

氏 名 横山隆明

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大甲第 1129 号

学位授与の日付 平成 20 年 3 月 19 日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻  
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 月惑星上砂地盤への着陸衝撃力算定手法に関する研究

論文審査委員 主 査 准教授 久保田 孝  
教授 小松 敬治  
教授 樋口 健  
教授 深川 良一（立命館大学）  
教授 建山 和由（立命館大学）

## 論文内容の要旨

本研究では、レゴリスといわれる細かい砂に覆われている月や惑星表面への着陸時の着陸衝撃力および沈下量を事前に算定する方法に関する研究を行った。

レゴリスのような細かい砂で覆われた地盤から受ける反力や沈下量を求めようとする時、砂のような粉粒体は変形時に連続体的挙動から非連続体的挙動を示すため、解析的に解くのは難しい。そのため地盤と機械との相互作用について研究しているテラメカニクス分野では、解析対象を模擬した実験を行い、得られた実験結果から地盤をモデル化し半経験式を導き、地盤の変形および抵抗を求める方法が良く用いられる。

まず既存の研究の調査を行った結果、テラメカニクス分野で、砂地盤への着陸現象を扱っている研究は見当たらなかったが、着陸と似たような現象を取り扱っている研究として、重錘落下による地盤の締め固め効果に関する研究があった。これらの研究では、衝撃加速度および沈下量は落下速度に比例すること、地盤密度が密な場合は衝撃加速度波形が1つのピークを持つこと、緩い場合は2つのピークを持つこと、質量が大きい場合は衝撃加速度ピーク値が小さくなることなどが実験から明らかにされていることがわかった。

そこで本研究においても、まずはテラメカニクス分野で行われている方法と同じく、実験から着陸衝撃力および沈下量を求める事を試みた。実験の対象は月面への着陸とし、月面の高真空環境を模擬するため実験は真空槽の中で行い、月面の1/6G環境を模擬するため1/6G相似則に基づき1/6スケールの試験体を使用した。試験体は平成14年度に提案されたSELENE-Bの着陸パットの諸元に基づき作成した。実験結果から、テラメカニクス分野の重錘落下実験結果と同じく、衝撃加速度および沈下量は落下速度に比例することがわかったが、月面環境を模擬するための真空引きの際に制御できない地盤密度の変化が発生し、落下質量の影響が明確に現れない、既存の実験では密度が低い場合に現れる2つのピークを持つ衝撃加速度形状が、密な地盤に対する実験でも現れるなどの真空を模擬した実験特有の難点があることがわかった。

そのため、アポロ計画で使われた地盤モデル中のパラメータを本研究で行ったフットパット試験体の直径に合わせて変更して数値解析をおこない衝撃加速度および沈下量の予測を行った。この結果、衝撃加速度および沈下量は速度に比例し、また、実験は表せなかった落下質量の影響も表すことができることがわかった。しかしアポロ計画で使われたモデルでは、実験結果に見られた2つのピークを持つ衝撃加速度を再現できない、沈下量がピーク値を示した後急激に減少してしまうなど、実験値と良く合わない点もあり注意が必要であることが明らかになった。その結果、アポロの地盤モデルの適用性としては、衝撃加速度、沈下量ともにピーク値までの予測であれば十分に使用可能であることがわかった。

次に、圧縮性流体の解析法として開発された連続体から非連続体まで解析できるSPH法を砂地盤への衝突問題へ適用することを試みた。SPH法は圧縮性流体の解析法として銀河系の形成など天体物理の問題解決のため開発された方法で、その後、非圧縮性流体解析、構造解析など適用範囲が広がっているが、砂地盤への衝突題にSPH法を適用した例は未だなく本研究が世界初である。本研究では地盤をモール・クーロンの破壊基準を

降伏条件として持つビンガム流体と仮定し解析を行った。その結果、実験と同様に衝撃加速度および沈下量は衝突速度に比例し、実験では明らかにならなかった衝突質量の影響、アポロモデルでは実験値と大きく異なったピーク後の沈下量の推移、およびアポロ地盤モデルで表せなかった2つのピークをもつ衝撃加速度形状を表せることが明らかになった。そしてSPH法による解析結果を分析することで第2番目のピークの発生原因も特定された。すなわち、実験の制約により制限せざるを得なかった地盤厚さをSPH法により任意に変化させ解析を行った解析結果、衝突中の地盤の密度変化の状態のモニター結果から、地盤底面からの反射波および地盤密度の増加が原因であることが確かめられた。

以上の検討からSPH法は実験を十分に補える解析法であることが確かめられ、本研究成果は月面上のみならず他の惑星上への着陸にも適用可能であることが示された。

最後に、これまでに得られた知見を用い、SELENE-B月探査機の月面着陸時の衝撃加速度および沈下量の予測をSPH法を用いて行った。垂直方向のみ3mの衝突速度がある場合を計算した結果、最大衝撃加速度は約21G程度(4脚接地の場合)、最大沈下量は約7.4cm程度(1脚接地の場合)であることがわかった。

本研究では、月および惑星上への着陸時の衝撃加速度の予測法として、月面を対象とした実験、地盤モデルによる数値計算、SPH法による解析の3つの方法を試みた。その結果、月面環境を模擬しなければならない実験には多くの制限があり、アポロの際用いられた地盤モデルによる数値計算ではピーク値までしか信頼性がないことがわかった。反面、SPH法での解析は、実験で見られた特徴を良く表しているため、実験を補える手段として信頼性が高いことが示され、月惑星上砂地盤への着陸衝撃力算定方法として信頼性が高い方法であることがわかった。

SPH法は現在様々な現象に対して適用範囲が広がりつつある方法であり、その特徴として連続体的挙動から非連続体的挙動まで表すことができるため、例えば着陸機が月および惑星上の砂地盤に対して斜めに衝突する際の機体の安定性から砂の飛散範囲までの解析などにも幅広く適用可能である。また、例えば今後活発になると思われる月の利用に係わる問題に関しても、月の砂の掘削、運搬方法など月の砂に係わる問題は数多い。SPH法を用いた砂の解析は、今回適用性が示された衝突問題以外にも幅広い適用性を持つと考えられ、今後の発展が期待される手法と言える。

## 論文の審査結果の要旨

出願者は、レゴリスといわれる細かい砂に覆われている月や惑星表面の砂地盤への着陸時の着陸衝撃力および沈下量に代表される相互作用を算定することを目的として、その手法に関する研究を行った。

レゴリスのような細かい砂で覆われた地盤から受ける反力や沈下量を求めようとする時、砂のような粉粒体は変形時に連続体的挙動から非連続体的挙動を示すため、解析的に解くのは難しい。そのため地盤と機械との相互作用について研究しているテラメカニクス分野では、解析対象を模擬した実験を行い、得られた実験結果から地盤をモデル化し半経験式を導き、地盤の変形および抵抗を求める方法が良く用いられている。テラメカニクス分野で砂地盤への着陸現象を扱っている既往の研究は見当たらなかったが、着陸と似た現象を取り扱っている研究として、重錘落下による地盤の締め固め効果に関する研究がある。そこで本研究においても、まずはテラメカニクス分野で行われている方法と同じく、実験から着陸衝撃力および沈下量を求めることを試みた。実験の対象を月面への着陸とし、月面の真空環境を模擬するため真空槽の中で実験を行い、月面の1/6G環境を模擬するため1/6G相似則に基づいた試験体を使用した。実験結果から、月面環境を模擬するための真空引きの際に制御できない地盤密度の変化が発生する実験特有の難点があることがわかった。

そのため、アポロ計画で使われた地盤モデル中のパラメータを本研究で行ったフットパッド試験体の直径に合わせ変更して数値解析をおこない衝撃加速度および沈下量の予測を行った。しかしアポロ計画で使われたモデルでは、実験値と良く合わない点もあり注意が必要であることが明らかになった。その結果、アポロ地盤モデルは、衝撃加速度、沈下量ともにピーク値までの予測であるならば使用可能であることがわかった。

次に、連続体的挙動から非連続体的挙動まで解析できる SPH 法を砂地盤への衝突問題に適用することを試みた。砂地盤への衝突問題に SPH 法を適用した例は未だ見当たらない。本研究では地盤をモール・クーロンの破壊基準を降伏条件として持つビンガム流体と仮定して SPH 法による解析を行った。その結果、実験では明らかにならなかった衝突質量の影響、アポロモデルでは実験値と大きく異なったピーク後の沈下量の推移、およびアポロ地盤モデルで表せなかった 2 つのピークをもつ衝撃加速度形状を表せることが明らかになった。そして SPH 法による解析結果を分析することにより 2 番目のピークの発生原因が特定された。すなわち、実験の制約により制限せざるを得なかった地盤厚さを SPH 法により任意に変化させ解析を行った結果、衝突中の地盤の密度変化を観察することにより、地盤底面からの反射波および地盤密度の増加が 2 番目のピークの原因であることが確かめられた。

以上の検討から SPH 法は実験を補える解析法であることが確かめられ、本研究成果は月面上のみならず他の惑星上への着陸にも適用可能であることが示唆された。

最後に、出願者は、SELENE-B 月探査機の月面着陸時の衝撃加速度および沈下量の予測に SPH 法を適用した。

本研究では、月および惑星上への着陸時の衝撃加速度の予測法として、月レゴリス地盤を対象とした実験、地盤モデルによる数値計算、SPH 法による解析の 3 つの方法を試

みた。その結果、SPH 法に基づく解析は、実験で見られた特徴を良く表す定量的な着陸衝撃力算定方法であることを示した。また、例えば着陸機が月および惑星上の砂地盤に対して斜めに衝突する際の機体の安定性から砂の飛散範囲の解析などまでも適用可能である。今後活発になると思われる月の利用に係わる問題に関しても、月の砂の掘削、運搬方法など月の砂に係わる問題は数多い。SPH 法を用いた砂の解析は、今回適用性が示された衝突問題以外にも幅広い適用性を持つと考えられ、今後の発展が期待される手法である。

砂は解析や数値計算に乗りにくい土質の対象であるが、出願者はさらに真空・低重力加速度でありかつ未知パラメータの多い月レゴリスを対象にし、動的挙動である衝撃力算定の方法を提案するという挑戦的なテーマを扱った。提案された衝撃力算定手法は実験結果をも良く説明できており、広い有用性が期待される。

以上から、本研究は砂地盤への衝突問題の実験・解析・考察とその宇宙利用技術に重要な役割を担い、出願された論文は博士学位論文としてふさわしい水準にあると判定した。