

# 技術紹介

## 4 デジタル・ディレクショナル・モジュールの開発

### Development of Digital Directional Module

有田 寛史	Hiroshi Arita	航機事業部 第三技術部 マネージャー
山田 孝純	Takazumi Yamada	航機事業部 第三技術部 主任
井上 雄介	Yusuke Inoue	航機事業部 第三技術部

キーワード: 油田掘削、加速度センサ、磁気センサ、ディレクショナル・モジュール、デジタル化

Keywords: Oil and Gas Drilling, Accelerometer, Magnetometer, Directional Module, Digitized

#### 要旨

当社では、これまで自社で開発した加速度センサや磁気センサといったアナログ出力センサをパッケージ化し、油田掘削市場向けに掘削装置の方位や傾きを検出するためのアナログ・ディレクショナル・モジュールを販売してきました。

今回、アナログ・センサ出力を演算し掘削装置の方位や傾きといった情報をデジタル出力する、デジタル・ディレクショナル・モジュールを開発し製品化しました。本稿ではデジタル・ディレクショナル・モジュールの開発の概要についてご紹介いたします。

#### SUMMARY

JAE is manufacturing and offering high performance accelerometer, magnetometer sensors and sensor packaged module for oil and gas drilling market. It is necessary and important to detect the drilling tool of inclination and azimuth as directional module.

Lately JAE developed and released the digitized directional module using JAE proprietary sensors, which is able to measurement inclination and azimuth while drilling.

## 1. はじめに

近年、貴重な天然資源である油田や天然ガスを得るため、油井の深深度化／長尺化が進んでおり、その距離は深度 5,000 m／掘削距離 10,000 m にまで達することがあります。このような難しい掘削を成功させるためには、過酷な振動や衝撃、そして高温環境に耐え、掘削の軌道が計画通りの軌跡をたどっているかを知ることが重要であり、掘削装置の傾斜角や方位角をリアルタイムに計測しながら掘削を進める MWD (Measurement While Drilling) と呼ばれる工法が行なわれています。MWD 工法に用いる掘削装置を MWD ツールと呼び、傾斜角や方位角を計測するディレクショナル・モジュールは、MWD 工法を行ううえで最も重要なモジュールです。

傾斜角や方位角などの情報を得るためには、高精度な加速度センサと磁気センサが必要で、さらにセンサ出力信号をデジタル変換して、演算処理するデジタル信号処理の機能も必要になります。従来の MWD ツールの市場では大手海外メーカー以外で、デジタル信号処理部の開発・製造もできるメーカーは限られていたのが現状です。

当社は、航空宇宙分野で培ったセンサ技術をもとに、1990 年代から油田掘削市場向けの加速度センサや磁気センサをアナログ・センサとして開発・製造しており、センサ単体での販売はもとより、加速度センサと磁気センサを三軸一体にパッケージ化した、“アナログ出力ディレクショナル・モジュール”の販売も手掛けてきました。これらの製品群は、高い性能を保ちつつ、耐振動・耐衝撃・耐高温といった耐環境特性にも優れている点で、お客様から長年高い評価と信頼を頂いております。

今回、従来の“アナログ出力ディレクショナル・モジュール”に“デジタル信号処理機能”を追加し、MWD ツールの中核として位置づけられる、傾斜角や方位角を演算する、“デジタル・ディレクショナル・モジュール”を開発しましたので、その概要と特徴について紹介いたします。

## 2. 製品仕様

今回開発したデジタル・ディレクショナル・モジュールの基本仕様を表 1 に示します。

表 1. デジタル・ディレクショナル・モジュール仕様

項目	単位	仕様値
基本性能（静止状態）		
傾斜角精度	deg	+/-0.1 以内
方位角精度	deg	+/-0.5 以内
回転角度精度	deg	+/-0.2 以内
環境		
性能保証温度	℃	-20 ~ +175
機能限界温度	℃	-40 ~ +185
耐振動	Grms	20 (10~500 Hz)
耐衝撃	G	500
外形寸法	mm	Φ34.5 x L741.7
質量	kg	1.8 以下

本表のように、本製品は 175℃ という高温下／静止状態の計測で、傾斜角精度：0.1deg、方位角精度：0.5deg という高い精度を実現しました。さらに最高温度 185℃ で作動し、高温＋振動・衝撃という苛酷な環境に耐えられるように設計されています。

### 3. デジタル・ディレクショナル・モジュールの構成

今回開発したデジタル・ディレクショナル・モジュールは、加速度センサ部、磁気センサ部とデジタル信号処理部の、大きく3つのブロックで構成されます(図1)。デジタル信号処理部には、AD変換機能(ADC)、振動衝撃モニタ機能、プロセッサ(MPU)、電源回路(TPS)、メモリなどの機能が一つの基板の中に集約されています。

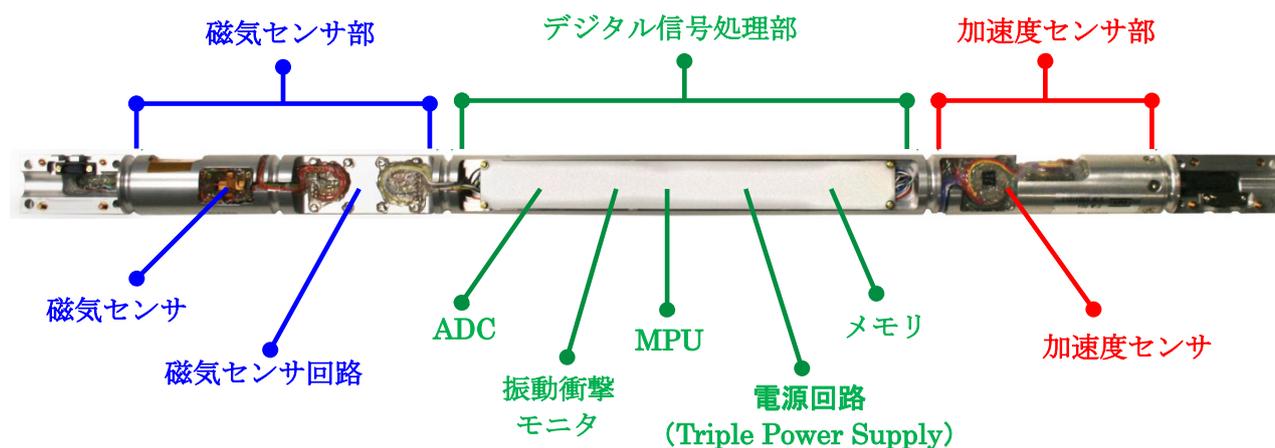


図1. デジタル・ディレクショナル・モジュールの構成

## 4. MWD ツールの構成

従来の MWD ツールは、図 2 に示すとおり、バッテリー、MPU、TPS (Triple Power Supply : 3 出力電源)、ディレクショナル・モジュール、Gamma、Pulser を一つに連結した構成になっていました。今回、当社では MPU、TPS といった機能をディレクショナル・モジュールの中に集約することで MWD ツールの全長を短くすることに成功しました。これにより MWD ツール全体の設計自由度の向上や、掘削時に行われる MWD ツールを屈曲させるための操作性向上に寄与することが期待できます。

従来 MWD ツールの構成

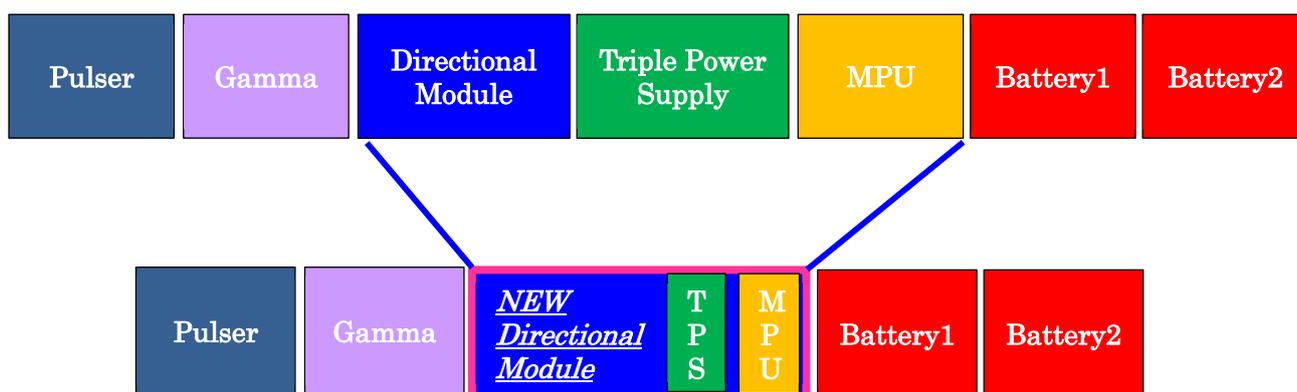


図 2. MWD ツールの構成

各モジュールの役割/機能

- ✓ Battery1/ Battery2 モジュール  
MWD ツールを作動させるために必要な電力を供給するバッテリー
- ✓ MPU モジュール  
MWD ツール全体の制御を行い、傾斜角・方位角の計算、Pulser へのデータ送信、掘削状態の記録などを行なう
- ✓ TPS モジュール  
バッテリーの電力を各モジュールの作動に必要な 3 種類の電圧に変換する
- ✓ ディレクショナル・モジュール  
加速度センサ/地磁気センサが搭載され、MWD ツールの傾斜角や方位角を計測するために必要なセンサ部分
- ✓ Gamma モジュール  
地層から放射される自然ガンマ線量を計測し、地層の種類を検知するためのセンサ
- ✓ Pulser モジュール  
掘削中に取得したデータをリアルタイムに地上設備に送信する

## 5. 掘削中の傾斜角・方位角計測

油田掘削はMWDツールの先端に取り付けられたドリルとツール全体と一緒に回転しながら進みます。このような一般のMWD工法では、通常、傾斜角や方位角を計測する際に、ドリルの回転を止めた“静止状態で計測”（サーベイ）を行い、掘削とサーベイを適時繰り返しながら掘り進んでいきます。一方、実際の掘削現場では、いかにこのサーベイ時間を短くして効率的に掘削を進めるか、ということが課題となっており、ドリルが回転し掘削している間でも、正確に傾斜角・方位角を測定できる機能が求められています。

今回このような顧客の要求に応えるため、掘削中でも傾斜角・方位角を高い精度で計測できる機能を新たに開発しましたので、その機能のポイントと評価結果について説明します。

実際の掘削環境下では、掘削による“振動”と“回転”が両方同時にMWDツール全体に加わります。このため、掘削中の計測は、加速度センサや磁気センサの出力信号からこれらの影響を除去して、傾斜角と方位角を演算する・・・という、複雑なアルゴリズムが必要になります。その実現のために、図3に概略を示した、外乱に強い耐性を持つUnscented Kalman Filterを採用することとしました。本図で示すように、Unscented Kalman Filterでは【予測プロセス】と【補正プロセス】を時間ステップ毎に繰り返すことで、【傾斜角】や【方位角】などの状態量を精度良く演算することを可能にしています。

- ✓ 予測プロセス：  
1ステップ前の状態量に対して、掘削時のツールの振動や回転を考慮した物理モデルを適用し、現在時刻での状態量を予測する。
- ✓ 補正プロセス：  
予測値に対して、現在時刻で得られた加速度センサ／磁気センサのデータを使って、外乱ノイズの影響が最小となるように補正を行う。

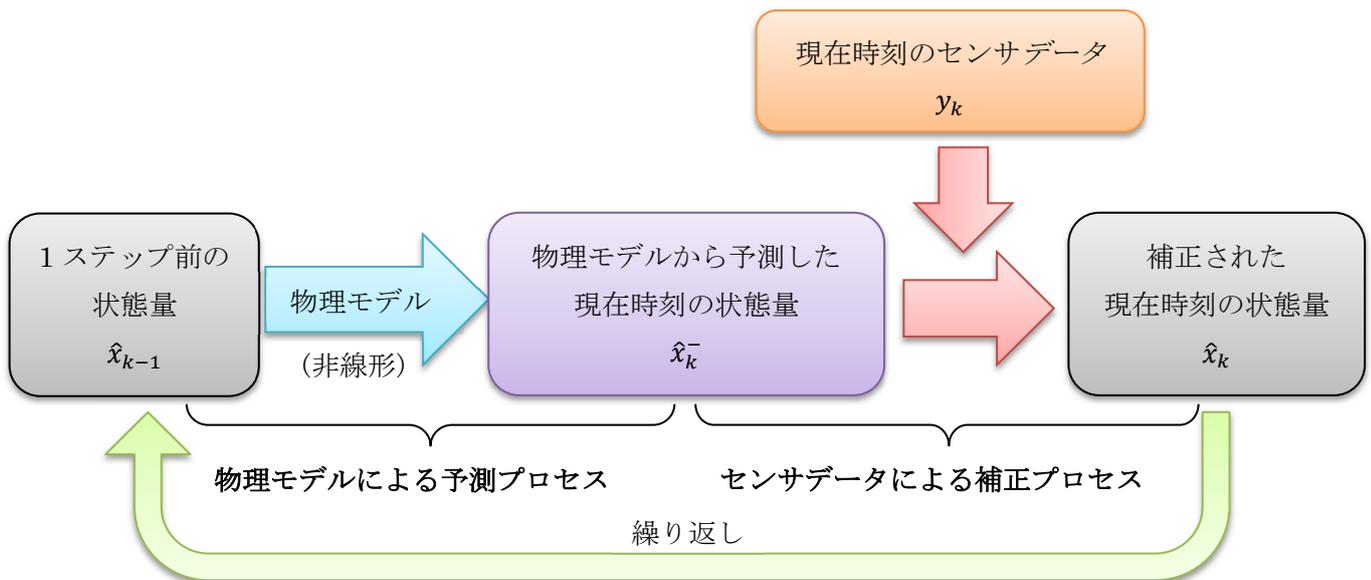


図 3. Unscented Kalman Filter 概略図

図 4 に試験結果の一例を示します。本図は、デジタル・ディレクショナル・モジュールを【傾斜角】45deg／【方位角】45deg に固定したうえで、掘削中の回転を模擬するため 100 rpm、200 rpm、400 rpm で回転させながら、回転中の【傾斜角】と【方位角】を測定した結果です。測定結果からも分かる通り、回転中においても、【傾斜角】及び【方位角】出力は非常に安定しており、回転速度 400 rpm の高速回転においても、【傾斜角】誤差 0.5deg 以下、【方位角】誤差 1deg 以下という計測精度を実現しました。

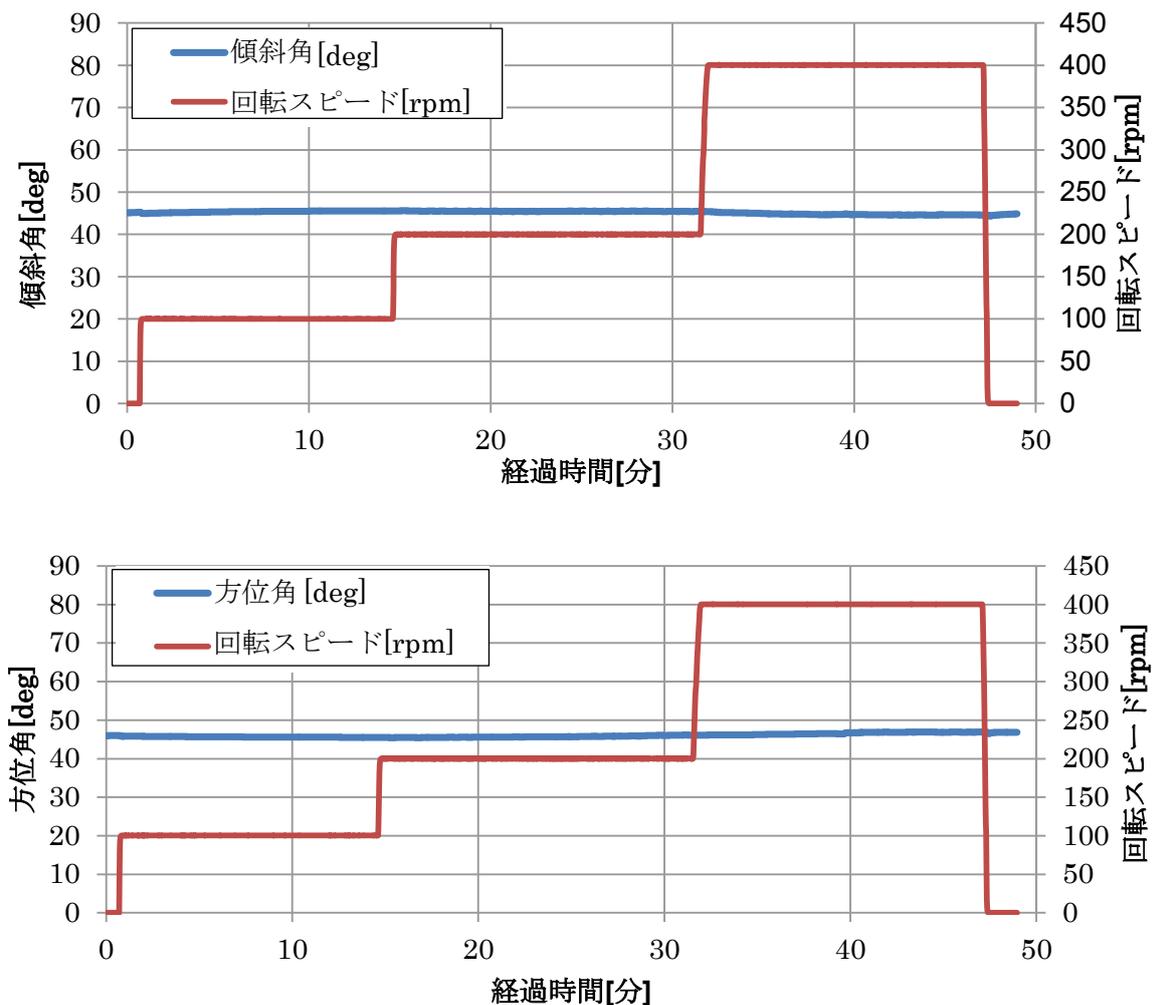


図 4. 掘削中（回転中）の【傾斜角】・【方位角】計測試験結果

## 6. 掘削データの紹介

実際に掘削現場で取得された、デジタル・ディレクショナル・モジュールの掘削データを図5に示します。ドリルが回転し、掘削しながら計測した【傾斜角】と、掘削を停止させて計測した傾斜角の結果は良く一致しており、優れた性能であることが証明されています。また、このデータからもわかるとおり、掘削開始直後はMWDツールが垂直(Inc=0deg)に掘り進み、途中で曲がりながら水平(Inc=90deg)に掘り進んでいく様子がうかがえ、特にシェール層の掘削では薄い地層の中を精度よく水平に掘り進む必要があることから、本デジタル・ディレクショナル・モジュールの活躍が大いに期待されます。

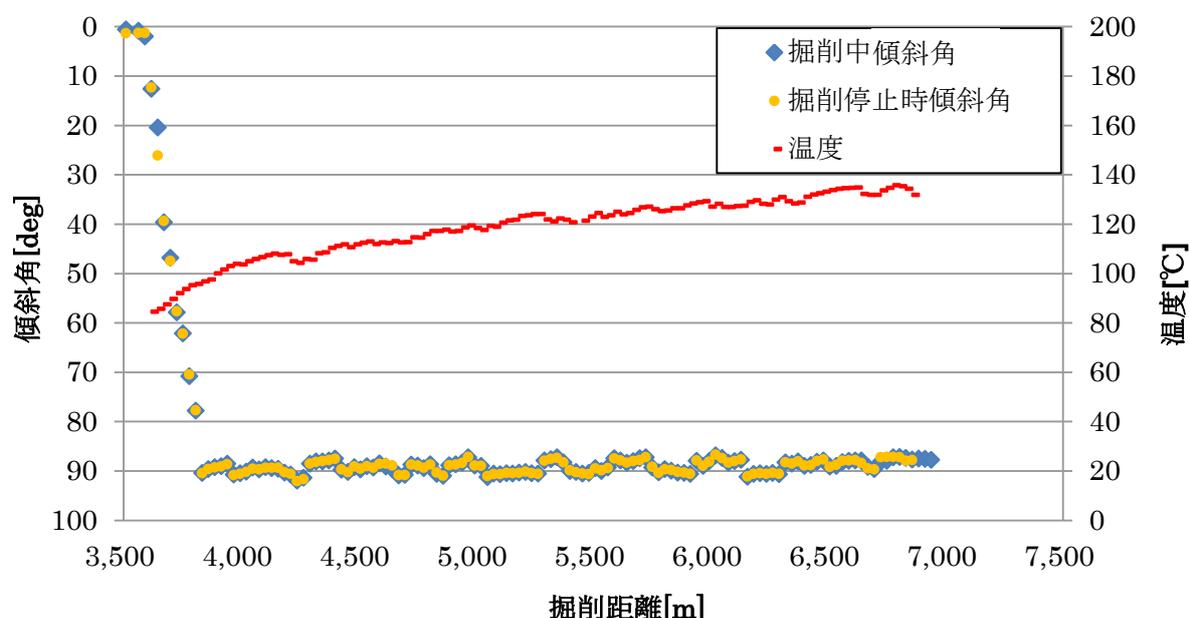


図5. デジタル・ディレクショナル・モジュールを使った掘削データ例

## 7. まとめ

今回、振動衝撃モニタ機能、MPU、電源回路などの機能をひとつに集約して短尺化し、掘削中でも精度の高い傾斜角・方位角計測できるデジタル・ディレクショナル・モジュールを開発することができました。既に本製品は、北米を中心に市場投入を開始しており、お客さまから、高い評価を得ております。

今後は、掘削制御におけるキーセンサである、掘削用加速度センサと磁気センサ、両方を製造・供給してきた“業界唯一のメーカー”として、センサ・メーカーの強みを生かしつつ、幅広い市場の要求に応じながら、さらなる高付加価値製品をめざして発展させていきたいと考えております。