

# 「活断層帯での地殻活動研究」に関わる

## 現地地質調査及び応力測定試験

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1998年3月

三井金属資源開発株式会社

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Tel: 029-282-1122 (代表)

Fax: 029-282-7980

e-mail: jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構

(Japan Nuclear Cycle Development Institute) 2005

# 「活断層帯での地殻活動研究」に関わる

## 現地地質調査及び応力測定試験

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1998年3月

三井金属資源開発株式会社

「活断層帯での地殻活動研究」に関わる現地地質調査及び応力測定試験\*

竹村友之\*\*、新宮和喜\*\*、迫垣内薫\*\*、西川有司\*\*、  
岡田洋一\*\*、中嶋敏秀\*\*、山下貢\*\*

要 旨

富山県と岐阜県の県境付近に位置する跡津川断層系では、地震発生機構の研究や新たな地震観測手法の開発を目的にした、総合的な活断層の調査研究が行われている。

本件のうち、現地地質調査では、跡津川断層系の茂住祐延断層の3次元構造を明らかにすることを目的にして、地表及び坑内の地質調査を実施した。また応力測定試験では、断層周辺の応力場を測定する乾式破碎応力測定法の確立のために、セメントモルタル供試体と鋼管による室内載荷試験と数値解析を実施した。

現地地質調査の結果から、茂住祐延断層の構造や活動性について、以下の点が明らかになった。

- ① 断層露頭、閉塞丘、小沢の右横ずれ及び、傾動する礫層（イベント堆積物）等の分布から茂住祐延断層の地表トレースが明らかになった。
- ② 高原川周辺は、茂住祐延断層の西端に相当し、断層の活動性は低調である。一方、茂住峠付近を境にして東側では、多くの変位地形が認められ、断層は活動的である。
- ③  $^{14}\text{C}$ 年代測定の結果から、茂住祐延断層は1858年の安政の飛越地震に活動した可能性がある。

また、応力測定試験の結果からは、以下の点が明らかになった。

- ① セメントモルタル供試体の載荷試験で、任意の3方向に亀裂を作成できるということが確認された。
- ② 載荷試験時に計測したAEは、圧力の昇降時に亀裂の挙動をとらえているものと思われたが、亀裂の挙動によるAE特性を明らかにすることはできなかった。
- ③ 鋼管内載荷試験の結果は、数値解析によって再現することができた。

---

\*本報告書は三井金属資源開発株式会社が動力炉・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：09C1161

事業団担当部室課：東濃地科学センター 地質安定性研究室（湯佐泰久室長）

\*\*三井金属資源開発株式会社

March, 1998

Geological Survey and Initial Stress Measurement Test consernig of  
"The Crustal Deformation Study in the Active Fault Zone"

Tomoyuki Takemura\*\*, Kazuki Shingu\*\*, Kaoru Sakogaichi\*\*,  
Yuji Nishikawa\*\*, Yoichi Okada\*\*, Toshihide Nakajima\*\*  
and Mitsugu Yamashita\*\*

ABSTRACT

The active fault survey tunnel that crossed the Mozumi - Sukenobu fault (MSF) is located at the Kamioka mine, northern Gifu prefecture, Central Japan. The comprehensive study of the active fault, such as the study of the earthquake mechanism and the development of the new initial stress measurement method is done by using this tunnel.

One of the purposes of this investigation is to define the three-dimensional distribution of the MSF by geological survey, on the basis of the seismic and geophysical studies on this fault. The other purpose is to develop the new initial stress measurement method.

The following points became clear from this geological survey.

- ① The surface trace of the MSF is define by the fault exposure and the tectonic land form such as offset stream, offset ridge and flexure scarp.
- ② The difference of the activity between eastern side and western side of MSF is recognized. The survey tunnel and the Takahara river is assumed to be located the western end of the MSF, therefore the amount of the fault displacement in this area is assumed to be smaller than that of the eastern side of the MSF.
- ③ It is assumed that the latest activity of the MSF is the Ansei earthquake in 1858 by the <sup>14</sup>C dating.

The following points became clear from the stress measurement test

- ① In the loading test for cement mortal specimen, it was confirmed that S-500 instrument could make optional 3 directional fractures.
- ② The fracture behavior seems to be caught by the AE measurement of the loading test, but the detailed analysis of the AE measurement was not carried out owing to limited data.
- ③ The result of the loading test for the steel pipe was reproduced by the numerical analysis.

---

\* Work performed by Mitsui Mineral Development Engineering Co., Ltd. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

PNC Liaison: Tono Geoscience Center, Yasuhisa Yusa

\*\* Mitsui Mineral Development Engineering Co., Ltd.

# 目 次

1. 調査の概要	1
1.1 件名	1
1.2 現地地質調査の概要	1
1.2.1 目的	1
1.2.2 調査位置	1
1.2.3 調査期間	1
1.2.4 調査項目	1
1.2.5 調査担当者	1
1.3 応力測定試験の概要	3
1.3.1 目的	3
1.3.2 調査期間	3
1.3.3 調査項目	3
1.3.4 調査担当者	3
2. 現地地質調査	4
2.1 既存の研究結果	4
2.1.1 調査地域周辺の地形・地質	4
2.1.2 跡津川断層系茂住祐延断層	8
2.2 地表の断層露頭・変位地形	8
2.2.1 高原川周辺	10
2.2.2 茂住谷周辺（高原川～茂住峠）	14
2.2.3 茂住峠周辺（茂住峠～長棟川）	17
2.2.4 長棟川東岸（長棟川～広川）	31
2.3 坑内地質	33
2.3.1 活断層調査坑道	33
2.3.2 精密調査坑道	43
2.3.3 活断層調査坑道以西（長棟坑道・茂住通洞）	43
2.4 断層の活動性	45
2.5 まとめと今後の課題	45
2.5.1 まとめ	45
2.5.2 今後の課題	47
2.5.3 参考文献	48
3. 応力測定試験	50
3.1 乾式一面破砕法による応力測定の概要	50
3.1.1 S-500 プローブ	50

3.1.2	応力測定理論	52
3.1.3	これまでのS-500による試験の概要と得られた問題点	55
3.2	室内破砕試験	57
3.2.1	载荷試験装置	57
3.2.2	供試体	59
3.2.3	AE計測システム	60
3.2.4	試験条件	61
3.2.5	試験結果	62
3.3	鋼管内载荷試験	91
3.3.1	試験の概要	91
3.3.2	試験結果	92
3.4	理論解析	111
3.4.1	鋼管内载荷試験のシミュレーション	111
3.4.2	解析結果	117
3.4.3	载荷圧-変位曲線を解析によって再現する手順	126
3.5	結論	128

図表一覧

図一覧

図 1. 2. 1	調査地域位置図	2
図 2. 1. 1	調査地域周辺の地質図	5~6
図 2. 2. 1	茂住峠東側の地形及び露头図 (Loc. 11, 12)	21~22
図 2. 2. 2	茂住峠東側林道沿いの模式断面図 (Loc. 11)	23
図 2. 2. 3	長棟川西岸の段丘上の傾動する礫層 (Loc. 14)	28
図 2. 2. 4	長棟川西岸傾動する礫層と断層池の関係 (Loc. 14, 15)	29
図 2. 2. 5	長棟川右岸の断層露头 (Loc. 16)	30
図 2. 2. 6	長棟川東岸鞍部付近の閉塞丘 (Loc. 19)	34
図 2. 2. 7	長棟川東岸鞍部東側の断層周辺露头図 (Loc. 20)	35
図 2. 2. 8	長棟川東岸鞍部東側の断層露头 (Loc. 21)	37
図 2. 3. 1	活断層調査坑道展開図	39~40
図 2. 3. 2	活断層調査坑道の断層露头 (B破碎帯)	42
図 3. 1. 1	S-500 プローブの載荷部の基本構造	50
図 3. 1. 2	S-500 計測システム図	51
図 3. 1. 3	半無限円孔板の円孔周辺応力概念図	53
図 3. 1. 4	円孔板の内圧が等応力状態で作用する場合	54
図 3. 1. 5	内圧が部分的に作用する場合	54
図 3. 1. 6	円孔周辺の応力	55
図 3. 2. 1	室内検証試験装置概念図	58
図 3. 2. 2	AE 計測システム図	60
図 3. 2. 3	圧力-変位曲線	64
図 3. 2. 4	圧力-変位曲線	65
図 3. 2. 5	圧力-変位曲線	66~67
図 3. 2. 6	圧力-変位曲線	68
図 3. 2. 7	圧力-変位曲線	69
図 3. 2. 8	圧力-変位曲線	70
図 3. 2. 9	圧力-変位曲線	71
図 3. 2. 10	圧力-変位曲線	72
図 3. 2. 11	圧力-変位曲線	73
図 3. 2. 12	圧力-変位曲線	74
図 3. 2. 13	圧力-変位曲線	75
図 3. 2. 14	圧力-変位曲線	76

図 3.2.15	折れ点圧力の理論値と実験値の相関図	78
図 3.2.16	AE センサーの位置図	79
図 3.2.17	載荷圧と AE の発生数との関係 (試験 1-15T1)	81
図 3.2.18	載荷圧と AE の発生数との関係 (試験 1-15T2)	81
図 3.2.19	載荷圧と AE の発生数との関係 (試験 1-80T1)	82
図 3.2.20	載荷圧と AE の発生数との関係 (試験 1-80T2)	82
図 3.2.21	AE 波形例 (昇圧時: 載荷圧力 約 15kgf/cm <sup>2</sup> )	83
図 3.2.22	AE 波形例 (昇圧時: 載荷圧力 約 50kgf/cm <sup>2</sup> )	84
図 3.2.23	AE 波形例 (昇圧時: 載荷圧力 約 150kgf/cm <sup>2</sup> )	85
図 3.2.24	AE 波形例 (昇圧時: 載荷圧力 約 250kgf/cm <sup>2</sup> )	86
図 3.2.25	AE 波形例 (降圧時: 載荷圧力 約 120kgf/cm <sup>2</sup> )	87
図 3.2.26	AE 波形例 (降圧時: 載荷圧力 約 50kgf/cm <sup>2</sup> )	88
図 3.2.27	AE 波形の周波数特性 (昇圧時)	89
図 3.2.28	AE 波形の周波数特性 (降圧時)	90
図 3.3.1	載荷試験用鋼管	91
図 3.3.2	鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (Pt1)	93
図 3.3.3	鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (Pt2)	94
図 3.3.4	鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (Pt3)	95
図 3.3.5	鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (Pt4)	96
図 3.3.6	鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (Pt5)	97
図 3.3.7	鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (Pt6)	98
図 3.3.8	鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (Pt7)	99
図 3.3.9	鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (Pt8)	100
図 3.3.10	鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (Pt9)	101
図 3.3.11	鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (Pt10)	102
図 3.3.12	鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (Pt11)	103
図 3.3.13	鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (Pt12)	104
図 3.3.14	鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (Pt13)	105
図 3.3.15	鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (Pt14)	106
図 3.3.16	鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (Pt15)	107
図 3.3.17	鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (Pt16)	108
図 3.3.18	鋼管内載荷試験時に観測されたプレスケールの結果	109
図 3.4.1	解析モデル (Model 1)	112
図 3.4.2	解析モデル (Model 2)	112
図 3.4.3	解析モデル (Model 3)	114
図 3.4.4	解析モデル (Model 4)	114

図 3.4.5	解析モデル (Model 5)	116
図 3.4.6	Model 1 の解析結果	119
図 3.4.7	Model 2 の解析結果	120
図 3.4.8	Model 3 の内周境界に載荷したせん断応力分布	120
図 3.4.9	Model 3 の解析結果	121~122
図 3.4.10	Model 4 の解析結果	122~123
図 3.4.11	Model 5 の解析結果	123~125
図 3.4.12	解析モデル (Model 6)	127

### 表一覧

表 2.1.1	跡津川断層系の概要	9
表 2.2.1	破碎度の定義	10
表 2.2.2	<sup>14</sup> C 年代測定結果	25
表 2.2.3	茂住祐延断層の地区別の活動性	46
表 3.2.1	供試体の配合表	59
表 3.2.2	計測機器一覧表	59
表 3.2.3	AE 計測システムの仕様と設定値	60
表 3.2.4	供試体拘束圧載荷条件	61
表 3.2.5	供試体を用いた実験結果一覧	63
表 3.3.1	鋼管内載荷試験条件	92
表 3.4.1	S-500 による鋼管内載荷試験から得られた (鋼管外周ひずみ/載荷圧) 比	118

### 写真一覧

写真 2.2.1	高原川右岸の断層露頭 (Loc. 1 の①)	12
写真 2.2.2	高原川右岸の断層露頭 (Loc. 1 の②)	12
写真 2.2.3	高原川右岸の断層露頭 (Loc. 3)	13
写真 2.2.4	茂住谷の安山岩質岩脈と同方向の割れ目群 (Loc. 6)	15
写真 2.2.5	茂住谷の断層露頭 (Loc. 7)	15
写真 2.2.6	鉛谷の不整合の露頭 (Loc. 9)	16
写真 2.2.7	鉛谷の手取層群の礫岩 (Loc. 9)	16
写真 2.2.8	茂住峠北西の断層露頭 (Loc. 10)	18

写真 2.2.9	茂住峠東側の不整合の露頭 (Loc. 11)	18
写真 2.2.10	茂住峠東側の断層露頭 (Loc. 11)	24
写真 2.2.11	茂住峠東側の古土壌 (Loc. 11)	24
写真 2.2.12	茂住峠東 500m の断層露頭 (Loc. 13)	25
写真 2.2.13	長棟川西岸の段丘上の傾動する礫層 (Lo14)	27
写真 2.2.14	長棟川右岸の断層露頭 (Loc. 16)	30
写真 2.2.15	長棟川東岸の小地溝 (Loc. 17)	32
写真 2.2.16	長棟川東岸北西斜面の地すべり中の粘土 (Loc. 18)	32
写真 2.2.17	長棟川東岸鞍部東側の断層露頭周辺 (Loc. 20)	35
写真 2.2.18	長棟川東岸鞍部東側の断層露頭 (Loc. 20)	36
写真 2.2.19	長棟川東岸鞍部東側の断層露頭 (Loc. 21)	36
写真 2.2.20	長棟川東岸鞍部東側の断層露頭 (Loc. 21)	37
写真 2.3.1	活断層調査坑道の断層露頭 (B 破碎帯)	41
写真 2.3.2	安山岩質岩脈の顕微鏡写真 (オープンニコル)	44
写真 2.3.3	安山岩質岩脈の顕微鏡写真 (クロスニコル)	44

#### <巻末資料>

付図-1	ルートマップ No. 1 高原川 (1 : 5,000)
付図-2	ルートマップ No. 2 茂住谷 (1 : 5,000)
付図-3	ルートマップ No. 3 茂住峠 (1 : 5,000)
付図-4	ルートマップ No. 4 長棟川西岸 (1 : 5,000)
付図-5	ルートマップ No. 5 長棟川東岸 (1 : 5,000)
付図-6	ルートマップ No. 6 高原川 (1 : 2,500)
付図-7	ルートマップ 高原川～広川 (1:10,000)
付図-8	地表地質図 (1:20,000)
付図-9	-500m 準 (海拔-350m) 地質平面図 (1:20,000)
付図-10	地質断面図 (1:20,000)
付図-11	載荷圧と AE の発生数との関係 (試験 1-15T1)
付図-12	載荷圧と AE の発生数との関係 (試験 1-15T2)
付図-13	載荷圧と AE の発生数との関係 (試験 1-80T1)
付図-14	載荷圧と AE の発生数との関係 (試験 1-80T2)

## 1. 調査の概要

### 1.1 件名

活断層帯での地殻活動研究に関わる現地地質調査及び応力測定試験

### 1.2 現地地質調査の概要

#### 1.2.1 目的

本調査及び試験では、茂住祐延断層の3次元構造解明のための基礎データを取得することを目的とする。

#### 1.2.2 調査位置

地表地質調査の調査地域は、茂住祐延断層に沿った方向で高原川（西端）から長棟川支流広川（東端）までの延長約7kmとし、断層に直交する方向は、断層を中心として両側500mの幅約1kmである（図1.2.1）。本調査地域は茂住祐延断層全長の西側約1/3に相当する。

#### 1.2.3 調査期間

平成9年11月14日～平成10年3月20日

#### 1.2.4 調査項目

##### (1) 既存の地質資料の整理

該当地域に関する既存の地質図やデータ及び既存の文献の収集整理を行った。

##### (2) 地質調査

調査地域について、断層露頭や変位地形の探索を中心に地質調査を行い、調査の結果を縮尺1/1万のルートマップに整理した。なお、重要な断層露頭については写真を撮影し、スケッチを行った。地表地質調査及び坑内調査の結果に既存のデータを加味して、縮尺1/2万の地表地質図を作成した。

##### (3) 坑内破砕帯スケッチ

活断層調査坑道内で観察される断層破砕帯の露頭スケッチ（1/50）を行い、破砕帯の内部構造の記載を行った。

#### 1.2.5 調査担当者

本調査は、千葉大学理学部伊藤谷生教授と富山大学理学部竹内章教授の指導のもと



以下に記す担当者が実施した。

三井金属資源開発株式会社 調査本部  
副本部長 竹村 友之  
部長付 西川 有司  
環境システム部 副部長 迫垣内 薫  
環境システム部 課長代理 岡田 洋一  
地質部 課長代理 原田 陽夫  
地質部 主任 井上 敏夫

### 1.3 応力測定試験の概要

乾式破砕応力測定法の試験として、乾式一面せん断試験プローブ S-500 による応力測定に関する2種類の室内実験および数値解析を行う。

#### 1.3.1 目的

乾式一面せん断試験による応力測定の実用性について検討することを目的とする。具体的には、S-500 プローブによる破壊のメカニズムを解明し、メカニズムに合致した理論式を構築することを目指して、まず、2種類の室内実験により、これに資するためのデータを収集する。つぎに、このデータに基づいた理論式構築のための理論解析の手順を開発する。

#### 1.3.2 調査期間

平成9年11月22日～平成10年3月24日

#### 1.3.3 調査項目

- (1)モルタル供試体を用いた室内載荷試験
- (2)鋼管を用いた室内載荷試験
- (3)鋼管を用いた試験に対する数値解析

#### 1.3.4 担当者

三井金属資源開発株式会社 開発本部  
副本部長 新宮和喜  
設計部 主任 中嶋敏秀  
設計部 主任 山下 貢

## 2. 現地地質調査

### 2.1 既存の研究結果

#### 2.1.1 調査地域周辺の地形・地質

##### (1) 地形

調査地域は、岐阜県吉城郡神岡町と富山県上新川郡大山町にまたがる山岳地域である(図 1.2.1)。調査地域のほぼ中央に位置する茂住峠(海拔約 1,065m)を境に、西側は急峻な茂住谷が西南西方向に直線的に発達し、高原川に至る。一方、峠の東側は比較的傾斜の緩やかな準平原が、ほぼ南北に流れる長棟川や北北西方向に流れる広川により削剥され、侵食の進んだ地形をなしている。

##### (2) 地質

###### (a) 概要

本調査地域の地質に関しては、地質調査所の地質図幅「東茂住」<sup>1)</sup>、通産省による長棟広域調査(1970~1972)<sup>2)~4)</sup>及び金属鉱業事業団による長棟精密調査(1979~1985)<sup>5)~11)</sup>等の研究事例がある。

本調査地域周辺では、手取層群と一括されているジュラ紀~白亜紀の堆積岩を主とする地層が飛騨片麻岩類の上に不整合に載り、西は高原川から東は有峰湖周辺に至る広い地域を占めて分布している。また、跡津川断層と茂住祐延断層が、ほぼ WSW-ENE 方向に走り、調査地域は茂住祐延断層の西端にあたる(図 2.1.1)<sup>12)</sup>。

調査地域内では、主に飛騨片麻岩類と手取層群が分布し、地表では飛騨片麻岩類が手取層群の上に横山衝上断層でのし上げている。神岡鉱山茂住坑における坑道調査やボーリング調査の結果からは、本地域の地下深部では、飛騨片麻岩類の上に不整合で手取層群が載っている<sup>11)</sup>。

###### (b) 飛騨片麻岩類

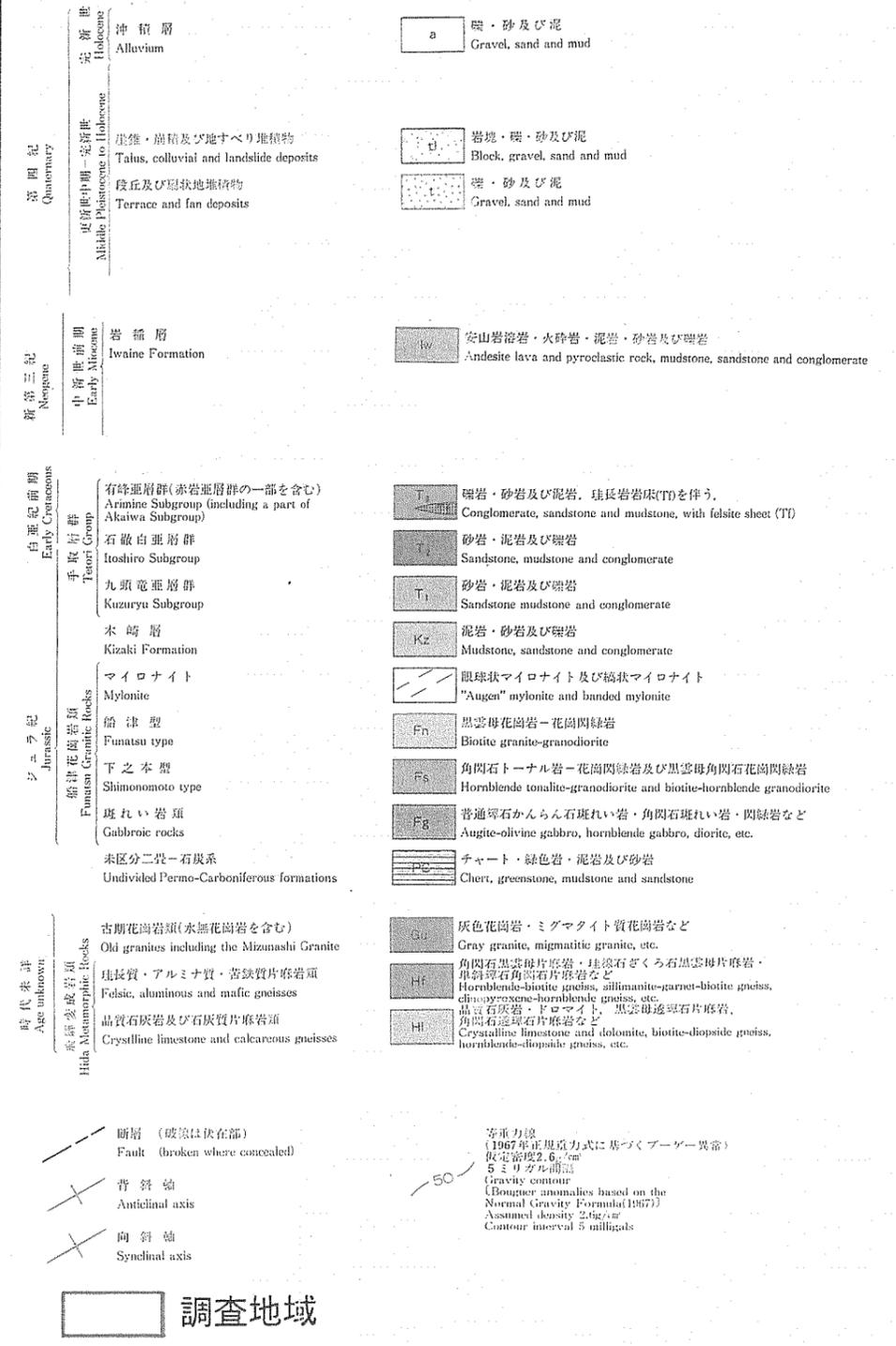
飛騨片麻岩類は、本調査地域の南部で横山衝上断層の上盤側に広く分布する<sup>2)</sup>。これらは、角閃石片麻岩、黒雲母片麻岩、眼球状片麻岩等の片麻岩類及び結晶質石灰岩等から構成される。本地域の横山衝上断層付近の片麻岩類は、マイロナイト化を強く受けていて、結晶質石灰岩は細粒化している。図 2.1.1 では、マイロナイト化した片麻岩類は、船津花崗岩類の眼球状マイロナイトとされている。

###### (c) 手取層群

調査地域の手取層群としては、下位から石徹白亜層群に対比されるジュラ紀後期~白亜紀前期の長棟川累層、赤岩層群に対比される白亜紀前期の跡津川累層が分布する<sup>13)</sup>。

長棟川累層は下位から庵谷峠礫岩層、猪谷互層に区分され、両者は漸移関係にある。庵谷峠礫岩層は、基盤岩の飛騨片麻岩類の上に不整合で載る基底礫岩を主とした礫岩層

凡 例



地質調査所 (1988)

図 2.1.1 調査地域周辺の地質図

である。主として拳大から人頭大の花崗岩や、片麻岩の円礫ないし亜角礫からなる無層理塊状の岩体を形成している。猪谷互層は、庵谷峠礫岩層を整合に覆う砂岩・頁岩の互層からなる厚い地層である。全般に砂岩（粗粒～中粒）が優勢で、その組成から花崗岩起源と考えられている。

跡津川累層は下位から南股谷礫岩層、和佐府互層に区分される。南股谷礫岩層は、礫岩の他に砂岩・頁岩を伴う。礫種は主に花崗岩、片麻岩で、石英斑岩や粘板岩等も含まれる。和佐府互層は本地域にみられる手取層群の最上位の地層で、砂岩と頁岩の互層からなり、礫岩・酸性凝灰岩を挟む。わずかに固結度が低いことを除けば、岩相は猪谷互層と同じである。

#### (d) 岩脈類

本地域周辺には、幅数  $m$  ないし数  $10m$  の岩脈として産する火成岩類と、手取層群の中にその地層面にほぼ平行に入ってくる貫入岩床としての火成岩類が、分布している<sup>2)</sup>。岩種としてはフェルサイト類（細粒石英斑岩・石英粗面岩を含む）、安山岩類、石英斑岩及び花崗斑岩が確認されている。

フェルサイト類は、塊状白色で岩脈ならびに貫入岩床として産する。細粒の斜長石及び石英を主とする石基の中に、石英及び斜長石の斑晶が含まれる。岩体は明らかに手取層群を切って貫入している。

安山岩類は石英安山岩、単斜輝石安山岩、含ざくろ石安山岩、粗面安山岩から構成される。塊状暗灰色ないし暗緑色で、岩脈状ならびに貫入岩床状として産する。貫入時期は手取層群堆積後である。茂住鉦山周辺に分布する安山岩質岩脈の年代については、55～65Ma（全岩の K-Ar 年代）という値が得られている<sup>14)</sup>。

石英斑岩及び花崗斑岩は岩相的にリソダイト類、石英斑岩類、アプライト質岩、斑状組織を示さない細粒花崗岩などがある。これらは、明らかに片麻岩類及び手取層群を切っている。

#### (e) 第四紀堆積物

調査地域の第四紀堆積物として、沖積層及び礫層が分布する。このうち沖積層は長棟川、茂住谷の現河床の平坦面を形成する堆積物よりなる。

礫層のうち、長棟川沿いの礫層については数段の段丘様の平坦面を形成している。拳大～人頭大の手取層群の礫よりなり、砂や粘土のレンズが挟まれた層理を示すことが多い。礫層中には崖錐性の角礫（巨礫）が含まれる。

また、茂住峠東から長棟川にかけての林道沿いには、風化が進み軟弱化したクサリ礫層の小分布が認められる。クサリ礫の特徴や分布域の海拔高度が高いことから、年代としては第四紀の前半または、それ以前の可能性がある。

## 2.1.2 跡津川断層系茂住祐延断層

富山・岐阜両県の県境付近には、日本で唯一クリープ運動が発見、観測されている跡津川断層系が存在する<sup>15)</sup>。本断層系は北から牛首断層、万波峠断層、茂住祐延断層、跡津川断層から構成される。茂住祐延断層は、牛首断層と跡津川断層というA級の活断層に挟まれて分布する確実度Ⅱ、全長23kmのC級活断層である<sup>16)</sup>。跡津川断層系の概要を表2.1.1に示す<sup>16)</sup>。

茂住祐延断層は、右横ずれセンスの跡津川断層系の一部であり、断層系中央部では跡津川断層の北側3~4kmをほぼ平行に走る。茂住祐延断層は、神通川支流の高原川右岸で神岡鉦山茂住坑のある茂住谷から東北東へ追跡される。茂住祐延断層は、本調査地域東方の長棟川支流金山谷の屈曲から右横ずれ500m、また西笠山西側尾根の屈曲から右横ずれ125mの変位を有するとされている<sup>16)</sup>。微小地震分布からは、跡津川断層北東端から茂住祐延断層が派生しているように見える<sup>17)</sup>。

調査地域は、茂住祐延断層の西側約1/3の範囲に相当する。前述の活断層の証拠となる地形的な特徴（尾根や谷の屈曲）は、本断層の中央部より東側に認められる。本調査地域内では、茂住谷の直線的な谷の形状から本断層の存在が推定されていて、これまでのところ、活断層と認定できる有力な地形的証拠（変位地形）や地質的証拠（第四紀層の変位・変形）は見つかっていない。また、跡津川断層系を対象にした微小地震の活動をみると、茂住祐延断層に関しては、特にその東側で地震活動が活発で、調査地域内では微小地震活動が不活発である<sup>17)</sup>。TEM法電磁探査による低比抵抗異常帯分布の結果は、複数の破碎帯が茂住谷底を走っていることを強く示唆しており<sup>18)</sup>、東側の断層の延長が茂住谷まで到達していると考えられる。

茂住祐延断層の西方（高原川以西）への連続性については、研究者の間でも意見の相違があり、これまでのところ統一された見解はない。竹村ほか<sup>19)</sup>は、茂住祐延断層は高原川以西へも連続し、茂住祐延断層の西方延長に当たる万波峠断層と連続した一連の断層であると考えている。茂住祐延断層と万波峠断層は、いずれも地形から北上がり右横ずれの断層とし、活動度はA~B、平均変位速度は60~90cm/千年で、右ずれ変位量は200~700m以上と推定している。特に顕著な河川の屈曲として、高原川が0.2~0.3km右横ずれに伴い屈曲していることを指摘している。活断層研究会<sup>16)</sup>は、茂住祐延断層と万波峠断層は一連の断層としているが、杉原（宮川）~茂住（高原川）間をつなぐ地形的な根拠が乏しいことから、2つの断層に分けて記載している。

## 2.2 地表の断層露頭・変位地形

本節では調査地域を西から東に向かって、①高原川周辺、②茂住谷周辺、③茂住峠周辺、④長棟川東岸の4つの地区に分け、各地区毎に地表調査で確認した断層露頭や、変位地形について報告する。露頭の観察に当たっては、表2.2.1に示す破碎度を定義し、記載を行

表 2.1.1.1 跡津川断層系の概要

断層名	牛首断層	茂住祐延断層	万波峠断層	跡津川断層
確実度	I	II	II	I
活動度	A~B	C	C	A
長さ	67 km	23 km (高原川~莫川)	7 km	60 km
走向	NE	ENE~NE	NE	ENE
傾斜	不明	不明	不明	垂直
断層変位 (変位基準)	上成隆起側	不明	不明	・北側隆起最大300m (有峰湖西岸の小起伏面の高度差)
	下成隆起側	・北側隆起最大15m (利賀川ダムの南の低位段丘陵層の基底)	・右ずれ500m (金山谷の屈曲) ・右ずれ125m (西笠山西側尾根の屈曲)	・右ずれ最大3000m (高原川の屈曲)

(活断層研究会, 1991)

った。本文中の露頭番号 (Loc. 1~Loc. 21) は、地表地質図 (付図-8) に表記した断層露頭や変位地形の番号に対応する。地表調査のルートマップ (1/2,500、1/5,000 及び 1/10,000) 等は付図として巻末に添付する。

表2.2.1 破碎度の定義

破碎度	凡例	分類基準	名称
I		○小断層により、ずれが生じている ○破碎により生じた細粒砂以下の物質の割合が全体の30%以下	断層角礫
II		○細粒物質の割合が全体の30%~70%	
III		○細粒物質の割合が全体の70%以上	断層ガウジ

注) 凡例中の記号は後述する図に適用される

## 2.2.1 高原川周辺

茂住祐延断層が高原川から西へさらに連続するのか、または、高原川が茂住祐延断層の末端部 (西端) になるのかは、活断層調査坑道内で観察される断層破碎帯や、ガイドウェーブ等の観測結果を解釈するために、是非とも明らかにしたい課題である。そこで、本調査では露頭状況の良好な高原川沿いを、縮尺 1/2,500 で地質調査を行い、既存の地質データを加えて上記の問題について検討した。地表調査の結果からは、高原川周辺では茂住祐延断層と思われる断層露頭を見つけることができず、茂住祐延断層の西方延長について結論は出せなかった。しかし、本地域の地質構造を解明するために、有効であると思われる断層露頭等を見つけたので、これらの特徴について報告する。

### (1) 高原川の茂住祐延断層通過位置

茂住祐延断層の西方延長については、地形的にみると茂住谷から高原川を横切って西方のソンボ谷に連続すると推定され、高原川での右横ずれ屈曲は約 200m と見込まれる<sup>19)</sup>。杉山トンネル出入口付近の高原川の屈曲が、この右横ずれに相当すると仮定し、調査を行ったが、断層露頭は見つからなかった。しかしながら、高原川沿いで岩盤の露出状況の悪い箇所があり、このような箇所を断層が通過する可能性は考えられる。

### (2) 茂住谷合流部南の断層露頭 (Loc. 1)

高原川右岸 (Loc. 1) の片麻岩中において、NE-SW 系の断層 (走向  $N70^{\circ} \sim 80^{\circ} E$ 、傾斜  $52^{\circ} \sim 75^{\circ} S$ ) 2 本 (間隔 12m) を確認した。北側から以下の断層が存在する。高原川左岸では、本断層の延長部は確認できなかった。

- ① 断層破砕帯、幅 40~90cm、走向  $N70^{\circ} E$ 、傾斜  $60^{\circ} S$ 、上盤側に幅 1~5cm の青灰色粘土脈を伴う (写真 2.2.1)。破砕帯は破砕度 I~II 程度で、所々原岩の構造を残している所がある。破砕帯内には、右ずれのドラッグを示すと考えられる非対象構造が認められるが、明瞭ではない。
- ② 断層破砕帯、幅 20~70cm、走向  $N80^{\circ} E$ 、傾斜  $52^{\circ} S$ 、下盤際に幅 2cm の灰白色粘土脈を伴う (写真 2.2.2)。この粘土脈のうち、幅 2~5mm は新鮮で連続性がよい。この新鮮で連続性の良い粘土は、最近の運動で形成された可能性がある。本破砕帯の下盤側にはネットワーク状に石墨様物質が充填する破砕部を認める。

これらの断層は、活断層調査坑道で確認した断層破砕帯 B の西方延長に相当する可能性がある。

### (3) 高原川屈曲部周辺の断層露頭 (Loc. 2, 3)

高原川左岸 (Loc. 2) の片麻岩類中に、幅約 1~2m (走向  $N40^{\circ} W$ 、傾斜  $60^{\circ} S$ ) の断層が存在する (写真 2.2.3)。本断層は固結していること、断層の走向・傾斜が茂住祐延断層の方向と、ほぼ直交することから、茂住祐延断層とは直接関係しない、古い時代の断層と考えられる。この断層は、高原川右岸に沿って連続し (Loc. 3)、断層の周辺はリモナイト化 (幅 2~3m) している。既存の鉱山資料によると、本断層は茂住坑内で鉱化作用に関連する北 20 号断層 (走向 NW-SE、傾斜  $45^{\circ} S$ ) の北西方延長と考えられる。

### (4) 高原川沿いの安山岩質岩脈 (Loc. 4, 5)

高原川の屈曲部の北側 (Loc. 4) では、幅 0.6~1.0m の安山岩質岩脈 (走向 NE-SE、傾斜  $80^{\circ} N$ ) が数本、緑泥石化した片麻岩類に貫入している。これら岩脈の貫入方向は、茂住坑内における安山岩質岩脈の一般的な貫入方向 (NE-SW~NNE-SSW 方向)<sup>20) 21)</sup> と調和的である。活断層調査坑道においても、断層破砕帯に同方向の安山岩質岩脈の貫入が認められる。また、跡津川断層の北側に発達する断層<sup>21)</sup> や、跡津川断層の真川の断層露頭<sup>22)</sup> でも断層破砕帯に安山岩質岩脈の貫入が報告されており、これらの事実と合わせると、安山岩質岩脈の貫入と断層活動とに何らかの関係があることが考えられる。

茂住谷が高原川に合流する地点付近 (Loc. 5) では、幅 1.5~2.0m の安山岩質岩脈 (走向 NW-SE、傾斜  $80^{\circ} S$ ) が、2 本平行して緑泥石化片麻岩に貫入する。これらの岩脈の走向・傾斜は、前述の茂住坑内の一般的な貫入方向とは異なり、北 20 号断層に近い走向傾斜を示している。



写真 2.2.1 高原川右岸の断層露頭 (Loc. 1 の①)  
 断層破碎帯の上盤側に青灰色の粘土脈が存在する  
 スケールは 1m

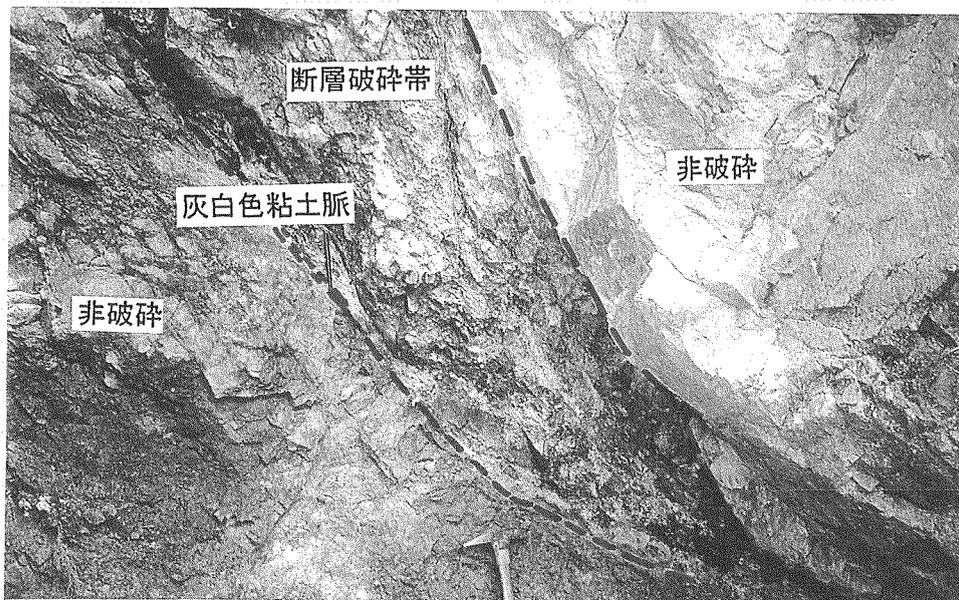


写真 2.2.2 高原川右岸の断層露頭 (Loc. 1 の②)  
 断層破碎帯の下盤側に幅 2cm の灰白色の粘土脈を伴う



写真 2. 2. 3 高原川右岸の断層露頭 (Loc. 3)

断層破碎帯の周辺がリモナイト化している

対岸の Loc. 2 に連続する

#### (5) 茂住谷合流部周辺 (Loc. 6, 7)

茂住谷が高原川に合流する地点では、数段の滝が存在し、茂住谷方向の急峻な谷が発達している。

旧国道にかかる茂住橋以東 (Loc. 6) では、茂住谷方向の割れ目の発達が顕著となる。急峻な谷は走向  $N70^{\circ} \sim 80^{\circ} E$ 、傾斜  $70^{\circ} \sim 80^{\circ} S$  の割れ目を弱面として発達し、高さ約 20m の滝を形成している (写真 2.2.4)。この割れ目の方向に貫入する安山岩質岩脈が 2 本 (幅 1.5~2m) 認められた。安山岩質岩脈と片麻岩類との境界部のスリッケンサイドにスリッケンライン (走向  $N45^{\circ} E$ 、傾斜  $60^{\circ} S$ 、落とし  $55^{\circ} SW$ ) が認められた。

茂住坑事務所下の河床 (Loc. 7) でも、茂住谷方向の割れ目の発達が著しい (幅 20m 間に 10 数本の割れ目を認める)。このうち、幅 50cm の断層ガウジを含む断層破碎帯南側境界部 (走向  $N60^{\circ} E$ 、傾斜  $85^{\circ} N$ ) のスリッケンサイド上では北落ちを示すスリッケンラインが認められた (写真 2.2.5)。

以上のように、茂住谷が高原川に注ぐ地点周辺では、谷は茂住谷方向の割れ目を弱面として、発達した組織地形を示している。

### 2.2.2 茂住谷周辺 (高原川~茂住峠)

#### (1) 片麻岩類分布地区

横山衝上断層の上盤側に位置する片麻岩類分布地区について、断層の通過が予想される山地斜面の変換点 (急傾斜から緩傾斜に変化する地点) や、茂住谷河床の緩傾斜面を中心に調査した。地表調査からは、断層露頭や活断層の証拠となる微地形は、確認できなかった。茂住谷河床の緩傾斜面は、主に現地性の崖錐から構成される。

#### (2) 茂住谷北岸斜面の手取層群分布地区 (Loc. 8)

海拔 970m 付近の緩斜面 (茂住谷河床より約 230m 上 : Loc. 8) は、手取層群の砂岩・頁岩互層 (砂岩優勢) の差別侵食により生じた組織地形である。緩斜面は、南西方向に緩く傾く砂岩・頁岩互層の層理面に沿って、形成されている。本地区の沢沿いには、同様な成因を有する階段状の段差地形が発達し、何段もの滝を形成している。

地表調査の範囲内では、茂住谷北岸の手取層群分布域に見られる緩斜面の多くは、南西方向に緩く傾斜する砂岩・頁岩互層の組織地形であり、山地斜面の変換点は、断層通過位置を示していなかった。

#### (3) 鉛谷の不整合の露頭 (Loc. 9)

茂住谷南岸海拔約 690m 地点 (Loc. 9) において、手取層群の礫岩と飛騨片麻岩類が、ほぼ鉛直の境界面で接する露頭を確認した (写真 2.2.6 及び写真 2.2.7)。手取層群の礫岩は、拳大から人頭大の円礫を多量に含み、直立する覆瓦構造が明瞭に認められる。



写真 2.2.4 茂住谷の安山岩質岩脈と同方向の割れ目群 (Loc. 6)  
安山岩質岩脈の部分を沢が流れている

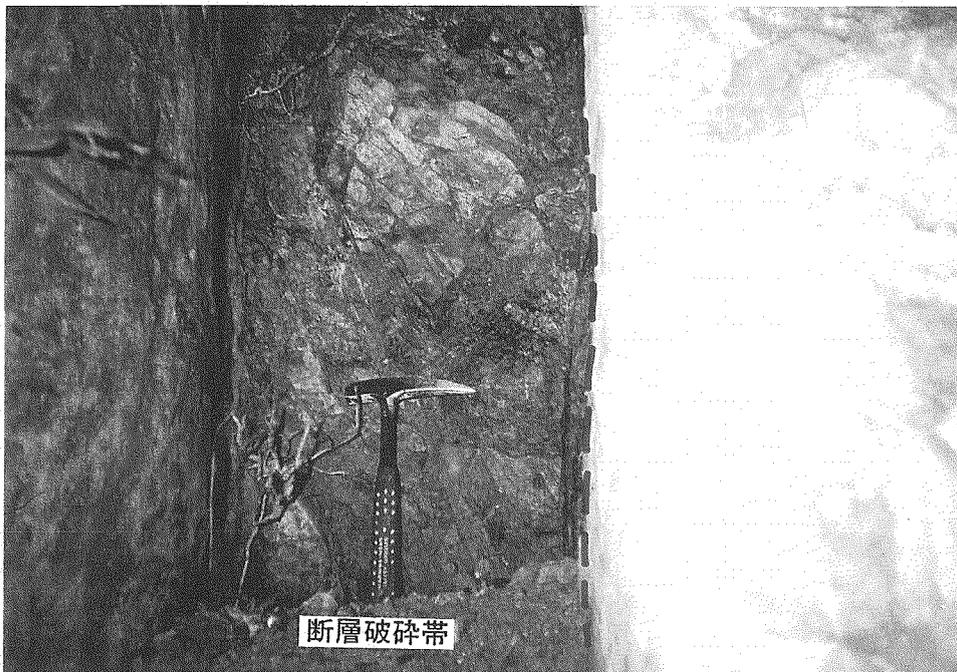


写真 2.2.5 茂住谷の断層露頭 (Loc. 7)  
ガウジを伴う断層破碎帯が侵食されて削られている



写真 2.2.6 鉛谷の不整合の露頭 (Loc. 9)  
 飛驒片麻岩類と手取層群の礫岩が不整合で接している



写真 2.2.7 鉛谷の手取層群の礫岩 (Loc. 9)  
 手取層群の円礫の形状をマジックで書き込んでいる  
 礫の長径はほぼ垂直方向を示している

手取層群の礫岩と飛騨片麻岩類の境界面は、走向  $N45^{\circ}\sim 65^{\circ}W$ 、傾斜  $90^{\circ}$  を示している。両者の境界面は固着・漸移し、顕著な破碎部や鉍化部は存在しない。これらの観察結果から、本露頭は飛騨片麻岩類と手取層群の不整合面が、断層運動等により直立したものと判断される。

神岡鉍山の坑内地質データによれば、本地点のほぼ直下に位置する海拔 350m 準の坑道で、NW-SE 走向、 $60^{\circ}SW$  傾斜の断層が認められ、本断層を境にして上盤側の飛騨片麻岩類と下盤側の手取層群とが接している（付図-9）。この断層は、既存の資料からは鉛谷断層と称されているが、横山衝上断層が、茂住祐延断層の右横ずれに伴い引きずられて走向・傾斜の変化した部分の可能性がある。この断層が横山衝上断層であるならば、坑内で確認した断層の走向・傾斜から、地表では、本不整合の露頭（Loc. 9）の東側を横山衝上断層が、通過することになる。実際に、この不整合の露頭から約 100m 以内の手取層群（砂岩・頁岩互層）は、東へ急傾斜する構造を示しており、断層活動に伴う西側上昇の引きずり構造と推定される。神岡鉍山の坑内地質データ（-500m 準及び同準からの金属鉍業事業団による下向試錐データ<sup>6)</sup>）によれば、手取層群と片麻岩類との不整合面は、横山衝上断層を境として約 500m の上下変位が推定される（付図-10）。

横山衝上断層の活動時期としては、断層破碎帯内部のアパタイトのフィッシュントラック年代測定から約 40Ma という値が得られている<sup>23)</sup>。この年代は断層の再活動の可能性があるが、いずれにしろ横山衝上断層の活動は、約 40Ma まで続いていたものと考えられる。

ちなみに、茂住鉍床で従来から知られている断層は、NW-SE 系 ( $N40\sim 70^{\circ}W$ ) と N-S 系 ( $N0\sim N20^{\circ}E$ ) と NE-SW 系 ( $N40\sim 70^{\circ}E$ ) の 3 種類がある<sup>20)</sup>。このうち、NW-SE 系と N-S 系が鉍化作用に密接に関連しており、両者は共役パターンで発達したような分布を示す。一方、NE-SW 系は広い破碎帯を有し、鉍床を転移させることから、鉍化作用後の構造運動に関係していると考えられている。

#### (4) 茂住峠北西 500m 地点の断層 (Loc. 10)

茂住峠北西 500m 地点（林道から北に約 100m 地点・Loc. 10）、西南西に流れる谷の上流部で幅 1.0~1.5m の断層破碎帯（破碎度 I~II、走向  $N80^{\circ}E$ 、傾斜  $85^{\circ}N$ ）が認められる（写真 2.2.8）。本破碎帯は手取層群の砂岩中に発達し、破碎帯の南側の盤際には水平に近いスリッケンライン ( $10^{\circ}\sim 20^{\circ}W$ ) が認められる。

### 2.2.3 茂住峠周辺（茂住峠～長棟川）

茂住峠から長棟川までの約 2km の間に、閉塞丘を伴う系統的な右横ずれ変位地形と陥没構造、谷の右横ずれ屈曲、段丘上の礫層の傾動と断層池が、西南西-東北東方向に断続的に認められる。



写真 2.2.8 茂住峠北西の断層露頭 (Loc. 10)  
 幅 1~1.5m の断層破碎帯 (破碎度 I~II)  
 南側の盤際には、水平に近いスリッカンラインが存在する



写真 2.2.9 茂住峠東側の不整合の露頭 (Loc. 11)  
 最大で人頭大の礫を含むクサリ礫層が風化した砂岩・頁岩互層 (手取層群)  
 の上に不整合でのる

#### (1) 茂住峠東側 (Loc. 11, 12)

既存の調査から茂住峠を茂住祐延断層が通過すると推定されたので、茂住峠周辺の沢及び林道を中心に地質調査を行った。調査の結果、第四紀堆積物と考えられる礫層の存在やその傾動、手取層群を切る断層群、及び右横ずれを示す変位地形（沢の系統的な横ずれや閉塞丘）が認められた。

##### (a) 第四紀層の層序

Loc. 11 では、基盤は風化した手取層群の砂岩・頁岩互層からなり、これをクサリ礫層、細礫層、崖錐堆積物が、いずれも不整合関係でおおっている。

##### ① クサリ礫層

手取層群の砂岩・頁岩互層を覆うクサリ礫（軟弱化礫）層で、層厚は3m以上に達している（図 2.2.1 及び図 2.2.2）。ここでは、茂住峠東側の林道沿いに小丘をなし分布するものを模式地とした（写真 2.2.9）。クサリ礫の上限を堆積面とすれば、その海拔は約1,050m（付近の谷の河床からの比高約20m）に相当する。この礫層は東側（河川の下流側）へ緩やかに傾斜し、長棟川までの林道沿いに小露頭が認められる。クサリ礫層は、茂住峠（海拔約1,065m）に近いこと風化礫となっているのか、あるいは、高位段丘に相当する古い段丘のために軟弱化しているのか、現在のところ不明である。しかし、年代としては第四紀の前半またはそれ以前の可能性がある。

礫種は手取層群の砂岩>頁岩（歪円～歪角礫）で構成され、片麻岩類は認められない。礫径は小礫～中礫（まれに人頭大）である。基質は主として砂、細礫よりなり一部で層理が認められる。また、稀ではあるがレンズ状の粘土質物質が、クサリ礫層下部に認められる。礫の覆瓦構造から北西方向が供給源と思われる。

##### ② 細礫層

細礫層はクサリ礫層からなる小丘の北西、林道の側溝沿いに小分布する。風化した手取層群の砂岩・頁岩層を不整合関係で覆っている（図 2.2.1 及び図 2.2.2）。不整合面は北西に緩く傾斜している。クサリ礫層との関係は十分に把握できていないが、クサリ礫層より上位の礫層と思われる。

##### ③ 崖錐堆積物

崖錐堆積物は沢沿いに広く分布しており、堆積物の主体は、人頭大以上の砂岩礫を含む砂礫であるが、細粒基質には褐色を呈する粘土を多く含んでいる。特に地すべりの直下やその下流部では、地すべり起源と思われる粘土が多く見られ、崖錐堆積物中に塊状～レンズ状を呈して認められる。クサリ礫層、細礫層との関係は不明である。

##### (b) 断層露頭

Loc. 11 では、細礫層の基盤である手取層群の砂岩・頁岩互層中に、E-W～ENE-WSW 方向を示す粘土脈を伴う断層露頭が6m間に3本認められた（図 2.2.1 及び図 2.2.2）。北側

から粘土脈の幅、走向・傾斜を以下に示す。

- ① 黒色粘土脈、幅 3~10cm、走向 N75° E、傾斜 69° N
- ② 白色~黒色粘土脈、幅 5~15cm、走向 N74° E、傾斜 68° N
- ③ 白色~灰色粘土脈、幅 30cm、走向 N82° E、傾斜 67° N (写真 2.2.10)

③の粘土脈には不明瞭であるが、右横ずれを示す非対象構造が見られる。これらの断層露頭は、後述する茂住祐延断層通過位置から南へわずか 8~14m しか離れていないこと、E-W~ENE-WSW 方向を示すことから、主断層である茂住祐延断層から分岐した派生断層と推定される。これらの断層に伴う変位地形は認められない。

#### (c) 変位地形

Loc. 12 の茂住峠東側の沢では、以下の右横ずれ変位を示す微地形が確認された (図 2.2.1)。

- ① N-S 方向の 4 つの小沢 (a~d) がいずれも系統的に上流側 (西側) に 2~5m 屈曲している。
- ② 一部の小沢には閉塞丘 (c の南) が認められ、その上流側 (北側) に湿地 (東西約 10m、幅 1~4m) が発達している。

微地形から推定される活断層の方向は全体として東西系であるが、茂住峠から東に ESE~E~ENE と緩やかに屈曲している。

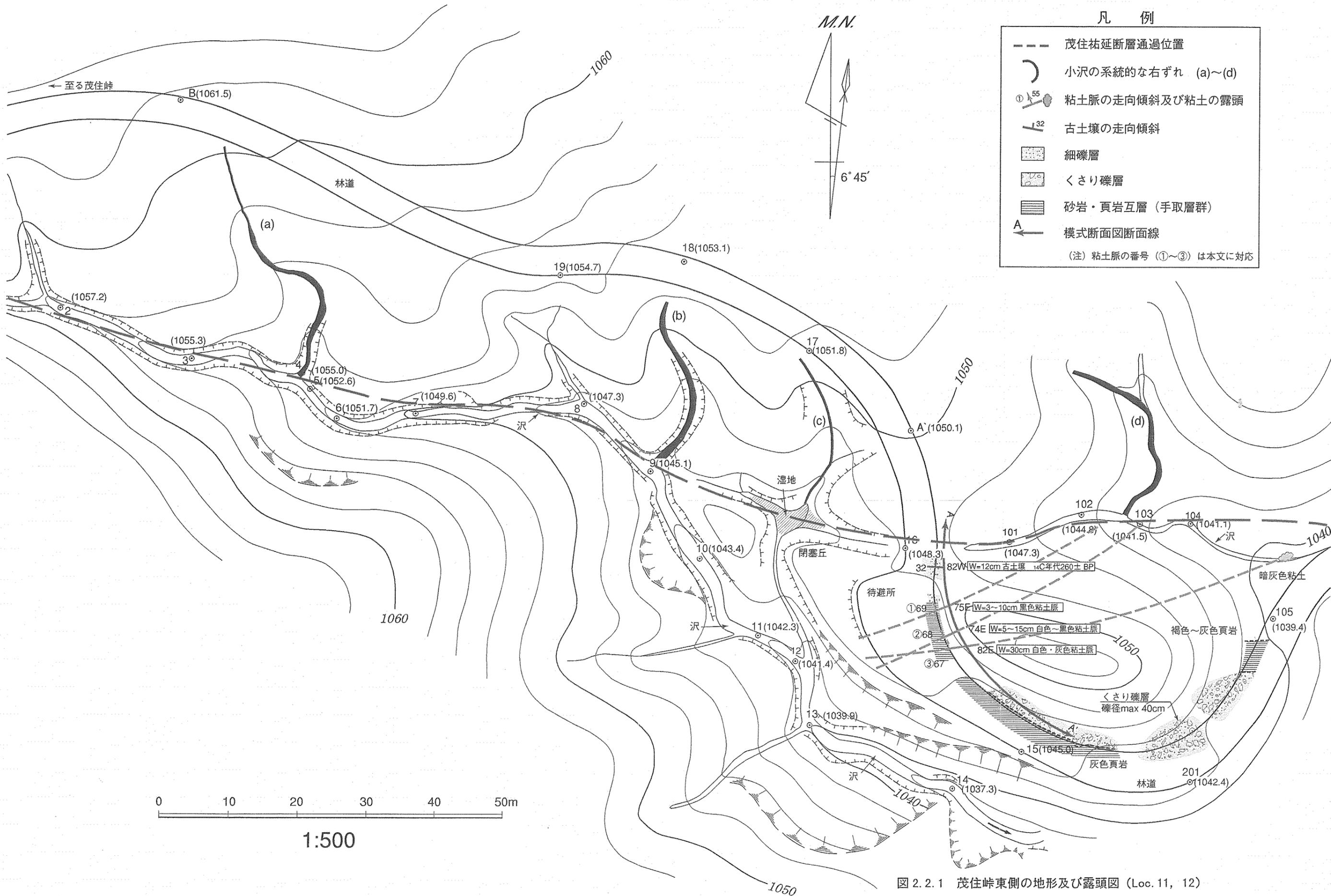
湿地の成因を考察すると、右横ずれ断層の屈曲部にプルアパート開口部 (陥没部) が形成され、そこに湿原を構成する細粒物質が堆積したと推定される。

#### (d) 第四紀堆積物の地質構造と断層活動

上記の変位地形より推定される茂住祐延断層通過位置周辺では、細礫層が北傾斜を示しており、この中には厚さ 10cm 程度の古土壌が存在する (図 2.2.2)。古土壌は走向 N82° W、傾斜 32° N と北に傾斜している。古土壌が傾斜する原因としては、断層活動による陥没地斜面に生成された、或いは、古土壌生成後に断層活動により変位したと推定される (写真 2.2.11)。古土壌の <sup>14</sup>C 年代測定結果は 260 年 B.P. を示しており、茂住祐延断層の最新活動が、1858 年の安政飛越地震に相当する可能性がある (表 2.2.2)。

#### (2) 茂住峠東 500m の右ずれ谷の断層露頭 (Loc. 13)

南流する谷が S 方向から WSW 方向に転換する地点 (Loc. 13) で、手取層群の頁岩中に幅 1~1.5m の断層破碎帯を認めた (写真 2.2.12)。本破碎帯では、頁岩の原岩構造を残すものの赤褐色粘土を含んでいる。周辺の黒色頁岩では、直立した板状節理 (走向 N90° E、傾斜 80° S) が発達し、頁岩の表面はリモナイト化が、顕著で弱い硫黄臭を認める。さらに上流数十 m にわたって、断層破碎帯 (幅数 m 程度が数箇所) が認められる。仮に、断層が南流する谷を上流側に屈曲させているとすれば、地形的な右横ずれ累積変位は、約 500m と推定される。本断層は、茂住祐延断層からの派生断層の一つと考えられる。



- 凡 例
- 茂住祐延断層通過位置
  - ⤵ 小沢の系統的な右ずれ (a)~(d)
  - ① 55 粘土脈の走向傾斜及び粘土の露頭
  - 32 古土壌の走向傾斜
  - 細礫層
  - くさり礫層
  - 砂岩・頁岩互層 (手取層群)
  - A 模式断面図断面線
- (注) 粘土脈の番号 (①~③) は本文に対応

図 2.2.1 茂住峠東側の地形及び露頭図 (Loc. 11, 12)

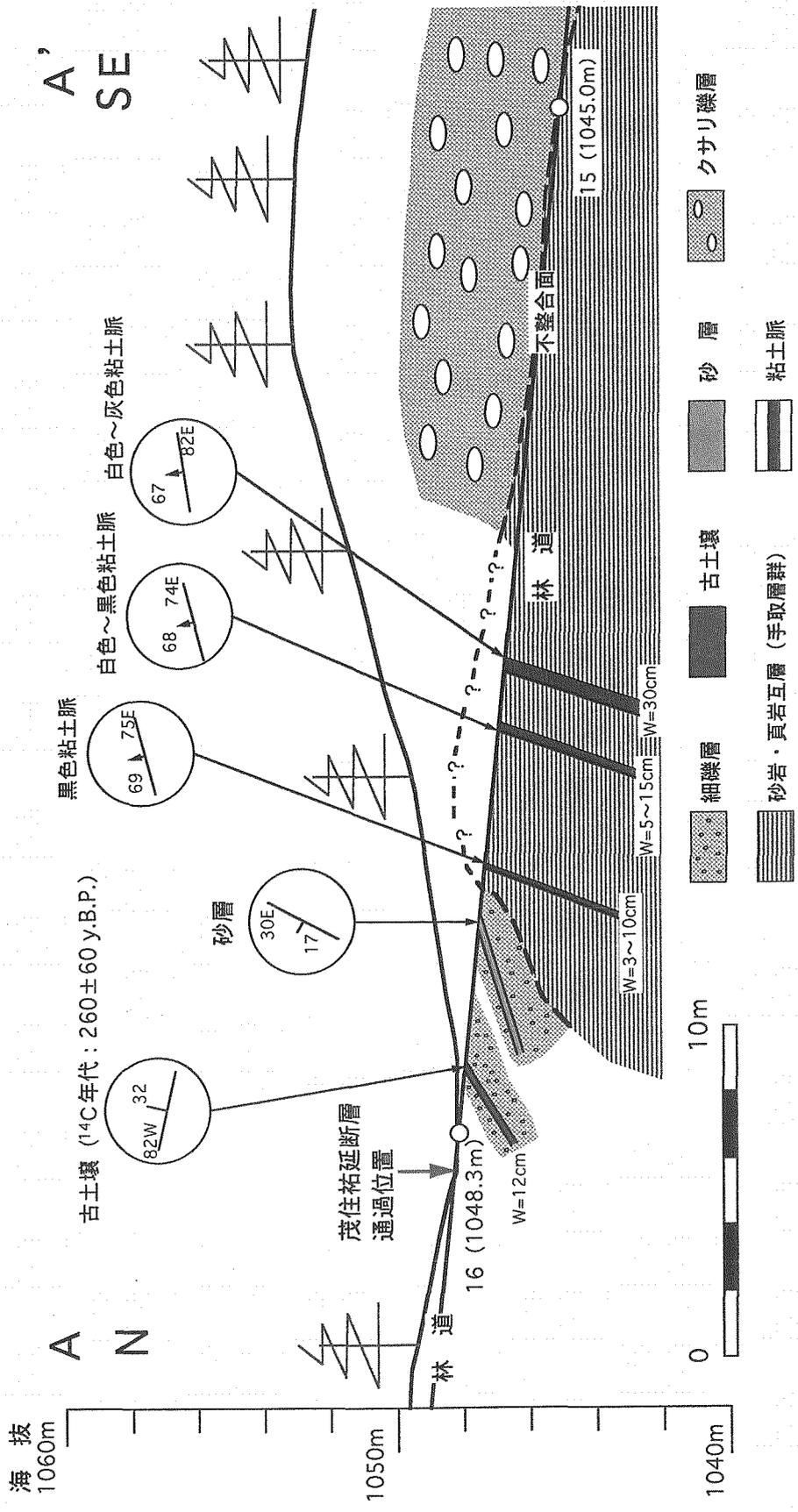


図 2.2.2 茂住峠東側林道沿いの模式断面図 (Loc. 11)

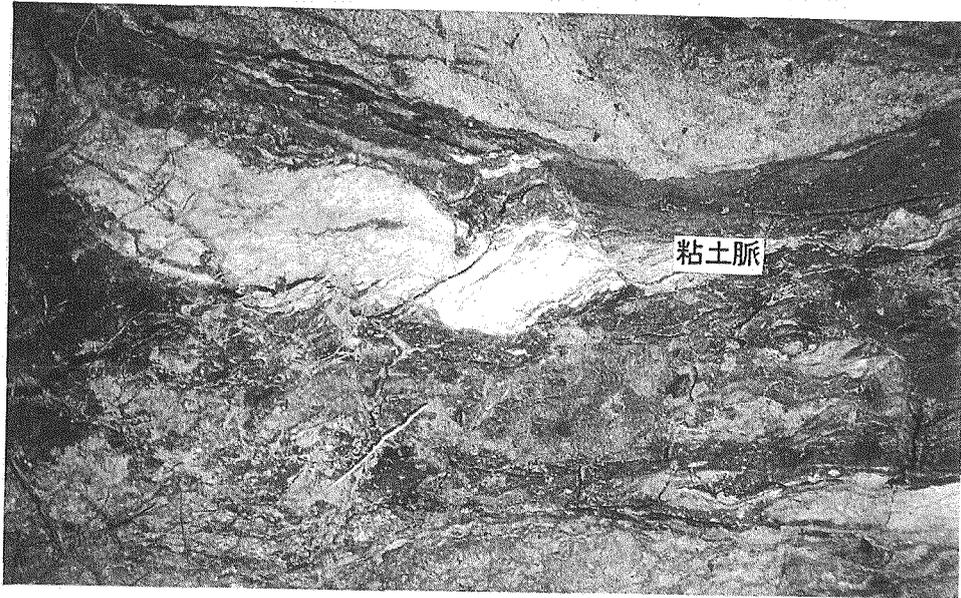


写真 2. 2. 10 茂住峠東側の断層露頭 (Loc. 11)  
本文中の③の粘土脈



写真 2. 2. 11 茂住峠東側の古土壤 (Loc. 11)  
林道脇の側溝で見られる  $32^{\circ}$  北に傾斜する古土壤  
 $^{14}\text{C}$ 年代測定で  $260 \pm 60\text{y. B. P.}$  の年代が得られた

表 2.2.2  $^{14}\text{C}$  年代測定結果

試料名	試料種	採取場所	$^{14}\text{C}$ 年代 (y BP)	測定方法
01	土 壤	茂住峠東側	260±60	シンチレーションカウンターによる $\beta$ 線計測法
02	木 片	長棟川西岸	6190±70	加速器質量分析
03	土 壤	長棟川西岸	6480±90	シンチレーションカウンターによる $\beta$ 線計測法
04	木 片	長棟川西岸	6360±100	シンチレーションカウンターによる $\beta$ 線計測法

注)  $^{14}\text{C}$  の半減期は5568年を利用している。

測定は(株)地球科学研究所で実施。



写真 2.2.12 茂住峠東 500m の断層露頭 (Loc. 13)

### (3)長棟川西岸海拔 1,005m 地点の段丘上の礫層の傾動 (Loc. 14)

本地点周辺は、現在の長棟川河床レベルから約 70m 高位に位置し、海拔 1,000~1,010m の小規模な段丘からなる (Loc. 14)。本段丘の南東端では、北傾斜 (走向 N63° W、傾斜 45° N) の礫層の露頭がある (写真 2.2.13 及び図 2.2.3)。礫層は、数~数 10cm 程度 (拳大) の円礫と、それを充填する砂礫からなり、数 10cm~1m 程度の亜角礫状の現地性崖錐礫も含まれる。円礫・亜角礫とも手取層群の砂岩からなり、片麻岩類や花崗岩類の礫は認められない。このため、本礫層は長棟川本流の礫層とは異なり、断層運動に伴い生じたイベント堆積物の可能性もある。

礫層中には、腐植土層とその見かけ下位に位置するシルト~粘土層の組み合わせからなる 2 枚の薄層 (最大幅 20cm) が存在する。この腐植土層中の木片や腐植土の <sup>14</sup>C 年代測定を行った結果、約 6,200~6,400 年 B.P. という年代が得られた (表 2.2.2)。

礫層が北に 40° (最大 70°) 傾斜することから、このような傾動した礫層は、断層運動により相対的に南側が上昇して、形成されたものと考えられる。また、露頭で確認できた範囲では、礫層は少なくとも垂直方向に 2m 以上引きずられており、礫層堆積後、約 6,400 年の間に少なくとも垂直方向に 2m 変位していることがわかる。垂直変位を 2m と仮定し、平均変位速度を求めると 0.3m/千年となり、縦ずれ断層としての活動度は B 級に相当する。

### (4)長棟川西岸海拔 1,010m 地点の断層池 (Loc. 15)

Loc. 14 の北東 70~150m の範囲 (海拔 1,005~1,010m) は、緩やかな凹凸地形からなっており、最も東部に池 (直径約 25m、長径は NE-SW-SW 方向) が存在し、そこが水源となり南西方向 (長棟川からみれば上流方向) に水が流れている。その水系は、複雑 (NW-SE-SE 方向と NE-SW-SW 方向との組合せ) で、湿地 (NE-SW-SW 方向に約 50m) が発達し、最終的には Loc. 14 の東方約 100m 地点より長棟川に向け、急斜面を落下している (図 2.2.4)。集水域が狭いため水量は乏しい。Loc. 14 の傾動する礫層の北東延長に位置すること、凹凸地形及び沢の方向性、沢の上流側への屈曲から、断層活動による変位地形と考えられる。

### (5)長棟川右岸の茂住祐延断層通過位置 (Loc. 16)

長棟川右岸の地点 Loc. 16 では、手取層群中に幅 15~20cm の粘土を伴う断層ガウジ (走向 N35° E、傾斜 87° S) が認められる。断層ガウジはその構造から 2 つに分けられ、下盤側 (北側) 8~10cm は亜角礫~亜円礫で、礫径最大 3cm (平均 0.5~1.0cm) の礫を 10% 含む灰色の断層ガウジからなり、上盤側 7~10cm は、砂岩の源岩の構造を比較的良く残す断層ガウジからなる (写真 2.2.14 及び図 2.2.5)。



写真 2. 2. 13 長棟川西岸の段丘上の傾動する礫層 (Loc. 14)

図 2. 2. 3 を参照

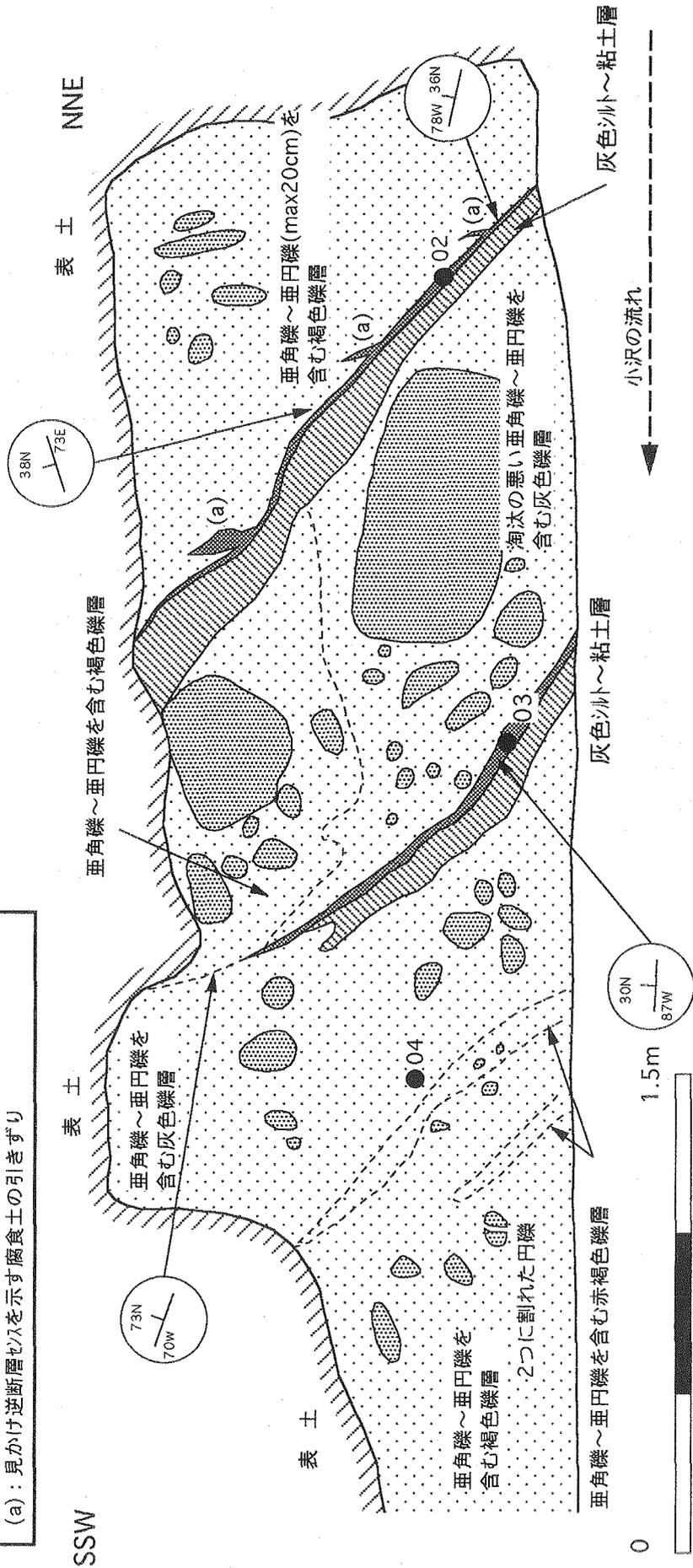
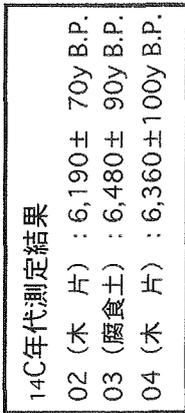
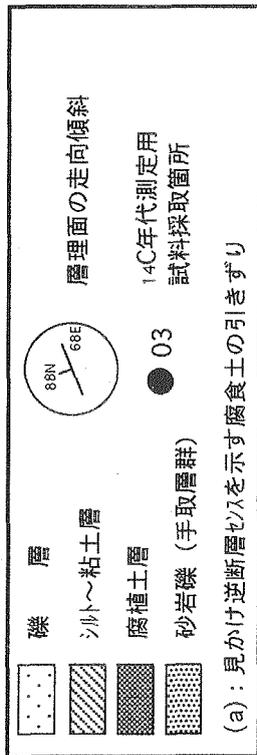


図 2.2.3 長棟川西岸の段丘上の傾動する礫層 (Loc. 14)

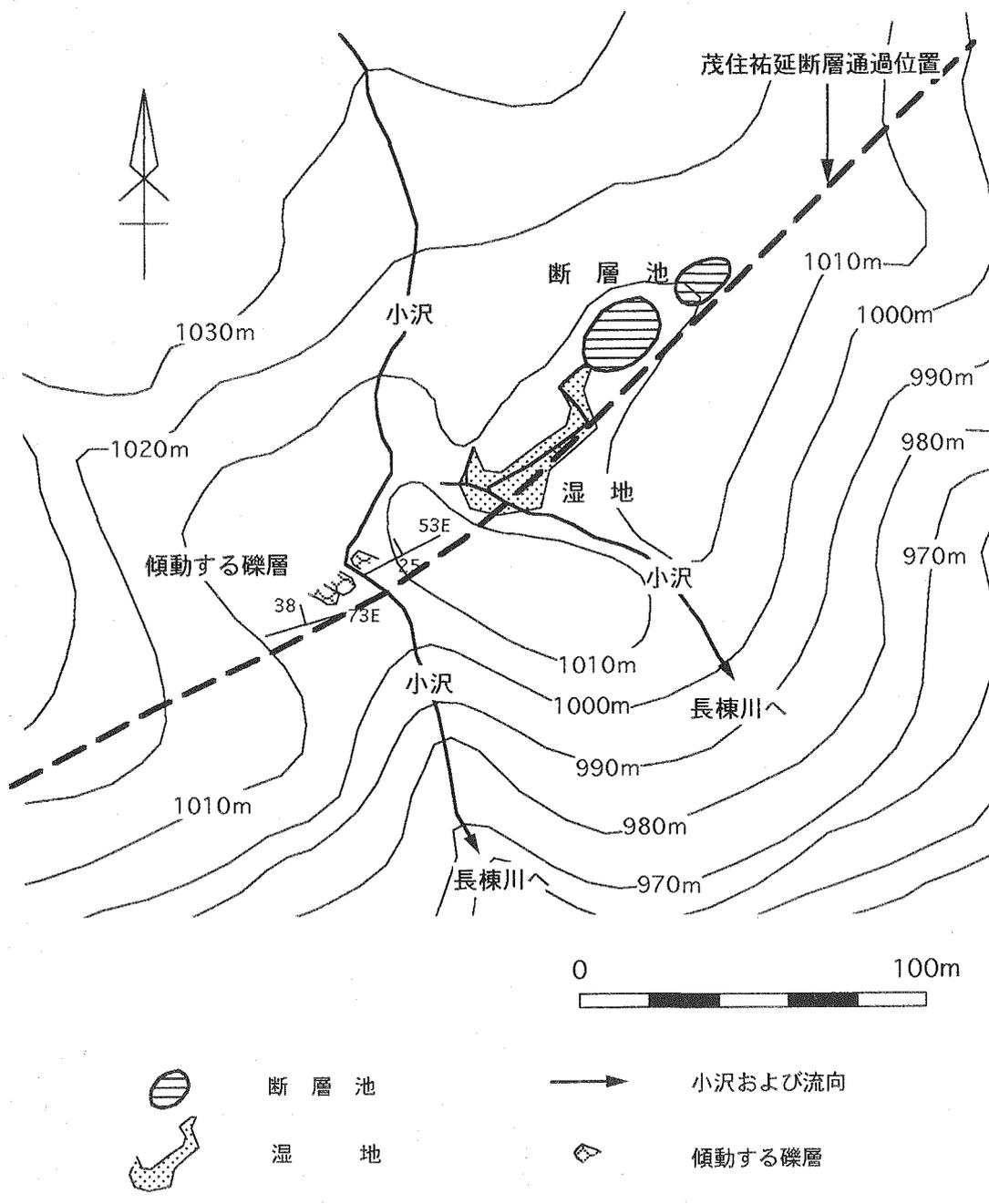


図 2.2.4 長棟川西岸傾動する礫層と断層池の関係 (Loc. 14, (15), 14・15)



写真 2.2.14 長棟川右岸の断層露头 (Loc. 16)

図 2.2.5 を参照

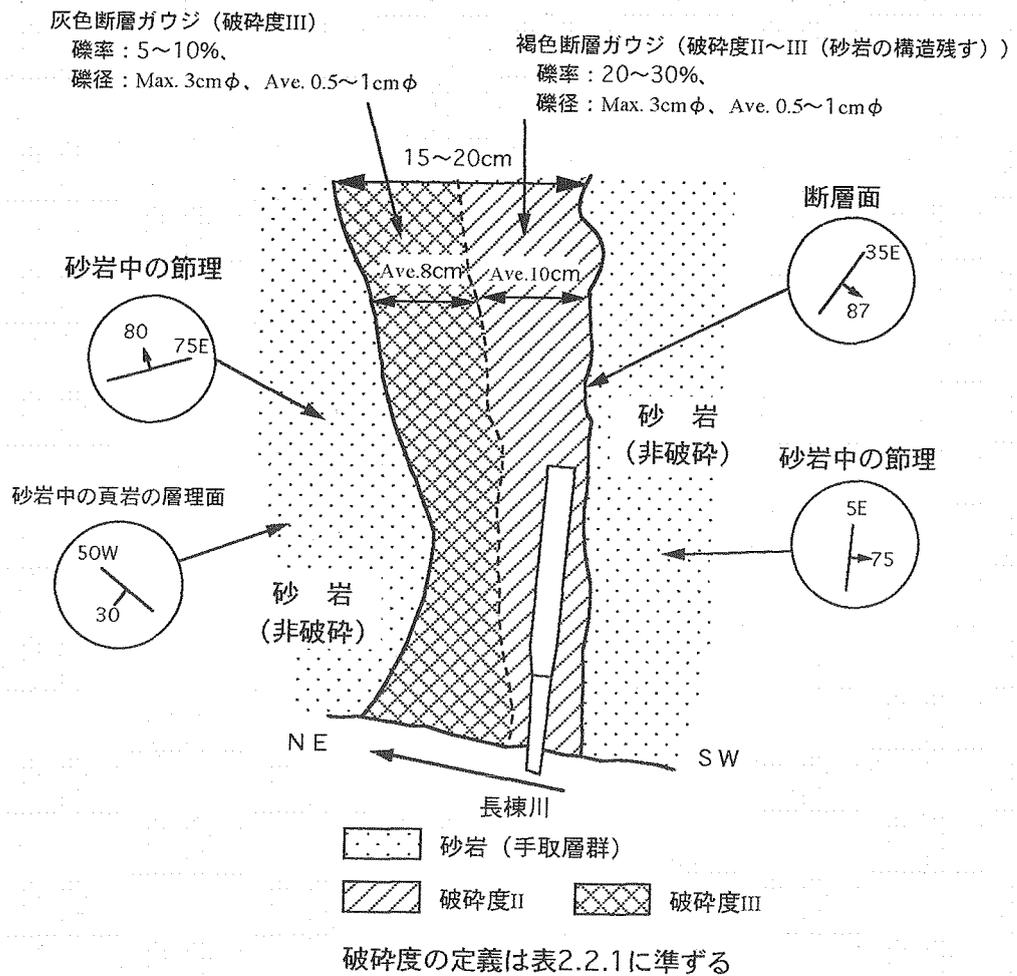


図 2.2.5 長棟川右岸の断層露头 (Loc. 16)

本断層ガウジの両盤は堅固な砂岩・頁岩の互層からなり、北側の砂岩・頁岩互層には、走向  $N75^{\circ}E$ 、傾斜  $80^{\circ}N$  の節理群が、 $20\sim 30\text{cm}$  間隔で発達している。それ以北では露岩が露出していない。本断層ガウジは茂住祐延断層の派生断層と考えられる。

本断層露頭の南側約  $1.5\text{m}$  には最大幅  $1.2\text{m}$ 、走向南北で、ほぼ垂直な傾斜を示す断層ガウジがあるが、上述の NE-SW 系の破碎帯と N-S 系の破碎帯の関係については、露頭状況が悪く確認できなかった。

#### 2.2.4 長棟川東岸（長棟川～広川）

長棟川から広川までの約  $1\text{km}$  の間に、茂住祐延断層の活動を示唆する小地溝、粘土帯を伴う地すべり、閉塞丘を含む右横ずれ微地形、南北尾根の右横ずれ屈曲、さらに断層露頭が西南西-東北東方向に連続して認められる。

##### (1) 長棟川東岸海拔 $940\text{m}$ 地点の小地溝 (Loc. 17)

海拔約  $940\text{m}$  の北西向き斜面 (Loc. 17) には、 $N70^{\circ}E$  方向の直線的な小地溝 (幅約  $10\text{m}$ 、深さ  $1.5\text{m}$ ) が、長さ  $50\text{m}$  以上にわたり連続する (写真 2.2.15)。写真は小地溝の延長方向である西南西方向から東北東方向に小地溝を撮影したもので、人物のいる位置が小地溝の底にあたる。

本地点の西南西約  $120\text{m}$  の林道と北向き小沢の合流部付近にも、小地溝 (幅約  $1\text{m}$ 、深さ約  $0.5\text{m}$ 、長さ約  $10\text{m}$ ) が存在する。

##### (2) 長棟川東岸鞍部北西斜面の地すべり (Loc. 18)

長棟川東方の鞍部に至る北西斜面では、手取層群と貫入岩 (フェルサイト) との境界に沿って幅数  $\text{m}\sim 10\text{m}$  規模の地すべり地塊が、ENE-WSW 方向に約  $120\text{m}$  連続する。このうち Loc. 18 の地すべり中には、灰白色～青灰色の粘土帯が認められる (写真 2.2.16)。粘土帯の幅は  $2\text{m}$  以上で、走向  $N75^{\circ}E$ 、傾斜  $78^{\circ}S$  を示す。粘土の母岩はフェルサイトで、粘土中には方解石脈 (幅  $5\text{cm}$ 、走向  $N77^{\circ}W$ 、傾斜  $85^{\circ}S$ ) や、多量の黄鉄鉱の鉱染が認められる。粘土帯の位置や走向・傾斜から、本粘土帯は茂住祐延断層と考えられるが、粘土中に多量の黄鉄鉱や南北方向の方解石脈が、存在することから、本地点の南東約  $1.2\text{km}$  に位置する長棟鉱山 (南北系の脈状鉛亜鉛鉱床) の鉱化作用に関係した粘土化変質の可能性もある。

##### (3) 長棟川東岸鞍部付近の閉塞丘 (Loc. 19)

本鞍部は茂住祐延断層に相当する主要リニアメントの通過位置であり、地形的には南北系やせ尾根の右横ずれ (約  $100\text{m}$ ) が明瞭に読みとれる場所である。

本鞍部の西方直下 (Loc. 19) では、北北西へ流れる小沢が上流側 (西南西方向) に  $90^{\circ}$



写真 2.2.15 長棟川東岸の小地溝 (Loc. 17)

小地溝の軸方向から撮影

小地溝の横断面が見える (赤色の点線が地表面)



写真 2.2.16 長棟川東岸北西斜面の地すべり中の粘土 (Loc. 18)

粘土中に多量の黄鉄鉱や方解石脈が認められる

方向を変え、閉塞丘に近い微地形を形成している（図 2.2.6）。小沢の屈曲量からは、右横ずれ約 4m の変位が推定される。このような小沢の上流側への屈曲は、断層運動に伴う閉塞丘と考えられるが、本地点の周辺では同様の屈曲を伴う小沢は認められない。

#### (4)長棟川東岸鞍部東側の断層露頭 (Loc. 20, 21)

右横ずれ鞍部の東を広川にむけ北流する地点 Loc. 20（写真 2.2.17）では、幅約 1.5m の断層破碎帯が認められる（写真 2.2.18）。この破碎帯は手取層群の砂岩中に発達し、灰白色粘土（幅 15cm、走向 N73° E、傾斜 90°）を伴う。地すべり堆積物に覆われるため破碎帯の全容は確認できないが、本断層露頭の約 5m 南側では弱破碎帯があり、さらにその南側約 10m の地点では、砂岩中に亀甲状の割れ目（間隔数 cm～10 数 cm）が発達する露頭が存在する。本断層周辺の破碎度の分布を図 2.2.7 に示す。位置的には、この破碎帯の露頭が茂住祐延断層の通過位置に相当すると思われる。

上記地点 Loc. 20 の南約 200m の地点 (Loc. 21) では、幅 1～1.5m の粘土化した断層破碎帯（走向 N68° E、傾斜 72° N）が存在する（写真 2.2.19、写真 2.2.20 及び図 2.2.8）。粘土化破碎帯と非破碎の母岩（砂岩）との南側の境界には、幅 0.5cm の白色粘土中にスリッケンサイド（走向 N68° E、傾斜 72° N）が認められる。スリッケンサイド上のスリッケンラインは、ほぼ水平方向を示す。

### 2.3 坑内地質

茂住祐延断層の地下深部の延長は、活断層調査坑道、金属鉱業事業団により実施された長棟精密調査や、神岡鉱山の自主探鉱による坑道掘削及び坑内ボーリングで確認されている。本節では、坑内で確認された茂住祐延断層の通過位置や特徴について報告する。

#### 2.3.1 活断層調査坑道

##### (1)活断層調査坑道と地表地質

活断層調査坑道（以下「調査坑道」という）は、既存の長棟精密調査坑道（以下「精密坑道」という）から茂住祐延断層に対して、直角に横断する方向で掘削された（付図-9）。調査坑道レベルは、茂住鉱山における-500m 準（海拔約 350m）に相当し、茂住谷の直下では地表下約 250m に位置する（付図-10）。調査坑道レベルでは、茂住祐延断層の南北両側に手取層群が分布するが、地表では南西に緩く傾斜する横山衝上断層を介して、手取層群の上に飛驒片麻岩類が構造的に載っている。

##### (2)調査坑道周辺の地質

調査坑道周辺の地質は、白亜紀前期の手取層群長棟川累層に属する砂岩・頁岩の互層（猪谷互層）からなる。手取層群の走向は概ね北西-南東方向を示し、緩やかに褶曲して

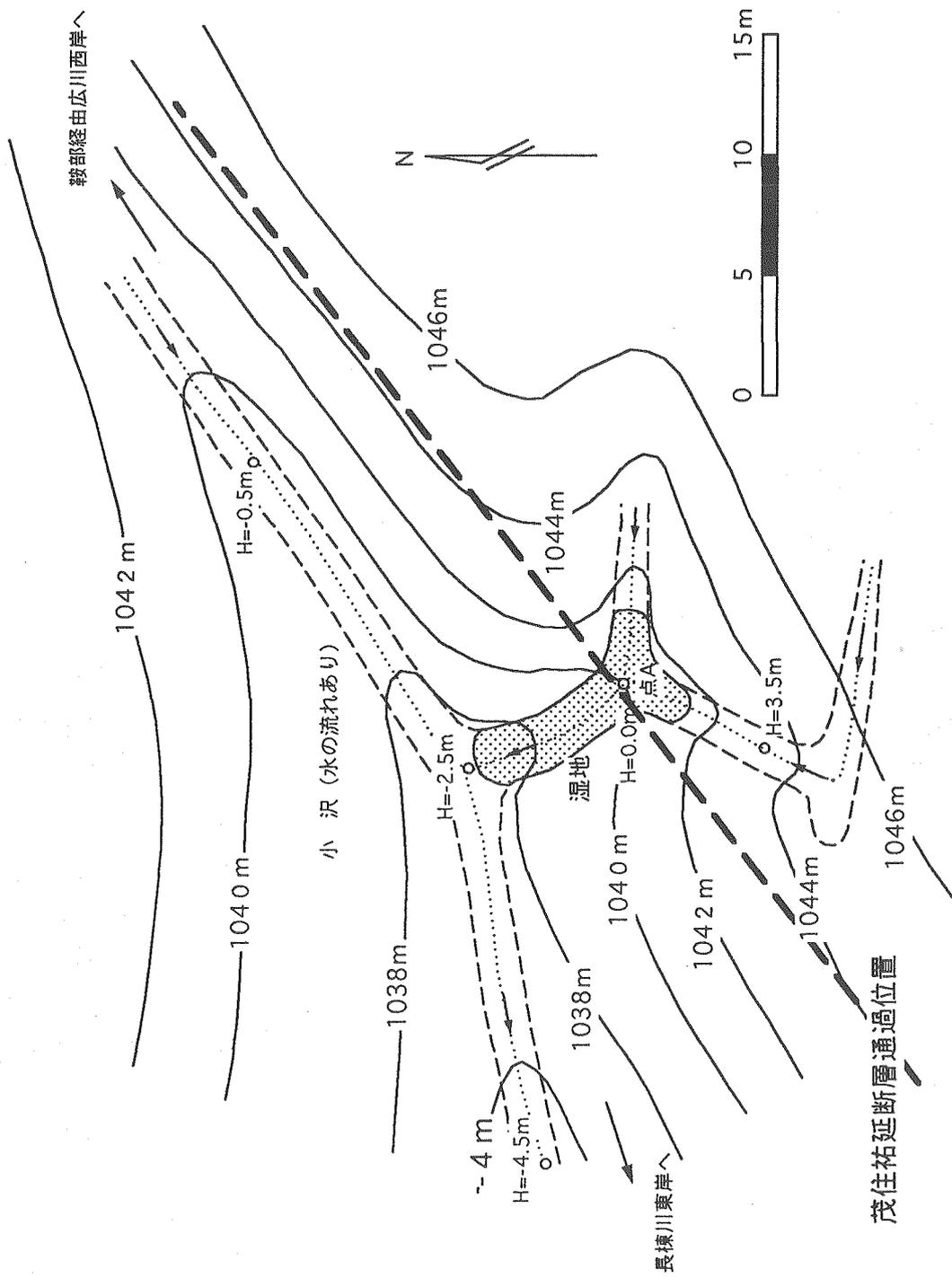
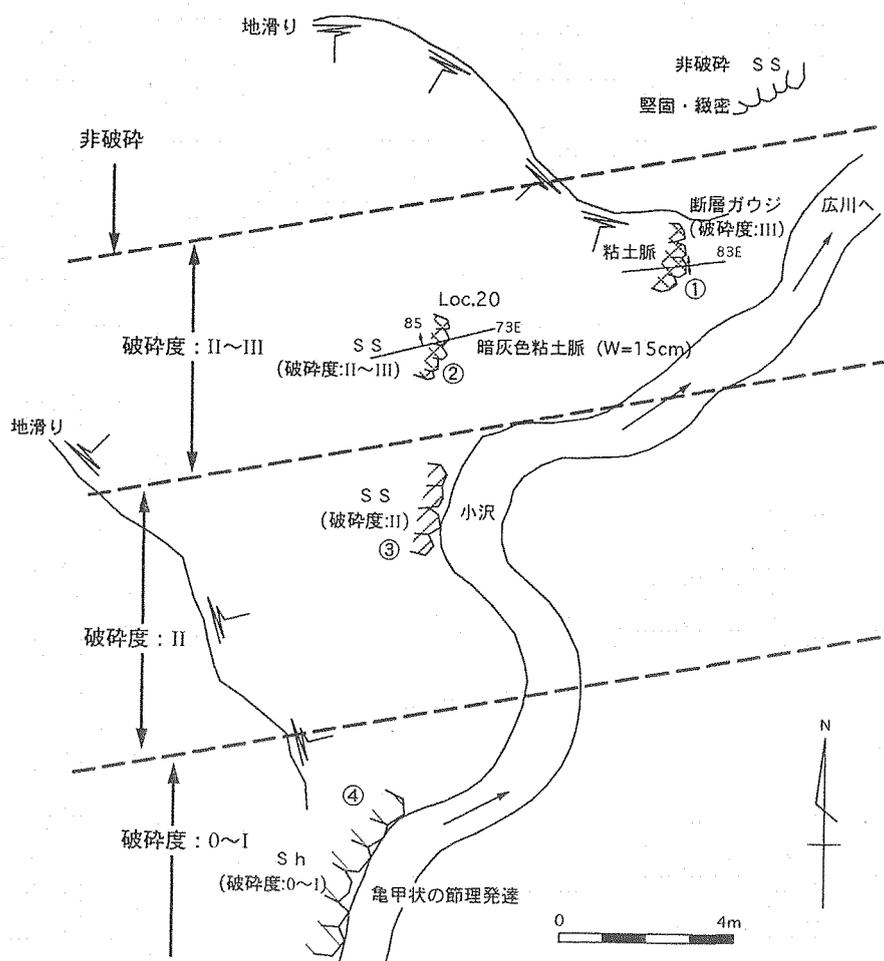


図2.2.6 長棟川 長棟川 図2.2.6 長棟川東岸鞍部付近の閉塞丘 (Loc.19)



写真 2.2.17 長棟川東岸鞍部東側の断層露頭周辺 (Loc. 20)

写真中の①～④は図 2.2.6 の露頭番号に対応する



S S : 砂岩 (手取層群) S h : 頁岩 (手取層群)

破碎度 I 破碎度 II 破碎度 III

破碎度の定義は表 2.2.1 に準ずる

図 2.2.7 長棟川東岸鞍部東側の断層周辺露頭図 (Loc. 20)



写真 2. 2. 18 長棟川東岸鞍部東側の断層露頭 (Loc. 20)

写真 2. 2. 17 の②の露頭の拡大

幅 15cm の灰白色粘土脈がみられる



写真 2. 2. 19 長棟川東岸鞍部東側の断層露頭 (Loc. 21)

幅約 1.5m の断層破碎帯

図 2. 2. 8 を参照



写真 2. 2. 20 長棟川東岸鞍部東側の断層露頭 (Loc. 21)  
写真 2. 2. 19 の拡大

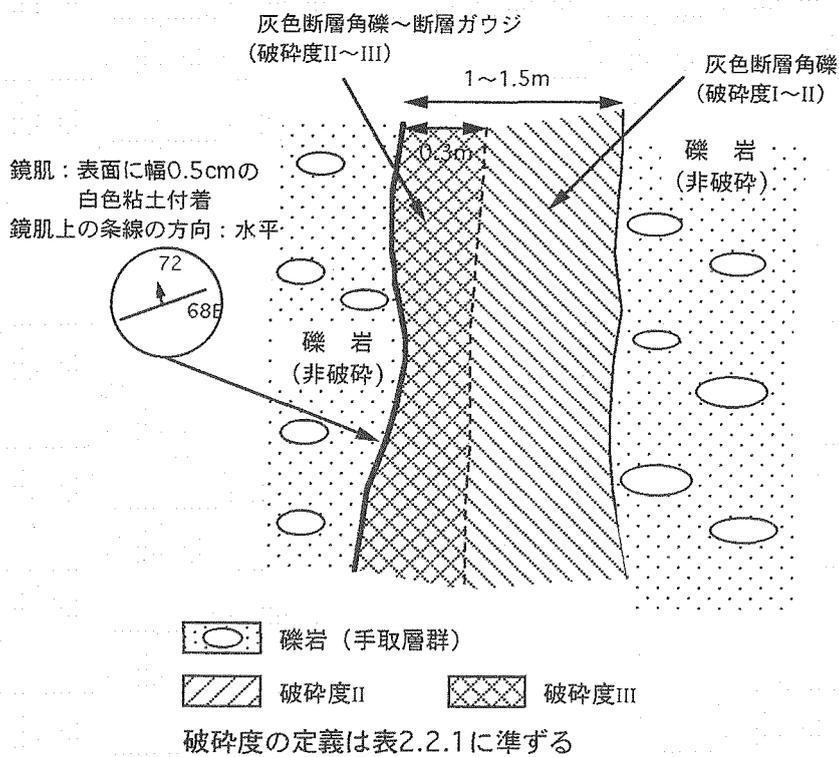


図 2. 2. 8 長棟川東岸鞍部東側の断層露頭 (Loc. 21)

いる。調査坑道開始点から 50m 地点付近及び 360m 地点（以下、坑道における位置は坑道開始点からの距離で表記する）付近に各々、背斜及び向斜構造を示す褶曲構造が、推定される。砂岩・頁岩の単層の層厚は数 10cm～数 m 程度である。

砂岩・頁岩中には幅数 mm～数 cm の方解石の細脈が部分的に発達し、特に砂岩・頁岩の境界部では、層理面に沿って認められることが多い。また、黄鉄鉱の鉱染が頻繁に認められ、閃亜鉛鉱・方鉛鉱・黄鉄鉱・磁硫鉄鉱等からなる鉱染帯（最大幅約 1m）が、390～450m 地点において地層の走向・傾斜とほぼ調和して、NNW-SSW 方向に連続する。

図 2.3.1 に坑道及び調査ボーリング結果に基づいて作成した調査坑道周辺の地質展開図を示す。

### (3) 断層破碎帯

手取層群の砂岩・頁岩互層を切って、A、B の 2 つの顕著な断層破碎帯が認められる。A 断層破碎帯（以下「A 破碎帯」という）は、茂住祐延断層の延長が通過すると思われる茂住谷直下の 242m～264m 地点付近に、B 破碎帯は 82m～110m 地点付近に存在する。主要な破碎帯の構造は、A 破碎帯が走向 N50° E、傾斜 80° S、B 破碎帯が走向 N50° E、傾斜 80° S を示しており、茂住祐延断層の走向延長と概ね一致する。いずれの断層破碎帯にもスリッケンサイド上に、ほぼ水平～低角なスリッケンラインが明瞭に認められることから、横ずれ変位の卓越した断層であることが推定される。母岩である砂岩・頁岩互層中には、対比可能な鍵層が発見されないことから断層破碎帯による変位量を、正確に見積もることはできない。

#### (a) A 破碎帯

A 破碎帯では、幅 50cm 以上の断層ガウジ（暗灰色粘土脈と灰白色粘土脈から成る）を介して、堅岩から破碎帯へ明瞭に変化している。断層ガウジ中の白色粘土には、明らかに右ずれを示す非対称構造が認められる。断層ガウジは、小角礫を含む粘土からなっていて、B 破碎帯に比べ破碎が進んでいるように見える。

#### (b) B 破碎帯

写真 2.3.1 及び図 2.3.2 に B 破碎帯の南端の様子を示す。B 破碎帯では、調査坑道の南東側（開始点側）から、

- ①砂岩層が小断層によりちぎれてブロック状になりながらも互層の構造を残している  
弱破碎部
- ②互層の構造を残さない断層角礫帯
- ③断層ガウジ帯
- ④断層角礫帯

という破碎度の異なる岩盤状況がみられる。②と③の境界付近には、幅約 50cm の変質

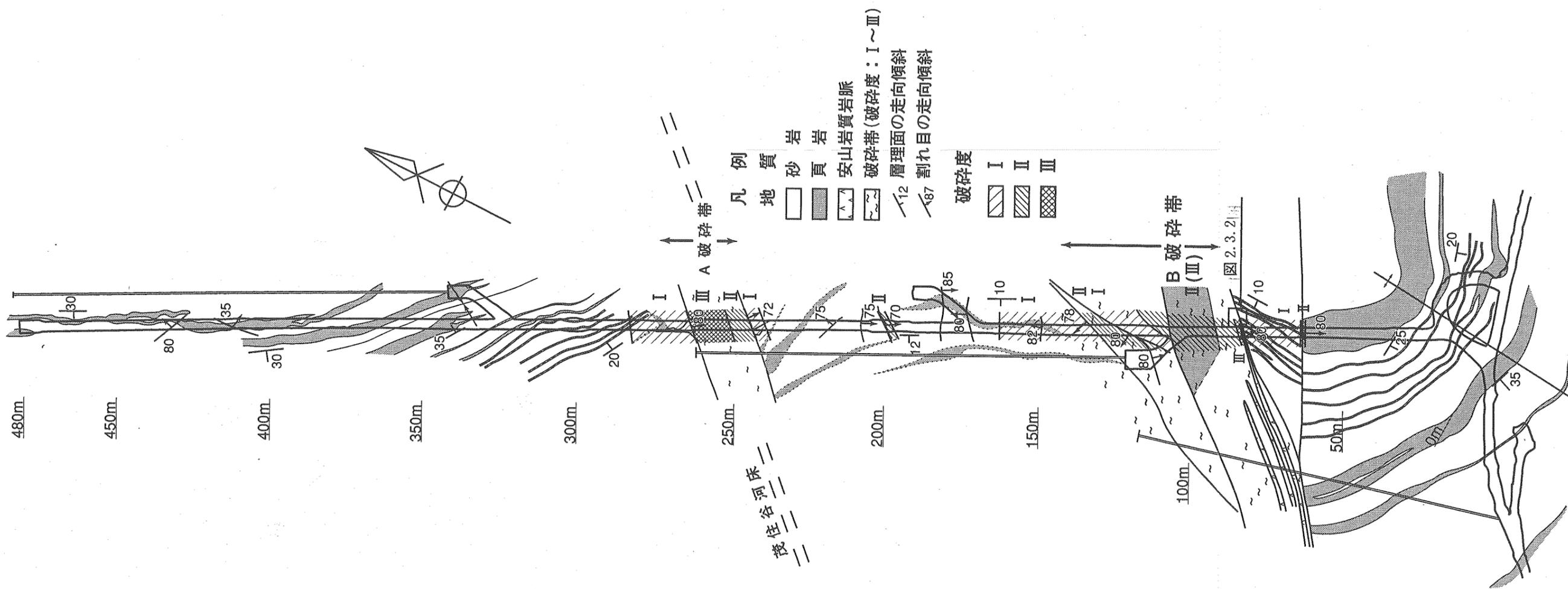


图 2.3.1 活断層調査坑道展開図



写真 2. 3. 1 活断層調査坑道の断層露頭 (B 破砕帯)

図 2. 3. 2 を参照

凡例

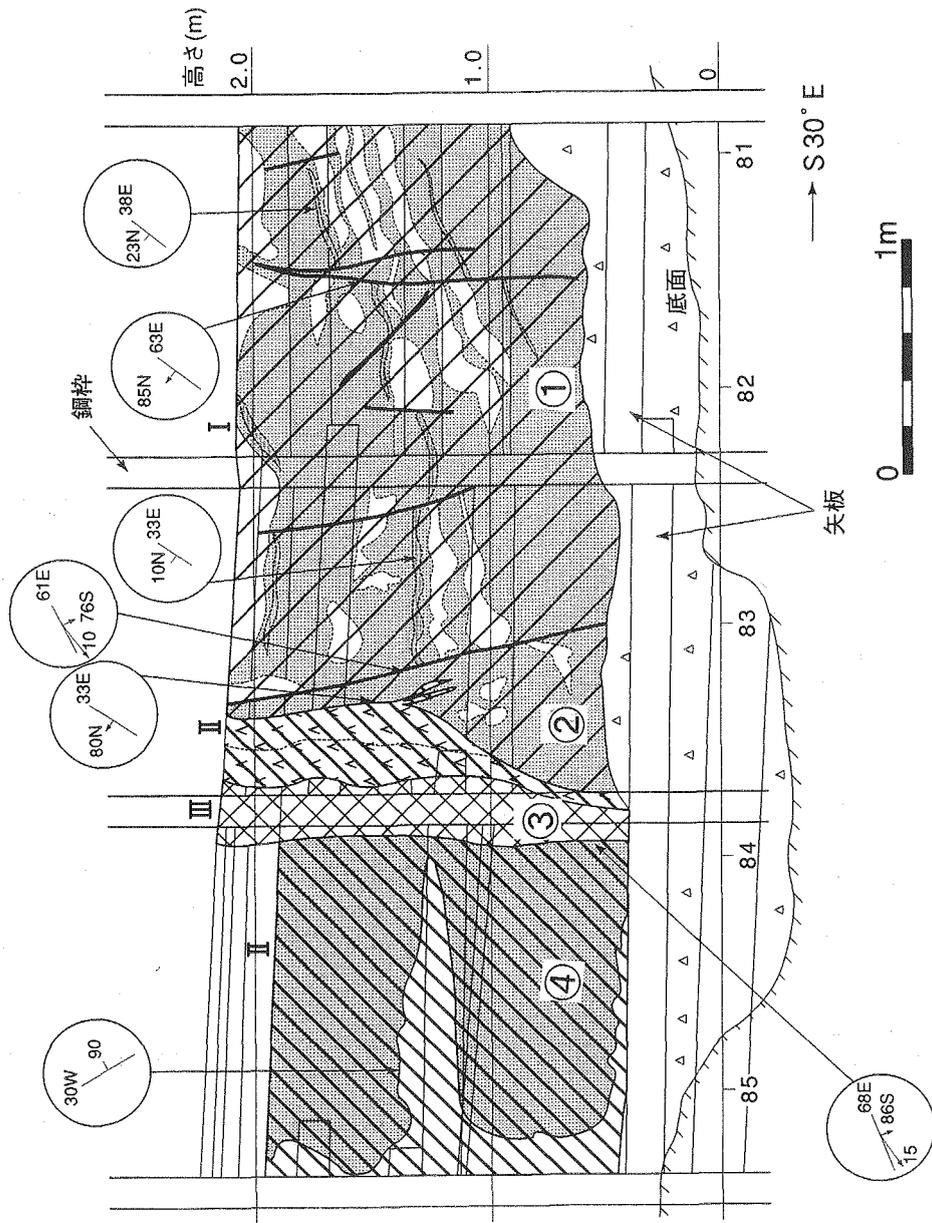
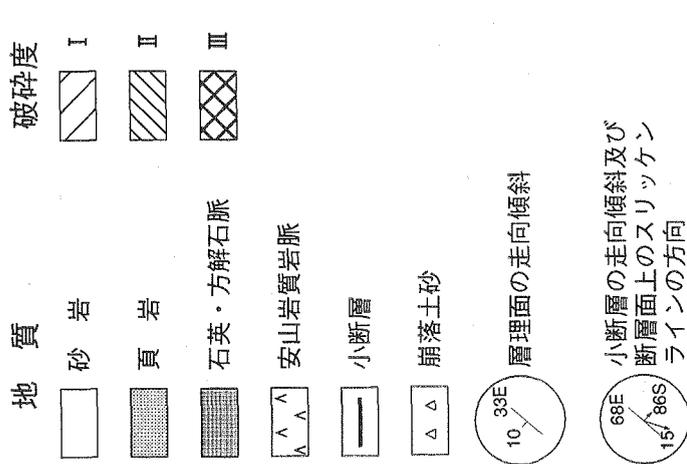


図 2.3.2 活断層調査坑道の断層露頭 (B 破碎帯)

した安山岩質岩脈が貫入している。安山岩質岩脈の顕微鏡写真を写真 2.3.2 及び写真 2.3.3 に示す。③を境界にして地層の走向・傾斜が大きく異なり、南東側では緩傾斜、北西側では急傾斜となる。また、①の小断層のスリッケンサイド上に認められるスリッケンラインは、ほとんどが水平に近い方向であり、断層破碎帯の最終活動が横ずれであったことを示している。④の断層角礫帯はモザイク状の破碎岩に相当し<sup>24)</sup>、原岩の構造が残された状態である。

## 2.3.2 精密調査坑道

### (1)長棟精密調査

本調査は、金属鉱業事業団により昭和 45 年に、茂住鉱山と旧長棟鉱山の中間で行われた広域調査構造ボーリング 45EAGNG-1 (土黒谷)<sup>3)</sup>で、捕捉した鉛・亜鉛の鉱化帯周辺の地質構造と鉱化状況を把握することを目的として、昭和 52 年～昭和 59 年に坑道延長 2,671m、ボーリング 9 孔 (5,525m) の工事が行われた<sup>5)~11)</sup>。

### (2)精密坑道周辺の地質

精密坑道では、茂住祐延断層は確認されていないが、精密坑道の先端から実施されたボーリング (58MANM-5 孔) により、地表下約 1,030m (海拔約 120m) において茂住祐延断層の断層破碎帯が捕捉されている (付図-9, 10)<sup>10)</sup>。58MANM-5 孔は精密坑道の先端から、方位 335° (真北)、傾斜-15°、長さ 700m で実施された。出現した岩石は片麻岩類、貫入岩類 (フェルサイトや含ざくろ石安山岩)、及び粘土である。

茂住祐延断層に相当すると思われる破碎帯は 664.35~700.60m (孔底) 間で、破碎と粘土化が著しく、コアの回収率が極端に悪い。700.60m の孔底は断層破碎帯を抜けきっていないことから、見かけの破碎帯の幅は 36.25m 以上と考えられる。664.35~680.15m 間は、比較的原岩の岩相を残し、細粒の石英の見える部分もあるが、大半は完全に白色粘土化している。680.15~700.60m 間は角礫混じりの灰色～青灰色の粘土になっている。

地表調査の結果と坑内調査の結果を考慮すると、本地点周辺では、茂住祐延断層は北に約 80° 傾斜していると考えられる。

## 2.3.3 活断層調査坑道以西 (長棟坑道・茂住通洞)

調査坑道における B 破碎帯の延長が、調査坑道より西側の坑道やボーリングで確認されている。坑道やボーリングの実施されたレベルは、茂住鉱山における-500m 準 (海拔約 350m) に相当する。ボーリングは鉱床探査のために行われたもので、破碎帯等に関する詳細な記載は残されていないが、コアの採取率の悪い箇所や粘土・角礫等が存在する箇所をつなぐと B 破碎帯の西方延長は付図-9 に示す通り、茂住通洞まで連続することが確認された。

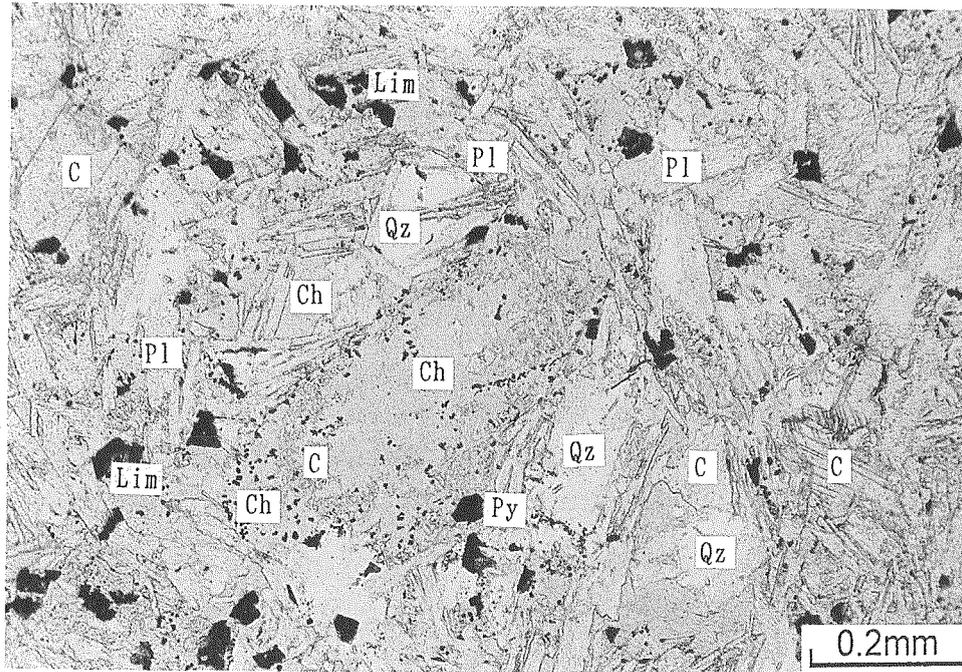


写真 2.3.2 安山岩質岩脈の顕微鏡写真（オープンニコル）

Qz : 石英 Pl : 斜長石 C : 方解石 Ch : 緑泥石 Py : 黄鉄鉱 Lim : リネイト



写真 2.3.3 安山岩質岩脈の顕微鏡写真（クロスニコル）

付図-9 中の Loc. 22 では、B 破碎帯の西方延長を坑道方向に約 45m (真幅で約 25m) 確認することができる。本破碎帯は飛騨片麻岩類中に存在し、走向  $N25^{\circ} \sim 45^{\circ} E$ 、傾斜  $80^{\circ} N \sim 70^{\circ} S$  である。破碎帯の南東側の非破碎部との境界は、幅 2~3m で花崗岩質の角礫を伴う青灰色の粘土からなり、黄鉄鉱・金雲母を含む。坑道及びボーリングの結果から、本破碎帯には安山岩質の岩脈が破碎帯の方向と調和的に貫入している。

一方、茂住谷河床部の直下に位置する A 破碎帯の延長は坑道やボーリング等で確認されていないが、ほぼ茂住谷の直下を通過している。

調査坑道周辺より以西では、茂住祐延断層は茂住谷の直下を通過する主要断層と、その南側に位置する副断層から構成される。主要断層の傾斜はほぼ垂直、副断層は南に高角で傾斜している。

## 2.4 断層の活動性

地表調査及び坑内の地質データとの検討結果に基づいた本調査地域における茂住祐延断層の地区別の活動特性を表 2.2.3 に示す。

見かけの総変位量は参照資料に基づいて、横ずれ成分及び上下成分を推定している。R は右横ずれ、L は左横ずれを、S は南側隆起、N は北側隆起を示す。茂住峠以西では 40Ma よりも古い横山衝上断層、北 20 号断層や手取層群基底の不整合面が変位基準であり、茂住峠以东では地表の変位地形である谷・沢の屈曲やイベント堆積物が変位基準となっている。

本調査地域における茂住祐延断層の活動特性は次の通りである。

- ①横ずれ総変位量の側方変化については、西に向かって減少し高原川付近が末端となっている。
- ②変位基準の年代については、断層で切られた河川の上流部の長さから、断層の活動開始年代を推定する方法により、長棟川については約 40 万年が出されている (竹内私信, 1998)。これに基づくと総変位量を 500m とすれば横ずれ平均変位速度は 1.25m/千年で A 級の活動度が推定される。
- ③調査坑道における断層ガウジの TL 年代は 10~15 万年程度 (暫定的な年代) を示しており、断層活動開始年代はこれらの値より若くないことを示唆している (竹内私信, 1998)。本調査地域において 40 万年前から断層が活動し始めたと考えれば、横ずれ平均変位速度が東から順に 1.25、1.25、0.75、0.08m/千年となり茂住峠以西は活動度が低下していると考えられる。

## 2.5 まとめと今後の課題

### 2.5.1 まとめ

茂住祐延断層の地表における連続性を追跡するため、西端の高原川から茂住谷、長棟

表2.2.3 茂住祐延断層の地区別の活動性

地区	高原川付近		調査坑道付近		茂住峠付近		長棟川付近		広川付近	
	地表	坑内	坑内	坑内	坑内	地表	地表	地表	地表	
変位基準	北20号断層	横山衝上断層	手取層群基底の不整合面	小沢の屈曲	礫層 (イベント堆積物)	谷・尾根の屈曲				
変位基準年代	—	—	—	?	6,400年	0.4Ma				
総変位量										
横ずれ成分	R30m (B破砕帯)	R300m (A破砕帯：R200m) (B破砕帯：R100m)	R500m	R3m	?	R500m				
上下成分	?	S130m	S150m	?	S2+m	?				
平均変位速度										
横ずれ	0.08m/千年	0.75m/千年	1.25m/千年	?	?	1.25m/千年				
上下	?	0.33m/千年	0.38m/千年	?	?	0.31m/千年				
参照資料	付図8	付図9, 10	付図9, 10	図2.2.1	図2.2.3	竹内私信(1998)				

川、東端の広川にわたる東西約 7km、南北約 1km の範囲について、地表調査を実施した。

調査の結果、茂住祐延断層は走向 ENE-SW で、約 80° 南または北に傾斜する断層であることが明らかになった。

高原川沿いでは茂住祐延断層を確認できなかったが、茂住谷との合流部付近では、茂住谷方向の割れ目が頻繁に発達し、組織地形を形成していることが判明した。地表調査と坑内の地質データとの検討により、活断層調査坑道で捕捉した 2 つの断層破碎帯のうち、A 破碎帯は、茂住谷底をほぼ高原川まで、B 破碎帯は高原川東岸付近まで連続することがわかった。

一方、調査地域の東部にあたる茂住峠から長棟川・広川にかけての約 2.5km の地区では、茂住祐延断層に相当する断層露頭や変位地形を連続的に確認することができた。茂住祐延断層の活動性を示唆する証拠は以下の通りである。

- ① 茂住峠東側では、閉塞丘を伴う複数の小沢の系統的な右横ずれ変位地形と、それに伴う陥没地形が存在する。古土壌の  $^{14}\text{C}$  年代測定から 260 年 B. P. が得られ、茂住祐延断層の最新活動が、1858 年の安政飛越地震に相当する可能性が出てきた。
- ② 長棟川西岸の段丘上（現河床より 70m 上）では、イベント堆積物の可能性のある礫層が山側へ傾動し、2m 以上の上下変位が存在する。礫層に挟在する腐植土や木片の  $^{14}\text{C}$  年代測定から 6,200~6,400 年 B. P. が得られ、茂住祐延断層の上下変位（南上がり）速度は、約 0.3m/千年と推定される。
- ③ 長棟川東岸では小地溝、閉塞丘、南北系やせ尾根の右横ずれ屈曲などの変位地形が存在する。

以上のように、調査地域東部では茂住祐延断層の地表での連続性や、ごく最近まで活動している証拠が明らかとなってきた。

茂住祐延断層は、茂住峠を境にして東西で、活動性に濃淡の差が認められる。高原川周辺は断層による変位量が小さく、活動が低調なことから、本断層の西端に相当すると考えられる。一方、峠の東側では多くの変位地形が認められ、活動的であり、茂住祐延断層による変位量は、東に向かうほど大きくなっている（表 2.2.3）。

茂住祐延断層の断層破碎帯中には、破碎帯の方向と調和的な安山岩質岩脈が貫入している。神岡鉦山周辺の安山岩質岩脈については、55~65Ma という年代が得られていて、本断層破碎帯中の安山岩質岩脈もほぼ同じ年代を示すことが予想される。安山岩の貫入した時代には、既に跡津川断層や茂住祐延断層では、現在の断層の方向と同じトレンドを有する割れ目が存在し、それにこれらの安山岩質岩脈が貫入したものと考えられる。現在もこのような弱線部を利用して断層が活動している。

## 2.5.2 今後の課題

今後以下に記す調査を行い、跡津川断層断層系としての茂住祐延断層の特徴について

明らかにしてゆく必要がある。

- ① 茂住祐延断層の最新活動時期、活動間隔及び活動様式を明らかにするために、変位地形や断層露頭の認められた茂住峠東側で、矢板工法等によるトレンチ調査を実施する。
- ② 茂住祐延断層に隣接する跡津川断層の東部について、トレンチ調査を実施し、跡津川断層系としての活動性を明らかにする。
- ③ 茂住祐延断層の活動の濃淡を明らかにするため、明らかに動いた証拠の認められる地点（例えば、茂住峠）の地下深部の地質状況をボーリング調査や坑道調査により明らかにする。
- ④ 跡津川断層を含めた茂住祐延断層の活動の起源に関する検討を行うために、地表に岩脈が分布する地域の地質調査を行い、断層と岩脈の関係について明らかにする。
- ⑤ 地表の断層露頭で認められた粘土について、TL法などによる年代測定を行い、断層の活動時期を明らかにする。

### 2.5.3 参考文献

- 1) 河合正虎, 野沢保, 5万分の1地質図幅「東茂住」及び説明書: 地質調査所 (1958)
- 2) 通商産業省, 昭和44年度広域調査報告書 長棟地域: pp. 16, (1970)
- 3) 通商産業省, 昭和45年度広域調査報告書 長棟地域: pp. 35, (1971)
- 4) 通商産業省, 昭和46年度広域調査報告書 長棟地域: pp. 25, (1972)
- 5) 金属鉱業事業団, 昭和53年度精密調査報告書 長棟地域: pp. 51, (1979)
- 6) 金属鉱業事業団, 昭和54年度精密調査報告書 長棟地域: pp. 130, (1980)
- 7) 金属鉱業事業団, 昭和55年度精密調査報告書 長棟地域: pp. 59, (1981)
- 8) 金属鉱業事業団, 昭和56年度精密調査報告書 長棟地域: pp. 40, (1982)
- 9) 金属鉱業事業団, 昭和57年度精密調査報告書 長棟地域: pp. 51, (1983)
- 10) 金属鉱業事業団, 昭和58年度精密調査報告書 長棟地域: pp. 57, (1984)
- 11) 金属鉱業事業団, 昭和59年度精密調査報告書 長棟地域: pp. 35, (1985)
- 12) 山田直利, 野沢保, 原山智ほか, 1/20万地質図「高山」: 地質調査所 (1989)
- 13) 日本の地質「中部地方Ⅱ」編集委員会, 中部地方Ⅱ: 共立出版株式会社, pp. 30~32 (1988)
- 14) 櫻井若葉, 塩川智, 神岡鉱床に産する岩脈のK-Ar年代について: 資源地質, Vpl. 43, No. 4, pp. 311~319 (1993)
- 15) 多田堯, 跡津川断層における地殻変動: 月刊地球, Vol. 20, No. 3, pp. 142~148 (1998)
- 16) 活断層研究会編, 新編日本の活断層: 東京大学出版会 (1991)
- 17) 和田博夫, 伊藤潔, 跡津川断層付近の地震活動: 京都大学防災研究所年報, No. 3 B-1, pp. 235~250 (1995)

- 18) 和田一成, 筒井直, 伊藤谷生, 竹内章, 何培明, TEM 法チューラム測定配置による断層検出の試み—モデル計算と実施例—: 物理探査学会第 96 回学術講演会論文集, pp. 200~204 (1997)
- 19) 竹村利夫, 藤井昭二, 飛騨山地北縁部の活断層: 第四紀研究, Vol. 22, pp. 297~312 (1983)
- 20) 川崎正士, 家城康二, 吉村文孝, 神岡鉱山茂住鉱床の最近の探鉱について—特に裂かと鉱化作用の関係—: 鉱山地質, Vol. 35, No. 2, pp. 145~159 (1985)
- 21) 櫻井若葉, 岡田洋一, 水谷内修, 神岡鉱山跡津川地区の探鉱について: 資源地質, Vol. 43, No. 2, pp. 79~91 (1993)
- 22) 金折裕司, 矢入憲二, 宮越勝義, 跡津川断層北東部における花崗岩類の微小変形構造とその形成過程: 地質学雑誌, Vol. 94, No. 11, pp. 887~901 (1988)
- 23) 松田高明, 後藤篤, 森永速男, 加納隆, 飛騨帯南東部の白亜紀以降の上昇様式—ジュラ紀花崗岩類のアパタイト・フィッシュトラック年代—: 地球惑星科学関連学会予稿集 pp. 640 (1996)
- 24) 木村敏雄, 断層特に断層破碎帯の見方・考え方: 応用地質, Vol. 22, No. 1, pp. 4~11 (1981)

### 3. 応力測定試験

#### 3.1 乾式一面破碎法による応力測定の概要

##### 3.1.1 S-500プローブ

乾式破碎法による応力測定原理は、地殻におけるボーリング掘削による円孔内を内圧  
 載荷した時の載荷圧と孔径変化を観測し、地殻応力を推定するものである。

本室内試験で用いた応力測定装置は、乾式多面破碎計測装置S-500である。図3.1.1に  
 S-500プローブの概念図を示す。このS-500計測装置は、既往の乾式破碎法とは異なり、  
 ウレタン性のプローブの周辺に2つ割れの摩擦シェルを配し、1方向のみに載荷方向を  
 制御して新規亀裂を発生させ、再載荷時の圧力-直径変化曲線から亀裂に直行する方向  
 の開口応力を決定し、同位置において最低3方向での計測結果から未知数として最大主  
 応力、最小主応力およびその方向を決定する。原理的には、設定した任意方向以外の亀  
 裂は、摩擦シェルの十分な摩擦により開口せず、観測される圧力-直径変化に影響を与  
 えない。この載荷機構によれば、実岩盤での既存亀裂、潜在亀裂の影響を抑えて亀裂開  
 口時の圧力を求められる可能性がある。

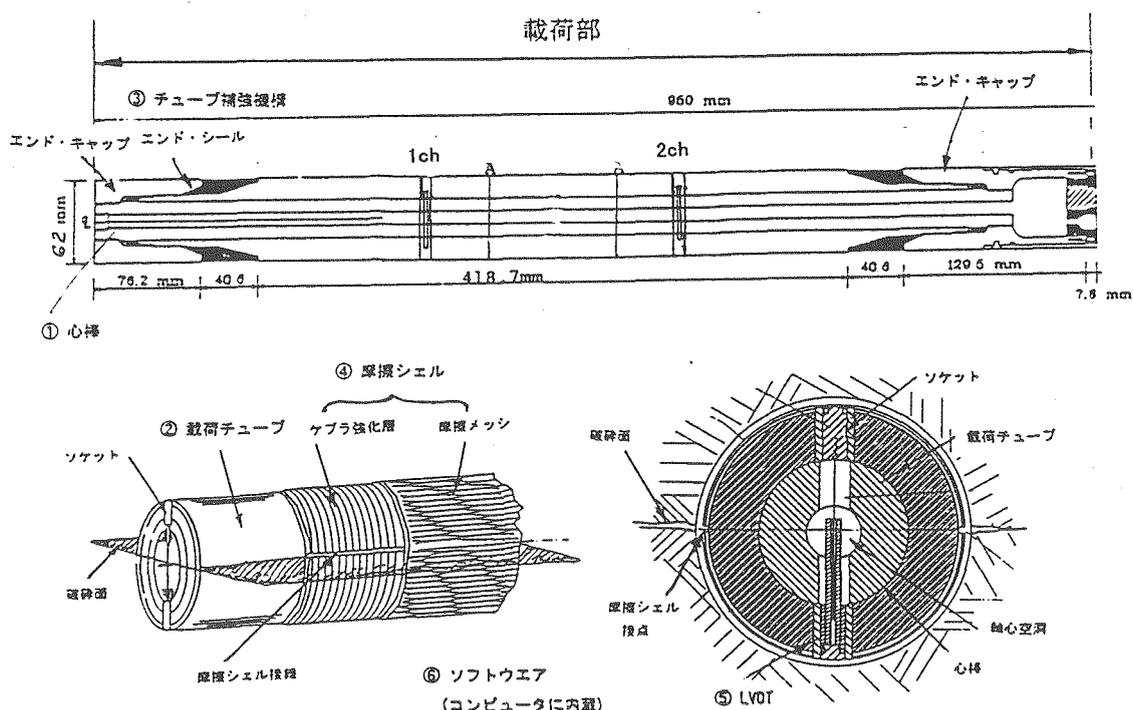


図3.1.1 S-500プローブの載荷部の基本構造

図3.1.2には、S-500を使用する際の計測システムの概要図を示す。この計測システムを用いて計測する項目は、実験開始からの経過時間、S-500プローブの載荷圧、載荷方向のS-500プローブの直径である。なおプローブの直径は、図3.1.1に示すように2カ所で同一方向の変化を計測する。

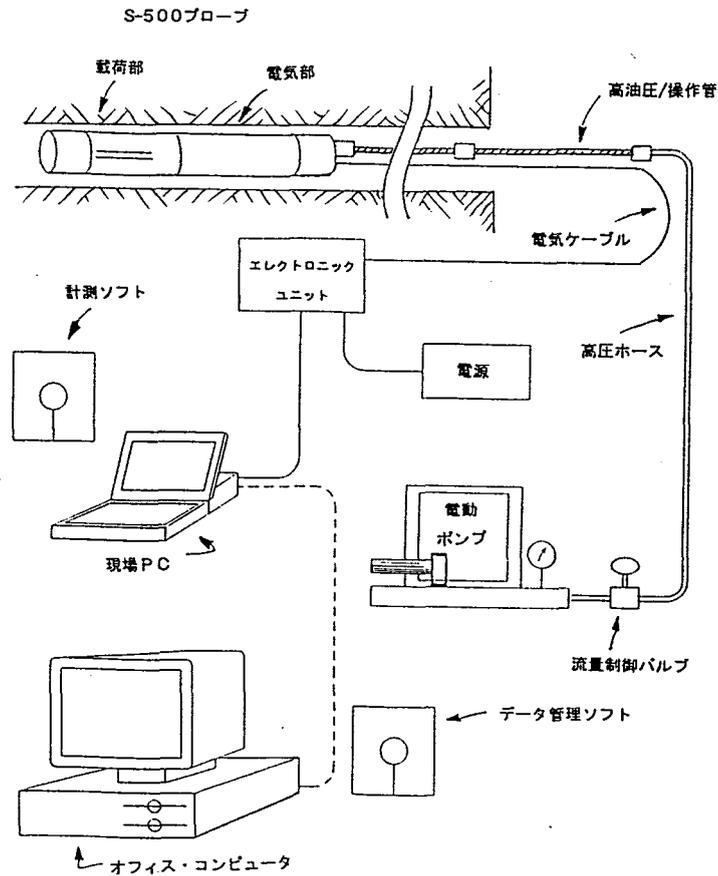


図3.1.2 S-500計測システム図

### 3.1.2 応力測定理論

乾式破砕法による応力測定の原理は、一般的には、円孔周辺理論によるものである。半無限板に空いた円孔周辺の応力状態については、弾性論に基づき種々の理論が示されているが、平面ひずみ状態（応力場に関しては平面応力状態も同様）での拘束圧を受ける有孔板の応力については、Kirschの解が代表的なものとして挙げられる。乾式破砕法のような円孔内から内圧を負荷する場合の円孔周辺への応力の影響については、応力制御荷、変位制御荷および全面荷、部分荷などの荷状態により異なり、それぞれ弾性理論に基づく理論解または近似解が得られている。応力制御荷について着目すると、円孔壁面に全面荷した場合には、Timoshenkoにより近似解が得られており、法線方向応力  $\sigma_r$  および周方向応力  $\sigma_\theta$  は、それぞれ内圧  $p$  がそのまま増加あるいは減少する応力状態となる。また、内圧が円孔壁面に部分的に作用する場合には、Jaegerの理論により、内圧  $p$  の荷により円孔に分布する法線方向応力  $\sigma_r$  および周方向応力  $\sigma_\theta$  を算出することができる。

本検討で用いた乾式多面破砕式応力測定装置は、通常乾式破砕法の荷機構である等方圧の加わるウレタンチューブに半円形状に2分割された摩擦シェルを配し、亀裂の方向を制御するメカニズムになっており、岩盤との摩擦、部分的な不均等荷などの特徴があり、かなり複雑な応力状態になっているものと考えため、ここではKirschの解による円孔理論を示し、内圧荷による円孔壁面での応力状態について、Timoshenkoの解、Jaegerの理論を概略説明する。

#### (1) 弾性論に基づく円孔周辺応力

##### ① Kirschの解

平面ひずみ状態における半無限円孔板の応力は、Kirschの解として一般的に知られている。半無限円孔板に任意応力  $P$  とそれに直交する応力  $Q$  が作用する場合、円孔中心から  $r$  の距離にあり、 $P$  の作用方向から  $\theta$  の角度における位置の応力は次式で与えられる。図3.1.3に半無限円孔板の円孔周辺応力概念図を示す。

$$\sigma_r = \frac{P+Q}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{P-Q}{2} \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P+Q}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{P-Q}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \quad (2)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{P-Q}{2} \left(1 + \frac{2a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4}\right) \sin 2\theta \quad (3)$$

ここに、 $P, Q$ : 作用力、 $a$ : 円孔半径、 $r$ : 円孔中心からの距離、 $\theta$ :  $P$  方向からの角度

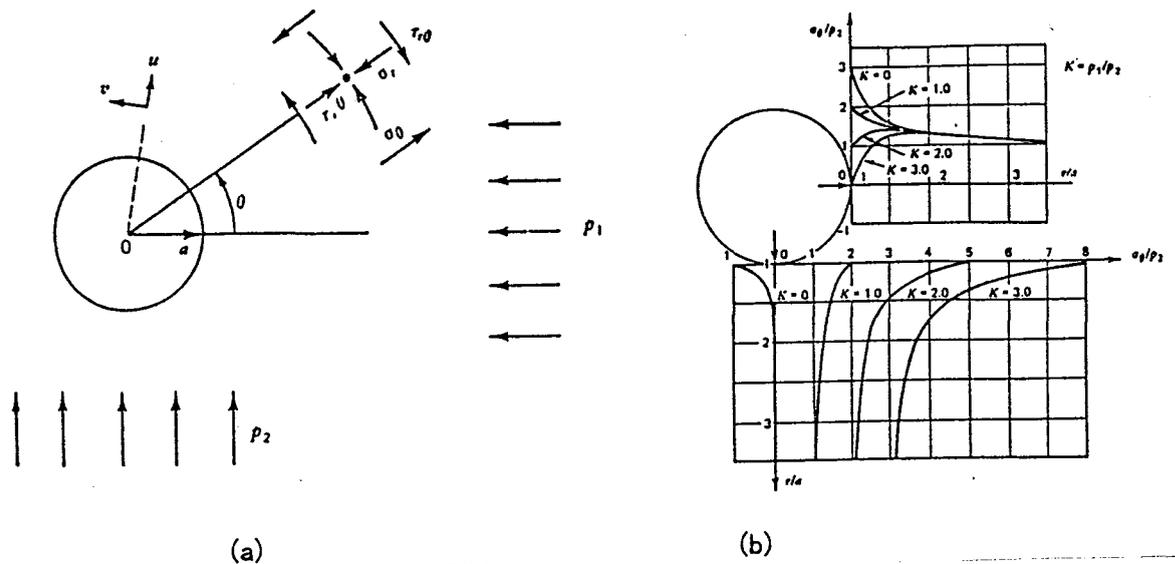


図3.1.3 半無限円孔板の円孔周辺応力概念図

②内圧载荷による周方向応力  $\sigma_\theta$  の変化

半無限板の円孔に内圧が負荷されることによる円孔壁面での周方向応力  $\sigma_\theta$  は、その载荷状態により異なる。法線方向応力  $\sigma_r$  および周方向応力  $\sigma_\theta$  については、円孔壁面に全面载荷した場合には、Timoshenkoにより近似解が与えられており、部分的に载荷された場合には、Jaegerの理論により与えられている。以下に各理論による内圧  $p$  の負荷による周方向応力  $\sigma_\theta$  に着目して述べる。

円孔板の内圧が等応力状態で作用する場合には、図3.1.4に示す条件において、Timoshenkoの解より内圧  $p$  による周方向応力  $\sigma_\theta'$  は、次式により与えられる。

$$\sigma_\theta' = \frac{a^2 b^2 (P_0 - P_1)}{b^2 - a^2} \cdot \frac{1}{r^2} + \frac{P_0 b^2 - P_1 a^2}{b^2 - a^2} \quad (4)$$

$P_i$ : 内圧、 $P_0$ : 作用力、 $a$ : 円孔半径、 $b$ : 円孔中心からの作用力境界

ここで、作用力境界  $b$  が円孔直径  $a$  に対して十分に大きく、円孔壁面からのみ内圧  $P_i$  が作用した場合の  $\sigma_\theta'$  を算定するには、以下の条件

$$b \gg a, \quad P_0 = 0, \quad r = a$$

を式(4)に代入する。

従って、内圧  $P_i$  による円孔壁面での周方向応力  $\sigma_\theta'$  は

$$\sigma_\theta' = -P_i \quad (5)$$

となる。すなわち、内圧を全载荷した場合には、円孔周方向応力は、符号を逆にしただけの増分となる。

次に、内圧が等方ではなく、図3.1.5に示すような部分的に作用する場合には、Jaegerの理論により内圧  $p$  による周方向応力  $\sigma_\theta'$  は、次式により与えられている。

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta} &= P_1 - (4P_1\alpha/\pi) & -\alpha < \theta < \alpha, \quad \pi - \alpha < \theta < \pi + \alpha \\ \sigma_{\theta} &= -4P_1\alpha/\pi & \alpha < \theta < \pi - \alpha, \quad \pi + \alpha < \theta < 2\pi - \alpha \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $\alpha$  : 載荷角度(ラジアン)

(6)式によれば、内圧を部分載荷した場合、内圧による非載荷部の円孔周方向応力の増加、すなわち、地殻応力((1)式による円孔周辺の初期状態)に対する $\sigma_{\theta}$ の低減率が大きくなり、局部的な引張応力の発生が早くなることを示している。

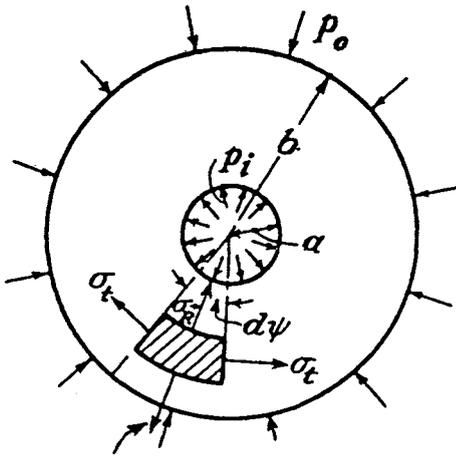


図3.1.4 円孔板の内圧が等応力状態で作用する場合

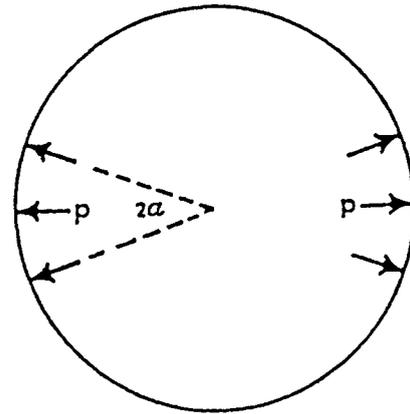


図3.1.5 内圧が部分的に作用する場合

### ③多面破碎法の地殻応力推定の概念

本検討の多面破碎式応力測定装置では、内圧はほぼ全載荷状態で負荷されているものと考えられる。そこで、Timoshenkoの等方載荷の場合を例にとり、任意方向の亀裂再開応力が捉えられることを前提として、地殻応力推定の概念について述べる。

前章にも述べたように、通常の乾式他面破碎式応力測定では、初期載荷により岩盤に亀裂を与え、再載荷による既存亀裂の開口挙動を観測し、最大および最小主応力を推定するものである。この概念では、円孔壁面での内圧と作用力(地殻応力による円孔周辺応力の応力状態の釣り合いを考えたものであり、(2)式に $a = r$ を代入し、(5)式と合わせた次式により定義されるものである。

$$\sigma_{\theta} = (3Q - P) + 4(P - Q)\sin^2 \theta - P_1 \quad (7)$$

平面内の主応力 $P$ および $Q$ の方向は未知であるため、図3.1.6に示すように最大主応力軸からの角度を $\alpha$ として、式(7)を一般化すると次式が与えられる。

$$\sigma_{\theta\alpha} = (3Q - P) + 4(P - Q)\sin^2(\theta + \alpha) - P_1 \quad (8)$$

既往の二面破碎法の場合、亀裂の方向は、最小主応力直交方向となり、初期載荷で岩盤に亀裂を発生させ、岩盤特性の引張強度を喪失させ、再載荷により岩盤特性には寄与し

ない境界条件の変化（亀裂の再開）による計測挙動変化を評価し、主応力を推定するものであるが、亀裂方向の確認および最大主応力の計測がかなり困難である。

ここで、亀裂方向が制御できるものとし、二面破碎法での応力推定原理が適用できるものとするれば、式（8）において、未知数は、 $P$ 、 $Q$ および $\theta$ であり、内圧 $P_i$ の载荷により最低3方向で $\sigma_\theta$ の値が得られれば、未知数を求めることができる。

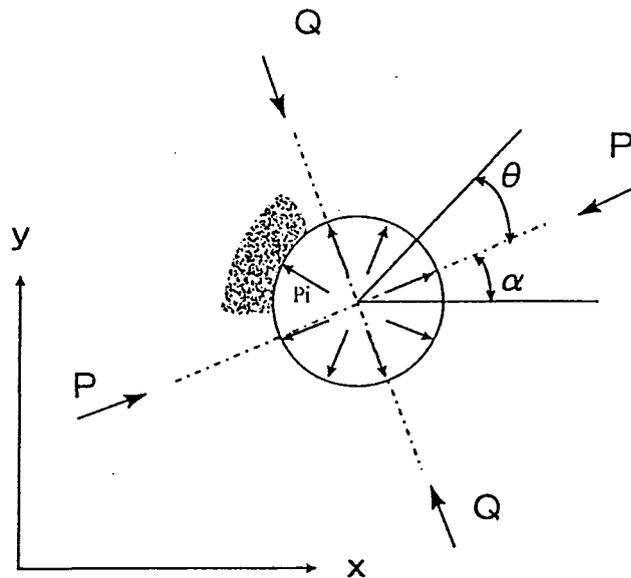


図3.1.6 円孔周辺の応力

### 3.1.3 これまでのS-500による試験の概要と得られた問題点

S-500は、3.1.1項で述べたように、同位置において最低3方向の亀裂を発生させ、それぞれの亀裂を再開させたときの圧力-直径変化曲線から亀裂に直行する方向の開口応力を求める必要がある。従って、S-500が必要とされる重要な機能として、「任意方向に破断面を生成出来ること」と、「既存の破断面がある場で、特定の破断面だけを開口させる载荷荷重を精度良く決定できること」をあげることができる。

前年度のS-500の試験は、2種類のプローブ（サンダー・ベルト型摩擦シェル及びワイヤ・ブレード型摩擦シェル）を用いて国内および米国の室内で行った後、現場でも実施した。これらの試験の結果、S-500の性能を評価する上での第一の基本的要件である「任意方向に破断面を生成出来ること」に関して、亀裂の造成が可能であると確認された。しかしながら、2種類のプローブ共に、第一方向および第二方向の破断面が存在する状態で、第三方向の破断面の生成について、既存亀裂の開口を確実に押さえることが出来ていない。このことは、2つのプローブ部分の摩擦効果がなお不十分であることを示唆していると考えられた。

次に、第二の基本的要件である「既存の破断面がある場で、特定の破断面だけを開口

させる載荷荷重を精度良く決定できること」については、室内試験の破断面が存在する場合の破断面再開口をシミュレートし、得られた圧力-変形曲線と試験で得られた圧力-変形曲線の特徴を対比させることにより、破断面の再開口時の荷重を特定する手法を提案することができた。しかし、圧力-変形曲線の上で、亀裂の再開口による折れ点を見つけ出すことは理想的ではあるが、FEM解析結果からも、変化点を捉えることが容易ではなく、試験から得られた折れ点は、理論値より2～3倍大きいということが明らかになった。

また、前年度の室内試験では、供試体の厚みが20cmであり、載荷部分全体を供試体に入れることができなかった。さらに、拘束圧を最大60kgf/cm<sup>2</sup>程度にしかあげることができず、地下深部での地核応力測定を想定した場合には、拘束圧が小さく思われた。

### 3.2 室内破碎試験

前述のような、前回行った試験から得られた問題点を踏まえ、今回はプローブと孔壁との間の摩擦を増すために新しく試作した鋼板型摩擦シェルを用いて以下に記述する室内試験を行った。

#### 3.2.1 載荷試験装置

2方向の主応力をモルタル供試体で再現するために、図3.2.1に示すような反力壁と4枚のフラットジャッキを準備し、異なる2系統の油圧系統を有する載荷試験装置を製作した。載荷は、鉛直方向と水平方向の2方向であり、最大載加圧能力は $150\text{kgf/cm}^2$ である。載荷時には供試体表面に偏圧がかからず、均等に載荷圧が分布するように供試体とフラットジャッキの隙間には石膏を流し込み充填した。

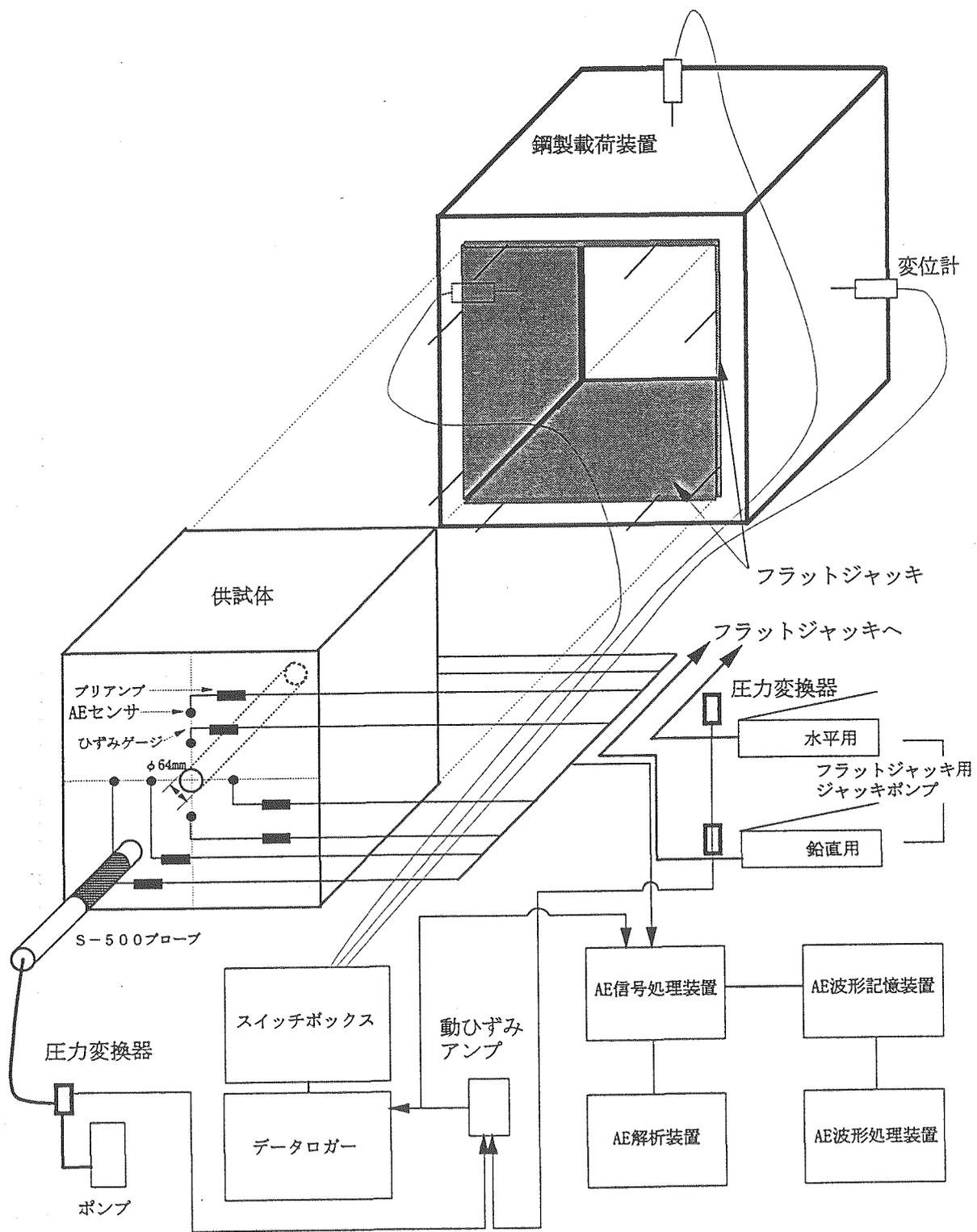


図3.2.1 室内検証試験装置概念図

### 3.2.2 供試体

本報の試験に用意した供試体の大きさはいずれも一辺60cmの立方体である。室内試験で用いるモルタル供試体は、7日強度で $\sigma_7=300\text{kgf/cm}^2$ となるように、表3.2.1に示す配合を設定した。使用したセメントは早強セメントである。なお、細骨材については、最大5.0mmのものを用いており、養生は24日間実施した。

表3.2.1 供試体の配合表

セメント:砂	W/c	C	W	S
	%	kg		
1 : 2	43.0	650	280	1301

供試体の中央には、 $\phi 64\text{mm}$ の乾式多面破碎試験装置挿入用の円孔を施している。なお、この円孔は、供試体の穿孔等による攪乱をなくすため、モルタル打設時に型枠により作成した。

亀裂の挙動および供試体自体の変化を観察するため、反力枠に変位計を合計で3個設置して載荷試験を行った。内圧の載荷圧とこれに伴う亀裂進展の経時変化の観測は、載荷圧と供試体表面での変位計による挙動観測は計測システムが異なるため、観測開始時に2つの計測システムが同時に観測を始められるよう声を掛けて観測を開始した。

本試験における供試体形状変化および計測フロー図は図3.2.1に示したとおりであり、計測機器一覧表は表3.2.2に示す。

表3.2.2 計測機器一覧表

使用機器	機器型番	個数	概略仕様
データロガー	TDS-601	1	測定スピード1点あたり0.08秒 測定最大点数1000点 3.5インチFDドライブ2基内蔵
スイッチボックス	ASW-30B	1	測定点数 30点
動ひずみ測定器	DPM-601A	3	測定点数 1点

### 3.2.3 AE計測システム

亀裂の発生、再開口圧力を検知するための補助的な装置として、本報ではAEセンサーを図3.2.1に示すようにボアホール周辺に表裏合計で6個配置した。この時使用したAEセンサーは共振周波数Hz、直径20mm、長さ26mmの圧電型センサーである。また使用したセンサーは瞬間接着剤を用いて供試体に接着した。図3.2.2にはAE計測システムを示し、表3.2.3にはシステムの仕様と設定値を示す。

表3.2.3 AE計測システムの仕様と設定値

名称	仕様	品名	数量	設定値
AEセンサ	・共振周波数 70kHz	㈱富士セラミック製 AE703SW-GAMP-0542	8個	—
プリアンプ	・増幅度 40dB	㈱富士セラミック製 LN-043	8台	30dB
シグナルコンディショナ	・周波数帯域 100kHz~2MHz ・増幅度 0~60dB	㈱昭和電気研究所 製 NAIS-5000	1台	40dB
ウェーブメモリ	・サンプリングタイム 0.1 $\mu$ 秒~2 $\mu$ 秒 ・波形記録長 1,2,4,8kwords ・プレトリガ 波形記録長の 1/8,1/4,1/2	(株)オートニクス APC-5108	1台	・サンプリングタイム 1 $\mu$ 秒 ・波形記録長 1,kwords ・プレトリガ 1/4
デジタルオシロスコープ(4ch用)	・分解能 8bit ・周波数帯域 DC~150MHz	㈱横河電機社 製 DL2100	1台	—
AE解析装置	・PC9801BX2	NEC 製	1台	—
AE波形処理装置	・PC9801BA2	NEC 製	1台	—

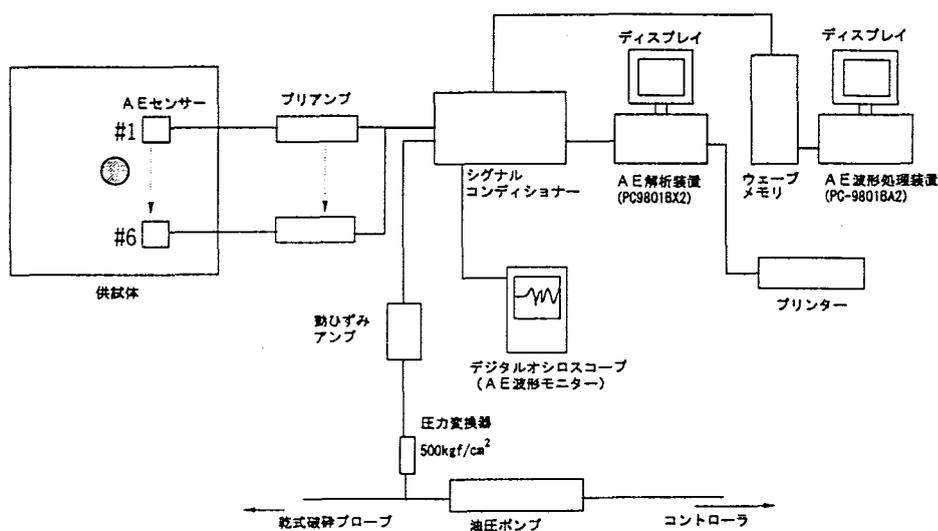


図3.2.2 AE計測システム図

### 3.2.4 試験条件

#### (1) 拘束圧載荷条件

供試体を用いた室内試験では、鋼板型摩擦シェルを用いて既存の亀裂がある状態でも任意の方向に亀裂を作成すること、亀裂再開口時の圧力-変位曲線の再現性の確認、および実験から得られる圧力-変位曲線によって求められた折れ点と、理論式から得られる亀裂開口圧力との関係を明らかにするため、主応力比を一定に保ちながら拘束圧を数種類に変化させた。また亀裂の発生方向も3方向にすることとした。本報の理論値の算出に使用した理論式は前述のKirschの式である。

拘束圧載荷条件は、水平方向応力と鉛直方向応力の比が3：2または2：3となるように、載荷ジャッキの能力（最大150kgf/cm<sup>2</sup>）等を考慮して、水平応力を最大で150kgf/cm<sup>2</sup>、垂直応力を最大で120kgf/cm<sup>2</sup>とした。亀裂の発生方向は、水平面から時計回りに15°、80° および130° となるようにした。各載荷試験での供試体拘束圧と亀裂発生角度を表3.2.4に示す。

なお、供試体を使用する載荷試験を行う前には、予備載荷として鋼管内での繰り返し載荷試験を行い、載荷に対するプローブの挙動が安定した後、供試体内で試験を行った。

表3.2.4 供試体拘束圧載荷条件

実験内容	載荷回数	水平応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	垂直応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	亀裂発生角度 (水平から) (°)	折れ点圧力 理論値(kgf/cm <sup>2</sup> )
破 碎	1	60	40	15	
再 開 口	2	30	20	15	32.7
再 開 口	6	60	40	15	65.4
再 開 口	3	90	60	15	98.0
再 開 口	2	150	100	15	136.1
再 開 口	2	20	30	15	67.3
再 開 口	1	40	60	15	134.6
再 開 口	1	60	90	15	202.0
再 開 口	2	80	120	15	269.3
破 碎	1	60	40	80	
再 開 口	3	60	40	80	137.6
破 碎	1	60	40	130	
再 開 口	1	60	40	130	106.9

## (2) 試験手順

供試体を使用する場合の試験手順を以下に示す。

- ① 载荷治具へ供試体を設置する。設置に当たっては、石膏により供試体とフラットジャッキとの隙間を充填する。
- ② 各機器の動作確認、供試体測定AE計器の作動確認をし、载荷圧、载荷装置の変位およびAEデータの計測記録確認を実施する。
- ③ 载荷装置のハンドポンプにより所定の拘束圧までフラットジャッキを加圧し、供試体を静かに载荷する。この時、载荷装置に大きなひずみが発生していないか確認する。
- ④ S-500プローブの载荷部を供試体の中央に設置する。
- ⑤ S-500の電動ポンプによりプローブの载荷部が鋼管内壁に密着するまで静かに载荷する。
- ⑥ スタートの合図と共に、S-500の圧力、孔径変位およびAEの計測を開始する。電動ポンプによりS-500プローブに内圧を負荷する。
- ⑦ 応力-孔径変位の関係をモニターしながら完全な折れ点を認めるとS-500の内圧を除荷する。
- ⑧ ⑤⑥と同じ手順で再载荷し、亀裂を再開口させる。
- ⑨ (一度拘束圧を除荷させる場合には③の作業が必要)
- ⑩ 試験終了

### 3.2.5 試験結果

図3.2.3～図3.2.14に载荷条件毎の圧力-変位曲線の結果を示し、これらの図から読みとった折れ点の圧力は、理論値から求めた折れ点の圧力と共にまとめて表3.3.5に示す。直径変形は図3.1.1に示したようにCh.1とCh.2の2カ所で計測しているため、それぞれの図(a)にはCh.1の結果を、図(b)にはCh.2の結果を示す。また、図中には载荷条件と载荷方向、および折れ点の圧力を併せて記述した。ただし図3.2.5は、载荷回数が多く、図が煩雑になるのを避けるため、破碎および再開口の3回目までと再開口の4回目以降の载荷結果を2つの図に分けている。そのため、図3.2.5(a)、(b)がCh.1の結果であり、図3.2.5(c)、(d)がCh.2の結果である。

ここでの得られた折れ点は、圧力-変位曲線の上部の直線的変形部分を下方に延長したときに直線から離脱する点でとした。

表3.2.5 供試体を用いた実験結果一覧

実験内容	試験名	水平応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	垂直応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	角度 (水平から) (°)	折れ点圧力 実験値(kgf/cm <sup>2</sup> )		折れ点圧力 理論値 (kgf/cm <sup>2</sup> )	参照図
					Ch.1	Ch.2		
鉄管内予備载荷1(5回)	PT1	-	-	-	-	-	-	図3.2.3
鉄管内予備载荷2(4回)	PT2	-	-	-	-	-	-	図3.2.4
破 碎	1-15t1	60	40	15	390	390	-	図3.2.5
再開口(1回目)	1-15t2	60	40	15	360	380	65.4	"
再開口(2回目)	1-15t3	"	"	"	360	360	"	"
再開口(3回目)	1-15t4	"	"	"	360	365	"	"
再開口(4回目)	1-15t5	"	"	"	365	360	"	"
再開口(5回目)	1-15t6	"	"	"	360	360	"	"
再開口(6回目)	1-15t7	"	"	"	360	360	"	"
再開口(1回目)	1-32t1	30	20	15	295	295	32.7	図3.2.6
再開口(2回目)	1-32t2	"	"	"	320	315	"	"
再開口(1回目)	1-96t1	90	60	15	400	400	98.0	図3.2.7
再開口(2回目)	1-96t2	"	"	"	420	425	"	"
再開口(3回目)	1-96t3	"	"	"	425	430	"	"
再開口(1回目)	1-1510t1	150(147)	100(98)	15	465	450	136.1	図3.2.8
再開口(2回目)	1-1510t2	"	"	"	470	450	"	"
再開口(1回目)	1-23t1	20	30	15	350	345	67.3	図3.2.9
再開口(2回目)	1-23t2	"	"	"	270	270	"	"
再開口	1-46t1	40	60	15	420	440	134.6	図3.2.10
再開口	1-69t1	60	90	15	430	440	202.0	図3.2.11
再開口(1回目)	1-812t1	80	120	15	470	480	269.3	図3.2.12
再開口(2回目)	1-812t2	"	"	"	495	495	"	"
破 碎	1-80t1	60	40	80	410	410	-	図3.2.13
再開口(1回目)	1-80t2	60	40	80	420	420	137.6	"
再開口(2回目)	1-80t3	"	"	"	430	430	"	"
再開口(3回目)	1-80t4	"	"	"	420	420	"	"
破 碎	1-130t1	60	40	130	405	405	-	図3.2.14
再開口	1-130t2	60	40	130	430	430	106.9	"

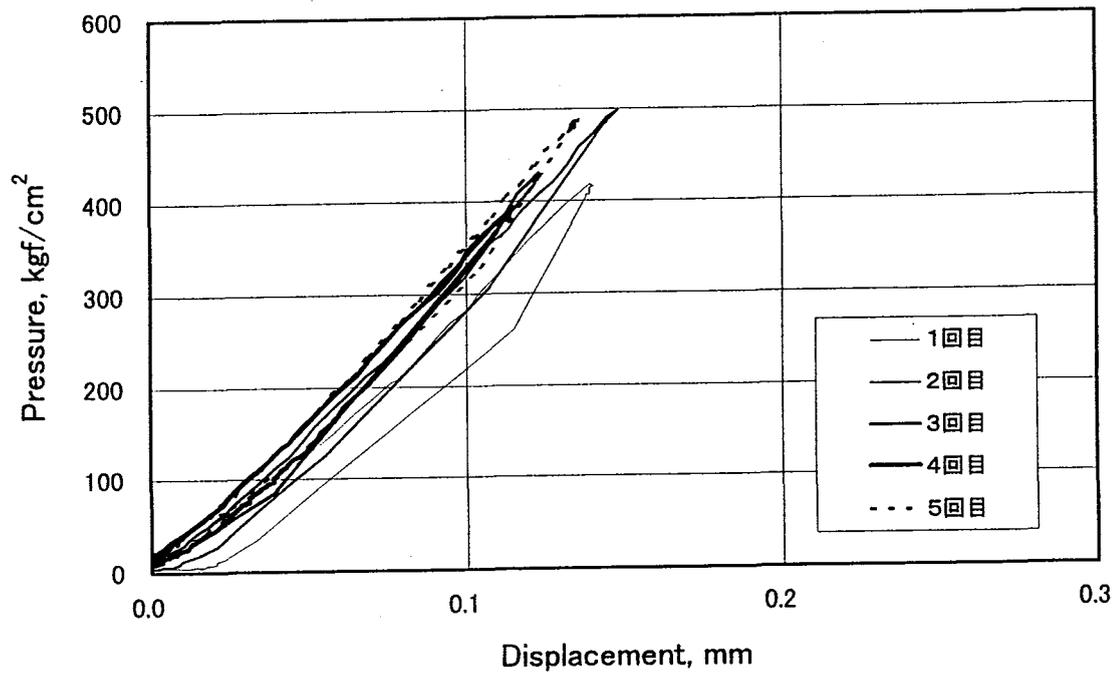


図3.2.3(a) 圧力-変位曲線(Ch.1)

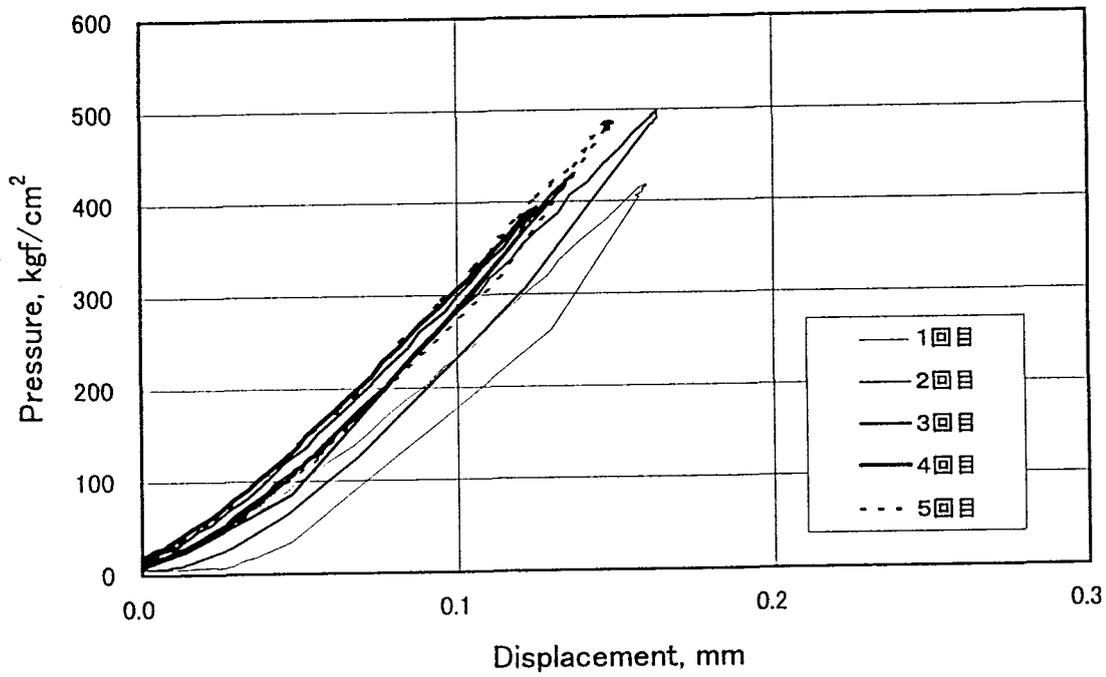


図3.2.3(b) 圧力-変位曲線(Ch.2)

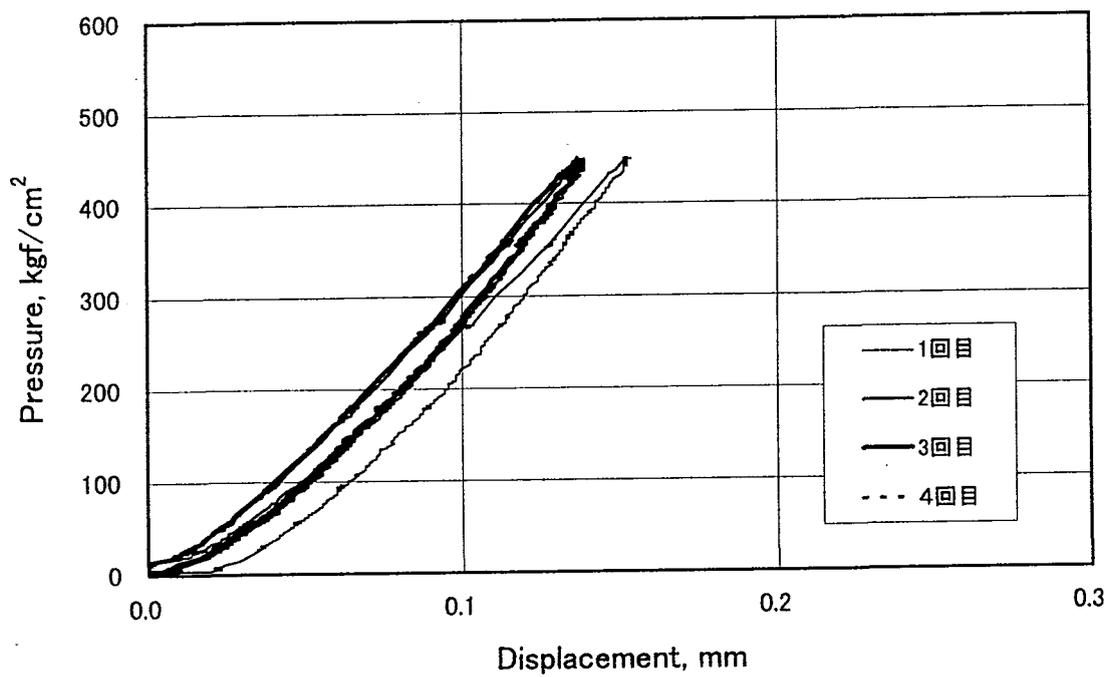


図3.2.4(a) 圧力-変位曲線(Ch.1)

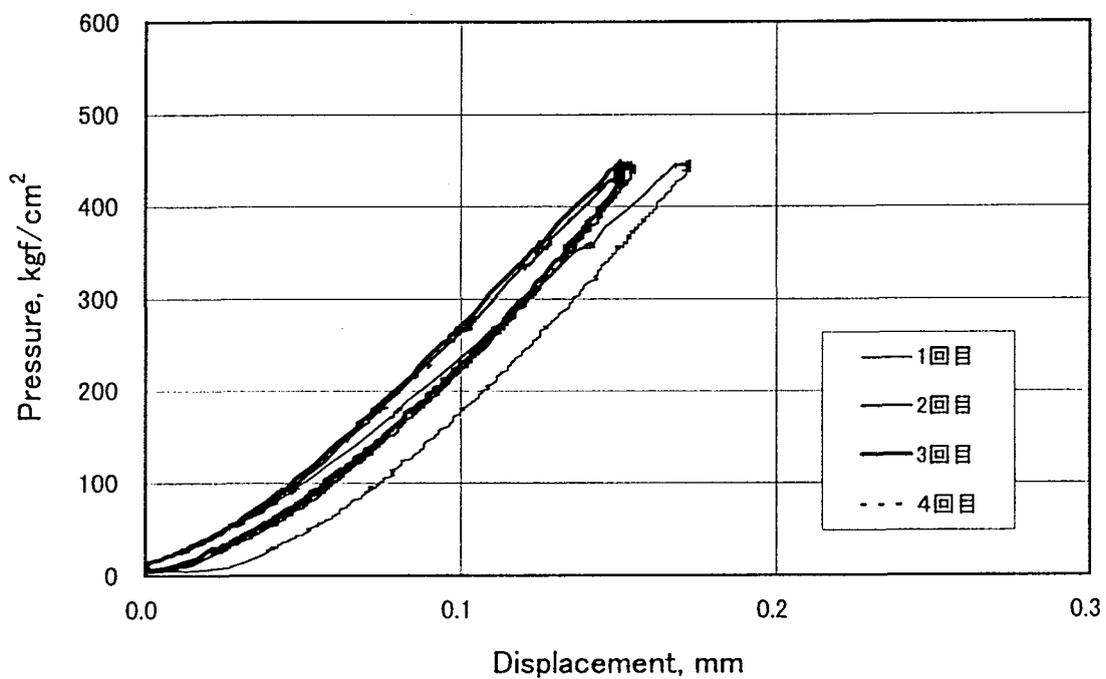


図3.2.4(b) 圧力-変位曲線(Ch.2)

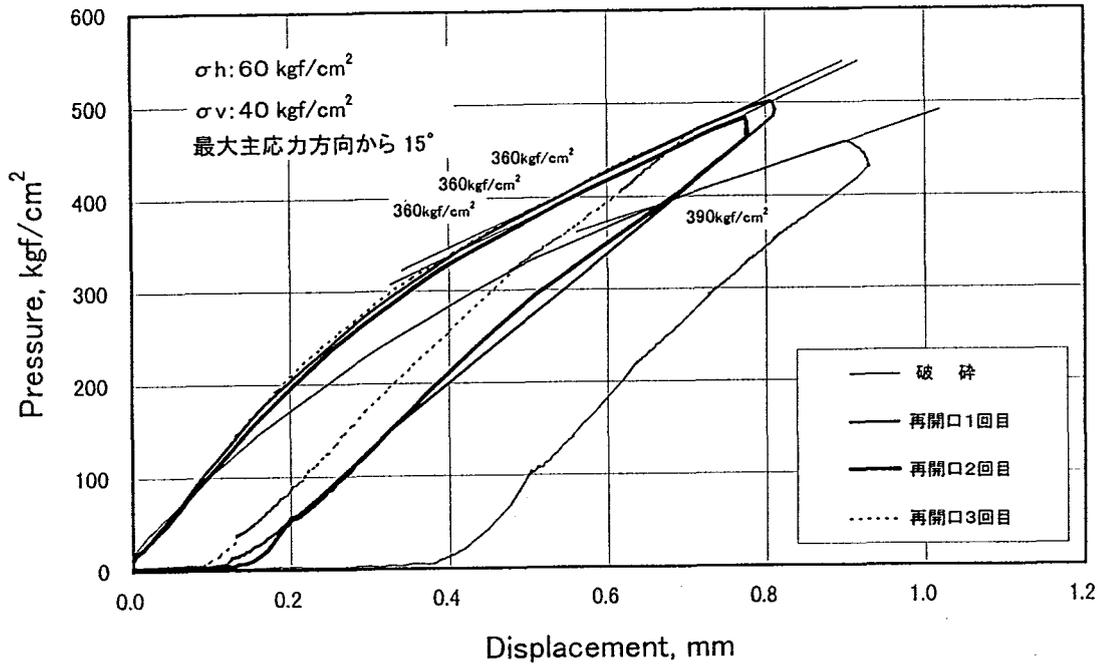


図3.2.5(a) 圧力-変位曲線(Ch.1)

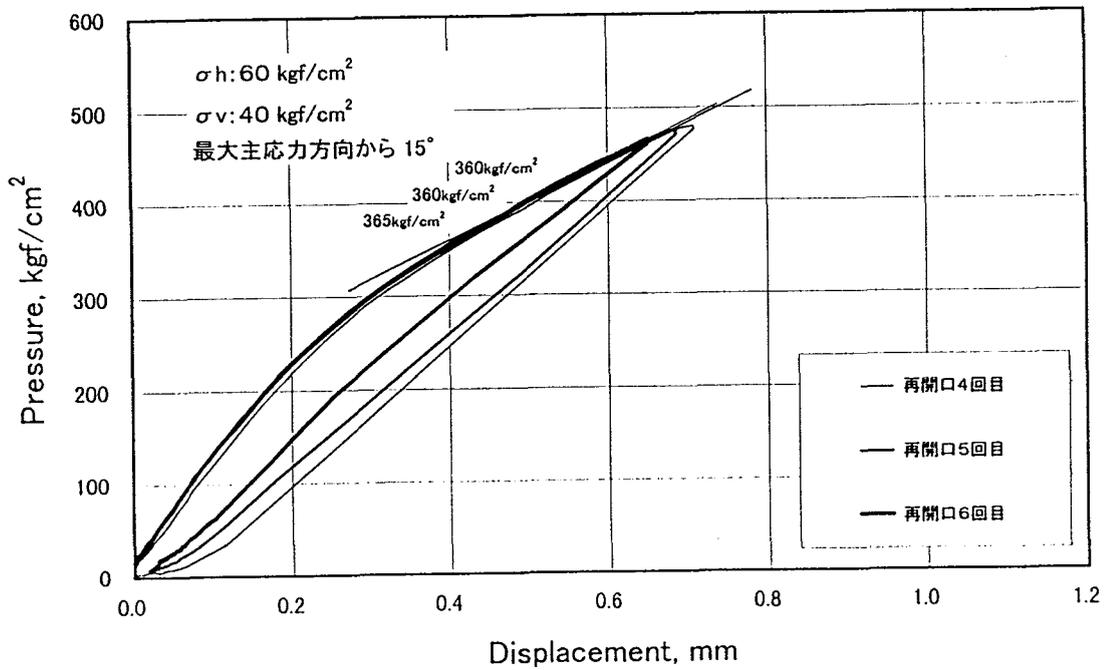


図3.2.5(b) 圧力-変位曲線(Ch.1)

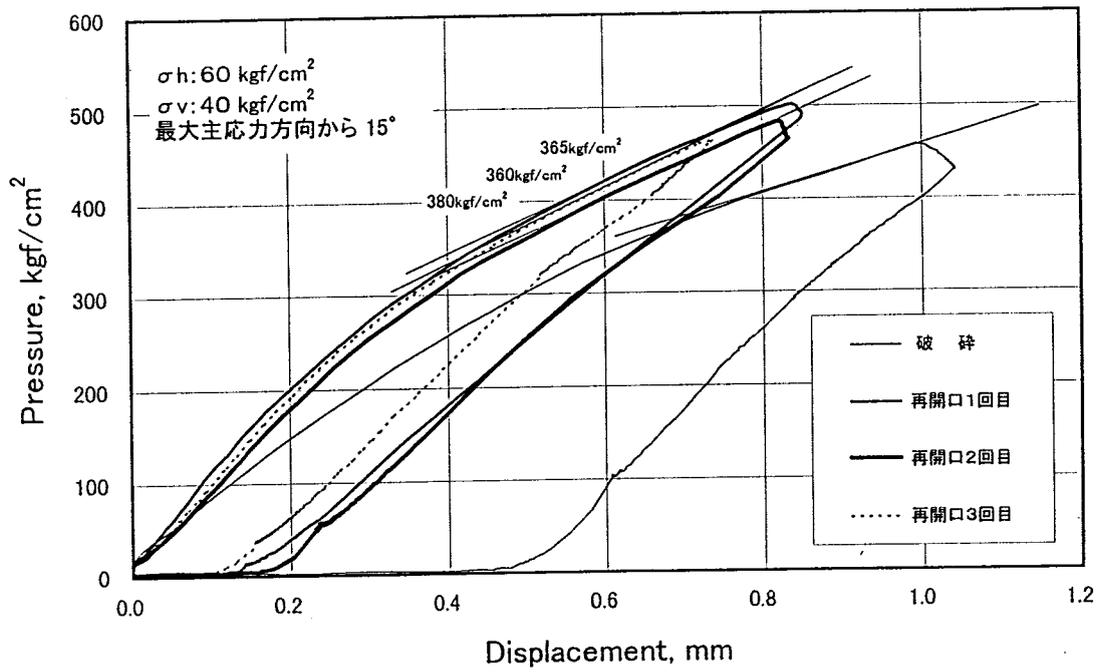


図3.2.5(c) 圧力-変位曲線(Ch.2)

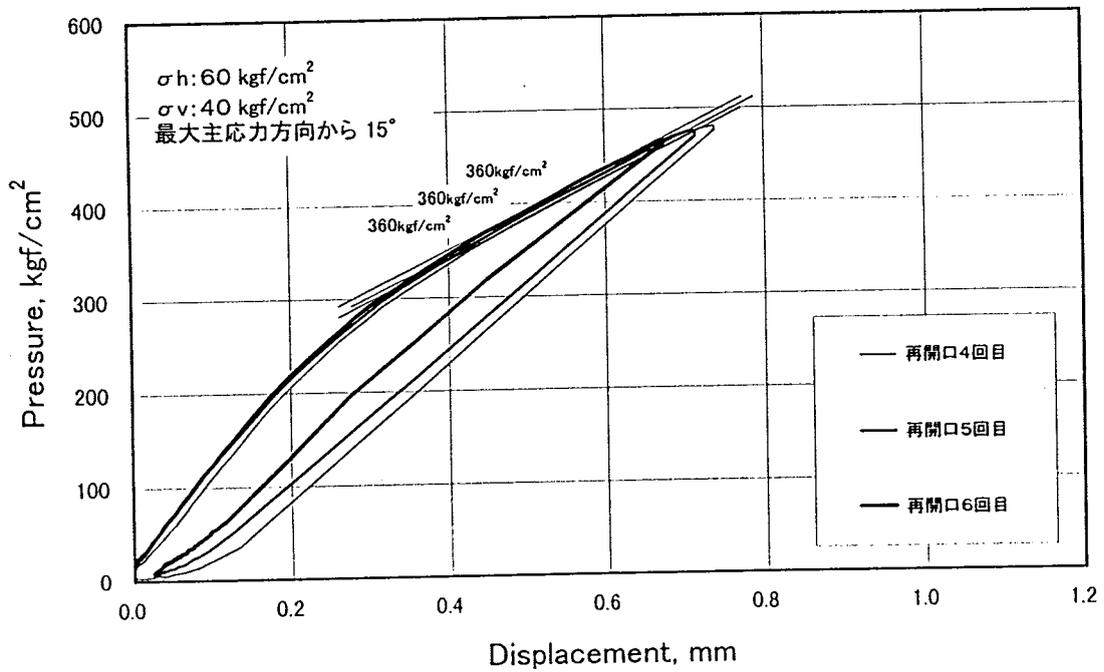


図3.2.5(d) 圧力-変位曲線(Ch.2)

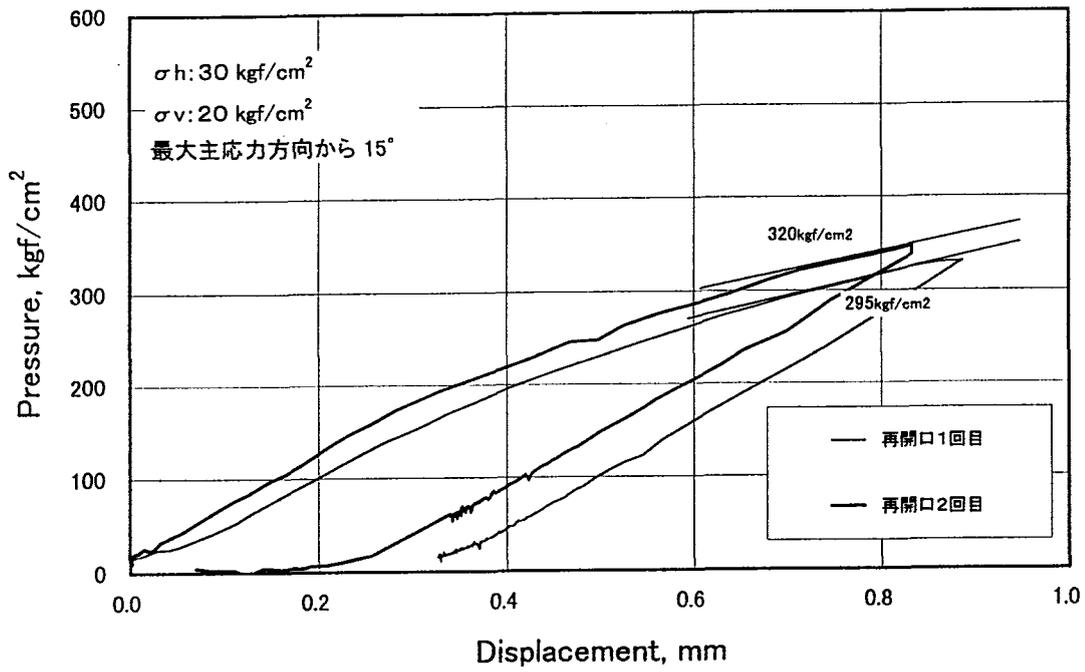


図3.2.6(a) 圧力-変位曲線(Ch.1)

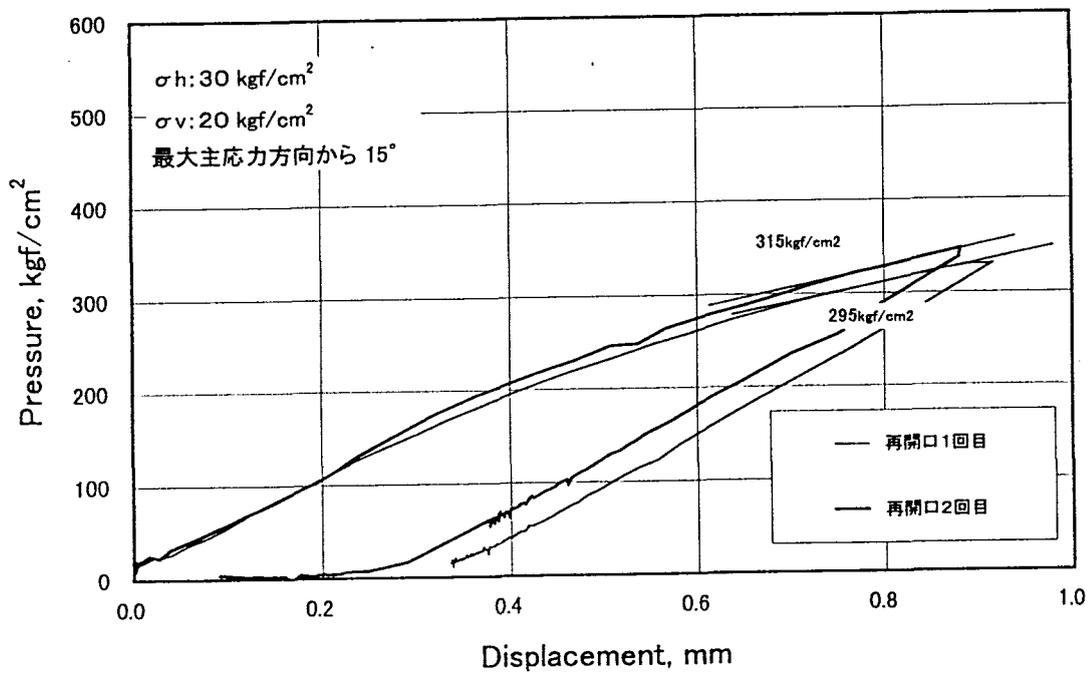


図3.2.6(b) 圧力-変位曲線(Ch.2)

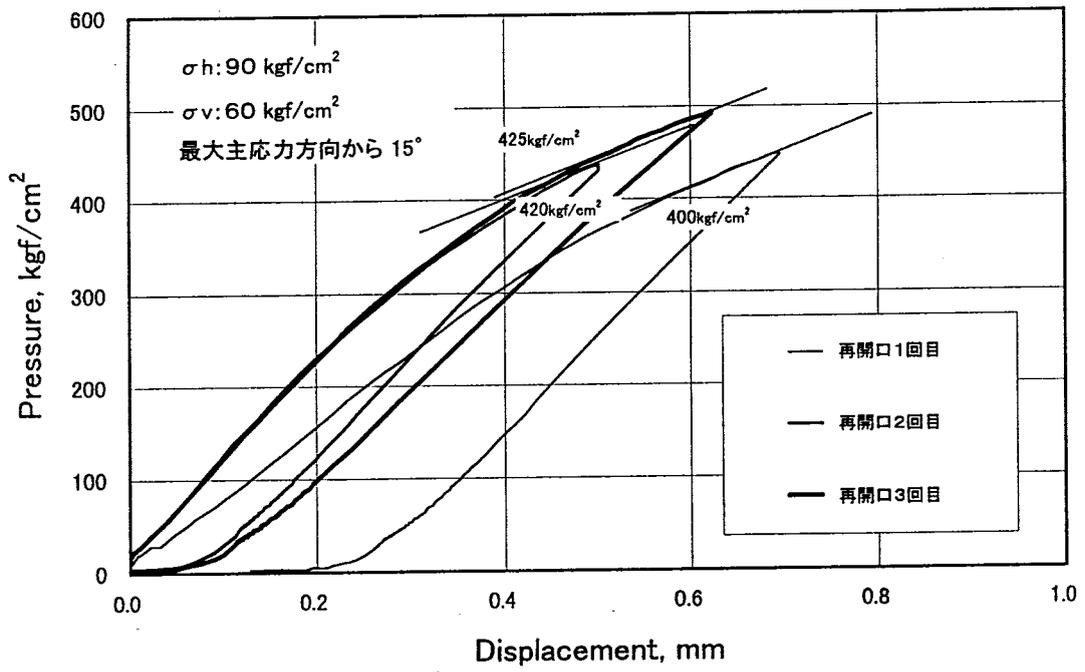


図3.2.7(a) 圧力-変位曲線(Ch.1)

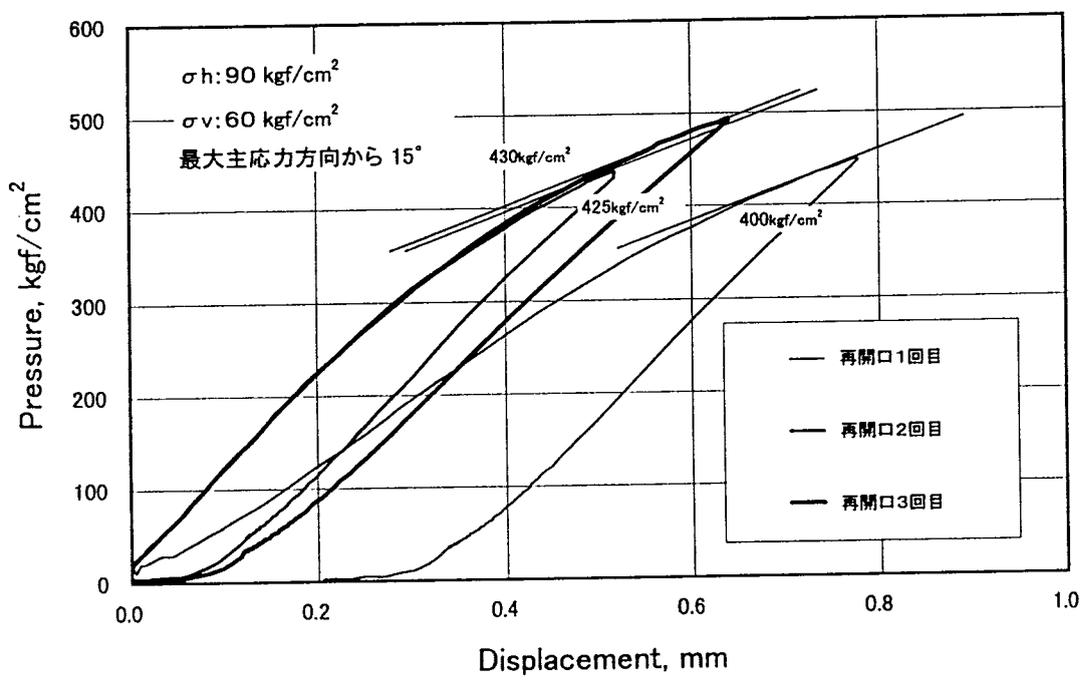


図3.2.7(b) 圧力-変位曲線(Ch.2)

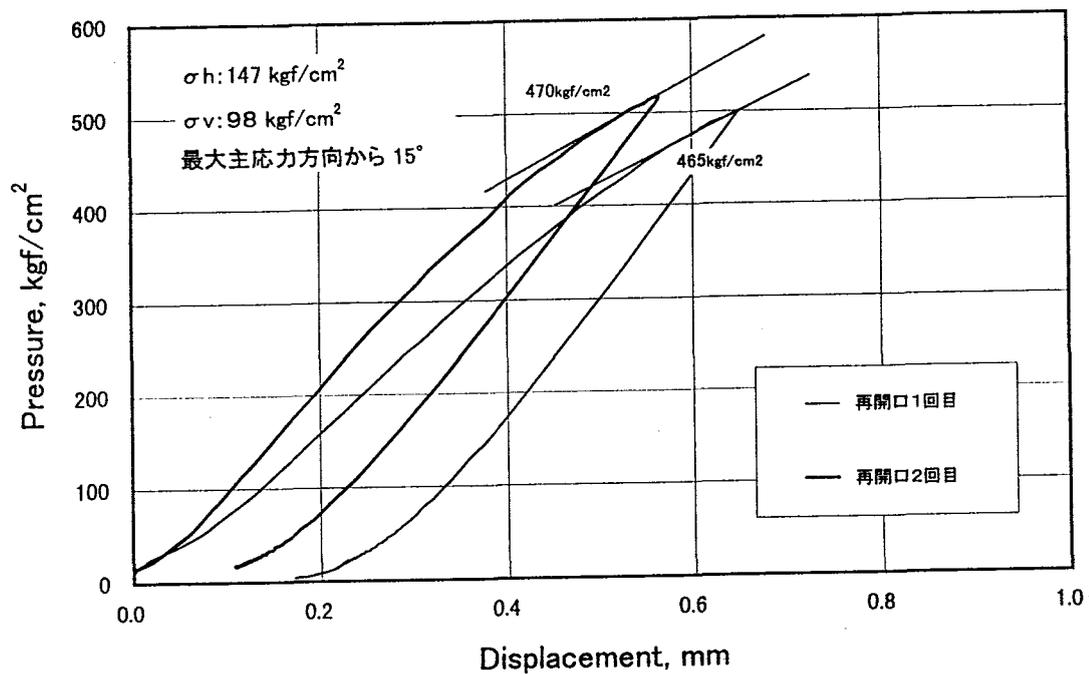


図3.2.8(a) 圧力-変位曲線(Ch.1)

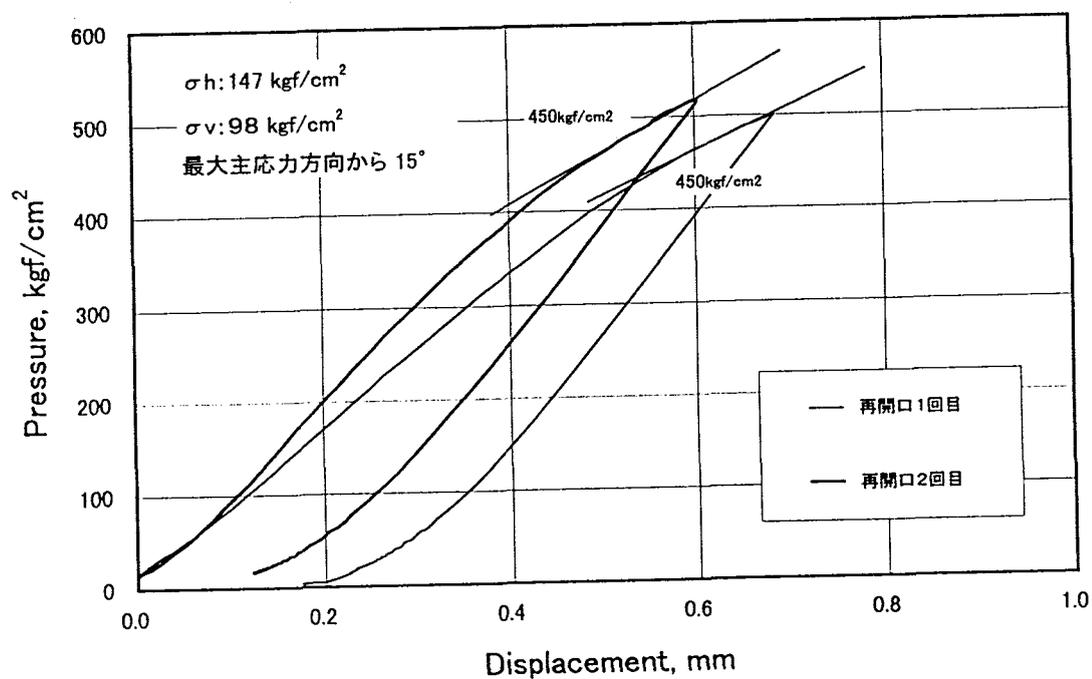


図3.2.8(b) 圧力-変位曲線(Ch.2)

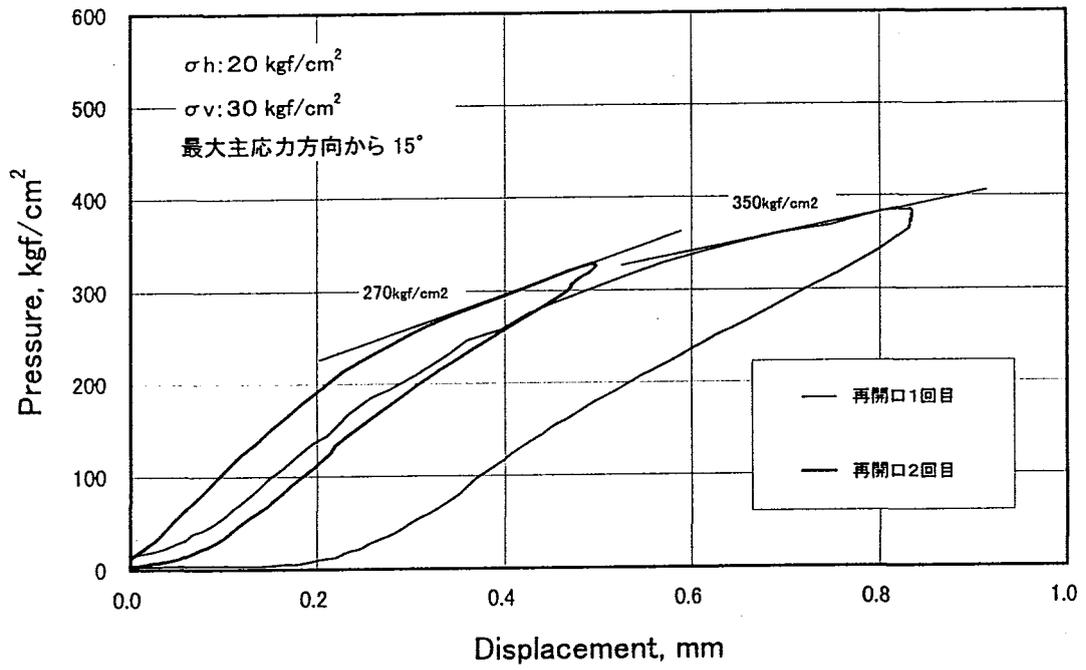


図3.2.9(a) 圧力-変位曲線(Ch.1)

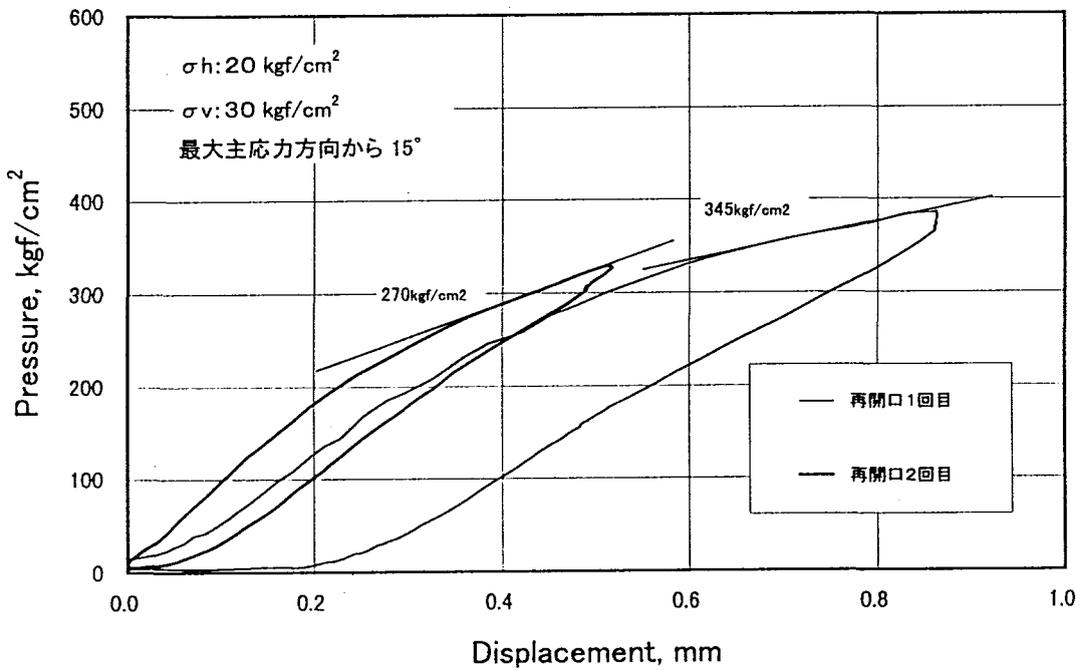


図3.2.9(b) 圧力-変位曲線(Ch.2)

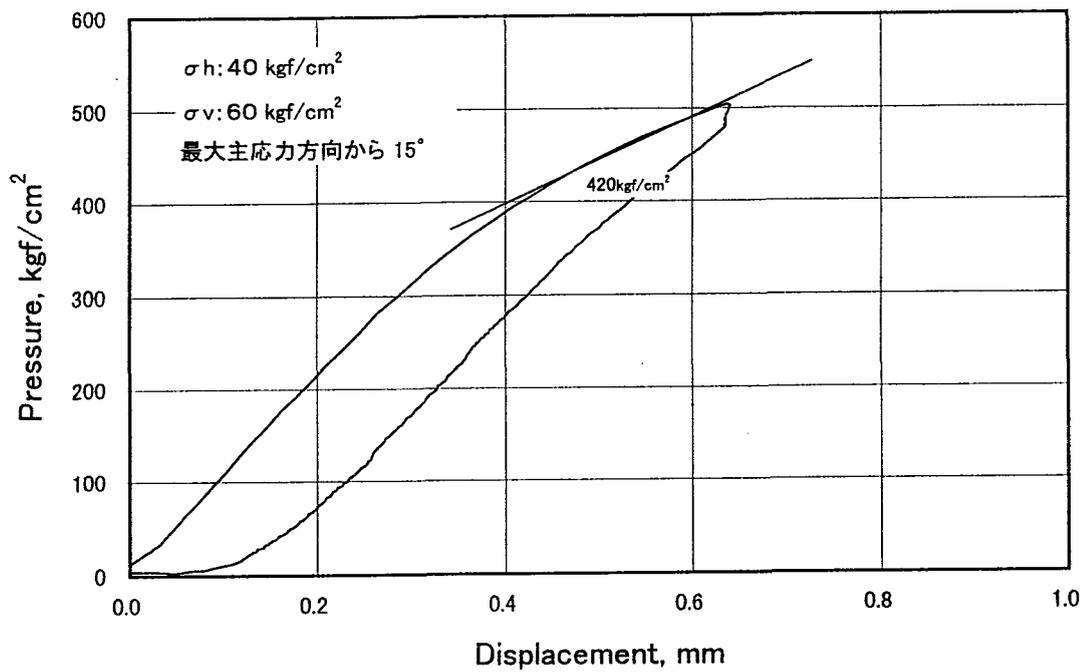


図3.2.10(a) 圧力-変位曲線(Ch.1)

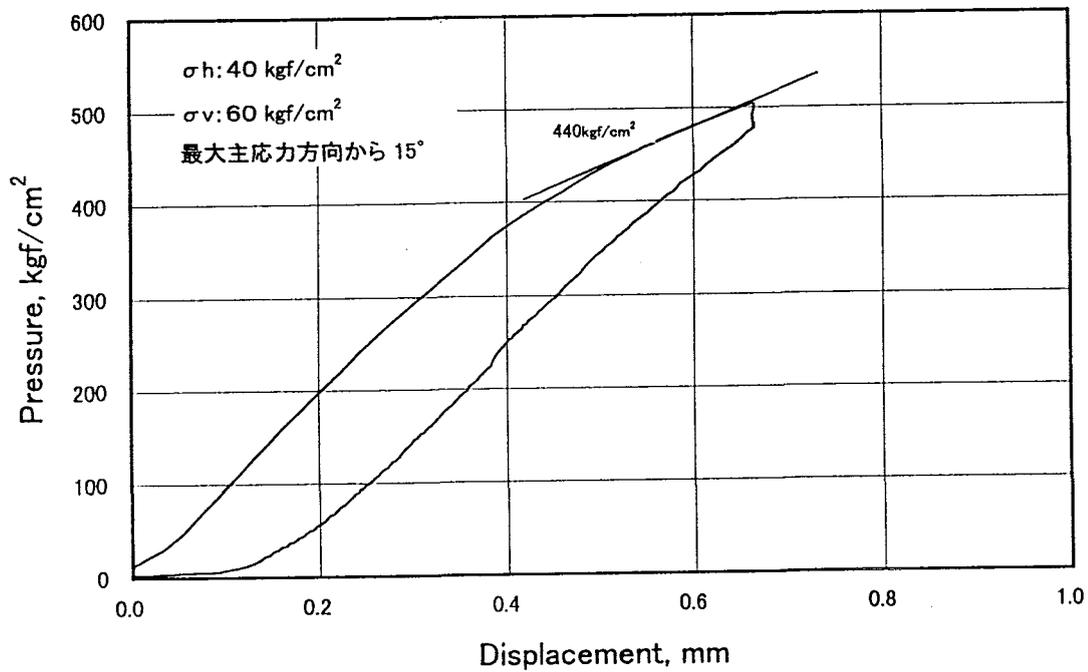


図3.2.10(b) 圧力-変位曲線(Ch.2)

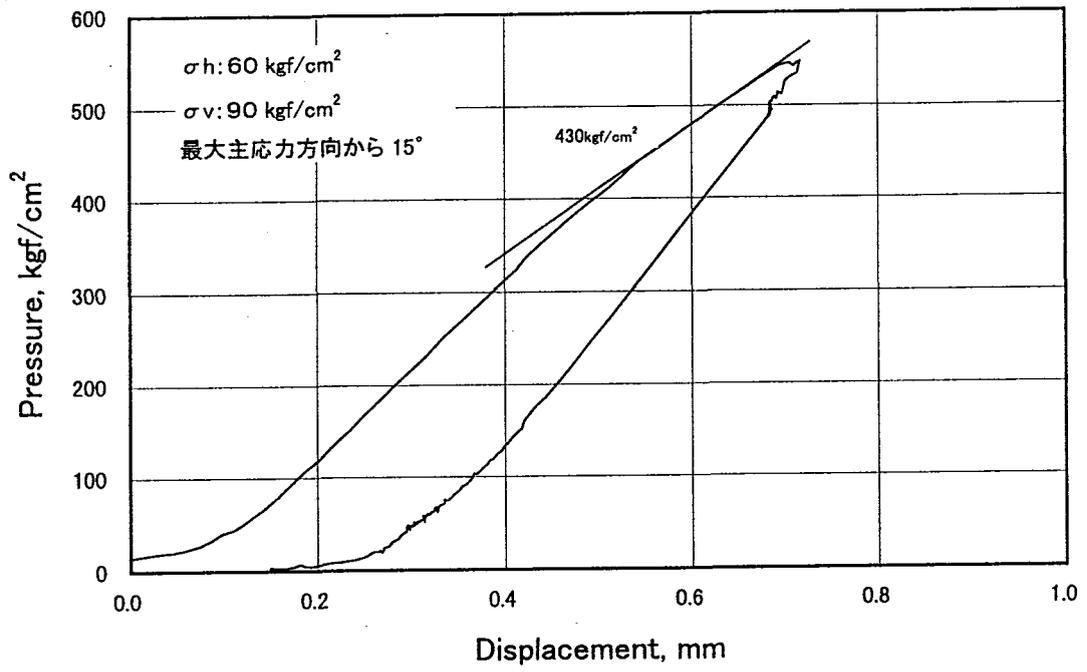


図3.2.11(a) 圧力-変位曲線(Ch.1)

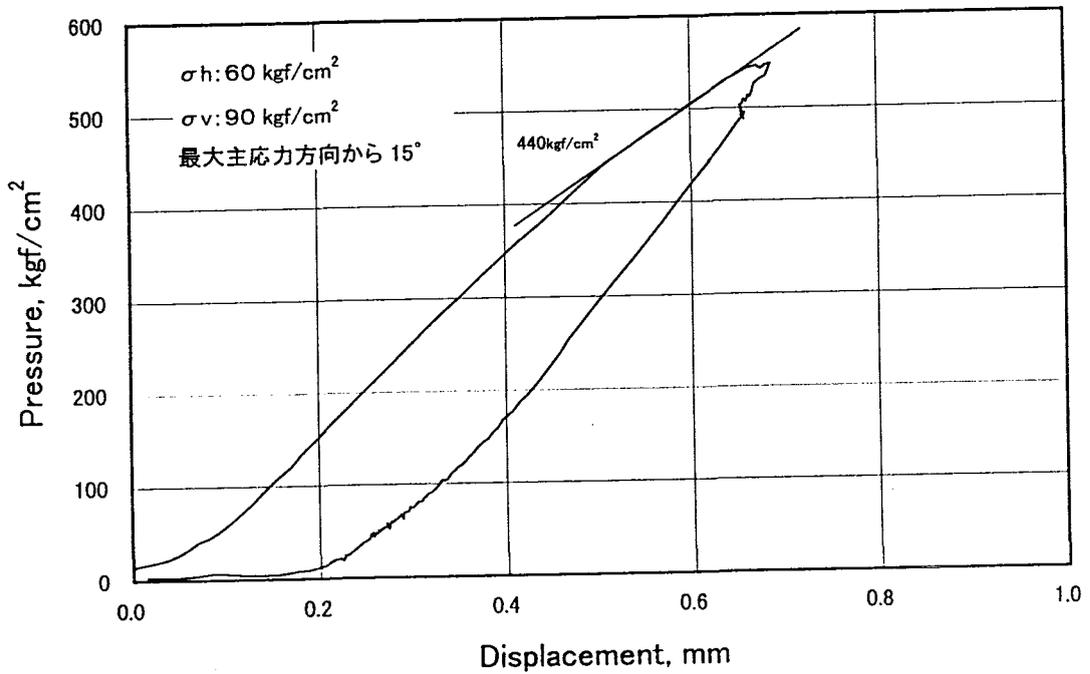


図3.2.11(b) 圧力-変位曲線(Ch.2)

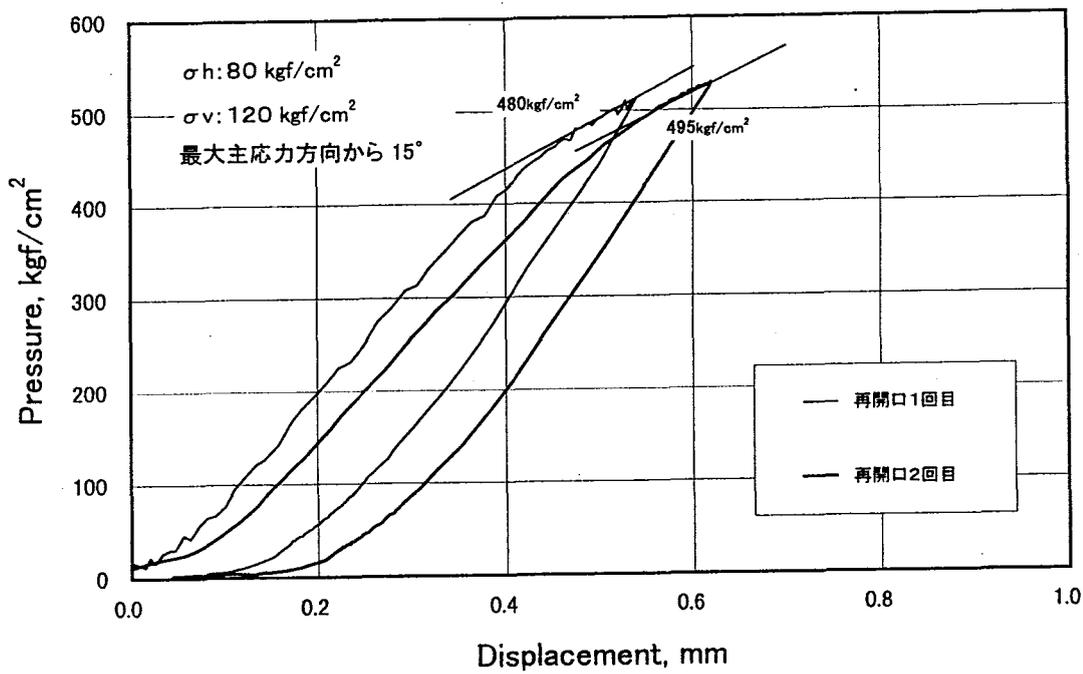


図3.2.12(a) 圧力-変位曲線(Ch.1)

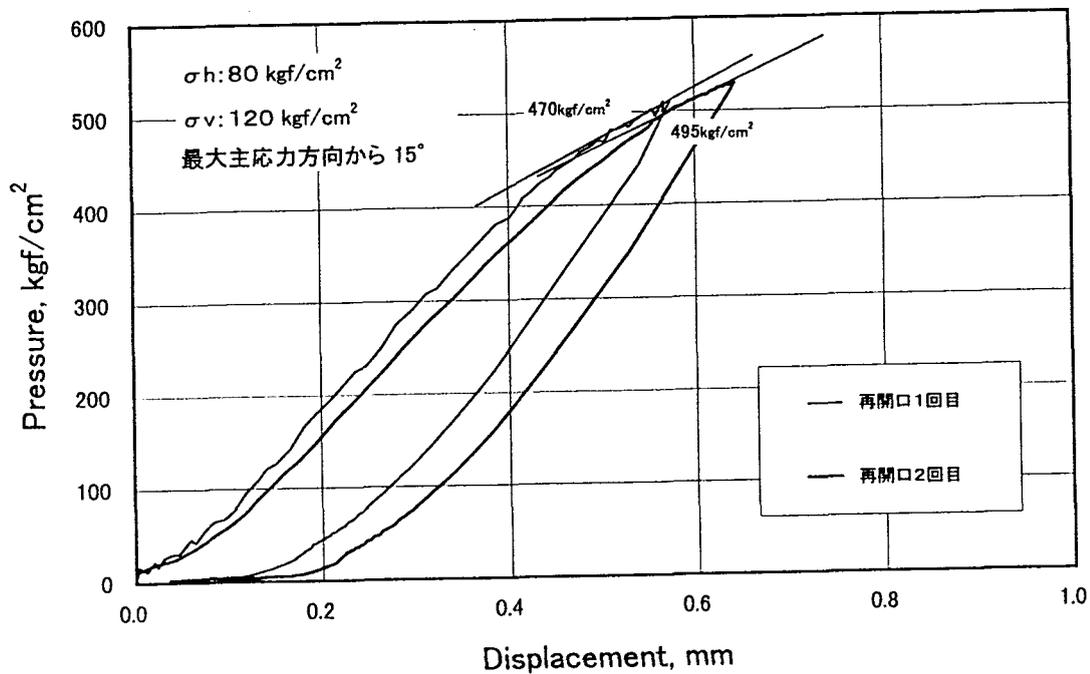


図3.2.12(b) 圧力-変位曲線(Ch.2)

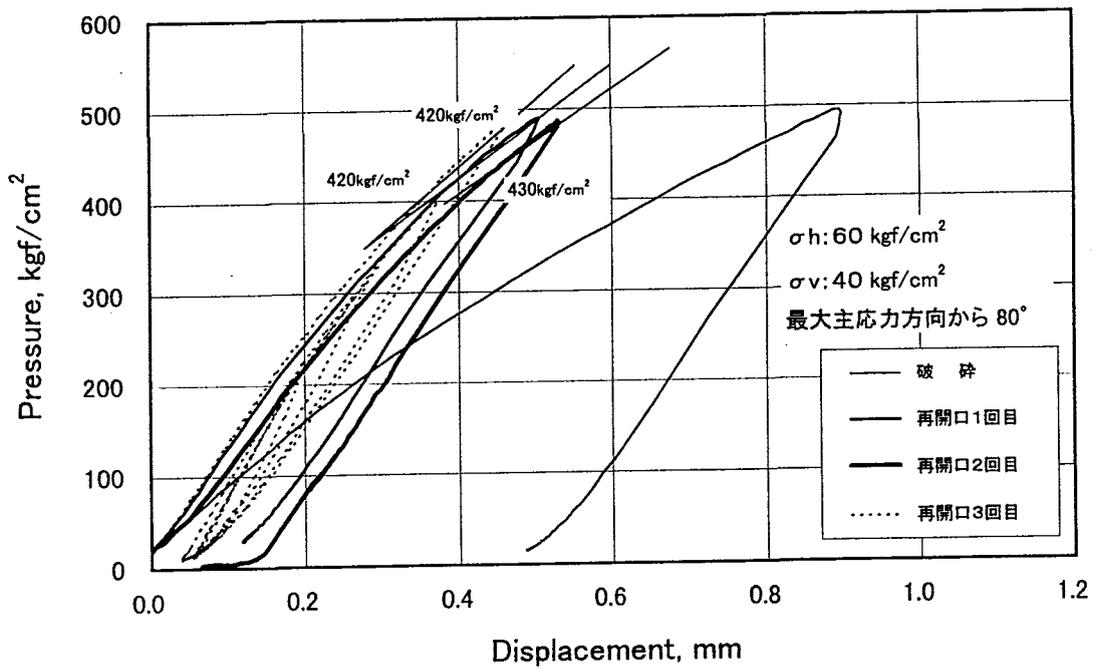


図3.2.13(a) 圧力-変位曲線(Ch.1)

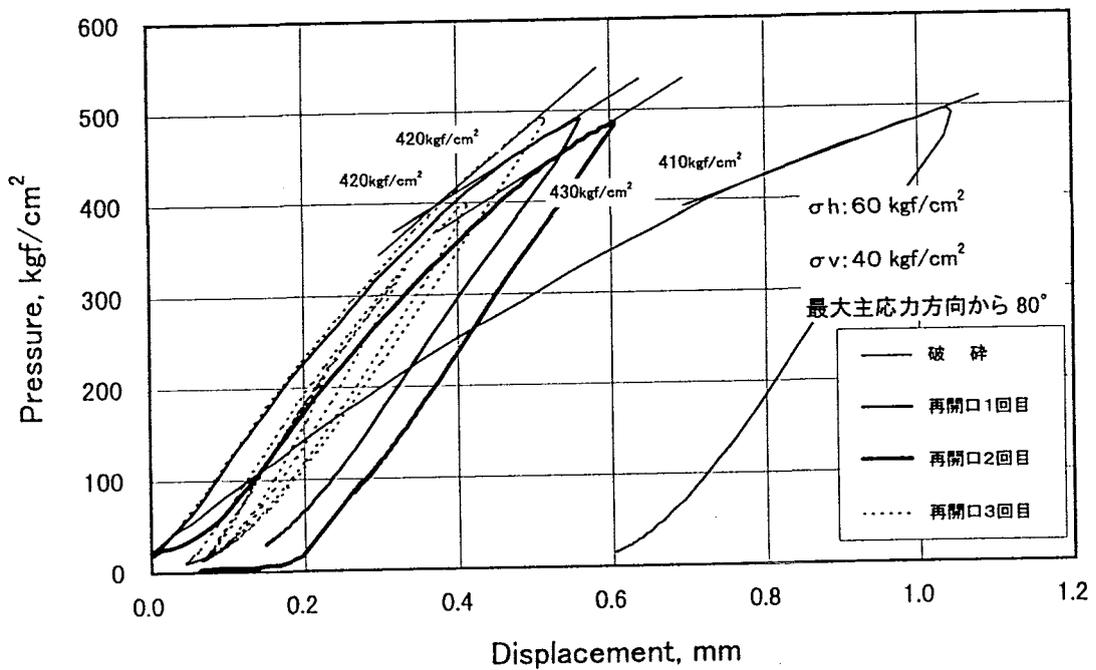


図3.2.13(b) 圧力-変位曲線(Ch.2)

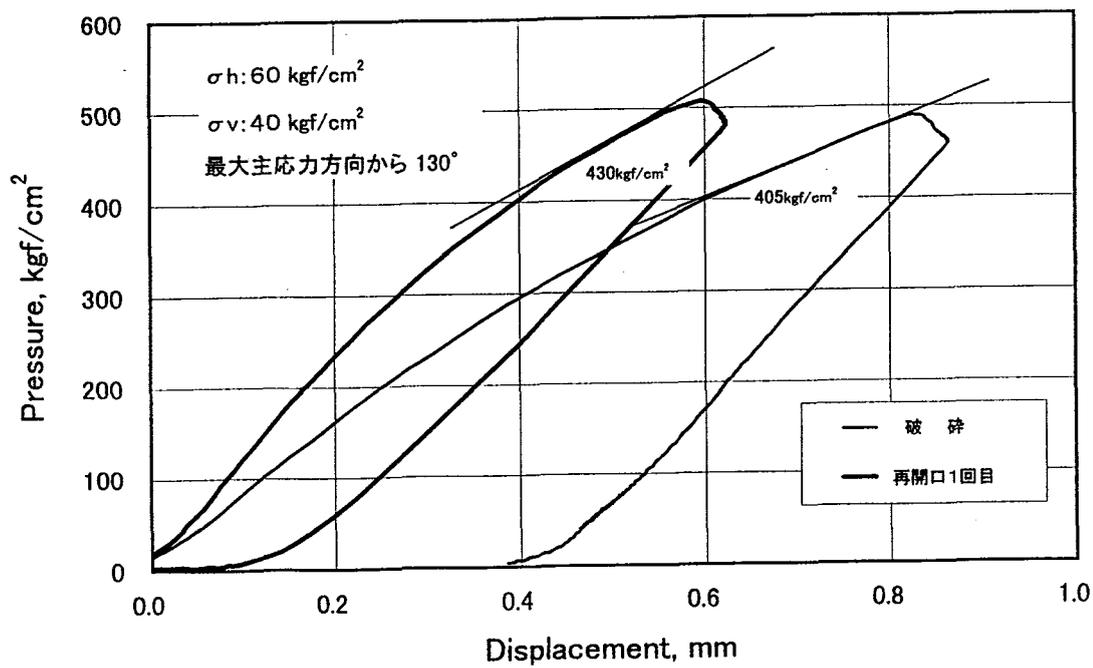


図3.2.14(a) 圧力-変位曲線(Ch.1)

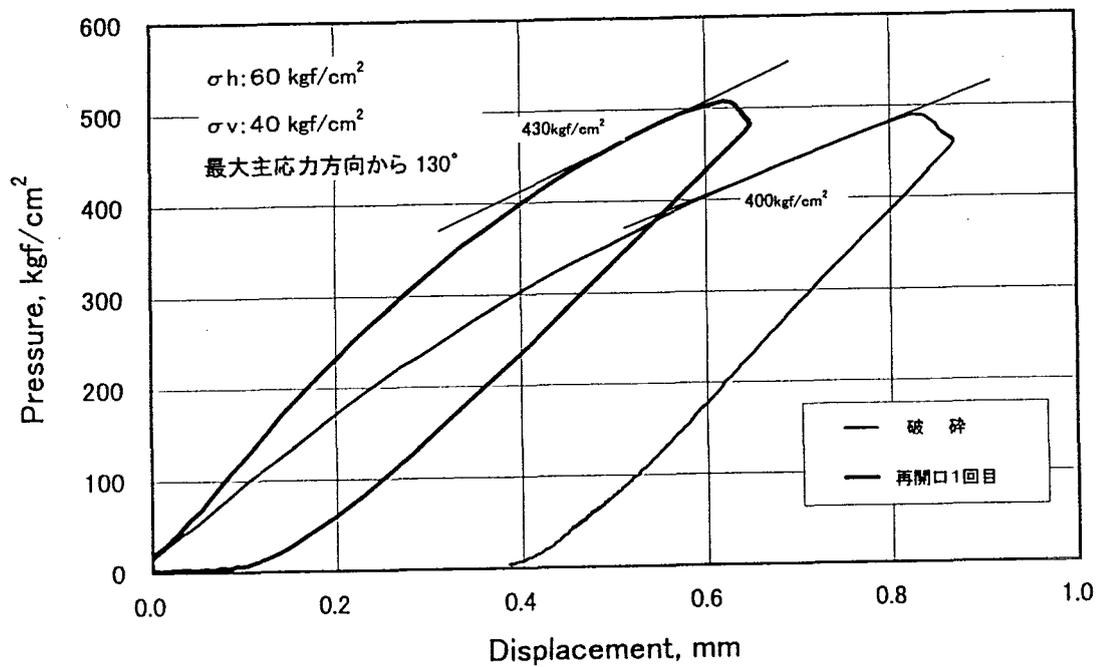


図3.2.14(b) 圧力-変位曲線(Ch.2)

鋼管内予備載荷試験結果の図3.2.3および図3.2.4を見ると、両方の試験共に1回目から3回目の載荷で計測された曲線はそれぞれ異なるが、3回目以降の曲線の履歴はほぼ同じであることが分かる。このことは、昨年度の試験からも報告されていることで、本試験でプローブを鋼板型摩擦シェルに改良してもこの現象は変化していない。2つの試験結果のうち、図3.2.3の結果は、図3.2.4の結果よりも線形性が高いが、これは図3.2.3における載荷速度が図3.2.4の時の載荷速度よりも早かったためであると思われる。

亀裂の発生角度を水平面から $15^\circ$ とした場合の結果を見ると、破砕と亀裂の再開口を行った図3.2.5は、いずれの圧力-変位曲線にも破砕時および再開口時に折れ点が観測されている。図中の破砕時の折れ点圧力は、再開口時の折れ点圧力よりも大きく、亀裂の発生を推測できる。また、圧力-変位曲線から読みとった亀裂再開口時の折れ点圧力は、1回目から6回目までほぼ等しい。その後拘束圧を変化させて $15^\circ$ 方向の亀裂を再開口させたとき結果は、拘束圧の増加と共に再開口時の折れ点圧力も増加している。これは、観測孔周辺の応力状態とS-500によって観測される亀裂の再開口圧力との間に何らかの関係があることを示唆している。ここで、同一の拘束圧条件で複数の載荷試験を行ったときの折れ点圧力結果を見ると、はじめの拘束条件下で行った図3.2.5は、前述のように1回目から6回目まで折れ点圧力にあまり変化が無い。また、図3.2.9は、1回目の折れ点圧力よりも2回目に折れ点圧力が低下している。しかしこの2ケース以外は、いずれの載荷条件でも1回目の折れ点圧力よりも2回目以降の折れ点圧力の方が大きくなっているのが分かる。2回目の折れ点圧力が大きくなっている場合（図3.2.6～3.2.8および図3.2.12）に注目すると、1回目と2回目の折れ点圧力の差は、いずれも $20\sim 30\text{kgf/cm}^2$ あるが、3回目の再開口を行っている図3.2.7の2回目と3回目の間の折れ点圧力差は、1回目と2回目の折れ点圧力の差に比べて非常に小さい。このことは、再開口試験を行う場合、図3.2.3および図3.2.4示した鋼管内予備載荷試験同様、各拘束条件下で3回程度の載荷を行わなければ安定した結果は得られないことを示していると思われる。

$80^\circ$ の角度に亀裂を発生させようとした時の結果を見ると、図3.2.13の圧力-時間曲線の傾きが変化しているため、この角度で亀裂が発生したような挙動である。しかし、その後に行った再開口試験の結果得られた折れ点圧力は、破砕時の折れ点圧力よりも大きい。再開口時の折れ点圧力は、供試体の引っ張り強度分小さくなると思われるが、ここでは逆の結果であり、 $80^\circ$ 方向に亀裂が発生したのかは圧力-変位曲線からのみでは判断できない。

$130^\circ$ の角度に亀裂を発生させる試験で観測された圧力-変位曲線（図3.2.14）も $80^\circ$ の時と同様、折れ点の圧力は再開口時の方が破砕時よりも大きく、実際に所定の箇所破砕が起こっているのか曲線からだけでは分からなかった。そこで、これらの載荷による亀裂発生箇所の確認をするため、試験終了後に載荷試験装置から供試体を取り出し、亀裂の観察を行った。その結果、最初に亀裂を作成した、水平から $15^\circ$ 方向には、非常に明瞭な亀

裂が観察された。また、他の2方向(80° および130° 方向)にも、15° 方向ほど明瞭ではないものの亀裂が観察された。従って、図3.2.14に示された130° 方向の試験結果のように、亀裂作成時の折れ点圧力よりも再開口時の折れ点圧力が小さい場合に、これらの圧力を再開口時の折れ点圧力としてどう評価するのか問題ではあるが、本装置を用いた試験で、任意の3方向に亀裂を作成することができるということは確認された。

以上の試験で得られた圧力-変位曲線から求めた折れ点の圧力と、Kirschの解から求めた折れ点の理論値の圧力とを比較するため、図3.2.16に相関図を示す。理論値が150kgf/cm<sup>2</sup>以下の場合には実験値と理論値の間には線形な関係があるように思われるが、プロットできる点が少ないため、実験値と理論値の正確な関係が判断できない。

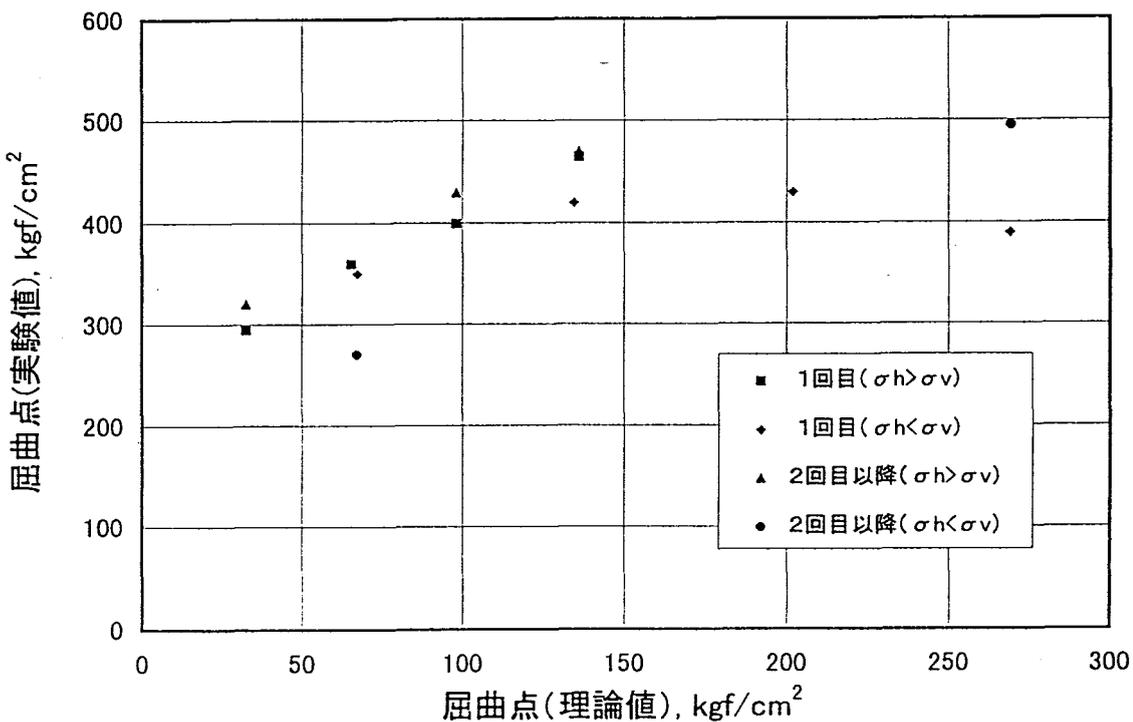


図3.2.15 折れ点圧力の理論値と実験値の相関図

次に、これらの試験で計測したAEの計測結果について述べる。6個のAEセンサーは、図3.2.16に示すように円孔の周辺6個配置した。図3.2.17～3.2.20に、計測結果を示す。これらの図は、試験の経過時間をX軸にとり、Y1軸にはS-500の载荷圧力値（単位はkgf/cm<sup>2</sup>）、Y2軸にはAEの発生数をとっている。AEセンサーは6個を使用しているが、亀裂が発生すると考えられる方向（15°、80°）に最も近い位置に設置してあるセンサー（Ch.1またはCh.4）についてのみ示す。他のセンサーによる計測結果は、図の煩雑さを避けるため章末の付図にまとめて示す。

供試体の拘束圧力が水平方向で60kgf/cm<sup>2</sup>、鉛直方向で40kgf/cm<sup>2</sup>の1-15T1試験（図3.2.16）についてみると試験を開始してS-500の载荷圧力が上昇するとAEの発生数も増加している。S-500の载荷圧力が200kgf/cm<sup>2</sup>程度からAEが急増し、350kgf/cm<sup>2</sup>で発生数のピークを迎え、その後は载荷圧力が500kgf/cm<sup>2</sup>まで増加する間AEの発生数は急激に減少している。

S-500の除荷時の亀裂閉口時に発生すると思われるAEを捉えるために、除荷は出来る限り低速度で降圧するようにした。しかしながら1-15T1試験については、降圧を滑らかに操作できず階段状の降圧となった。S-500の载荷圧力が最大に達した後、除荷を開始すると、AEが急激に発生している。しかし、除荷速度が遅くなるとAEの発生は少なくなった。AEの発生数は230kgf/cm<sup>2</sup>前後で、除荷速度を早くしたときに最も多かった。

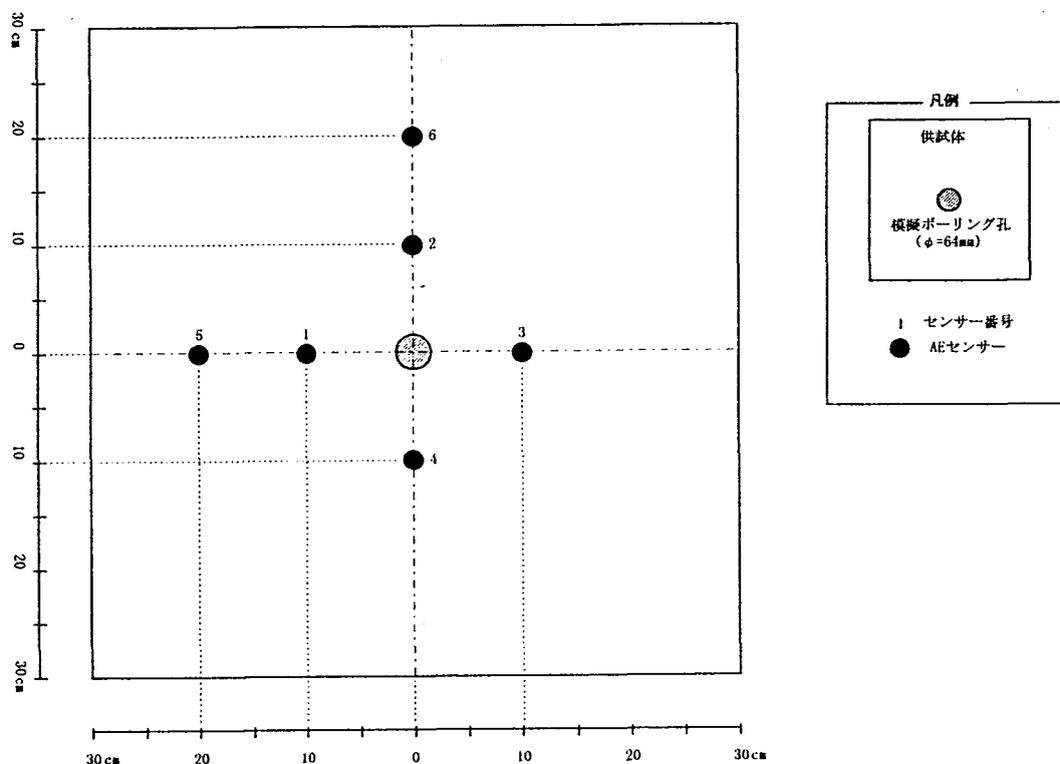


図3.2.16 AEセンサー位置図

図3. 2. 18は1-15T2試験結果を示している。これは亀裂の再開口時の試験結果である。S-500の載荷圧力が200kgf/cm<sup>2</sup>を越えるまで、AEはほとんど発生していなかったが、200kgf/cm<sup>2</sup>を越えるとAEが急増している。約250kgf/cm<sup>2</sup>で発生数のピークをむかえ、その後は減少している。また、最大載荷圧力（500kgf/cm<sup>2</sup>）でホールドしているときは、AEの発生は徐々に減少していく。1-15T1試験同様に除荷を開始するとすぐにAEが発生したが、載荷圧力の減少とともにAE発生数も激減している。

図3. 2. 19～3. 2. 20は、引き続き実施したS-500の載荷方向を供試体主応力軸より80度に変えた試験である。この試験でも、亀裂が発生すると考えられる位置に近いCh. 4において、載荷圧が200kgf/cm<sup>2</sup>以上でAE発生が急増し、350kgf/cm<sup>2</sup>付近で発生数のピークが観察される。除荷時では降圧速度が速いため不明瞭ではあるが、300～250kgf/cm<sup>2</sup>にAE発生のピークが認められる。以後、繰り返し試験を実施したが載荷・除荷を繰り返すに従いAEの発生数は減少し、昇圧時・降圧時でのAEの発生数ピークも不明になった。

図3. 2. 21～3. 2. 26までに1-15T1試験で測定したAE波形例を示す。各波形の横軸の単位はマイクロ秒（1マイクロ秒=10<sup>-6</sup>秒）である。縦軸の振幅値の単位はV（ボルト）である。図3. 2. 21～3. 2. 22では載荷初期（載荷圧力値 約15と50kgf/cm<sup>2</sup>）の波形、図3. 2. 23では、AEの発生数が多くなってきた（載荷圧力値 約150kgf/cm<sup>2</sup>）時の波形、図3. 2. 24は、除荷時（載荷圧力値 約250kgf/cm<sup>2</sup>）で、AE発生数が多くなっている時の波形、図3. 2. 25は除荷時圧力値約120kgf/cm<sup>2</sup>で除荷速度が緩くなっているときの波形、図3. 2. 26は除荷時圧力値約50kgf/cm<sup>2</sup>の時の波形である。また、Ch. 1について各圧力段階の波形のFFTスペクトルを図3. 2. 27～3. 2. 28に示した。

図3. 2. 21は、載荷開始段階の圧力約15 kgf/cm<sup>2</sup>の波形で、S-500が孔壁に密着した初期のAE波形と思われるが、試験器と孔壁の摩擦等によるノイズ波形の可能性も考えられる。昇圧時圧力約50kgf/cm<sup>2</sup>では波形長、振幅も大きくなり周波数もやや高くなっている。昇圧150kgf/cm<sup>2</sup>以後は周波数100kHz以上の高周波成分が卓越したAEが多く測定された。

今回の試験では、S-500載荷時の亀裂発生及び降圧による亀裂の閉口時AEを測定し、AE発生状況あるいはAE特性とS-500試験を関係付けることを目標とした。

S-500 に試験に伴う AE 計測では、載荷時及び除荷時の途中で AE 発生数の急増は認めたものの、亀裂発生、亀裂閉口、再開口時の AE 特性をとらえるには至らなかった。ただ、圧力昇降時の AE 発生数のピークは、S-500 による供試体の挙動をとらえたものと判断され、今後の試験手法の改良により上記亀裂発生時、亀裂閉口時の AE を計測できる可能性がある。

S-500 Test1 (1-15T1)

15° 水平圧力60kgf/cm<sup>2</sup>, 鉛直圧力40kgf/cm<sup>2</sup>

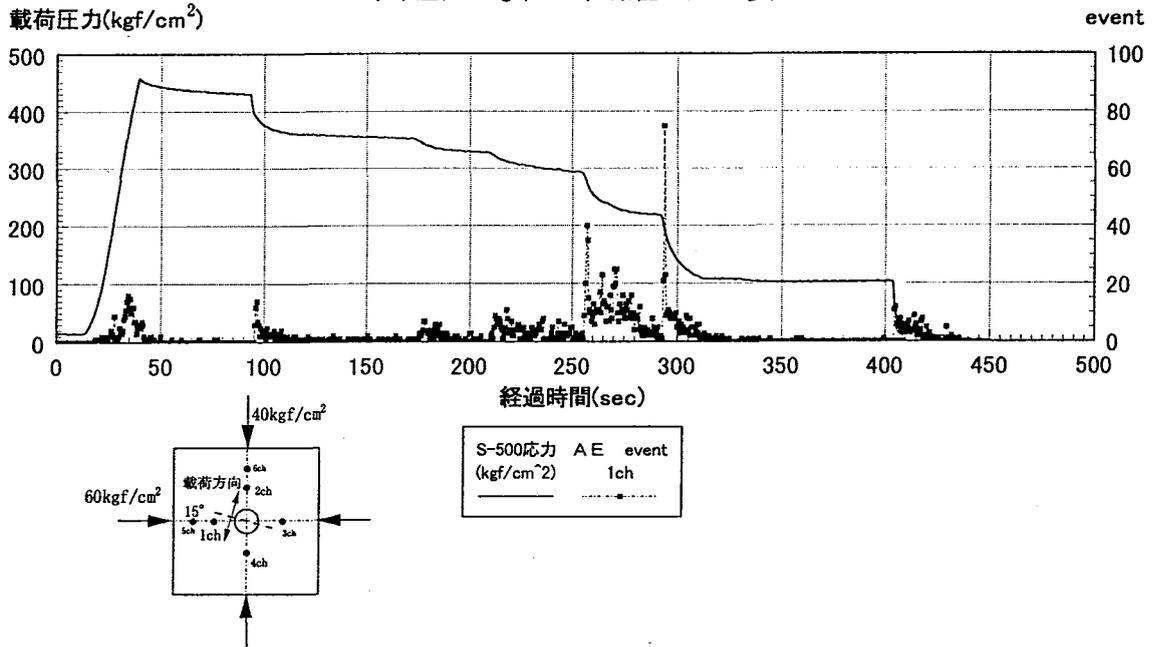


図 3.2.17 載荷圧と AE の発生数との関係 (試験 1-15T1)

S-500 Test1 (1-15T2)

15° 水平圧力60kgf/cm<sup>2</sup>, 鉛直圧力40kgf/cm<sup>2</sup>

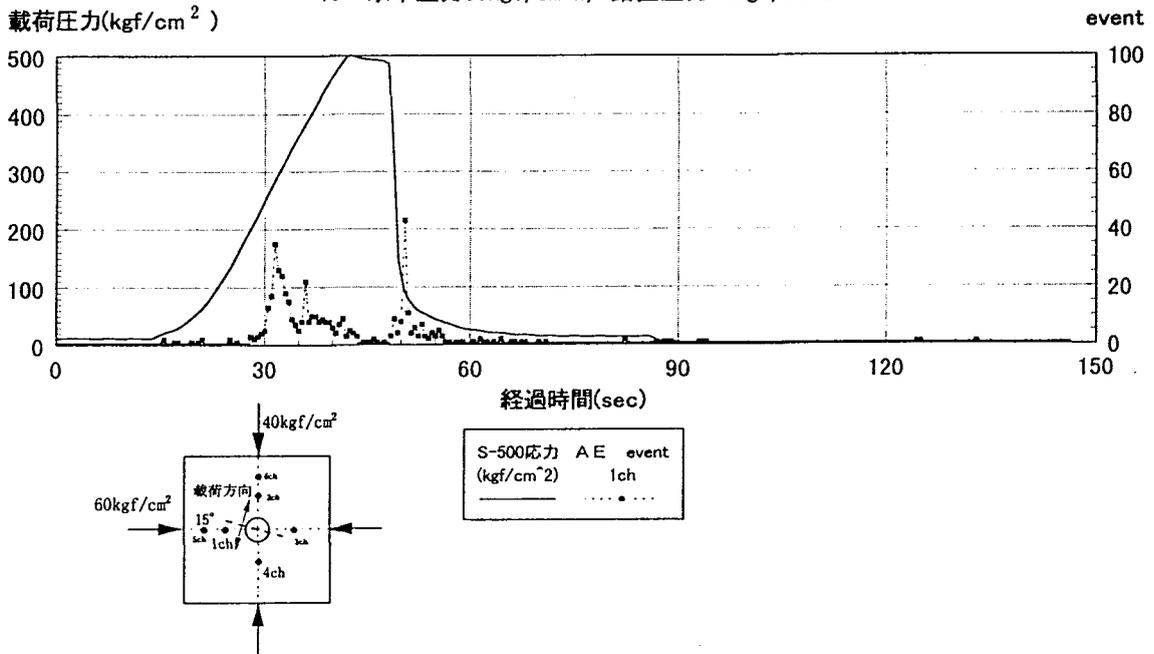


図 3.2.18 載荷圧と AE の発生数との関係 (試験 1-15T2)

S-500 Test1 (1-80T2)

80° 水平圧力60kgf/cm<sup>2</sup>, 鉛直圧力40kgf/cm<sup>2</sup>

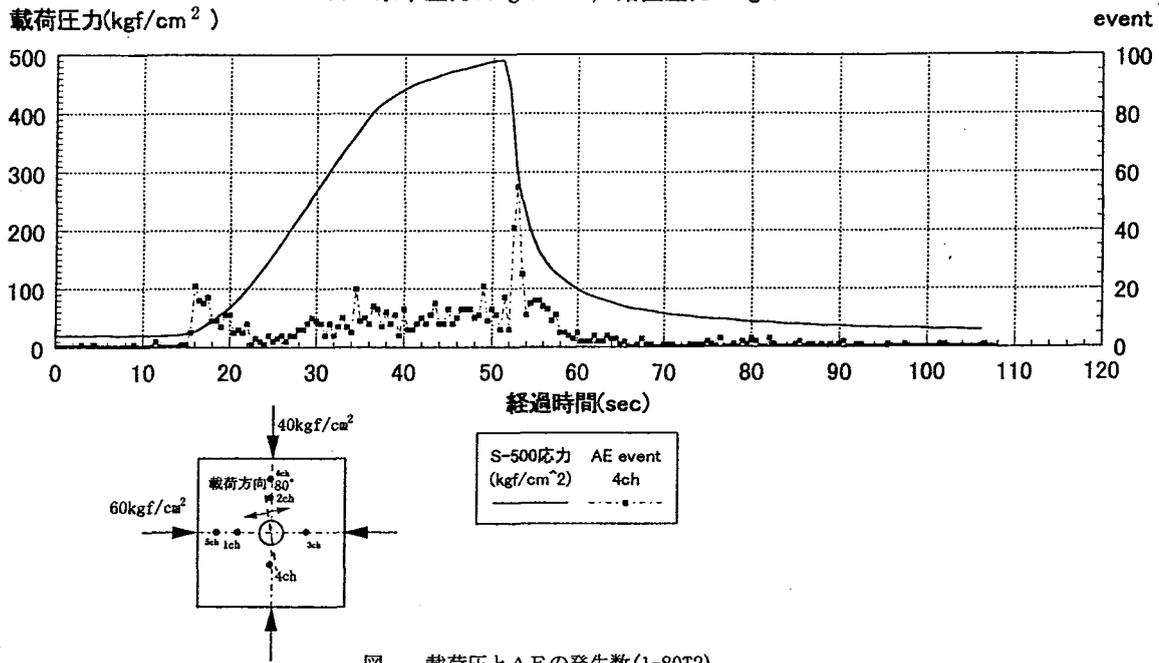


図 载荷圧とAEの発生数(1-80T2)

図 3.2.19 载荷圧とAEの発生数との関係(試験1-80T1)

S-500 Test1 (1-80T1)

80° 水平圧力60kgf/cm<sup>2</sup>, 鉛直圧力40kgf/cm<sup>2</sup>

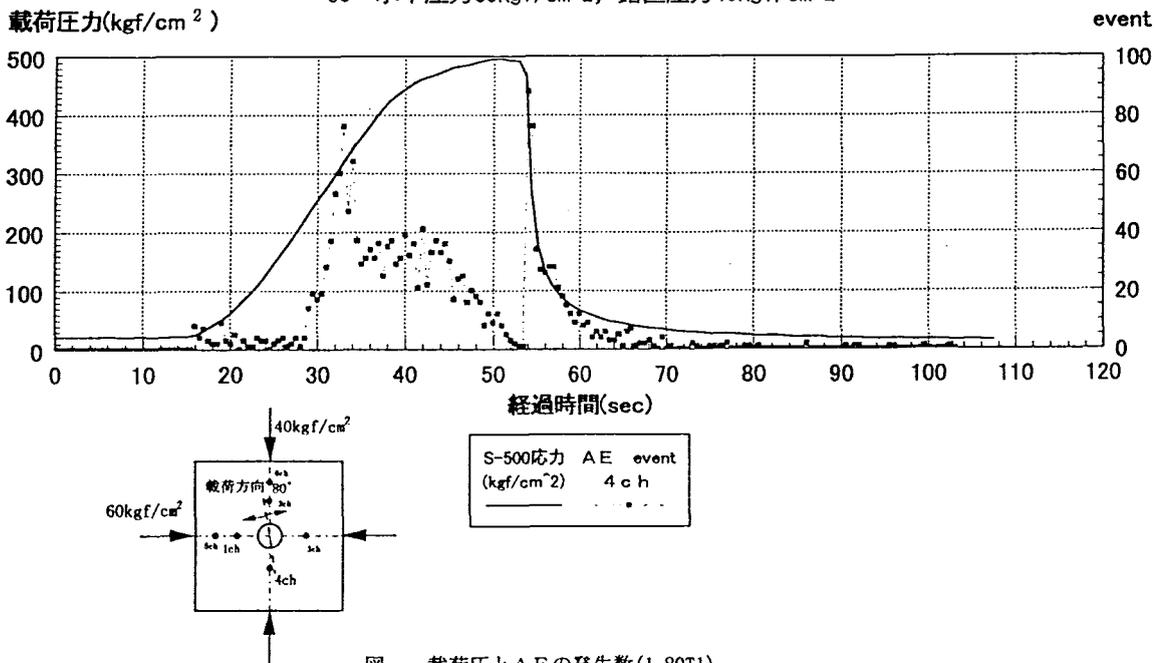


図 载荷圧とAEの発生数(1-80T1)

図 3.2.20 载荷圧とAEの発生数との関係(試験1-80T2)

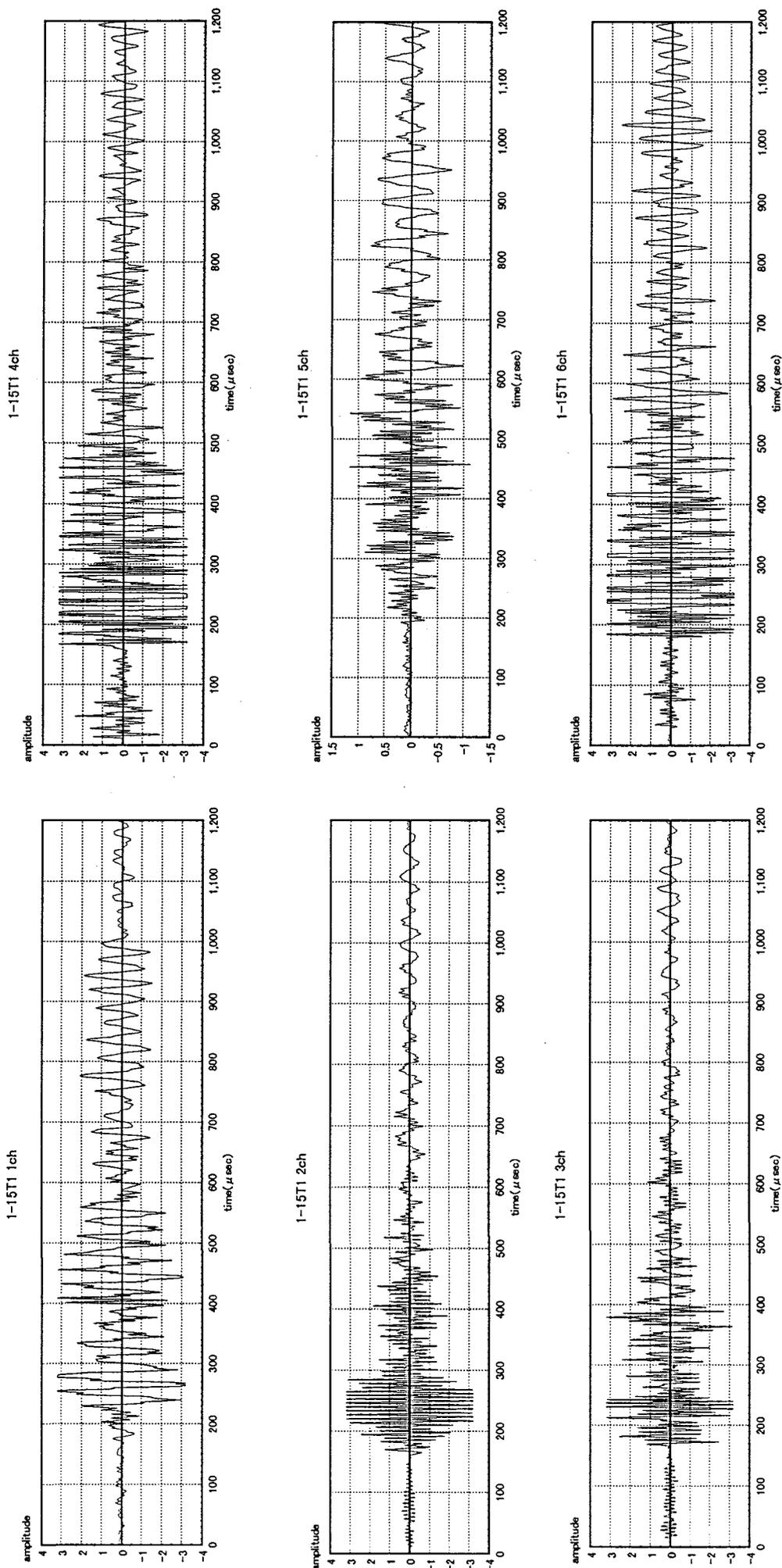


図 3.2.21 AE 波形例 (昇圧時: 載荷圧力 約 15kgf/cm<sup>2</sup>)

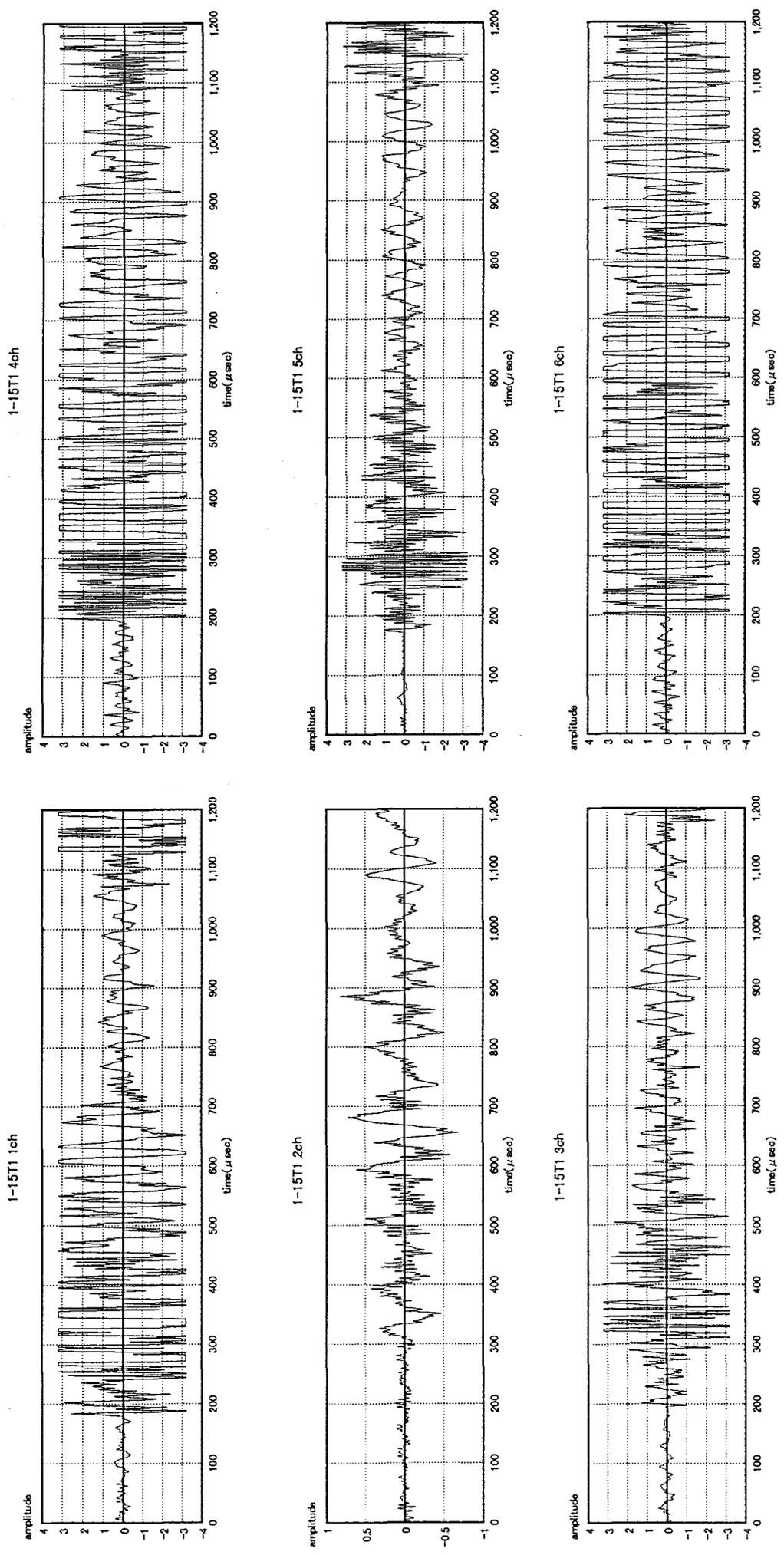


図 3.2.22 AE 波形例 (昇圧時： 載荷圧力 約 50kgf/cm<sup>2</sup>)

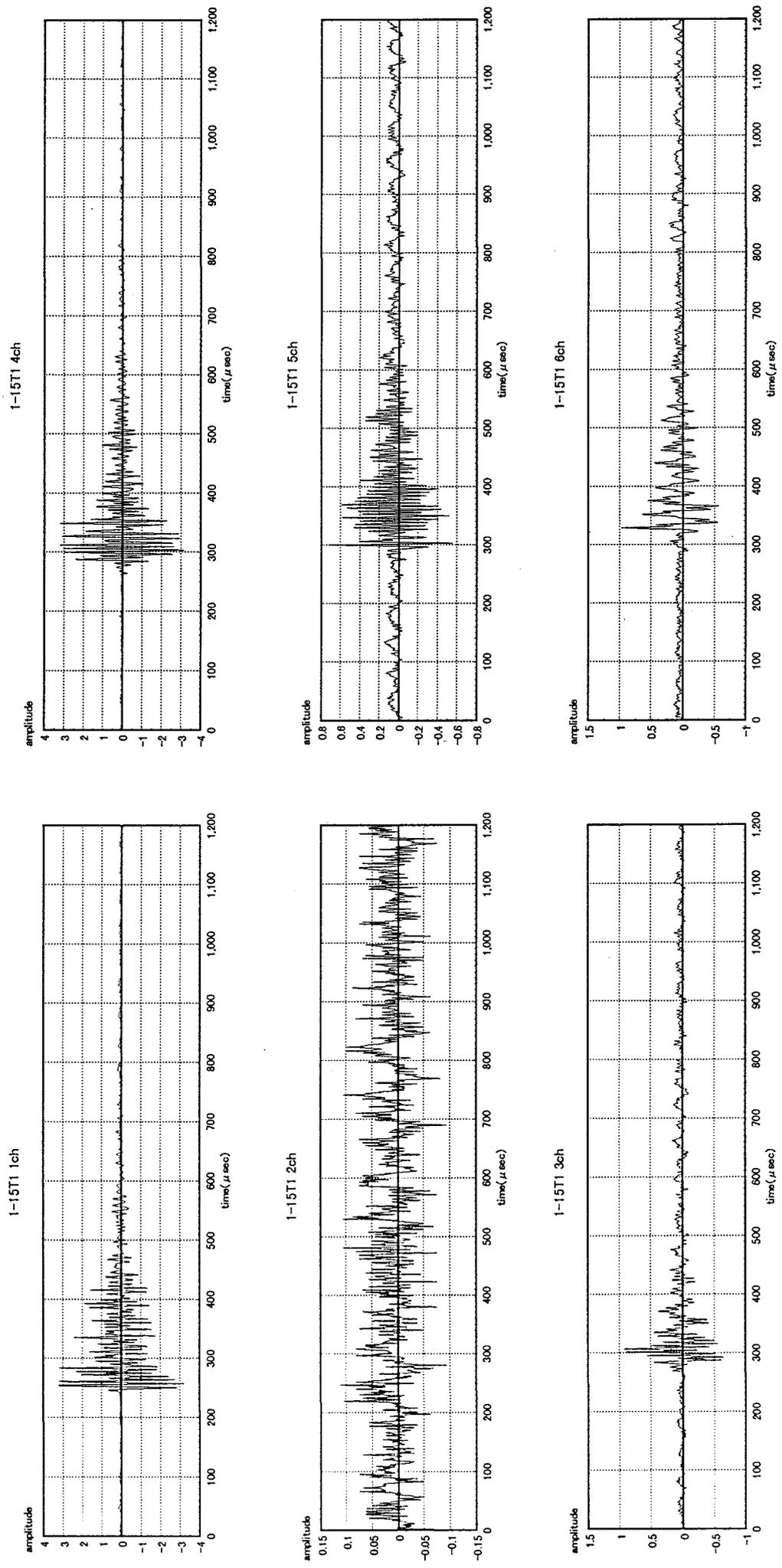


図 3.2.23 AE 波形例 (昇圧時: 載荷圧力 約 150kgf/cm<sup>2</sup>)

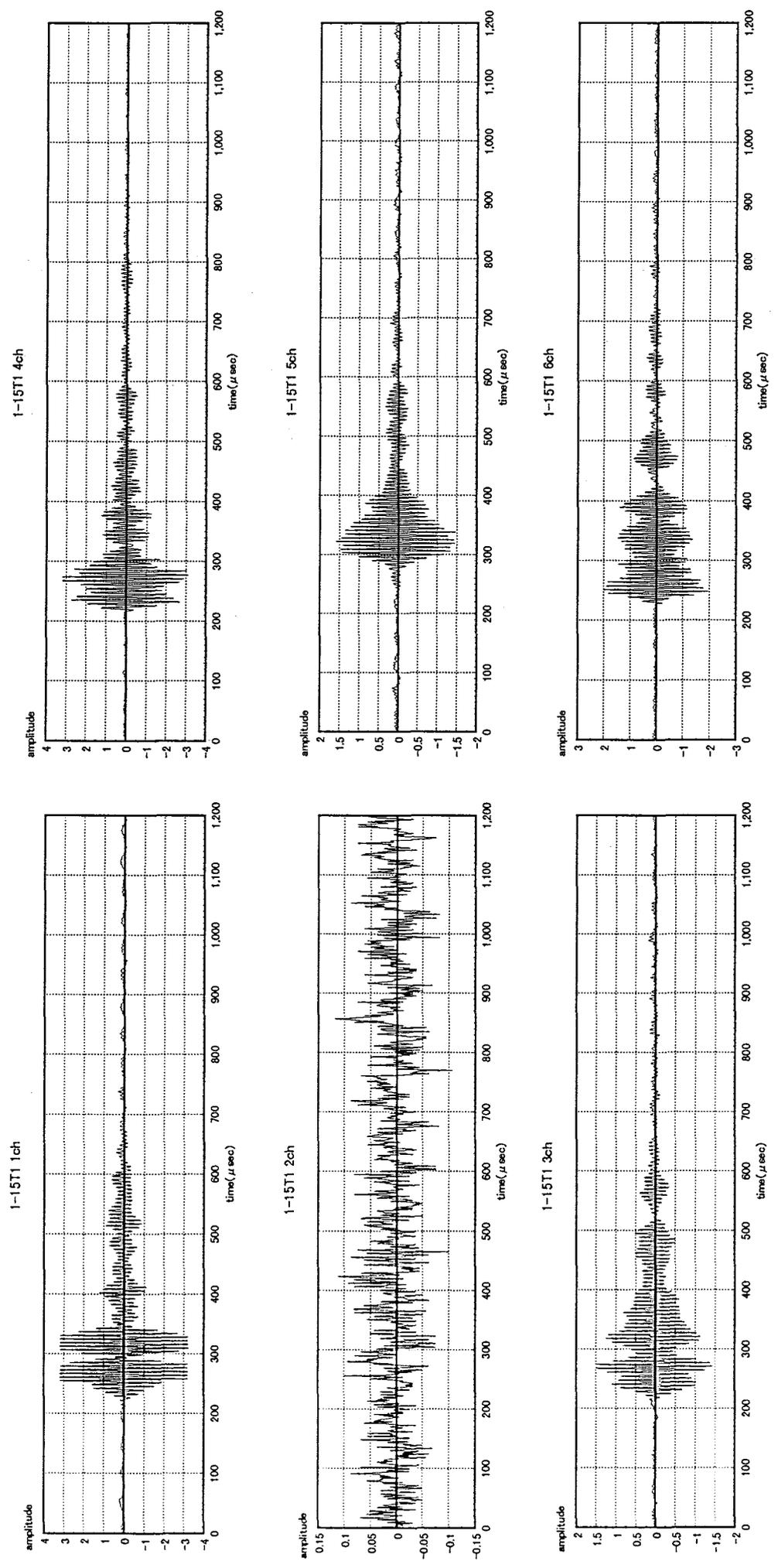


图 3.2.24 AE 波形例 (昇圧時 : 載荷圧力 約 250kgf/cm<sup>2</sup>)

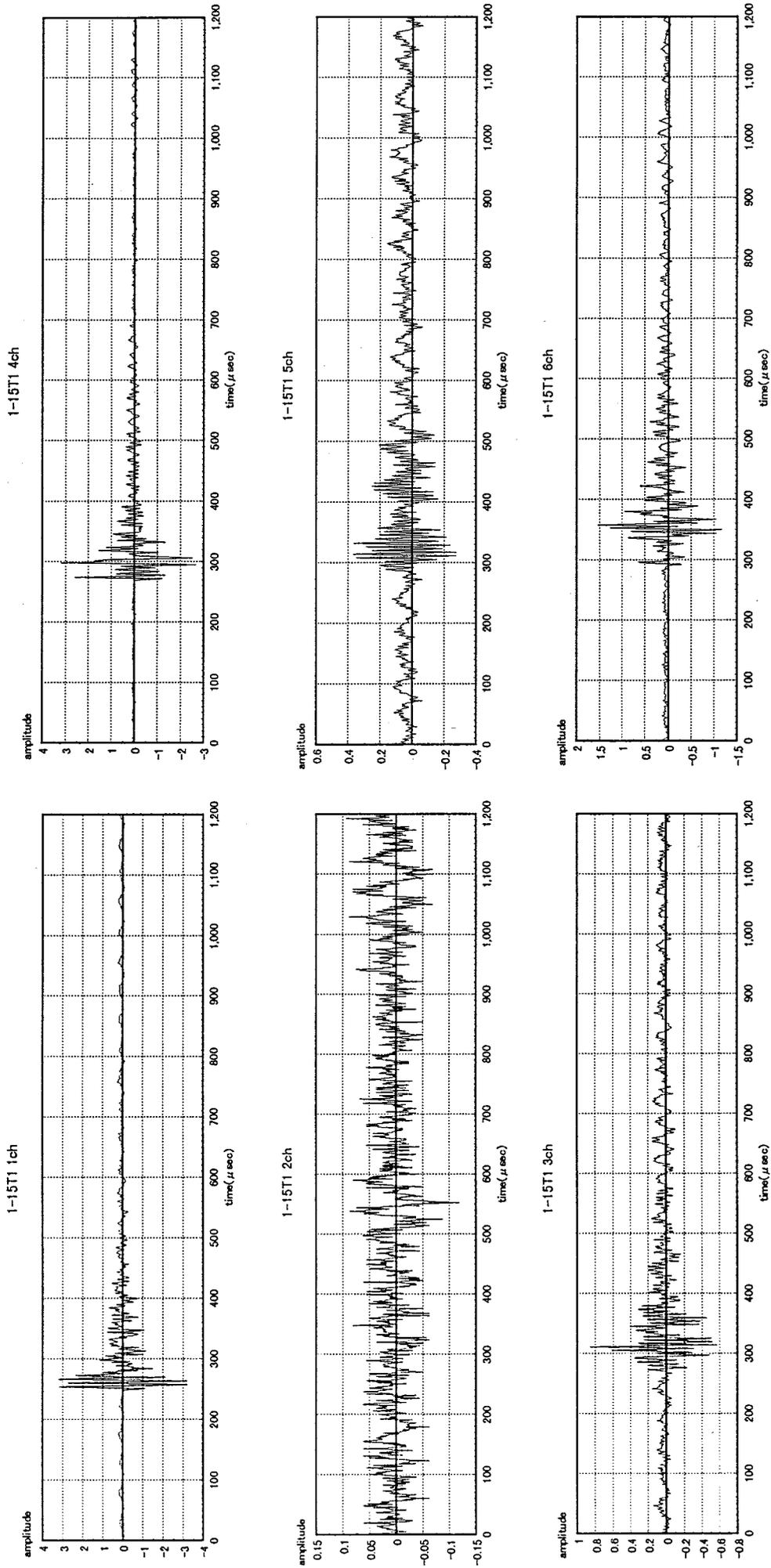


図 3.2.25 AE 波形例 (降圧時: 載荷圧力 約 120kgf/cm<sup>2</sup>)

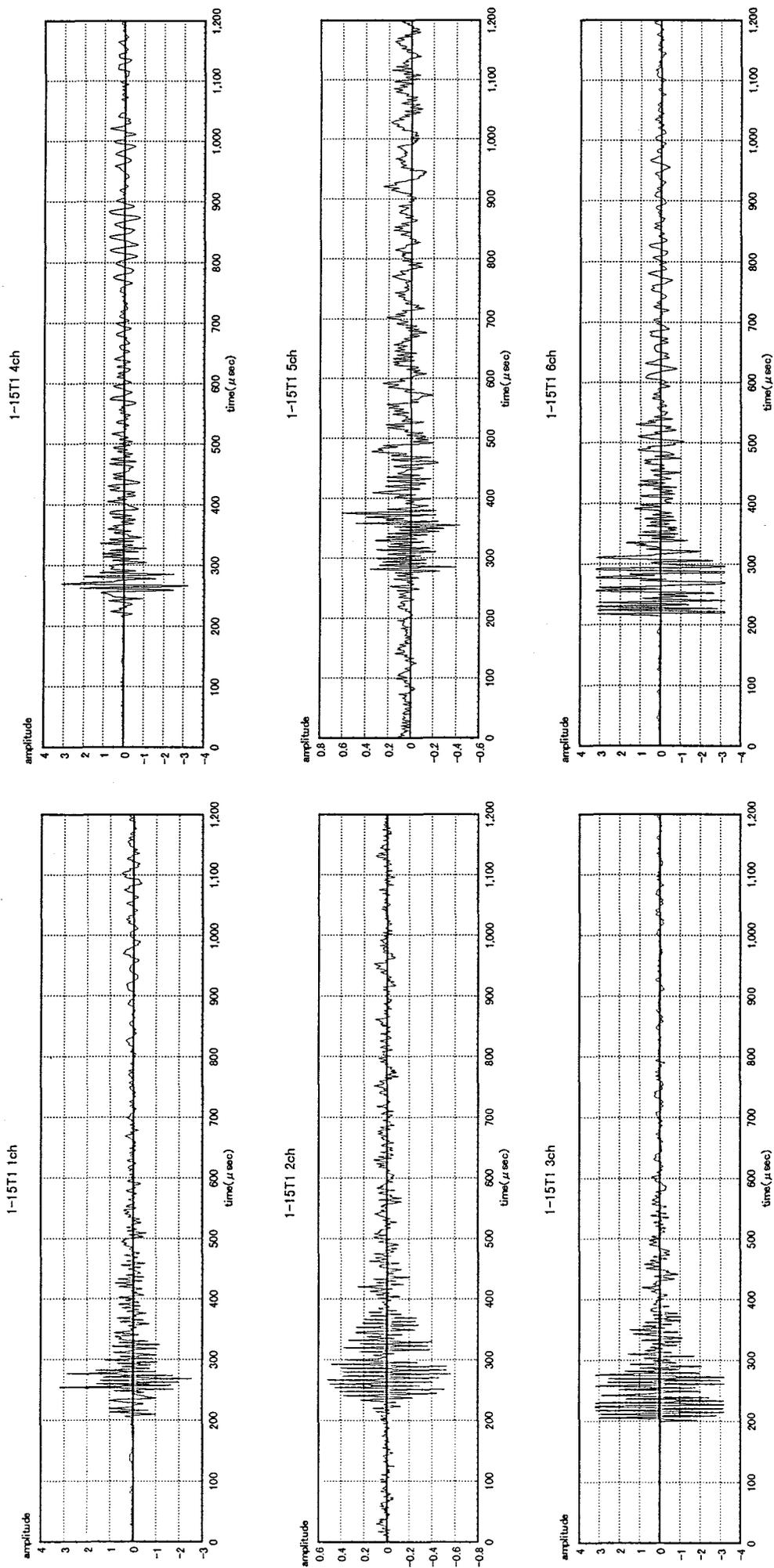


図 3.2.26 AE 波形例 (降圧時: 載荷圧力 約 50kgf/cm<sup>2</sup>)

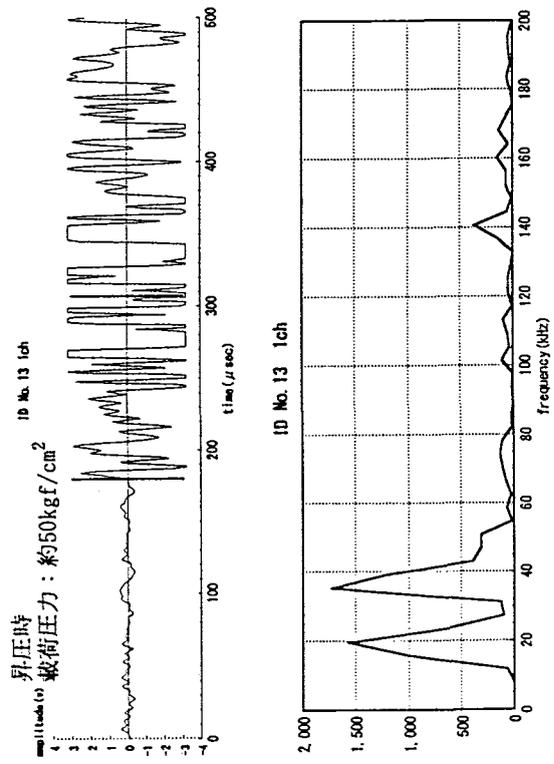
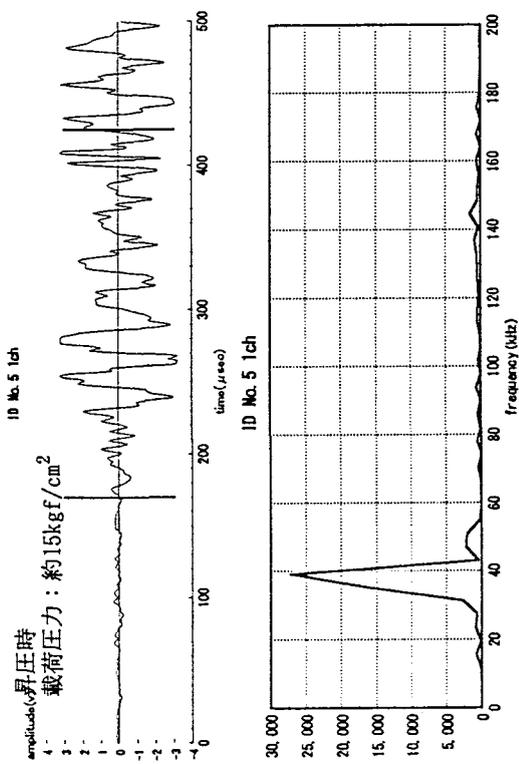
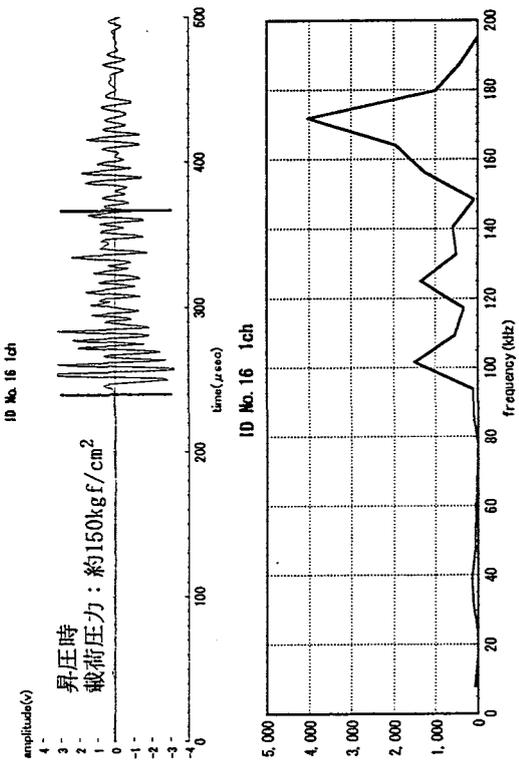


図 3. 2. 27 AE 波形の周波数特性 (昇圧時)

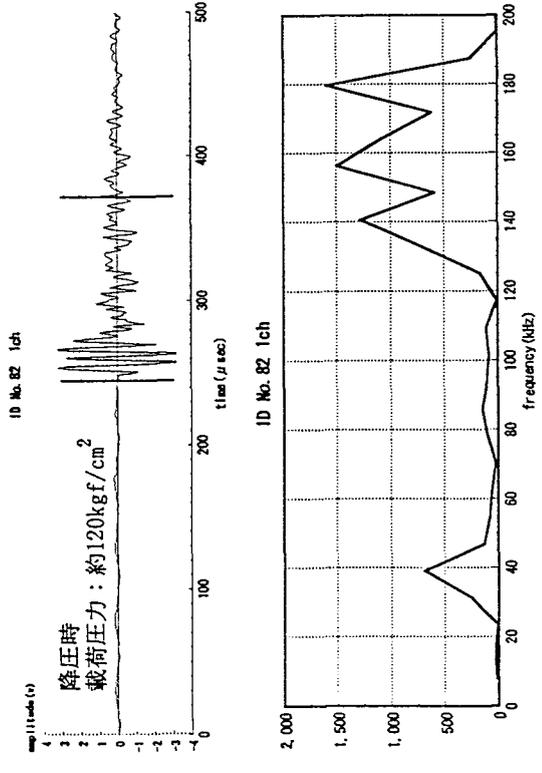
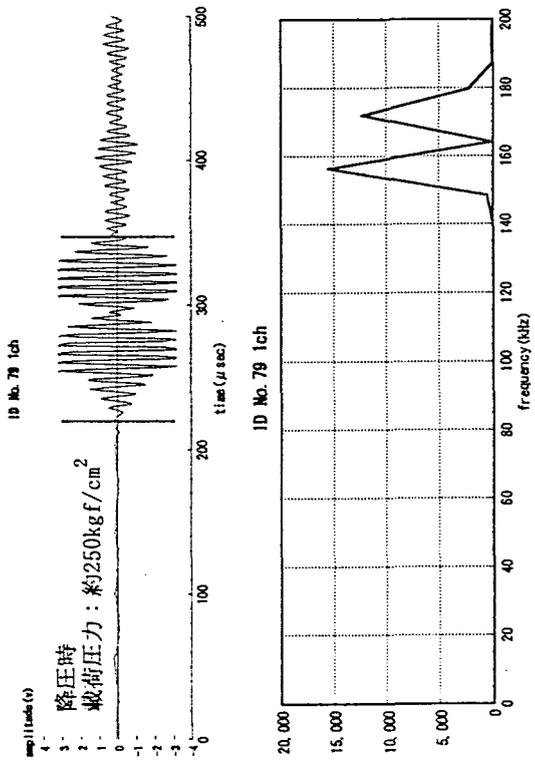
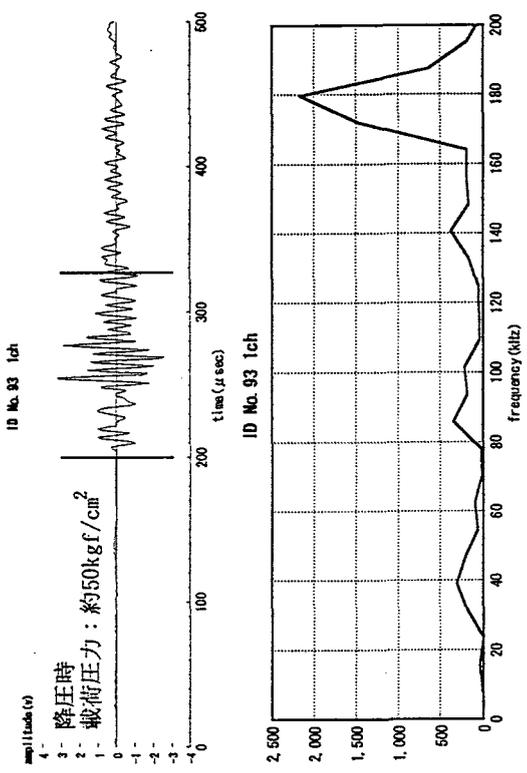


図 3. 2. 28 AE 波形の周波数特性 (降圧時)

### 3.3 鋼管内載荷試験

#### 3.3.1 試験の概要

前年度及び本報の室内破砕試験の結果、試験時に得られた圧力-変位曲線から読みとった折れ点と、理論値との間には2～3倍の開きがあることが分かっている。この原因の1つとしてプローブ内に加圧される圧力と孔壁に加わる圧力との間に差があるのではないかとということが考えられた。また、S-500によって起こされる破壊機構を確認するうえでプローブ上の圧力分布を知る必要がある。そこで、ひずみゲージを貼付した鋼管内で載荷試験を行うことによって、鋼管の外側で得られるひずみから、プローブ内の圧力と鋼管内壁の圧力との差と鋼管内壁に加わる応力状態を調べることにした。図3.3.1にひずみゲージを貼付した鋼管の外形を示し、表3.3.1に載荷方向等の実験条件をまとめて示す。

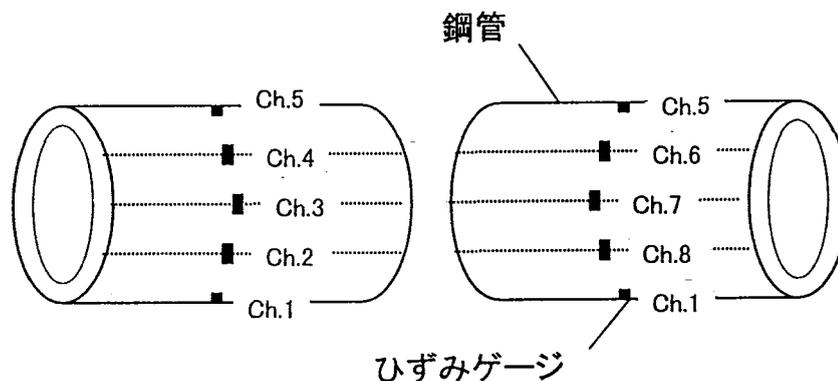


図3.3.1 載荷試験用鋼管

試験Pt01、Pt02で水圧破砕用パッカーを用いて載荷試験を行ったのは、試験の信頼性を確認するためである。正確に測定ができるならば、水圧破砕用のパッカーを用いた場合、観測されるひずみはCh.1～8まで同じ大きさになるはずである。

試験Pt08、09では、鋼管内壁にグリースを塗り、鋼管内壁とプローブの間の摩擦力を減少させたときの載荷状態の変化を観測した。また、Pt13～15では、載荷時にプレスケール（圧力によって発色する紙であり、色の濃淡から圧力の大きさが推定できる）をプローブに巻き付け、プローブ外周の載荷圧分布を観測した。

表3.3.1 鋼管内載荷試験条件

試験名	亀裂作成方向 水平方向から時計回り (°)	備考
Pt01	-	水圧破碎用パッカー使用
Pt02	-	水圧破碎用パッカー使用
Pt03	90	
Pt04	90	
Pt05	90	
Pt06	0	
Pt07	0	
Pt08	90	鋼管内壁にグリースを塗り摩擦力を減少
Pt09	0	鋼管内壁にグリースを塗り摩擦力を減少
Pt10	90	鋼管内壁のグリース除去
Pt11	0	
Pt12	90	
Pt13	90	プローブにプレスケールを巻付け
Pt14	90	プローブにプレスケールを巻付け
Pt15	90	プローブにプレスケールを巻付け
Pt16	90	

### 3.3.2 試験結果

鋼管内載荷試験で得られたひずみの結果を図3.3.2～3.3.17に示す。それぞれ図(a)には鋼管外壁に貼付したひずみゲージのCh.1～4までを、図(b)にはひずみゲージのCh.5～8までの結果を示す。

図3.3.2および図3.3.3から、水圧破碎用パッカーを使用した場合、得られるひずみ量はch.1～8までほぼ同じ大きさであることが分かる。この結果には、鋼管内壁面に当方的な載荷を行った結果がよく表れており、ひずみゲージの方向や計測系が正しく機能していることが示されている。

図3.3.4以降の試験はS-500プローブを使用した載荷試験である。図3.3.4以降の図を見ると、いずれも亀裂を発生させる角度で得られるひずみが最も小さいという結果である。この結果は、亀裂作成方向を変化させても載荷試験を行っても変わりなく、図3.3.

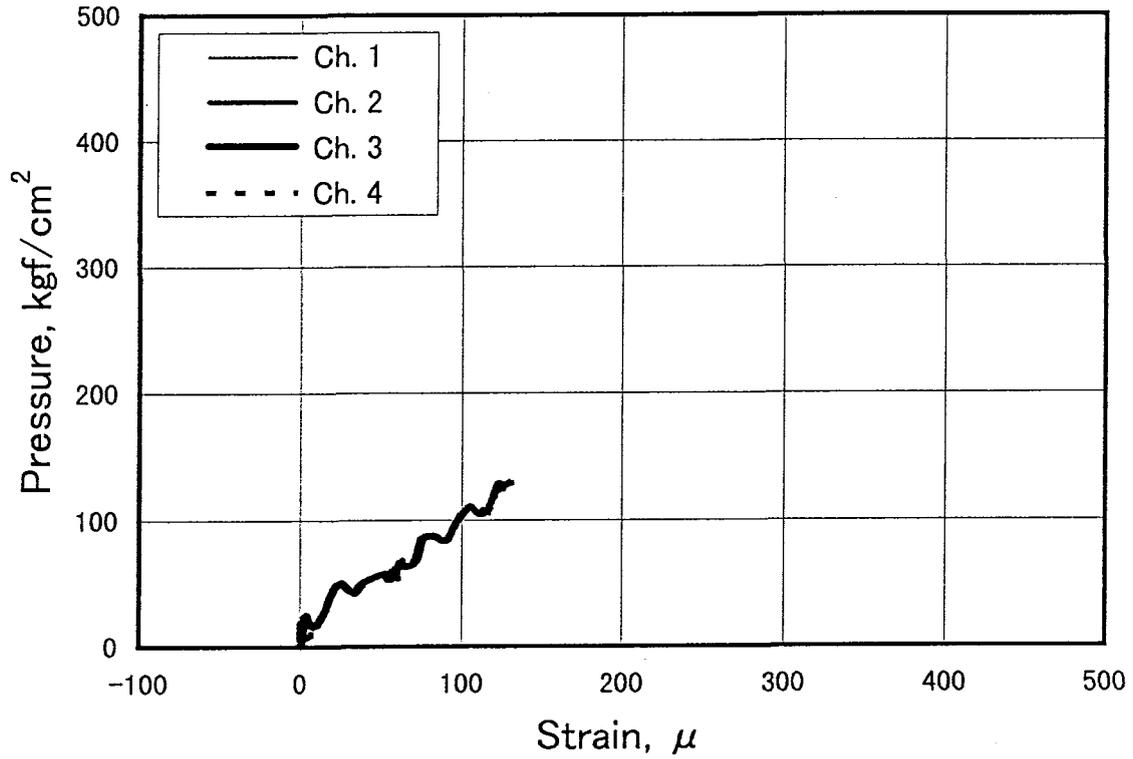


図3.3.2(a) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt1, Ch.1-4)

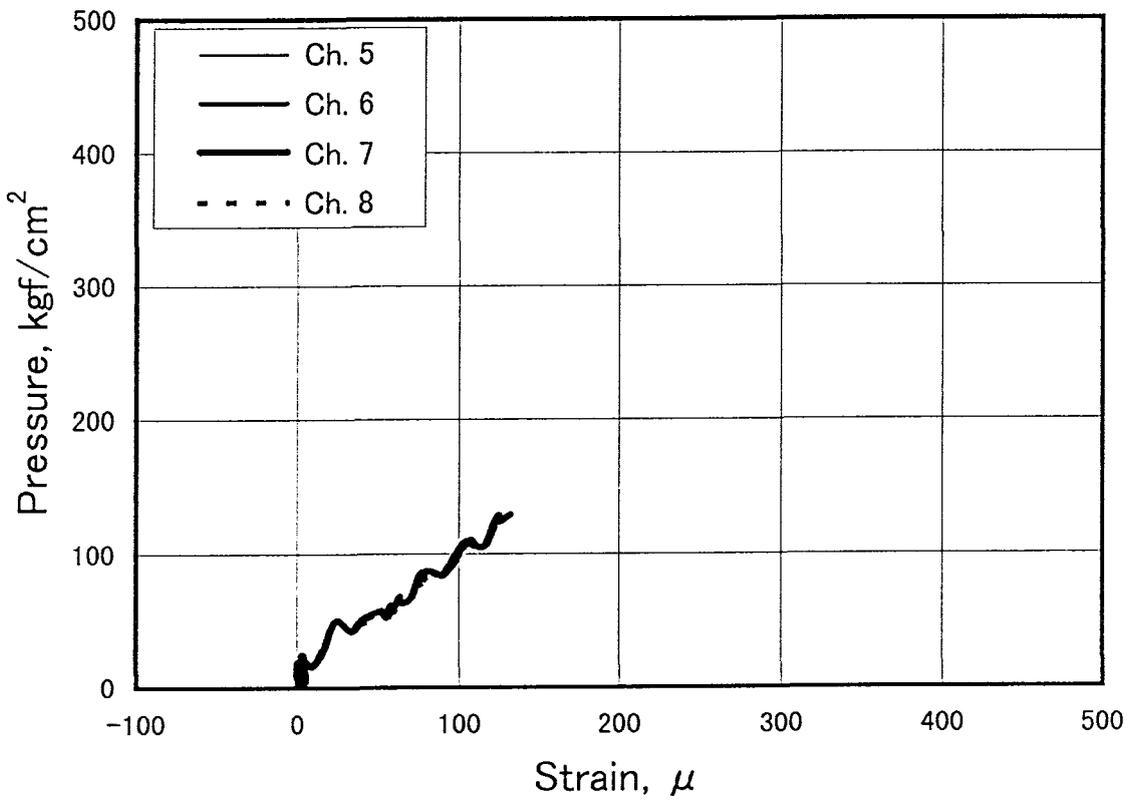


図3.3.2(b) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt1, Ch.5-8)

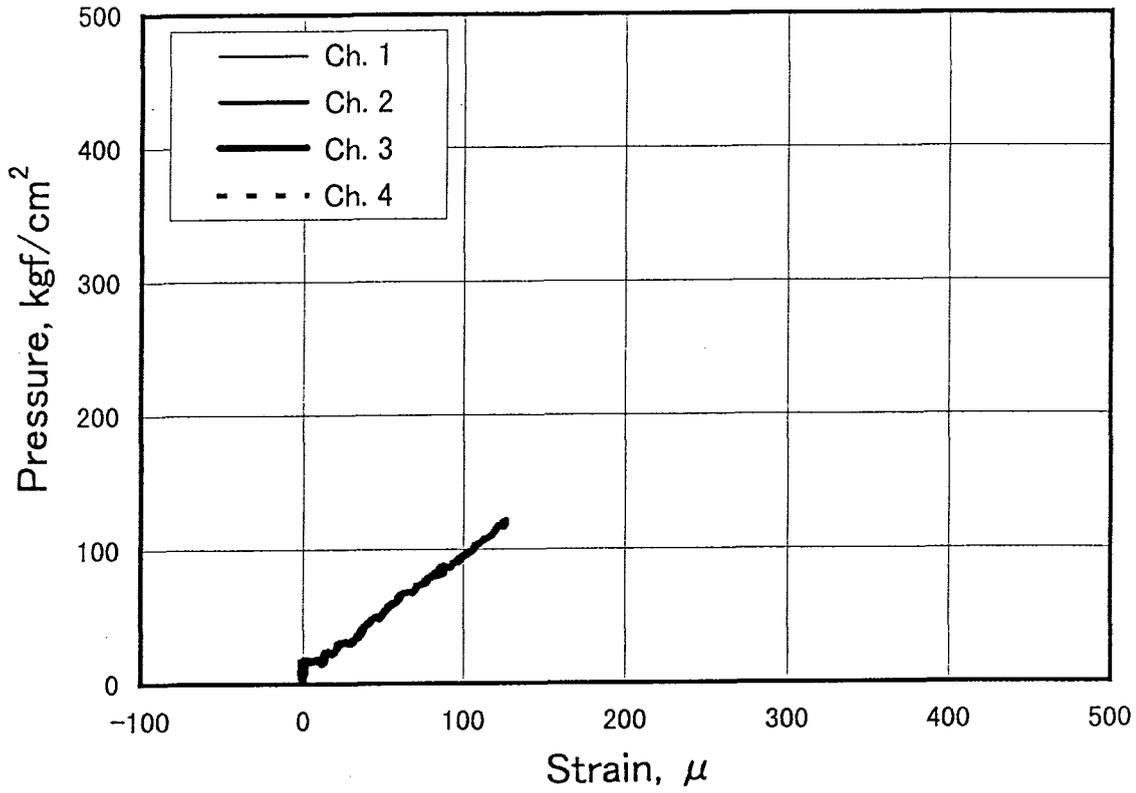


図3.3.3(a) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt2, Ch.1-4)

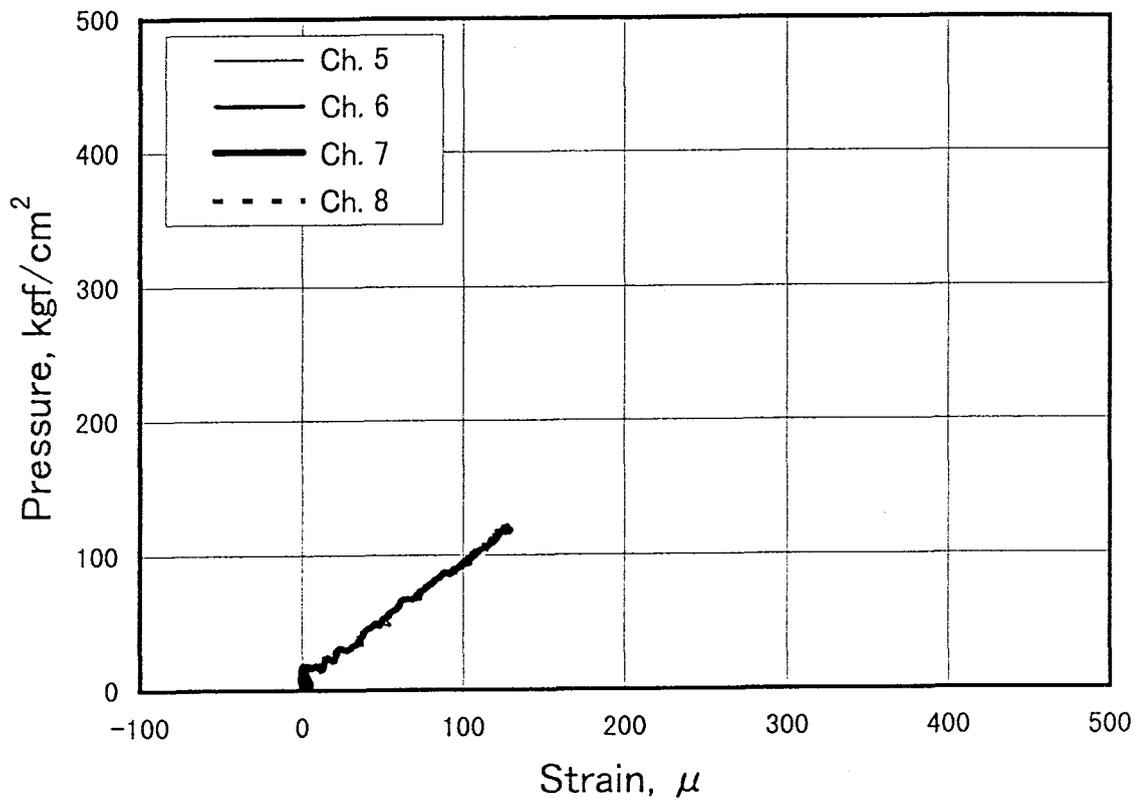


図3.3.3(b) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt2, Ch.5-8)

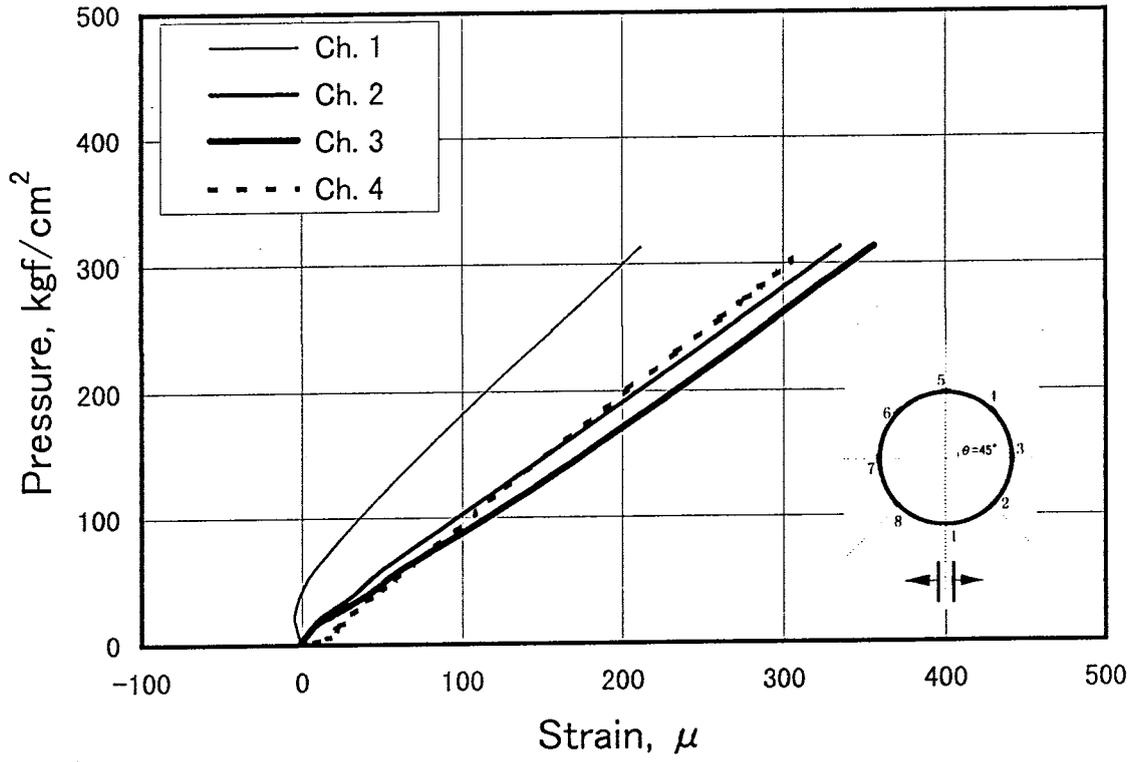


図3.3.4(a) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt3, Ch.1-4)

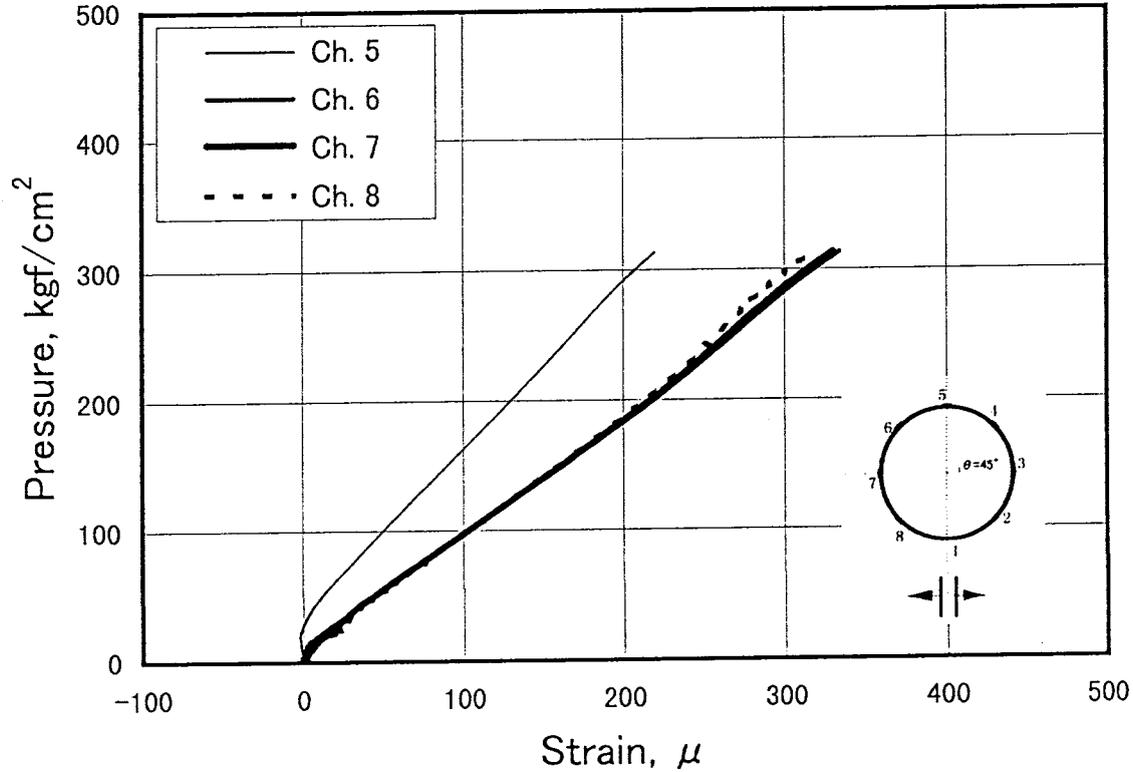


図3.3.4(b) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt3, Ch.5-8)

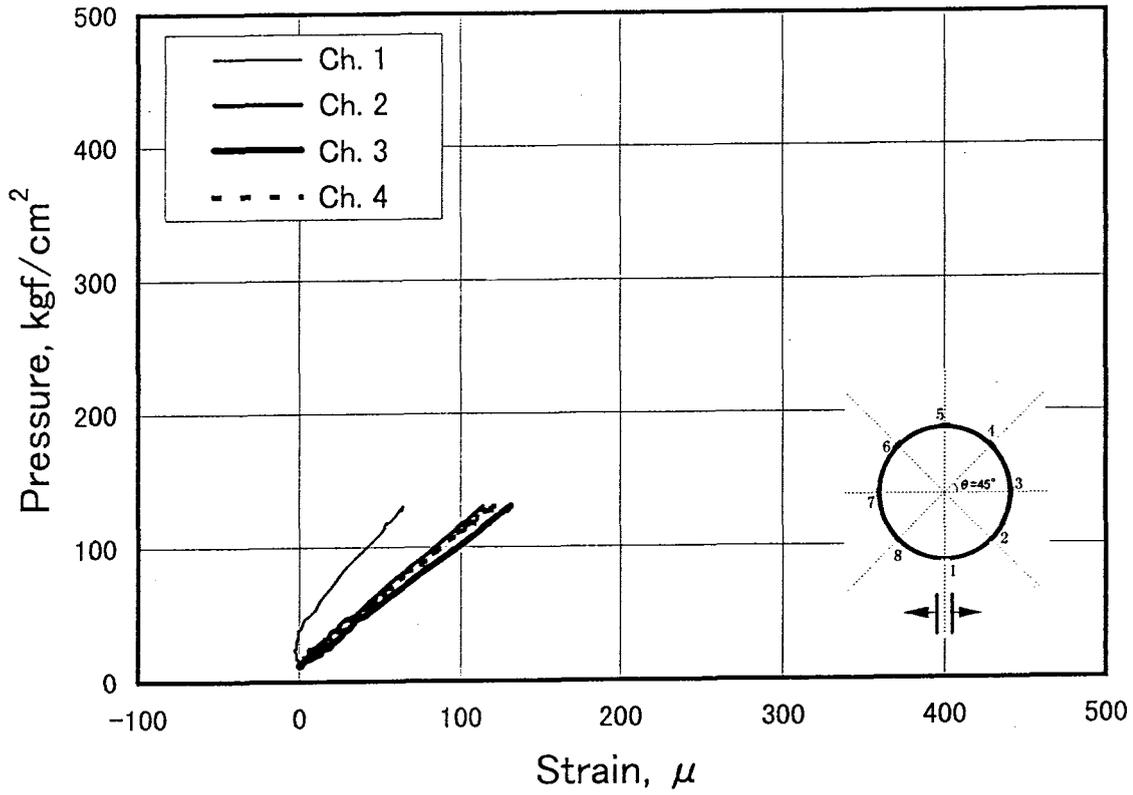


図3.3.5(a) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt4, Ch.1-4)

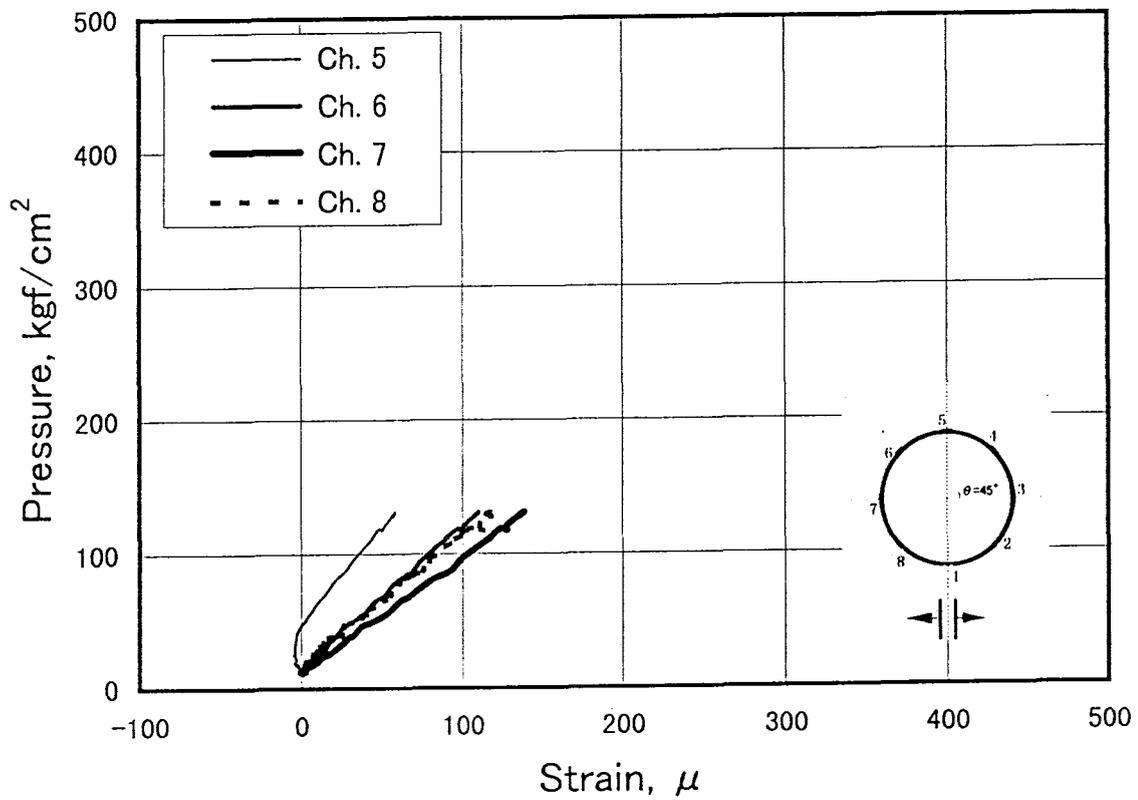


図3.3.5(b) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt4, Ch.5-8)

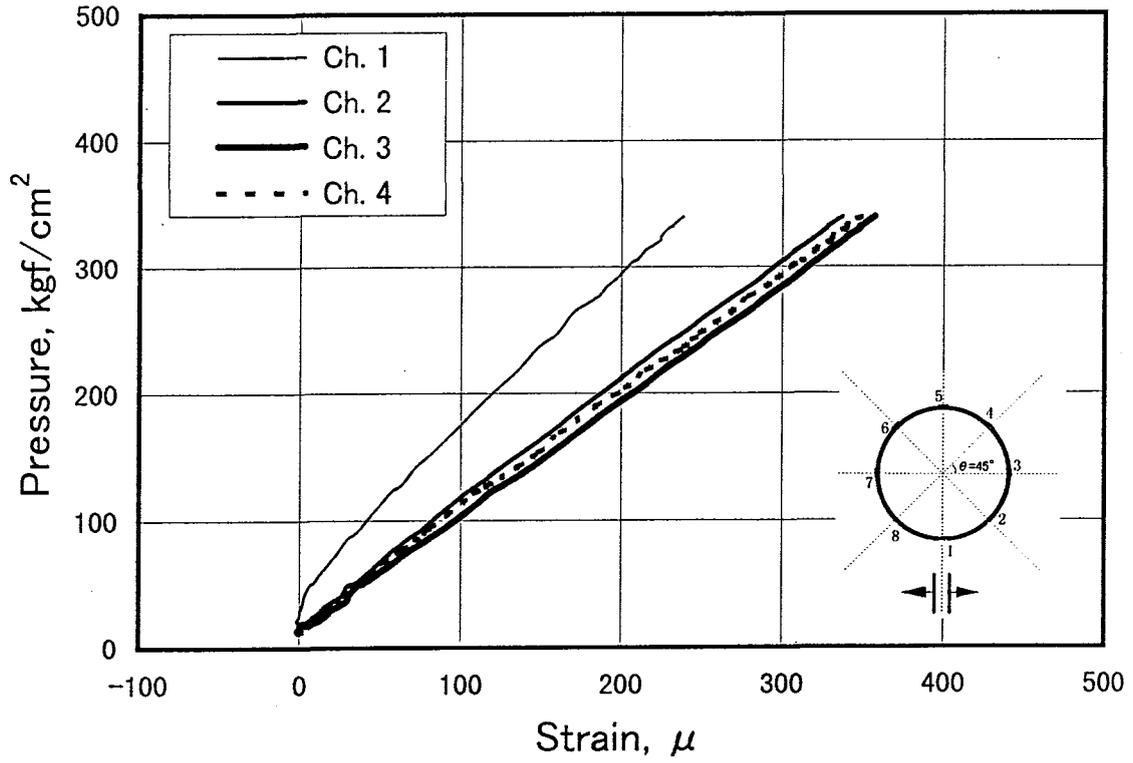


図3.3.6(a) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt5, Ch.1-4)

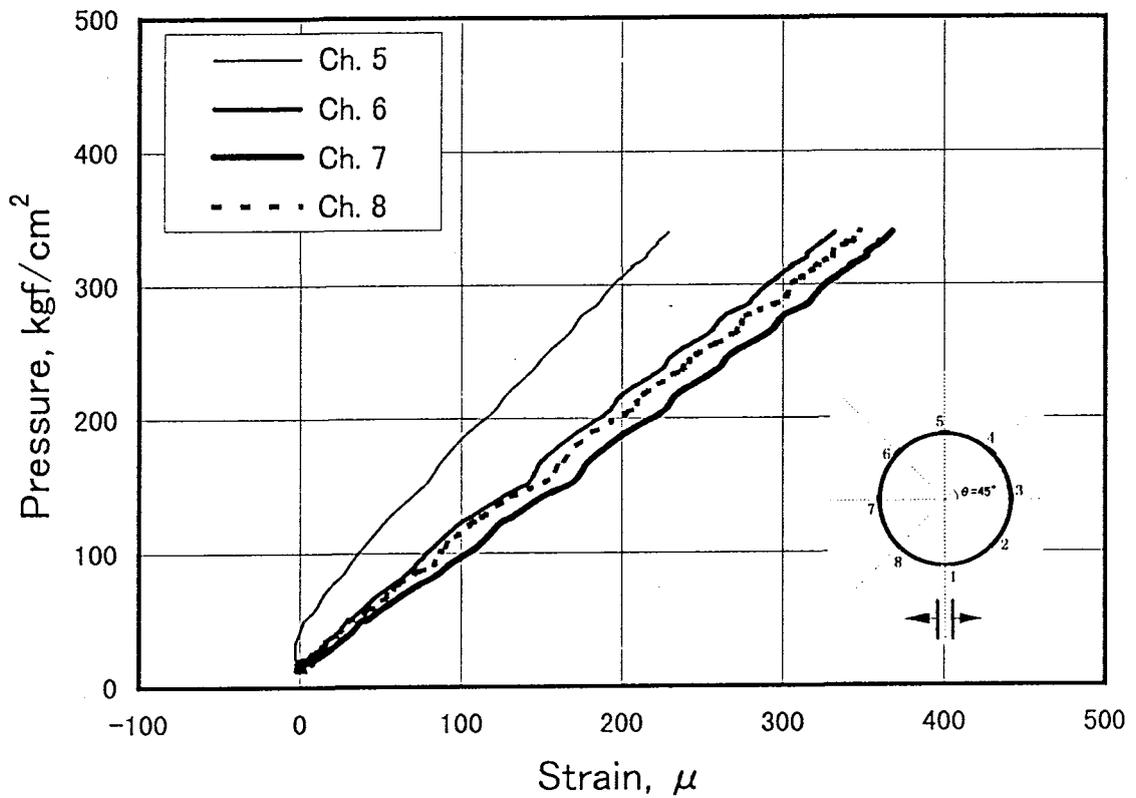


図3.3.6(b) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt5, Ch.5-8)

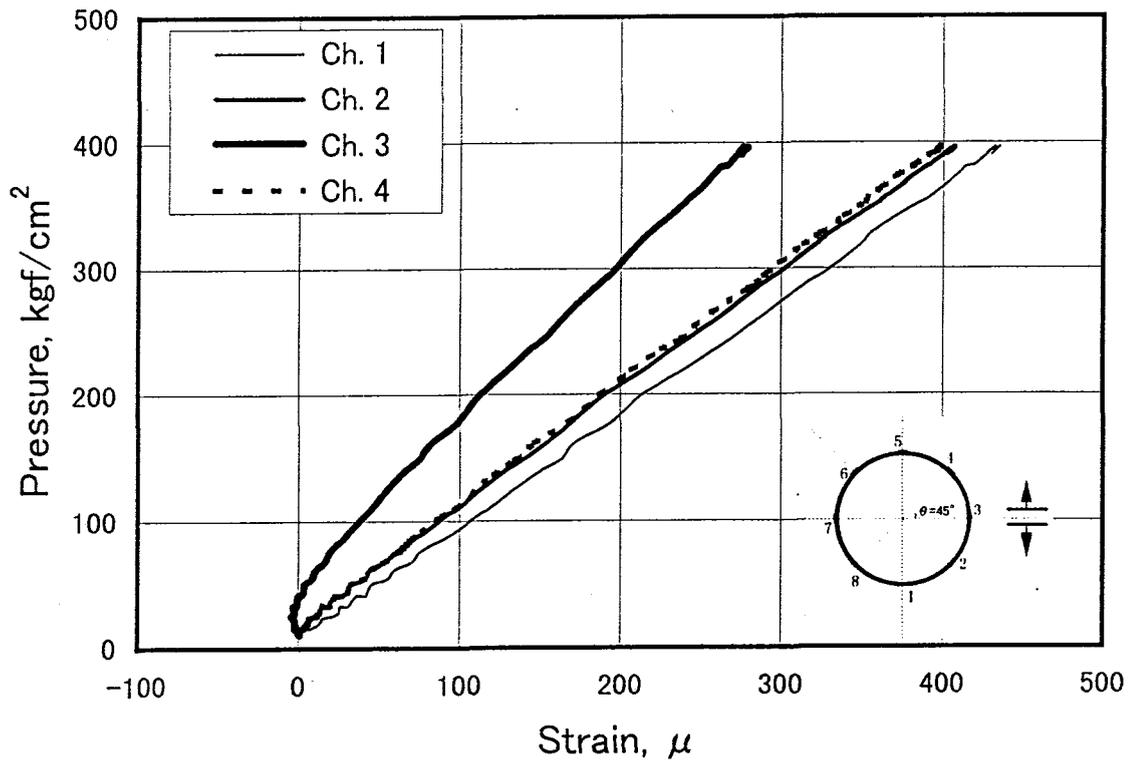


図3.3.7(a) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt6, Ch.1-4)

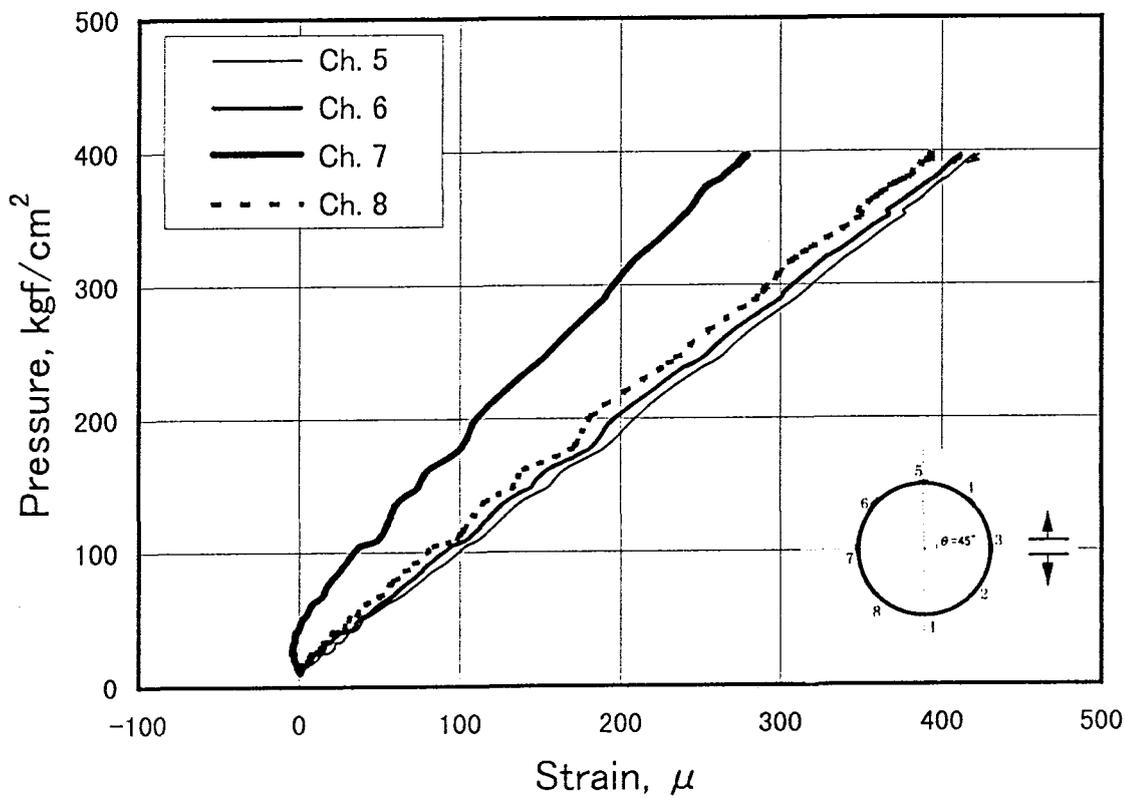


図3.3.7(b) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt6, Ch.5-8)

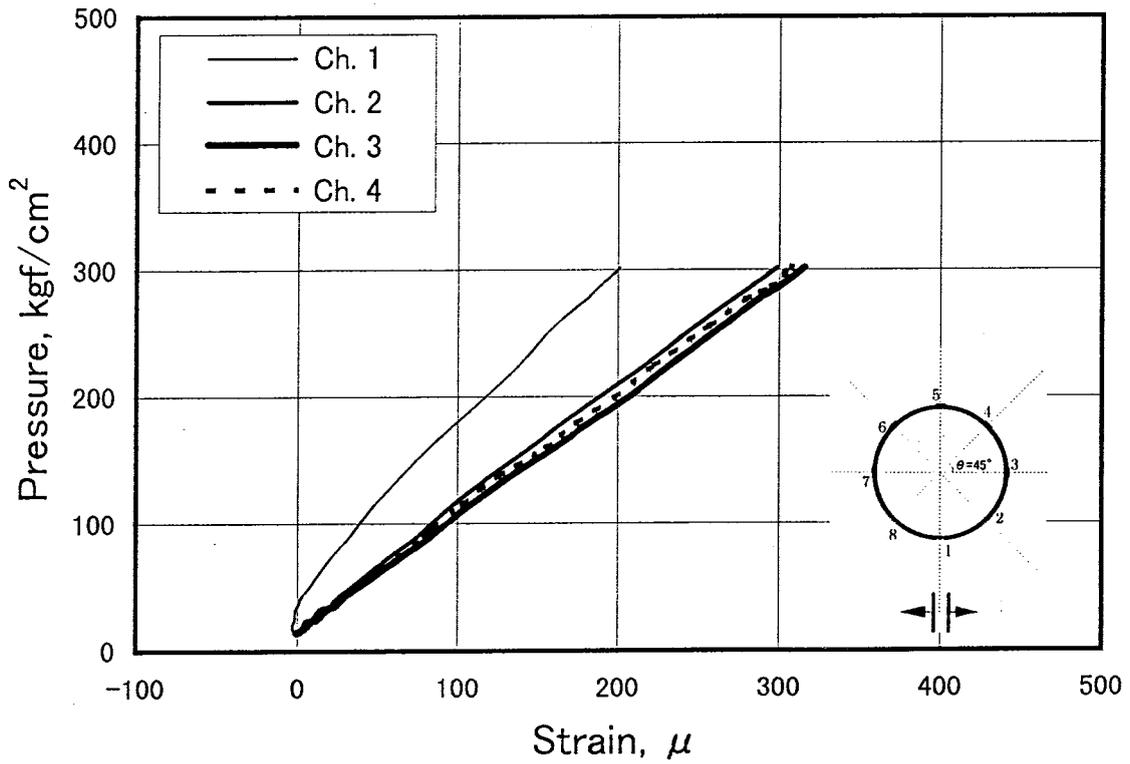


図3.3.8(a) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt7, Ch.1-4)

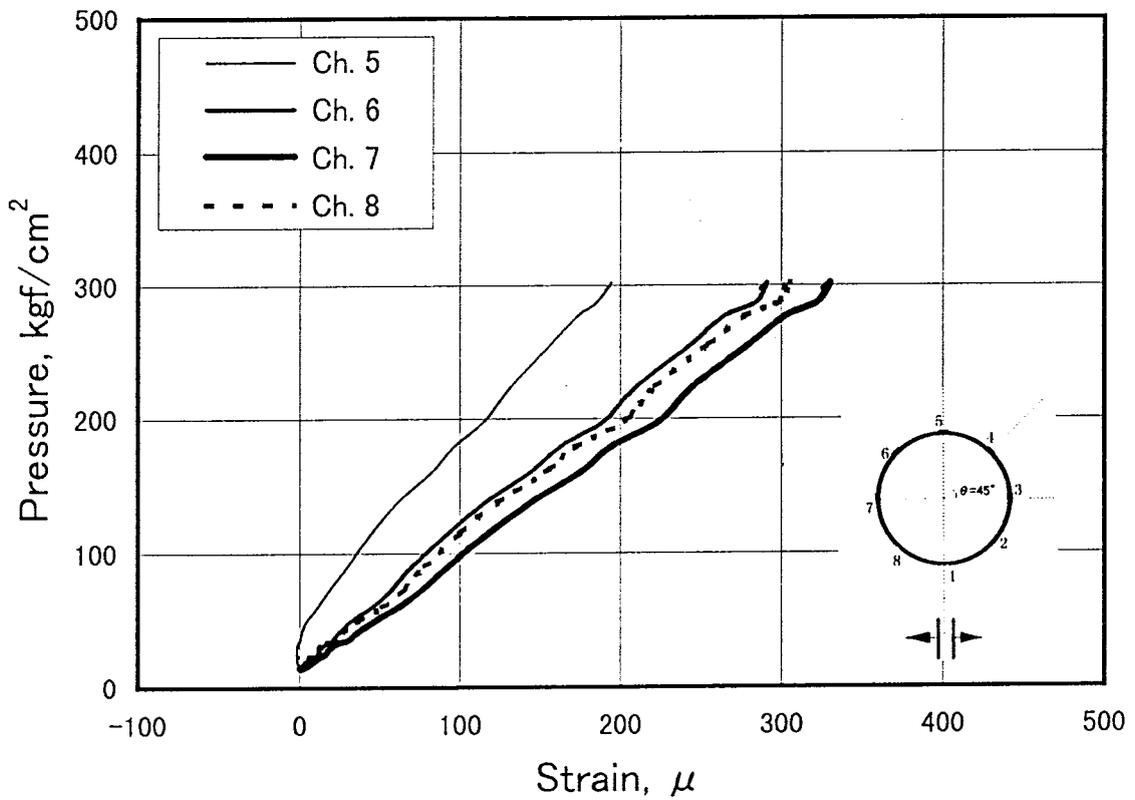


図3.3.8(b) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt7, Ch.5-8)

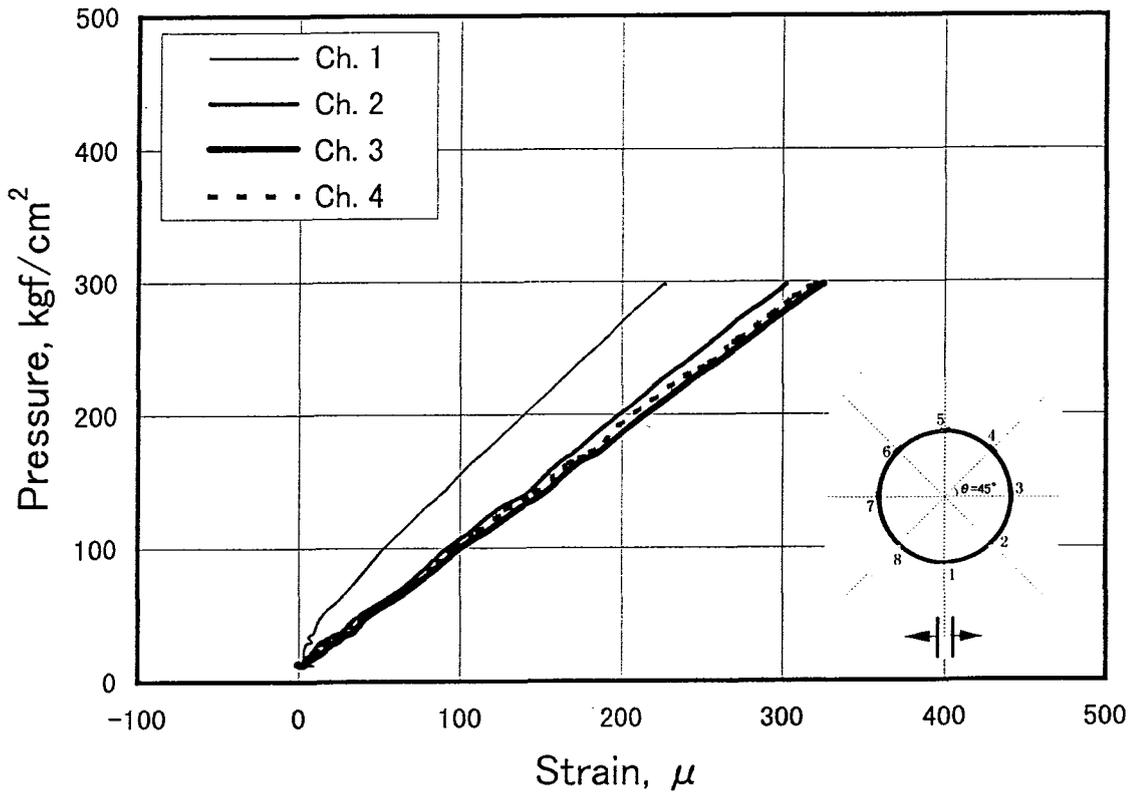


図3.3.9(a) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt8, Ch.1-4)

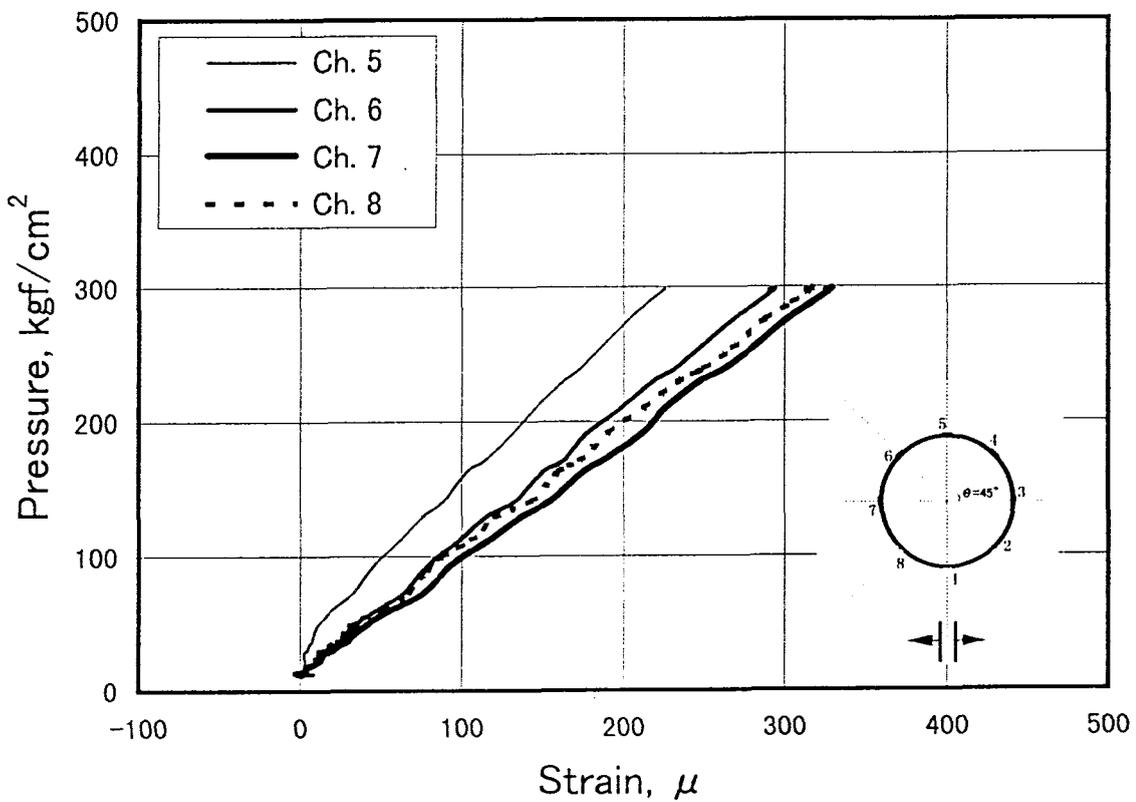


図3.3.9(b) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt8, Ch.5-8)

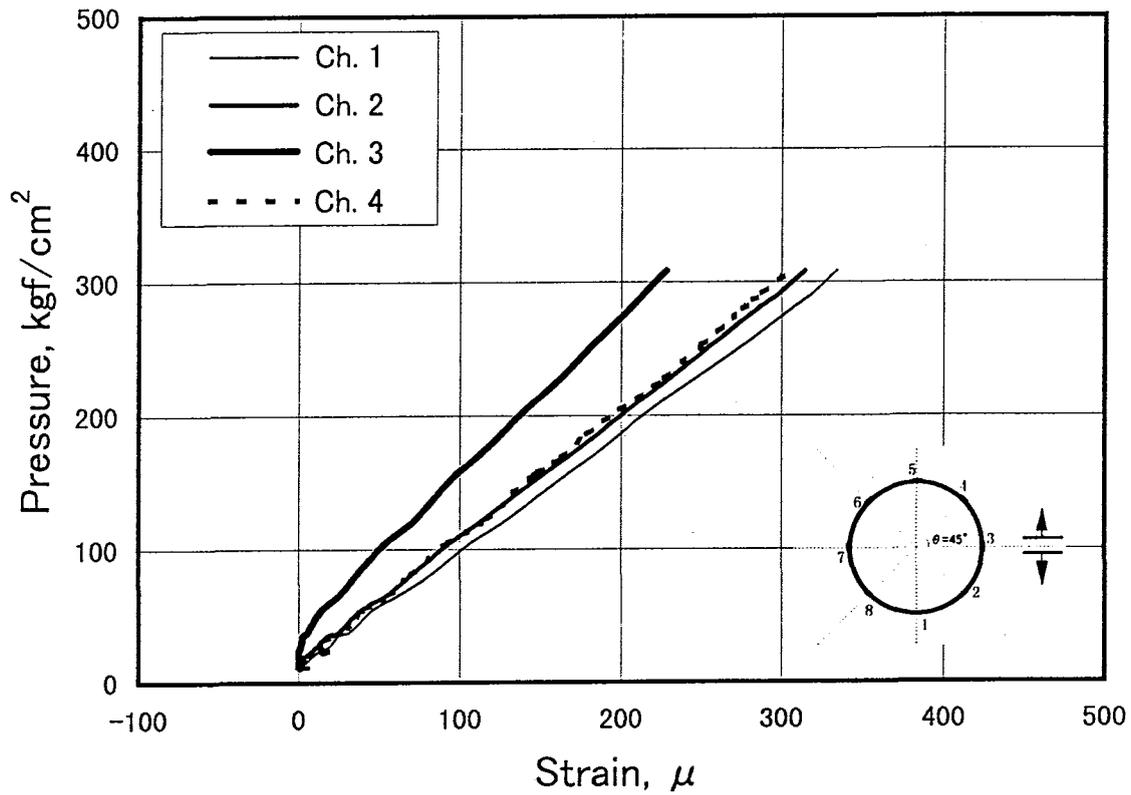


図3.3.10(a) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt9, Ch.1-4)

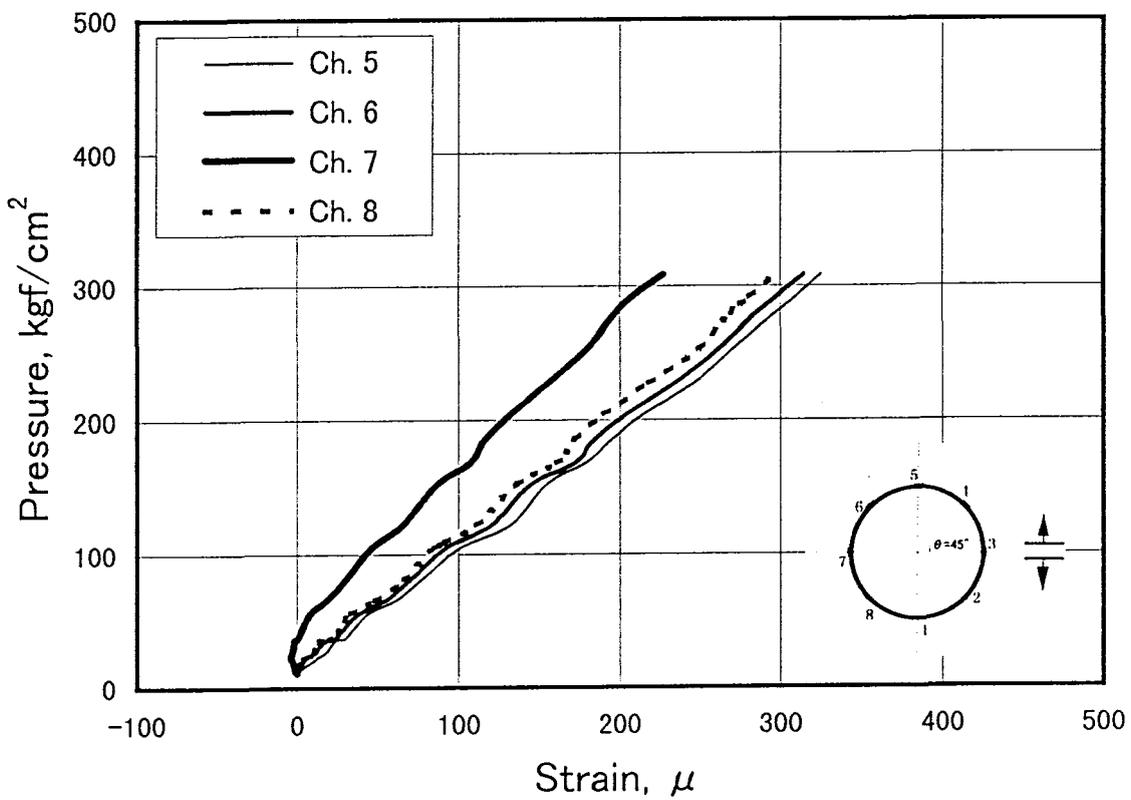


図3.3.10(b) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt9, Ch.5-8)

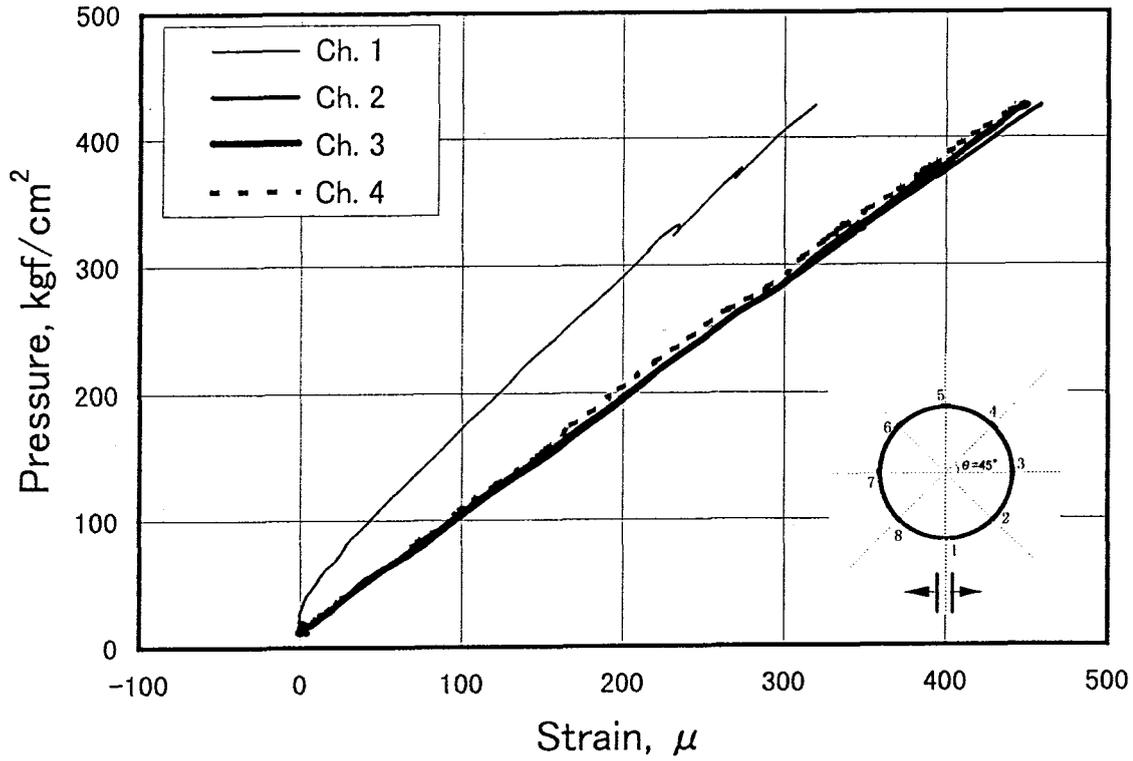


図3.3.11(a) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt10, Ch.1-4)

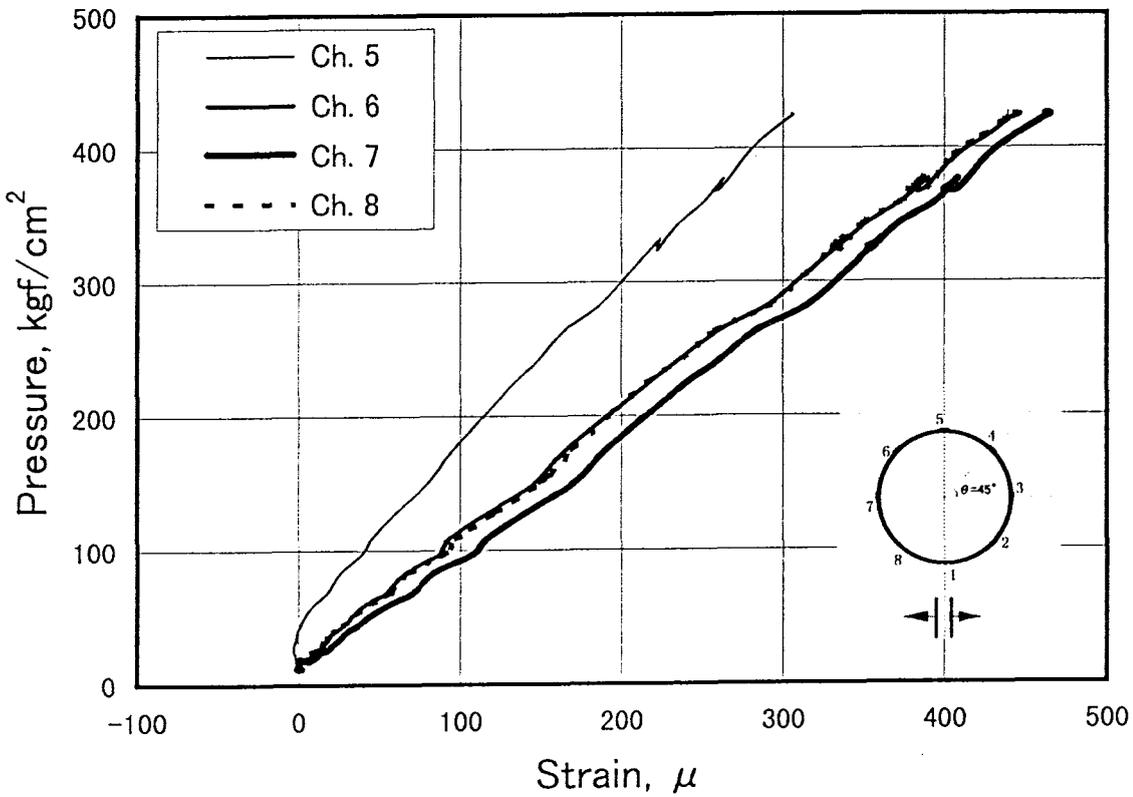


図3.3.11(b) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt10, Ch.5-8)

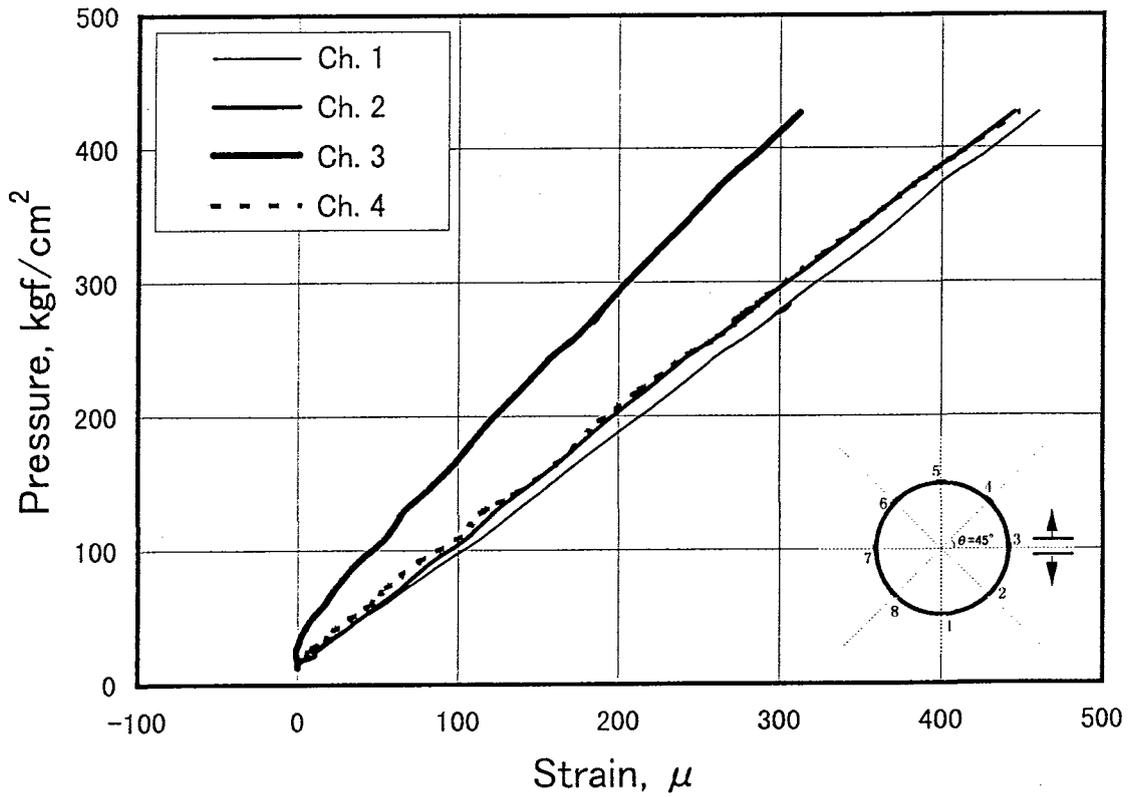


図3.3.12(a) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt11, Ch.1-4)

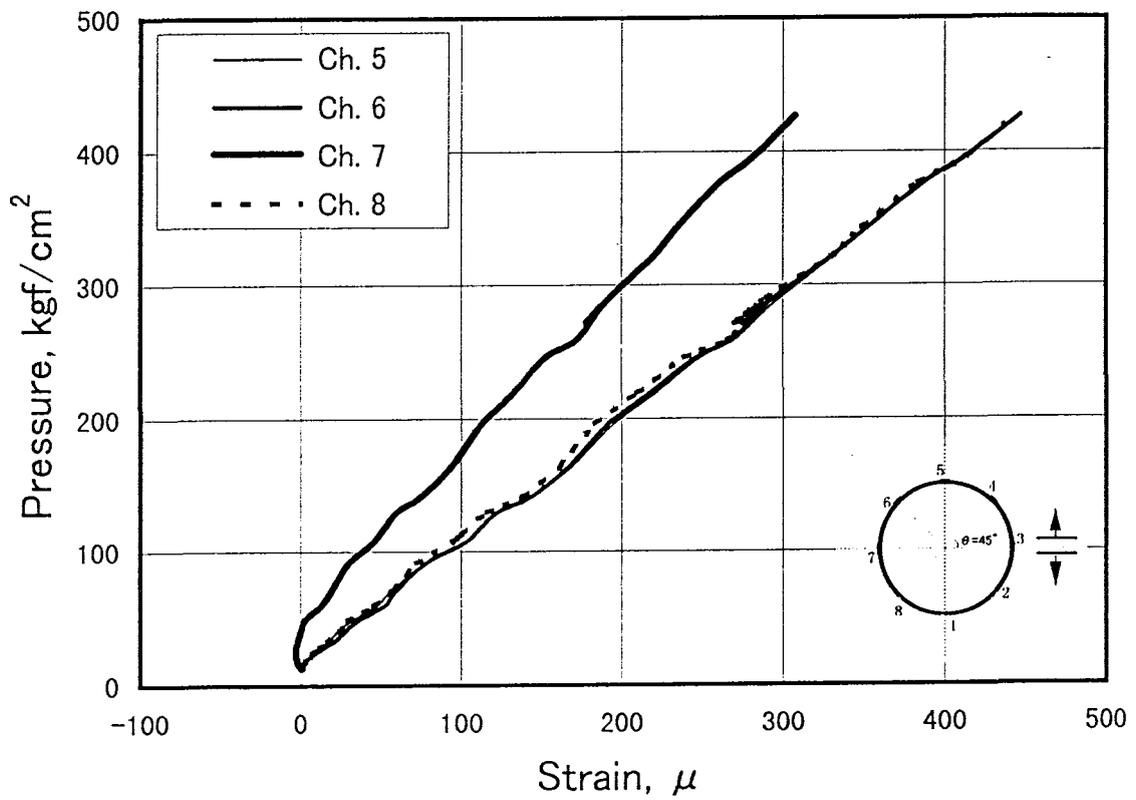


図3.3.12(b) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt11, Ch.5-8)

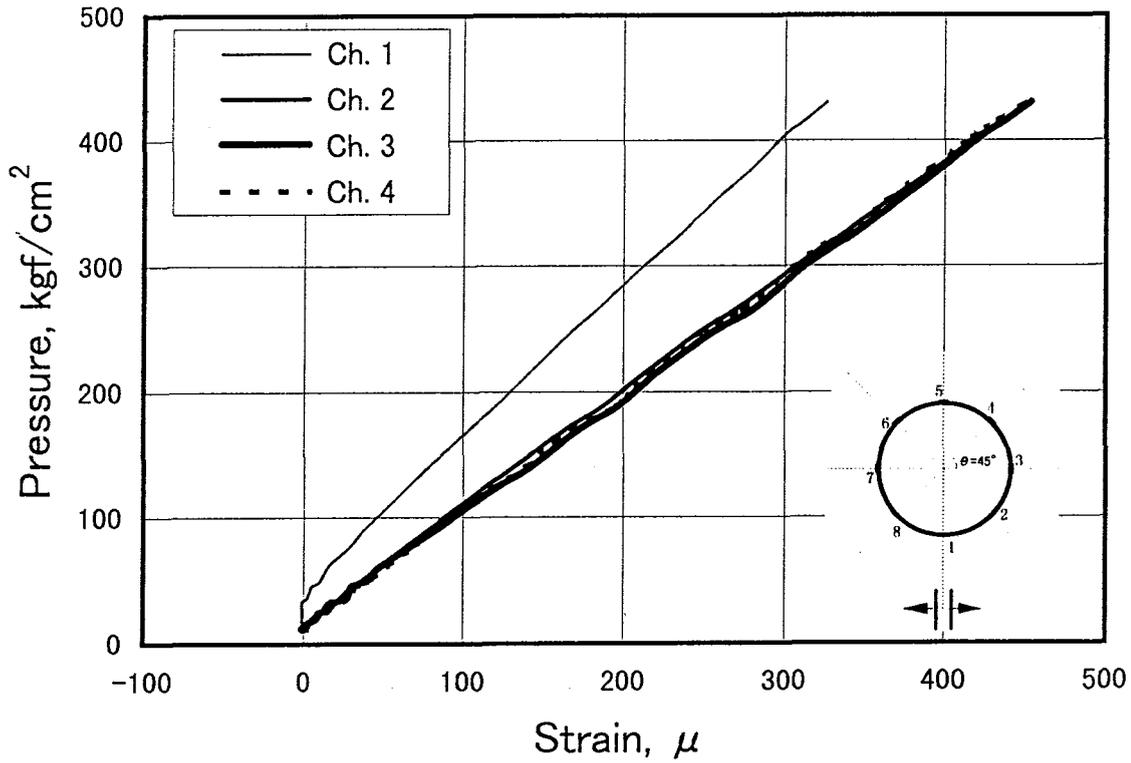


図3.3.13(a) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt12, Ch.1-4)

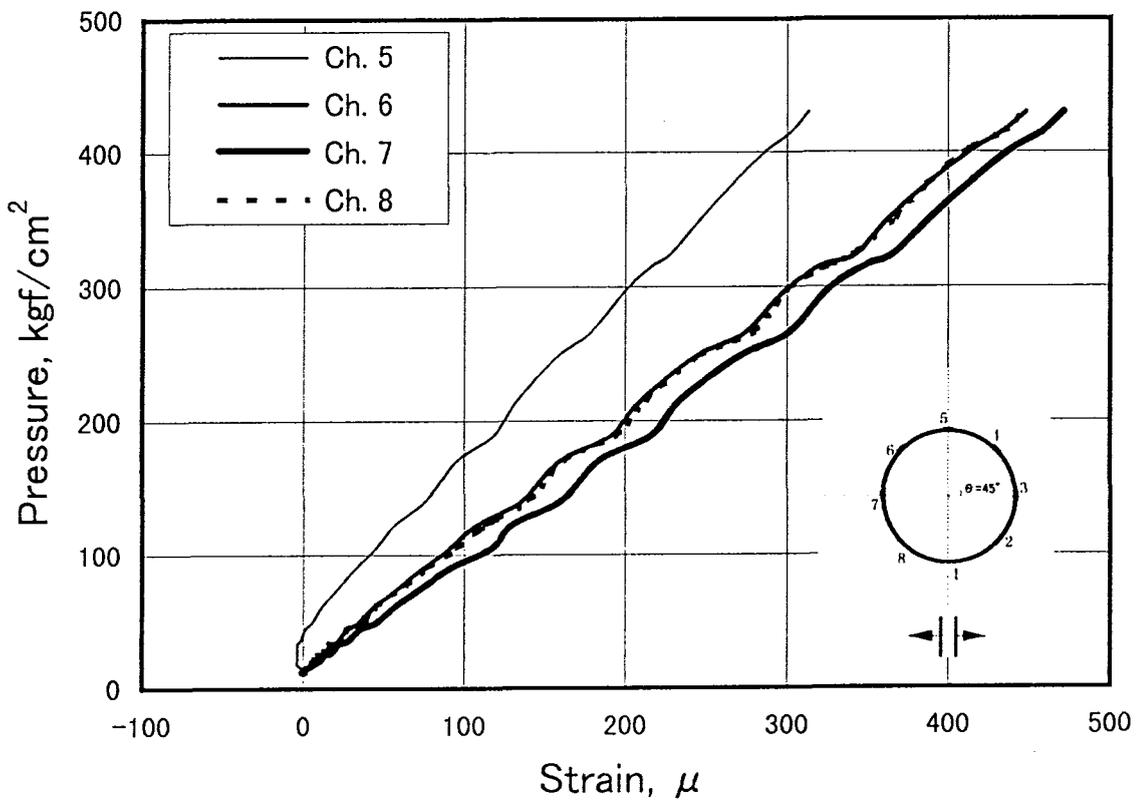


図3.3.13(b) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt12, Ch.5-8)

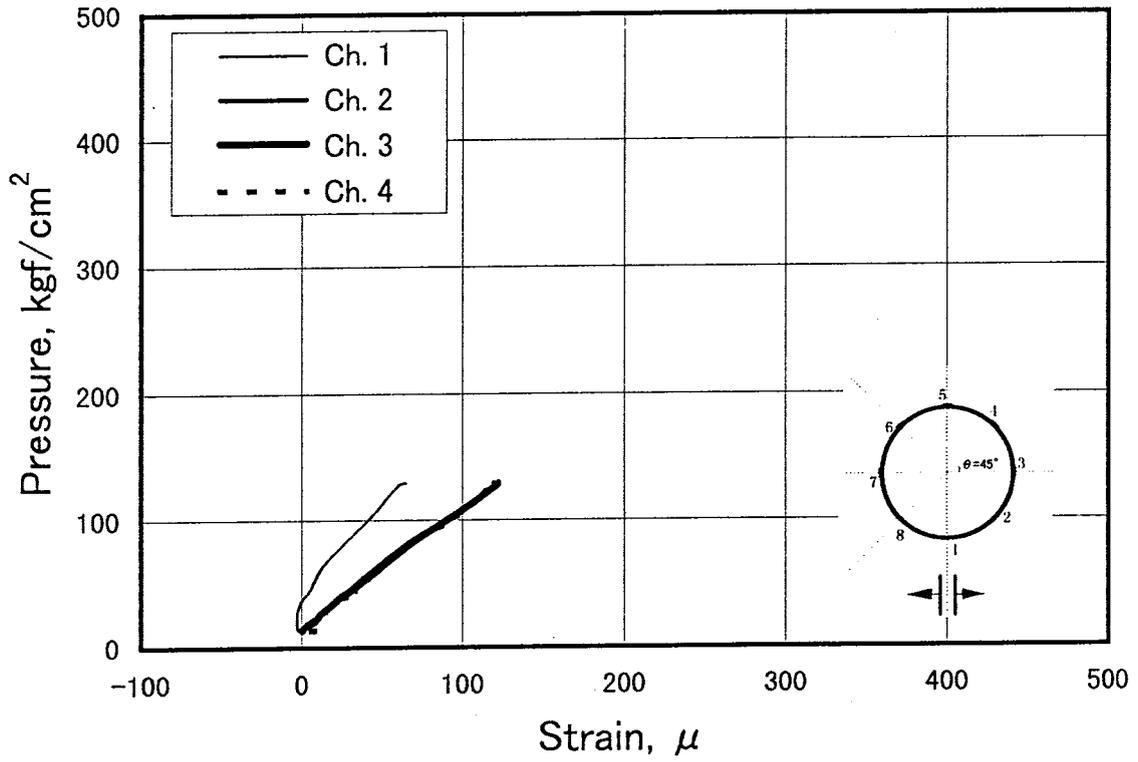


図3.3.14(a) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt13, Ch.1-4)

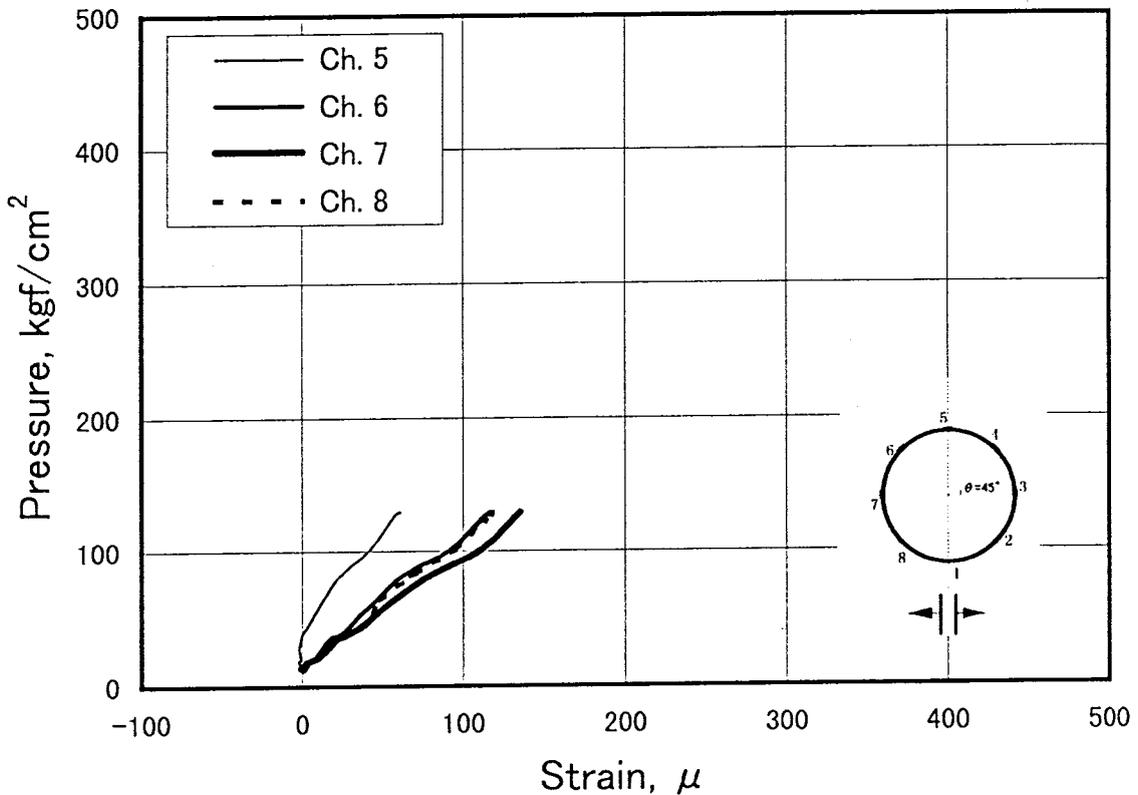


図3.3.14(b) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt13, Ch.5-8)

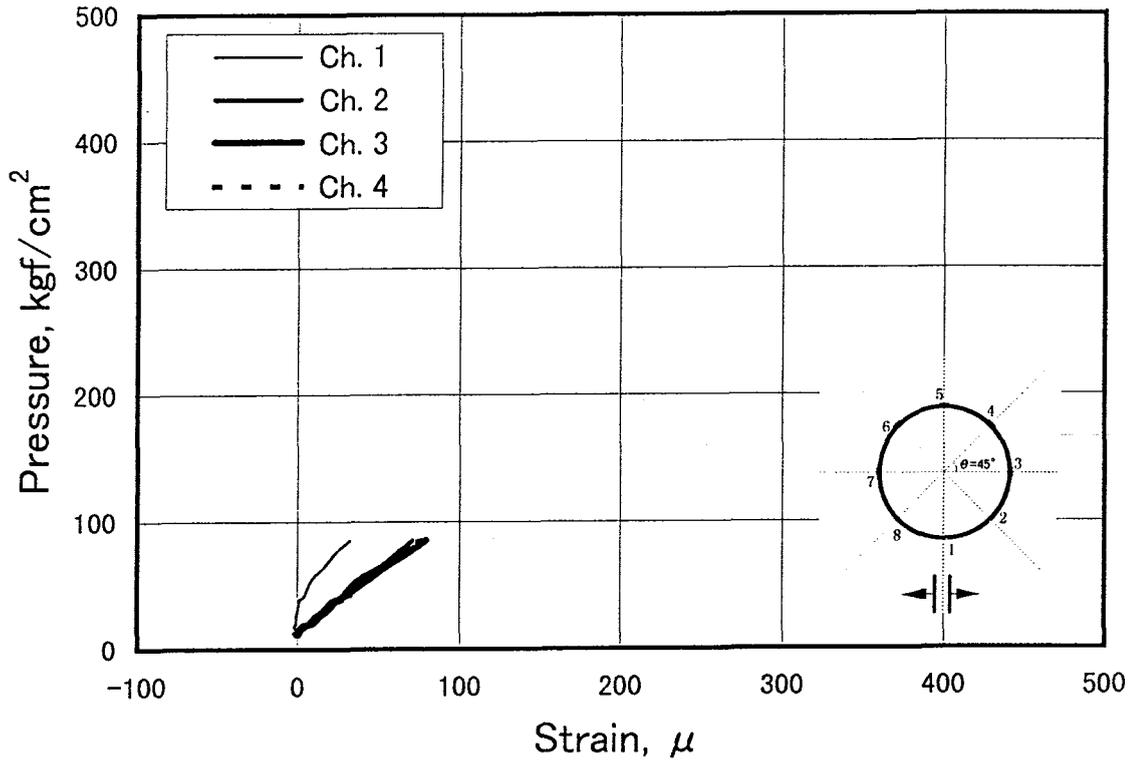


図3.3.15(a) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt14, Ch.1-4)

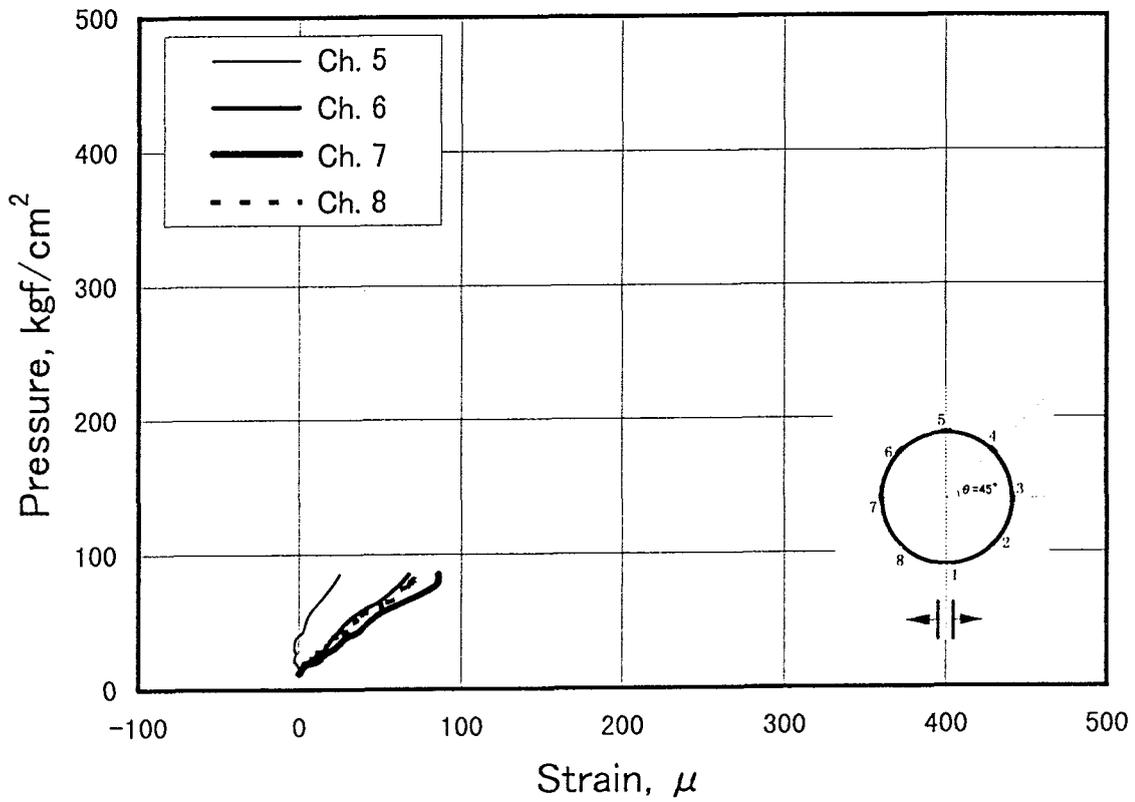


図3.3.15(b) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt14, Ch.5-8)

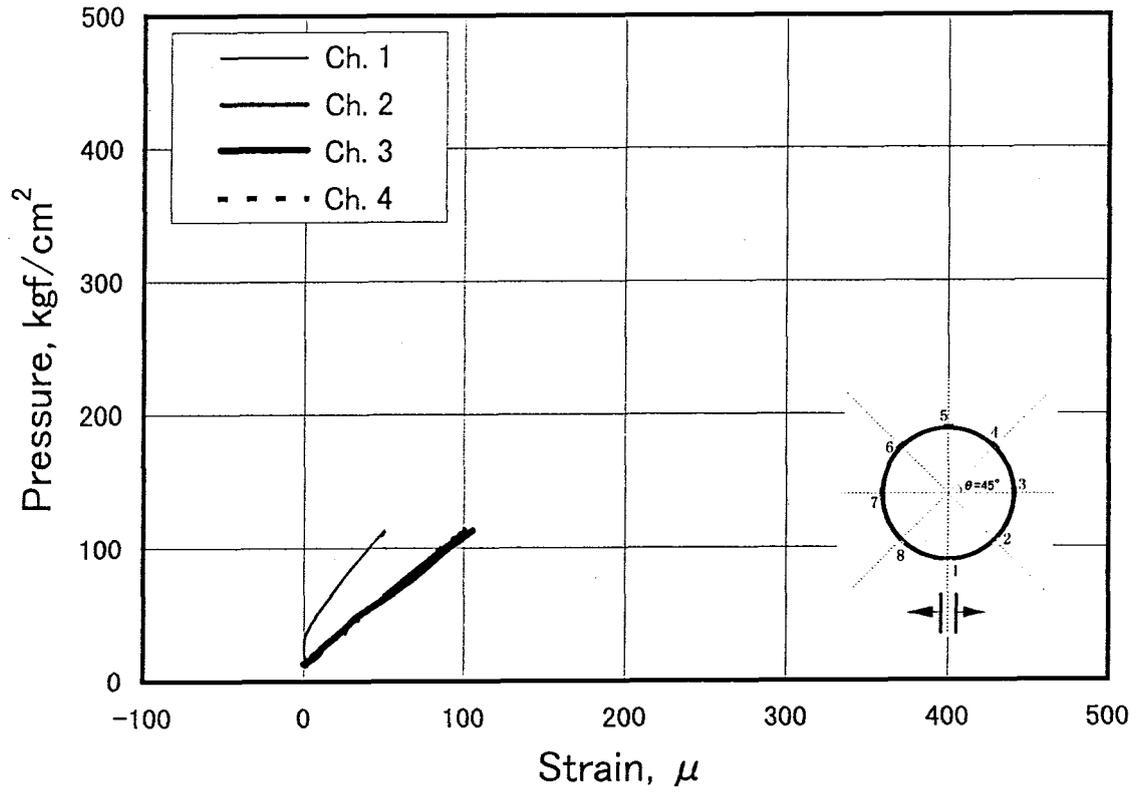


図3.3.16(a) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt15, Ch.1-4)

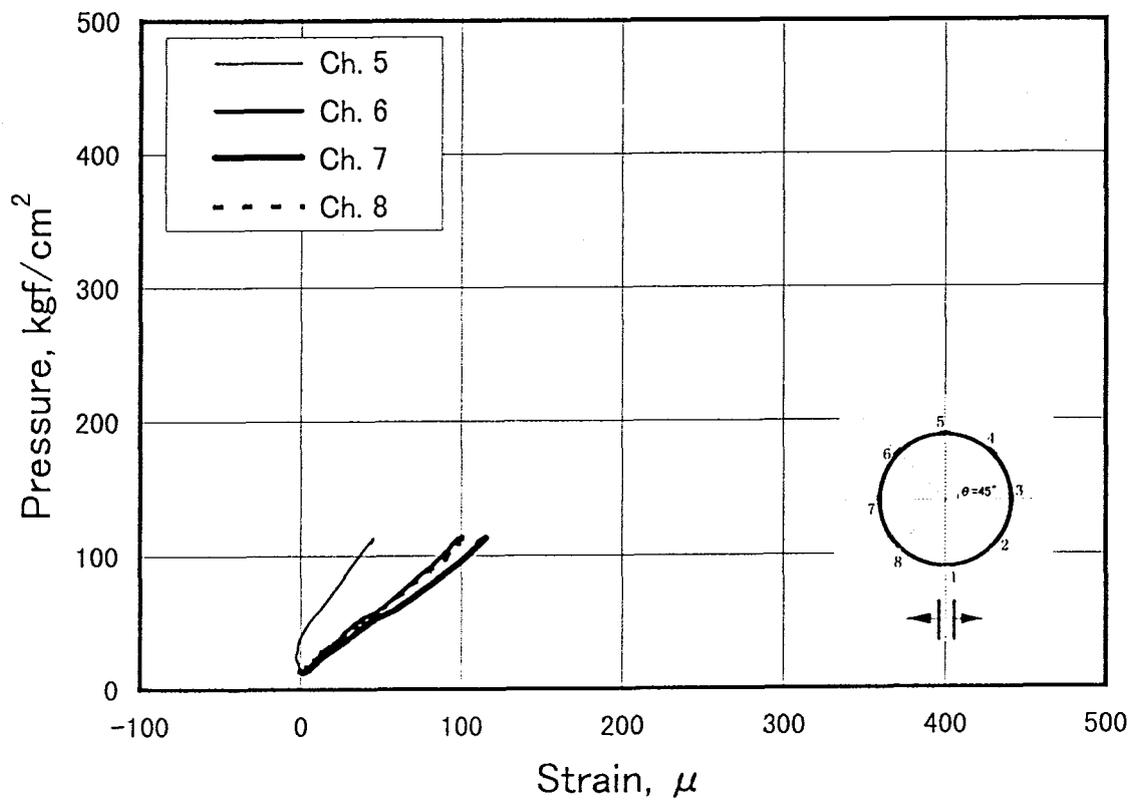


図3.3.16(b) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt15, Ch.5-8)

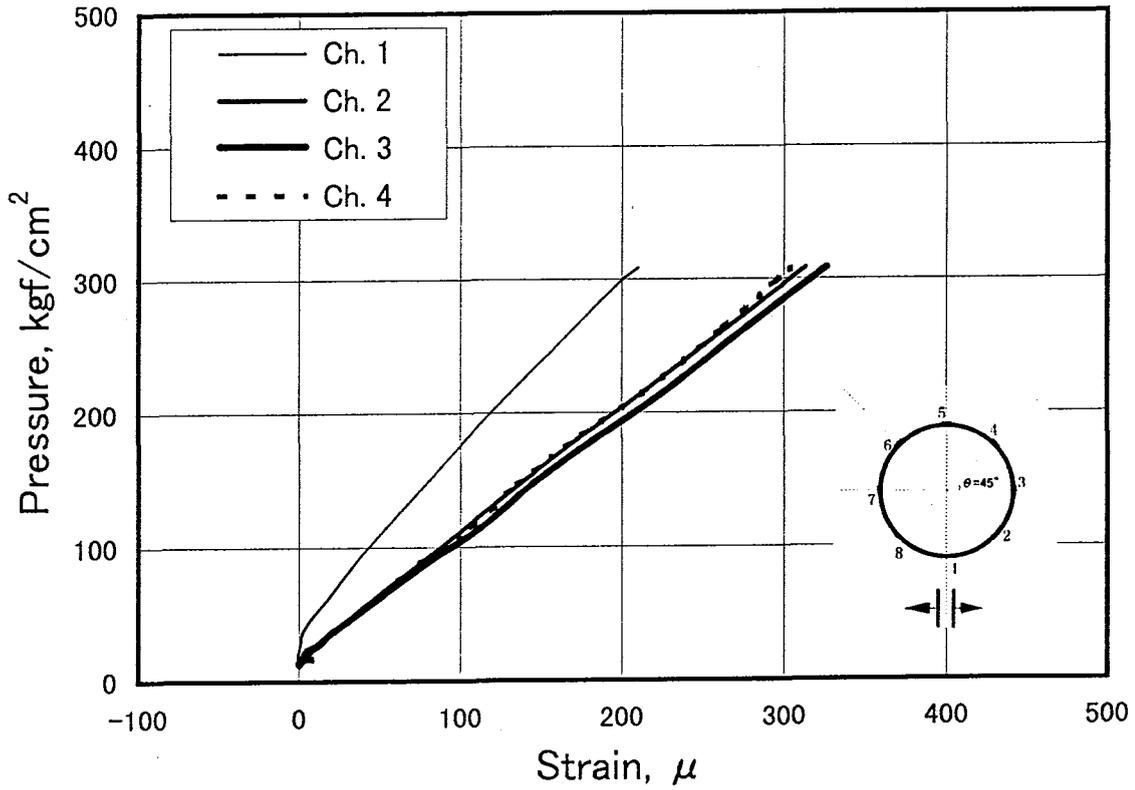


図3.3.17(a) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt16, Ch.1-4)

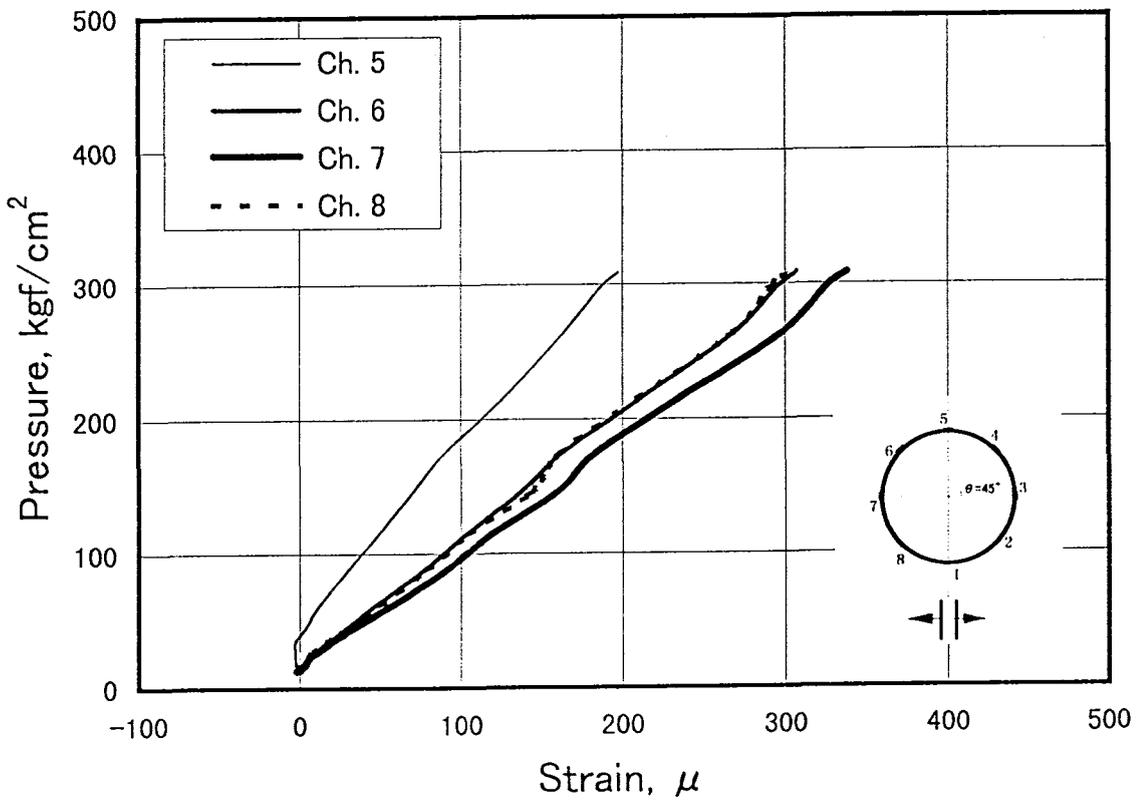
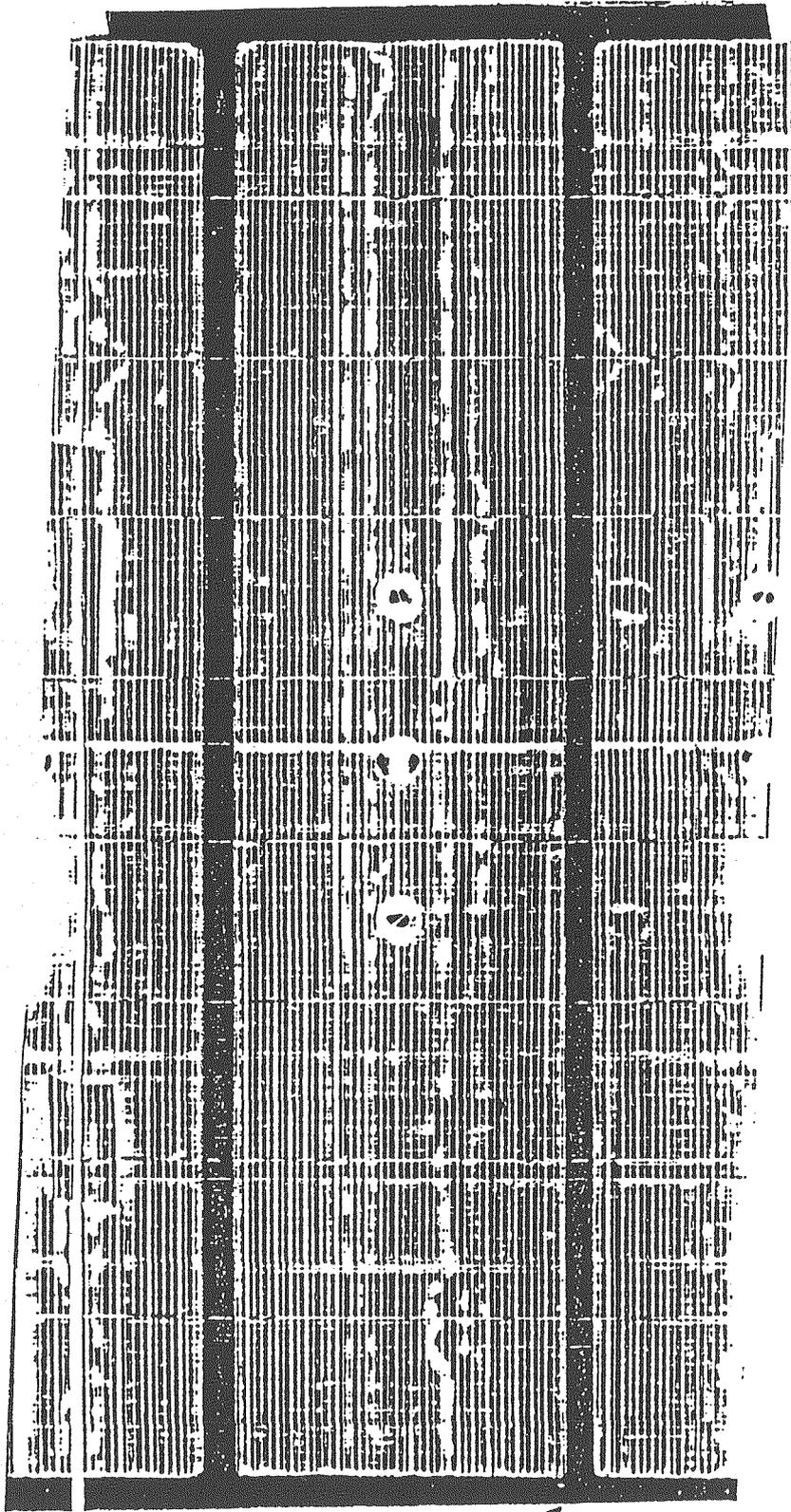


図3.3.17(b) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt16, Ch.5-8)



亀裂発生位置

図 3.3.18 鋼管内載荷試験時に観測されたブレスケールの結果

9や図3.3.10から分かるように、鋼管内部にグリースを塗り、鋼管とプローブの摩擦を減少させても、やはり結果に変わりはない。

ここで、試験Pt16の載荷時にプローブに巻き付けたプレスケールの結果を図3.3.18に示す。プローブ中央部の3つのやや白くなっている丸い部分は変位計のソケット2カ所とアンカー部である。一方、黒く太い筋状になっている部分は摩擦部と摩擦部の間、つまり亀裂発生部分である。はじめに想定した載荷機構通りならば、プレスケールで大きな圧力を受けた色の濃い部分は、亀裂の発生方向であり、色の薄い部分は亀裂発生方向よりも90°離れた部分と思われた。しかし、色の濃い圧力を大きく受けた部分は亀裂発生方向で、亀裂発生方向よりも90°離れた部分の色は、亀裂の発生方向よりも薄くなっている。

以上の結果から、現在のS-500のプローブによって起こっている破壊機構は、亀裂作成面が摩擦シェル内部のウレタンの等方膨張により引き離され引張破壊が起こっているのではなく、亀裂作成面直近の摩擦シェルの強い拘束を受けた状況下（シェルが供試体に食い込んだような状態）で、その内部のウレタンが膨張することによって生じる局部的引張破壊であると思われる。従って、当初想定していた破壊機構とは異なると考えられる。局部的引張亀裂は所定の箇所が発生しており、ここで展開されている破壊機構については新たな検討を加える必要があることが判明した。

### 3.4 理論解析

#### 3.4.1 鋼管内載荷試験のシミュレーション

境界要素法を用いた数値解析により、鋼管内載荷試験のシミュレーションを行った。数値解析に供したモデルは以下に示す Model 1 から Model 5 の 5 通りである。

##### (1) 水圧破砕パッカーによる鋼管内載荷モデル

図 3.4.1 に解析モデル (Model 1) を示す。図に示すように、同心円上の二つの境界の局所座標系において、空間に向かう法線方向 (n) が正であり、実質 (鋼管肉質) を右にしながら前に向かう方向 (s) が正である。したがって要素番号は内周境界については反時計まわりに、外周境界については時計まわりになっている。また、引張を正とすれば図中の矢印で示される方向の直応力、せん断応力が正であるが、ここではすべて逆向きの応力を正とする。すなわち引張を負とし、第一象限の内周境界に対して反時計まわりの方向に作用するせん断応力 (本来は正) を負とする。内周境界、外周境界ともに 72 分割 (Model 3 参照) されている。境界要素法による解析手法は仮想応力法 (Fictitious Stress Method, 以後 F S M 法と呼ぶことにする) による間接法である。仮想応力法は無限媒体中のある面に表面力を作用させることにより、その面において応力不連続をもたらすので、応力不連続法 (Stress Discontinuity Method) とも呼ばれている。モデルの寸法、境界条件はつぎの通りである。

○外周境界の半径  $b$  と内周境界の半径  $a$  との比 : 65/89

○内周境界に流体圧  $p_i$  を載荷

このモデルに対する厳密解は次式で与えられる。

$$\sigma_r = -\frac{a^2 p_i}{b^2 - a^2} \left( 1 - \frac{b^2}{r^2} \right)$$
$$\sigma_\theta = -\frac{a^2 p_i}{b^2 - a^2} \left( 1 + \frac{b^2}{r^2} \right)$$

##### (2) 無限媒体中の円孔境界への水圧載荷モデル

図 3.4.2 に解析モデル (Model 2) を示す。図に示すように円孔境界は反時計まわりに 72 個の F S M 要素に分割されている。モデルの寸法、境界条件はつぎの通りである。

○円孔の半径 :  $a$

○円孔境界に流体圧  $p_i$  を載荷

このモデルに対する厳密解は次式で与えられる。

$$\sigma_r = p_i \frac{a^2}{r^2} \quad , \quad \sigma_\theta = -p_i \frac{a^2}{r^2}$$

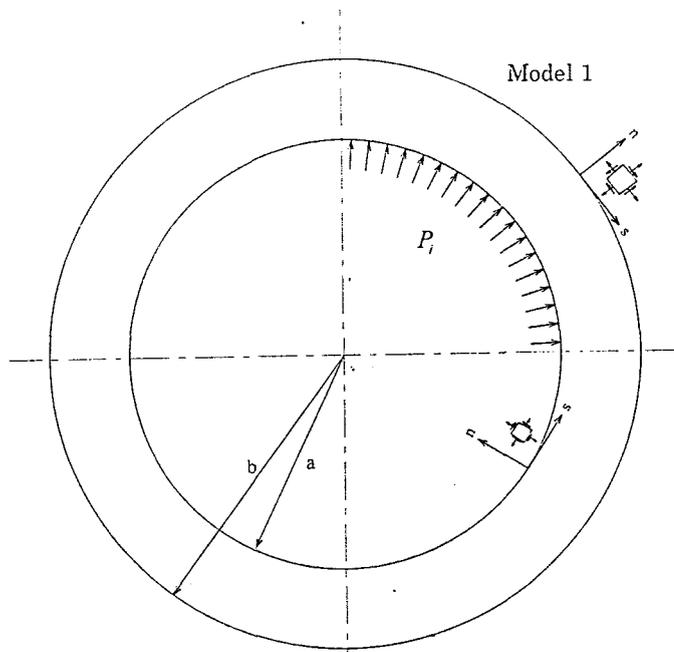


図 3.4.1

図 3.4.1 解析モデル (Model 1)

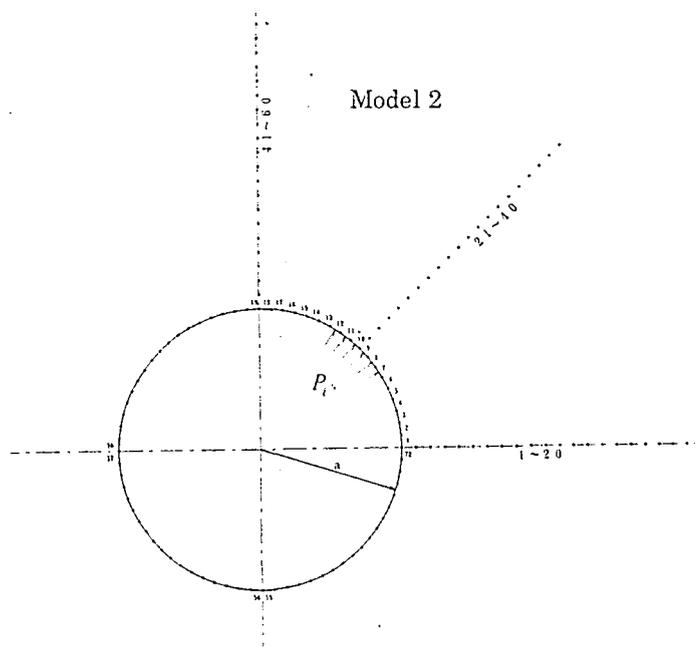


図 3.4.2

図 3.4.2 解析モデル (Model 2)

(3) 鋼管内周境界に流体圧  $p_i$  とせん断応力  $p_s$  を同時に載荷するモデル

図 3.4.3 に解析モデル (Model 3) を示す。要素分割は Model 1 と同じであるが、境界条件は次の通りである。

○ 内周境界に一定の流体圧  $p_i$  を作用させると同時に次式で与えられるせん断応力  $p_s$  を作用させる。

$$p_s = -\alpha p_i \cos^2 \theta \quad (\pi/36 \leq \theta \leq 35\pi/36)$$

$$p_s = \alpha p_i \cos^2 \theta \quad (37\pi/36 \leq \theta \leq 71\pi/36)$$

ただし、鋼管外周境界の  $\theta = \frac{\pi}{2}$  における接線応力と  $\theta = 0$  における接線応力との

比  $(\sigma_\theta)_{\pi/2} / (\sigma_\theta)_0$  が計測されたひずみから応力に換算して求められた比と同じになるよ

うに、 $\alpha = 1.006$  とした。

圧縮を正とするとき、上式で与えられるせん断応力 (内周境界に載荷) の符号はつぎの通りである。

第1象限で負 (反時計まわり)

第2象限で正 (時計まわり)

第3象限で負 (反時計まわり)

第4象限で正 (時計まわり)

このモデルに対する厳密解はない。

(4) 限媒体中の円孔境界に水圧  $p_i$  とせん断応力  $p_s$  を同時に載荷するモデル

図 3.4.4 に解析モデル (Model 4) を示す。要素分割は Model 2 と同じであるが、境界条件は Model 3 における内周境界への載荷と同じものを円孔境界に作用させる。すなわち、円孔境界に  $p_s / p_i = \pm 0.1006$  である  $p_i$  と  $p_s$  を同時に載荷する。

このモデルに対する厳密解はない。

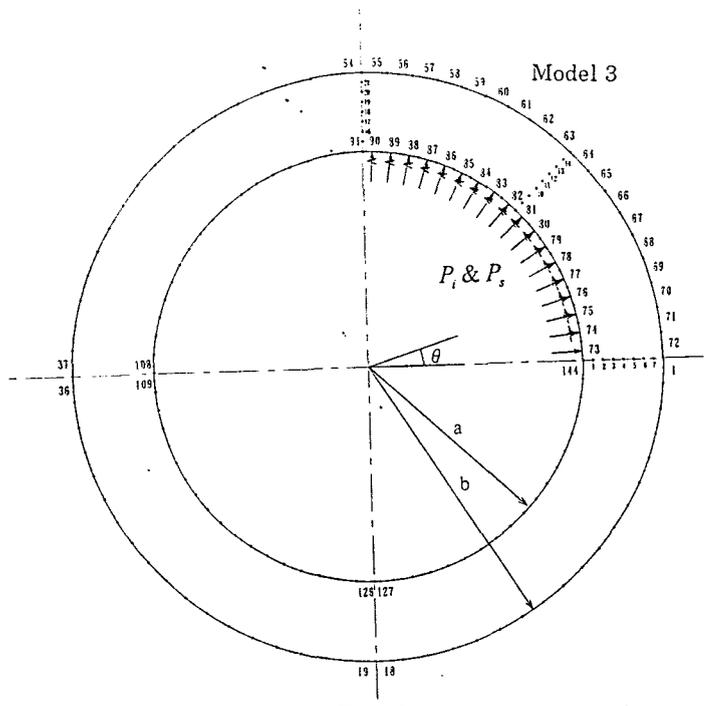


図 3.4.3

図 3.4.3 解析モデル (Model 3)

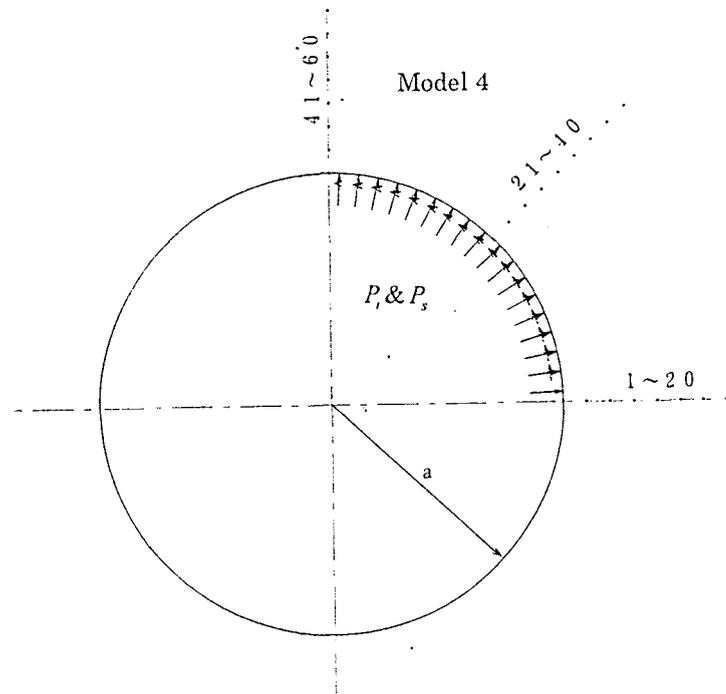


図 3.4.4

図 3.4.4 解析モデル (Model 4)

(5) 鋼管内周境界をジョイント要素で表わした S-500 モデル

図 3.4.5 に解析モデル (Model 5) を示す。図に示す三つの同心円のうち、一番大きい円は鋼管外周境界を表わし、2番目の円は鋼管内周境界を表わす。また、2番目の円の  $\pi/36 \leq \theta \leq 35\pi/36$  および  $37\pi/36 \leq \theta \leq 71\pi/36$  の部分は、同時に半パイプ状の高剛性摩擦シェルの外周 (実際には、図 3.3.18 のプレスケール試験結果からも分かるように、凹凸のある波形になっている) を表わして、これがジョイント要素に分割されている。

また、最も内側の円は摩擦シェルの内周 (実際には、ウレタンスリーブと摩擦シェルの境界面) を表わしている。ウレタン樹脂のポアソン比はほぼ 0.5 であるのでシェルとの境界面には一様に  $p_i$  が作用しているものと考えられる。

ジョイント要素というのは、境界要素法による解析手法である変位くい違い要素法 (Displacement Discontinuity Method) に導入され得るもので、ある厚さを有する弾性体としてイメージされ、次式で与えられる垂直剛性  $K_n$  とせん断剛性  $K_s$  を有するものである。

$$K_n = \frac{E_o}{h} \quad , \quad K_s = \frac{G_o}{h}$$

ここに  $E_o$  はヤング率、 $G_o$  は剛性率である。

一般にはヤング率  $E$  と剛性率  $G$  との間には一定の関係、 $G = E / 2(1 + \nu)$  があるが、実際の計算においては、 $K_n$  と  $K_s$  を独立に与えることもできる。このモデルにおけるジョイント要素は連続した固体を表わしているのではなく、凹凸のある摩擦シェル外周と鋼管内周との相対変位を表わすので、 $K_n = K_s$  とした。

また、各ジョイント要素は個々に挙動し、横方向につながりはない。したがってジョイント要素自体には  $\sigma_\theta$  は発生しない。ただし、鋼管内周境界上の  $\sigma_\theta$  分布はその変位分布から求めることはできる。

モデルの寸法と境界条件はつぎの通りである。

- 鋼管外径  $b$ 、鋼管内径 = 摩擦シェル外径  $a$  および摩擦シェル内径  $a_0$  の比率は  
89 : 65 : 60
- 鋼のポアソン比  $\nu$  : 0.25
- 鋼のヤング率  $E$  とジョイントの剛性  $K_n = K_s$  との比 :  $2.1 \times 10^6 / 2.6 \times 10^7$  (m)

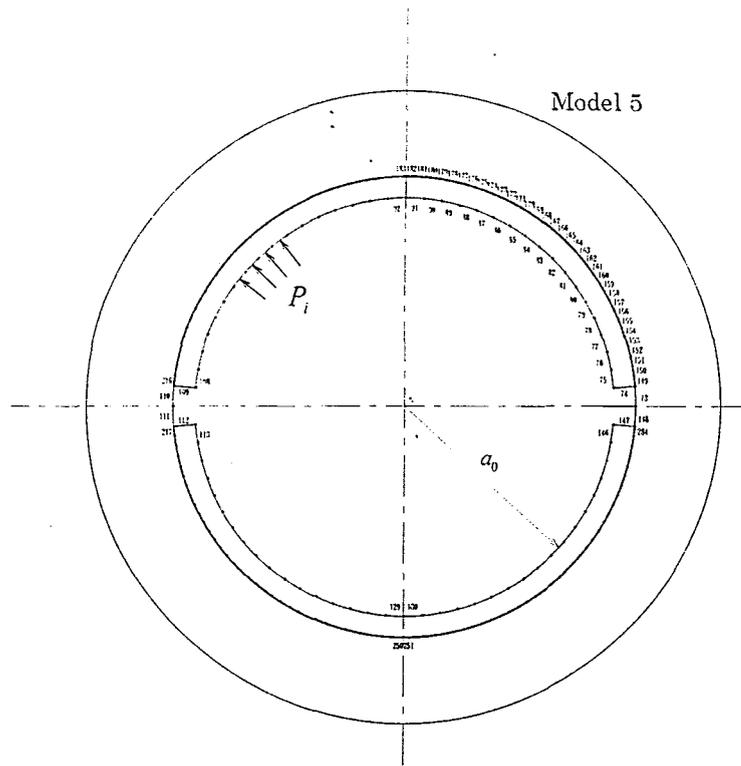


図 3.4.5

図 3.4.5 解析モデル (Model 5)

### 3.4.2 解析結果

Model 1 の解析結果を図 3.4.6 に示す。同図 (a) は図 3.4.3 (Model 3) に示されている三つの  $r$  断面上の各 7 点すなわち、点 1～7 ( $\theta=0$ )、点 8～14 ( $\theta=\frac{\pi}{4}$ ) および点 15～21 ( $\theta=\frac{\pi}{2}$ ) の  $\sigma_r$  を示している。また、同図 (b) は同じ点の  $\sigma_\theta$  を示している。これらの図から、 $\sigma_r$ 、 $\sigma_\theta$  ともにほぼ軸対称であり、かつ厳密解とよい精度で一致していることがわかる。

Model 2 の解析結果を図 3.4.7 に示す。同図は図中に示されている三つの  $r$  断面上の各 20 点の  $\sigma_\theta$  を示している。 $\sigma_r$  は符号が異なるだけで  $\sigma_\theta$  と全く同じ形の分布を示している。 $\sigma_r$ 、 $\sigma_\theta$  ともにほぼ軸対称であり、かつ厳密解とよい精度で一致していることがわかる。

図 3.4.8 は Model 3 の内周境界に載荷したせん断応力分布を示している。Model 3 の解析結果を図 3.4.9 に示す。同図 (a) はモデルの外周境界上および内周境界上の  $\sigma_\theta$  分布を示す。同図 (b) は図中に示されている三つの  $r$  断面上の各 7 点の  $\sigma_\theta$  分布を示している。

表 3.4.1 は S-500 による鋼管内載荷試験結果、すなわち鋼管外周ひずみと載荷圧との関係 (図 3.3.2～図 3.3.17) から最大載荷点での傾き (ひずみと載荷圧との比) を求めたものである。ただし、水圧破碎用パッカーを用いた結果 (Pt. 1 と Pt. 2)、プレスケールを用いた試験の結果 (Pt. 13～15) および Pt. 4 等載荷圧が小さい試験は除外した。

この表から、 $\theta=0$  (内周境界が直接ウレタン樹脂と接する部分から延長した断面) におけるひずみがとくに小さい。 $\theta=\pi/2$  におけるひずみと  $\theta=0$  におけるひずみとの比は 1.54 である。またひずみから換算した応力の比  $\sigma_\theta(\theta=\pi/2)/\sigma_\theta(\theta=0)$  も 1.54 である。図 3.4.9(a) の黒丸印をみると、解析から得られた応力の比もほぼ同じであること、及び実測値が解析結果よりも小さいことが分かる。実測値が解析結果よりも小さいのは、実際に孔壁に作用する圧力が計測している圧力よりも小さいということが考えられる。

図 3.4.10 に Model 4 の解析結果を示す。同図 (a) は内周境界上の  $\sigma_\theta$  分布を示し、同図 (b) は  $\theta=0$ 、 $\pi/4$  および  $\pi/2$  における  $\sigma_\theta$  分布を示している。これらの図から、 $\theta=0$  における引張応力と  $\theta=\pi/2$  における引張応力との比が 1.37 になっていること、また円孔から遠ざかると軸対称に近くなることがわかる。

図 3.4.11 に Model 5 の解析結果を示す。同図 (a) は鋼管外周境界上の  $\sigma_\theta$  分布を示したものであり、同図 (b) は三つの  $r$  断面上の  $\sigma_\theta$  分布を示したものである。これらの図から、外周境界上の  $\sigma_\theta$  は  $\theta=0$  の近傍においてのみ小さくなり、 $\theta=\pi/4$  と  $\theta=$

表 3. 4. 1 S-500 による鋼管内載荷試験から得られた  
(鋼管外周ひずみ/載荷圧) 比

鋼管テスト番号	載荷圧 $P_i$ (kgf / cm <sup>2</sup> )	$(\varepsilon_\theta)_0 / P_i$	$(\varepsilon_\theta)_{\frac{\pi}{4}} / P_i$ 10 <sup>-6</sup> / (kgf / cm <sup>2</sup> )	$(\varepsilon_\theta)_{\frac{\pi}{2}} / P_i$
Pt. 3	313. 2	0. 674	1. 070	0. 993
		0. 699	1. 066	1. 015
Pt. 5	339. 2	0. 702	0. 944	1. 029
		0. 675	0. 979	1. 026
Pt. 6	396. 2	0. 704	1. 027	1. 004
		0. 699	1. 039	0. 994
Pt. 7	301. 3	0. 677	0. 989	1. 019
		0. 644	0. 966	1. 012
Pt. 8*	298. 2	0. 758	1. 013	1. 073
		0. 758	0. 986	1. 103
Pt. 9*	308. 2	0. 740	1. 019	0. 989
		0. 737	1. 019	0. 964
Pt. 10	425. 1	0. 750	1. 077	1. 042
		0. 717	1. 044	1. 035
Pt. 11	426. 7	0. 731	1. 041	1. 045
		0. 719	1. 045	1. 041
Pt. 12	425. 3	0. 755	1. 053	1. 049
		0. 731	1. 042	1. 039
Pt. 16	308. 5	0. 681	1. 015	1. 057
		0. 639	0. 995	0. 985
平均**		0. 699	1. 026	1. 075
$\sigma_\theta / P_i$ ***		1. 468	2. 154	2. 257
$\frac{2a^2}{b^2 - a^2}$			2. 286	
$\frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2}$			3. 286	

\* S-500 表面にグリースを塗布して摩擦を減らした。

\*\* Pt. 8 と Pt. 9 を除外した。

\*\*\*  $E = 2.1 \times 10^6$  kgf / cm<sup>2</sup> とした。

最後の 2 行は水圧載荷したときの鋼管外周応力と内周応力の厳密解を示す。ただし鋼管の内径  $a = 6.5$ cm、外径  $b = 8.9$ cm とした。

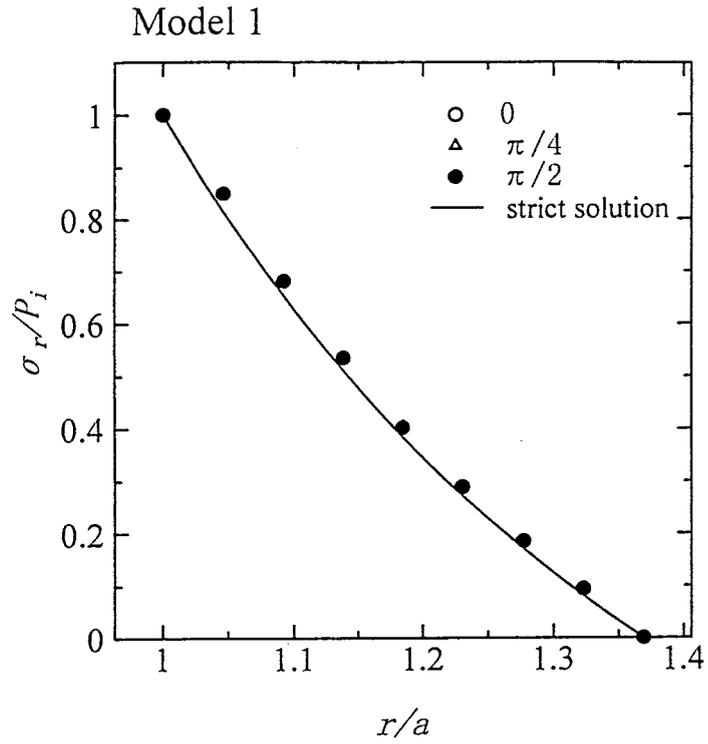


図 3.4.6(a) Model 1 の解析結果  
(3 方向の  $r$  断面上における  $\sigma_r$  の分布)

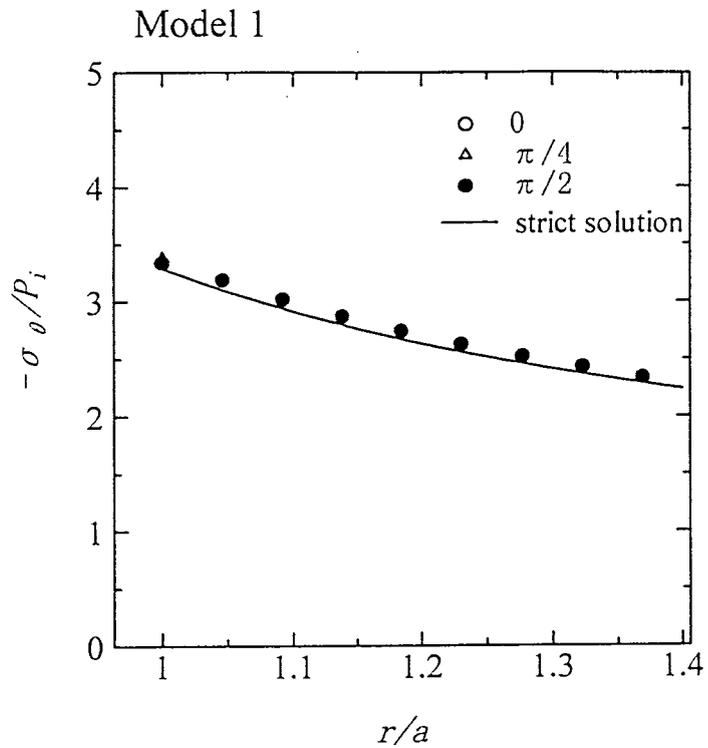


図 3.4.6(b) Model 1 の解析結果  
(3 方向の  $r$  断面上における  $\sigma_\theta$  の分布)

Model 2

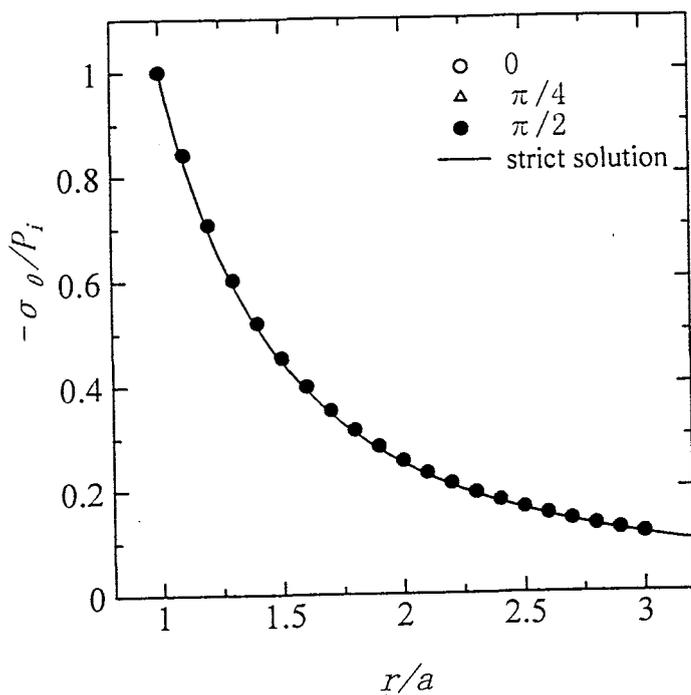


図 3.4.7 Model 2 の解析結果  
(3方向の  $r$  断面上における  $\sigma_\theta$  の分布)

Model 3

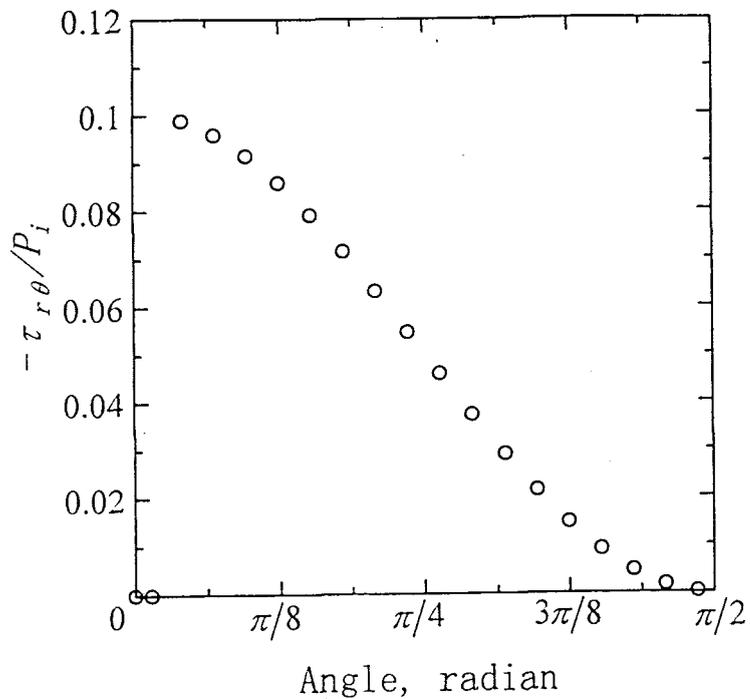


図 3.4.8 Model 3 の鋼管内周境界に載荷したせん断応力分布

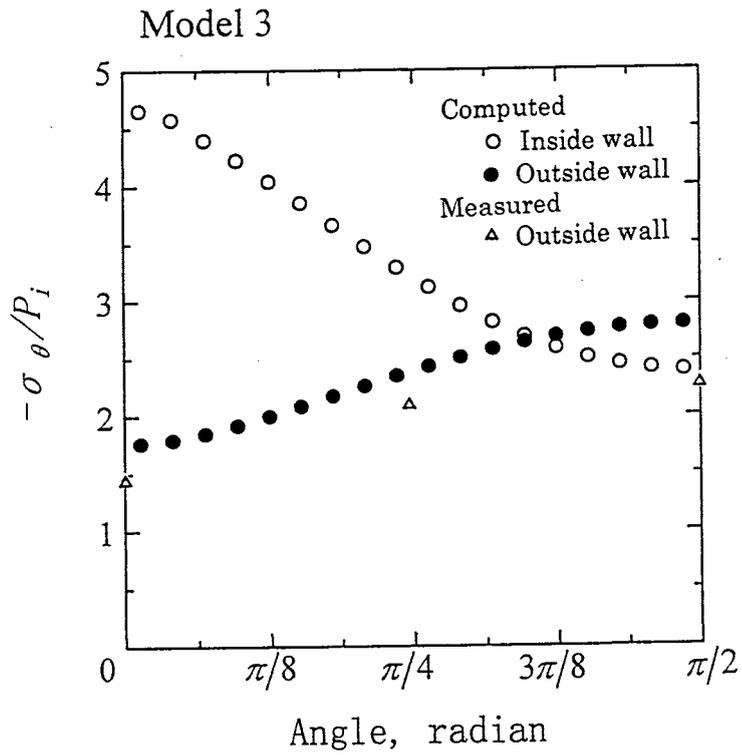


図 3.4.9(a) Model 3 の解析結果  
(鋼管表面の  $\sigma_{\theta}$  の分布)

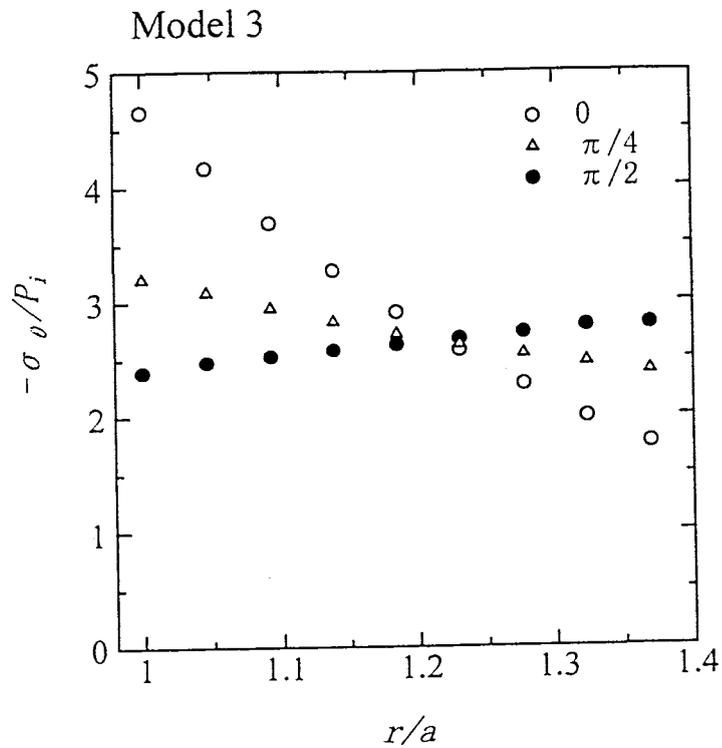


図 3.4.9(b) Model 3 の解析結果  
(3方向の  $r$  断面上における  $\sigma_{\theta}$  の分布)

Model 3

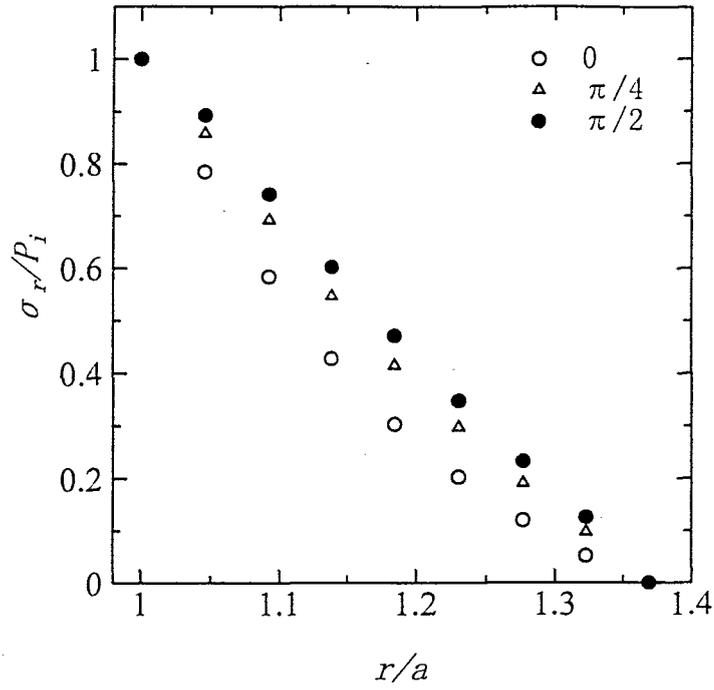


図 3.4.9(c) Model 3 の解析結果  
(3 方向の r 断面上における  $\sigma_r$  の分布)

Model 4

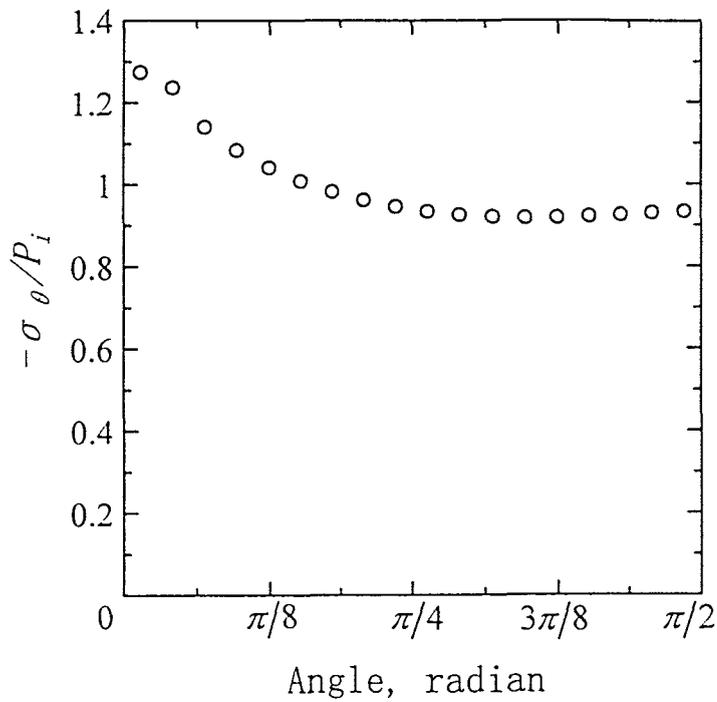


図 3.4.10(a) Model 4 の解析結果  
(鋼管内周境界の  $\sigma_\theta$  の分布)

Model 4

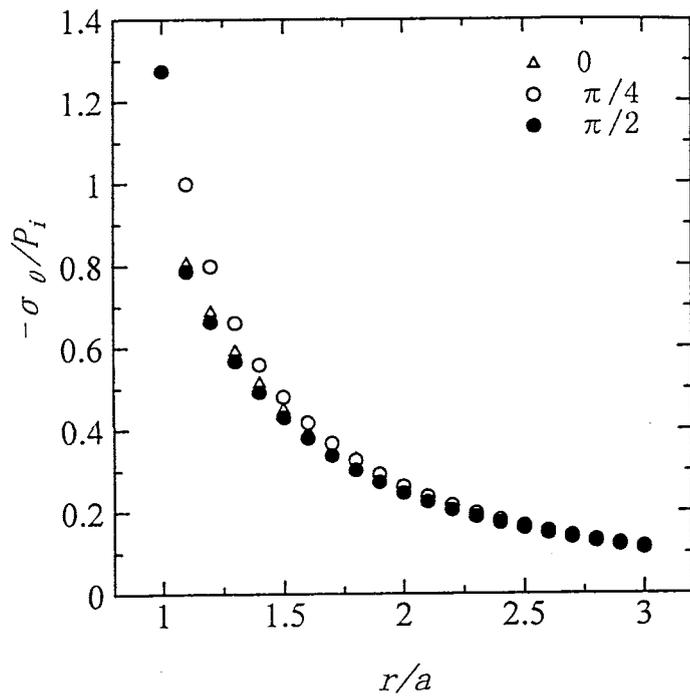


図 3.4.10(b) Model 4 の解析結果  
(3方向の r 断面上におけるσ<sub>θ</sub>の分布)

Model 5

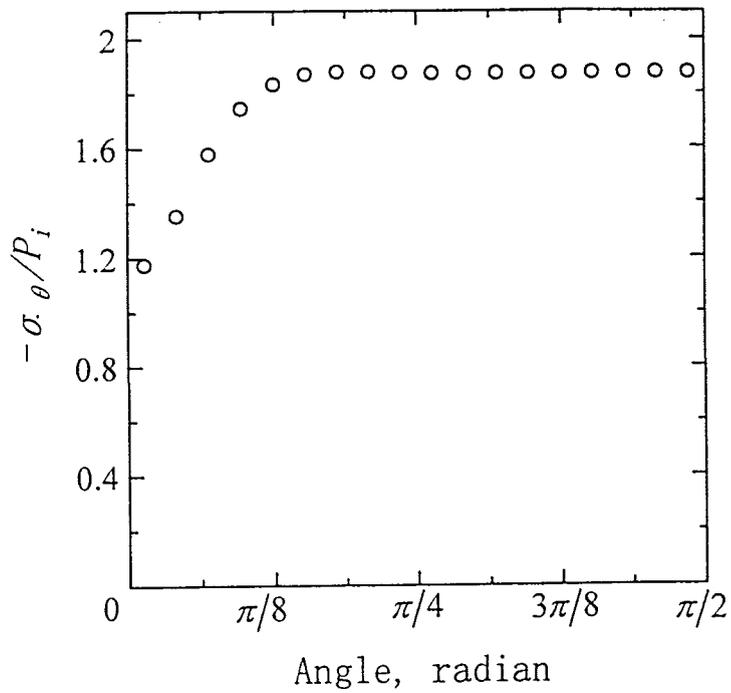


図 3.4.11(a) Model 5 の解析結果  
(鋼管外周境界のσ<sub>θ</sub>の分布)

Model 5

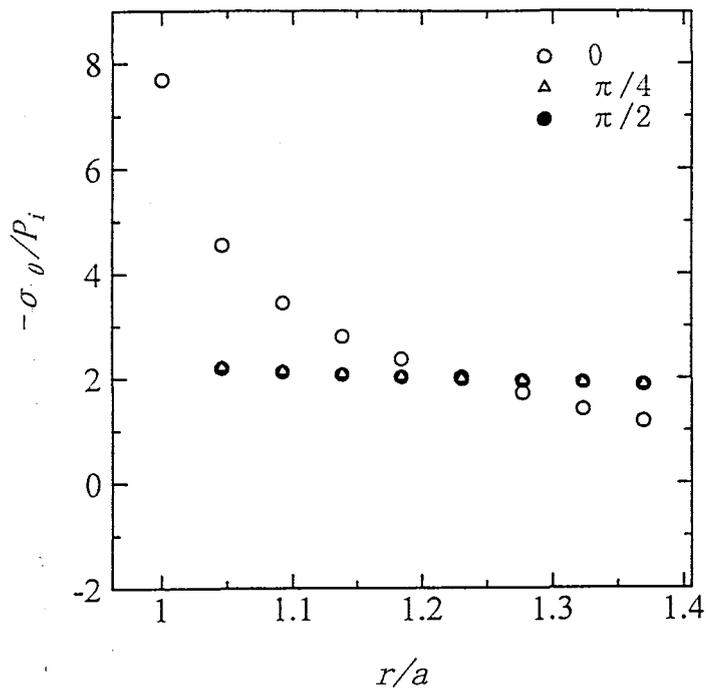


図 3.4.11(b) Model 5 の解析結果  
(3方向の  $r$  断面上における  $\sigma_\theta$  の分布)

Model 5

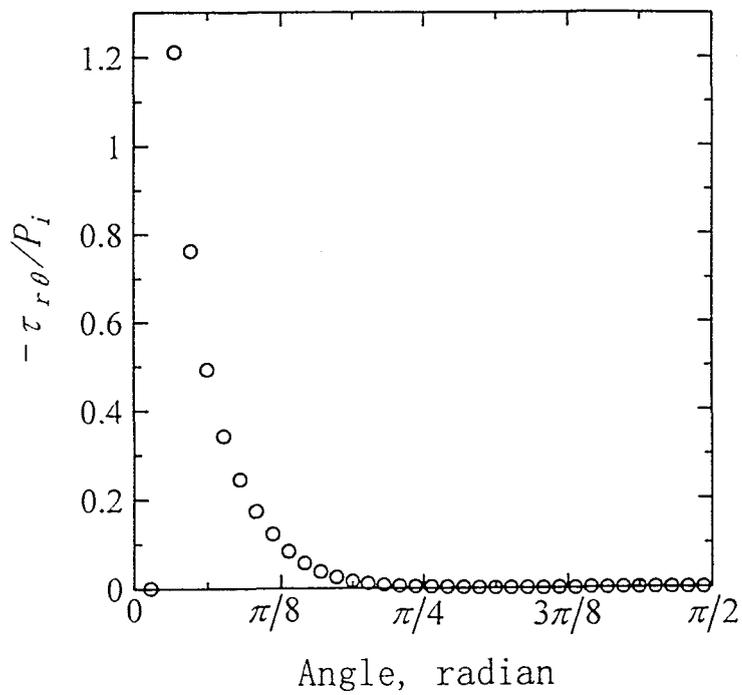


図 3.4.11(c) Model 5 の解析結果  
(鋼管内周境界の  $\tau_{r\theta}$  の分布)

Model 5

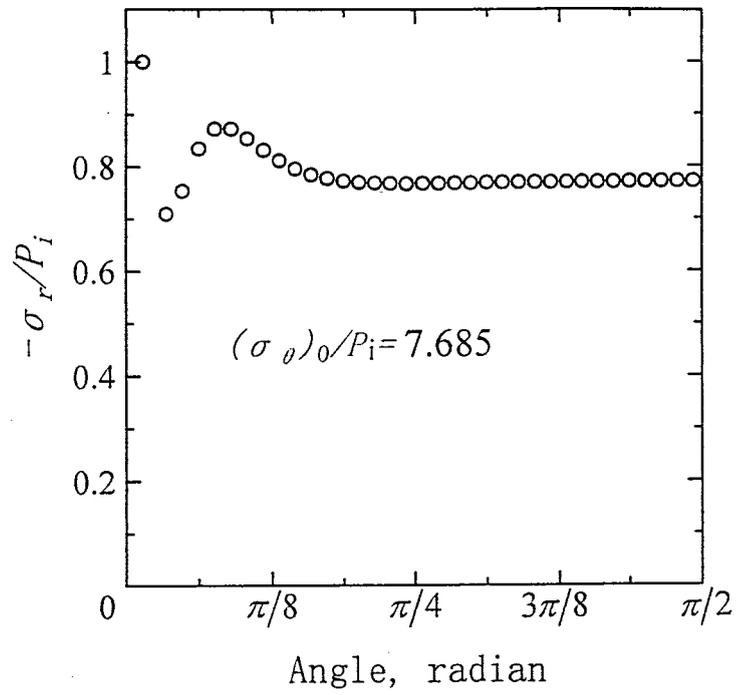


図 3.4.11(d) Model 5 の解析結果  
(鋼管内周境界内壁の  $\sigma_r$  の分布)

$\pi/2$  ではほとんど変わらないことがわかる。実験結果では  $\theta = \pi/4$  と  $\theta = \pi/2$  とでいくらか差が生じているが、これは  $\theta = 0$  に近いジョイント要素が実際にはスリップしているための結果と思われる。S-500 の外周に油をぬって行った実際 (Pt. 8 と Pt. 9) の結果 (図 3.3.9 と図 3.3.10) では、 $\theta = 0$  のひずみがいくぶん大きくなっているが、これは摩擦シェル端部外周におけるスリップが生じ易くなったためと思われる。

同図 (c) はジョイント要素のせん断応力分布すなわち、摩擦シェルと鋼管内壁との摩擦応力の分布を示したものである。これをみると、摩擦シェル先端部すなわち  $\theta = 0$  の近傍においてのみ大きなせん断応力が発生していることがわかる。

同図 (d) は鋼管内周境界の  $\sigma_r$  分布を示したものである。これをみると、 $\theta = 0$  の近傍で複雑な変化をしていることがわかる。なお、図中の数字 7.685 は  $\theta = 0$  における  $\sigma_\theta$  がかなり大きいことを示している (ジョイント要素と接する内周境界の  $\sigma_\theta$  は計算されていない)。

### 3.4.3 載荷圧-変位曲線を解析によって再現する手順

Model 5 はジョイント要素のスリップを許さないものであったが、Model 6 として、モール・クローンの破壊基準を設けて、摩擦シェル両端部のせん断応力が非常に大きくなるとき、そこにすべりが生ずるモデル解析を行う。つぎに、この解析から得られた鋼管内周境界上のせん断応力分布をもとにして、図 3.4.12 に示す Model 7 による解析を行う。図に示されているように、この解析では、発生した亀裂がモデル化されている。亀裂は通常の変位くい違い (DDM) 要素に分割される。有限要素法などの領域型の解析においては、鋼管内周境界より内側は空洞であるが、境界要素法においてはそこにも実質があり内周境界と接している DDM 要素の開口を抑えることになるので、空洞側にもダミーの DDM 要素が設けられている。

載荷圧の上昇とともに  $\theta = \pi/2$  における直径が増加するが、同時に亀裂先端の応力拡大係数  $K_I$  が増大する。 $K_I$  が破壊靱性値  $K_{IC}$  を越えると亀裂は伸展するので、直径はさらに増大し、載荷圧-変位曲線の傾きは小さくなる。このような載荷圧の増分に対する直径変化の増分の変化および亀裂長さの変化を数値解析により再現することもできる。しかし、重要なのは亀裂を再開 (  $K_{IC} = 0$  ) させるときの挙動であるから、このときの載荷圧-変位曲線を数値解析により描き、亀裂が再開する瞬間や亀裂が開く部分の長さとの関係を見て、S-500 プローブを用いて亀裂に垂直な応力成分を検出することの可能性について検討する。

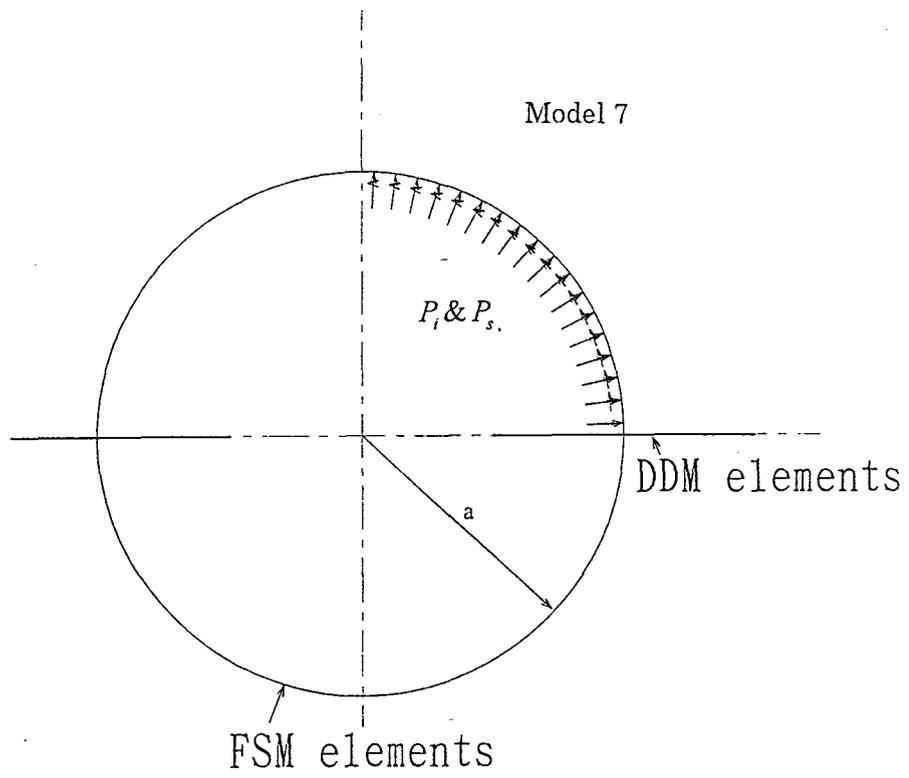


図 3.4.12 解析モデル (Model 7)

### 3.5 結論

供試体を用いた室内試験では、鋼板型摩擦シェルを用いて既存の亀裂がある状態でも任意の方向に亀裂を作成すること、亀裂再開口時の圧力-変位曲線の再現性の確認、および実験から得られる圧力-変位曲線によって求められた折れ点と、Kirschの式から得られる亀裂開口圧力との関係を明らかにするため、主応力比を一定に保ちながら拘束圧を数種類に変化させ、また亀裂の発生方向も3方向にした。このとき、AEも同時に計測し、AEがS-500にとって亀裂の挙動を把握するための手掛かりと成りうるか否かについて検討することとした。その後、ひずみゲージを貼付した鋼管内で載荷試験と、鋼管内載荷試験をモデル化した解析を行うことによって、プローブ内の圧力と鋼管内壁の圧力との差と鋼管内壁に加わる応力状態を調べることにした。以上の結果、以下のことが明らかになった。

(1) 試験終了後に載荷試験装置から供試体を取り出し、亀裂の観察を行った。その結果、3方向全てに亀裂は発生しており、任意の3方向に亀裂を作成することができることは確認された。

(2) 同一の拘束条件下に複数回行った載荷試験では、1回目と2回目の再開口圧力に大きな開きがあり、安定した再開口圧力を得るためには各拘束圧条件下で3回程度の載荷を行う必要がある。

(3) 試験時に計測した圧力-時間曲線の再開口圧力と理論式から求めた再開口圧力との相関図から、理論値が $150\text{kgf/cm}^2$ 以下の場合には実験値と理論値の間には線形な関係があるように思われるが、プロットできる点が少ないため、実験値と理論値の正確な関係が判断できなかった。

(4) 載荷試験時に計測したAEは、圧力の昇降時に亀裂の挙動をとらえているものと思われたが、亀裂発生、亀裂閉口および再開口時のAE特性をとらえるまでには至らなかった。

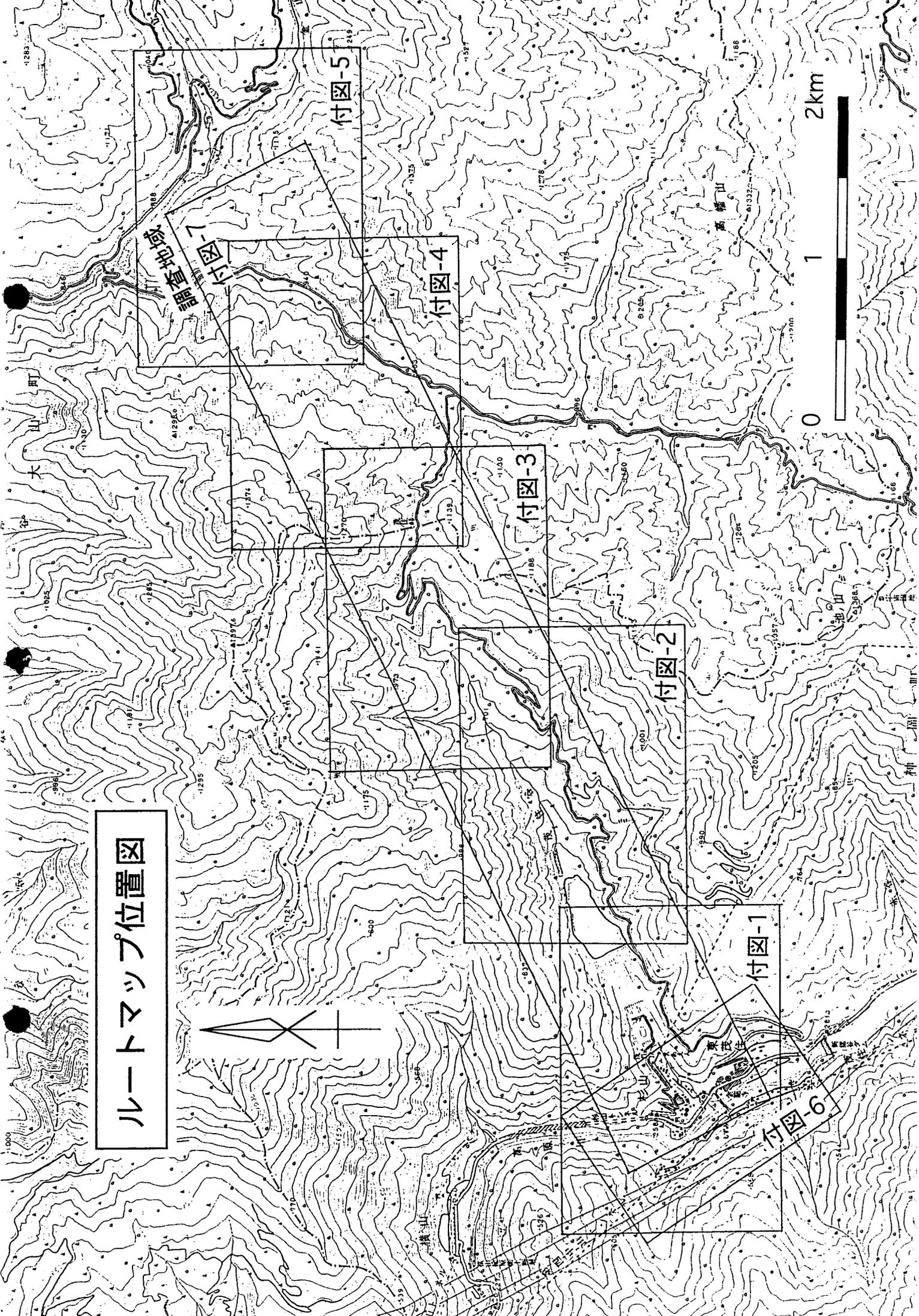
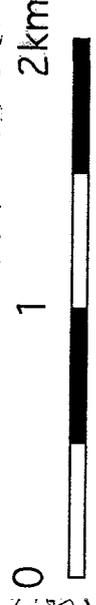
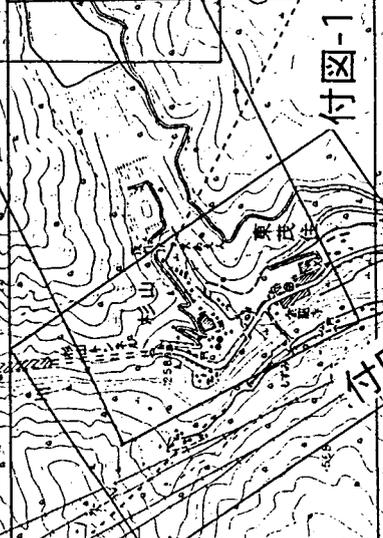
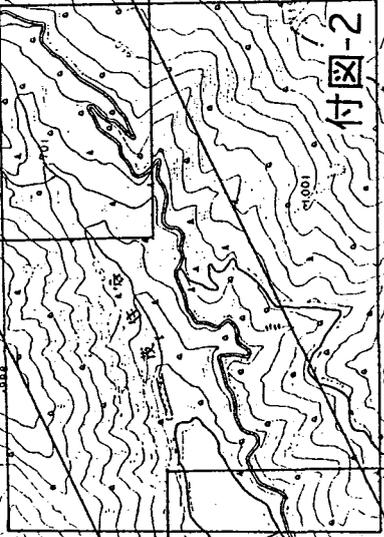
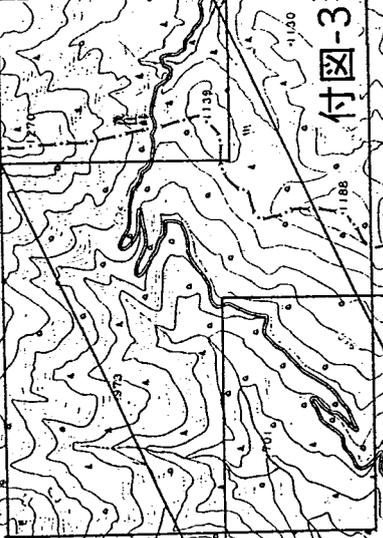
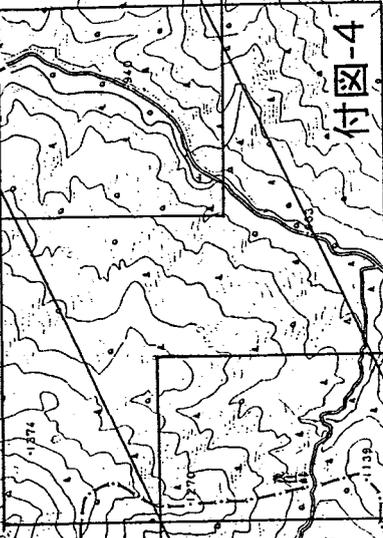
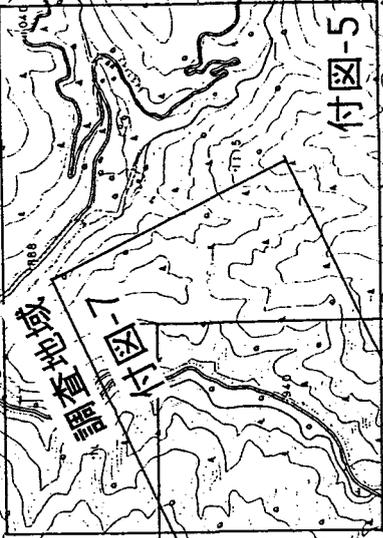
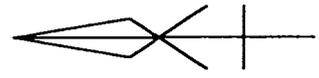
(5) 鋼管内の載荷試験から、鋼管の外周で観測されるひずみは亀裂を発生させようとする方向で最も小さく観測された。この結果は、鋼管内周境界に流体圧とせん断応力を同時に載荷するモデルを用いて表現することができた。

以上のことから、さらに精度の良い測定をするには、まず供試体の個数を増やす必要があると思われる。これは、特に理論値が大きくなる拘束圧条件下で亀裂開口圧力の理論値と実験値との関係を求めると同時に、AEを計測回数を増やすことによって、ノイズによるAEと亀裂の挙動によるAEの区別を付けることが可能になると思われるためである。また、これと並行して解析も亀裂を含んだ現実に近いモデルを作成し、載荷圧-変位曲線を再現させることが、試験から得られる載荷圧-変位曲線から再開口圧を読みとる上で非常に重要であると考えられる。

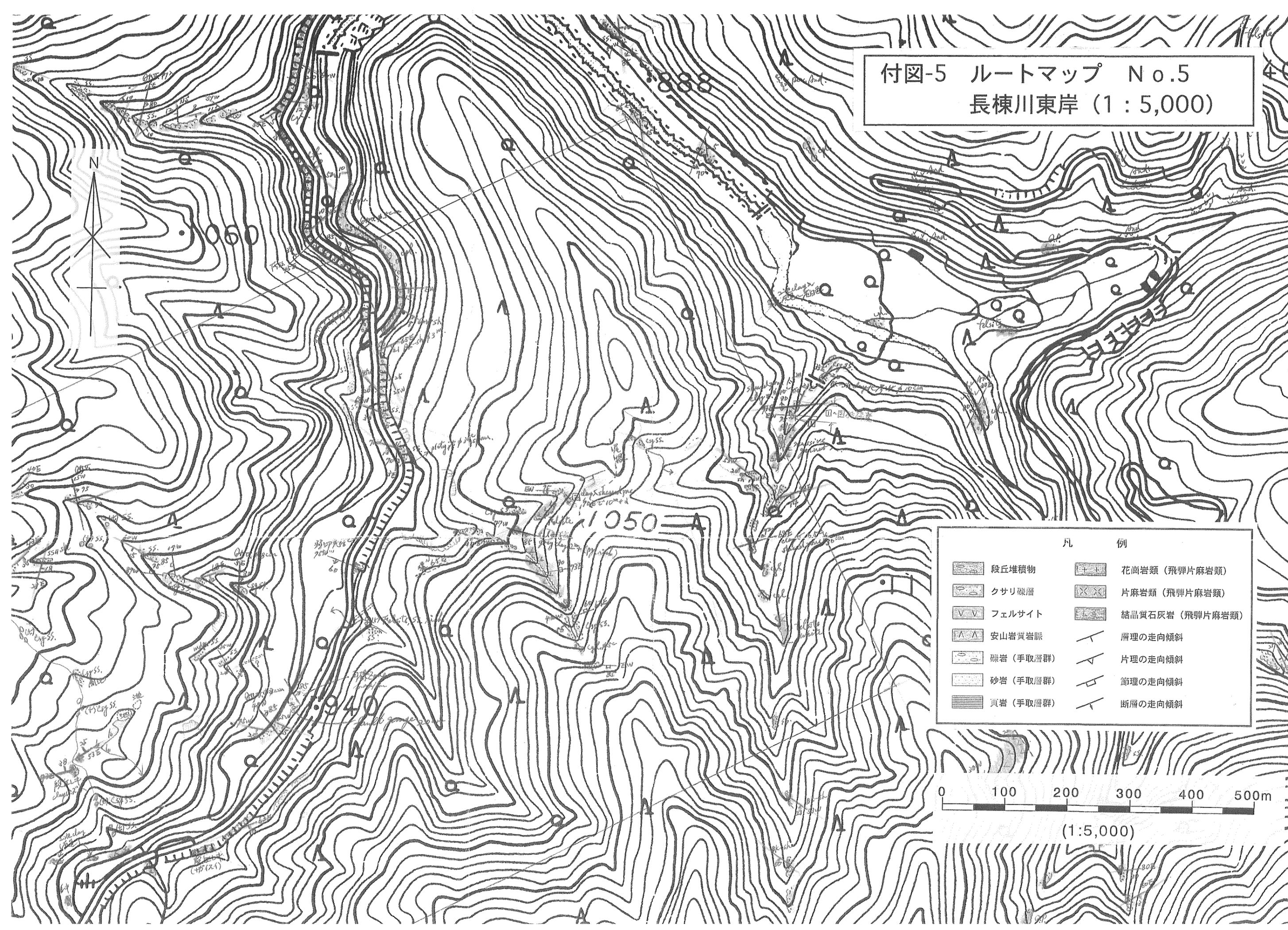
## 巻末資料一覧

- 付図-1 ルートマップ No. 1 高原川 (1 : 5, 000)
- 付図-2 ルートマップ No. 2 茂住谷 (1 : 5, 000)
- 付図-3 ルートマップ No. 3 茂住峠 (1 : 5, 000)
- 付図-4 ルートマップ No. 4 長棟川西岸 (1 : 5, 000)
- 付図-5 ルートマップ No. 5 長棟川東岸 (1 : 5, 000)
- 付図-6 ルートマップ No. 6 高原川 (1 : 2, 500)
- 付図-7 ルートマップ 高原川～広川 (1:10, 000)
- 付図-8 地表地質図 (1:20, 000)
- 付図-9 -500m 準 (海拔 350m) 地質平面図 (1:20, 000)
- 付図-10 地質断面図 (1:20, 000)
- 付図-11 載荷圧と AE の発生数との関係 (試験 1-15T1)
- 付図-12 載荷圧と AE の発生数との関係 (試験 1-15T2)
- 付図-13 載荷圧と AE の発生数との関係 (試験 1-80T1)
- 付図-14 載荷圧と AE の発生数との関係 (試験 1-80T2)

# ルートマップ位置図



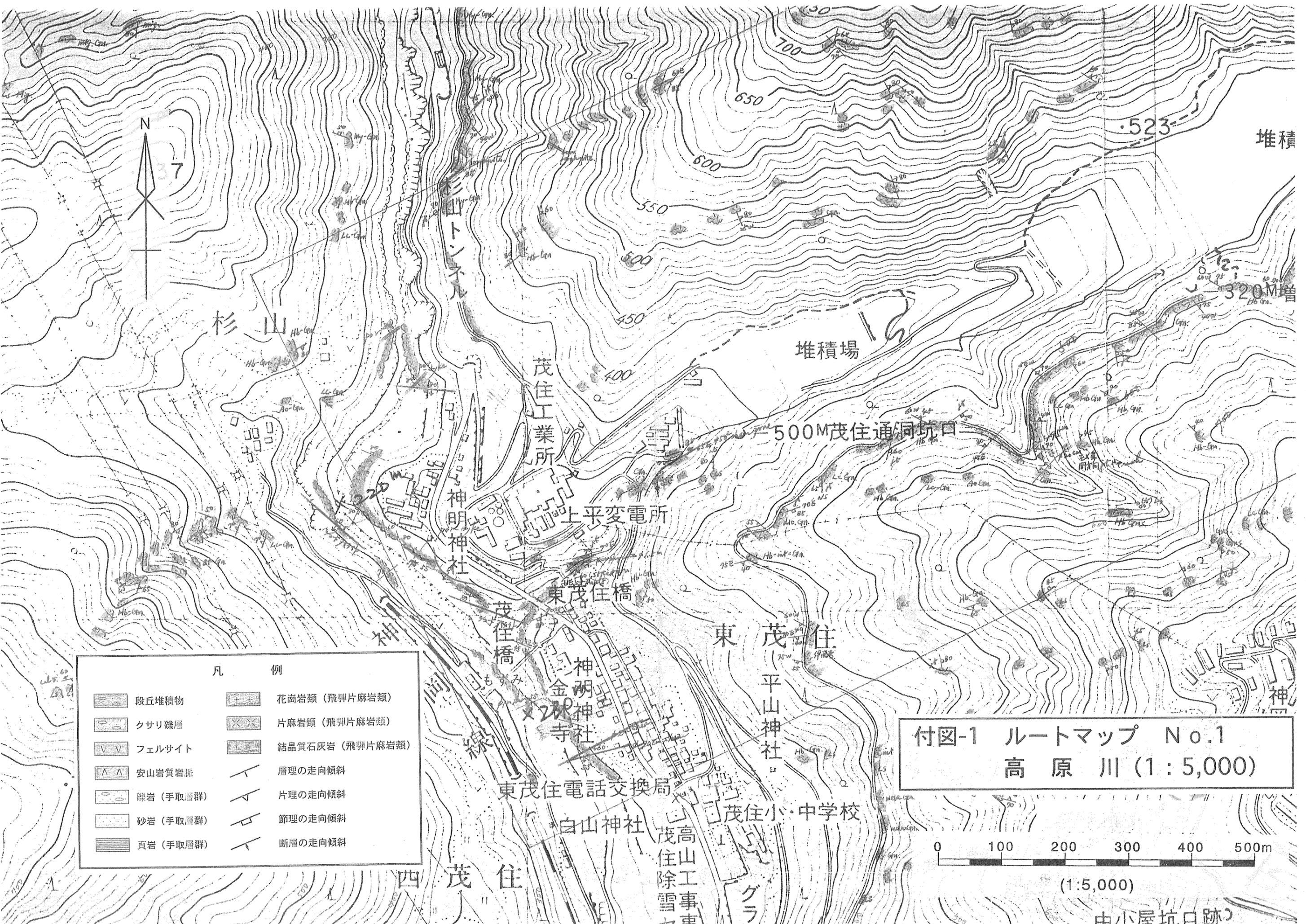
付図-5 ルートマップ No.5  
長棟川東岸 (1:5,000)



凡 例	

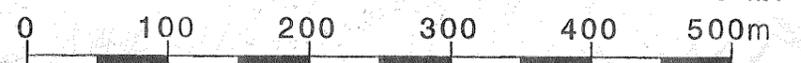
0 100 200 300 400 500m

(1:5,000)



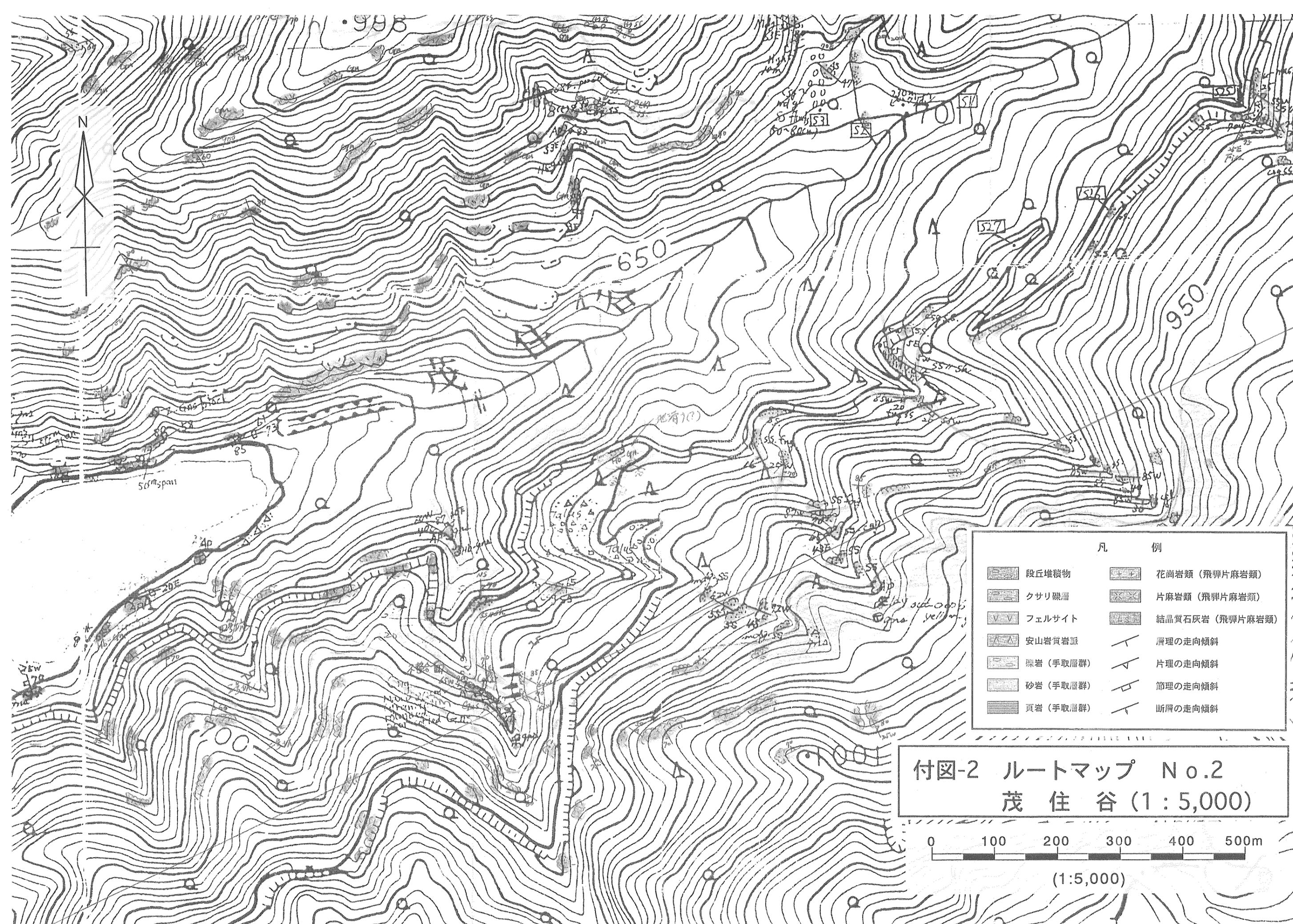
凡 例	
	段丘堆積物
	クサリ礫層
	フェルサイト
	安山岩質岩脈
	礫岩 (手取層群)
	砂岩 (手取層群)
	頁岩 (手取層群)
	花崗岩類 (飛騨片麻岩類)
	片麻岩類 (飛騨片麻岩類)
	結晶質石灰岩 (飛騨片麻岩類)
	層理の走向傾斜
	片理の走向傾斜
	節理の走向傾斜
	断層の走向傾斜

付図-1 ルートマップ No.1  
高原川 (1:5,000)

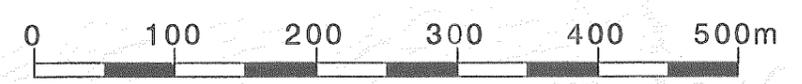


(1:5,000)

中小屋坑口跡

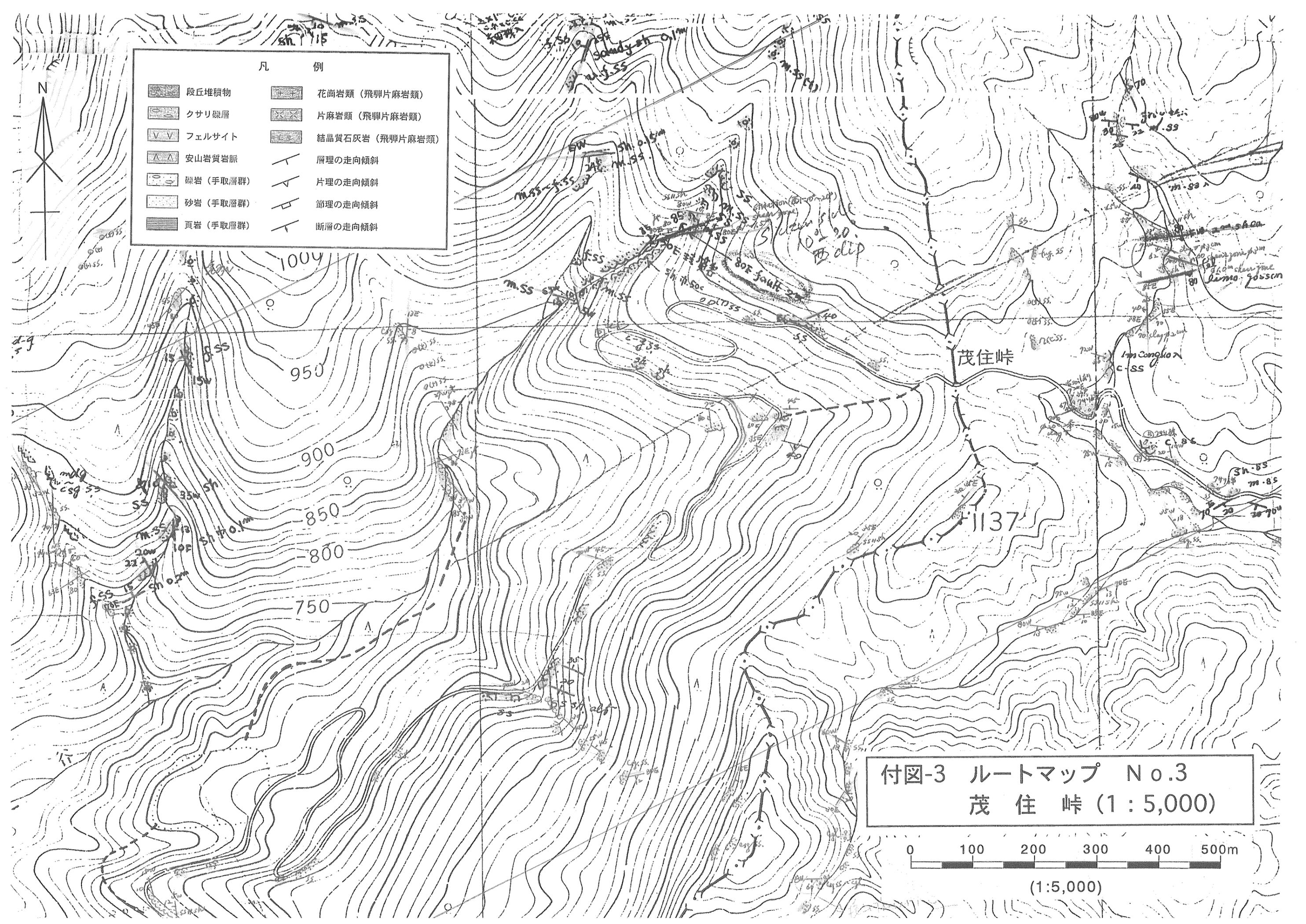


付図-2 ルートマップ No.2  
茂住谷 (1:5,000)

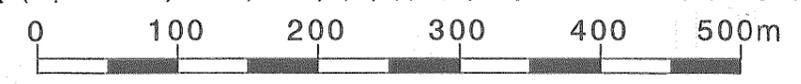


(1:5,000)

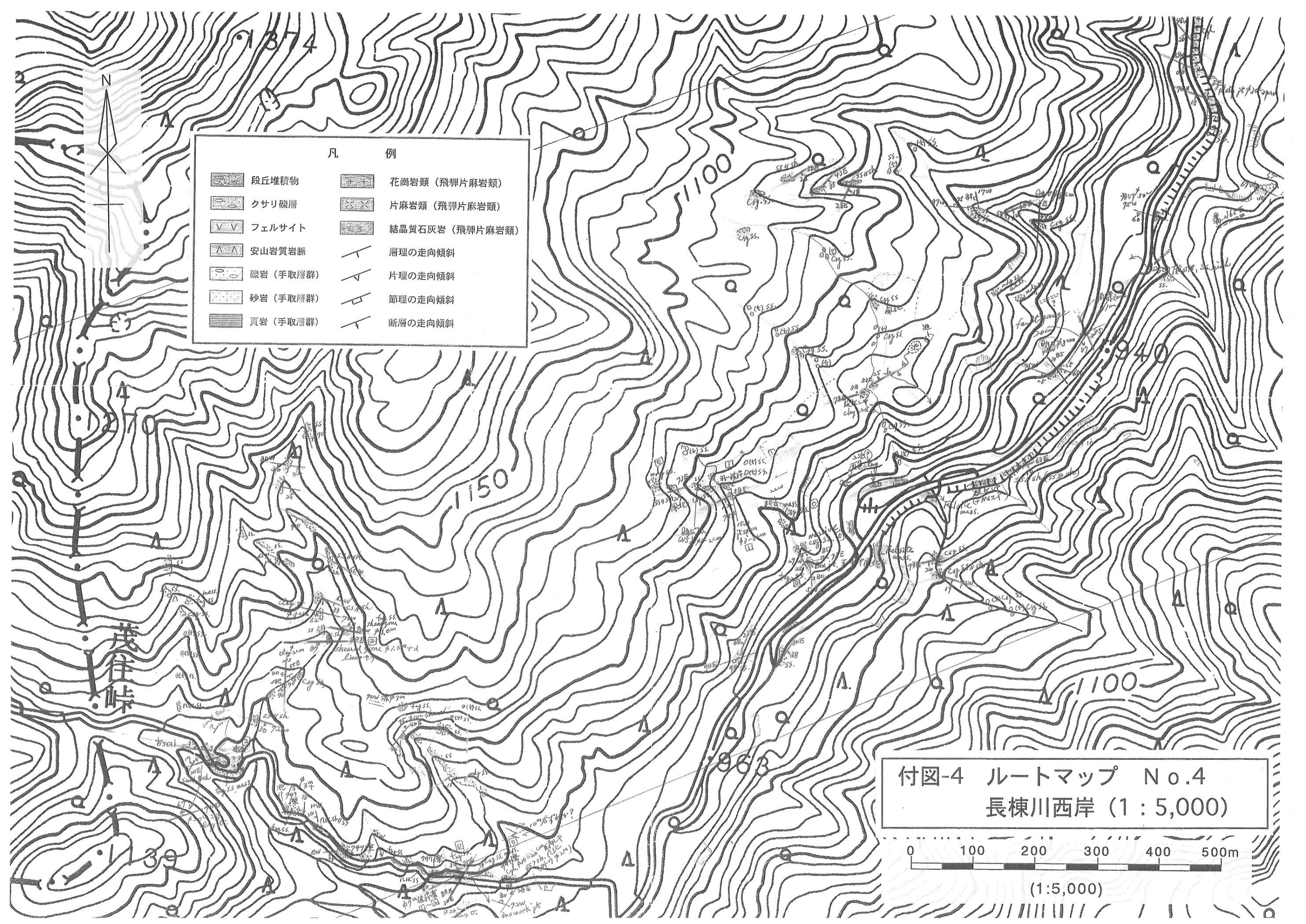
凡 例			
	段丘堆積物		花崗岩類 (飛驒片麻岩類)
	クサリ礫層		片麻岩類 (飛驒片麻岩類)
	フェルサイト		結晶質石灰岩 (飛驒片麻岩類)
	安山岩質岩脈		層理の走向傾斜
	礫岩 (手取層群)		片理の走向傾斜
	砂岩 (手取層群)		節理の走向傾斜
	頁岩 (手取層群)		断層の走向傾斜



付図-3 ルートマップ No.3  
茂住峠 (1:5,000)



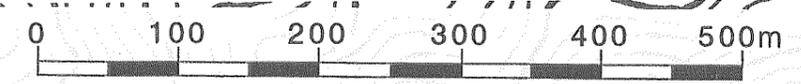
(1:5,000)



凡 例

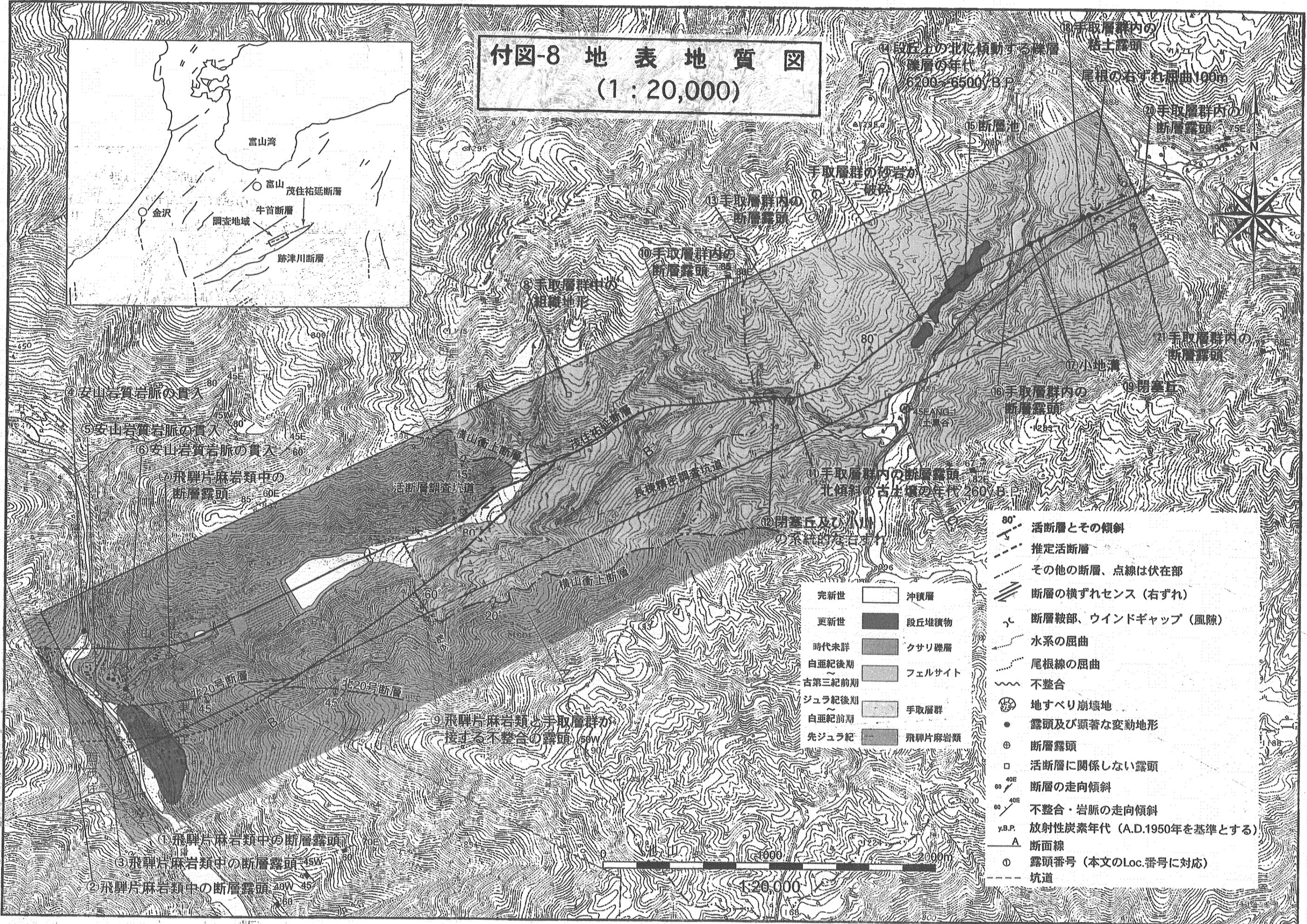
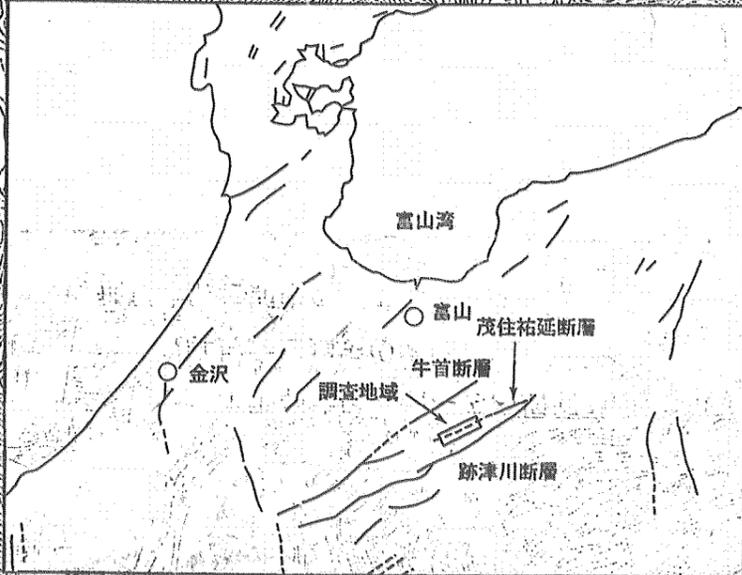
	段丘堆積物		花崗岩類 (飛驒片麻岩類)
	クサリ礫層		片麻岩類 (飛驒片麻岩類)
	フェルサイト		結晶質石灰岩 (飛驒片麻岩類)
	安山岩質岩脈		層理の走向傾斜
	礫岩 (手取層群)		片理の走向傾斜
	砂岩 (手取層群)		節理の走向傾斜
	頁岩 (手取層群)		断層の走向傾斜

付図-4 ルートマップ No.4  
長棟川西岸 (1:5,000)



(1:5,000)

付図-8 地表地質図  
(1 : 20,000)

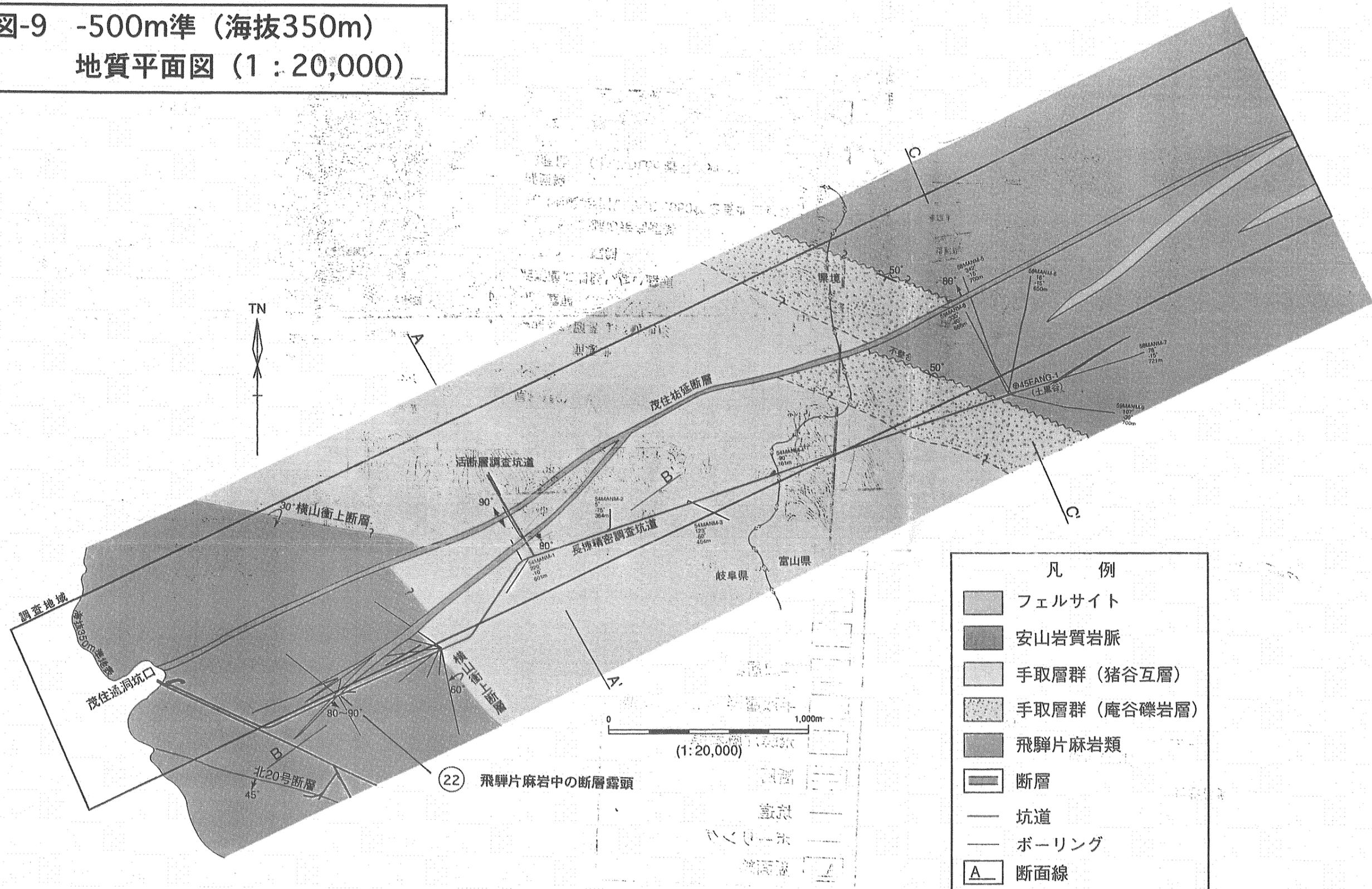


完新世	沖積層
更新世	段丘堆積物
時代未詳	クサリ礫層
白亜紀後期	フェルサイト
古第三紀前期	手取層群
ジュラ紀後期	
白亜紀前期	
先ジュラ紀	飛騨片麻岩類

- 80° 活断層とその傾斜
- 推定活断層
- その他の断層、点線は伏在部
- 断層の横ずれセンス (右ずれ)
- 断層鞍部、ウインドギャップ (風隙)
- 水系の屈曲
- 尾根線の屈曲
- 不整合
- 地すべり崩壊地
- 露頭及び顕著な変動地形
- 断層露頭
- 活断層に関係しない露頭
- 断層の走向傾斜
- 不整合・岩脈の走向傾斜
- y.B.P. 放射性炭素年代 (A.D.1950年を基準とする)
- 断面線
- 露頭番号 (本文のLoc.番号に対応)
- 坑道



付図-9 -500m準 (海拔350m)  
地質平面図 (1 : 20,000)

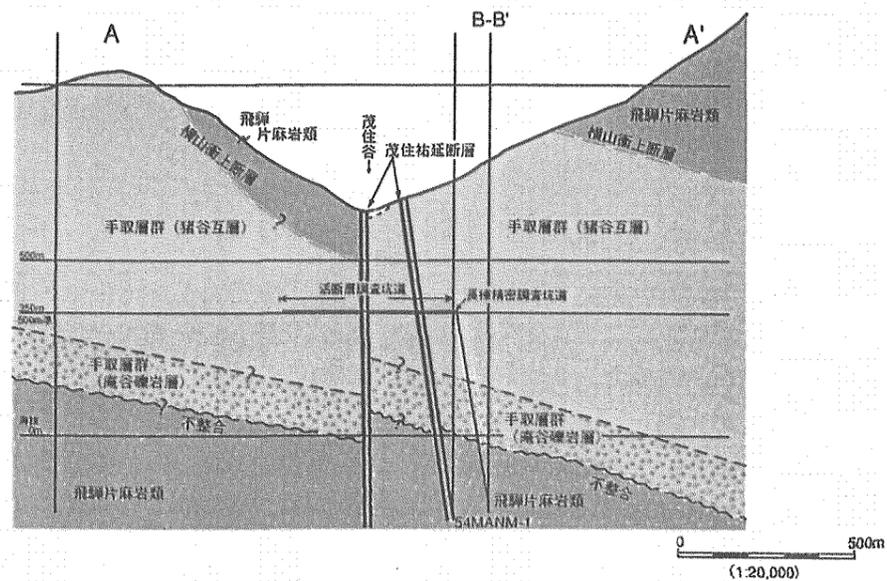


- 凡 例
- フェルサイト
  - 安山岩質岩脈
  - 手取層群 (猪谷互層)
  - 手取層群 (庵谷礫岩層)
  - 飛驒片麻岩類
  - 断層
  - 坑道
  - ボーリング
  - 断面線

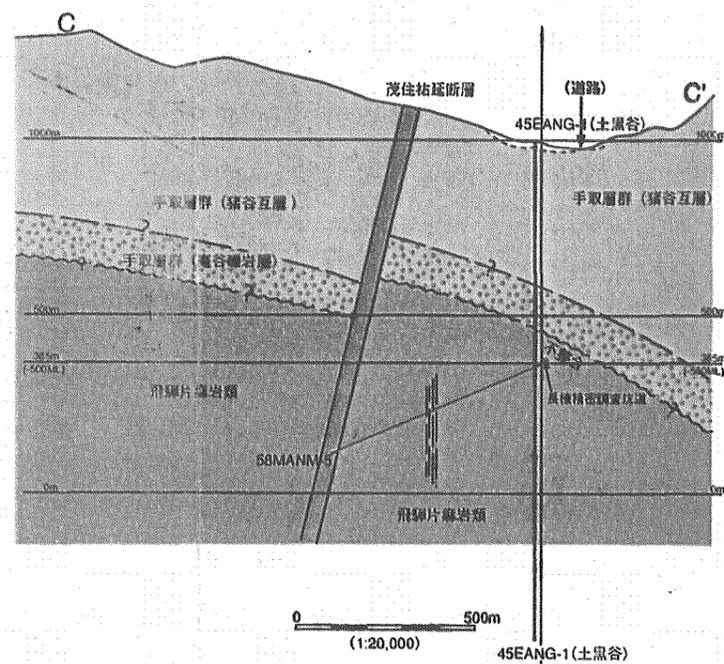
(22) 飛驒片麻岩中の断層露頭

# 付図-10 地質断面図 (1 : 20,000)

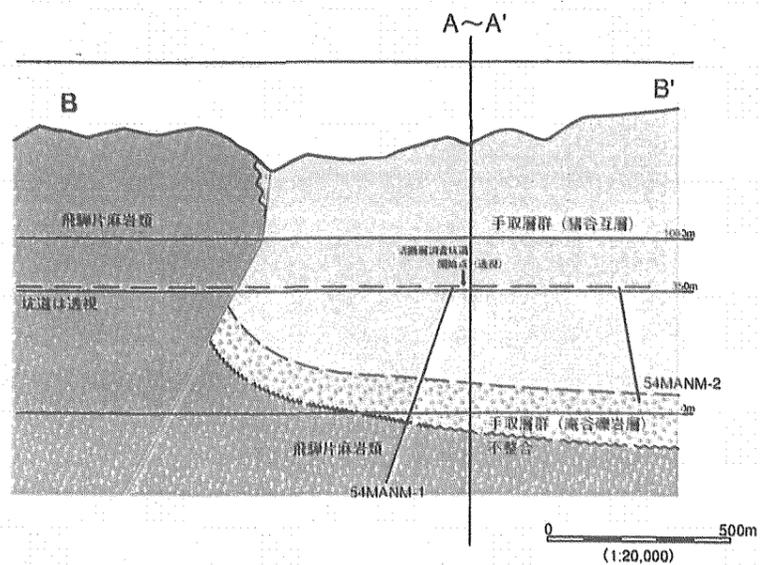
地質断面図(A-A')



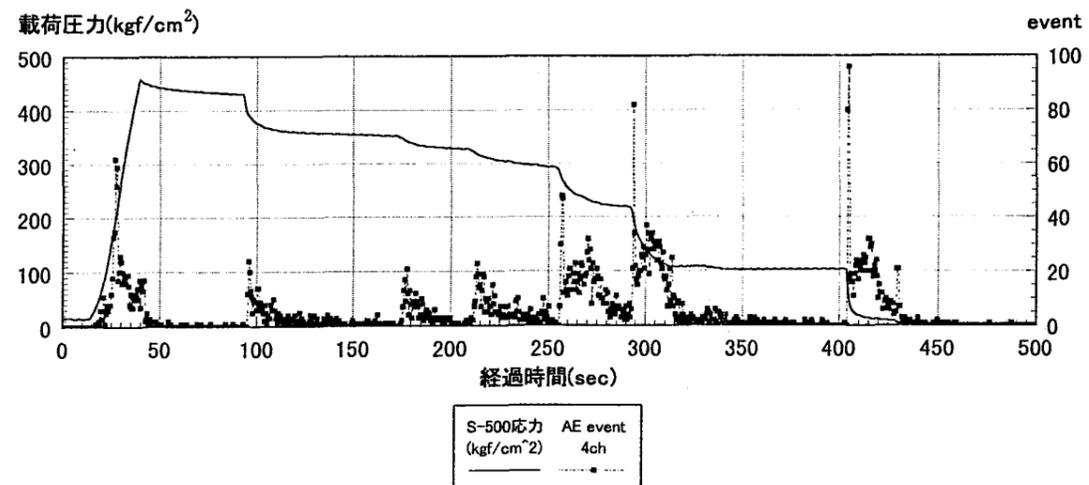
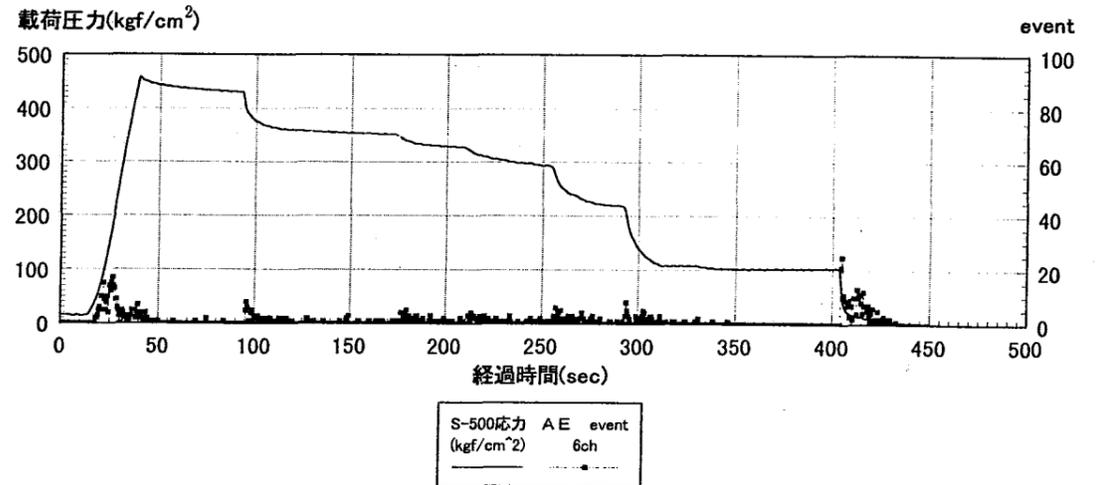
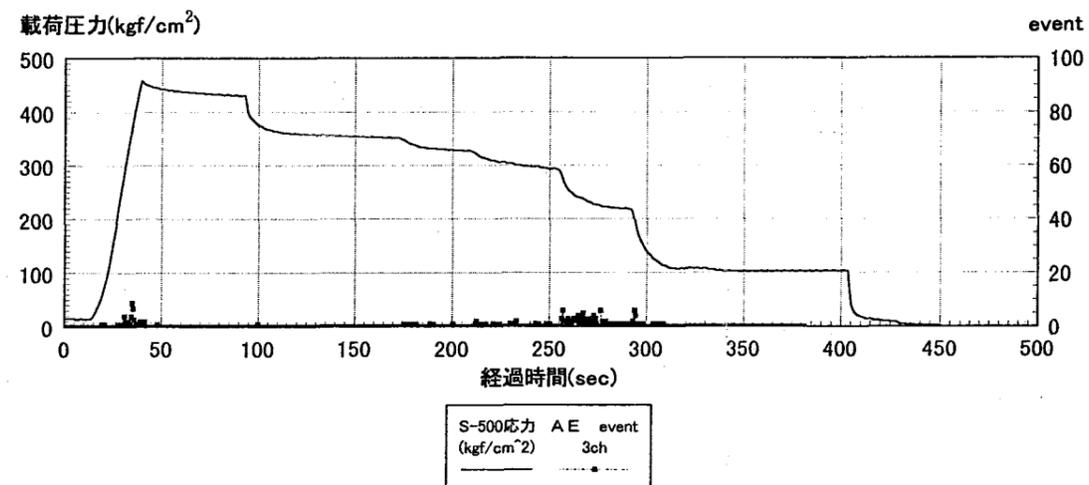
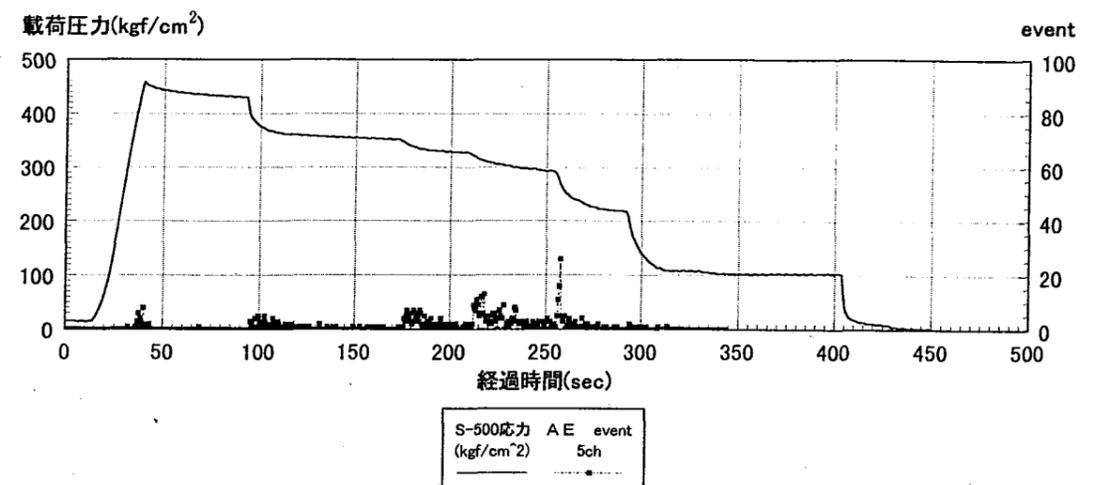
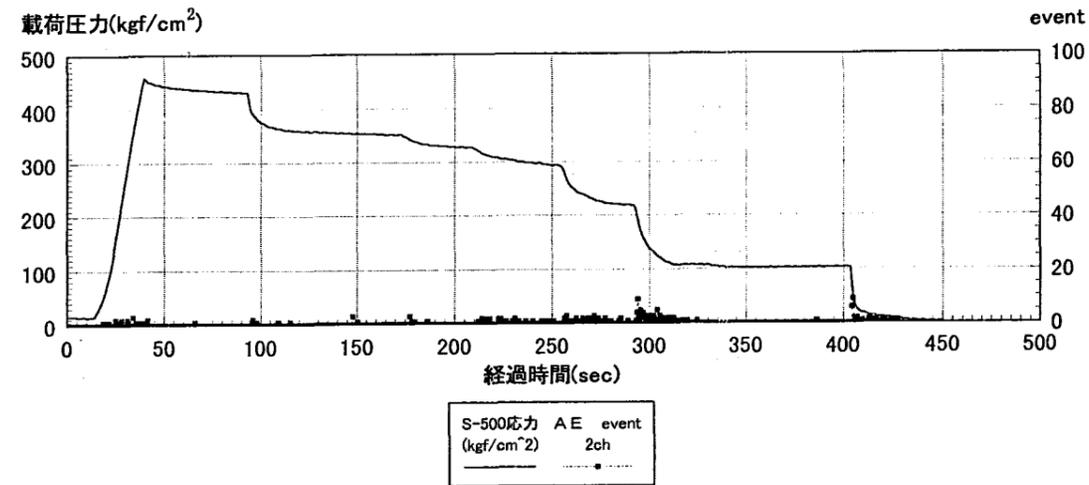
地質断面図(C-C')



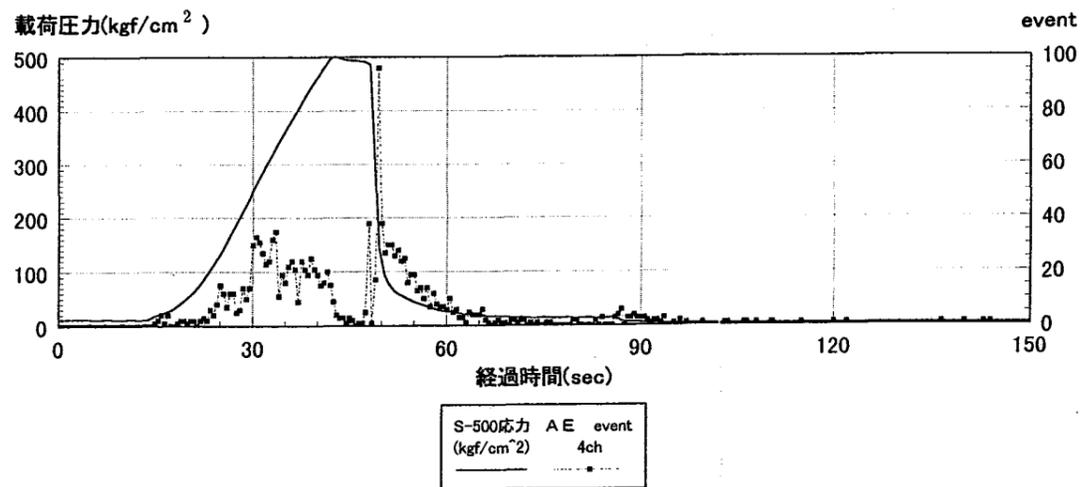
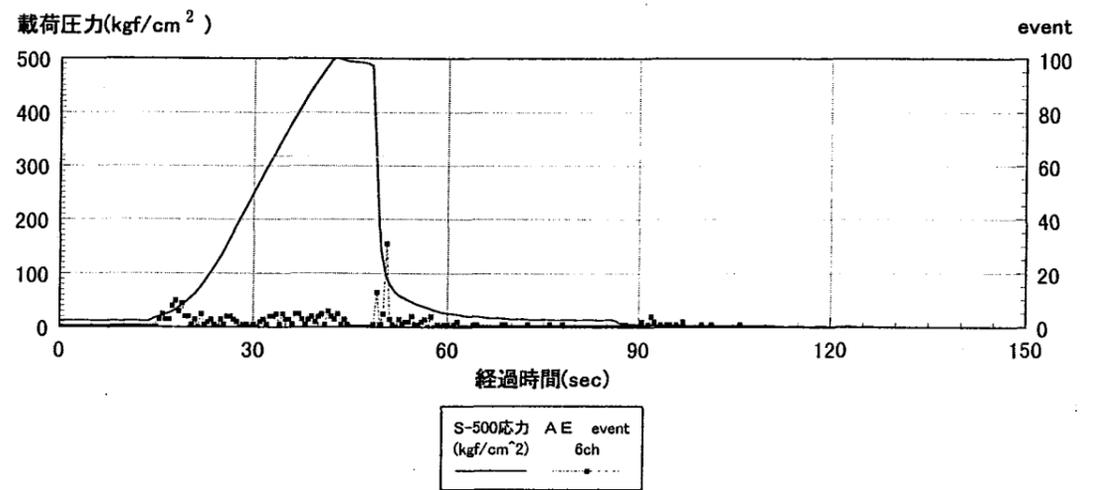
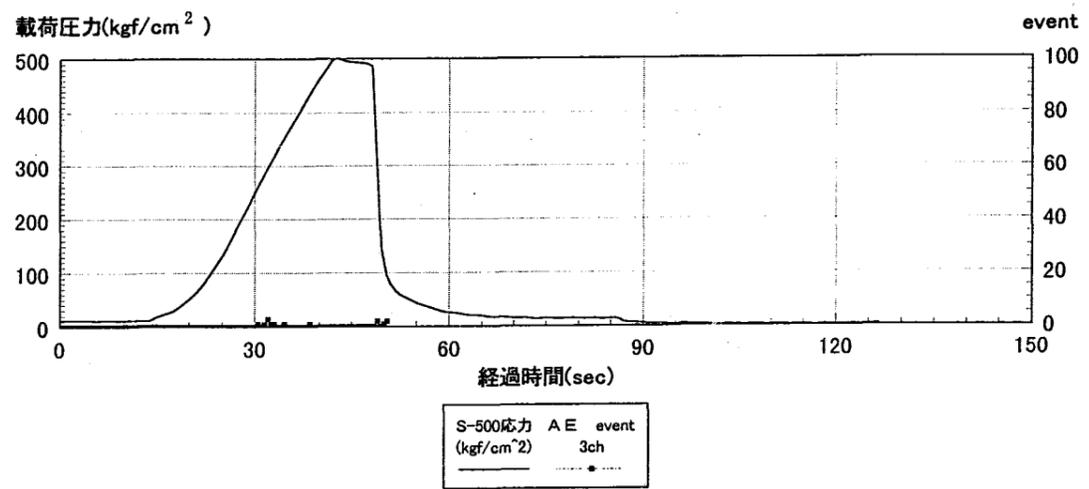
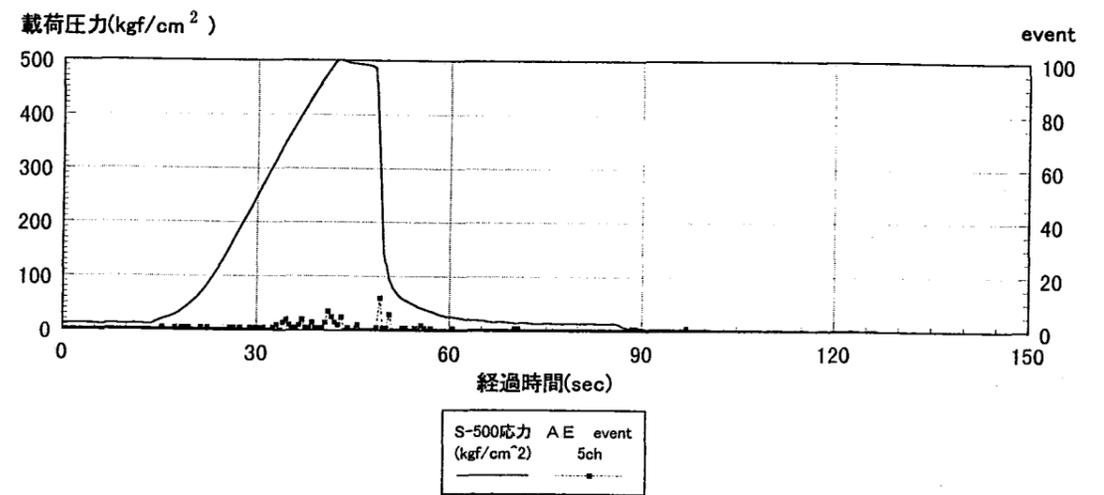
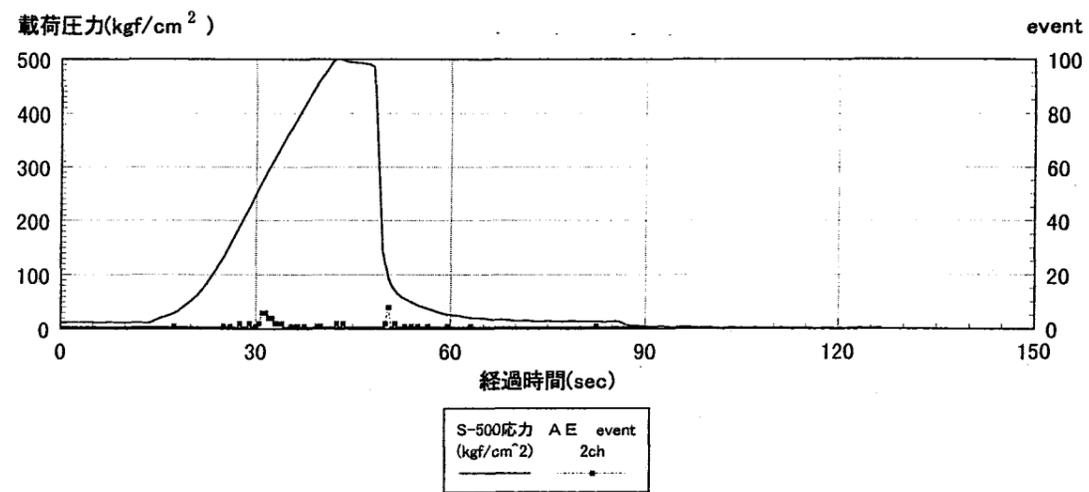
地質断面図(B-B')



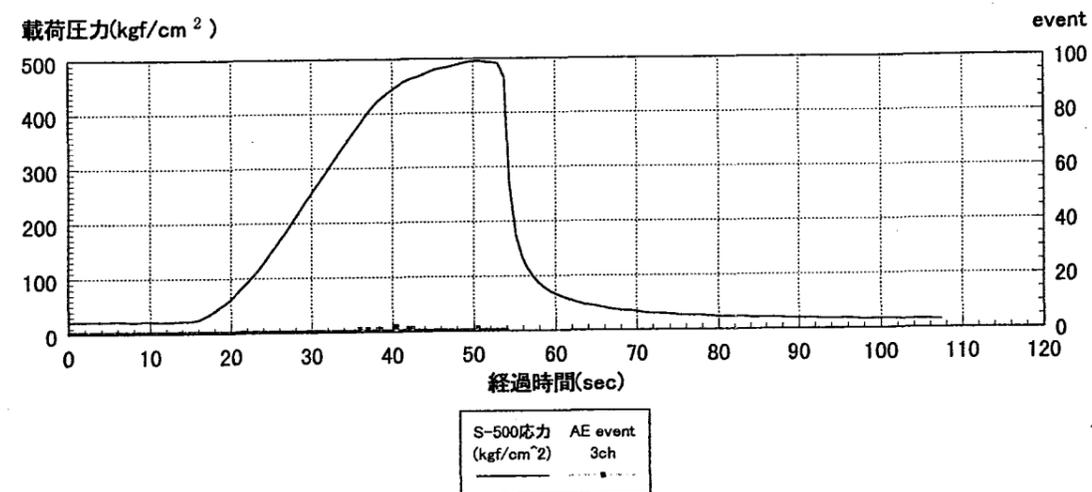
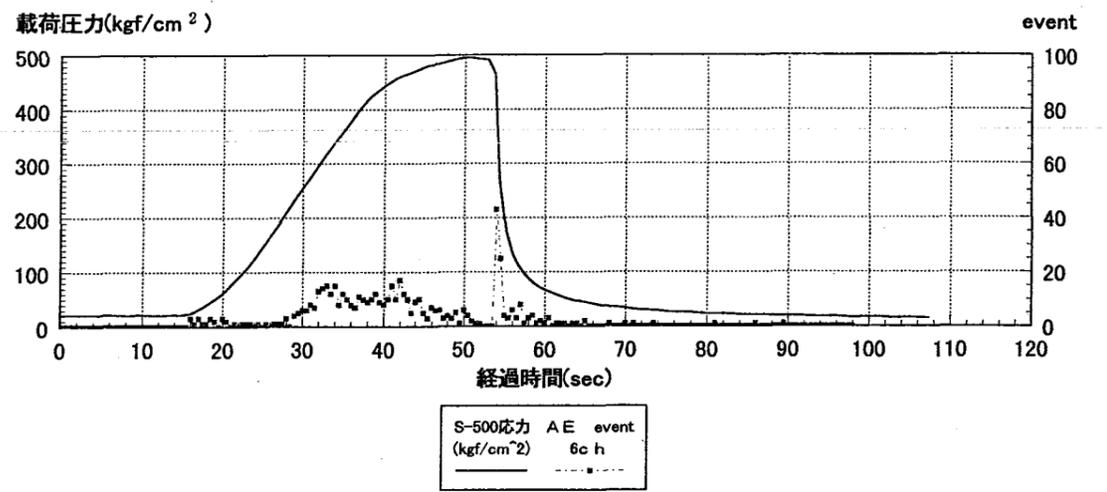
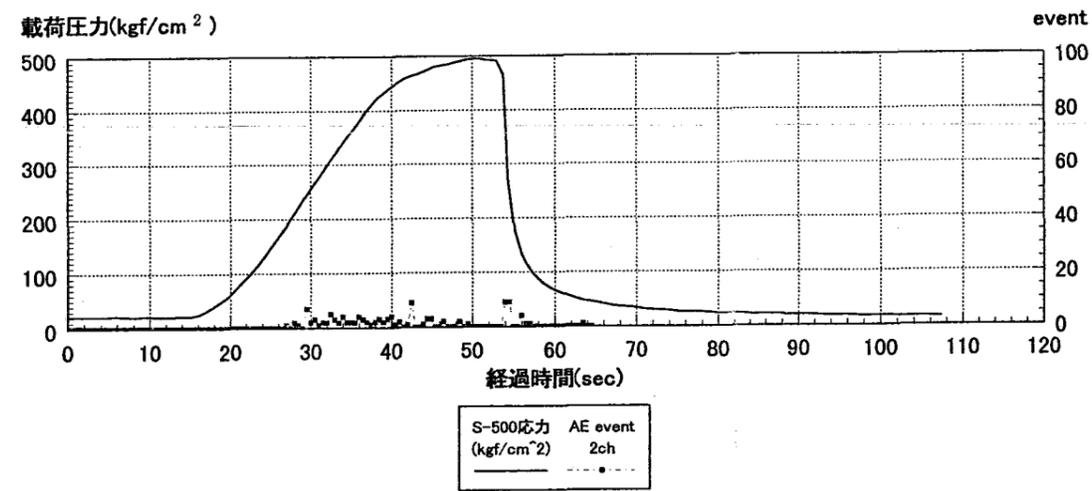
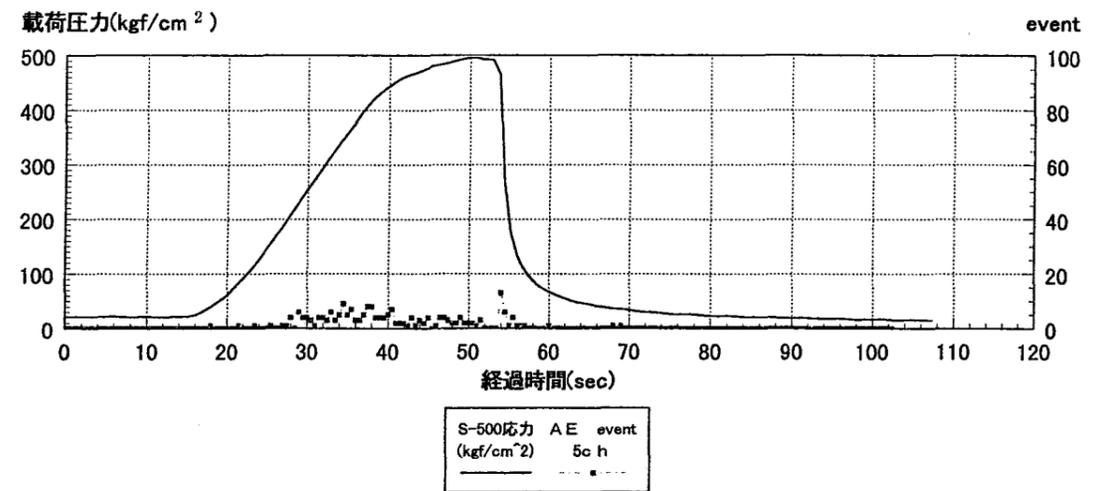
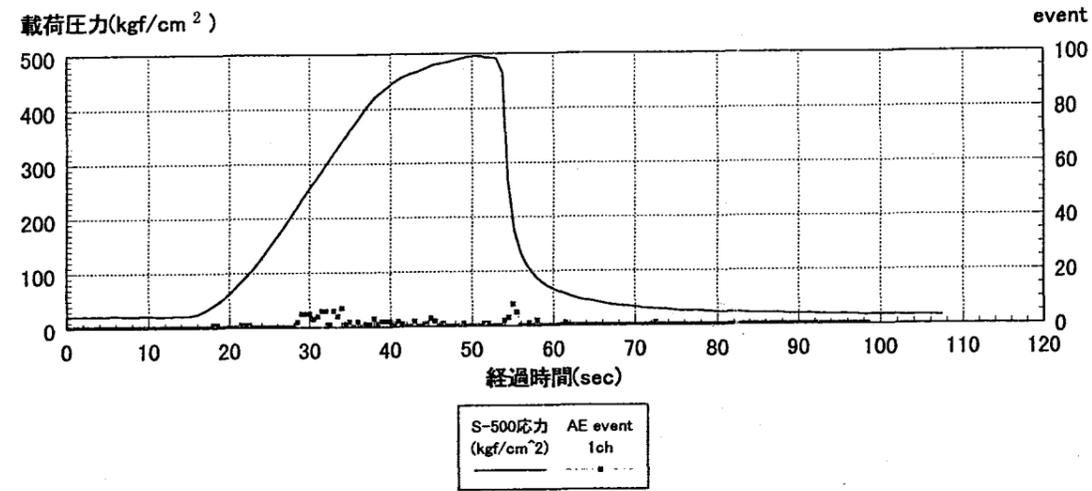
凡例	
	沖積層
	フェルサイト
	安山岩質岩脈
	手取層群 (猪谷互層)
	手取層群 (庵谷礫岩層)
	飛騨片麻岩類
	断層
	坑道
	ボーリング



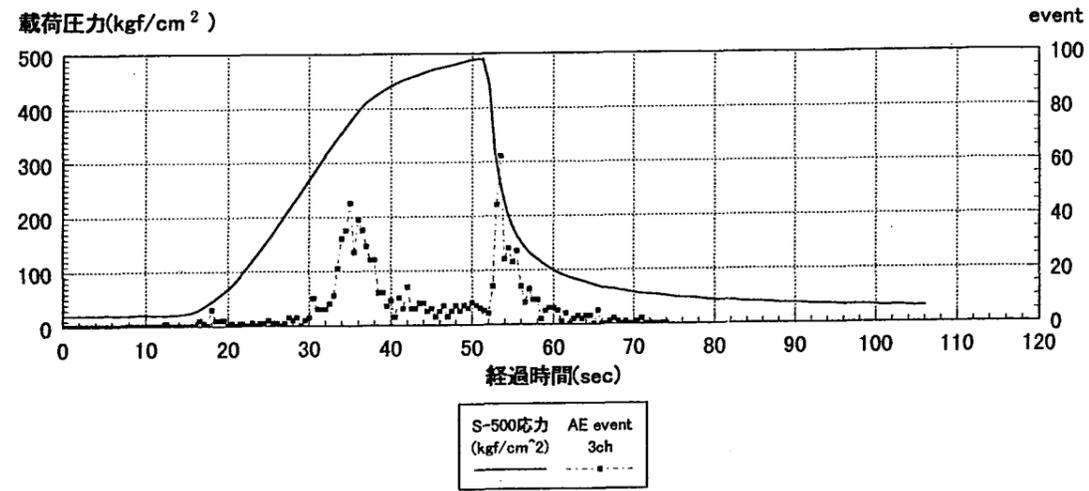
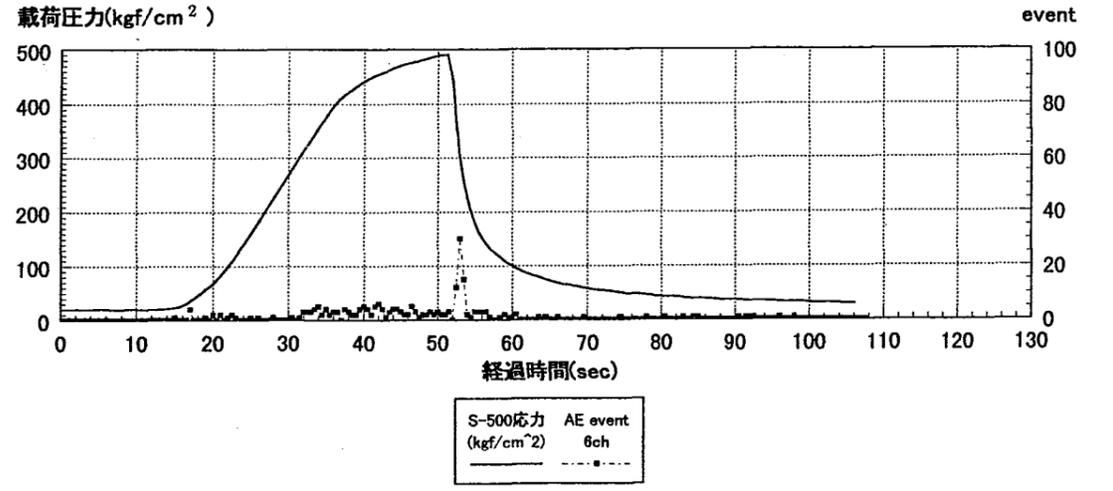
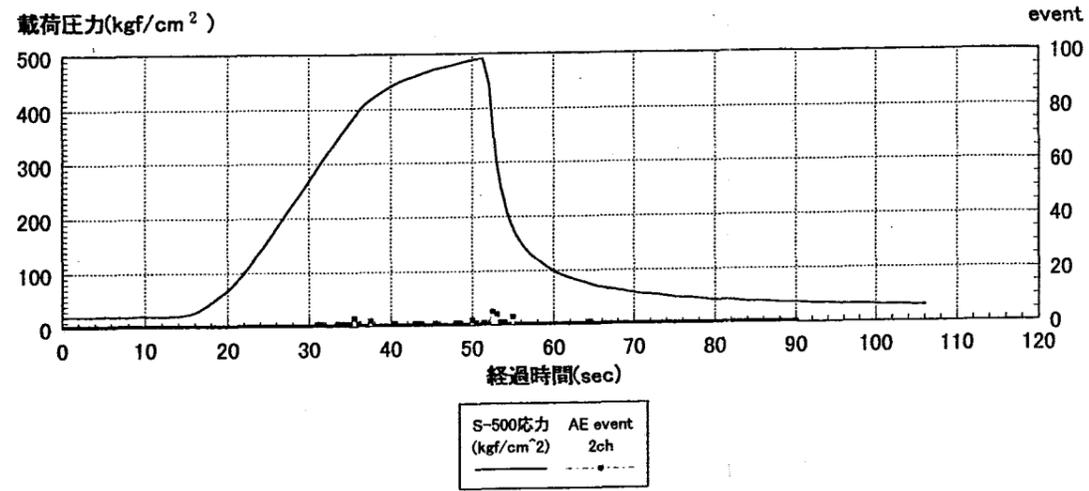
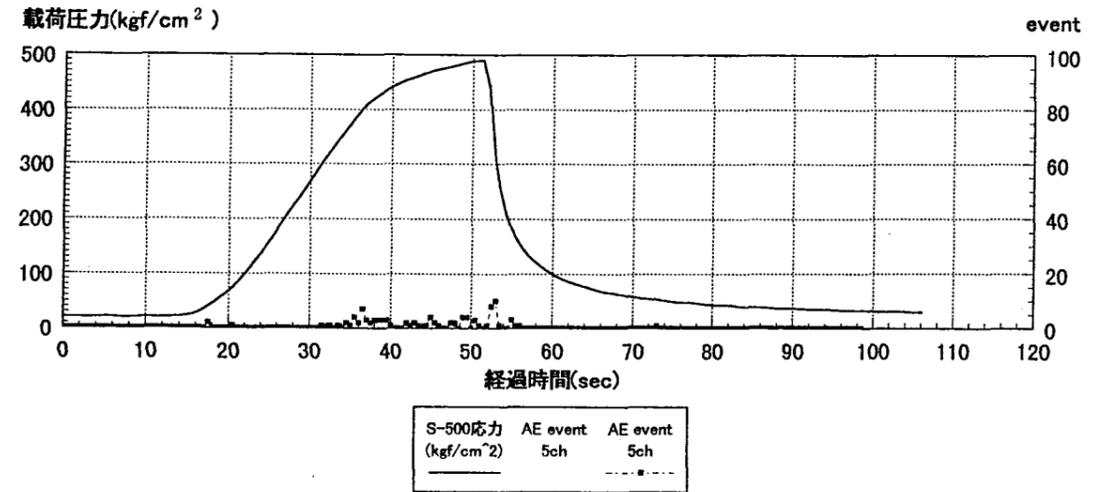
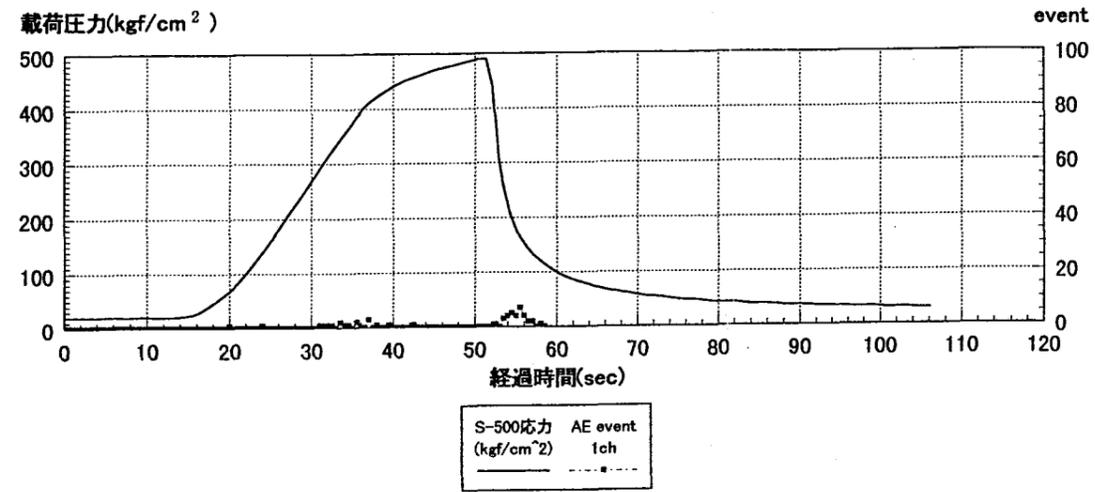
付図-11 載荷圧と AE の発生数との関係 (試験 1-15T1)



付図-12 載荷圧と AE の発生数との関係 (試験 1-15T2)



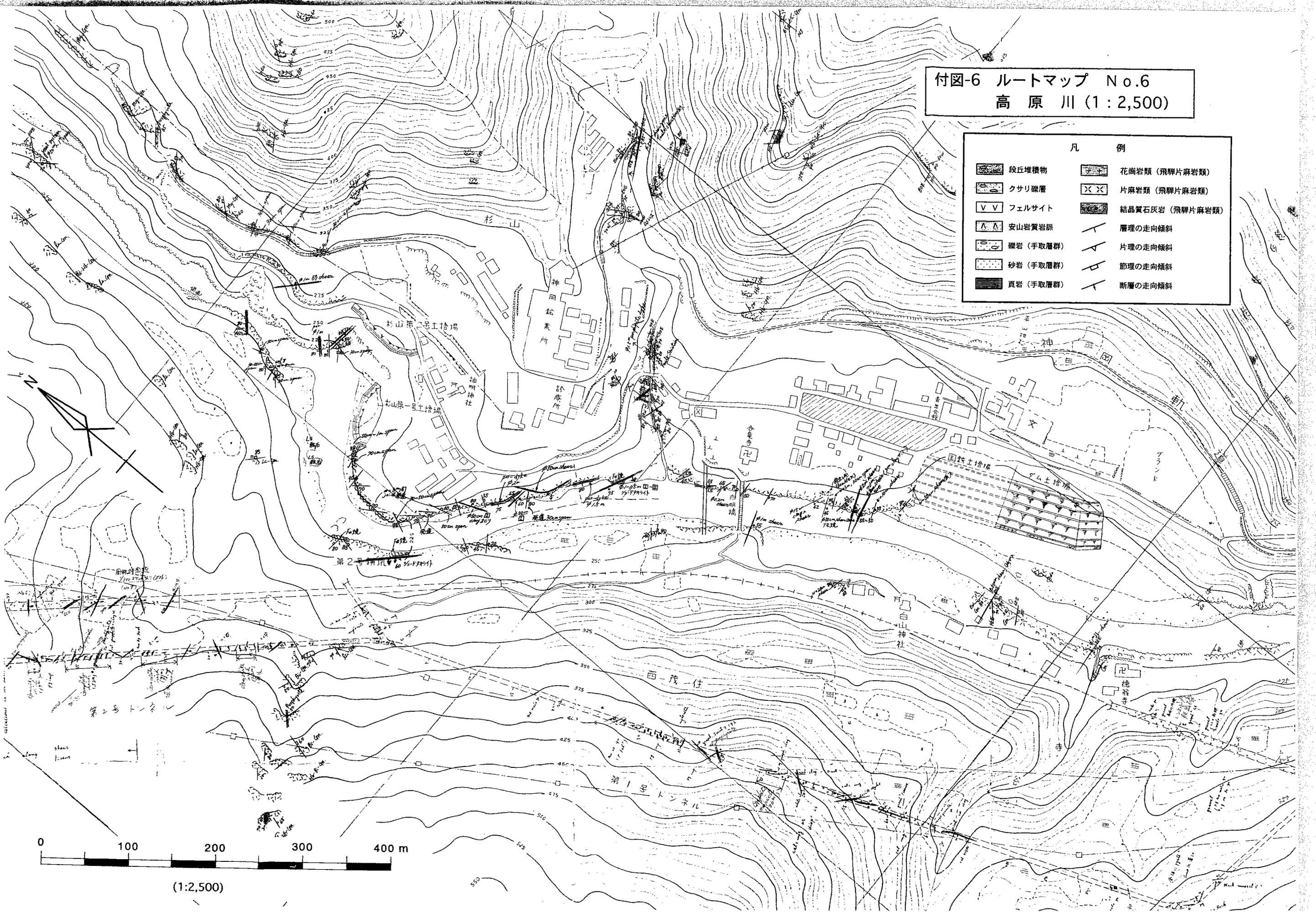
付図-13 載荷圧と AE の発生数との関係 (試験 1-80T1)



付図-14 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験 1-80T2)

付図-6 ルートマップ No.6  
高原川 (1:2,500)

凡 例			
	段丘堆積物		花崗岩類 (飛驒片麻岩類)
	クサリ礫層		片麻岩類 (飛驒片麻岩類)
	フェルサイト		結晶質石灰岩 (飛驒片麻岩類)
	安山岩貫岩脈		層理の走向傾斜
	礫岩 (手取層群)		片理の走向傾斜
	砂岩 (手取層群)		節理の走向傾斜
	頁岩 (手取層群)		断層の走向傾斜



0 100 200 300 400 m

(1:2,500)

