の膨張が顕著となる。また、マッハディスク衝撃波が下流側へと移動し、パレル衝撃波およびマッハディスク衝撃波の強さが弱められる。

#### ・ 固気二相の音速逆推進噴流の数値解析

- (1) 逆推進噴流の場合には、噴流衝撃波背後の気体流体場の変動に加え、主流と噴流の接触面も時間的に強い変動を見せる。このため、接触面近傍の粒子の運動は非常に複雑になり、粒子軌道は互いに複雑に交差する。その結果、粒子の存在しない領域や粒子繭 (particle cocoon) が流れ場の内部に発生する。
- (2) 逆推進噴流の場合には、粒子は流れ場の内部構造の中の複数の領域を通過していくため、Stokes 数のような単一のパラメータで粒子軌道の特性を分類することは困難となる。
- (3) 固気二相逆推進噴流においては、粒子相と気体相との相互作用により、噴流衝撃波、接触面、バウ衝撃波が、噴流の下流側へと移動する。また、粒子相の存在は、接触面の不安定性を増大させる作用を持つ。

### II. 鈍頭物体まわりの定常な超音速固気二相流の数値解析

次に、円柱および球のまわりの超音速固気二相流に関する数値解析を行い、流れ場の中の粒子軌道や粒子相の存在が気体相の流れ場に及ぼす影響を明らかにした。ここで得られた知見を円柱および球のそれぞれの場合について要約する。

#### ・ 円柱 (truncated cylinder) まわりの超音速固気二相流の数値解析

- (1) 粒子の粒径が小さい場合には、円柱表面での反射が粒子経路に及ぼす影響は小さい。また、円柱の上部に粒子の強い集中が見られる。一方、粒径が大きくなると、円柱表面での反射の影響

は大きくなり、円柱前面で粒子軌道が複雑に交差する。また、対称軸付近で円柱に衝突した粒子は衝撃波層から流出するまでに円柱に数回衝突する場合がある。

- (2) 円柱の集塵率は、Forney & McGregor の提案した修正 Stokes 数により良く整理される。しかしながら、修正 Stokes 数が 0.8 未満の領域に対しては彼らの理論曲線と今回の解析結果は一致せず、彼らの理論には若干の修正が必要とされる。
  - (3) 粒子相と気体相の相互干渉が存在する場合には、衝撃波の離脱距離が減少し、気体圧力や気体密度の分布が変化するが、気体 Mach 数の分布はあまり影響を受けない。また、粒子相と気体相の相互干渉が粒子の限界流線に与える影響は小さい。
  - (4) 気体単相流の衝撃波層では、物体表面で気体の温度が最大となるが、固気二相流の場合には、気体の温度は衝撃波先端付近のある点で最大となる。また、粒子速度の大きさは、粒子が衝撃波を通過した後、対称軸に沿ってほぼ線形に減少する。
- ・球のまわりの超音速固気二相流の解析
- (1) 粒子が球表面で完全非弾性衝突をする場合には、円柱の上部で粒子の強い集中が起こるが、粒子軌道の交差は発生しない。これは、粒子相の負荷率がゼロおよび有限のいずれの場合に対しても成り立つ。
  - (2) 粒子相の負荷率がゼロおよび有限のいずれの場合に対しても、球の集塵率は、Forney & McGregor の提案する修正 Stokes 数に対して非常に良く整理される。
  - (3) 粒子相と気体相の相互干渉が存在する場合には、衝撃波の離脱距離が減少し、気体圧力や気体密度の分布が変化するが、気体 Mach 数の分布はあまり影響を受けない。また、衝撃波層内の気体および粒子相の温度、速度分布は、気体単相流と固気二相流の場合で大きく変化し、その分布の特徴は、修正 Stokes 数と粒子相の負荷率の値に強く影響を受ける。
  - (4) バウ衝撃波の形状は、修正 Stokes 数と粒子相の負荷率の影響を受けて変化する。また、衝撃波の離脱距離は修正 Stokes 数の減少関数となる。

### Ⅲ. 鈍頭物体まわりの非定常な超音速固気二相流の数値解析

続いて、大きな粒子雲が球の前面の衝撃波層に入射したときに引き起こされる非定常な流体場の数値解析を行なった。ここで得られた知見を以下に要約する。

まず、粒子が球表面で完全弾性衝突をする場合に関して次のような結果が得られた。

- (1) 粒子の衝撃波層への入射および球表面からの反射の際に、粒子相と気体相の相互作用により、球前面のバウ衝撃波は大きく変形する。この変形の様子は従来の実験結果と良く一致する。また、対称軸上のバウ衝撃波の位置も粒子との相互作用により強く乱される。
- (2) 粒子雲の反射の際に、球前面には、高温の気体と主流との接触面が生成される。この接触面は物体の近傍に長くとどまるため、衝撃波層内の密度分布が初期の状態に回復するには、非常に長い時間が必要となる。また、粒子の反射時には球の前面に渦構造が生成され、球の表面に沿って緩やかに流されていく。
- (3) 粒子は、最初に球表面へ入射した後、反射して上流側へと移動し、バウ衝撃波を突き抜けて運動する。バウ衝撃波を通過した粒子は、弱い衝撃波を上流へと伝えるが、後に、主流により減速され、再び球表面への入射と反射を繰り返す。

一方、粒子が球表面で完全非弾性衝突をする場合に関して次のような結果が得られた。

- (4) 衝撃波層への粒子雲の入射により、バウ衝撃波の離脱距離は減少し、形状も若干の変化を見せるが、その変形は完全弾性衝突の場合と比べて非常に小さい。また、バウ衝撃波の初期の位置と形状は比較的早い時間に回復される。
- (5) 粒子雲により流れ場に誘起される渦度は、完全弾性衝突の場合に比べて非常に弱い。また、完全弾性衝突と完全非弾性衝突の両者の結果の比較により、次の結論が得られた。
- (6) 反射粒子は衝撃波の変形に非常に重要な役割を果たしている。過去の実験で観察された、バウ衝撃波の大きな変形は、入射粒子のみで反射粒子が存在しない場合には発生しない

## 第2編 固体-液体二相連成系としての海底地盤の波浪応答の理論解析

波浪に対する海底地盤の動的応答のメカニズムを明らかにすることは、海底地盤の液状化や海底地滑りの危険性を評価する上で非常に重要であり、海岸工学および土質工学の両分野で、近年精力的に研究が進められている。しかしながら、その研究は、およそ25年前から開始されたきわめて新しい分野であり、多くの問題点が未解明のまま存在する。本論文では、その中でも次の2点、すなわち、

- ・ 土-水の二相混合体内を伝播する波動と海底地盤の波浪応答特性との関連
- ・ 海底地盤の異方性が海底地盤の波浪応答特性に及ぼす影響

に着目して、従来の解析モデルをより一般的な形へと発展させ、詳細な理論的検討を行った。

第2編で得られた主要な成果は以下の通りである。

### I. 二相混合体内の波動伝播に基づく海底地盤の波浪応答の理論解析

まず、海底地盤の波浪応答に対して、土-水二相混合体内の波動伝播の観点から理論的な解析を行い、地盤内を伝播する膨張波およびせん断波の特性を検討するとともに、海底地盤の波浪応答に対する動的な理論解を誘導し、従来用いられてきた準静的解との関連を明らかにした。ここで得られた主な成果を以下に要約する。

- (1) 海底地盤を間隙水（圧縮性流体）と土粒子骨格（等方性の線形弾性体）の混合体としてモデル化すると、その混合体内部を伝播する波動として、2種類の膨張波と1種類のせん断波が存在する。また、膨張波とせん断波に対する支配方程式系は互いに分離されて表される。
- (2) 海底地盤の波浪応答を考える際の代表的な条件の下では、膨張波およびせん断波の位相、減衰特性は次のようになる。第1の膨張波およびせん断波は、鉛直方向に非常に大きな位相速度で伝播し、第2の膨張波はそれと比較して緩やかに伝播する。また、第2の膨張波は第1の膨張波やせん断波と比べて、鉛直方向の減衰が非常に激しい。
- (3) 間隙水と土粒子骨格の相対運動は、第2の膨張波によってのみ生じ、第1の膨張波とせん断波にはよらない。
- (4) 一様な半無限地盤に波圧変動が作用する場合の海底地盤の応答に対して、完全に動的な理論解を新たに誘導することができた。得られた解の各成分は第1、第2の膨張波およびせん断波に対応しており、物理的意味のきわめて明快な形で表現された。また、今回得られた理論解は、その極限形として、従来用いられてきた準静的な理論解を含んでいることを示した。
- (5) 今回得られた動的な解と従来良く用いられてきた準静的解との関係を明らかにすることにより、両者の適用性を判断する上で重要となる2つの無次元パラメータを提示することができた。

### II. 直交異方性海底地盤の波浪応答に対する理論解析

次に、海底地盤を直交異方性線形弾性体の土粒子骨格と気泡を含む間隙水との混合体としてモデル化し、力学的異方性および透水異方性に関する異方パラメータが海底地盤の波浪応答特性に及ぼす影響を理論的に検討した。その主要な成果を以下に要約する。

- (1) 直交異方性海底地盤の波浪応答に対する支配方程式をBiotの理論に基づいて定式化し、微小振幅の進行波と半無限の一様地盤に対する厳密解を誘導することができた。更に、鉛直面内のせん断弾性係数に対するBardenの仮定などいくつかの仮定を付加することによって、解を簡略化し、陽な形で提示することができた。
- (2) 飽和した直交異方性海底地盤の波浪応答を特徴づける無次元パラメータは、水平および鉛直方向のヤング係数の比と水平面内および鉛直面内のポアソン比の3個となる。また、飽和地盤においては、鉛直方向の間隙水圧伝達の位相遅れはなく、異方性が及ぼす影響は、すべての地盤深度において同じ傾向を示す。
- (3) 不飽和な直交異方性海底地盤の波浪応答を特徴づける6個の無次元パラメータを提示した。さらに、その無次元パラメータとの関連を通して、力学的異方性および透水異方性が海底地盤の

波浪応答特性に及ぼす影響を明らかにした。

- (4) 力学的異方性および透水異方性に関する異方パラメータの個々の影響は、場合により、互いに強め合うかあるいは打ち消し合うかして相乗効果を生み出す。相乗効果により異方性の影響が強まった場合には、間隙水圧や有効応力の分布さらには海底地盤の波浪安定性に与える効果は非常に大きく、異方性の影響は無視できない。

## 学位論文審査結果の要旨

当該学位論文に対し、平成9年6月24日に第1回学位論文審査委員会を開催し、提出された学位論文および関連資料について検討するとともに、面接審査を併せて行った。8月7日の口頭発表後、第2回審査委員会を開催し、以下の通り判定した。

本研究は、固体と流体の連成系である、固気二相流体および固液二相流体を対象とし、超音速固気二相流および海底地盤の波浪応答の問題を取り上げて、理論的および数値的な解析を行ったものである。第1編では、固体微粒子を含む超音速気体の流れ場に対し、気体流体場内部での粒子軌道および粒子相の存在が気体相の流れ場に与える影響に関する体系的な検討を行い、自由噴流、逆推進噴流、円柱および球のまわりの定常・非定常な流れ場に対して、種々の貴重な現象を見出し、物理的な解釈を与えるとともに、その特性を体系的に明らかにしている。次に、第2編では、波浪に対する海底地盤の動的応答問題を取り上げて、厳密な理論的検討を行い、新しい理論解析モデルを確立することに成功している。ここでは、土-水の二相混合体内部の弾性波伝播と海底地盤の波浪応答特性との関連を明らかにし、現象に対する本質的な知見を与えたことに加え、海底地盤の有する力学的・透水的な異方性が、波浪に対する応答にどのような影響を及ぼすかに関して、実用上有意義な知見を得ている。

本研究成果は、今後の固体-流体連成系の工学研究に資するところ大であり、博士（工学）論文として十分に値するものと認定する。