

論文の内容の要旨

論文題目 ローラーコーンビットの動力学モデルの構築とそのビット振動
解析への応用

氏 名 長 縄 成 実

石油・天然ガス開発においては、いかに速くかつ安価に坑井を掘削するかが普遍的な課題である。このためロータリー掘削による坑井掘削の現場では、地上で計測されるビット荷重やトルク、掘進率などのデータを常時監視することによって坑井内の状態を把握し、より効率的に坑井を掘削する努力が従来よりなされてきた。しかし、計測データをもとに人間の目で直接見ることでできない地下数千メートルの坑井内の状態を正確に把握することは極めて難しい。坑井掘削は今なお経験的技術に依るところが大きく、いかにして掘削時の坑井内の状態を早く正確に把握するかが、これまで以上に重要な課題となっている。

ローラーコーンビットを用いた坑井掘削では、コーンの回転に伴ってビット歯先が坑底面の岩石に次々に衝突する作用により特有の軸方向の振動が発生し、このビット振動が坑底の状態を知るための重要な情報源となり得ることが以前より指摘されてきた。1980年代後半には、Cooperらによってビットの歯先摩耗がビット振動スペクトルのピーク周波数の変化として観察されることが室内実験によって確かめられ、振動解析を利用したビット摩耗診断の可能性を示す結果として注目された。しかしながら、ビット摩耗と振動特性との関係の定量的な評価は難しく、その後、実用的な診断システムの開発には至っていない。振動データを利用したビット摩耗診断の可能性が示され、現在ではMWDによる坑底振動データの取得が可能となっている状況のなかで、データ解析手法の確立が不十分なために、フィールドで計測されるデータが有効に活用されていないのが現状であるといえる。

こうした現状を踏まえ、本研究では、リアルタイムビット掘削制御技術の開発に関する基礎研

究として、

- 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詳細に解析するための動力学モデルの構築
- 構築した動力学モデルと振動シミュレーション手法のビット振動解析への応用

を行った。本研究の目的は、ローラーコーンビットの掘削時振動を定量的かつ詳細に解析するためのツールと新しい解析手法を提示し、それを利用した坑底状態診断技術の実用化の可能性を示すことである。

本論文の第 3 章では、ビット試験機を用いて行った室内（常温，大気圧下）での岩石掘削実験の詳細について述べた。ビット径 95.3 ~ 120.6 mm (3-3/4 ~ 4-3/4 in.) の比較的小径のビットを用いた実験と、実際の石油・天然ガス坑井の最終坑径掘削に最もよく用いられる 215.9 mm (8-1/2 in.) 径のフルスケールビットを用いた実験の 2 種類の実験により、さまざまな条件下でのビット荷重、ビットトルクおよびビットの軸方向加速度の計測を行った。実験データの振動解析に先立って、静的データを用いた掘進率解析やトルク解析、さらに機械効率検層とよばれるビット摩耗診断法を評価したところ、これらの従来の掘削挙動モデルや解析方法のうちのある 1 つの手法を単独で用いてビット摩耗状態を確実に診断することは、少なくとも実坑井では容易でないことが推察される結果となった。

ビット振動に着目した解析として、第 4 章では FFT (fast Fourier transform) 法を用いたスペクトル解析によって、掘削パラメータやビットの摩耗状態とスペクトル特性との関係の詳細な考察を試みた。段階的に歯先を摩耗させたフルスケールのローラーコーンビット数種類を用いた掘削実験で取得したデータに対してスペクトル解析を行った結果では、ビットの歯先摩耗が進行するとともに、スペクトル上に現れた顕著なピークの周波数が高周波数側に移動する挙動が観察された。これは Cooper らの示した解析結果に一致し、ビット振動解析による摩耗診断の可能性が再確認できた。また、ほぼ同様のピークの移動の挙動は岩石の種類に依らず見られることも分かった。しかしながら、ビット振動データに対する通常のスเปクトル解析手法の課題として、より定量的な解析には何らかの理論的なアプローチが必要であることが認識された。

第 5 章では、ミルドーツタイプの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を構築した。ここでは、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簡易な運動方程式を用いてビットの軸方向運動を記述した。ビット歯先が岩石に貫入するときに作用する力の定式化では、運動学モデルによる詳細な記述に基づいて、摩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たモデル化を行った。また、自由に回転できるコーンの回転挙動に対して拘束条件を設けることによって、コーン回転速度を定式化した。第 6 章で、モデルの妥当性の検証を行い、比較的単純な形の運動方程式を用いながらも、ローラーコーンビット特有の軸方向振動を適切にシミュレーションできることを示した。シミュレーションによって得られたビット荷重振動のパワースペクトルの形状は、実験結果の特徴を非常によく再現できた。コーン回転速度のモデル化に課題は残ったものの、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を確

認した。

最後に第 7 章において、構築したモデルとシミュレーション手法を応用することで、ビットの振動解析による摩耗診断がどのように実現できるかについて 2 つの具体例を示した。

まず、構築した動力学モデルを用いたビット振動シミュレーション結果に対して、時間 - 周波数スペクトル解析によるビット摩耗状態の追跡・予測が可能かどうかを検証した。通常の単一の振動スペクトルによる解析では、どのピークがどの歯先列に由来するものかを同定することができなかったが、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、完全ではないもののスペクトルピークを同定することが可能になり、ピーク位置の移動を追跡することによる定量的なデータ解析が行えることが分かった。実際の掘削時のビット摩耗診断においても、測定データの振動スペクトルの連続モニタリングが有効であると考えられる。また、スペクトルの連続モニタリングは、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への適用も期待できる。

次に、掘削時に計測されるローラーコーンビットの振動データから、掘削中のコーンの回転速度を逆問題的に推定する手法を提示した。ビット歯先の摩耗によってコーン回転速度が増加することが、理論的考察および実験の結果から分かっており、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をモニタリングできれば、摩耗診断の有効な手段となり得る。掘削実験データに対して本推定法を適用した結果、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することができた。より高い推定精度を得るには、ある程度長い時刻歴データが必要であるが、相互スペクトルによる解析を併用することで推定誤差を低減でき得ることも示した。ビットの動力学モデルを利用した解析を行うことによって、ビット振動の計測データから、雑音に埋もれた有用な情報を取り出すことが可能であることを示した。

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、これを用いることで、従来用いられてきたスペクトル解析手法では成し得なかったビット摩耗診断のためのより定量的な振動解析が行えることを具体的に示した。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取得できる限られたデータを最大限に利用して、地下数千メートルの坑底の状態を「推定」し、的確に把握するための技術の根幹を成すものであり、石油・天然ガス開発に限らず、地熱開発や学術ボーリングなどの広範囲にわたる坑井掘削技術の発展に大いに寄与するものと考えられる。