JAEA-Research 2013-040



掘削体積比エネルギーを用いた 原位置岩盤物性評価に関する研究 (共同研究)

Study of Specific Energy for Evaluation of In-situ Rock Mass Properties (Joint Research)

引間 亮一 平野 享 山下 雅之 石山 宏二 丹野 剛男 真田 祐幸 佐藤 稔紀

Ryoichi HIKIMA, Toru HIRANO, Masayuki YAMASHITA, Koji ISHIYAMA Takeo TANNO, Hiroyuki SANADA and Toshinori SATO

> 地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット

Tono Geoscientific Research Unit Geological Isolation Research and Development Directorate

March 2014

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency. Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency. 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan

Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2014

掘削体積比エネルギーを用いた原位置岩盤物性評価に関する研究 (共同研究)

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット 引間 亮一*1、平野 享*1、山下 雅之*2、石山 宏二*2、 丹野 剛男*3、真田 祐幸、佐藤 稔紀

(2013年12月10日受理)

高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発では、岩盤の力学特性や初期応力状態 を評価して地層処分場の岩盤力学モデルを構築し、坑道掘削時の力学的安定性を評価するととも に、岩盤の長期的な挙動を評価することが重要な研究課題とされている。さらに、坑道掘削後に は元来の岩盤には無かった掘削損傷や応力再配分など、坑道の掘削により影響を受けた領域(掘 削影響領域)が生じる。掘削影響領域は地下水や物質の選択的な移行経路になることも想定され、 その性質と広がりを把握して評価手法を確立することは重要な課題とされている。このため、こ れらを精度よく評価するためには、坑道掘削後に坑道周辺の岩盤を調査して原位置岩盤の力学特 性を評価することが重要である。しかし、岩盤調査には、多大な時間やコストを要するため、広 範囲にわたる地下施設にもかかわらず実施できる岩盤調査は限られてしまう可能性が高い。そこ で原位置岩盤の力学特性を簡便で精度よく把握する手法として、掘削機械の掘削データから得ら れる掘削体積比エネルギー(Specific Energy)に基づく原位置岩盤物性評価手法に関する研究を 実施した。

本報告書は、2010年度~2012年度の3年間で実施した共同研究の成果をまとめたものである。 第1章では、研究内容とその背景を概括した。第2章では、瑞浪超深地層研究所の深度 500m 研 究アクセス北坑道の掘削において、施工機械である油圧式削岩機に計測装置を設置して施工時の 削孔データを取得し、掘削体積比エネルギーによる原位置岩盤の評価を試みた結果を報告した。 第3章では、原位置で簡便に岩盤評価を行えることを目的として開発されたハンドドリル計測シ ステムを用いて、瑞浪超深地層研究所で採取された予め物性値が取得されているボーリングコア を削孔し、原位置での岩盤物性を評価するための基礎実験を行った。さらに、瑞浪超深地層研究 所の深度 300m ボーリング横坑の露岩部で原位置試験を行った結果を報告した。最後に第4章に おいて共同研究の成果を概括し、今後の研究に関する課題を述べた。

本研究は、西松建設(株)と(独)日本原子力研究開発機構との共同研究に基づいて実施したものである。 東濃地科学センター(駐在):〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内 1-64 *1 西松建設株式会社(元 技術開発協力員)

^{*2} 西松建設株式会社

^{*3} 株式会社 3D 地科学研究所(元 技術開発協力員)

Study of Specific Energy for Evaluation of In-situ Rock Mass Properties (Joint Research)

Ryoichi HIKIMA^{*1}, Toru HIRANO^{*1}, Masayuki YAMASHITA^{*2}, Koji ISHIYAMA^{*2} Takeo TANNO^{*3}, Hiroyuki SANADA and Toshinori SATO

> Tono Geoscientific Research Unit Geological Isolation Research and Development Directorate Japan Atomic Energy Agency Akiyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

> > (Received December 10, 2013)

For the research and development about high-level radioactive waste disposal, it is important to evaluate the mechanical stability and the long-term behavior of in-situ rock. Furthermore, in excavating a gallery in deep underground, an excavation disturbed zone (EDZ) develops around the opening with new cracks due to both stress redistribution and excavation induced damage. It is assumed that EDZ becomes the selective path way of groundwater and material, so it is necessary to evaluation properties and distributions of EDZ. Therefore, it is important to conduct investigations to evaluate in-situ rock properties around gallery. However, the in-situ investigation of rock properties is time consuming and costly, so it is difficult to conduct many investigations even though underground gallery is large-scale. For this reason, evaluation of rock properties based on Specific Energy using mechanical data from an excavation machine is carried out.

This report describes the results of the joint research carried out in FY 2010 to FY 2012. In Chapter 1, we provide the overview and the background of this study. In Chapter 2, results of evaluation of rock properties in the research gallery at a depth of 500m in Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) based on Specific Energy using a hydraulic rock drill are described. In Chapter 3, results of laboratory tests using a hand drill for evaluation of rock properties based on Specific Energy are described. Furthermore, in-situ tests are carried out in the research gallery at a depth of 300m in MIU, and compared with results of laboratory tests. Finally in Chapter 4, the result of joint research is summarized, and the future study is described.

Keywords: MIU, Specific Energy, EDZ, Hydraulic Rock Drill, Hand Drill

This work has been perfomed by Nishimatsu Construction CO., LTD. and Japan Atomic Energy Agency under contract.

^{* 1} Nishimatsu Construction CO., LTD. (Former Collaborating Engineer)

^{* 2} Nishimatsu Construction CO., LTD.

^{* 3 3}D Geoscience, Inc. (Former Collaborating Engineer)

目 次

1.	はじ	めに	
2.	油圧	式削	岩機を用いた原位置岩盤物性評価3
2.	1	実施	内容3
2.	2	調査	位置3
2.	3	計測	装置と計測項目5
2.	4	削孔	データ取得7
	2.4.2	1	長孔削孔データの取得7
	2.4.2	2	日常削孔データの取得13
2.	5	評価	・検討23
	2.5.1	1	先行ボーリングとの比較23
	2.5.2	2	削孔深さの影響評価
	2.5.3	3	装薬孔削孔データによる評価27
	2.5.4	4	ビット径の違いによる影響の検討
	2.5.8	5	掘削影響領域の検討
2.	6	まと	Ø
3.	ハン	ドド	リルを用いた原位置岩盤物性評価
3.	1	実施	內容
3.	2	装置	の概要
3.	3	コア	を用いた基礎実験
	3.3.1	1	試験結果
3.	4	原位	置への適用
	3.4.	1	基本性能評価試験
	3.4.2	2	岩盤強度の推定
3.	5	岩盤	評価手法の検討
3.	6	まと	め
4.	おわ	りに	
参考	文献		

CONTENTS

1. In	ntrodu	ction	1
2. Ev	valuat	ion of in-situ rock properties using a hydraulic rock drill	3
2.1	Out	tline	3
2.2	Loc	ation	3
2.3	Dev	rice	5
2.4	Dri	lling data acquisition	7
2.	4.1	Long hole drilling data	7
2.	4.2	Short hole drilling data	13
2.5	Res	ults and discussion	23
2.	5.1	Compare of pre-boring	23
2.	5.2	Effect of hole length on drilling	25
2.	5.3	Evalution of in-situ rock proprtie using data of blasting holes drilling	27
2.	5.4	Effect of drill bit diameter	30
2.	5.5	Evaluation of EDZ	32
2.6	Sur	nmary	34
3. Ev	valuat	ion of in-situ rock properties using a hand drill	35
3.1	Out	tline	35
3.2	Dev	rice	35
3.3	Lab	ooratory tests	36
3.	3.1	Results	38
3.4	In-s	situ tests	40
3.	4.1	Performance tests	40
3.	4.2	Estimation of in-situ rock strength	42
3.5	Dis	cussion	47
3.6	Sur	nmary	48
4. Co	onclus	ion	49
Refere	ences		50

図	IJ	ス	\mathbb{P}
---	----	---	--------------

図 1.1 研究所用地の概要	2
図 1.2 研究坑道のレイアウト	2
図 2.2.1 調査位置平面図	4
図 2.2.2 SL 断面上での切羽観察結果	4
図 2.3.1 使用機械(古河ロックドリル: JCH1-90)	5
図 2.3.2 計測システム概要	6
図 2.3.3 計測装置 設置状況	6
図 2.4.1 長孔削孔実施イメージ	7
図 2.4.2 長孔削孔位置図	8
図 2.4.3 長孔削孔データ取得フロー	9
図 2.4.4 長孔削孔用ビット(三菱マテリアル 32RTP64R)	10
図 2.4.5 長孔削孔状況	10
図 2.4.6 測定結果(長孔削孔1回目)	.11
図 2.4.7 測定結果(長孔削孔 2 回目)	12
図 2.4.8 日常削孔実施イメージ	13
図 2.4.9 切羽面発破削孔パターン断面図	14
図 2.4.10 ロックボルト配置図(ロックボルト孔)	15
図 2.4.11 長孔削孔・ボーリング孔周辺孔配置図	15
図 2.4.12 日常削孔データ取得フロー	16
図 2.4.13 装薬孔&ロックボルト用ビット(17
図 2.4.14 装薬孔用ビット(φ 45mm : サンドビック 7733-5345A-R4)	17
図 2.4.15 測定結果例(装薬孔-上半:TD17.75m)	18
図 2.4.16 測定結果例(装薬孔-下半:TD5.65m)	19
図 2.4.17 測定結果例(ロックボルト孔:TD17.75m)	20
図 2.4.18 測定結果例(長孔周辺孔: TD17.75m)	21
図 2.4.19 測定結果例(ボーリング周辺孔:TD5.65m)	22
図 2.5.1 先行ボーリングから得られた情報	24
図 2.5.2 ボーリング周辺孔で得られた SE の分布	24
図 2.5.3 長孔削孔・長孔周辺孔で得られた SE の分布	24
図 2.5.4 長孔削孔と長孔周辺孔で得られた SEの分布(長孔削孔1回目)	26
図 2.5.5 長孔削孔と長孔周辺孔で得られた SEの分布(長孔削孔1回目補正後)	26
図 2.5.6 長孔削孔と長孔周辺孔で得られた SEの分布(長孔削孔 2 回目)	26
図 2.5.7 長孔削孔と長孔周辺孔で得られた SEの分布(長孔削孔 2 回目補正後)	26
図 2.5.8 SL 断面での切羽観察記録と SE 分布図	28
図 2.5.9 切羽観察による岩盤等級ごとの SE の累積確率分布	29
図 2.5.10 切羽観察による岩盤等級ごとの SE の相対頻度分布	29
図 2.5.11 同一地点削孔時の削孔速度の分布と SE の分布	31
図 2.5.12 上半断面装薬孔の深度ごとの SE 平均値 (n=249)	33
図 2.5.13 下半断面装薬孔の深度ごとの SE 平均値 (n=101)	33
図 2.5.14 ロックボルト孔の深度ごとの SE 平均値 (n=121)	33
図 3.2.1 ハンドドリル計測システム	35

図 3.3.1 深度方向の物性値の分布状況	36
図 3.3.2 モルタルで固定した試料	
図 3.3.3 全試料の試験結果	
図 3.3.4 削孔速度と一軸圧縮強さ	39
図 3.3.5 掘削体積比エネルギーと一軸圧縮強さ	39
図 3.4.1 テスト場所とした試験坑道の状況	40
図 3.4.2 原位置用測定器で測定した押付力の影響	41
図 3.4.3 300-G2 地点でのコア採取から削孔までの状況	
図 3.4.4 300-C9 地点での削孔からコア採取までの状況	43
図 3.4.5 原位置試験結果	
図 3.4.6 土岐花崗岩の SE と一軸圧縮強さ	
図 3.5.1 SE と一軸圧縮強さの関係	47

表リスト

表	2.3.1	削孔データ取得項目一覧	6
表	2.4.1	取得したデータの概要	7
表	2.4.2	長孔削孔実施概要	7
表	2.4.3	日常削孔データ取得概要	13
表	3.3.1	試験に用いたコアの概要:	36
表	3.4.1	室内試験結果	43
表	3.4.2	原位置試験結果と推定式から算出される一軸圧縮強さ	46

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分では、岩盤の力学特性や初期応力状態を評価して地層処分場 の岩盤力学モデルを構築し、坑道掘削時や操業時の力学的安定性を評価することはもちろんのこ と、閉鎖後(空洞の埋め戻し後)も千年程度にわたる坑道の安定性を評価することが要求される。 岩盤にはクリープや応力緩和などの時間依存性挙動が認められることがあるため、長期にわたる 岩盤の挙動を把握することは、地層処分場の長期安定性を評価する上で重要な研究課題である^D。 さらに、坑道掘削後には元来の岩盤には無かった掘削損傷や応力再配分など、坑道の掘削により 影響を受けた領域(掘削影響領域)が生じる。掘削影響領域は地下水や物質の選択的な移行経路 になることも想定され、その性質と広がりを把握して評価手法を確立することは重要な課題とさ れている²⁾。このため、これらを精度よく評価するためには、坑道掘削後の坑道周辺の岩盤を調 査して原位置岩盤の力学特性を評価することが重要である。しかし、岩盤調査には、多大な時間 やコストを要するため、広範囲にわたる地下施設にもかかわらず実施できる岩盤調査は限られて しまう可能性が高い。そこで原位置岩盤の力学特性を簡便で精度よく把握する手法として、掘削 機械の掘削データから得られる掘削体積比エネルギー(Specific Energy)に基づく原位置岩盤物 性評価手法に関する研究を実施した。

掘削体積比エネルギーとは、掘削に要したエネルギーを掘削体積で除した値であり、主に掘削 機械の能率を評価する指標として提案されたものである³⁾。掘削体積比エネルギーは掘削する岩 盤の強度特性によっても変化するため、掘削機械の能力を一定とすれば岩盤の強度特性評価の指 標として用いることができる^{4,5)}。油圧式削岩機や TBM、自由断面掘削機などの掘削データから 岩盤強度などの岩盤物性が推定できることが以前から知られており^{6,7,8,9,10)}、掘削体積比エネルギ ーが岩盤の力学特性を表す一つの指標として提案されている^{6,9)}。油圧式削岩機や TBM、自由断 面掘削機などの掘削では、坑道に沿った連続的な掘削データが取得でき、広範囲にわたる原位置 での岩盤物性を評価することができる可能性が高い。また、近年では、原位置で簡便に岩盤の力 学特性を把握する手法として回転打撃式のハンドドリルを応用した掘削体積比エネルギーに基づ く評価手法の研究・開発が行われている^{11,12,13)}。これらの研究では、ハンドドリルを用いた岩盤 評価のための基礎的実験や原位置での調査を想定した測定ツールとしての計測システムの開発が 行われている。

本報告書は、2010年度~2012年度の3年間で実施した共同研究の成果をまとめたものである。 第2章では、原子力機構の瑞浪超深地層研究所(以下、研究所)、深度 500m 研究アクセス北坑 道の掘削に用いた油圧式削岩機に計測機械を設置して、施工時の削孔データを取得することによ り原位置岩盤の評価を試みた。第3章では、原位置で簡便に岩盤評価を行うことを目的として開 発されたハンドドリル計測システムを用いて、研究所で採取された予め物性値が取得されている ボーリングコアを削孔し、原位置での岩盤物性を評価するための基礎実験を行った。さらに、深 度 300m ボーリング横坑の露岩部で原位置試験を行った結果を報告した。最後に第4章において 共同研究の成果を概括し、今後の研究に関する課題を述べた。本報告書に記載されている研究所 用地の概要を図 1.1 に、研究坑道のレイアウトを図 1.2 に示す。





図 1.2 研究坑道のレイアウト

2. 油圧式削岩機を用いた原位置岩盤物性評価

2.1 実施内容

本研究では、施工機械である油圧式削岩機を利用した掘削体積比エネルギーに基づく原位置岩 盤物性評価手法を、深度 500m 研究アクセス北坑道の掘削において適用し、原位置岩盤評価や定 量的岩盤物性評価に資する検討を行った。本手法の特徴は、坑道に沿った連続的な掘削データが 取得でき、広範囲にわたる原位置での岩盤物性を評価できることである。

2.2 調査位置

油圧式削岩機の削孔データ取得は、深度 500m 研究アクセス北坑道で実施した。深度 500m 研 究アクセス北坑道は、掘削断面を上下に分割して施工する上半先進ベンチカット工法で施工され ている。このため、上半掘削については TD17.75m~55.55m、下半掘削については TD5.65m~ 51.59m の範囲でデータを取得した。データを取得した位置を図 2.2.1 に示す。測点位置の TD は、 立坑連接部からの距離を示している。この区間では研究坑道の掘削に先立ち先行ボーリング (12MI27 号孔)が実施されており、油圧式削岩機による岩盤物性評価結果と先行ボーリングで 得られた試験結果との対比が可能となっている。試験を実施した坑道周辺の地質は、後期白亜紀 の土岐花崗岩であり、施工時の切羽観察によると CL~B 級の岩盤である。SL(スプリングライ ン)断面に投影した切羽観察による岩盤等級を図 2.2.2 に示す。









2.3 計測装置と計測項目

油圧式削岩機の削孔データの取得には市販の DRISS (Drilling Survey System)を使用した。 当該システムは油圧式削岩機から得られる各種データを測定し、これらのデータを基に削孔した 地山性状について定量的な推定・評価を行うものである。測定するデータは、油圧式削岩機から 得られる機械挙動データであるフィード圧、打撃圧、回転圧、ダンピング圧の各油圧データおよ び削孔長である。今回使用した油圧式削岩機ではダンピング圧が計測できないため、そのデータ を取得対象外とした。これらのデータは、各油圧配管中に設置した油圧センサーおよび油量計を 介してデータレコーダに記録される。計測装置は、瑞浪超深地層研究所研究坑道掘削工事(A工 区その5)で使用している古河ロックドリルの1ブームクローラージャンボ JCH1-90 (搭載削岩 機 HD90、図 2.3.1) に設置した。計測システムの概要を図 2.3.2 に、設置した計測装置の写真を 図 2.3.3 に示す。なお、計測装置には、リアルタイムで削孔データが確認できるモニターが装備 されている。

削岩機のような打撃破砕による削孔では掘削条件や岩盤特性などにより削孔効率が複雑に変化 することが知られている¹⁴⁾。このため、削孔効率が各試験で同じになるよう、削孔部材や削孔油 圧等の諸条件をできるだけ一定にした。 測定した項目とその概要を表 2.3.1 に示す。

岩盤物性の評価に用いる掘削体積比エネルギー(以下、SE)は単位体積を掘削するのに要したエネルギーと定義され、下記の式¹⁴により算出される。

$$SE = (Ei \times bpm) / (P_R \times A_H)$$

(2.1)

ここで、*Ei*は削岩機内のピストンの運動エネルギー、*bpm*は打撃数、*P*_Rは削孔速度、*A*_Hは 孔断面積である。なお、*Ei*は測定された打撃圧にピストン受圧面積とピストンストロークを乗じ て算出される。



図 2.3.1 使用機械(古河ロックドリル: JCH1-90)



図 2.3.2 計測システム概要



計測装置設置全景



モニターおよびデータレコーダー 収納ボックス

油圧センサー収納ボックス

図 2.3.3 計測装置 設置状況

-		
測定項目	検出器	備考
掘削長/掘削速度	油量計	-
フィード圧	油圧センサー	5MPa を目安に削孔
回転圧	油圧センサー	5MPa を目安に削孔
打擊圧	油圧センサー	15MPa を目安に削孔
ダンピング圧	油圧センサー	計測不可

表 2.3.1 削孔データ取得項目一覧

2.4 削孔データ取得

油圧式削岩機の削孔データとして長孔削孔および日常削孔のデータを取得した。長孔削孔は、 ロッドを継ぎ足しながら切羽前方数十mを削孔するものである。日常削孔は、日々の施工におけ る装薬孔とロックボルト孔の削孔、および長孔削孔や先行ボーリングで得られた情報の検証を行 うために、これらの残存孔周辺を削孔する長孔周辺孔とボーリング周辺孔の削孔である。これら の削孔で取得したデータの概要を表 2.4.1 に示す。取得したデータは 10cm ごとに平均値を算出 して評価・検討に利用した。

表 2.4.1 取得したデータの概要

					実施条件	
	取得	データ	データ取得目的	実施場所	ビット 径	サンプリ ング間隔
長孔削孔			先行ボーリングとの比較	上半断面	$\phi 64$	1Hz
		壮東山	日常施工データの取得による岩盤	上半断面	φ 48	1kHz
日	日常施上 データ	表采孔	評価法検討	下半断面	φ 48	1kHz
常削孔	, ,	ロックボルト孔	11	上半断面	φ48	1kHz
	Ð	長孔周辺孔	長孔削孔の検証	上半断面	$\phi 64$	1kHz
	ボー	リング周辺孔	先行ボーリングの検証	下半断面	$\phi 64$	1kHz

2.4.1 長孔削孔データの取得

長孔削孔は、坑道掘削に先立って、ロッドを継ぎ足しながら切羽前方数十mを削孔して切羽前 方の地山性状の確認を行うものである。長孔削孔の実施イメージを図2.4.1 に示す。長孔削孔は、 発破や重機走行などによる影響を受ける前の上半掘削断面で行い、油圧式削岩機の削孔能力と工 事掘削進捗を考慮して2回に分け、1回目をTD17.75から25m、2回目をTD42.75から12mと して実施した。長孔削孔の実施概要を表2.4.2に、長孔削孔実施位置を図2.4.2に示す。



図 2.4.1 長孔削孔実施イメージ

番号	調査実施位置 (TD)	調査区間長	使用ロッド	使用ビット	サンプリング 間隔
1	17.75m	25m	1.5m×17 本(残尺 0.5m) (スリーブー体式ロッド)	$\phi \ 64$	111_
2	41.75m	12m	1.5m×9 本(残尺 1.5m) (スリーブー体式ロッド)	ボタンビット	1112

表 2.4.2 長孔削孔実施概要



図 2.4.2 長孔削孔位置図

長孔削孔は図 2.4.3 に示すフローにしたがって実施した。データレコーダに記録媒体をセット し、記録開始後に削孔を開始する。削孔中は、削孔区間の岩盤と湧水状況を把握するため、排出 されるくり粉の岩質や大きさ、削孔水の色や湧水量を 1m おきに別途記録した。ロッド1本分の 削孔が完了すると、何度かロッドを出し入れしてくり粉の排出を促し、その後にロッドを継ぎ足 す。所定の削孔長になるまでこの作業を繰り返す。所定の削孔長まで削孔が完了した後、記録を 停止して記録媒体を取り出す。これを事務所に持ち帰り、解析・グラフ化して出力する。データ 取得のサンプリング間隔は 1Hz (1回/秒)とし、評価・検討には 10cm ごとの平均値を利用し た。ビットは、図 2.4.4 の三菱マテリアル 32RTP64R 製φ64mm ボタンビットを使用した。長孔 削孔の実施状況を図 2.4.5 に示す。今回取得した 2 回の測定結果を図 2.4.6、図 2.4.7 に示す。



図 2.4.3 長孔削孔データ取得フロー

JAEA-Research 2013-040



図 2.4.4 長孔削孔用ビット(三菱マテリアル 32RTP64R)



削孔状況

ロッド継ぎ足し状況

図 2.4.5 長孔削孔状況



図 2.4.6 測定結果(長孔削孔1回目)



図 2.4.7 測定結果(長孔削孔 2 回目)

2.4.2 日常削孔データの取得

日常削孔は、日々の施工において実施する切羽への装薬孔の削孔と側壁や天端へのロックボル ト孔の削孔、および長孔削孔と先行ボーリングで得られた情報の検証を行うためにこれらの残存 孔周辺を削孔する長孔周辺孔およびボーリング周辺孔の削孔ある。日常削孔の実施概要を表 2.4.3 に、日常削孔の実施イメージを図 2.4.8 に示す。装薬孔の削孔は、発破パターンにしたがい上半 断面および下半断面で実施した。切羽での装薬孔削孔パターンを図 2.4.9 に示す。上半断面で 1 切羽あたり 69 孔、下半断面で 16 孔削孔した。ロックボルト孔の削孔は上半断面で実施し、1 断 面あたり 5 孔削孔した。ロックボルト孔の配置図を図 2.4.10 に示す。長孔周辺孔は上半断面で削 孔し、長孔残存孔の周辺を 1 切羽あたり 3 孔掘削した。ボーリング周辺孔は下半断面で削孔し、 先行ボーリング残存孔の周辺を 1 切羽あたり 3 孔掘削した。長孔周辺孔およびボーリング周辺孔 の切羽での削孔位置を図 2.4.11 に示す。なお、長孔周辺孔およびボーリング周辺孔のデータは 3 孔の平均値を利用して評価・検討に用いた。

調査対象		調査区間 TD(m)	標準削孔長 (m)	削孔数量	使用 ロッド (m)	使用 ビット (mm)	サンプ リング 間隔	備考
日常施工データ		上半断面 17.75~53.75	1.5	69 孔/切羽 24 切羽	2.2	φ 48,45	1kHz	
	装薬孔	下半断面 7.90~51.95	2.0	16 孔/切羽 22 切羽	2.2	φ 48	1kHz	
	ロックボ ルト孔	上半断面 17.75~55.6	2.0	5 孔/断面 25 断面	2.2	φ 48	1kHz	
長孔周辺孔		上半断面 17.75~52.4	1.5	3 孔/切羽 23 切羽	2.2	ϕ 64	1kHz	3孔の平均 を利用
ボーリング 周辺孔		下半断面 7.9~39.5	2.0	3 孔/切羽 16 切羽	2.2	ϕ 64	1kHz	3 孔の平均 を利用

表 2.4.3 日常削孔データ取得概要

(ロックボルト孔)



図 2.4.8 日常削孔実施イメージ

JAEA-Research 2013-040



図 2.4.9 切羽面発破削孔パターン断面図



図 2.4.11 長孔削孔・ボーリング孔周辺孔配置図

日常削孔は図 2.4.12 に示すフローにしたがって実施した。データレコーダに記録媒体をセット し、記録開始後に専用記録用紙に削孔位置と時間を記入する。その後、削孔を開始し、所定の削 孔長まで削孔する。削孔完了後に記録を停止し、削孔位置を移動する。この動作をすべての削孔 が終わるまで繰り返して記録媒体を取り出す。これを事務所で解析・グラフ化して出力する。デ ータ取得のサンプリング間隔は削孔時間が少ないため、岩盤の変化をより正確に捉えるため 1kHz (1000 回/秒)とし、評価・検討にはこれを 10cm ごとに平均して利用した。装薬孔、ロ ックボルト孔削孔では 48mm ボタンビット (図 2.4.13)を使用した。なお、TD40.15m での装 薬孔の削孔にのみ、 45mm ボタンビット (図 2.4.14)を使用した。長孔削孔、先行ボーリング 孔周辺孔では、長孔削孔と同じ 64mm ボタンビット (図 2.4.4)を使用した。各削孔時の測定 結果の代表例を図 2.4.15~図 2.4.19 に示す。



図 2.4.12 日常削孔データ取得フロー



図 2.4.13 装薬孔&ロックボルト用ビット(*ϕ*48mm : サンドビック 7733-5248A-S4)



図 2.4.14 装薬孔用ビット(*ϕ*45mm : サンドビック 7733-5345A-R4)



図 2.4.15 測定結果例(装薬孔-上半:TD17.75m)



図 2.4.16 測定結果例(装薬孔-下半: TD5.65m)



図 2.4.17 測定結果例(ロックボルト孔:TD17.75m)



図 2.4.18 測定結果例(長孔周辺孔: TD17.75m)



図 2.4.19 測定結果例(ボーリング周辺孔:TD5.65m)

2.5 評価·検討

2.5.1 先行ボーリングとの比較

先行ボーリングから得られた情報(コア観察による岩盤等級、 RQD、速度検層による P 波速 度)を図 2.5.1 に、ボーリング周辺孔で得られた SEの分布を図 2.5.2 に、長孔削孔と長孔周辺孔 で得られた SE の分布を図 2.5.3 に示す。いずれの図も横軸は先行ボーリングの掘削深度に合わ せて表示している。また、図 2.5.1、図 2.5.2 には先行ボーリングのコアを用いた物理・力学試験 の結果を、コア採取深度に合わせて図中にプロットしている。図 2.5.1 の先行ボーリングから得 られた情報では、掘削深度 14~17m 付近でコア観察による岩盤等級が悪く、RQD と P 波速度が 小さく脆弱な区間をとらえているものと推定された。この区間は施工時の地質観察において CL 級と判定され、脆弱部であることが確認されている。図 2.5.2 の SE の分布をみると、掘削深度 13~15mの区間で SEが 100MPa 程度であり、SE が小さく脆弱部をとらえているものと考えら れる。また、この脆弱部の前後区間の SE を比較すると、掘削深度 $0 \sim 13 \text{m}$ までは約 200 MPa、 掘削深度 15~33m までは約 300MPa と 15m 以深で SE が大きく、前半区間に比べて岩盤強度が 大きいことが予想された。コアを用いた一軸圧縮試験によると、掘削深度 11m付近で σ。 =100MPa、20m 付近で σ_c =145MPa であり、この予想が概ね正しいことが確認された。一方、 強度と比較的相関が高いと考えられている P 波速度は、原位置での速度検層とコアから求められ ているが、明確な相関は確認されていない。図 2.5.3 に示す長孔削孔と長孔周辺孔で得られた SE の分布は、ボーリング周辺孔とは削孔位置が若干異なるものの、概ね同様な傾向を示しているこ とがわかる。また、長孔削孔のデータは、長孔周辺孔のデータに比べて掘削深度が深くなるにし たがい、SEが大きくなる傾向が見られる。これは、長孔削孔が 1.5m のロッドを順次連結しなが ら 25m の削孔を行っているため、ロッド中を伝わる弾性波エネルギーがロッド継手部などで減衰 していることなどの影響を受けているためと推定される。



2.5.2 削孔深さの影響評価

長孔削孔では、ロッドと孔壁との摩擦やロッド継手部での弾性波の減衰や反射などにより、ロッド中を伝播する弾性波エネルギーが減衰し、削孔速度が減少することが知られている¹⁵⁾。削孔 速度が減少すると、(2.1)式より算出される SE は削孔速度の減少率と同じ率だけ増加する。大 久保¹⁶は摩擦力を考慮した削岩機の削孔過程の数値計算を行い、摩擦力が削孔速度に与える影響 は小さいことを示している。継手部での弾性波エネルギーの減衰は、既往の研究では 1.5~10% 程度と報告されている^{17,18,19}。今回実施した 2 回の長孔削孔においても前節に示したように掘削 深度が深くなるにしたがい、長孔削孔で SE が大きくなる傾向が確認された。この原因をロッド 継手部での弾性波エネルギーの減衰によるものと仮定して減衰の割合を検討した。

長孔削孔はロッドを継ぎ足しながら切羽前方を数十 m 削孔するものであり、ロッドの継手にお いて弾性波エネルギーの減衰が想定される。これに対して長孔周辺孔は、長孔削孔の残存孔周辺 をロッド1本で所定の掘削長を削孔するものである。したがって、長孔周辺孔の削孔には継手の 影響が含まれない。このため、両者を比較することで弾性波エネルギーの減衰率を推定できるも のと考えた。図 2.5.4 に 1 回目の長孔削孔と長孔周辺孔の SE 分布を示す。図には最小二乗法で 求めた近似直線も示してある。長孔削孔では、長孔周辺孔に比べ近似直線の傾きが大きく、掘削 深度とともに SE が大きくなっている。この傾きを長孔周辺孔と同程度になるように継手1個あ たりの減衰率を計算した。継手1個あたりの減衰率を1.9%として補正した長孔削孔と長孔周辺 孔の SE 分布を図 2.5.5 に示す。図によると補正した長孔削孔と長孔周辺孔の SE の分布は、ほぼ 一致している。同様にして 2 回目の長孔削孔における継手 1 個あたりの減衰率を検討すると 10.3%となった。2回目の長孔削孔と長孔周辺孔の SE 分布を図 2.5.6に、減衰率を 10.3%として 補正した2回目の長孔削孔と長孔周辺孔のSE分布を図2.5.7に示す。1回目の長孔削孔と比べる と減衰率が約5倍大きくなっているが、補正したSEの分布は概ね一致する。2回目の長孔削孔 では、浅い掘削深度から回転圧が上昇していることから、孔曲がりを起こしている可能性なども 考えられるが、減衰率の違いの原因は不明である。しかし、これらの減衰率は既往の研究結果と 矛盾しない結果となり、概ね妥当な値であると考えられる。



図 2.5.4 長孔削孔と長孔周辺孔で得られた SE の分布(長孔削孔1回目)



図 2.5.5 長孔削孔と長孔周辺孔で得られた SE の分布(長孔削孔1回目補正後)





2.5.3 装薬孔削孔データによる評価

日常の施工データとして収集した上半断面での装薬孔削孔データのうち SL 断面近傍のデータ を用いて、SL 断面での SE 分布図を作成した。作成した SE 分布図を図 2.5.8 に示す。図には、 SE 分布との比較のために SL 断面に投影した切羽観察による岩盤等級も記載してある。なお、図 中の白抜きは、データ未取得区間である。図によるとTD17.75~20m付近のCL~CM級の岩盤 の分布や TD45m 付近の B 級岩盤の分布、TD55m 付近の CL 級の岩盤の分布など、切羽観察に よる岩盤等級と SEの分布が概ね対応していることがわかる。次に、図 2.5.8 示した SEを岩盤等 級ごとに集計した結果を、図 2.5.9に累積確率分布図として、図 2.5.10 に 20MPa ごとに区分し た相対頻度分布図として示す。図 2.5.9 には、各岩盤等級での SE の平均値も記載している。図 2.5.9 によると、すべての岩盤等級の累積確率分布曲線の傾きは、概ね等しく、岩盤等級に対応し て良好な岩盤ほど SE が大きい範囲に分布している。また、SE の平均値を見ると岩盤等級に対応 して良好な岩盤ほど SEが大きく、脆弱な岩盤では SEが小さくなる傾向がある。図 2.5.10 によ ると、すべての岩盤等級においてその分布形状は概ね左右対称の分布を示している。SE の分布 する範囲は、CL 級で 100~300MPa、CM 級で 150~450MPa、CH 級で 200~500MPa、B 級 で 300~600MPa であり、岩盤等級に対応して良好な岩盤ほど SE が大きい範囲に分布している。 このように、日常の施工データから算出した SE は、切羽観察記録による岩盤等級との相関が良 いことが確認された。

以上より、日常施工データを用いることで岩盤の連続的な性状を示すことができ、その性状は 切羽観察記録と概ね対応していることが確認できた。地層処分場では、坑道掘削から閉塞まで数 十年に及び、その施設の維持管理が行われる。この施設建設時に施工データを取得することで、 覆工などにより不可視となってしまう岩盤性状を、坑道全線にわたり3次元的に把握できる可能 性を示すことができた。これは、地層処分場を建設する岩盤状態のトレーサビリティとなり得る ものと考えられ、安全性や品質の向上に寄与できるものであると考えられる。



SL 断面での切羽観察記録



SL 断面での SE 分布

図 2.5.8 SL 断面での切羽観察記録と SE分布図





(20MPa ごとに区分)

2.5.4 ビット径の違いによる影響の検討

今回の調査では、日常の施工データの削孔を φ 48mm のビットで削孔しているに対し、長孔削 孔ではくり粉の排出性能等を考えて φ 64mm のビットを使用している。長孔削孔のデータと比較 することを考慮して長孔周辺孔やボーリング周辺孔の削孔は、長孔削孔と同様の φ 64mm のビッ トで削孔している。式(2.1)に示した掘削体積比エネルギーの算出式には、孔断面積としてビッ ト径の違いが考慮されているが、削孔径が削孔効率に与える影響までは考慮されていない。福井 ら²⁰は、掘削を代表する寸法として掘削機械の刃物間隔や切り込み深さ等と SE を一軸圧縮強さ で除した無次元化 SE を用いて寸法効果を検討しており、掘削代表寸法が大きくなるほど無次元 化 SE が小さくなる傾向、つまり一軸圧縮強さが同じものを削孔する場合、ビット径が大きくな るほど SE が小さくなることを指摘している。このようなビット径の違いによる寸法効果を確認 するため、ビット径の違いが SE に及ぼす影響を検討した。

検討には、TD40.15mの切羽において、ほぼ同一地点を ϕ 48mmビットと ϕ 64mmビットで3 回ずつ削孔したデータを利用した。削孔時の削孔速度の分布とSEの分布を図2.5.11に示す。SE の分布には平均値も記載した。削孔速度とSEの分布とも大きな変動がなく、この区間の岩盤が 比較的均質であったことがわかる。また、 ϕ 48mmビットと ϕ 64mmビットの削孔速度を比較す ると ϕ 48mmの方で削孔速度が速く、その変動が若干大きいことがわかる。 ϕ 48mmビットと ϕ 64mmビットのSEを比較すると、その値は削孔速度に比べて近い値を示しており、ビット径の 違いの影響を大きく緩和していることがわかる。しかし、SEの平均値を比較すると SE_{ϕ} 64/SE $_{\phi}$ 48=315/338=0.93となり、7%ほど ϕ 64mmビットの方が小さい。これはビット径が大きいほど 同一体積の岩盤を削孔するために要するエネルギーが少なく、削孔効率が向上していることを示 している。この結果は、山下ら²¹⁾による既往の研究結果と同様の傾向であり、花崗岩ブロックの 削孔実験結果より算出される ϕ 45mmビットと ϕ 64mmビットのSEの比(SE_{ϕ} 64/SE $_{\phi}$ 45= 167/186=0.90)と概ね近い値であった。このように、異なるビット径で削孔する場合、寸法効果 の影響を受けて削孔効率に違いが生じるため、その比較には寸法効果の影響を考慮する必要があ る。



図 2.5.11 同一地点削孔時の削孔速度の分布と SE の分布

2.5.5 掘削影響領域の検討

発破などによる掘削影響を把握するため、日常施工データを削孔深度ごとに重ね合わせ、各削 孔の大局的な削孔傾向を確認した。削孔データを深度ごとに重ね合わせることにより、地山性状 の違いが平滑化され、すべての削孔に共通すると考えられる挙動が明確になるものと想定した。

上半断面の装薬孔 249 削孔、下半断面の装薬孔 101 削孔、ロックボルト孔 121 削孔のデータを それぞれ削孔深度ごとに重ね合わせた大局的な削孔傾向を図 2.5.12~図 2.5.14 に示す。各図を見 ると、どのデータも掘削開始直後から 15cm~25cm で傾きが変化している。上下半の装薬孔は、 そこからほぼ一定値となっている。ロックボルト孔では、若干増加し、その後一定値まで減少し て収束している。さらに上半装薬孔とロックボルト孔の削孔では、削孔終了前に傾きが大きくな っている。掘削開始直後の SE の傾きの変化点は、すべての削孔で見られ、ロックボルト孔で最 も大きく明確に現れている。変化点の深度は、ロックボルト孔で 15cm 程度、上下半の装薬孔で 25cm 程度である。この挙動には機械的な影響が含まれている可能性はあるが、すべての削孔に 共通する挙動であると考えられる掘削影響の範囲を捉えている可能性がある。油圧式削岩機の削 孔データを用いた掘削影響領域の検討は、既往の研究成果がなく、今回初めて検討された課題で ある。今後、屈折法弾性波探査などによる調査と同時に実施して、この結果を検証していくこと が重要である。

また、SEの傾きが一定になるところでのSEの値を比較すると、削孔の種類ごとに異なってお り、上半断面装薬孔で約300MPa、下半断面装薬孔で約350MPa、ロックボルト孔で約400MPa となっている。この違いは掘削機械による影響であると考えられ、油圧式削岩機の削孔方向の違 いによる影響を表している可能性がある。ロックボルト孔の削孔は上向きの削孔になるため、水 平方向の削孔に比べ、フィード力の低下やビットの岩着状態が悪化していることなどが考えられ る。また、下半断面装薬孔では、上半断面に比べ低い位置の削孔となっている。このため、ドリ ルジャンボのブームのリンク機構の影響なども考えられる。削孔方向の違いが削孔効率に及ぼす 影響を検討した研究は、これまでほとんど知られておらず、今後の検討課題である。





図 2.5.12 上半断面装薬孔の深度ごとの SE 平均値 (n=249)



図 2.5.13 下半断面装薬孔の深度ごとの SE 平均値(n=101)

図 2.5.14 ロックボルト孔の深度ごとの SE 平均値(n=121)

2.6 まとめ

深度 500m 研究アクセス北坑道の掘削において、施工機械である油圧式削岩機を利用した、掘 削体積比エネルギーに基づく原位置岩盤物性評価手法を適用し、原位置岩盤評価や定量的な岩盤 物性評価に資する検討を行った。その結果、得られた知見は下記のとおりである。

- (1) SE は岩盤の状態を表す岩盤等級や RQD と概ね同様の傾向を示し、特に一軸圧縮強さと 強い相関を示す結果が得られた。
- (2) 長孔削孔における掘削深さの影響を検討した結果、2回実施した長孔削孔におけるロッド 継手部における弾性波エネルギーの減衰率は、それぞれ 1.9%と 10.3%であった。2回の 結果の違いは大きく、その原因は不明であるが、既往の研究成果と矛盾しない値であった。
- (3) 日常施工データを用いることで岩盤の連続的な性状を示すことができ、その性状は切羽観 察記録の岩盤等級と概ね対応していることが確認できた。
- (4) ビット径の違いによる寸法効果の影響を検討し、ビット径が大きいほど削孔効率が向上す ることを確認した。
- (5) 日常施工データから掘削影響領域を検討した結果、掘削影響を捉えている可能性がある挙 動が確認された。また、削孔方向の違いが削孔効率に影響を及ぼしている可能性を指摘し た。

これらの知見により、原位置の岩盤物性を精度よく評価することができる可能性を示すことが できた。また、油圧式削岩機の削孔データを用いた掘削影響領域の検討は、既往の研究成果がな く、今回初めて検討された課題である。今後、屈折法弾性波探査などによる調査と同時に実施し て、この結果を検証していくことが重要である。地層処分場では、坑道掘削から閉塞まで数十年 に及び、その施設の維持管理が行われる。この施設建設時に施工データを取得することで、覆工 などにより不可視となってしまう岩盤性状を、坑道全線にわたり3次元的に把握できる可能性を 示すことができた。これは、地層処分場を建設する岩盤状態のトレーサビリティとなり得るもの と考えられ、安全性や品質の向上に寄与できるものであると考えられる。

3. ハンドドリルを用いた原位置岩盤物性評価

3.1 実施内容

原位置で簡便に岩盤の力学特性を把握する手法として回転打撃式のハンドドリルを応用した掘 削体積比エネルギーに基づく評価法の研究・開発が行われている^{11,12,13,22)}。これらの研究では、 原位置での調査を想定した測定ツールとしての計測システムの開発、およびハンドドリルを用い た岩盤評価のための基礎的実験が行われている。本研究では、これらの知見のもとで試作された 原位置測定用ハンドドリル計測システムを用いてボーリングコアを利用した基礎実験を行った。 さらに、これを原位置で適用し、その適用性および基本性能評価確認、岩盤物性の評価手法の検 討を行った。

3.2 装置の概要

試作されたハンドドリル計測システムは原位置で簡便に利用できることを目的として開発され たものである¹³⁾。使用した装置を図 3.2.1に示す。測定部は市販のバッテリー式ハンドドリルを改 造し、押付力測定用ロードセル、削孔深さ測定用変位計が配置されている。バックパックにはリ チウムイオンバッテリ、データロガーが配置されており、測定部への電源供給およびデータの記 録を行うものである。



図 3.2.1 ハンドドリル計測システム

3.3 コアを用いた基礎実験

岩盤物性を評価するための基礎実験として研究所で採取された予め物性値が取得されているボ ーリングコアを削孔して強度と SE の関係を求めた。実験に用いた岩石試料は、研究所において 採取された土岐花崗岩のボーリングコアである。試料用のコアは、地上からの調査ボーリング孔 (MIZ-1 号孔)²³⁾、研究坑道での力学調査ボーリング孔(08MI15、08MI16 号孔)²⁴⁾のコアを用 いて強度のコントラストが明確に現れるよう選定した。試験に用いたコアの概要を表 3.3.1 に、 これらを含めて研究所において得られた物性値の深度方向の分布状況を図 3.3.1 に示す。

試料名	試料採取元 ボーリング孔名	岩盤等級	試料数	見かけ比重 (乾燥)	ー軸圧縮強さ (MPa)	圧裂引張強さ (MPa)	備考			
А	MIZ-1	CL	4	2.34	72	2.6	コアは変質している、1つの試料は 削孔により破損・データ未取得			
В	MIZ-1	В	4	2.62	131	5.1				
С	MIZ-1	СН	4	2.63	202	9.4				
200-1	08MI15	СН	5	2.62	136	5.9				
200-2	08MI16	СН	4	2.62	150	6.7				

表 3.3.1 試験に用いたコアの概要



図 3.3.1 深度方向の物性値の分布状況

試料はボーリングコアを切断したものを、削孔時に動いたり回転したりしないようモルタル中 に固定した(図 3.3.2)。この試料を直径 8 mm の SDS プラスビットを装着したハンドドリルで、 自重のみ加わるよう本体を軽く支えた状態(押付力約 80N)で鉛直に削孔した。この削孔を同一 条件で 21 個の試料に対し行ったが、このうち 1 試料については削孔時に破損してデータが取得 できなかった。削孔データは 0.1 秒間隔に取得し、押付力、削孔深さ、ドリル回転数、電流、電 圧をデジタル式記録計に記録した。削孔は回転打撃モードで 10 秒間行い、測定開始時と終了時 の 1 秒ずつを除くデータを平均して検討に用いた。





モルタル固定直後の試料

削孔後の試料

図 3.3.2 モルタルで固定した試料

岩盤の評価に用いるハンドドリルで得られる SE は (3.1) 式で示され、ハンドドリルが削孔に 要する消費電力 Wに削孔時間 t をかけた電力量を削孔体積 V で除したものである。ハンドドリ ルが削孔に要する消費電力 Wは、ハンドドリル削孔中の消費電力 Waから無負荷状態の回転と打 撃による消費電力 Woを引いたものであり、削孔体積 V は使用するビット径に削孔長をかけたも のである²²⁾。

3.3.1 試験結果

試験により得られた結果を図 3.3.3 に示す。図によると削孔により消費される消費電力は概ね 一定であった。削孔速度は試料 C で小さく、試料 A で大きくなっている。SE は、試料 C で大き く、試料 A で小さくなっている。表 3.3.1 に示した一軸圧縮強さと比較すると強度が大きいほど 削孔速度が小さく、SE が大きくなる傾向が認められる。



次に、一軸圧縮強さと削孔速度の平均値の関係を図 3.3.4 に、一軸圧縮強さと SE の平均値の 関係を図 3.3.5 に示す。一軸圧縮強さが増加するに従い削孔速度は直線的に減少し、SE は直線的 に増加している。これは、一軸圧縮強さが大きいものほど削孔に時間を要し、削孔に要するエネ ルギーが多く必要となることを示している。この結果から、原位置の岩盤を同一条件でハンドド リルにより削孔し、削孔速度または SE を取得すれば、原位置での岩盤強度を推定できる可能性 が高いものと考えられた。



3.4 原位置への適用

試作した原位置用測定器のテストを深度300mボーリング横坑(図参照)において実施した。ボ ーリング横坑の端部は、岩盤露頭にアクセスできるよう側壁のほぼSLより下側と床面が素掘りの 状態で露岩している(図 3.4.1)。岩石の種類は土岐花崗岩であり、地表からの調査研究段階で実 施されたMIZ-1号孔のボーリングコアで行われた一軸圧縮試験の結果によると、健岩部でσ_c=121 ~212MPa、深度300mの平均でσ_c=168MPaである²³⁾。



図 3.4.1 テスト場所とした試験坑道の状況

3.4.1 基本性能評価試験

テストでは岩盤露頭に対して約1m²の領域を5地点選定し、水平方向に削孔する3地点と鉛直下 向きの2地点を対象として性能評価試験を実施した。各地点では同一条件での削孔を3点以上得ら れるように削孔数は少なくとも9点を確保し、押付力を3種類程度変化させてデータを収集した。 ドリルビットはコアを用いた基礎実験と同じ直径8mmのSDSプラスビットを用いた。

図 3.4.2は当該テストで測定したデータを用いて、ハンドドリル計測システムにおけるハンド ドリルの押付力の影響を見たものである。本図では削孔方向が岩盤露頭に対して水平方向と鉛直 下向きの場合を重ねて示しているが、鉛直下向きの場合は測定器の自重(約80N)以下の測定が、 操作上困難であるのでその部分のデータはない。

本図において、押付力が約50Nまでの範囲が削孔速度と削孔の消費電力Wがバラつきながら増加する領域(以下、不安定領域)であることが分かる。50Nを超えると削孔速度も消費電力も増加が頭打ちとなり安定する領域(以下、安定領域)が現れる(図中点線)。鉛直下向き方向の場合は、押付力の小さい領域にデータが無く不安定領域が不明であるが、安定領域においては、削孔速度および消費電力とも削孔方向による相違は特段認められない。

まとめると、本測定器を用いて原位置測定を行う場合、水平方向と鉛直下向き方向の両方に適 用が可能であり、方向によるデータの相違は、少なくとも50N以上の領域で小さく、この性質を 利用すると二方向のデータを概ね同等に扱うことができることが確認された。また、測定時の押 付力は、花崗岩で70~100N程度とすればよいと考えられる。





図 3.4.2 原位置用測定器で測定した押付力の影響

3.4.2 岩盤強度の推定

基本性能評価試験(以下、原位置試験)で原位置岩盤を削孔したデータを用いて、コアを用い た基礎実験(以下、基礎実験)で提案した岩盤強度推定方法の検証を行った。岩盤強度推定方法 の検証は、原位置試験で得られたデータを精査して、この値から推定される強度と、削孔を行っ た地点で取得されたコアによる強度試験結果を比較するものである。原位置試験の1 地点目 (300-G2)では、コアドリルによるコア採取を試みたが、背面の亀裂などにより十分な長さのコ アを得ることが難しく、ダイヤモンドビットの摩耗により採取できたコアは1 本のみであった。 このため、2 地点目(300-C9)では原位置でのコア採取を諦め、岩盤をブロック状に取得できる 地点を選定し原位置試験の削孔を行った。その後、削孔地点をブロックで持ち帰り、室内でブロ ックからコアを採取した。図 3.4.3 に 300-G2 でのコア採取から削孔までの状況を、図 3.4.4 に 300-C9 での削孔からブロック取得・コア採取までの状況を示す。採取したコアは、別途室内試 験に供した。基礎実験で使ったコアの試験結果とともに、今回実施した室内試験の結果を表 3.4.1 に示す。300-G2 のコアは1 本のみであるが、原位置試験実施地点での岩盤物性はこれまでの試 験結果の範囲に収まっている。



コア採取状況

採取したコア



ハンドドリルによる削孔状況

削孔後の状況

図 3.4.3 300-G2 地点でのコア採取から削孔までの状況



ハンドドリルによる削孔状況

採取するブロック



削孔後の状況



取得したブロック



採取したコアとコア採取後のブロック

図 3.4.4 300-C9 地点での削孔からコア採取までの状況

試料名	試料採取地点 又は 試料採取 ボーリング孔名	試料数	見かけ比重 (乾燥)	ー軸圧縮強さ (MPa)	圧裂引張強さ (MPa)	P波速度 (km/s)	消費電力 (W)	削孔速度 (cm/s)	SE (MPa)	備考
А	MIZ-1	4	2.34	72	2.6	3.92	173	6.00	573	コアは変質している、1つの試料は 削孔により破損・データ未取得
В	MIZ-1	4	2.62	131	5.1	5.20	172	5.64	603	
С	MIZ-1	4	2.63	202	9.4	6.02	174	4.67	739	
200-1	08MI15	5	2.62	136	5.9	5.35	170	5.39	627	
200-2	08MI16	4	2.62	150	6.7	5.57	168	5.35	625	
300-G2	深度300m ボーリング横坑	1	2.62	153	-	5.16	198	5.52	712	原位置でコアを採取
300-C9	深度300m ボーリング横坑	12	2.61	197	-	5.77	197	6.00	655	原位置でブロックを採取

表 3.4.1 室内試験結果

次に、原位置試験でハンドドリルの削孔により得られたデータと基礎実験から得られたデータ の比較を行った。なお、比較に用いた原位置試験の削孔データは、基礎実験との削孔条件を同一 にするため、鉛直下向き削孔で押付力が約 80N のものを用いている。原位置試験で得られた結果 を基礎実験の結果とともに図 3.4.5 に示す。







図によると、原位置試験の消費電力 W は基礎実験と比較して増加している。 削孔データの内訳 を確認すると W。は基礎実験の時の値と概ね一致しており、この原因は削孔負荷の増加によるも のであると推定される。削孔速度は、基礎実験の範囲に収まっているが、300-C9 と試料 A を比 較すると、削孔速度は等しいが、一軸圧縮強さは約3倍異なっている。この原因として、300-C9 では、増加した消費電力が岩盤の削孔に費やされているため、削孔速度が向上しているものと推 定される。このことは、単に削孔速度を比較するだけでは岩盤性状が評価できないことを示して いる。一方、300-G2 と 300-C9 を比較すると消費電力はほぼ同じであるが、300-G2 の方が一軸 圧縮強さが小さい。このため 300-G2 では、削孔速度が速くなることが想定されるが、削孔速度 は遅くなっている。この原因の1つとして、300-G2では、削孔以外で消費されるエネルギーが 多かった可能性が推定される。具体的には水が影響しているものと考えられる。300-G2 では、 微量の水が常に供給される環境(図3.4.3)にあったが、300-C9では表面が湿っている程度であ った(図 3.4.4)。このため、300-G2 では削孔の際に発生するくり粉が泥質化してドリルの回転 への抵抗となり、これにエネルギーが消費された可能性がある。その他に原位置での試験のため SE のバラつきが大きくなった可能性や、一軸圧縮試験用のコア採取時のコアへの損傷により強 度が低下していた可能性なども考えられる。SE の値は、基礎実験の範囲に収まっている。削孔 速度が等しい 300-C9 と試料 A を比べると、SE は 300-C9 で大きく、300-C9 の方が強度が大き いことと整合する。一方、300-G2 と 300-C9 を比較すると、強度の大きい 300-C9 の方が SE は 小さい。これは前述した水の影響、原位置試験によるバラつきの増加、原位置採取コアの損傷に よる強度の低下などの要因が複合しているためと推定される。

次に基礎実験から得られた SE と一軸圧縮強さの関係図に原位置試験で得られた結果をプロットした結果を図 3.4.6 に示す。削孔速度は、前述したとおり単に比較できないことがわかったため、岩盤強度推定に関する検討の対象から外した。基礎実験から求めた推定式に原位置試験で得られた SE を代入して求められた推定一軸圧縮強さを表 3.4.2 に示す。図によると原位置試験結果は、基礎実験より算出した近似直線から大きく逸脱していないことがわかる。しかし、推定式から算出された推定強度は、300-G2 では室内試験結果より大きく、200MPa であった。300-C9 では、室内試験結果より小さく、推定強度は 155MPa であった。推定強度と室内試験結果の誤差を算出すると 20~30%である。この誤差の原因として、前述した水の影響や、原位置削孔による SE のバラつき、原位置採取コアの損傷による強度の低下など様々な要因が考えられる。今後、試験を数多く蓄積し、これらの要因を特定して排除することにより、その精度は向上するものと考えられる。



図 3.4.6 土岐花崗岩の SE と一軸圧縮強さ

=井业」々	SE	室内試験の。	推定す。	推定す。
武州石	(MPa)	(MPa)	(MPa)	室内試験o。
300-G2	712	153	200	1.31
300-C9	655	197	155	0.79

表 3.4.2 原位置試験結果と推定式から算出される一軸圧縮強さ

3.5 岩盤評価手法の検討

既往の研究^{8,9,10}によると TBM や自由断面掘削機などの回転破砕方式の掘削機械では、SE と 岩盤強度の間には線形関係があることが知られている。しかし、山下らは、油圧式削岩機などの 打撃を主体とする削孔の場合、削孔効率が岩盤強度によって変化し、特に強度が小さい領域でそ の効率低下が著しいことを指摘している¹⁴⁾。さらに、岩石ブロックの削孔実験や原位置試験結果 から、SE は岩盤強度のべき乗で表すことができると報告している。また、齋²⁵⁾は、本試験機を 用いた削孔実験において SE は岩盤強度のべき乗で表すことができると報告している。本節では、 これらの知見に基づき、回転打撃式の掘削機械であるハンドドリルによる SE と岩盤強度の関係 を線形やべき乗で近似する評価手法を検討した。

強度推定式の近似に用いたデータは、本試験装置で鉛直下向きに押付力が約80Nの条件で削孔 した、すべての岩石試験体の削孔結果を対象とした。本試験装置で削孔したすべての岩石供試体 に対する SE と一軸圧縮強さの関係を線形近似直線およびべき乗近似曲線とともに図3.5.1 に示 す。前節で議論した基礎実験から推定した近似式は、土岐花崗岩を対象として限られた範囲の強 度推定式であったが、本図では、複数の岩種の幅広い範囲の強度特性とSEの関係を表している。 線形近似の相関係数は約0.97 であり、べき乗近似の相関係数の約0.93 より若干良いが、強度の 小さい領域での試験結果が不足しており、どちらの近似式が適当であるかの結論は出せない。ま た、べき乗近似式により得られた乗数は約0.5 乗であり、既往の研究成果と概ね近い値であった。

以上から、本計測装置で幅広い強度特性の岩盤を1つの推定式から算出できる可能性を示すこ とができた。しかし、強度の小さい領域での試験結果が不足しており強度推定式を検証するには 至らなかった。今後は、測定事例を蓄積し、その結果を検証するとともに理論的研究を進めてい くことが必要である。



図 3.5.1 SE と一軸圧縮強さの関係

3.6 まとめ

原位置で簡便に岩盤評価を行うことを目的として開発されたハンドドリル計測システムを用いて、研究所で採取された予め物性値が取得されているボーリングコアを削孔し、原位置での岩盤物性を評価するための基礎実験を行った。さらに、深度 300m ボーリング横坑の露岩部で原位置試験を行った。その結果、得られた知見は下記のとおりである。

- (1) 本測定器を用いて原位置測定を行う場合、水平方向と鉛直下向き方向の両方に適用が可能 であることを確認し、測定時の押付力は、花崗岩で 70~100N 程度とすれば二方向のデ ータを概ね同等に扱うことができることが確認された。
- (2) 基礎実験から得られた SEによる強度推定式より、原位置の岩盤強度を概ね正しく評価することができ、その誤差は 20~30%であった。
- (3) 基礎実験から得られた削孔速度による強度推定式では、岩盤強度を正しく評価できないことがわかった。
- (4) 原位置の削孔においては水の影響を受ける可能性を指摘した。
- (5) 1つの推定式からより広範囲の岩盤強度を算出できる可能性を示した。

ハンドドリルによる削孔は原位置で容易に行うことができ、原位置での岩盤物性を評価するこ とができる可能性が高いと期待される。しかし、強度の小さい領域での試験結果が不足しており、 強度推定式の決定やその精度の検証など多くの課題を残している。このため、今後も多くの岩種 で測定例を蓄積するとともに、理論的な研究を行い、原位置での岩盤物性を評価する手法として の実用化を目指したいと考えている。

4. おわりに

本研究では、深度 500m 研究アクセス北坑道の掘削において、施工機械である油圧式削岩機に 計測装置を設置して施工時の削孔データを取得し、掘削体積比エネルギーによる原位置岩盤の評 価を試みた結果を報告した。さらに、原位置で簡便に岩盤評価を行うことを目的として開発され たハンドドリル計測システムを用いて、研究所で採取された予め物性値が取得されているボーリ ングコアを削孔し、原位置での岩盤物性を評価するための基礎実験を行い、深度 300m ボーリン グ横坑の露岩部で原位置試験を行った結果を報告した。

これらの研究はどちらも掘削体積比エネルギーに基づいて岩盤強度を推定・評価するものであ り、一方は施工機械を使い、広範囲にわたる施設をその坑道に沿った連続したデータとして評価 しようとするもので、一方はポータブル式のハンドドリルを利用し、原位置の岩盤をスポット的 に精度よく評価しようとするものである。これら何れの技術も地下施設の建設において、安全性 や品質の向上に寄与できる技術になり得るものであると考えられる。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構: "わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 地層処分研究開発第2次取りまとめー 総論レポート",核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 99-020 (1999).
- 2) 核燃料サイクル開発機構: "釜石原位置試験総括報告書", 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7410 99-001 (1999).
- 3) Teale, R: "The concept of specific energy in rock drilling", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.2, pp.57-73 (1965).
- 4) 西松裕一: "掘削方法とその評価方法について"日本鉱業会秋季大会分科会資料[L], pp.1-4 (1972).
- 5) Hughes, H: "Some aspects of rock machining", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.9, pp.205-211, (1972).
- 6) 山下雅之,石山宏二,木村哲,福井勝則,大久保誠介 "長尺さく孔データと岩盤強度の関係 に関する検討":第61回土木学会年次学術講演会講演概要集,Ⅲ-333, pp.661-662 (2006).
- 7)山下雅之,福井勝則,大久保誠介:"さく孔深さの影響を考慮した長尺さく孔データと岩盤特性の関係に関する検討"資源と素材, Vol.120, pp.508-514 (2004).
- 8) 福井勝則, 大久保誠介: "TBM の掘削抵抗を利用した岩盤物性の把握", トンネルと地下, Vol.28, pp.123-131 (1997).
- 9) 領家邦泰,青木智幸,田村尋夫,福井勝則,大久保誠介,松本一騎,宮本義広:"硬岩用自由 断面掘削機の掘削体積比エネルギーと岩盤物性",土木学会論文集,No.603, PartⅢ-44, pp.89-100 (1998).
- 10) 福井勝則,大久保誠介,板垣大介,羽出山吉裕,山本卓也: "ブームヘッダの掘削体積比エネ ルギーと岩盤物性",資源・素材学会秋季大会講演要旨集(A2),pp. 109-112 (2009).
- 11) 吉田智章,福井勝則,大久保誠介: "回転打撃さく孔における岩石のさく孔特性",資源・素 材学会春季大会講演要旨集(A), pp. 89-90 (2010).
- 12) 福井勝則,大久保誠介,羽柴公博,平野享: "回転打撃さく孔での岩石のさく孔特性",資源・ 素材学会秋季大会講演要旨集(A), pp. 171-174 (2011).
- 13) 平野享,山下雅之,石山宏二,福井勝則:"ハンドドリルを応用した掘削体積比エネルギーに 基づく坑内岩盤強度測定器の開発",第66回土木学会年次学術講演会講演概要集,3-108, pp.215-216 (2011).
- 14) 山下雅之,石山宏二,福井勝則,大久保誠介: "さく岩機のさく孔効率と岩盤特性についての 検討",第41回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp. 1-6 (2012).
- 15) Lundberg, B.: "Efficiency of percussive drilling with extension rods", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.24, pp.213-222 (1987).
- 16) 大久保誠介: "さく孔過程に及ぼすスラストの影響", 資源と素材, Vol.113, pp.613-618(1997).
- 17) 大久保誠介,太田彰則,福井勝則: "削岩機のスリーブ式ロッド継手の弾性波伝播特性に及ぼ す弾性波の波長とロッド径の影響",資源と素材, Vol.111, pp.301-308 (1995).
- 18) 福井勝則, 大久保誠介, 山下雅之: "長孔さく孔におけるさく孔深さの影響", 資源と素材, Vol.120, pp.146-151 (2004).
- 19) 福井勝則, 阿部裕之, 小泉匡弘, 友定英貴, 大久保誠介: "長孔さく孔におけるロッド応力の 減衰", Journal of MMIJ, Vol.123, pp.152-157 (2007).
- 20) 福井勝則, 大久保誠介: "掘削体積比エネルギーを用いた岩石強度の寸法効果の推定", 資源 と素材, Vol.120, pp.555-559 (2004).
- 21) 山下雅之,平野享,石山宏二,塚田純一,福井勝則,大久保誠介:"油圧式さく岩機の掘削体 積比エネルギーを用いた坑道周辺岩盤の特性評価に関する研究",第66回土木学会年次学術 講演会講演概要集,Ⅲ-109, pp.217-218 (2011).
- 22) 平野享,引間亮一,山下雅之,石山宏二:"ハンマードリルを用いた原位置岩盤強度測定器の 開発",西松建設技報第36号, No.11 (2013).

- 23) 平野享,中間茂雄,山田淳夫,瀬野康弘,佐藤稔紀: "超深地層研究所計画(岩盤力学に関する調査研究) MIZ-1 号孔における岩盤力学調査",日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2009-031 (2009).
- 24) 平野享, 瀬野康弘, 松井裕哉: "超深地層研究所計画(岩盤力学に関する調査研究) 深度 200m における岩盤力学ボーリング調査", JAEA-Research 2010-013 (2010).
- 25) 齋英俊: "ロータリハンマによる岩盤特性の把握に関する研究",東京大学卒業論文(2012).

This is a blank page.

表 1. SI 基本単位						
甘大昌	SI 基本ì	単位				
盔半里	名称	記号				
長さ	メートル	m				
質 量	キログラム	kg				
時 間	秒	s				
電 流	アンペア	А				
熱力学温度	ケルビン	Κ				
物質量	モル	mol				
光度	カンデラ	cd				

表2. 基本単位を用い	いて表されるSI組立里(豆の例				
知辛量	SI 基本単位					
和立里	名称	記号				
面 積平方	メートル	m^2				
体 積立法	メートル	m^3				
速 さ , 速 度 メー	トル毎秒	m/s				
加速度メー	トル毎秒毎秒	m/s^2				
波 数 每メ	ートル	m ⁻¹				
密度,質量密度キロ	グラム毎立方メートル	kg/m ³				
面積密度キロ	グラム毎平方メートル	kg/m ²				
比 体 積立方	メートル毎キログラム	m ³ /kg				
電流密度アン	ペア毎平方メートル	A/m^2				
磁界の強さアン	ペア毎メートル	A/m				
量濃度(a),濃度モル	毎立方メートル	mol/m ³				
質量濃度+口	グラム毎立法メートル	kg/m ³				
輝 度 カン	デラ毎平方メートル	cd/m ²				
屈 折 率 ^(b) (数	字の) 1	1				
<u>比透磁率(b)</u> (数	字の) 1	1				
(a) 量濃度 (amount concentrati	on)は臨床化学の分野では	物質濃度				
(substance concentration) とも上げれる						

(substance concentration)ともよばれる。
 (b)これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

			SI 租立单位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方
亚	5.37 v (b)	red	1 (b)	m/m
	() / / / / / / (b)	(c)	1 1 (b)	2/ 2
		sr II-	1	m m -1
同 仮 多		пг		S .
カ	ニュートン	N		m kg s ⁻²
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷,電気量	クーロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^1$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$\text{kg s}^{2} \text{A}^{1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^{-2} A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光束	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Βα		s ⁻¹
吸収線量 比エネルギー分与				~
カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ²
線量当量,周辺線量当量,方向	2 ((g)	Su	Ulta	2 o ⁻²
性線量当量, 個人線量当量		50	o/kg	m s
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

酸素活性(カタール) kat [s¹mol]
 (a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや ュヒーレントではない。
 (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (a)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)へルツは周崩現象についてのみ、ペシレルは抜焼性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (a)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度度を表すために使用される。
 (d)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。
 (d)かけ性核種の放射能(activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	S	[組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{-2} K^{-1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{2}$
熱 伝 導 率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
表 面 電 荷	「クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
誘 電 率	シファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ミヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA
吸収線量率	ダレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{-3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放 射 輝 度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酸素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ e ⁻¹ mol

表 5. SI 接頭語								
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号			
10^{24}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d			
10^{21}	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	с			
10^{18}	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m			
10^{15}	ペタ	Р	10 ⁻⁶	マイクロ	μ			
10^{12}	テラ	Т	10 ⁻⁹	ナノ	n			
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р			
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f			
10^{3}	+ 1	k	10 ⁻¹⁸	アト	а			
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z			
10^{1}	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	v			

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位						
名称	記号	SI 単位による値				
分	min	1 min=60s				
時	h	1h =60 min=3600 s				
日	d	1 d=24 h=86 400 s				
度	٥	1°=(п/180) rad				
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad				
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad				
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²				
リットル	L, 1	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³				
トン	t	$1t=10^{3}$ kg				

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

衣される剱値が美験的に待られるもの						
名称				記号	SI 単位で表される数値	
電	子 >	ボル	ŀ	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J	
ダ	N	ŀ	\sim	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg	
統-	一原子	質量単	单位	u	1u=1 Da	
天	文	単	位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m	

表8.SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

	名称		記号	SI 単位で表される数値
バ	-	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀	柱ミリメー	トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オン	グストロ・	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海		里	М	1 M=1852m
バ	-	ン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm)2=10 ⁻²⁸ m ²
1	ツ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネ	-	パ	Np	CI単位しの粉値的な間接け
ベ		N	В	対数量の定義に依存。
デ	ジベ	ル	dB -	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値			
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J			
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N			
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s			
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} = 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$			
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd } \text{ cm}^{\cdot 2} = 10^4 \text{ cd } \text{ m}^{\cdot 2}$			
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx			
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²			
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$			
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$			
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4π)A m ^{·1}			
(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≦ 」					

は対応関係を示すものである。

		表	(10.	SIに 尾	禹さないその他の単位の例
	名	称		記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ	IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	ン	トゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ			K	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$			ム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ	:	\sim	7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	II.	N	"		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	ートルネ	系カラ:	ット		1メートル系カラット=200 mg=2×10-4kg
ŀ			N	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	進	大気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力	П	IJ	ļ	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	カ	17	~		$1 = 1 = 10^{-6} m$

この印刷物は再生紙を使用しています