

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 長縄 成実

本論文では、石油・天然ガスの坑井掘削におけるローラーコーンビットの掘削運動機構およびビットの軸方向振動を定量的に解析するための動力学モデルの構築が行われ、掘削時ビットの軸方向振動のシミュレーション手法が開発された。動力学モデルを利用した振動のシミュレーションによる坑底でのビット磨耗状態診断技術の実用化の可能性を提示した論文である。本論文は次の7章からなる。

第1章では、本研究の背景として、石油・天然ガスの坑井掘削におけるリアルタイムビット掘削制御技術の重要性と論文の構成を述べている。

第2章では、ローラーコーンビットの掘削挙動とビット振動解析に関する先行研究の現状と課題を整理している。

第3章では、ビット試験機を用いて実施した岩石掘削実験の詳細と従来手法による解析結果を纏めている。小径のビットと実際の石油・天然ガス坑井掘削に用いられるフルスケールビットを用いた2種類の掘削実験の解析の結果、静的データを用いた掘進率解析やトルク解析、機械効率検層と呼ばれる従来のビット磨耗診断法では、実坑井でのビット磨耗状態を確実に診断することが難しいことが示されている。

第4章では、岩石掘削実験で得られたビット振動に対してFFT法を用いたスペクトル解析を適用し、掘削パラメータやビットの磨耗状態とスペクトル特性との関係に関する詳細な考察が行われている。段階的に歯先を磨耗させたフルスケールビット数種類を用いた掘削実験で取得した振動データに対してスペクトル解析を行った結果、スペクトル上に現れる顕著なピークの周波数はビットの歯先磨耗の進行とともに高周波数側に移動する現象が観察された。この現象は岩石の種類に依らないことから、振動のスペクトル解析によるビット磨耗診断の可能性が確認された。しかし一方で、通常のスベクトル解析手法ではスペクトルピークの同定が難しく、より定量的な解析にはビットの動力学モデルに基づく理論的なアプローチの必要性が論じられている。

第5章では、ミルドーツタイプ歯先をもったローラーコーンビットを対象として、ビットの軸方向変位運動に関する動力学モデルの構築理論が述べられている。本モデルでは、ビットを剛体とみなし、ドリルストリングを1自由度のばねで表した運動方程式を用いてビットの軸方向運動を記述している。ビット磨耗による歯先の形状変化およびコーンの回転に伴って変化するビット歯先と岩石面との接触状態を考慮して、ビット歯先が岩石に貫入するとき作用する力の定式

化が行われている。また，所定の拘束条件を設けることによって自由に回転できるコーンの回転速度が定式化されている。

第 6 章では，室内実験との比較によって，構築した動力学モデルの妥当性の検証が行われている。ローラーコーンビット特有の軸方向振動をモデルが適切に予測できたこと，シミュレーションで得られたビット荷重振動のパワースペクトルの形状が実験結果の特徴を良く再現できたことから，本研究で構築したビット動力学モデルと振動シミュレーション手法は，ローラーコーンビットの振動解析に対して大変有用なツールであることが確認されている。

第 7 章では，ビット動力学モデルを利用した振動シミュレーションの坑底状態診断技術への応用例が提唱されている。第一は，時間 - 周波数スペクトル解析によるビット摩耗状態のモニタリングである。時間 - 周波数スペクトルによる連続モニタリングを行うことによってスペクトルピークの同定が可能になり，ピーク位置の移動を追跡することによるビット磨耗状態の定量的なデータ解析が行えることが判明した。この振動スペクトルの連続モニタリング手法は，実際の掘削時のベアリングの摩耗や破損によってコーンの回転が停止した場合の診断手法としても期待できる。第二は，掘削時のビット振動データからのコーン回転速度の推定手法である。本研究で提唱した推定法を適用すると，掘削条件の影響をさほど受けることなく，3 つのコーンそれぞれの回転速度を推定できることが示された。実坑井において直接測定できない掘削中のコーン回転速度のモニタリング手法は，ビット摩耗診断の有効な手段を与えている。

以上のように，本研究では，ローラーコーンビット特有の振動を詳細かつ定量的に解析するツールとして，ビット動力学モデルおよびビット振動のシミュレーション手法を構築し，従来の解析手法では成し得なかったビット摩耗診断のための定量的な振動解析手法を提唱した。本研究の成果は，石油・天然ガス開発における坑井掘削現場において，地下数千メートルの坑底の状態を的確に推定・把握するための技術の根幹を成すものである。MWD(Measuring While Drilling)による坑底振動データを利用した坑井内状態診断技術の実用化への道を切り開く独創的な研究である。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。