

コア変形法（DCDA）の適用拡大と高度化の現状

船戸明雄

深田地質研究所

Expansion and Advancement of the Diametrical Core Deformation Analysis (DCDA) for Rock Stress Evaluation

FUNATO Akio

Fukada Geological Institute

要旨：コア変形法（DCDA）は応力解放に伴うボーリングコアの弾性的な変形から原位置の応力を評価する方法で、理論的背景が明快であり、非破壊で迅速な測定ができることから適用範囲が広いという利点を有している。南アフリカの金鉱山では地下 2.9 km の坑道から余震発生帯に向けて掘削した 817 m のコアに DCDA を適用し、地震発生メカニズムの研究に一役買っている。また、南米ブラジルの露天掘り鉄鉱山やチリのアンデス山中の銅鉱山では DCDA を鉱山開発に適用するための共同研究を実施している。DCDA では差応力しか評価できないので、新たに二重解放コア変形法やサイドウォールコアリング法を提案した。これらの方法を用いれば、コア軸直交面内の最大主応力と最小主応力の大きさと方向を個別に評価することが可能になる。二重解放コア変形法を実用化するため、二重ビットコアリングツールを作成し、現地での検証実験を踏まえて改良を重ねている。

キーワード：弾性変形，差応力，主応力，二重ビットコアリングツール，サイドウォールコアリング法

Abstract: DCDA is a new method for evaluating the in-situ stress of rocks based on the elliptical deformation of boring cores with stress relief. Since this method is speedy and non-destructive for measurements, and based on a simple elastic model, DCDA has an advantage in that the coverage may be very wide. In South African gold mines, DCDA was applied to the cores of the 817 m hole, which was drilled into aftershock zones from a chamber 2.9 km below earth's surface to elucidate seismogenic processes. At the Tamandua opencast mine in Brazilian Iron Quadrangle and at the El Teniente underground copper mine in Andes Mountains of central Chile, we carry out collaborative researches to apply DCDA to mine development. However, DCDA can evaluate only the differential stress but not stress components separately. Then, we propose new ideas to improve DCDA so that each magnitude and orientation of the stress components can be evaluated separately. One of them is "Dual bits coring" and another is "Side-wall coring". For practical use of Dual bits coring method, we have developed a special coring tool and improve it through the field verification tests.

Keywords: elastic deformation, differential stress, principal stress, Dual bits coring tool, Side-wall coring

1. はじめに

コア変形法（DCDA）は応力解放に伴うボーリ

ングコアの弾性的な変形から原位置の応力を評価する方法（図 1）で、測定原理や開発の経緯については船戸（2015）、Funato & Ito（2017）を参照さ

りたい。DCDA は理論的背景が明快であり、非破壊で迅速な測定ができることから適用範囲が広いという利点を有している。著者は本研究所に入所した 2014 年以来、この利点を生かした DCDA の適用拡大と高度化を自主研究テーマとして掲げ実施してきた。本稿ではそれらの事例のいくつかを報告する。

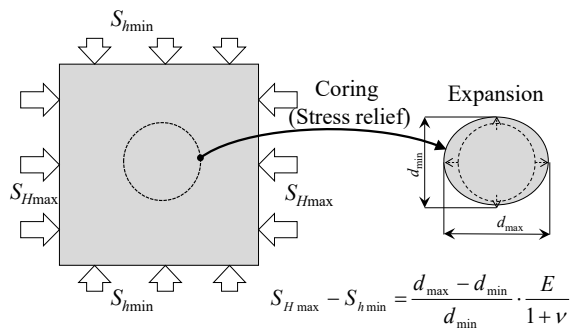


図 1 コア変形法 (DCDA) の原理

2. 海外の鉱山への適用事例

2.1 南アの金鉱山

南アの金鉱山では薄板状の金鉱脈を採掘するため地下 3 km 以上の深部まで坑道が掘削されている。地下深部の採掘では、採掘跡空洞周辺の岩盤への応力集中によって激しい地震活動が誘発され、人的被害も発生している。1970 年代から被害軽減のために地震観測が開始され、地震の発生メカニズムの研究や前駆現象のモニタリングなどが行われてきた。日本の研究者も 1992 年から南アの金鉱山での研究に参画し成果を重ねてきた (小笠原ら, 2009)。2009 年以降は、科研費や SATREPS, ICDP などの公的資金を得て、金鉱山で発生した M2~5.5 の地震を対象にボーリング調査や地震観測、岩盤応力測定が実施され、2016 年から DCDA が適用されることとなった。DCDA を適用するコアの選別、方位決定、直径測定及び測定結果の整理は、立命館大学の学生が数年にわ

たって南アで行ったが、著者は測定装置 (図 2) を航空手荷物で運搬できるように改良して現地へ持ち込み、学生たちに測定、解析方法を指導するなどの協力を行ってきた。

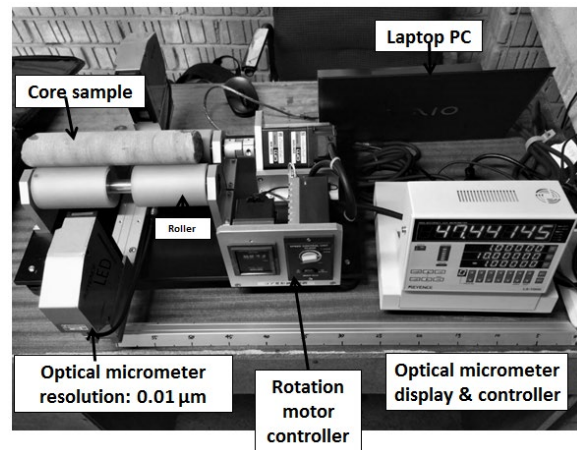


図 2 改良型のコア直径測定装置

図 3 は ICDP の Dseis 計画 (Ogasawara et al., 2019) において Moab 鉱山の地下 2.9 km の坑道から M5.5 の余震発生帯に向けて斜め下向きに掘削したボーリングにより回収した数百本のコアに DCDA を適用して得られた差応力の深度分布である。金鉱山の母岩は、主に 28 億年前の珪岩を主体とする変成した堆積岩層で、ヤング率は 50~80 GPa と非常に硬いが作用している応力が極めて大きい。ため、回収コアは有意な変形を示し比較的ばらつきも小さい。同図の破線は、近傍の坑道で円錐孔底ひずみ法 (CCBO) によって得られた三次元応力をもとに、ボーリング孔の深度と孔曲がり を考慮して計算されたコア軸直交面内の差応力である。深度 420 m 付近の差応力が大きな箇所は貫入岩とシルト岩の境界に近く、検層による高濃度の塩水湧出箇所と一致している。また、深度 700 m 付近の差応力が大きな箇所は M5.5 の余震発生帯の端部に近接している。このようにボーリング孔に沿った差応力の連続的な分布状況を把握

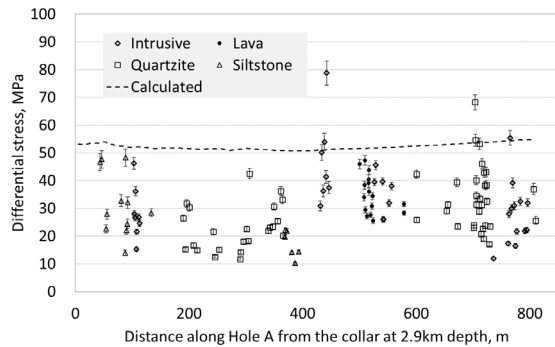


図 3 コア軸直交断面内の差応力の深度分布 (Ogasawara et al., 2019)

できることは、DCDA の大きな利点である。

2010 年の SATREPS 計画においては Cooke 4 鉱山の地下 1 km の堅坑周辺に地震計を設置するため、様々な方向にボーリングが行われた（小笠原ら，2021）。2016 年，著者らはコア倉庫に乱雑に保管されていたこれらのコアの中から 38 本のコアを選定し（図 4），それらのコアに DCDA を適用した。いずれのコアも方位は不明なので，DCDA によって得られる情報はコア軸直交面内の差応力のみである。そこで，空間的に一様な三次元応力場を仮定し，各孔の方位から計算される孔軸直交面内の差応力と，DCDA による差応力との差が最小になるような最尤解が求められた（図 5）。

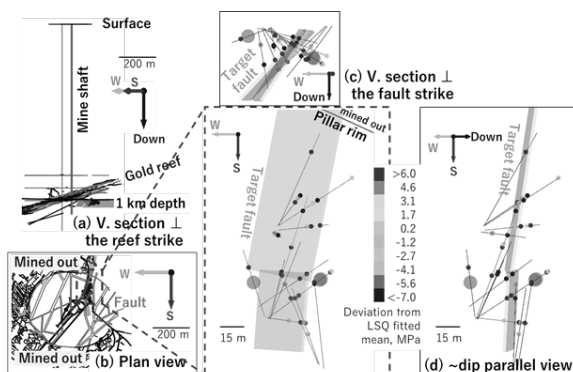


図 4 ボーリング孔の配置とコア採取位置 (小笠原ら，2021)

同図には近傍で実施された円錐孔底ひずみ法（CCBO）の結果を比較のために示しているが，測定時期や堅坑掘削の影響が異なるものの最大主応力が鉛直に近く，差応力が非常に大きいという大局的な傾向は調和的である。

このように，それぞれのコアが定方位でなくてもコア軸（ボーリング孔軸）が既知であれば，異なる方向の複数のボーリングコアを用いることにより三次元応力を評価することが可能になる。

Table 2 Comparison of the measured principal stress values, MPa. Pre-mining DCDA (this study) with and without outliers (WO and WoO, respectively). Overcoring: post-mining CCBO overcoring¹³⁾.

Pre-mining (This Study)	Measured stress, MPa and symbols in Fig.8				
	σ_1 ○	σ_2 △	σ_3 □	$\sigma_1 - \sigma_3$	$\sigma_2 - \sigma_3$
DCDA WO	124 ± 9	104 ± 10	78 ± 8	46	26
DCDA WoO	110 ± 7	88 ± 7	55 ± 9	55	13
Post-mining Overcoring ¹³⁾	127 ± 3	41 ± 3	36 ± 3	91	5

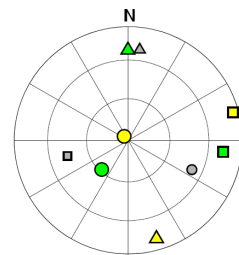


Fig. 8 A composite plot of the three results to compare the plunges and orientations of the measured principal stresses. Gray and green: pre-mining DCDA (WO and WoO, respectively; this study). Yellow: post-mining overcoring¹³⁾ at the location in Fig. 4b. See measured values in Table 2. ○: σ_1 , △: σ_2 , □: σ_3 .

図 5 三次元主応力（小笠原ら，2021）

2.2 ブラジルの露天掘り鉄鉱山

JOGMEC はブラジルの Vale 社と 2014 年に締結した資源分野における包括協定覚書（MOU）に基づいて日本の先進技術を紹介する活動を行ってきた。その一つに DCDA が取り上げられ，著者は 2017 年に図 2 の装置を携えて JOGMEC 担当者に同行し，Vale 社の技術研究所で DCDA のプレゼンとデモ測定を行い今後の共同研究に向けて協議した。翌年，JOGMEC と Vale 社の間で岩盤応力測定技術に関する共同研究合意書が締結され，DCDA を Vale 社の鉱山に適用する研究が開始された。対象とした鉱山は，ブラジル南東部ミナス

ジェライス州の鉄鉱石四角地帯 (Iron Quadrangle) にある露天掘りの Tamandua 鉱山 (図 6) で、この露天掘りピットは約 1.0×1.5 km の広さで地表面からの最大深さは 370 m である。用地上の制約から露天掘りではこれ以上の採掘ができないため、ピット底部からの坑道掘削が検討されている。ピット端から 1~2 km 離れた位置で応力測定用の鉛直ボーリングが掘削され、深度 290~410 m において原位置での水圧破碎試験 (HF)、室内での変形率変化法 (DRA) 及び DCDA の応力比較測定が実施された (Penido et al., 2021)。地質はイタビライトと呼ばれる縞状鉄鉱層とドロマイトである。著者は、HF を実施した箇所に対応して選定、空輸された 38 本のコアを受領し、孔壁展開画像から各コアの方位を決定して DCDA による応力評価を行った。これらのコアの代表的なもの 8 本から端部約 50 mm を切り出して圧裂試験によるヤング率測定 (船戸・細田, 2016) 等 に供し、残りのコアは DRA を担当する西オーストラリア大学へ送付した。



図 6 Tamandua 鉱山の露天掘りピット
(中央の斜面の高さは見える範囲で約 300m)

図 7 に代表的なコアを示す。(a) のドロマイトは優白色で網状の模様を伴うが概ね塊状、均質である。イタビライトは黒色 (b) と茶褐色 (c) のものがあるがいずれも層状で白色脈が発達してい

る。ドロマイトとイタビライトの両者ともコア軸直交面内の P 波速度、ヤング率に顕著な異方性は認められていない (Penido et al., 2021)。

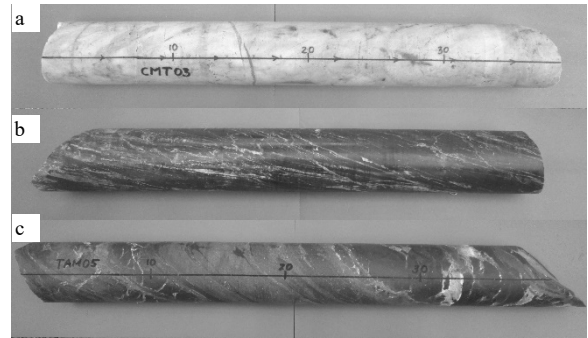


図 7 DCDA 用のコア, (a) ドロマイト, (b) 黒色のイタビライト, (c) 茶褐色のイタビライト

図 8 に DCDA による最大直径 $d_{\max}$ の方位 α と差応力 $\Delta\sigma$ の深度分布を示す。同図にプロットされた $\times$ 記号は、孔壁展開画像による方位決定が不確実なもの、 $d_{\max}$ と $d_{\min}$ の差が小さく α の誤差が大きいもの又は割れ目やコアの曲がりなどにより直径分布が異常なものを示す。同図 (a) の $d_{\max}$ の方位 α は、深度 330 m の地層境界を境に、上位のドロマイトでは E-W 方向、下位のイタビライトでは概ね N-S 方向を示している。同図 (b) の差応力 $\Delta\sigma$ は所々大きい値を示す箇所もあるが概ね被り圧 ρgz (ρ : 密度, g : 重力加速度, z : 深度) より小さい。

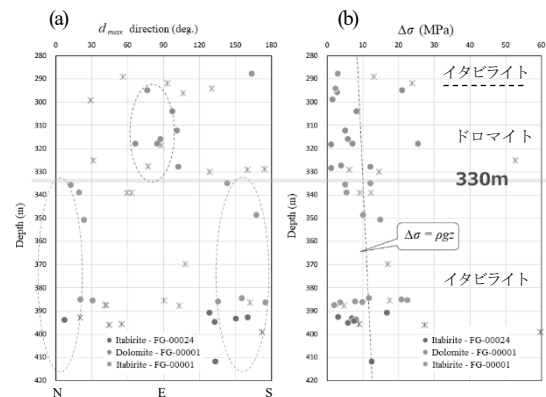


図 8 DCDA による最大直径 $d_{\max}$ の方位 α と差応力 $\Delta\sigma$ の深度分布 (Penido et al., 2021 に加筆)

Penido et al. (2021) は、HF、DRA 及び DCDA による応力測定結果が必ずしも一致していないことを示し、その原因として縞状構造や褶曲構造などの複雑な地質条件と、HF や DCDA は現在の自然地形やピット掘削の影響を受けているのに対して DRA は過去の構造運動の影響の可能性があることを示唆している。

2.3 チリアンデス山中の銅鉱山

チリ銅公社（CODELCO）は世界最大の銅産出国チリを代表する国営企業で、世界最大の露天掘り鉱山であるチュキカマタやアンデス山中の大規模なエル・テニエンテ鉱山などを保有している。エル・テニエンテ鉱山では坑道掘削に伴いオーバーコアリング法による数多くの応力測定が実施されてきたが（Windsor et al., 2006）、掘削レベルが深くなるにしたがって応力情報の必要性が一層高まり、新たな応力測定が計画、実施されてきた。そんな折、CODELCO とも覚書を締結した JOGMEC が DCDA を紹介したところ強い関心が寄せられ、2017 年から試験的適用が始まった。

まず、あらかじめ AE 法による応力測定が行われた近傍のコアが CODELCO から提供され、DCDA を適用して両者の結果を比較するブラインドテストが 2 度実施された。その結果について議論し今後の進め方を協議するため、2017 年にブラジルの前にチリの CODELCO 本社やエル・テニエンテ鉱山を訪れ、DCDA のデモ測定なども行った（図 9）。その後協議を重ねた結果、2019 年に CODELCO と深田地質研究所の間で DCDA の適用測定に関する秘密保持契約（NDA）が締結され、CODELCO から提供された 19 本のコアに DCDA を適用する測定、試験を行った。しかし、その結果について十分な議論がされないまま、CODELCO がエル・テニエンテ鉱山で計画してい

た水圧破碎や CCBO を含む応力測定計画を断念したよだとの情報が JOGMEC を通してもたらされた。その後コロナ禍の影響もあって何ら進展がないまま現在に至っている。



図 9 DCDA の測定デモ状況
（右は著者、左奥は CODELCO の Cavieres 氏）

3. 新たな方法の開発

DCDA は非破壊で迅速な測定ができ適用範囲が広いという利点を有するものの、適用が一気に拡大するという事態には至っていない。その最も大きな要因は、主応力の値を個々に決定することができないという点にあるものと考えられる。以下には DCDA の発展形として最大主応力、最小主応力及びその方位を決定することができる新たな方法を紹介する。

3.1 二重解放コア変形法

二重解放コア変形法（Ito et al., 2020）は近年著者らが最も精力的に開発を進めている方法である。この方法では、図 10 に示すようにボーリング孔の孔底を外ビットで直径程度の深さまで掘削してコアを残し、その中心を内ビットで掘削してコアを回収する。この時、外ビットで掘削した区間は応力が解放されているのでコアの直径は初期直径

d_0 のままで変化せず，下部は応力解放に伴ってコアの直径が最大直径 $d_{\max}$ ，最小直径 $d_{\min}$ の楕円形に変化する。

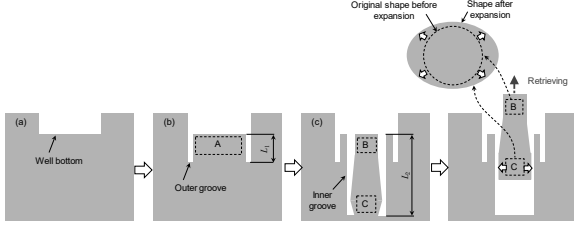


図 10 二重解放コア変形法の概念図 (Ito et al., 2020)

このようにして得たコアを応力記憶コア (stress record core) と呼び，次式で最大主応力 $S_{H\max}$ と最小主応力 $S_{H\min}$ を求めることができる。

$$S_{H\max} = \frac{E}{(1-\nu^2)}(\epsilon_{\max} + \nu\epsilon_{\min}) + \frac{\nu}{1-\nu}S_v \quad (1)$$

$$S_{H\min} = \frac{E}{(1-\nu^2)}(\epsilon_{\min} + \nu\epsilon_{\max}) + \frac{\nu}{1-\nu}S_v \quad (2)$$

$$\epsilon_{\max} = \frac{d_{\max} - d_0}{d_0} \quad \epsilon_{\min} = \frac{d_{\min} - d_0}{d_0} \quad (3)$$

ここに， E と ν は岩石のヤング率とポアソン比， S_v は $S_{H\max}$ と $S_{H\min}$ に直交する主応力である．ここで(1)式と(2)式の差をとると，

$$S_{H\max} - S_{H\min} = \frac{E}{1+\nu} \cdot \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_0} \quad (4)$$

となり図 1 中に示した式と同じになる。

図 11 に二重解放コア変形法の原理を検証するためにに行った室内実験の結果を示す．実験は， 200×200 mm，高さ 230 mm の安山岩ブロックの側面一方向にフラットジャッキで 10 MPa の圧力を加えた状態で，内径 $\phi 50$ mm の外ビットで深さ 90 mm まで掘削してコアを残したまま，その中心を内径 34 mm の内ビットでくり抜く方法で行った．回収したコアの軸方向に 5 mm 間隔で断面形状を測定し，各断面で $d_{\max}$ ， $d_{\min}$ 及び $d_{\max}$ の方位 α を決定した．図 11 の応力解放区間 (I) では，

(a) $d_{\max}$ と $d_{\min}$ の差はわずかで，(b) α に定方位性は認められない．これに対し，応力作用区間 (III) では (a) $d_{\max} > d_{\min}$ であり，(b) α は 0–180 度 (载荷方向) ではほぼ一定である．同図の網掛け区間の平均として求めた $d_0 = 33.443$ mm， $d_{\max} = 33.463$ mm， $d_{\min} = 33.438$ mm を (1)~(3) 式に代入すると $S_{H\max} = 8.64$ MPa， $S_{H\min} = -1.3$ MPa となり (ただし $S_v = 0$)，実際に加えた応力 10 MPa と 0 MPa をほぼ再現することができている。

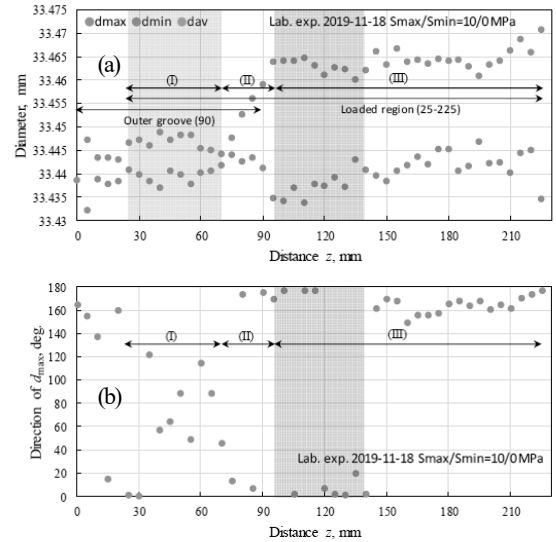


図 11 二重解放コア変形法の検証実験による $d_{\max}$ ， $d_{\min}$ 及び α の分布 (Ito et al., 2020 を一部改変)

さらにこの方法を実用化するために二重ビットコアリングツールを開発し (Ito et al., 2020)，現地実験を重ねている．このツールは，大小 2 種類のビットを組み込み，図 12 のように最初は外ビットで掘削した後，切り替えて内ビットで掘削するように工夫したものである．この切り替えには J-スロットと呼ばれる機構を用いている．図 13 に HQ サイズ ($\phi 98$ mm) で作成した二重ビットコアリングツールの構造を示す．最初に作成したツールの外ビットと内ビットの内径はそれぞれ $\phi 76$ mm と $\phi 50$ mm であった．

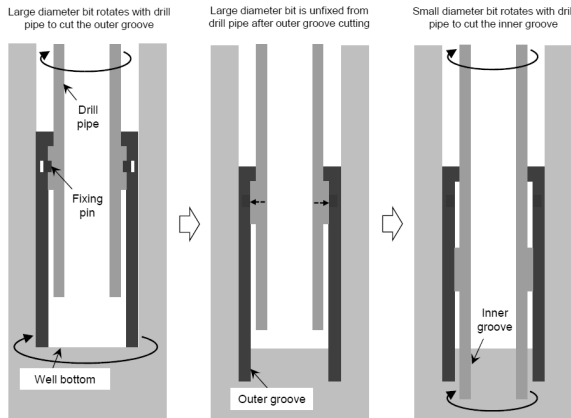


図 12 二重ビットコアリングの概念図
(Ito et al., 2020)

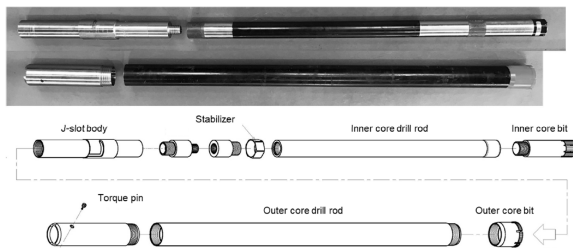


図 13 HQの二重ビットコアリングツール
(Ito et al., 2020)

このツールの動作確認を兼ねた応力比較測定実験を岐阜県の神岡鉱山で行った。ここでは水平に 20m 掘削した NQ 孔で、7 回の水圧破砕法と 4 回のオーバーコアリング（CCBO）法を実施し、約 1m 離して水平に 20m 掘削した HQ 孔で二重ビットコアリングツールによる掘削、応力測定を行った。二重コアリングは 4 回行い、そのうち 2 回のコアを用いて応力を評価した。その結果を図 14 に示す。ばらつきはあるものの概ね整合的な結果となっている。

二重ビットコアリングツールは、その後も掘削試験と改良を積み重ね、ビットの回転ブレ抑制のためのスタビライザー、内外ビットのクリアランス、内ビット先端の形状や材質などについて最適化をめざし改良、開発を進めている。

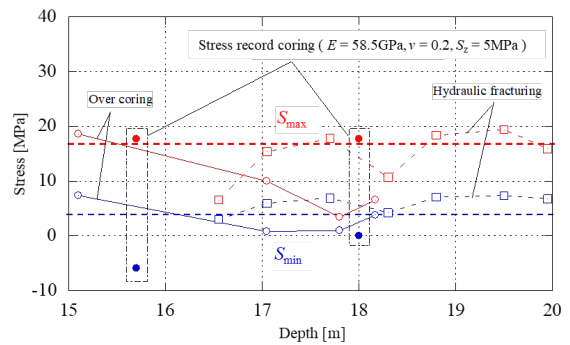


図 14 二重解放コア変形法、水圧破砕法及びオーバーコアリング法による応力測定結果 (Tezuka et al., 2019)

3.2 サイドウォールコアリング法

石油や天然ガスの分野では、試掘井において特定の深度の岩石試料を採取するため、坑井の側壁から小口径のコアを採取するサイドウォールコアリングが行われている。このサイドウォールコアを用いることで最大主応力 S_{Hmax} と最小主応力 S_{Hmin} を別々に求めることができる (Ito et al., 2018)。

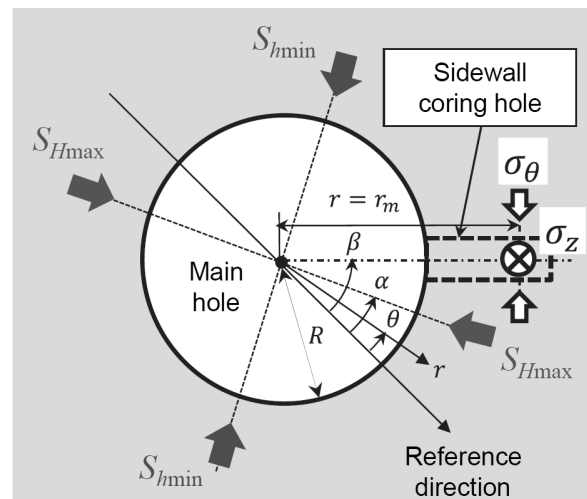


図 15 サイドウォールコアの応力条件
(Ito et al., 2018)

図 15 のような応力条件下において、サイドウォールコアに作用する応力は側壁からの距離によって変化する。本孔の中心から r の位置の応力は次式で表される。

$$\sigma_{\theta} = \frac{1}{2}(S_{Hmax} + S_{hmin})\left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}(S_{Hmax} - S_{hmin})\left(1 + \frac{3R^4}{r^4}\right)\cos 2(\beta - \alpha) \quad (5)$$

$$\sigma_z = S_v - 2\nu(S_{Hmax} - S_{hmin})\frac{R^2}{r^2}\cos(\beta - \alpha) \quad (6)$$

Ito et al. (2018) は図 16 に示すような室内実験でこの方法の検証を行った。即ち、中央に $\phi 110$ mm の主孔を貫通した一辺 300 mm の本小松安山岩の供試体に、側方からフラットジャッキで一定の圧力 S_a を加えた状態で主孔に直交する外径 $\phi 40$ mm のコアリングを行い、同図 A のサイドウォールコアを回収した。この場合、 $S_{Hmax} = S_a$ 、 $S_{hmin} = S_v = 0$ 、 $\beta - \alpha = 90^\circ$ なので (5) 式と (6) 式の差 $\Delta\sigma$ は、

$$\Delta\sigma = S_a \left\{ 1 + \frac{R^2}{2r^2} \left(1 + \frac{3R^2}{2r^2} - 4\nu \right) \right\} \quad (7)$$

と表すことができる。

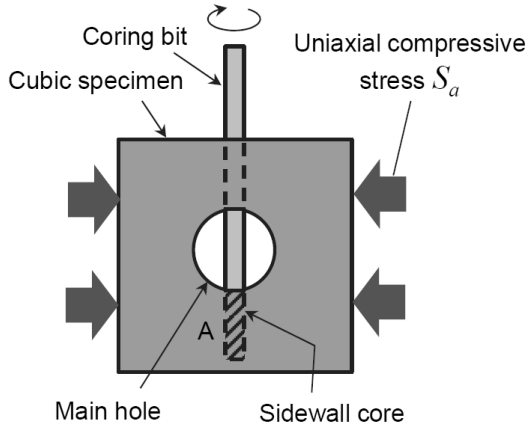


図 16 サイドウォールコアの室内検証実験 (Ito et al., 2018)

$S_a = 3$ MPa 及び 6 MPa の条件でくり抜いたサイドウォールコアの直径測定から求めた $\Delta\sigma$ と主孔壁からの距離 $(r - R)$ の関係を図 17 に示す。同図の破線と直線は (7) 式に回帰した理論曲線で、実測値はばらつきがあるものの理論曲線に沿って分布している。実測の $\Delta\sigma$ から回帰して得られる

S_a はそれぞれ 3.13 MPa 及び 6.39 MPa となり、実際に加えた応力とほぼ一致している。

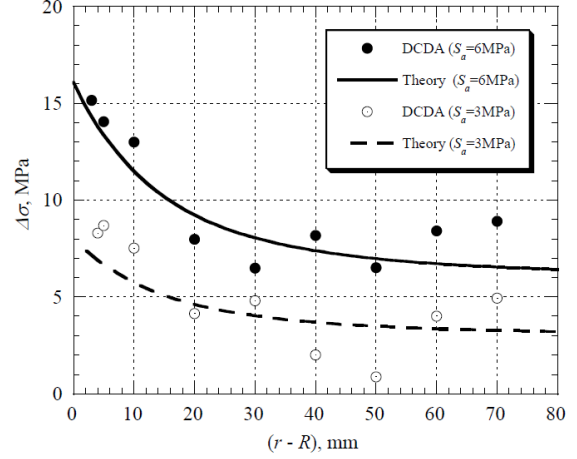


図 17 サイドウォールコアの室内検証実験 (Ito et al., 2018)

この方法を実用化するには、通常ノンコアで掘削される主孔での定方位コアリング及び検層によるサイドウォールコアの方位決定が不可欠である。また、主孔コア及びサイドウォールコアの両者とも側面が滑らかで乱れないコアであることが要求される。原理としては可能であるが、実用化するにはまだまだ多くの課題を克服する必要がある。

4. 今後の課題

4.1 コアの品質

これまで DCDA は、コアさえあれば応力評価が可能であることを売り文句に適用拡大を図ってきたが、測定事例が増えるにつれ DCDA が適用できないコアが少なからずあることが明らかになってきた。この一例を図 18 に示す。このコアは、同図 (a) のように側面に直定規を当てると最大 1 mm 程度の隙間があり、側面の凸部がスパイラル状になっていた。このようなコアは決して特殊なものでもなく、2.3 で紹介したエル・テニエンテ

では“pig tail”と呼ばれているようである。コアがスパイラル状になるのは、ボーリング時に過度な荷重を負荷するなどによるものではないかと推測される。応力解放によるコアの変形は一様に生ずることが期待されるため、図 18 (b) のように測定断面によって最大直径の方向 α が変わるようなデータはこれまでは異常値として棄却していた。しかし、 α の変化に一定の傾向がみられることに気づき、再度 1 cm 間隔で再測定して移動平均をとってみると、図 19 のように 8 断面（7 cm 区間）或いは 15 断面（14 cm）区間の移動平均は、小丸記号でプロットした全 29 断面の平均と重なり、 α と直径差 Δd はほぼ一定となった。図 18 (a) のようにスパイラルがコアを一周する深度間隔は 14~15 cm なので、半周分或いは一周分の平均をとることでスパイラルの影響がキャンセルされたものと考えられる。しかし、このようにして得られたデータが応力解放に伴うコアの変形を反映しているかについては、今後慎重な検討が必要である。

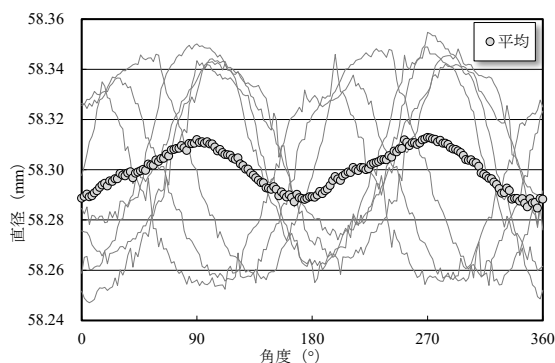


図 18 (a) 曲がったコア、(b) その直径分布

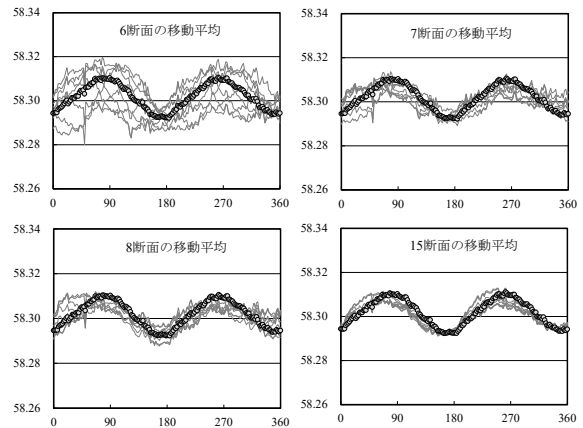


図 19 曲がったコアの直径分布（移動平均）

前述の図 4 に示したコアを選定する際には、定盤の上でコアを転がして曲がりをチェックしたが、意外に曲がったコアが多く見られた。また、チリのコアでは図 20 のようにコアの表面にビットの削痕と思われる微細な縞模様がみられる場合も少なくなかった。このような削痕のあるコアは測定対象から除外するのが望ましいが、直径測定を密に行って平均する、或いは次項に示す二次元測定器を用いることによりその影響を減じることができるものと期待される。



図 20 表面にビット削痕のあるコア

以上に述べたように、既存コアに DCDA を適用する際には、曲がりのない表面が滑らかなコアを選定するのが望ましいが、そのほかにも留意点

がある。その一つは、ビット先端で応力解放に伴って膨張したコアの側面がビットの内刃によって削られること、それを避けるには内刃の刃高が低いビットが望ましいことを船戸ら（2014）が指摘している。また、良好なコアを得るためには、掘削時の諸条件（ビット圧、トルク、回転数、送水量など）を一定にして極力負荷をかけないで掘削する必要がある。一般的に、浅掘りコアより深掘りコアの方が長いコアチューブを使用するためビットの回転ブレが少なく、良好なコアを得やすい。既存コアから選定する場合には、これらの情報も参照するのが望ましい。

コア径については、応力解放に伴う変形はコア径に比例するので、コア径が小さいと測定誤差の影響が大きく、掘削時にビットもぶれやすいので不利である。一方で、コア径があまり大きい場合には掘削時の不安定さによる影響が懸念され、測定時の取り扱いも容易ではない。現実的には $\phi 50 \sim 100 \text{ mm}$ 程度のコアが好ましい。

4.2 測定装置の改良

図 2 に示した直径測定装置の寸法測定器（Optical micrometer）には株式会社キーエンスの LS-7070 を用いている。この測定器は LED 光源から発せられた光がコアに当たって影となる上下のエッジを検出する機構であるが、スリットを立てて試したところ、エッジを検出する区間は約 20 mm の光の幅のうちの中心部の 0.5 mm 以下であることが分かった。したがって、局所的な影響を受けて測定値がばらつきやすいため、これまでは一本のコアについて数断面から十数断面の測定を行い、それらの平均値で評価していた。これに対し、同社の二次元寸法測定器 TM-065 は、二次元測定が可能であり、また図 21 に示すように任意の幅に設定した複数個所の測定領域の平均直径を

同時に測定することができる。この測定器を用いることで測定時間の短縮とより安定したデータの取得が可能になる。

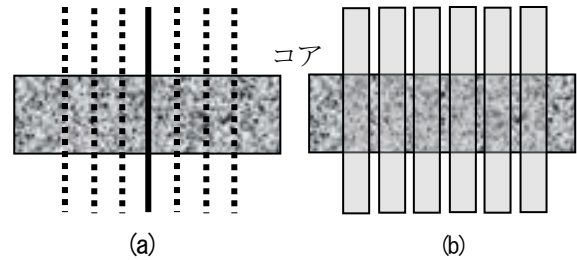


図 21 (a)従来の一次元測定器ではコアを 1 回転させるごとに測定位置を変えて複数断面の測定を行って平均していたが、(b)二次元測定器では任意の幅の測定範囲の平均直径を同時に複数個所で測定することができる。

4.3 測定データの評価

これまでは前述のように一本のコアの複数断面において測定したデータの平均値から最大直径 $d_{\max}$ 、最小直径 $d_{\min}$ 及び $d_{\max}$ の方位 α を決定していた。その際、一様な変形から外れていると判断した測定断面のデータは平均を求める際に除外していたが、客観的な判定基準がある訳ではなかった。また、 $\Delta d (= d_{\max} - d_{\min})$ と α のばらつきの評価もできなかった。図 11 に示したように各測定断面ごとにこれらの値を算定すれば、 Δd と α の標準偏差を求めることができ、統計的な棄却も可能になる。さらには、実測データと回帰した理論曲線との差の二乗和からばらつきを評価し、客観的な閾値により取捨選択を行うこともできる。

そのためには、前項に示したような装置を用いてばらつきの少ない数多くのデータを取得できるようにするとともに、ばらつきを評価するためのデータ整理のフォーマットを標準化する必要がある。

5. おわりに

2014 年以来、筆者が自主研究テーマとして取り組んできた DCDA の拡大と高度化の現状について報告した。このうち、南アや南米の鉱山関係のプロジェクトは、コロナ禍のために昨年以来渡航することができず現地での作業は中断しているが、これまで蓄積したデータを取りまとめた論文を執筆し、オンライン会議等を利用して次の計画を検討している。

また、二重解放コア変形法の二重ビットコアリングツールの開発は、研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務の中で実施したものであり、記して謝意を表するとともに、今年度以降はフェーズⅡとしてこのツールをより実用的な装置に改良、発展させてゆく計画である。

謝辞

南アのプロジェクトについては、立命館大学の小笠原宏教授、東北大学の矢部康男准教授、南アの鉱山関係者に大変お世話になった。南米の鉱山会社との共同研究は JOGMEC の目次英哉氏に全面的にサポートしていただいた。二重ビットコアリングツールの開発については、東北大学の伊藤高敏教授、石油資源開発株式会社 (元 株式会社物理計測コンサルタント) の手塚和彦氏、応用地質株式会社の小川浩二氏ほか多くの関係者のご指導、ご協力をいただいている。

ここに記して心より感謝の意を表します。

文献

船戸明雄 (2015) : 原位置の岩盤応力を評価する

ためのコア変形法 (DCDA)。深田地質研究所年報, No.16, 169-179.

船戸明雄・細田光一 (2016) : 圧裂試験による変形異方性の評価。第 51 回地盤工学研究発表会, 511-512.

Funato, A., Ito, T. (2017): A New Method of Diametrical Core Deformation Analysis for In-Situ Stress Measurements. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 91, 112-118.

船戸明雄・伊藤高敏・三上央 (2014) : コア変形法 (DCDA) の室内検証実験。Journal of MMIJ, 130, 515-526.

Ito, T., Fukusawa, S., Funato, A., Tamagawa, T., Tezuka, K. (2018): A new method of stress measurement based on elastic deformation of sidewall-core with stress relief during coring. *52nd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. ARMA-2018-672.

Ito, T., Kumazawa, A., Funato, A., Tezuka, K., and Yokoyama, T. (2020): A New Method Developed for Rock Stress Measurement at Deep Depth in High Temperature Environment. *Proceedings World Geothermal Congress 2020+1*, 22098.

Ito, T., Kumazawa, A., Tezuka, K., Yokoyama, T., Ogawa K., Funato, A. (2020): Experimental verification of the dual bit coring method developed for stress measurement applicable in deep and high temperature environment. *54th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, ARMA 20-2016.

Ogasawara, H., Ishida, A., Sugimura, K., Yabe, Y., Abe, S., Ito, T., Funato, A., Kato, H., Liebenberg, B., Hofmann, G., Scheepers, L., Durrheim, R. J. and The SATREPS & DSeis teams (2019): Spatial variation in stress in seismogenic zones in South African gold mines. *Rock Dynamics Summit - Proceedings of the 2019 Rock Dynamics Summit*, RDS 2019, 39-44.

小笠原宏・川方裕則・石井 紘・中谷正生・矢部
康男・飯尾能久・南アフリカ金鉱山における
半制御地震発生実験国際共同研究グループ
(2009)：南アフリカ金鉱山における半制御地
震発生実験－至近距離観測による地震発生過
程の解明に向けて－. 地震第2輯, 第61巻特
集号, 563-573.

小笠原宏・美間良大・石田亮壮・Siyanda
MNGADI・東 充也・矢部康男・船戸明雄・伊
藤高敏・中谷正生・Raymond DURRHEIM
(2021)：大深度高応力鉱山でのルーチン的な
採掘ハザード定量化に資しうる岩盤コア絶対
差応力 DCDA 測定法の試評価. 材料. (投稿
中)

Penido, H., Funato, A., Metsugi, H., Navarro Torres, V. F.,
Sotomayor, J. M. G., Dight, P., Figueiredo, R. P., Assis,
A. and Guimaraes, A. (2021): Application of the HF,
DRA and DCDA technologies for in situ stress
determination in Iron Quadrangle rock masses.
Geomechanics and Geoengineering,
DOI:10.1080/17486025.2021.1955162

Tezuka, K., Yamamoto, T., Ito, T., Yokoyama, T., Funato A.,
(2019): First Field Test of the Dual Core-bit Tool for
Drilling Stress Record Cores at KAMIOKA MINE.
JAPAN, *The 25th Formation Evaluation Symposium of
Japan*.

Windsor, C. R., Cavieres, P., Villaescusa, E., Pereira J.,
(2006): Rock stress tensor measurements at El Teniente
Mine, Chile. *In-situ Rock Stress*, Taylor & Francis
Group, London, 533-540.