

# 深部岩盤における初期応力測定手法に関する調査

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1998年3月

同和工営株式会社

複製またはこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒509-51 岐阜県土岐市泉町定林寺959-31  
動力炉・核燃料開発事業団  
東濃地科学センター  
技術開発課

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to : Exploration and Mining Technology Development Section. Tono Geoscience Center. Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 959-31, Jorinji, Izumi-machi, Toki-shi, Gifu-ken 509-5102, Japan

© 動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1998

## 深部岩盤における初期応力測定手法に関する調査

加藤春實\*

### 要 旨

超深地層研究所計画においては、地表から掘削した 1000m の試錐孔を掘削し、初期応力測定を実施し、地表から地下深部までの 3 次元初期応力状態を把握する予定である。しかしながら、国内・国外ともに深度 1000m 程度の 3 次元初期応力を測定した実績が少なく、信頼性も高いとは言えない。

本調査では、現在、最も信頼性が高いと言われている応力解放法に関して、文献等により測定機器・システムの開発に関する調査をおこなった。特に、地下 1000m の深度まで適用できる SSPB 3 軸セルと DDGS ついて詳しく調査をおこない、深度 1000m に適用できる新しい大深度オーバーコアリングシステムを開発するための検討をおこなった。

最後に、土岐花崗岩のボーリングコアと直交する平面内の弾性波速度の異方性に関する調査をおこなった。4 本のボーリングコアは AN-1 孔の深度 198.3~1004.8 m から採取された。いずれのコアも顕著な弾性速度の異方性を示し、配向性マイクロクラックの存在を示唆していた。したがって、土岐花崗岩に DSCA(Differential Strain Curve Analysis)法を適用すれば初期応力に関する情報が得られると予測された。

---

本報告書は、同和工営株式会社が動力炉・核燃料開発事業団との契約により実施した業務の成果である。

契約番号：09C1715

事業団担当部課室および担当者：東濃地科学センター 地質環境研究室長 坪田浩二

\*：同和工営株式会社ジオサイエンス事業部

## Investigation on *In Situ* Stress Measurement Technique of Overcoring Method at great Depth

H.Kato

### ABSTRACT

In the construction project of underground research facility, the *in situ* state of stress is to be measured in exploration boreholes to determine the complete stress field at depths ranging from surface to 1000 meters. However, measurements of the complete stress state at depths around 1000 meters have not yet gained much popularity in practice and *in situ* stresses cannot be measured with high reliability at the depths.

The objective of this report is to conduct a review of techniques, equipment and procedures of overcoring method which is one of the most reliable methods of *in situ* stress measurement. Especially, deep overcoring measurements using the Swedish State Power Board triaxial strain cell and the Deep Doorstopper Gauge System were examined since they are two of only a few overcoring techniques capable of measuring stresses at great depth reaching 1000 meters. This presentation provides basic data for designing a new overcoring probe which can be operated at depths to 1000 meters in water-filled boreholes.

Finally, velocities of compressional waves propagating along diametrical directions of four core samples of Toki granite were measured to investigate the anisotropic elasticity. The core samples had been taken from borehole AN-1 at depths ranging from 198.3 to 1004.8 meters. It was found to show the significant anisotropic distribution of sound velocity in all of the cores which may attribute to oriented microcracks. Therefore, the DSCA(Differential Strain Curve Analysis) method will give stress estimates for the Toki granite.

---

Work performed by Dowa Engineering Co., Ltd. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

PNC Liaison: Koji Tsubota, Geological Environment Research Section, Tono Geoscience Center.

\* : Dowa Engineering Co., Ltd., Geoscience Consulting Division.

## 目次

1. 目的	1
2. 地下開発における初期応力測定法の発達	2
3. 応力解放法	4
3. 1 オーバーコアリングによる応力解放法の一般的な測定手順	7
3. 2 CSIR 3 軸ひずみセル	9
3. 3 2 軸載荷試験	11
3. 4 測定データの解析方法	12
3. 4. 1 解析の前提として導入される仮定	12
3. 4. 2 セルによって測定されたひずみの解析	14
3. 4. 3 オーバーコアの弾性特性の測定	18
4. 海外における大深度オーバーコアリングシステム	19
4. 1 SSPB (Swedish State Power Board) セル (1976~1988)	19
4. 2 SSPB (Swedish State Power Board) セル (1990 年代)	22
4. 3 DDGS (Deep Doorstopper Gauge System)	24
5. 大深度オーバーコアリングシステムの開発	26
5. 1 大深度オーバーコアリングのためのプローブ	26
5. 2 大深度オーバーコアリングのためのボーリング技術	33
6. 土岐花崗岩の室内弾性波速度測定	35
6. 1 弾性波速度測定による微小き裂系の評価	35
6. 2 弾性波速度測定	35
6. 3 測定結果	37
7. まとめ	40
引用文献	41

## 付表目次

表 3. 1	種々の応力解放法	5
表 3. 2	ボアホールにおける応力解放法	6
表 5. 1	既製の超小型ひずみレコーダーの仕様をもとに検討した 大深度オーバーコアリングのためのひずみレコーダーの概略仕様	29
表 5. 2	大深度オーバーコアリングシステムの仕様および開発課題	32
表 5. 3	深部岩盤におけるオーバーコアリングにともなう生じると 予想される問題点	34
表 6. 1	コアの軸方向と直交する平面内の P 波速度	37

## 付図目次

図 3. 1	ボアホールオーバーコアリングによる応力解放の手順。	8
図 3. 2	CSIR セルの鳥瞰図。	10
図 3. 3	(a)CSIR セルのひずみロゼットの位置および(b)ひずみゲージの配置。	10
図 3. 4	2 軸載荷試験装置。	11
図 3. 5	(a)ボアホールと弾性対称軸の関係、(b)ボアホール座標系および (c)弾性対称軸の座標系。	16
図 3. 6	(a)CSIR タイプの 3 軸セルおよび(b)ひずみゲージの方向。	17
図 4. 1	鉛直ボアホール用の SSPB プロープ。	20
図 4. 2	SSBP セルのひずみゲージアッセンブリー。	20
図 4. 3	SSBP セルを用いたボアホールオーバーコアリングの手順。	21
図 4. 4	Borre の外観。	23
図 4. 5	Boore によるボアホールオーバーコアリングの手順。	23
図 4. 6	DDGS(Deep Doorstopper Gauge System)による オーバーコアリングの手順。	25
図 5. 1	測定データがパーソナルコンピューターに記録されるまでの流れ。	28
図 5. 2	ひずみレコーダーのブロックダイアグラム。	29
図 5. 3	大深度オーバーコアリングのためのプロープ。	31
図 6. 1	非整形ボーリングコアの弾性波速度測定。	36
図 6. 2	コアの軸方向と直交する平面内をコアの中心を 通って伝播する P 波の速度分布。	39

## 1. 目的

超深地層研究所計画においては、地表から掘削した 1000m の試錐孔を掘削し、初期応力測定を実施し、地表から地下深部までの 3 次元初期応力状態を把握する予定である。しかしながら、国内・国外ともに深度 1000m 程度の 3 次元初期応力を測定した実績が少なく、信頼性も高いとは言えない。このため、現在、最も信頼性が高いと言われている応力解放法に関して、文献等により測定機器・システムの開発に関する調査を行ない、基礎情報を得ることを目的とする。さらに、土岐花崗岩の弾性波速度の異方性に関するデータを取得し、コアを用いた測定手法の適用性を解析する。

## 2. 地下開発における初期応力測定法の発達

初期応力状態の知識は地下空洞の合理的な設計において必要不可欠である。しかし、最近まで、初期応力測定がおこなわれるのはきわめて限られた場合だけであって、その方法も限定されていたのが実状であった。たとえば、応力測定がおこなわれるのは大規模な水力発電設備を建設する場合や鉱石の採掘によって力学的に不安定な空洞が形成されると予想されるような特殊な場合であった。採用されていた方法は主としてオーバーコアリング法で、この方法は適用できるボアホールの深度に制約があった。その結果、初期応力測定がおこなわれるのは空洞の掘削が開始された後になり、掘削前の空洞設計には不確定な要素が含まれることになる。

水圧破碎法による初期応力測定技術の発達は、適用深度に関する障害を取り除いたばかりでなく、調査用のボアホールを用いることによって掘削前の設計段階において深部岩盤の応力状態を評価することを可能にした。このことは空洞掘削後の設計変更に伴う莫大な費用を低減するという観点から大きな進歩であった。水圧破碎法は応力解放法と異なり、オーバーコアリングや水中でのひずみゲージの接着が不要なので大深度への適用が容易である。しかも、近年、いくつかの技術革新によって水圧破碎法による初期応力測定は急速な広がりを見せている。すなわち、柔らかな高圧ホースとワイヤラインを用いる試験方法は、従来の掘削やくらやドリルロッドなどの大規模な機械設備を必要とした水圧破碎法と比較するときわめて小規模な機械設備によって経済的に試験をおこなうことを可能にした。マイクロコンピューターの発達はデジタルデータの記録と処理を容易にし、水圧破碎試験のデータを客観的に解釈するのに大きな貢献をした。

いっぽう、これまでの応力解放法はその適用深度が浅いために、主として掘削後の設計段階において広く用いられてきた。この方法は、現在のところ、初期応力の大きさと方向に関して仮定を設けることなしに岩盤内のある一点における完全な3次元初期応力を決定できる唯一の方法である。たとえば、3軸ひずみセルは掘削後の設計段階において広く用いられており、一部では空洞掘削前の設計段階でも適用されている。Wortnicki and Walton(1976)<sup>[1]</sup>は、Leeman(1971)<sup>[2]</sup>が設計した3軸ひずみセルを改良し、堅牢な円筒形のプラスチックボディの中にひずみロゼットを埋め込んだセルを開発した。ひずみゲージと岩盤との接着は、プラスチックシリンダーとボアホール壁面との間隙にエポキシセメントを充填しておこなう。これによって3軸セルはボアホール壁面の状態にほとんど影響されず、しかもオーバーコアリング中に連続的にロゼットのひずみを記録できるようになった。

Swedish State Power Board, SSPBは、ひずみロゼットをボアホール壁面に接着する方法、ゲージの方位測定方法およびゲージを岩盤に接着するための接着剤に技術的な改良を加え、かなりの大深度まで適用できる3軸セルを開発した。ここで使用される接着剤は岩盤が乾燥した状態でも湿潤した状態でも機能を発揮する。

SSPBセルを用いたオーバーコアリング法は、水圧破碎法のように掘削設計の予備段



階において調査用のボアホールに適用できるという長所がある。この 3 軸セルは SSPB に  
よって広く採用されていて、多くの岩盤開発プロジェクトで成功をおさめている(Hallbjorn,  
1986)<sup>[3]</sup>。

本報告書は 7 章から構成される。第 1 章は目的、第 2 章は地下開発における初期応力  
測定の発達について述べるとともに、本報告書の構成について述べる。第 3 章ではまず種々  
の応力解放法全般について概観するとともに、深部岩盤への適用がすでにおこなわれてい  
る CSIR タイプの 3 軸ひずみセルを用いたオーバーコアリングについて詳しく述べる。こ  
れには測定データの解析方法と 2 軸载荷試験のデータ解析方法が含まれる。第 4 章では、  
スウェーデンおよびカナダで開発された大深度オーバーコアリングシステムを文献に基づ  
いて調査した結果について述べる。第 5 章では、新たに大深度オーバーコアリングシステ  
ムを開発するために、測定システムを構成する各アッセンブリーの検討をおこなう。大深  
度オーバーコアリングのボーリング方法に関する検討もおこなう。第 6 章では、土岐花崗  
岩の弾性波速度の異方性を調査した結果について述べ、DSCA 法などのボーリングコアを  
用いた初期応力測定の適用性などについて検討する。第 7 章はまとめである。

### 3. 応力解放法<sup>[4]</sup>

応力解放法とは、原位置岩盤における初期応力場から岩石試料を（部分的にあるいは完全に）切り離し、その時の岩石の応答を観測する初期応力測定法である。通常、これはオーバーコアリング、アンダーコアリングあるいはスロットの切削をおこなうことで実現される。水圧破碎法ではボアホールに加える水圧の大きさから初期応力の大きさを直接に求めるが、応力解放法では応力解放の過程で応力場から切り離される岩石試料に生じるひずみあるいは変位をボアホール内部あるいは周囲の岩盤において測定する。応力解放試験の結果から初期応力場を正しく評価できるかどうかは、

- (1) 当該岩盤の応力-ひずみ（あるいは変位）の関係を正確に把握できるか、
- (2) 採取された岩石試料から岩盤の力学特性を正しく決定できるか、そして、
- (3) 用いる装置が微小なひずみあるいは変位を測定できるかどうかにかかっている。

通常、線形等方弾性理論から導いた方程式を用いて、測定されるひずみあるいは変位と初期応力場を関係づける。ひずみと変位の測定は初期応力場を求めようとする点に近接しておこなわれるので、注目する岩盤のまわりで初期応力場は一様でなければならない。すなわち、その岩盤内には顕著な不均質性あるいは応力の擾乱を引き起こす地質構造がないことが仮定される。

1930年代の初期から数多くの応力解放法が開発されてきたが、それらは3つの大きなグループに分類することができる。すなわち、(1)岩盤表面におけるひずみあるいは変位を測定する方法、(2)ボアホールの内部に測定装置を設置する方法、そして(3)空洞掘削などともなう大きな体積の岩盤の応答を測定する方法である。これらの応力解放法をまとめると表3.1のようである。これらの応力解放法のうち、原理的に大深度ボアホールへの適用が可能なものはボアホールにおける応力解放法である。この方法は、あらかじめボーリングしたパイロットホールと孔軸を一致させて、より大きな口径のボーリングをおこなう（オーバーコアリング）ものである。ボアホールにおける応力解放法はさらにいくつかのグループに分類できるが、その一部を示すと表3.2のようである。

ここで、表3.2(a)に分類される Hast ゲージはニッケル合金の透磁率の変化を、(b)に分類される応力解放法ではボアホールの変位を、そして(c)~(f)に分類される応力解放法ではボアホール表面のひずみを直接あるいは間接に測定する。これらの測定方法のうち、(b)の DBDG (Deep Borehole Deformation Gage)と(c)の DDGS(Deep Doorstopper Gauge System) および SSPB(Swedish State Power Board)セルだけが水で満たされた1000mまでのボアホールで試験ができるように設計されている。さらに1回のオーバーコアリングによって完全な3次元初期応力が決定できるのは、CSIR 3軸ひずみセルを改良した SSPBセルだけであって、DBDG および DDGS はボアホールと垂直な平面内の初期応力状態を決定するにすぎない。その他のセルあるいはゲージは適用できるボアホールの深度が最大で数十メートルから数百メートルで、しかもセルを設置するボアホールの表面が湿潤していたり濡れている場合は適用できないものがほとんどである。

表 3. 1 種々の応力解放法

<p>岩盤表面における応力解放法</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 岩石のブロックを周囲の岩盤から切り離し、その表面におけるひずみあるいは変位の応答を観測する。</li> <li>・ 孔軸を平行にして近接してボーリングをおこない、ボアホールの変形を観測する。</li> <li>・ 岩盤の表面に配置したセンサーの中心にボーリングをおこなう（アンダーコアリング）。</li> </ul>
<p>ボアホールにおける応力解放法</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ プレストレスを与えたセルのオーバーコアリング</li> <li>・ USBM ゲージのような変形ゲージのオーバーコアリング</li> <li>・ 平面に整形したボアホールの底面にゲージを設置して、それをオーバーコアリングする。ドアストッパーおよび光弾性ディスク。</li> <li>・ CSIR タイプの 3 軸ひずみセルのオーバーコアリング。</li> <li>・ ボアホールの底面に設置した 3 軸ひずみセルのオーバーコアリング（球面孔底および円錐孔底セル）。</li> <li>・ 剛性のある中実あるいは中空インクルージョンタイプのゲージのオーバーコアリング。</li> <li>・ ボアホールジャッキフラクチャリング、スロットティング。</li> <li>・ ホログラフィック法。</li> <li>・ ボアホール壁面のアンダーコアリング。</li> <li>・ ボアホールテーパコアリング。</li> </ul>
<p>岩盤応力解放法</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ レイズボーリングによって掘削したレイズの壁面における応力解放法。</li> <li>・ 逆解析法。</li> <li>・ Under-excavation technique</li> </ul>

表 3. 2 ボアホールにおける応力解放法

オーバーコアリングの種類	研究者	測定項目	パイロットホール直径	1本のボアホールで決定される応力状態
(a)プレストレスを与えたセルのオーバーコアリング	Hast(1958),Hast ゲージ	ニッケル合金の透磁率の変化、直径3測線	26mm	孔軸と垂直な平面内の応力状態
(b)変形ゲージのオーバーコアリング	USBM ゲージ (Obert,Merrill and Morgan,1962)	直径3測線	38mm	孔軸と垂直な平面内の応力状態
	Griswold(1963)	直径3測線	15.9mm	孔軸と垂直な平面内の応力状態
	Crouch and Fairhurst(1967)	直径4測線	57.2mm	孔軸と垂直な平面内の応力状態
	Royea(1969)	直径6測線	29.5mm	孔軸と垂直な平面内の応力状態
	Kovari,Amstad and Grob(1972)	直径6測線、軸方向3測線	56mm	完全な応力状態
	Bonnechere and Cornet(1977)	直径4測線、軸方向3測線	76mm	完全な応力状態
	Pahl(1977)	直径4測線	46mm	孔軸と垂直な平面内の応力状態
	Kanagawa et al.(1986)	直径4測線、斜め4測線	48mm	完全な応力状態
(c)平面孔底に設置したゲージのオーバーコアリング	Thompson(1990),DBDG	直径3測線?	38mm	孔軸と垂直な平面内の応力状態
	Leeman(1964),CSIR ドアストッパー	ひずみゲージ3枚 (4枚)	60mm	孔軸と垂直な平面内の応力状態
	Oka et al.(1975),平面孔底ひずみ法	ひずみゲージ8枚	76mm	完全な応力状態
	Thompson, Corthesy and Leite(1997), DDGS	ひずみゲージ4枚	101mm	孔軸と垂直な平面内の応力状態
(d)CSIR タイプの3軸ひずみセルのオーバーコアリング	Leeman and Hayes(1966),CSIR 3軸ひずみセル	ひずみゲージ9枚	38mm	完全な応力状態
	Van Heerden(1976)	ひずみゲージ12枚	38mm	完全な応力状態
	Mills and Pender(1986),ANZSI セル	ひずみゲージ9枚	38mm	完全な応力状態
	Hiltscher, Martna and Strindell,(1997),SSPB セル	ひずみゲージ9枚	38mm	完全な応力状態
(e)ボアホール孔底に設置する3軸セルのオーバーコアリング	Sugawara et al.(1985),球面孔底ひずみ法	ひずみゲージ16枚	76mm	完全な応力状態
	Kobayashi et al(1991),円錐孔底ひずみ法	ひずみゲージ16枚 (24枚)	76mm	完全な応力状態
(f)インクルージョンタイプゲージのオーバーコアリング	Rocha et al.(1974),LNEC ゲージ	ひずみゲージ9枚	38mm	完全な応力状態
	Worotnicki and Walton(1976),CSIRO HI セル	ひずみゲージ9枚	38mm	完全な応力状態

USBM : U.S. Bureau of Mine, DBDG : Deep Borehole Deformation Gage, DDGS : Deep Doorstopper Gauge System, CSIR : Council for Scientific and Industrial Research  
 SSPB : Swedish State Power Board, CSIRO HI : Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Hollow Inclusion

### 3. 1 オーバーコアリングによる応力解放法の一般的な測定手順

ボアホールオーバーコアリングによる応力解放の手順は図 3. 1 に示す通りである。

- (1) まず、初期応力を測定しようとする岩盤まで大口径ボーリング（直径 60 から 220mm）をおこなう。このとき、空洞あるいは地表から十分に離れた距離までボーリングをおこない、これらの自由面が測定値に影響をおよぼさないようにする。地下空洞で測定するときは、少なくとも空洞幅の 1.5 から 2.5 倍の距離まで大口径ボアホールをボーリングする。大口径ボアホールの直径は試験をおこなう国によって大きく異なる。アメリカ、カナダおよびイギリスでは、直径 150mm のボアホールが好んで使用されるようである。スウェーデンおよびノルウェーでは直径 76 あるいは 88mm のボアホールがよく使われる。カナダ盾状地では直径 96mm のボアホールが用いられることも多い。日本では 220mm という大きな直径のオーバーコアリングがおこなわれることもある。オーバーコアの直径が大きければ軟岩であってもオーバーコアリングの途中でコアが折損しにくい。またオーバーコアリングにともなって発生する熱が測定値におよぼす影響はきわめて小さい。そして、岩盤の不均質性が測定結果におよぼす影響は相対的に小さくなる。いっぽう、オーバーコアの直径が小さいと、同じ費用でより多くの測定がおこなえるというメリットがある。
- (2) 次に（通常 EW あるいは 38mm。ときにはもっと大きい）小口径パイロットボアホールを大口径ボアホールの底にボーリングする。図 3. 1b 参照。小口径と大口径ボアホールはできるだけ孔軸を一致させなければならない。このため、大口径ボアホールの底部を平坦に整形することがよくおこなわれる。パイロットホールのコアは、岩質のチェックおよび装置の設置位置を決定するのに利用される。また、岩盤の弾性係数を決定するための室内試験にも利用できる。パイロットホールは、その底部が測定値におよぼす影響および大口径ボアホールによって引き起こされる応力の擾乱が無視できるほど十分に長くなければならない。パイロットホールの長さは通常 300 から 500mm である。次に測定装置をパイロットホールに設置する。この装置は微小なひずみあるいは変位を測定できるものでなければならない。ドアストップタイプの装置では、大口径ボアホールの底面にセルを設置する。この場合、パイロットホールは不要であるが、ボアホール底面を注意深く整形する必要がある。
- (3) 最後に大口径ボーリングが再開され、岩石の中空円筒内部の応力およびひずみを部分的あるいは完全に解放する。図 3. 1c 参照。オーバーコアリングの先端がすすむあいだ、ひずみあるいは変位の微小変化が測定される。ただし、測定値を連続して観測できるかどうかは測定システムによって異なる。オーバーコアリングに引き続き、岩石の弾性特性を決定するために測定装置が設置されたままのオーバーコアを回収し、それを封圧装置によって 2 軸載荷することが

よくおこなわれる。オーバーコアの軸方向に载荷することによっても弾性特性が決定できる。パイロットホールから得られたコア試験片を 1 軸圧縮試験することもある。応力測定をおこなった地点の近傍から採取したコア試験片を用いて室内試験をおこなう方法もあるが、このようにして調整された試験片はオーバーコアリングによって応力解放された岩石と特性が異なる場合があるのであまり好ましくない。

次の節では、完全な 3 次元の初期応力状態が決定できる CSIR 3 軸ひずみセルについて概観する。このタイプのセルは水で満たされた大深度のボアホールに適用されている。

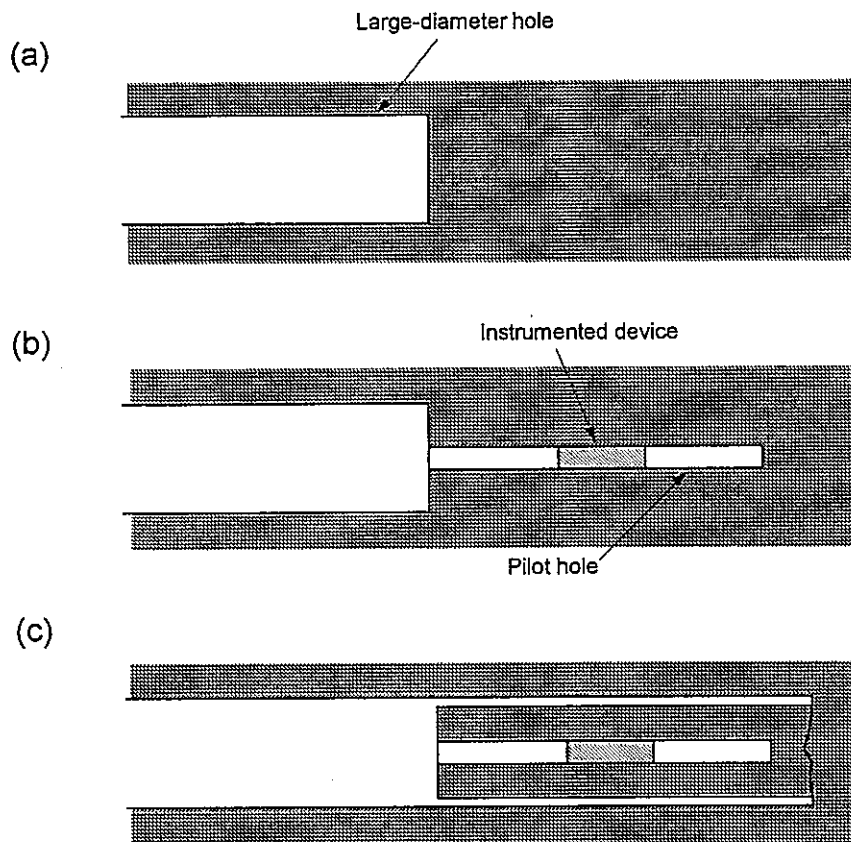


図 3. 1 ボアホールオーバーコアリングによる応力解放の手順。

### 3. 2 CSIR3 軸ひずみセル

Leeman and Hayes が 1966 年に CSIR セルを発表してから、このセルのひずみゲージの数と配置に改良が加えられた。図 3. 2 はこのセルの鳥瞰図である。ボディーの材質はナイロンで、4 軸ひずみロゼットが  $120^\circ$  間隔に 3 枚配置されている。ロゼットの位置と形状は図 3. 3a および図 3. 3b のようである。12 枚のゲージのうち 3 枚はボアホール軸に平行で、3 枚は接線方向に配置されている。各ひずみゲージの長さは 10mm である。測定用のゲージに加えて、温度補償用のダミーゲージがセルの前面に配置されている。このセルは EX (38mm) のボアホールに設置される。オーバーコアリングは通常、直径 90mm (あるいはこれ以上の大きさ) のビットでおこなう。

標準的な CSIR3 軸セルを用いると、ひずみはオーバーコアリングの前後におこなわれるので連続測定はできないが、連続測定がおこなえるように改造されたセルも開発されている。ひずみの連続測定をおこなうとオーバーコアリング中のひずみゲージの剥離を検知することができる。改造した CSIR セルでは、温度補償のダミーゲージのかわりにサーミスターが用いられ、オーバーコアリング中のセルと岩盤のインターフェイスにおける温度が測定される。

EX パイロットホールの壁面は清浄であって、水分があってはならない。またオーバーコアの長さは少なくとも 500mm なければならない。ボアホール壁面の乾燥の程度および温度に応じていろいろなゲージセメントを使用する。理想的な状況では、1 日 2 回の測定ができるといわれている。

CSIR 3 軸セルを用いたオーバーコアリングは、通常、自由面から 30~50m までの範囲でおこなわれる。ボアホール壁面の水はゲージ接着の障害になるので、ボアホールはわずかに上向きにボーリングする。Martna and Strindell(1979) は Hiltcher の CSIR セルを改造して、水で満たされた深度 500m までの鉛直ボアホールで試験をおこなってきた。最近では、1000m の深度まで試験をおこなっている。

CSIR セルの大きな長所は、1 本のボアホールにおける 1 回のオーバーコアリングから完全な初期応力場を決定できることである。測定値が 12 得られて未知数の数が 6 つであるから、最小 2 乗法によって応力成分が決定できる。

岩石のヤング率とポアソン比は CSIR セルが接着された状態のオーバーコアを 2 軸載荷して決定する。これらの弾性特性値はオーバーコアを軸方向に載荷するか、あるいは EX コアの試験片を 1 軸載荷して決定することもできる。

CSIR セルの欠点は、(1) セルを設置するためにパイロットホールの壁面を清浄する必要がある、(2) 標準的な CSIR セルでは、オーバーコアリング中のひずみゲージのモニタリングができない、(3) セルは再利用できない、(4) ゲージはホイートストンブリッジの 1 辺にのみ取り付けられている、(5) ボアホールの状態および使用する接着剤によって接着剤が硬化するまでの時間は 1 から 10 時間あるいは 20 時間である、そして、(6) 長いオーバーコアが必要であり、これは軟岩あるいは弱面を含む岩盤および大きな応力を受けて

ディスクングが発生する岩盤では採取するのがむずかしい。

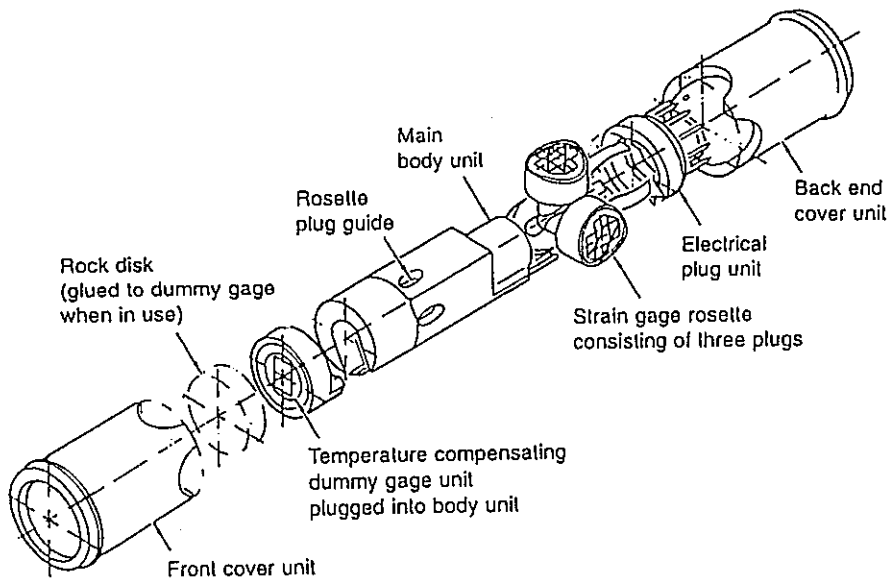


図 3. 2 CSIR セルの鳥瞰図。

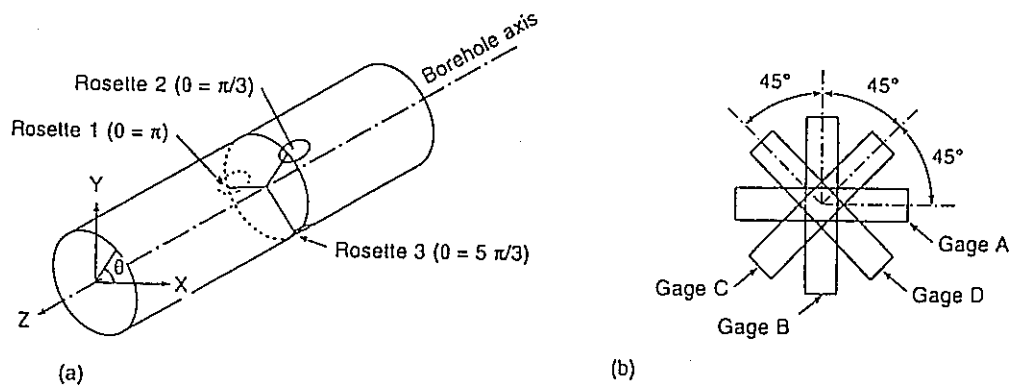


図 3. 3 (a) CSIR セルのひずみロゼットの位置および(b)ひずみゲージの配置。



### 3. 3 2軸載荷試験

オーバーコアリングが終わると、CSIR3 軸ひずみセル、USBM ゲージあるいは CSIRO HI セルを含んだオーバーコアを 2 軸載荷試験装置によって載荷する。2 軸試験の主要な目的は岩盤の変形特性、特に除荷における変形特性を決定することである。岩石の鉱物粒子の寸法、異方性、不均質性およびボアホールの孔軸のずれが測定結果におよぼす影響を評価することもできる。岩石の載荷および除荷サイクルに対する応答をチェックし、原位置で予測される応力の範囲内で岩石を線形弾性体として扱うことができるかどうかを判断するのに利用できる。オーバーコアのひずみあるいは変位を観測することは岩石のクリープの大きさを知るうえでも役に立つ。

CSIR および CSIRO HI セルの場合、セルを含むオーバーコアを切断してセルと岩石の接着状態をチェックすることができる。これによって、(1)接着が不完全なひずみゲージを判別することができる。(2)セルのまわりの接着剤の硬さと厚さをチェックできる。(3)ひずみゲージの方向を実際にチェックできる。そして、(4)パイロットホールの寸法をチェックできる。軟岩ではオーバーサイズになる場合がある。

2 軸セルは図 3. 4 に示すように円筒形の鋼製ジャケット、ゴム製のスリーブおよびシールから構成されている。オーバーコアを 2 軸セルの中にセットして、ジャケットと岩石の間の空間にハンドポンプでオイルを送る。これによって、ひずみあるいは変位を観測しながらオーバーコアの外周に均様な 2 軸圧力を作用させることができる。ゴムスリーブは、岩石内部の空隙あるいはクラックにオイルが浸透することを防ぐ働きがある。通常、2 軸セルの耐圧は 30~40MPa である。最新のセルは直径の異なるコアにも対応することができて、直径 40 から 150mm の範囲のオーバーコアで試験ができる。

2 軸載荷試験においては、オーバーコアに載荷/除荷のサイクルを何度か繰り返す。このとき測定されるひずみあるいは変位から、外周に軸対称圧力を受ける中空円筒の内面におけるひずみおよび変位の弾性解を用いてオーバーコアの弾性特性を決定する。

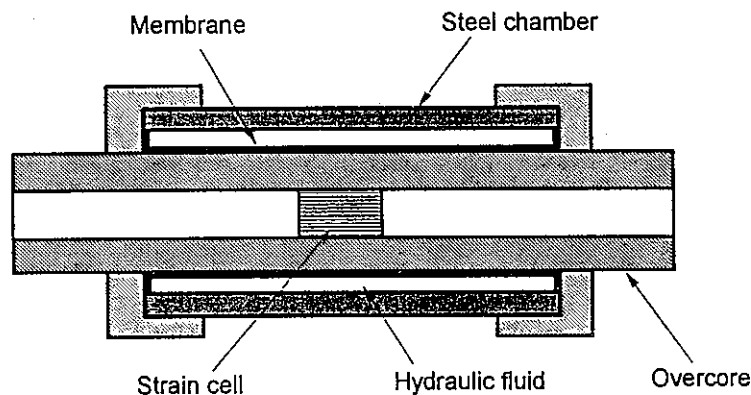


図 3. 4 2軸載荷試験装置。

### 3. 4 測定データの解析方法

この節では CSIR タイプの 3 軸ひずみセルで得られる測定結果を解析するための理論と、2 軸載荷試験の結果から岩石の弾性特性を決定するための理論について説明する。

#### 3. 4. 1 解析の前提として導入される仮定

ボアホール内部におけるオーバーコアリングによって測定された結果を解析するとき、次のような仮定が導入される。

(1)オーバーコアリングによって解放される応力は、岩石がコアリングされる前の環境にあったときの応力に等しい。

図 3. 1 に示した一般的な測定方法をみると、オーバーコアリングの過程は、コア表面に作用していた岩盤内部の初期応力成分をキャンセルすることであるとみなすことができる。したがって、オーバーコアリングとは、ボーリングされる以前のオーバーコアの表面に存在していた応力と大きさが等しく符号が逆であるような表面応力を加えることと等価である。

(2)オーバーコアの直径の大きさは測定結果に影響をおよぼさない。

オーバーコアリング中に発生する変位とひずみの解析方法は、パイロットホールに設置される装置によって異なる。もしも岩盤と接触する装置がオーバーコアリング中の岩石の変形を妨げないならば、コアリングが終了した段階でオーバーコアは無応力状態になる（完全解放）。このことはオーバーコアの寸法および形状と無関係に成立する。オーバーコアリングは、初期応力ばかりでなくパイロットホールおよび大口径ホールをボーリングすることによって導入されるひずみ、変位および応力も解放する。応力の解放をまったく妨げない装置には、USBM ゲージ、CSIR ドアストッパー、CSIR 3 軸ひずみセルおよび他の CSIR タイプの 3 軸セルなどが含まれる。

いっぽう、設置される装置が岩石の変形に影響をおよぼすタイプの場合、岩盤に接着された介在物の存在によって介在物と岩石の両方に残留応力および残留ひずみが発生するので、オーバーコアリングによって全応力の解放はおこなわれない（部分解放）。中実および中空インクルージョンプローブの場合がこれにあてはまる。応力が部分的にしか解放されないということは、オーバーコアリングの直径がインクルージョンプローブ内部の応力とひずみの分布に影響をおよぼすことを意味する。したがって、オーバーコアリングによって誘起されたひずみおよび変位を解析するときはオーバーコアリングの直径を考慮しなければならない。

(3) 岩石の応答は弾性的であってその弾性特性は載荷および除荷時において等しい。

オーバーコアリング中のひずみと変位は、短期（オーバーコアリングから 2 時間以内）および長期（2 時間以降に発生）のものに分類できる。それぞれのひずみと変位は、さらに残留応力の解放によるものと重力および／あるいはテクトニックな応力の解放によるものとに分類できる。一般に、標準的なオーバーコアリング法は、重力による応力

およびテクニクな応力など、現在の応力の解放による短期的な（弾性的な）ひずみを測定する。ダブルオーバーコアリング（オーバーコアのオーバーコアリング）によって短期的な残留応力の解放をおこなうことができる。長期間にわたる残留ひずみの解放は、長時間にわたるオーバーコアのひずみ測定をおこなうことで観測できる。

(4) 岩盤は連続かつ均質である。

初期応力を測定しようとする岩盤を連続かつ均質であると判断できるかどうかは、地質構造および岩盤の不均質性の寸法が、パイロットホールの寸法と比較して相対的どの程度であるかによって決まる。

(5) パイロットホールの断面は円形であってその表面は滑らかである。

測定装置を設置するためにパイロットホールのボーリングをおこなうと、ボアホールの偏芯は避けることができない。さらに、ボーリングのときに岩片が剥離することがあるのでボアホールの表面は常に滑らかであるとは限らない。これは岩盤のタイプ、岩石組織およびボアホールの方向と岩石組織の方向性に関係している。

(6) 岩盤は平面ひずみあるいは平面応力状態で変形する。

ひずみおよび変位を初期応力と関係づけるために平面ひずみ（あるいは一般化された平面ひずみ）が仮定される。これは USBM ゲージ、CSIR および CSIR タイプの 3 軸ひずみセルそして CSIRO HI セルに適用される。平面ひずみ状態を実現するために、パイロットホール底部から十分に離れた断面において測定をおこない、端部の影響（end effects）を避ける必要がある。一般に、パイロットホールの先端からパイロットホールの直径の少なくとも 3 から 4 倍の距離だけ離れた位置に測定点があれば平面ひずみ状態が実現できる。したがって、直径 38mm のパイロットホールの場合、その先端から測定位置までの距離は少なくとも 114 から 152mm 必要である。このことはまたオーバーコアの長さが少なくとも 300mm なければならないことを意味する。CSIR ドアストッパーで測定したデータを解析するときは、平面ひずみ状態が仮定される。

(7) 初期応力場は 3 次元である。

岩盤は 3 次元応力状態にあつて、パイロットホールに設けた  $x$ 、 $y$ 、 $z$  座標系における初期応力成分を  $\sigma_{x_0}$ 、 $\sigma_{y_0}$ 、 $\sigma_{z_0}$ 、 $\tau_{yz_0}$ 、 $\tau_{xz_0}$ 、 $\tau_{xy_0}$  で定義する。 $[\sigma_0]$ を次のような応力マトリクスとする。

$$[\sigma_0]^t = [\sigma_{x_0}, \sigma_{y_0}, \sigma_{z_0}, \tau_{yz_0}, \tau_{xz_0}, \tau_{xy_0}] \quad (3.1)$$

$x$ 、 $y$ 、 $z$  座標系に対して傾いている  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  全体座標系では、初期応力成分は  $\sigma_{X_0}$ 、 $\sigma_{Y_0}$ 、 $\sigma_{Z_0}$ 、 $\tau_{YZ_0}$ 、 $\tau_{XZ_0}$ 、 $\tau_{XY_0}$  であり、 $[\sigma_0]_{XYZ}$  と  $[\sigma_0]$  は次式で関係づけられる。

$$[\sigma_0] = [T_0] [\sigma_0]_{XYZ} \quad (3.2)$$

ここで、 $[T_0]$  は  $(6 \times 6)$  の応力変換マトリクスである。このマトリクスの成分は  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  全体座標系に関する  $x$ 、 $y$ 、 $z$  軸の方向余弦によって決まる。たとえば図 3.5 に示すような 2 つの角度  $\beta_h$  と  $\delta_h$  でその方向が定義されるパイロットホールの場合、 $x$ 、 $y$ 、 $z$  軸の方向余弦は次のように表される。

$$\begin{aligned}
l_x &= \sin \beta_h & m_x &= 0 & n_x &= -\cos \beta_h \\
l_y &= -\sin \delta_h \cos \beta_h & m_y &= \cos \delta_h & n_y &= -\sin \delta_h \sin \beta_h \\
l_z &= \cos \delta_h \cos \beta_h & m_z &= \sin \delta_h & n_z &= \cos \delta_h \sin \beta_h
\end{aligned} \tag{3.3}$$

### 3. 4. 2 CSIRタイプの3軸ひずみセルによって測定されたひずみの解析

オリジナルのCSIR 3軸ひずみセルあるいはその改良バージョンによって得られる測定値を解析するには、パイロットホールの壁面において測定されたひずみを初期応力の6成分と関係づけなければならない。ここで述べる一般解は、直交異方性、横等方性および等方性岩盤において測定されたひずみの解析に適用できる。岩石の弾性主軸に対するボアホールの方向は任意である。

連続かつ均質で無限に広がる線形弾性異方性岩盤のつりあいを考える。全体座標系  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  のうち、 $X$  および  $Z$  軸はそれぞれ北と西を向いているものとする。 $Y$  軸は上向きが正である。岩盤の内部には半径  $a$  の円形断面を有する円筒の境界があつて、これはパイロットホールを表している。ボアホールの方向と弾性主軸の関係を図3. 5a のように定義する。ここで、 $x$ 、 $y$ 、 $z$  はボアホールの座標系であり、 $z$  軸はボアホール軸と一致する。 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  全体座標系に関するボアホールの方向および  $x$ 、 $y$ 、 $z$  軸の方向は、2つの角度  $\beta_h$  (ボアホールの方位) および  $\delta_h$  (ボアホールの仰角) によって定義される。ただし、 $x$  軸は  $X$ 、 $Z$  平面に含まれる (図3. 5b)。単位ベクトルの  $x$ 、 $y$  および  $z$  方向の方向余弦  $l$ 、 $m$  および  $n$  は式 (3.3) のようである。

岩盤は直交異方性を有していて、岩盤の弾性主軸は  $n$ 、 $s$ 、 $t$  座標系と一致する (図3. 5a 参照)。 $n$  軸はひとつの弾性対称面に垂直、 $t$  軸は水平そして  $s$  軸および  $t$  軸はこの対称面に含まれる。 $n$ 、 $s$ 、 $t$  座標系の  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  全体座標系に関する方向は、傾斜方向を表す角度  $\beta_a$  および傾斜角  $\phi_a$  で定義される (図3. 5c)。 $n$ 、 $s$ 、 $t$  (1、2、3) 方向における単位ベクトルの方向余弦  $l$ 、 $m$  および  $n$  は次式のようなものである。

$$\begin{aligned}
l_1 &= \cos \beta_a \sin \phi_a & m_1 &= \cos \phi_a & n_1 &= \sin \beta_a \sin \phi_a \\
l_2 &= -\cos \beta_a \cos \phi_a & m_2 &= \sin \phi_a & n_2 &= -\sin \beta_a \cos \phi_a \\
l_3 &= -\sin \beta_a & m_3 &= 0 & n_3 &= \cos \beta_a
\end{aligned} \tag{3.4}$$

この岩盤の  $n$ 、 $s$ 、 $t$  座標系における構成方程式は次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \\ \varepsilon_t \\ \gamma_{st} \\ \gamma_{nt} \\ \gamma_{ns} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_n & -\nu_{sn}/E_s & -\nu_{tn}/E_t & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{ns}/E_n & 1/E_s & -\nu_{ts}/E_t & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{nt}/E_n & -\nu_{st}/E_s & 1/E_t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{st} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{nt} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{ns} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \sigma_n \\ \sigma_s \\ \sigma_t \\ \tau_{st} \\ \tau_{nt} \\ \tau_{ns} \end{bmatrix} \tag{3.5}$$

より簡潔にマトリクスで表示すると次式のようなものである。

$$[\varepsilon]_{nst}=[H][\sigma]_{nst} \quad (3.6)$$

式(3.5)から明らかなように、 $n$ 、 $s$ 、 $t$ 座標系における岩盤の変形特性を表現するためには9つの独立した弾性定数が必要である。 $E_n$ 、 $E_s$ および $E_t$ は、それぞれ $n$ 、 $s$ および $t$ 方向のヤング率である。 $G_{ns}$ 、 $G_{nt}$ および $G_{st}$ は、それぞれ $ns$ 、 $nt$ および $st$ 平面と平行な平面における剛性率である。 $\nu_{ij}$  ( $i,j=n,s,t$ )は、弾性対称軸 $i$ の方向に応力を加えたときの弾性対称軸 $j$ の軸ひずみの特徴づけるポアソン比である。コンプライアンスマトリクス $[H]$ は対称なので、ポアソン比 $\nu_{ij}$ と $\nu_{ji}$ の間には $\nu_{ij}/E_i=\nu_{ji}/E_j$ の関係が成り立つ。式(3.5)および(3.6)は横等方性および等方性岩盤にも適用できる。

ここで解析する初期応力状態はパイロットホールに設けられた $x$ 、 $y$ 、 $z$ 座標系のマトリクス $[\sigma_0]$ と $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 全体座標系のマトリクス $[\sigma_0]_{XYZ}$ とによって定義される。

$r$ 、 $\theta$ 、 $z$ をパイロットホールの円筒座標系とする。この系のひずみ成分は $x$ 、 $y$ 、 $z$ 座標系のひずみ成分と次式のようにして関係づけることができる：

$$[\varepsilon]_{r\theta z}=[T_{r\theta z}][\varepsilon]_{xyz} \quad (3.7)$$

ここで、 $[\varepsilon]_{xyz}^t=[\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}, \gamma_{xy}]$ 、 $[\varepsilon]_{r\theta z}^t=[\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z, \gamma_{\theta z}, \gamma_{rz}, \gamma_{r\theta}]$ そして $[T_{r\theta z}]$ は(6×6)のひずみに関する座標変換マトリクスである。次に図3.6に示すようなCSIRタイプの3軸ひずみセルを考える。各ひずみゲージ $i$  ( $i=1, M$ )の中心は $x$ 軸から $\theta_i$  (あるいは $y$ 軸から $\alpha_i$ )の角度に位置し、ゲージの長軸は $z$ 軸に対して $\phi_i$ だけ傾いている(図3.6)。そうすると、軸ひずみ $\varepsilon_{1i}$ は局所ひずみ成分 $\varepsilon_\theta$ 、 $\varepsilon_z$ および $\gamma_{\theta z}$ と次式のように関係づけることができる。

$$\varepsilon_{1i}=[0 \quad \sin^2 \phi_i \quad \cos^2 \phi_i \quad \cos \phi_i \sin \phi_i \quad 0 \quad 0][\varepsilon]_{r\theta z} \quad (3.8)$$

さらに、ボアホールのコンターにそった点 $P(a, \theta)$ における応力場は次式によって初期応力場と関係づけられる：

$$[\sigma]_{xyz}=[F][\sigma_0] \quad (3.9)$$

ここで、 $[F]$ は(6×6)のマトリクスであって、その成分は $n$ 、 $s$ 、 $t$ 座標系における岩盤の弾性特性、図3.5bおよび図3.5cで定義される4つの方位角 $\beta_h$ 、 $\delta_h$ 、 $\beta_a$ 、 $\phi_a$ および角度 $\theta$ によって決まる。マトリクス $[F]$ の係数は等方性および異方性岩盤について求められている。

式(3.7)、(3.8)、(3.9)および(3.2)から、ひずみゲージ $i$ における軸ひずみは、 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 座標系における初期応力成分の線形結合として表すことができ次式のようなものである。

$$\varepsilon_{1i}=[0 \quad \sin^2 \phi_i \quad \cos^2 \phi_i \quad \cos \phi_i \sin \phi_i \quad 0 \quad 0][T_{r\theta z}][A][F][T_\sigma][\sigma_0]_{XYZ} \quad (3.10)$$

ここで、 $[A]$ は(6×6)の対称マトリクスであって、その成分は $n$ 、 $s$ 、 $t$ 座標系における岩盤の弾性特性、図3.5bおよび図3.5cで定義される4つの方位角 $\beta_h$ 、 $\delta_h$ 、 $\beta_a$ および $\phi_a$ によって決まる。オーバーコアリングのときCSIRタイプのセルによって記録されるひずみは、無応力の岩盤にボーリングしたパイロットホールから十分離れたところに初期応力を作用させたときに生じるひずみと大きさが等しく符号は逆であると仮定する。

したがって、式(3.10)の  $\varepsilon_{1i}$  を  $-\varepsilon_{1i}$  と置き換えれば測定されるひずみを初期応力場の応力成分と関係づけることができる。

式(3.10)は、CSIR タイプの3軸セルを用いたオーバーコアリングの測定結果を解析するときの基本的な方程式であって、異方性岩盤あるいは等方性岩盤に適用できる。ただし、この式はひずみゲージの長さを考慮していない。式(3.10)は、各ひずみゲージが初期応力場の6つの応力成分の線形関数であることを示している。したがって、これらの応力成分を決定するために、6つの独立したひずみ測定値から6本の独立した連立方程式を組み立てなければならない。測定値が6つ以上あれば最小2乗法によって各応力成分の最確値を求めることができる。 $N$  ( $N \geq 6$ ) をひずみゲージの数とすると、 $N$  枚のひずみゲージのそれぞれについて式(3.10) が得られる。これから次式のような6つの未知数をもつ  $N$  本の連立方程式が導かれる：

$$[E] = [T_e] [\sigma]_{XYZ} \quad (3.11)$$

ここで、 $[E]$  および  $[T_e]$  はそれぞれ  $(N \times 1)$  および  $(N \times 6)$  マトリクスである。式(3.11)の最小2乗解は次の6元一次方程式の解として求められる：

$$[T_e]^t [T_e] [\sigma]_{XYZ} = [T_e]^t [E] \quad (3.12)$$

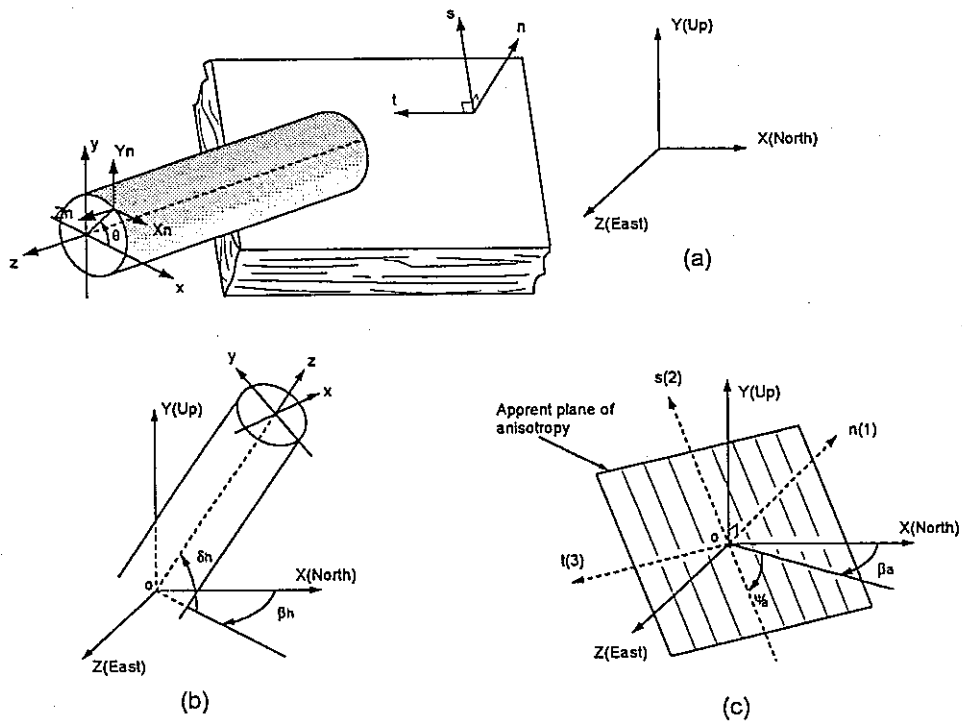


図3. 5 (a)ボアホールと弾性対称軸の関係、(b)ボアホール座標系および (c)弾性対称軸の座標系。

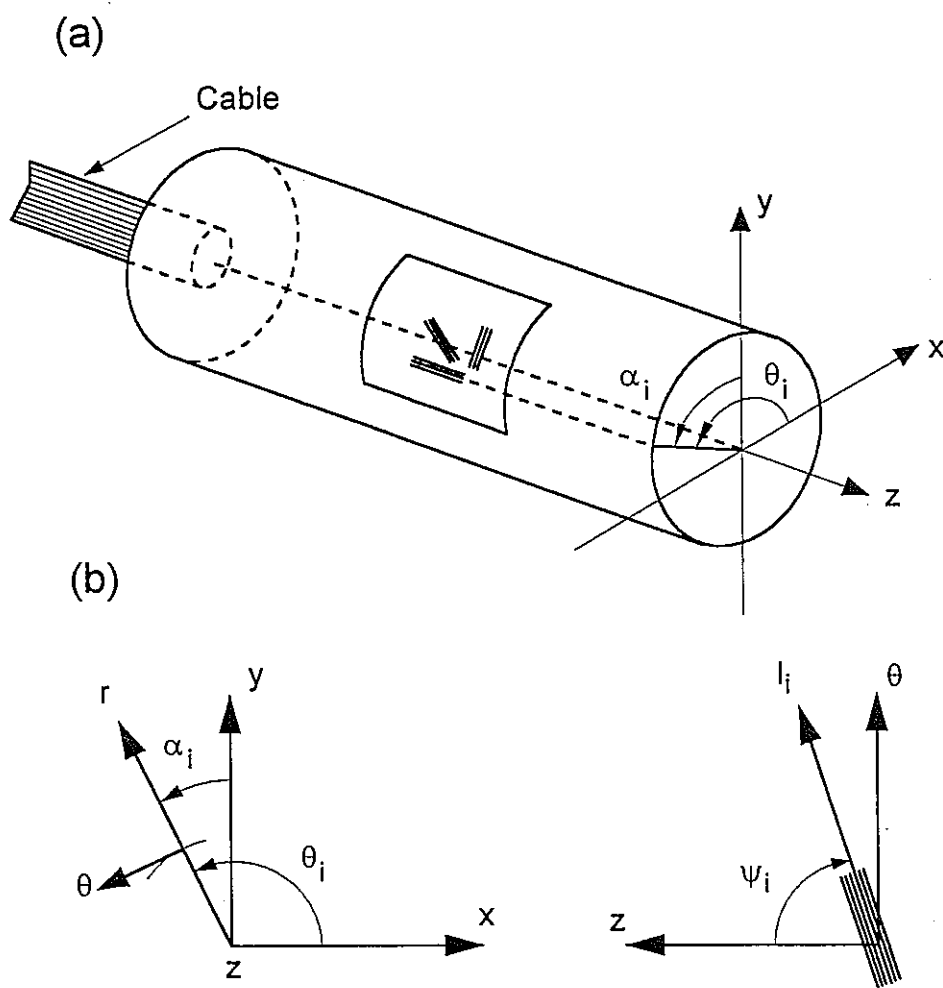


図 3. 6 (a)CSIR タイプの 3 軸セルおよび(b)ひずみゲージの方向。

### 3. 4. 3 オーバーコアの弾性特性の測定

オーバーコアに2軸載荷したとき、岩石が線形弾性挙動を示すならば（すなわち応答曲線が線形ならば）、軸対称の周圧を受ける中空円筒の内面におけるひずみと変位に関する弾性解から岩石の弾性特性を決定することができる。ほとんどの弾性解は等方弾性体を仮定している。CSIR 3軸ひずみセルあるいは CSIR タイプのセルを含むオーバーコアを2軸載荷すると、各ひずみロゼットにおいて測定されたひずみからヤング率  $E$  とポアソン比  $\nu$  が決定できる。内径および外径がそれぞれ  $d$  および  $D$  のオーバーコアの外部表面に封圧  $p$  をかけたとき、ロゼット  $i$  ( $i=1,2,3$ ) において測定される接線および軸ひずみを  $\epsilon_{\theta i}$  および  $\epsilon_{zi}$  とすると、ロゼット  $i$  における  $E$  および  $\nu$  は次式で表される。

$$E = 2p / \epsilon_{\theta i} \cdot D^2 / (D^2 - d^2); \quad \nu = -\epsilon_{zi} / \epsilon_{\theta i} \quad (3.13)$$

ただし、コアは線形等方弾性体と仮定する。各ひずみロゼットについて弾性特性を決定し、それら3組の結果を平均して岩石の平均的なヤング率とポアソン比を求めることが一般におこなわれる。

2軸載荷のときに得られる3組のヤング率とポアソン比のちがいがから岩石の異方性を定性的に評価できる。岩石が等方性を有していれば、同じ方向を向いたひずみゲージで測定されたひずみの大きさは等しくなければならない。さらに、コア軸に対して  $45^\circ$  の角度で測定されたひずみ  $\epsilon_{45}$  と円周方向のひずみ  $\epsilon_{cir}$  および軸方向のひずみ  $\epsilon_{ax}$  との間に次式が成り立つ：

$$\epsilon_{45} = 0.5 (\epsilon_{ax} + \epsilon_{cir}) \quad (3.14)$$

すなわち、 $\pm 45^\circ$  傾いたひずみゲージで測定されたひずみ  $\epsilon_{45}$  は、軸方向および接線方向のひずみを平均した値と等しくなる。もしも岩石に異方性がある場合は、接線および軸方向のひずみはロゼットごとに異なる。しかも2軸載荷によって  $\pm 0.5 \nu_{\theta z}$  に等しいせん断ひずみが生じて、これが式(3.14)の右辺に加わる。

2軸載荷のときのひずみ-圧力曲線あるいは変位-圧力曲線を吟味することによってもオーバーコア試料の異方性を推定することができる。オーバーコアが等方性を有していれば、同じ方向を向いたひずみゲージの応答曲線はひとつにまとまらねばならない。さらに、理想的な等方性岩石であれば式(3.14)が成り立つから、 $\pm 45^\circ$  に傾斜したひずみゲージの応答曲線は軸方向および円周方向の応答曲線に挟まれる角度を2等分する。しかし実際には岩石が等方的であってもこれらが厳密に満足されることはほとんどない。その理由はゲージの剥離およびゲージの方向の微妙なちがいが測定誤差の原因になりうるからである。



#### 4. 海外における大深度オーバーコアリングシステム

第3章で述べたように、水で満たされた 1000m までのボアホールで試験ができるように設計されている測定システムは DBDG (Deep Borehole Deformation Gage)、DDGS(Deep Doorstopper Gauge System) および SSPB(Swedish State Power Board)セルである。このうち 1 回のオーバーコアリングによって完全な 3 次元初期応力が決定できるのは、CSIR 3 軸ひずみセルを改良した SSPB セルだけである。この章では、大深度オーバーコアリングシステムの開発に資するための基礎データを得ることを目的として SSPB セルを用いたオーバーコアリングを概観する。DDGS は用いるひずみセルがドアストップタイプなので完全な 3 次元初期応力を決定することはできないが、その測定システムを概観することは新たに大深度オーバーコアリングのシステムを開発するうえで参考になるので、このシステムについても述べる。

##### 4. 1 SSPB(Swedish State Power Board)セル (1976~1988) <sup>[3]</sup>

1976 年、SSPB(Swedish State Power Board)は、水で満たされた大深度の鉛直なボアホールにおいてオーバーコアリングによる 3 次元初期応力測定をおこなうために、CSIR タイプの 3 軸ひずみセルを採用したプローブを開発し、1988 年までに約 550 回の測定をおこなっている。

測定用のプローブは、図 4. 1 に示すように電子ユニット、方位測定装置およびゲージアッセンブリーから構成される。プローブは 12 芯のアーマードケーブルに接続されている。ひずみゲージは、先端にある接着剤で満たされたポットの中に浸されているので、プローブが孔底に達するまで水と接触しない。プローブ先端のピンが大口径ボアホールの孔底に接触するとプローブ内の重錘が落下し、その重さによってコーンが孔底に向かって押し出される。このとき接着剤のポットはパイロットホールの孔底に落下し、ひずみゲージはコーンによってボアホールの壁面に押し付けられる。

図 4. 2 は SSPB セルのひずみゲージアッセンブリーであって、CSIR タイプの 3 軸ひずみセルを使用する。円周方向に 120° 間隔で配置されたプラスチック製の板の上にひずみロゼットが取り付けられている。ひずみロゼットは 3 枚のひずみゲージから構成され、1 枚は孔軸方向、もう 1 枚は円周方向に向いている。残りの 1 枚はそれらのゲージと 45° の角度をなす方向に向いている。ゲージ接着剤はアクリルレジン、メタメチルアクリレートモノマー、触媒および結合剤からなる。

SSPB セルによる初期応力の測定手順は図 4. 3 のようである。まず初期応力を測定しようとする深度まで直径 76mm の大口径ボーリングをおこない、ステップ c) で大口径ボアホールの孔軸と一致させて直径 36mm のパイロットボーリングをおこなう。ステップ d) ではパイロットホールのコアを鑑定し、測定箇所岩盤にき裂があるかどうか、岩盤がひずみゲージの接着に適しているかどうかをチェックする。つぎに 12 芯の測定ケーブルに接続したプローブを孔底まで降ろす。ステップ f) でひずみゲージの接着をおこない、接着

剤が硬化した段階で第 1 回目のひずみの読み取りを地表でおこなう。このときのチャンネルの切りかえは、プローブに内蔵された電子ユニットでおこなわれる。接着剤の硬化時間は約 2 時間である。プローブの方位を測定するコンパスのまわりは加熱された液体で満たされていて、接着剤が硬化する間にこの液体が冷却して固化する。したがってプローブの方位が記録される。第 1 回目の測定を終えるとひずみゲージアセンブリーだけを孔底に残して他のプローブを巻きあげる。ステップ h) のオーバーコアリングによって円筒状のオーバーコアの応力が解放され、コアとひずみセルを地表まで回収する。ここで再びひずみの読み取りをおこなう。ステップ f) のときに読み取ったひずみとの差がオーバーコアリングによる応力解放によって生じたひずみである。すなわち、このシステムにおいてはオーバーコアリング中のひずみの連続測定はおこなわない。

回収された円筒状のオーバーコアの外周に、2 軸载荷装置によって静水圧をかけて、各载荷レベルにおけるひずみを読み取る。この試験によってひずみゲージが適切に接着されたかを判定するとともに、岩石のヤング率とポアソン比を決定する。オーバーコアの軸方向に载荷して弾性定数を求めることもできる。

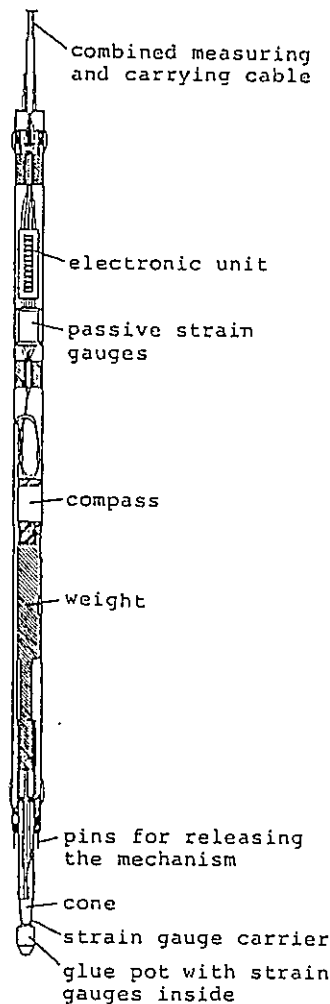


図 4. 1 鉛直ボアホール用の SSPB プローブ。

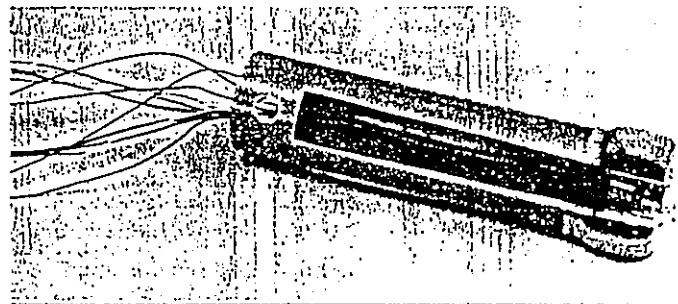


図 4. 2 SSPB セルのひずみゲージアセンブリー。

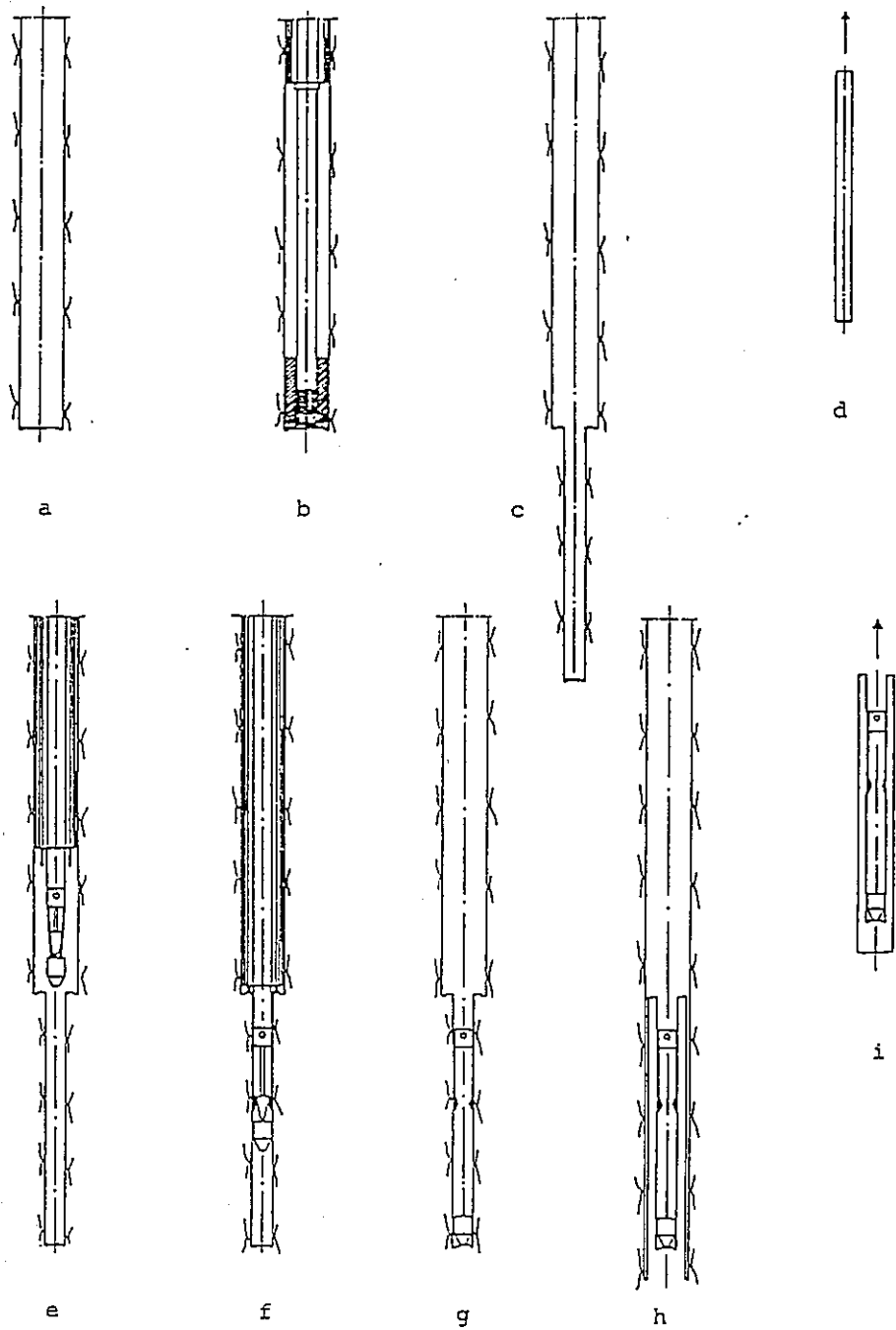


図4. 3 SSBPセルを用いたボアホールオーバーコアリングの手順。a)  $\phi 76\text{mm}$  ボアホール。b)  $\phi 36\text{mm}$  ビットの芯出し。c)  $\phi 36\text{mm}$  パイロットボアホール。d) コアの鑑定。e) プロブの降下。f) コーンによるひずみゲージの接着。第1回目のひずみ測定。g) プロブの巻き上げ。h) オーバーコアリング。i) 第2回目のひずみ測定。

#### 4. 2 SSPB (Swedish State Power Board) セル (1990 年代) <sup>[5]</sup>

1970 年代に開発された SSPB セルは、オーバーコアリングをおこなう前にひずみを読み取ってからオーバーコアリングが終了して再びひずみを読み取るまで、少なくとも 0.5 ~ 2 時間以上かかった。このため、温度変化およびクリープが測定結果に影響を及ぼすという問題があった。そこで、1990 年代の初め、オーバーコアリングをおこないながらひずみを孔底で記録するプローブが開発された。

このプローブは "Borre" とよばれ、オーバーコアリング中にひずみと温度を連続的に測定する。図 4. 4 は Borre の外観である。測定を開始する前に Borre のコンピューターにラップトップのパーソナルコンピューターを接続し、測定開始時刻およびサンプリングスピードを入力する。測定されたひずみと温度は記録ユニットにたくわえられる。アーマードケーブルは不要で、Borre だけを孔底にセットした状態でオーバーコアリングをおこなう。オーバーコアリングが終了したら、Borre が設置された円筒状のコアを回収し、パーソナルコンピューターに再び接続する。測定されたデータはコンピューターに転送され、3 次元初期応力が求められる。プローブにはもうひとつのアダプターが接続されていて、その中にプローブの方位を測定するためのコンパスが内蔵されている。このアダプターには、ひずみゲージをパイロットホール の壁面に押し付けるための重錘の役目もある。これまでの SSPB セルと同様に CSIR タイプの 3 軸ひずみセルが採用され、ひずみゲージの数は全部で 9 枚である。このプローブは 110bar の水圧下で正常に作動することが確認されているので、長さ 1100m の鉛直なボアホールでもオーバーコアリングが可能である。Borre を用いたオーバーコアリングの手順は図 4. 5 の通りである。

ひずみゲージをボアホール の壁面に確実に貼付するために、接着剤の選定はきわめて重要である。岩盤の温度が 5~10°C のときは 2 液混合のアクリルレジンを使用し、もっと温度の高い岩盤や接着剤の硬化に一晩かける場合は、2 液混合のエポキシレジンを使用する。セルを設置してからオーバーコアリングを開始するまでの時間は、アクリルレジンの接着剤を用いるときで 2 時間、エポキシレジンのときで 10~15 時間である。

1988 年から 1989 年にかけて、長さ 350m までのボアホールで約 60 回の SSPB セルを用いた初期応力測定がスウェーデンを中心としておこなわれた。1995 年から 1996 年には、フィンランドの高レベル放射性廃棄物の処分に関連した調査において、地表から掘削された長さ 620m のボアホールで初期応力の測定に成功している (C. Ljunggren, personal communication, 1997)。

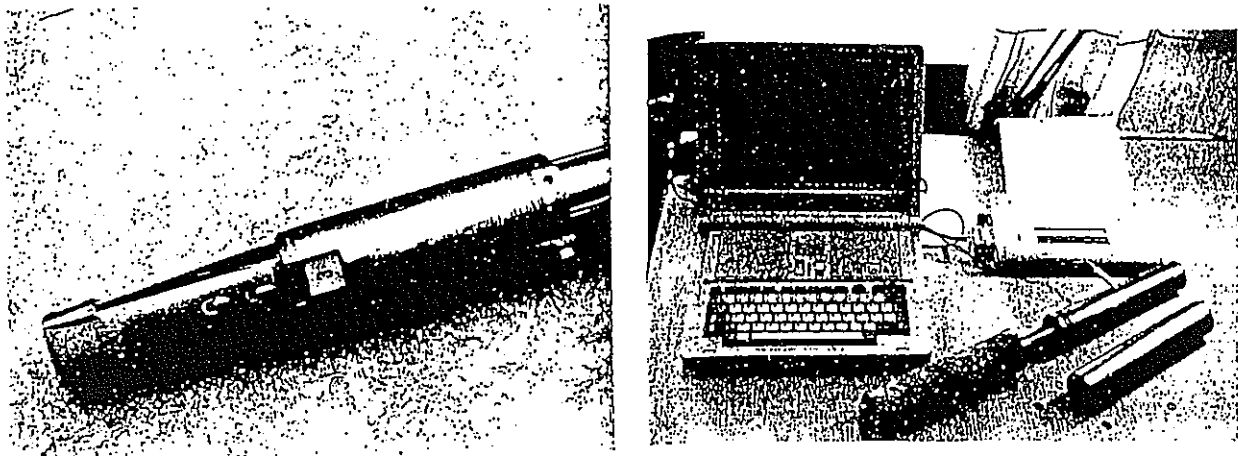


図4. 4 Borre の外観。

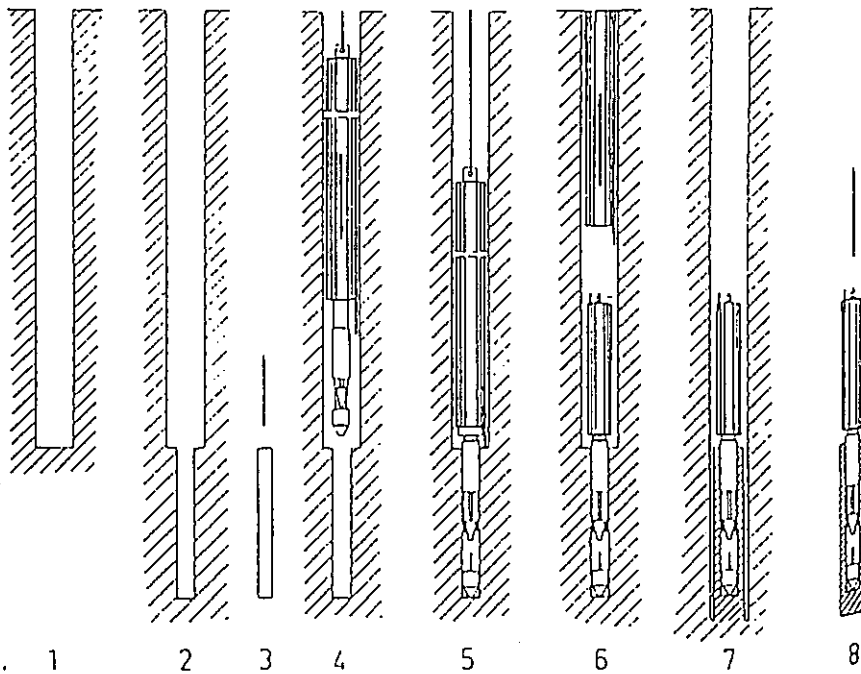


図4. 5 Boore によるボアホールオーバーコアリングの手順。(1)  $\phi 76\text{mm}$  ボアホール。(2)  $\phi 36\text{mm}$  パイロットボアホール。(3) コアの鑑定。(4) プロブの降下。(5) コーンによるひずみゲージの接着。(6) プロブの巻き上げ。(7) オーバーコアリング。(8) 円筒コアの回収。コンピューターによる測定データの読み取り。

#### 4. 3 DDGS (Deep Doorstopper Gauge System) <sup>(6)</sup>

AECL(Atomic Energy of Canada Ltd.)は、深度 1000m 程度の傾斜したボアホールでドアストッパーゲージのオーバーコアリングができる Deep Doorstopper Gauge System(DDGS)を開発した。この装置には Rock Mechanics Laboratory of Ecole Polytechnique で開発された Intelligent Acquisition Module(IAM)が組み込まれている。Borre と同様に IAM は電池を電源とするデータロガーであって、オーバーコアリングの間も孔底でひずみの連続測定をおこなう。測定条件のプログラミングおよび測定されたデータの取り込みは、パーソナルコンピュータを接続してをおこなう。

DDGS を構成する主要なアッセンブリーは、直径 44.5mm の耐圧容器に収納された IAM、ひずみロゼットの保護機構および貼り付け装置、それと重力を利用した方位測定装置である。

耐圧容器の耐圧は薄肉のアルミ円筒の場合 0.5MPa であるが、厚肉のステンレス円筒を用いると深度 1000m までの水で満たされたボアホールでも DDGS を用いることができる。ひずみロゼットには 120Ω の箔ゲージが 45° 間隔に 4 枚配置されている。

耐圧容器の外側はスライディングスリーブになっていて、これがドアストッパーよりも先に伸びているときは“diving bell”の働きをするので、ゲージロゼットと接着剤は水に接触しない。ドアストッパーゲージの表面に接着剤を塗った後、水で満たされたボアホールの中に DDGS をワイヤラインで降ろす。DDGS は HQ ドリルロッド (内径 77.8mm) を通って HQ ワイヤラインコアバレルの中に設置される。接着剤の厚い皮膜ができるように、ゲージの表面は気泡を含む薄いゴムのシートで被覆される。使用する接着剤に無水珪酸の粉末を加えて粘性を高める。

DDGS がコアバレルの先端に到着すると、トリガー機構が作動して IAM の容器はスライディングスリーブから外れ、貼り付け装置および方位測定装置の重量によってスライディングスリーブの内側を降りていく。そしてドアストッパーゲージ (および塗布された接着剤) が平面孔底に到達した瞬間に、スリーブの内側に閉じ込められていたエアポケットはボアホールの孔底から押し出される。これと同時に、方位測定装置のアルミニウムディスクの上にあるボールベアリングに、スプリングの力によって貼り付け装置が押し付けられる。その結果、アルミニウムディスクの上に重力の方向を示すベアリングの跡が刻印される。DDGS によるオーバーコアリングの手順は図 4. 6 の通りである。

通常、接着剤の硬化時間を考えて、2 時間後に IAM が作動してデータを採取するようにタイマーをセットする。接着剤が硬化すると、貼り付け装置、方位測定装置およびスライディングスリーブを回収するためにワイヤラインケーブルを引上げる。もしもゲージロゼットが適切に接着すれば、このときドアストッパーゲージと耐圧容器に入った IAM だけが孔底に残るので、引き続いてオーバーコアリングをおこなうことができる。

DDGS は 1995 から 1996 年にかけて設計、製作および試験が実施され、深度 518m (地表からは深度 943m) のボアホールで測定がおこなわれた。43 回の試験をおこない、その

うち 5 回の測定が成功した。

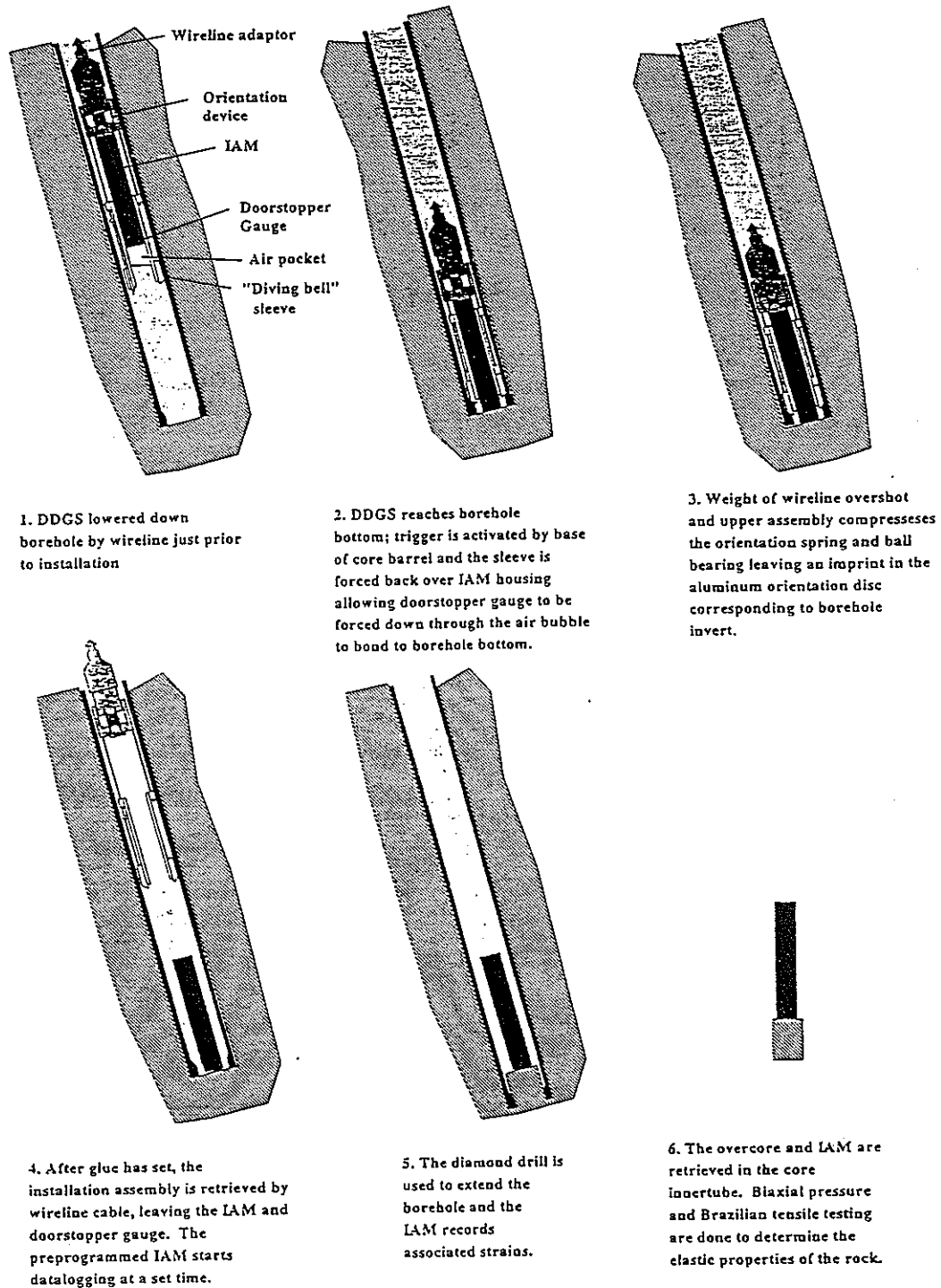


図 4. 6 DDGS (Deep Doorstopper Gauge System) によるオーバーコアリングの手順。

## 5. 大深度オーバーコアリングシステムの開発

### 5.1 大深度オーバーコアリングのためのプローブ

SSPB セルおよび DDGS などのプローブを概観すると、大深度オーバーコアリングのためのプローブは 3 つの主要なアッセンブリーから構成されていることがわかる。すなわち、①ひずみゲージをボアホールの壁面に接着するための貼り付け装置および接着剤、②深度 1000m の水中で作動するひずみレコーダー、そして③基準となるひずみゲージの方位を測定する方位測定装置である。新たに大深度オーバーコアリングシステムを開発するためには、これら 3 つのアッセンブリーの機能、大まかな仕様および問題点などについて検討する必要がある。

#### (1) 貼り付け装置および接着剤

一回のオーバーコアリングによって完全な初期応力状態が決定できるようにするために、ひずみゲージの配置は 6 つ以上の独立した測定値が得られるものでなければならない。この条件を満たすゲージの配置は多い。しかし鉛直なボアホールの中で浮遊する岩粉や岩片は重力によって孔底に沈積するから、ドラストッパーあるいは円錐孔底ひずみセルなど孔底面に接着するタイプのセルよりも、孔壁のひずみを測定するひずみセルの方がゲージの接着は容易であると考えられる。ひずみゲージの配置を CSIR 3 軸ひずみセルと同一にすると仮定すれば、測定すべきひずみの数は 9 つである。直交異方性、横等方性および等方性岩盤にボーリングされたボアホールの壁面で測定されたひずみから初期応力を算定するための厳密解はすでに求められているので、ボアホール壁面にひずみゲージを接着するセルには、花崗岩のような弾性異方性を有する岩盤への適用も比較的容易であるという利点もある。

ワイヤラインにつるされたプローブが大口径ボアホールの先端に到達するまで、ひずみゲージに塗布した接着剤が流れ落ちないように、接着剤には粘性の高いものを用いる。さらに、パイロットホールの壁面にひずみゲージが接着される直前までひずみゲージと接着剤が水と直接に接触しないようにする工夫が必要である。SSPB セルでは粘性の高い接着剤が満たされたポットの中に、接着の直前までひずみゲージを漬けておくことによってゲージと水の接触を避けている。DDGS では"diving bell"によってエアポケットを作り、接着の直前までひずみゲージを水で濡らさないようにしている。

ワイヤラインによって降ろしたプローブが大口径ボアホールの先端に到達すると、貼り付け装置は接着剤が塗布されたひずみゲージを所定の圧力で孔壁に確実に接着しなければならない。オリジナルの CSIR3 軸セルは流体（空気）圧によってひずみゲージを壁面に押し付ける。SSPB セルおよび DDGS では、接着剤が硬化するまでのあいだ装置の重さを利用してひずみゲージに一定の圧力を与える。ひずみゲージをボアホールの壁面に押し付ける機構は単純で信頼性の高いものであることが望ましい。

オーバーコアリングを成功させるためには、適切な接着剤を用いてボアホールの壁面にひずみゲージを貼付しなければならない。日本国内では、平面孔底ひずみセルあるいは球



面孔底ひずみセルを水中で接着するとき、パテ状の 2 液混合のエポキシレジンが用いられた。この接着剤は硬化するまで約 12 時間かかる。SSPB セルおよび DDGS では、水中でひずみゲージを接着するためにアクリルレジンタイプの接着剤を使用する。この接着剤の硬化時間は約 2 時間である。また、接着剤の厚い被膜が形成されるように、ひずみゲージの表面を多孔質の薄いポリウレタンのシートで被覆する。日本国内ではこのような性能を有する接着剤は市販されていないようなので、適度の粘性があつて硬化までの時間が短く、しかも濡れた岩石に接着する接着剤を新たに開発する必要がある。

貼り付け装置（あるいはプローブ）は、大口径ボアホールの中を上げ下ろしするので、その直径は大口径ボアホールの直径によって決まる。ここでは、オーバーコアリングを NQ（直径 76mm）のビットでおこなうと仮定する。貼り付け装置の直径は NQ のビットゲージよりも小さければ大口径ボアホールを通過できるが、NX のビットで採取されるボーリングコアの直径よりも小さければ、貼り付け装置（およびプローブ）が抑留された場合、NX サイズのコアバレルで確実に回収できる。したがって、貼り付け装置（およびプローブ）の直径は 60mm よりも小さくしなければならない。長さは任意であるが、ひずみゲージを接着するときに装置自体の重量を利用する場合は、適切な接着圧力が発揮できるような重量になるような寸法でなければならない。ボアホールの中に硬い金属材料で製作されたプローブが抑留され、しかもそれが回収できない場合、それよりも深い深度までボーリングをおこなうことはできない。しかし前述のように回収できることがほぼ確実であれば、プローブの材質は特に限定されない。

## (2) ひずみレコーダー

ひずみレコーダーは、デジタルデータの収録を長時間にわたっておこなえる機能を有するものでなければならない。一回のオーバーコアリングによって完全な初期応力状態が決定できるように、ボアホールの壁面に貼付するひずみゲージの配置は CSIR 3 軸ひずみセルと同一にする。したがって、ひずみを 9 点、温度を 1 点、そして時刻を測定記録することができるものとする。電源はリチウム電池から供給し、AC 電源のない大深度ボアホールにおいて長時間にわたってデータの収録をおこなう。プローブがボアホールの孔底に設置されてからオーバーコアリングを開始するまでの時間は、接着剤の硬化時間およびドリルストリングを孔底まで降ろすのに要する時間によって変化する。ひずみと温度のデータを測定記録するのはオーバーコアリングの間だけでよいから、それまでの待機中はタイマーだけを作動させて電力の消費をおさえる。データのサンプリング間隔、測定開始時刻などの測定条件の設定およびデータの回収を、RS-232C インターフェイスを介してパーソナルコンピュータでおこなう。

ひずみレコーダーを収納する容器は 10MPa 以上の耐圧性を有し、内部のひずみレコーダーは水圧の影響を受けないようにする。耐圧容器の直径はオーバーコアリングに用いるダブルコアチューブのビット内径によって決定される。オーバーコアリングを NX サイズのビットでおこなうとすると、ビットの内径は 54.74mm なので耐圧容器の外径は最大で

45mm 程度でなければならない。配管用ステンレス鋼管 32A×スケジュール（外径 42.7mm×厚さ 4.9mm）の耐圧は 16MPa なので、耐圧容器として使用できる。接着剤が硬化してから貼り付け装置および方位測定装置をワイヤラインによって回収すると、ひずみレコーダーはパイロットホールと孔軸を一致させて直立した状態になる。このとき、ひずみレコーダーの軸方向の寸法が長ければ座りが悪くなる。このため軸方向の長さは 400mm 程度とする。オーバーコアリングの間ひずみレコーダーの姿勢をボアホールの孔軸と一致した状態に保つ必要がある。接着剤の接着力だけでレコーダーの姿勢を十分に保持できない場合、ひずみレコーダーとひずみゲージの間に、パイロットホールの内壁に接触してひずみレコーダーの姿勢を保持するための機構を設ける必要があるかも知れない。

ひずみデータがパーソナルコンピュータに記録されるまでの流れを模式的に表すと図 5. 1 のようである。表 5. 1 および図 5. 2 は特注品の超小型ひずみレコーダーの仕様をもとにして大深度オーバーコアリングに使用するひずみレコーダーの概略仕様を検討した結果である。レコーダーの軸方向の寸法は 1450mm であるから、目標とする 400mm よりもかなり長い。またインターバル測定 of 最小時間間隔は 3 分であるが数秒間隔で測定できることが望ましい。

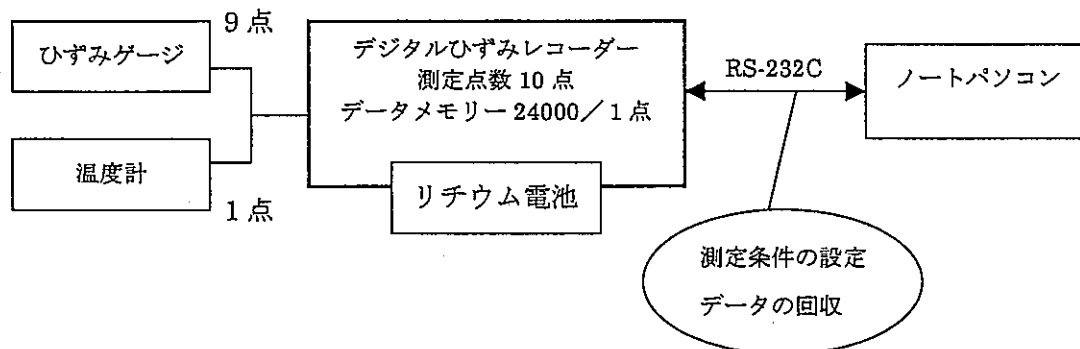


図 5. 1 測定データがパーソナルコンピュータに記録されるまでの流れ。

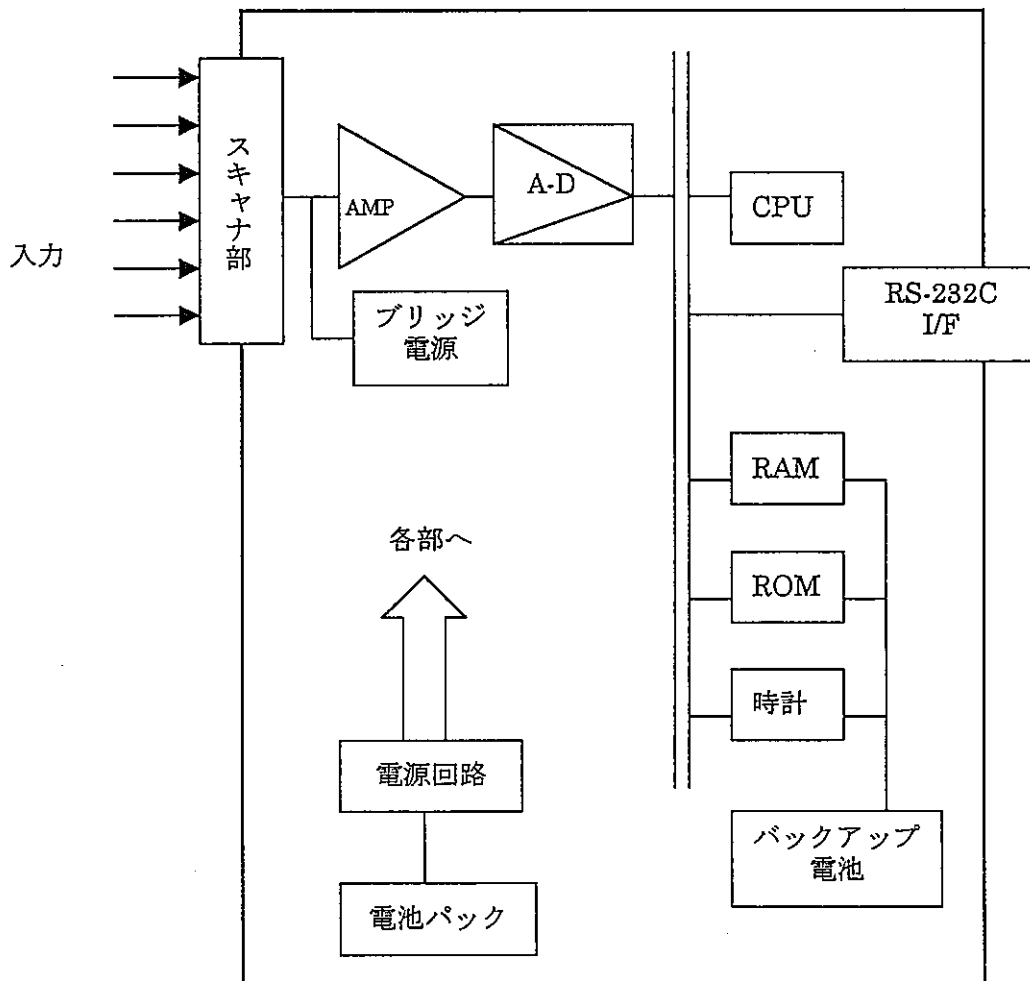


図 5. 2 ひずみレコーダーのブロックダイアグラム。

表 5. 1 既製の超小型ひずみレコーダーの仕様をもとに検討した  
大深度オーバーコアリングのためのひずみレコーダーの概略仕様

項目	仕様
入力	350Ω3線式ひずみゲージ、温度計
測定チャンネル数	10ch
測定範囲	ひずみ：±20000×10 <sup>-6</sup> 、温度：-30℃～+70℃
分解能	ひずみ：1×10 <sup>-6</sup> 、温度：±1℃
測定精度	ひずみ：±0.1%FS、温度：±0.5℃
データメモリ	24000データ/1ch
時計	年(西暦2桁)、月、日、時、分
インターバル測定	3分～99時間59分
インターフェイス	RS-232C、ボーレート：600,1200,2400,4800,9600bps
電源	リチウム電池9V、1.8Ah(1次電池：充電不可)
消費電流	動作時100mA以下、待機時100μA以下
使用温度範囲	-20℃～+50℃、10%～95%RH(結露しないこと)
外形寸法	約45φ×1450mm(突起部含まず)

### (3) 方位測定装置

ボアホールの壁面において測定されたひずみから、 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 座標系に関するひずみテンソルを求めるためには、 $x$ 軸からひずみロゼットまでの回転角度 $\theta_i$ を測定しなければならない。さらに $x$ 、 $y$ 、 $z$ 座標系に関するひずみテンソルを $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 全体座標系に変換するためにはボアホールの方角を表す角度 $\delta_h$ および $\beta_h$ を用いる。鉛直なボアホールであれば $\delta_h$ および $\beta_h$ は既知であるから $\theta_i$ だけを測定すればよい。SSPBセルの場合、マグネチックコンパスによって $\theta_i$ を測定する。DDGSでは傾斜したボアホールの鉛直下方をホールベアリングの位置から決定し、 $\theta_i$ を求める。市販の孔井方位傾斜儀計を用いると、任意の方向に傾斜したボアホールにおいて $\theta_i$ 、 $\delta_h$ および $\beta_h$ が測定できる。

以上(1)から(3)までの検討結果を図式的にまとめると図5.3のようである。また、これから開発すべき大深度オーバーコアリングシステムの仕様をDDGSのそれと対比してまとめると表5.2の通りである。なお、SSPBの詳細な仕様はこれまでに発表された文献に公表されていないようなので、この表に書き加えることはできなかった。表5.2の右の欄は、大深度オーバーコアリングシステムを開発するための技術的検討課題および問題点である。

表5.2①のひずみゲージ貼り付け装置の開発課題において、貼り付け装置によるひずみゲージの保護とその貼り付け方法にどのような機構を採用するかは、プローブ全体の構造を特徴づける最も大きな課題である。ひずみゲージの貼り付けは、プローブ全体の重量によってひずみゲージを孔壁に押し付ける方法が最も単純で確実であろう。ただし、プローブの重量からひずみゲージを接着するための水平方向の分力をどのような方法によって導くかは検討すべき課題である。プローブが大口径の孔底に到着するまでひずみゲージをどのようにして保護するかも大きな課題である。ひずみゲージを水中で確実に岩盤に接着するための接着剤は、オーバーコアリングの成功を左右するひとつの重要な要素である。市販の接着剤に適切な粘性および硬化時間を有するものが見当たらない場合は、新たにこれを開発しなければならない。ひずみゲージの方位測定装置に関するものは、市販の孔井方位傾斜儀計を使用することができるので比較的容易に解決できると考えられる。ただし、これをどのようにしてプローブに組み込むかはひとつの課題である。

表5.2②以降の項目は小型ひずみレコーダーの仕様と開発課題である。レコーダー単体の開発は、ある程度の費用をかけることによって可能と考えられる。しかし、レコーダーとひずみゲージおよびサーミスターとの接続方法、接続部分の水密性、接着剤が硬化した後のレコーダー収納ケースとひずみゲージ貼り付け装置の切り離し方法など、他の構成要素の働きを十分に発揮させながら、しかもレコーダーをプローブの中に組み込むために検討すべき項目は多い。これらの課題を解決するためには、工場における模擬試験および原位置でのテストを繰り返し、試行錯誤的にプローブに改良を加えていく必要があると思われる。

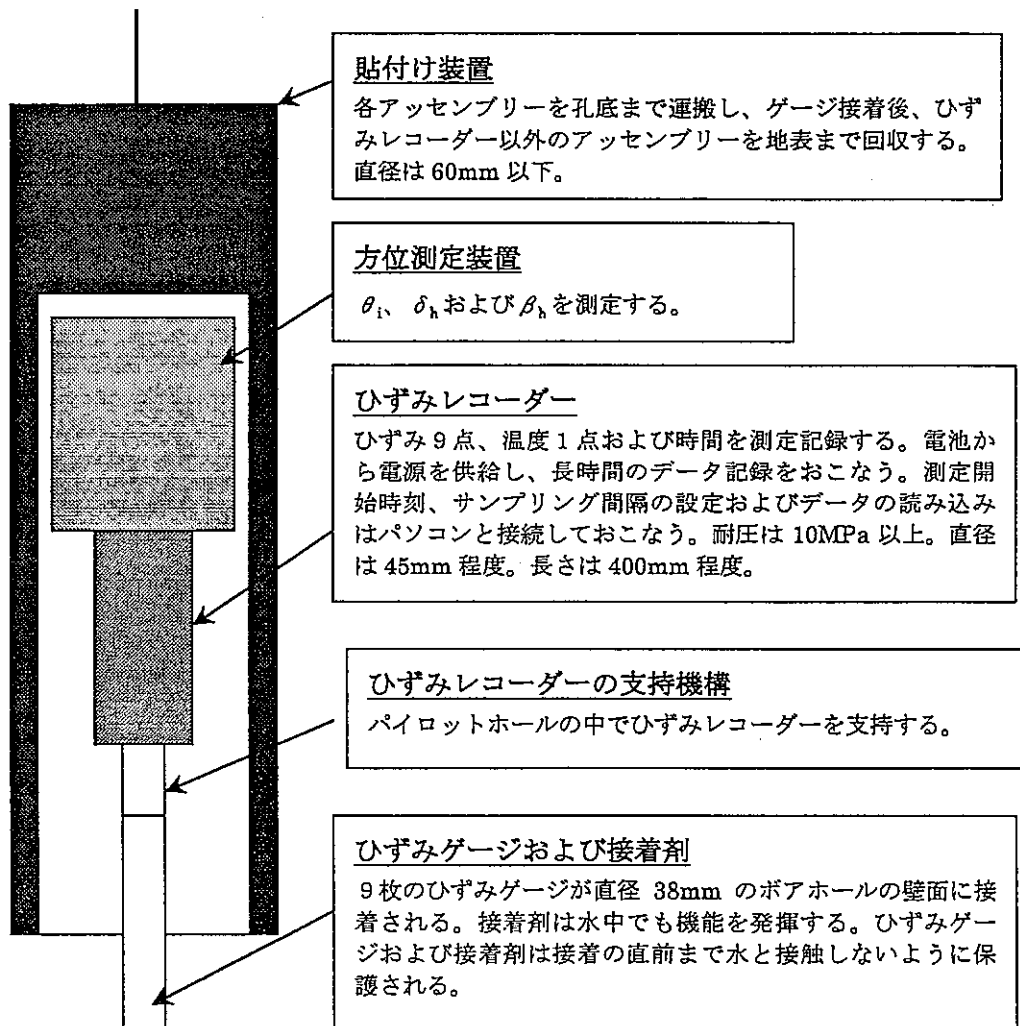


図 5. 3 大深度オーバーコアリングのためのプローブ。

表 5. 2 大深度オーバーコアリングシステムの仕様および開発課題

項 目		DDGS(Deep Doorstopper Gauge System)	大深度オーバーコアリングシステム	開発課題など
① ひずみゲージ貼	ひずみゲージの貼り付けおよび保護機構	平面孔底ひずみ法 装置の重量によるひずみゲージの押し付け	孔壁ひずみ法 コーンおよび装置の重量による押し付け	孔壁ひずみ法 ひずみゲージ貼り付け機構およびひずみゲージ保護方法の検討
	接着剤	エポキシレジン (硬化時間 12 時間) アクリルレジン (硬化時間 2 時間)	エポキシレジン (硬化時間 12 時間) アクリルレジン	水中でも短時間に接着力を発揮する接着剤の開発
	基準ゲージの方位測定	鋼球の位置をアルミ板に刻印して鉛直下方を決定	孔井方位傾斜儀計	貼り付け装置への組み込み方法の検討
② バッテリー電源		アルカリ 9V セル 2 本 (1 サンプル/秒、ブリッジ電圧 2V で 3 時間連続測定) 温度が低いときには 9V のリチウム電池	リチウム電池 9V、1.8Ah (一次電池:充電不可)	小型化
② アナログ入力および記憶容	分解能	12bit、6 チャンネル	ひずみ 10 チャンネル、温度 1 チャンネル	
	精度	±0.05%	ひずみ:±0.1%FS,温度: ±0.5℃	
	記憶容量	4000 データ/チャンネル	24000 データ/チャンネル	
	インターバル測定	1 サンプル/秒	1 サンプル/3 分~99 時間 59 分	測定インターバルを短くするための技術的検討
	スパン	±500, ±1000, ±2000, ±3000 μ ひずみ	ひずみ:±20000 × 10 <sup>-6</sup> , 温度:-30℃+70℃	
	ひずみゲージ	120 Ω、4 枚、ゲージファクター 2.13	350 Ω 3 線式ひずみゲージ、9 枚	防水性の検討 ひずみレコーダーとの接続方法の技術的検討
	感度	±0.5 μ ひずみ	ひずみ:1 × 10 <sup>-6</sup> 、温度:±1℃	
温度センサー	サーミスター、3000 Ω@25℃	サーミスター	防水性の検討	
④ インターフェイス		EIA-485,9600bps	RS-232C 600,1200,2400,4800,9600bps	
⑤ 使用環境	作動温度	通常: 0~+55℃(精度=±0.05%) 特別: -40 ~+70℃(精度=±0.1%)	-20~+50℃	温度・湿度等の環境に対する技術的検討
	湿度	0~95%	10~95% (結露しないこと)	
⑥ 収納ケース	耐圧性	アルミニウム製の収納ケース 0.6MPa ステンレス製の収納ケース 10MPa	ステンレス性収納ケース 10MPa	センサー部分とレコーダーとの接続方法の技術的検討
	収納ケース直径	54mm	約 45mm	ひずみレコーダーを収納するための技術的検討および小型化 センサーとレコーダーとの接続方法の検討
	収納ケース全長	314.3mm	約 1450mm	

## 5. 2 大深度オーバーコアリングのためのボーリング技術

ここでは、応力解放法の測定手順にしたがってボーリングの仕様を決定するとともに、各作業工程における問題点およびその対策などを抽出する。ただし、オーバーコアリングは NX (直径 76mm) ビットを、パイロットボーリングは EQ (直径 37.72mm) ビットを使用すると仮定する。大深度オーバーコアリングの作業手順、その作業時間、そときのドリルストリングの編成、そのときに発生すると予想される問題、およびその対策をまとめると表 5. 3 のようである。オーバーコアリングの深度は 1000m を想定している。パイロットボーリングおよびオーバーコアリングの長さは、それぞれ 500mm 程度であるから、実際にボーリングをおこなう時間は 30 分程度である。しかし、ドリルストリングを降ろしてコアチューブが 1000m の深度に到達するまでにはかなりの時間がかかると予想される。これに要する時間は使用する機械設備の能力によって変化する。

ボーリング作業のうち、パイロットホールのボーリングでは NQ ボアホールの孔軸と一致させて EQ のパイロットホールをボーリングするので、特別のボーリングツールが必要である。EQ のコアチューブは NQ のものと比較すると直径が小さいので座屈しやすいから、その外周を拘束しないでボーリングをおこなうと容易に偏芯する可能性がある。したがって、パイロットホールの孔軸を大口径ボアホールの孔軸と一致させるための機構を備えたコアチューブを新たに製作しなければならない。図 4. 3 のステップ b) をみると、SSPB では、パイロットホールを掘削するためのコアチューブの先端に、センタリングガイドを取り付けて偏芯を防止していることが読み取れる。

パイロットホールのボーリングにともなって発生するくり粉は、ひずみゲージをボアホールの壁面に接着するときの障害になりうるので、ボアホールの中にくり粉をできるだけ残さないようにしなければならない。パイロットボーリングのときの編成では、先端の口径が小さいので、清水を循環してもくり粉を孔口まで排除することは困難であると予想される。そこで、EQ ビットの上部にセジメントチューブを接続して、くり粉が孔底に沈降する前にできるだけ捕獲するようにする。セジメントチューブはそれ以外のストリングの外径よりも小さいので、セジメントチューブのアニュラスを上昇する掘削流体の流速は低下する。この流速がくり粉の沈降速度よりも遅ければ、くり粉はセジメントチューブのバケットに捕獲される。セジメントチューブは直径が BQ あるいは 40.5 mm のものを使用する。

表5. 3 深部岩盤におけるオーバーコアリングにもなって生じると予想される問題点

作業手順	作業時間	ドリルストリングの編成	問題点	対策
①NQボーリング (大口径ボーリング)	—	NQワイヤラインロッド NQアウターチューブ NQワイヤラインビット	特になし。	特になし。
②EQボーリング (パイロットボーリング)	6時間 30分	NQワイヤラインロッド BQセジメントチューブ (BQ or 40.5mm) EQワイヤラインビット	くり粉を孔口まで排除するためには、パイロットボーリングのストリング編成では圧力および流量とも不十分である。	ロッドの先端に、パイロット孔に入るパイプを取り付けて清水を循環させる。 EQビットの上部にセジメントチューブを取り付けて、くり粉が孔底に沈降するまえに捕獲する。
③ダミープローブの降下	30分	ワイヤラインによる	孔底に堆積したくり粉によってプローブの先端がパイロット孔に入らない。	くり粉が沈積してもパイロット孔が埋没しないように、パイロット孔を十分に長くする。
④プローブの降下	30分	ワイヤラインによる	孔底に堆積したくり粉によってプローブの先端がパイロット孔に入らない。	くり粉が沈積してもパイロット孔が埋没しないように、パイロット孔を十分に長くする。
⑤ひずみゲージの貼り付け	不明。スウェーデンでは2時間から15時間。	ボアホール壁面へ貼り付ける方式を採用	接着剤が硬化するまでの時間内に、浮遊していたくり粉が貼り付け装置の周りに沈積し、貼り付け装置が抑留される。	貼り付け装置の上にくり粉が沈降した場合であってもワイヤーで引き上げることができるように、ワイヤーと貼り付け装置の強度を高める。
⑥貼り付け装置の回収	30分	ワイヤラインによる	貼り付け装置を回収するときにワイヤーが切断して、装置が孔内に落下する。	NXビットを貼り付け装置にかぶせて回収できるように、貼り付け装置の直径を60mmよりも小さくする。ビットをかぶせやすいように装置の上部はテーパにする。
⑦オーバーコアリング (応力解放)	6時間 30分	NQワイヤラインロッド NXダブルコアチューブ	オーバーコアが破損して、プローブが孔底に残留する。	NXビットをかぶせてプローブが回収できるように、プローブの直径を50mmよりも小さくする。ビットをかぶせやすいように装置の上部はテーパにする。



## 6. 土岐花崗岩の室内弾性波速度測定

これから初期応力測定をおこなおうとする予定地域の岩盤に適した測定方法をあらかじめ推定し、その有効性を評価することができれば初期応力測定の計画を立案するうえで有益である。超深地層研究計画の対象となる地域には深度 1000m の AN-1 孔がすでにボーリングされている。このボアホールから採取されたインタクトなボーリングコアを用いて弾性波速度分布を調査し、もしも顕著な速度異方性がみいだされればコアの内部に配向性のマイクロクラックが存在すると考えられるので、将来、同一地域にボーリングして採取されるコアに対してマイクロクラックの生成に基礎をおく初期応力の測定方法を適用した場合、深部の初期応力場に関する情報が得られる可能性は高い。これとは逆に、速度異方性が小さければ、たとえばボアホールオーバーコアリングなどの応力解放法に基づく初期応力測定法から、マイクロクラックの発生に起因する弾性異方性の影響の少ない、信頼性の高い初期応力状態が決定できるであろう。

この章では、AN-1 孔の深度 198.3、515.8、758.3 および 1004.8m から採取された 4 本のコアを用いて、コア軸と直交する平面内を伝播する弾性波の速度を測定し、土岐花崗岩の弾性異方性について検討する。ここで採用した試験方法はコアの整形および载荷を必要としないので、簡便にしかも短時間で岩石の弾性異方性を調査できるという利点がある。

### 6. 1 弾性波速度測定による微小き裂系の評価

岩石内のき裂は弾性率を低下させるため弾性波速度も低下する。また、き裂に方向性があれば弾性波速度および弾性率に異方性が生じる。コアを用いた初期応力測定法である ASR 法と DSCA 法は、岩盤内の初期応力を急激に解放した結果生じる微小なき裂の伸長あるいは発生と関連していると考えることができる。この仮説が正しければ、弾性波速度情報から得られるき裂の方位分布と ASR 法および DSCA 法により得られる主ひずみの方向が一致するはずである。あるいはもし一致するならば、弾性波速度情報から得られるき裂の情報もまた岩盤内の応力測定の一助となりうるということが期待できる。佐野ら<sup>17)</sup>はこのような仮定に基づいて、DSCA 法により得られた結果と弾性波速度測定により得られた結果とを比較し、両者の間により対応性をみいだしている。すなわち、岩石の弾性波速度測定によって初期応力の主応力方向が推定できる可能性を示した。

### 6. 2 弾性波速度測定

配向性き裂の分布を解く問題は、多くの弾性波速度情報をもとに、任意に定めた観測座標系に関する弾性定数あるいは対称軸方向と対称軸（主軸）に関する弾性定数を求める問題であり、最小 2 乗法を用いて解くことができる。このためボーリングコアを多面体、たとえば 18 面体に整形し、できるだけ多くの平行な 2 平面間の弾性波速度を測定することによって測定誤差による影響を小さくする努力がおこなわれる。しかし、本測定は土岐花崗岩への DSCA 法の適用性を大まかに評価することを目的とするので、図 6. 1 に示すよ

うに非整形のボーリングコアの円周方向に  $45^\circ$  間隔で圧電振動子を接着し、8 測線の P 波の速度を測定した。

ボーリングコアは AN-1 孔の深度 198.3、515.8、758.3 および 1004.8m から採取された直径 63.25mm の棒状のコアで、採取された深度が深くなるにつれて造岩鉱物の粒径は相対的に大きくなる。これらのコアは採取後コア箱に入れられ、倉庫に 10 年以上保管されていた。

弾性波測定はすべてパルス透過法によりおこなった。制御は NEC 社製パーソナル・コンピュータ PC-9801M2 でおこない、コンピュータの指令により HP-IB インターフェイスを介して Wavetek 社製ファンクション・ジェネレーター Model143 からパルスを発信させた。パルス信号は、Hewlett Packard 社製 VHF スイッチを介して供試体に接着された発信子により応力波となって供試体内を伝播し受信子に入力される。弾性波の受信子および発信子の接着はすべて真空グリスでおこなった。受信子からの電気信号は Hewlett Packard 社製 VHF スイッチを介して作動アンプに入力され約 46dB 増幅し、その信号をオートニクス社製トランジェント・レコーダー S121 でデジタル量に変換した後、オートニクス社製アベレージャー F601 に転送する手続きを 128 回おこない、平均化処理をほどこしてデータをコンピュータに転送記録した。なお、発信子および受信子は、富士セラミックス社製の共振周波数 1MHz の PZT-7 圧電振動子を使用した。発信パルスは周波数を 1MHz に変化させて測定した。トランジェント・レコーダーの分解能は 10bit、サンプリング間隔は 10ns、アベレージャーの加算処理後に出力されるデータは 12bit である。したがって、弾性波速度測定結果には少なくとも 20~40m/s の誤差が存在する。

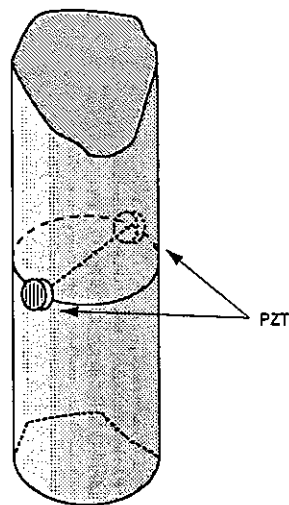


図 6. 1 非整形ボーリングコアの弾性波速度測定。

### 6. 3 測定結果

コアの軸方向と直交する平面内をコアの中心点を通して伝播する P 波の速度分布は図 6. 2 のようである。ここで、縦軸は P 波速度、横軸はボーリングコアを孔口の方向から見たとき、コアの円周上にもうけた任意の基準点から時計まわりに計った測線までの回転角度である。円周方向の速度分布には周期  $\pi$  の顕著な速度異方性が認められ、P 波速度の最大値  $V_{p,max.}$  と最小値  $V_{p,min.}$  の差は 300~700m/s である。表 6. 1 はコアの軸方向と直交する平面内の速度分布に最小 2 乗法によって正弦曲線を当てはめたときの P 波速度の極値である。P 波速度の最大値  $V_{p,max.}$  と最小値  $V_{p,min.}$  の違いを  $(V_{p,max.}/V_{p,min.}-1) \times 100$  から評価すると、採取深度 515.8m のコアが 21.3% と最も速度異方性が大きく、758.3m のコアで 7.5% と最も小さい。速度異方性の大きさと採取深度の間に系統的な変化傾向は認められないようである。

表 6. 1 コアの軸方向と直交する平面内の P 波速度

採取深度 (m)	$V_{p,min.}$ (m/s)	$V_{p,max.}$ (m/s)	$(V_{p,max.}/V_{p,min.}-1) \times 100$ (%)
198.3	3584	4188	16.9
515.8	3331	4040	21.3
758.3	3664	3938	7.5
1004.8	3537	4044	14.3

以上の測定結果は、土岐花崗岩に顕著な弾性波速度の異方性があることを示すとともに、配向性クラックの存在を示唆するものである。したがって、土岐花崗岩に DSCA 法を適用すればマイクロクラックの分布に関して有意な測定結果が得られる可能性は高い。しかし、この配向性クラックがコアを採取する際の応力解放の過程で生じたものか、あるいはマグマが冷却、固化し、それが地表に表れるときに生じる温度と応力の低下によって発生したものであって現在の応力状態とは無関係であるのか、岩石試料の弾性波速度分布だけから判断できない。配向性クラックが初期応力の解放によって発生したのであれば、採取前の岩石が受けていた完全な 3 次元初期応力状態と弾性波速度分布に関する情報とを比較し、それらがお互いに合致することが示されなければならない。配向性クラックが応力解放後に時間に依存して伸長したかどうかを調べるには非弾性ひずみの原位置測定が必要である。またコアの内部には肉眼で認められるものから電子顕微鏡下ではじめて明らかになるものまで種々のマイクロクラックが存在するが、例えば初期応力の解放によって生じたマイクロクラックと過去に受けた応力によって生じるマイクロクラックが同一の岩石の内部に混在する場合、弾性波速度分布は成因の異なるこれらのマイクロクラックの影響を同時に受けると考えられる。したがって、DSCA 法によって岩石内部のマイクロクラックのアスペクト比に関する分布、クラック密度および方位分布を測定し、弾性波速度分布および非弾性ひずみ測定結果との関係を総合的に調査することが、初期応力測定のためにより有効であると考えられる。

弾性波速度分布に顕著な異方性があるということは、土岐花崗岩の弾性的性質に顕著な異方性があることも意味している。したがって岩盤を完全等方弾性体と仮定して初期応力

を決定しようとする方法を土岐花崗岩に適用する場合は、測定方法の選定と結果の解釈に特別の注意が必要である。たとえば、カナダの Manitoba 州、Winnipeg の北東 100km にある URL(Underground Research Laboratory)の 240 レベルでは、約 30m 離れた 2 本のボアホールでオーバーコアリングによる初期応力測定がおこなわれたが、このとき応力解放によってマイクロクラックが誘起され、花崗岩のオーバーコアは弾性異方性を呈した<sup>19)</sup>。オーバーコアを等方弾性体と仮定して算定したそれぞれのボアホールにおける最大主応力の方向は  $45^\circ$  ずれていて、ばらつきは大きかった。これは岩石の弾性異方性が考慮されていなかったことと、マイクロクラックによって岩石の挙動が非線形的になったことに原因があると考えられた。しかし、この花崗岩に横等方性を仮定した場合、初期応力の方向は一致し、ばらつきも小さくなった。ボアホールまわりの弾性等方性を仮定する水圧破碎法についても、異方性岩盤への適用性を検討しておく必要があると考えられる。

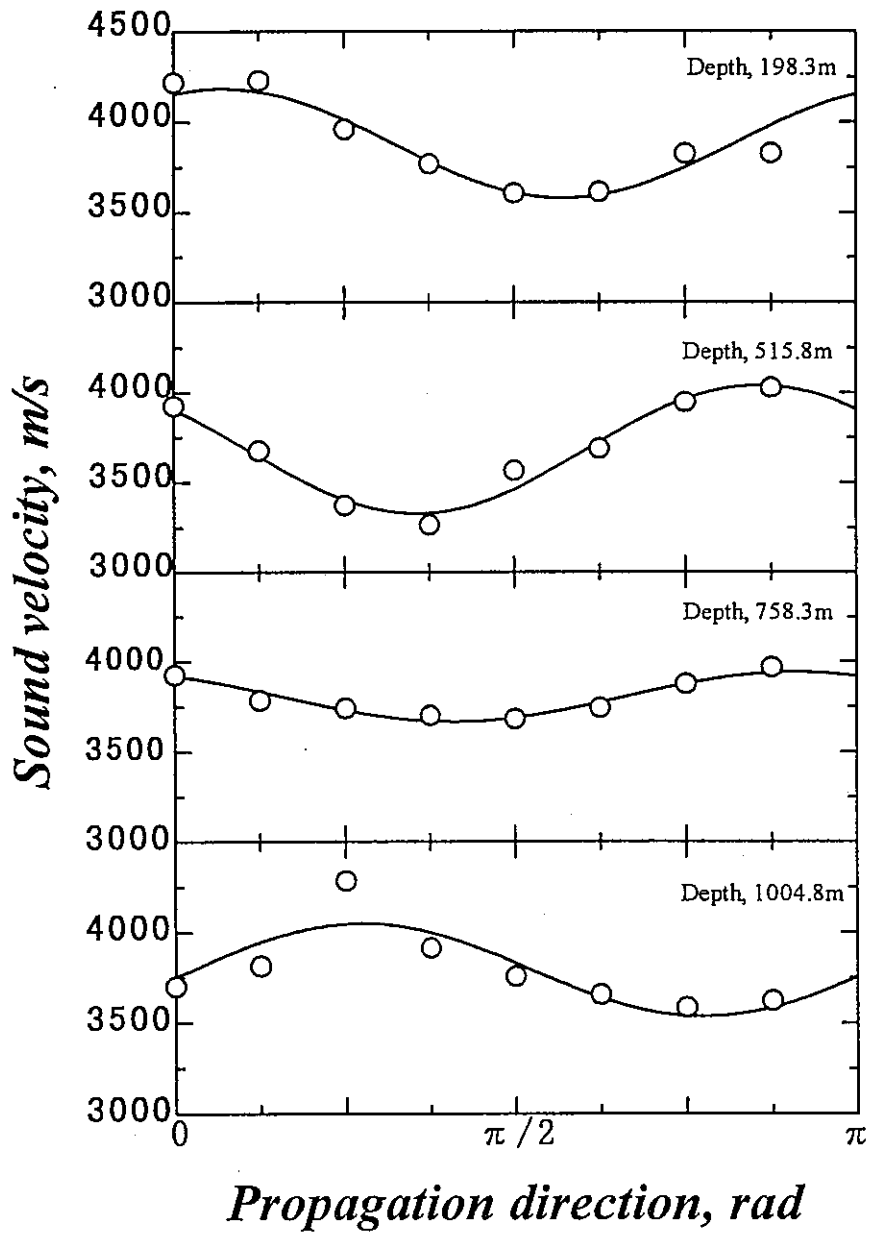


図 6. 2 コアの軸方向と直交する平面内をコアの中心点を通して伝播する P 波の速度分布。

## 7. まとめ

超深地層研究所計画においては、地表から掘削した 1000m の試錐孔を掘削し、初期応力測定を実施し、地表から地下深部までの 3 次元初期応力状態を把握する予定である。しかしながら、国内・国外ともに深度 1000m 程度の 3 次元初期応力を測定した実績が少なく、信頼性も高いとは言えない。このため、現在、最も信頼性が高いと言われている応力解放法に関して、文献等により測定機器・システムの開発に関する調査をおこなった。すなわち、まずこれまでに開発された種々の応力解放法全般について概観し、次に CSIR タイプの 3 軸ひずみセルを用いたオーバーコアリングについて詳細に述べた。このタイプのセルはすでに大深度への適用がおこなわれている。さらに、スウェーデンおよびカナダで開発された大深度オーバーコアリングシステムの詳細について文献に基づいた調査をおこなった。以上の調査結果をもとにして、新たに大深度オーバーコアリングシステムを開発するためのプローブについて検討をおこなった。既存の超小型ひずみレコーダーをそのまま使用することはできないが、大深度オーバーコアリングのためのひずみレコーダー単体の開発は技術的に可能であると考えられる。しかし、大深度におけるひずみゲージの孔壁への接着方法、ひずみレコーダーとひずみゲージの接続方法、水中でひずみゲージを岩盤に確実に接着するための接着剤の開発など、全体としてひとつの信頼性の高いプローブを開発するために解決すべき課題は多い。このほか、大深度オーバーコアリングのボーリング技術についても検討を加えた。最後に、土岐花崗岩の弾性波速度を測定し、土岐花崗岩には顕著な弾性異方性があることみいだした。したがって土岐花崗岩を完全等方弾性体と仮定して初期応力を決定しようとする場合は、測定方法の選定と結果の解釈に特別の注意が必要であることを指摘した。

## 引用文献

1. Wortnick, G. and Walton R.J. Triaxial 'hollow inclusion' gauges for determination of rock stress in situ. Supplement to ISRM Symp. on Investigation of Stress in Rock, the Institution of Engineers, Australia, P1-8(1976)
2. Leeman, E.R. The CSIR 'doorstopper' and triaxial rock stress measuring instruments. Rock Mechanics, 3: 25-50(1971)
3. Hallbjorn L. Rock stress measurements by Swedish State Power Board. Proc. International Symposium on Rock Stress and Rock Stress Measurement, Stockholm, Publ Lulea: Centek, P197-206(1986).
4. Amadei B. and Stephansson O. Rock Stress and Its Measurement. Chapman & Hall, P201-267(1997).
5. Hallbjorn L., Ingevald K., Martna J., Stridell L. A new automatic probe for measuring triaxial stresses in deep bore holes. Tunneling and Underground Space Technology, V5, N1/2, P141-145(1990).
6. Thompson P.M., Corthesy R., Leite M.H. Rock stress determinations at great depth using the modified doorstopper gauge. Rock Stress, Balkema, Rotterdam, P59-64(1997).
7. 佐野 修, 工藤洋三, 石田一成, 民部雅史, 水田義明. 室内弾性波速度測定による原位置応力の推定について. 資源・素材'94 (秋季大会), P25-28(1994)
8. Martin C.D. and Christiansson R. Overcoring in highly stressed granite – the influence of microcracking. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol.28, No.28, P53-70(1991)