



## 削孔データによる地下岩盤構造の可視化手法について

メタデータ	言語: jpn 出版者: 骨材資源工学会 公開日: 2017-05-24 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 板倉, 賢一 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/00009200">http://hdl.handle.net/10258/00009200</a>

# 削孔データによる地下岩盤 構造の可視化手法について<sup>※)</sup>

板倉賢一<sup>※※)</sup>

## 1. はじめに

近年、センシング技術の発達によりボーリング中に削孔機の各種機械量データ（トルクや推力、回転数、ストロークなど）を記録、解析してオペレータの運転判断材料に供したり、削孔箇所の探査に活用するなど、いわゆるMWD（Measurement While Drilling）技術が石油掘削だけでなく様々なボーリング現場で使われている。例えば、シェールガスの掘削や海洋掘削、土木トンネルの前方探査などがある。中でも、シールド掘削では、その制御のために必要不可欠である。

こうしたMWD技術を用いて削孔箇所の地質性状や鉱石の品位、岩石の強度等を、場合によっては掘削ビットの磨耗量を推定しようとする研究は、古くから行われてきた。ただし、ビットの磨耗は直接削孔機械量データに影響を及ぼすため、磨耗状態がわからないと削孔箇所の情報をうまく推定できない。また、逆に同じ性質の岩盤内の削孔でなければ磨耗量の変化を推定できないという、矛盾した問題がある。

我々もこれまでに、長壁式採炭の払跡空洞の大きさ推定や採炭パネル周辺の地圧分布の推定、土木トンネルの壁面周辺の弱部推定にMWD技術を採用し、それが可能な削孔機とソフトウェアの開発を行ってきた。本講演では、多くの産炭国で問題になっている坑道の落盤・崩落を防ぐロックボルト支保工を対象にした、MWDシステムの開発結果について述べる。

炭鉱の坑内保安統計によると、ガス・炭塵爆発や山はね・ガス突出等の大規模な災害の裏で、落盤・崩落災害が恒常的に発生している [1]。この傾向は過去の我が国のみならず、未だに多くの産炭国に見られる。落盤・崩落災害の多くは、ロックボルト支保による坑道や採炭切

羽周辺で起きている。落盤・崩落は、岩盤の破壊とその集積に起因することから、これを予知・予防するとともに対策を講じるためには、坑道に沿った岩盤内部のき裂の集積度合いを把握し、監視する必要がある。この目的のために、これまでルーフボルト削孔時の削孔機械量データを削孔中に検出、記録し、天盤内の地層構造（き裂分布の推定と岩相変化）を可視化表示するとともに、危険箇所を予測するシステムの開発を行ってきた [2] [3] [4]。以下に、その一例を示す。

## 2. 検層システム

圧縮空気駆動型のポータブルなルーフボルター（WOMBAT：既に生産中止）や油圧駆動式のケーブルボルター（ARO, Hydramatic Engineering PTY., Ltd.）に各種機械量データを検出するセンサを搭載し、メモリや耐圧防爆容器内のパーソナル・コンピュータに計測データを記録するシステムをこれまでに開発してきた。その結果、国内では一応の成果をあげて有効性を確認したが、国外の炭鉱で活用するまでには至らなかった。

その後、これまでの削孔機械量データ検層システムのノウハウを活かして、多くの産炭国で簡便に利用できるシステムの開発を目指してきた。すなわち、小型軽量で移動が容易であり、安全な削孔ができると共に、国際電気標準会議（IEC）の防爆検定（IECE X）に合格したハードウェア・システムである。

### 2.1 ハードウェア・システム

本システムのベースとなるボルト打設機は、Rambor Limited製 Trussmaster 1 P/N TRUSS001-1828（95シリーズモーター、1.3mストローク）である。Trussmasterはスティングーにより打設機本体を天盤に固定し、遠隔操作できるのが特徴である。これにより、オペレー

※) 平成28年度秋季定例研究会（函館）にて講演

※※) 室蘭工業大学大学院工学研究科しくみ情報系領域 環境科学・防災研究センター長 教授 工学博士

タは削孔中の落石の影響を受けない。打設機にはストローク、推力、トルク、回転数の4種類の機械量データを計測するためのセンサを取り付けた。センサは全て市販の本質安全防爆型センサである。計測データはデータロガーによりA/D変換され、保存される。図1に、天盤可視化用ボルト打設機の外観を示す。

#### <センサ>

搭載性（大きさや重さなど）、電気規格などを考慮して、以下のセンサを打設機本体に取り付けた。表1はTrussmasterの仕様であり、各センサの検出範囲はこれらの最大値以上に設定してある。

- ・回転数センサ：Pepperl+Funchs Group NJ2-12GM-N
- ・トルクセンサ：Australian Weighing Equipment Pty Ltd Torque Cell A2100
- ・推力（圧力）センサ：Setra Systems, Inc. Model 522
- ・ストロークセンサ：Uni Measure Inc. HX-PA Series Ratiometric Voltage Output

表1 Trussmasterの性能（空気圧：689kPa時）

回転数	850-900	rpm
推力	4.4	kN
トルク	251	Nm
ストローク	1.3	m
空気量	2832-3398	litter/min
高さ(最小と最大)	1.8-2.8	m

#### <データロガー>

本システム用に、防爆型データロガーを開発した。ロガーは、国際電気規格（IEC）における防爆機器認証制度（IECEXスキーム）による認証を取得した。条件は標準圧雰囲気、40℃以下における本質安全防爆（IECEX ia Group 1 IP55）であり、IEC 60079-0:2004 Ed.4、IEC 60079-11:2006 Ed.5を満たすものである。取得番号はIECEX TSA 07.0008X（ここで、TSAは認定機関であるTestSafe Australiaを表す）である。

このデータロガーのサンプリングタイムは、1msecあるいは10msecを選択できる。削孔中のデータ量は膨大になるため、また、分析を行うPC（パーソナルコンピュータ）へのデータ転送を容易に行えるよう、データ保

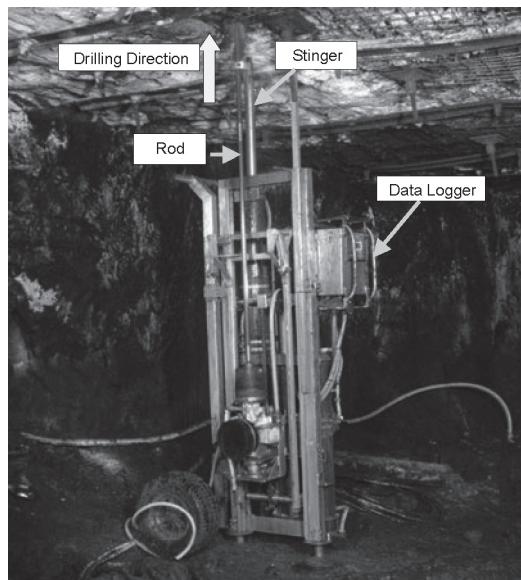


図1 Trussmaster Mark2の外観

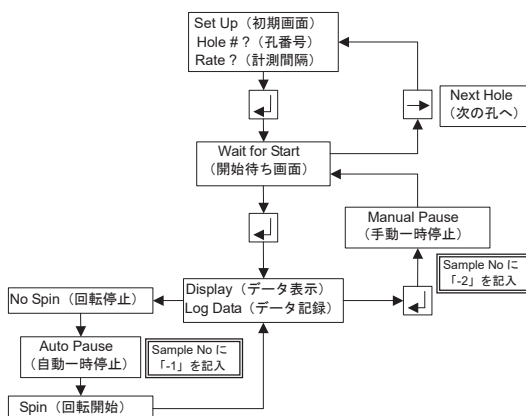


図2 データロガーの操作設計

存媒体にはUSBメモリを採用した。USBメモリは防塵・防水構造になっており、坑内でも取り外し可能である。

データロガーの前面には液晶画面で4つの計測データが表示される。操作は4つのキーで行う。センサおよびデータロガーへの電源供給は、充電式バッテリーによる。バッテリーは、データを取得している時に最も多く電力を消費する。省電力を図るため、ロッドの回転が止まっている時は自動的にデータ取得を一時停止する機能を搭載している。その結果、消費電力を大幅に抑えることができ、現場試験において18時間以上の計測にも耐えうる

容量である事が確認された。

図2は、データロガーの画面操作を表している。削孔番号やサンプリングタイムの設定の後、自動あるいは手動によりデータの記録、中断が可能である。

図3は、データロガーによりバイナリ形式で記録されたデータファイルをアスキーコード変換した例である。回転数が一定時間検出されなくなるとファイルへの記録が中断され、-1と0の並びが記録される。また、手動により中断した場合には、-2と0の並びが記録される。

Hole #0001	
Sample Number, Torque Value, Stroke Value, Pressure Value, Speed Value	
0, 267, 1983, 1459, 7359	
1, 199, 1985, 1451, 7434	
2, 42, 1985, 1457, 7434	
3, 57, 1986, 1460, 7283	
.....	
-1, 0, 0, 0, 0	← 回転数 0 による自動停止
3224, 495, 631, 1085, 3783	← 再回転による自動開始
3225, 559, 631, 1092, 3783	
3226, 871, 632, 1087, 3771	
3227, 1203, 653, 1112, 3704	
.....	
-2, 0, 0, 0, 0	← ボタンによる手動停止
38, 938, 702, 1352, 3662	← 再回転による自動開始
39, 1069, 704, 1353, 3662	
.....	

図3 記録データのフォーマット

## 2.2 ソフトウェア・システム

収集されたデータは、専用のソフトウェアで段階を踏んで分析される。図4に、その手順を示す。Trussmasterは、オペレータが推力を調整しながら削孔するため、岩層境界やき裂等の判定にトルクと推力の比（トルク/推力）を用いた。

### 1) バイナリデータのアスキーコード変換

USBメモリに記録されたバイナリデータをアスキーコード変換し、CSV形式ファイルとして保存する。変換後のファイルには、ヘッダ部に続き図3のようにサンプル番号、トルク、ストローク、推力、回転数の順にデータが記録される。サンプル番号は、削孔時間を算出するのに用いた。

### 2) ノイズデータと不要データの除去

回転数だけでは判定できない削孔休止状態のデータを、推力等のデータを基準にして削除する。さらには、パルス上のノイズが入ることがあるため、それらを削除する。

### 3) 不要データ範囲を詳細に調べて削除

ロッドの継ぎ足しが終わり、実際に削孔が始まるまでの不要なデータや削孔が終了した後の不要なデータは、プログラムにより自動的に削除するのは難しい。このステップでは、時系列データの表示グラフを見ながら不要データを細かく調べて、手動で削除を行う。

### 4) 時系列データをログデータに変換

ストロークデータを用いて、時系列データから削孔長に対するログデータへの変換を行う。また、必要に応じて一種のローパスフィルタである移動平均処理も行う。

### 5) BP法によるログデータの分解

ログデータの変動パターンを調べるため、ログデータを10mm毎に区切り、その間のパターン分類をニューラルネットワークの一種であるバックプロパゲーション

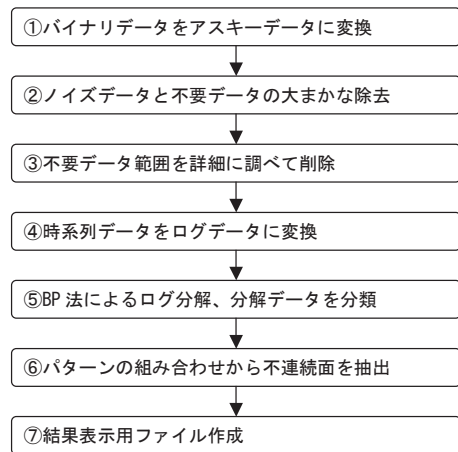


図4 機械量データの処理手順

(BP) 法により行う。

### 6) パターンの組み合わせから不連続面を抽出

ステップ5) で分類された10mm毎のログパターンの組み合わせから、不連続面の位置を求める。得られた不連続面位置から次の不連続面位置の間の平均トルク/推力値と、次の区間の平均値の間に一定（閾値）以上の差があれば岩層境界と見なし、差が小さければその不連続面をき裂と見なす。この閾値の設定は、既知の地層構造情報を考慮して試行錯誤的に決定した。得られた不連続面位置および平均トルク/推力値の階段状グラフを、基になったトルク/推力ログと共に、グラフ表示する。ここで、トルク/推力をパラメータとして用いている理由は、見掛けの削孔エネルギーは、トルクの影響が大きいた

めである。すなわち、回転数 $N$ 、推力 $F$ 、トルク $T$ 、ストローク $d$ とすると、見掛けの削孔エネルギーは次式で表せる [5]。

$$e = F/A + 2\pi NT/Au \quad (1)$$

ここで、 $A$ は削孔断面積、 $u$ は削孔速度である。上式の右辺第一項と二項を比較すると、一般的なロックボルトの削孔では、二項が一項の10倍以上の値になることが確かめられている。すなわち、削孔エネルギーをトルクにより代表させることができる。また、オペレータは推力を変化させて削孔を行うため、その影響を除くため単位推力当たりのトルク値をパラメータとした。

### 7) 結果表示用ファイル作成

VRML (Virtual Reality Modeling Language) を用いた分析結果の3次元表示用ファイルを作成する。ここでは、削孔位置の座標や岩層境界面の位置情報、き裂位置情報をもとに、VRMLファイルが作成される。その結果は、Webブラウザにプラグインしたビューワや、ビューワ・ソフトを使って見ることができる。

## 3. 現場適用試験

豪州NSW州にあるGujarat NRE No.1炭鉱 (以下NRE炭鉱) において現場試験を実施した。水平坑道の坑口 (Adit20) から100~200m程度入った区域である。試験区域の平面図を図5に示す。図において番号を付した区域で試験を実施した。坑道の幅は5.0~5.5m、高さは2.3~2.8m程度であり、坑道から7~8m上方に1930~40年代に採掘された旧坑が存在する。

試験は、対象となる坑道を図5のように12の区域に分け、それぞれの区域で基本的には3本、部分的にはそれより数本多く削孔し、合計で48本天盤に向けて垂直に削孔した。内訳は、 $\phi 27\text{mm}$ 孔1本、 $\phi 28\text{mm}$ 孔31本、 $\phi 55\text{mm}$ 孔15本、 $\phi 55\text{mm}$ のコアボーリング1本である。削孔長は概ね5m、機械量データのサンプリング間隔は10msecである。また、試験中の給水、空気圧の条件はほぼ一定である。図5中の×印は、過去の天盤崩落箇所を表す。

### 3.1 削孔径の影響

図6は、図5における11区域で実施したNo.8とNo.9孔のトルク/推力ログである。同図中の黒丸は、不連続面

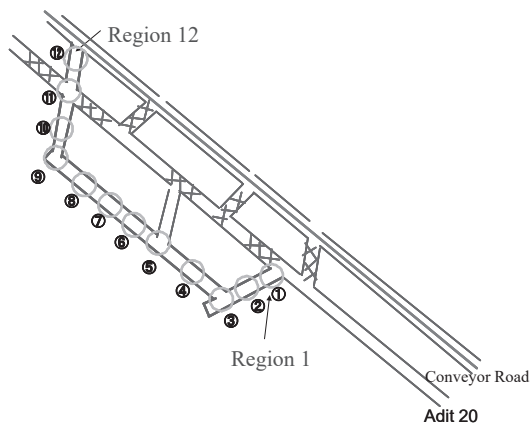


図5 削孔試験坑道

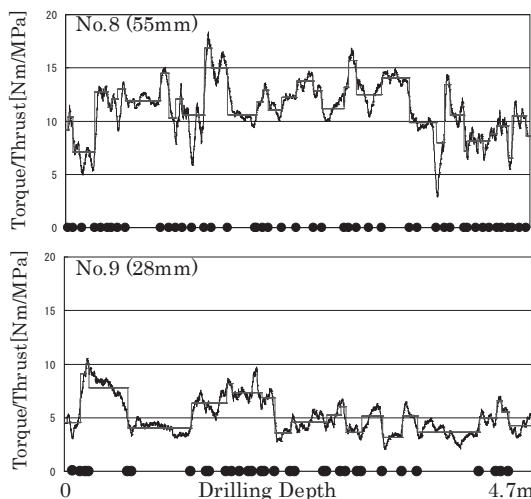


図6 28mmと55mmビットのトルク/推力

位置と判断された箇所を表している。No.8孔が最大径55mmのPCDビットによる削孔で、No.9は最大径28mmのTwo Wingビットによる削孔である。この場所は坑道の交差部にあたり、崩落跡に近い。同図より、ビット径が2倍異なることにより、トルク/推力値も約2倍違っている。この結果は、モルタルを対象にした試験でも同様であった。また、トルク/推力ログの変化であるが、55mmのビットと28mmのビットではやや異なる結果になった。本来であれば、岩層の変化に応じていずれのビットにおいても類似した変化パターンを示すはずである

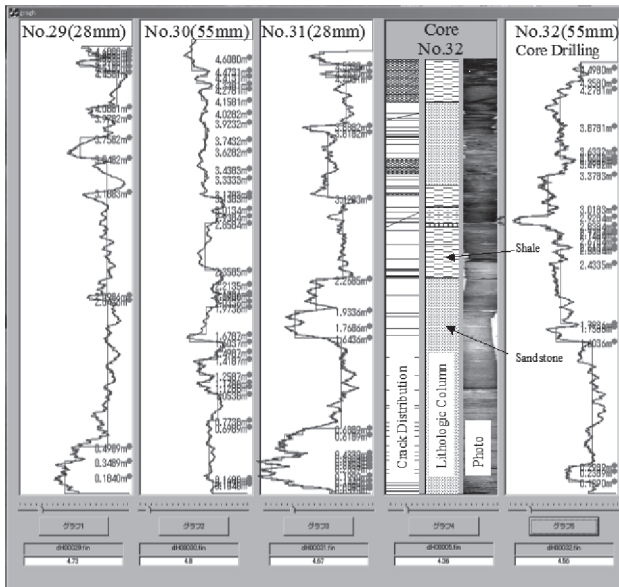


図7 コアボーリングとその近傍のトルク/推力ログ

が、対応しない箇所が見られる。他の削孔箇所において、28mmビットによるトルク/推力ログ同士を比較したら削孔長に対して類似した変動パターンを示しており、その傾向は55mmのビットにおいても同じであった。従って、この違いはビットの形状に依るものと考えられる。

### 3.2 コアボーリングとノンコアボーリング

試験現場の地質状態を把握するため、図5に示す5区域のNo.32孔でコアボーリングを実施した。採取したコアの観察から、坑道天盤は砂岩、頁岩で構成されており、天盤より1～2.5m付近は比較的良好な状態であるが、3.5m以上ではRQD値も低く、き裂も多く見られた。コア長は4.88mで、上部には石炭が見られた。

図7は、コアボーリングNo.32のトルク/推力ログとその近傍のNo.29孔、No.30孔、No.31孔のログを表している。図の下から上に向かって4.5から4.8m削孔している。また、回収したコアのき裂分布、地質柱状図、コアの写真も示している。各トルク/推力値のスケールは、変化がわかるように調整してある。

図7によると、コアボーリングのトルク/推力ログは地質柱状図、き裂分布と非常によく対応しているのがわかる。一方、数m離れたNo.28～No.31孔においては、大きな変化には再現性があり、コアの観察結果とも対応

するが、部分的に対応していない箇所が見られる。この場所もまた坑道交差部であり、崩落跡に近いことから、地層構造が局所的に変動していると考えられる。

### 3.3 地層境界の判別とき裂分布

全削孔データから図7に示すようなトルク/推力ログを作成し、地層境界面と考えられる深度をそれぞれのログから求め、それらを連ねる地層境界面を3次元表示した。ただし、地層境界の判定は28mm径によるログと、55mm径によるログを分けて求め、最後に統合して判断した。図8(a)が全体像である。結果として砂岩層中のゆるみ域と安定砂岩層の境界、砂岩層と頁岩層、頁岩層と砂岩層、砂岩層と炭質頁岩層の四つの境界面が得られた。図8(a)内の(b)の領域を拡大したのが、図8(b)である。この図には、ゆるみ域の境界面は示されていない。この場所は、

図7に示したNo.29孔からNo.32孔の近傍領域である。また、図8(c)は、坑道内から図8(a)中の(c)方向を見た図である。各ボーリング孔に見られるリングは、き裂と判定された場所を表している。

図8に示した坑道天盤の3次元構造表示はVRMLで記述されており、坑道内部を移動しながらき裂分布の様子を見る事ができる。それによると、直上天盤から約2.5m以上上方でき裂分布密度が高く、ルーフボルトが短いと、砂岩層が崩落する可能性がある。過去の崩落箇所における崩落高さとも、ほぼ一致する。

### 3.4 単軸圧縮強度の推定

次に、得られた削孔機械量データから削孔中の岩石の単軸圧縮強度を推定した。その際、図9に示す切削モデルを仮定した。一般に、ビットの送り運動は、圧入(indentation)や研削(grinding)、磨潰(crushing)、粉碎(smashing)などの破壊過程を含むが、小型削孔機で削孔する場合に、ビットの送り運動は圧入として簡略化することができる。ここでは、西松の切削モデル[6]に刃先の「仮想底面」(図9のa1a4部分。この長さをbとする)を加えて拡張し、圧入モデルとしてMateusの圧入モデル[7]を援用した。その結果、トルクの総和Tは次式で表される。

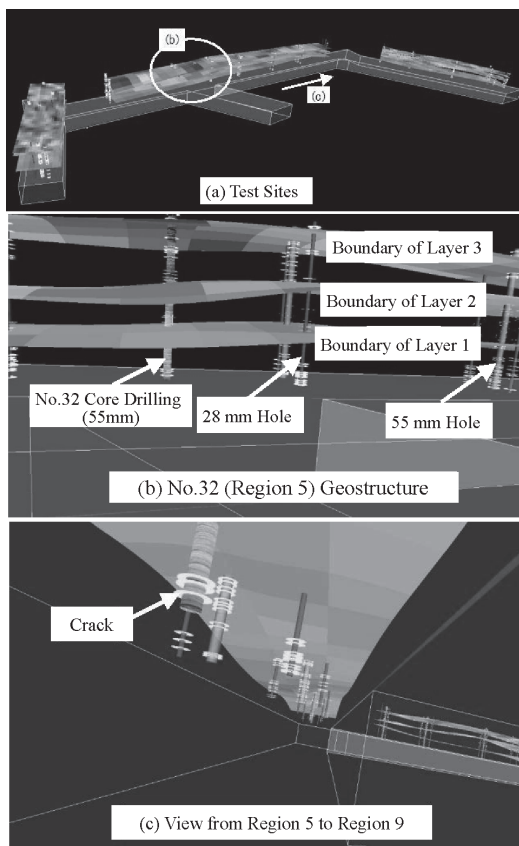


図8 地層構造の3次元表示

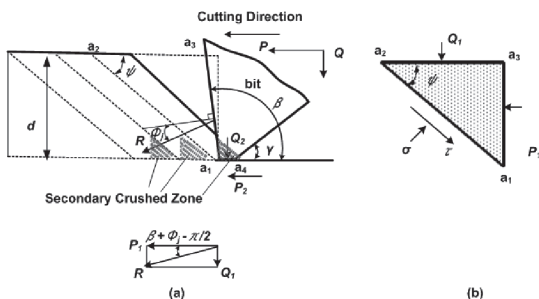


図9 西松の切削モデルの拡張モデル

$$T = k_c \cdot d \cdot C_0 + k_r \cdot C_0 + k_f \cdot b \cdot d \cdot C_0 + T_i \quad (2)$$

ここで、 $k_c$ 、 $k_r$ と $k_f$ は係数であり、 $T_i$ は空転時の削孔機のトルクである。式(2)によると、削孔トルクの総和は4つの部分からなる。

- ① 切削トルク  $k_c \cdot d \cdot C_0$ ;
- ② ビット逃げ面の摩擦トルク  $k_r \cdot C_0$ ;

③ ビットの送り運動によるトルク  $k_f \cdot b \cdot d \cdot C_0$ ;

④ 削孔機の空転トルク  $T_i$ ;

これより、削孔トルクの総和と単軸圧縮強度が比例関係にあることが分かる。この切削トルクTを(1)式に代入すると、体積比エネルギーで表わすことができる。このうち、②と④のトルクは単軸圧縮強度推定には不要な項である。この影響を排除するために、事前に使用するビットに応じた単軸圧縮強度と有効トルク(有効体積比エネルギー)の比例係数を求めておくと、推定が簡便になり、精度が高くなる。この手法により、図7に示したコアボーリングNo.32とその近傍のNo.29孔、No.30孔、No.31孔の強度を求めた。図10が、その結果である。単軸圧縮強度の大きさより、軟(<20MPa)、中(20-50MPa)と硬(>50MPa)の岩石を3段階のグレースケールで表示している。中央の円柱はコアであり、全体的に下部の圧縮強度が低く、上部が高い。周りの29孔、30孔、33孔、35孔の4孔の強度分布は似た傾向を示した。しかし、31孔と34孔はやや強度分布が異なっている。地層構造が短い区間でも、変化していると考えられる。

#### 4. おわりに

坑道天盤可視化システムの概要および現場適用事例について述べた。開発した天盤検層削孔システムを用い、豪州Gujarat NRE No.1炭鉱で現場削孔試験を実施した。その結果、以下のことがわかった。

1. 開発した防爆型坑道天盤可視化システムのハードウェア、ソフトウェアの安定した動作を確認した。
2. 機械量データのうち、トルク/推力は地層構造を反映するパラメータとして有効であることがわかった。

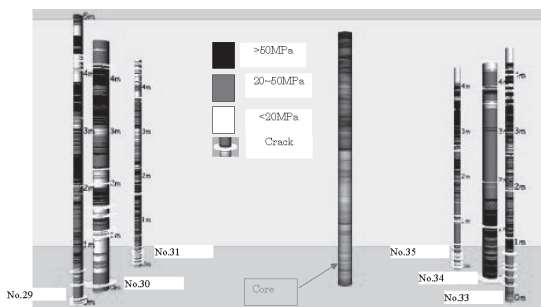


図10 単軸圧縮強度分布の可視化表示

このことは、コアボーリングとノンコアボーリングでのトルク/推力変化パターンの相関性からも確かめられた。

3. トルク/推力変化から単純な変動パターンを抽出し、その組み合わせから不連続面位置（岩層境界やき裂、岩層分離など）を検出する手法（プリミティブ分解法）の有効性が確認された。
4. 複数のボーリング孔の検層データを用いて、3次元地層構造の推定とその可視化表示が可能になった。
5. 有効トルク（有効体積比エネルギー）から、岩石の単軸圧縮強度を推定するモデルを提案した。このモデルにより、削孔個所の強度推定が可能になった。また、現場から採取したコアの測定値と比較すると、平均推定誤差は約17%で、手法の有効性を確認した。

### 謝 辞

炭鉱での現場実験の実施にあたりご協力を戴いたJCOAL、太平洋興発（株）、釧路コールマイン（株）、ならびに削孔機（ボルト打設機）開発にご協力を戴いた削孔機メーカーのRambor Ltd、データロガー製作会社のRingway Control & Automation、現場を提供して下さいGujarat NRE No.1 Collieryの各位に、衷心よりお礼申し上げます。また、この研究に携わった多くの学生諸君にお礼申し上げます。

### 参考文献

- [1] 板倉、佐藤（2005）：炭鉱の坑内保安と情報化技術、資源・素材関係学協会合同秋季大会分科研究会資料、B3-4、177-180
- [2] K. Itakura et al (1977) : Development of a roof logging system by rock bolt drilling, Trans. Instn Min. Metall, Vol.106, Sect. A, 118-123.
- [3] K. Itakura et al (2002) : Visualization of Geostucture by Mechanical Data Logging of Rockbolt Drilling, Proc. of Aachen Int. Mining Symp.-Rapid Mine Development-, Aachen, 193-204.
- [4] K. Itakura et al (2004) : Visualization of roof geostucture around tunnel by analysis of mechanical data from MWD, Proc.of the ISRM Int. Sympo. 3rd ARMS, Vol. 1, 179-184.
- [5] R. Teale (1965) : The Concept of Specific Energy in Rock Drilling, Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 2, 57-73.
- [6] Y. Nishimatsu (1972) : The mechanics of rock cutting, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. Vol. 9, 261-270.
- [7] J. Mateus, J. et al (2007) : Correlation development between indentation parameters and uniaxial compressive strength for colombian sandstones. Cienc Tecnol Futuro,3 (3) , 125-35.