

外 22-12

早稲田大学大学院理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

石油掘削における超低周波電磁波を用いた地中情報伝送技術の研究

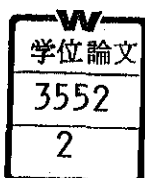
Studies on Underground Transmission Technology
using Extremely Low Frequency for Electromagnetic Measurement while Drilling

申 請 者

井 上 悟

SATORU I N O U E

2002 年 7 月



本論文は石油井の掘削において、坑底の状況を超低周波電磁波を用いてリアルタイムに地上に伝送する地中情報伝送技術に関する研究をまとめたものである。

近年の石油開発は中小規模で大深度かつ異常高圧層を有する地域や海洋などの掘削が困難な地域が多く、開発コストが高くなっている。よって、坑井の掘削においては、安全性や経済性の向上のために掘削中の坑底の状態をリアルタイムで入手する MWD(Measurement While Drilling)技術の活用が望まれている。

MWD は掘削ビットの上部に設けたセンサによって得られる計測情報をリアルタイムに地上に伝送するシステムで、これを実現することにより坑井の掘削軌跡、地層の状態、事故の予兆などが早期に把握でき、掘削コストを低減することができる。坑底から地上への情報伝送手段としては 1980 年前半頃からドリルパイプを循環するマッドを媒体とした弾性波を用いるマッドパルス方法が実用に供されている。しかし、マッドパルス方式は機械的な可動部を有しているため情報の伝送速度が遅いなどの欠点があり新たな方式が望まれている。このような状況下、伝送手段に電磁波を用いる EM-MWD(Electromagnetic-MWD)が注目され、1980 年後半頃から海外で研究が進められている。しかし、電磁波の伝搬媒質となる大地は減衰媒質であるため伝送信号の減衰が著しく、実用深度(約 3 km)での情報伝送を困難にしている。よって、EM-MWD の実用化にあたっては、①数 10Hz 以下の超低周波電磁波(ELF: Extremely Low Frequency)を用い、②減衰媒質である大地での伝搬特性および送受信アンテナ特性の解明と最適構造の確立、③地上での受信信号レベルと S/N 比の把握、④変復調およびノイズ処理に関わる信号処理技術の研究開発が必要である。

第 1 章では、本研究に関わる石油坑井の一般的な掘削コスト、掘削原理、掘削機器および地中情報伝送技術の現状を概説すると共に、本論文の概要について述べている。

第 2 章では EM-MWD 研究プロジェクトで開発した超低周波電磁波解析シミュレータを用いた電磁波の地中伝搬特性および送受信アンテナ特性の解析結果について述べている。解析領域には送信アンテナを含むドリルストリングや地層、マッドおよびケーシングを含む複雑な境界が存在し、細長い開領域であることが特徴である。解析シミュレータは、これらのことを考慮して有限要素法と境界要素法を組み合わせたコンビネーション法を用い準電界解析を行った後、この結果に電磁波減衰に伴う減衰の補正と微小ダイポールの合成による電界算出法を組み合わせ、実寸モデルでの解析を可能にしている。地層の導電率、マッドの導電率、多層の地層、送受信アンテナの形状の影響を解析シミュレータで求めた結果、電磁波伝送特性にマッド導電率の影響は考慮しなくても良く、異なる導電率の多層地層は平均導電率で代表しても良いことが明らかになった。さらに送信アンテナは、ビット直上のドリルパイプを一つの極に、そのドリルパイプに絶縁物を巻き回し、その絶縁物にさらに巻き回した電極(中央電極)を対極とした同軸構造

で掘削時の機械強度に耐えるアンテナ構造(レイヤ形アンテナと呼ぶ)を考案し、長さ 9m の定尺のドリルカラーに実装する効率の良い送信アンテナ寸法(中央電極長: 6m、沿面絶縁長: 1m)およびアンテナのインピーダンスは近傍地層の導電率で決まることを明らかにした。例えば地層の導電率が 0.6S/m のときでアンテナインピーダンスは約 0.3Ω である。地上の受信アンテナはケーシングパイプと大地に埋設した電極を双極子としたダイポールアンテナを用い、効率の良いアンテナの電極間距離は 10m 以上であることを明らかにしている。

第 3 章では変復調方式およびノイズ低減に関わる信号処理技術について述べている。信号伝送は搬送波に超低周波を用いた 2 値信号とした。従来の空中通信のフレーム構成ではデータレートおよびビットレートが極端に低くなり実用的ではない。また、受信信号の波長が数 km オーダになるため、地上での受信アンテナは空中通信のような共振アンテナにできない。さらに、受信アンプの低雑音化の観点からすれば低インピーダンスでのインピーダンスマッチングが必要になるので地中埋設型のダイポールアンテナ方式を採用した。しかし、掘削リグで発生する漏れ電流が大地に流れ、この電流が受信アンテナにノイズとして混入し、受信信号の S/N 比が低下することが分かった。これらのことから、EM-MWD システムに合った変復調およびノイズ処理に関する信号処理技術の研究開発が必要となった。変復調方式の同期タイミング検出にバーカ符号を用い同期検出信号の S/N を改善するとともに、同期タイミング検出精度を必要としない DPSK 方式によるデジタル変復調方式を考案した。性能評価の結果、同期信号の波数を 90 波以上、1 ビット当たりの波数を 16 に設定すれば、受信信号の S/N 比が -3 dB まで復調できることを明らかにした。また、地上での受信アンテナに混入するノイズはドリルパイプおよびケーシングを流れる電流との相関が強いことを見出し、ケーシングパイプを流れる電流を参照信号に適応フィルタを用いた適応型ノイズキャンセルシステムを適用し S/N 比を大幅に改善することができた。

第 4 章では、上記 2, 3 章での研究成果に基づき、EM-MWD システムおよびフィールド検証実験に供する機器の構成と仕様の検討結果について述べている。本システムは、坑底機器と地上機器から成り、ビット直上のドリルカラーに内蔵された坑底のセンサ情報を地上に伝送する片方向通信システムである。坑底機器は、マッドの循環エネルギーを利用したマッドタービン発電機により電子回路の駆動源を得、情報伝送を可能にしている。地上機器は受信アンテナ、アンプ、ノイズキャンセラ、復調器、復調情報を工学値に変換し表示する表示システムより構成している。

第 5 章はフィールド検証実験の結果について述べている。3ヶ所の実フィールドにおいて、超低周波電磁波の伝搬特性の解析結果との比較、ノイズキャンセラおよび復調器の性能検証実験を行い以下の成果を得た。

- ① 電磁波伝送特性と送受信アンテナの効率：地層の導電率（実験フィールドにより異なる）、搬送周波数を変えて、地中電磁波伝送特性のシミュレーション結果と実験結果を比較した。周波数が低くなるに従い両者の誤差が大きくなるものの、地上での受信信号レベルを比較すると、50%程度の誤差であり、ほぼ満足の行く結果であった。
- ② 変復調およびノイズキャンセル処理：同期信号にバーカ符号を用い、データ部に DPSK を用いた変復調方式およびノイズキャンセラの性能は通信モデルのシミュレーションと良く一致した。受信アンテナに混入するノイズレベルは掘削フィールドや掘削深度によって異なるが、ノイズキャンセラの出力は約 $30\mu\text{V}_{\text{rms}}$ で、ほぼ一定である。
- ③ 伝送可能深度：電磁波の伝送特性と信号処理技術の性能評価の結果、実用深度・3000m からの情報伝送には、搬送周波数に 1Hz を加える必要が生じた。3ヶ所のフィールド検証では、地層の導電率 0.35S/m で 3300m (3Hz)、地層の導電率 0.6S/m で 2200m (3Hz)、地層の導電率 0.4S/m で 3500m (3Hz)、4000m (1Hz) を実現した。

第6章では双方向通信システムについて述べている。前章までに研究した坑底から地上への伝送技術を基本に、新たに地上から坑底への情報伝送のための変復調技術を開発し、双方向通信システムを構築した。通常の中継通信では送受信アンテナの特性は可逆性の関係にある。本地下中通信においても伝搬経路が同一であることから、可逆性であると見なして4章で述べた送受信アンテナ構造を採用した。変復調は、坑底での設置空間、耐環境性、ノイズレベル等が異なることから新たに開発する必要が生じた。変復調方式はバーカ符号と差動位相変調を組み合わせた変復調方式を考案し、3章で述べた復調性能評価のための通信モデルシミュレーションで性能検証した。地上の送信アンテナ・アンプと坑底の受信用復調器を新たに試作し、双方向通信システムの性能を実フィールドで検証した。地層の導電率 0.4S/m で深度 3500m までは搬送周波数 3Hz で、深度 4000m までは搬送周波数 1 Hz で、地上一坑底間の双方向通信実験を行い、有効性を検証し、双方向通信によりさらに掘削性能の向上の可能性を明らかにした。

以上、本研究では超低周波電磁波を用いた地中情報伝送システムを開発し、実フィールドにおいて性能検証実験を行った。その結果、電磁波の伝送特性、変復調性能、ノイズキャンセル性能は所期の性能を満足した。また、地上から坑底のビットレートが 0.0024 ビット/秒、坑底から地上のビットレートが 0.04 ビット/秒、大地の導電率が 0.4S/m と低いものの、深度 4000m での双方向通信システムの検証にも成功し、実用化に向けて有意な研究成果を得た。