

A Eによる斜面動態計測システムに関する 共同研究報告書

平成11年6月

建設省土木研究所

砂防部急傾斜地崩壊研究室

(財) 砂防・地すべり技術センター

(株) エヌエフ回路設計ブロック

川崎地質 (株)

(株) 興和

佐藤工業 (株)

飛島建設 (株)

西松建設 (株)

日本工営 (株)

日本フィジカルアコースティクス (株)

(株) 間組

(株) フジタ

Copyright © (1999)by P.W.R.I

All rights reserved. No Part of this book may be reproduced any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

AEによる斜面動態計測システムに関する共同研究報告書

建設省土木研究所

砂防部急傾斜地崩壊研究室 室長 門間 敬一
主任研究員 笹原 克夫*
研究員 海老原和重**

(財)砂防・地すべり技術センター

斜面保全部 部長 藤田 壽雄
砂防技術研究所 所長 瀬尾 克美
次長 阿部 宗平
技師 嶋 大尚

(株)エヌエフ回路設計ブロック

エイシス事業部 副部長 清水 勇芳
技師 本郷 仁啓
技師 金本 淑夫

川崎地質(株)

技術本部技術管理部 部長 中田 文雄
技術本部地質技術開発部 課長代理 樽原 信夫
関東支社 技術部 課長 結城 則行
技術本部システム解析技術部 主任 田澤 教

(株)興和

調査部 部長 南雲 政博
企画開発部 課長 佐藤 朗
工事部 課長 笹川 考義
調査部 課長 那須野郁夫
課長 小林 雄三

佐藤工業(株)

中央技術研究所土木研究部門 解析グループ長 福島 晴夫
解析グループ研究員 規矩 大義
構造グループ長 伊藤 良浩
土質グループ主任研究員 上澤 充

飛島建設(株)

技術研究所 地盤耐震研究室 室長 三輪 滋
主任 塩谷 智基

西松建設(株)

技術研究所 技術部土木技術課 課長 稲葉 力
課長 木村 哲
係長 石山 宏二
研究部 地質研究課 諸岡 敬太
山下 雅之

日本工営(株)

中央研究所 開発研究部 部長 太田 資郎
藤原 鉄朗
松山 公年
金本 康宏
総合技術本部情報システム部 部長 石橋 晃睦

日本フィジカルアコースティクス(株)

代表取締役 湯山 茂徳
エンジニアリングマネージャー 田中 一夫

(株)間組

技術研究所技術研究部土木研究室 主席研究員 吉村 和彦
主任研究員 蓮井 昭則
土木本部 トンネル統括部 課長 笠 博義
前田 信行

フジタ(株)

フジタ技術研究所土木研究部 主任研究員 秩父 顕美
フジタ土木本部生産技術部 宇田川義夫

要 旨

自然斜面の異常変動を早く時期にとらえ、かつ崩壊・規模等の予測手法として、現地観測に適したAE計測技術開発を目的として行った。岩盤斜面、土砂斜面におけるAEセンサーの反応と斜面動態との関係を検討し、AEセンサーの特性を明らかにした。

キーワード：AE計測、斜面動態特性

(* : 現、砂防研究室)

(** : 現、建設省利根川水系砂防工事事務所)

AE による斜面動態計測システムに関する共同研究

最終報告書 目次

1. 背景と目的	1
2. 研究経緯	2
2.1 平成7年度実施内容	2
2.2 平成8年度実施内容	2
2.3 平成9年度実施内容	5
2.4 平成10年度実施内容	5
3. AE法による斜面動態計測に関する既存の計測方法および評価方法の整理	6
3.1 AE計測方法について	6
3.1.1 センサの種類	6
3.1.2 センサの設置方法	7
3.2 AE計測データの評価方法について	9
3.2.1 AEパラメータの選定	9
3.2.2 AE信号の分類手法および評価指標の検討	10
3.2.3 位置標定手法の検討	10
3.2.4 崩壊ステージの判定基準の検討	10
3.2.5 崩壊の発生予知（時刻、規模、要因）手法の検討	10
4. 土砂斜面における現地実証試験	13
4.1 木更津における実験	13
4.1.1 実験概要	13
4.1.2 計測結果	32
4.1.3 計測データの評価	57
4.1.4 まとめ	62
4.2 しらすにおける実験	63
4.2.1 実験概要	63
4.2.2 計測結果	71
4.2.3 計測データの評価	76
4.2.4 まとめ	83

5. 岩盤斜面における現地実証試験	84
5.1 実験概要	84
5.1.1 実験目的	84
5.1.2 現地概要	84
5.1.3 実験装置	89
5.1.4 動作確認試験	95
5.1.5 予備実験	96
5.2 長期計測	112
5.2.1 計測状況	112
5.2.2 AE センサの挙動	114
5.2.3 計測データの評価	120
5.3 人工崩壊実験	141
5.3.1 油圧ジャッキによる人工崩壊実験	141
5.3.2 破砕剤による人工崩壊実験	157
5.4 まとめ	167
6. 斜面崩壊モニタリングにおける AE 計測	169
6.1 AE センサおよび AE センサ設置方法	169
6.1.1 土砂斜面における適用	169
6.1.2 岩盤斜面における適用	172
6.2 AE 計測システム	179
6.2.1 システム構成	179
6.2.2 ノイズ及び電源対策	182
6.2.3 ノイズによる信号の特徴	184
6.2.4 現場計測での問題点と今後の改善策	189
6.2.5 野外計測用絶縁型 AE センサの開発	190
6.3 AE データの解析と評価	193
6.3.1 斜面変状の経時変化のモニタリング	193
6.3.2 斜面の変状位置の推定	219
6.3.3 斜面崩壊時刻の予測	224
6.4 AE 法による斜面動態計測の実用性	230
7. まとめ	234

1. 背景と目的

日本では平坦地が少なく、急な斜面の直下や直上部にも多くの人家などがあり、ひとたび斜面崩壊が発生すると多くの犠牲者を伴う場合が多い。現在の斜面崩壊発生予測システムは伸縮計や GPS など土塊の動きを観測しそのデータを解析して崩壊発生を予測するものであり、ミリメートル単位の変形の観測であるため、精度に問題があるといえる。そこで時間的余裕のもとで適切な避難が出来るようにするためには、より精度の高い斜面崩壊発生予測システムの開発が必要である。

近年、金属材料等を対象として、アコースティック・エミッション (AE: Acoustic Emission) の計測技術を用いた材料性能評価や破壊過程解析が実施されており、技術的にもめざましい発展を遂げている。また、最近では土木の分野でも利用の有効性が確認されつつある。

固体材料に力あるいは変形が与えられると、その外力による仕事はひずみエネルギーとして材料内部に蓄積される。このひずみエネルギーが限界まで蓄えられると塑性変形が生じ、エネルギーの一部が弾性波動 (AE) となって放出される。すなわち、AE とは「固体材料内部の微少な破壊あるいは同様なエネルギー開放過程によって発生する弾性波動現象」として定義される。

AE による崩壊予測とは、地盤の内部構造の微小変化を AE として計測することにより斜面崩壊を予測するものであり、斜面変形量の計測がマクロな現象に基づく予測手法であるのに対して、ミクロな現象に基づく予測手法といえる。AE による斜面崩壊発生予測は、土塊のマクロな変位のみならず、地中における土塊破壊の前兆 (AE の発生) をとらえるため、既往の予測システムにくらべかなり早い段階から崩壊の発生を予測することが可能である。また、AE は地震波と同じ弾性波であるので、複数のセンサーを設置することによって破壊面の位置を標定することが可能である。破壊面の位置が把握できれば崩壊の規模も推定することが可能となる。伸縮計や GPS など得られる情報は地表面の変動であり、破壊面を予測することは困難である。このようなことから、AE による崩壊監視手法が確立できれば、経済的かつ精度のよい監視が可能になると考えられる。

そこで、自然斜面の異常変動を早い時期にとらえ、かつ崩壊時間・規模等の予測手法として、AE 計測技術の適用性を検討し、現地観測に適した計測システムの開発を目的として、平成 7 年度より平成 10 年度までの 4 ケ年にわたり、共同研究「AE による斜面動態計測システムに関する研究」を建設省土木研究所、指定機関 (財)砂防・地すべり技術センター) および民間 10 社 ((株)エヌエフ回路設計ブロック、川崎地質(株)、(株)興和、佐藤工業(株)、飛鳥建設(株)、西松建設(株)、日本工営(株)、日本フィジカルアコースティクス(株)、(株)間組、(株)フジタ) で実施した。本報告書は、上記共同研究の成果をとりまとめたものである。

2. 研究経緯

本共同研究は、平成7年度から平成10年度の4ヶ年にわたり実施した。

斜面崩壊には多様な形態が存在し、その発生機構も複雑である。本共同研究では、斜面崩壊を岩盤崩壊と土砂崩壊に区分し、それぞれの代表的な形態について AE 法の適用性を検討した。以下に、検討を実施した斜面を示す。

- ① 日光稲荷川流域岩盤斜面（岩盤斜面）
- ② 木更津下総層斜面（土砂斜面）
- ③ 鹿児島しらす斜面（土砂斜面）

共同研究では、これらの現地計測および解析結果をもとに、斜面動態計測に適した AE 計測システムについて考察を行なった。本共同研究の経緯を図-2.1 に示す。また、各年度の実施内容について次節以降に簡単に示す。

2.1 平成7年度実施内容

（1）AE 法の斜面動態計測についての既往文献調査

AE 法の斜面計測への適用事例について、既存の文献・資料を和・英文合わせて 270 編収集・整理し、AE 計測および評価の基礎的検討を行なった。

（2）現地実証試験候補地検討

建設省富士川砂防工事事務所管内（春木川、小武川）、建設省日光砂防工事事務所管内（稲荷川、大事川）、建設省天竜川上流工事事務所管内（中田切川、遠山川）流域およびその他の地域を対象に現地実証試験候補地の検討を行なった。検討対象となった斜面候補地を表-2.1 に示す。その結果、稲荷川岩盤斜面について次年度以降 AE 現地計測を実施することが決定した。

2.2 平成8年度実施内容

平成8年度は、稲荷川岩盤斜面における AE 計測を主眼に研究を実施した。

（1）稲荷川岩盤斜面における AE 計測計画の立案

AE センサー（高周波・低周波）、光波測距儀、傾斜計、温度センサー、ビデオカメラ、変位計等の岩盤斜面への配置計画を立案した。

（2）稲荷川岩盤斜面における予備実験の実施

現地計測場所（日光稲荷川左岸側岩盤斜面）の岩盤の基本的な物性を調べるために岩石コアを採取し、一軸圧縮強度試験などの室内試験を実施した。また、稲荷川流域（左岸側）の岩盤斜面において岩盤の弾性波伝播特性の調査を行った。

（3）稲荷川岩盤斜面における AE 計測器の設置および計測開始

平成8年12月3日から稲荷川岩盤斜面における AE 現地計測を開始した。

平成
7年度

AEによる斜面動態計測
についての文献調査

現地実証試験候補地検討

岩盤斜面への適用

土砂斜面への適用

平成
8年度

岩盤斜面現地実証試験地選定
日光砂防工事事務所管内
稲荷川流域左岸岩盤斜面

AE計測計画の立案

斜面動態計測器の設置
・AEセンサ（高周波・低周波）
・変位計、傾斜計
・雨量計、温度計
・映像記録

平成
9年度

現地
長期
計
測

H.8.12.3
～H.10.8.3

予備実験
・岩石コア試験
・現地AE伝播実験
・温度影響試験
・雨滴模擬試験
・現地熱赤外線計測

土砂斜面現地実証試験地選定

木更津下総層斜面

鹿児島しらす斜面

AE計測計画の立案

AE計測計画の立案

斜面動態計測器の設置
・AEセンサ
（高周波・低周波）
・変位計、傾斜計
・雨量計、温度計
・映像記録

斜面動態計測器の設置
・AEセンサ
（高周波・低周波）
・変位計、傾斜計
・映像記録

現地計測 H.9.6.18
～H.9.8.1

現地計測 H.9.10.1
～H.9.10.15

放水による
人工崩壊実験

下部掘削による
人工崩壊実験

木更津下総層斜面
計測データの
解析・評価

鹿児島しらす斜面
計測データの
解析・評価

平成
10年度

人工崩壊実験
・油圧ジャッキ人工崩壊実験
・破砕剤人工崩壊実験

岩盤斜面計測データ
の解析・評価

岩盤斜面におけるAE
計測手法の検討

土砂斜面におけるAE
計測手法の検討

まとめ・最終報告書の作成

図-2.1 AEによる斜面動態計測システムに関する研究経緯

表-2.1 AE試験地候補一覧表

事務所名	地点名	管理者	斜面形態					想定される崩壊				AE計測条件			評価
			斜面高	平均斜面勾配(°)	斜面幅(m)	表土層	表土層厚(m)	崩壊形態	崩壊幅(m)	崩壊高(m)	崩壊深(m)	設置スペース	電源	道路アクセス	
富士川砂防	春木川 No.1	増田屋旅館	12	60~70	20	硬岩	0.2	岩石崩壊	5	5	1	あり	あり	道路際	×
〃	〃 No.2	林野庁?	8	50~60	10	土砂混じり岩 軟岩	0.5	土砂崩落 (砂混じり)	10	5	1	なし	電柱から 30m	道路際	×
〃	小武川 No.1	富士川砂防	100	70	20	軟岩, 硬岩	3	岩石/ 岩屑崩落	50	100	3	なし	100m	100m	×
〃	〃 No.2	〃	8	60~70	4	土砂混じり岩	0.1	岩屑崩落	4	8	1	なし	30m	道路際	×
〃	〃 No.3	〃	4	80~90	20	土砂 (砂礫・砂質土)	0.2	土砂崩落	3	2	0.5	のり面上部	10m~20m	道路際	×
日光砂防	稲荷川 No.1	日光砂防	100	70~80	70~80	土砂混じり岩	1~2	崩落 トップリング	10	10	2	斜面上部 東屋付近	なし	斜面上方約30mに 工事専用道路あり	×
〃	〃 No.2	〃	20	70~80	30	中硬岩	1	崩落	3	2	1	あり	なし	稲荷川対岸に 工事用道路あり	×
〃	〃 No.3	〃	18~20	70~90	25	中硬岩	1	崩壊	2	1	1	あり	なし	斜面に隣接してあり	岩盤 ○
〃	大事沢 No.1	国, 農水省 (国有林)	40~50	60~70	70~80	なし	0	崩落	50	35	1~1.5	あり	200m	工事用道路約2km, モーター900m, 徒歩1分	×
〃	〃 No.2	〃	15	50~60	20	なし	0	崩落	15	7~8	0.5	あり	300m	工事用道路約2km, モーター900m, 徒歩1分	×
天竜川上流	中田切川No.1	建設省	15	70	6	土砂	0.4	土砂崩落 (岩石含む)	2	4	0.4~0.5	あり	なし	林道沿い	×
〃	〃 No.2	国有林	20	80~90	20			岩石崩落	20	10	0.5~1	あり	約50m	林道より約30m	×
〃	〃 No.3	〃	15	80	20	硬岩	0.05以下	岩石崩落	6	3	0.8	あり	キュービク まで100m	林道沿い	×
〃	〃 No.4	建設省	15	70	15			岩石崩落	6	1	0.6	あり	なし	林道沿い	×
〃	遠山川 No.1	建設省	15	85~90	30	土砂	0~0.1	岩石崩落	20	10	0.5	なし	(断線)	道路脇	×
〃	〃 No.2	建設省	10	80~90	25~30	土砂	0~0.1	岩石崩落	20	10	1	あり	(断線)	道路脇	×
〃	〃 No.3	(建設省)	400~600	50	300	土砂	0.1	表層崩壊	300	150~200	1~2	あり	あり	道路脇	×
日光砂防	稲荷川 土砂 No.1~3	日光砂防	15	40, 90	20	土砂混じり岩	0.5	土砂崩落	5	5	0.5	あり	150m~800m	3~80m	×
-	葛生 No.1	古沢石灰工業㈱	10	80	10	土砂	0.3	表層崩壊	5	5	0.5	あり	20mまたは 300m	民地内通行許可が必要	×
-	木更津 No.1	中央産業㈱	15	50	10	土砂	2~3	表層崩壊	10	10	1~2	あり	200m	土取場内(道路に近い)	土砂 ○
-	牧 園	福地建設(株)	5	90	5	しらす	0	土砂崩落	5	5	2	あり	あり	土取場内(道路に近い)	しらす ○

2.3 平成9年度実施内容

平成9年度は継続して稲荷川岩盤斜面における長期計測を実施するとともに、土砂斜面におけるAE法の適用性試験を実施した。

(1) 稲荷川岩盤斜面AE計測および予備実験の実施

平成8年度に引き続き、稲荷川岩盤斜面計測を実施するとともに、雨滴がAE計測に及ぼす影響などについて室内試験を実施した。

(2) 木更津下総層斜面におけるAE現地実証試験

千葉県木更津の民間土取場の土砂斜面を対象に、AE現地実証試験を実施した。計測期間を台風の襲来時期に設定し、土砂斜面の自然崩壊を試みたが、崩壊を自然誘発させることができなかった。そこで斜面に対して放水を行い、強制的に斜面崩壊を発生させた。これにより、収集されたAE計測データおよびその他の計器から得られたデータを整理し、AE計測による土砂斜面崩壊予測の可能性と問題点についてまとめた。

(3) 鹿児島しらす斜面におけるAE現地実証試験

鹿児島県始良郡牧園町三体堂に位置するしらす採取場を対象斜面として、AE現地実証試験を実施した。通常時（バックグラウンド）、人工崩壊時などのAEを計測し、斜面の崩壊とAEの発生挙動の関係についてとりまとめ、しらす斜面動態計測におけるAE法の適用性を明らかにした。

2.4 平成10年度実施内容

(1) 稲荷川岩盤斜面AE計測および人工崩壊実験

平成9年度に続き、稲荷川岩盤斜面におけるAE計測を実施し、様々な自然環境下におけるAEデータを得た。しかし、大規模な自然崩壊は発生しなかったため、岩盤斜面に油圧ジャッキおよび破碎剤を用い、人工的に斜面崩壊を誘起し崩壊時のAEを計測した。

(2) 稲荷川岩盤斜面AE計測データの解析・評価

通常時（バックグラウンド）、人工崩壊時のAE計測結果をもとに種々の解析を行い、崩壊時のAEの発生挙動について検討を行なった。

(3) 土砂斜面および岩盤斜面におけるAE計測手法の検討

稲荷川岩盤実証試験結果および木更津・しらすの両実証試験結果をもとに、岩盤斜面・土砂斜面におけるAE計測・評価手法をそれぞれ整理した。

(4) 最終報告書の作成

各現地実証試験の結果を別冊報告書としてとりまとめるとともに、本共同研究の最終報告書を作成した。

3. AE 法による斜面動態計測に関する既存の計測方法および評価方法の整理

本共同研究を開始するにあたり、斜面動態計測における AE 計測の研究動向・レベルを明らかにする必要があると考えられた。そこで、既往の AE 計測方法および評価方法に関する知見を整理する目的で、以下の学会について過去 15 年の論文を対象に検索を行い、関連する論文を収集した。

表-3.1.1 斜面動態観測への AE 計測関連の検索論文

関連学会	文献数
土木学会関係	58 編
地盤工学会（旧土質工学会）関係	26 編
地すべり学会関係	6 編
ASCE Journal of Geotechnical Eng.	12 編
砂防学会関係	1 編
日本非破壊検査協会関係	4 編
地下と土木の国内 AE コンファレンス	27 編
AE 総合コンファレンス	6 編
International Acoustic Emission Symposium	27 編
岩盤力学に関するシンポジウム関係	22 編
Journal of Acoustic Emission	20 編
その他	64 編
合計	273 編

3.1 AE 計測方法について

3.1.1 センサの種類

AE 計測では計測対象となる地盤の材料特性や計測状況などから受信される AE 信号の周波数特性を考慮して、使用する AE センサの種類を決定する必要がある。地盤材料を対象とした AE 計測においてこれまでに用いられているセンサは 3 種類に分類できる。以下にそれぞれの特徴と主な使用目的を示す。

なお、AE センサの分類方法に低周波センサ、高周波センサと分ける方法があるが、その境界点は明確でなく計測対象によって異なっている。ここで対象としている地盤構造物では 20kHz～30kHz を境に分類している場合が多い。また、高周波センサでも金属を対象にした場合よりもかなり小さく 100kHz 程度までの共振点を持つセンサが主に利用されている。

（１）加速度センサ（500Hz 以下）

一般的に加速度計と呼ばれているセンサで、固体表面の弾性波動を電気信号に変換する際に電荷の変化として取り出しチャージアンプを用いて増幅する。数 10m 以上の遠距離で発生した大規模な振動の低周波成分の受信に適しているが、通常の AE 波のような微弱な振動の計測は困難である。

・主な使用目的

地震観測¹⁾、地熱開発のクラック進展²⁾

（２）加速度センサ（500Hz～20kHz）

機械的な振動を電圧の変化として取出し、プリアンプを用いて増幅する。通常の AE センサと同じ構造であるが、共振周波数を避けて計測するために平坦な感度で計測することができ、検出信号の周波数特性が有効な

指標となる。

・ 主な使用目的

地すべり³⁾、切土、岩盤などの斜面監視⁴⁾、グラウト注入監視⁵⁾、山はね監視⁶⁾ など

(3) AE センサ (低周波 5kHz~30kHz、高周波 30kHz~100kHz)

本来金属材料の AE 計測に用いられてきたセンサであるが、現場計測における高周波振動の減衰を考慮して周波数帯域を低くしたものである。共振点を中心に計測周波数帯域を設定している点に特徴がある。センサの感度が平坦でないために、検出信号の周波数特性はセンサの共振周波数の影響を受け周波数解析は非定性的な結果になる場合がある。現場計測において低周波では共振 15kHz、高周波では 60kHz 前後のセンサが多く使用されている。

・ 主な使用目的

切土、岩盤斜面などの監視^{7)、8)}、岩石の破壊実験⁹⁾、杭の損傷位置の検知¹⁰⁾ など

既往の研究では各センサとも AE の計測が可能であるとされており、どの種類が現場計測に適しているかを判断することは困難である。使用するセンサを選定するには、上記の特徴を考慮し実際の計測状況に適したセンサを用いる必要がある。また、現場計測では迷走電流などによるノイズも予想され、できるだけノイズを除去できるセンサを用いることが重要である。

3.1.2 センサの設置方法

地盤材料を対象とした AE 計測では AE 波の減衰が顕著で、また短期的な実験目的で計測する場合を除いてセンサの受波面を直接構造物に取りつけて長期間一定の計測条件を確保することが困難である。従って、AE の発生源である地盤とセンサの受波面との接触面積を大きくして受信しやすくするために、一般的には金属棒などの波動の伝播性能が優れたウェーブガイドが用いられている。ウェーブガイドを利用するに際して指摘されている注意点には次のようなものがある。

- ・ ウェーブガイドを伝播中に波動の特性が変化する。変化の度合いについては定量的に検証されていないが、全ての特徴が損失してしまうほどの変化ではなく部分的なものであると思われる。
- ・ 硬化前のモルタルにアルミ製のウェーブガイドを挿入した場合、アルミとセメントとの間で化学反応が生じ、それに伴って AE を発生する。
- ・ 地中の迷走電流を受信しやすくするので、センサとウェーブガイドの間を絶縁する必要がある。
- ・ ウェーブガイドを極端に長くした場合、ウェーブガイドがアンテナの役割を果たし、空気中の電波を受信しやすくなる。
- ・ 長いウェーブガイドの場合、伝播中に周囲に波動が吸収され、AE 波の伝播が難しくなる。

既往の文献では現位置の計測条件を考慮し、ウェーブガイドの利用方法を工夫してセンサが設置されている。主に斜面の動態観測を目的とした AE 計測で利用されている設置方法について以下に紹介する。

(1) 表面に設置する方法

岩盤などの表面に 10cm 程度のアンカーを打ち、取付け金具を用いてセンサをアンカーに取付けて設置する。ボーリングが不可能な箇所でも設置できセンサの回収も可能であるが、岩盤の深部で発生した AE を計測することは難しい。また、布などでセンサを防護しても雨滴や落石などがセンサおよびその周囲に衝突するとノイズを計測する可能性が高く、日射などの影響も受け易いという問題がある。崩壊の危険性が高く表層での削孔が難しい場合に利用されている。

(2) 浅いボーリング孔を利用する方法

簡易な削岩機を用いて岩盤の表層に 1～2 m 削孔し、長さ 1 m 程度のウェーブガイドにセンサを取付け挿入後モルタルで充填する。表面の場合と同様に深部で発生する AE を検出することは難しいが、50cm 程度斜面表面から埋設することにより雨滴や落石などが直接センサに衝突しなくなるため、ノイズのかなりの部分が除去できる。また、長期計測においても安定した条件で計測できる。

(3) 深層のボーリング孔を利用する方法

比較的大規模な斜面において深部に崩落を誘発する可能性の高い亀裂等がある場合、その亀裂の周辺で発生する AE を計測するために深部までボーリングを行い、ウェーブガイドを挿入して計測する。センサの設置費用が高くなるが、発生源の近傍で受信できるためより確実な計測が可能である。使用するウェーブガイドは 10m を越える長さのものを利用した例もあるが、ウェーブガイド中を伝播する際の減衰や周囲への波動の吸収などがあり、あまり長くしても先端付近で入射した信号をセンサで受信することは難しい。また、長くすると空気中の電波を受信しやすくなるので 5 m 程度ぐらいが限界と思われる。従って、できるかぎり潜在クラック付近に設置する事が重要となる。

(4) 直接地中に貫入する方法

比較的に柔らかい材料からなる斜面では、ボーリングを行わずにウェーブガイドを直接地面に貫入する方法が用いられている。ボーリング費用が不要なので設置コストは廉価であるが、貫入の長さは 3 m 程度が限界であると思われるので、深部での AE の計測は難しい。また、この種の材料では通常計測の対象とする 1 kHz 以上の信号は非常に伝播範囲が限られてくるので、岩盤構造物のように伝播する AE を計測すると言うよりもむしろ、ウェーブガイドの周辺もしくは接触面で土粒子などがウェーブガイドと摩擦を起こすときの AE を計測している場合が多い。この方法ではウェーブガイドを貫入する際に乱された土粒子が安定に向かう際にウェーブガイドと摩擦を生じるので、設置後数は少ないが AE が連続して計測される傾向がある。1 m 程度の短いウェーブガイドを用いて場所を移動させ、地すべり地帯の平面的な分布を調査するのに用いられた例も報告されている³⁾。

(5) その他

上記以外に報告されているセンサの設置方法を列挙すると次のようになる。

- ・ AE 発生材料からなるウェーブガイドを用い、変形に伴って発生する人工的な AE を計測する方法^{11), 12)}
- ・ 伝播速度の異なるウェーブガイドを用い、到達時間の差を利用して発生位置を推定する方法¹³⁾
- ・ ウェーブガイドの両端にセンサを取付け、発生位置を求める方法¹⁴⁾

3.2 AE 計測データの評価方法について

3.2.1 AE パラメータの選定

AE 波は、物体内の破壊エネルギー解放現象により放出される波動エネルギーを検出したものであり、評価に用いるためには AE 信号をなんらかのパラメータに置換する必要がある。AE パラメータには以下のようなものが提案されている。これらの中には、エネルギー・モーメントなど特定の AE 計測機のみにより用いられる計測パラメータもある。既往の文献で提案されている AE パラメータを以下に示す^{16), 16), 17), 18), 19)}。

- 1) 発生頻度： 発生総数（トータルカウント）
時間間隔発生数（カウントレート）
リングダウン計数、事象（イベント）計数
- 2) 波形パラメータ 1： 到着時間（ts）
（時間） 立ち上がり時間（Tr）
持続時間（Td）
- 3) 波形パラメータ 2： 最大振幅（ap）
（エネルギー）
- 4) 波形パラメータ： エネルギー・モーメント 1
（パターン） エネルギー・モーメント 2
2 次エネルギー・モーメント
- 5) 波形パラメータ： 周波数分布（周波数）

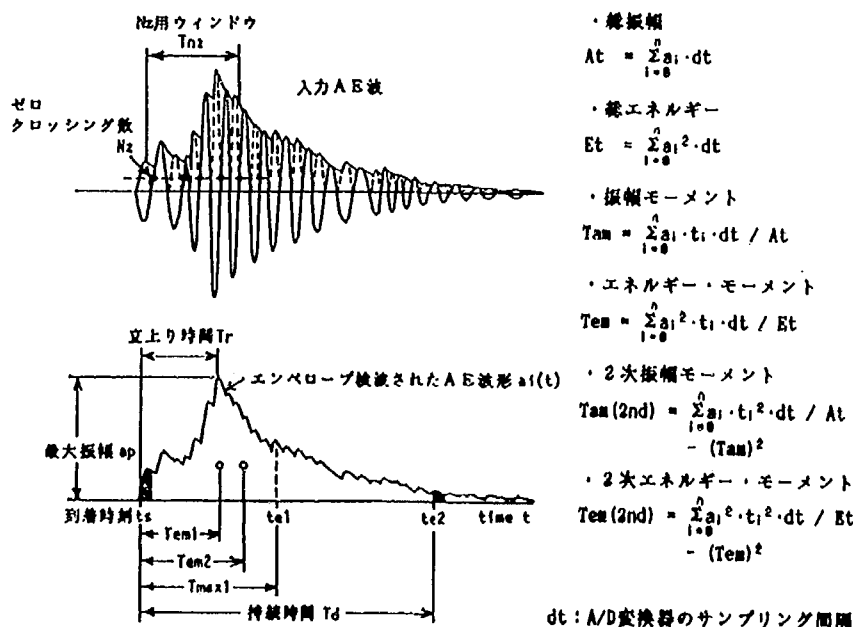


図-3.2.1 AE 波形パラメータ¹⁶⁾

3.2.2 AE 信号の分類手法および評価指標の検討

AE 計測装置は、岩や土砂の変形に伴う弾性波のみならず、様々な要因によって発生するノイズを同時に計測する。また、同じ弾性波でも崩壊の形態やステージによって発生する AE 信号が変化することもあり得る。

現在、提案されている AE の分類手法および評価指標を以下に示す。

1) 単一パラメータおよび複数のパラメータの組み合わせによるノイズの除去

単一パラメータおよび複数のパラメータの閾値を設定することによって必要な AE のみを抽出する。通常行われている最も簡易な方法。

2) 統計的方法（主成分分析法、クラスター分類法）

AE 信号の意味付けを行う。

主成分分析^{2 1)}、クラスター分類^{2 0)}、K-nearest-neighbor^{2 2)}

3) 最大振幅と発生頻度による方法（m 値、b 値、フランク）

b 値^{1 4)}、フランク理論^{2 3)}、^{2 4)}、^{2 5)}

3.2.3 位置標定手法の検討

位置標定手法については、プラントのモニタリングや供試体レベルの破壊試験などの技術において下記に示す手法が既に確立されている^{2 6)}。また、地盤への適用では、ウェーブガイドを用いて 1 次元の位置標定が行われる場合もある。この場合、取得したい AE に応じてウェーブガイドの種類や材質、設置方法を変える必要がある。

1) ソーン標定

2) テーブルルックアップ方式（3 次元位置標定）

3) 逐次近似法（3 次元位置標定）

3.2.4 崩壊ステージの判定基準の検討

ここでは、「分類された結果あるいは計算された指標がどのような値を示した場合、危険と判断すべきか」という管理基準の問題を検討する。これについては未だ確立された方法がない。現在、利用が検討されている方法を以下に示す。

1) カウントレートによる方法

多用される方法であるが、AE 発生数を以下に一般化するかが問題である。

2) ニューラルネットワーク

AE 発生挙動と破壊・崩壊との関連をニューラルネットワークによりシミュレートする方法^{2 7)}

3) ファジー理論

複数の AE パラメータから破壊・崩壊基準を判定するための手法²⁸⁾

3.2.5 崩壊の発生予知(時刻、規模、要因.....)手法の検討

斜面崩壊に関するより具体的な情報(発生時刻、規模、要因.....)などを AE 信号から評価する手法について検討する^{29), 30)}。とくに、崩壊時刻の予測については、地すべりの分野でひずみ量(あるいは移動量)にもとに算出する方法が提案されている³¹⁾。

[関連文献]

- 1) 伊藤久男、杉原光彦、「滝ノ土地熱地域の断裂系と微小地震」、第3回地下の AE 国内コンファレンス論文集、p.113~119、1988
- 2) 館野正之、工藤裕之、鷹背守彦、新妻弘明、「AE 法を利用した葛根田地域における地熱貯蔵留層の評価」、第3回地下の AE 国内コンファレンス論文集、pp.120~125、1988
- 3) 熊谷周、高橋克実、湯田周二、橋本良忠、「地滑り検知用 AE 計測装置の開発と計測実施例」、社団法人日本非破壊検査協会 006 特別研究委員会資料 N0.79、pp.54~61、1986
- 4) 新妻弘明、長島重憲、「広帯域・高精度坑井内 3 軸 AE ソンデの開発と性能評価」、第4回地下と土木の AE 国内コンファレンス論文集、pp.75~84、1991
- 5) 上田貴夫、鈴木志朗、三木自行、重石光弘、湯山茂徳、「岩盤グラウト注入に伴う AE 発生特性とその波形解析」、第4回地下と土木の AE 国内コンファレンス論文集、pp.91~96、1991
- 6) 出口剛太、「長壁式採炭切羽周辺の山鳴り観測」、第3回地下の AE 国内コンファレンス論文集、pp.98~104、1988
- 7) 秩父顕美、城 和裕、中村正博、鎌田正孝、「施工管理用 AE 計測システムの開発」、土木学会第43回年次学術講演会論文集、pp.222~223、1988
- 8) 根岸正充、中島巖、「層雲峡熔凝灰岩の柱状節理におけるき裂進展とすべり破壊—寒冷地における岩盤斜面崩壊に関する研究(第1報)—」、応用地質 34 巻 2 号、pp.1~11、1993
- 9) 山下秀、大塚一雄、山富二郎、鈴木肇、「岩石の圧縮破壊過程と AE 発生挙動」、第3回地下の AE 国内コンファレンス論文集、pp.60~68、1988
- 10) 塩谷智基、「地盤内破壊評価法へのアコースティック・エミッションの適用に関する研究博士論文」、pp.238~250、1998
- 11) 中島巖、「AE 法による岩盤斜面崩壊の監視」、第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.530~531、1990
- 12) 石橋晃睦、福地伸一、笹原克夫、網木亮介、「表層崩壊発生監視のための AE ウェーブガイドの構造について」、第34回地すべり学会研究発表講演集、pp.233~236、1995
- 13) 川上 純、服部弘通、中尾健児、「AE による地すべり活動のモニタリング手法に関する一考察」、地すべり第30巻第2号、pp.17~24、1993
- 14) 青木朋也、天羽恵子、塩谷智基、藤井清司、「AE 法による砂質土斜面の崩壊メカニズム推定と崩壊位置予測」、第5回地下と土木の AE 国内コンファレンス論文集、pp.56~61、1993

- 15) 山口楠雄、小柳津宏忠「AE 情報分散処理による適応型多目的監視システム」、第 6 回アコースティックエミッション総合コンファレンス論文集、pp.94～99、1988
- 16) 小柳津宏忠、山口楠雄、「AE 波形マルチ・パラメータ処理のための高機能計測システム」、第 7 回アコースティックエミッション総合コンファレンス論文集、pp.193～198、1989
- 17) 小柳津宏忠、山口楠雄、「AE 計測システムの評価と較正法」、第 8 回アコースティックエミッション総合コンファレンス論文集、pp.19～24、1990
- 18) 大津政康、「第 3 章 AE 計測システム、3.2 信号処理」現場技術者のための AE 技術の応用、ア化°-シ、pp.65～71、1994
- 19) 秩父顕美「砂のせん断試験における AE 波形特性」、第 4 回地下と土木の AE 国内コンファレンス論文集、pp.36～41、1991
- 20) 山口楠雄、藤田博之「実時間 AE 波形パラメータ抽出による破壊挙動監視システムとその FBR 配管系疲労試験への適用」、第 4 回アコースティックエミッション総合コンファレンス論文集、pp.166～171、1986
- 21) 秩父顕美「AE 波形特性を用いた地盤の破壊予知方法」、第 5 回地下と土木の AE 国内コンファレンス論文集、pp.48～55、1993
- 22) ONO, Kanji "AE/PATTERN RECOGNITION ANALYSIS OF THE FRACTURE OF GLASS FIBER COMPOSITES EXPOSED TO HOT-WET CONDITIONS" AECM-5, pp.197～204, 1995
- 23) 仲佐博裕「振幅分布による定量的活動度評価方法」第 6 回アコースティックエミッション総合コンファレンス論文集、pp.129～134、1988
- 24) 仲佐博裕「フラクタル性を利用する AE 活動度の定量的評価」第 7 回アコースティックエミッション総合コンファレンス論文集、pp.206～211、1989
- 25) 仲佐博裕「AE 活動度評価に及ぼす計測条件の影響」第 10 回アコースティックエミッション総合コンファレンス論文集、pp.13～18、1995
- 26) 勝山邦久、「第 3 章 AE 計測システム、3.3.3 位置標定法」現場技術者のための AE 技術の応用、ア化°-シ、pp.84～91、1994
- 27) 宅間正則、新家昇「磁気 AE による低サイクル疲労損傷評価—ニューラルネットワークの適用」、第 10 回アコースティックエミッション総合コンファレンス論文集、pp.73～78、1995
- 28) 米山隆雄、佐藤式也「AE 法による機器診断のためのアルゴリズム自動構築法」、第 9 回アコースティックエミッション総合コンファレンス論文集、pp.37～42、1993
- 29) 谷本喜一「土のせん断伸の AE に関する研究」、第 1 回アコースティックエミッション総合コンファレンス論文集、p.113～118、1977
- 30) 塩谷智基「AE 経時曲線を用いた斜面崩壊時間予測」第 10 回アコースティックエミッション総合コンファレンス論文集、pp.49～54、1995
- 31) 福岡輝旗「斜面崩壊時の表面変位速度と加速について」土木学会第 36 回年次学術講演会概要集第 3 部、pp.302-303、1981

4 土砂斜面における現地実証試験

4.1 木更津における実験

4.1.1 実験概要

AE法による土砂斜面動態モニタリングの適用性の検討を目的に、代表的な土砂斜面として、固結度の低い砂岩・砂層（成田層）と崖錐からなる土砂斜面にAEセンサを設置し、斜面の動態観測を実施した。実験概要を表-4.1.1に、工程を表-4.1.2に示す。

表-4.1.1 実験概要

実験期間	平成9年6月6日～平成9年7月31日
計測項目	高周波AE、低周波AEおよびその他の比較用斜面動態計測（伸縮計、傾斜計等）
実験場所	千葉県木更津市上烏田字梅ヶ峯517 土砂採取場
地質的特徴	主に固結度の低い砂層から成り、泥岩との互層を成す。砂層にはクロスラミナが顕著に見られ、ほぼ水平な構造を呈す。斜面の表土は、粘性土を主体としている。下総層群成田層。

表-4.1.2 実験工程表

	4月	5月	6月	7月
計画策定		5/28		
計器配置決定			6/6	
設置工事			6/11～16	
屈折法弾性波探査			6/12～13	
予備計測			6/17～18	
本計測			6/18～	7/31
常駐監視			6/17～	7/31
斜面法尻カット			6/17～18	
トレンチ注水			6/23～	7/31
人工散水				7/11 7/30～31
計測器撤去 後かたづけ				7/31

実験サイトは、千葉県木更津市の市街地から南西に約5kmの烏田川の右岸に位置し、その周辺には木更津丘陵地と呼ばれるなだらかな丘陵地が広く分布している。この地域では山砂利の採取が盛んに行われており、今回、実験の対象として選定された斜面も民間の土取場内にあり、土砂採集の過程に形成された人工斜面の一つである。実験サイトの位置図を図-4.1.1に示す。

実験対象斜面は、図-4.1.2に示すように実験サイトとなった土取場の南西部に位置し、斜面高約20m、傾斜角度が27～40°の北西向き（N32E33N）となっている。斜面の前方で、かつ予想される最大崩壊土砂到達範囲外の高台の上に計測小屋を設置し、この中に各種計測機器を収納するとともに、ビデオカメラと目視によって斜面の挙動を監視した。また、最大崩壊土砂到達範囲内に溜池が存在するのも本サイトの特徴である。

(1) 地形・地質概要

実験サイト周辺の地形は、房総半島中～南部に広く分布している上総丘陵の北西端部に位置する木更津丘陵に属する。木更津丘陵は標高100m以下の比較的小起伏の丘陵であり、丘陵地の周囲は北～北東側を流れる小櫃川や南側を流れる小糸川により形成された三角州性低地や段丘が丘陵を取り囲むように分布している。

特に、実験対象斜面は丘陵地のほぼ中央部を流れる烏田川右岸部（標高40～80m）において形成された人工斜面である。

実験サイト周辺には第四紀中～後期更新世の下総層群が広く分布しており、実験サイトにおける切土斜面の下総層群は固結度が低く斜交葉理の発達した砂岩主体の砂岩泥岩互層から成る。

特に、実験対象とした切土斜面では、上述の互層が水平、あるいは斜面に対して緩やかな差し目構造（斜面の走向・傾斜：N32E30-35N、互層の走向・傾斜：N70W0-15S）をなし、それを崖錐性もしくは土砂採取後の残土と思われる粘性土が主に斜面の表層を薄く覆うような地質構造を示している。

(2) 事前調査の結果

実験を行うに際して、対象となる斜面の状態（物性、堆積構造および各層の厚さ、弾性波速度等）を把握するために、まず露頭の地質観察を実施し、採取された試料に対して室内土質試験を実施した。さらに、斜面上にて土研式簡易貫入試験および屈折法弾性波探査の原位置試験が行われている。表-4.1.3に調査項目および数量を示す。また、実験対象斜面全体の模式平面図を図-4.1.3に示す。図中、□で示す2地点から土質試験用の試料を採取した。

表-4.1.3 事前調査項目および実施数量

調査項目		実施数量		
地質観察		計測対象斜面全域		
土質試験	斜面上部（Ⅰ）	3 試料	計 7 試料	
	下部（Ⅱ）	4 試料		
土研式簡易貫入試験		5 箇所		
弾性波探査	斜面縦断方向	1 測線	19.0m	3 測線 計43.5m
	横断方向	2 測線	24.5m	

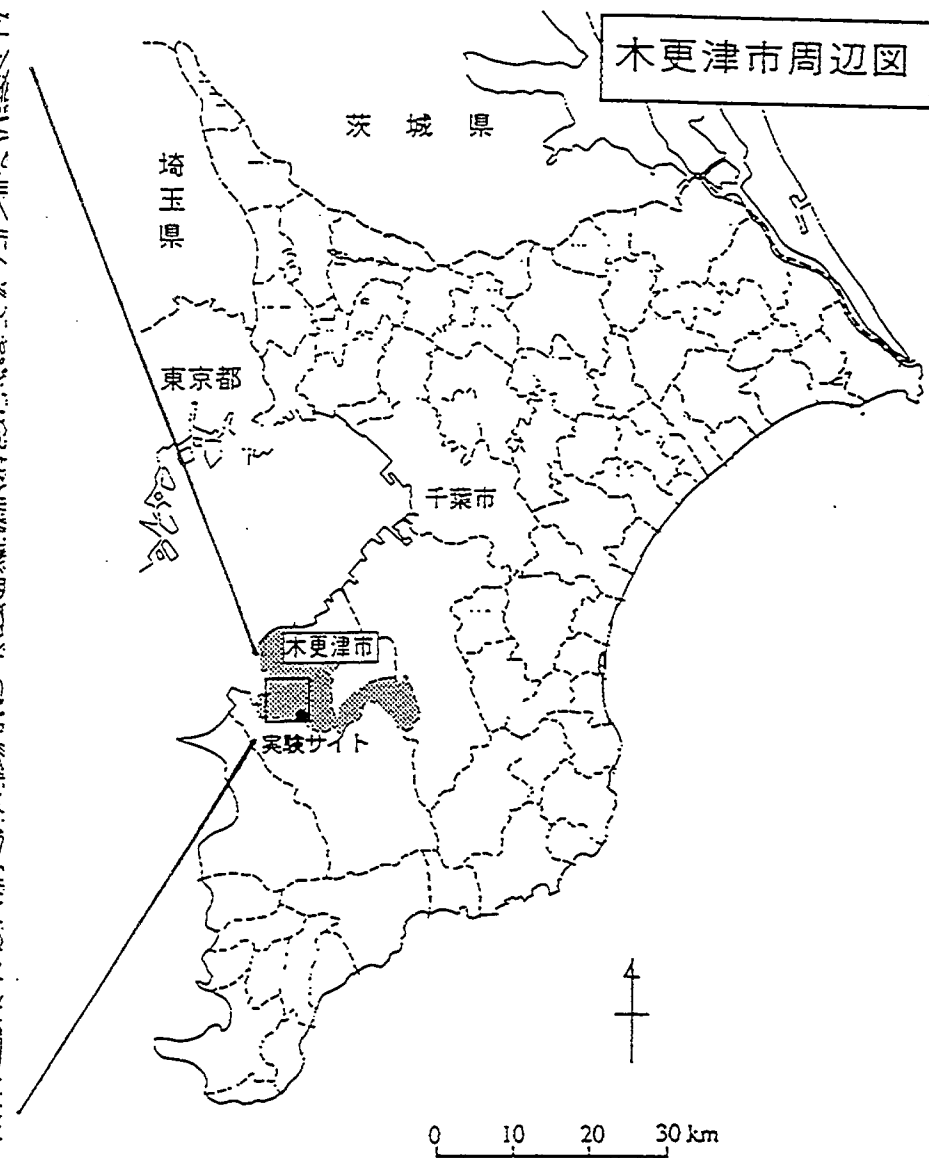
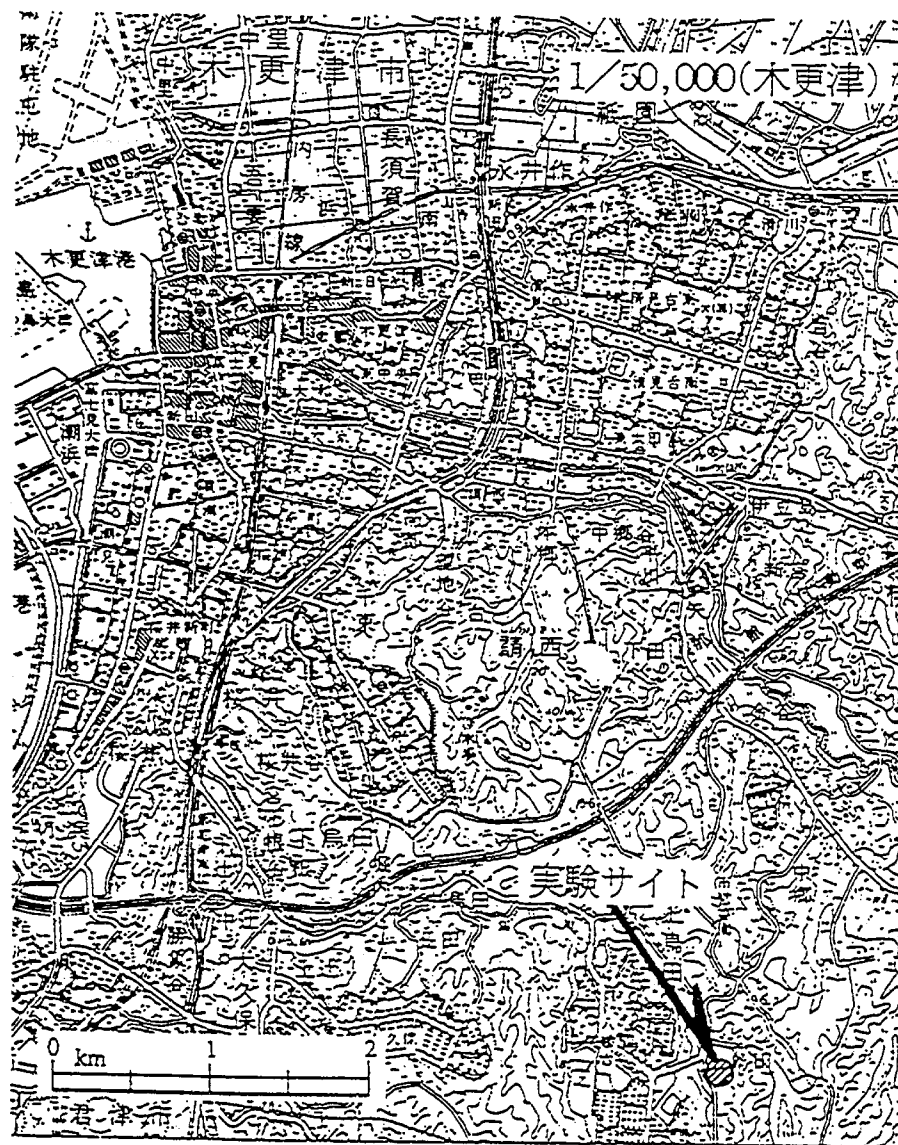


図-4.1.1 実験サイト周辺図

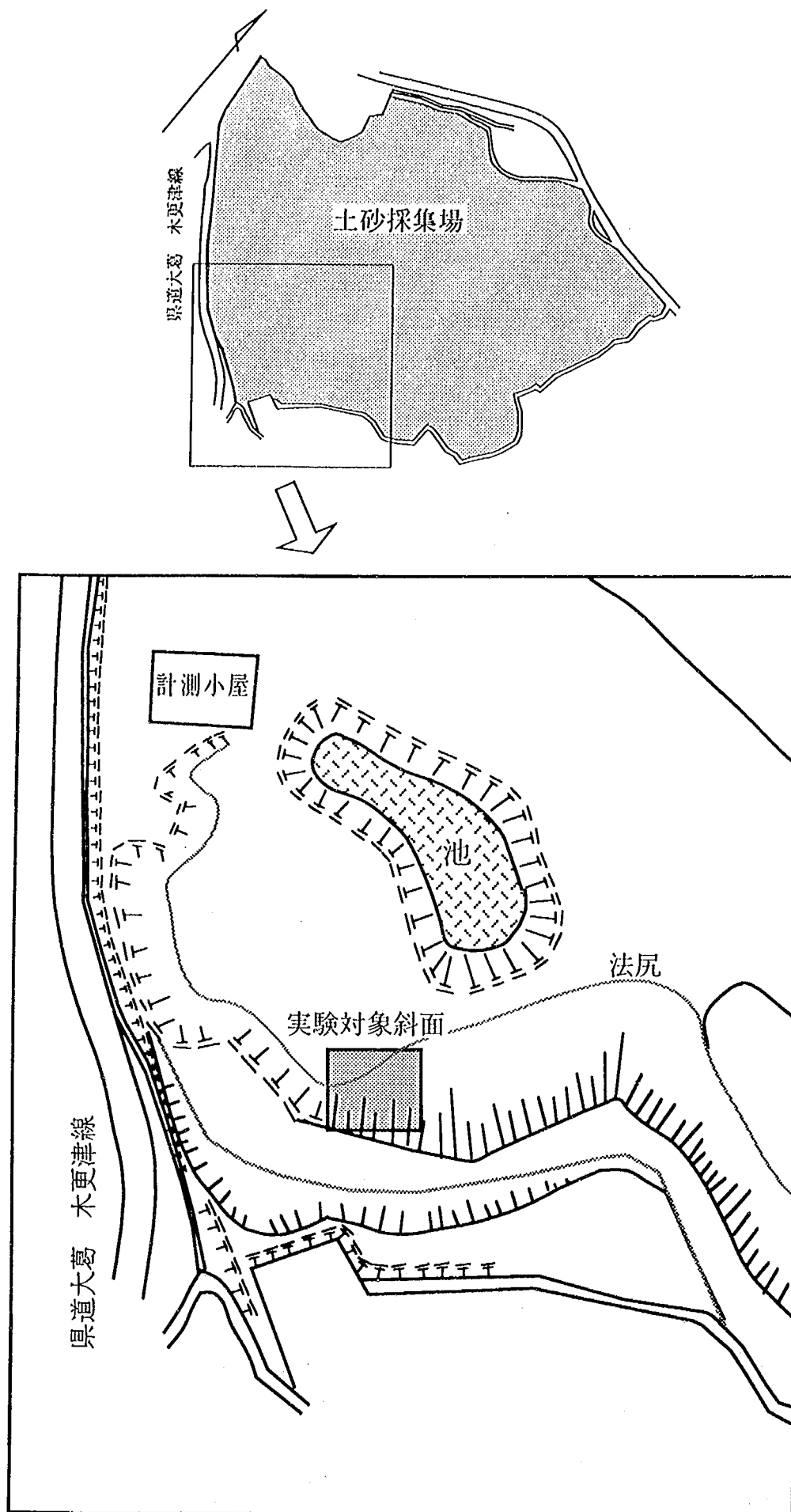


図-4.1.2 実験対象斜面全体概要図

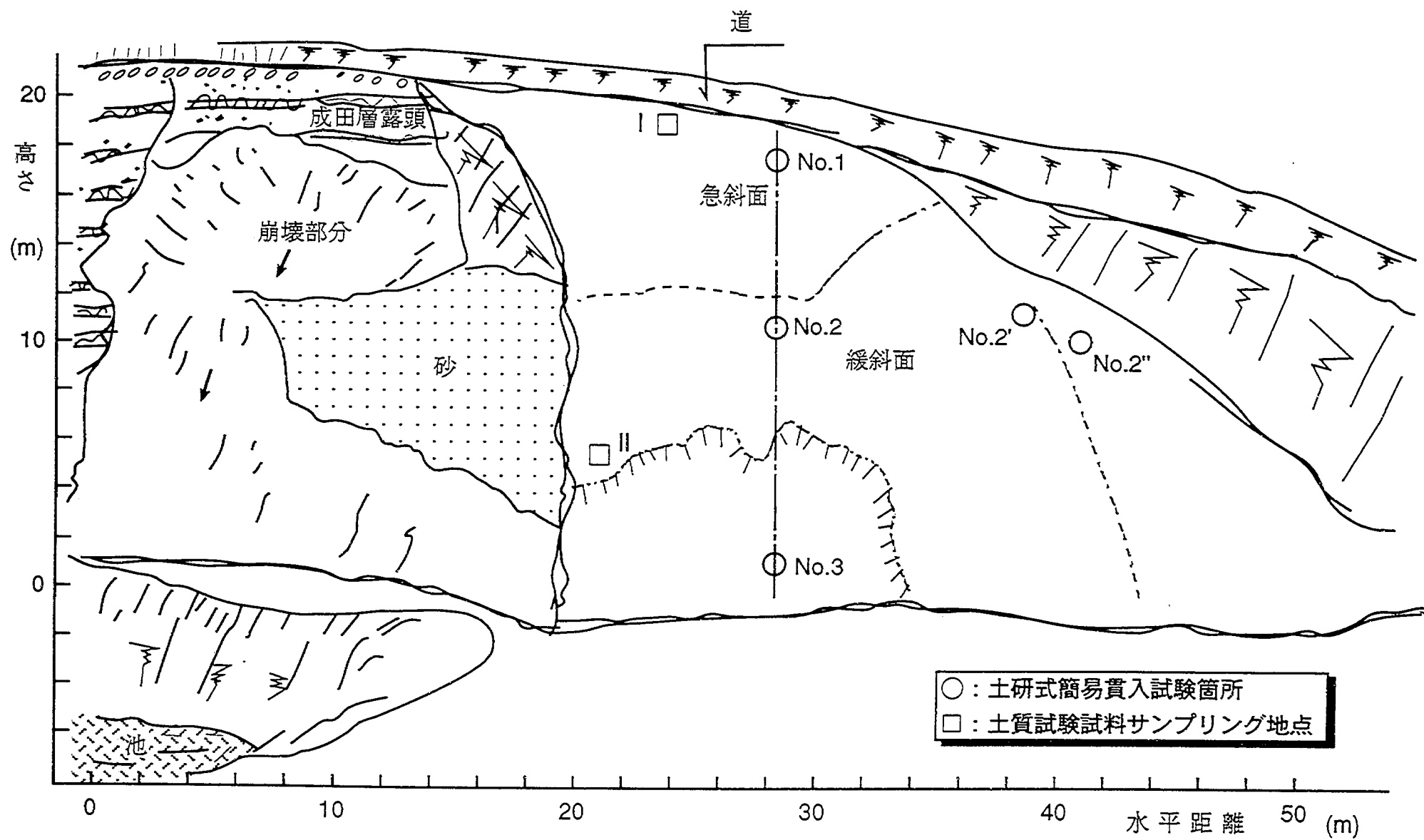


図-4.1.3 実験対象斜面全体模式図

これら事前調査の結果、露頭観察結果を基に描いた斜面全体地質断面図を図-4.1.4に、室内土質試験結果の一覧を表-4.1.4に示す。

表-4.1.4 室内土質試験結果一覧

孔 番		(I) 斜面上部			(II) 斜面下部			
試料番号		I-1	I-2	I-3	II-1	II-2	II-3	II-4
採取深度(m)		0.8~0.9	1.8~1.9	2.9~3.0	0.1~0.3	1.3~1.4	2.0~2.1	2.6~2.7
一般	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)							
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)							
	土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.54	2.62	2.58	2.70	2.27	2.66	2.67
	自然含水比 ω_n (%)	14.9	32.4	10.6	40.8	39.0	35.5	32.3
	間 隙 比 e							
	飽 和 度 S_r (%)							
粒 度	礫 分 2~75mm(%)	0.1	0.4	0.7	0.5	9.0	0.3	0.1
	砂 分 75 μ m~2mm(%)	25.0	48.0	51.4	58.9	77.4	35.6	95.2
	シルト分 5~75 μ m(%)	37.3	25.9	23.2	20.5		25.9	
	粘土分 5 μ m未満(%)	37.6	25.7	24.7	20.1	13.6	38.2	4.7
	均 等 係 数 U_c	—	—	—	—	—	—	2.1
	曲 率 係 数 U_c	—	—	—	—	—	—	1.2
	液性限界 ω_L (%)	66.1	43.9	48.1	53.6		68.1	
	塑性限界 ω_P (%)	27.2	24.5	27.6	27.3		22.7	
	液性指数 I_P	38.9	19.4	20.5	26.3		45.4	
日本統一土質分類		CH 粘土(高液 性限界)	CL 粘土(低液 性限界)	SM シルト質 砂	SC 粘土質砂	S-Fg 細粒分礫 混り砂	CH 粘土(高液 性限界)	SP 粒度の悪 い砂

また、土研式簡易貫入試験から推定された実験対象斜面の断面図を図-4.1.5に示す。試験結果から推定すると、本斜面の堆積構造として、表層部は2層構造を成し、深度1.4m前後に第1層と2層の境界があると考えられる。また、表層部と基盤との境界は深度2.8m付近にあると考えられた。

その他に、計測法面上にて図-4.1.6に示す3つの測線を設け、屈折法弾性波探査を実施した。得られた波形データに対してハギトリ法により解析を行い、計測対象斜面の地山速度および速度分布を求めた。斜面縦断方向に設定した測線1上の速度層断面を図-4.1.7に、また横断方向に設定した測線2, 3上での速度層断面を図-4.1.8, 図-4.1.9にそれぞれ示す。各測線の解析結果を比較した結果、本斜面は3層構造から成り、各層の速度値は第1層が0.16km/s~0.18km/s、第2層は0.28km/s~0.3km/s、第3層は0.5km/sであることが分かる。また、各速度層の厚さは縦断方向では約1m程度であり、下方にいくほどやや厚さを増す傾向が見られる。特に、法尻(標高約40m)より2~3m上方に第1層と第2層を含む表層部の膨らんだ箇所が見られるのが特徴と

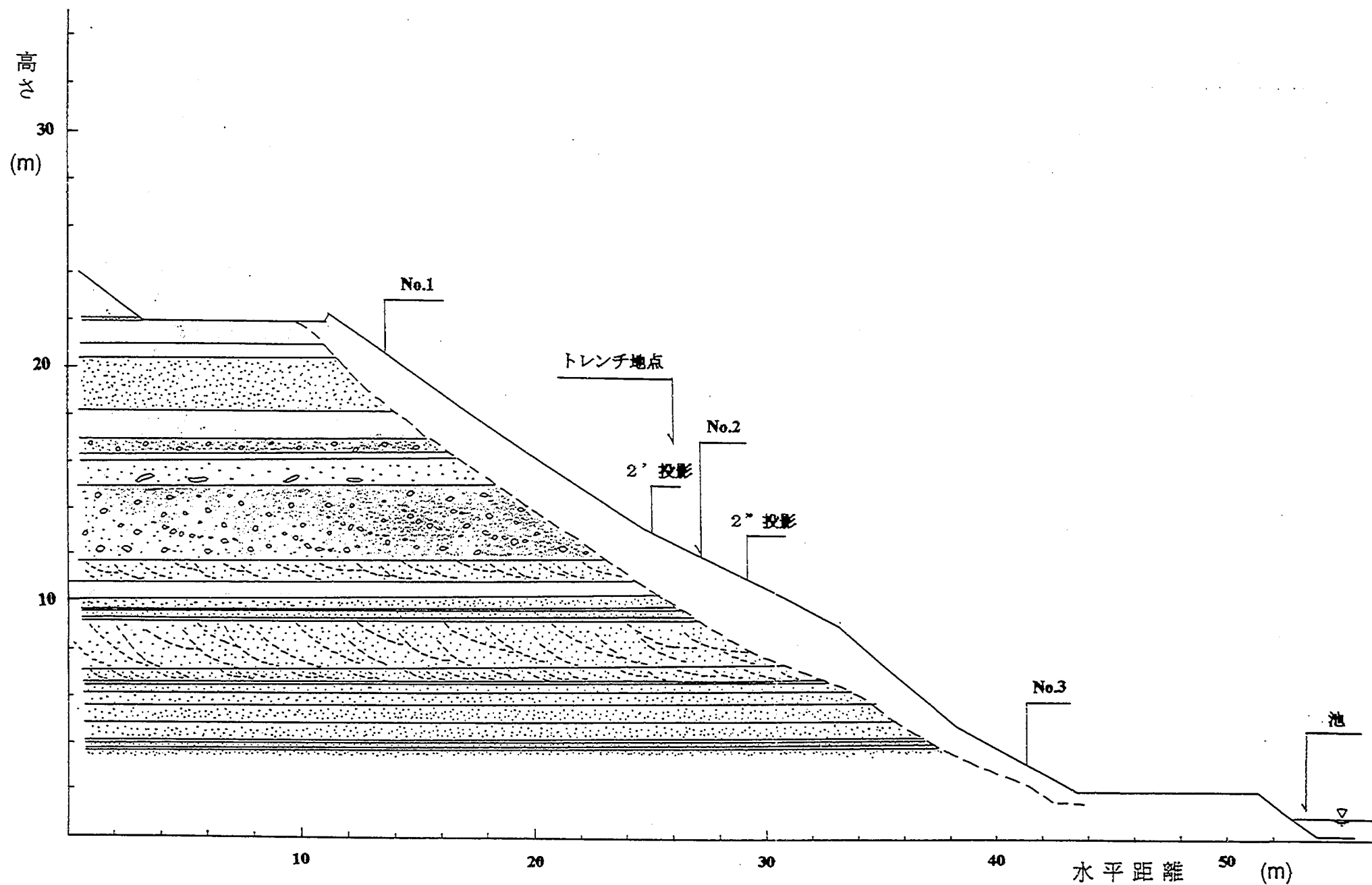


図-4.1.4 地質観察から推定された実験対象斜面断面図

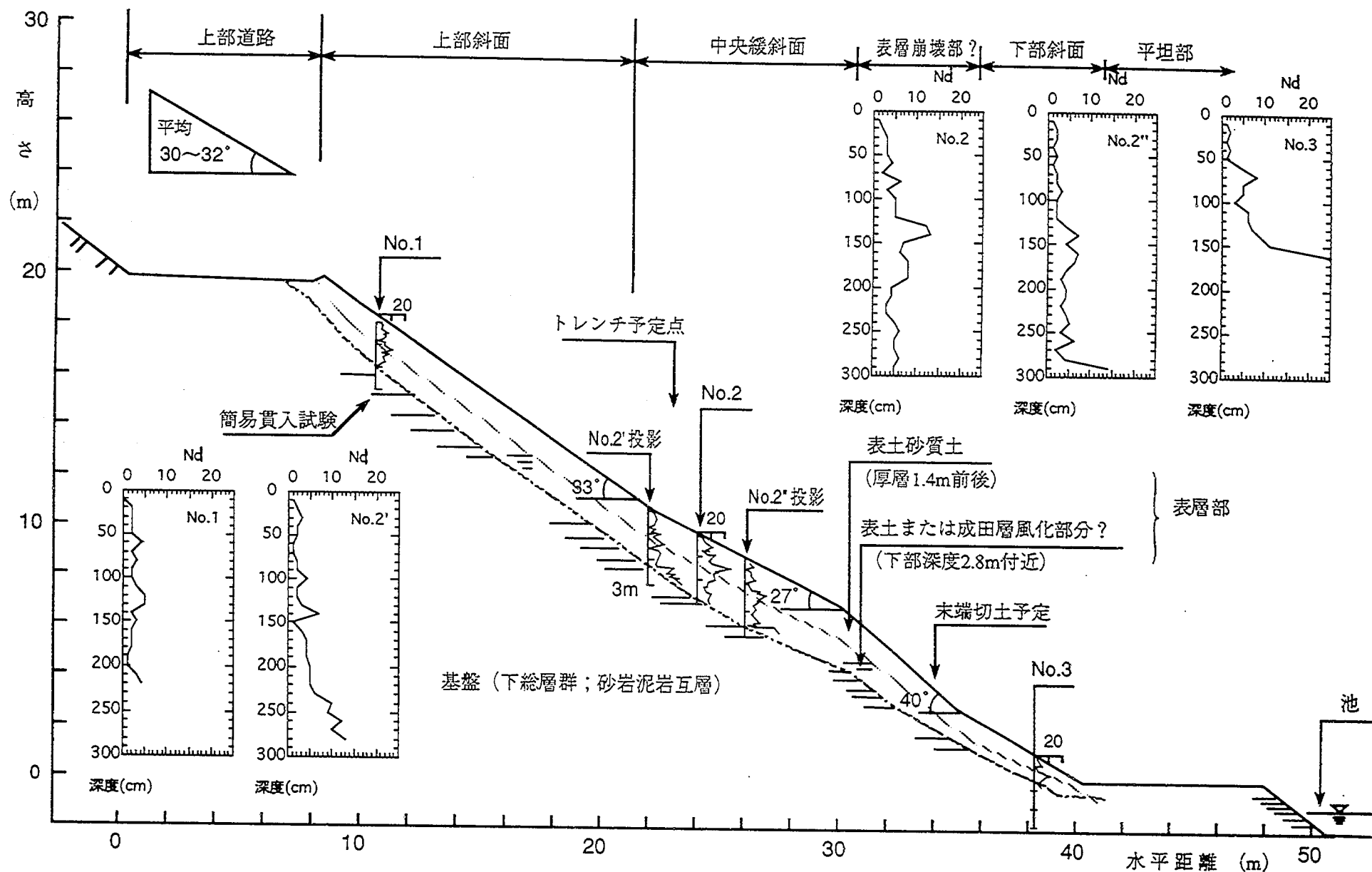


図-4.1.5 土研式簡易貫入試験から推定された実験対象斜面断面図

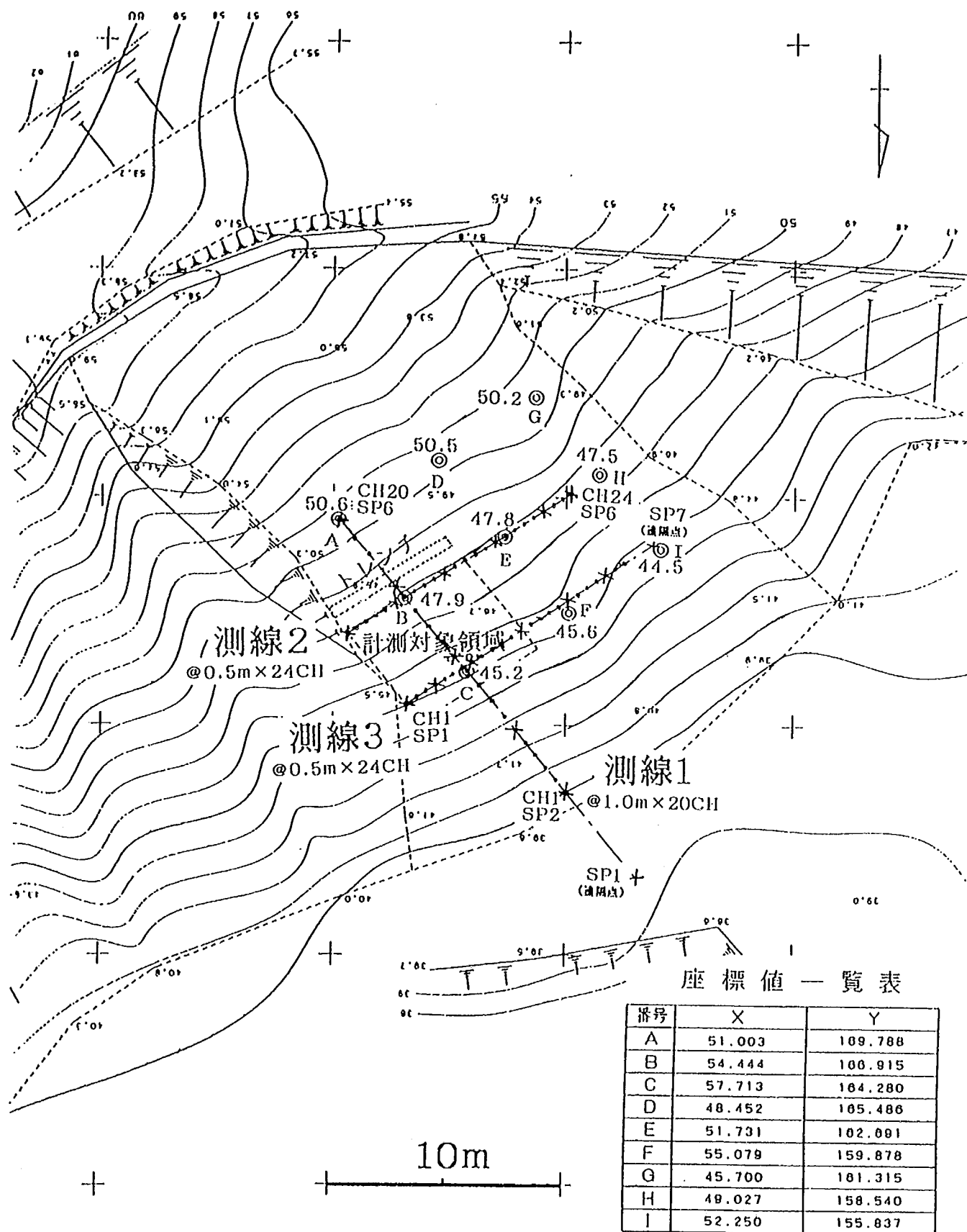


図-4.1.6 弾性波探査計測測線図

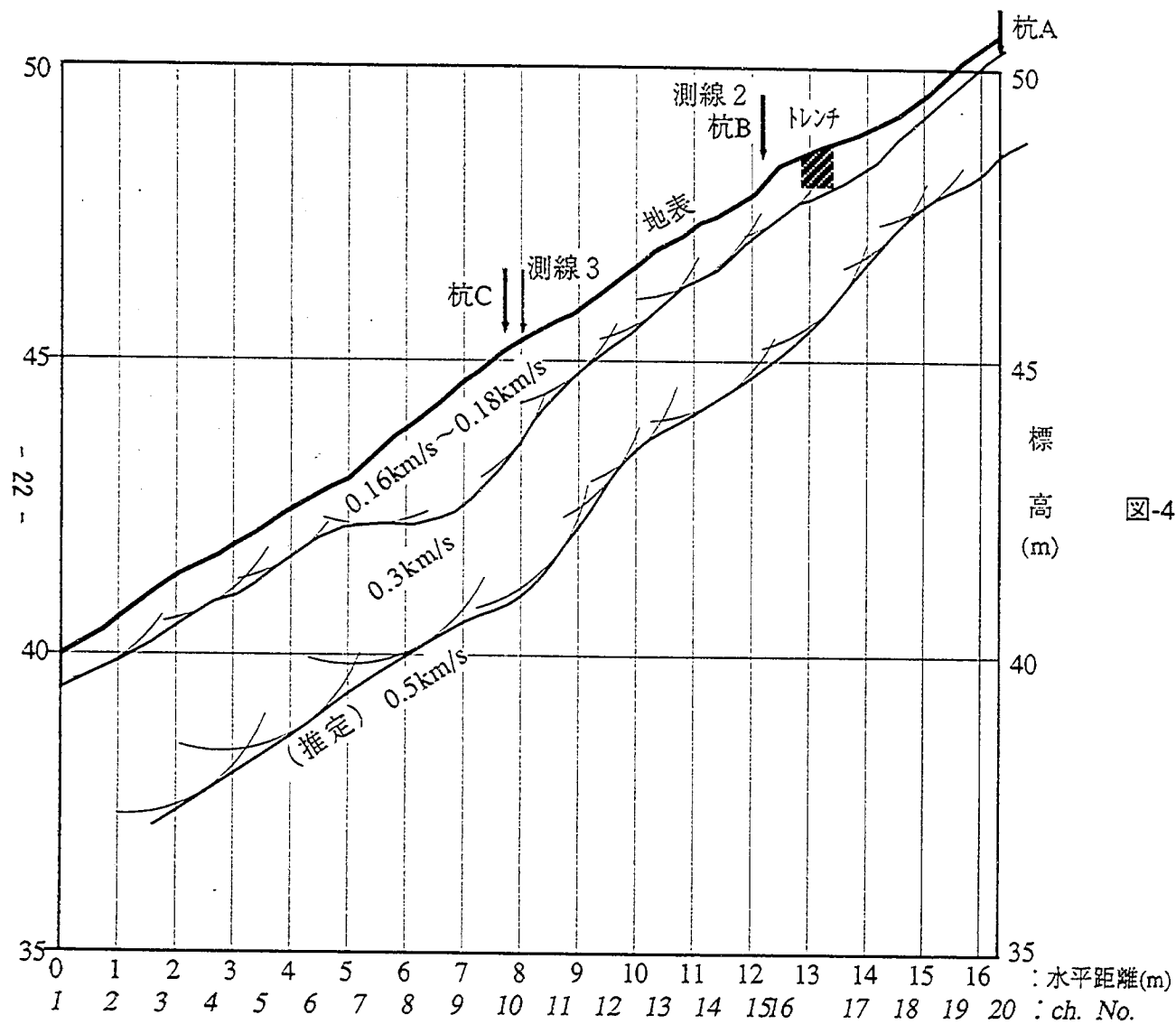


図-4.1.7 弾性波探査から得られた実験対象斜面縦断面図 (測線1)

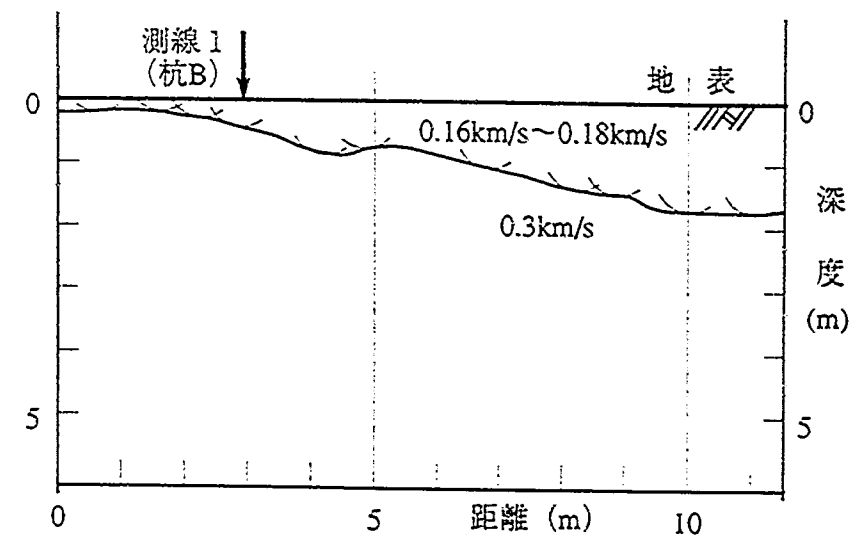


図-4.1.8 弾性波探査から得られた実験対象斜面横断面図 (測線2)

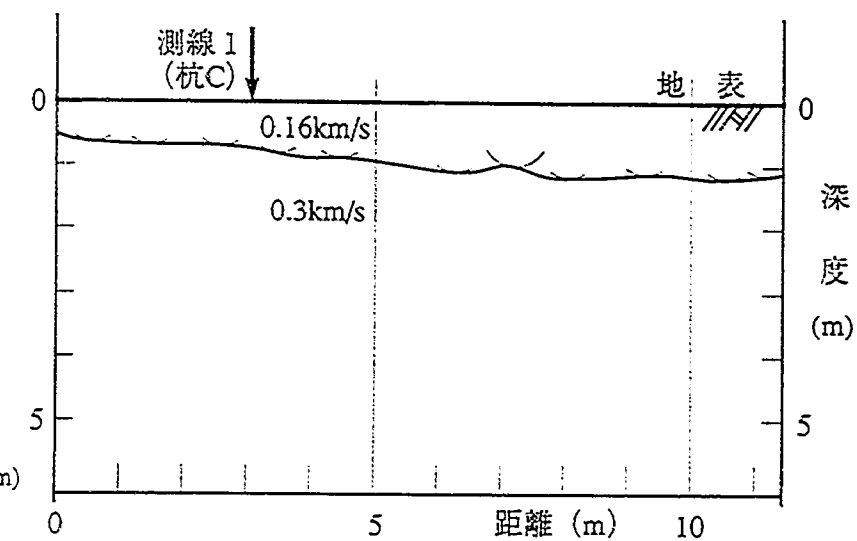


図-4.1.9 弾性波探査から得られた実験対象斜面横断面図 (測線3)

いえる。横断方向では、斜面に向かって左から右に第1層の厚さは増加傾向を示し、特に上側の測線2上でその傾向は著しいことが分かる。

(3) 計測機器の構成

実験斜面に設置された計測機器は大まかに、次の3種類に分けられる。

- ①AE計測装置 : 4種類のAE計測装置を設置。
- ②AE以外の斜面動態計測装置 : 比較用の従来型の変位や気象記録用計器。
- ③映像記録装置 : 24時間記録可能な間欠動作型のビデオ。

これら主要機器の内訳と計測範囲(仕様)および数量を表4.1.5に示す。また、観測機器の全体配置概略図を図4.1.10に、センサおよび計測機器のシステム系統図を図4.1.11に示す。

(4) 計測機器の配置

計測領域およびセンサの配置を示す平面図を図4.1.12、図4.1.13に示す。図中、計測領域は斜面中段の約36m²の範囲を指し、伸縮計3は安全管理用に設置している。同様に、計測領域およびセンサの配置を示す断面図を図4.1.14、図4.1.15に示す。

法面上には、図に示すように計測領域の1m上方に、崩壊を促すための注水用トレンチ(L6.0m×W0.6～0.7m×H0.5～0.8m)が設けられた。トレンチには常時水が供給できるように、水道ホースを延長・固定し、水道メータで注水量の管理を行った。トレンチの構造を図4.1.16に示す。

観測小屋は計測斜面法尻より北西に60m離れた位置に設置された。観測小屋の大きさは、3.6m×1.8mであり、その中にAE計測装置、ビデオデッキ、モニター、パソコン等が配備された。

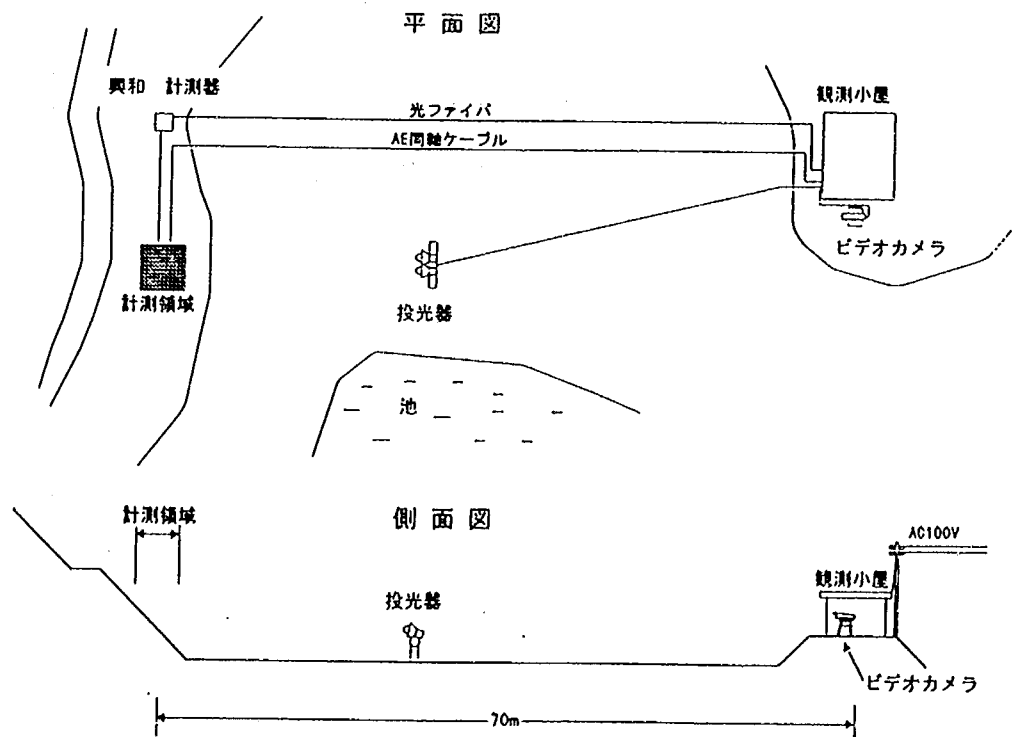


図4.1.10 観測機器の全体配置概略図

表-4.1.5 主要機器の内訳と計測範囲および数量

観測項目	計測対象	計 測 範 囲	数 量
AE計測	高周波AE	60kHz共振型 (AE計測システム MISTRAS)	3個
	高周波AE (土研式)	60kHz共振型 (AE計測システム MISTRAS)	2個
	低周波AE①	20kHz共振型 (AE解析システム MUSIC)	3個
	低周波AE②	25kHz共振型 (AE岩盤崩壊予知システム)	3個
AE以外の 斜面動態計測	伸縮計	測定範囲400mm (0.04mm)	3台
	孔内傾斜計	2軸型 ±5度 (0.0025度)	3個
		1軸型 ±15度 (0.01度)	9個
	水分計	比抵抗測定型 (4極法)	2個
	雨量計	転倒升式 (0.5mm)	1台
	温度計	IC温度センサ (0.1℃)	1個
	記録計	カードロガー24 2ch. (光ファイバー通信)	1台
	自然電位 (SP)	鉛電極2個1組、電極間隔2m (縦方向X, 横Y)	4組
映像記録	ビデオカメラ	電子増感型	1台
	ビデオデッキ	間欠記録型タイムラプスビデオ (2秒1回で10日記録)	1台

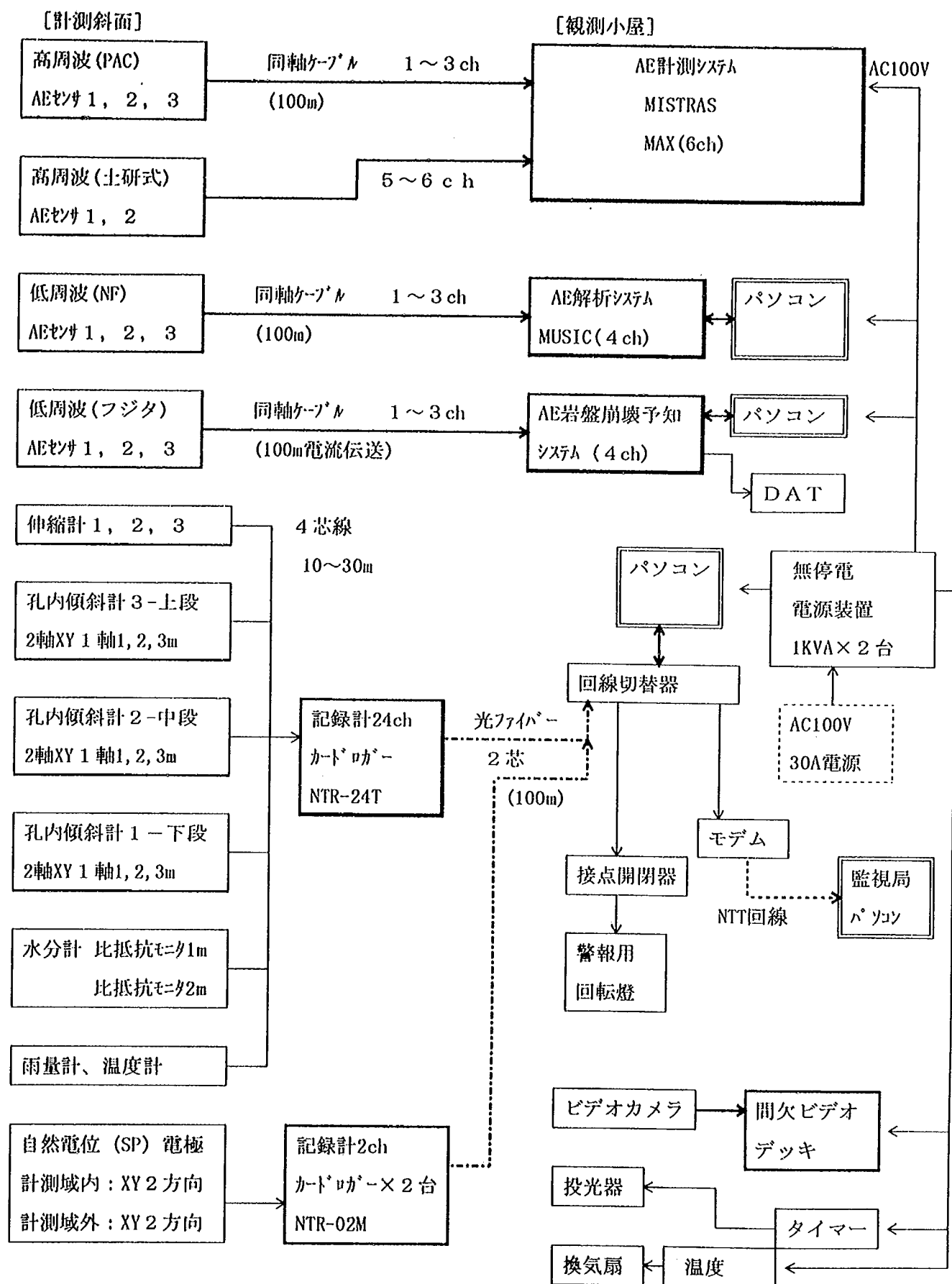


図4.1.11 観測機器の配線系統

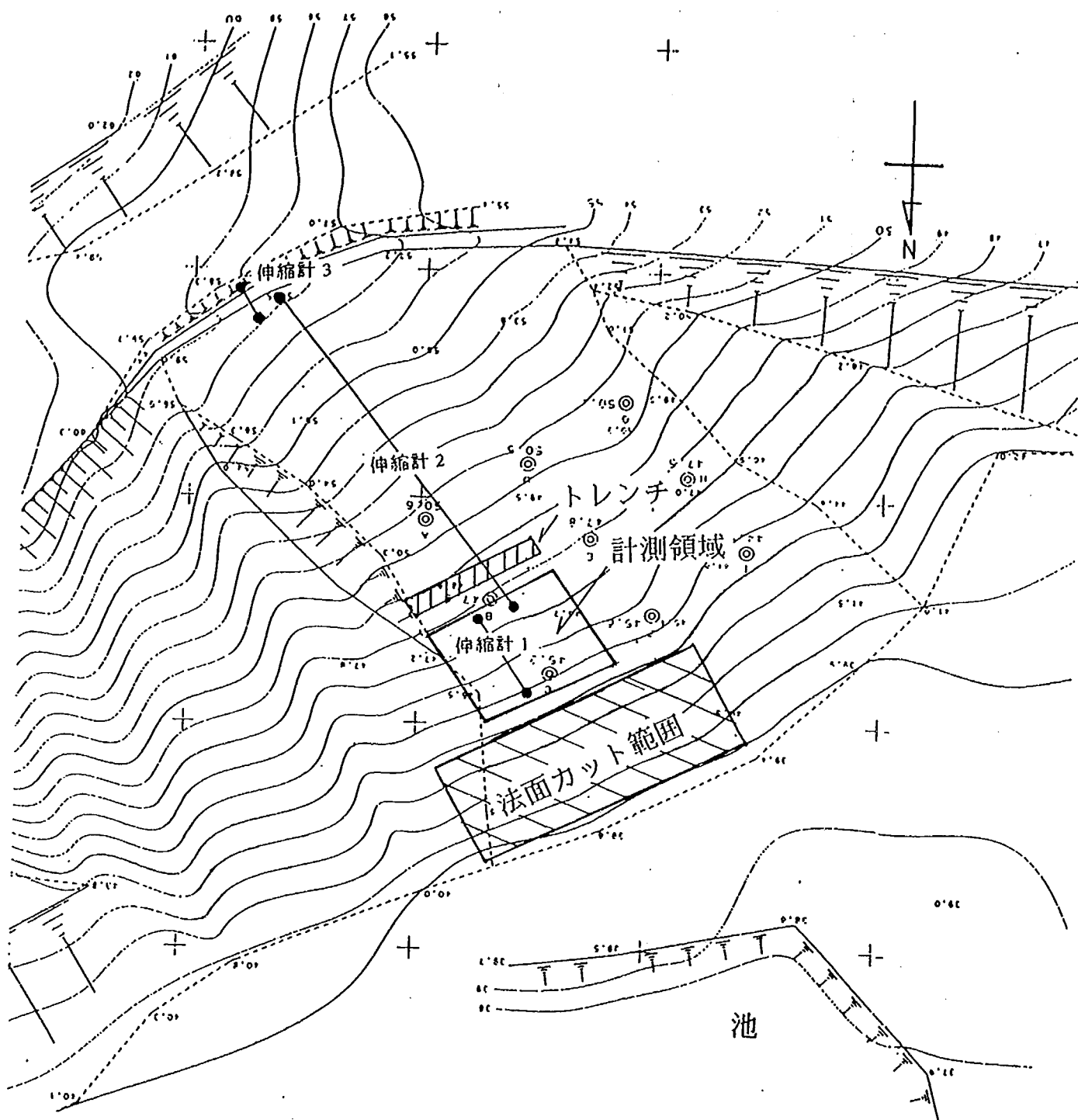


図-4.1.12 計測領域平面図

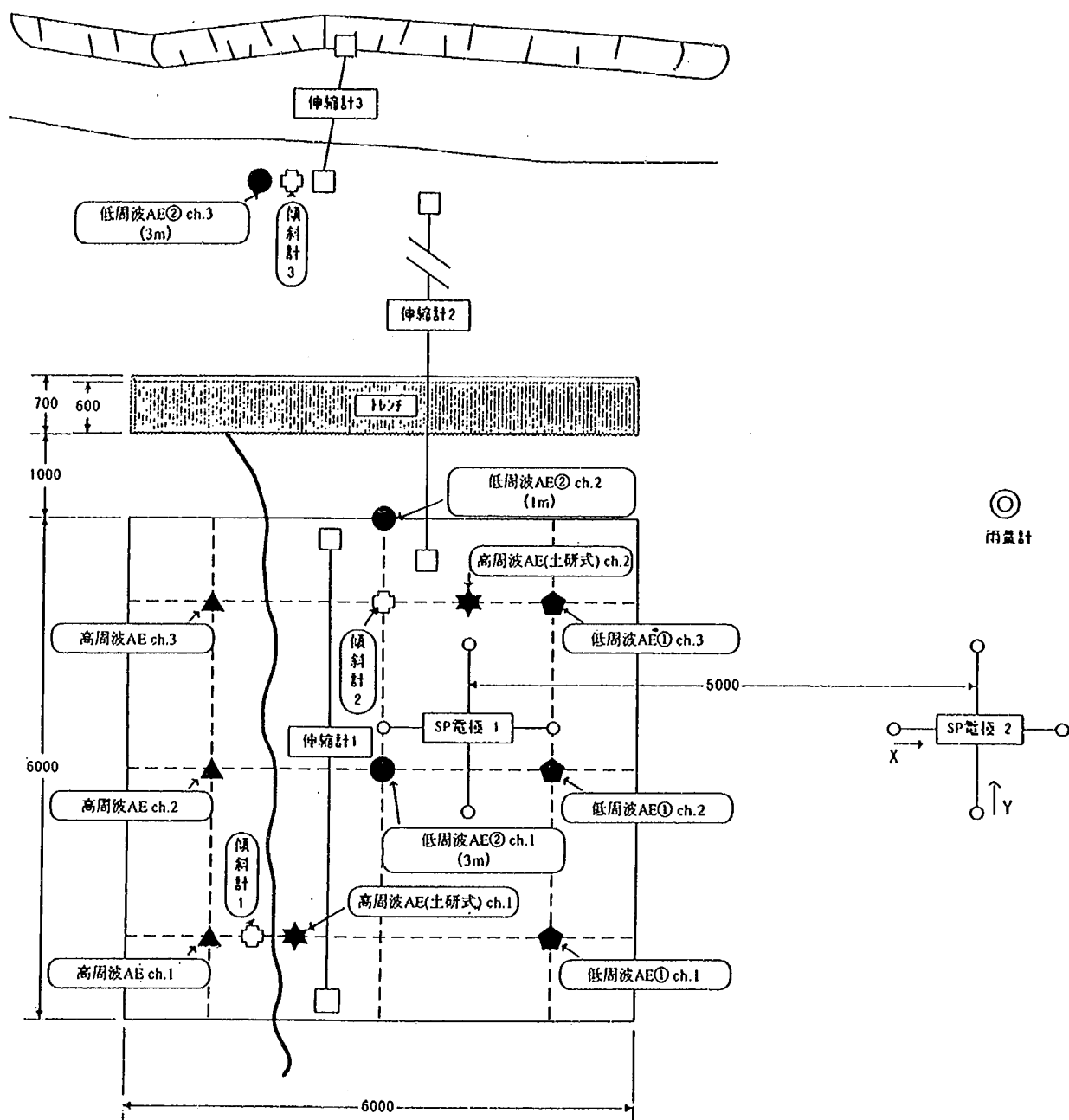


図-4.1.13 センサ配置平面図

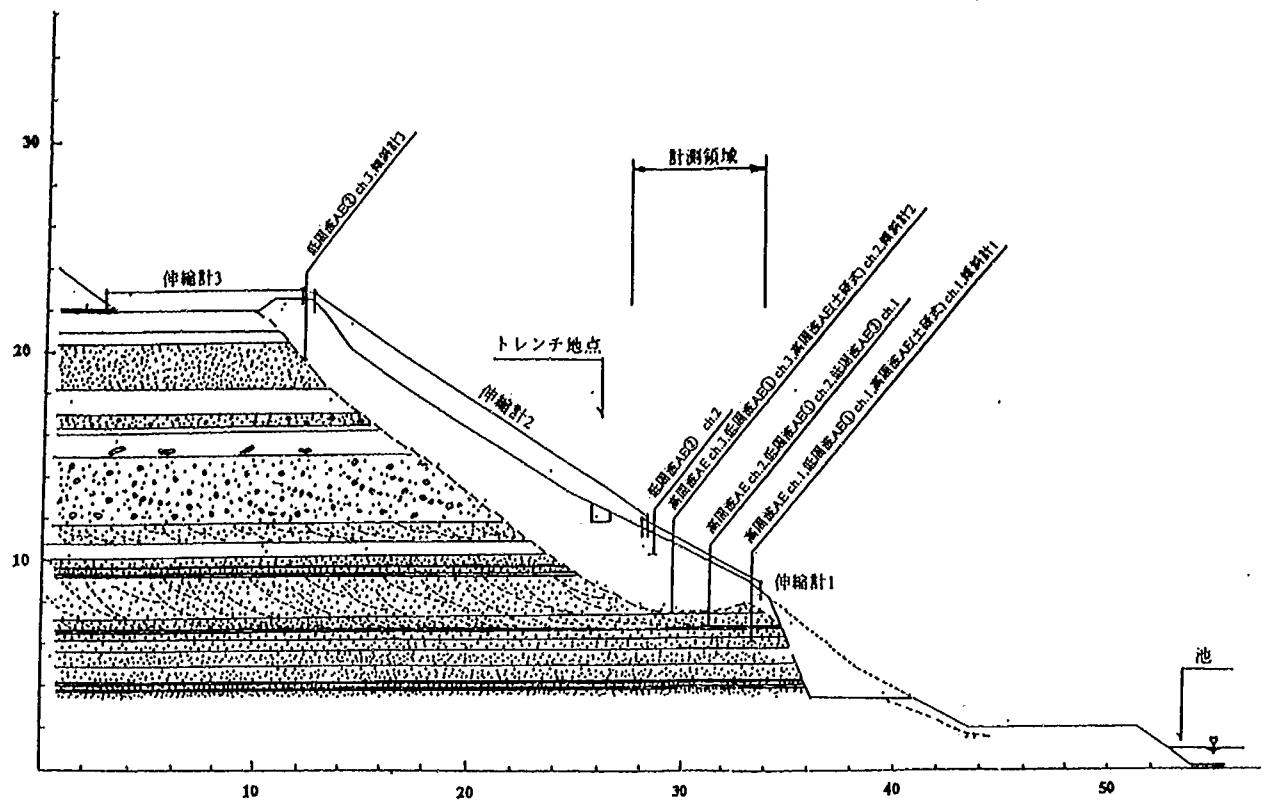


図-4.1.14 計測領域断面図

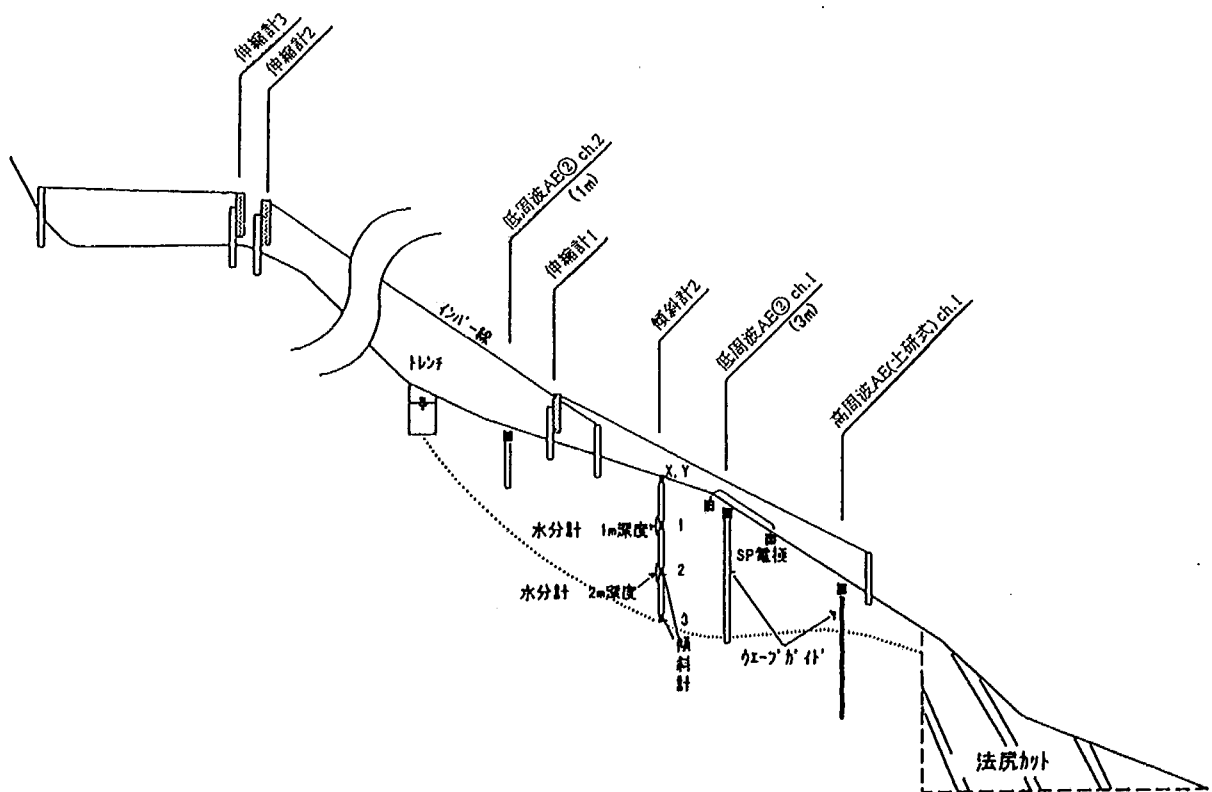


図-4.1.15 センサ配置模式断面図

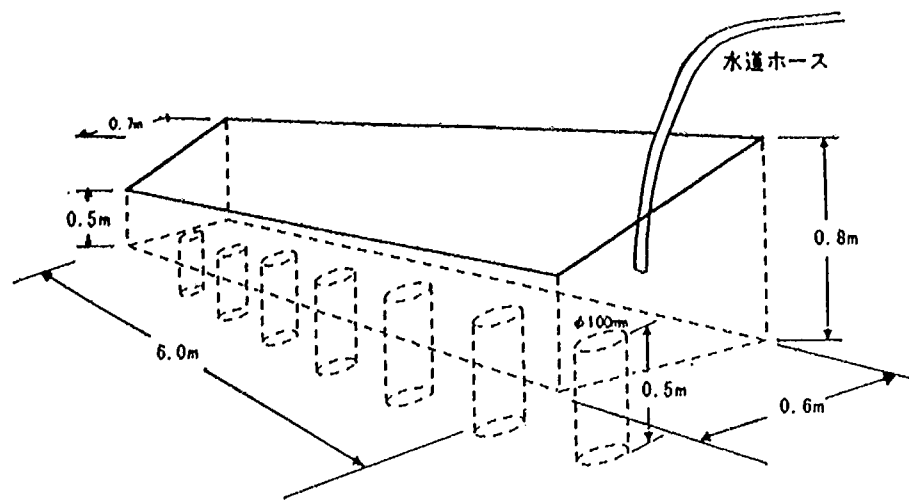


図4.1.16 トレンチの構造

(5) 設置方法

1) AEセンサの設置

①ステンレス製ウェーブガイド

当初、土研式以外のAEセンサについては、長さ3mのウェーブガイドを用い、この先端にAEセンサを取り付けた。ウェーブガイドはステンレス製で、1mもの3本をネジ止め連結したものである。このウェーブガイドの上部先端をハンマで打撃し地盤中に設置した後、AEセンサを設置した。AEセンサは地中に埋まっている状態である。このときウェーブガイドとAEセンサは絶縁されておらず、直接接していた。しかし、その後、高周波AE計測システムおよび低周波AE①計測システムのAEセンサから極めて高振幅の電気ノイズが検知された。そこで、ウェーブガイドとAEセンサの間に絶縁材としてアクリル製小板を挟み、再設置を試みた。この結果、計測に支障となるようなノイズは、実験終了に至るまでほとんど検出されなかった。

一方、低周波AE②計測システムのAEセンサは電流出力型センサであり、ステンレス製ウェーブガイドと直接接している状態でもノイズはほとんど検出されなかった。

②土研式ウェーブガイド

土研式ウェーブガイドとは、耐圧ホース内に銅メッキしたアルミニウムワイヤを挿入し、空間部をステンレススチール綿で埋めたものである。ワイヤの上部先端は、渦巻き上にしてAEセンサと接触させる。土研式ウェーブガイドは軟質であるため、あらかじめ所定の深度までハンドオーガにより掘削し、ウェーブガイドを埋設する。埋設については砂詰めを行い、空隙を充填した。このとき、ウェーブガイドのアルミニウムワイヤとAEセンサは直接接しているが、耐圧ホース自体はビニールであるため、大地との絶縁性は一応確保されていた。したがって、土研式ウェーブガイドについては、ステンレス製ウェーブガイドの場合に見られたような電気ノイズは、当初、検出されなかった。しかしながら、時間の経過とともに電気ノイズが徐々に検出されるようになり、AEセンサ設置後2日経過した時点で極めて大振幅のノイズが連続的に検出される事態にいたり、通常のAE計測が全く行えない状態となった。そこで、ステンレス製ウェーブガイドと同様に、絶縁材を挟み、新たなAEセンサと交換する処理を行ったが、再度、同様の故障が発生したため、これ以上のAEデータの取得を諦めざるをえなかった。

2) 変位センサの設置

傾斜計は1mの塩ビパイプ内にセットされており、あらかじめ所定の設置深度までハンドオーガにより掘削を行い、地上で3本連結した後、孔内に挿入・設置される。埋設時には、砂詰めにより空隙充填が行われた。

(6) 実験経過と人工崩壊

観測経緯は分冊に示す観測日誌の通りである。基本的には梅雨の自然降雨による崩壊を目指したが、崩壊を促進するために、①法尻カット、②トレンチ注水、③人工放水の作業を行った。

法尻カット作業はバックホウにより行われ、その掘削規模は幅10m×奥行き5m×高さ5m程度で、排除土量は約100m³となった。法尻カット後、斜面末端付近に小規模な崩壊が確認されたものの、対象斜面全体が不安定な状態になるまでには至らなかった。

次に、トレンチ注水が以後、実験終了時まで行われた。この際、気象条件、対象斜面の変状、トレンチ内の水位等の状況に併せて、注水量が変更されている。

最後に、人工崩壊の最終手段として、対象斜面下の溜池の水を利用し、エンジンポンプでこれを吸い上げ、斜面の横から斜面上部と法尻カット部の前面めがけて人工放水が行われた。人工放水は、①7月11日13時53分～17時16分、②7月30日13時28分～16時44分、③7月31日9時29分～12時30分の計3回実施された。

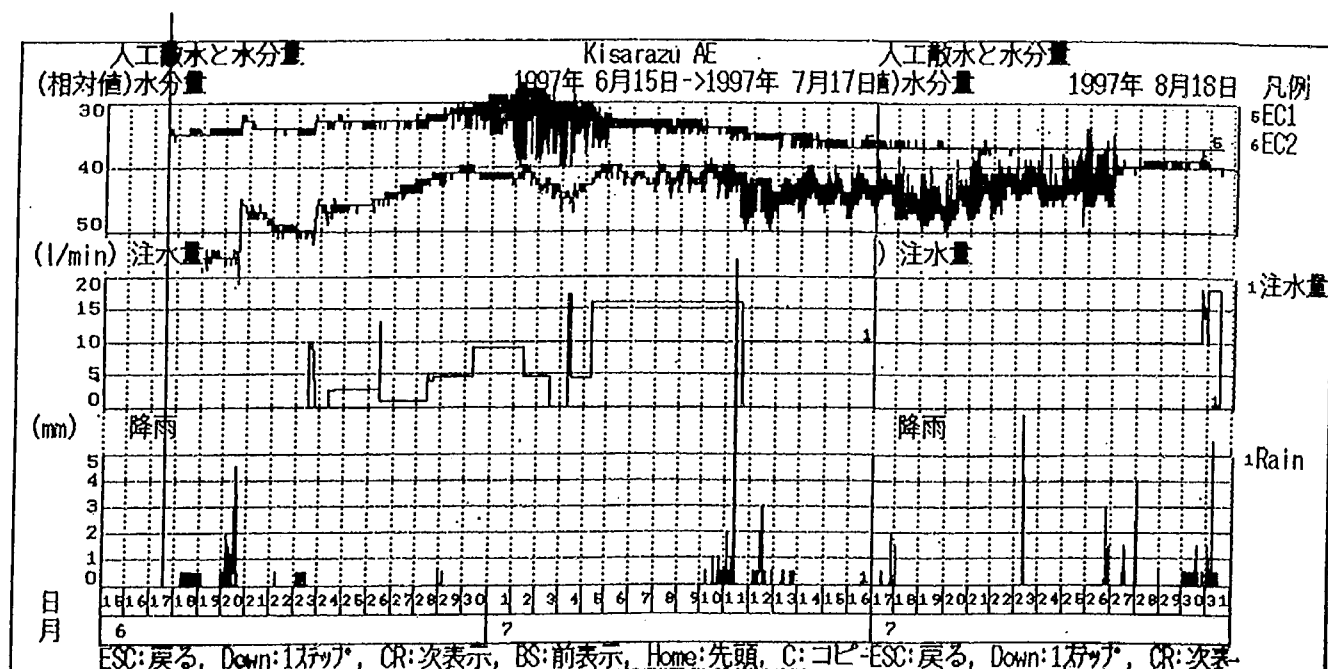


図-4.1.17 降雨とトレンチ注水量の変化



写真-4.1.1 法尻カット前の状況

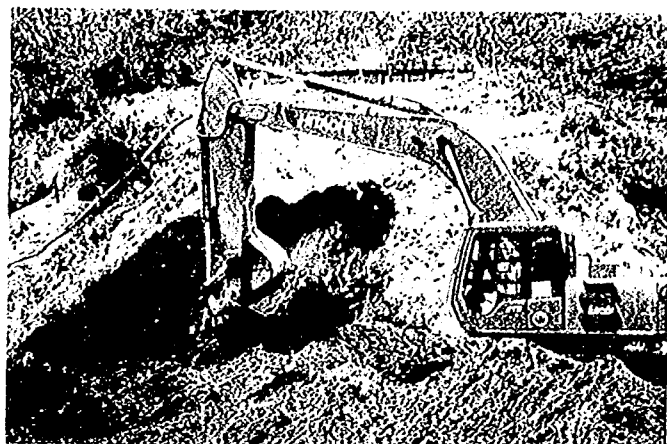


写真-4.1.2 法尻カット作業

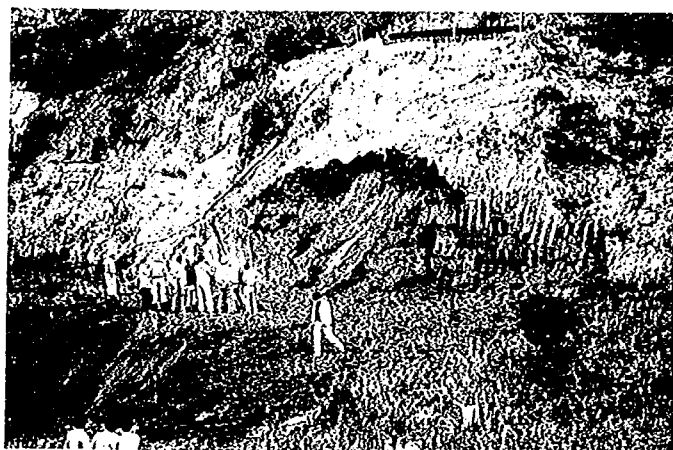


写真-4.1.3 法尻カット後の状況

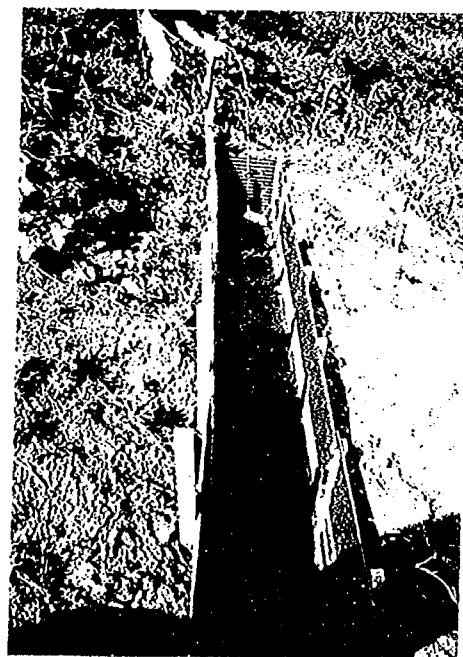


写真-4.1.4 トレンチ注水状況



写真-4.1.5 人工放水状況

4.1.2 計測結果

(1) 6月に計測された斜面変状およびAEの発生挙動

AE以外の斜面動態計測データを図-4.1.18に、高周波AEの発生挙動を図-4.1.19に、また低周波AE①と低周波AE②の発生挙動をそれぞれ図-4.1.20、図-4.1.21に示す。

木更津土砂斜面におけるAE以外のセンサの連続計測は、17日午後から開始した。計測開始から本月末までに2回の台風が襲来しているが、この台風に伴う降雨により、それぞれ70mm（20日）、2mm（29日）の降水が計測されている。さらに、24日以降はトレンチに3 L/min前後で連続給水を実施している。

伸縮計および傾斜計は、気温と連動して変動しているものの、設置以降、対象斜面が下方に1～2mm程度、ズレ落ちている傾向が読みとれる。特に、20日の台風以降の傾斜計2（中）でこの傾向が顕著である。

なお、24日に伸縮計3（上）が大きく変化しているが、インバー線を再設置したことによるもので、斜面の動きとは無関係である。

次に、高周波AEセンサで検出されたAEの発生挙動に着目する。土研式ウェーブガイドに設置したタイプ（ch.4～6）は、試験開始後数日でセンサに破損事故が発生した。また、18日～26日に期間については、上記の影響か、ステンレス製ウェーブガイドに設置したAE（ch.1～3）の検出量も極端に少ないことがわかる。これ以降、28日0～6時（ch.2）、29日0～6時（ch.2,3）にそれぞれ際だったピークが見られる。このうち、29日に関しては先に記した台風による降雨ノイズを検出したものと考えられる。しかし、28日のピークに関しては、降雨もないことから発生原因は不明である。しかしながら、低周波AE①もこの時刻よりやや早い時刻（27日18～24時）で多量のAEを検出している他、伸縮計2（中）もこの時間帯に異常な変化を示している点は注目される。ただし、この時間帯でオシロスコープ上に異常な波形が観察されており、電氣的なノイズの可能性も否定できない。

低周波AE①は、18日にセンサ設置が行われたが、設置後、ノイズが多くなったため、ch.1（下）については19日に、ch.2,3に関しては20日にしきい値の再設定が行われている。このため、20日以降のAE発生数が一旦、減少した。

これ以降の低周波AE①の発生ピークを見ると、降雨のあった23日および29日の台風時に僅かに確認できる。この他にも、26日12時頃、27日午後に大きなピークが見られる。このうち、26日のピークは、高周波AEセンサ再設置の際に発生したものであり、斜面の挙動とは直接関係ないことがわかっている。しかし、27日のピークについては発生原因が不明である。

低周波AE②の発生ピークは、ほぼ降雨期間と重なっており、特に20日の台風時の発生が顕著である。また、降雨期間以外にも幾つかAE発生のピークが見られる。このうち、24日のch.3のピークについては伸縮計3（上）を再設置した時点で発生したものであり、26日のピークについては、低周波AE①と同様、高周波AEセンサ再設置の際に発生したものであることがわかっている。しかし、30日0時直前にch.1で発生しているピークについては降雨によるものでなく、発生原因は不明である。崩壊が発生しやすい最下部（ch.1）でのみ検出していることから、小崩落を検出した可能性もあると考えられる。

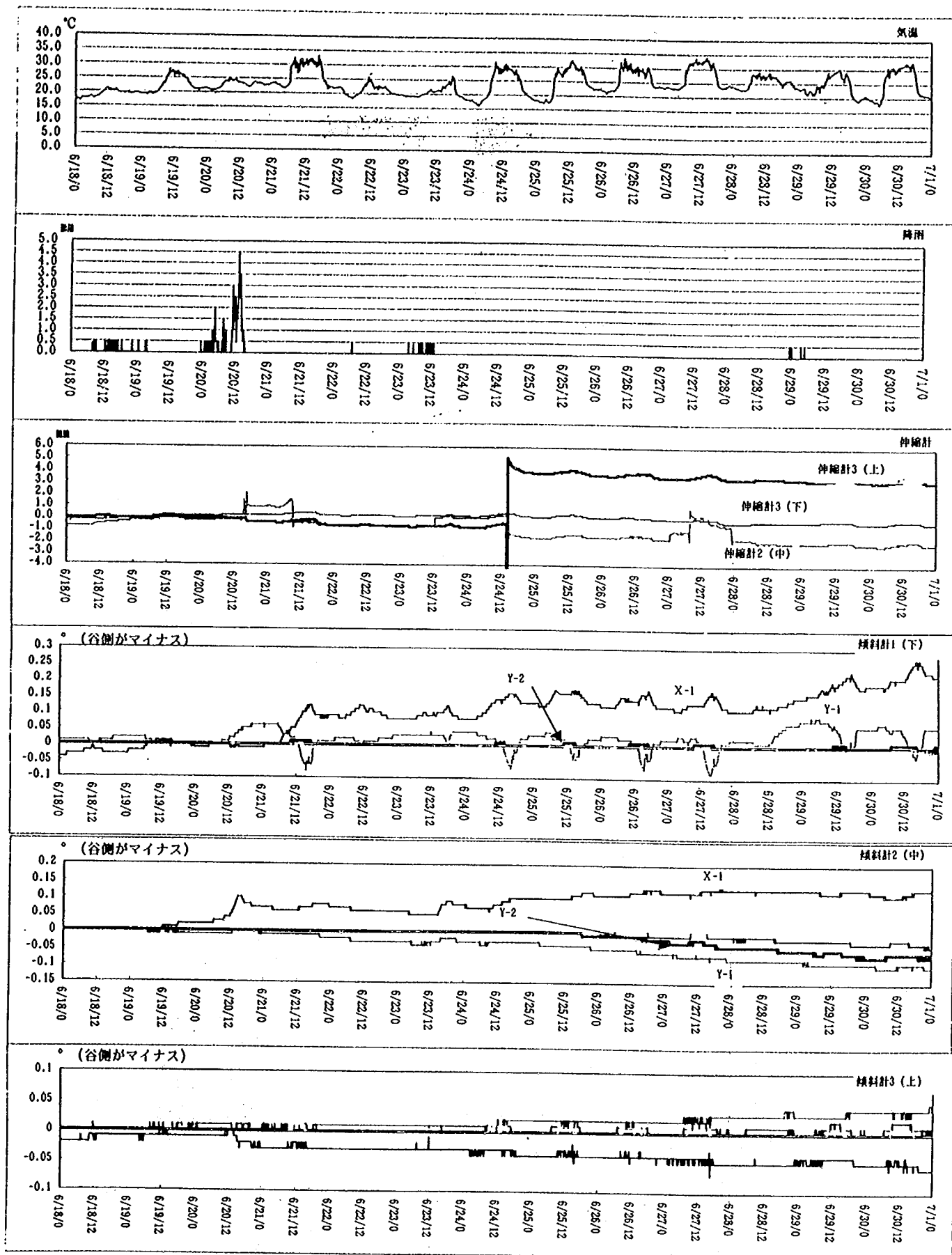


図-4.1.18 木更津土砂斜面 AE以外の斜面動態計測データ (6月)

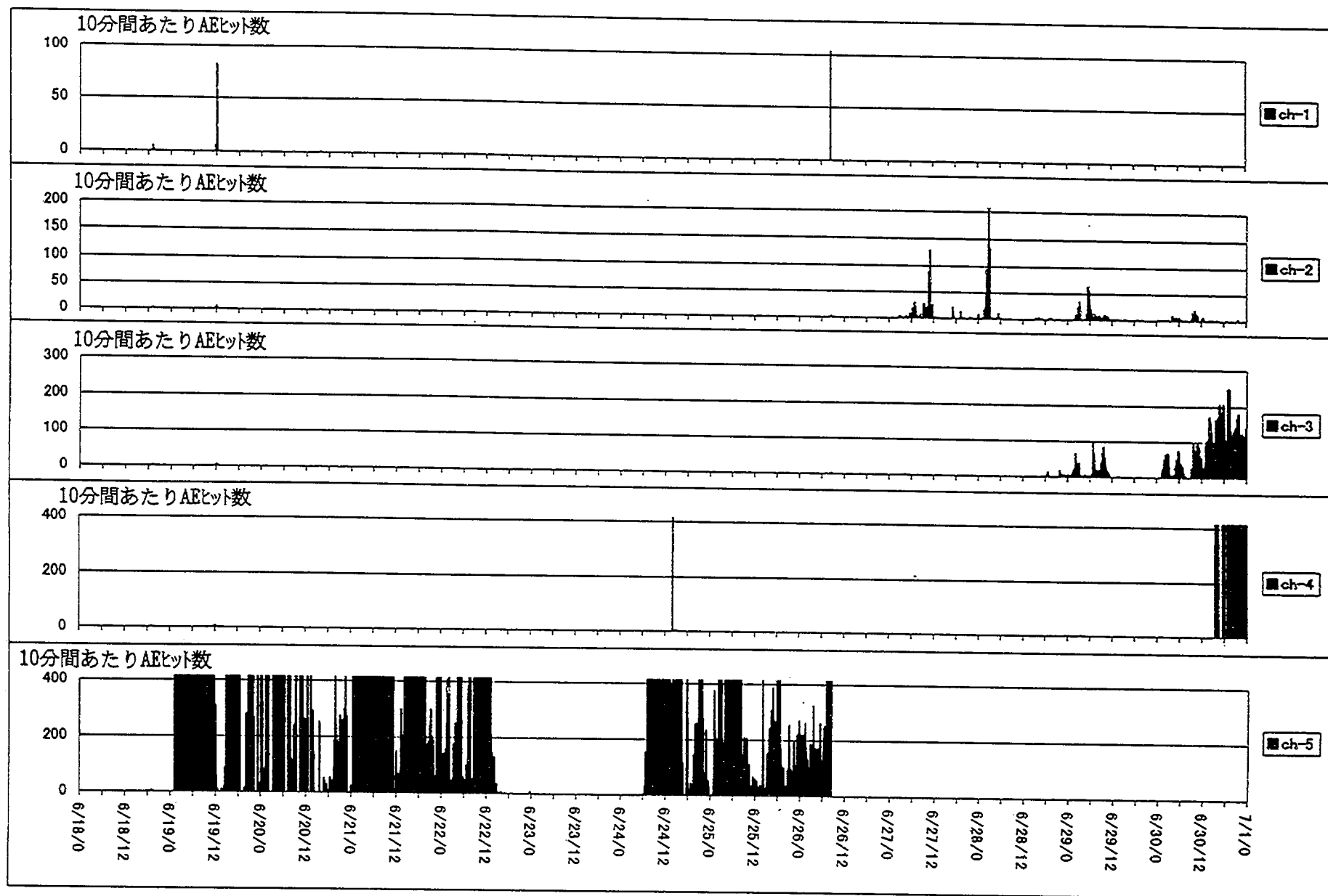


図-4.1.19 木更津土砂斜面 高周波AEの発生挙動 (6月)

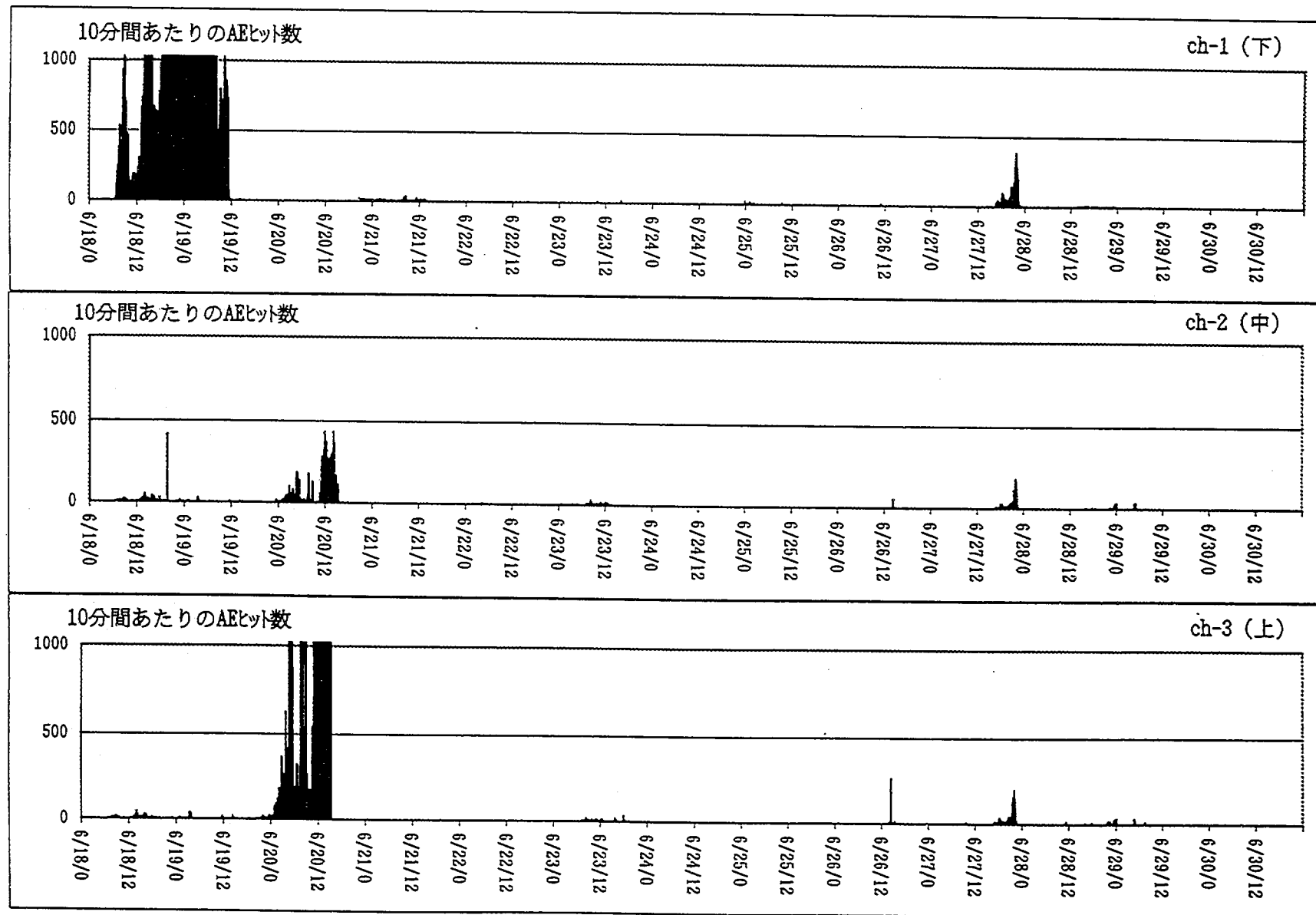


図-4.1.20 木更津土砂斜面 低周波AE①の発生挙動 (6月)

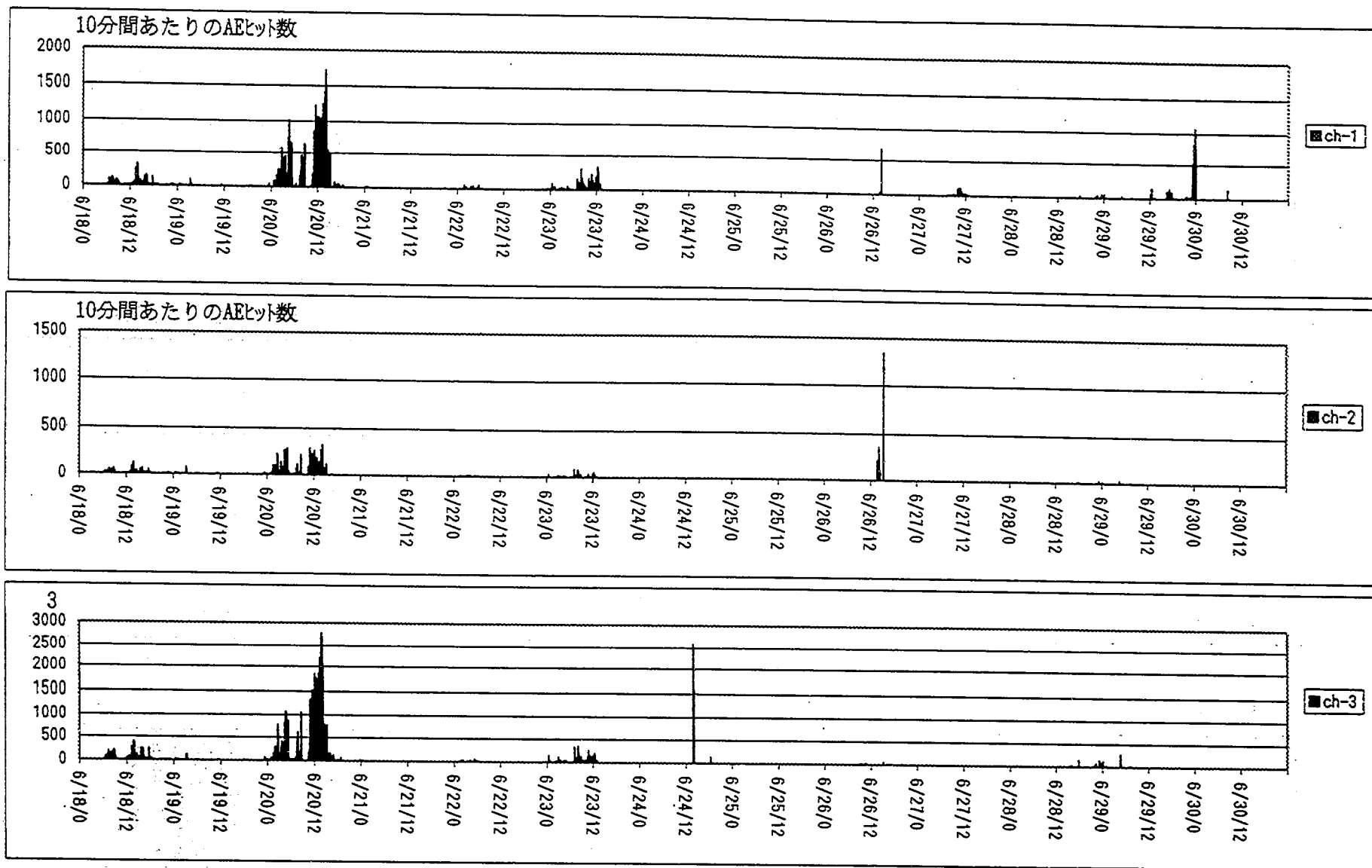


図-4.1.21 木更津土砂斜面 低周波AE②の発生挙動 (6月)

(2) 7月に計測された斜面変状およびAEの発生挙動

AE以外の斜面動態計測データを図-4.1.22に、高周波AEの発生挙動を図-4.1.23に、また低周波AE①と低周波AE②の発生挙動をそれぞれ図-4.1.24、図-4.1.25に示す。

7月の千葉県南部は全般的に降水量が少ないカラ梅雨傾向となった。このため、期待した斜面の不安定化は認められなかった。そこで、11日13時頃から17時頃にかけて対象斜面下部にエンジンポンプによる放水を行い、人工的に斜面の不安定化を促進させることとした。このエンジンポンプによる放水によって斜面の最下部が約1mの幅で崩落した。

10日から降り続いた降雨により、伸縮計1（上）に関して、ポンプ放水以前に1mm程度下方に斜面が移動する傾向が認められ、ポンプ放水直後にはこの傾向が顕著となっている。伸縮計3（下）については、11日19時半頃に伸縮計を固定した杭が倒れ落ちて計測不能となっている。また、対象斜面最下部に設置した傾斜計1（下）もポンプ放水直後から土砂が下方に移動する傾向を顕著に示すようになり、12日14時頃崩れ落ちている。しかし、この他の伸縮計、傾斜計には顕著な動きはなく、土砂の移動は斜面下部の局部的なものに限られ、対象斜面全体を不安定化させるに至らなかったと考えられる。

11日のポンプ放水以降、20日間、対象斜面の計測を継続したが、斜面に設置したセンサに大きな変化は認められなかった。そこで、7月30～31日に、再度、エンジンポンプによる放水を実施し、強制的に斜面を崩壊させた。

なお、2日に伸縮計2（中）が大きく変化しているが、これはインバー線を再設置したことによるもので、斜面の動きとは無関係である。

次に、高周波AEセンサで検出されたAEの発生挙動に着目する。大きなAEの発生ピークとしては、10日12時～11日12時、12日12時～13日0時、17日12時～18日0時、23日12時頃、26日12時～27日0時、28日0時頃、30日～31日の7カ所が挙げられる。しかし、これらのピークはいずれも降雨期間と重なっており、検出しているAEのほとんどが降雨によるノイズであり、僅かに斜面の動態を表すものもある可能性はあるが、現時点における分離は困難と判断される。また、降雨時以外でもAEを検出している時間帯はあるが、降雨時のAEに比較して、量的に少ないため個別の検討はできない。

低周波AE①も高周波AEと同様に、降雨時と連動して大きなAE発生ピークがあり、降雨ノイズによるものと考えられる。しかし、降雨期間以外にも20日12時～22日12時までかなり長い期間にわたり、AEが発生している時間帯もあり、傾斜計2（中）が異常変動をしている期間とも重なっていることから、何らかの変動を示している可能性もあると考える。

同様に、低周波AE②のAE発生挙動も降雨の発生と極めて類似した傾向を示しており、降雨ノイズの影響を強く受けていることが明らかである。しかし、25日以降、ch.1,3において、降雨時のAE発生数が減少しており、また、最終崩壊時のAEもほとんど検出していないことから、7月後半からセンサが異常をきたしていた可能性もあると考える。

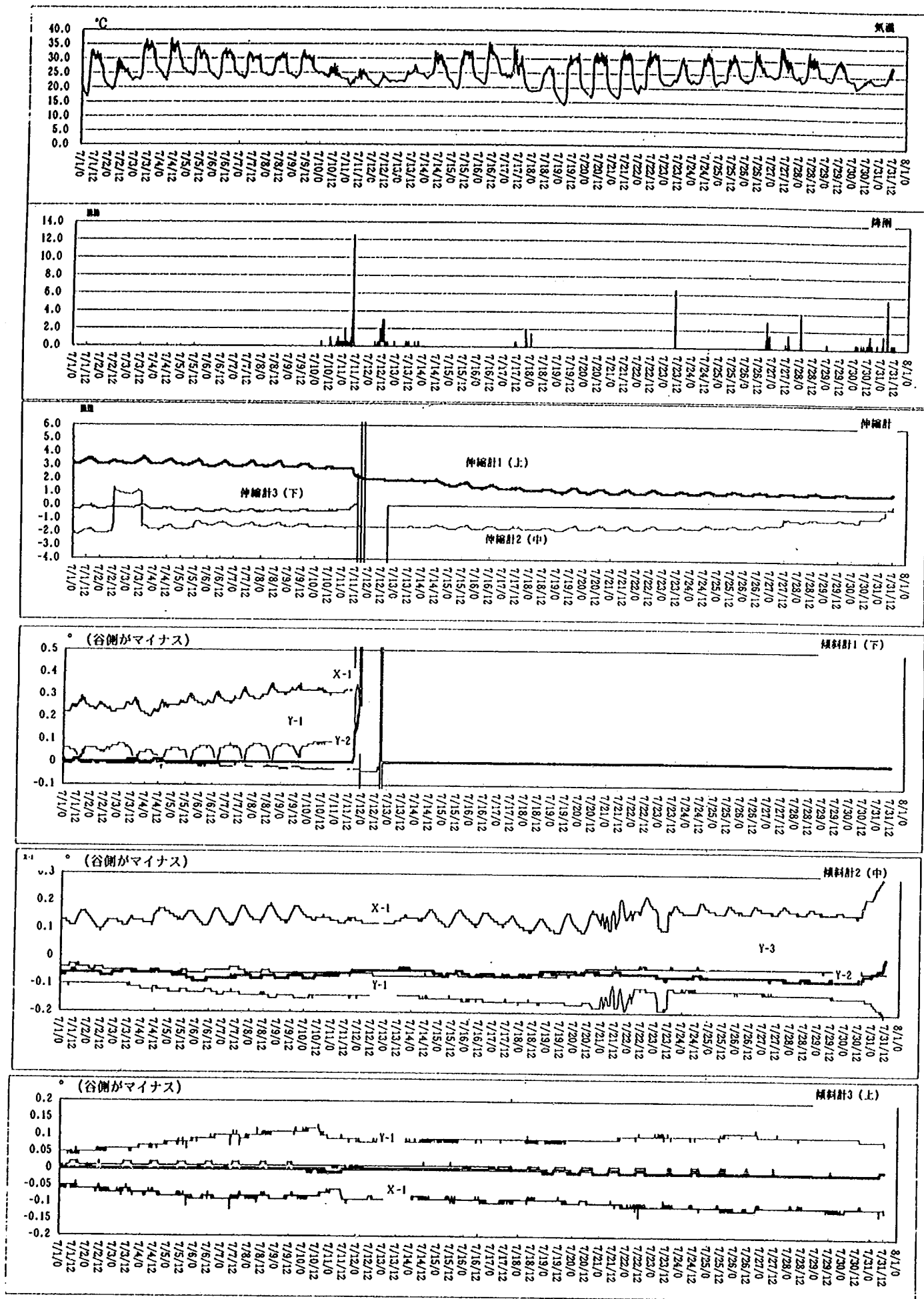


図-4.1.22 木更津土砂斜面 AE以外の斜面動態計測データ (7月)

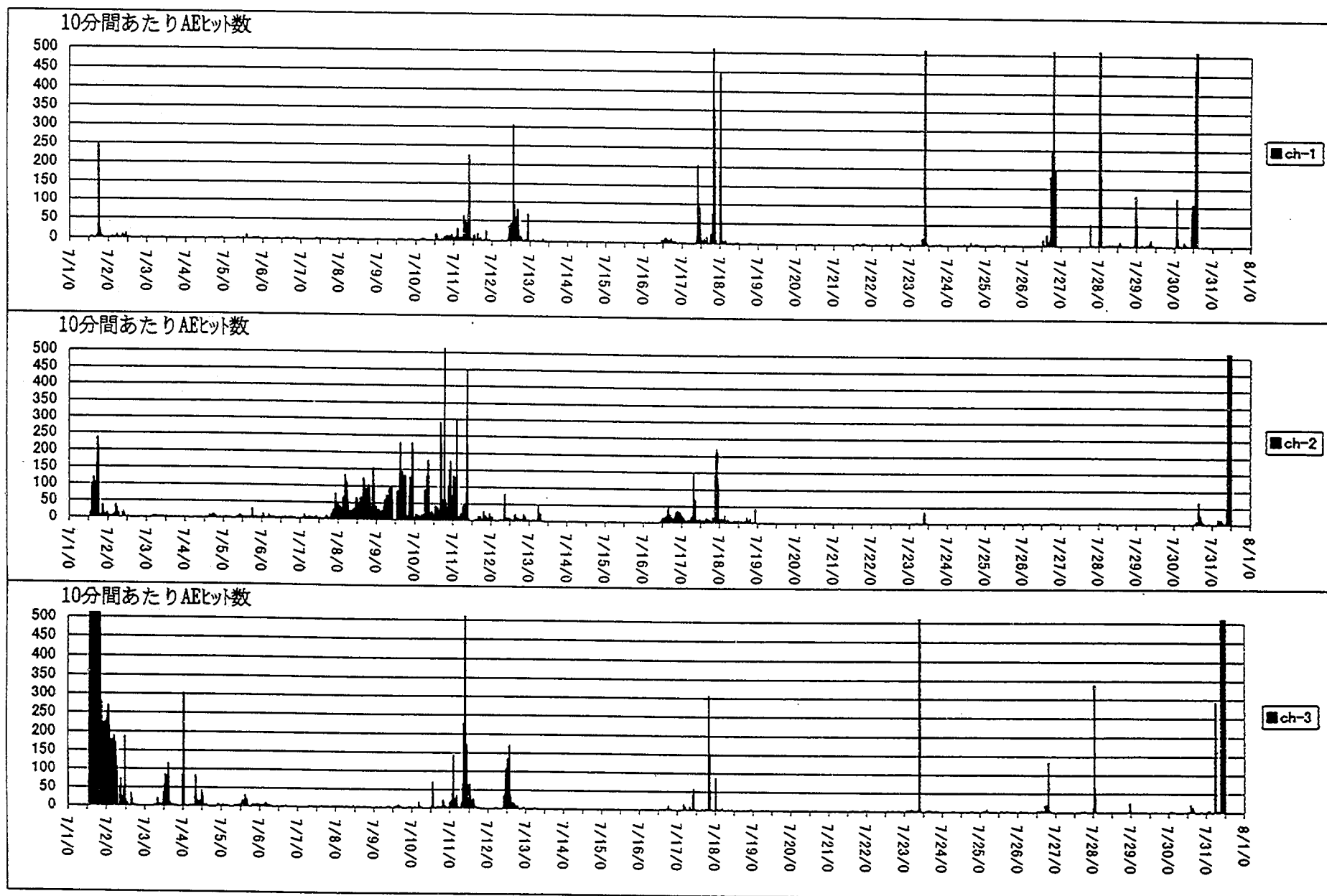


図-4.1.23 木更津土砂斜面 高周波AEの発生挙動 (7月)

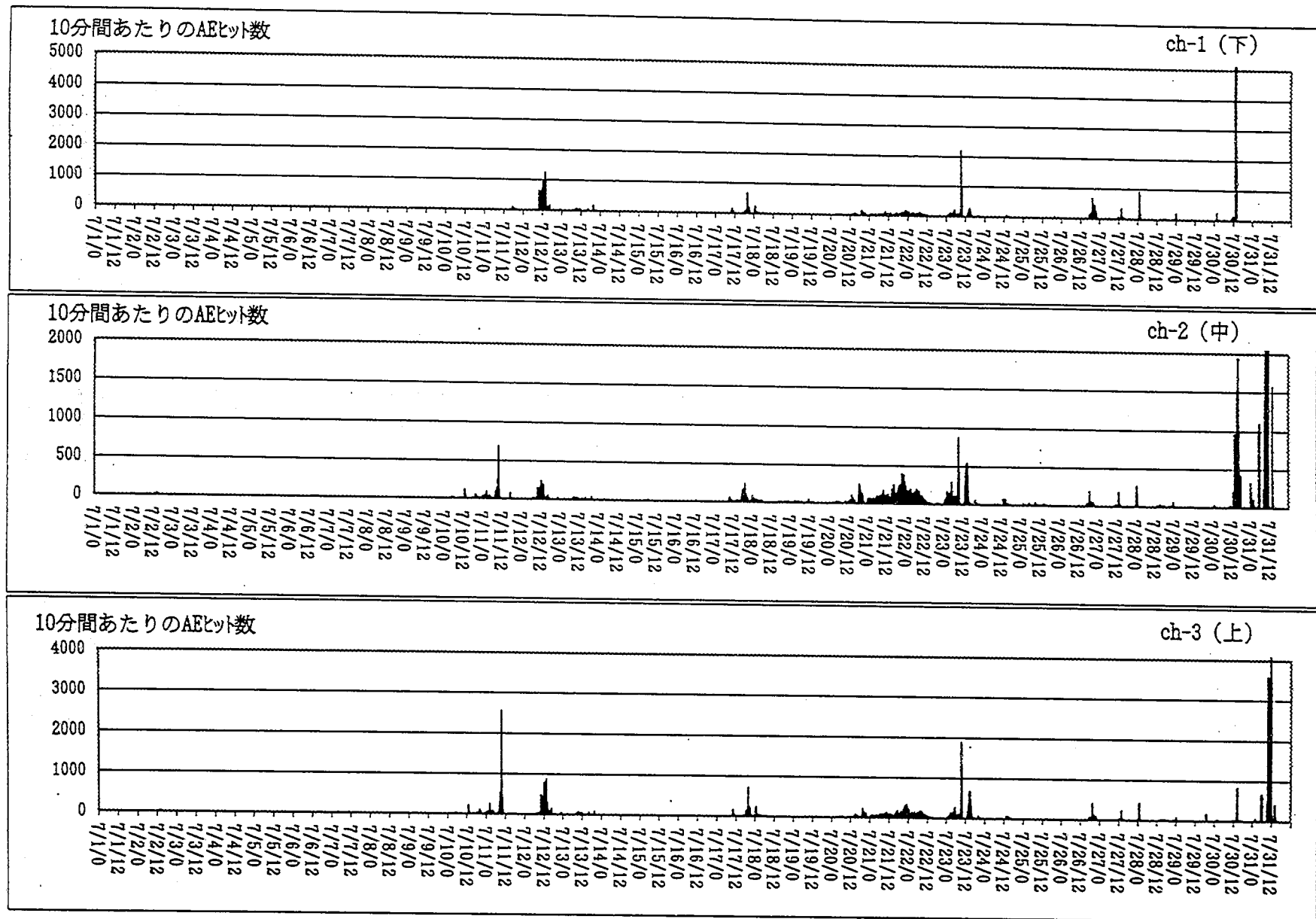


図-4.1.24 木更津土砂斜面 低周波AE①の発生挙動 (7月)

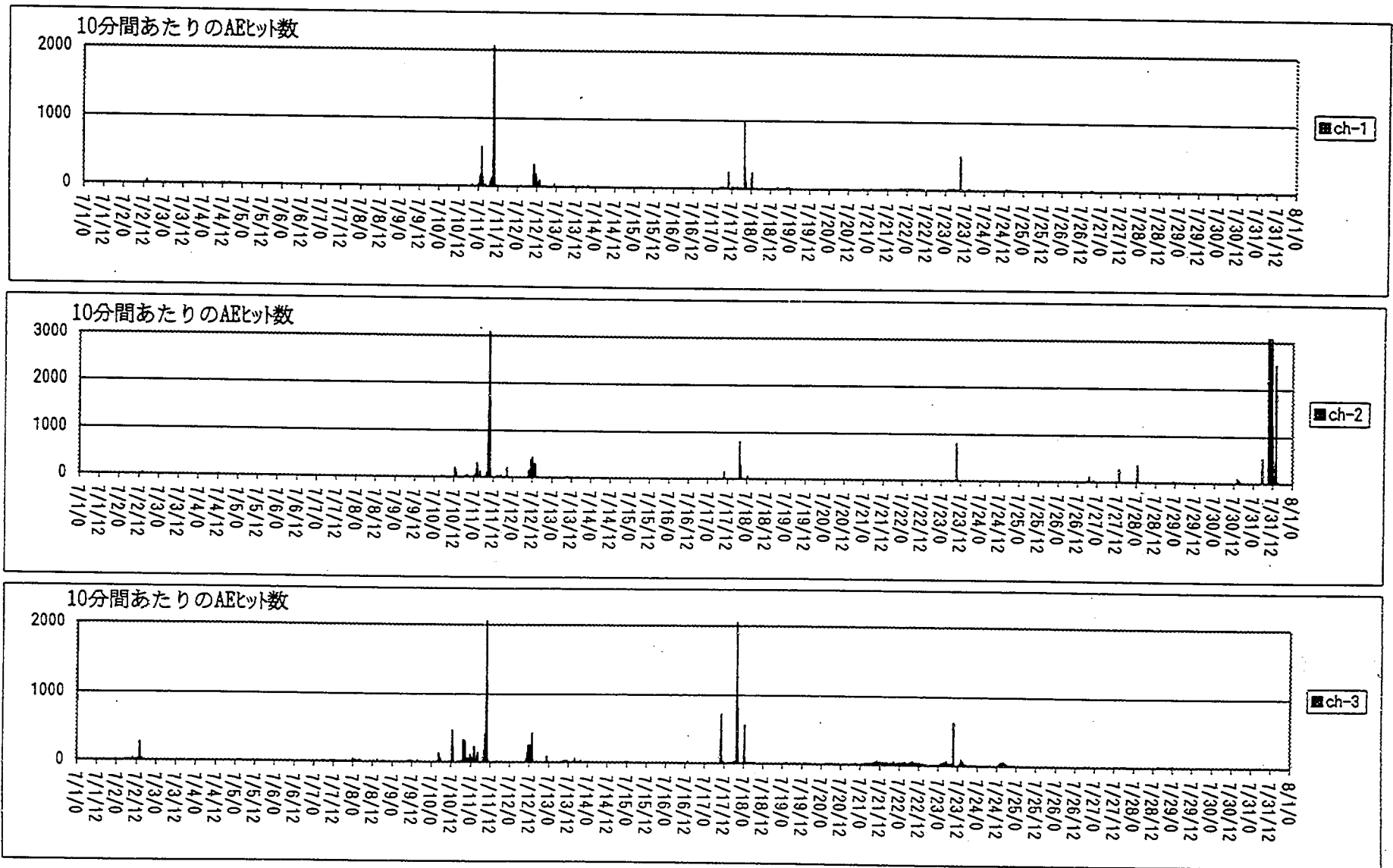


図-4.1.25 木更津土砂斜面 低周波AE②の発生挙動 (7月)

(3) 人工崩壊時に計測された斜面変状およびAEの発生挙動

7月30～31日に、斜面下部に対しエンジンポンプで放水を行い、強制的に斜面崩壊を発生させた。しかし、これらの放水によっても、当初期待したような斜面全体が塊として移動するような崩壊は発生せず、図-4.1.26に示すような後退性の小崩壊が断続的に発生する結果となった。

7月30日12時～18時、および31日9時～12時における放水時のAE以外の斜面動態計測データおよびAE発生状況を図-4.1.27 (1)～(4)、図-4.1.28 (1)～(4)にそれぞれ示す。

計測対象斜面に設置した傾斜計2 (中) の最も地表面に近い地点 (X-1) で7月30日15時以降、僅かながら変位していることが確認できる。さらに、31日の10時頃から大きな変形 (X-1,Y-1) が見られ、10時半直前に表層が大きく下方に移動したことを示している。一方、AEの発生状況を見ると、いずれのAEセンサも放水時間帯に集中してAEを検出している。これは、通常の降雨時同様、放水の衝撃によるAEを検出している可能性が高い。したがって、この時間帯に斜面が変位した可能性はあるものの、AEからその有無を判断することは困難である。

しかし、30日17時半以降の高周波AEセンサ (ch.2) および31日10時半前後の低周波AE②のセンサ (ch.2,3) で検出されたAEの発生挙動に着目すると、放水時間帯以外でもAEが顕著に発生している時間帯があることが確認できる。そこで、これらの時間帯におけるAEの発生状況とビデオ画像から確認できる斜面の小崩落の発生状況について比較検討を行う。

31日の10時～11時のAE発生状況を詳細に整理した結果を図-4.1.29 (1)～(4)に、ビデオ画像から判読したこの時間帯における小崩壊の発生状況を図-4.1.30に示す。

傾斜計が大きく変動し、図-4.1.30に見られるように小規模な崩落が発生した10時半頃に着目すると、高周波AEセンサ (ch.2) において、10:28～29に活発なAEの発生が認められる。一方、ch.3ではこの時刻におけるAEの発生は認められない。ただし、頻度としては小さい (10ヒット/sec程度) が、10:40以降、連続的なAEが検出されており、全体として斜面が不安定化していることと対応している可能性が考えられる。

低周波AE①センサでは、ch.2,3ともに10:45直前に活発なAEの発生が認められた。この時刻はch.2近傍で小崩落が発生しており、これと対応しているものと判断される。これ以外でも低周波AE①センサでは小崩落に対応していると考えられるAEの発生が認められた。

一方、低周波AE②センサでは、小崩落と明らかに対応するAEの発生挙動は見られなかった。この理由としては、センサ設置位置と小崩落位置が比較的遠かったこと、崩壊終盤になり、AEセンサが正常に作動していなかったこと等の可能性が考えられる。

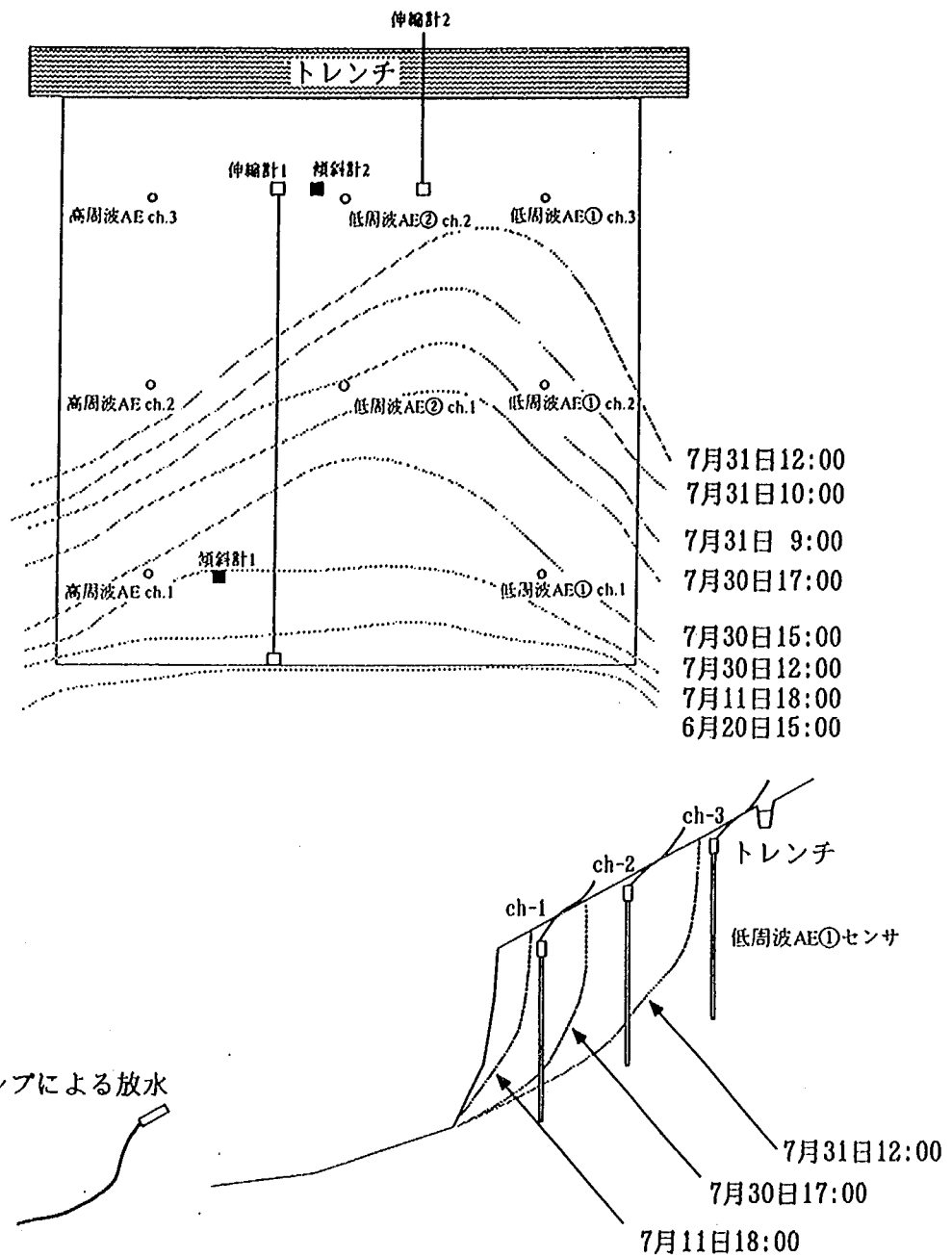


図-4.1.26 放水による斜面崩壊の発生状況

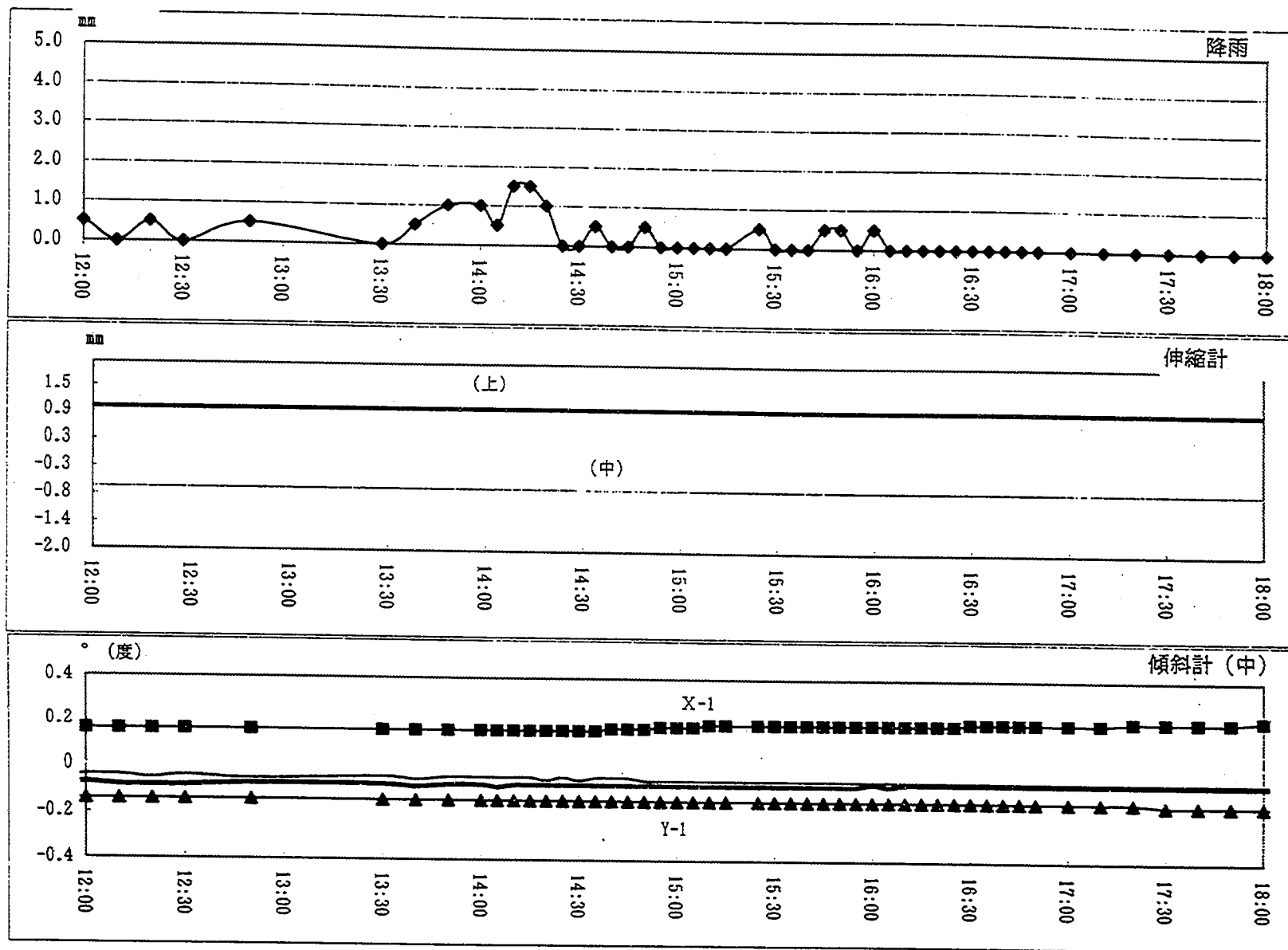


図-4.1.27 (1) 木更津土砂斜面 AE以外の斜面動態計測データ (7月30日12:00~18:00)

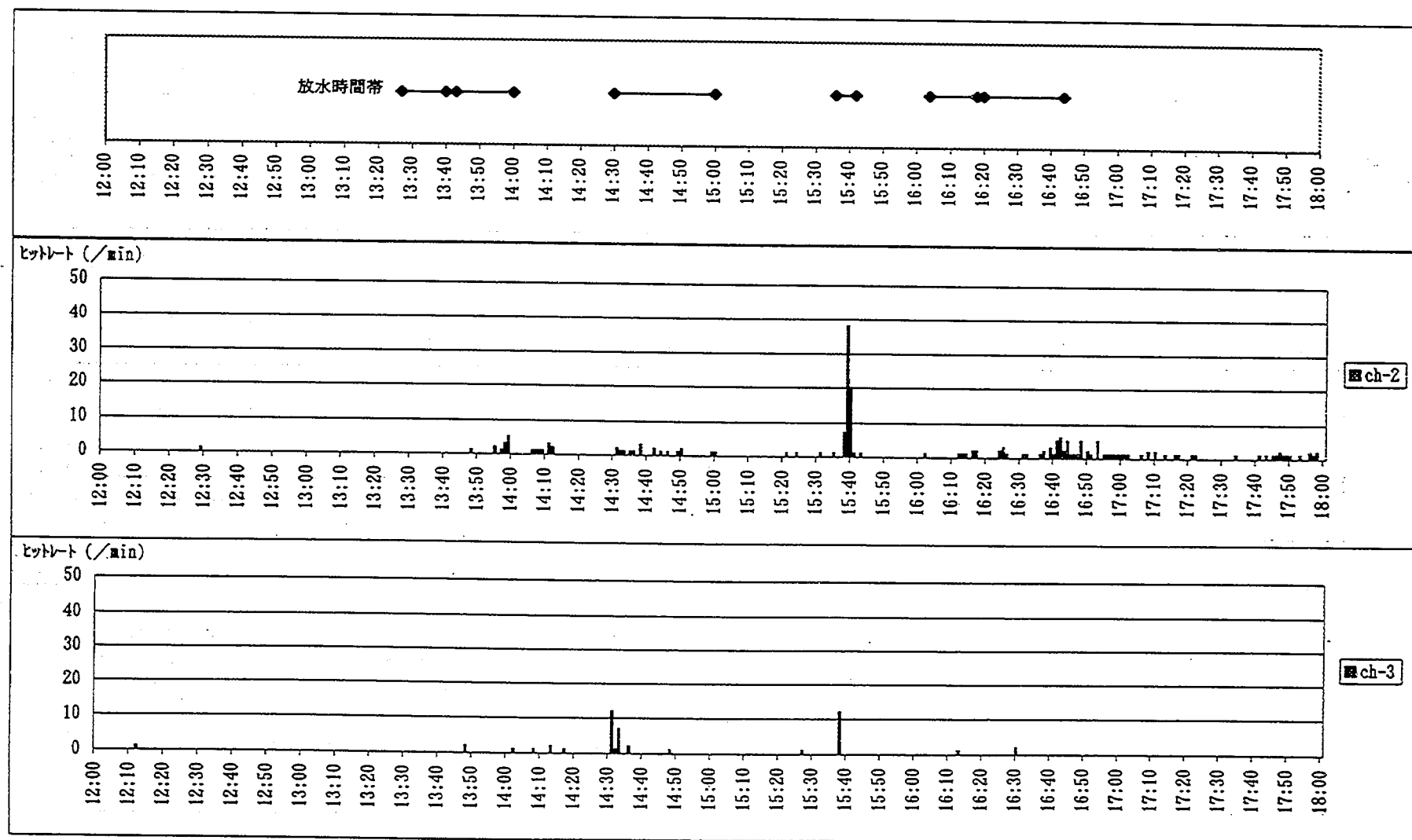


図-4.1.27 (2) 木更津土砂斜面 高周波AEの発生挙動 (7月30日12:00~18:00)

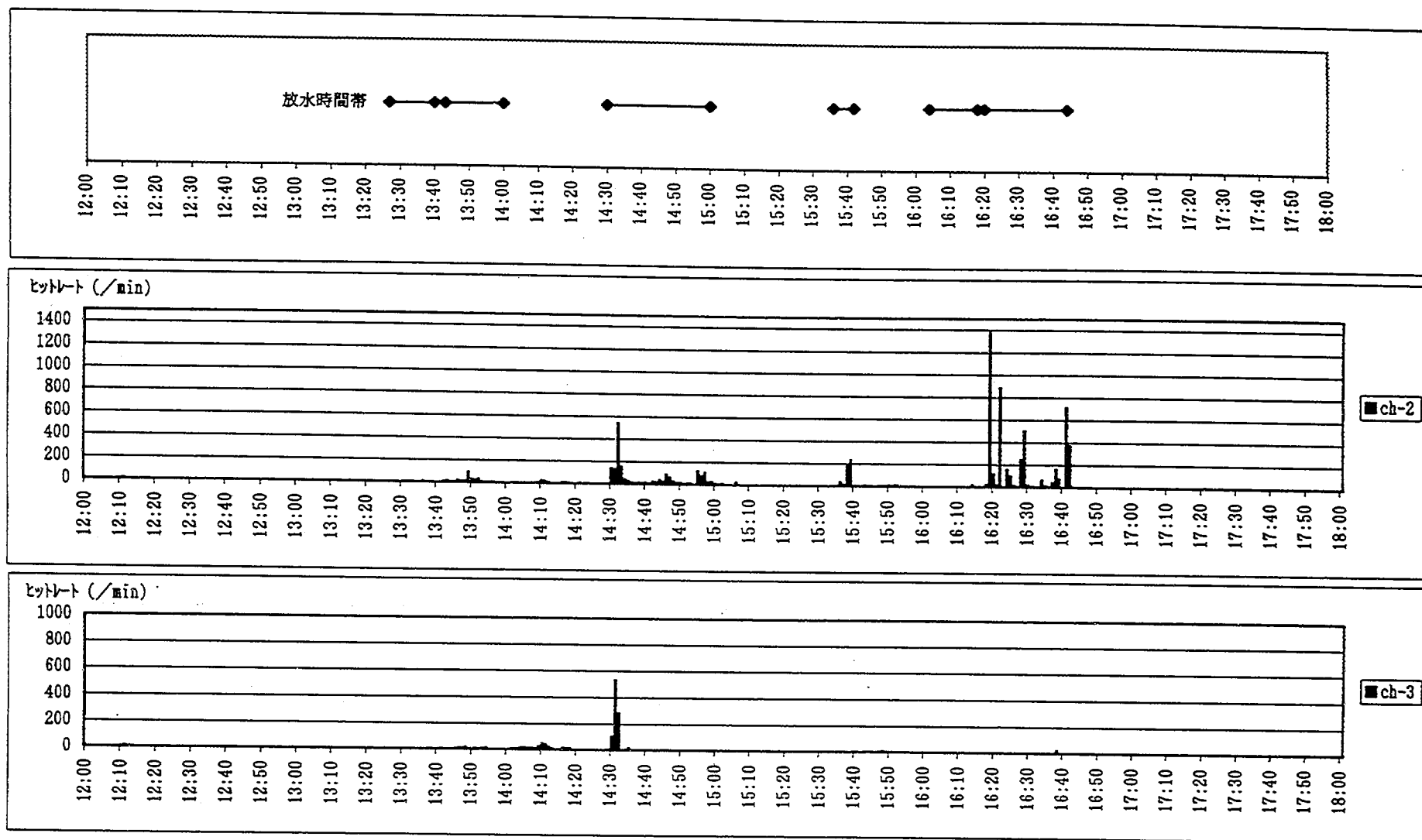


図-4.1.27 (3) 木更津土砂斜面 低周波AE①の発生挙動 (7月30日12:00~18:00)

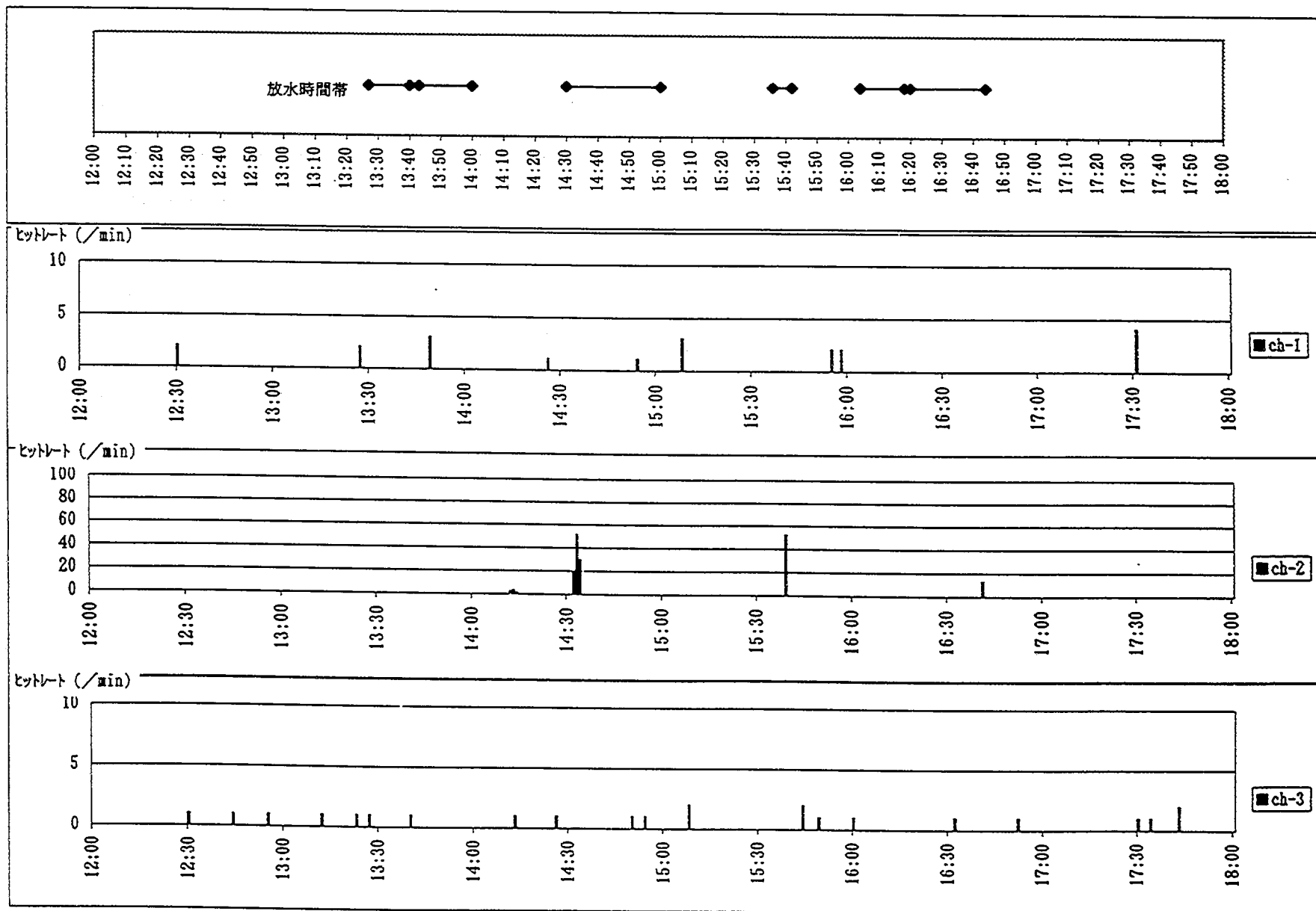


図-4.1.27 (4) 木更津土砂斜面 低周波AE②の発生挙動 (7月30日12:00~18:00)

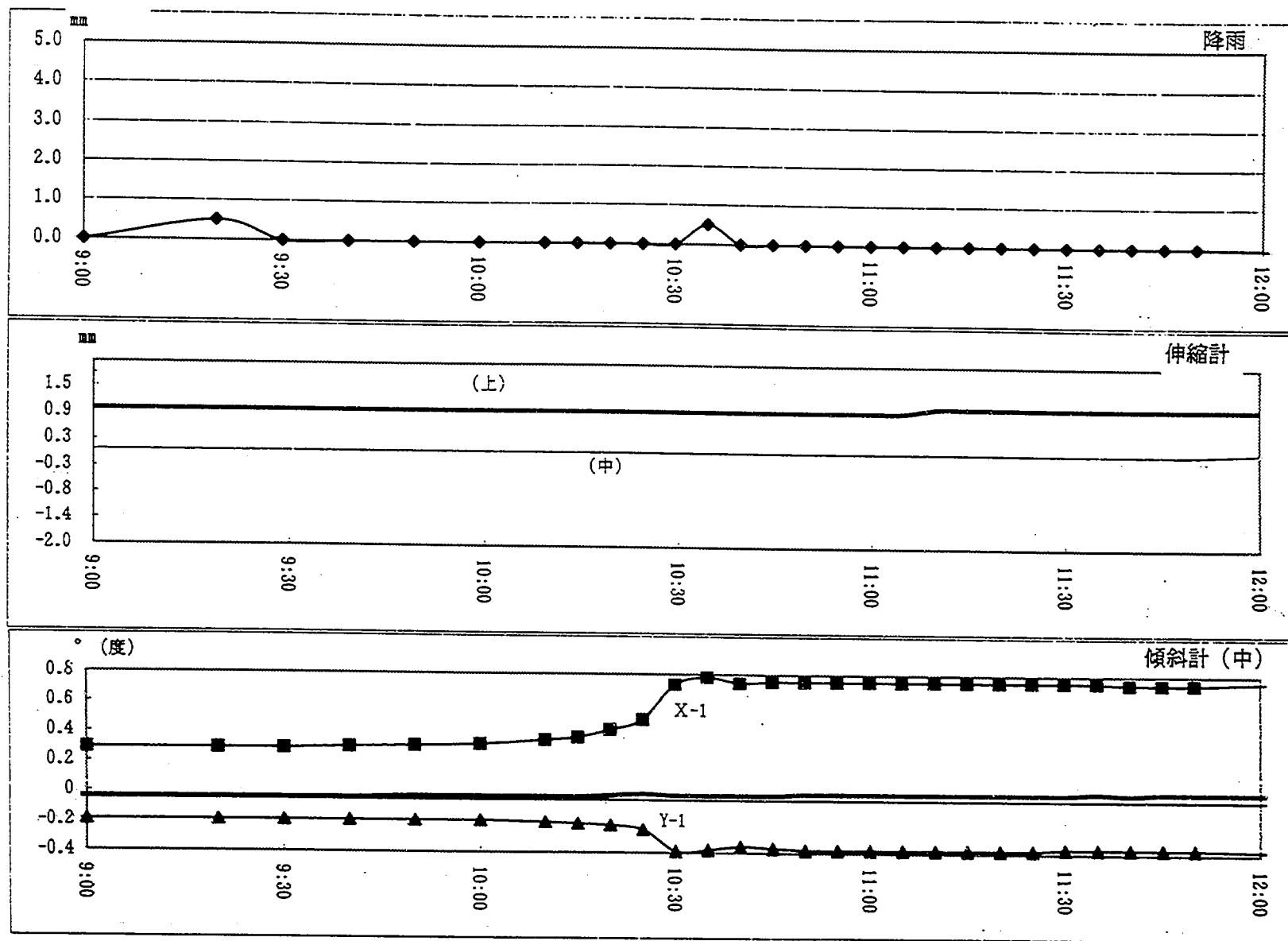


図-4.1.28 (1) 木更津土砂斜面 AE以外の斜面動態計測データ (7月31日9:00~12:00)

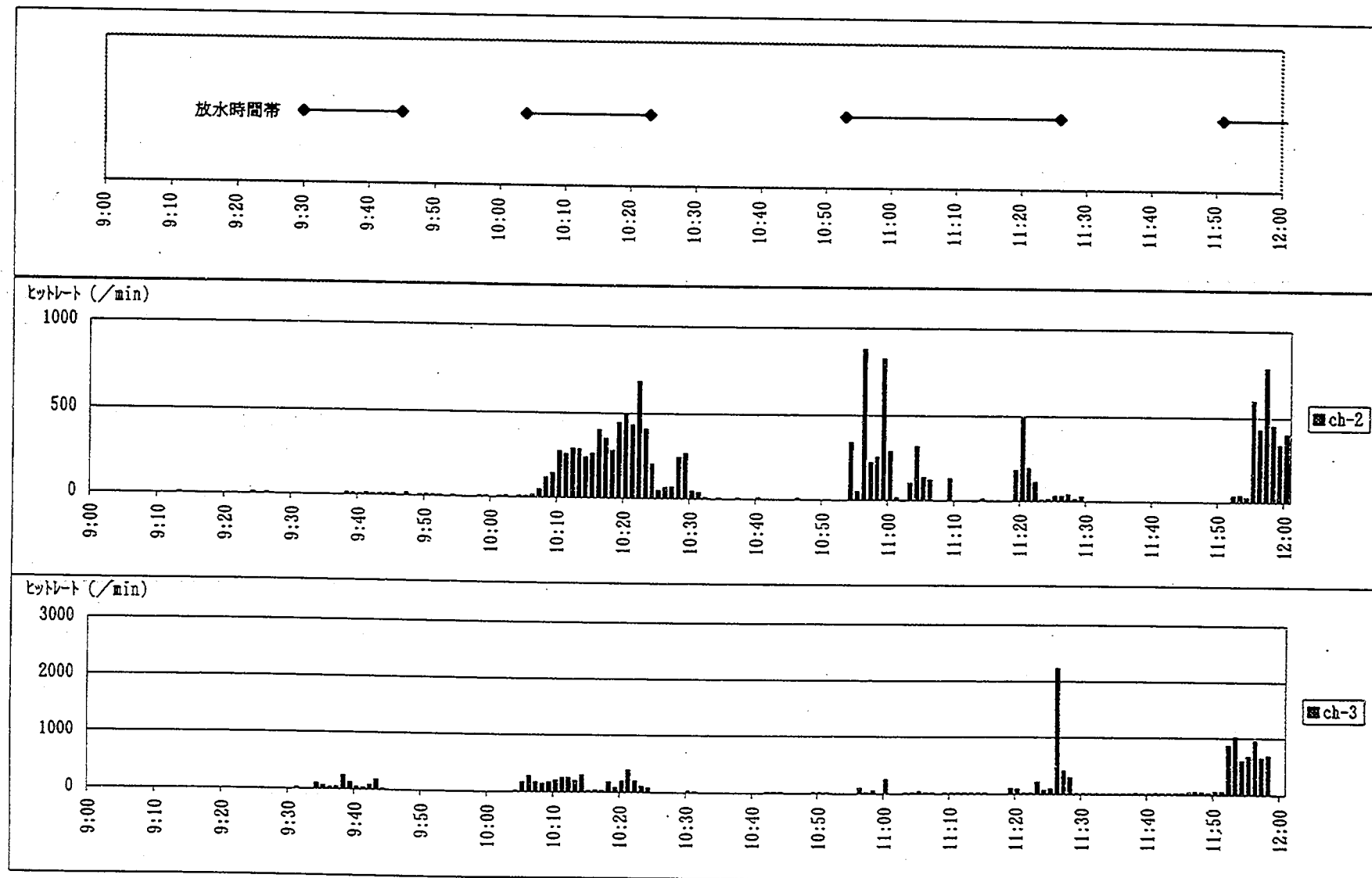


図-4.1.28 (2) 木更津土砂斜面 高周波AEの発生挙動 (7月31日9:00~12:00)

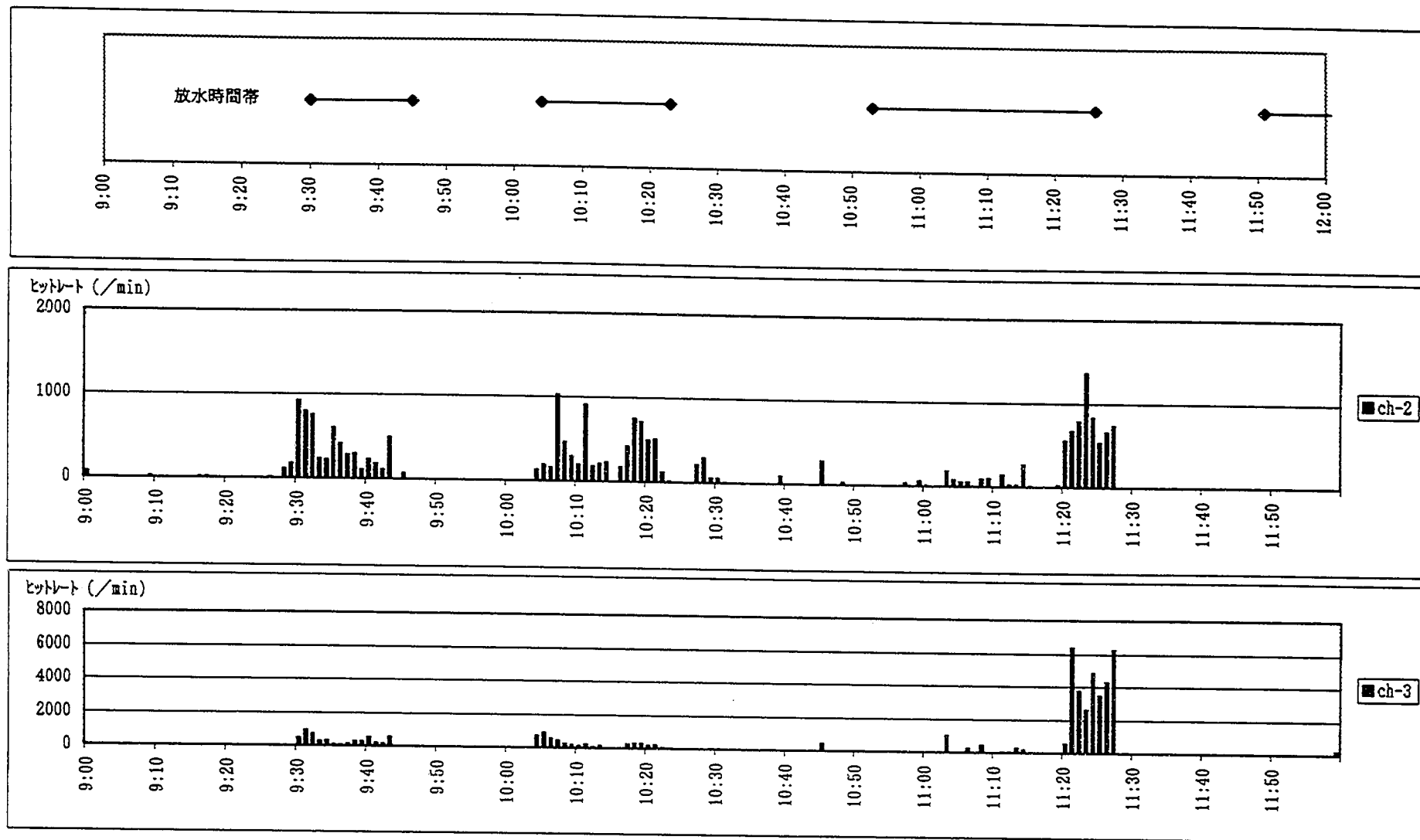


図-4.1.28 (3) 木更津土砂斜面 低周波AE①の発生挙動 (7月31日9:00~12:00)

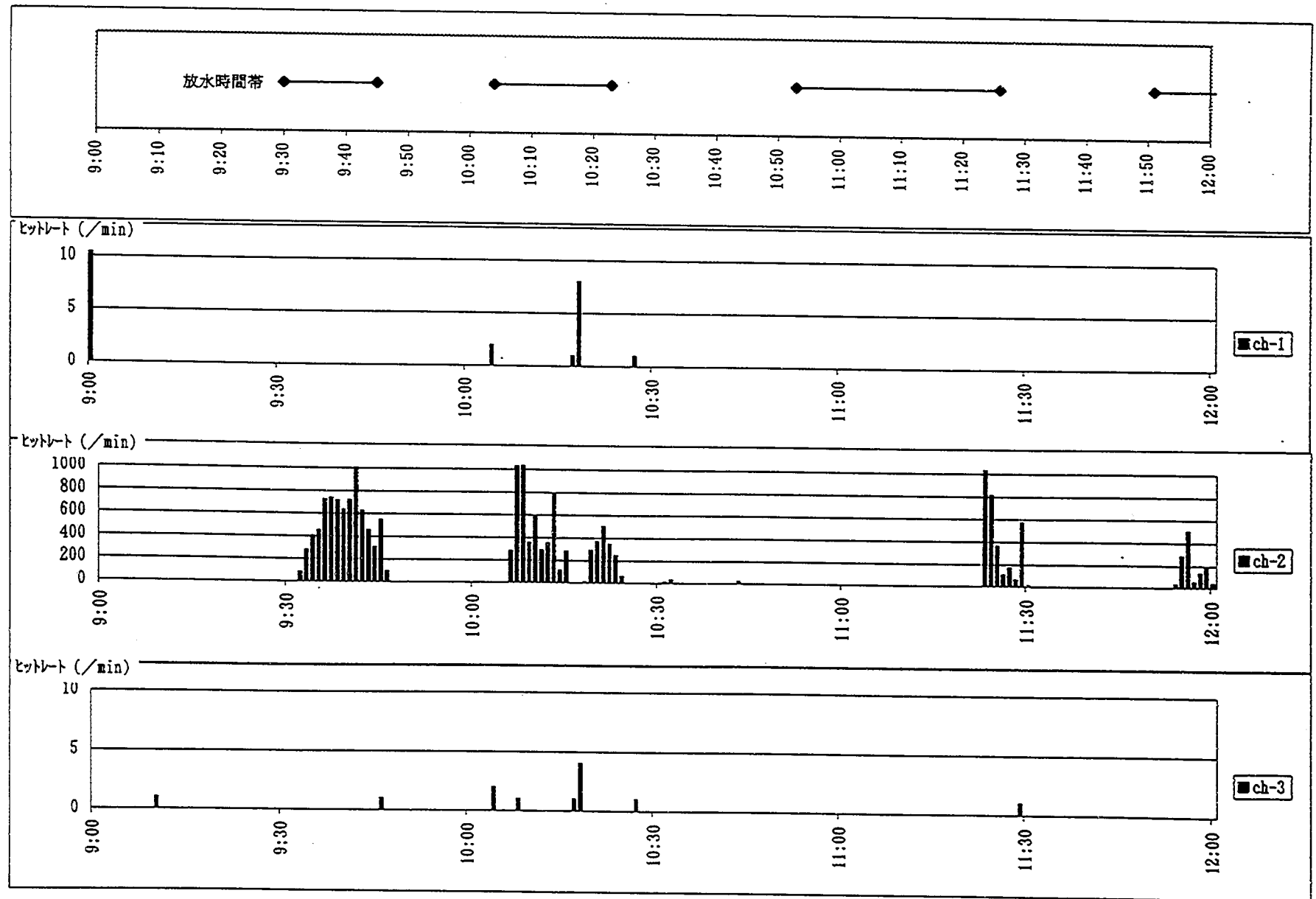


図-4.1.28 (4) 木更津土砂斜面 低周波AE②の発生挙動 (7月31日9:00~12:00)

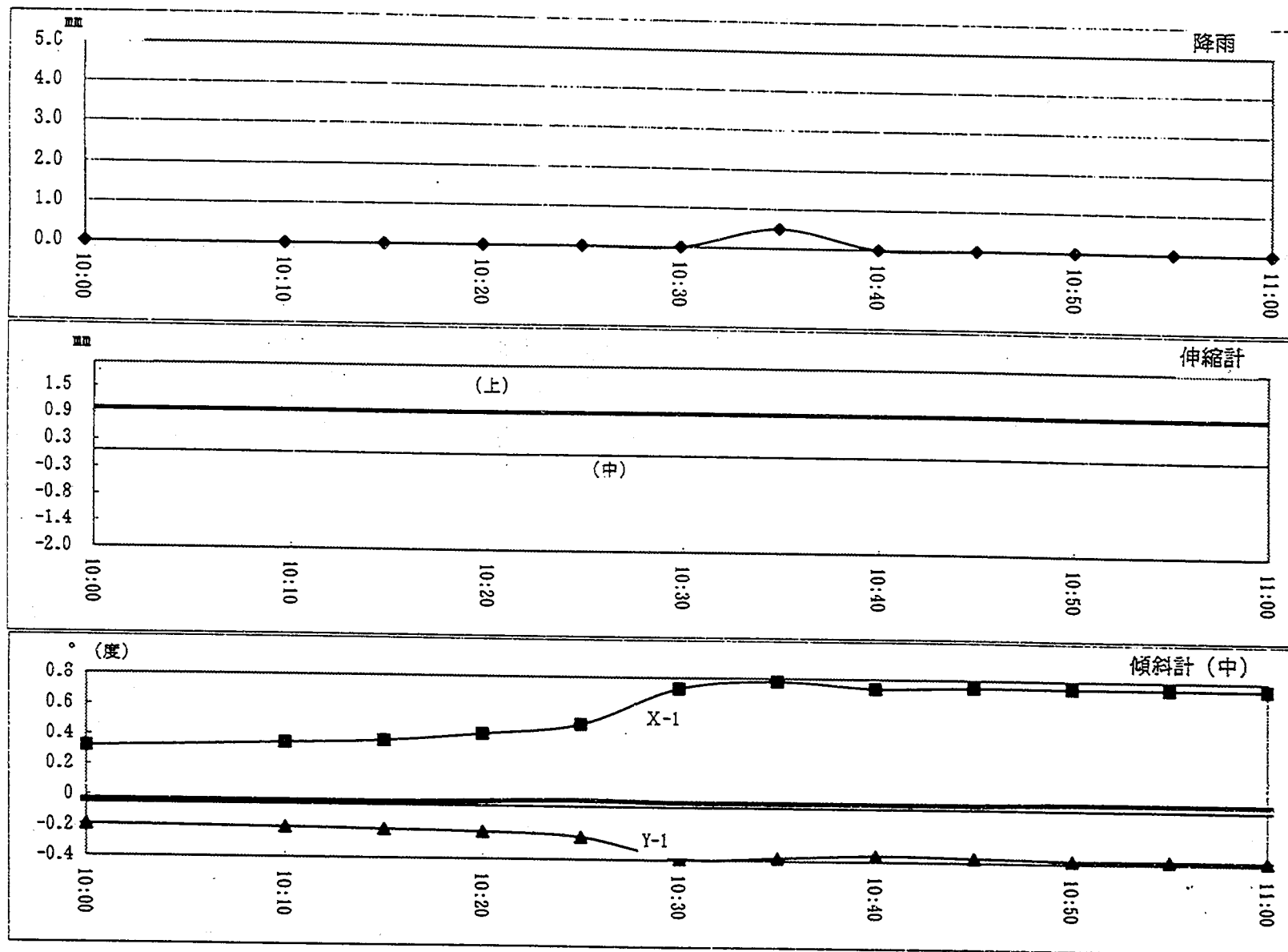


図-4.1.29 (1) 木更津土砂斜面 AE以外の斜面動態計測データ (7月31日10:00~11:00)

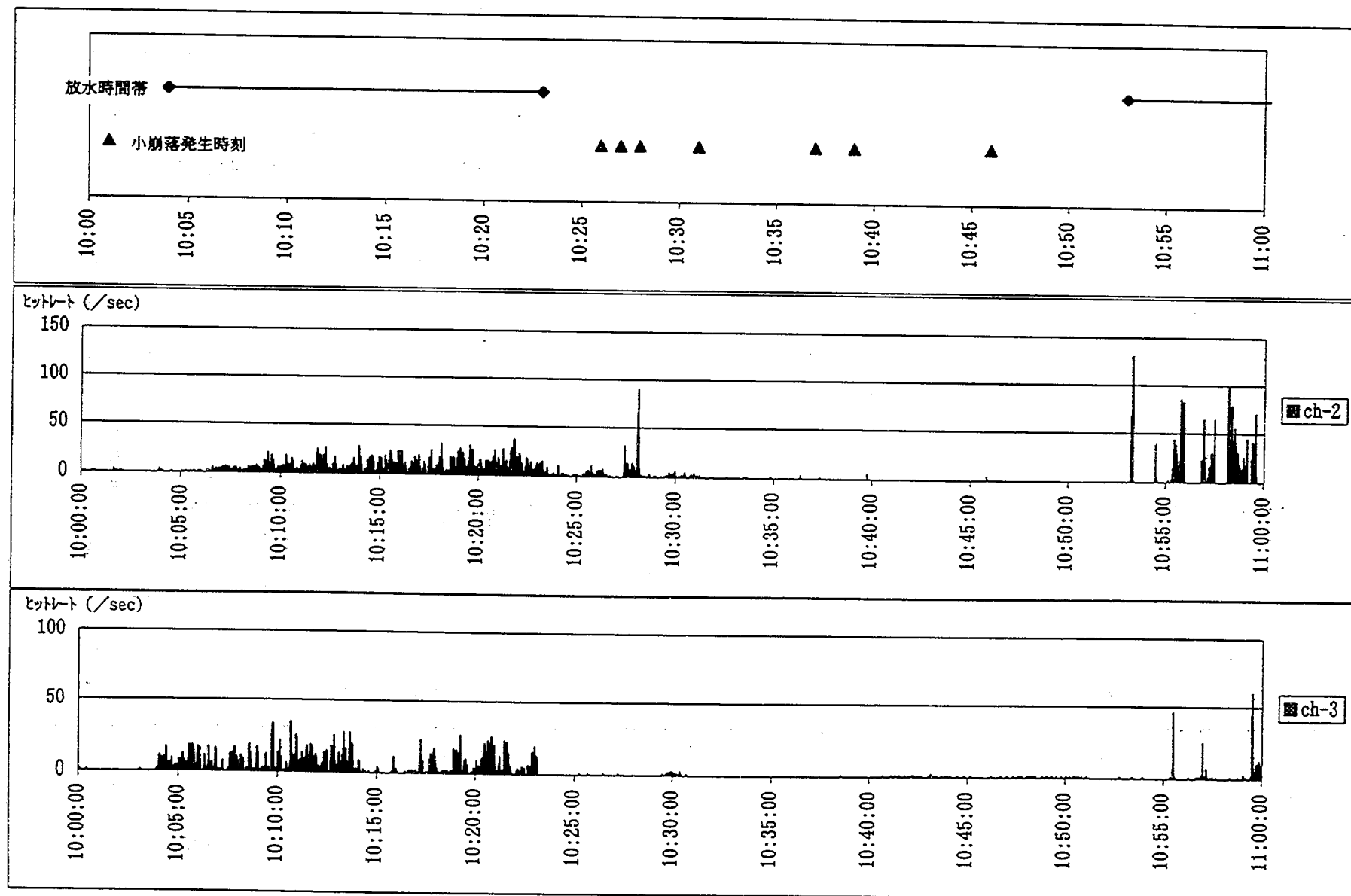


図-4.1.29 (2) 木更津土砂斜面 高周波AEの発生挙動 (7月31日10:00~11:00)

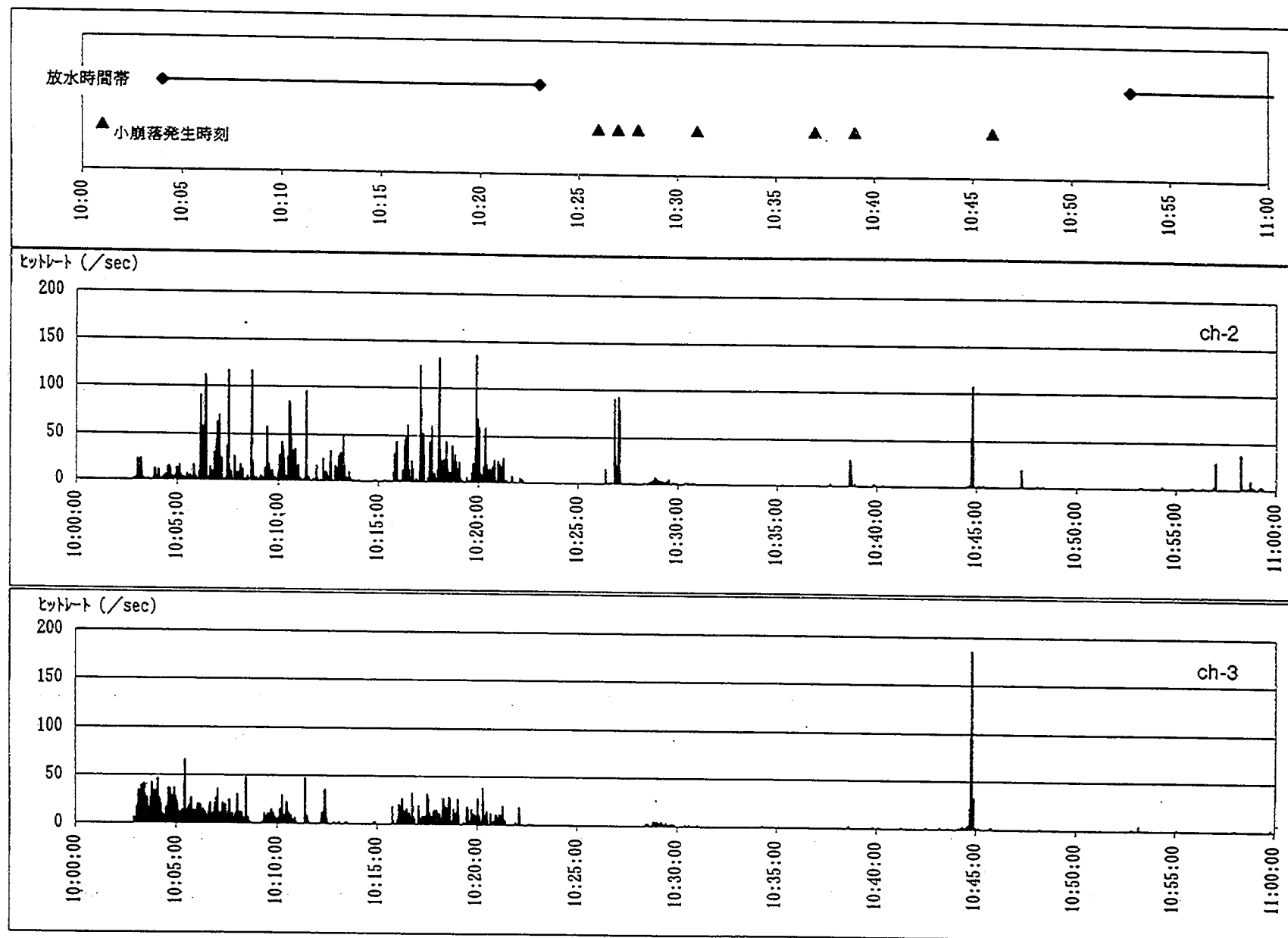


図-4.1.29 (3) 木更津土砂斜面 低周波AE①の発生挙動 (7月31日10:00~11:00)

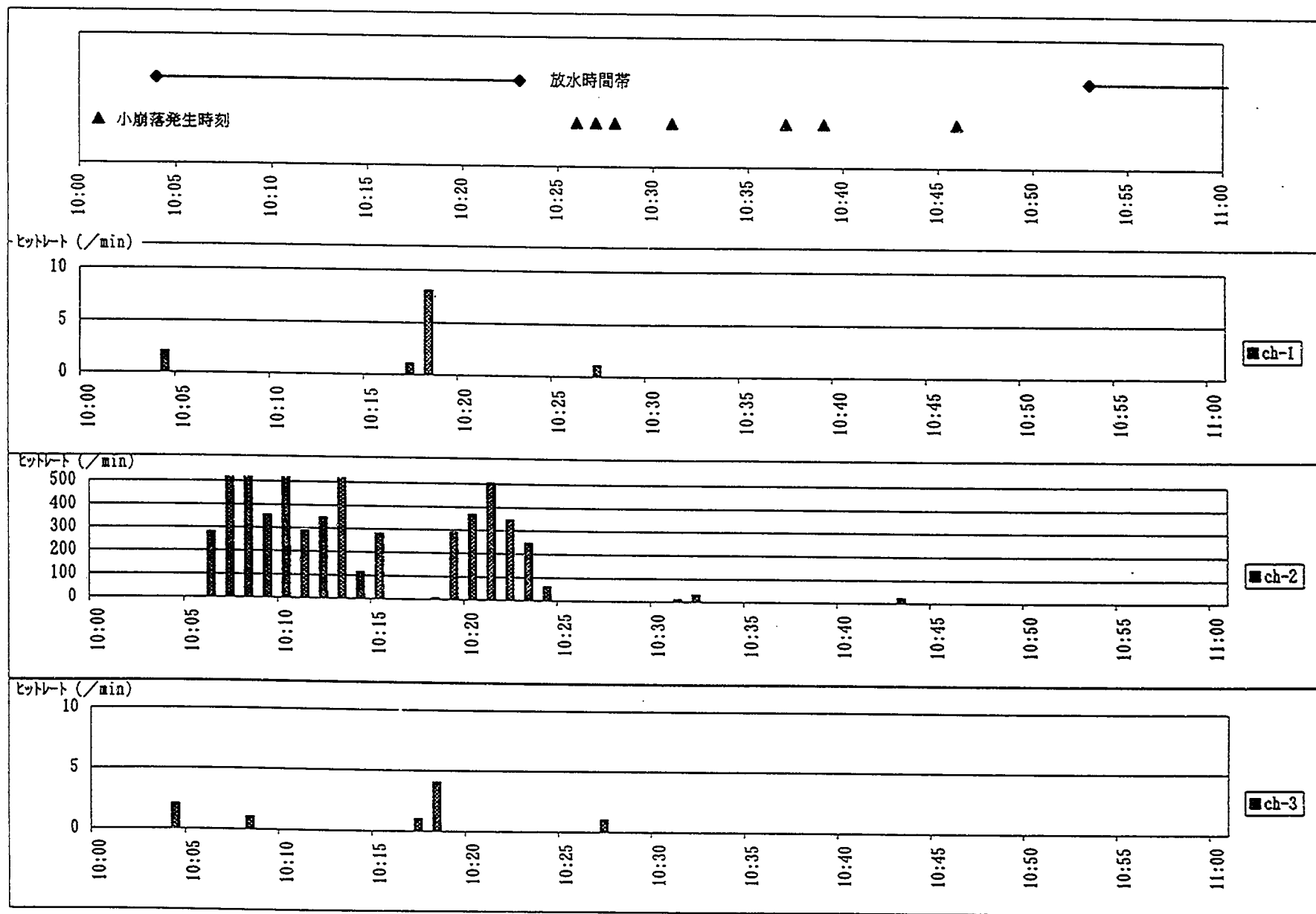


図-4.1.29 (4) 木更津土砂斜面 低周波AE②の発生挙動 (7月31日10:00~11:00)

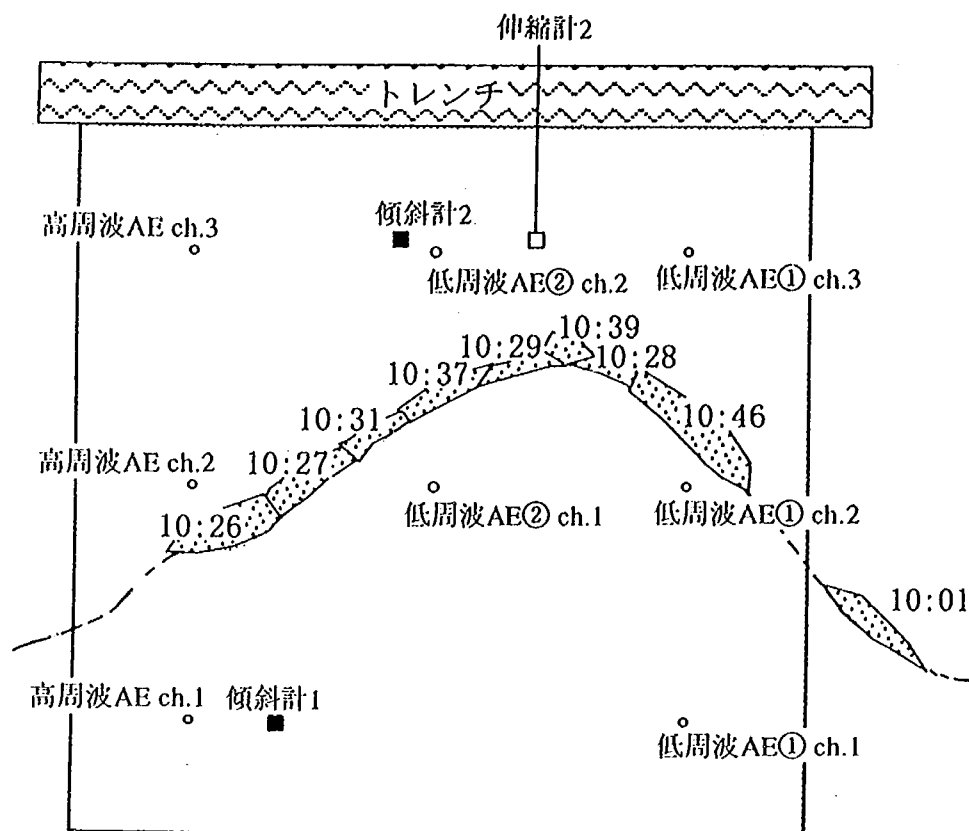


図-4.1.30 ビデオ画像から判読した小崩落の発生状況

4.1.3 計測データの評価

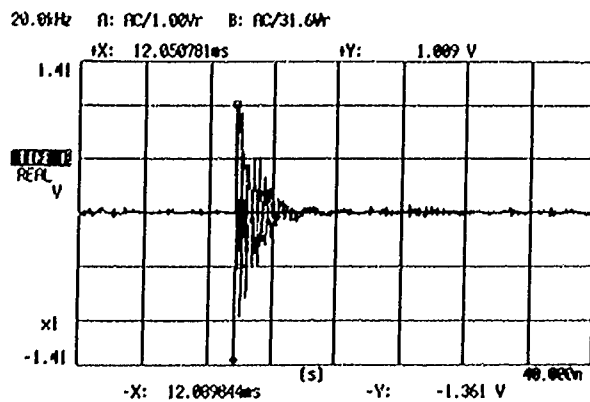
今回使用したいずれのAE計測装置においても、降雨と連動してAEを検出する傾向にあり、降雨時に計測されるAEの大部分は雨滴あるいは流水によって発生した波動が、センサまで伝播したものであると考えられる。しかし、土砂斜面の崩壊は、降雨時に斜面内部の間隙水圧が増加し、土砂の強度が低下することによって発生するため、検出されたAEの中には斜面崩壊の前兆現象である土粒子の摩擦によって発生したAEも含まれている可能性が高い。したがって、AE計測を用いて斜面の動態を監視するためには計測された個々のAE信号と物理的な現象との対応を明確にし、発生要因別にAEの発生パターンを明らかにする必要がある。

(1) 人間の聴覚によるAE信号の識別

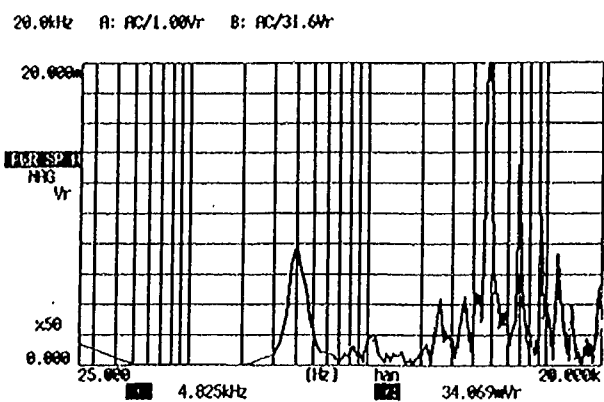
計測の対象とする周波数帯域を500Hz～20kHzとした時に、土砂斜面で計測されるAEには雨滴や流水による音、土粒子が摩擦する音、作業等による人為的な音等がある。聴覚による判断では、計測信号の中で最も多く含まれているのは雨滴による「パチパチ」という音であり、この音に混じって時々「ギシギシ」という音が含まれている。雨滴によるAEは斜面の動態とは直接関係が無く、ノイズとして除去されるべき信号であるが、土粒子の摩擦による音は斜面が微小な変動を起こした際にウェーブガイドの近傍で発生した音であり、斜面崩壊の前兆現象の一つであると考えることができる。

そこで、実験中に低周波AE②センサで検出され、テープレコーダに収録されたAE波形データを再生し、その音を直接耳で聞いてAE信号の発生要因の推定を試みた。その結果、「雨滴による信号」と「土粒子の摩擦による信号」と推定できる、代表的なAE信号波形を抽出することができ、そのパワースペクトルも併せて図-4.1.31に示す。図から明らかなように、土粒子の摩擦によるAEよりも雨滴によるAEの方がむしろ大きな振幅値を示し、周波数も高くなる傾向が得られた。今回の実験では、大規模な斜面の崩落が発生しなかったために、土粒子の摩擦による大きなAEは計測されず、雨滴による大きなAEが多く計測される結果となったと考えられる。雨滴によるAEは、基本的には斜面の変状と直接関係ないので、AE計測によって斜面の動態を監視するにはこれらの信号を除去する必要がある。これらの信号を、しきい値の調整によって除去するのは信号の振幅値の大小関係から困難であるため、パラメータの特徴から除去するか、若しくは降雨によるノイズ振幅が小さくなるようなセンサの設置方法を工夫する必要がある。

また、雨滴によるノイズの中に土粒子の摩擦による音が含まれている部分とそうでない部分とがあることが判明した。図-4.1.32はAE発生数の経時変化グラフ上に土粒子の摩擦音が含まれている部分を表示したものである。図から、土粒子の摩擦音は最下段のch.1センサにおいて多く計測され、斜面上部の崩壊対象外の部分に設置したセンサにはほとんど計測されていないことが分かる。また、第1回目の放水実験を行った以降に土粒子の摩擦による音が顕著に観測されており、計測開始直後の6月20日に経験した台風による集中豪雨時にはほとんど観測されていないことが分かる。このような結果から、この実験では大規模な斜面の崩壊には至らなかったが、斜面の内部では降雨による雨水の浸透や放水実験による斜面の不安定化により、崩壊の前兆となるような微小な変化が生じているものと考えることができる。したがって、計測されたAEの発生要因が特定できればAE計測によって崩壊の前兆現象捉えることが可能であると言える。

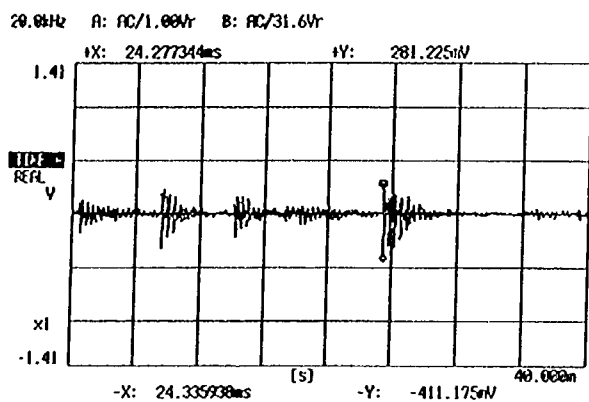


時間波形

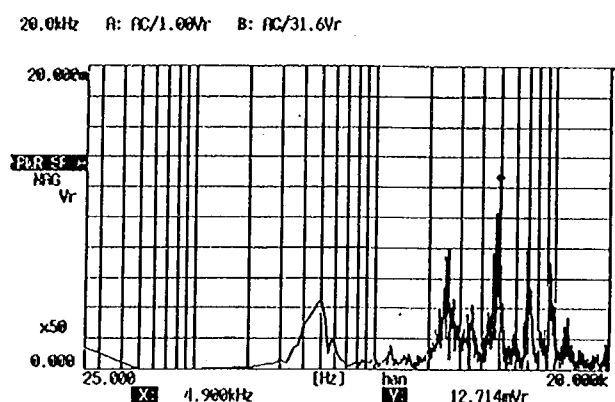


パワースペクトル

雨滴によるAE信号



時間波形



パワースペクトル

土粒子の摩擦によるAE信号

図-4.1.31 木更津土砂斜面 低周波AE②で計測された
 代表的なAE波形とパワースペクトル

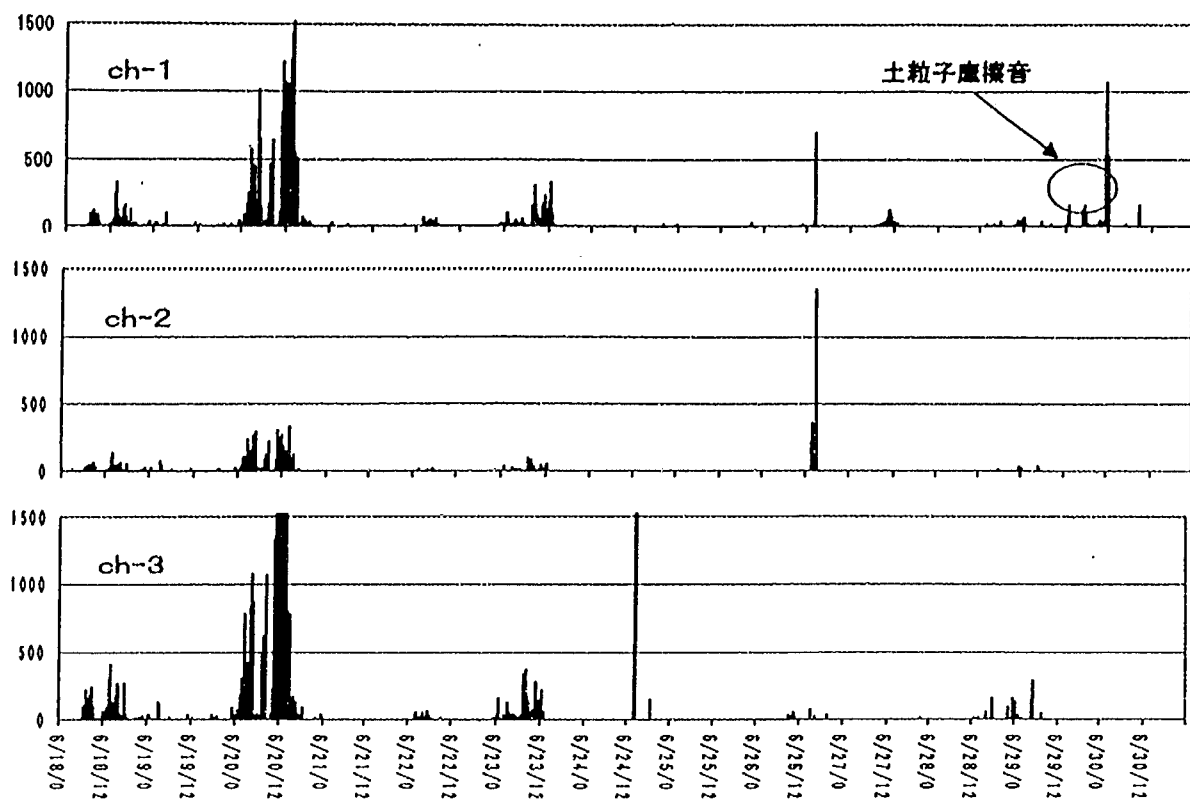


図-4.1.32 (1) 低周波AE②における土粒子摩擦音の経時変化 (6月)

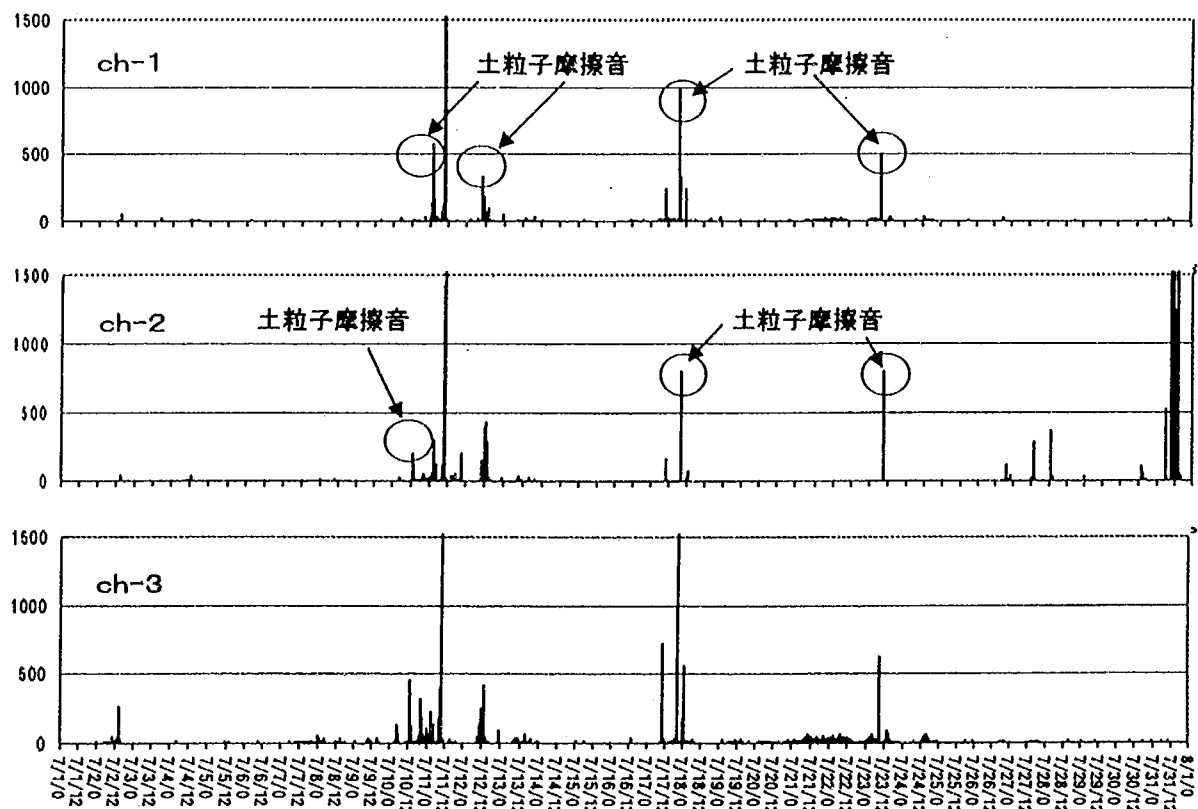


図-4.1.32 (2) 低周波AE②における土粒子摩擦音の経時変化 (7月)

(2) 降雨時のAEパラメータの特徴

上記のように、降雨時に発生しているAEの中に斜面の不安定化（すべり）に起因するAEが含まれていることが確認できた。しかし、この評価は個人の聴覚に依存した主観的・定性的な評価であり、曖昧な部分があることは否めない。そこで、斜面の不安定化に起因するAEが多く発生している時間帯について、AEパラメータから降雨時のAE波形の特徴化を検討した。なお、検討には以下の2つの時間帯を用い、AEデータとしてはAEパラメータが記録されている高周波AEのデータを用いた。

時間帯①： 7月11日0：00～9：00（9時間）

DATテープから降雨と小規模崩壊の双方が発生していると判断される時間帯

時間帯②： 7月31日10：25～10：52（0.5時間）

ビデオテープで小規模崩壊のみが発生していることが確認できる時間帯

上記の2つの時間帯に発生したAEについて、振幅（Amplitude）・波形長（Duration）・カウント（Counts）の各パラメータをプロットした結果を図-4.1.33に示す。

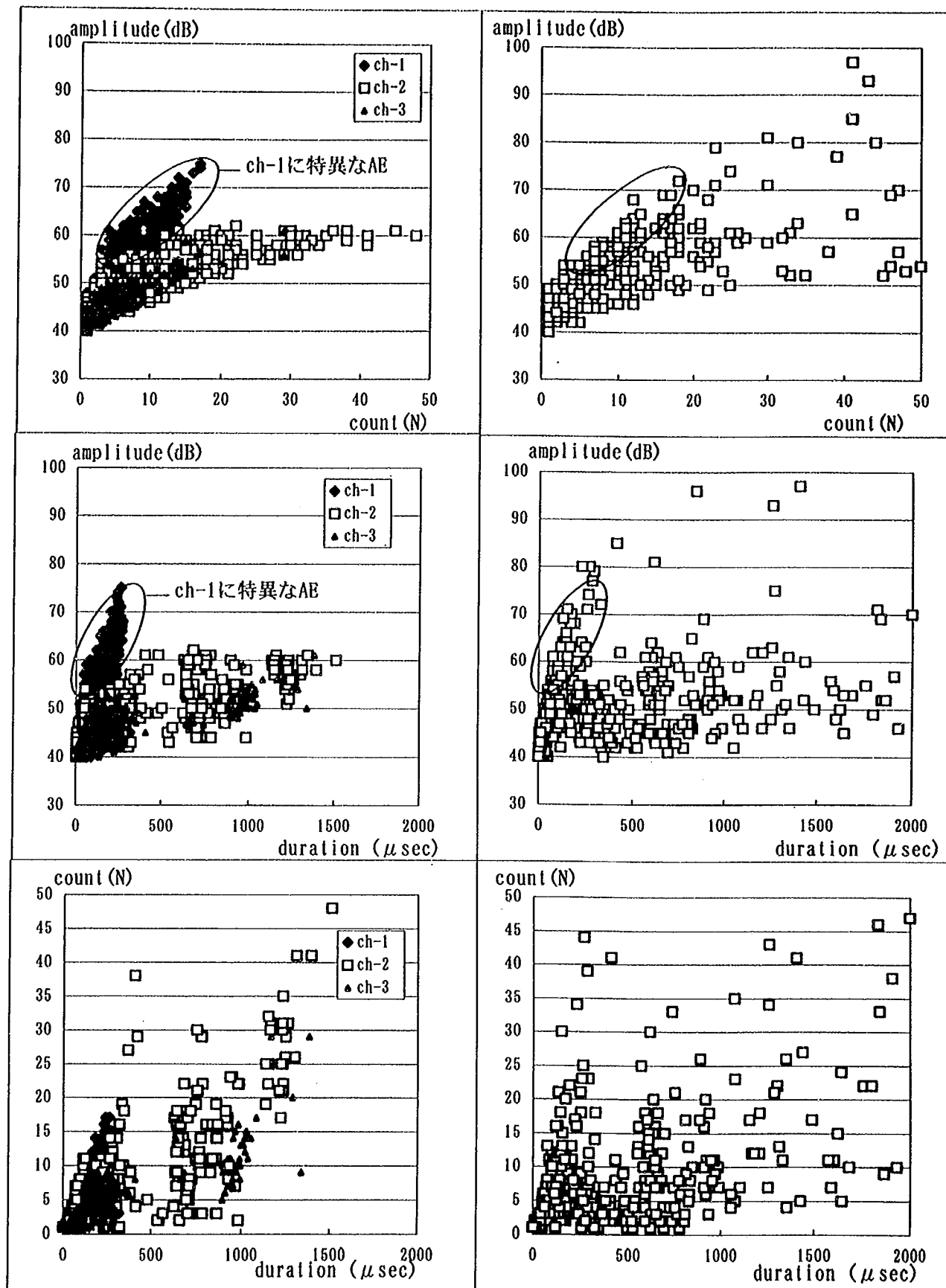
まず、図-4.1.33に示される時間帯①のデータに注目すると、ch.1とch.2およびch.3では、プロットされる範囲が異なっていることが確認できる。すなわち、ch.1では、ch.2およびch.3に比較して、1ヒット信号のカウントおよび波形長が小さく、振幅が大きなAEを多数検出している。特に、ch.2およびch.3では波形長が長く、カウントが大きくなっても、60dBを越える振幅を有するAEは発生していないという特徴がある。

この結果は、低周波AE②のデータとは異なる傾向を示すものであるが、これは雨滴に起因するAEが低い周波数を持つことによるものと考えられる。

また時間帯②（小規模崩壊のみ発生時）では、発生したAEの波形タイプが多様化しているものの、時間帯①におけるch.1で検出されたタイプのAE（振幅＝大・波形長＝短・カウント＝少）も数多く発生している。

ch.1の高周波AEセンサは、斜面の最下部に埋設されており、斜面下部付近で時間帯①（降雨と小規模崩壊発生時）中の小規模崩壊に起因するAEを最も検出しやすい位置に設置されている。このことから、ch.1に特異なAE波形は小規模崩壊に起因するAEである可能性が高い。

一方、雨滴に起因するAEは、振幅が小さく、波形長が長く、また低周波という特徴を有しているものと考えられ、ch.2およびch.3で検出されているAEのパラメータの特徴と一致する。また、ch.2およびch.3で検出されたAEの中にも、小規模崩壊に起因するAEが含まれているものと考えられるが、伝播の過程で波形が長く、周波数が低くなった可能性もある。このことは、時間帯②（小規模崩壊のみ発生時）で発生しているAEには多様なタイプがあることから裏付けられる。



時間帯① (降雨および小規模崩壊)

7月11日 0:00~9:00

時間帯② (小規模崩壊のみ)

7月31日 10:25~10:52 ch-2

図-4.1.33 崩壊時と降雨時のAEパラメータの比較(高周波AE)

4.1.4 まとめ

今回実施した土砂斜面における現地崩壊実験により以下の点が明らかになった。

- ①降雨時には、雨滴に起因するAE（降雨ノイズ）が多数発生する。これらの降雨ノイズの中に斜面変動に起因するAEが含まれるような場合でも、AEセンサの設置位置によってはAEパラメータによりこれを分離することができる可能性がある。
- ②降雨時でなければ、高周波AE、低周波AEのいずれによっても大規模崩壊の前兆である小規模崩壊の発生を捉えることができる。

しかしながら、今回の実験ではAEを用いてより正確かつ定量的に斜面変動を把握するための課題も数多く抽出された。これらの課題は大きく以下の2つに集約される。

- ①土砂斜面の崩壊は降雨が直接の原因になる場合がほとんどである。このことは、降雨ノイズをいかに除去するかが、実際の土砂斜面におけるAE計測法の実用化を進める上で不可避な課題であることを示しており、今後の検討が急務である。
- ②AEセンサの設置条件により電氣的なノイズが発生することがあり、場合によってはセンサが破損し、計測不能になることもある。この現象は、多点設置によるセンサー計測器間の電位差の発生が最大の要因として考えられ、安定して電気ノイズの発生がない状態で計測できる技術の確立が必要である。

4.2 しらすにおける実験

4.2.1 実験概要

(1) 対象斜面と工程

対象斜面は、鹿児島県始良郡牧園町三体堂に位置するしらす採取場に整形した(図-4.2.1)。

対象斜面は、鹿児島湾北部周辺を中心に数 10m から 200m の高さで広がるしらす台地の北端に位置している。対象斜面の地質は、鹿児島湾北部の始良カルデラから 22,000 年前に噴出した入戸火砕流の非溶結堆積物で構成される(図-4.2.2)。いわゆるしらす災害は、これらのしらす台地の周縁部に形成される急峻な斜面で発生している。

実験対象斜面は、しらす採取場端の比較的風化の進んだ切土部を整形し準備した。対象斜面の規模は図-4.2.3 に示すとおりである。図-4.2.3 に示すとおり、対象斜面の下部は比較的固結したしらすであるが、上部には風化が進んで褐色化した層が分布している。また、斜面に向かって左側がやや風化の度合いが強い傾向にある。斜面は、ほぼ垂直に整形しており、斜面の左右両端を深く掘り込んで、側面からの抵抗がない状態とした。整形後の対象斜面の状況を写真-4.2.1 に示す。なお、崩壊の発生は、斜面の下部をバックホウで掘り込むことにより誘起した。

なお、対象斜面における本実験は、平成9年10月1日から10月15日にかけて実施した。



写真-4.2.1 整形後の対象斜面

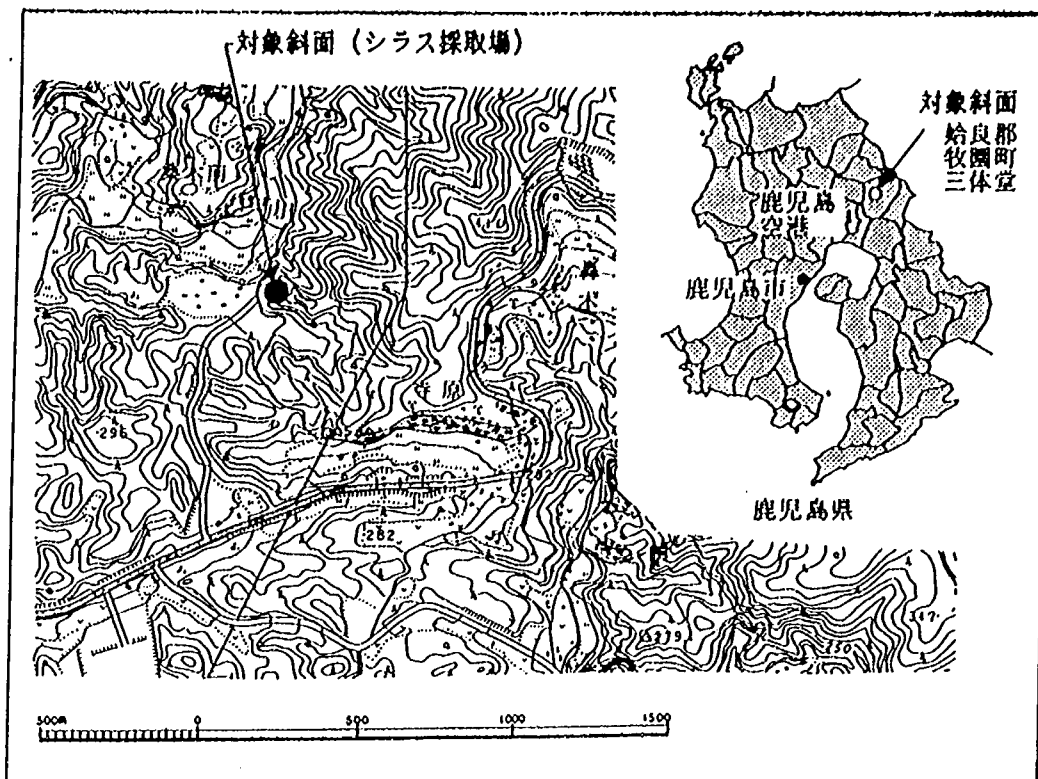


図-4.2.1 しらす対象斜面の位置

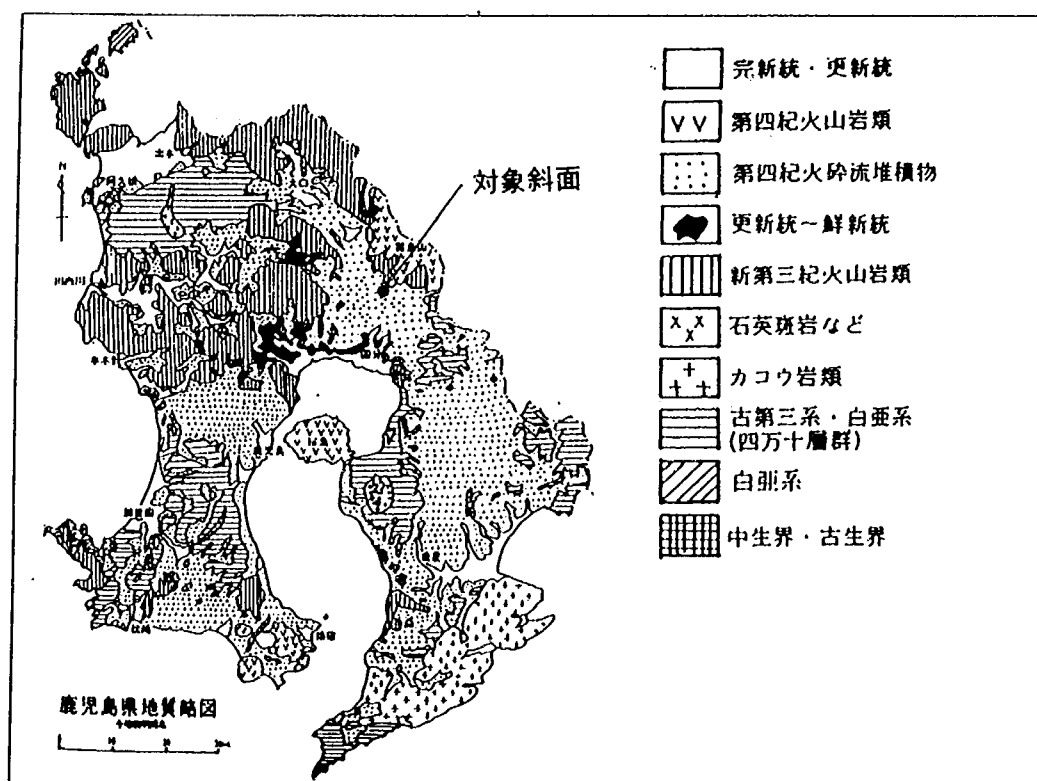


図-4.2.2 対象斜面の地質

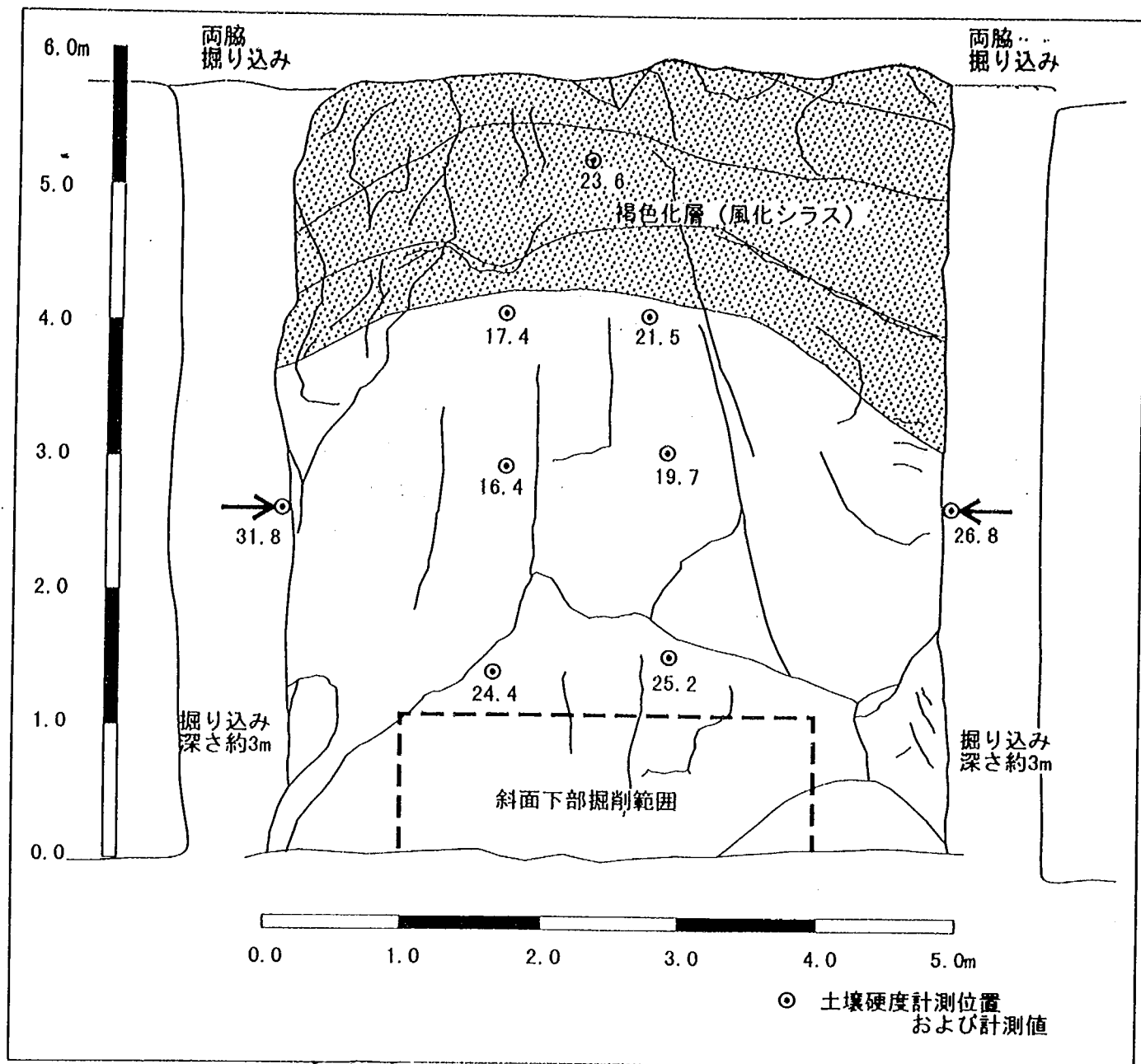


図-4.2.3 対象斜面正面スケッチ

表-4.2.1 建設省によるしらすの分類

分類	説明	設計換算土類
シラス (丘陵シラス)		
硬質シラス	かたく締まっていた洗掘抵抗も強いシラス 山中式硬度およそ 33~30 mm	砂質土 (硬質シラス)
中硬質シラス	硬質および軟質の中間のもの 硬度およそ 30~25 mm	(中硬質シラス)
軟質シラス	比較的やわらかくて洗掘抵抗も弱いシラス 硬度およそ 25 mm 以下	(軟質シラス)
チョウ積シラス	低地にゆるくタイ積している飽和されたシラス層	
ローム層	黒ボク、赤ボク、風化シラス、表土などの粘質土	粘質土
ゆるい怪石層	ボラ・コラなどの降下怪石層	レキ質土
その他	溶結凝灰岩、レキ層、粘土層などがある。	

(2) 計器の配置と AE センサの仕様

実験対象斜面への計器の設置状況を図-4.2.4 に示す。

AE の計測については、高周波 AE 計測システム (60kHz 共振 AE センサ・6チャンネル)、低周波 AE 計測システム (25kHz 共振 AE センサ・4チャンネル) の2システムを使用した。本報告では、これらのシステムで計測されたデータのうち、高周波 AE システムで計測されたデータについて以下に説明を行うものとする。

また、AE センサの設置方法については、ウェーブガイドを使用する方法 (ステンレス製・2センサ、土木研究所式・2センサ) と直接埋設する方法 (1 センサ) のそれぞれで実施した。さらにバックグラウンドノイズの状況を把握する目的で、対象斜面とは異なる位置に比較参照用の AE センサ (1 センサ) を埋設した。各ウェーブガイドの構造および高周波 AE 計測システムの仕様を図-4.2.5 に示す。また、埋設の方法を図-4.2.6 に示す。

AE 以外の計測については伸縮変位計 (2基)、傾斜計 (3基)、水分計 (4基) により斜面の動態モニタリングを実施した。さらに、可視的な情報を得るため、2 台のビデオカメラを対象斜面の正面に設置し、夜間は照明を行い常時監視を行った。

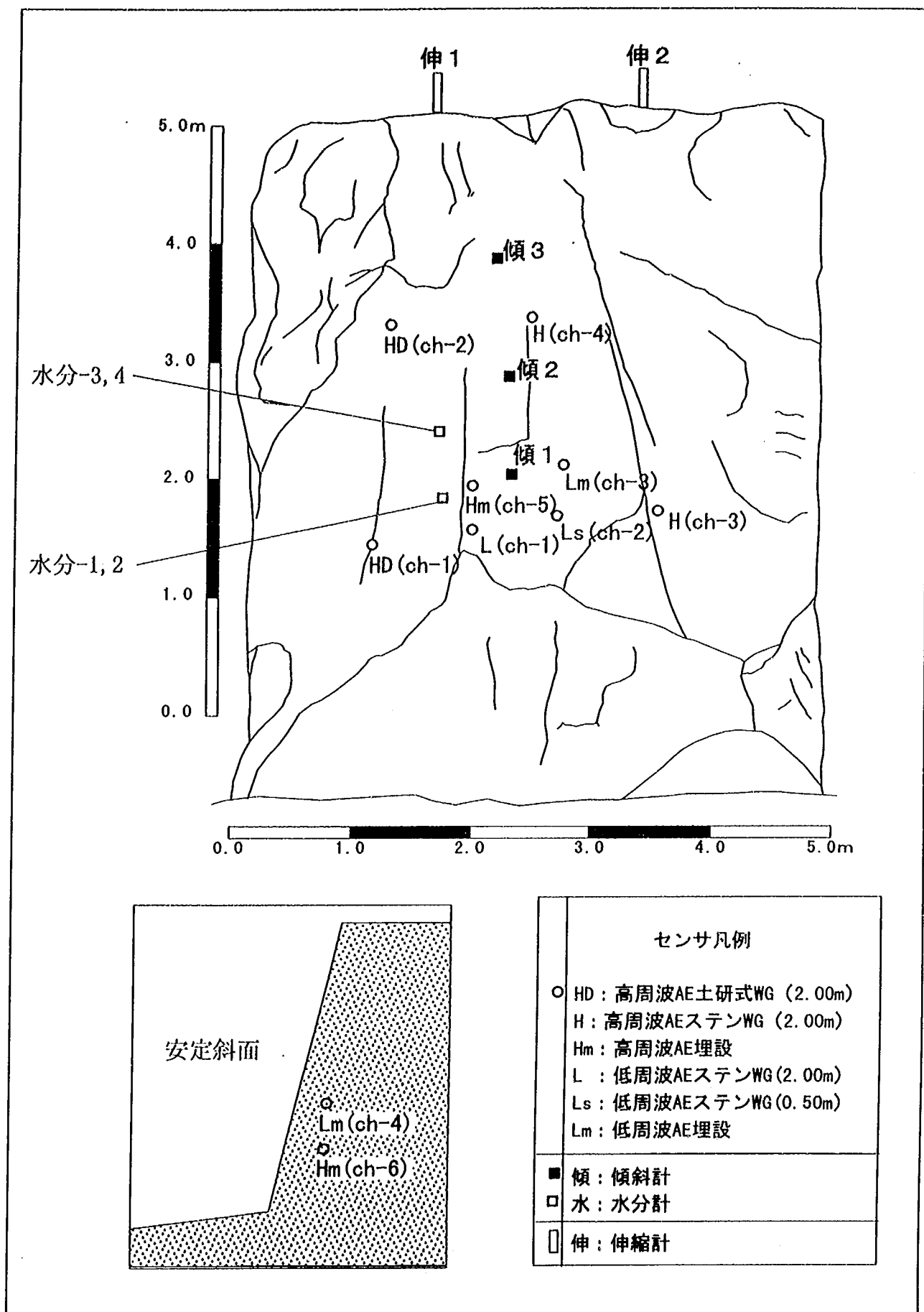


図-4.2.4 対象斜面へのセンサ配置状況

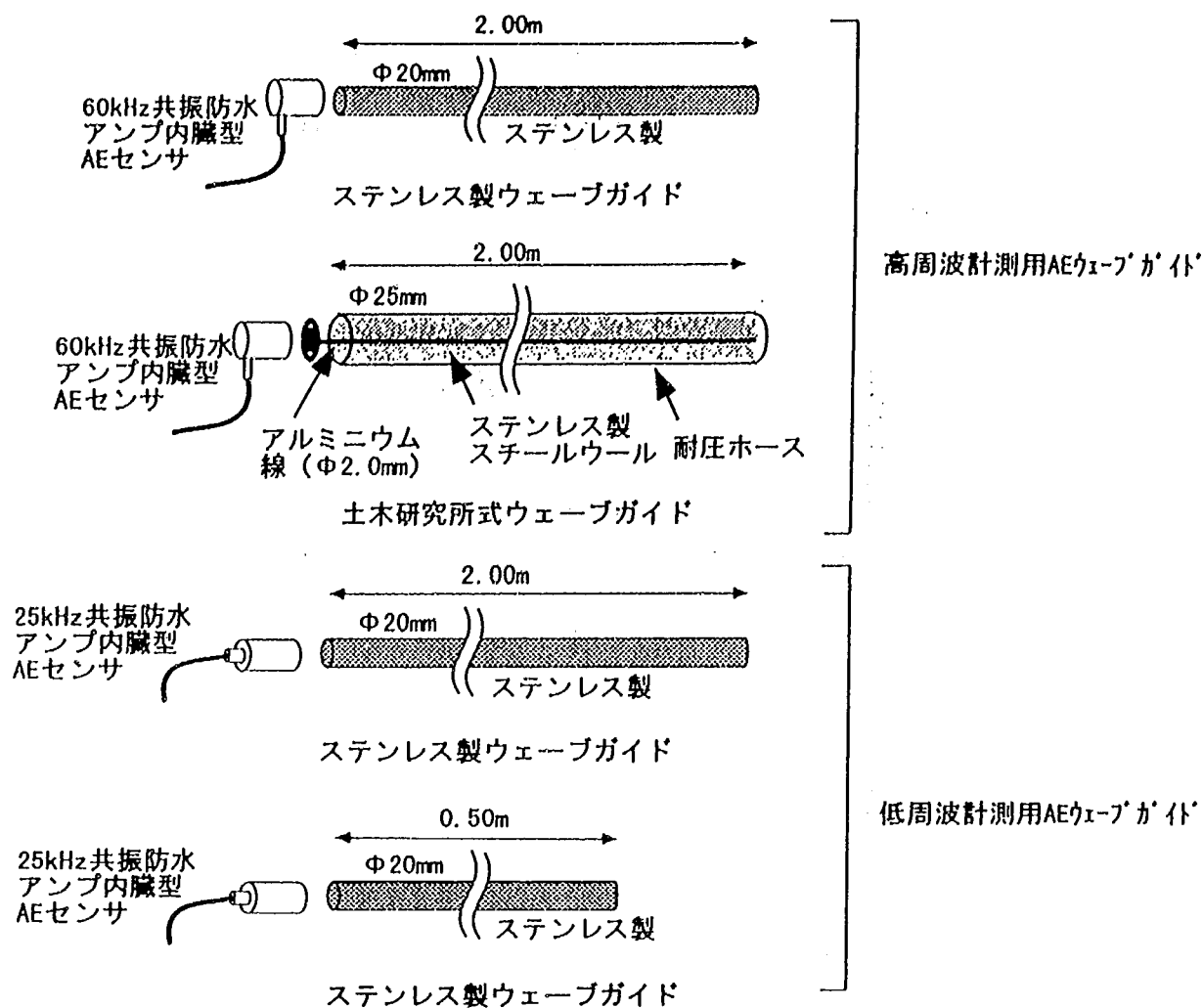


図-4.2.5 ウェーブガイドの構造

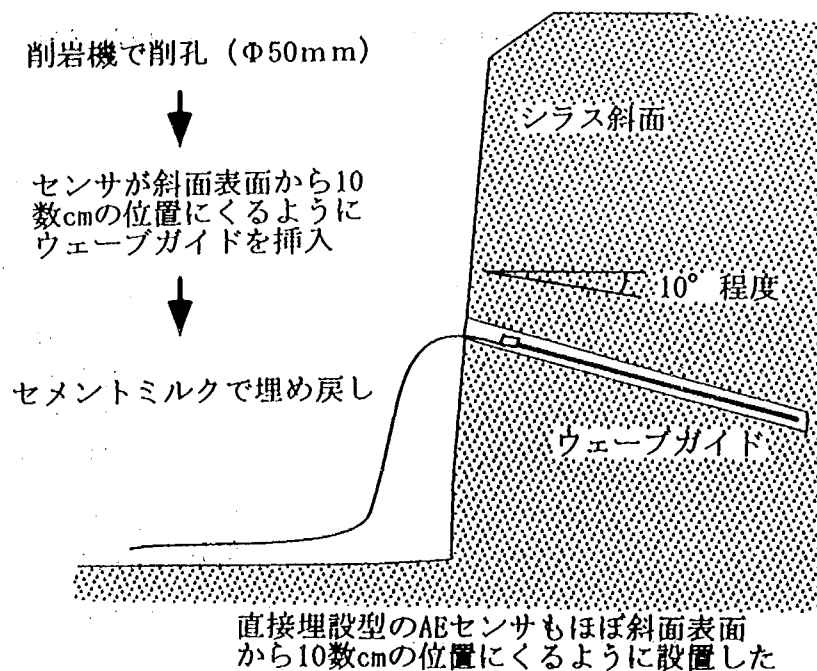


図-4.2.6 AEセンサの埋設方法

(3) 人工崩壊の方法

人工崩壊までの工程を図-4.2.7 に示す。まず、10 月 13 日に対象斜面に対してバックホウで斜面下部を掘り込み、不安定化させた後、3 日間放置し斜面のモニタリングを実施した。この最初の掘り込みにより、斜面の上部平坦面にはひびわれが発生したが、計器観測の結果からその後徐々に安定状態へと移行していることが類推された。そこで、10 月 15 日の早朝から上部平坦面のひびわれへの注水（写真-4.2.2）を行うとともに、午後からのり面下部のバックホウによる再掘削を行い（写真-4.2.3）、不安定化を促進させた。AE の発生挙動から十分に斜面が不安定化していると判断された時点で掘削を終了し、崩壊を待機した結果、掘削終了から約 3.5 時間で対象斜面の全面崩壊へと至った。

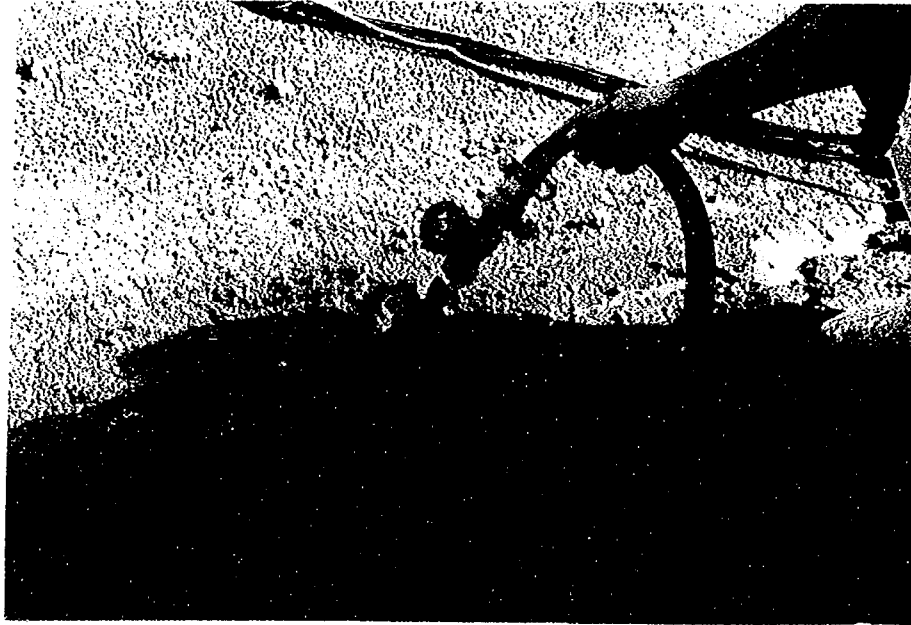


写真-4.2.2 斜面上部平坦面のひびわれへの注水

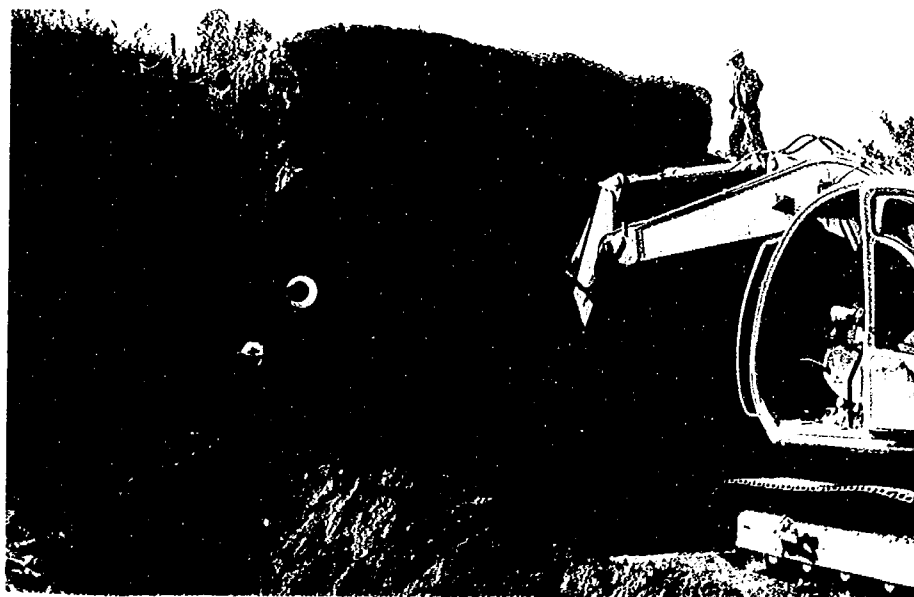


写真-4.2.3 のり面下部のバックホウによる再掘削

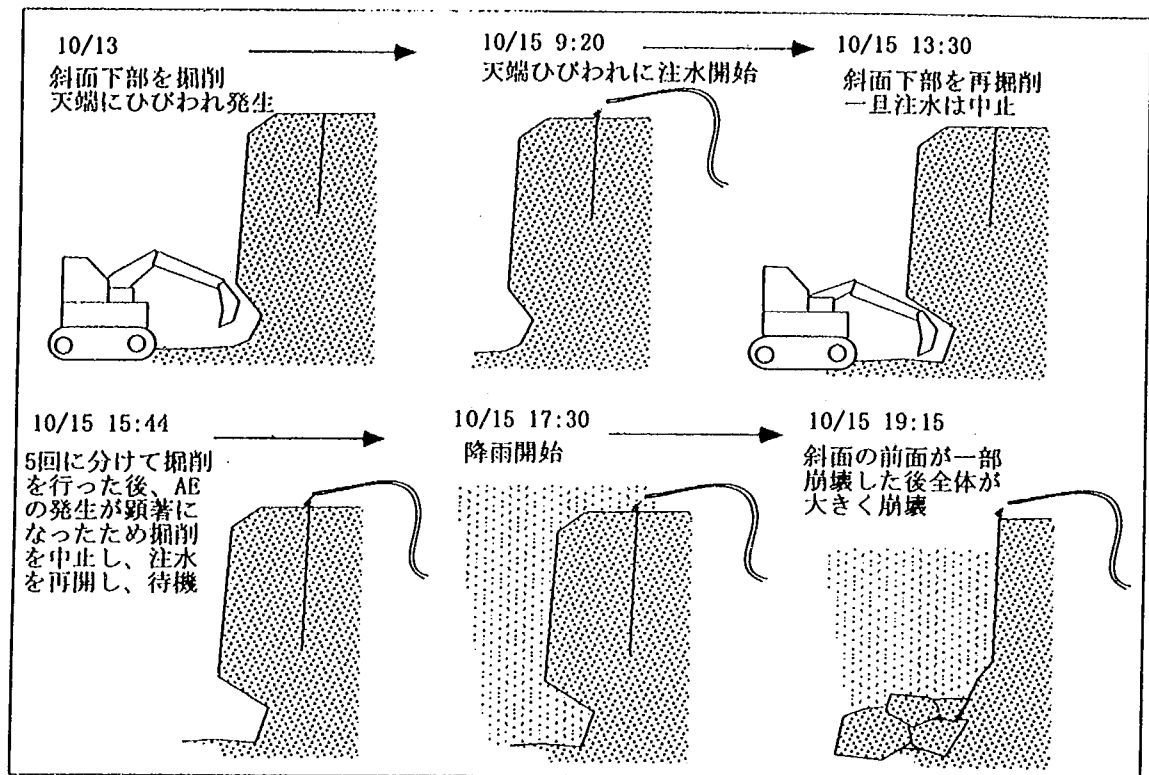
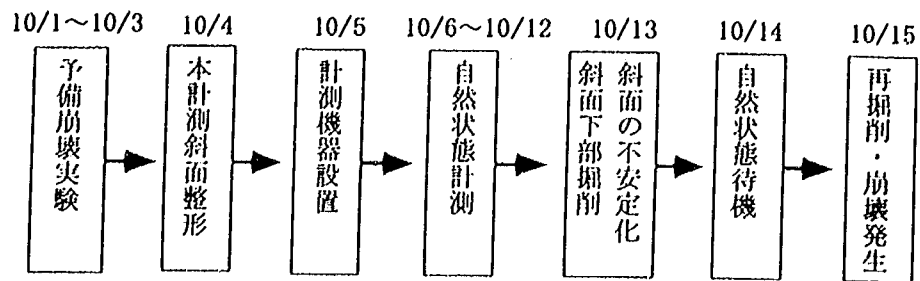


図-4.2.7 人工崩壊までの工程

4.2.2 計測結果

(1) 通常時における計測結果

斜面整形を行い、各センサを設置した状態で通常時（バックグラウンド）における AE センサおよびその他のセンサによる斜面動態計測を行った。図-4.2.8 に晴天時の代表的なセンサの挙動を示す。伸縮計や傾斜計は晴天時において気温と連動する形で変化を示しているが、AE センサは、センサ間で差はあるもののヒット数で 10 分間あたり 20 個以下と極めて低いレベルでしか信号を検出していない。

(2) 予備斜面下部掘削時（10 月 13 日）の計測結果

10 月 13 日に斜面下部を掘削し、斜面上部平坦面にひびわれを発生させ、斜面の不安定化を促進した（図-4.2.9）。

掘削時点では斜面を直接バックホウで削るため、多くの AE が発生している。この掘削後、AE ヒットレート（単位時間あたりの AE の発生数）は徐々に低下しており、斜面が安定しつつある状態をモニタリングできている。また、伸縮計および傾斜計も掘削後 2 時間程度（15:00 あたりまで）は連続した変化を示しているが、その後ほぼ通常時の変動に戻っている。

(3) 最終崩壊時の計測結果

予備斜面下部掘削を行って 3 日目の 10 月 15 日の早朝から上部平坦面のひびわれに対して注水を実施した。その後、13:30 から 15:40 にかけて計 5 回に分けて斜面下部の再掘削を行い、3 時間 30 分後に崩壊を誘起させた。

この間の代表的な AE の発生挙動とその他のセンサの挙動を図-4.2.10 に示す。図-4.2.10 に示されるとおり、5 回にわたる掘削では、掘削を重ねるごとに掘削直後の AE の発生数（ヒットレート）が拡大していることが確認できる。とくに、5 回目の掘削以降は、これまで掘削後の時間経過によって減少傾向にあった AE の発生数（ヒットレート）が減少せず、高い状態で維持している。試験中はこれらの AE の発生挙動を勘案し、5 回目の掘削を最後に崩壊を待機することにした。

最後の掘削を終了した後、AE の発生数（ヒットレート）は急激に高くなる「うねり」を数回繰り返すが、18:30 以降は、AE 発生数（ヒットレート）の連続的な増加傾向が顕著になる。また、図-4.2.10 から伸縮計および傾斜計についてもほぼ AE の発生数と連動した形で、変化していることが認められる。

最終的な崩壊は、10 月 15 日の 19:15 に発生しているが、この直前（19:10）に斜面の下部の一部が崩落しており、この時点で AE 発生数は一旦大きなピークを示し、最終崩壊時にはさらに大きなピークを示している。

写真-4.2.4、写真-4.2.5 に崩壊中および崩壊後翌朝の対象斜面の状況を示す。なお、最終的な崩壊による崩壊深は約 2.5m であった。

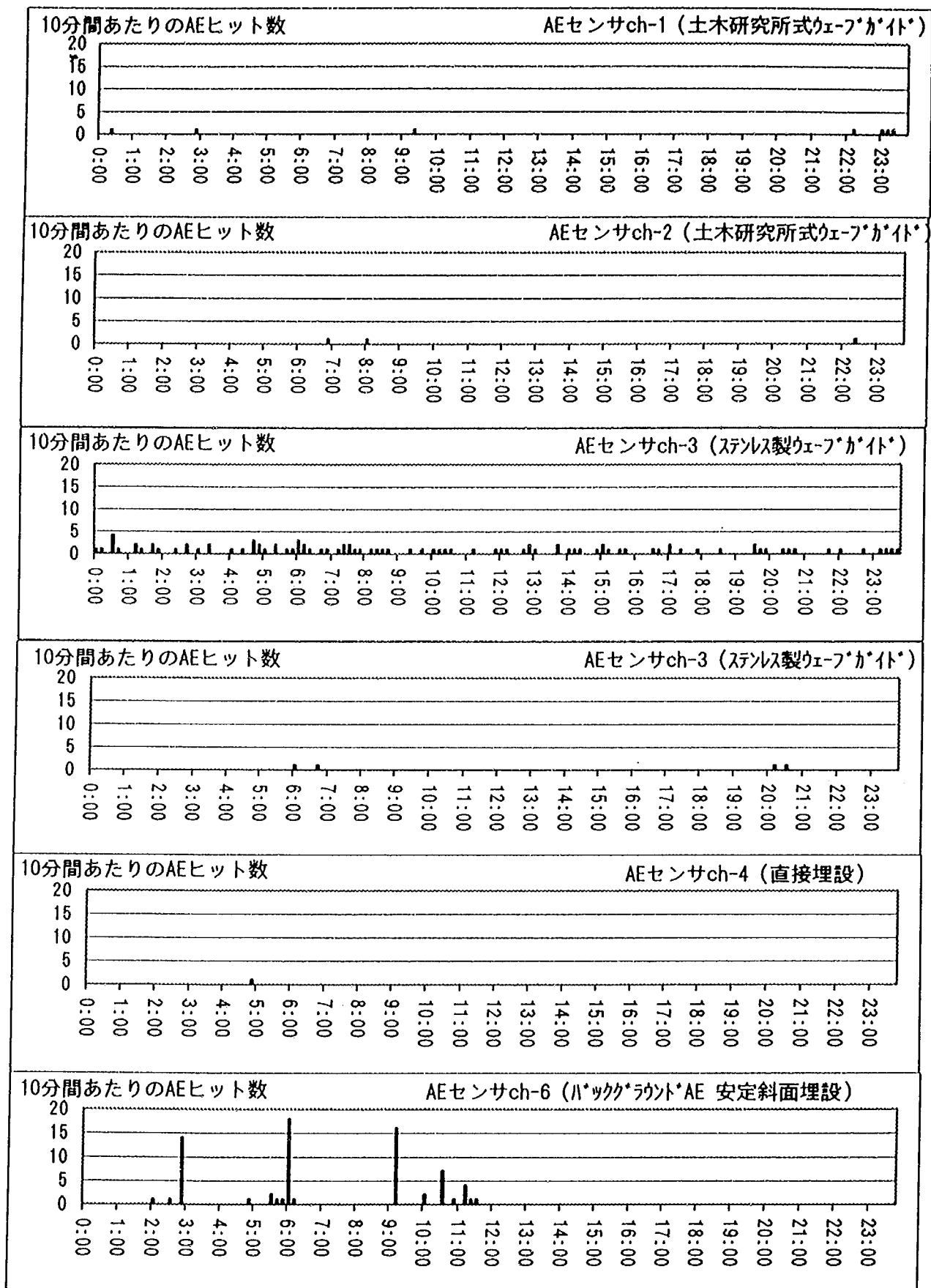
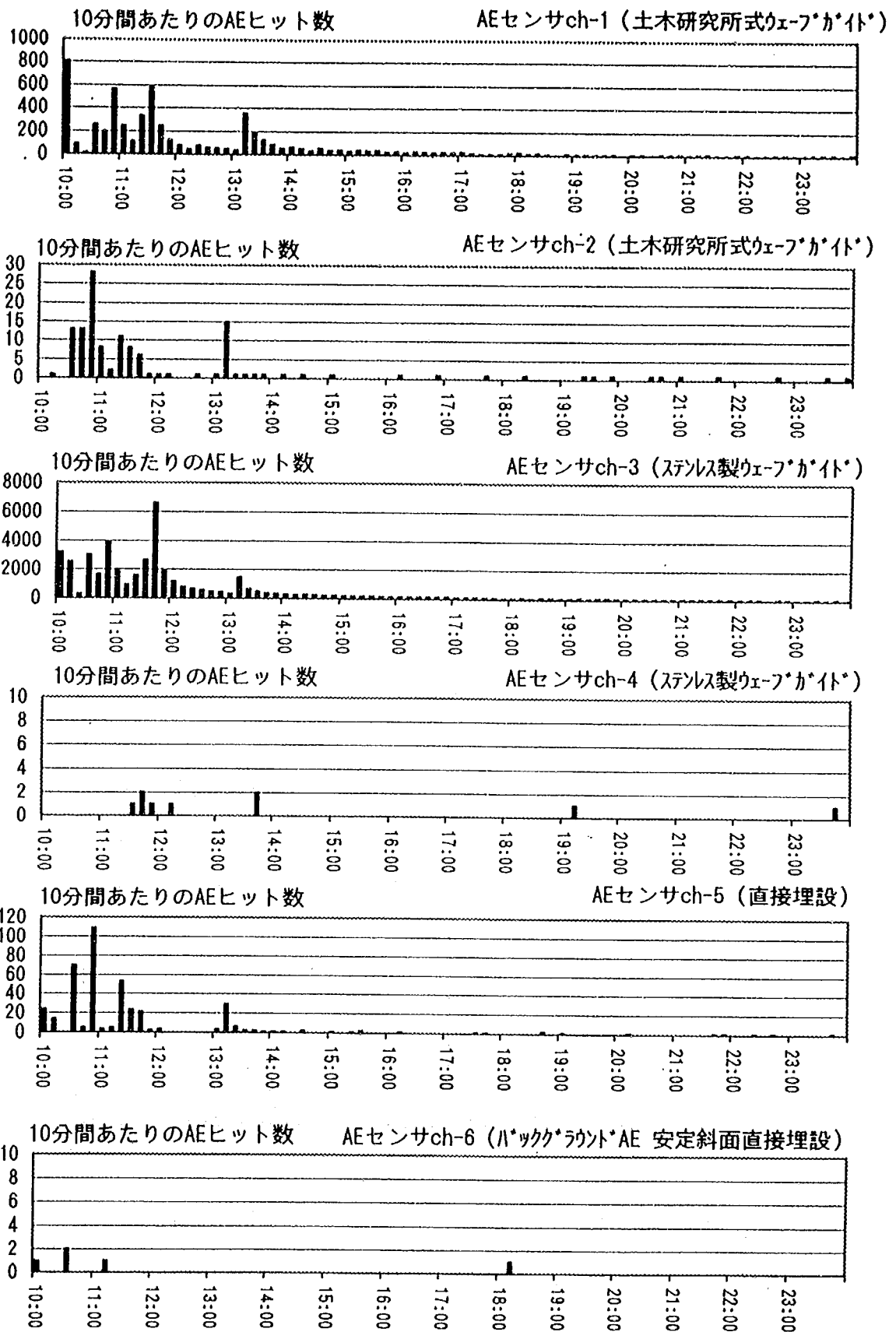


図-4.2.8 通常時のしらす斜面動態データ (10月8日)



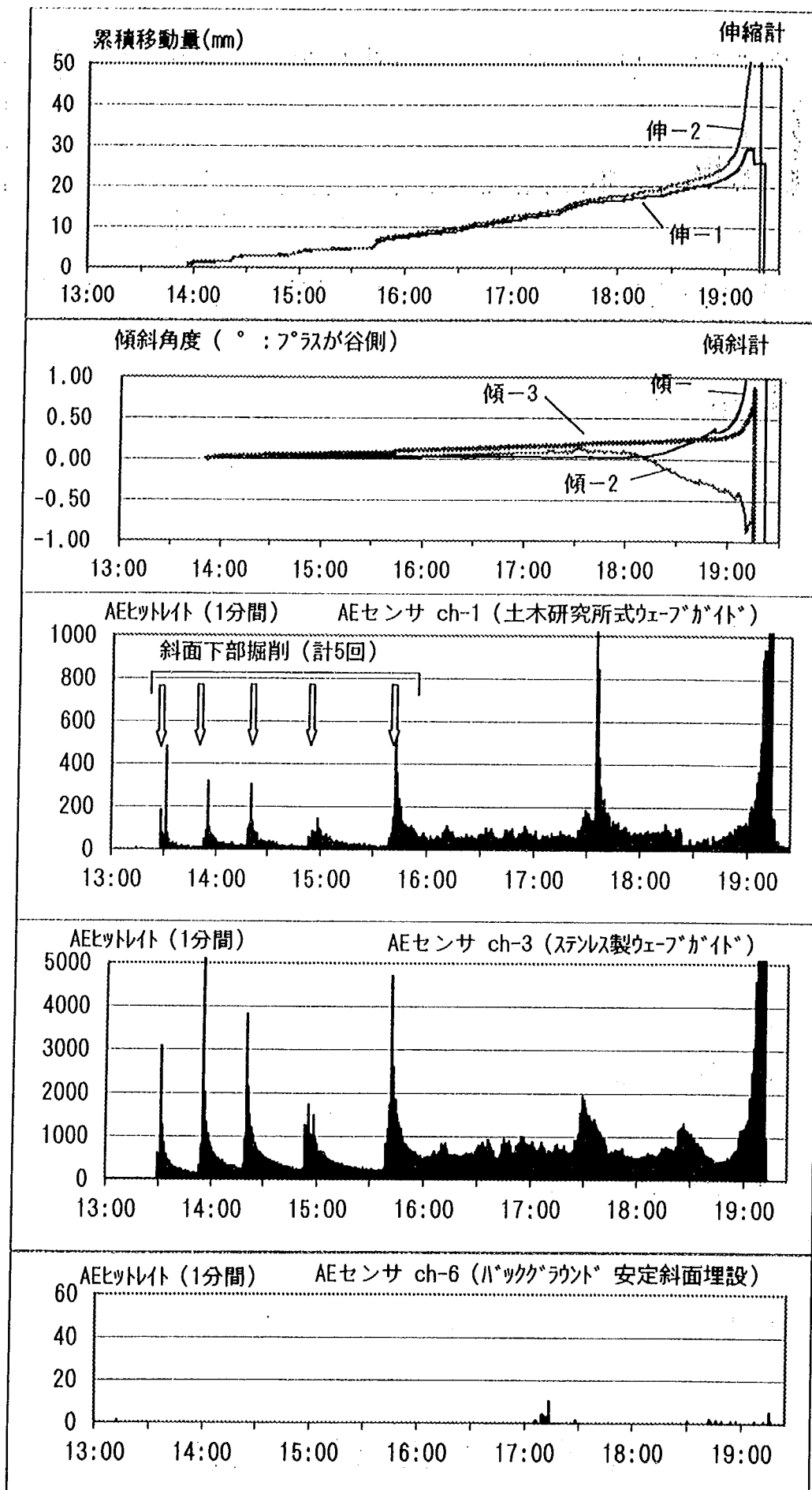


図-4.2.10 掘削および崩壊時のしらす斜面動態データ (10月15日)



写真-4.2.4 崩壊中の対象しらす斜面の状況



写真-4.2.5 崩壊後翌朝の対象しらす斜面の状況

4.2.3 計測データの評価

(1) 対象斜面の崩壊形態と崩壊機構

対象斜面は、下部に比較的固結度の高いしらすと上部に風化の進んだしらすが堆積した構造になっており、向かって右側でより風化が進んでいる。また、写真-4.2.5 に認められるように向かって左側の斜面が崩落せずに残存している。

図-4.2.10 の伸縮計の変化を詳細に見ると、5 回目の掘削後ほぼ伸縮計 1、2 とも同様に増加する傾向にあるが、崩壊前約 1 時間 (18:15 頃) から伸縮計 2 (右側) が大きく増加し、伸縮計 1 の変化が緩慢になっていく傾向が認められる。

また、傾斜計の変化は、かなり早い段階 (14:00 頃) から上部に設置した傾斜計 3 が増加傾向 (トップリング側) に動いており、傾斜計 2、1 は 17:30 頃から増加傾向が顕著になっている。傾斜計 3 と 1 は 2 次関数的に増加を続け崩壊に至るが、傾斜計 2 は 18:00 時以降、減少傾向 (滑動側) に転じ、そのまま崩壊に至っている。

これらの地質的な条件、崩壊後の形状、伸縮計等の動きを総合すると、全体としてはトップリングによる崩壊であるが、向かって右側での崩壊傾向が強く、また、高さ方向にも一部滑動方向での崩壊も含んだ複合的な崩壊形態を示している (図-4.2.11)。

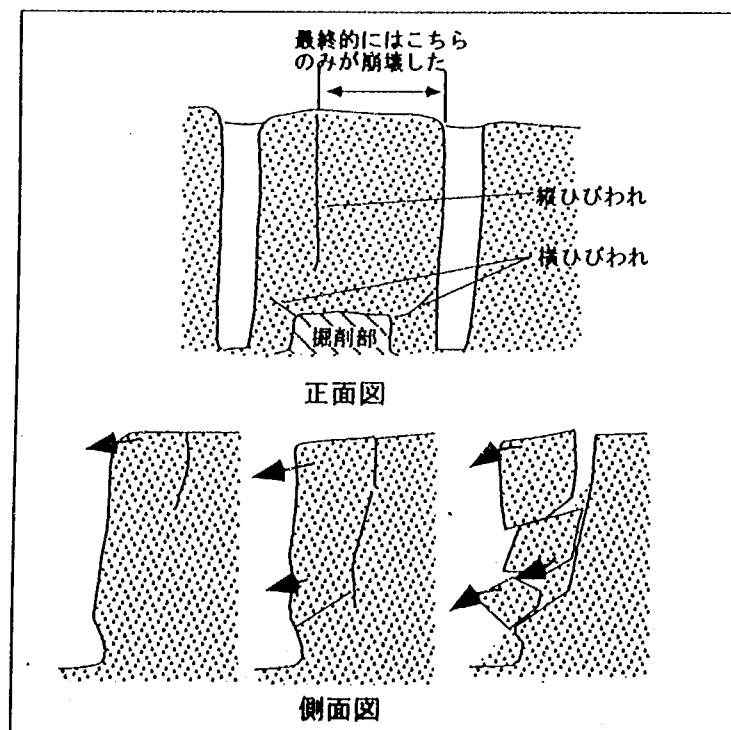


図-4.2.11 対象しらす斜面の崩壊形態

(2) 斜面の崩壊と AE の発生挙動

崩壊直前の各 AE センサの AE 発生状況を図-4.2.12 に示す。比較参照用 AE センサ以外の各 AE センサの全体的な傾向は同じであるが、検出する AE 発生数には大きな差がある。これには、センサの設置方法の相違と設置位置の相違の 2 つの理由が考えられる。

今回、設置した AE センサのうちでは、斜面下部に設置したステンレス製ウェーブガイド AE センサ (ch-3) において最も多数の AE 発生数が早い段階から検出され、続いて斜面下部の土木研究所式ウェーブガイド AE センサ (ch-1) で検出量が多い傾向にあった。

しかしながら、同様に斜面下部に設置した直接埋設型の AE センサの検出量は低く、また、同じウェーブガイド式でも斜面の上部に設置した AE センサの崩壊前兆初期の AE 検出量は低い傾向にあった。これらの関係を表-4.2.2 に示す。

これらの AE 発生数の相違は、センサ周辺で消費されるエネルギーの相違を示しているものと考えられる。すなわち、対象斜面はトップリング的に崩壊しているため、斜面の上部では、変位量は大きいが応力は小さい。このため、相対的なエネルギー量は小さくなる。これに対して、斜面の下部では、大きな応力集中があり、またウェーブガイドにこれが直接作用する形になっているため、変位そのものは小さくとも、エネルギー量が大きくなり、このため、下部に設置したウェーブガイド式の AE センサでは多数の AE が検出されたものと想定される。

また、同じ下部に設置したウェーブガイド方式の AE センサでも、ステンレス製と土木研究所式では、ステンレス製で多く AE を検出する傾向にあった。これはステンレス製のウェーブガイドでより AE を検出しやすいことによると考えられたが、崩壊時にはステンレス製のウェーブガイドの設置してある向かって右側が大きく崩れていることから、崩壊形態の差による可能性も否定できない。

また、最終崩壊前の 17:30 以降から降雨があったが、比較参照用 AE センサのデータでは、ほとんど AE を検出していないことから、対象斜面に設置した AE センサの崩壊時のデータには、降雨によるノイズはないか、あっても極めて微小であると判断される。

表-4.2.2 AE 検出量とウェーブガイドの設置方法

設置方法 崩壊現象	土木研究所式ウェーブガイド AE		ステンレス製ウェーブガイド AE		直接埋設 AE	比較参照 AE
	斜面下部 ch-1	斜面上部 ch-2	斜面下部 ch-3	斜面上部 ch-4	斜面下部 ch-5	ch-6
掘削時の AE 13:00~15:00	○	△	○	△	○	×
斜面崩壊前兆時の AE 17:00~18:30	○	△	○	△	△	×
部分崩壊時の AE 17:00	○	○	○	○	○	×
全面崩壊時の AE 17:15	○	○	○	○	○	×

※ ○：十分に検出できた △：検出できた ×：検出できなかった

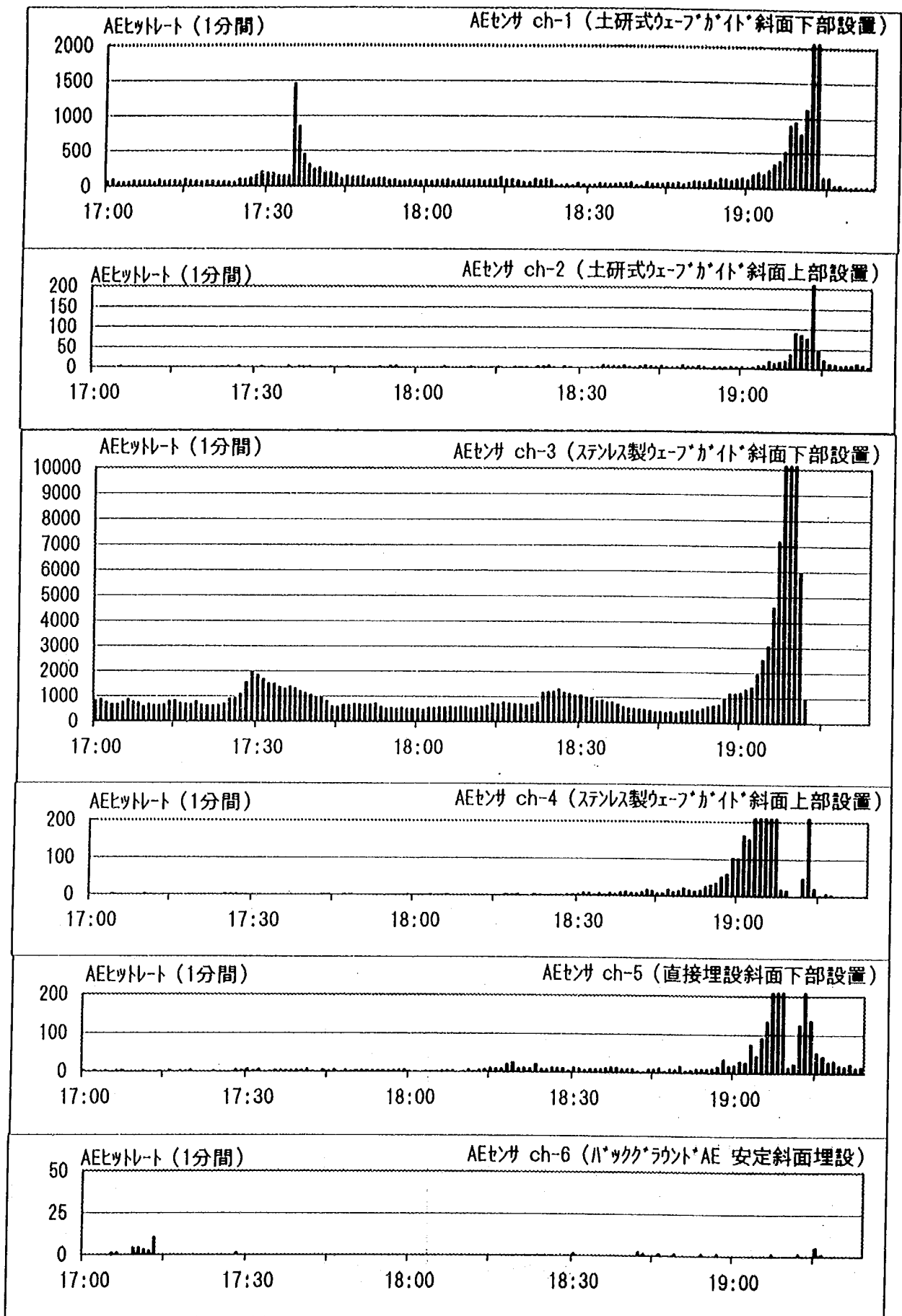
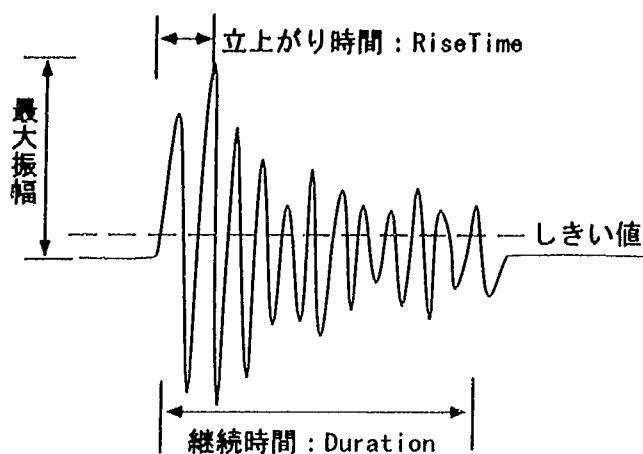


図-4.2.12 崩壊直前のAE発生状況

(3) 崩壊時の AE パラメータと崩壊予知

AE による斜面崩壊のモニタリングの利点として、伸縮計や傾斜計の変化を詳細に監視するためにはサンプリング速度を短くとる必要があるのに対して、AE は信号が検出された時点でリアルタイムにそのデータ記録・表示するため、前兆時間の短い現象を観測するのに適していることが挙げられる。また、検出される 1 つ 1 つの AE 信号のなかに AE パラメータとして様々な情報を含んでいる点も重要である。

図-4.2.13 に AE の各パラメータについての説明を示す。これらの AE パラメータは AE 信号を発生させた破壊現象についての特徴を示すものと考えられる。



AE ヒット : しきい値を超える信号の発生回数
(上記の波形 1 つで 1 ヒット)

AE カウント : 1 つのヒットの中でしきい値を
上から下に通過した回数

しきい値 : AE 検出のため設定する振幅の最小値

図-4.2.13 AE パラメータの説明

そこで、図-4.2.14 に、代表的な崩壊前兆時 (16:00) の AE 波形と崩壊直前 (19:00) の AE 波形を示す。両者を比較すると、崩壊直前の AE 波形がかなり長くなっていることがわかる。また、図-4.2.15 は、崩壊前兆時と崩壊直前にそれぞれ発生する AE の継続時間の頻度分布を比較したものであるが、崩壊直前に長い波長を有する AE の発生する頻度が明らかに多くなっていることが確認できる。

この波長長さの相違については、崩壊直前では破壊の形態がせん断が卓越するためとの考え方もできる。しかし、この現象はむしろ破壊が連続的に進行するため、幾つもの AE が重なり、重合波になっているためであると考えられる。図-4.2.16 は、最終崩壊時における単位時間あたりの AE ヒットと AE カウントの比較を行ったものであるが、崩壊の直前 5 分前ほどで AE カウントが 2 次関数的に増加しているにもかかわらず AE ヒット数は急激に減少している。これは、瞬間的に膨大な破壊が発生しているため、無数の AE が重合してことを示しているものと判断され、継続時間が長くなる理由を示している。

このことから、継続時間の長い AE が多数発生する段階は、崩壊の最終段階にきていると判断でき、AE の継続時間をモニタリングすることにより崩壊の直前予知も可能であると思われる。

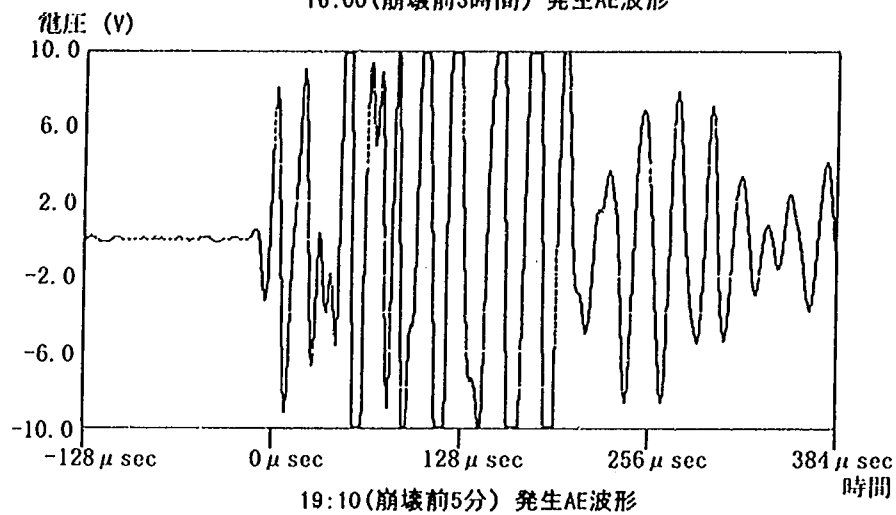
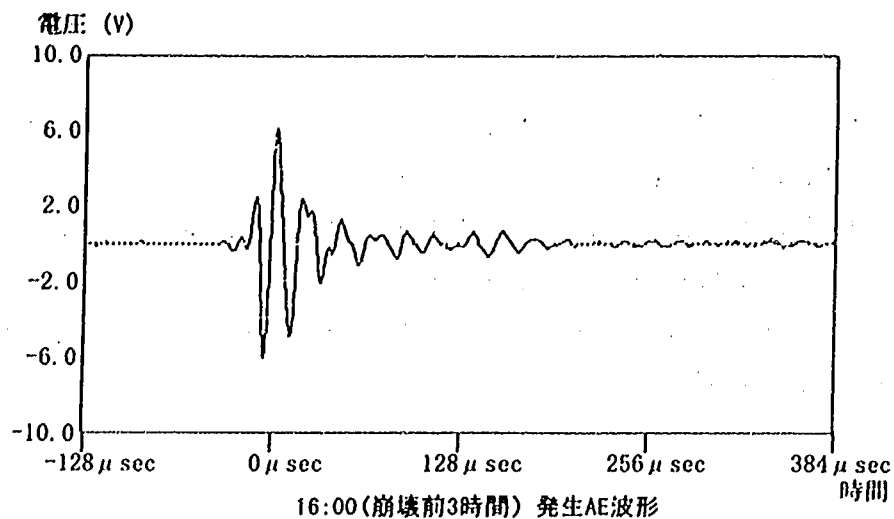
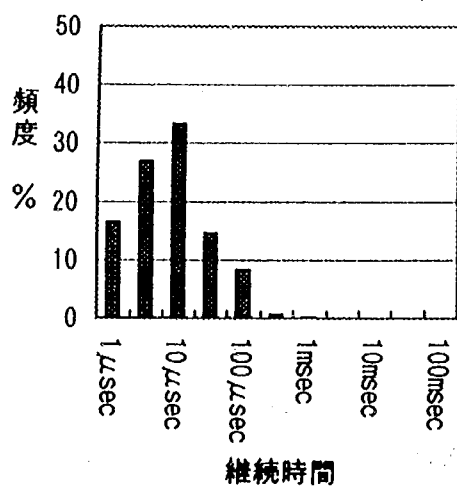
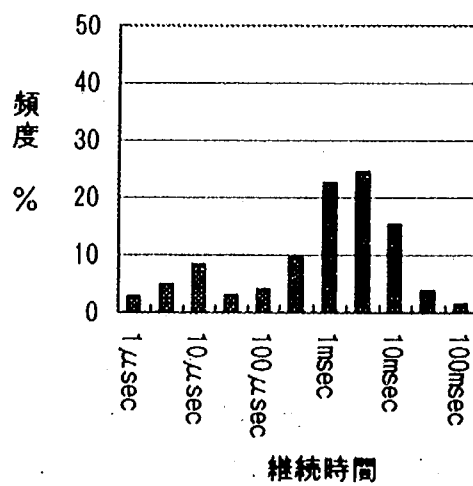


図-4.2.14 崩壊前のAE波形の比較 (ch-3)



崩壊前3時間 (16:00~16:10)



崩壊前5分 (19:00~19:10)

図-4.2.15 崩壊前のAE継続時間頻度分布の相違

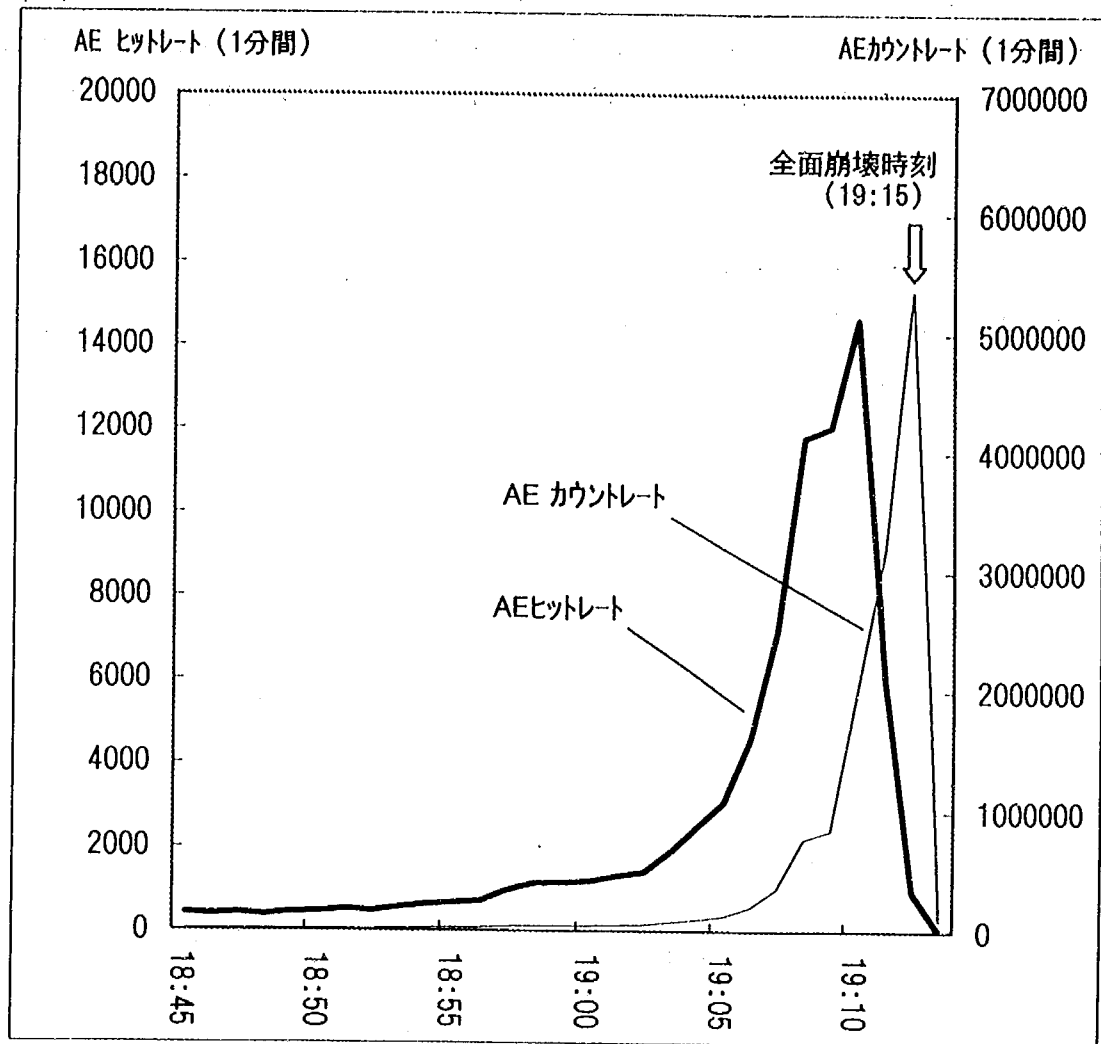


図-4.2.16 崩壊前のAEヒット・カウントレートの変化

(4) AE 法による崩壊予知の可能性

図-4.2.17 は、今回の実験における崩壊直前の AE カウント (ch-3) の総和および表面移動量 (伸縮計 2) を比較したグラフである。AE のパラメータの 1 つであるカウントでグラフ化した理由は、崩壊の最終的な段階でも AE の重合の影響を受けず、AE の発生挙動を正確に表現できることによる。図-4.2.17 に示されるとおり、伸縮計の挙動と AE の発生挙動は酷似しており、いわゆるクリープ曲線に対応していることが明らかである。

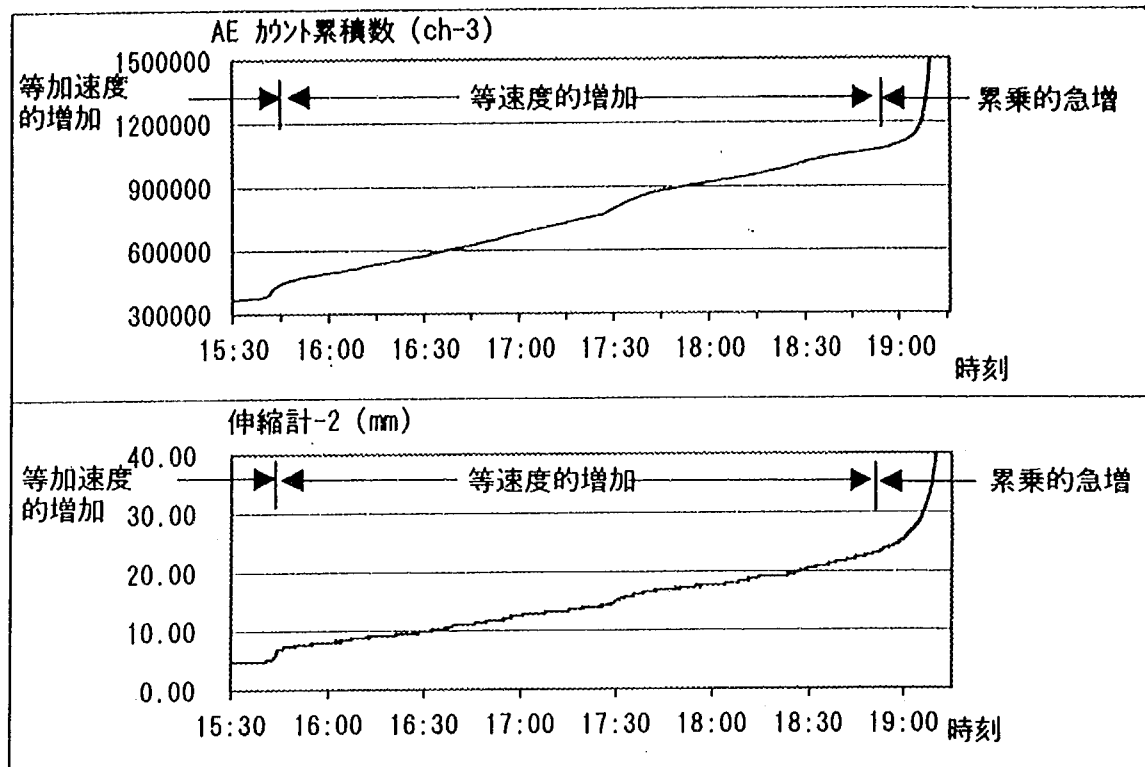


図-4.2.17 崩壊直前の伸縮計の挙動と AE の発生挙動

福岡らは¹⁾、表面移動速度の逆数がゼロになる時刻すなわち表面移動速度が無限大になる時間を予測することで、崩壊時刻を予測する方法を確立している。AE の発生挙動では、単位時間あたりの AE の発生量（ここでは、単位時間あたりのカウント）が、この表面移動速度に対応している。そこで、同様に、単位時間あたりのカウント逆数の時系列変化を図-4.2.18 に示す。この図に示されるとおり、18:50 以降、単位時間あたりのカウントの逆数は、ゼロに向かってほぼ直線的に収束している。このことは、福岡らが表面移動量のデータを用いて崩壊時刻の予測した方法と同様の予測が AE データを用いることによってもできることを示している。

しかし、地すべりや粘性土斜面とは異なり、今回のしらす斜面のように切り立った斜面では斜面における前兆現象は短く、総じて崩壊は突発的である。AE が 3 次クリープに相当する累乗的な急増を示してから、崩壊に至るまでの時間はわずか 10 数分であり、現実的に崩壊予測を行うにはあまりに短い。このように、今回のしらす斜面のような場合 3 次クリープの時間が極めて短いことを考えると、2 次クリープに相当する定常的に大量の AE が検出されている時点で、非常に危険な状態にあると判断される。

また、先に述べた崩壊直前に AE の継続時間が極端に長くなる現象は崩壊 1~2 分前から発生するため、復旧工

事などの2次崩落監視に適用が可能と思われる。

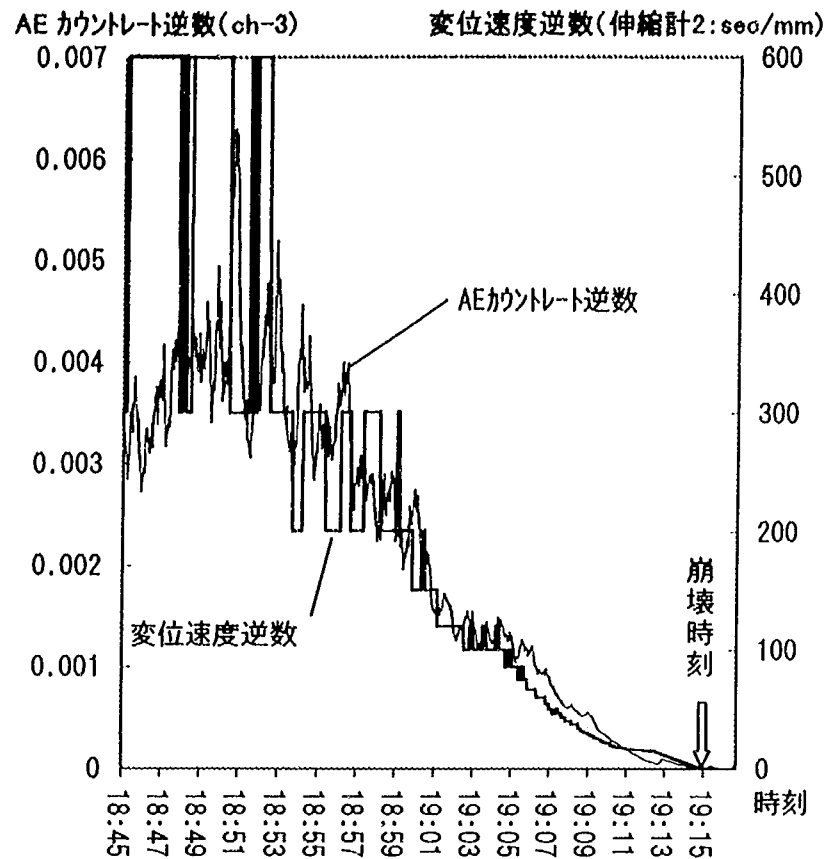


図-4.2.18 AE カウントの逆数による崩壊時刻の予測

4.2.4 まとめ

今回の実験によって以下のことが明らかになった。

- ①垂直に近い土砂斜面の場合、AE のセンサは応力の集中する斜面下部にウェーブガイドを用いて設置することが望ましい。
- ②土砂斜面において高周波 AE センサ（共振周波数 60kHz）を用いる場合には、数 10cm 埋設することにより降雨等のノイズをカットできる。
- ③伸縮計等の従来の計測システムではサンプリング速度を任意に設定するため、急傾斜地崩壊のように突発的な現象には対応できない場合もあるのに対して、AE の計測システムはリアルタイムで現象を捉えるため、突発的な現象を検出しやすく、情報量も多くなる。
- ④AE センサは高い精度で斜面の挙動をモニタリングすることができるとともに、発生挙動を観察・解析することにより、崩壊発生時刻を予測することも可能である。
- ⑤AE パラメータ（継続時間）から崩壊の瞬間の状況をモニタリングすることも可能であり、崩壊直前の監視方法として有効である。

〔関連文献〕

- 1) 福岡輝旗「斜面崩壊時の表面変位速度と加速について」土木学会第 36 回年次学術講演会概要集第 3 部、pp302-303、1981

5. 岩盤斜面における現地実証実験

5.1 実験概要

5.1.1 実験目的

本共同研究では、AE 法による岩盤斜面動態モニタリングの適用性の検討を目的に、日光砂防工事事務所管内の稲荷川流域の計測サイトに岩盤斜面に AE センサを設置し、斜面の動態観測を実施した。

岩盤崩壊のモニタリング技術については、平成 8 年 2 月に発生した豊浜トンネル坑口における岩盤崩落事故を契機にその重要性が再認識され、AE 法の適用が注目されるようになっている。

5.1.2 現地概要

計測・実験実施地点の地形・地質および気象条件の概要と推定される崩壊のメカニズムについて以下に示す。

(1) 実験実施位置

本研究における岩盤斜面における AE 計測・実験は、栃木県日光市北部の稲荷川上流の左岸に位置する実験サイトにおいて行った。図-5.1.1 にその位置図を示した。この稲荷川流域では頻繁に斜面崩壊や土石流が発生しており、本地点の周辺にも大小さまざまな砂防施設が存在する。

(2) 地形概要

稲荷川は女峰山に源を発し、ほぼ南東方向に流下し大谷川に合流する小河川であり、その最上流部は極めて急峻であり、雲龍溪谷と呼ばれている。稲荷川の地形は、大谷川との合流点付近のみに砂礫からなる河川敷が広がっている以外は、全般的に急峻な V 字谷の地形を呈している。計測対象地点周辺も両岸とも急峻な斜面となっており、特に計測対象斜面である左岸の河床に近い部分は一部オーバーハングしたほぼ垂直な岩壁となっている。なお、計測対象斜面の正面に位置する右岸には狭小な土石流段丘が数段認められる。写真-5.1.1 に対象地点の全景を示す。

(3) 地質概要

計測地点の地質については、周辺における露頭観察およびボーリング調査結果から確認した。これらの調査結果によれば、本地域の地質構造は、火砕流堆積物上に安山岩質の溶岩が堆積し、その上部に段丘礫層が部分的に見られる構造を呈している。計測・実験実施地点の標準的な地質構造を図-5.1.2 に示した。このうち、対象斜面自体は安山岩溶岩部に位置しており、この下流側の下部では崖錐堆積物が広く分布している。

対象斜面の安山岩は冷却時の Cooling joint が冷却面に平行に発達し、かつ稲荷川の流下方向に応力の開放に沿う形で、き裂が潜在的に分布していることが推定される。これに対して、火砕流堆積物は火山灰質に富み塊状を呈し、全体として未固結～半固結状態である。

こうした状況から、水理的には下位の火砕流堆積物は不透水層として機能し、上位の安山岩層はき裂部分に地下水を貯留・流下させる帯水層として考えられる。現地においても安山岩と火砕流堆積物との境界から湧水が観察される。

(4) 気象条件

対象地点周辺の気象条件について、対象地点に近い日光測候所の気象データをもとに、この周辺部の気

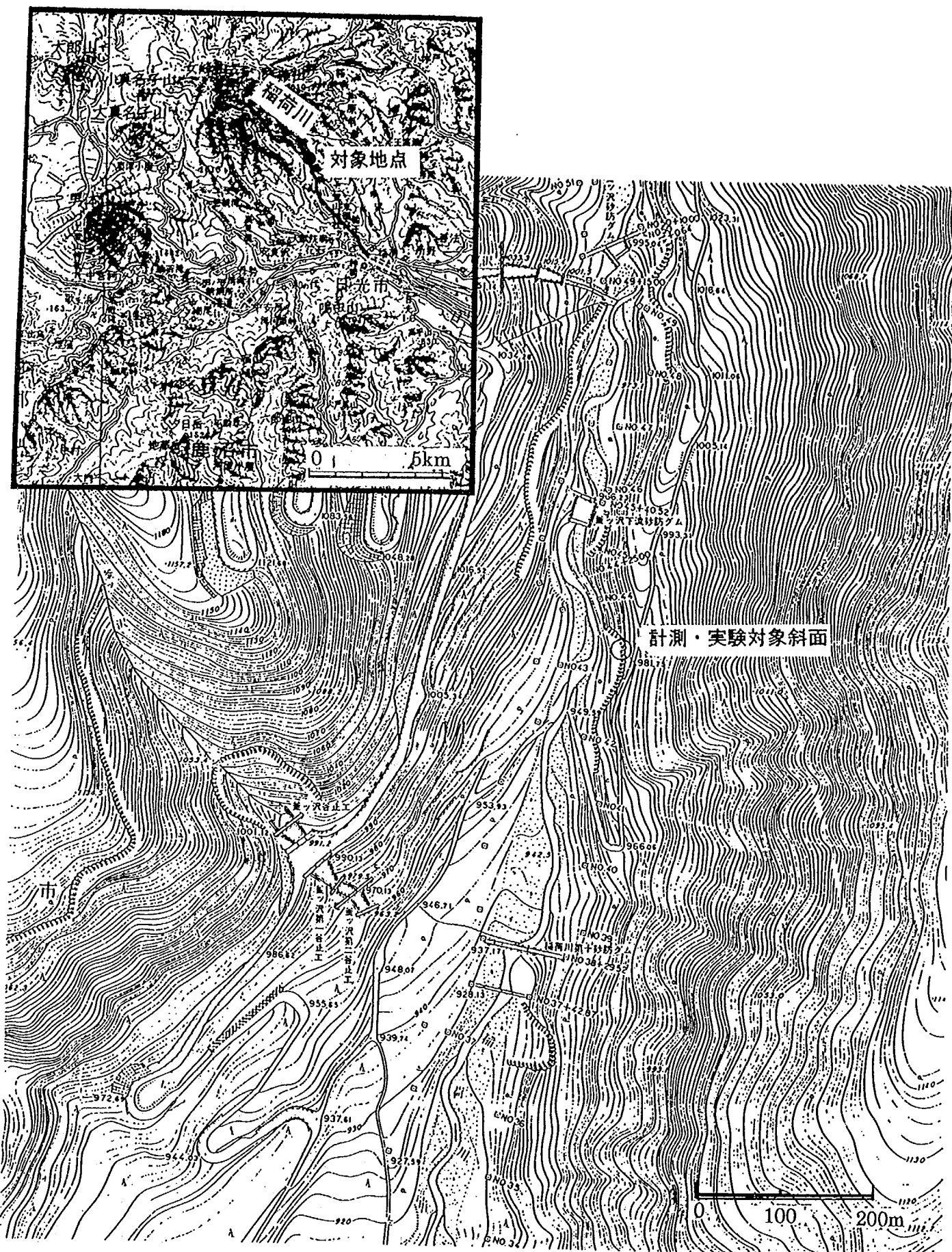


図-5.1.1 計測・実験位置

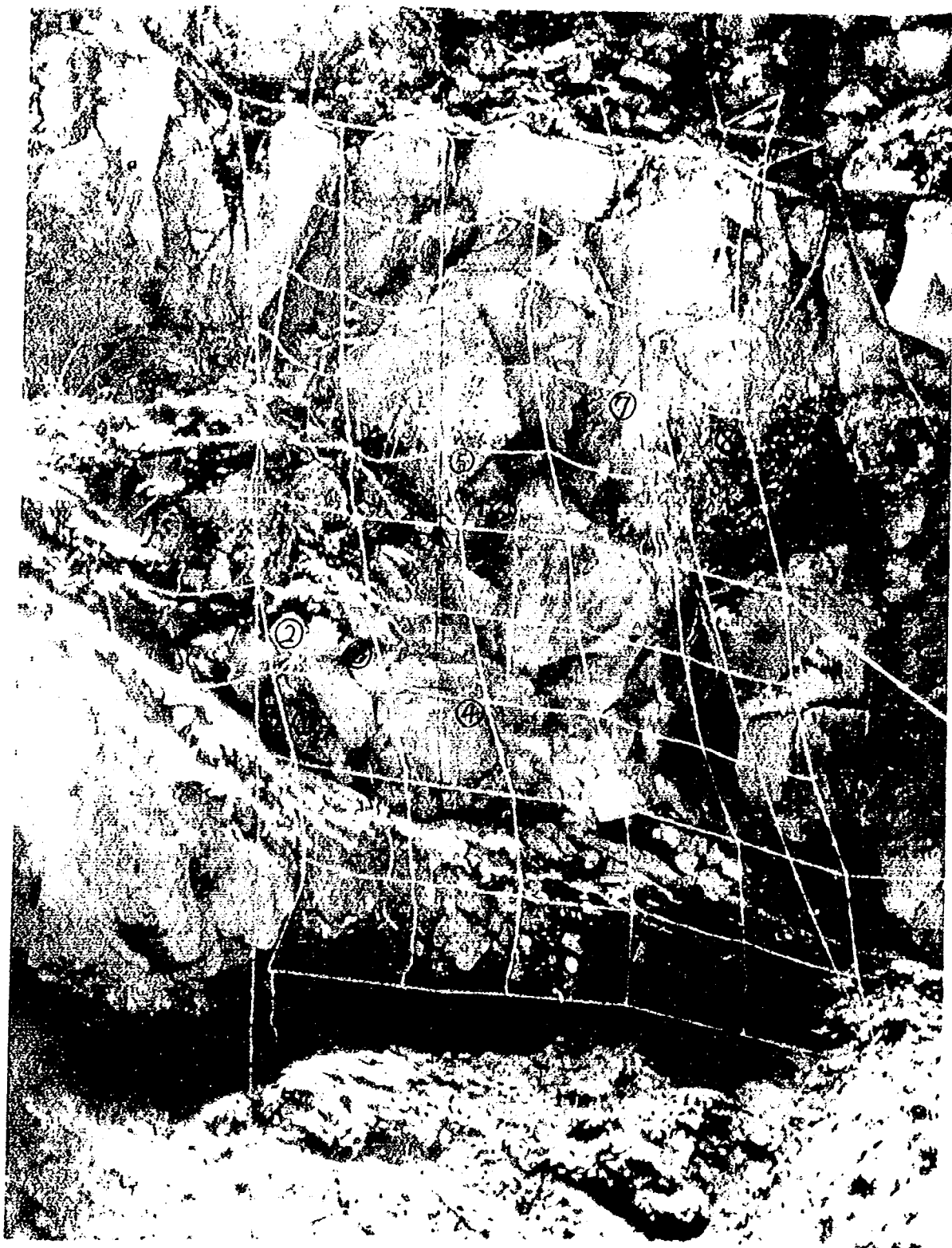


写真-5.1.1 対象地点全景

計測・実験対象地点は、下位の火砕流堆積物とその上位に分布するき裂の発達した安山岩溶岩から構成されるほぼ垂直な岩壁である。目視観察により、いくつかのブロックはかなり不安定化が進行しているものと判断された。

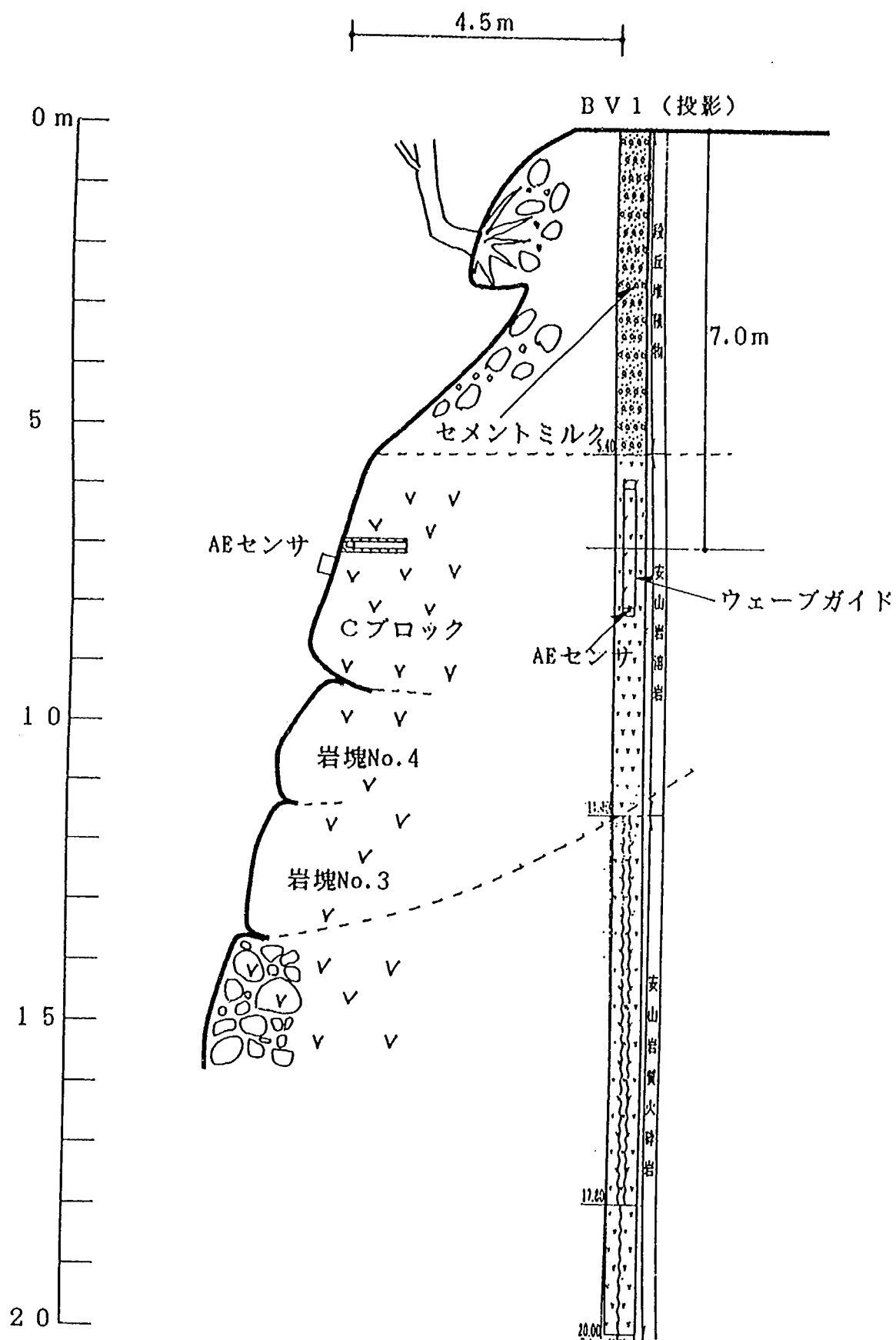


図-5.1.2 対象地点の地質構造模式図

露頭観察結果およびボーリング調査結果より推定した河川と横断方向の地質構造図。
上下流方向にも、ほぼこうした地質構造が連続するものと推定される。

象状況を整理した。これらのデータによると、対象地点周辺は夏季には 30℃ 近く気温が上昇する一方、冬季には -10℃ 以下の低温となり、30cm 程度の積雪も観測されている。また、夏季～秋季の期間は一般に梅雨前線や台風などの影響で降水量が多く、こうした降雨期には、斜面崩壊や土石流が頻繁に発生していることが窺われる。

また、この地点は標高の高い山間部に位置することから、気温の日較差も大きく、冬季ではその値は 20℃ 以上となり、凍結融解が頻繁に繰り返される。こうした気象条件から、融雪期には凍結融解作用に加えて、融雪に伴う地表水および地下水の作用によって斜面崩壊や落石が頻発しているものと考えられる。

(5) 崩壊のメカニズム

計測地点の岩盤崩壊のメカニズムとしては、上述の地形・地質・気象条件から以下のようなものが考えられる（図-5.1.3）。また、図-5.1.4 には本地点の崩壊形態を模式的に示した。

① 融雪期や連続降雨期

- a. 火砕流堆積物の崩壊や洗掘による粗粒部の崩壊で安山岩斜面の規模の大きい崩壊が誘発される。
- b. 安山岩溶岩中で、き裂の状況によっては背後から水圧がかかるようになり、これによって崩壊や落石が誘発される。

② 平常時

安山岩溶岩によって形成された崖は、引張り応力が作用している場にあることから、地震あるいは降雨の流水がき裂へ浸透することにより、き裂が進展または破壊し、落石が発生する。

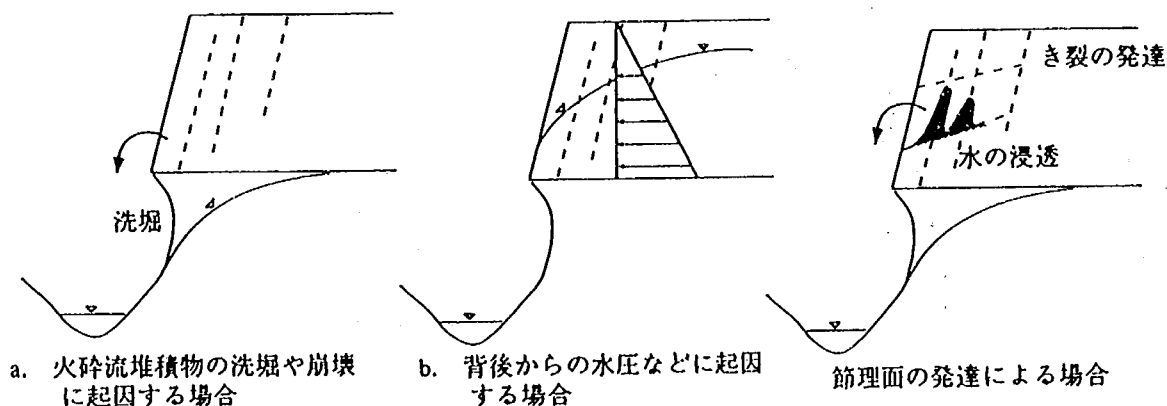


図-5.1.3 対象地点で推定される崩壊メカニズム

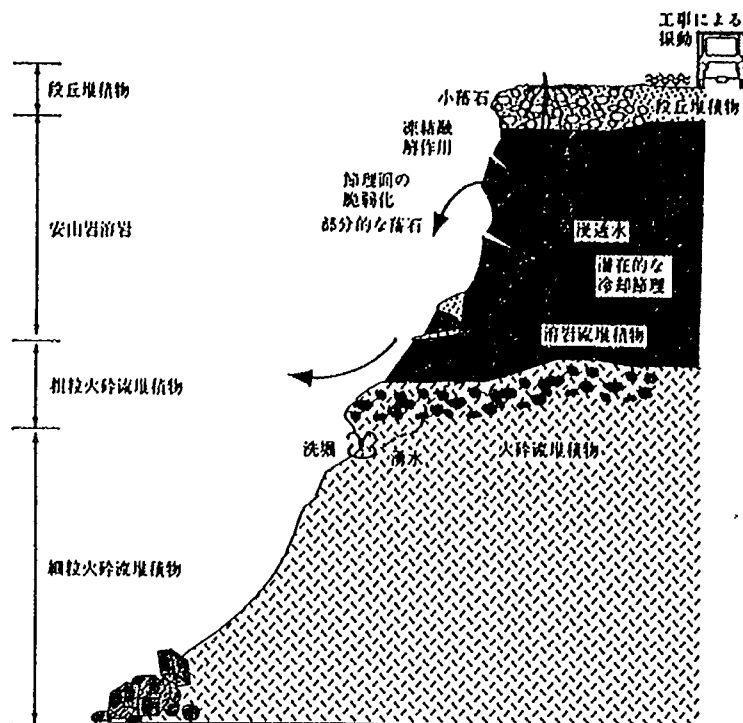


図-5.1.4 対象地点の崩壊形態の模式図

5.1.3 実験装置

(1) 計測機器の構成と仕様

実験対象斜面に設置された計測機器について表-5.1.1に、AEセンサについて表-5.1.2に示した。

表-5.1.1 主な計測機器

観測項目	計測対象	計測範囲	数量	備考
AE計測	高周波AE	60kHz共振型(AE計測システム SPARTAN)	6個	表面設置2個 表面削孔設置2個 ボーリング孔内設置2個
	低周波AE	20kHz共振型(AE解析システム MUSIC)	6個	表面設置2個 表面削孔設置2個 ボーリング孔内設置2個
	参照用AE (絶縁型)	60kHz共振型(AE計測システム SPARTAN)	2個	表面
AE以外の 斜面動態 計測	変位計	測定範囲250mm (分解能0.025mm)	4台	表面
	傾斜計	測定範囲-5~+5度 (分解能0.0025度)	6個	表面
	雨量計	転倒升式(0.5mm)	1台	
	温度計	IC温度センサ(0.1℃)	1個	
	記録器	カードロガー24ch	1台	
光波計測器	変位計測	測距(最小表示0.1mm) 測角(最小表示1秒)	1台	簡易反射板15箇所
映像記録	ビデオカメラ	電子増感型	1台	
	ビデオデッキ	間欠記録型タイムラプスビデオ	1台	8秒1回で40日記録

表-5.1.2 AEセンサおよびAE計測装置の仕様

項目		高周波AEセンサ(PAC)	低周波AEセンサ(NF)	参照用AEセンサ(PAC)
AEセンサ	種類	プリアンプ内蔵型	プリアンプ内蔵型	プリアンプ内蔵・絶縁型
	防水性	防水型		
	周波数特性	60kHz共振型	20kHz共振型	60kHz共振型
AE計測器	チャンネル数	6ch	6ch	高周波AEセンサ(PAC)のAE計測器と共用
	AEパラメータ	発生日時、発生チャンネル、ヒット、カウント、立上り時間、ピーク時刻、最大振幅値、エネルギー等		

実験対象斜面の表面に設置するためにAEセンサには、図-5.1.5及び図-5.1.6に示す取付金具を使用した。また、金具に取り付けたAEセンサを図-5.1.7のように防護した。

表面削孔設置及びボーリング孔内設置のAEセンサには、ステンレス製のウェーブガイド（図-5.1.8～図-5.1.11）を取付けた。表面削孔設置用のウェーブガイドは長さ250mm、ボーリング孔内設置用のウェーブガイドは長さ2mである。

AEデータの比較参照用に岩盤変位（変位計、傾斜計）および気象観測（雨量、温度、湿度）を実施した。また、岩盤全体の変位状況を確認するために、光波計測装置を設置し、1回/月程度の測量を実施した。なお、AEデータ発生時点の現場状況を確認するために、対象斜面对岸に画像記録装置を設置し、岩盤の変状及び気象を24時間連続で記録した。

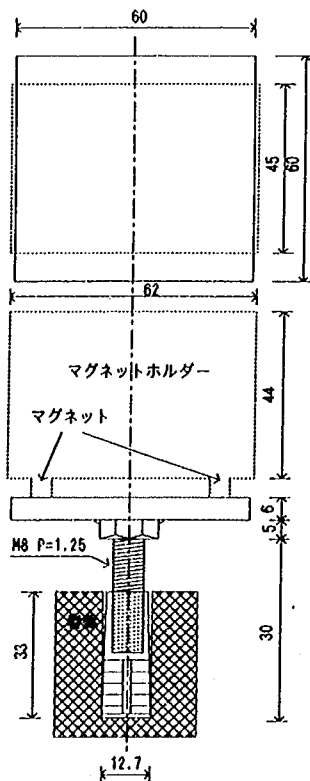


図-5.1.5 AEセンサ架台
(高周波AEセンサ用)

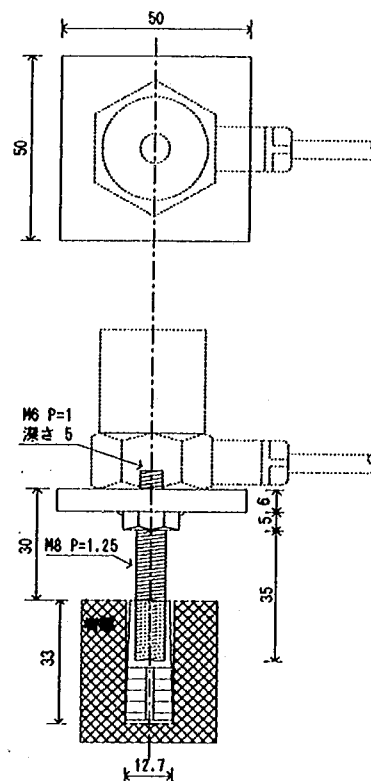


図-5.1.6 AEセンサ架台
(低周波AEセンサ用)

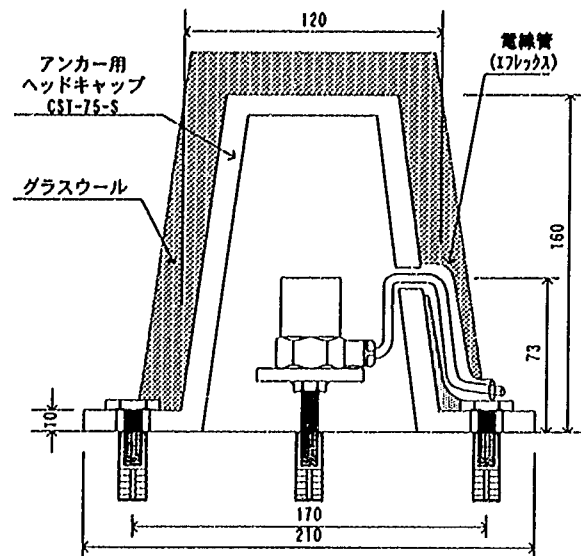


図-5.1.7 AEセンサ防護

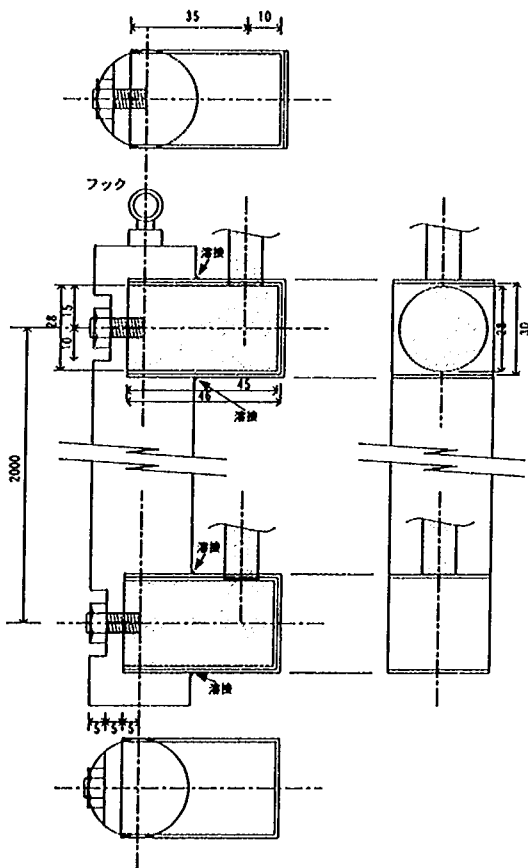


図-5.1.8 ウェーブガイド

(ボアリング孔内高周波AEセンサ用)

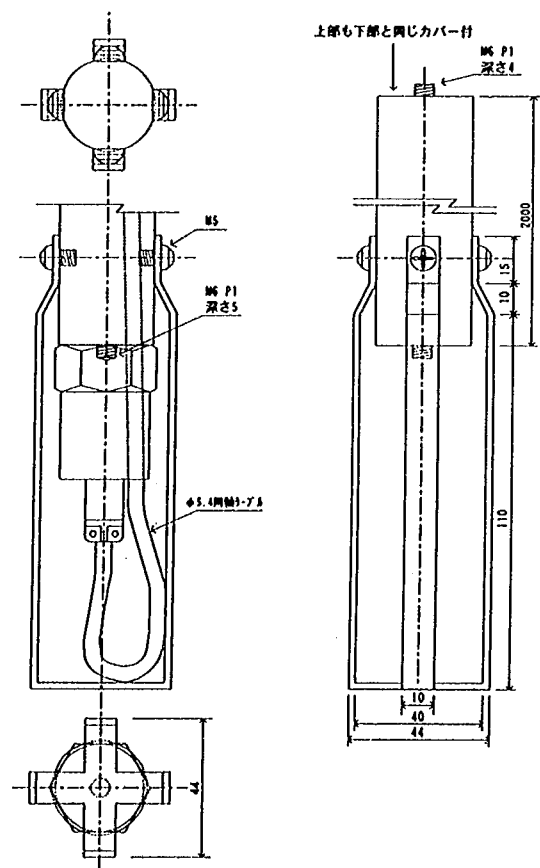


図-5.1.9 ウェーブガイド

(ボアリング孔内低周波AEセンサ用)

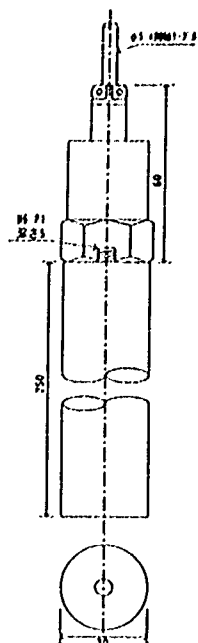


図-5.1.10 ウェーブガイド
(表面削孔高周波AEセンサ用)

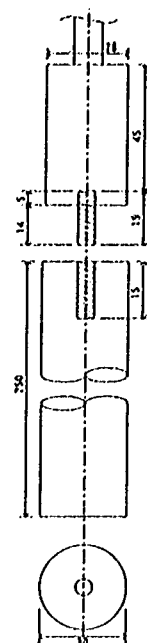


図-5.1.11 ウェーブガイド
(表面削孔低周波AEセンサ用)

(2) 計測器配置

実験対象斜面におけるセンサ配置の模式断面図を図-5.1.12に示し、図-5.1.13に正面からみたセンサ配置状況を示す。

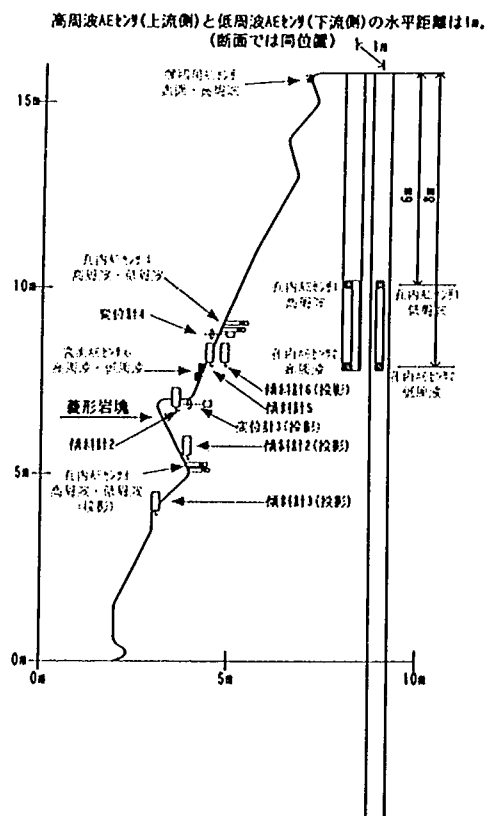


図-5.1.12(a) センサ配置模式断面図 (上流側)

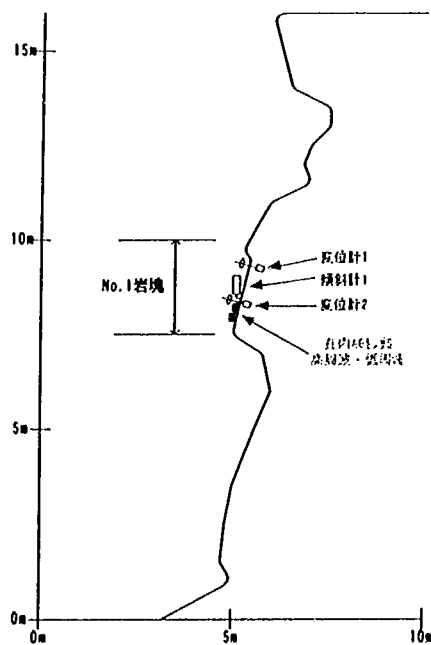


図-5.1.12(b) センサ配置模式断面図 (下流側)

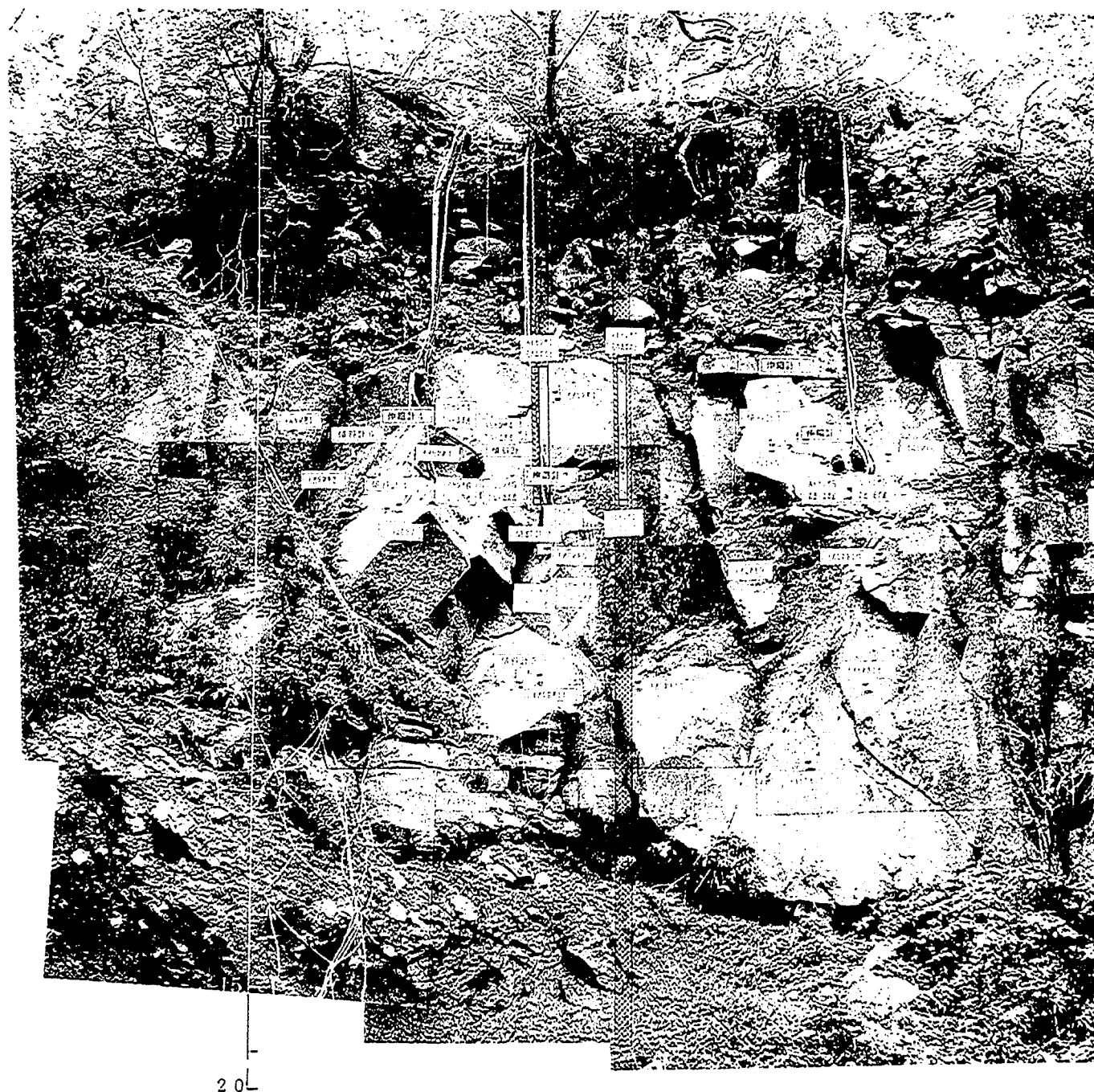


図-5.1.13 センサ配置図

(3) 計測器設置方法

表面設置のAEセンサは取付金具に固定し、ホールインアンカーおよびボルトを用いて実験対象斜面に設置した。また、AEセンサ防護のため、アンカー用ヘッドキャップで覆い、さらに緩衝材としてグラスウールで覆った。同軸ケーブルは電線管で保護した上で、ケーブル類は所々をアンカーボルト等で斜面に固定した。

表面削孔設置のAEセンサは計測位置に穿孔し、AEセンサを取付けた長さ250mmのウェーブガイドを孔内に挿入した後に、セメントミルクを充填することによって岩盤に固定した。

一方、ボーリング孔内設置のセンサは、実験対象斜面の背面に鉛直ボーリングを行い、長さ2mのウェーブガイドの両端にAEセンサを取付け、表面削孔型のセンサと同様にセメントミルクを充填する方法で設置した。

変位計はクラックを挟む形で設置し、傾斜計は変形が生じると想定される岩盤に設置した。なお、いずれの計測装置も温度変化を低減させるための防護措置を施し、ケーブルの動揺を抑えるために、所々をアンカーボルト等で固定した。

光波測距儀を取り付ける台は右岸側の段丘上に設置し、三脚をコンクリートで地盤に固定した。なお、基準点は、約240m離れた稻荷川第10砂防ダムに固定し、簡易反射板は実験対象斜面にホールインアンカーとボルトで固定した。また、対象斜面画像記録を撮影するビデオカメラは、光波測距儀の設置位置の上部の段丘面上に設けた単管パイプ足場に固定した。なお、ビデオカメラには夜間撮影用の指向性投光器(100V80W)1個を設置した。なお、電源は日向ダム用商用電源を用い、電源ケーブルは稻荷川左岸側の観測小屋まで、ビデオカメラの同軸ケーブルと一緒に稲荷川を架空索道で約30m横断させた。

これらの装置の設置状況を図-5.1.14に示す。

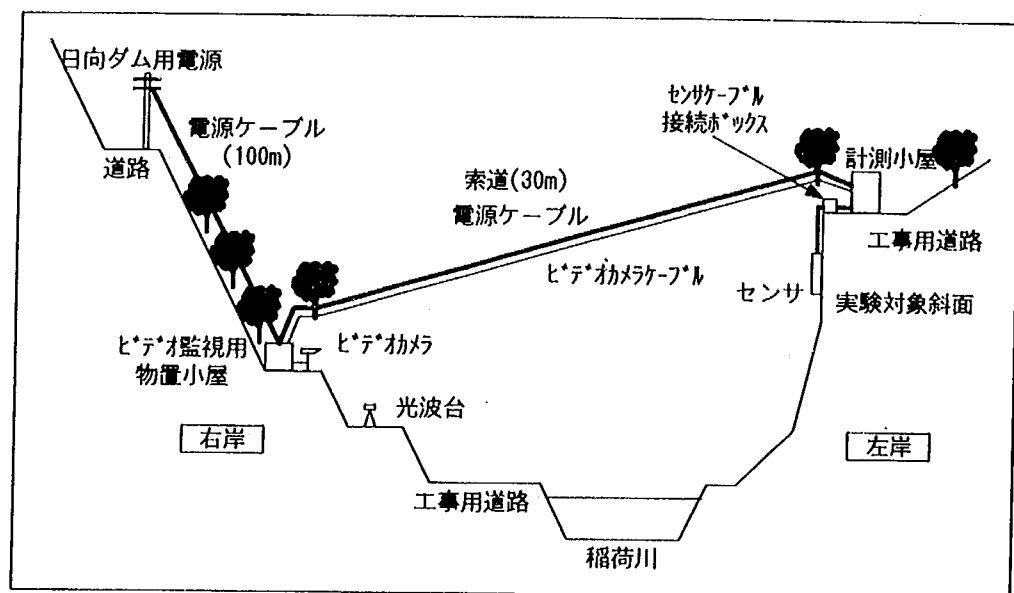


図-5.1.14 計測装置の配置状況（模式断面図）

5.1.4 動作確認試験

実験斜面に設置された高周波および低周波の各センサに対して、センサ周辺の岩盤斜面を打撃し、センサの動作の確認試験を平成9年5月8日に実施した。さらに、岩盤の破壊に伴い発生・検知される波動（本質的な AE）とそれ以外の波動（ノイズ）とを判別するための有効な資料を得る目的で、AE 計測時にノイズが発生すると想定される現象を励起し、その波形を収録して検討した。

全実験ケースを表-5.1.3 に示した。

表-5.1.3 動作確認試験計測条件一覧

	計 測 条 件	主に確認対象（事象近傍） となる AE センサ
Case1	C ブロック上部岩盤打撃	ch-4,ch-6
Case2	B ブロック右端岩盤打撃	ch-1,ch-2,ch-3
Case3	下流側センサケーブルの振動	ch-5
Case4	真ん中センサケーブルの振動	ch-1,ch-2,ch-3
Case5	上流側センサケーブルの振動	ch-4,ch-6
Case6	計測小屋内の蛍光灯スイッチ入切	全 ch
Case7	岩盤斜面上部道路のダンプ（約 5t）通行	全 ch.

この実験の結果と考察を以下に示す。

- ① 高周波および低周波タイプの各 AE センサは、ボーリング孔内に設置した ch-1 と ch-2 を除いて、正常に信号を検出した。
- ② 低周波タイプのセンサは高周波タイプのセンサに比べてより検出可能範囲が広い。したがって、広範な計測対象領域を少数のセンサで監視する場合には有効であると言える。
- ③ 高周波タイプのセンサでは、このような試験の対象外ではあるがノイズではなく、むしろ本質的な AE ともとれる波形信号が各ケースのチャンネルで捉えられていた。したがって、センサ近傍の挙動を低周波タイプのセンサより検知しやすい可能性がある。

5.1.5 予備実験

実験対象斜面における AE の長期計測と平行して、基礎データや計測評価の補足資料の収集を目的に、いくつかの予備実験を行った。各実験の目的と実施時期について図-5.1.15 にまとめた。

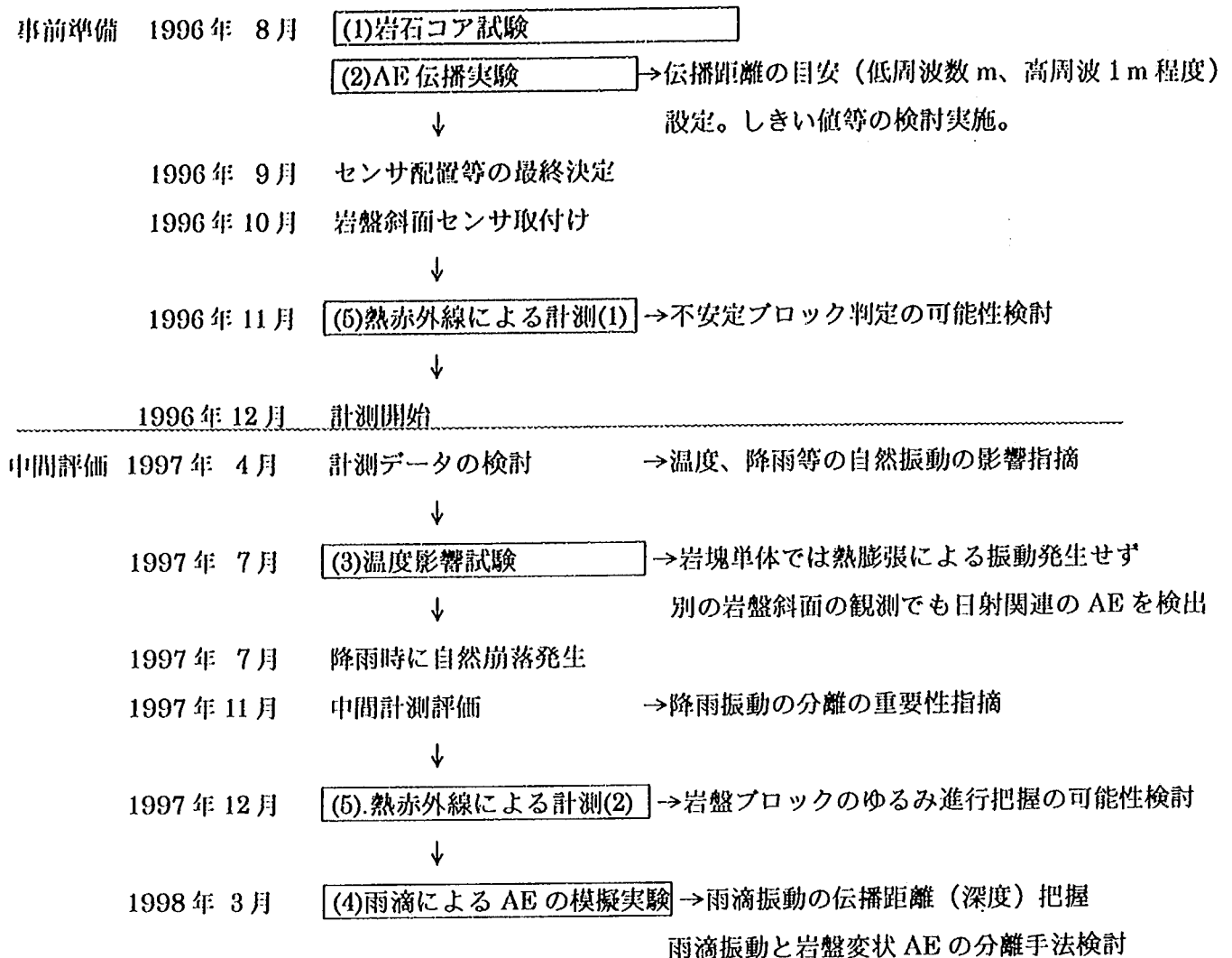


図-5.1.15 予備実験の順序と位置付け

(1) 岩石コア試験

1) 岩石コア試験概要

岩石コア試験に用いた供試体は、計測実施斜面直下で採取した安山岩の岩塊から円柱形試料を切り出して作成した。実施した力学試験の項目は表-5.1.4 に示したように 7 項目であり、各試験に対して 3~4 個の供試体を準備した。岩石コアの力学試験および AE 計測試験に用いた試験機器について表-5.1.5 に示す。

2) 岩石コア力学試験結果

岩石コアの力学試験結果を表-5.1.6 にまとめた。この表からわかるように、計測対象斜面の岩盤は、圧縮強度がかなり高く ($q_u=170\text{MPa}$) 硬岩に分類される。また、破壊ひずみは $4000\mu\sim 6000\mu$ 程度であった。一方、引張強度は圧縮強度の約 $1/20$ (通常の岩石では、 $1/8\sim 1/10$) であり比較的低いことがわかる。一方、P 波速度は約 4200m/s 、S 波速度は約 2400m/s であり、一般的に、安山岩の P 波速度の平均が $4000\sim 4200\text{m/s}$ 程度であることから、これらは標準的な速度であることが確認された。

表-5.1.4 試験項目および数量

項目		数量	試験方法
力学試験	一軸圧縮強度試験	4	JISM302
	圧裂試験	4	JISM302
	弾性波速度測定	4	土質工学会岩の調査と試験第 47 章
	動弾性係数測定	4	弾性波速度より算出
	単位体積重量測定	4	ノギス法
	含水比測定	3	土質工学会岩の調査と試験第 45 章
	破壊靱性試験	3	土質工学会岩の調査と試験第 60 章
AE 計測試験（一軸圧縮強度試験、圧裂試験時に実施）		4	土質工学会岩の調査と試験第 65 章

表-5.1.5 岩石コア力学試験に用いた試験機器

名称	型番
圧縮試験機	Universal Testing Machine
AE 計測装置	MISTRAS 2001
AE センサ	PACR 6 (60kHz 共振型)
弾性波パルス発生装置	Sonic Viewer 170

表-5.1.6 力学試験結果のまとめ

項目	物性値
一軸圧縮強度 (MPa)	169.6
50 ハ°-セント接線変形係数 (MPa)	36.6
50 ハ°-セント静ポアソン比 (-)	0.19
引張強度 (MPa)	8.0
P 波速度 (m/s)	4,183
S 波速度 (m/s)	2,411
動せん断弾性係数 (GPa)	15.5
動ポアソン比 (-)	0.25
動弾性係数 (GPa)	38.7
単位体積重量 (g/cm ³)	2.66
含水比 (%)	0.60
破壊靱性値 (MPa · m ^{1/2})	(2.31)

3) AE 特性について

一軸圧縮試験における各パラメータの経時変化を図-5.1.16 に、圧裂試験時の各パラメータの経時変化を図-5.1.17 に示した。

圧縮試験時および圧裂に観測された波形の周波数は 100 kHz 前後でピークが見られ、その後 280 kHz 付近に小さなピークが現れる。こうした傾向は圧裂試験時でも同様であるが、2 つ目のピークはやや不明瞭である。振幅を比較すると、圧縮試験時に発生する AE の方が大きい。

圧縮試験では破壊荷重(破壊ひずみ)の 70%程度から AE の発生が顕著になり、圧裂試験では 90%あたりから AE の発生が顕著になり破壊に至っている。また、破壊に至るまでの AE 発生数やエネルギーの累積等については、圧縮試験時の方が圧裂試験時よりも 1 桁大きい値を示している。

これらのことから、圧縮破壊では破壊の少し前から AE 発生数の増加が顕著になり累積エネルギーも急増するのに対して、引張破壊では、破壊する直前に AE 発生数が増加し始め、そのエネルギーも小さいことがわかる。こうした室内実験の結果をそのまま現場に展開することはできないが、こうした試験結果は、岩石の破壊状況によって AE の発生状況が異なることを示しており、現場での計測・実験においては岩盤の破壊メカニズムについても十分考慮する必要があることを示している。

4) 岩石コアの AE 減衰特性

計測実施場所における岩盤の周波数別の減衰特性を調べるために、岩石コア供試体（ $\phi 50\text{mm} \times H 50\text{mm}$ 、 $\phi 50\text{mm} \times H 100\text{mm}$ ）を用いて室内試験を実施した。具体的には、表-5.1.7 に示した試験機器を用いて、長さの異なる（100mm, 50mm）2 種類の供試体について、連続波透過法によって、岩石の周波数別の減衰特性を調査した。

表-5.1.7 減衰試験に用いた試験機器

名称	型番
周波数特性分析器	5050A
AE センサ	AE-900F (20kHz 共振型)

本試験によって得られた周波数特性の例を図-5.1.18 に示す。なお、各ケースともそれぞれ同じ条件の試験を行った結果、得られた周波数特性がほぼ一致しており、試験の再現性が確認された。また、GAIN は感度特性が約 10kHz 以下の周波数では平坦であるが、それ以上の周波数では大きく上下していることがわかる。すなわち、約 10kHz 以下の周波数では、GAIN は加速度に応答しており、それ以上の周波数では加速度以外の成分である速度や変位にも応答しているためと考えられる。言い換えれば、約 10kHz を境にそれ以上の周波数ではさまざまなモードの共振が現れており、多重反射による影響も 10kHz 以上で顕著になると考えられる。このように、今回の岩石コアによる試験では、10kHz 以上での周波数特性は定量的な評価が難しいことから、10kHz 以下の周波数についてのみ検討を加えた結果、次のようなことが推察される。

- ① センサ間に試料を挟むと約 32db 減衰する。すなわちこの間で、加速度成分は約 1/20 に減衰する。
- ② 試料の大きさ（ $L=50, 100\text{mm}$ ）はこの周波数ではほとんど関係ないことから、50mm 程度では減衰はほとんど見られない。

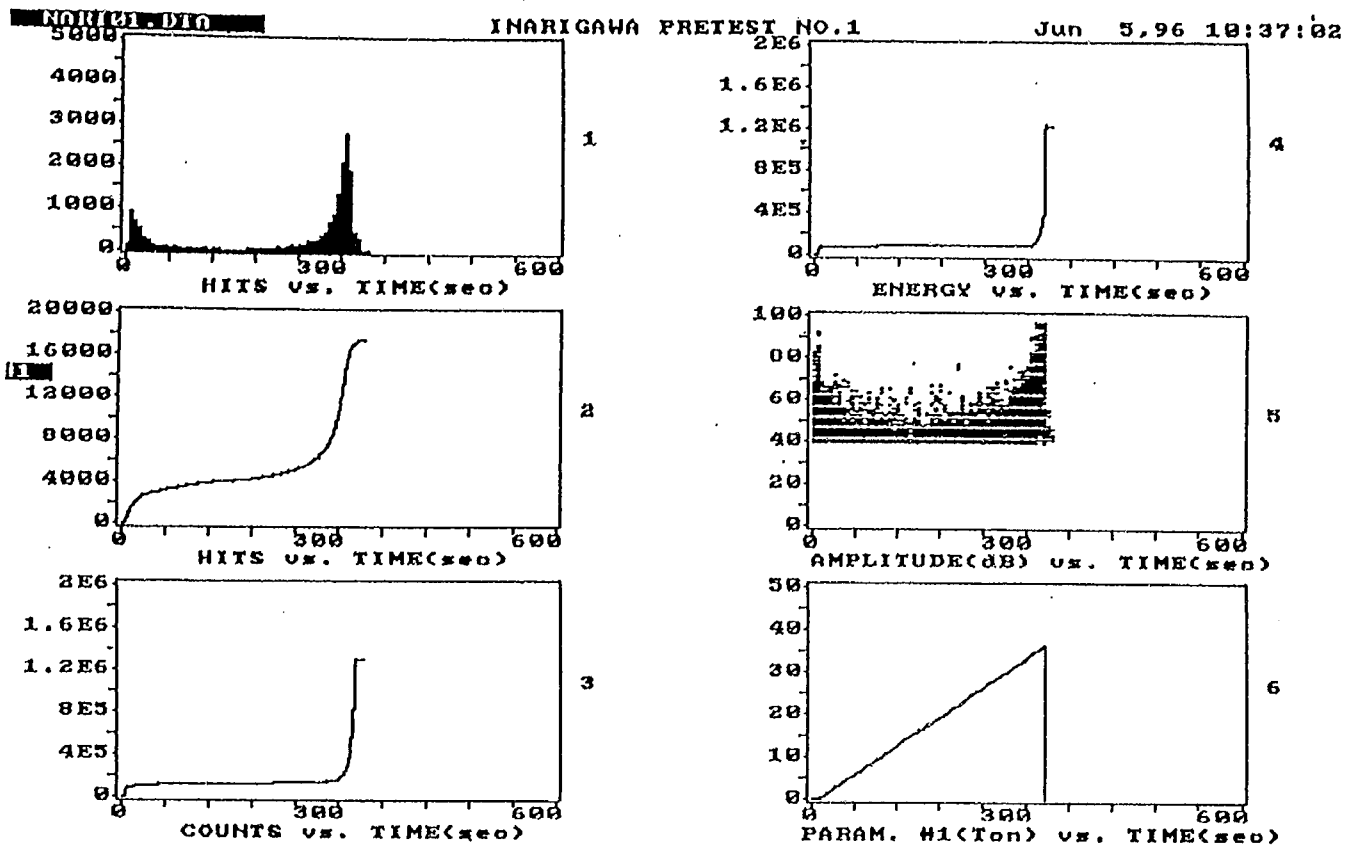


図-5.1.16 各パラメータの経時変化図 (圧縮試験：試料 No.A-1)

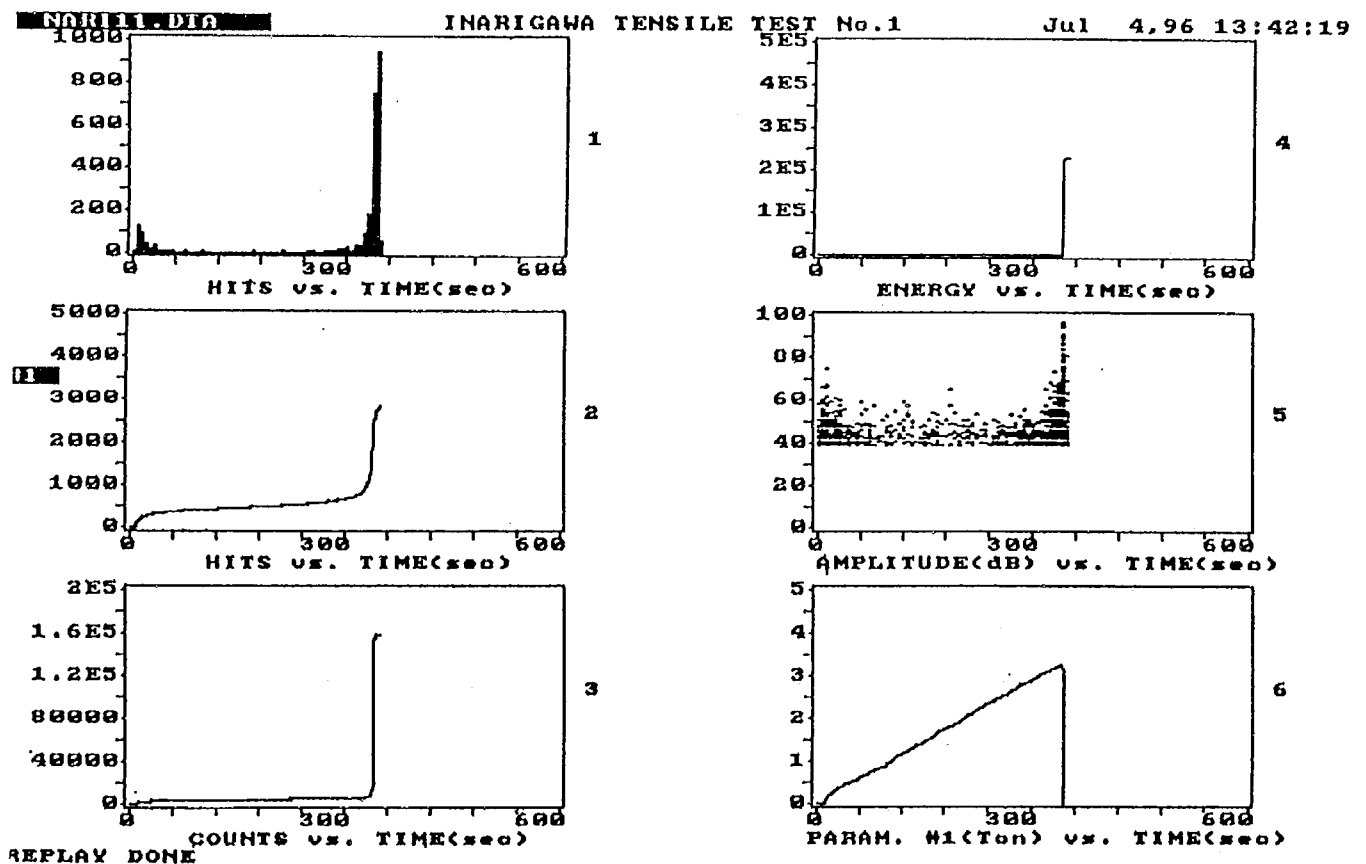


図-5.1.17 各パラメータの経時変化図 (圧裂試験：試料 No.B-1)

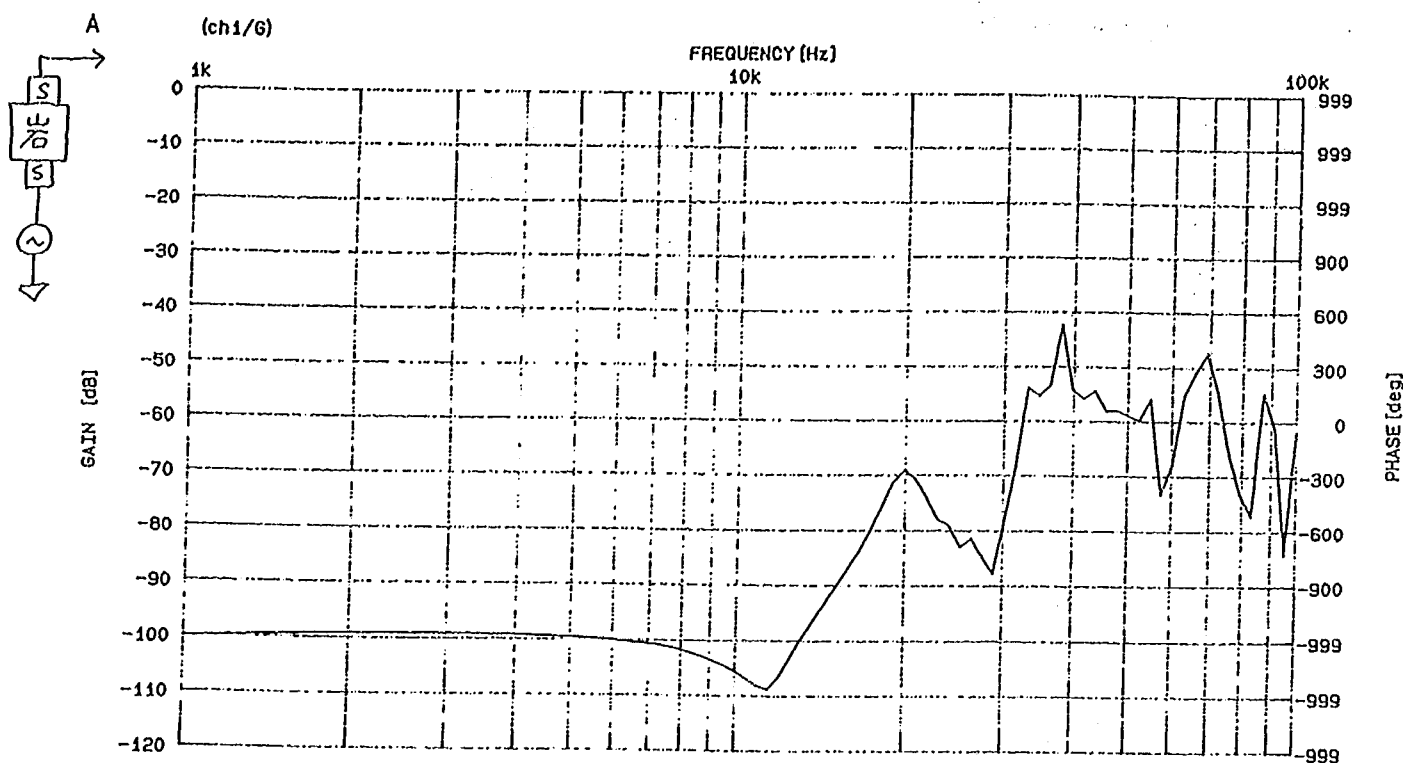


図-5.1.18 周波数特性図 (供試体 (小))

(2) AE 伝播実験

1) 実験概要

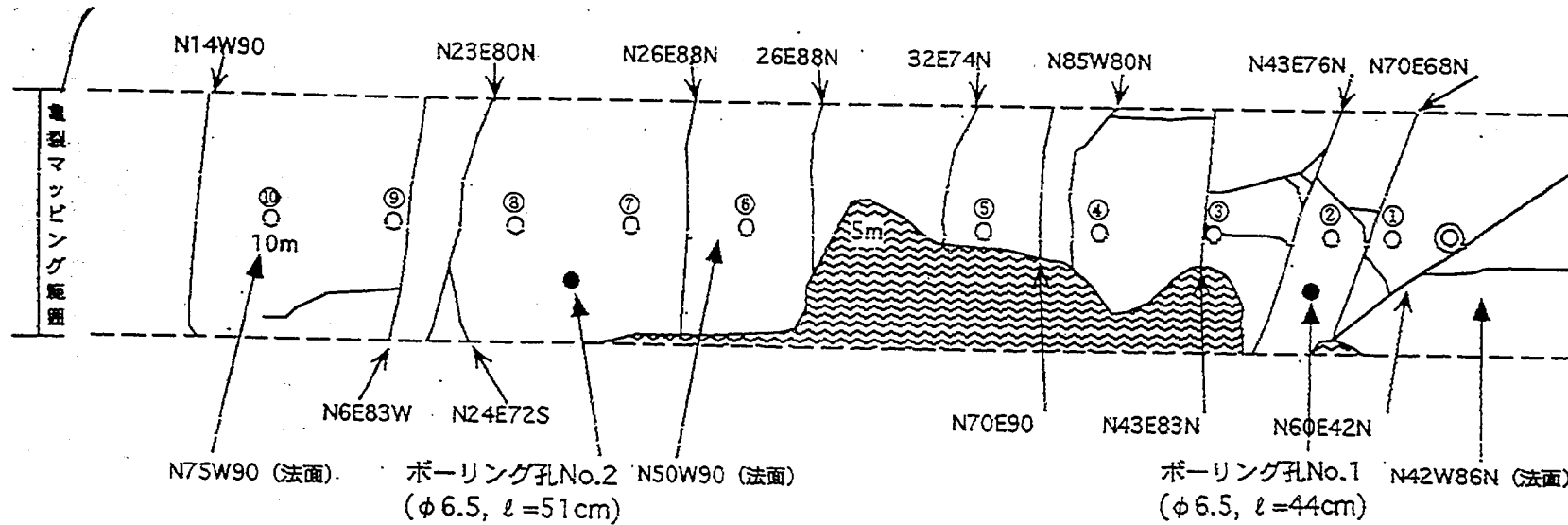
原位置岩盤斜面における AE 波動 (弾性波) の減衰 (率)、および斜面崩壊予測時におけるセンサの設置方法等を評価・確認するために計測対象斜面付近の岩盤斜面で予備的な伝播実験を実施した。本実験では、主に低周波数タイプ (加速度計 ; 20 kHz 共振) のセンサと、随時、高周波数タイプ (AE センサ ; 60 kHz 共振) のセンサを使用してデータを取得し、代表的な周波数の減衰特性を把握するとともに、顕著な潜在き裂が振源とセンサの間にある場合の減衰特性も調べ、き裂の有無による減衰特性への影響も検討した。

弾性波の計測測線および受発振点の配置は、図-5.1.19 に示す通りである。計測は、受振点および発振点の各組合せに対して 3 回の起振を標準とし、センサの配置は表面設置のみ、あるいは表面削孔設置の 2 点も混ぜた組合せとした。なお、同じ起振エネルギーに対する高周波成分の弾性波伝播減衰特性を調べるため、加速度計と同じ表面設置金具に AE センサを設置し、センサの配置を変えて計 2 回の波形収録を実施している。

2) 実験結果

実験結果から対象岩盤の平均弾性波速度は $V_p = 3390 \text{ m/s}$ と測定された。これは岩石コア試験結果よりおよそ 1000 m/s 小さな値である。これは表層の風化やき裂などの影響があるものと考えられる。

北西
下



0 1m

図-5.1.19 伝播実験配置図

また、それぞれの受発振点配置での測定結果に対する FFT 解析では起振点から受振点までの水平距離が 4~5m 以内の場合は 2~4 kHz の卓越周波数が明確に確認できるが、それ以遠ではこの帯域の周波数に明らかな卓越傾向は見られないことが分かった。したがって、起振エネルギーがこの実験程度の場合、加速度計で検出される周波数帯域の波形の伝播距離は約 5m 程度と考えられる。

次に、本サイトにおける岩盤の弾性波伝播時における減衰特性を得るために、各チャンネルで受振した波形初動の最大振幅値を起振点近傍の受振点における最大振幅値で除（正規化）し、距離程との関係を求めた。起振点別にまとめた減衰特性を図-5.1.20 に示す。なお、表面設置のセンサから得られたデータについてのみカーブフィッティングを行い、本サイトにおける減衰特性の算定式を以下のように求めた。

$$A/A_0 = \exp(-3.07 \times X/2)$$

X：伝播距離

なお、AE センサから検出・収録された波形データからでは減衰直線を導けなかったが、高周波成分波形の伝播距離に関しては約 1~2m 程度であることがわかった。

伝播におけるき裂の影響に関しては、本測定結果から特に傾向は見られなかった。また、図中の減衰カーブ（表面設置データ）と孔内設置センサから得られたデータとを比較すると顕著な差は見られない。したがって、この程度の深度の孔内にセンサを設置しても減衰特性の向上は特に得られないと考えられる。

また、各ケース毎に 1 回、加速度計を使用してバックグラウンドノイズのレベルを測定した。その結果、ノイズレベルは $1.0 \times 10^{-4} \sim 2.6 \times 10^{-3}$ (G) の範囲にあることがわかった。したがって、予備実験サイトの周辺で実施される AE 計測のしきい値は、この値以上を設定すれば問題ないと考えられる。

以上の弾性波伝播特性に関する現位置実験の結果、高周波数タイプのセンサに比べて低周波数タイプのセンサの方が岩盤崩壊を検知することが可能な範囲は広いとすることができる。しかし、斜面崩壊に伴い発生する AE の波動エネルギーの規模・周波数帯域は不明であるので、予備実験の結果との比較は一概にできない。したがって、できるだけ予想される震源の近傍にセンサを設置するよう心がける必要があると考える。

(3) 温度影響試験

1) 実験概要

岩盤斜面実験現場の安山岩塊を用いて、ビル屋上で日射及び気温変化に伴う AE の発生についての約 1.5 (1997.6~7 月中旬) の観測を行った。観測には加速度センサを使用した。計測は自然状況下における計測と人工的に加熱・冷却する方法とを実施したが、観測期間中は AE と思われるデータは観測されなかった。以上の経緯から、1997 年 8~9 月に、実際の安山岩質岩盤斜面において、各種センサを設置して、自然条件下で AE 観測を行った (図-5.1.21)。

実験斜面は西向きであり、正午頃から日没までの間、直射日光があたる。斜面上の 10m^2 の範囲に、4 個の加速度センサを設置し、波形を記録すると同時に気温も観測した。

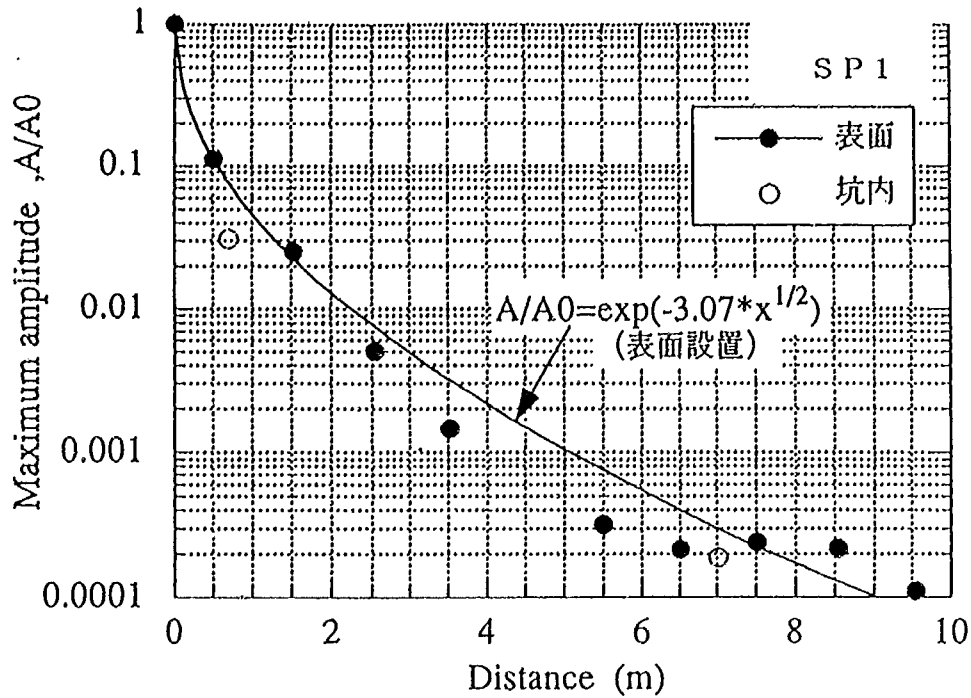


図-5.1.20 減衰特性 (起振点: SP1)

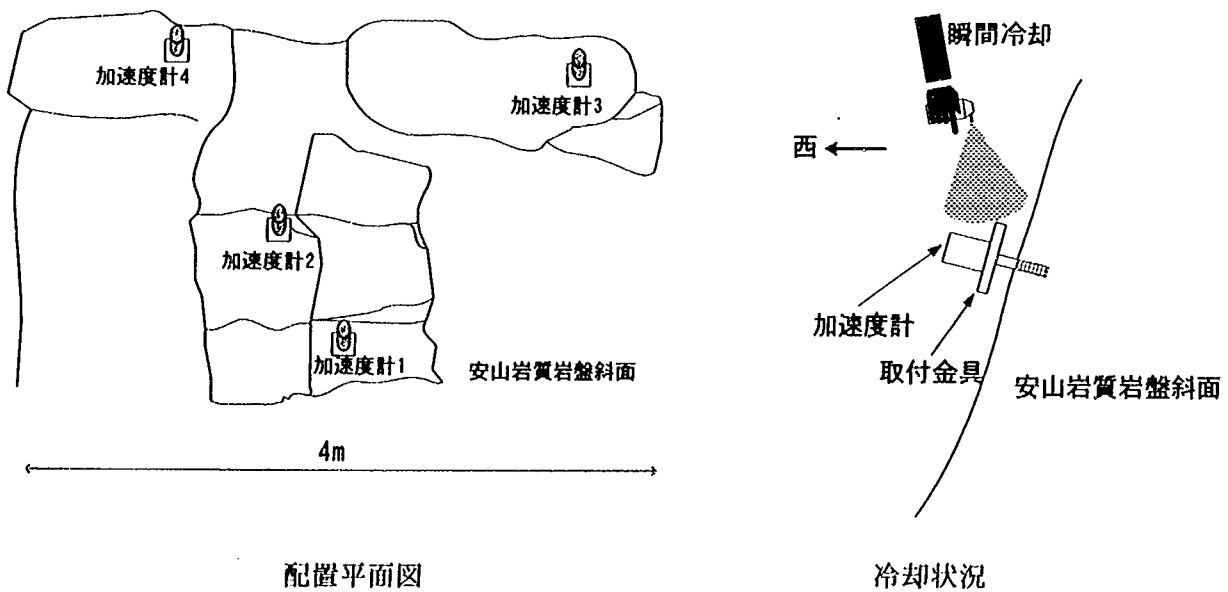


図-5.1.21 温度影響試験実施状況

2) 観測結果

8月中旬までの AE 発生を観測記録 (図-5.1.22～図-5.1.23) に示すように、AE は斜面に直射日光が当たる正午頃から発生し気温が下がる日没後の 19 時～21 時頃に最も多く発生している。これは、正午から日射が当たって岩盤が暖められ、更に強烈な西日が当たり加熱されたものが、日没後、急に冷えて岩盤が収縮したことに起因するものと考えられる。その後、8 月下旬～9 月の観測では、AE と思われるデータが非常に少なくなっており、気温の低下が影響している可能性が高い。

一方、センサ取付金具の温度変化に伴う熱膨張・伸縮による振動の発生を確かめるため、日射により暖められた取付金具やその周辺の岩盤表面をコールドスプレーで急激に冷却した実験では、取付金具の振動は観測されなかった。また、取付金具を打撃して得られた振動波形と日射による温度変化に起因するAE波形を比較すると波形は明らかに異なることが確認された。

このような観測結果から日射及び気温変化に伴うAEの発生については以下のようにまとめられる。

- 岩塊単体を用いた観測では、日射及び気温変化に伴うAEの発生は認められなかった。
- 実際の岩盤斜面の観測では、気温よりもむしろ日射による温度変化に起因するAEが観測された。
- 実際の岩盤斜面において日射により暖められた取付金具やその周辺の岩盤表面を急激に冷却した今回の観測では、取付金具の振動は観測されなかった。センサ取付金具の熱膨張（又は収縮）による取付金具の振動の発生については否定できないが、その可能性は低いと考えられる。

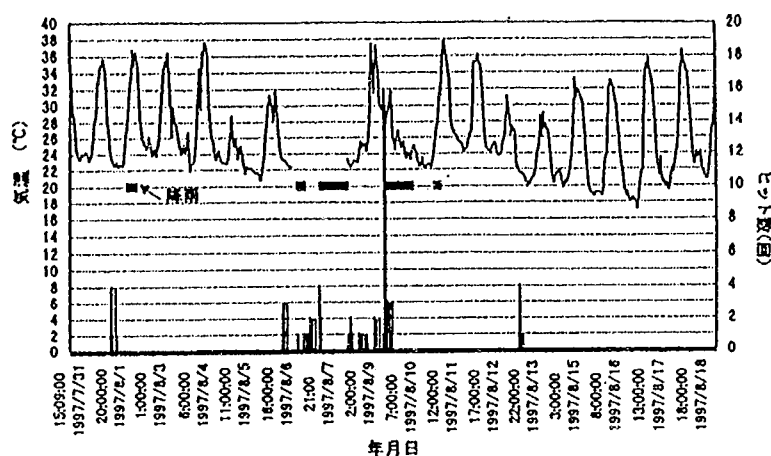


図-5.1.22 気象条件とヒット数 (8/1～8/19)

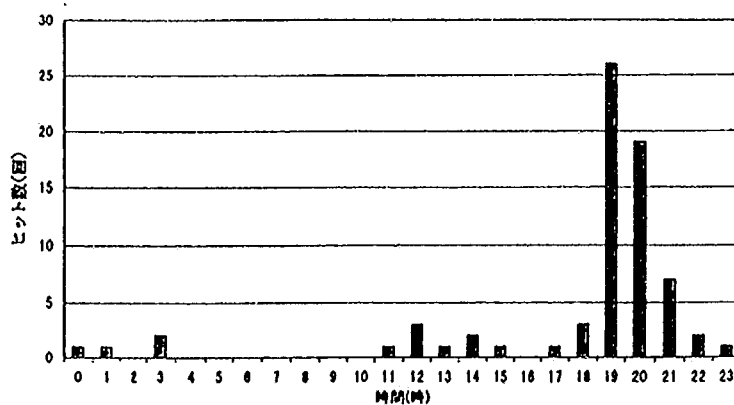


図-5.1.23 ヒット数の24時間頻度分布(8/1～8/15 累計)

(4) 雨滴による AE の模擬実験

1) 実験概要

雨滴が直接 AE センサ周辺を打撃することによって発生する AE は、野外の AE 計測で検出する AE のうち、最も発生頻度の高い AE の 1 つである。降雨に関して、実際の計測条件等を考慮すると、以下に示す①～④について検討する必要があるものと考えられる。

- ①雨滴により発生する弾性波の強さ、および弾性波源としての周波数特性の検討
- ②岩盤物性の違いによる減衰特性の検討
- ③降雨に特徴的な AE パラメータの抽出
- ④AE 波形による③の検証

実験は図-5.1.24 に示すように、15cm×15cm×50cm のコンクリート直方体供試体に AE センサ (15、60kHz 共振型、PAC 社製) を底面に取付け、もう一方の面にスポイドにより水滴を落下させることによって実施した。なお、落下高さは、既往の研究^{2),3),4)}より、水滴の終端落下速度が 6m/s となるように 2m とした。ここで、水滴 10 滴当たりの重量より球換算半径を算出した結果、2.75mm であった。この半径は「大粒の雨滴」に相当する。このような実験を供試体の材令にしたがって行い、材料物性の変化による AE 伝播特性を検討した。また、材令 50 日目に自然降雨においても同じ手順で実験を行なった。

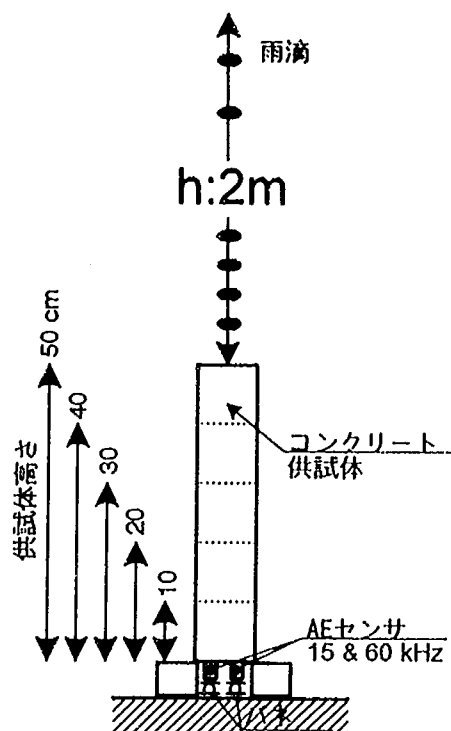


図-5.1.24 実験概要図

解析は、検出 AE 波形は実務上の基準となるように AE 最大振幅値を用いて、“AE 波動の伝播減衰特性”について行った。また、AE 波形パラメータとしてはカウント (Rc)、最大振幅値 (Pa)、エネルギー (En)、継続時間 (Dt)、立上り時間 (Rt) に着目して検討することとした。

2) 伝播減衰検討結果および考察

図-5.1.25 に AE 最大振幅値による減衰特性⁹⁾を、図-5.1.26 に P 波初動振幅値による減衰特性⁹⁾の検討結果を示す。同図の横軸は AE 伝播距離を対数で、縦軸は AE 波形より読みとった振幅値を電圧で表している。なお、図中には「供試体材令-AE センサ共振周波数、および相関係数」を「3-60 kHz、R : 0.932」のように略記している。両図ともに AE センサの共振周波数が 15kHz から 60kHz と大きくなると伝播減衰が大きくなっている。表-5.1.8 は、図-5.4.25 より得られたしきい値ごとの AE 最大検出を、一軸圧縮強度、音響インピーダンス（密度×速度）とともに示したもので、この表より、AE 検出条件となる「しきい値」を 40dB とした場合、例えば圧縮強度 500 kgf/cm²程度の材料で 2.2 m (15 kHz)、1.5 m (60 kHz) が大粒の雨滴に影響を受ける範囲の目安となる。なお、図-5.1.26 の P 波初動振幅値による減衰特性結果では、同じ条件での検出範囲は、15kHz で 1.3m、60kHz で 0.9m となった。また、P 波初動振幅値による減衰特性結果では材令に伴う AE 減衰緩和が明瞭に認められたが、AE 最大振幅値では良い相関結果が得られなかった。

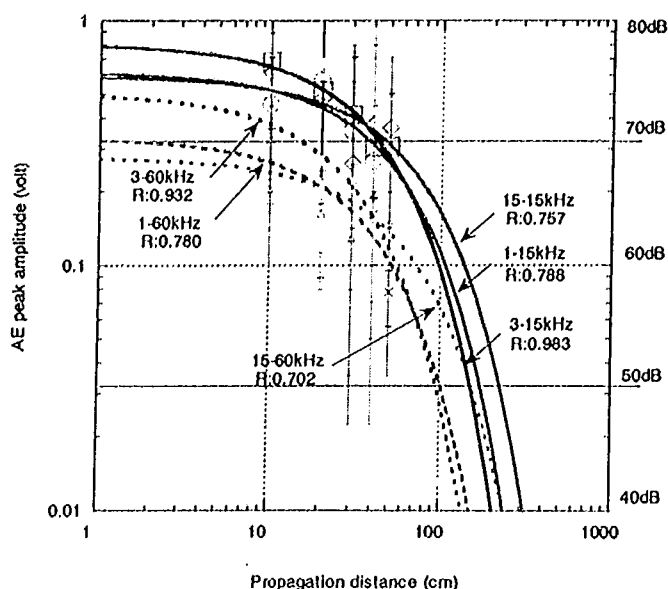


図-5.1.25 AE 最大振幅値による減衰特性

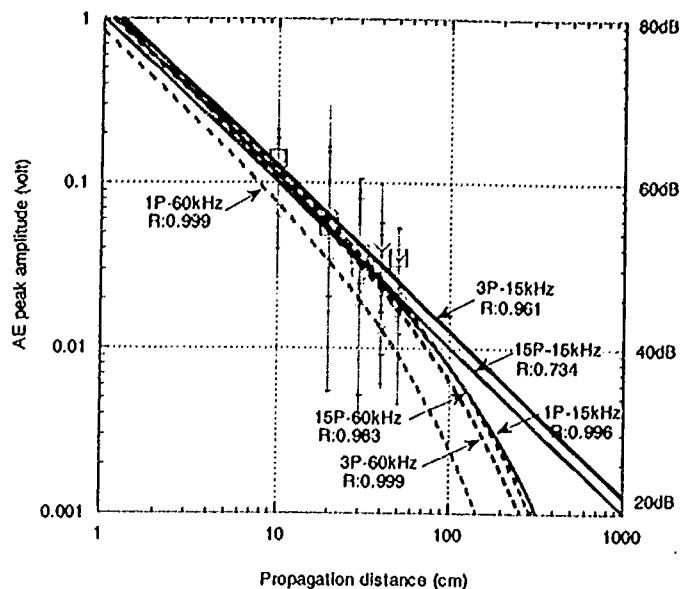


図-5.1.26 P 波初動振幅値による減衰特性

表-5.1.8 材令と物性変化一覧

材令 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	アコースティック・インピーダンス (kN/m ² s)	AE検出可能範囲 (mm)			
			しきい値 40 dB		しきい値 50 dB	
			15 kHz	60 kHz	15 kHz	60 kHz
1	12.9	78256.2	2420	1500	1740	1000
3	30.2	88700.9	2030	1300	1500	950
15	46.5	95259.6	3100	2420	2230	1500

3) AE パラメータ検討結果

a. 全 AE パラメータ相関結果

AE パラメータ間の相関関係を示す例として、材令 3 日、伝播距離 10 cm の結果を図-5.1.27 に示す。この図より得られた結果は以下にまとめられる。

- ・ 立上がり時間に関する組合わせ(g)、(h)、(i)、(j)には明らかな相関は見られない。
- ・ 振幅に関する組合わせ(c)、(e)、(f)については、振幅値に関わらず R_c 、 E_n 、 D_t のばらつく範囲が広く、降雨による AE パラメータの特徴を議論できない。また(d)も同様である。
- ・ (a)、(b)では、AE センサの共振周波数の違いが認められ、ともにパラメータ間に正の相関が明白である。
- ・ (a)のエネルギーは、計測機器ごとに定義およびその値が異なることから、実計測で重要となる定量的な降雨に対する判断事項には不適切と思われ、定性的な検討に留まるものと位置付けられる。
- ・ (b)は AE 波形継続時間に対する波の振動数を模擬していることから、「降雨による AE は、その周波数（あるいは波長でも良い）特性に一義的な特徴を有している」といえる。

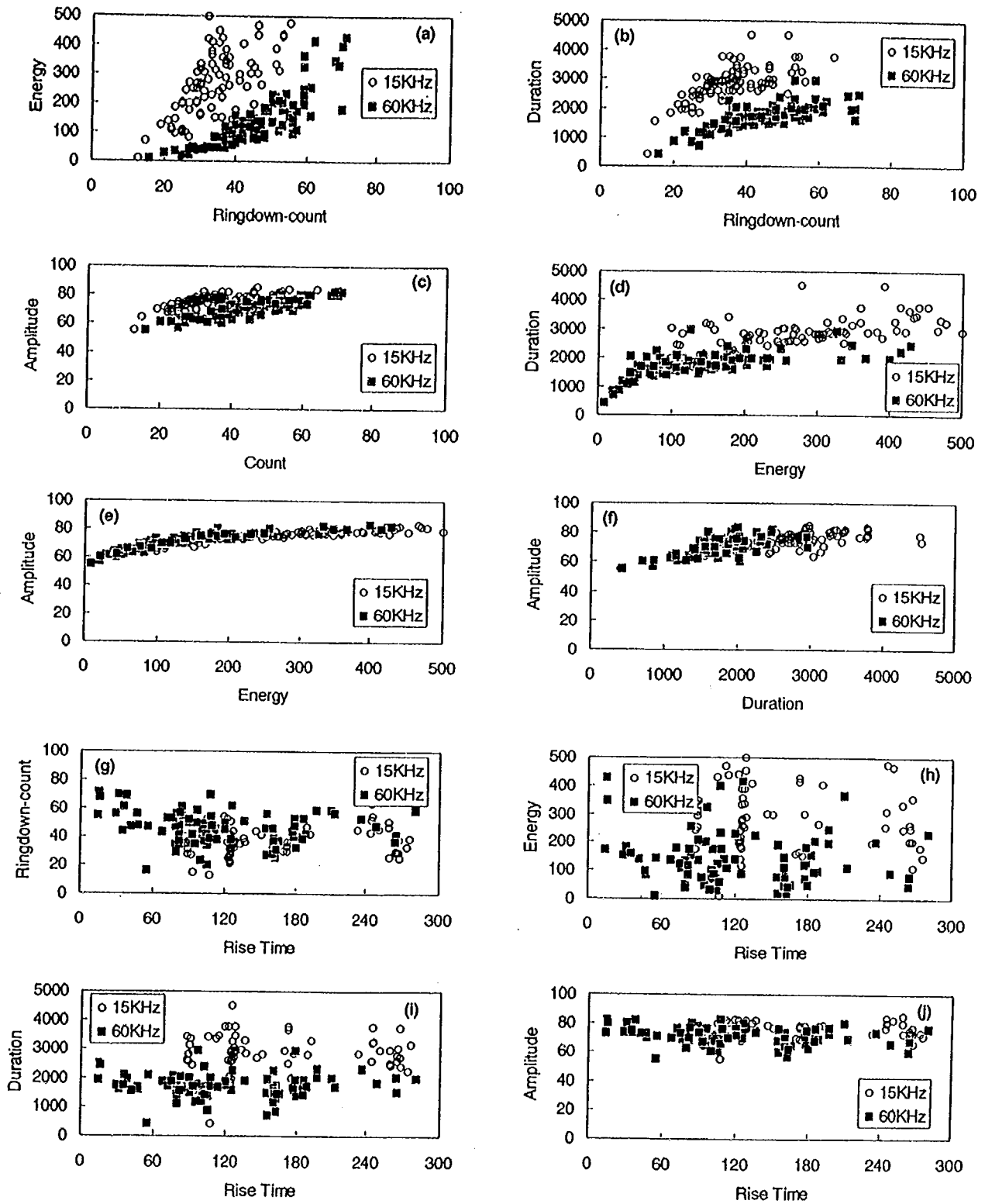


図-5.1.27 AE パラメータ相関 (材令 3 日、伝播距離 10 cm)

b. 継続時間とリングダウンカウント詳細相関解析結果

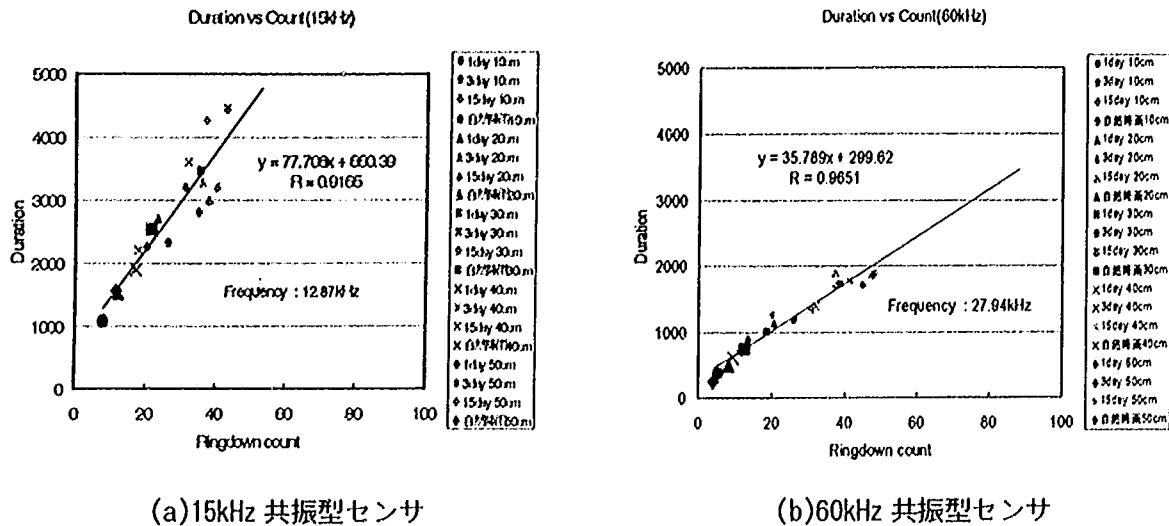


図-5.1.28 各 AE センサによる継続時間とカウント相関（自然降雨実験含む）

図-5.1.28 に、各 AE センサで得られた各材令、供試体長さの室内実験結果および、自然降雨実験より得られた実験結果を併せて示す。各プロットはそれぞれの実験で得られた平均値を代表値として示した。この図から、供試体の材令、長さ（AE 伝播距離）に関わらず、継続時間とカウントに正の相関があることがわかる。これらのプロットを一次関数により近似した結果、その直線勾配は 15kHz 共振型で $77.706 \mu\text{s}$ となった。この勾配は一波長にあたり、周波数で表すと 12.87 kHz となる。60kHz 共振センサでは勾配は、 $35.789 \mu\text{s}$ 、周波数は 27.94 kHz となった。なお、自然降雨より得られた値は室内実験結果と比べてそれぞれ小さい値をとっているが、これについても継続時間とカウントには室内実験と同様に正の良好な相関があることから、継続時間、カウントより求められる卓越周波数に雨粒の大小は無関係であるといえる。

以上から、雨滴により得られる AE 波の周波数特性は、それぞれの AE センサで共振周波数近傍に現れかつ、供試体長、材令に依存しないことから、降雨により発生する AE 源波形は、100 kHz 前後まで平坦な特性を有しているものと推察される。

c. AE 波形および FFT 解析結果

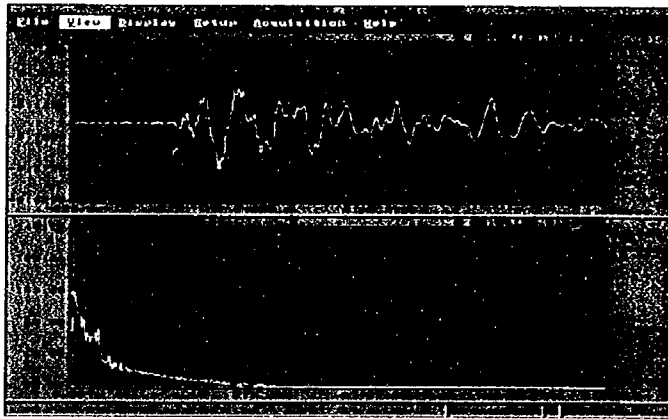
図-5.1.29 に、材令 3 日、長さ 20 cm の供試体で得られた雨滴による AE 波形および FFT 解析結果(a),(c)と、自然降雨による AE 波形および FFT 解析結果(b),(d)を示す。雨滴と自然降雨より得られる AE 波形はほぼ同様な波形で、卓越周波数は 15kHz 共振センサで雨滴(a)で 7.8 kHz、自然降雨(b)で 15.6 kHz、60 kHz 共振型 AE センサで、雨滴(c)が 7.8 kHz、自然降雨(d)で 15.6 kHz となり、両者とも雨滴と自然降雨との良好な波形相似性が認められた。こうした卓越周波数についてまとめたものが図-5.1.30 である。この図は、供試体長さ（AE 伝播距離）と卓越周波数を各材令、各センサ毎に示しており、材令 50 日は自然降雨での実験結果である。また、一点鎖線は継続時間とリングダウンカウントの相関より得られた降雨の卓越周波数であり、各供試体長さとも AE 波伝播速度より求めた反射波の卓越周波数も実線で付記した。

この図より、1 日材令に比べ 3、15、50 日は卓越周波数が若干高くなる傾向にあるが、材令、供試体長さ（AE 伝播距離）および、雨滴、自然降雨に関わらず、得られる AE 波形の卓越周波数に大きな違いがないことがわか

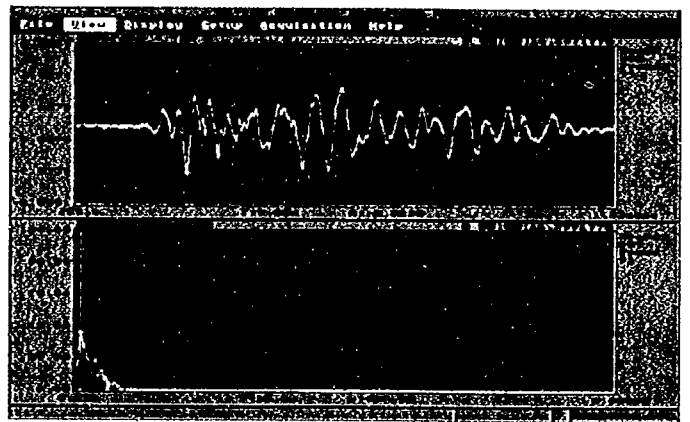
る。ここで、継続時間とカウントの AE パラメータより得られた卓越周波数に着目すると、この卓越周波数と実 AE 波形より得た卓越周波数がほぼ一致していることが明らかとなった。

また、反射波の影響を考慮すると、反射波から得られる卓越周波数は同図中に実線に示したとおり、供試体長さの増加とともに低くなる傾向にあり、そのばらつく範囲も 21 kHz~4.2kHz の範囲となる。これらのことから、実験を通じて AE センサで得られた AE 波形には反射波の影響は含まれてはいるものの降雨により得られる波形特性がそれに優るといえる。

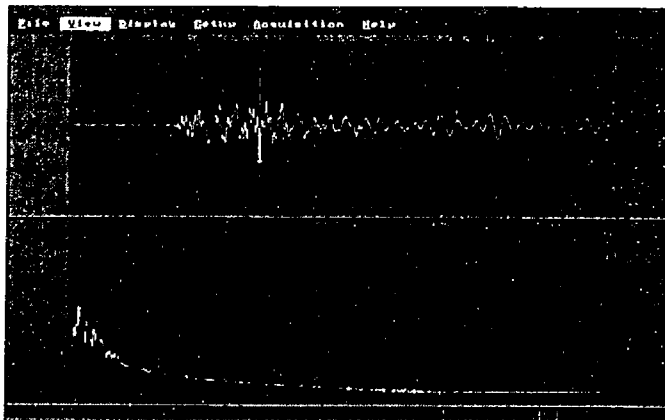
以上の検討結果から、降雨による AE 源波形は使用したセンサの周波数帯域ではほぼフラットな特性を有しているものと考えられ、AE 波形計測結果よりセンサ毎に明瞭な卓越周波数が現れた。さらに、AE パラメータ計測より得た継続時間、カウントより簡易に求めた周波数特性と、AE 波形を FFT 解析して得た卓越周波数がほぼ一致していたことから、AE パラメータのみで降雨による AE の除去は可能であると考えられる。



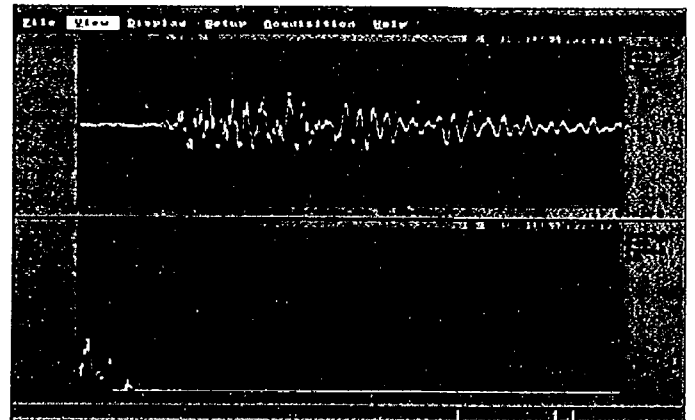
(a) 材令 3 日、20 cm、15 kHz 共振型



(b) 自然降雨、20 cm、15 kHz



(c) 材令 3 日、20 cm、60kHz 共振型



(d) 自然降雨、20 cm、60 kHz

図-5.1.29 各共振型センサでの雨滴と自然降雨による AE 波形と FFT 解析結果

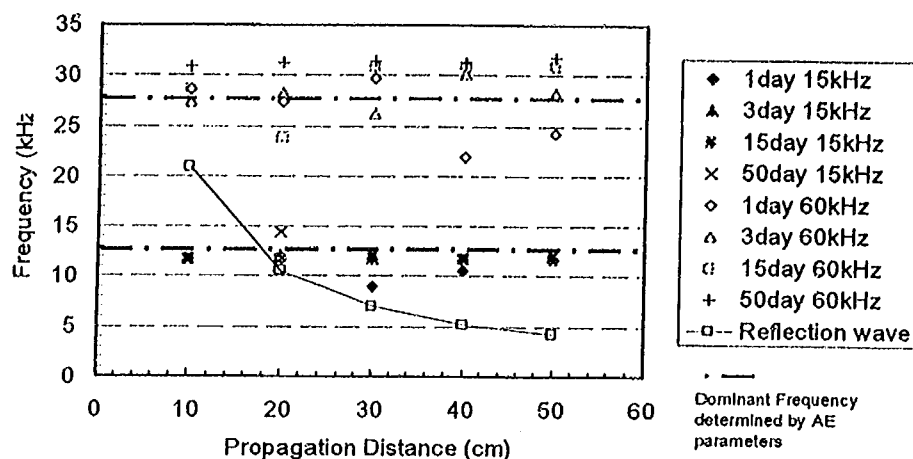


図-5.1.30 卓越周波数と供試体長さならびに反射波の卓越周波数との関係

(5) 熱赤外線による計測

a. 測定概要

AE 計測の対象となっている、節理の発達した安山岩溶岩からなる自然斜面に対し、ほぼ 24 時間にわたる熱赤外線映像法による計測（撮影）を 2 度実施し、岩盤ブロックのゆるみの進行状況を把握可能であるかの検討を行った。熱画像の撮影は、赤外線カメラを実験対象斜面から約 45m 離れた対岸（右岸）の 1 ヶ所に固定し、15 分間隔のインターバル撮影で行った。表-5.1.9 に撮影に使用した熱赤外線映像装置の仕様を示す。なお、関連する気象条件として、気温、風速、日射量、有効放射量、相対湿度についても計測した。

表-5.1.9 熱赤外線映像装置の仕様

温度測定範囲	-50～250℃
測定波長帯	8～13μm
検出器	HgCdTe
冷却方式	スターリングクーラ
測定精度	±0.5%（フルスケール）
最小検知温度差	0.1℃
走査角（水平×垂直）	30°×28.5°
瞬時視野角	1.5mrad
走査線数	207本

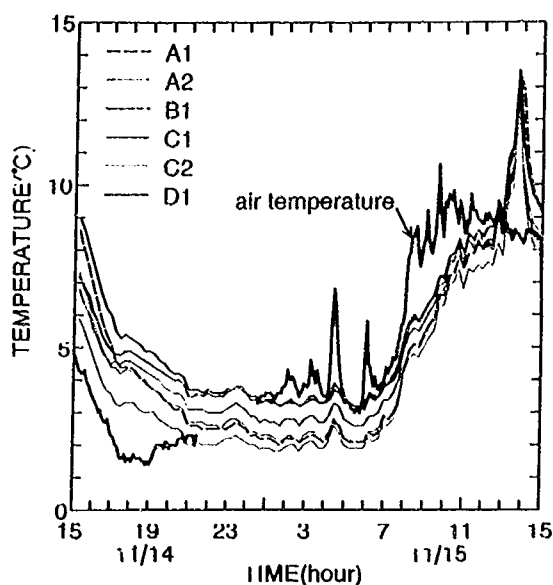
b. 測定結果

図-5.1.31 に岩盤表面温度の経時変化（第 1 回）を示した。また、合計 2 回実施された計測結果について各岩盤ブロックごとに温度差についてまとめたものを図-5.1.32 に示した。これらの検討結果から次に述べるようなことが考察される。

すなわち、熱画像による温度解析の結果、A1 ブロックと C2、D1 ブロックの表面温度変化幅が他のブロックに比べて相対的に大きい傾向が認められた。目視による安山岩斜面の観察によると、A1、C2 ブロック背面には斜面表面とほぼ平行な開口節理が認められ、板状のブロックを成している。これに対し、B1 ブロックは塊状で

あり背面に節理は認められない。また、現場周辺の安山岩の露頭調査より、風化変質の程度を観察した結果、表面から 10~20mm 程度の層が僅かに変質している程度で、ほぼ新鮮な状態にある。したがって、A1、C2 ブロックの表面温度変化幅が相対的に大きいのは背面に節理のある、浮きブロック状態のため、夜間の冷却時に背面からの熱供給量が少なく、温度低下が著しかったことによるものと考えられる。また、A2 ブロックに着目して熱画像を検討すると、何れの時刻においても周辺部に比べ、低温域として表示されていることがわかった。このブロック自体の面の向きや表面形状が周囲と明らかに異なるわけではないことから、この背面に地下水が存在する可能性が示された。

以上のようなことから、熱赤外線映像法による計測の結果、定性的に見て A1、A2、C2 ブロックの崩落危険性が高いことが示唆された。



計測位置

図-5.1.31 岩盤表面温度の経時変化 (第1回計測)

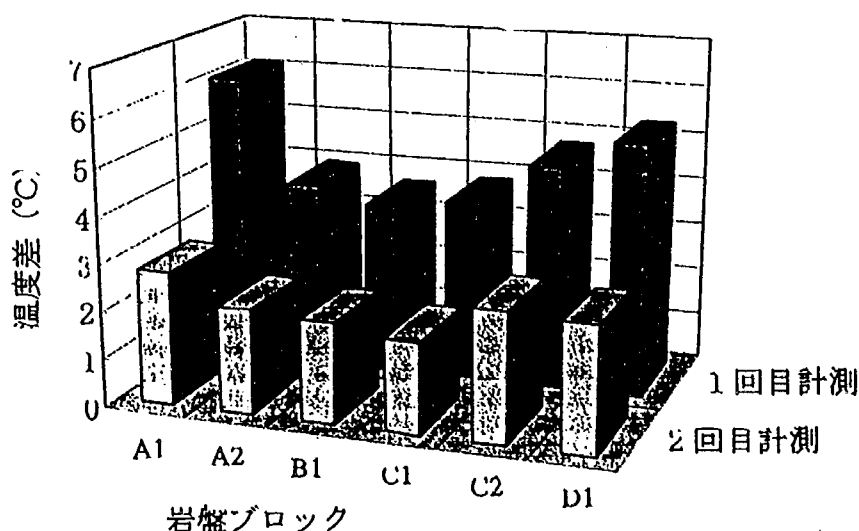


図-5.1.32 岩盤ブロック表面温度の変化幅 (1, 2回目計測結果の比較)

5.2 長期計測

5.2.1 計測状況

日光稲荷川左岸の岩盤斜面を対象としたAE長期計測は、1996年12月3日～1998年8月3日まで実施され、全計測期間は606日であった。この間の計測条件などを表-5.2.1にまとめた。

表-5.2.1 AE長期計測の位置と計測条件

	成分	設置位置	しきい値
低周波AE	ch-1	AE1(ボーリング下部)	100 μ V
	ch-2	AE2(ボーリング上部)	80 μ V
	ch-3	AE3(Bブロック表面削孔)	40 μ V
	ch-4	AE4(Cブロック表面削孔)	40 μ V
	ch-5	AE5(Aブロック表面設置)	40 μ V
	ch-6	AE6(Cブロック表面設置)	40 μ V
	ch-8	屋外参照点	40 μ V
高周波AE	ch-1	AE1(ボーリング上部) → 参照点へ (1997/09/12～)	30dB
	ch-2	AE2(ボーリング下部) → AE1(上部)へ (1997/10/09～)	60dB → 36dB
	ch-3	AE3(Bブロック表面削孔)	30dB
	ch-4	AE4(Cブロック表面削孔)	30dB
	ch-5	AE5(Aブロック表面設置)	30dB → 34dB
	ch-6	AE6(Cブロック表面設置)	30dB

実験の全期間を通して計測されたデータから、下記の条件に従って集計・記録した結果の例を図-5.2.1に示すような形で整理した。

・図化期間：1996年12月1日～1998年7月31日[20ヶ月間]

図化は1ヶ月ごととし、ヒット、カウントの各2葉にまとめた。

累積値は月の始めを0とした値である。

頻度、累積値とも表示スケールは、表示ソフトにより自動設定されている。

・AEデータ：低周波AE、高周波AE共、10分間ごとに集計した結果である。

集計条件は以下の通りである。

(継続時間 > 0 μ 秒) AND (0% < 立上り時間 / 継続時間 < 100%) AND (最大振幅値 > 0)

・斜面変動：10分間ごとの計測データ(傾斜計、変位計、雨量計、温度計)

なお、傾斜計の場合、X軸は谷が+であり、Y軸は下流が+である。

・天候状況：VTR画像に、「日射、降雪、風、霧、雨、変状」が認められた場合に記録する。

なお、日射、降雪、霧、変状については[0：無]、[1：有]で表現し、風と雨については、[0：

日光稲荷川 AE計測結果

1996/12/01~1996/12/31

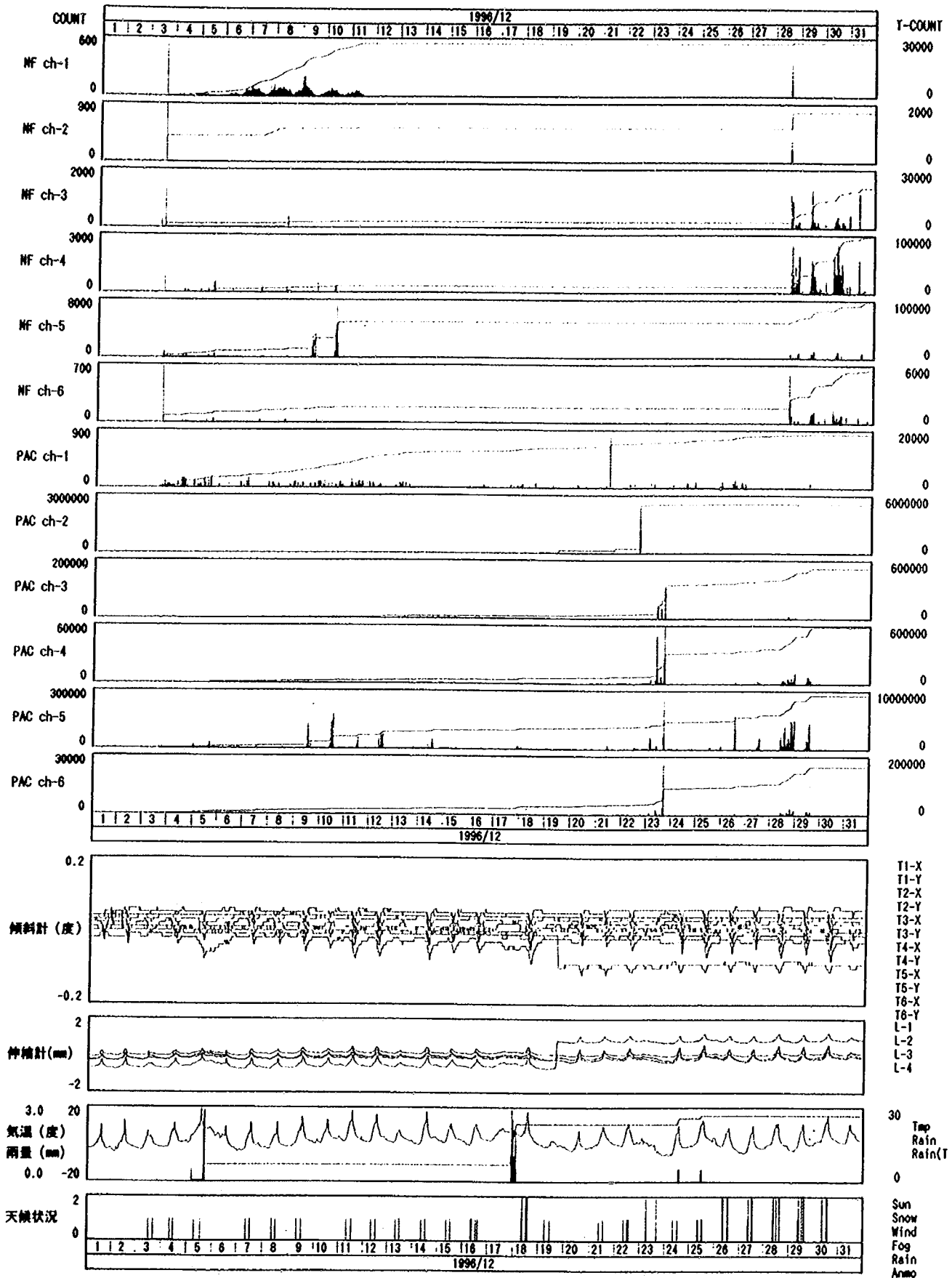


図-5.2.1 長期観測データとりまとめ例

無]、[1:弱]、[2:強]で表現した。

今回は、時刻の同期がされていない2つのAE計測システムを使用したため、絶対時刻を含む時刻の精度も各々独立したものとなっている。また、静的な計測システム(興和製)も同様であり、さらにはVTRの時刻信号も同様である。すなわち、データ収録用のパソコンや計測装置などに内蔵された時計の精度が異なる以上、それぞれデータに記述された発生時刻は、微妙に異なっているものとして考えねばならない。

したがって、図-5.2.1に示した集合グラフにおいて、各計測グループ(例、高周波(PAC)や低周波(NF)など)の中は同じ時刻であるが、別のグループについては、水平軸上での同じ位置が同一時刻であるという保証はないため、同時発生性を考える上で極めて支障になっている。實際上、どの程度ずれているかはわからないケースが多いため、AEでは集計の関係で10分~20分程度差がある可能性は否定できない。

5.2.2 AEセンサの挙動(時間変動)

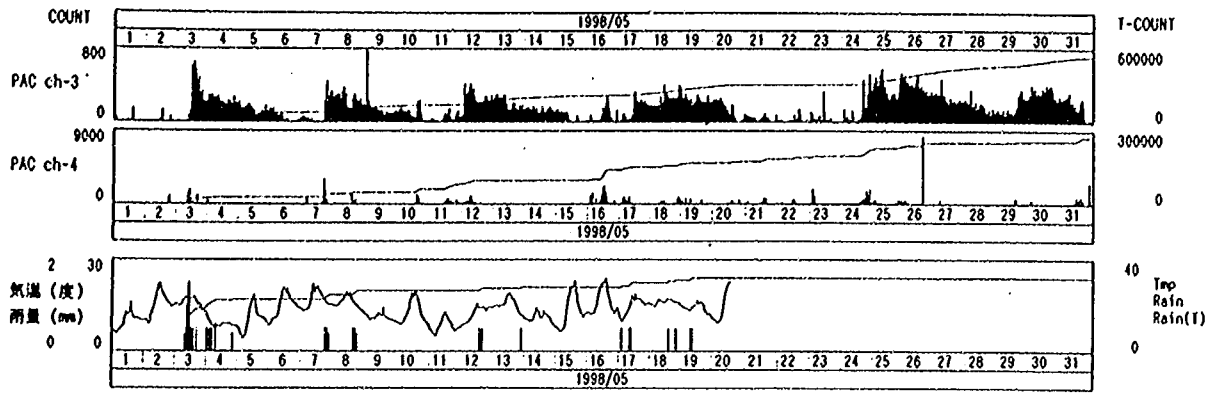
(1) 高周波AE(PAC)の発生挙動(時間変動)

全期間を通して得られた高周波AEの挙動の中から、特徴のある動きを抽出すると以下のようなものがある。なおこのデータは、ヒットとカウントをそれぞれ10分ごとに集計したものであって、集計の条件は、(継続時間 > 0 μ 秒) AND (0% < 立上り時間 / 継続時間 < 100%) AND (最大振幅値 > 0)とした。

- ・ ch-1は、設置直後からほぼ定常的な信号が検出された。同一のボーリング孔に設置されているch-2の発生挙動とは大きく異なっていること、高周波AE(PAC)は非絶縁タイプのAEセンサを使用していることを考えあわせ、この信号は殆どが電気ノイズであると判定した。したがって、ch-1で検出された信号のうち、大多数はAEではないと思われる。
- ・ ch-2はボーリング孔に埋設設置されたAEセンサである。他の表面設置(削孔を含む)のAEセンサとは異なり、降雨時にAE発生数が上昇する傾向はあまり見られない。
- ・ ch-3~ch-6までの表面設置あるいは表面削孔設置のAEセンサの場合、気温と降雨に依存する発生挙動(これらに対応して発生数が増減する)を示している。特に、時間雨量が多い場合、日中では相対的にAE発生数が多く、これらが何らかのAE発生源である可能性が大きい(もしくは、AE信号に似ている電気信号の可能性もある)。
- ・ 図-5.2.2(a)に示すように、1998年 5月 3日以降、ch-3には明らかなノイズが混入するようになった。降雨時にノイズが発生し、降雨後に3日~4日かけてゆっくりとノイズが減少する現象である。5月 3日には恐らく雷雨と思われる天候であったため、この時にセンサの不具合(絶縁抵抗の低下など)が発生した可能性がある。
- ・ 雷雨(雷)のノイズがしばしば計測された。例えば、1997年 4月 8日、5月16日、6月20日、6月27日、7月17日、8月2日~3日 などである。雷は、AEデータの集計に際し、極めて有害なノイズであるが、強大な電気パルスであるために恐らくその信号を除去することはできないと思われる。したがって、雷によるノイズをカウント(集計)しないようなデータ処理が必要である。例えば、雷センサを設置して雷信号を記録しておく方法などが有効ではないかと思われる。

日光稲荷川 AE計測結果

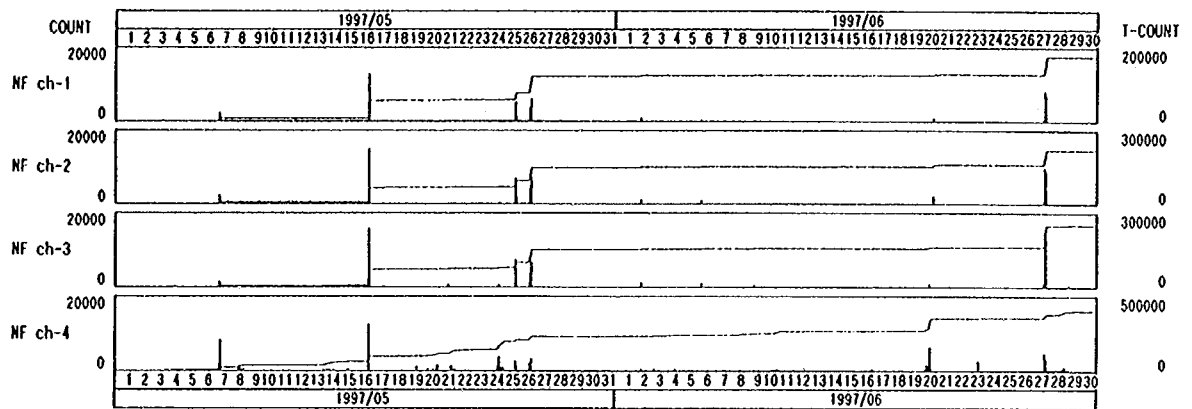
1998/05/01~1998/05/31



(a) 高周波AE計測データ (ノイズ発生状況)

日光稲荷川 AE計測結果

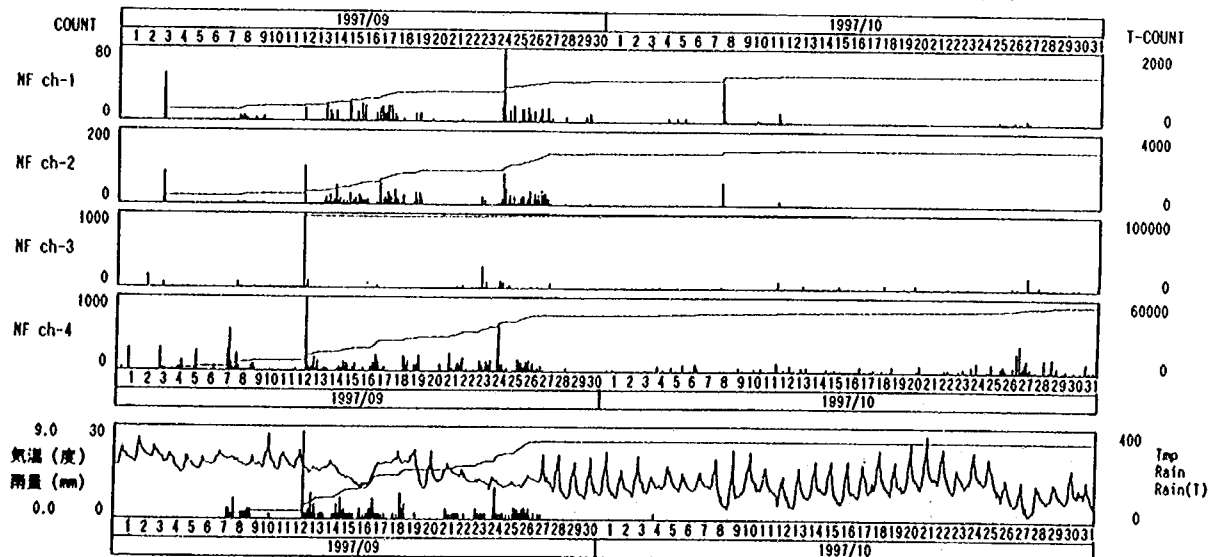
1997/05/01~1997/06/30



(b) 低周波AE計測データ (センサ間の同期)

日光稲荷川 AE計測結果

1997/09/01~1997/10/31



(c) 低周波AE計測データ (カウントの経時変化)

図-5.2.2 AE計測データ

- ・降雨や日照(温度)などによる特徴については、「5.3 計測データの評価」に記述した。

(2) 低周波AE(NF)の発生挙動(時間変動)

全期間を通して得られた低周波AEの挙動の中から、特徴のある動きを抽出すると以下のような。

なおこのデータは、ヒットとカウントをそれぞれ10分ごとに集計したものであって、集計の条件は、(継続時間 > 0 μ秒) AND (0% < 立上り時間 / 継続時間 < 100%) AND (最大振幅値 > 0)とした。

- ・高周波AE(PAC)と同様、ボーリング孔内に設置したch-1は設置後S/N比が悪く、他の表面・表面削孔により設置されているch-3～ch-6のAEセンサよりしきい値を高く設定せざるを得なかった(設置直後の8日間の挙動参照)が、その後の計測ではほぼ正常となった。
- ・表面・表面削孔により設置されているセンサ(ch-3～ch-6)のうち、ch-3(表面削孔)はボーリング孔内に設置されているch-1とch-2の挙動に、極めて近い発生挙動を示す時期があったが(例えば、1997年 5月中旬～ 7月下旬)、その理由は不明である(図-5.2.2(b)参照)。
- ・図-5.2.2(c)に示すように、1997年10月以降、ch-3のAE発生数がそれまでの約1/10に低下したが、同じ表面削孔のch-4と比較しても同様の傾向が出ている(元々、ch-4の方がch-3より発生数は多かったが、10月以降その比が拡大した)。1997年 9月12日に、雷と思われるノイズが記録されている(図-5.2.2(b)参照)が、このノイズは特にch-3で大きいため、落雷時のショックによりch-3の感度が低下した可能性(センサか増幅器かは不明)がある。ただし、その期日以降もAEを検出していることが確認されている。
- ・表面・表面削孔により設置されているセンサ(ch-3～ch-6)には、高周波(PAC)AEセンサの場合と同じく、降雨や日照(温度)による依存性が見られた。なお、その詳細については、「5.3 計測データの評価」に記述した。
- ・雷の影響については、高周波(PAC)AEセンサの場合と全く同じであると考えて良いと思われる。
- ・1997年 5月25日 7時22分(VTR時刻)に発生したNo.3岩塊の自然崩落に伴った振動を検出することができた。その詳細は、「5.2.3(1) 自然崩落時のAE」に記述した。
- ・低周波AE(NF)の場合、606日の観測期間中73日間(約12%)の計測データが消失している。原因は、計測器や電源の故障と報告されているが、斜面モニタリング装置として長期間使用するためには、この欠測率を確実に低下させることが必要である(欠測期間中に前兆が発生しないとは言えない)。

(3) AEセンサ以外の挙動(時間変動)

1) 傾斜計の挙動

全期間を通して得られた傾斜計の挙動の中から、特徴のある動きは以下のようにまとめられる。

- ・傾斜計の挙動には、1日をサイクルとする往復の変動が見られるが、これは温度補償がなされていない傾斜計を使用しているために発生した現象である。気温によって傾斜計(センサ)や取付け金具、あるいは岩盤などが膨張-収縮を繰り返した結果であるが、傾斜計の温度特性が不明であるため、どれが主な原因であるかは不明である。
- ・温度による日変化が見られるものの、傾斜角度はきわめてゆっくりと大きくなる傾向にあった。

- ・計測期間の所々に傾斜角が突発的に変動する部分が見られる。このうち、計測機器の接続作業や斜面上での作業によるものなどを除くと、いずれも原因は特定できないが、他のデータや岩盤の状況から見て、計器の誤作動によるものと思われる。
- ・また、その他にも微少な急変が確認されているが、その原因を特定することはできなかった。

2) 変位計の挙動

全期間を通して得られた変位計の挙動の中で、特徴のある動きは以下のようにまとめられる。

- ・変位計の挙動には、1日をサイクルとする往復の変動が見られる。
- ・傾斜計ほど回数は多くないが、変位計にも突発的な変動が見られた。その全てについて原因を特定することはできなかった。

3) 気象観測

気象データのうち、雨量については、各月の1日午前0時を0mmとした積算雨量も併せてとりまとめた。雨量の計測結果から、おおむね50mm以上の連続雨量を記録した期日を表-5.2.2に示す。

なお、観測期間中、最低気温は1997年 1月22日 06時30分の-9.8℃であり、最高気温は1997年 8月 9日 16時30分の35.8℃であった。ただし、最高気温は極めて短時間(ピーク状)の記録であって、30分後の17時00分では27.9℃に降下していることとピーク時の時刻を考えあわせると、温度センサに直射日光があたっていた可能性もある。

表-5.2.2 50mm以上の連続雨量

期 日	降雨量	備 考
1997年 5月21日	約 95mm	
1997年 5月24日～25日	約110mm	終了直後にNo.3岩塊が自然崩落
1997年 6月10日	約 55mm	
1997年 6月20日	約145mm	台風[雷を伴う]
1997年 6月27日～28日	約 70mm	降り始め雷を伴う
1997年 7月17日	約120mm	雷を伴う
1997年 7月26日～30日	約290mm	間欠的な降雨が4日間続く
1997年 8月 3日	約115mm	雷を伴う
1997年 8月 7日	約110mm	雷を伴う
1997年 9月12日～26日	約290mm	ほぼ連日降雨あり
1998年 4月14日～15日	約 85mm	

4) VTRによる観察

VTRは1996年12月 3日 12時24分から録画を開始し、1998年 8月 3日 8時29分に終了した。映像は、8秒ごとに1フレームの間欠映像となっており、再生時には通常の30フレーム/1秒であることより、240倍の

高速再生となっている。

画像を観察し、日射、降雪、霧、変状については[0：無]、[1：有]で表現し、風と雨については、[0：無]、[1：弱]、[2：強]で表現した。

なお、1997年11月 7日 14時10分～15時03分は人工崩壊実験予備調査、また、1998年 6月10日 15時05分～ 6月11日 11時04分は人工崩壊実験のため、それぞれ実画像記録とした。

5) 光波計測

岩盤の挙動を3次元的に把握する目的で光波測量による計測を実施した。測量の概要は表-5.2.3に示すとおりである。

表-5.2.3 光波測量による岩盤挙動観測の概要

項目	数量	仕様	設置方法
光波測距儀	1	トータルステーション	各測量時点に機械点の三脚に設置
機械点	1	測量用三脚	稲荷川右岸（対象斜面对岸）段丘上に三脚をコンクリートで固定
基準点	1	反射プリズム（1素子）	稲荷川第10砂防ダム上にボルトで固定
測点	15	簡易反射板	岩壁に取付用金具を介してボルトで固定

計測はほぼ1回／月に交替で実施し、測定者によるばらつきを極力小さくするために、“光波測量手順書”を作成し、これに従って測量を実施すると同時に、測量結果を一定のフォーマットで整理した。

各測点の計測結果として、各測点の上下流方向の挙動を現地状況写真上に投影したものを図-5.2.3に示した。この計測結果は次のようにまとめられる。

- ・各測点とも水平方向の変位量が垂直方向より大きい、これは気象条件や基準点の視準誤差によるものと判断される。
- ・各測点とも崩壊実験時に生じた変位を除けば、全般的に岩盤の顕著な変位は認められない。
- ・No.7,10,12,14測点は、ある時期に下方に変位したことも考えられるが、いずれも継続した変位ではなく、落石等により反射板自体が変形したことも考えられる。
- ・No.15の岩塊は計測期間中に崩落したが、光波測量の結果からはこの兆候は認められなかった。

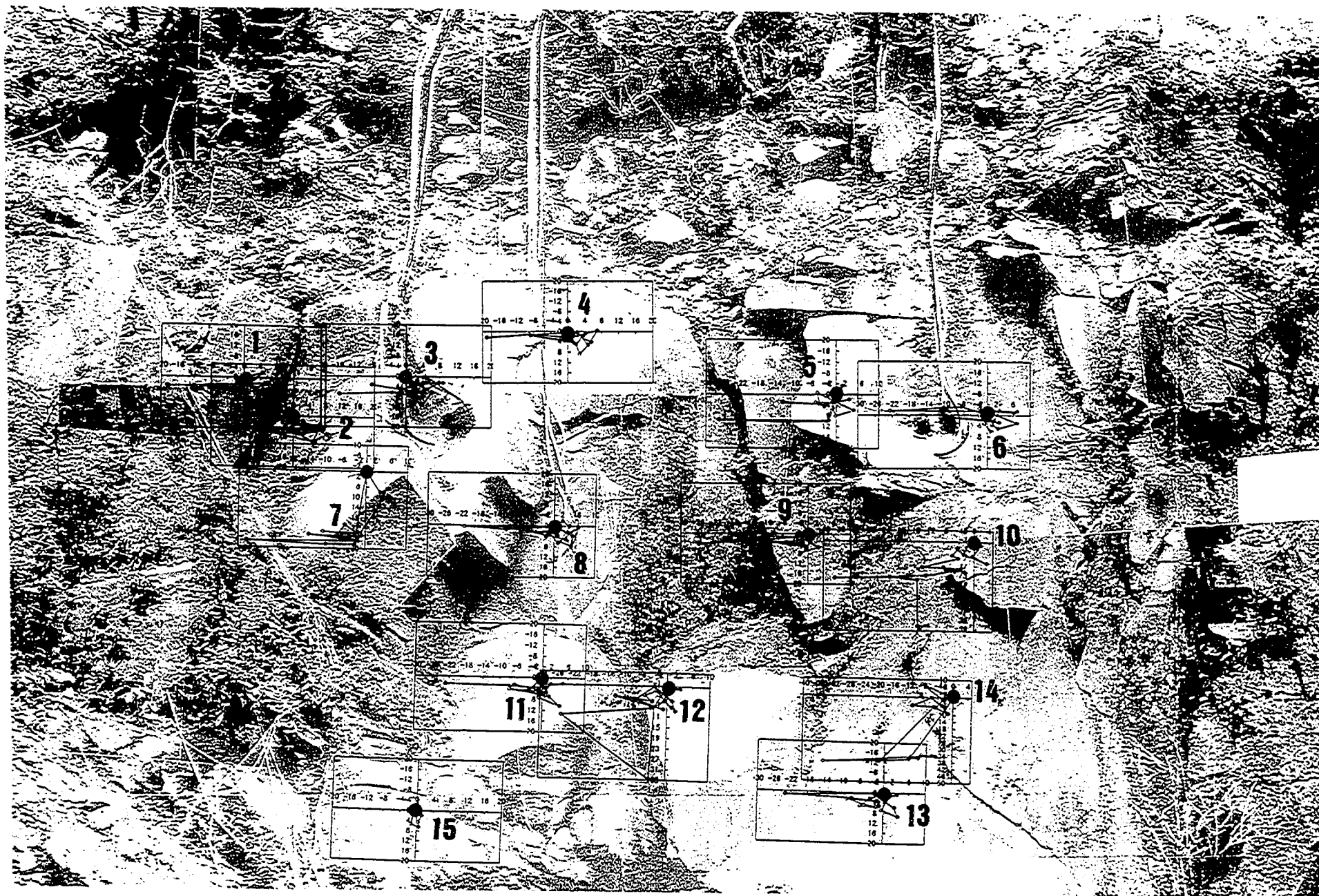


図-5.2.3 光波測量結果（上下流方向）のまとめ

5.2.3 計測データの評価

AE 計測で測定されたデータを評価するに際しては、観測された信号が有意なデータであるのかノイズであるのかを判別する必要がある。ここで、有意なデータとはさまざまな要因によって発生した弾性波に基づく信号であり、ノイズとはセンサ・計測装置および通信ケーブルを含む計測システム内において発生した電氣的な信号のように、岩盤における弾性的な挙動とは無関係に発生するものと考えられる。このように考えると、自然現象に基づく信号であっても雷によって生じた信号はノイズ、落雷で地盤が振動したことによって発生した信号はデータというように考えることができる。

実際には、測定された信号を厳密な意味でデータとノイズに分離することは困難であると考えられるが、実用上は、そのデータの特徴から両者は判別することができるものと思われる。

一方、データと判定された信号についても、その発生要因はさまざまなものが考えられる。すなわち、本研究で目的としている岩盤崩壊の前兆としての AE 以外にも、降雨時のように雨滴が地面に衝突した際に生じる振動に由来するものや、強風時に立木の動揺が根を通じて伝播したもの、温度変化により岩盤表面が膨張・収縮する時点で発生するものなど自然現象に加えて、付近の工事現場の振動やさらに遠方に発生源がある常時微動なども考えられる。

このように、測定された信号にはさまざまな要因によって発生したものが含まれており、この中には一般的に AE と呼ばれるものも単に振動と捉えられるものも含まれている。ここで、本研究は最終的には、AE 観測手法によって岩盤の挙動を観測・予測することを目的としていることから、岩盤の挙動を観測する上で検討すべき課題については、いくつかの検討を実施した。

このようなことから、以下に行うデータの評価においては、ノイズ以外の一般的な定義における AE には含まれないと考えられる信号についても評価を行うものとする。図-5.2.4 に測定信号の発生要因に基づいた分類を示した。

以下、本節では長期計測中に観測されたデータの中から、図中に示したような項目を代表する事例として、自然崩落（落石）、降雨・温度変化および日射等の気象条件、地震の自然条件に加えて、電氣的なノイズについて検討を行うものとする。

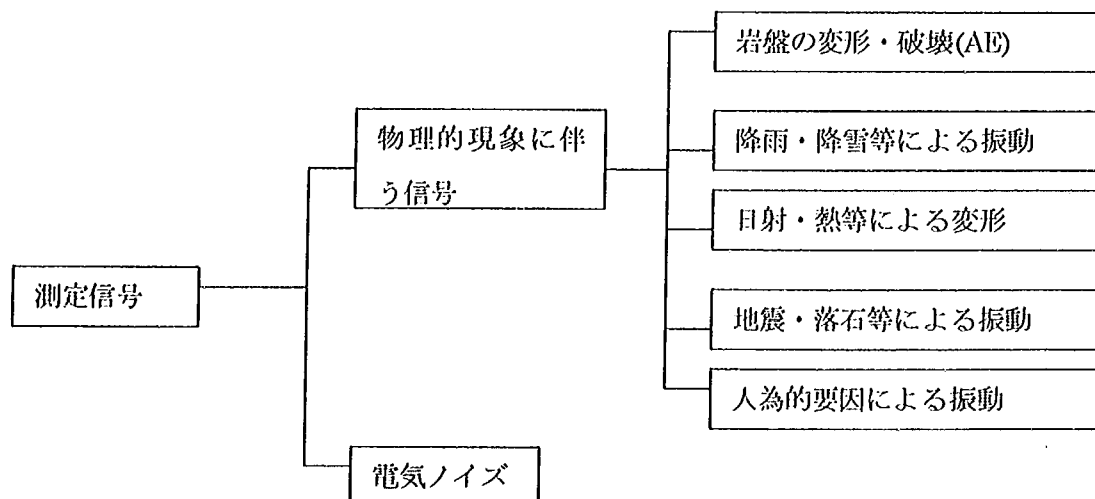


図-5.2.4 AE 信号の発生要因に基づく位置付け

（１）自然崩落時の挙動

1997年5月25日7時22分(VTRの時刻)、No.3岩塊とその周辺の岩塊が自然崩落した。写真-5.2.1は自然崩落の前後の状況であるが、赤い反射鏡(No.15)が設置されていた岩がNo.3岩塊である。

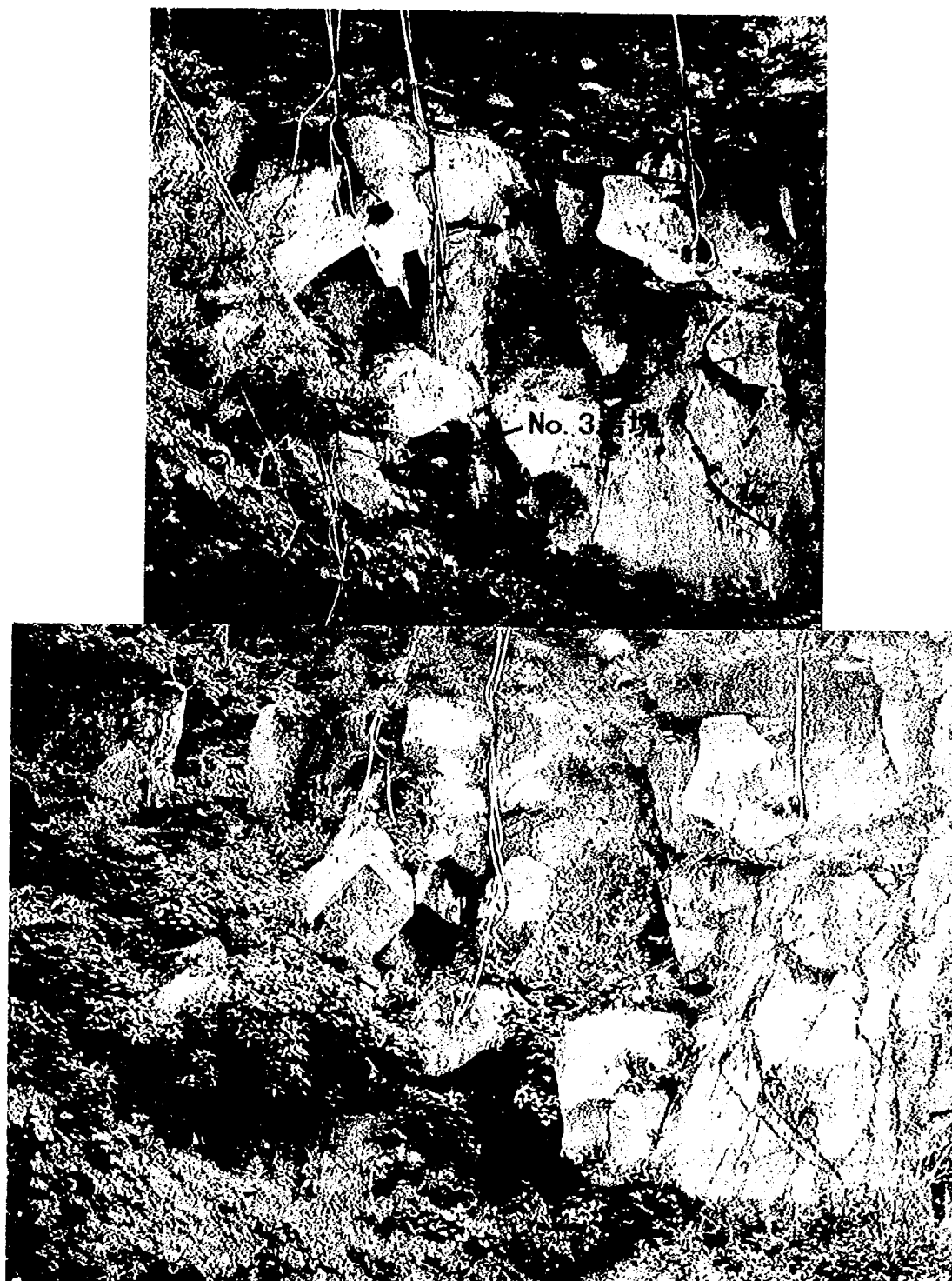


写真-5.2.1 自然崩落した No.3 岩塊

a. 時間的推移

図-5.2.5 は、自然崩落した日を含む 2 日間に計測された各計測データである。これらの特徴をまとめると次のようになる。

- ・ 落石の直前まで、16 時間以上にわたって累積雨量 120mm を越える豪雨が降っており、自然崩壊はその豪雨が止んでから約 2 時間後に発生した。
- ・ No.3 岩塊が自然崩壊した時刻に、低周波 AE(NI)センサでは全てのセンサで AE を検出することができたが、高周波 AE(PA.C)センサでは該当する時刻には顕著な AE を検出していない。このため、低周波 AE センサで検出した AE 信号は、岩塊の崩落による振動(広義の AE)であると考えられる(一般的に落石による振動は周波数が低い傾向にある)。
- ・ ボーリング孔内に埋設設置されている AE センサは、降雨の影響をほとんど受けておらず、これらの中では比較的明瞭に崩落時の振動を検出することができた。
- ・ 自然崩落した No.3 岩塊のすぐ直上に位置する No.4 岩塊には、No.3 傾斜計(X 成分、Y 成分)が設置されているが、図-5.2.5 を見る限り、前兆と認められる現象は検出されていない。

b. AE パラメータ

AE パラメータのうち、継続時間－立上り時間と、継続時間－最大振幅値の関係について、ほぼ同一の方向に設置されている ch-3 および ch-5 についてそれぞれ求め、図-5.2.6 と図-5.2.7 に示した。それぞれの特徴は以下のようにまとめられる。

- ・ ch-3、ch-5 のいずれとも、一部の例外はあるが、継続時間と立上り時間がほぼ同じである、という特徴が見られる。波形が得られていないので結論は軽々に下せないが、次の理由が考えられる。
 - ① 波形の後半に、最大振幅が存在する。
 - ② 崩落による振動は長時間連続したと考えられることから、AE 計測システムが追従できなかった。
- ・ AE の最大振幅は、発生源(No.3 岩塊)に近い ch-3 が約 0.12mV(平均)で、遠い ch-5 がで約 0.9mV(平均)であった。何れも、継続時間が長くなるにつれて僅かに大きくなるという特徴が見られる。

(2) 気象条件等による AE 特性

1) 降雨

a. AE パラメータ

降雨による影響の評価を、表-5.2.4 に示した時間(時間帯)で行った。なお、1997 年 5 月 14 日のデータはカウントとの関係評価にのみ使用した。これらのデータ取得期間は、欠測期間を避けたり、VTR による観察結果などを参考にして決定したものである。また、評価に使用した測定点は、高周波・低周波とも ch-4[表面削孔(ウェーブガイド使用)]と ch-6[表面設置]の 2 地点とした。これは両者とも同一(C ブロック)岩塊に設置されているためである。

1997/05/24~1997/05/25

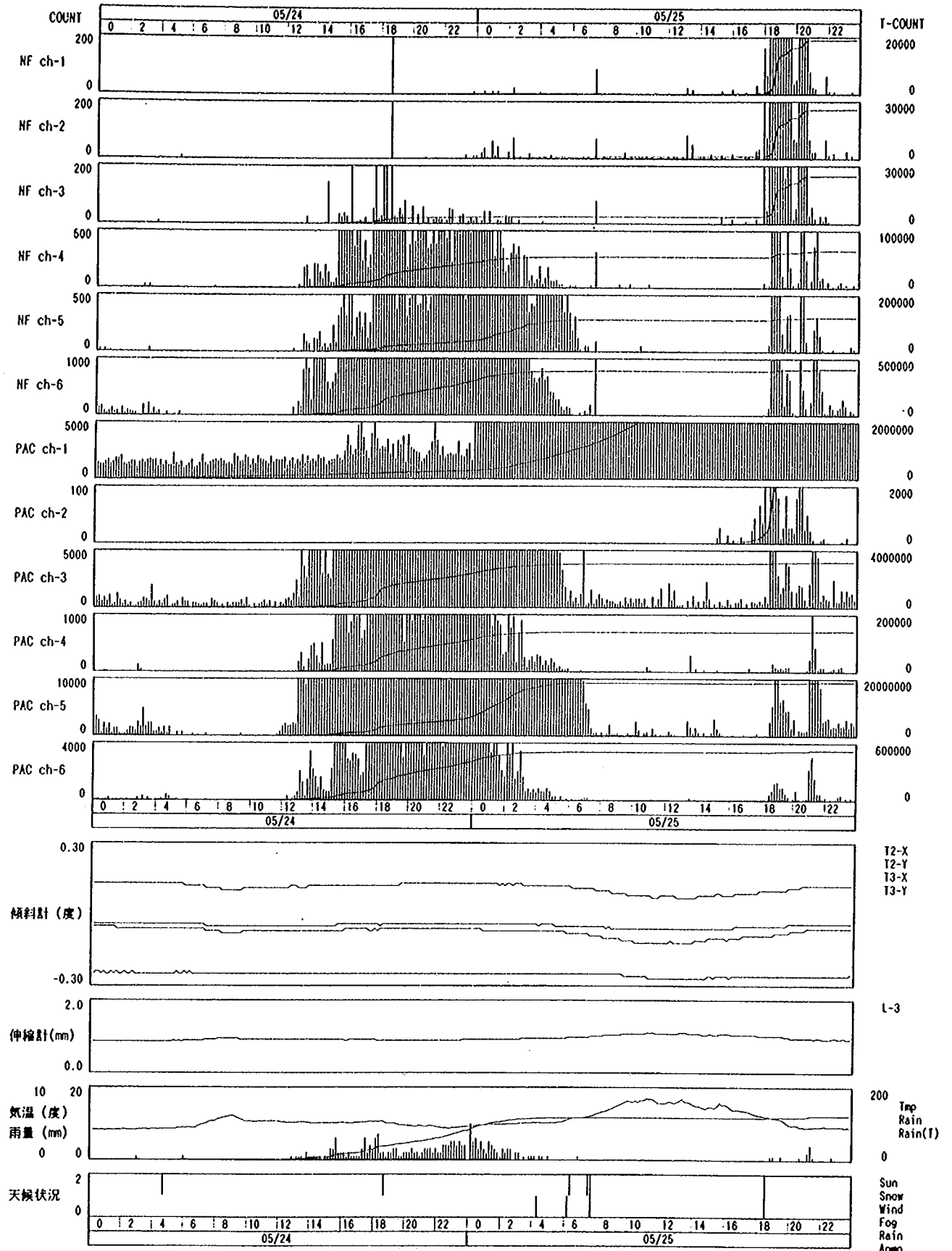


図-5.2.5 自然崩落時の前後に発生した AE

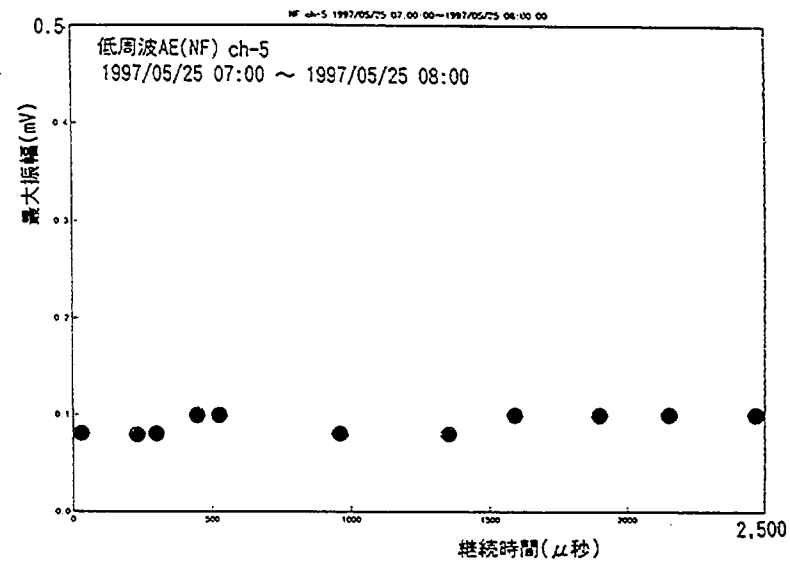
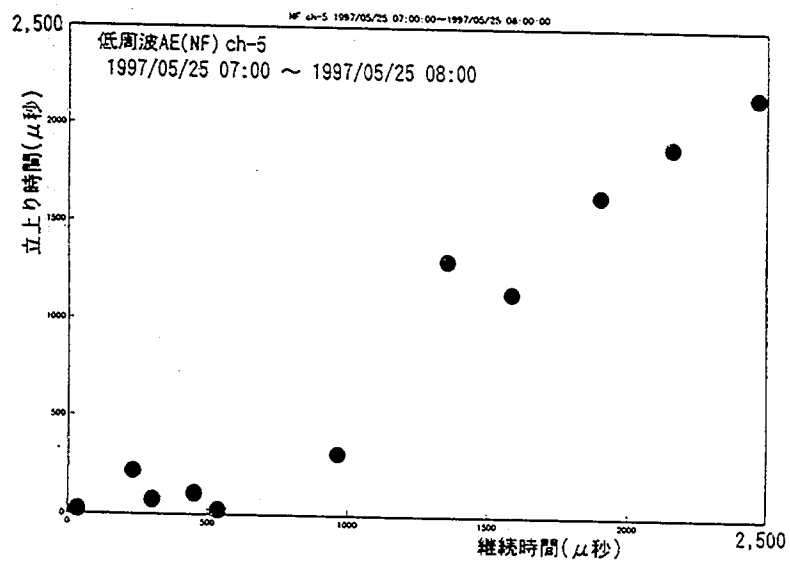
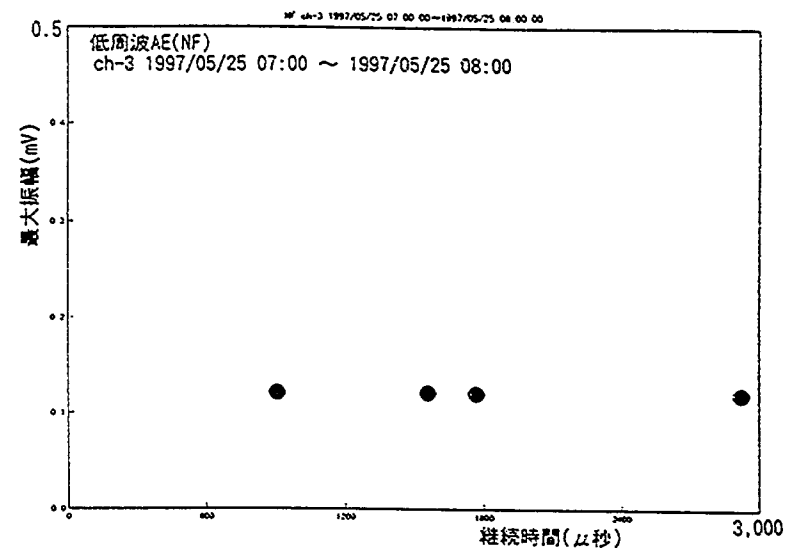
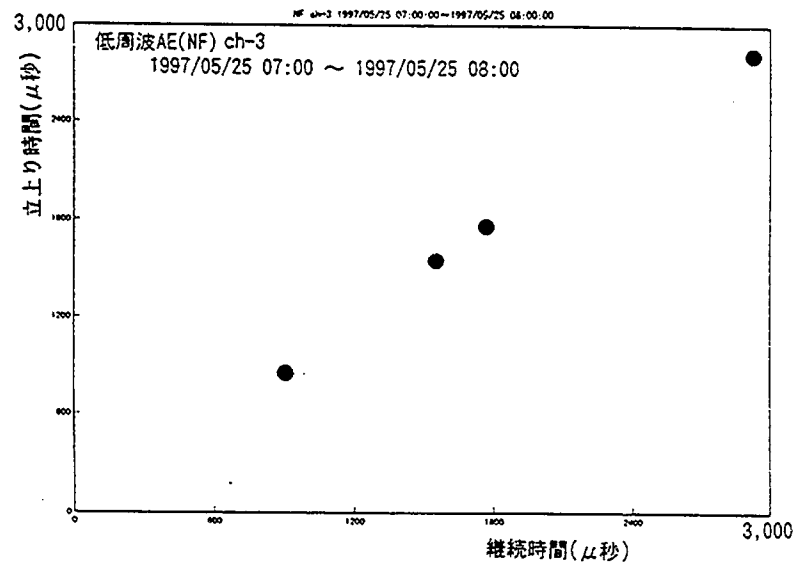


図-5.2.6 No.3岩塊の自然崩落に伴う AE のパラメータ(1)

図-5.2.7 No.3岩塊の自然崩落に伴う AE のパラメータ(2)

表-5.2.4 降雨による AE パラメータの評価期間(時間帯)

評 価 期 間	総雨量(mm)	高周波 AE	低周波 AE
1997 年 05 月 20 日 06 時 00 分 ～ 05 月 21 日 00 時 00 分	17[1.0/h]	ch-4、ch-6	ch-4、ch-6
1997 年 06 月 20 日 06 時 00 分 ～ 06 月 20 日 18 時 00 分	145[12.1/h]	ch-4、ch-6	ch-4、ch-6
1997 年 07 月 26 日 20 時 00 分 ～ 07 月 27 日 00 時 00 分	34[8.3/h]	ch-4、ch-6	ch-4、ch-6
1998 年 04 月 15 日 02 時 00 分 ～ 04 月 15 日 11 時 00 分	56[6.3/h]	ch-4、ch-6	ch-4、ch-6
1998 年 05 月 03 日 08 時 00 分 ～ 05 月 03 日 12 時 00 分	16[3.9/h]	ch-4、ch-6	ch-4、ch-6
1997 年 05 月 14 日 00 時 00 分 ～ 05 月 28 日 00 時 00 分	245.0	全 ch	全 ch

注：雨量は評価期間(時間帯)での連続降雨量、[内]は時間平均雨量

図-5.2.8 は、表-5.2.4 に示したうち、1997 年 5 月 20 日を含む 3 日間の経時変化を、拡大表示したものであり、図-5.2.9～図-5.2.10 は、AE パラメータのうち、継続時間－立上り時間、継続時間－最大振幅値を分布図とした結果である。それぞれの特徴をまとめると次のようになる。

① 継続時間－立上り時間

雨の降り方による影響はあるものの、高周波 AE(PA.C)の場合、100% > 立上り時間 > 0%の間にランダム状に分布している。これに対し、低周波 AE(NF : ch-4、ch-6)の場合では、ある一定の間隔にまとまって分布する傾向を持っている。その傾向は、表面設置(ch-6)に強く、表面削孔(ch-4)の場合では、その間隔が短い。また、データの分布域は、表面設置(ch-6)の方が表面削孔(ch-4)よりも 1.5 倍から 2.0 倍程度広がっている。

② 継続時間－最大振幅値

雨の降り方による影響はあるものの、継続時間が長くなるにつれ最大振幅値の最低値は、傾斜は緩やかであるが確実に大きくなるという特徴が見られる。また、継続時間 - 最大振幅値の分布において、傾斜の異なるグループに分かれる傾向が周波数に関係なく見られる。

b.雨量とカウントの関係

降雨量とカウントの関係を評価した期間(時間帯)は表-5.2.4 に示した通りである。なお、No.3 岩塊が自然崩壊した時期についての 14 日間については、より詳しく分析した。いずれの評価とも、評価期間の開始時の雨量を 0mm とする累積雨量を求める一方、AE の場合は 0 カウントとする累積量を求め、両者の関係を図化するとともに一次回帰式を求めた。

① 1997 年 5 月 14 日～28 日を除いた 5 つの評価期間(短期間)

図-5.2.11 に 1997 年 5 月 20 日のデータに対する検討結果を示した。また、図中には一次回帰式と相関係数を記述してある。また、表-5.2.5 は、累積(総)雨量－累積カウントの一次回帰式から求めた相関係数を、設置場所ごとにまとめたものである。これによると、いずれの平均値とも約 0.98 と、極めて高い相関係数が得られた。このことから、AE センサを表面付近に設置した場合には、AE センサの種類(高周波・低周波)に関係なく、「降雨中の AE 信号はほとんど全てが降雨による影響である」と結論づけても過言ではない。したがって、表面削孔(深さ 30cm 程度)と表面設置の AE センサは、降雨時には岩盤からの AE をほとんど検出できない(両者を分離できない)ものと思われる。

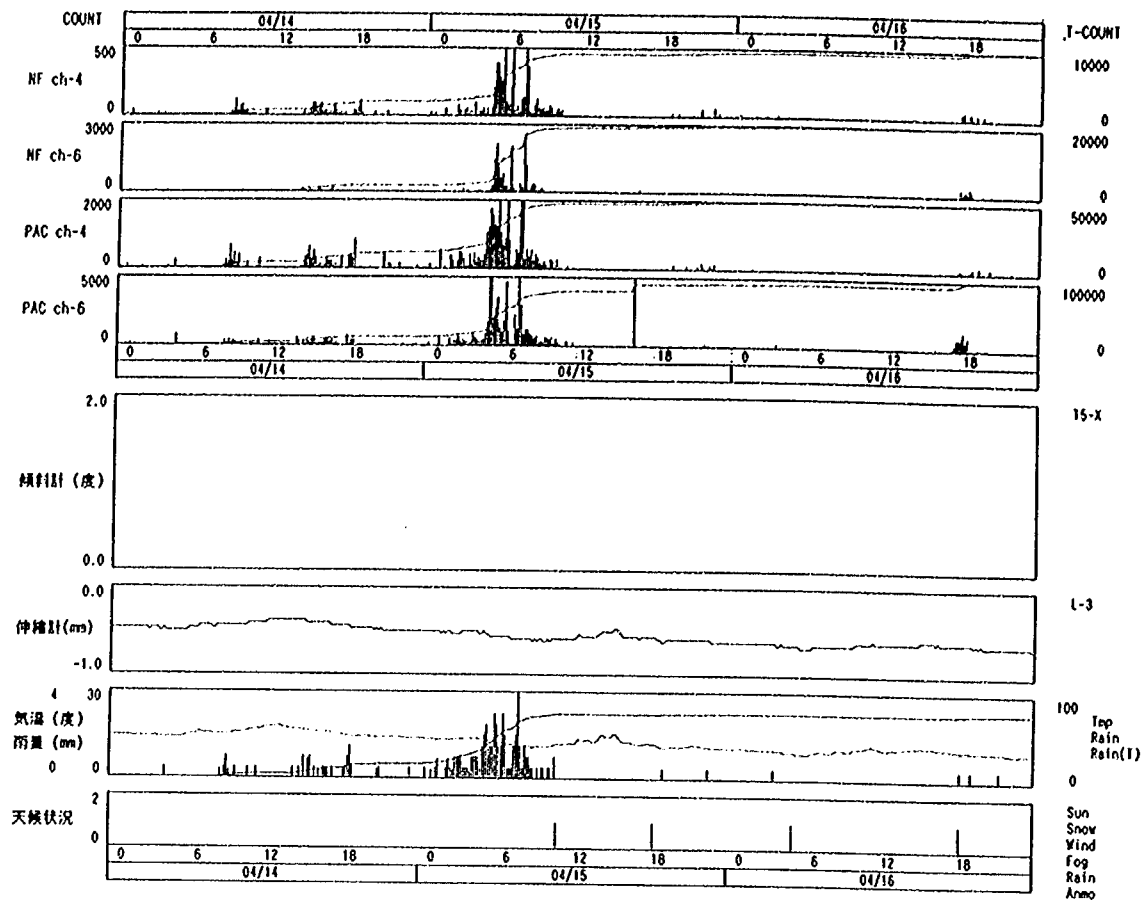


図-5.2.8 降雨期間の経時変化

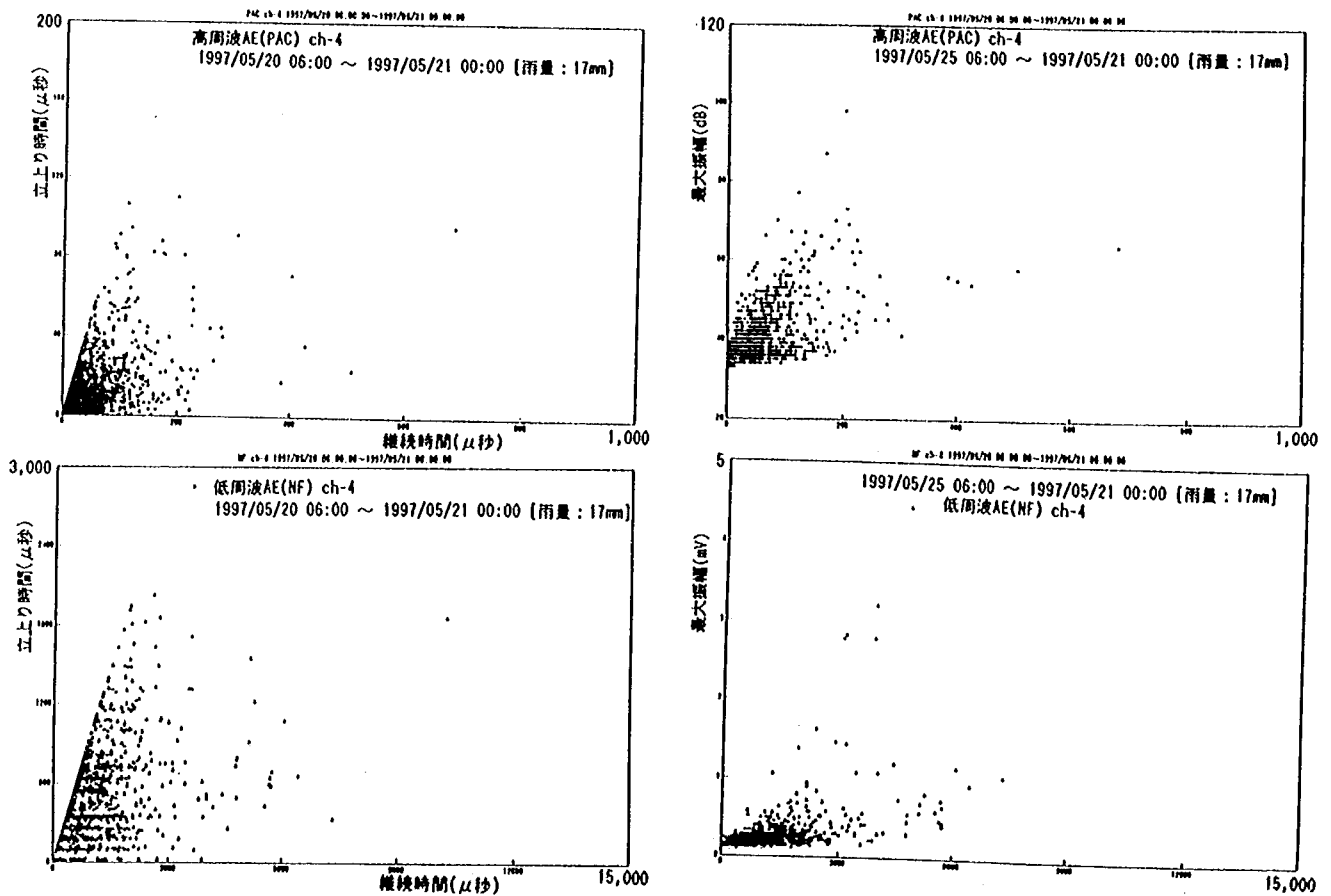


図-5.2.9 降雨時の AE パラメータ (ch-4)

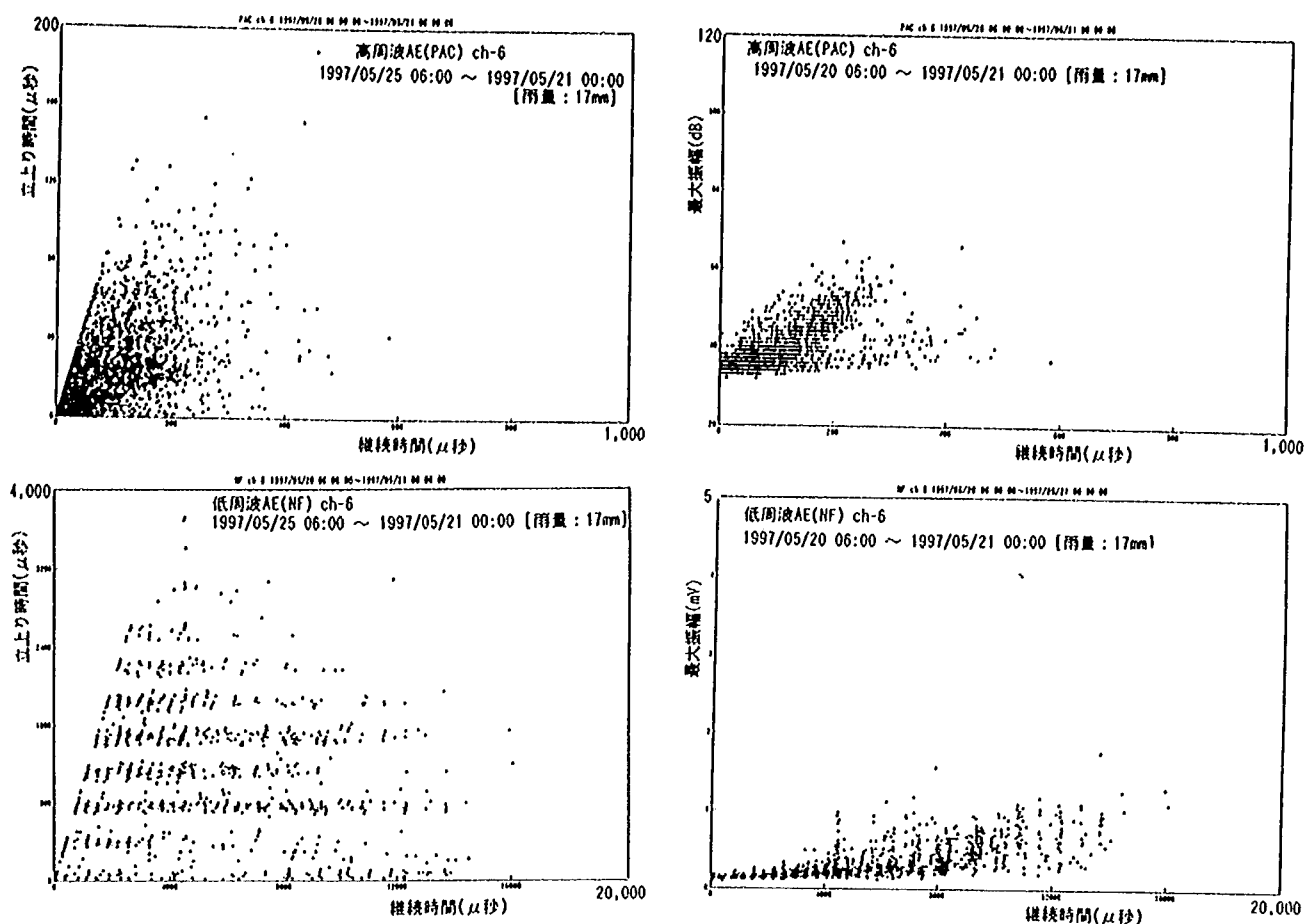


図-5. 2. 10 降雨時の AE パラメータ (ch-6)

表-5. 2. 5 [雨量-カウント]の一次回帰式における相関係数

評価期間	雨量(mm)	表面削孔(ch-4)		表面設置(ch-6)	
		高周波	低周波	高周波	低周波
1997年05月20日06時00分～00時00分	17[1.0/h]	0.988	0.981	0.964	0.965
1997年06月20日06時00分～18時00分	145[12.1/h]	0.967	0.973	0.978	0.986
1997年07月26日20時00分～00時00分	34[8.3/h]	0.966	0.963	0.958	0.956
1998年04月15日02時00分～11時00分	56[6.3/h]	0.995	0.992	0.995	0.992
1998年05月03日08時00分～12時00分	16[3.9/h]	0.995	0.995	0.996	0.997
平均値	—	0.982	0.981	0.978	0.979

② 1997年5月14日～28日の期間(長期間)

表-5. 2. 4 に示した 6 つの評価期間のうち、1997年05月14日00時00分～05月28日00時00分(14日間)の累積(総)雨量と累積カウントについて検討すると、AE センサが地表に設置されているほど降雨の影響が大きい傾向にあることがわかった。ただし、ほとんどの AE センサで同時に累積カウントが急増している時間帯では、極めて短時間に 10mm ほどの豪雨に加えて、落雷による電気ノイズを検出している可能性がある。

また、5月24日から25日にかけて 120mm を越す大雨が観測されたが、ボーリング孔底に設置されているセンサ(ch-1、ch-2)では、ほとんど累積カウントの増加が見られず、必ずしも降雨量にのみカウントが依存していない

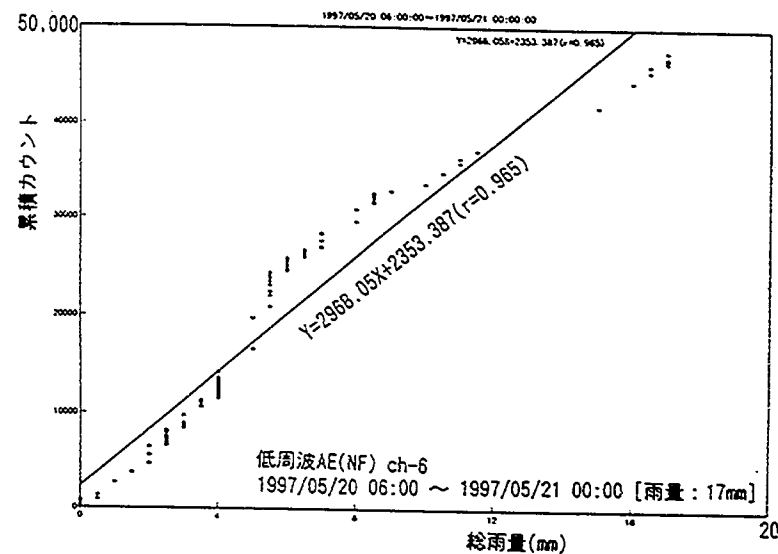
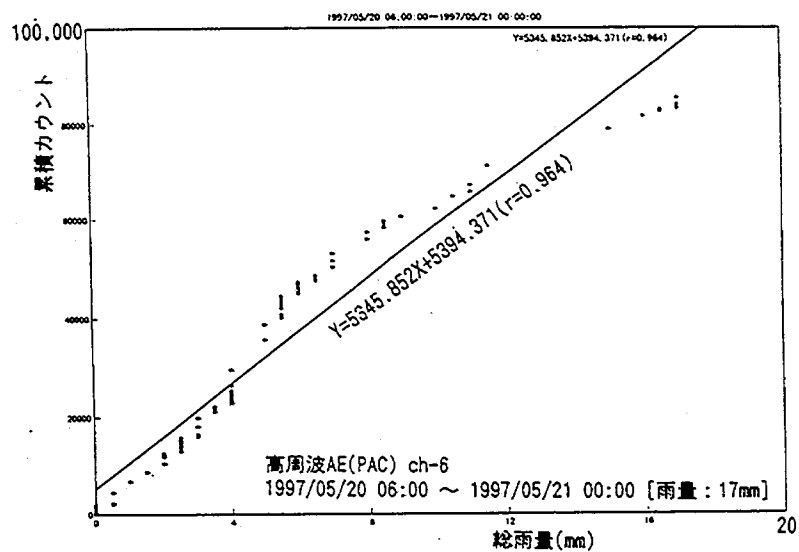
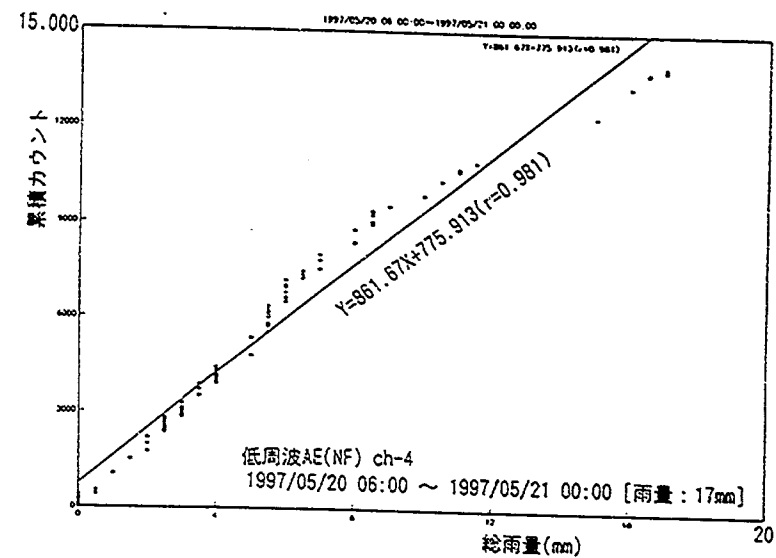
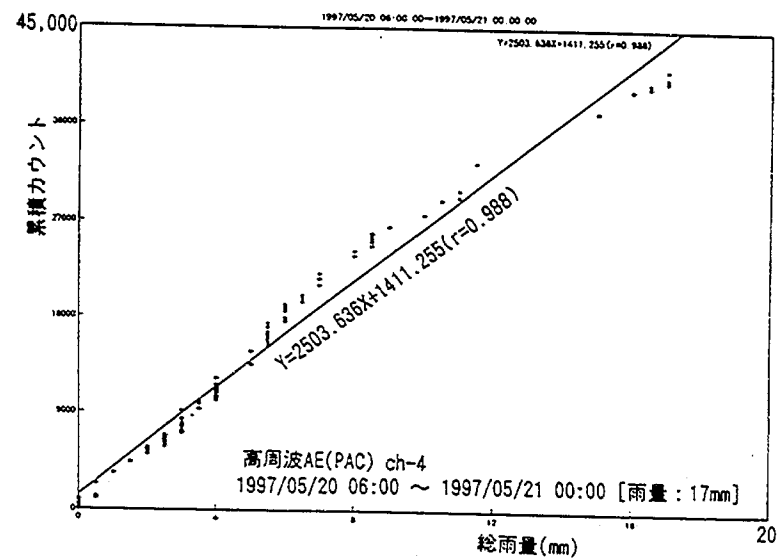


図-5.2.11 総雨量とカウントとの関係

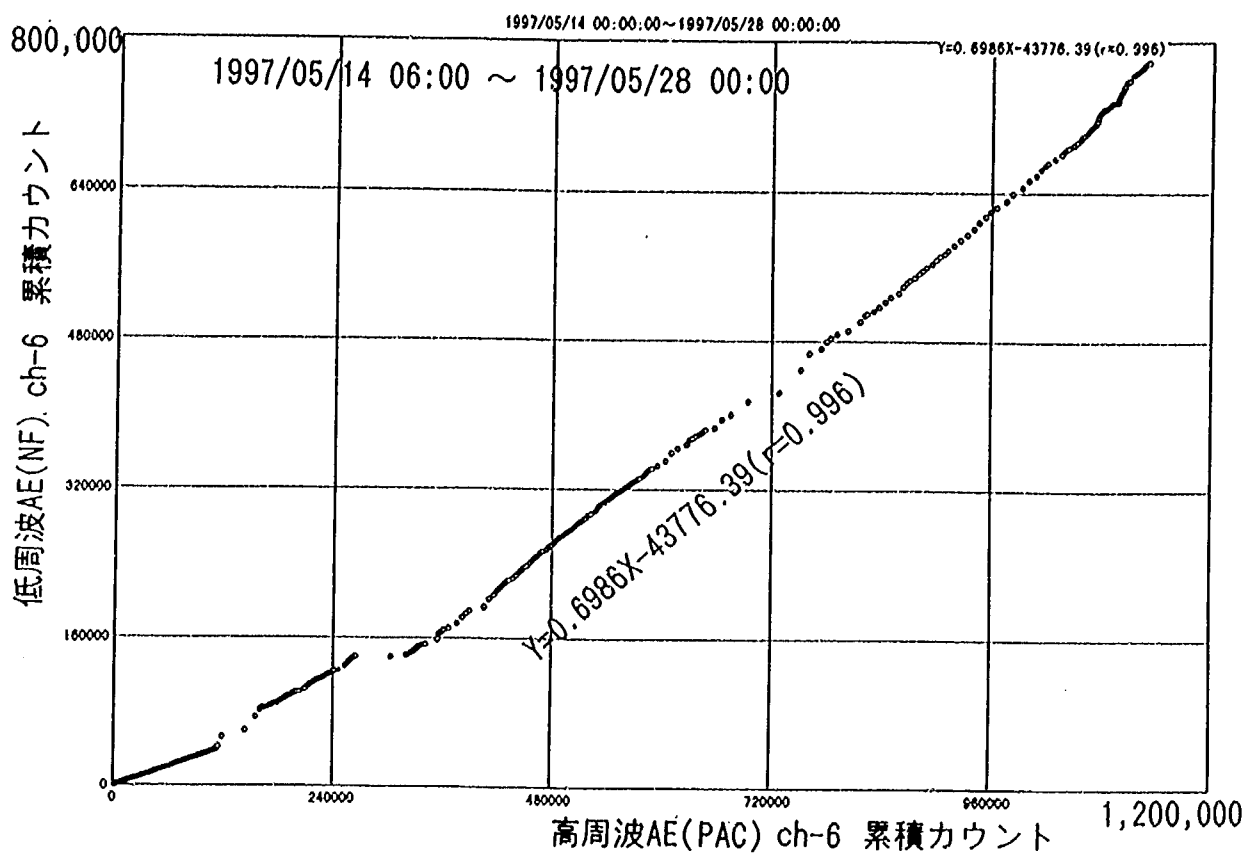


図-5. 2. 12 降雨時の高周波 AE と低周波 AE の比較

場合もある。この原因として、この降雨は雷雨ではなかった可能性が高い。

図-5. 2. 12 は、高周波(PAC)の ch-6(表面設置)と低周波(NF)の ch-6(表面設置)の相関関係をグラフ化したものである。一部を除き、極めて良好な正の関係にあって、表-5. 2. 5 の結果とも一致する。

c.雨量と設置位置の関係

全段で指摘した、表面削孔センサより表面設置 AE センサの方が降雨の影響が大きい点を確認するために、低周波(NF)AE センサについて、影響の程度を推定してみた。結果を図-5. 2. 13 に示す。なお、集計に使用した時間間隔は 20 分である。

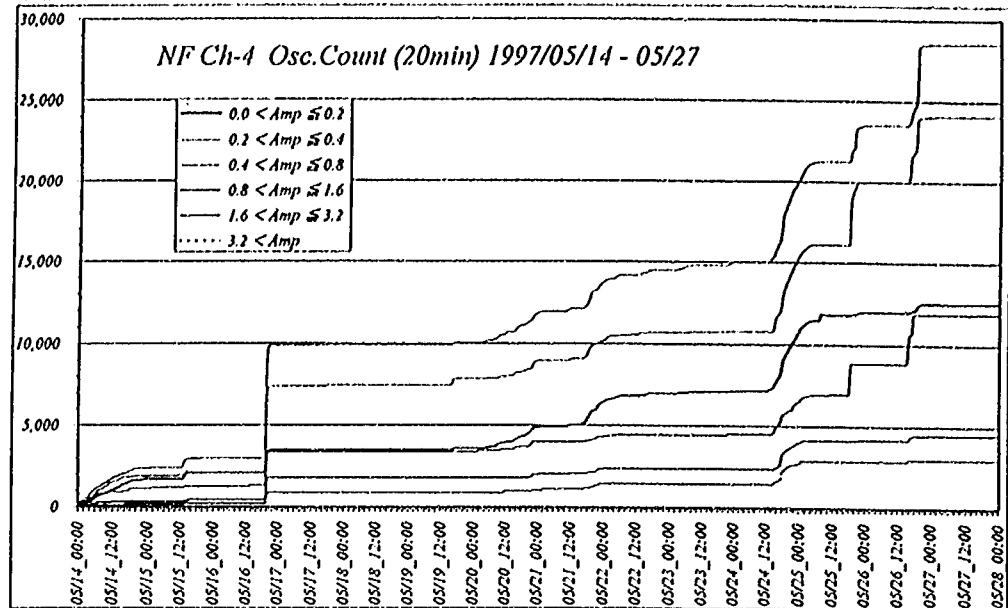
その結果、AE センサが地表面あるいは地表近くに設置された場合では、連続雨量にほぼ比例した累積カウントが得られ、その傾向は表面設置の方が強いことが確認された。なお、ボーリング孔底と地表削孔に設置された低周波 AE では、連続雨量が 5~10mm にもかかわらず異常に大きいカウントを示す部分が検出されたが、この部分は先にも述べたように落雷の影響の可能性はある。

d.時間変化に対する降雨量補正

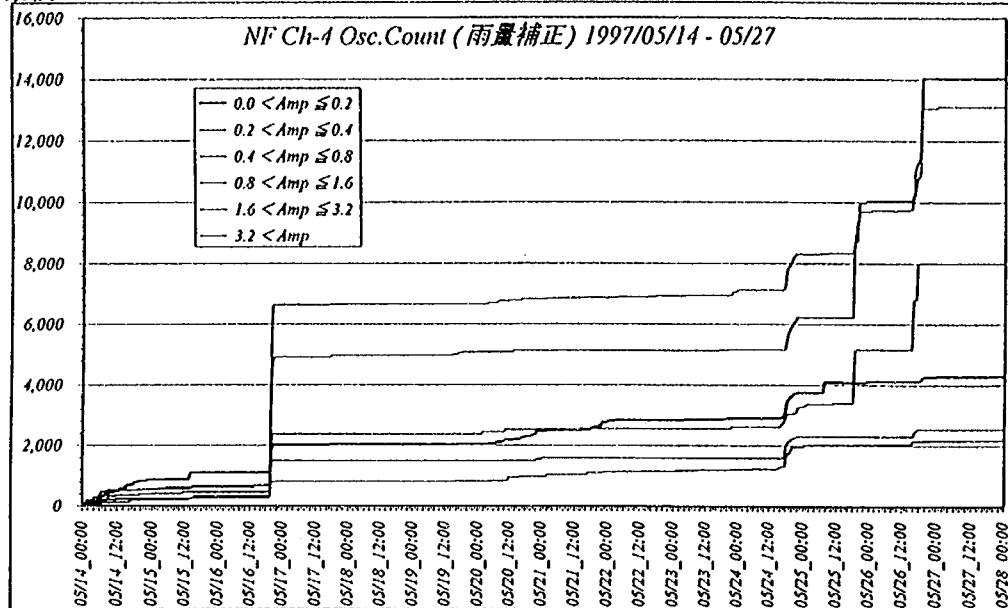
b、c.に述べたように、AE センサが降雨量の影響を受けているならば、一次回帰式を逆に適用することによって、その影響を除去することができる可能性が高い。ここでは c.と同様に、低周波(NF)AE センサ(ch-2、ch-4、ch-6)を使用して、その効果を検証してみた。

そのうちから、ch-4 の結果を図-5. 2. 14 に示したが、表面削孔(ウェーブガイド使用)設置では、補正前に比べ、補正後では確実に累積カウントが低下し、降雨の影響が抑制されている。また、No.3 岩塊の自然崩落による AE は、0.2mV より小さな振幅を持っているが、雨量補正により比較的明瞭になってきていることがわかる。この傾向は、表面設置のケースでも同等であるが、ボーリング孔内設置のセンサでは、この補正による降下は不明瞭であり、落雷による電気ノイズには全く効果がなかった。

累積カウント



累積カウント

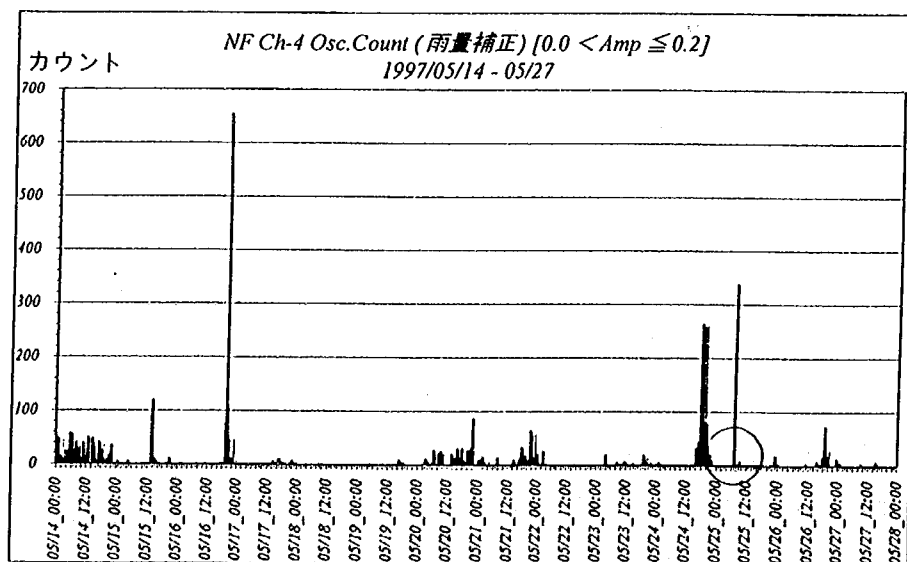
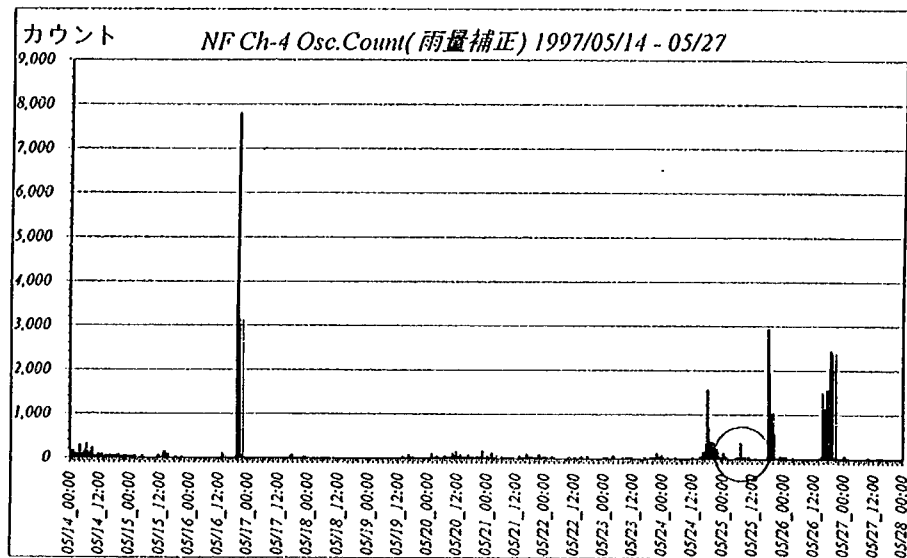
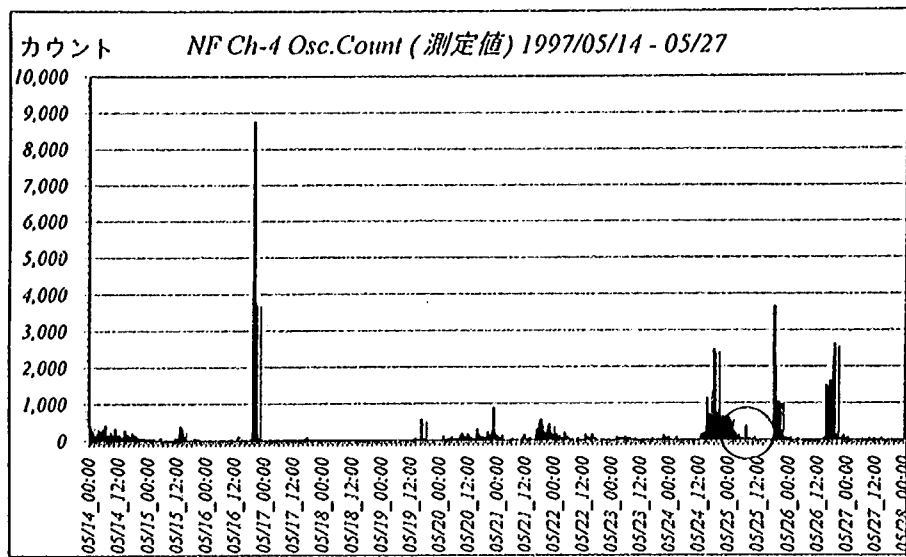


上段：計測データ、下段：雨量補正後

図-5.2.13 振幅別 連続雨量－累積カウント の関係(低周波 AE : ch-4)

以上の a.～d.は次のようにまとめられる。

- ・連続した雨量と累積カウントの間には明瞭の相関関係が成立し、地表近くに設置されている AE センサほどその相関係数は大きい。
- ・比較的時間雨量の少ない降雨に対しては、AE センサを地中深く埋設することにより、周波数にかかわらずその影響を受けないことが確認された。
- ・雷を伴う降雨の影響は、センサの埋設深さに関係がない。
- ・連続した雨量の全体的な傾向によって、降雨による影響を除去する方法は、ある程度効果が認められるが、時間雨量の大きな降雨や雷を伴う降雨に対しては、ほとんど効果が期待できない。



上段：計測データ、中段：雨量補正後、下段：雨量補正後(0.0mV<最大振幅値<0.2mV)

図-5.2.14 カウント の時刻変動(低周波 AE : ch-4)

2) 温度

a. AE 発生数の温度依存性

図-5.2.15 は降雨のない時の AE 発生状況の拡大図である。記録は 1997 年 1 月 13 日であるが、地表設置(ch-6)の AE センサにおいては、昼間の気温上昇時(14 時頃まで)に連動して AE のカウントが増加するという傾向が明瞭である。約 30cm の深さに削孔により設置した AE センサ(表面削孔 : ch-4)でも検出されていることから、AE センサ自体の温度特性とは考えにくく、日射によって岩盤の表面が熱せられた結果、熱膨張によって AE が発生した可能性が考えられる。

このため、表-5.2.6 に示した時間帯(初春と夏期)について、温度上昇時の気温とカウントの関係をグラフ化し、詳細な検討を行ってみた。対象 AE センサは、高周波と低周波の双方とし、位置は降雨と同じくほぼ同一箇所に設置されている ch-4(表面削孔)と ch-6(表面設置)とした。

表-5.2.6 気温による AE パラメータの評価時間帯(温度上昇時)

評 価 期 間	気温(°C)	高周波 AE	低周波 AE
1997 年 01 月 13 日 07 時 00 分 ～ 01 月 13 日 14 時 00 分	0.3 - 11.2	ch-4、ch-6	ch-4、ch-6
1997 年 03 月 25 日 07 時 00 分 ～ 03 月 25 日 14 時 00 分	2.0 - 19.8	ch-4、ch-6	ch-4、ch-6
1997 年 07 月 04 日 05 時 00 分 ～ 07 月 04 日 13 時 00 分	19.7 - 28.6	ch-4、ch-6	ch-4、ch-6

注：気温は、評価時間帯での最低値と最高値

ch-4 に対する検討結果を図-5.2.16 に示し、その特徴や課題は以下のようにまとめられる。

季節変化としては、最低気温が 0°C となる冬期の場合、極めて大きな温度依存性を示す。しかも、周波数(高周波 AE、低周波 AE)や設置場所にかかわらず、7°C～8°C を境として傾斜が急変する傾向を示すが、これに対して、最低気温が 20°C 近くとなった夏期の場合、温度依存性は極めて少ない。また、最低気温が数°C となる冬～初春の場合では、中程度の温度依存性を示してが、冬期間に見られた傾斜の急変箇所は見られない。ここで、冬期においてのみ温度依存性が大きい理由としては、岩盤内および表面の水分の凍結融解に伴い、氷あるいは岩盤から AE が発生するためと考えられる。

また、温度に対する依存性は、地表設置の方が地表削孔よりも 3 倍程度大きい結果が得られたが、これは表面における凍結融解現象がより顕著であることと関係しているものと思われる。

b. 気温上昇時の AE パラメータ

表-5.2.6 に示した時間帯のうち、1997 年 1 月 13 日(ch-4 および ch-6)の AE について、継続時間と立上り時間、継続時間と最大振幅値の関係を求め、図-5.2.17 に示した。そのぞれの特徴をまとめると次のようになる。

すなわち、継続時間－立上り時間では、高周波、低周波ともパラメータの分布状況はほぼランダムであり、特別な偏りは見られない。特に、継続時間－立上り時間のグラフで、降雨時に低周波 AE(NF:ch-6)に検出されたような、ある一定時間間隔(190～200 μ 秒)でデータがまとまっているというような周期的特性は、この気温上昇時には見られない現象である。一方、継続時間－最大振幅値では、高周波、低周波とも傾斜の異なる 2 つのグループに分かれて分布しているが、その理由は特定できなかった。なお、他の時間帯についても同様の結果が得られている。

日光稲荷川 AE 計測結果

1997/01/13~1997/01/13

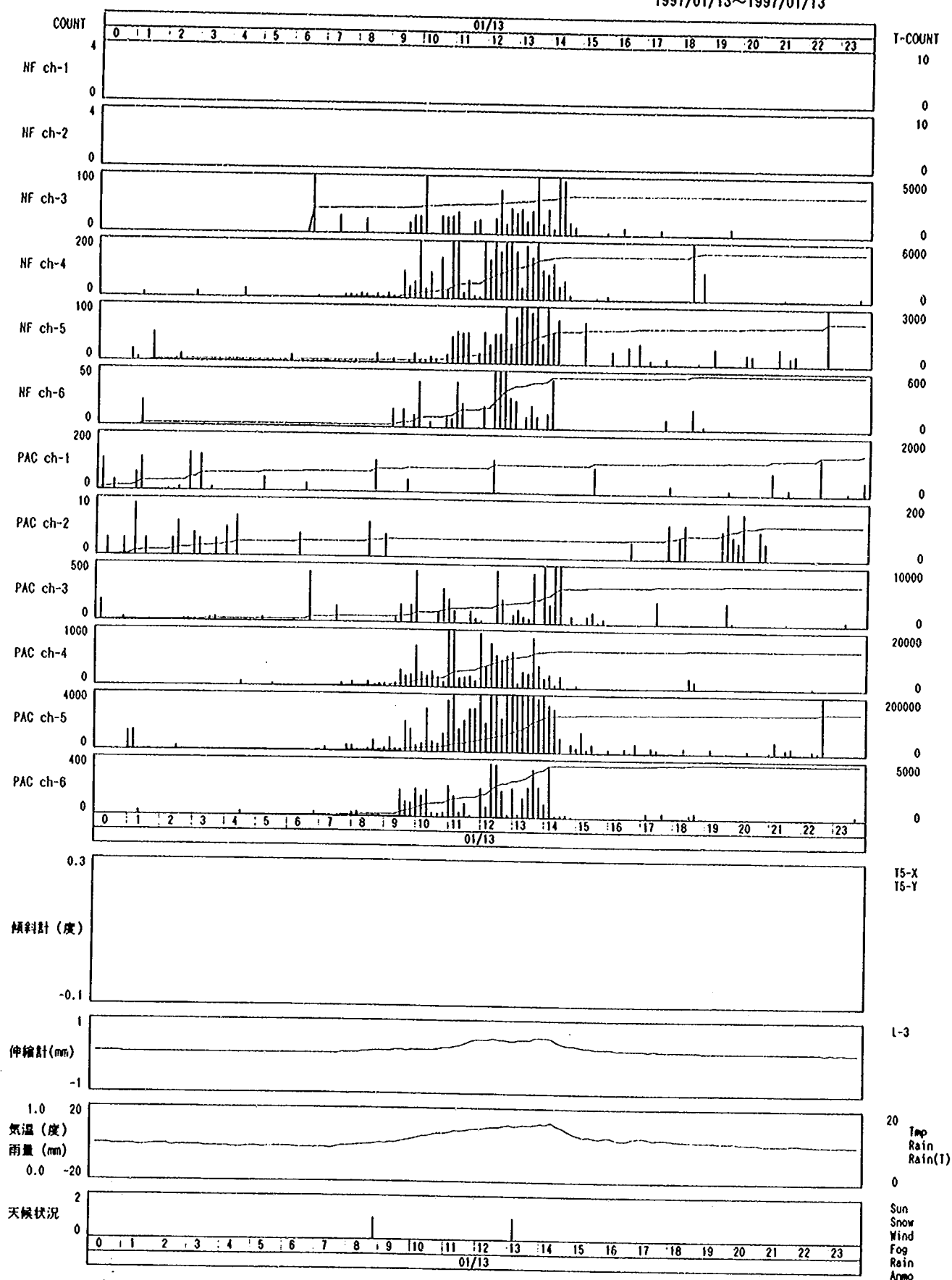


図-5.2.15 温度変化による AE の経時変化

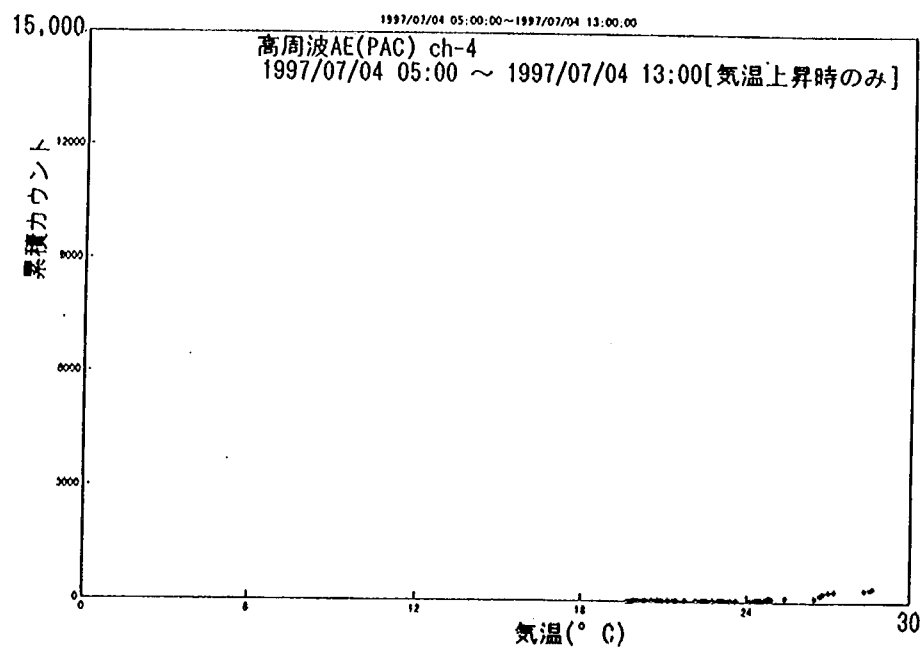
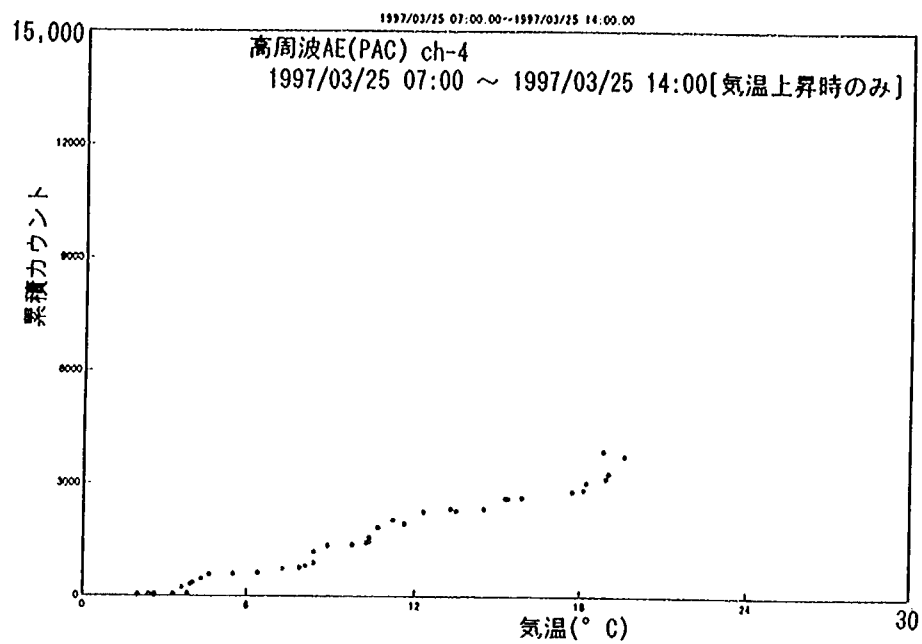
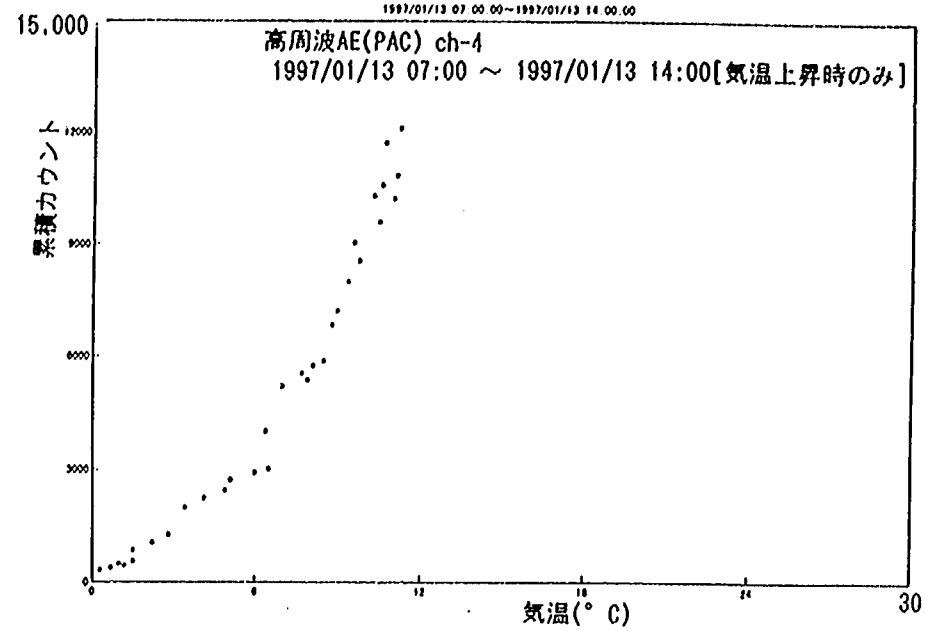


図-5.2.16 気温(上昇時)と累積カウントの関係

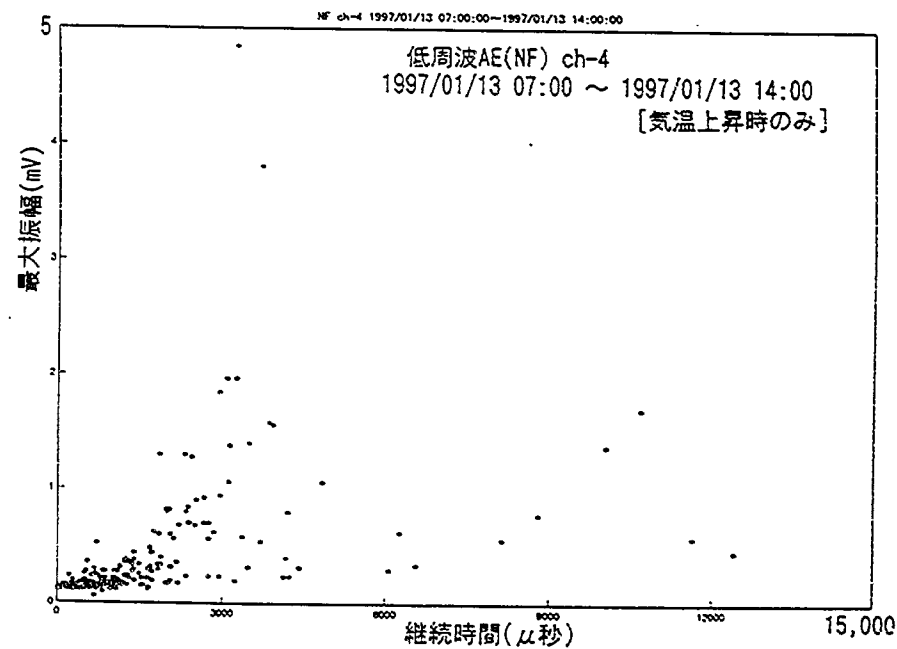
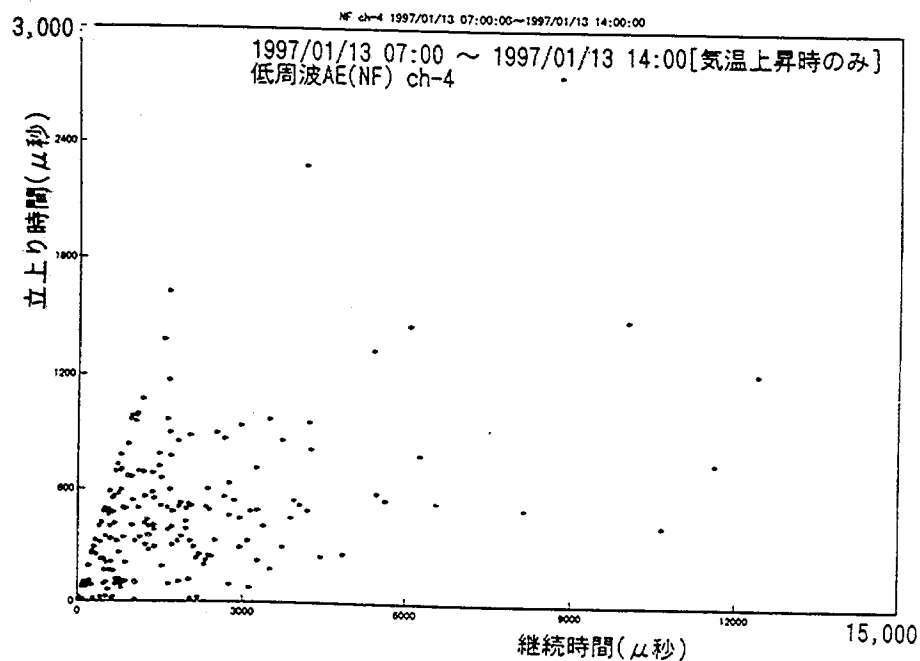
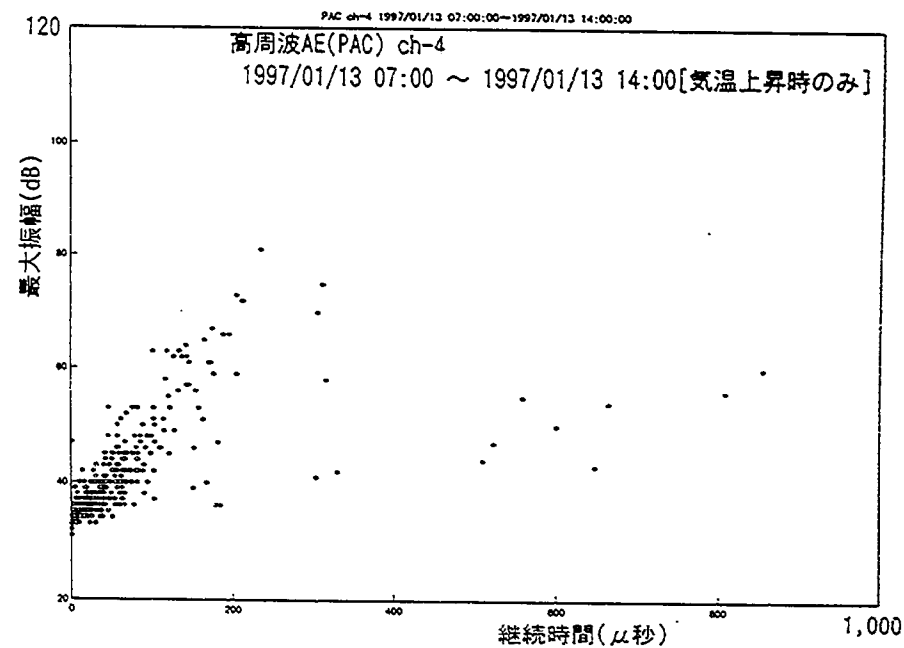
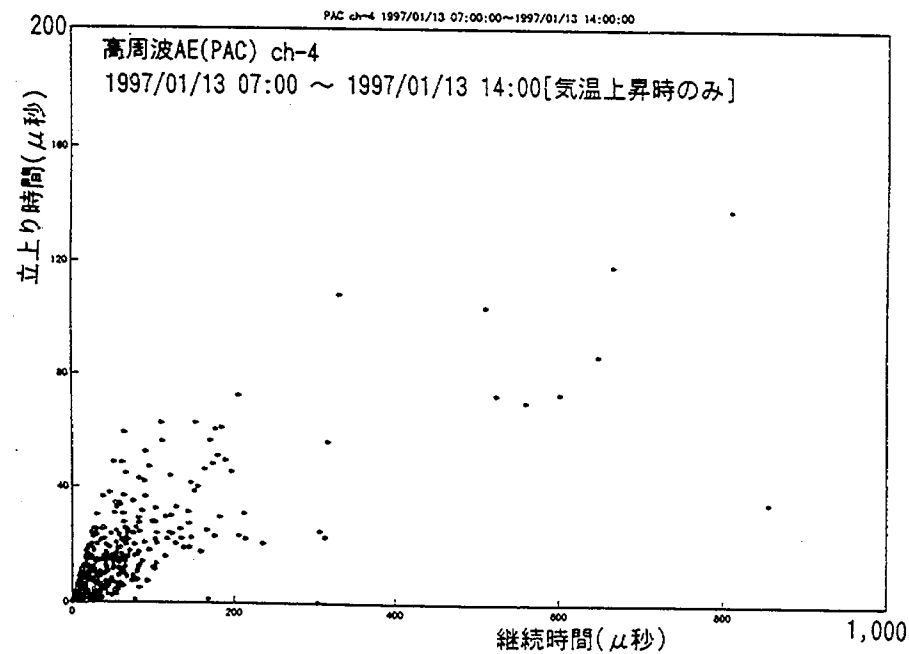


図-5.2.17 気温上昇時の AE パラメータ

このように、表面設置と表面削孔により設置された AE センサには、周波数に関係なく AE 発生数に明瞭な温度依存性が確認されたが、傾斜計及び変位計の挙動の項でも記述したように、これらのデータにも温度依存性が存在している。このようなことから、気温－傾斜計の関係と気温－変位計の関係について、その依存性がどの程度あるかについて検討してみた。その結果、傾斜計の場合では、冬期・夏期ともに明瞭な温度依存性が存在すること、特に傾斜計の X 軸(山・谷方向)では、AE 発生数の温度依存性と同じ傾向を示していることが判明した。一方、変位計の場合には、傾斜計と同様に冬期・夏期ともに明瞭な温度依存性が存在するが、気温の絶対値によって、温度依存性の傾斜が若干変化する傾向を示している。

3) その他の気象要因による AE の発生状況

岩盤の破壊や地震などの直接的な弾性波の発生または、降雨、日射以外の気象条件による AE 信号の発生以外では、降雪、強風または人為的な振動(交通車輛、工事振動等)などの要素が AE の発生源として考えられる。ここでは上に示した各項目のうち、表-5.2.7 に示した AE の発生について整理し、それぞれの条件下で発生する AE の特徴について検討を行った。

表-5.2.7 検討に用いたデータ

データ名称	測定日
降雪時	1997.1.3
強風時	1997.3.1
静穏時	1997.2.14
低温時(降雪なし)	1997.1.21

各気象条件下のチャンネル別のヒット数を図-5.2.18(a, b)に示した。これらの図と時系列データをもとにし、AE の発生パターンに着目して、発生数と信号の発生するチャンネルについてまとめたものが表-5.2.8 である。

表-5.2.8 時系列的データの特徴

	a. ランダム・非同期 低振幅信号	b. 同期 高振幅信号	高周波信号卓越 チャンネル	低周波信号卓越チャ ンネル
降雪時	多い	多い	ch-5, ch-4	ch-4
強風時	少ない	ある	(ch-4)	(ch-4)
低温時	多い	多い	ch-4, ch-5	ch-4
静穏時	少ない	ない	(ch-4)	(ch-4)

*ch-4: 表面削孔設置、ch-5: 表面設置、(ch-4): 絶対量が少ない場合

こうした検討結果から、降雪時には、雪片がセンサやその周辺地盤に接触した時点の振動が表面に設置したセンサで検出されていることが推測されるが、降雪のない低温時でも同じ ch-5 で AE が多く発生していることから、必ずしも雪片による振動が要因であるとは限らないものと考えられる。

また、図-5.2.18 から、低周波 AE は ch-4 において降雪時の発生数が低温時のそれを大きく上回っており、降雪によって低周波 AE が頻発していることが示された。なお、上記の気象条件によるカウント/継続時間および最大振幅値分布の差はあまり認められなかった。

以上のように、降雪時、強風時の AE 発生信号について、静穏時および低温時との比較で検討を行ったが、時系列的な変化やカウント、継続時間、最大振幅値などにそれぞれの気象条件に特徴的な傾向は認められなかった。この要因としては、各気象条件による AE は他の要因による信号(ノイズ)に埋もれていることが考えられる。例えば、降雪に関しては、雪片がセンサやその近傍に落下するときの振動に加えて、融雪による表面の湿度や地

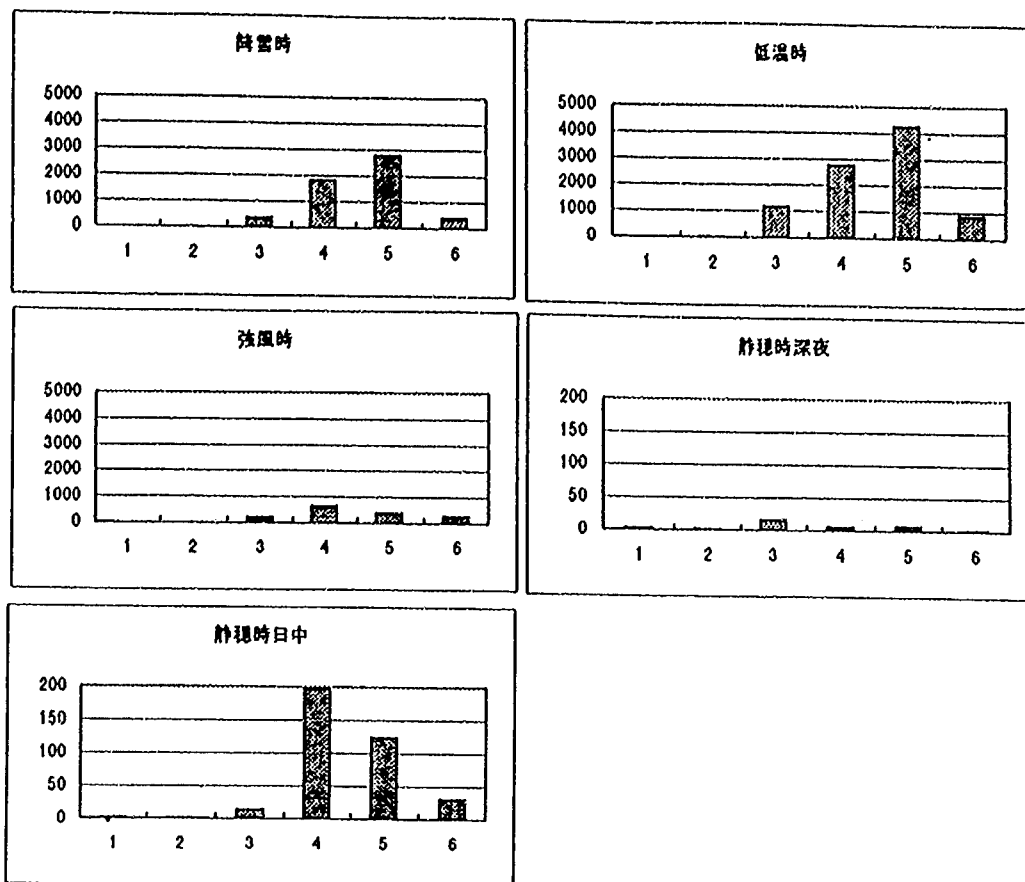


図-5.2.18(a) AE 発生数のまとめ (高周波 AE)

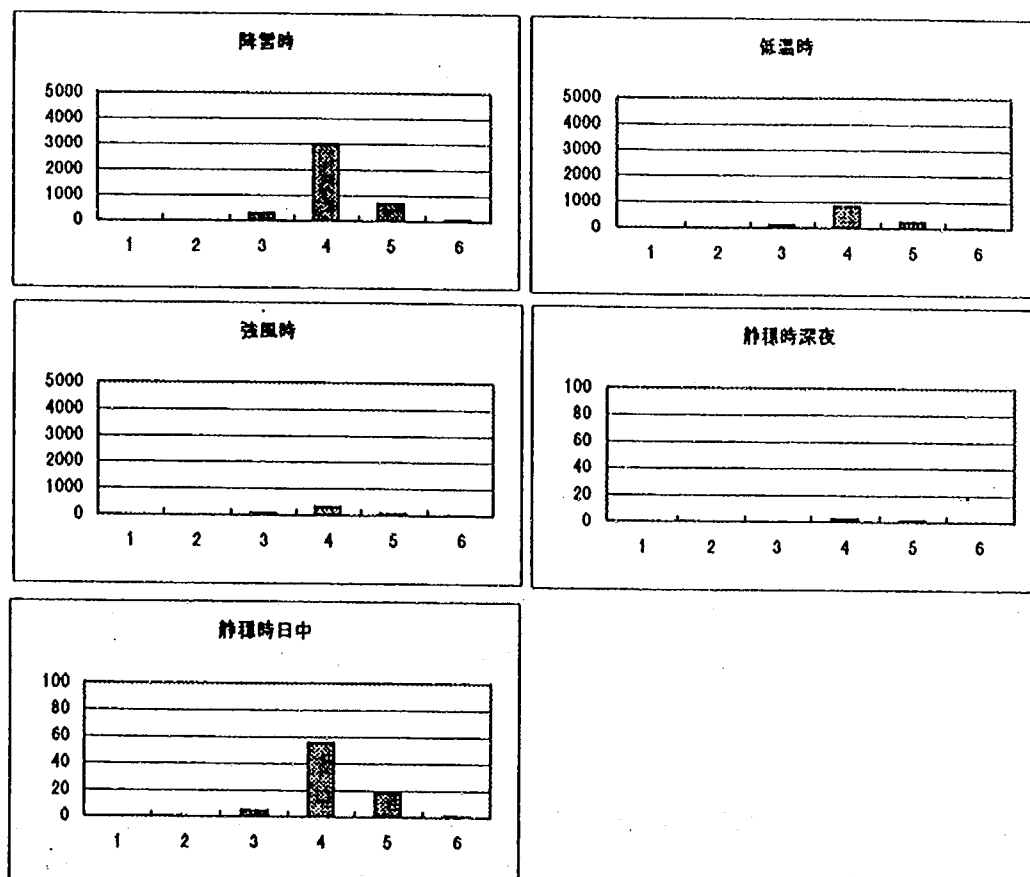


図-5.2.18(b) AE 発生数のまとめ (低周波 AE)

下水位の変動や気温の変化による要因も大きいものと考えられる。また、樹木等に積もった雪の落下時の振動（低周波振動と考えられる）についても AE 信号として計測されている可能性がある。一方、強風時の樹木の振動についても、周辺部の樹林全体が振動源となることや砂塵等の飛散による振動も考えられる。

このように、降雪や強風のみについても、その現象に伴って発生する AE は多様なものが考えられ、必ずしも気象条件特有の明確な AE 信号として抽出されない可能性がある。

（３）地震

長期計測を開始してほぼ１ヶ月が経過した 1996 年 12 月 29 日 10 時 29 分に、現地周辺を震源とする地震が発生した。マグニチュードは 5.5 で、日光市の震度は 5 弱、華嚴の滝では 2m×3m×1m の岩盤が崩落する被害が発生している。29 日の 08 時～12 時に発生した AE の状況を図-5.2.19 に示した（低周波 AE のみ）。この図によると、10 時 29 分を含む 09 時前後から低周波 AE、傾斜計と変位計に変化が表れているが、前述のようにこれらは全て温度（気温）の影響であると思われる。また、ch-3 や ch-4 では、10 時 30 分頃から低周波 AE が増加しているが、それと同様の傾向が他の時刻にも検出されており、この記録からだけでは地震時の AE であるとは断言できない。したがって、もし地震の振動が観測されていた場合でも、極めて微弱なものであって、温度によるノイズの中に埋もれてしまった可能性がある。

（４）電気ノイズの AE 計測への影響

１）高周波センサの電氣的雑音による信号発生状況

電気ノイズによる検出信号の特徴を調査するため、雨、風、雪など気象条件の影響を全く受けないように、計測小屋に参照用 AE センサをゴム粘土で保護して設置した。このセンサで検出される AE 信号は、気候の変動など外部雑音の影響はほとんど受けず、その大部分は電気ノイズによるものと考えることができる。

図-5.2.20 は、1997 年 12 月 10 日～1998 年 1 月 24 日の計測において、高周波参照用センサ(ch-1) で検出された AE 信号の解析結果である。参照用センサ(ch-1)で検出されたヒットの総数は表面に設置されているセンサ(ch-3、ch-5)のその約 2.2%以下であった。ここで、図番-4 の 最大振幅値－継続時間の相関図を見ると、最大振幅値 32～70dB、継続時間 2000μ秒以下の領域で、明らかに特徴的な集中分布が観察される。このことから、実際に岩盤に設置した高周波センサにおいてこの特徴を持つ信号を除去することにより、電気ノイズの影響を受けない AE 検出信号の解析を行えるものと考えられる。

２）低周波センサの電氣的雑音による信号発生状況

今回の長期計測時に発生した電気ノイズは大きく、次の３点が考えられる。すなわち、蛍光灯などによるもの、ボーリング孔内のウェーブガイドがその要因となったものおよびアースに関するものである。以下にこの３点について発生状況をまとめる。

a. 蛍光灯による電気ノイズ

一般に電氣的ノイズは、インパルス状で持続時間が短く、周波数範囲が広いとされている。また、き裂の発生に伴う AE や雨風など、機械的なノイズが特定のセンサにのみ強調されるのに対して、電氣的なノイズは全チャネルに同時に発生する。実際の測定データでは計測小屋の蛍光灯の点灯・消灯時にこうしたデータが顕著に発生

日光稲荷川 AE 計測結果

1996/12/29~1996/12/29

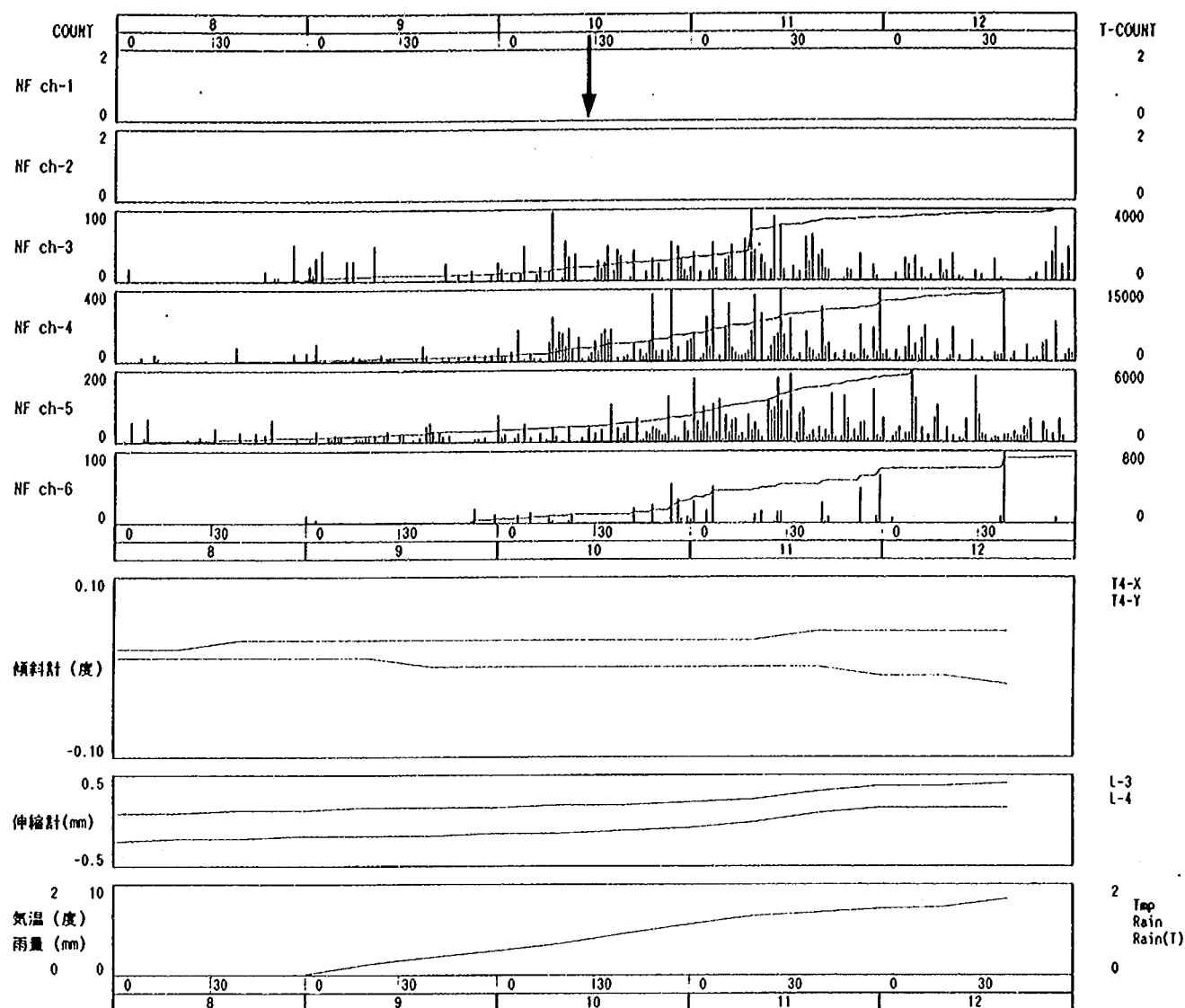


図-5.2.19 地震時 (1996 年 12 月 29 日) の状況

した。

b. ウェーブガイドが関連した電気ノイズ

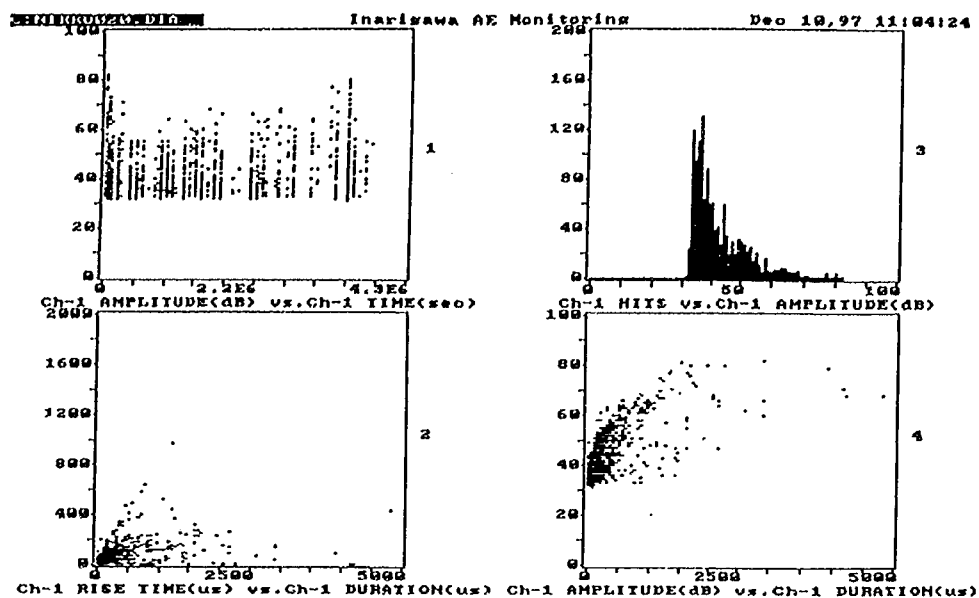
2m のウェーブガイドの両端に取付けられ地中に埋設された ch-1 と ch-2 はノイズレベルが高く、しきい値を高くせざるを得なかった。これらのノイズが発生した理由には以下の 2 点が考えられる。

- ① 2 つのセンサがループを形成していたため、電磁誘導を拾いやすい状況となった。
- ② ウェーブガイドの長さが他のチャンネルより長く、かつ地中深く埋めたためにセンサ部での接地が完全となり、グラウンドループが生じた。

このノイズに対しては、今回の計測では、非絶縁センサをそのまま使用してしまったことが大きな原因であると考えられる。

c. 無停電電源から接地 (アース) を経由したノイズ

1998 年 1 月 30 日から 2 月 13 日までの 14 日間に、ch-3~ch-6 で大量のノイズが検出された。これは、観測小屋の移設に伴い、配線のやり直しを行った際のアースの接続が適当でなかったことによると思われる。すなわち無停電電源のノイズが接地回路を介して受信されてしまったものと考えられる。



左上：最大振幅値の履歴

右上：最大振幅値分布

左下：立上り時間—継続時間

右下：最大振幅値—継続時間

図-5. 2. 20 高周波参照用センサ (ch-1) で検出された AE 信号の解析結果

5.3 人工崩壊実験

岩盤崩壊時のAEを計測するために、冬季の低温時に凍結融解を促進するためにき裂への注水を行ったが、十分な効果が得られなかったことから、以下に示す油圧ジャッキによる崩壊実験および破碎剤を用いた崩壊実験を実施した。

5.3.1 油圧ジャッキによる人工崩壊実験

(1) 対象岩塊と実験方法の選定

ジャッキによる破壊実験場所の選定においては、ジャッキ圧で崩壊が発生し得る岩塊を選定する必要がある。こうした観点から、岩盤状況の目視およびセンサ設置工事を行った際の打診音から、図-5.3.1に示すNo.1岩塊は完全に浮いていると推定された。こうしたことからNo.1岩塊は比較的容易に人工手に崩壊させることが可能と考えられ、この岩塊を崩壊実験の対象とすることとした。

崩壊実験に先立って実施した事前調査の測量結果(図-5.3.1)を基にして、表-5.3.1に示すように崩壊方法の比較検討を行った結果、油圧ジャッキ(商品名ウエッジラム)で崩壊可能と判断した。

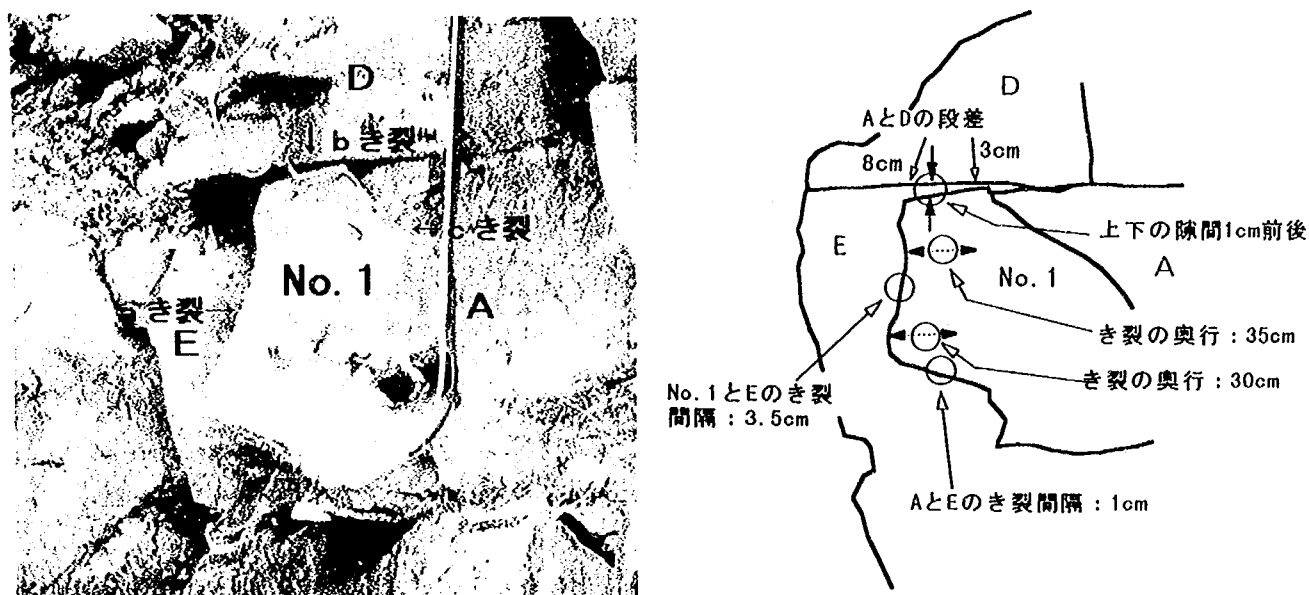


図-5.3.1 No.1岩塊の状況

表-5.3.1 人工崩壊実験の比較検討結果

実験方法	主な特徴	主な課題点	採否
油圧ジャッキ (くさび式)	・A岩塊とは右側の1面のみで接合している ので、破壊力は比較的少なくて済む	・No.1とその上部岩塊との隙間が1cm程度 のため、先端を確実に挿入する必要がある	○
静的破碎剤 (き裂充てん)		・No.1岩塊の周辺は空間が多すぎるの で、静的破碎剤の充てんは難しい	×
静的破碎剤 (削孔充てん)	・確実に崩壊させられる	・掘削機の稼働が困難(ロープ懸垂は計 器に損傷を与える)	×

(2) 使用した油圧システムと油圧ジャッキの固定方法

今回の人工崩壊実験に使用した油圧ジャッキの概要を表-5.3.2に示した。また、油圧システムの構成を図-5.3.2に示す。

表-5.3.2 油圧ジャッキの概要

装置名	商品名(メーカー)	主な仕様	数量
油圧ジャッキ	ウエッジラムW-01型	最大出力 1ton(先端部) 4ton(基部)	15
油圧ポンプ	手動ポンプHP-5型	最大圧力 70MPa(700kgf/cm ²)	3
その他	高圧ゴムホース、分岐金具	最大圧力 70MPa(700kgf/cm ²)	3

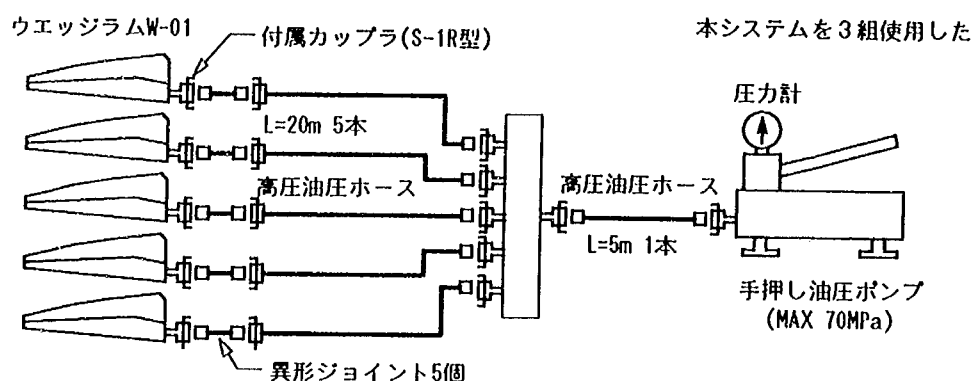


図-5.3.2 油圧ジャッキのシステム構成

油圧ジャッキには、図-5.3.3のように滑り止めの硬質ゴムを貼り付けた。また、固定方法は、き裂へ油圧ジャッキを強く押し込む方法を採用した。なお、安全のために油圧ジャッキには初期圧をかけなかった。写真-5.3.1～写真-5.3.2にそれらの油圧ジャッキシステムの概要と第1回実験時の設置状況を示した。

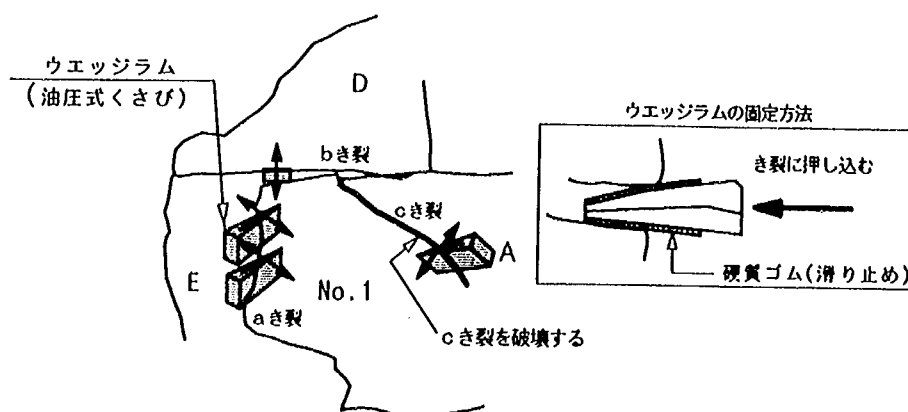
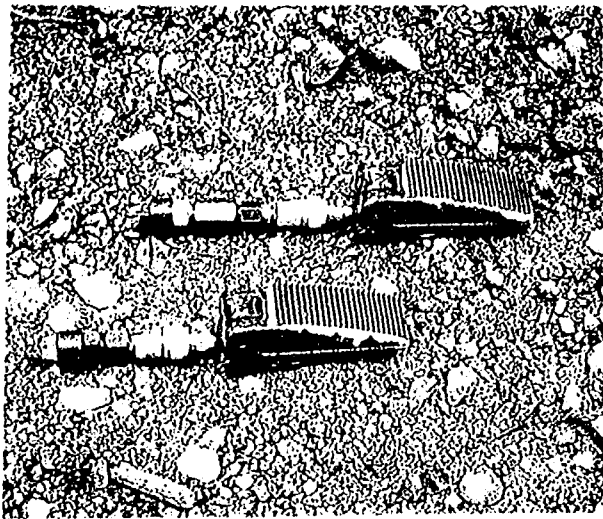
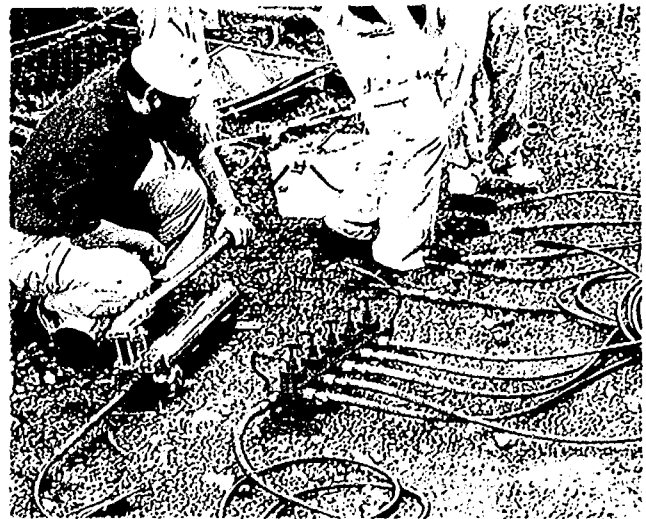


図-5.3.3 油圧ジャッキの設置方法



(a)油圧ジャッキ



(b)油圧ポンプシステム

写真-5.3.1 油圧ジャッキシステム



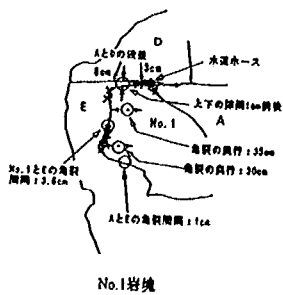
上端・左



上端



上端



左側面



左側面



写真-5.3.2 油圧ジャッキの設置状況 (第1回実験)

(3) 人工崩壊実験の概要

人工崩壊実験は1998年6月10日の午後に実施した。当初、図-5.3.3に示す[aき裂]に7台、[bき裂]に2台と[cき裂]に1台(計10台)油圧ジャッキを設置して実験を行ったところ、[bき裂]は閉塞し[cき裂]は拡大したが、岩塊自体の崩壊は発生しなかった。このため、[cき裂]に油圧ジャッキを3台設置し直して実験を再開した結果、No.1岩塊を崩壊することができた。

実験の条件は以下の通りである。

- ・油圧は、ポンプ吐出口の油圧計によって測定した。
- ・3台の油圧ポンプからの吐出圧力が同じになるよう、同調させて操作した。
- ・各実験時とも、原則として5MPa(50kgf/cm²)の段階加圧方式(2分毎)を採用した。

実験の詳細な時間的経緯を表-5.3.3に示す。

表-5.3.3 実験の経緯

実験回数	1回目			2回目		
設置状況	合計10台 ([aき裂]: 7台, [bき裂]: 2台, [cき裂]: 1台)			合計 3台 ([cき裂]: 3台)		
加圧回数	圧力(MPa)	開始	終了	圧力(MPa)	開始	終了
1	5.0	13:15:00	13:15:27	5.0	14:15:00	13:15:11
2	10.0	13:17:00	13:17:28	10.0	14:17:00	13:17:10
3	15.0	13:19:00	13:19:23	15.0	14:19:00	13:19:11
4	20.0	13:21:00	13:21:20	20.0	14:21:00	13:21:10
5	25.0	13:23:00	13:23:27	25.0	14:23:00	13:23:10
6	30.0	13:25:00	13:25:22	30.0	14:25:00	13:25:11
7	35.0	13:27:00	13:27:27	35.0	14:27:00	13:27:12
8	40.0	13:31:00	13:31:27	崩壊	14:27:47	
9	45.0	13:33:00	13:33:27			
10	50.0	13:35:00	13:35:29			
11	55.0	13:37:00	13:37:39			
12	60.0	13:39:00	13:39:39			
13	65.0	13:41:00	13:41:35			
14	70.0	13:43:00	13:43:32			
—	減圧開始	13:53:00				

注：第1回目の7段(35MPa)はAE発生数が減少気味のため4分間隔とした

(4) 人工崩壊実験時のAE計測

1) AEの発生概要

1998年6月10日に実施した崩壊実験時の計測結果を図-5.3.4にまとめた。この図はカウントを1分ごとに集計した結果である。この図と同様に、ヒットと最大振幅値についても整理したが、いずれもカウントと同様の傾向を示したことから、カウントでこれらのパラメータを代表させることができると考えられる。

なお、AE以外のデータについては、各グラフとも10分ごとの計測値である。また、13時54分～14時12分の間は、油圧ジャッキを再設置する作業が行われ、作業に伴うノイズが多量に発生したため、この間のAE発生状況については図化していない。

本集合図の最下段は、加圧時刻を示したものである。載荷を開始した時刻と除荷した時刻を「縦軸目盛り1」とし、通常の加圧時刻(2分間隔)を「縦軸目盛り2」として図化してある。さらに、崩壊時刻を同じく「縦軸目盛り3」と示し、それぞれを区別した。

AE発生の特徴を下記に略記する。

- ・低周波AE(NF)のch-5と高周波AE(PAC)のch-5は、いずれもジャッキへの加圧時にほぼ連動してAEが発生した。第1回実験時と第2回実験時を比較すると、第2回実験時の方が明瞭にAEが発生した。また、第1回実験時で13時39分以降は、AEの発生状況は極めて不明瞭であった。
- ・低周波AE(NF)のch-1とch-2、高周波AE(PAC)のch-2は、いずれもボーリング孔内に設置されている。これらのセンサは実験時には全くAEを検出していない(高周波AE(PAC)のch-1は参照用として別途設置されている)。
- ・低周波AE(NF)のch-3は、13時12分頃にわずかなAEを検出しているが、発生時刻が加圧時刻と異なるため実験とは無関係である。
- ・高周波AE(PAC)のch-3は、ほぼ等間隔で一定のAEが発生し続けている。その発生状況からみて、電氣的ノイズか降雨の影響と思われるが、このグラフからでは判然としない。いずれにしても、今回の実験とは無関係と思われる。
- ・その他のAEセンサについても、ジャッキへの加圧時に連動したAE発生は認められなかった。
- ・なお、斜面に設置した傾斜計や変位計などの挙動については後述する。

以上のことから、油圧ジャッキによる人工崩壊実験時に発生したAEを検出することができた箇所は、対象としたNo.1岩塊に最も近い低周波AE(NF)ch-5と高周波AE(PAC)のch-5のみであり、他の箇所に設置したAEセンサは、崩壊実験に伴うAEを検出することができなかった。

2) AEの発生状況(時間的推移)

図-5.3.5に示すような形式で第1回および第2回実験時に発生したNo.1岩塊の変化を、油圧ジャッキの載荷段階ごとにまとめた。この図には、以下に示す図、写真やグラフを含めた。

- ・岩塊の変動：傾斜と変位の変動量と方向。いずれも載荷直前の値を0とする。
- ・岩塊の写真：監視カメラの設置付近から撮影されたもの。
- ・AEの代表波形と周波数特性：NFch-5のみを表示した。
- ・AEの状況：NFとPACのch-5のみ。いずれも10秒ごとに集計したカウントとトータルカウントを1時間分に

日光稲荷川 AE計測結果

1998/06/10~1998/06/10

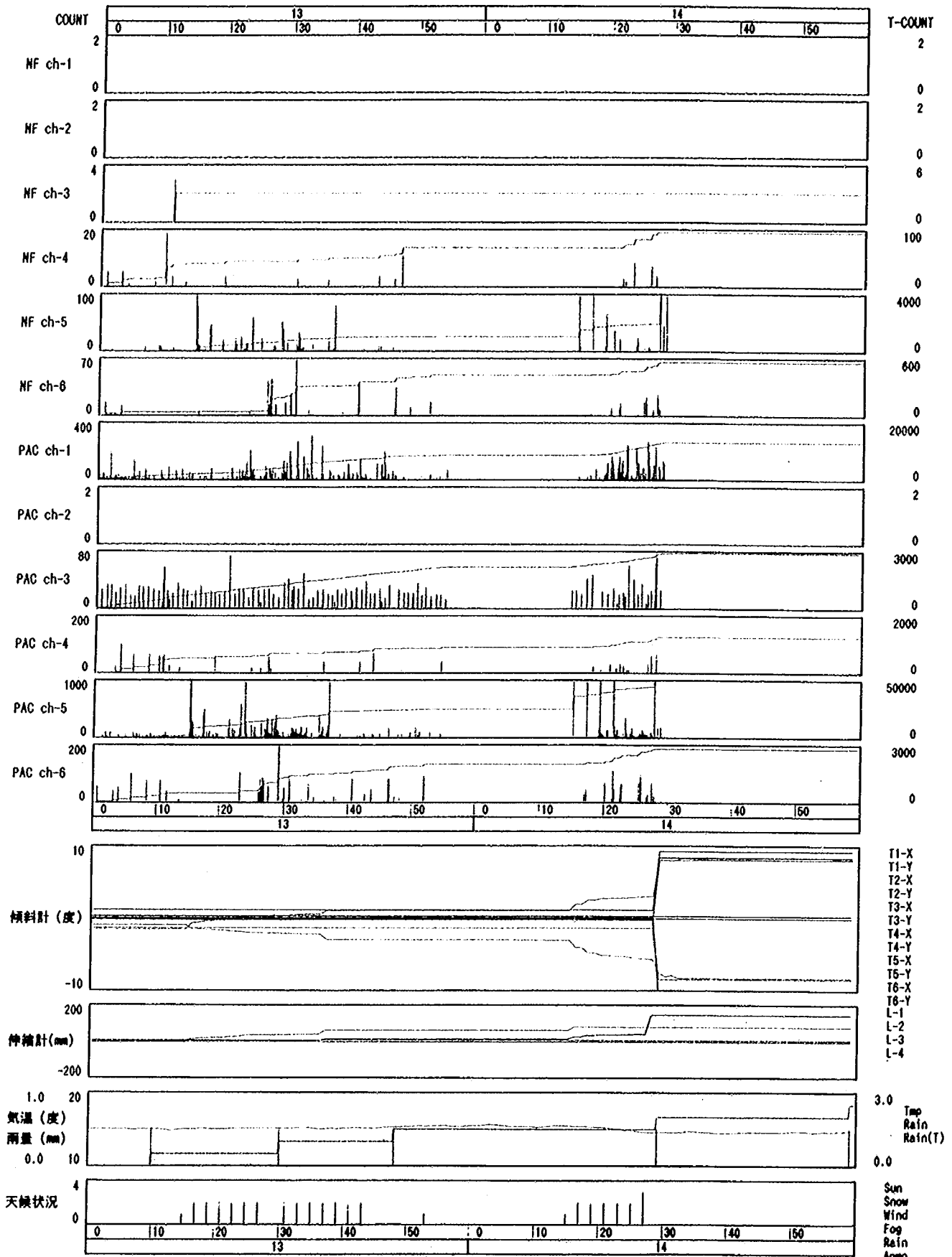
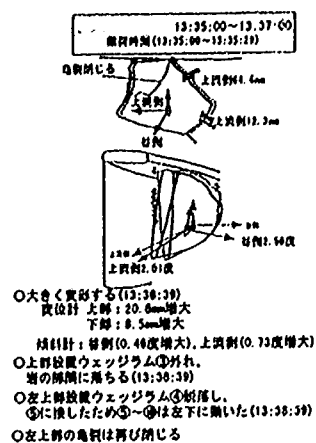


図-5.3.4 油圧ジャッキによる人工崩壊実験時のAE発生状況

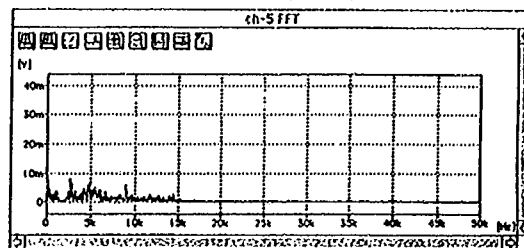
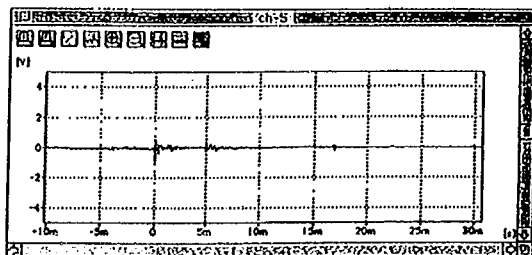
状況写真



岩塊の変動状況



低周波AE(NF) ch-5 の波形 NF ch-5 13:36:43 50.0MPa



低周波AE(ch-5)・高周波AE(ch-5), 地盤変位(傾斜・変位)の状況

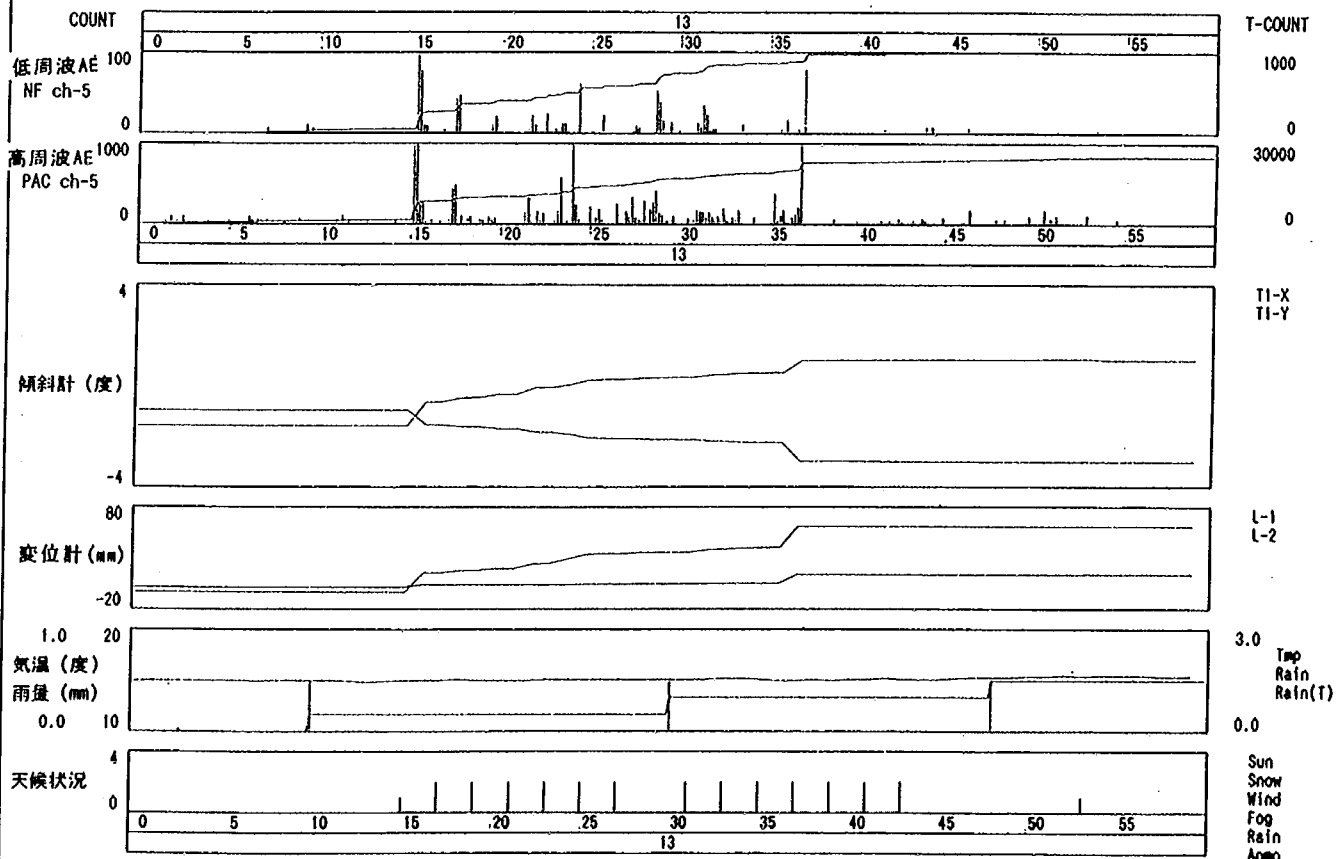
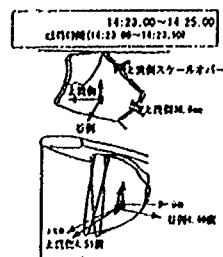


図-5.3.5(a) 油圧ジャッキによる人工崩壊実験の状況(第1回実験 載荷50.0MPa)

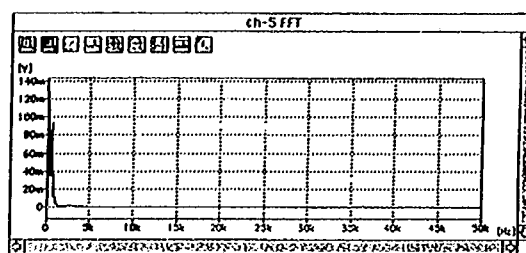
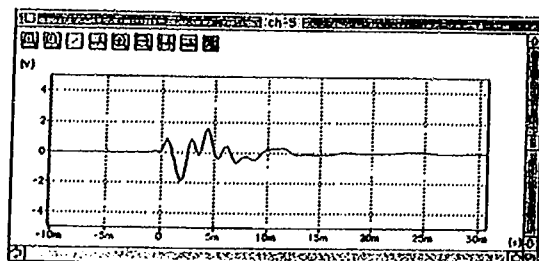
状況写真



岩塊の変動状況



低周波AE(NF) ch-5 の波形 NF ch-5 14:23:56 25.0 MPa



低周波AE(ch-5)・高周波AE(ch-5), 地盤変位(傾斜・変位)の状況

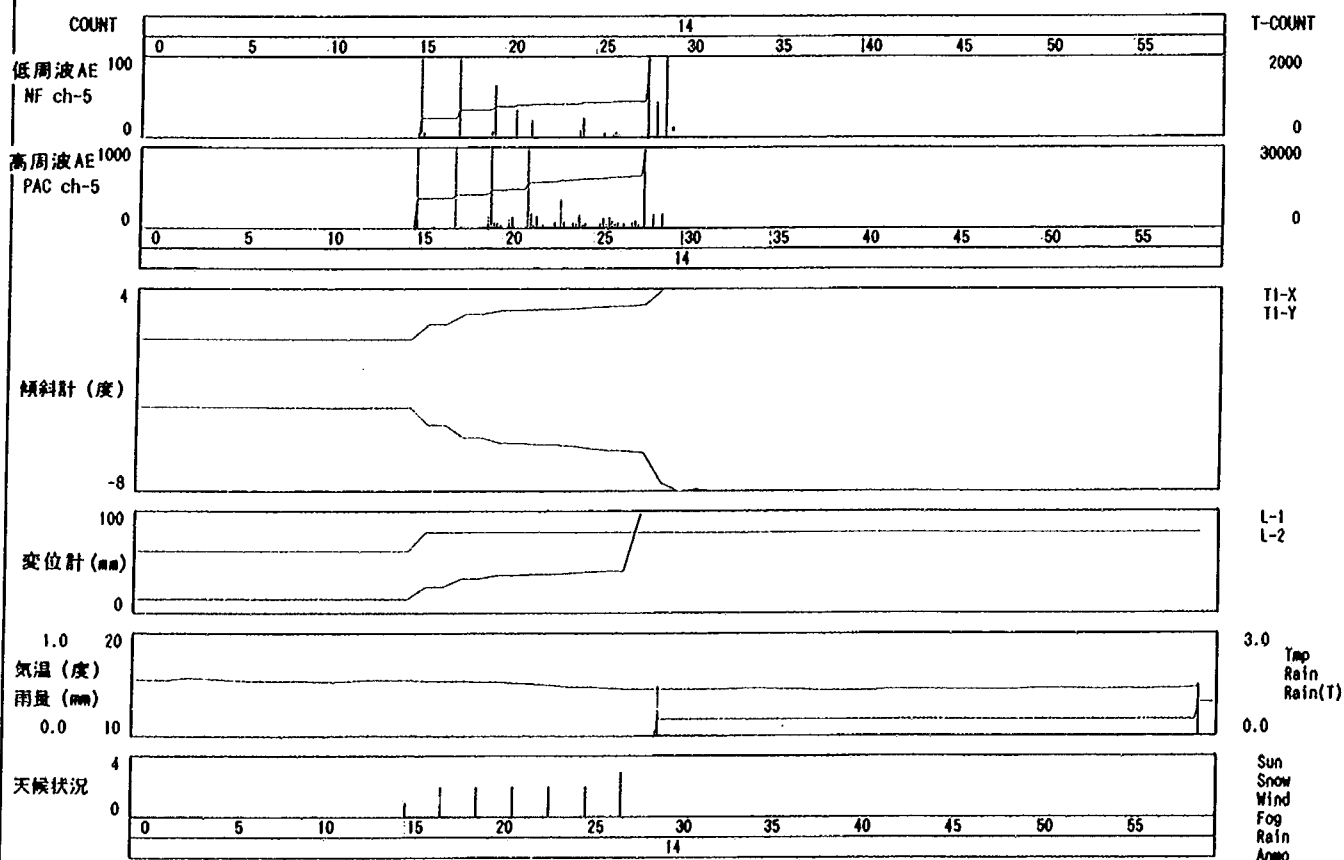
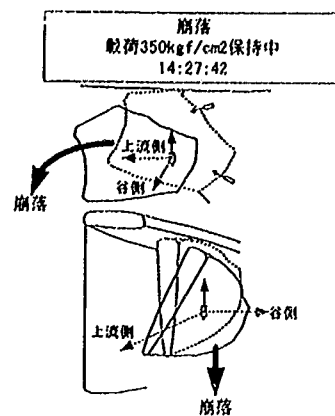


図-5.3.5(b) 油圧ジャッキによる人工崩壊実験の状況 (第2回実験 載荷25.0MPa)

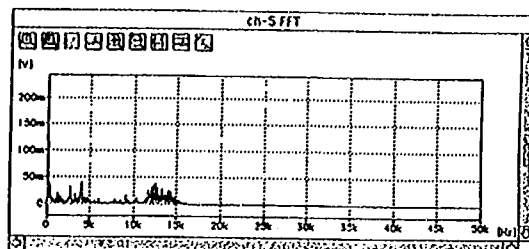
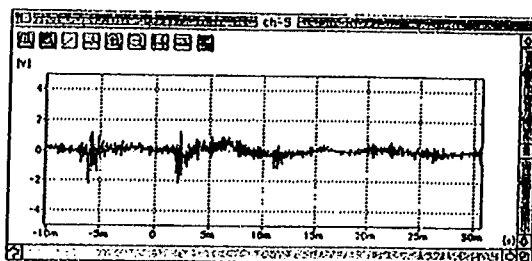
状況写真



岩塊の変動状況



低周波AE(NF) ch-5 の波形 NF ch-5 14:27:49 35.0 MPa



低周波AE(ch-5)・高周波AE(ch-5), 地盤変位(傾斜・変位)の状況

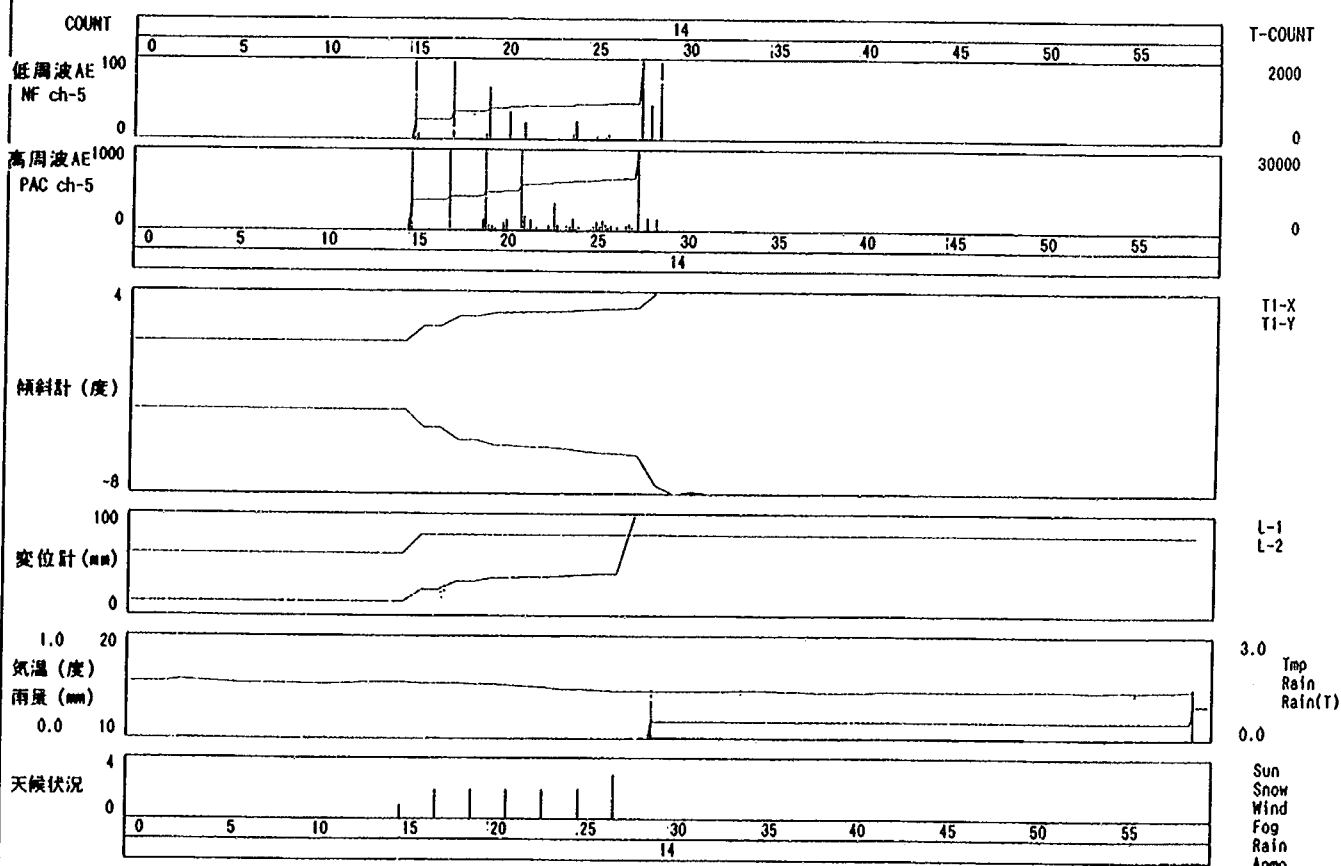


図-5.3.5(c) 油圧ジャッキによる人工崩壊実験の状況(第2回実験 崩壊: 載荷35.0MPa)

について表示した。

- ・傾斜計変化：T-1地点のX軸(+谷側傾斜、-山側傾斜)、T-1地点のY軸(+上流側傾斜、-下流側傾斜)を1時間分について表示した。
- ・変位計変化：I-1地点(No.1岩塊の[cき裂]上部)、I-2地点(No.1岩塊の[cき裂]下部)のみを表示した。
- ・気象状況：気温と雨量(0.5mmごとに計測)で1時間分を表示した。

なお、ここでは、第1回、第2回の代表的なデータと、岩塊が崩壊した時点のデータを図-5.3.5(a)～(c)に示した。

油圧ジャッキ載荷により、No.1岩塊自身やAEその他の変化状況は、以下のようまとめられる。

① 第1回実験時

- ・各載荷に対応する形でAEが発生したが、最初の載荷時での発生数が最も多かった。岩盤の変位(傾斜計と変位計)もほぼ同様の傾向が見られた。
- ・載荷の繰り返し回数が増えるほど、AE発生数は次第に減少する傾向が見られ、岩盤の変位もほぼ同様の傾向を示している。
- ・13時21分の載荷時には、No.1岩塊の[aき裂]のほぼ中央から[bき裂]と[cき裂]の交差部分に向かうき裂が発生し、その後の載荷に伴って拡大した(13時35分まで)。
- ・13時35分の載荷時においては、載荷開始直後から1分30秒が経過した時間(13時36分30秒：13時27分の載荷直前)からAEの発生数が急増した。岩盤の変位も同様に傾斜計と変位計に大きな変化を記録している。VTRの観測結果によると、13時21分に発生したき裂が閉塞しており、[bき裂]も同様にほぼ閉塞したものと思われる。したがって、この時刻に、No.1岩塊の右下部に発生したき裂が完全に開口し、周囲の岩盤から切り離されたものと思われる(変位計の結果では、載荷の開始と共にき裂が生じていた)。
- ・それ以後の載荷においては、AEの発生や岩盤の変位(傾斜計と変位計)も計測されていないため、油圧ジャッキの全てが最大ストローク達したものと考えられる。
- ・波形の周波数特性は、得られた波形によって多少異なっているものの、4～5kHz、8～10kHz、13～15kHzの3ヶ所にピークを示す傾向にある。ただし、ピークの高さは波形によって異なる。

② 第2回実験時

- ・各載荷時において、加圧している時間には比較的明瞭なAEの発生を検出したが、繰り返し回数の増加に伴い、発生数の絶対値は減少する傾向にあった。
- ・一方、加圧を中止し圧力を一定に保持している時間については、AEの発生数はほとんどないか極めて少なかった。
- ・岩盤の変位(傾斜計と変位計)の動きは、AEの累積値の変化に相似である。
- ・14時23分の載荷では、加圧中ではなく圧力保持中に、わずかではあるがAEを検出するようになった(低周波(NF)AEと高周波(PAC)の発生状況は若干異なっている)。
- ・14時25分の載荷時では、その傾向がさらに明確になり、発生時間も比較的長時間になった。
- ・14時27分の載荷時では、圧力保持中の14時27分42秒にNo.1岩塊は崩落した。この際に発生したAE発生数は、第2回実験時において最も多かった。

- ・低周波AE(NFch-5)の波形によると、継続時間が2～5m秒で、R/T比が50%以下と思われる波形が多い。
- ・波形の周波数特性は、第1回実験時と同じく、4～5kHz、8～10kHz、13～15kHzの3ヶ所にピークを示す傾向にある(ピークの高さは波形によって異なる)。

3) AEの発生状況(パラメータ)

実験時によって得られたAEのパラメータを以下の条件に従って集計した。その結果を、図-5.3.6～図-5.3.13に示す。

- ・使用チャンネル：低周波AE(ch-5)、高周波AE(ch-5)
 - ・時間区分：第1回実験時、油圧ジャッキ再設置時、第2回実験時
 - ・種類：継続時間 - 立上り時間、継続時間 - カウント、継続時間 - 最大振幅値、継続時間 - エネルギー
- ここで、エネルギーは、継続時間 × 最大振幅値 として計算した結果である。

① 低周波AE(NF、ch-5)

- ・第1回実験時では継続時間の最大は4000μ秒以下であったが、第2回実験時は9000μ秒前後まで延びた。後者は参考までに計測した作業時と比較的類似している。
- ・継続時間－立上り時間の関係から見た場合、第2回実験時のAEは継続時間に関わりなく、1500μ秒以下にほぼ収まっている。
- ・継続時間－カウントの関係には計測の区分による差はほとんどない。
- ・継続時間－最大振幅値の関係から見た場合、第2回実験時では継続時間が2,000μ秒以下の短いAEで、1mVを超える大きな最大振幅値を持つAEが検出された。
- ・この関係は、継続時間－エネルギーの関係にも見られる。

② 高周波AE(PAC、ch-5)の特徴

- ・第1回実験時に比べ、第2回実験時に検出されたAEの継続時間は長いものが多い。
- ・継続時間－カウントの関係には、計測の区分による差はほとんどないようである。
- ・継続時間－最大振幅値の関係から見た場合、第2回実験時では、60dBを超える大きな最大振幅値を持つAEが検出された。この傾向は、設置作業時の特性に類似している。
- ・継続時間－エネルギーの関係にも、継続時間－最大振幅値の関係とほぼ同様の関係が見られる。

4) 実験結果のまとめ

本実験の結果は以下のようにまとめられる。

- ・油圧ジャッキを使用した人工崩壊実験により、No.1岩塊を崩落させることに成功した。
- ・人工崩壊に伴うAEは、No.1岩塊に最も近く設置したAEセンサ(低周波、高周波ともch-5)のみで検出され、その他のAEセンサでは全く検出されなかったか、ノイズレベル以下であった。この結果より、正確な距離は不明ではあるが、AEの検出はおおむね1～3m以内に限定されるようである。
- ・油圧ジャッキに対し段階的に油圧を加えて岩塊に載荷した結果、載荷した直後あるいはしばらく経った後(1～2分後)に突発的なAEが発生した。
- ・載荷回数を繰り返すと、AE発生数は減少する傾向にあった。
- ・第1回実験時の13時35分(載加圧5MPa)には、それまで徐々に開いていたNo.1岩塊右下のき裂が完全に開口し、

周囲の岩盤から切り離されたものと思われるが崩落はなかった。第1回実験時では、それ以後のAE発生はなかったため、この時に油圧ジャッキは最大ストロークに達したと思われる。

- ・第1回実験時と第2回実験時のAEパラメータを比較すると、次のようにまとめられる。

継続時間 : 第2回実験時の方が2倍程度長くなった

最大振幅値 : 第2回実験時では、短い継続時間の部分に大きな最大振幅値とエネルギーが検出された。このことは、第1回実験時(13時35分まで)では、主としてき裂の進展に伴うAE、第2回実験時は主としてき裂接触面の摩擦によるAEが発生したと考えられる。しかし、AEの波形と周波数特性には特に明瞭な変化はないようであり、これ以上のことは不明である。

- ・ヒットやカウントなどAEパラメータの累積値の時間変化と、傾斜計および変位計の時間変化は、1分単位で見ると限り極めて類似した傾向を示している。対象岩塊を含む対象岩盤には大きな開口き裂が多量に分布しているため、油圧ジャッキへの加圧と同時にこれらのき裂が進展し、対象岩塊が移動した可能性が考えられる。

- ・再設置作業時と第2回実験時のAEパラメータには大きな差がないことから、特に人工ノイズの除去方法については、今後解決すべき課題も残されている。

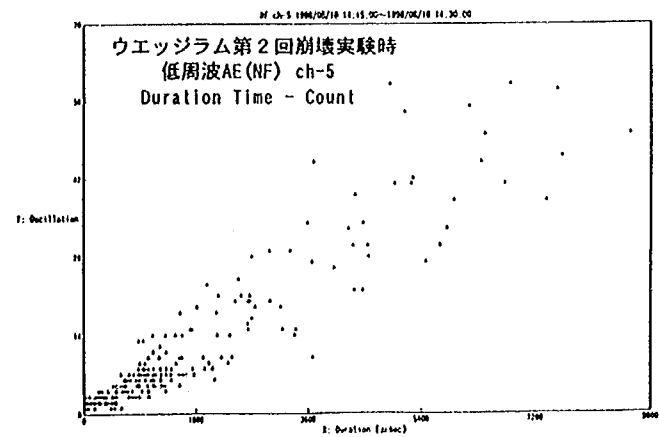
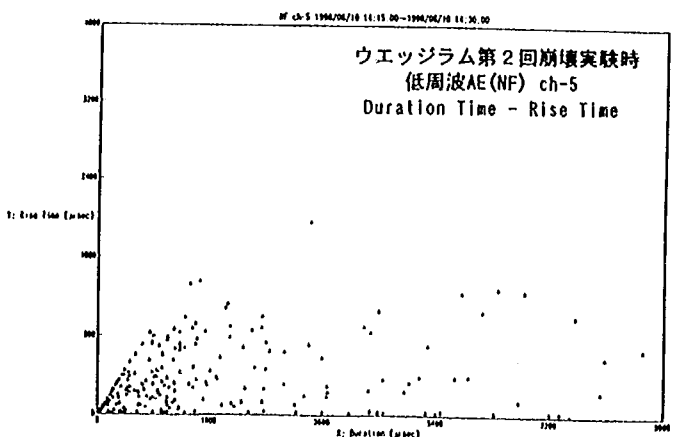
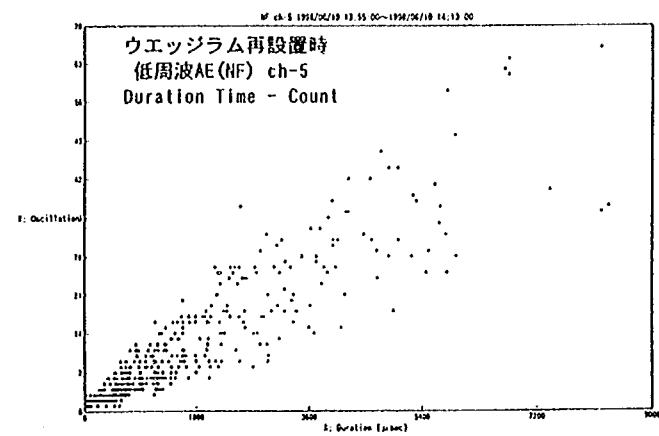
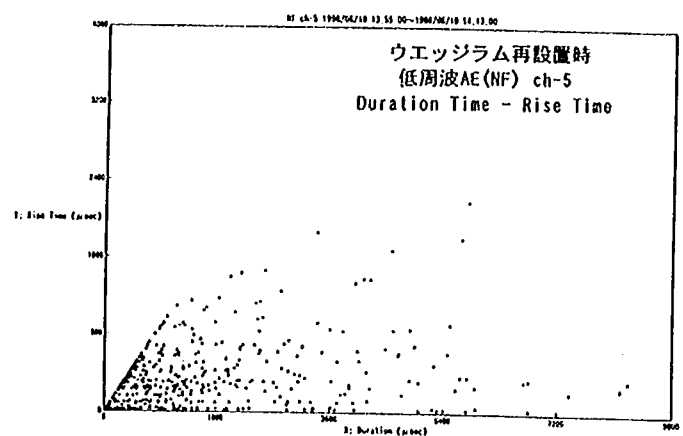
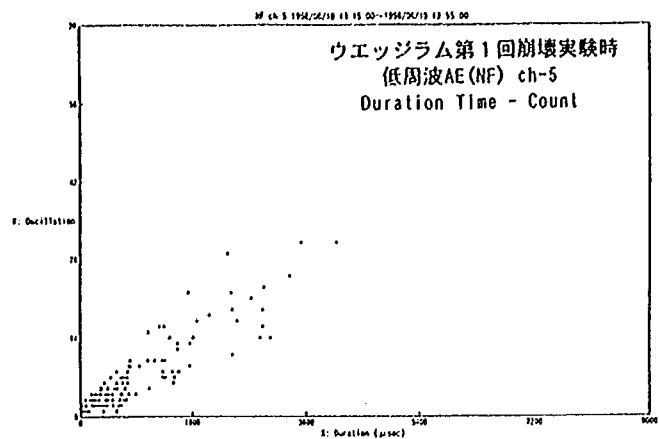
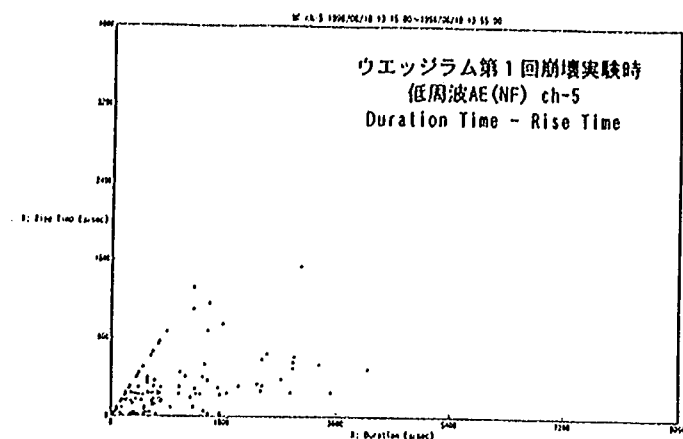


図-5.3.6 油圧ジャッキによる人工崩壊実験時の
AEパラメータ (低周波：継続時間-立上り時間)

図-5.3.7 油圧ジャッキによる人工崩壊実験時の
AEパラメータ (低周波：継続時間-カウント)

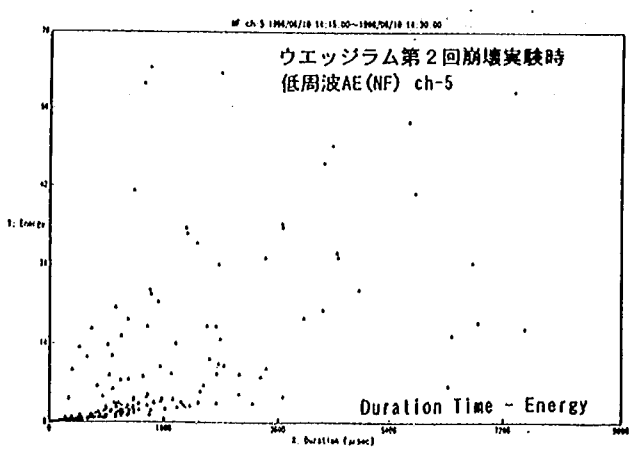
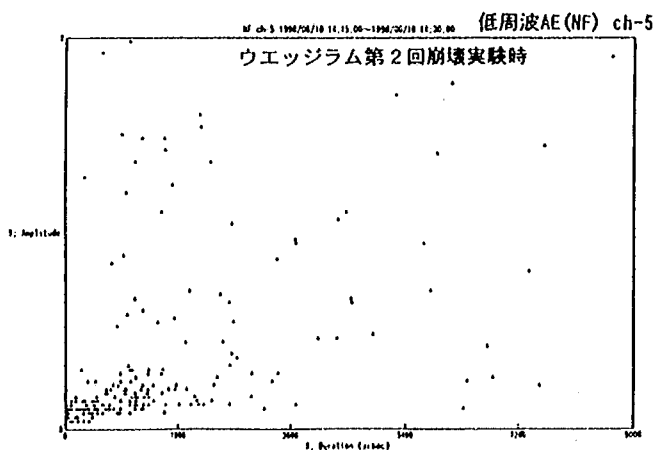
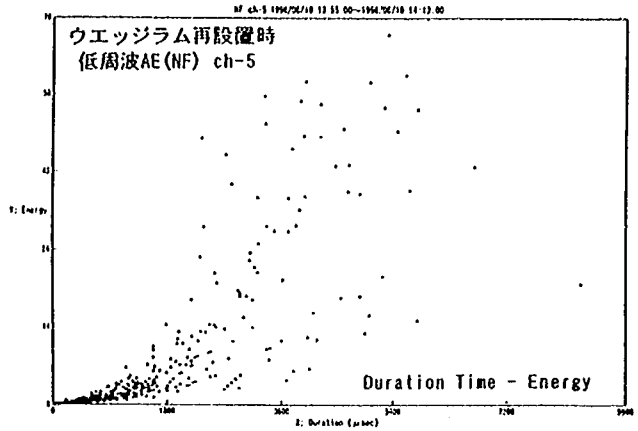
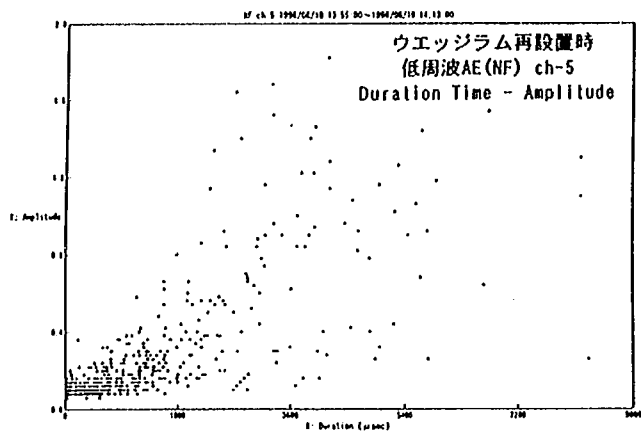
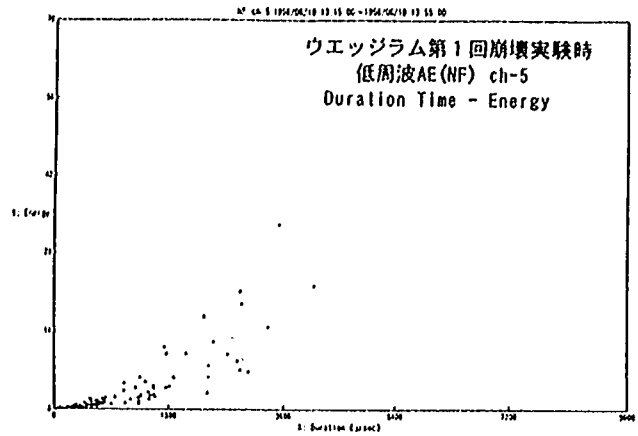
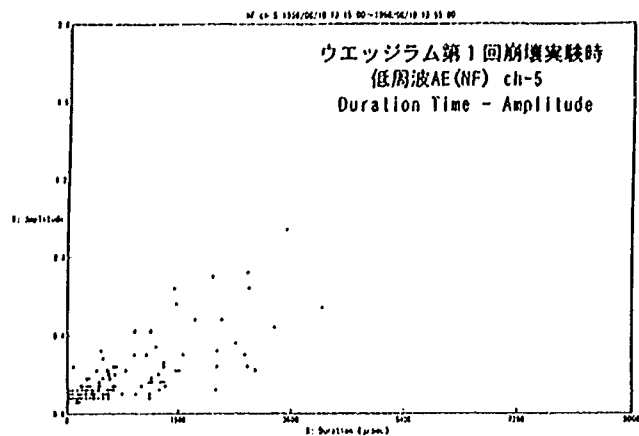


図-5.3.8 油圧ジャッキによる人工崩壊実験時の
AEパラメータ (低周波、継続時間-最大振幅値)

図-5.3.9 油圧ジャッキによる人工崩壊実験時の
AEパラメータ (低周波、継続時間-エネルギー)

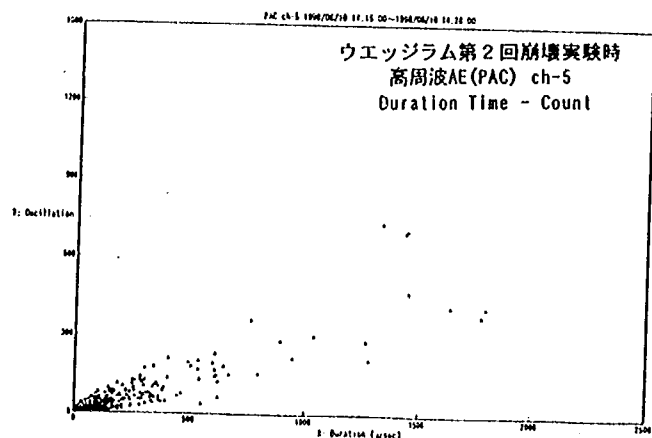
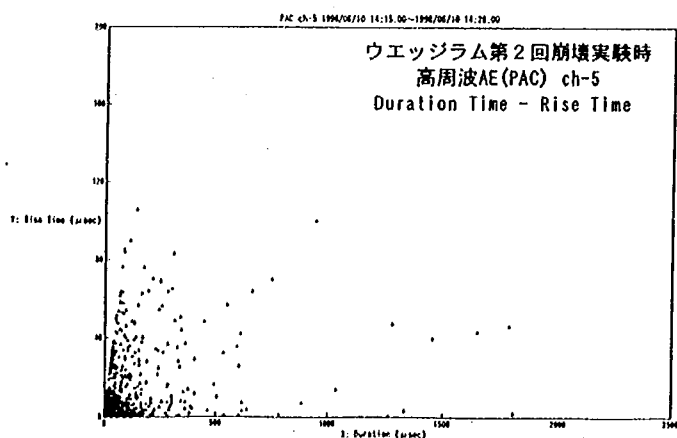
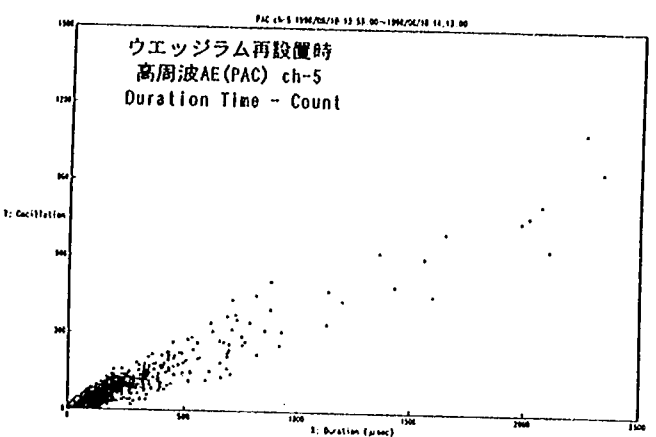
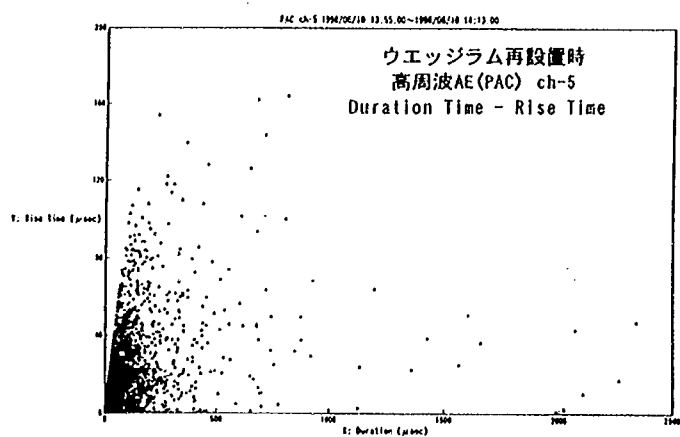
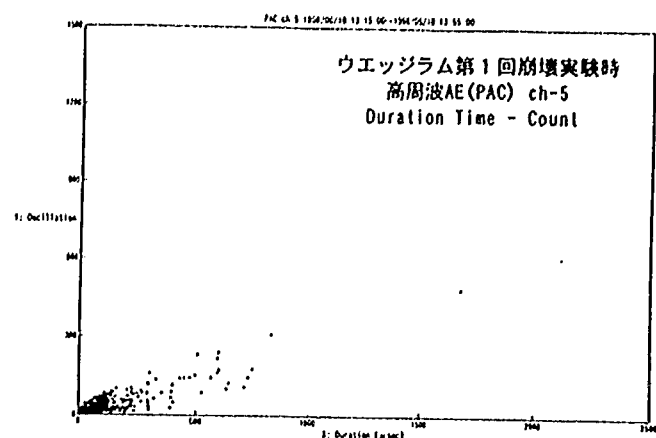
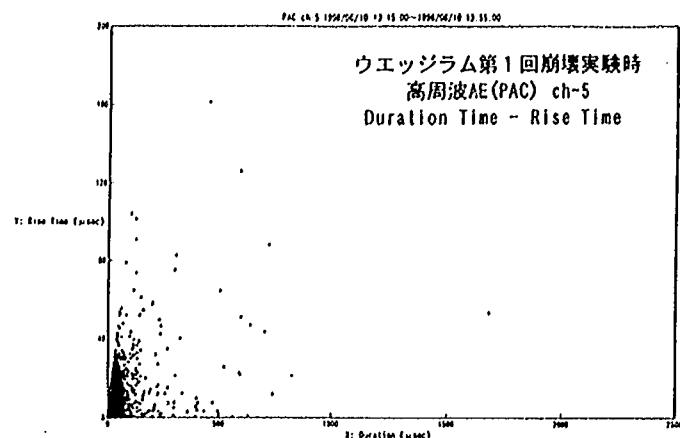


図-5.3.10 油圧ジャッキによる人工崩壊実験時の
AEパラメータ (高周波、継続時間-立上り時間)

図-5.3.11 油圧ジャッキによる人工崩壊実験時の
AEパラメータ (高周波、継続時間-カウント)

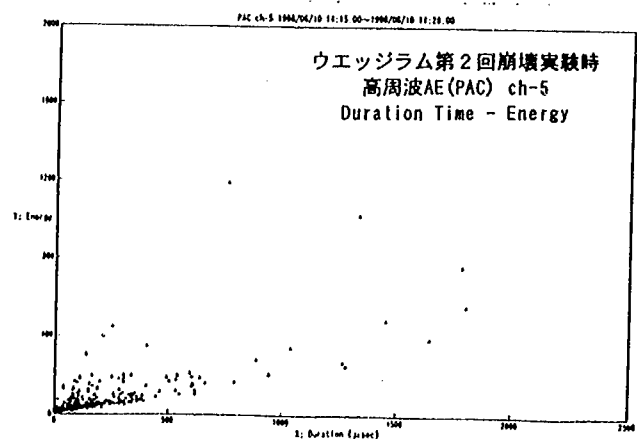
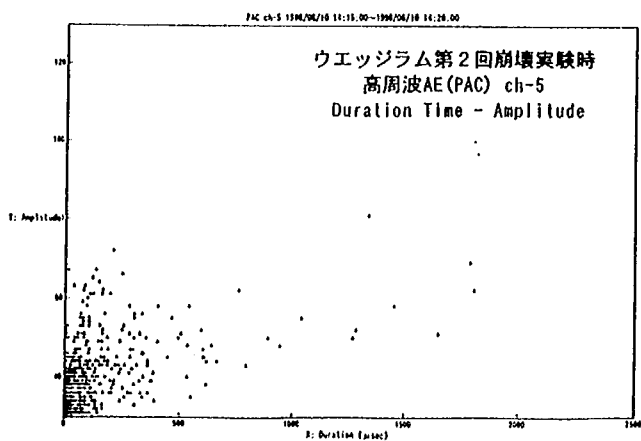
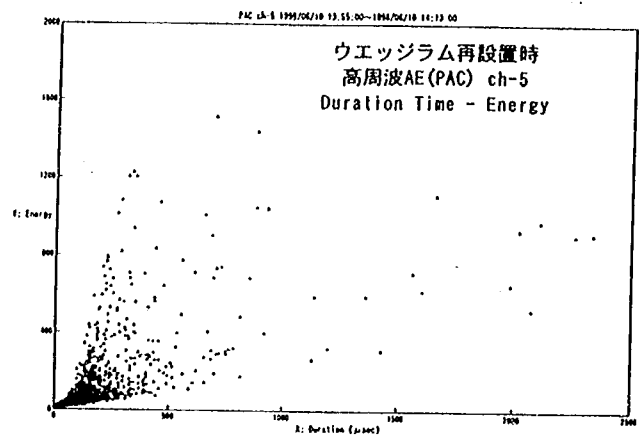
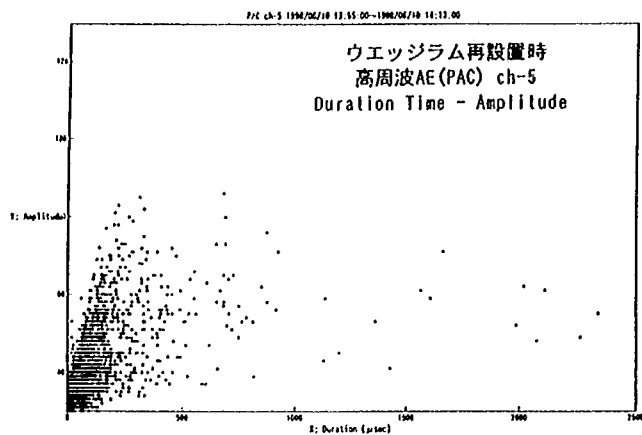
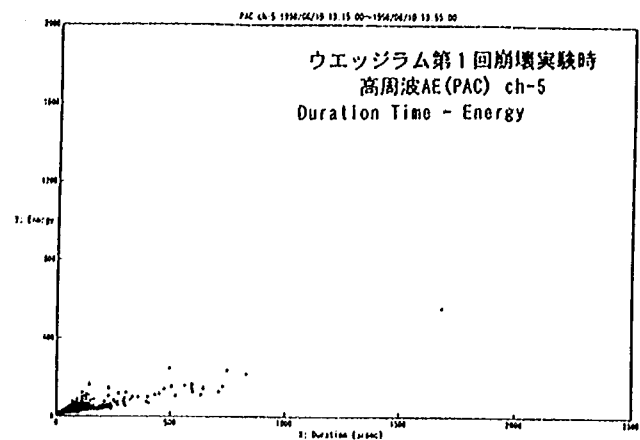
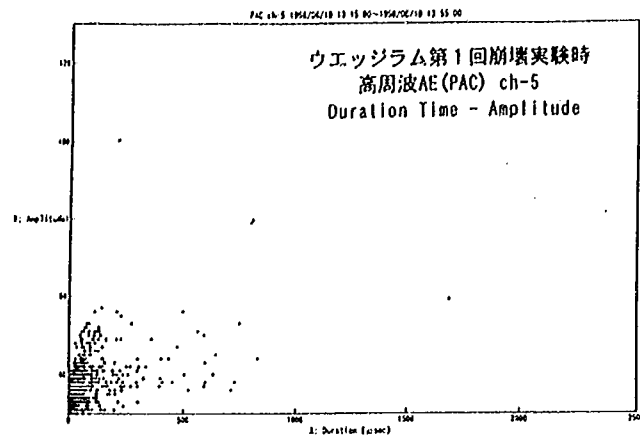


図-5.3.12 油圧ジャッキによる人工崩壊実験時の
AEパラメータ (高周波、継続時間-最大振幅値)

図-5.3.13 油圧ジャッキによる人工崩壊実験時の
AEパラメータ (高周波、継続時間-エネルギー)

5.3.2 破碎剤による人工崩壊実験

油圧ジャッキによる人工崩壊実験と平行して、破碎剤による人工崩壊実験について検討を行った。これは、油圧ジャッキによる方法がジャッキ圧力で破壊できる程度の岩塊にのみ適用可能で、比較的小規模な岩塊を直接的に破壊するのに対して、破碎剤を用いれば、より大規模な岩塊を不安定化させることによって、自然状態に近い岩盤の崩壊を発生させる可能性があると考えられたためである。

(1) 破碎方法の検討

1年以上の計測データ等から、岩盤の自然崩壊による AE 発生を的確に計測するためには、AE センサの設置してある岩塊に隣接する菱形岩塊を不安定にし、この岩塊の崩壊時に発生する AE を捉えることが最適と判断された。このため、菱形岩塊を支えている下部の岩盤の一部を除去する方法について検討した。

菱形岩塊を通る地形断面は、ノンプリズム光波測距儀による概略測量によると平均傾斜 60° の急崖斜面であり、十分な安全を確保しながら効率の良い破碎関連作業を行うために、斜面下部への立ち入り禁止を前提として、表-5.3.4 に示すような方法について検討を行った。この結果、菱形岩塊下部の岩盤を確実に除去できること、計測終了後まで菱形岩塊周辺の岩盤が不安定な状態で残留した場合にも比較的安全に不安定岩塊を除去できることを考慮して、水蒸気圧破碎法と発破とを選定した。さらに、センサへの振動の影響等を検討した結果、使用許可が不要で比較的大きな破碎能力を有する水蒸気圧破碎剤を使用することとした。

なお、破碎方法検討において注目した適用条件は以下のとおりである。

- ① 騒音・振動等による周辺環境に与える影響を極力小さくする。
- ② 定められた期間内に、確実に岩盤斜面の崩壊を発生させることができる。
- ③ 崩壊後、不安定な岩塊が残る場合、適切な時期にこれを除去することができる。
- ④ 短期間で破碎剤の使用許可が取得可能である。
- ⑤ 破碎準備・破碎作業が簡単である。
- ⑥ AE、その他のセンサへの影響が少ない。

ここで、破碎剤による破碎が AE センサに及ぼす影響は、

a. 爆速がダイナマイトの $1/10$ と遅いため、発生する振動の周波数はかなり低くなる。

b. AE センサの設置されている菱形岩塊と装薬する岩塊との距離は、 $1.5\text{m} \sim 2.0\text{m}$ と短い、両岩塊の境界には明瞭なクラックが存在しており、周波数の高い振動は伝播し難い。

等の観点から、基本的には問題ないと考えられる。

(2) 破碎作業

人工崩壊実験およびその準備作業に当たっては、作業の安全確保および実験地域への一般人の通行・侵入防止を目的として、十分な安全対策を実施した上で破碎を実施した。

穿孔には空圧レグドリルを使用した。表-5.3.5 に穿孔概要および装薬量についてまとめ、装薬配置について図-5.3.14 に模式的に示す。本実験では、崩壊対象岩塊の下部の支えとなっている岩塊を破壊することを目指したが、実際の岩盤状況は事前に十分把握できない部分もあることから、穿孔時に現地状況を確認しながら装薬間隔や薬量を決定することとした。対象岩塊と破碎岩塊を写真-5.3.3 に示す。

表-5.3.4 破碎方法の比較検討結果

項 目	斜めボーリング法		亀裂内挿入法		岩塊（岩盤）ボーリング法	
	静的破碎剤	動的破碎剤	静的破碎剤	動的破碎剤	静的破碎剤	動的破碎剤
具体的な方法	斜面上部道路から菱形岩塊背面に斜め Br を穿孔し、孔内に静的破碎剤を充填して背後の岩盤を破碎。	斜面上部道路から菱形岩塊背面に斜め Br を穿孔し、動的破碎剤を装填して破碎。	菱形岩塊の背面の亀裂に静的破碎剤を充填し、膨張を利用して破碎する。	菱形岩塊の背面の亀裂に動的破碎剤を挿入し、破碎する。		
破碎の確実度	静的破碎剤は破碎力が小さく、岩塊の破碎は困難。	複雑な斜面形状のため、ボーリング先端と岩塊との距離の把握が困難であり、ダイナイト程度の破壊力がないと、破碎しない。	破碎剤を充填したクラックを密閉しないと、破碎圧力が逃げるため、破碎の確度が低下する。	破碎剤の形状寸法とクラックの形状が異なり、込め物等により充填しても、起爆力が大きく、破碎圧は自由面に逃げる。	圧力伝達が確実で、岩塊の破碎に適している。	通常の爆破（発破）と同様な破碎効率が得られる。
安 全 性	急斜面作業がなく、安全	急斜面作業がなく、安全	急斜面作業で、十分な安全確保が必要	急斜面作業で、十分な安全確保が必要	急斜面作業で、十分な安全確保が必要	急斜面作業で、十分な安全確保が必要
利 点	取り扱いが容易で、許可の必要がない。	破碎力が大きく、確実な破碎が可能。破碎理論がある程度確立している。	取り扱いが容易で、許可の必要がない。	破碎力が大きく、確実な破碎が可能。破碎理論がある程度確立している。	取り扱いが容易で、許可の必要がない。	破碎力が大きく、確実な破碎が可能。破碎理論がある程度確立している。
問 題 点	破碎時間を制御できない。破碎力が弱く、現実には不可能。	火薬類の取り扱い許可が必要。斜面全体が崩れる恐れ有り。	急斜面上での作業が多く、作業の手戻りは許されない。	急斜面作業となる。火薬類の取り扱い許可が必要。	急斜面作業であり、一般に穿孔数が増加する。	急斜面作業であるが、穿孔数は少ない。申請が必要（除ガンサイザー）
適用破碎剤		ダイナマイト		スラリー爆薬		コンクリート破碎器 ガンサイザー
判 定	×	×	×	×	△	○

表-5.3.5 装藥孔諸元

孔番号	孔径(mm)	穿孔長(cm)	装藥量(g)	孔間隔(cm)	抵抗線(cm)
No. 1	35	70			
No. 2	35	70		40	
No. 3	35	80		40	
No. 4	35	100	240	40	60
No. 5	35	100	240	20	60
No. 6	35	100	240	20	60
No. 7	35	100	240	20	60

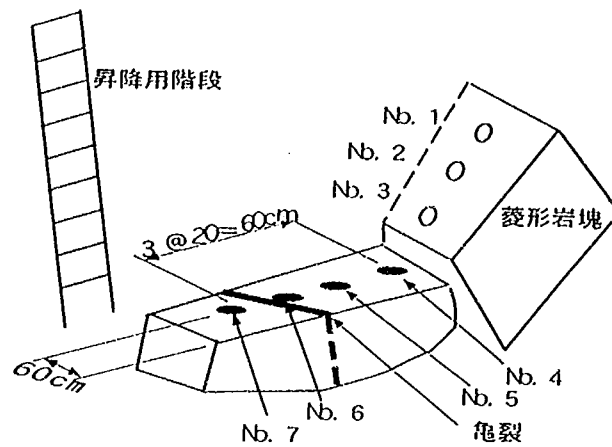


図-5.3.14 装藥配置図



写真-5.3.3 対象岩塊

(3) 破碎結果

破碎状況を写真-5.3.4～写真-5.3.6に示す。破碎状況を以下に時系列的にまとめる。

- ① 点火直後、発火は菱形岩塊の右側に認められる。この原因は No.3 孔が破碎対象岩塊を貫通しているためと推定される。
- ② 4/30 秒後には、破碎対象岩塊が若干浮き上がりながら動いている状況が認められる。
- ③ 10/30 秒以下の画像は火花と爆風のため岩塊の動きは確認できない。
- ④ 14/30 秒後の画像では、右側に飛散している2つの岩塊が認められる。これらの岩塊は、菱形岩塊右斜め上の岩塊に相当する。また、破碎対象岩塊は背面岩塊と分離している。
- ⑤ 28/30 秒後、菱形岩塊が破碎岩塊に引きずられるように転倒を始めている。
- ⑥ 発破終了後の画像では、菱形岩塊背面に明瞭な節理が認められる。

破碎実験後の状況から推定すると、菱形岩塊は当初の推定とは異なり、背面の岩塊とは節理面で完全に分離していたものと考えられる。このため、下部の支えとなっていた岩塊を破壊したことによって、菱形岩塊自体も転倒・崩壊したものと考えられる。

(4) 破碎時の AE 発生状況

破碎剤による岩盤の破碎時間は図-5.3.15に示す AE 測定結果からおおよそ4～5秒程度継続したと思われる。この期間中に幾つかのセンサが破損した。本実験で想定される AE としては以下のものが考えられる。

- ・爆発による衝撃波
- ・爆発による岩盤の破碎音
- ・破碎岩石落下時の岩石同士の接触音

また、自然崩壊と異なると考えられるものとしては、自然崩壊が応力の不均衡箇所から漸増的に崩壊していくと考えられるのに対して、破碎剤の場合は、短時間にエネルギーが放出されるという点に大きな違いがある。しかしながらこの違いを考慮して評価することは困難と思われるので、この点に注意しながらも通常の AE として評価を試みる。

ここでは、破損を免れた ch-3 および ch-5 に着目して測定結果を評価する。

図-5.3.16 は継続時間と振幅の関係を示したものであるが、ch-3 の方が高周波センサ、低周波センサとも振幅が大きく継続時間の長い AE が多い。ch-3 の方が破碎位置に近いことから、振幅値が ch-5 に比べて大きくなるという結果は妥当であると思われる。一方、継続時間については破碎位置からの衝撃波やき裂発生による AE などの弾性波が複雑に散乱するなどして、継続時間の長い AE が観察されても不思議ではない。しかし、今回の条件下では弾性波の伝播距離の増加にともなって継続時間も小さくなる傾向となった。

図-5.3.17 は継続時間と立上り時間の関係を示したものである。全体に低周波センサは立上り時間の長いものが多く、高周波センサは立上り時間が短い。ただし、高周波センサのうち破碎剤位置に近い ch-3 では、継続時間の長い AE が観察されている。

図-5.3.18 は立上り時間と振幅の関係を示したものである。低周波センサにおいては高周波センサに比べ立上り時間はかなりばらついている。この違いはセンサの特性によるものと思われる。また、低周波セン



写真-5.3.4 点火



写真-5.3.5 点火後 14/30 秒経過

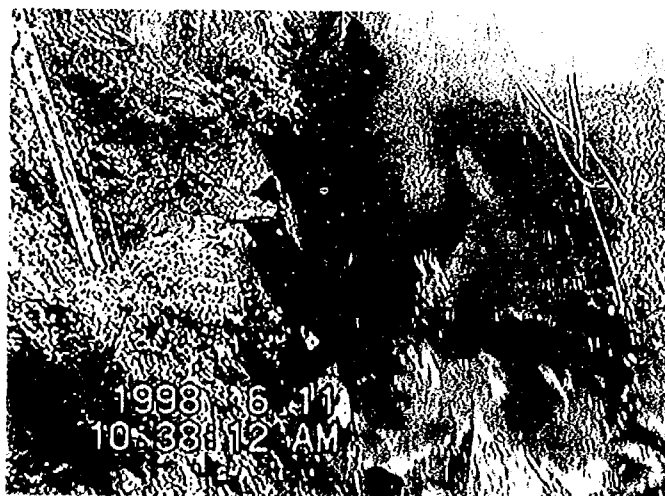


写真-5.3.6 点火後 63/30 秒経過

サでは立上り時間の如何に関わらず、振幅の大きな波が発生しており、非常に立上り勾配の大きな波が多かったものと思われる。

図-5.3.19 は立上り時間を継続時間で除した R/D の発生頻度を 10%刻みで表示したものである。破碎位置近傍の ch-3 では R/D が 10%以下の物の比率が大きいのが特徴的である。一般的に、岩石など比較的硬いものが破壊する時に生じる弾性波は短時間にエネルギーが放出されるために高周波成分が卓越し、散乱等の影響を受けなければ立上り時間が小さいと考えられる。また、高周波成分は減衰が大きく AE 発生位置からセンサまでの距離が大きいと高周波成分が捉えにくくなる。ch-3 が R/D の小さいものを多くとらえているのは、このようなことが原因かと思われる。また、R/D の分布が AE 発生位置とセンサ位置の距離の影響を受けているものと思われ、センサ毎の R/D の分布を評価することにより AE 発生位置を標定できる可能性がある。

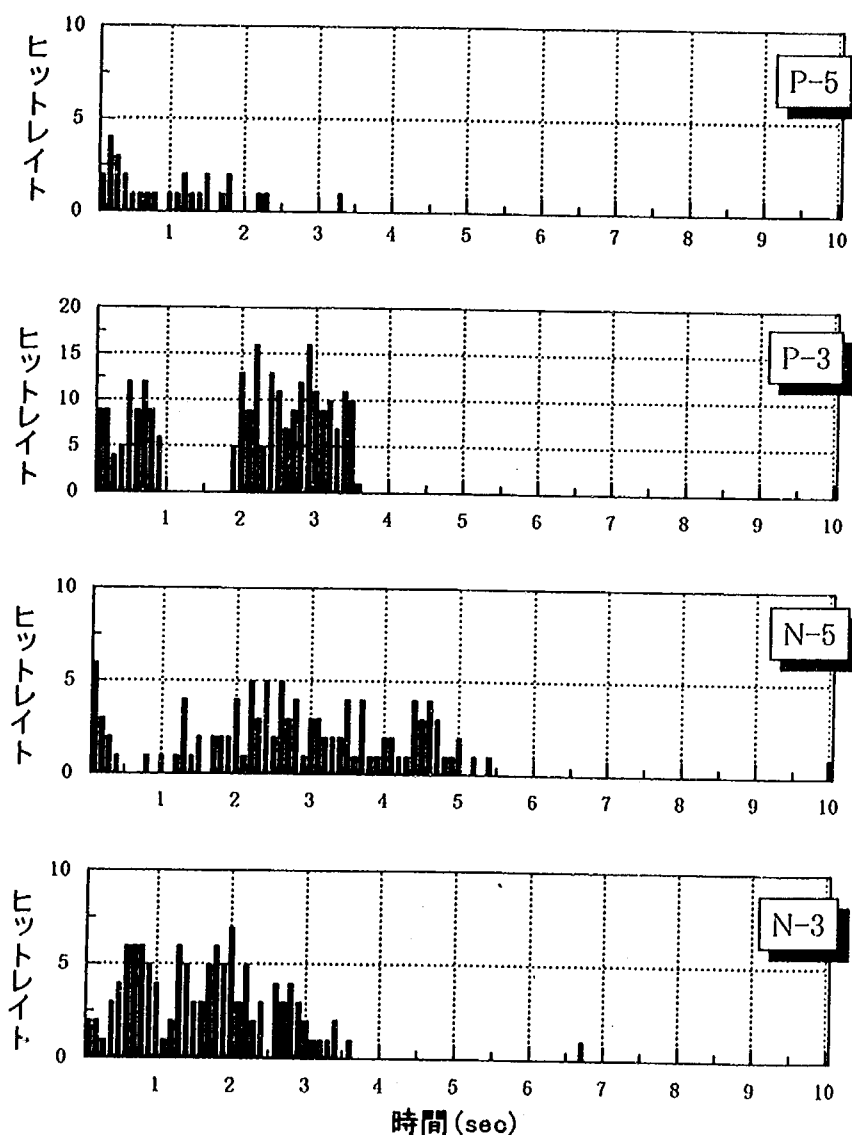


図-5.3.15 破碎剤施工時の AE 発生状況

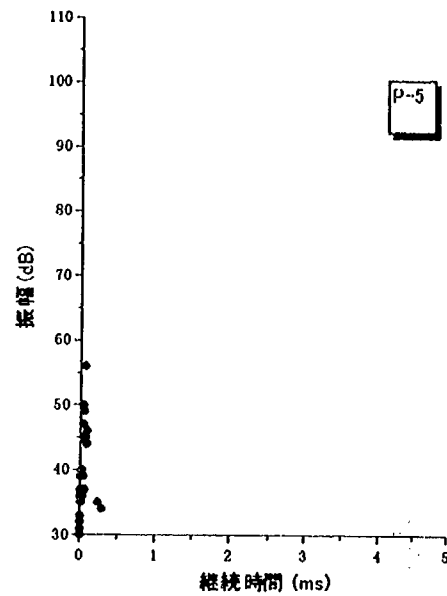
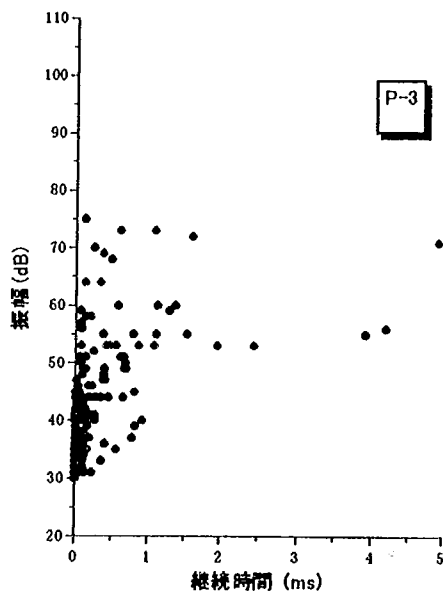
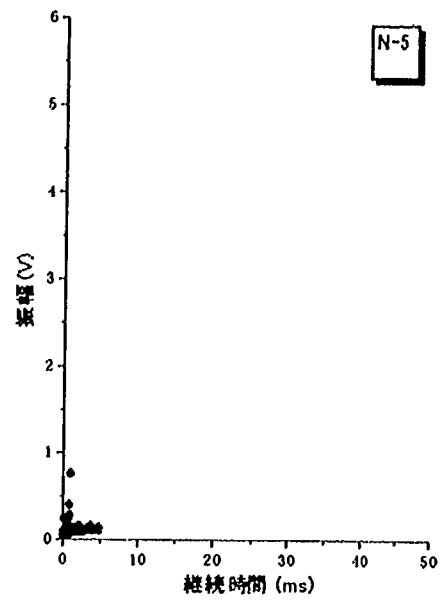
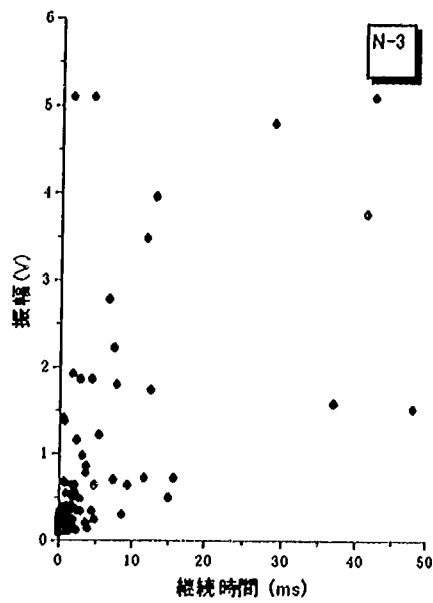


図-5.3.16 継続時間と振幅の関係

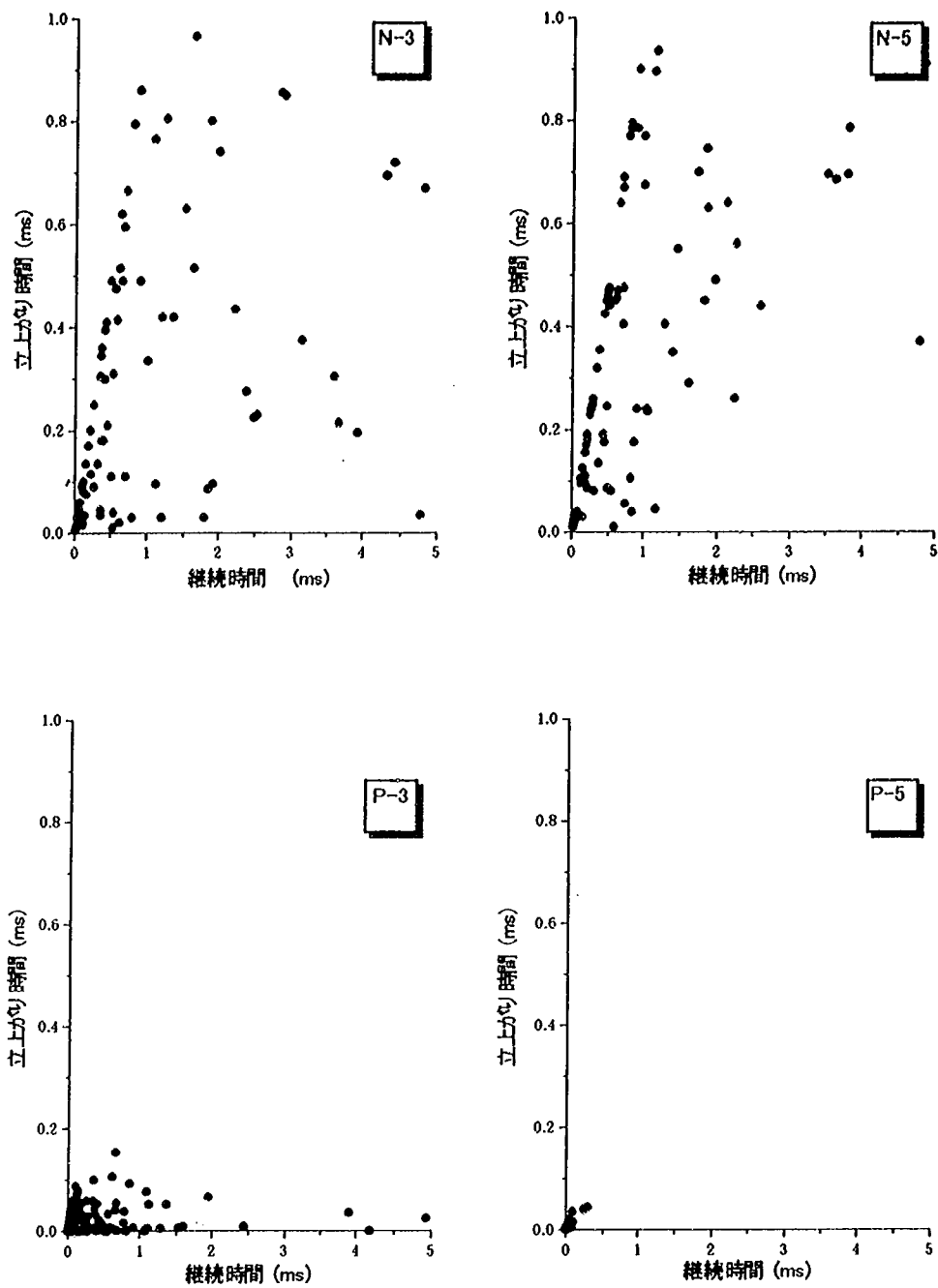


図-5.3.17 継続時間と立上がり時間の関係

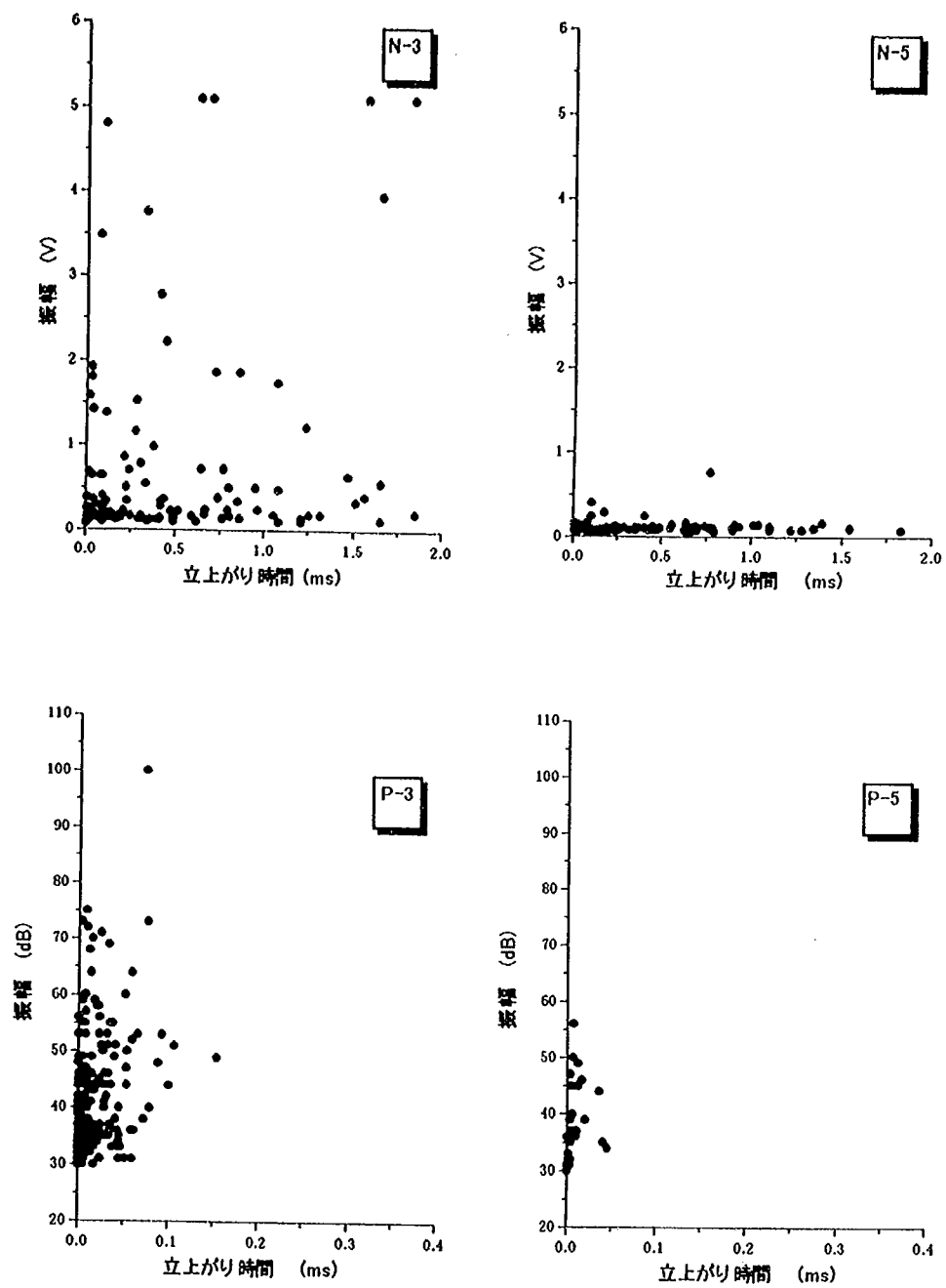


図-5.3.18 立上がり時間と振幅の関係

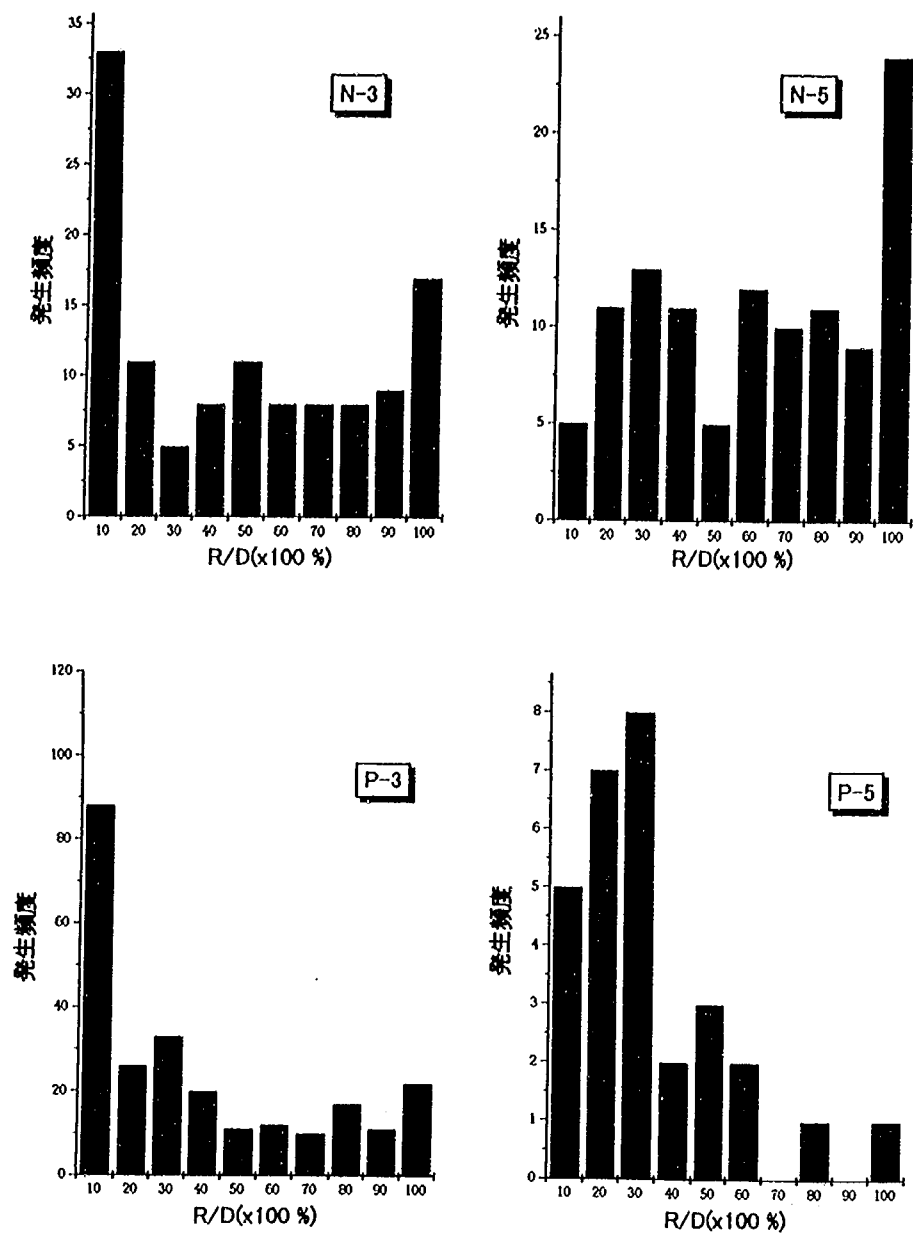


図-5.3.19 立上り時間—継続時間比の度数分布

5.4 まとめ

今回実施した日光岩盤斜面における AE 計測実験結果について項目ごとにまとめたものを以下に示す。

(1) データ取得状況について

- ①現地斜面においての約 20 ヶ月間の長期にわたる AE データを取得した。
- ②計測期間中、計測対象斜面近傍で落石があり、落石による AE データを取得した。
- ③計測期間中の様々な気象条件(晴天、降雨、降雪、雷等)によって発生する AE データを取得し、各気象条件による特徴的な AE を把握した。

(2) センサの設置状況について

- ①表面設置や表面削孔して設置された AE センサは、低周波、高周波に関係なく、降雨や温度の影響を強く受けることが判明した。
- ②ボーリング孔に設置した AE センサは、低周波、高周波とも降雨や温度の影響を受けなかった。
- ③上記の結果より、地表面から約 4.5m 程度の離隔で AE センサを設置すれば、降雨や温度の影響がないことがわかった。

(3) 人工崩壊実験について

- ①油圧ジャッキによる崩壊実験の結果より、AE カウントの累積値の時間変化と、傾斜および変位量の時間変化は、きわめて類似した傾向を示した。なお、AE と他の計測装置のデータに時間差がみられなかったのは、油圧ジャッキの荷重の載荷速度が急激であったためであると解釈される。
- ②破碎剤による実験では、当初の予想以上に対象岩塊のき裂が発達していたため、破碎作業自体によって計測対象岩塊が崩壊したため、有効なデータが取得できなかった。
- ③凍結融解促進実験は、実施時期の暖冬の影響で、現地の気温低下が小さかったことから、当初予想した効果を得られなかった。

(4) 予備実験について

- ①原位置 AE 伝播試験：実験サイトの弾性波減衰特性を把握した。
- ②温度影響試験：温度変化による AE の発生が確認され、その発生源は岩盤自体からと推定された。
- ③雨滴影響試験：降雨による原波形は使用したセンサの周波数帯域(～1MHz)でほぼ平坦な特性を有していると考えられ、AE 波形計測結果よりセンサごとに明瞭な卓越周波数があることがわかった。このことから、降雨による AE をパラメータで分離できる可能性があることが示唆された。

(5) 計測システムの安定性について

- ①非絶縁型 AE センサは電気ノイズを受けやすく、現地計測においては適さないことがわかった。このため、現地計測には絶縁型センサを用いることが不可欠である。
- ②長期間にわたる計測においては、システムの故障、停電、操作ミスなどによって、計測再開始以降のデータファイルが破壊されることがあった。このことは、データの回収(バックアップ)の間隔が長い場合、ある期間全体のファイルが破壊されて回収不可能になることを意味している。そこで、早い段階でデータの保存を行い、不意のハングアップでも、データの損失をできる限り小さくするよう、システムの改良が必要である。

(6) 総合まとめ

今回の実験では、自然現象での岩盤崩壊現象に伴う AE を計測・評価することはできなかったが、油圧ジャッキを用いた人工崩壊実験を通じて、岩盤が破壊され、き裂が拡大して崩壊に至るまでのデータを取得することができた。このデータから、AE が岩盤崩壊の予知に繋がるモニタリングに有効性があることが示された。一方、長期観測データでは、気象条件など様々な要因で AE が発生することが確認され、同時にそれらの要因による AE の特徴も把握した。また、表面近傍に設置したセンサでは、特にこうして本来不必要な信号が極めて多量に検出されることから、センサの設置条件やしきい値の問題などの計測条件設定の検討が重要な課題である。

【参考文献】

- 1) 塩谷智基・境野典夫・大津政康・重石光弘：地盤内部より発生する AE 波の検出方法，第 32 回地盤工学研究発表会講演概要集，pp. 2633-2644，1997. 7
- 2) 近藤純正：水環境の気象学（地表面の水収支・熱収支），朝倉書店，pp.38-47
- 3) 山内豊太郎：気象の実験シリーズ(5)雨粒の形，気象 No.497，pp. 46-47，1998. 9
- 4) 木村和義著：作物にとって雨とは何か，（社）農山漁村文化協会，pp. 108-111
- 5) 日本非破壊検査協会：非破壊検査便覧，日刊工業新聞，pp.386
- 6) 塩谷智基・境野典夫：AE 法による杭診断技術に関する基礎的研究と実構造物適用事例，土木学会耐震補強・補修技術及び耐震診断技術に関するシンポジウム講演論文集，pp. 203-210，1997. 7

6 斜面崩壊モニタリングにおける AE 計測

6.1 AE センサおよび AE センサ設置方法

6.1.1 土砂斜面における適用

(1) AE センサおよびウェーブガイドの種類と形状

土砂斜面への AE 法の適用では、AE の減衰がとくに大きな問題となる。図-6.1.1 に示す Koerner が弾性波動減衰特性を検討した結果¹⁾では、金属に比較して土砂盤では減衰の程度が 3~4 桁も高い。減衰の程度は、センサの周波数特性に大きく依存するが、土砂盤の減衰特性は 10kHz の比較的 low 周波の AE でも 5 ~ 10dB/cm、60kHz では 20dB/cm 以上となる。

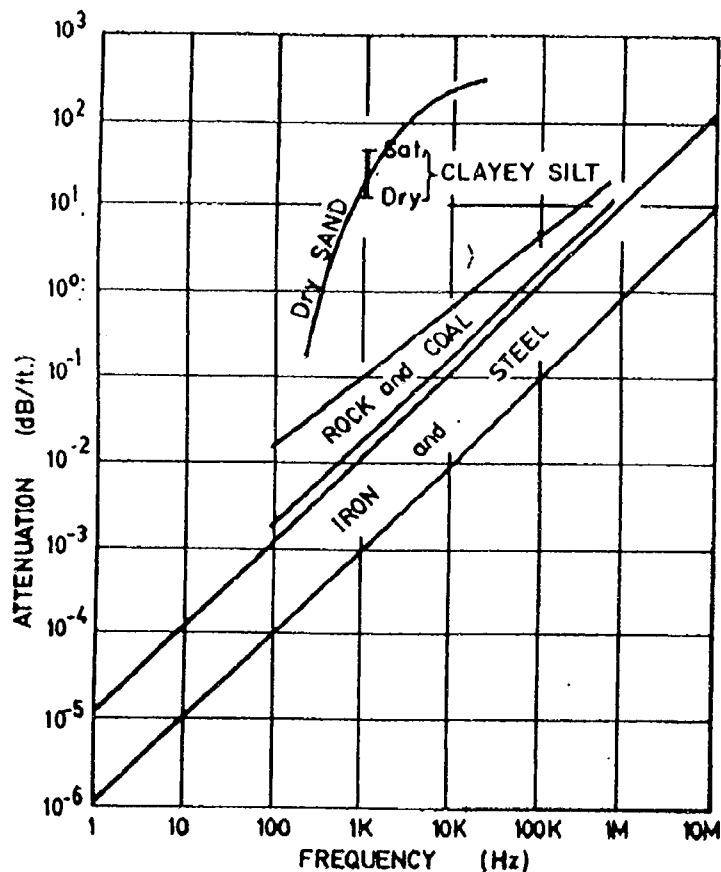


図-6.1.1 減衰率と材料、周波数の関係

このため、一般に、地盤分野における AE 計測では、金属製のウェーブガイドと呼ばれる棒を用いる方法が多用されている。また、ウェーブガイドは、さらにその使用法により図-6.1.2 のように分類することができる。

図-6.1.2 に示すとおり、ウェーブガイドには幾つかのタイプがあるが、ウェーブガイドが伝播体として使われるタイプ (I,II) とウェーブガイド自身が変形に伴って破壊するタイプ (III) とに大きく分けられる。

しかしながら、実際には土砂斜面では以下のことが考えられ、I のタイプのウェーブガイドは不適である。

- (i) 距離減衰が大きいことにより、共振周波数 10kHz 程度の低周波 AE センサでも監視できる範囲は数 10cm 程度であると考えられる。
- (ii) 金属製のウェーブガイドを用いることで、土とウェーブガイドのインピーダンスの差により、透過減衰が発生し、さらに監視できる範囲が狭くなると考えられる⁹⁾。

このことは、今回の木更津およびしらすの実験において、ウェーブガイドから離れた位置に崩壊や変位が生じてもほとんど AE の検出はされていないことから確認できる。

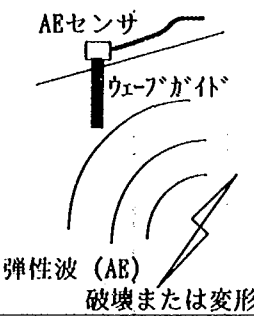
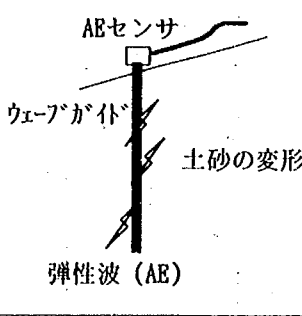
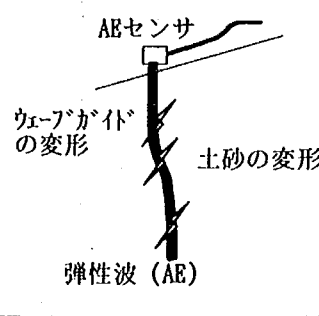
	I 伝播型ウェーブガイド	II 摩擦型ウェーブガイド	III 自己破砕型ウェーブガイド
検出のしくみ			
特徴	対象（岩盤や土砂）中を伝搬してくるAE（弾性波）を検出するため、媒質中の減衰が少ないことが条件となる。また、高い周波数ほど減衰が著しいことから、AE センサの周波数帯は低いほど望ましい。	ウェーブガイド近傍の土砂が変形、移動することにより、ウェーブガイドとの摩擦が生じることから、これをAEとして検出する。 ウェーブガイド近傍の土砂が変形することが前提となる。	土砂の変形をウェーブガイド自身の変形に置き換え、ウェーブガイド内の中詰め材で生じるAEを土砂の変形によって生じるAEとして記録する方法である。 斜面の構成材料に左右されなくて、変形を高感度に計測できるが、ウェーブガイド近傍の土砂が変形することが前提となる。

図-6.1.2 ウェーブガイドの使用法

① AE センサの共振周波数

一般に、「土砂斜面では低周波の AE センサがよい」とされるが、前述のとおり、土砂斜面内を伝播する AE を検出することは、低周波でも高周波でも極めて困難である。このため、土砂斜面における AE 法の適用は、特殊な場合を除きウェーブガイドの使用が前提となる。したがって、AE センサの共振周波数は、土砂斜面の AE の伝播特性からではなく、むしろウェーブガイドの長さと材質を勘案して選定した方がよい。

金属製のウェーブガイドでは、長さが数mであれば、60kHz 共振程度の AE センサを用いた方がノイズカットしやすいと判断され、ウェーブガイドの長さがさらに長くなる場合には 20kHz 以下の比較的低い周波数の AE センサを用いてより広範囲を監視した方が望ましいと判断される。

② ウェーブガイドの種類

土砂斜面に適用可能なウェーブガイドは、図-6.1.2 に示す II および III のタイプがある。すなわち、ウェーブガイドと周囲の土砂（土粒子）の摩擦音を検出するタイプとウェーブガイド周囲の土砂の変形によりウェーブガイドが変形することにより、ウェーブガイド内部の中詰材が破壊・変形し、これを検出するタイプである。

これらのウェーブガイドは、土砂斜面の構成材料（砂質か粘性土か）、土砂斜面の規模、土砂斜面の形状などに応じて選定することが望ましい。

(2) 設置方法と手順

① 設置位置

土砂斜面に AE 法を適用する場合は推定される崩壊の形態を考慮し、移動土塊と不動土塊の境界を横切るように設置する必要がある。

② 設置方法

摩擦音を検出するタイプについては、土研式簡易貫入試験の要領でウェーブガイドを打ち込み、ウェーブガイド埋設後にウェーブガイド頭部に AE センサを設置する。また、土砂斜面が硬い場合や自己破壊するタイプのウェーブガイドについては、オーガーなどでボーリングを行い、ウェーブガイドを挿入した後に、適当な土質材料により埋め戻すことにより設置する。

③ 埋設深さ

木更津土砂斜面の実験では、表面から深さ 20cm 程度の位置に AE センサが埋設されて、観測が行われた。この結果、高周波 60kHz 共振 AE センサ、低周波 20kHz 共振 AE センサのいずれでも降雨によるノイズが発生したが、低周波 20kHz 共振 AE センサで顕著であった。

一方、しらす斜面でも同様に表面から深さ 20cm 程度の位置に AE センサが埋設し、斜面動態試験を行なった。この結果、低周波 20kHz 共振センサでは、降雨ノイズが発生したが、高周波 60kHz 共振 AE センサでは降雨ノイズは問題にならず、斜面の動態を観測することができた。このように、ノイズカットが可能なセンサの設置深さは地盤条件にも依存するが、高周波 60kHz 共振 AE センサでは数 10cm 以上、低周波 20kHz 共振 AE センサでは、それ以上と考えられる。

6.1.2 岩盤斜面における適用

(1) AE センサおよびウェーブガイドの種類と形状

1) AE センサの種類

AE センサの種類は3章(3.1 AE 計測方法について)に示すとおり、一般に次の2種類に分けられる。

① 低周波型 AE センサ

比較的低周波領域の AE を計測する。低周波は高周波に比べ伝播距離が長く、比較的広範囲で発生する AE を検出できる特徴がある。岩盤斜面における予備実験(AE 伝播試験)では、低周波振動の伝播距離は 5m 程度であった。ただし、低周波型は、AE 以外の環境ノイズを検出しやすいという欠点もある。

② 高周波型 AE センサ

高周波型は一般に、低周波型に比べ環境ノイズの影響が少なく、AE の検出が容易とされている。ただし、岩盤斜面における予備実験(AE 伝播試験)では、高周波振動の伝播距離は 1~2m 程度であった。

2) 低周波 AE センサと高周波 AE センサの特徴

今回の岩盤斜面における長期計測では、低周波型と高周波型では特別な差は認められなかった。その理由は以下に示すことによる。

- ・計測された AE 信号の多くの割合を占める雨滴の衝突振動など、自然環境の振動は幅広い周波数成分を含み、低周波型、高周波型共に反応した。
- ・今回の実験で岩盤斜面に取り付けた AE センサの内、後述する非絶縁型のセンサを使用した場合、電気ノイズ等を検出しやすく、結果的に「しきい値」を高めに設定した状態で計測が行われた。このため、低周波型、高周波型ともに、遠方に発生した微小な AE 信号を検出できず、低周波の検出距離に関して、低周波型と高周波型の差はあまりみられなかった。
- ・岩盤の AE と雨や環境ノイズの分離については、AE パラメータによる分離手法が完全に確立されるに至らなかったため、低周波データと高周波データのどちらが有効であるかの結論が出せなかった。

3) AE センサ選択の留意点

岩盤斜面の実験では、低周波型、高周波型のどちらが有効であるかの判定は下せなかったが、今後、次の点が明らかにされれば、岩盤斜面における AE 計測に最適なセンサが確定するであろう。

- ・絶縁型 AE センサを使用し、雨の影響を避けるため地中埋設するなど、最適な計測環境でノイズをおさえ感度を上げた計測を行った場合に、低周波型、高周波型の計測可能な範囲が実際にはセンサ周囲何 m 程度になるかを確認する必要がある。
- ・岩盤の変位に起因する AE 信号と雨等による振動を判別する際、低周波型と高周波型のどちらが有効であるか判定する必要がある。

4) AE センサの必要条件:

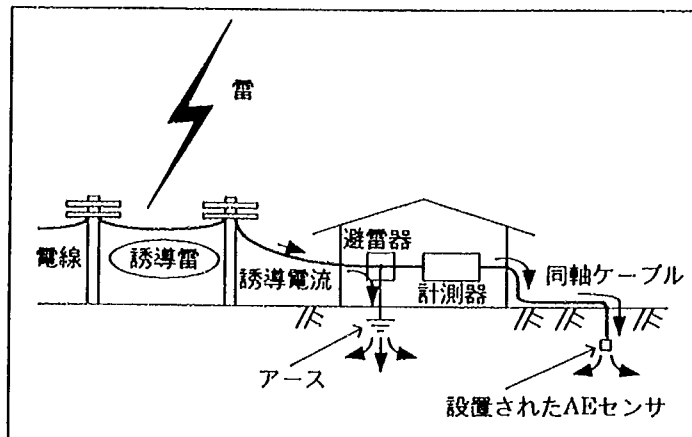
野外の岩盤斜面で使用する AE センサは室内用のそれに比べて下記の条件を満たしていなければならない。

① 防水性

長期間風雨にさらされ、地中にも埋設される計器であるため、センサ本体及びケーブル部も含め、防水性は必須条件である。最低でも1気圧(0.1MPa)、できれば5気圧(0.5MPa)以上の防水性を有するものが望ましい。

② 電気絶縁性

野外で使用する AE センサは絶縁型である必要がある。一般的な AE センサは、非絶縁型であり金属ケースと信号線のマイナスが接地されている。この種のセンサを野外で使用した場合、次のような問題が発生する。



AE センサが雷のアースとなり、センサが破壊される。 図-6.1.1 誘導雷が AE センサを通過する経路
(注) 雷によっては電流方向が逆の場合もある

雷によって商用電源系統に誘導された対地間の異常電圧が計測小屋に入ると、大部分は避雷器により大地に放散するが、一部避雷器の容量を超えるものは、計測器を通過し、接地された AE センサから地面に入る (図-6.1.1)。この過程で AE センサが破壊される。

- ・非絶縁型センサが設置されるとノイズを検出する原因となる。

大地には、雷や送電線の影響で、地電流と呼ばれる様々な周波数の電流が流れている。ここに2箇所以上の非絶縁型 AE センサを接触させると、センサ間の大地の電圧が計測器に流入し、ノイズを発生させる。1 個の非絶縁型センサが設置された場合でも、センサと計測器のアース間で生ずる電位差によりノイズを検出する可能性がある (図-6.1.2)。

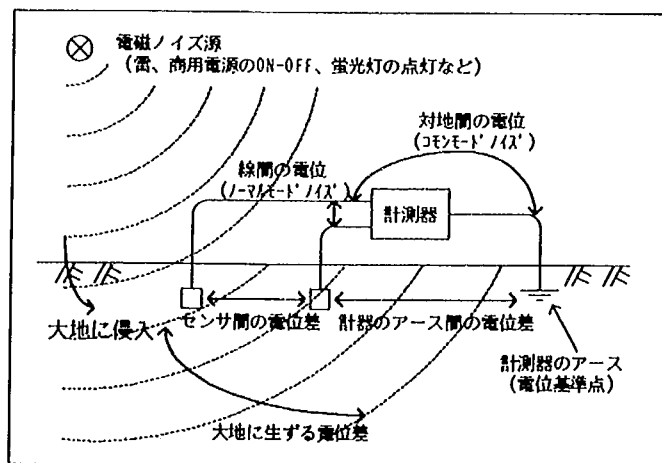


図-6.1.2 複数接地により AE センサに入る電気ノイズ

岩盤斜面において、非絶縁型 AE センサを金属製ウェーブガイドの両端に取り付けボアリング孔に挿入した場合は、大地との接触がより良好になり、AE センサのノイズレベルが高くなることが考えられる。また、土砂斜面において、非絶縁型 AE センサを使用した場合、雨により AE センサと地面の接地抵抗が低下し、よりノイズを検出しやすくなり、降雨時に電気ノイズが増える可能性が高いと考えられる。以上より、野外計測において AE センサの絶縁は必須条件である。絶縁方法としては、センサ感部とケースの間に樹脂板やセラミック板を挟んだ構造が一般的である。この絶縁板により、AE センサとしての感度は若干低下するが、ノイズ低減の効果の方が大きい。

③小型形状

降雨や温度変化の影響を低減させるためには、AE センサを埋設する方が望ましい。この際、削孔径としては以下のものが挙げられる。

- ・ 振動ドリル : 直径 10～20mm×深度 200mm 以内。小型で携帯可能。
- ・ 削岩機 : 直径 30～50mm×深度 1000mm 以内。仮設足場での作業が望ましい。
- ・ ホーリングマシン : 直径 66～116mm×深度 5～10m 程度。仮設ステージが必要。

現地の作業性を考えると、削孔径が小さくすむように、センサはできるだけ小型のものが望ましい。

また、センサケーブルの引き出しは、トップコネクタのもので、ケーブル自体もフレキシブルなものの方が挿入の作業性が良い。

5) ウェーブガイド

ウェーブガイドの特徴、留意点および設置方法については3章（3.

1 AE 計測方法について）を参照されたい。一般に、ウェーブガイドは金属製のものが使用されるが、ここでは、2 種類の金属製ウェーブガイドの実用例を示す。

1 つは AE センサをウェーブガイドの両端に取り付けるタイプ（写真-6.1.1、図-6.1.3）で、もう 1 つはウェーブガイドの一端に取り付けるタイプ（写真-6.1.3、図-6.1.4）である。写真-6.1.2 は設置時にセンサを傷付けないように保護金具を付けたものである。



写真-6.1.1 ウェーブガイド（両端にセンサ取付）



写真-6.1.2 ウェーブガイド先端

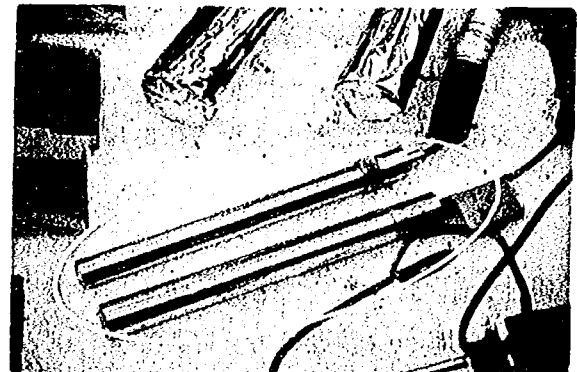


写真-6.1.3 ウェーブガイド（一端にセンサ取付）

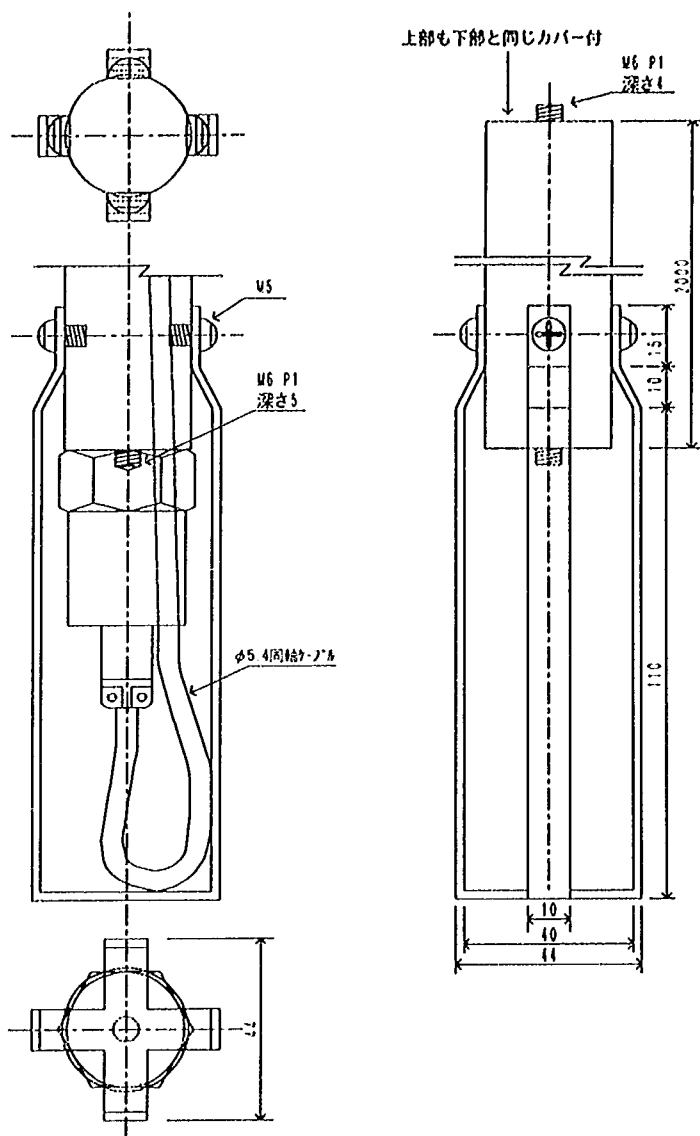


図-6.1.3 ウェブゲイト（両端にセンサ取付）

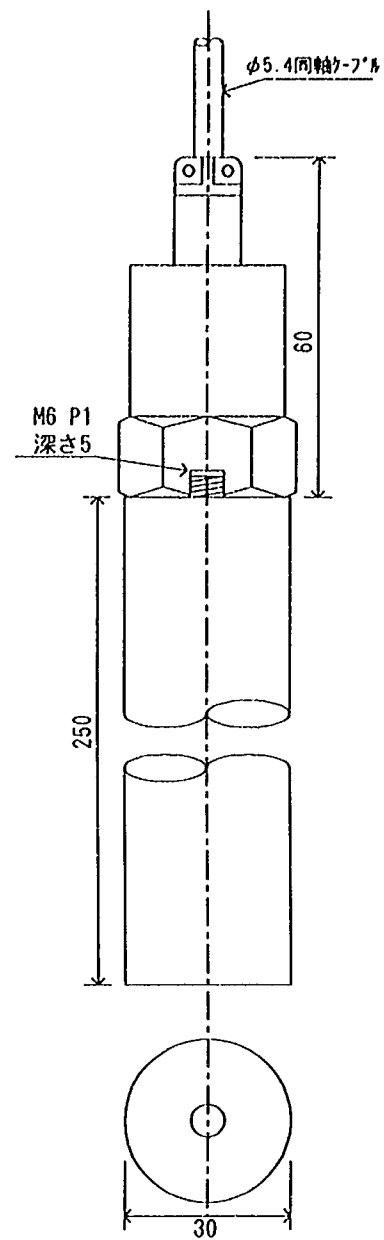


図-6.1.4 ウェブゲイト（一端にセンサ取付）

(2) 設置方法と手順

AE センサの設置方法には表面設置、水平穿孔・孔内設置、鉛直削孔・孔内設置に区分される。それぞれの特徴と設置手順は以下のとおりである。

なお、設置作業は、斜面下方に仮設足場を設け作業する場合と、斜面上方からロープを用いて降下し作業を行う場合（写真-6.1.4）がある。



写真-6.1.4 斜面上方から降下する設置作業

1) 表面設置

○長所 作業性が良い。保守が可能である。

○短所 防護キャップを用いてセンサを覆っても、岩盤を伝播する雨滴の振動を防ぐことができない。
温度変化の影響を受けやすい。

○設置手順（図-6.1.5）

・取付金具に AE センサ取付

取付金具に AE センサを確実に取付けるために、ネジ結合が望ましい。

・岩盤穿孔

センサを岩盤に設置するために、振動ドリル等で穿孔する。

・岩盤に AE センサ取付

ホールインアンカー、ボルト等でセンサを岩盤に設置する。センサ防護のため、アンカー用ヘッドキャップ等防護キャップを用いてセンサを覆い、さらにグラスウール等緩衝材で防護キャップを覆う。

・ケーブル保護

ケーブル保護およびケーブルの揺れに伴うノイズ発生を防止する。

斜面に沿ったセンサケーブルは電線管等の保護管で保護し、必要に応じて穿孔し所々ボルト等で斜面に固定する。

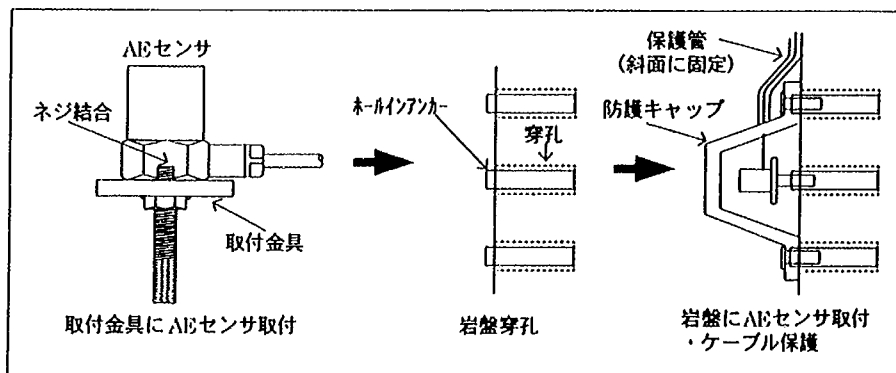


図-6.1.5 表面設置の手順

2) 水平穿孔・孔内設置

○長所 温度変化の影響を受けにくい。

岩盤を伝播する雨滴の振動の影響を受けにくい。

○短所 急傾斜地では作業性が悪く、穿孔深度が限られる場合がある。

充填し岩盤に固定してしまうため、保守が不可能である。

○設置手順 (図-6.1.6)

- ・ ウェーブガイドに AE センサ取付け

ウェーブガイドに AE センサを確実に取付けるために、ネジ結合が望ましい。

- ・ 岩盤水平穿孔

ウェーブガイドを孔内に設置するために、岩盤斜面に削岩機等で水平穿孔する。

充填が確実にできるように、水平に対してやや下方に斜掘りする。

- ・ 充填

セメントミルク、モルタル等で空隙を充填する。急結セメント、急結材を用いると良い。

- ・ ケーブル保護

ケーブル保護およびケーブルの揺れに伴うノイズ発生を防止する。

斜面に沿ったセンサケーブルは電線管等の保護管で保護し、必要に応じて穿孔し所々ボルト等で斜面に固定する。

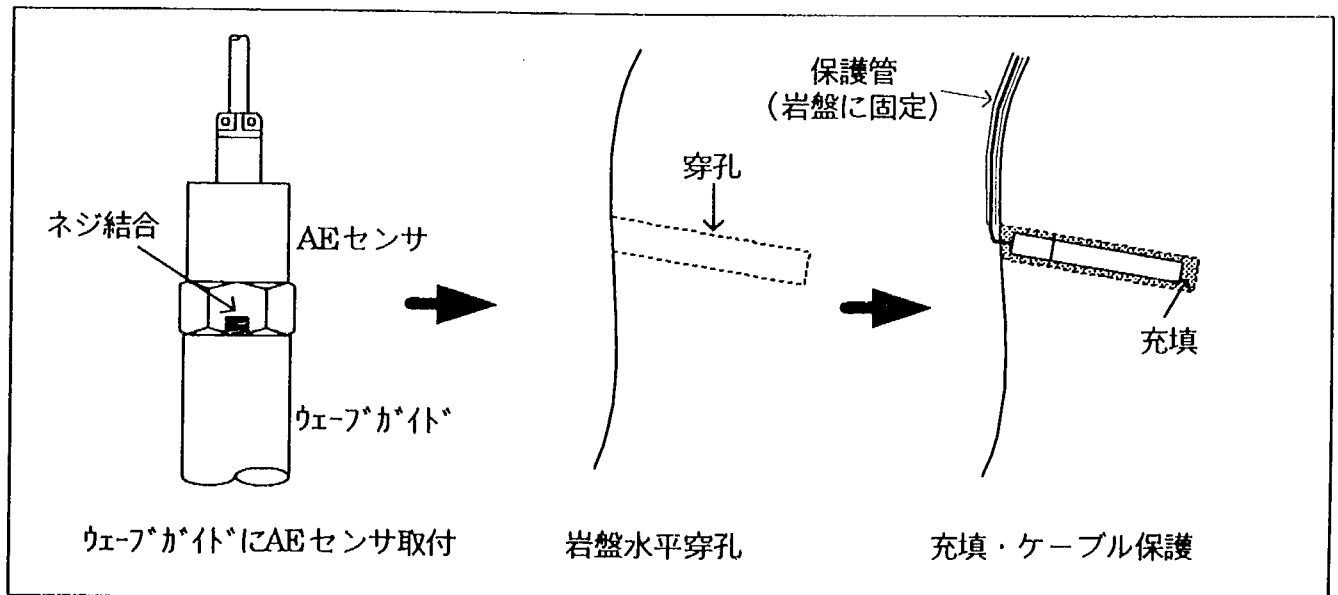


図-6.1.6 水平穿孔・孔内設置の手順

3) 鉛直削孔・孔内設置

○長所 温度変化の影響を受けにくい。

岩盤を伝播する雨滴の振動の影響を受けにくい。

○短所 斜面上方に作業スペースが必要となる。

鉛直削孔深度が大きい場合、時間と費用を要する。

充填し岩盤に固定してしまうため、保守が不可能である。

○設置手順 (図-6.1.7)

・ウェーブガイドにAEセンサ取付け

ウェーブガイドにAEセンサを確実に取付けるために、ネジ結合が望ましい。

ウェーブガイドの両端にAEセンサを取付ける場合、下端側の折り返したセンサケーブルをウェーブガイドにビニールテープ等で固定する。

・岩盤鉛直削孔

ウェーブガイドを孔内に設置するために、岩盤斜面上に鉛直削孔する。

・充填

セメントミルク、モルタル等で空隙を充填する。急結セメント、急結材を用いると良い。

孔の上部は粘土ペレットや砂等の軟質な材料で充填し、地表からの振動を低減させる。

・ケーブル保護

ケーブル保護およびケーブルの揺れに伴うノイズ発生を防止する。

センサケーブルは電線管等の保護管で保護し、固定する。

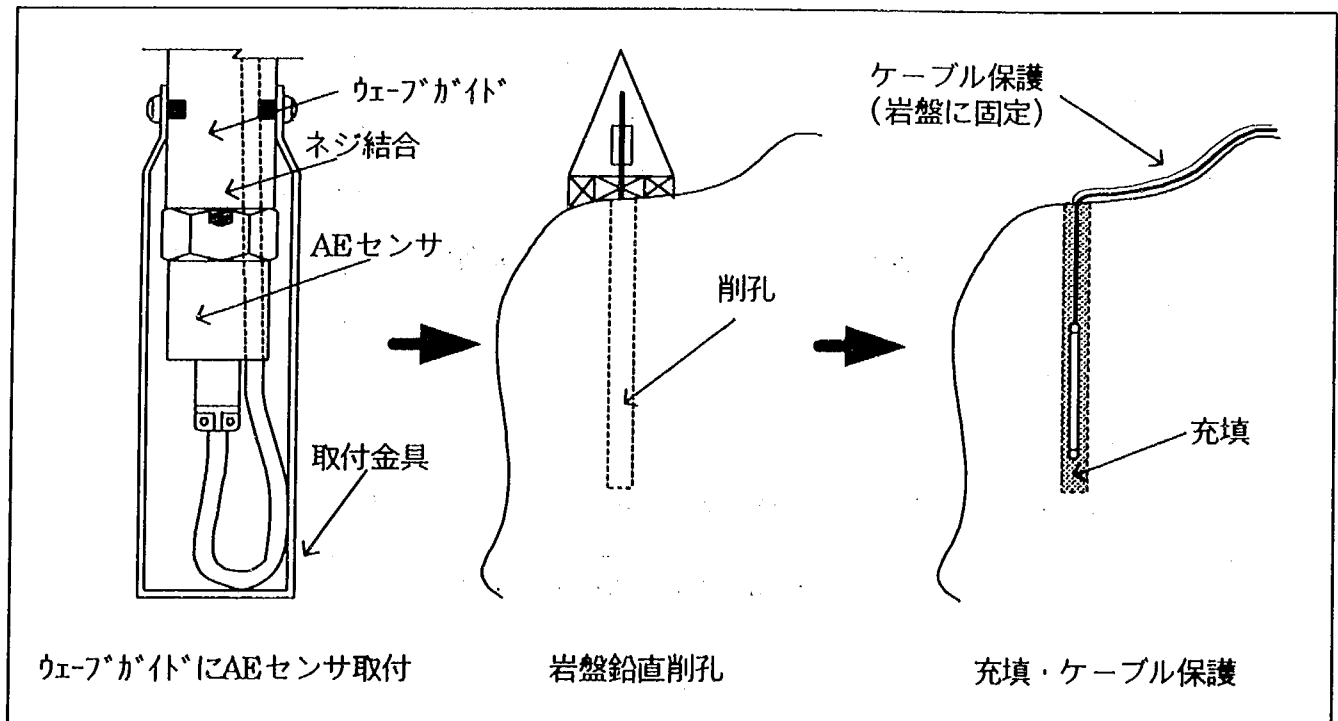


図-6.1.7 鉛直削孔・孔内設置の手順

6.2 AE 計測システム

6.2.1 システム構成

(1) 基本構成

現在 AE 計測装置として、単機能型からコンピュータ制御の万能型まで、多種多様な製品が市販されている。しかしながら、その最も基本となる構成はいずれの装置でも共通であり、そのブロック図を図-6.2.1 に示す。すなわち、(a)AE 波を電気信号に変換する AE センサ、(b)AE センサの近くに設置し、増幅やインピーダンス変換を行うプリアンプ、(c)AE 計測装置本体にあり、信号を増幅するメインアンプ、(d)振幅、エネルギー、到達時刻などのパラメータを抽出するパラメータ抽出部、(e)抽出されたパラメータや外部入力パラメータを用いて演算を行う演算部、(f)得られた結果を出力する出力・表示部からなっている。このほか、周波数帯域を制限するためのフィルタ、波形表示装置、波形記録・記憶装置、パラメータ記憶装置などが組み込まれる。今回の計測では、現場での操作性および設置条件等を考慮し、上記の(a)および(b)を一体化した、プリアンプ内蔵型 AE センサを使用した。

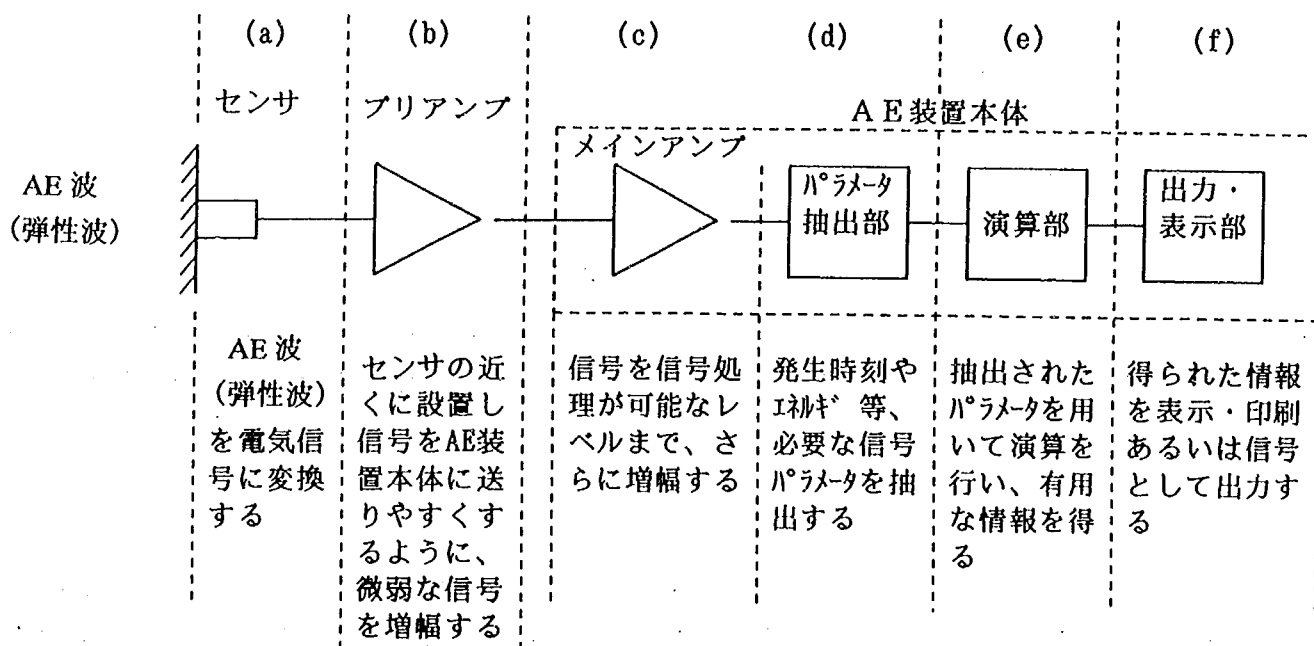


図-6.2.1 AE 計測装置の基本構成とその性能

(2) データ解析項目

1) AE 信号処理パラメータとデータ解析法

本計測で用いた AE 信号処理パラメータは、カウント、エネルギー、ヒット数、AE 信号の最大振幅値(振幅分布)、信号立上り時間、信号継続時間、AE 発生位置等であった。計測システムでは、さらにひずみ計、変位計、温度計などのアナログ信号を入力し、デジタルデータとして収録できる。これらパラメータの持つ意味と特徴を以下に示す。

・カウント (Count):

しきい値を越えた AE 波の振動回数をすべて数える。事象の振幅の重み付けとしての意味を持つが、AE 波形は、

伝播媒体やセンサの周波数特性に大きな影響を受けるため、そのカウント数もこれらに強く依存する。AE 発生箇所および計測箇所が同じ場合には、一般にカウント数の大きなものほど大きいエネルギー（最大振幅値）を持つと考えてよい。

・エネルギー (Energy) :

発生した AE 事象のエネルギーを相対的に比較するのに最適なパラメータである。一般的にカウントと類似した挙動を示す。高周波用 AE 計測装置の場合、入力した AE の包絡線検波波形の面積と定義される。便宜的に 10V のピーク値が 1 ミリ秒続いたときの波形、すなわち高さ 10V、長さ 1 ミリ秒の矩形波が入力したときに 1000 カウントのエネルギーを持つと定め、これを参照値として用いている。一方、低周波用 AE 計測装置では、最大振幅値の 2 乗(V_p^2)、あるいはこの値に継続時間を乗じたものから一つを選択してエネルギー値と定義している。

・ヒット (Hit) :

センサに入力した AE 信号波の1かたまりを 1 ヒットと数える。従って、発生した AE 事象が一個であっても複数個のセンサに信号が入力される場合、その個数分だけヒット数が計測されることになる。き裂発生など突発型 AE 事象を生ずる AE 源の発生頻度や発生形態を知るのに適したパラメータである。ただしヒットそのものは入力した信号のエネルギーには全く関係しないため、発生した AE エネルギーの比較を行うのには不向きである。

・最大振幅値 (Amplitude) :

AE を生じた事象がセンサに与える振動の大きさ、すなわち地震の震度に相当する情報を与える。統計的処理を施すことにより振幅分布が得られ、発生した AE 事象間の相対的エネルギーレベルの比較が行える。これを用い、異なる AE 発生機構を識別できる場合がある。また、振幅分布上において、直線部を外れる領域にみられる高振幅事象の連続発生は、き裂の成長などに対応している可能性がある。このように最大振幅値は AE 事象の危険度を知る重要な尺度である。

・立上り時間 (Rise time) :

信号が入力したとき、最初のしきい値クロス時から最大振幅値にいたるまでの時間のことである。各信号の立ち上がりの鋭さに関する情報を与える。この情報をもとに、本来の AE と機械的及び電氣的ノイズなどの識別を行える場合がある。

・継続時間 (Duration) :

信号入力時、最初のしきい値クロス時から最後のしきい値クロス時までの時間、すなわち 1 ヒットの継続時間と定義される。この値と信号立ち上がり時間及び最大振幅値を総合して、入力した信号のおおまかな波形に関する情報を得ることができる。この情報をもとに、異なる AE 発生源を識別できる場合がある。

・位置標定 (Location) :

センサ間の信号到達時間差をもとに AE 発生源の位置を求めることができる。通常、直線標定の場合には、2 個、また平面標定の場合には 3~4 個のセンサでグループをつくり解析を行う。グループ内のセンサ全てに信号が入力

したときに初めてこうした計算が可能となり、AE イベントが発生したと見なされその発生位置を標定することができる。従って信号が小さくグループ内のセンサ全てがそれを検出しないときには、この方法で位置を決定することはできず、またきわめて短時間内に集中して AE が発生する際には計算結果が混乱するなど、不都合の生ずる可能性がある。このような場合には、センサ間信号到達時間差に基づかない、例えば各センサーごとに監視領域を設定するゾーン標定法などを用いる必要がある。

・アナログ入力：

ひずみ計、変位計、温度計などのアナログ信号を入力し、デジタル信号として記録する。

上記に示される、カウント数、エネルギー、ヒット数、最大振幅値の時間履歴等をリアルタイムでもとめ、AE 発生挙動を監視した。さらに必要な場合には、ポスト処理として、フィルタリング（しきい値の変更あるいはノイズの除去）を行ったデータについて解析した。

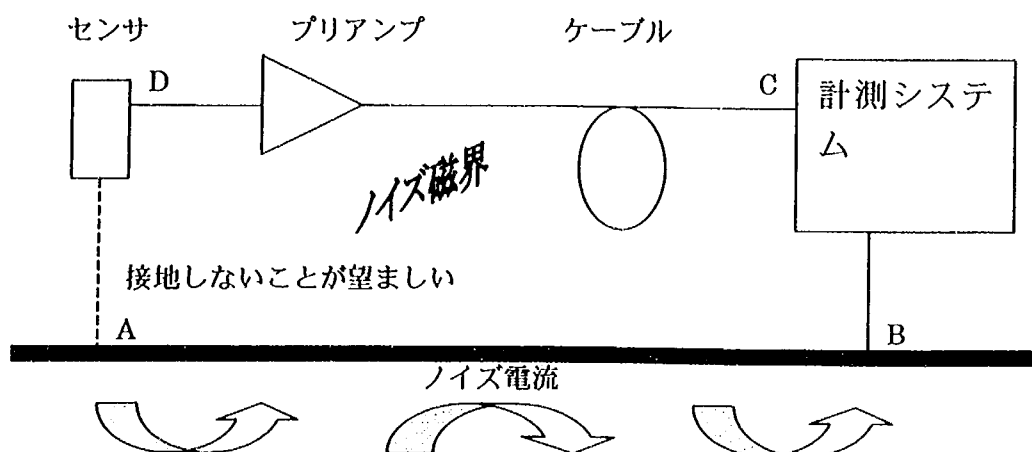
6.2.2 ノイズ及び電源対策

(1) ノイズ対策

ここでは、AE計測を行う上で障害となる電気的なノイズについて考察する。それ以外のノイズ、例えば雨風等に起因するノイズについては触れない。電気的ノイズの混入経路は、以下に示すように大別して3種類ある。

1) 電源から混入するノイズ

AC100Vの商用電源を介して混入するノイズである。最近ではスイッチング電源を搭載する機器が増えており、その影響で商用電源はパルス状のノイズが混入したり、波形がひずむ等、純粋な正弦波とは言いがたい状況になる。パルス状のノイズはノイズフィルタトランスやAE計測装置に内蔵されているラインフィルタ等である程度除去することができる。



センサを接地した場合、A B C Dで囲まれるループを磁界が横切るとループ（ノイズ）電流が流れる。また、地面にはいろいろなノイズ電流が流れているためA点とB点で電位が異なる

図-6.2.2 アース電流とループによるノイズ

2) 空中を伝播する電波によるノイズ

放送局の電波や、動力機械からの電磁波等、屋外には空中を伝播するノイズが多い。これらのノイズがAE計測機器のケーブルに混入する場合がある。特に屋外計測ではプリアンプ内蔵センサから計測装置本体までの距離が百メートル以上になることもあるので空中からのノイズが混入しやすい。通常同軸ケーブルを使用しているので混入するノイズはかなり少なくなるが、それでも完全に遮断することは難しい。

電磁波が導体に混入する度合いは、信号系が作るループの大きさに比例する。信号のリターンを地面に通さないこと、すなわち全て同軸ケーブルのコモン側（シールド線）から戻すようにすることが重要である。このためにはセンサを地面から電気的に絶縁することが効果的である。（図-6.2.2 参照）

また、AEセンサのケーブルをノイズ発生源となる他の電線と一緒に束ねると、容量結合によってAEケーブル

ルにノイズが混入するので、注意が必要である。

3) アース電流によるノイズ

地面には、極めて多くのノイズ電流が存在する。従って計測システムの2点以上を接地すると、この影響を受ける。前述のようにセンサと計測器の間が一番離れているので、両者をそれぞれ接地すると地電流の一部がケーブルを流れ、ノイズとなる。これを防ぐためにはどちらかを絶縁すればよいが、一般的に計測器側は絶縁するのが難しい。直流的に絶縁できても浮遊容量（コンデンサ）を介して交流的には導通してしまうからである。このため、センサを絶縁するのが効果的である。

(2) 電源対策

長期計測を行う上で重要なのが、停電を含む商用電源の瞬断対策である。最新の AE 計測装置はマイコンを搭載し、パソコンと連動して動作するものが多いので、電源の瞬時の供給停止によって、ハングアップ等の重大な結果を招く。これらの対策としては無停電電源を使用する。

無停電電源を使う上で注意すべきことは、バッテリーが常に充電されていることの確認である。市販の無停電電源の中には、動作中（給電中）は充電できなかったり、商用電源（入力電圧）が少し下がっただけで充電できなくなるものがある。

無停電電源の機種を選択する場合には、方式にも注意すべきである。正弦波の常時インバータ方式が望ましい。出力電圧が方形波のものは、安価ではあるがノイズを発生し易い。また、常時商用電源方式は、停電時の切換えにわずかではあるが空白時間がある。

6.2.3 ノイズによる信号の特徴

(1) 高周波センサの電氣的ノイズによる信号発生状況

電気ノイズによる検出信号の特徴を調査するため、雨、風、雪など気象条件の影響を全く受けないように、計測小屋に参照用 AE センサを設置して、連続計測を行った。

図-6.2.3 に、日光における 50 日間にわたる冬季期間の計測において、高周波参照用センサ(ch-1) で検出された AE 信号の解析結果が与えられている。図中で、

図番-1, 5 AE 振幅値の履歴

図番-2, 6 立ち上がり時間 vs 継続時間 (相関図)

図番-3, 7 振幅分布

図番-4, 8 AE 振幅値 vs 継続時間 (相関図)

が解析されている。ここで、X 軸をなす時間の最大値は 4,320,000 秒 (50 日)、また計測しきい値は 32dB である。参照用センサ(ch-1)で検出されたヒット信号の総数は約 1,300 で、穿孔内設置の ch-3 および表面設置の ch-5 (検出したヒット信号の総数はそれぞれ、ch-3 で約 60,000、ch-5 で 1,800,000) と比べると、その総数の約 2.2%、0.072%、であった。図番-4 の AE 振幅値 vs 信号継続時間の相関図を見ると、振幅値 32~70dB 及び信号継続時間 2,000 マイクロ秒以下の領域で、明らかに特徴的な集中分布が観察される。参照用センサはゴム粘土で保護され、計測小屋の中に設置されている。したがって、このセンサで検出される AE 信号は、気候の変動など外部ノイズの影響はほとんど受けず、その大部分は電気ノイズによるものと考えられる。また図-6.2.4 に ch-3 (穿孔内設置センサ) で検出された AE 信号の解析結果が与えられている。図番-8 に示されるように、AE 振幅値 vs 信号継続時間の相関図において、前述したような参照用センサで得られた特徴的な集中分布は全く認められず、データはグラフ内全域にわたり広く分布している。これより、実際に岩盤に設置したセンサ、すなわち ch-5 及び ch-6 において参照用センサで検出された特徴を持つ信号を除去することにより、電気ノイズの影響を受けない AE 検出信号の解析を行えるものと考えられる。

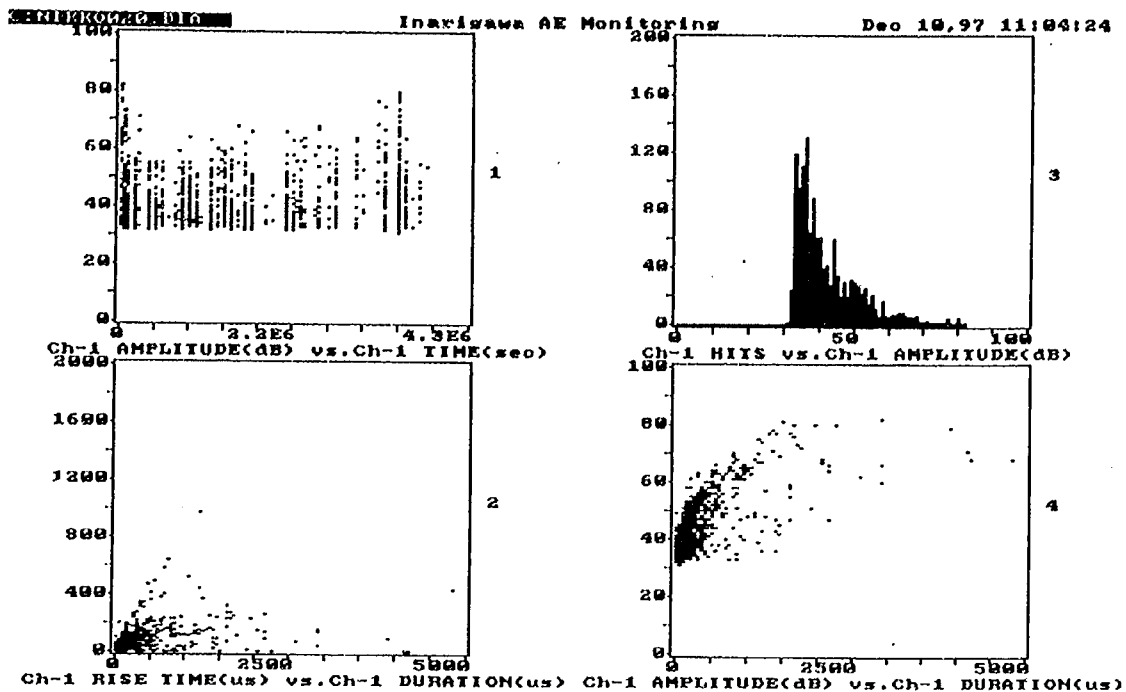


図-6.2.3 高周波参照用センサ(ch-1)で検出された AE 信号の解析結果

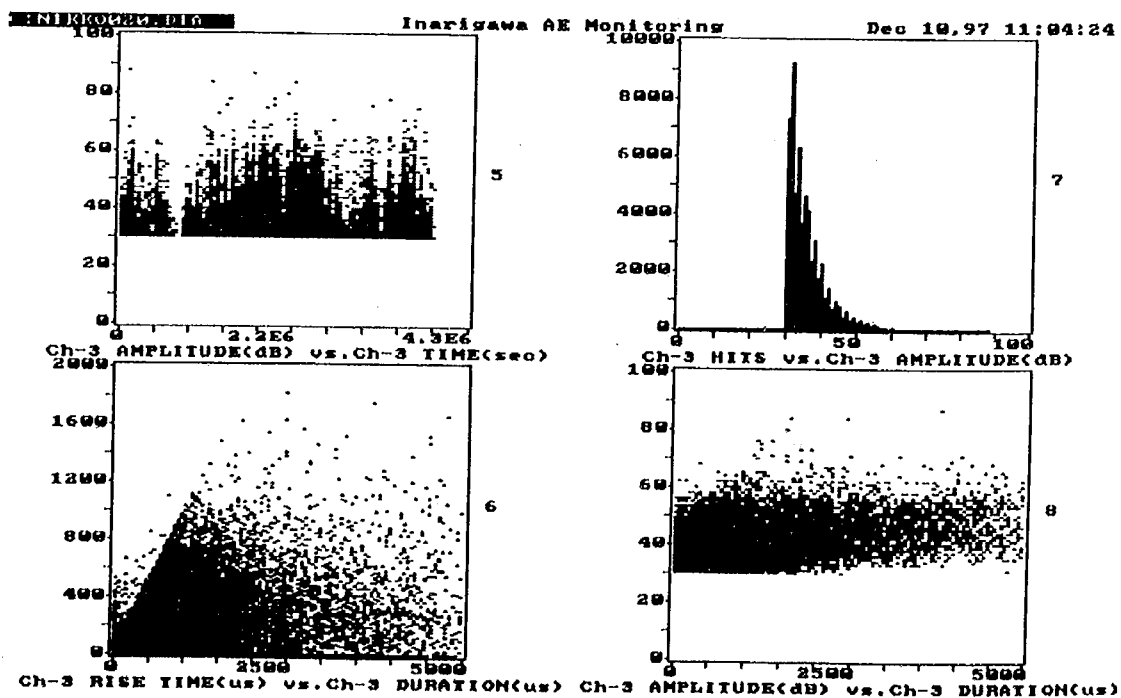


図-6.2.4 穿孔内設置センサ(ch-3)で検出された AE 信号の解析結果

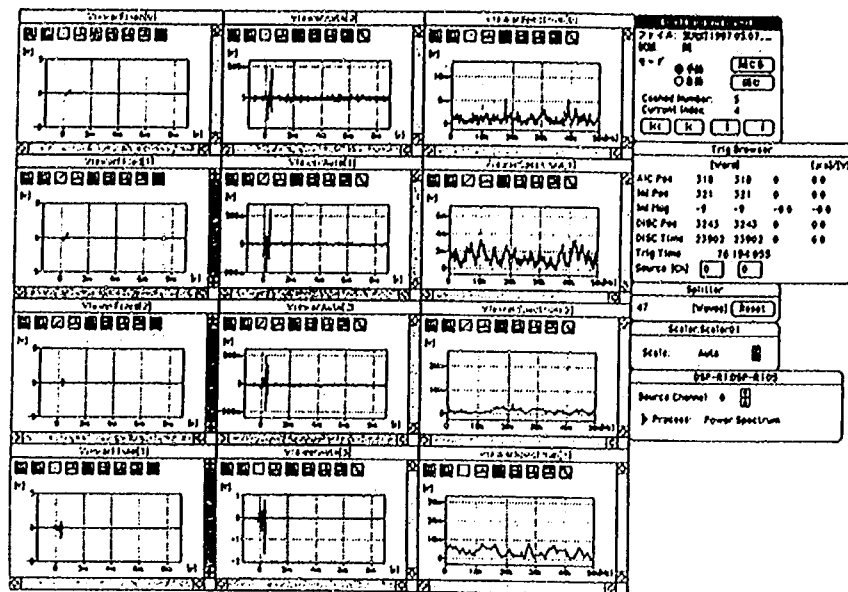


図-6.2.5 蛍光灯オン・オフ時のノイズ波形

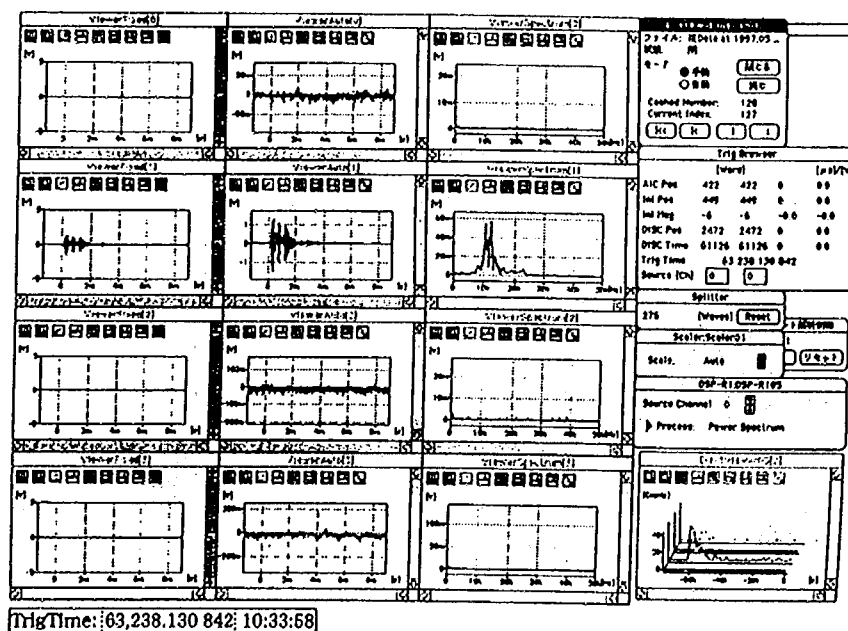


図-6.2.6 通常計測時の AE 波形

(2) 低周波センサの電氣的ノイズによる信号発生状況

1) 電気ノイズの波形例

計測小屋の蛍光灯をオン・オフした時の波形例を図-6.2.5 に、さらに通常計測される突発型 AE 波形例を図-6.2.6 に示す。一般に電気ノイズはインパルス状で持続時間が短く、周波数範囲が広いとされている。また、き裂の進展などによる本来の AE や雨風などの機械的な要因で発生するノイズが特定のセンサにおいて検出されるのに対して、電氣的なノイズは全チャンネルで同時に発生する。蛍光灯のオン・オフによるノイズは、空中および電源を介して伝播すると考えられる。

2) 電気ノイズの実際

① 長いウェーブガイドのノイズ

日光における計測においてセンサ設置の際、ch-1 と ch-2 は、ノイズレベルが高く、しきい値を高くせざるを得なかった。ch-1 と ch-2 のセンサは、2m のウェーブガイドの両端に取付けられ、地中に埋められている。他のチャンネルに比べてノイズが多かった理由は、以下の2つが考えられる。

- ・ 2つのセンサがループを形成していたため、電磁誘導の影響を受け易くなった。
- ・ ウェーブガイドの長さが他のチャンネルより長く、かつ地中深く埋めたためにセンサ部での接地が完全となり、グラウンドループができた。

このため、計測を開始した直後の約 8 日間に大量のノイズデータが検出され、やむを得ずこれら 2 つのチャンネルのしきい値を他のチャンネルより高く (2~2.5 倍に) した。

② 無停電電源から接地 (アース) を経由したノイズ

日光において AE 計測を開始して約 2 ヶ月後、ch-3~6 で大量のノイズが検出された。観測小屋の移設に伴い、配線のやり直しを行ったが、その時のアースの接続が適当でなかったことによると思われる。すなわち無停電電源のノイズが接地回路を介して受信されたと推察される。この場合もセンサが電氣的に接地されていなければ、アース回路が形成されず、従ってノイズも拾わなかったと思われる。現に参照用のセンサは屋内に電氣的にも機械的にも絶縁された状態で置かれていたが、ほとんどノイズを拾っていない。

ちなみに参照用のセンサは屋内に移してからは、ほとんどノイズを検出していない。他のチャンネルが数千カウントしている時でも、数カウントに止まっている。このことは、電源や空中を介して混入するノイズは、極めて少なかったことを意味している。

③ 原因と対策

以上示したように、電気ノイズの影響は、屋外の AE 計測に限っては接地ループの影響が最も大きい。日光の対象斜面は山間部にあるため、周囲に電氣的なノイズが少なかったため短いウェーブガイドやセンサの直付けでは比較的影響が少なかったが、ノイズ源の多い市街地で計測を行う時はセンサの絶縁は不可欠である。絶縁型のセンサを使うことが望ましいが、非絶縁型のセンサを使わざるを得ない場合は、絶縁板やビニルテープによって電氣的な絶縁を施す必要がある。今回の計測では、コストの面から非絶縁センサをそのまま使用した。

④ データ欠落の原因

今回の連続計測で、低周波のデータは 3 回欠落した。その原因は以下の通りである。

- 計測装置 1 台の電源スイッチが 17 日間にわたりオフになっていた。計測小屋の内部は狭いので、作業員が誤ってスイッチに触れ、電源がオフになったものと思われる。対策として電源スイッチの周りにガードを付け、人や物が触れてもスイッチがオフにならないようにした。
- 計測小屋の移動に伴い、電源の配線を再度行ったが、その時にパソコンの電源を無停電電源の前から取った。このため、28 日間パソコンに関して無停電電源の保護を受けることができず、この期間に発生したと思われる電源の瞬断でパソコンがハングアップした。

- c. ケーブル工事に伴う停電の際、無停電電源のスイッチをオフにしておかなかったため、バッテリーが放電してしまった。これに気がつかなかったため、7日間にわたりパソコンがハングアップした。

上記以外に、15日間にわたり電氣的ノイズのために無意味なデータを多量に取り込み、事実上データ欠落と同じ状況にいたった期間があった。

(3) ノイズ発生経緯

木更津の計測では、事前に電源の対策は十分に行ったため、電源によるノイズ（瞬断を含む）の影響はほとんどなかった。

センサについては、当初非絶縁型のものを準備した。なぜなら前述の理論は既知であったが、同時に進行中の日光における計測で非絶縁型のセンサを使い、特に問題が無かったからである。むしろ実績があるという理由で積極的に同じものを使うことにした。しかしながら、木更津ではセンサを地面に接触するとノイズは2～3倍に増え、埋め込み済みのウェーブガイドに接触すると6～7倍に増えることが明らかになった。

(4) ノイズ発生原因

日光の計測現場はノイズ源の比較的少ない山間部にあるが、木更津の場合市街地にあり、従ってノイズを与えるアース電流も格段に多いと推定できる。このため、アース電流による影響が顕著になったと考えられる。また、日光のウェーブガイドは高々30cm程度であるのに対し、木更津では3m以上あり接地がより完全になった。これらの理由により、センサ接地によるノイズが増えたものと考えられる。

(5) ノイズ対策

上記経過からして、センサを絶縁型にするのが最良の対策であることは言うまでもない。しかしながら、すでに非絶縁型のものを選択してあったため、ウェーブガイドとセンサの間に絶縁板を挿入し、接着剤で固定した。またセンサ自身もビニルテープを多数回巻き付け地面から電氣的に絶縁した。

これとは対照的に、計測器側はアース棒により、積極的に接地した。これらの作業によってノイズレベルが下がり、しきい値をセンサ出力換算で40 μ Vに設定することができた。ただし、その後風雨等、電気以外のノイズの影響で信号検出数が増えたためしきい値を高く設定した。

6.2.4 現場計測での問題点と今後の改善策

本計測で使用した AE 計測システムは元来室内での実験を対照として設計されたものであるため、今回のような現場での計測には不十分な面がある。改善すべき点について以下に示す。

(1) 通信機能

本計測では、データを定期的に計測場所まで収録に行った。計測場所が山間部のため、かなりの手間を要した。公衆回線を使った通信機能があれば、遠隔操作によりデータを回収できる。市販のソフトウェアを使って実現することも可能であるが、通信中はデータの収録が中断するため、データ量が多くなると支障をきたす。また転送速度も遅い。したがって、専用のシステムを開発することが望まれる。携帯電話や衛星電話の利用も視野に入れてシステムを構築すべきである。

(2) 電源対策

本計測でも無停電電源を使用して一応の対策は行ったが、十分ではなかった。無停電電源はシステム毎に別の物を使い、AE装置の点検時に無停電電源のチェックも行えるようにすべきである。今回の低周波計測用の無停電電源はビデオ等、他の装置と共通に使用していたため、これら計測中の装置への影響を考慮して、無停電電源の動作チェックはできなかった。たとえば入力コンセントを引き抜いて無停電電源の動作チェックを行うとすると、異常が実際に生じ計測中の装置がハングアップする恐れがある。また、供給中のバッテリー充電が可能なタイプを選ぶ等、機種を選択も十分考慮すべきであった。定電圧トランスとの組み合わせも今後は十分検討したい。

(3) 自動終了/立ち上げ

本計測では実現しなかったが、電源の異常を含む種々の異常を検知して、自動的に計測を終了し、これらの異常が解除された時に自動的に計測を再開するシステムが望ましい。そうすれば計測中に異常などの不都合があっても、最小限のデータは得られ、異常理由により計測期間のすべてのデータが失われることはない。

異常信号がうまく得られれば、計測を自動的に終了することはそれほど難しくはない。しかし異常状態が解除された後、システムを立ち上げ、計測を継続させることは簡単ではない。例えば通常 Windows95 / 98 では、電源がいったん切れると再びオンになってもシステムが立ち上がらないため、何らかのハード的な改造が必要になる可能性がある。いずれにせよ、自動終了/立ち上げ機能は、将来のシステムには必須になると考えられる。

(4) データのバッファメモリーからの転送機能

人工崩壊実験の際、計測終了後一時的に現場を離れた間に電源が遮断されたため、バッファメモリー内のデータが失われ、十分な解析が行えないという事態が生じた。こうした問題を防ぐために、現場計測用のシステムにおいては、データ取得後できる限り速やかにバッファメモリーからハードディスクなどの外部記憶装置にデータを転送する機能を有する必要がある。

(5) 現場でのセンサ感度等の確認

現場計測において特に問題となったのは、長時間にわたる連続監視中に、如何にして各センサの動作を確認し、また所定の感度を保持しているか否かを調査する方法についてである。これらを行うには、適切な擬似 AE 発生源を用いて人工的に AE 信号を発生させ、それを AE 計測装置で検出する必要がある。しかしながら、岩盤斜面や土

砂斜面のような現場に対応可能な人工 AE 信号を発生可能な信頼性の高い疑似 AE 発生源は、現在のところ存在しない。今後、岩盤あるいは土砂内において、発信する弾性波エネルギーが調節可能で安定的に操作可能な人工 AE 発生源（小規模発破、あるいは高出力圧電型バルサー等）の開発が、強く望まれる。

（6）波形解析等による有効信号の抽出機能

今回の計測では、長期現場計測においては有効な AE 信号の他に、電気ノイズや雨、雪、雷さらに風等の気象条件に依存する環境ノイズが多く検出されることが明らかになった。したがって、有意な信号をこれらのノイズから分離するのに、リアルタイムあるいはポスト処理的に両者を識別可能な機能を持つソフトウェアを備えた AE 計測装置が必要である。さらに、AE 波形を直接観察することは本来の AE 信号とノイズなど、発生要因の異なる AE 信号を識別するのに有効と考えられるので、将来的に現場で使用する装置は、必要に応じて波形信号を取り出し、通常の AE パラメータデータと分離して解析可能な機能を持つシステムであることが望ましい。

6.2.5 野外計測用絶縁型 AE センサの開発

（1）経過

木更津市における計測では土砂斜面崩壊実験の AE 計測を行うために、ウェーブガイド上に高周波 AE センサを設置した。計測に用いたウェーブガイドは、長さ 300cm のステンレス棒（通常型）と、耐圧ホース内に銅メッキしたアルミニウムワイヤを渦巻状にして芯線として固定し、空間部をステンレススチール綿で埋めた土研式の 2 種類である。

センサの設置時に、通常型ステンレス製ウェーブガイドにセンサを直接取付けたところ、極めて高振幅の電気的ノイズが連続的に発生したため、ウェーブガイドとセンサの間に、絶縁材としてアクリル製小板をはさみ込んだ。こうするとこうしたノイズは、ほとんど検出されなくなった。以後、実験終了に至るまで計測に支障となるような電気ノイズは、ほとんど検出されなかった。

一方、土研式ウェーブガイドにセンサを直接取付けたところ、ステンレス製ウェーブガイドの場合に見られたような、電気ノイズは取付け当初は検出されなかった。しかしながら、時間の経過とともに電気ノイズが徐々に検出されるようになり、センサ設置後 2 日経過した時点で、極めて大振幅のノイズが連続的に検出される事態に至り、通常の AE 計測が全く行えない状態であることが確認された。このため、土研方式のウェーブガイドに直接取付けられた 2 個のセンサ（ch-5 と ch-6）は破損したものと判断され、新しいセンサをアクリル製小板をはさんで、設置し直した。設置後しばらくの間は、電気ノイズはほとんど検出されず比較的順調に AE 計測が行われたが、設置後 1 週間程度経過すると再び電気ノイズによる多数の大振幅 AE が発生するようになり、通常の計測が行えなくなった。このため 後日、センサの再設置が可能な ch-5（ch-6 は危険なため、センサの再設置は不可能と判断された。）のみについて、破損したセンサを新しいセンサと交換した。

(2) 对策

破損した AE センサを製造元に送り、内部を調査したところ一部コンデンサが破損していることが確認された。破損の原因としては、過大負荷が連続的に加かったためと推定された。

破損の原因となる過大負荷を生じた要因としては、

- ・異種金属間（センサのケースはステンレス製であり、一方ウェーブガイドの芯線は銅メッキしたアルミニウムワイヤである。）で局部電池が生じたことに起因する電位差
- ・地電流の影響
- ・防水性の不備

などが考えられる。しかしながら、その原因について特定することは困難であった。いずれにせよ、外的要因で生ずる過大電流、あるいは電位などに起因する破損は、センサの防水特性を向上させること、及びセンサを絶縁型とすることにより防止することが可能と期待される。したがって、岩盤崩壊及び土砂斜面実験等の使用環境を考慮し、図-6.2.7、及び表-6.2.1 に示される仕様の絶縁型 AE センサを新たに開発した。

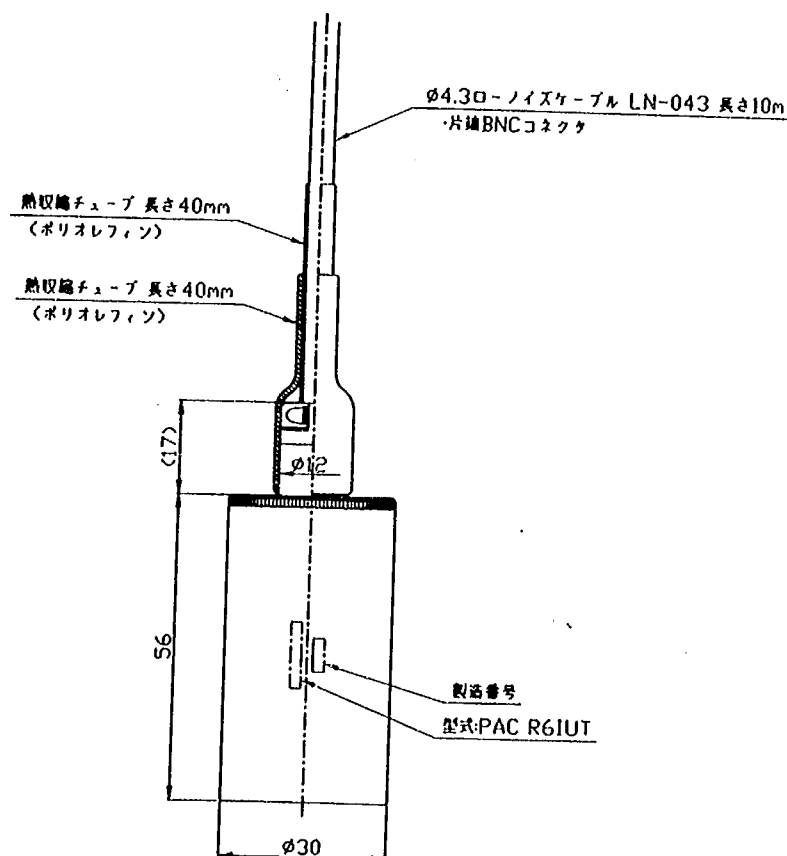


図-6.2.7 新たに開発した高周波 AE センサ外形図

表-6.2.1 新たに開発した AE センサの仕様

項 目		単 位	規 格	備 考
1	感度 So	dB	115 ± 5	0dB=1V/m/s at.fo.絶対感度簡易更正法による
2	共振周波数 fo	kHz	60 ± 20%	
3	絶縁抵抗 IR	M Ω	1000 以上	at. DC 500V、ケースフロート間
4	出力インピーダンス Zo	Ω	50	
5	使用温度範囲 Tb	℃	-20 ~ +80	
6	本体質量 Wt	gr.	約 150	
7	内蔵プリアンプ駆動電源	V	電圧 +28V、50 Ωにて駆動	
8	検出方法	—	圧電型、40dB プリアンプ内蔵、シングルエンド出力	
9	本体構造	—	ケーブル上直出し、防水構造(JIS C0920 IPX7に準ずる)、耐水圧 6 気圧、ケースフロート	
10	外形寸法	mm	φ 30 × 56(H)	
11	外装ケース材質	—	ステンレススチール(SUS-303)	
12	彫刻表示	—	円筒面に表示 型式 "PAC R6IUT"、製造番号・4桁連番 スミ入 黒	
13	ケーブル	—	φ 4.3 ローノイズケーブル LN-043(FEP/ETFE/PVC 黄)長さ 10m、片端 BNC コネクタ	
14	出荷試験項目	—	1・2・5 各項全数 水圧試験(6 気圧水中にて 4 時間)及び 1m 金属棒に装着し、電源作動状態にて水中 24 時間放置後、全数測定	

6.3 AE データの解析と評価

6.3.1 斜面変状の経時変化のモニタリング

(1) 改良 b 値による評価

1) はじめに

AE 振幅分布は AE 計測により得られる AE 波の最大振幅値の頻度分布のことであり、詳細には振幅規模別頻度分布と呼ばれる³⁾。振幅規模別頻度分布の勾配は、 b 値、 m 値として知られ、AE 信号の最大振幅値は、AE 発生源での破壊の規模に応じて大小の振幅値が得られるとされている。得られる振幅値のみに注目し破壊を評価することは AE 波の種類が不明確であり一意的に判断できない。しかし、波の種類がいずれにせよ、検出された AE 波の振幅値は励起させた実体波のエネルギーに依存することから、相対的に最大振幅値は AE 発生源の規模を代表しているパラメータと考えることができる⁴⁾。ただし、最大振幅値そのものを議論し、AE を発生させた系の破壊の規模を論じる例は少なく、一般には「振幅規模別頻度分布」と呼ばれる、各振幅値ごとの頻度として取扱われている。また、その分布の勾配は微分型あるいは積分型に分けられ、それぞれ m 値、 b 値として知られる。これらの定義は次のようである。ある地域、ある期間にマグニチュード M の地震が発生する回数を N とするとき、マグニチュード M と累積頻度 N との間に Gutenberg-Richter の式と呼ばれる次の統計則が成立つ。

$$\log_{10} N = \alpha - bM \quad (6.1)$$

α と b は定数で、通常 b は 1 に近い値をとることが多い。地震学においては式 (6.1) 中の定数 b の値が、前震について一般の地震の値より小さい傾向が指摘されている。この b が「 b 値」である。 b 値は地震動の最大振幅とその度数分布を表す有用な指標として多くの地震学の書に「地震学的先行現象を評価し得るもの」として紹介されている^{5), 6), 7)}。

また、 m 値は石本-飯田式^{8), 9)} と呼ばれる以下の式で定義される。

$$n(a) = ka^{-m} da \quad (6.2)$$

ここで、 a は 1 現象の最大振幅、 $n(a)$ はその最大振幅値が a から $a+da$ の間の規模であった現象の発生頻度であり、 k 、 m は定数とされる。その後の研究から式 (6.1) と式 (6.2) は同値な式であることが認められている。実際、式 (6.1) を積分することで式 (6.2) は導くことができ、 b と m には以下のような関係が成立する。

$$b = m - 1 \quad (6.3)$$

これらの式の意味としては、図-6.3.1 のように、あるマグニチュード M 以上の地震発生総数 N の対数とマグニチュード M をプロットすれば、ほぼ一直線で近似でき、傾きが $-b$ と負であることから、大きな地震現象は数少なく発生し、小さな現象は数多く発生することを意味している。地域により b 値は異なるが、地震個々のエネルギーが有限であると考えれば、この関係はほぼ成立するものと考えられる。

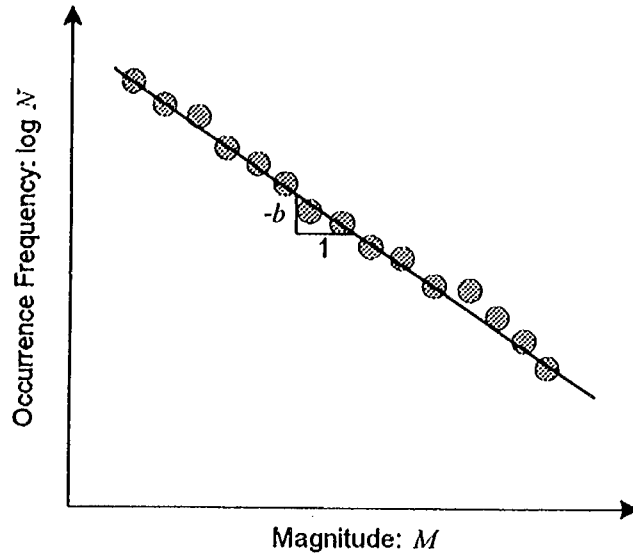


図-6.3.1 地震のマグニチュードと発生度数との関係

2) 改良 b 値

既往研究より報告される b 値ならびに m 値は、ほとんどの場合に単位時間あたりの振幅頻度より算出されており、算出に用いた振幅値の母数や振幅範囲が不明確である。また、AE の最大振幅値に与える影響因子として、AE センサーの取付け方法、媒体による AE 波伝播減衰の違いなどがあげられ、さらには AE 源がいつも同一場所に発生するとは限らないので、その発生源により振幅値の広がりが大きくなることもある。したがって、地震学の成果は、そのまま AE 法に適用するのは困難であると考えられる。AE が対象とする破壊現象は、地震に比べきわめて短時間に集約されることから、計測時間とともに刻々得られる AE データに基づき即座に b 値を算出し、破壊の定量化を行うことが必要不可欠となる。

これらのことから、AE 計測に基づく振幅頻度分布より b 値ならびに m 値を算出する場合、算出振幅母数と算出振幅範囲をある程度普遍化させる必要があり、振幅分布の統計諸量に着目した改良 b 値が提案されている^{10), 11)}。改良 b 値の算出法は以下のとおりで、 b 値算出に用いる振幅個数を常に直近の一定個： β とし、振幅分布の平均値と標準偏差に基づき算出振幅範囲を定めている。この算出法により求められる b 値は“改良 b 値: lb (Improved b -value)” とされ以下のように定義される。いま、振幅値が $\mu - \alpha_2 \sigma$ 以上の AE 累積数を $N(w_1)$ 、 $\mu + \alpha_1 \sigma$ 以上の AE 累積数を $N(w_2)$ すると、

$$N(w_1) = N(\mu - \alpha_2 \sigma) = \int_{\mu - \alpha_2 \sigma}^{\infty} n(a) da \quad (6.4)$$

$$N(w_2) = N(\mu + \alpha_1 \sigma) = \int_{\mu + \alpha_1 \sigma}^{\infty} n(a) da \quad (6.5)$$

となる。このとき振幅の範囲は、 $(\alpha_1 + \alpha_2)\sigma$ となるので、 Ib 値は、

$$Ib = \frac{\log_{10} N(w_1) - \log_{10} N(w_2)}{(\alpha_1 + \alpha_2)\sigma} \quad (6.6)$$

で与えられる。

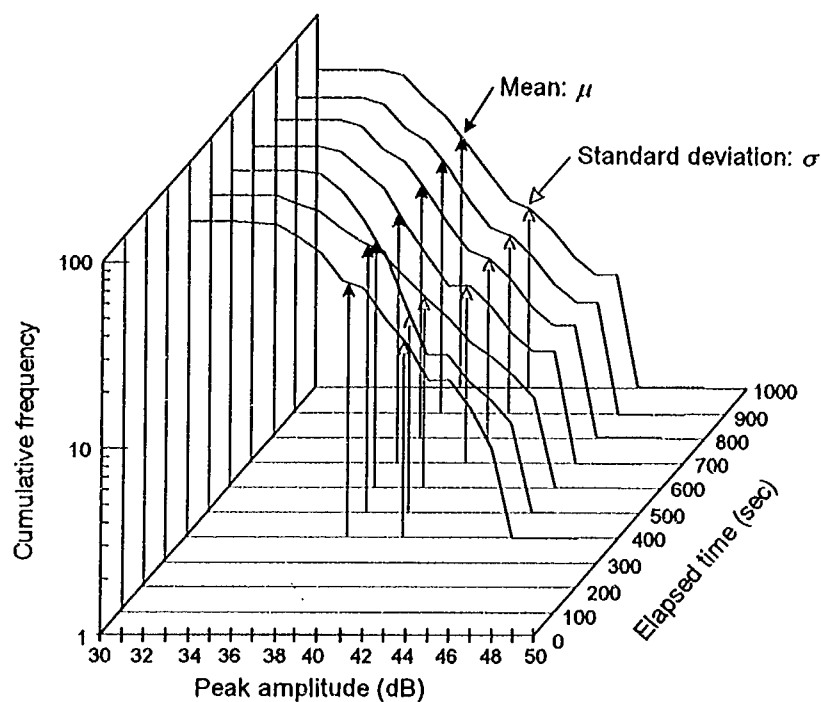


図-6.3.2 斜面載荷実験における振幅分布

図-6.3.2 に模型砂斜面の載荷実験より得られた AE データに基づき、計測時間 400 秒から 100 秒ごとに 1000 秒までの AE 振幅分布を示す。ここで、各分布の母数 (β) は 100 個であり、平均値 μ と標準偏差 σ も併せて記している。同図より、振幅値 $\mu \sim \mu + \sigma$ の範囲における AE 累積頻度がほぼ 1 つの直線で近似できる範囲内にあることがわかる。

図-6.3.3 に振幅個数による相関係数の変化を示す。図の横軸は振幅個数、縦軸が対数軸で直線近似したときに得られた相関係数である。同図から、 b 値算出に用いる振幅個数を 40 個以上とすれば概ね良い相関が得られることがわかる。さらに、振幅値の累積評価による b 値の収束と併せて振幅個数を検討すれば、50~100 個程度が妥当な振幅母数であると判断できる。

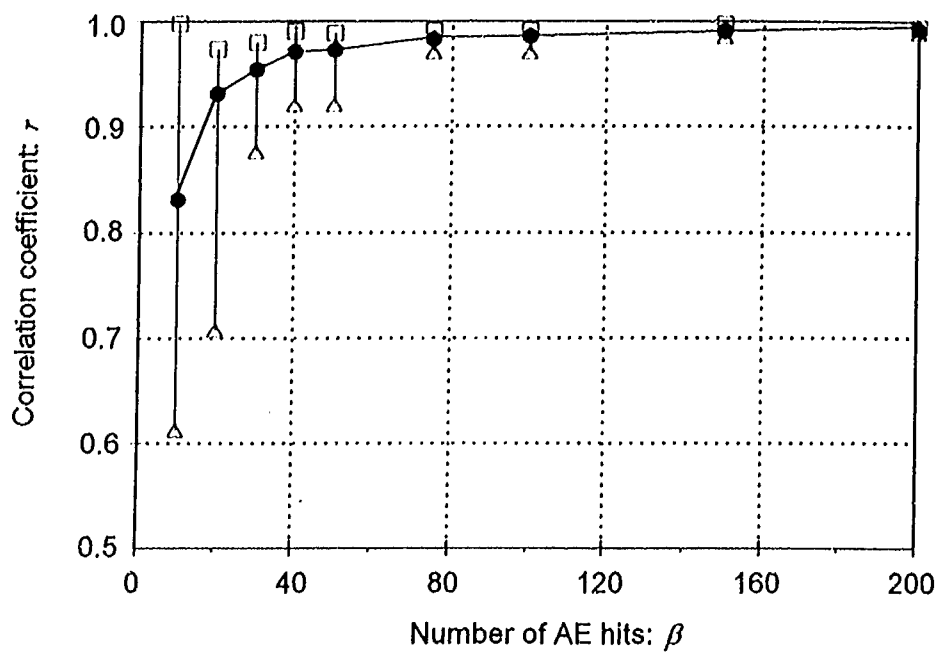


図-6.3.3 振幅個数による相関係数の変化

3) 日光岩盤斜面 AE 計測

① 気象起因による AE の b 値解析

例えば、降雨が岩盤を直撃するときその岩盤への打撃が AE 源となり、近傍に設置した AE センサが降雨により発生した弾性波を検出する場合がある。太陽光が岩盤を照射するとき、岩盤の体積膨張あるいは収縮にともなうマイクロクラックの発生などにより、日射の影響を受ける岩盤計測範囲で AE が発生する場合がある。これらの気象条件に起因する AE は、岩盤表面近傍に AE センサを設置した場合に避けられず、岩盤の破壊による AE と区別する必要がある。気象条件に起因する AE は、その発生要因がある程度限定されることから、 b 値に特徴的な事項が認められる可能性がある。以下に表面設置、および表面削孔に設置した AE センサで得られたデータ（小雨、大雨、日射）より b 値を算出し、その特徴を検討する。

a) b 値解析結果

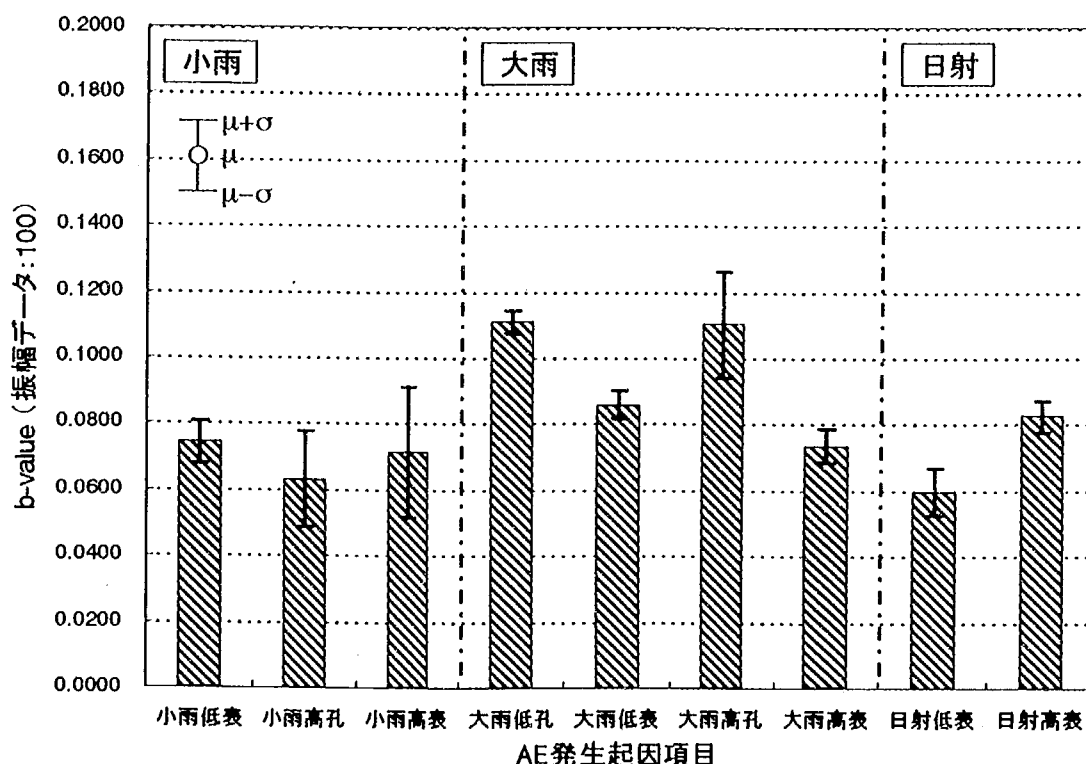


図-6.3.4 降雨（小雨、大雨）、日射により発生したと考えられる b 値

図-6.3.4 に降雨（小雨、大雨）、日射により発生したと考えられる AE 振幅値 100 個に基づき算出した b 値を示す。ここで、各項目の b 値は 100 データ毎に得た値の平均値を棒グラフとして表し、併せて標準偏差が示されている。各項目は順に AE 発生起因/AE センサ種別/AE センサ設置方法を示し、例えば「大雨低表」は、「大雨により発生した AE を低周波 AE センサを用い、岩盤表面に設置して検出した結果」である。同図から、次の事項が推察される。降雨による AE の特徴として、異なる計測装置でも同位置（表面・孔内）に設置した AE セ

ンサにより得られた b 値は、ほぼ同じ値と考えられる。 b 値は、小雨・ AE センサ表面設置で約 0.07、大雨・ AE センサ表面設置で約 0.08、大雨・ AE センサ孔内設置で約 0.11 である。また、日射による b 値は製造会社毎に若干異なるが、高々 0.08 程度である。これらの事項とデータ誤差を考慮すると、0.05~0.11 の b 値は、気象条件に起因する b 値であり、この範囲に含まれない b 値をを検討することで、気象条件に影響しないその他の要因、例えば破壊現象などの追跡監視ができる可能性がある。

② ウエッジラムによる岩盤破壊にともなう改良 b 値解析結果

a) 高周波 AE センサによる結果

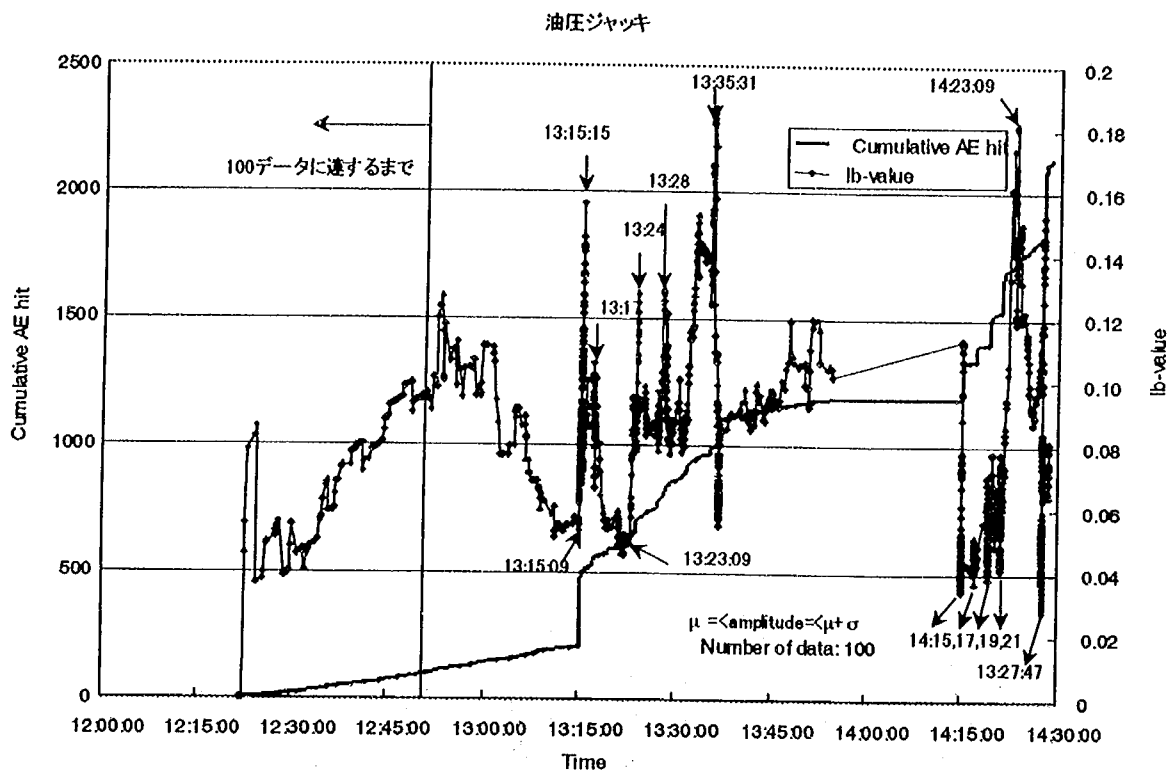


図-6.3.5 高周波 AE センサ (ch-5) で得られた AE 累積発生数と改良 b 値解析結果

図-6.3.5 に日光岩盤斜面のウエッジラム試験時、破壊岩体近傍に設置した高周波 AE センサ (ch-5) で得られた AE 累積発生数と改良 b 値解析結果を示す。ウエッジラムの加圧は、第 1 回が 13:15:00~13:43:32 まで 50 kgf/cm² 毎に 700 kgf/cm² まで 14 ステージに分け、第 2 回が 14:15:00~14:27:12 まで 50 kgf/cm² 毎に 340 kgf/cm² まで 7 ステージに分け実施された。崩壊は 14:27:47 であった。

ほぼ载荷開始と同時に AE の急増、改良 b 値の激増が認められる。改良 b 値は 13:15:15 で最初の最大値約 0.16 をむかえ、直後激減する。その後も载荷に連動した増加あるいは減少を示し、13:35:31 に最大値 0.18 に至り、直後に 0.05 まで低下する。13:35:30 付近は 450~500 kgf/cm² の圧力値に相当し、この時刻以降も引続き圧力増加が行われた。岩盤崩落が認められず、最初の加圧試験により終局破壊に至っていないと考えられた岩体は 14:15:00 から次の加圧試験が行われた。改良 b 値は、加圧ステップに連動し変動するが、その変動範囲は小さく 0.04~0.08

程度である。14:21:00 から 14:23:09 までの加圧、つまり 150 kgf/cm^2 から 250 kgf/cm^2 の加圧により、改良 b 値は急増し、最初の試験で得られた最大値 (0.18) 付近まで上昇する。その後、崩壊直前に再度急増するが、圧力が 350 kgf/cm^2 に至った直後の 14:27:47 に崩落に至った。最終崩壊は、同図上での最後の改良 b 値低下時刻に合致している。ウェッジラムの加圧により以下の現象が岩盤内部に生じたことが推察される。

以上から推察される事項として、対象岩体内部での破壊は初期加圧時 (50 kgf/cm^2) に既に生じ、以降の加圧レベルでは「初期加圧時に生じたクラックが進展する」のみである。AE から判断される対象岩体の終局破壊強度は改良 b 値が最大値を示し、直後に激減した $450 \sim 500 \text{ kgf/cm}^2$ であり、最大圧力 700 kgf/cm^2 は加圧により岩盤が不動岩塊に向い回転していたことから、不動岩塊により発揮された見かけの耐力と考えられる。したがって、岩盤内部には最初の加圧試験で既に破壊が生じていたことから、次の加圧試験では最初の最大加圧力の半分程度の圧力 350 kgf/cm^2 で岩体が崩落したものと考えられる。また、前節の気象条件に起因する AE より算出した改良 b 値が 0.11 以下であったことを考慮すると、改良 b 値の 0.1 以上の上昇は岩盤内部のクリティカルな破壊状態を示す指標といえる。

b) 低周波 AE センサによる結果

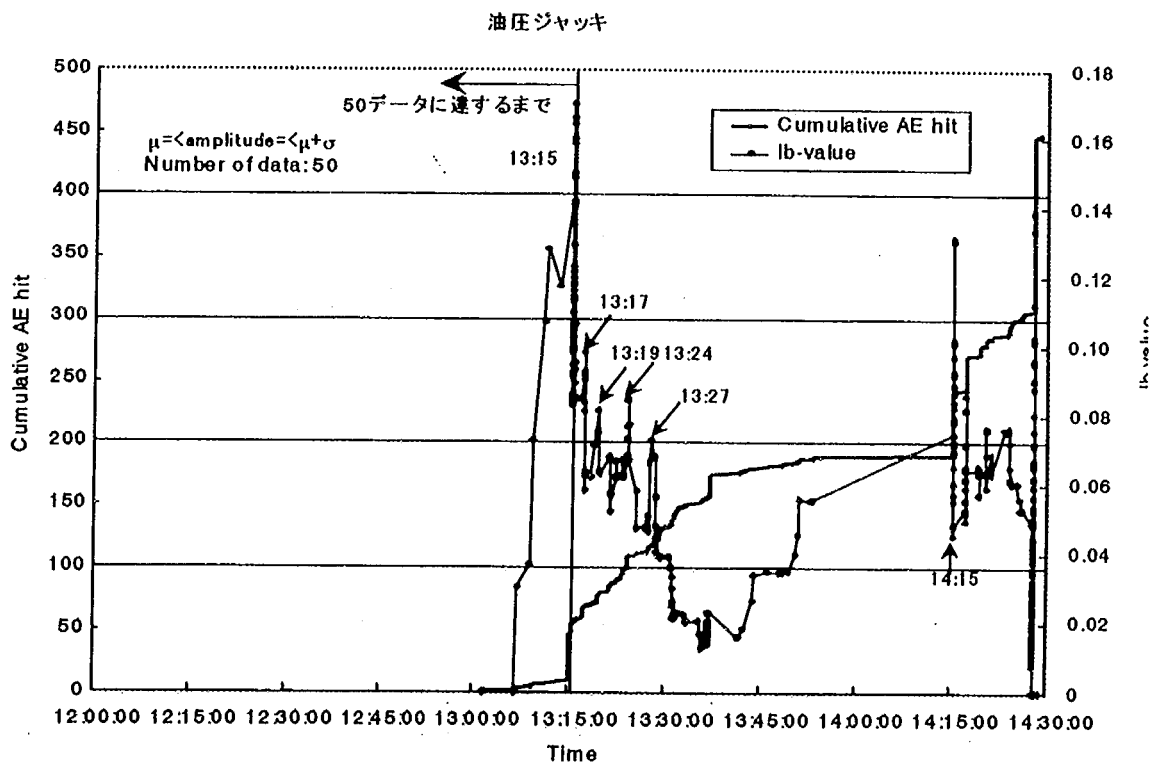


図-6.3.6 低周波 AE センサ (ch-5) で得られた AE 累積発生数と改良 b 値解析結果

図-6.3.6 に日光岩盤斜面のウェッジラム試験時、破壊岩体近傍に設置した低周波 AE センサ (ch-5) で得られた AE 累積発生数と改良 b 値解析結果を示す。なお、同センサは、前節で考察した高周波 AE センサの直近に設

置されており、センサの周波数特性の違いによる AE 特性を検討するために配置されている。ここで、高周波の AE センサは 60 kHz 共振型を、低周波は 20 kHz を採用している。また、改良 b 値算出時の振幅個数 β は、「データ数が高周波 AE センサでの計測結果に比べて少なく、 β を 100 とした場合、13:23 以降が定量的値を与える改良 b 値となり加圧初期の挙動を検討できない」ことから、50 とした。

同図から計測装置、共振周波数は異なるが、低周波 AE センサで得られた改良 b 値の変化は、概ね高周波 AE センサの変化傾向と同様であると考えられる。加圧初期に改良 b 値の急増、直後の激減が認められるほか、2 回目の加圧初期にこそ改良 b 値の 0.13 程度までの増加はみられるが、その後の圧力増で顕著な変化傾向は崩壊まで得られていない。岩盤内部の破壊を示唆する改良 b 値も高周波センサでの検討結果と同様 0.1 を超過する加圧初期といえる。

c) 破壊に無関係な位置の高周波 AE センサによる結果

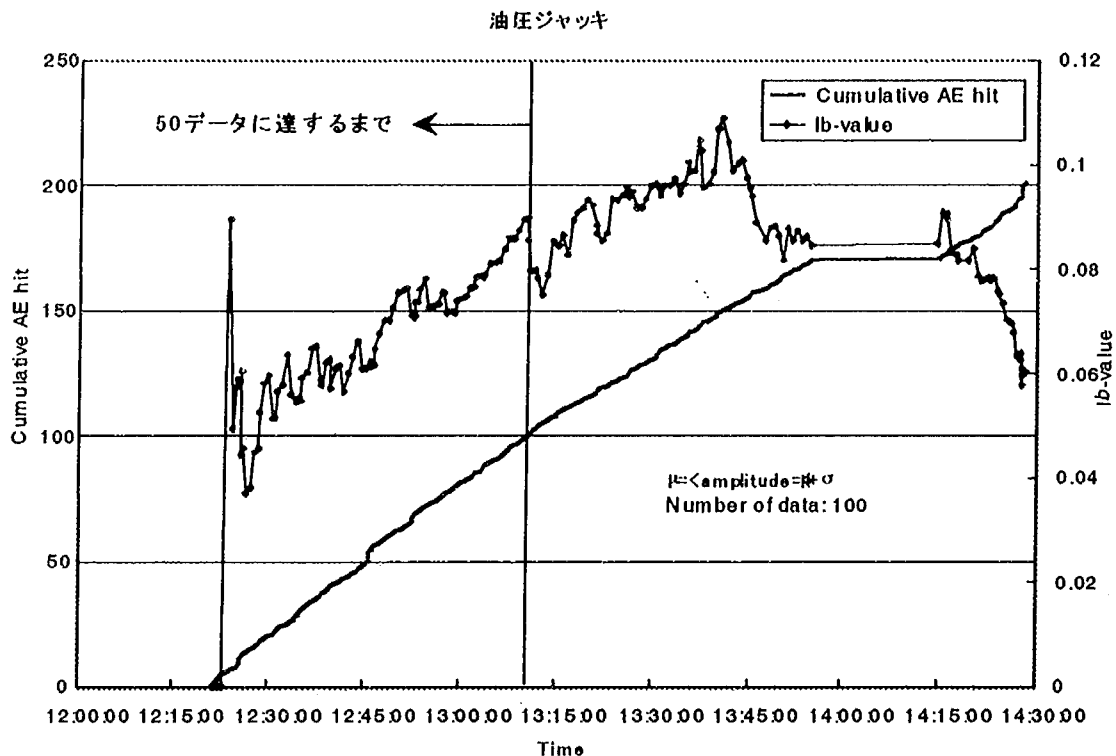


図-6.3.7 対象岩体と異なる岩体に設置した高周波 AE センサで得られた結果

前節 a)、b) で得た改良 b 値の変化傾向の妥当性を異なる岩体に設置した AE センサによる検出結果と比較する。本節で検討する AE センサは、破壊対象岩体と明瞭な多くのき裂を挟み、約 7 m 離れて配置されている。

図-6.3.7 に高周波 AE センサで得られた結果を示す。加圧は 13:15 から開始されたが、AE は加圧に無関係に上昇している。また、これらの AE データより得られる改良 b 値は高々、0.11 程度であり岩盤の破壊に起因する有意な AE ではないものと考えられる。さらに、試験時に試験サイトが雨（時間降雨量 2.5 mm 程度）であったことから、得られた改良 b 値 0.07~0.11 は 5.1.7(4)で検討した降雨による AE による b 値結果を反映した値といえる。

(d)まとめ

- ・降雨による AE の特徴として、異なる計測装置でも同位置（表面・孔内）に設置した AE センサにより得られた b 値は、ほぼ同じ値と考えられる。 b 値は、小雨・ AE センサ表面設置で約 0.07、大雨・ AE センサ表面設置で約 0.08、大雨・ AE センサ孔内設置で約 0.11 である。また、日射による b 値は機器により若干異なるが、高々 0.08 程度である。これらの事項とデータ誤差を考慮すると、0.05～0.11 の b 値は、気象条件に起因する b 値であり、この範囲に含まれない b 値をを検討することで、気象条件に影響しないその他の要因、例えば破壊現象などの追跡監視ができる可能性がある。
- ・岩体内部の破壊は、改良 b 値の変動により追跡可能であり、計測機器に依存しない。また、破壊に起因する改良 b 値は、気象条件による改良 b 値 0.11 を大きく超過し 0.18 程度まで上昇することから、改良 b 値の 0.11 以上の上昇は、岩盤内部のクリティカルな破壊状態を示す指標となる可能性がある。
- ・岩体の破壊に無関係な位置で計測・算出された改良 b 値結果から、破壊に特徴的な変化傾向は認められなかった。しかし、計測サイトの気象条件である降雨を反映した値 0.07～0.11 であり、改良 b 値の破壊状態評価への有用性が示唆された。

最後に、以上の b 値および改良 b 値の検討は、「一定個数の振幅値に基づき算出した値」であるからこそ議論できたことが多く、「母数が異なる振幅値に基づく b 値」での「値そのものの議論」は困難であること、 b 値および改良 b 値はデシベル単位に基づき計算されていることを付け加えたい。

(2) 正規偏差による評価

1) 評価方法の概要

本文では、日光での岩盤斜面での AE 計測結果を用いて、各種 AE パラメータのバラツキを統計的に評価することにより、破砕剤による岩塊破壊および崩落時の AE を特徴づける方法を考える。その方法として自然崩壊時、人工崩壊時（油圧ジャッキ、破砕剤）および崩壊のない状態での各パラメータのバラツキを正規確率紙による正規偏差で表示し、これらを比較する。

正規確率紙によれば、ある事象が正規分布していれば正規確率紙にプロットされる事象は直線になるという性質を有している。逆に複数の要因により複数のピークを持つような度数分布がある場合は、正規確率紙に表示された事象のプロットは直線にならない。図-6.3.8～9 はこれを概念的に示したものである。各種 AE パラメータが正規分布すべきものかどうかは定かではないが、岩塊崩落時には平常時と異なった AE が発生するとすれば、これらの分布にも違いが生じてくることが予測され、AE パラメータのバラツキという観点でデータ整理を試みる。具体的データ処理方法は図-6.3.10 の通りである。

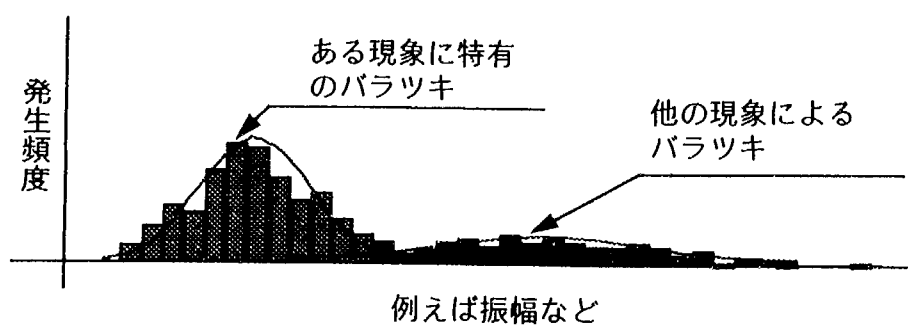


図-6.3.8 複数のピークを持つ度数分布

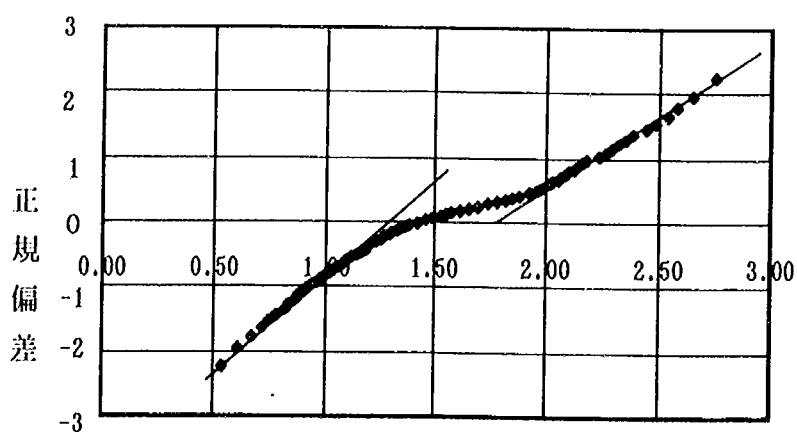
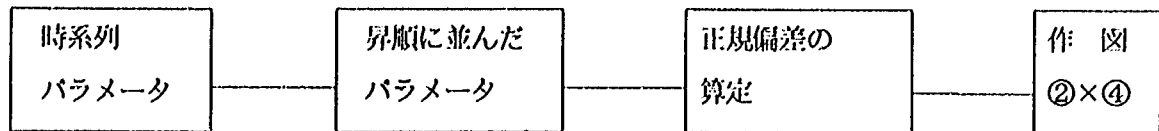


図-6.3.9 2つのピークを持つ分布を正規確率紙で表示したもの



例)

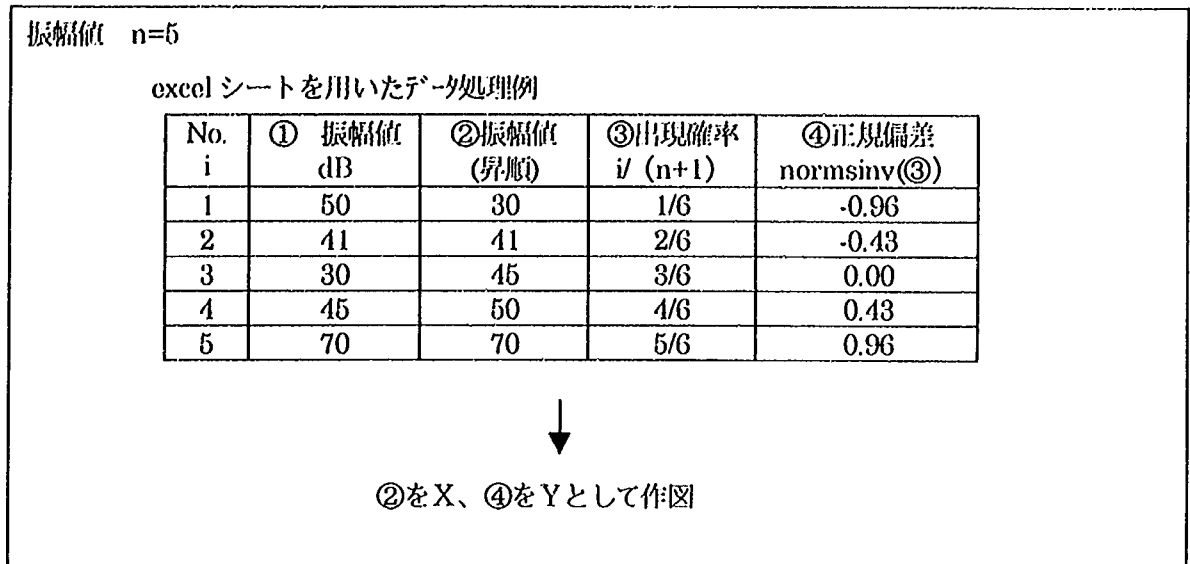


図-6.3.10 データ処理方法

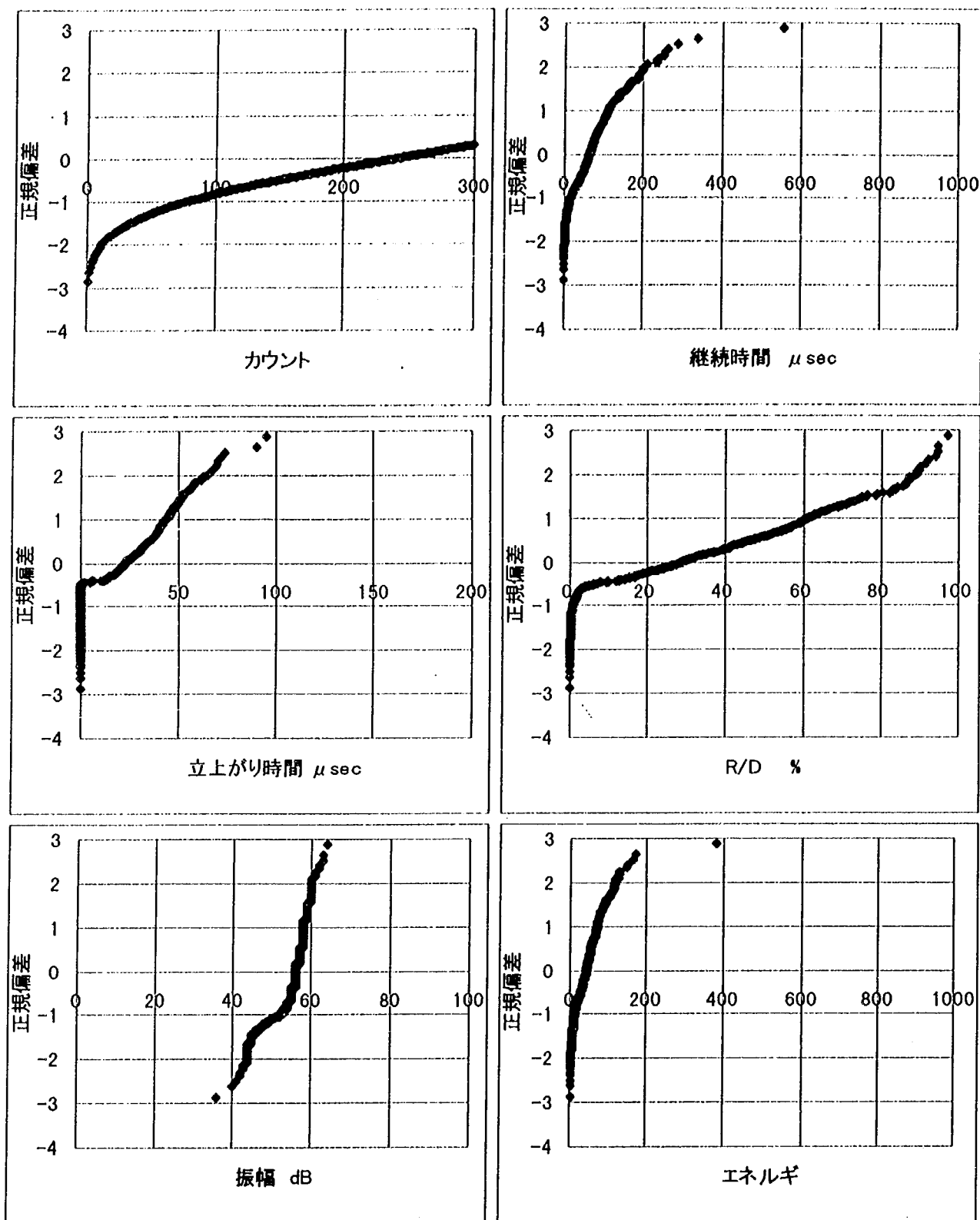
2) 各種要因ごとのAEパラメータのバラツキ

図-6.3.11～15 に大雨時、日射時、静穏時、油圧ジャッキによる人工崩壊時、破砕剤による人工崩壊時の各AEパラメータを正規確率紙にプロットしたものを示す。全体的傾向としては点列を直線と見なしても良いと思われるものもあるが、かなり複雑な傾向を示しているものが多い。

本図から特徴的なものを列举すると、以下の通りである。

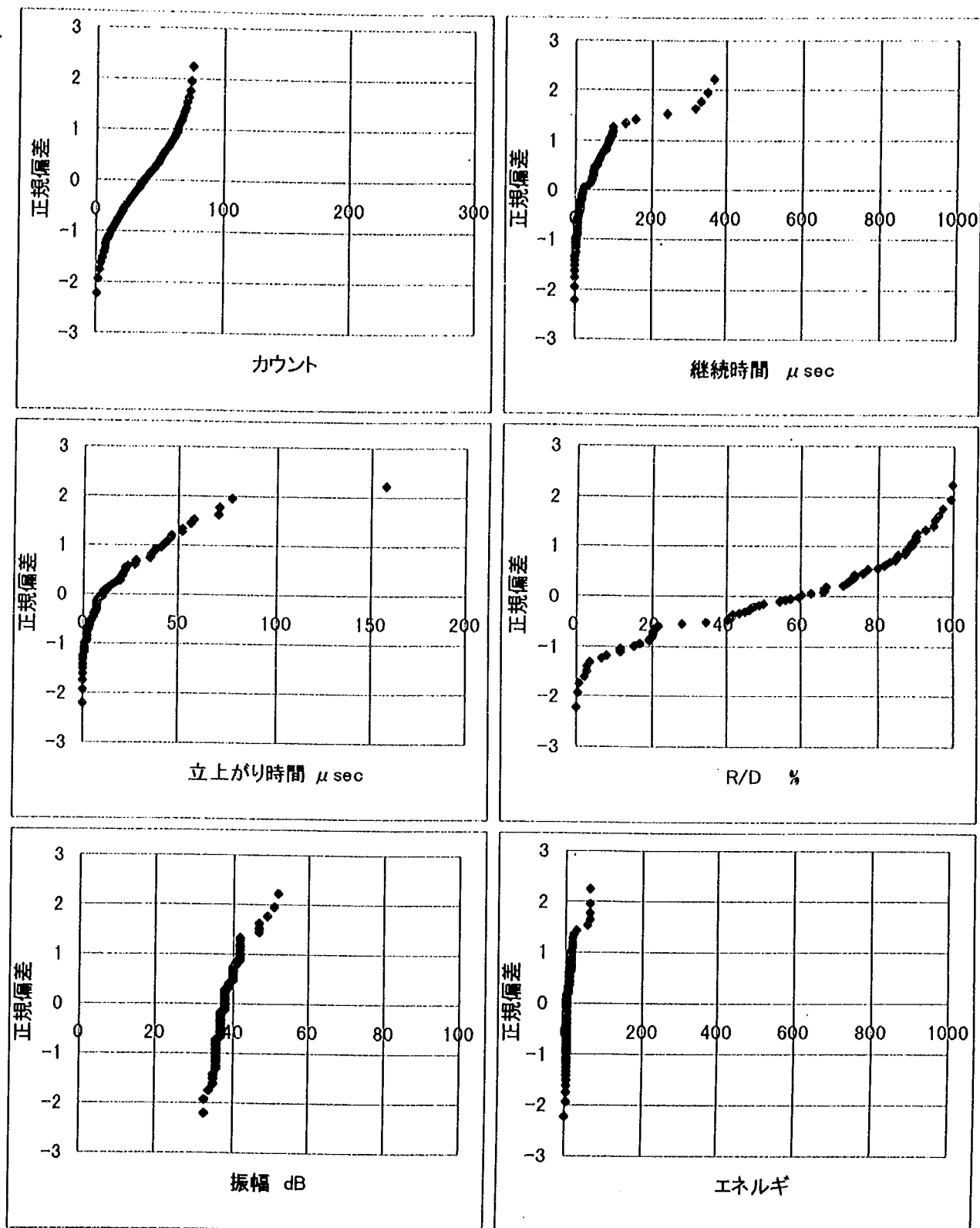
- ①破砕剤施工時のAEは他のAEに比べ振幅、エネルギーが大きい。また、立上がり時間と継続時間の比である R/D が10%以下のものと90%以上のものが比較的多い。
- ②油圧ジャッキ施工時は岩の破壊が進行しているにもかかわらず、振幅、エネルギーともそれほど大きくない。
- ③大雨時は立上がり時間の非常に小さい波が多く発生している。また、カウントの大きなものが非常に多い。
- ④静穏時は大雨時と同じく立上がり時間の非常に小さい波が多く発生している。
- ⑤日照時は振幅、エネルギーの小さな波が多く、立上がり時間も比較的長いものが多い。

以上のように各状態でそれぞれの状態で相違が認められるが、逆に AE 発生状況から考えた場合、これらの環境条件を識別することは容易ではないと思われる。

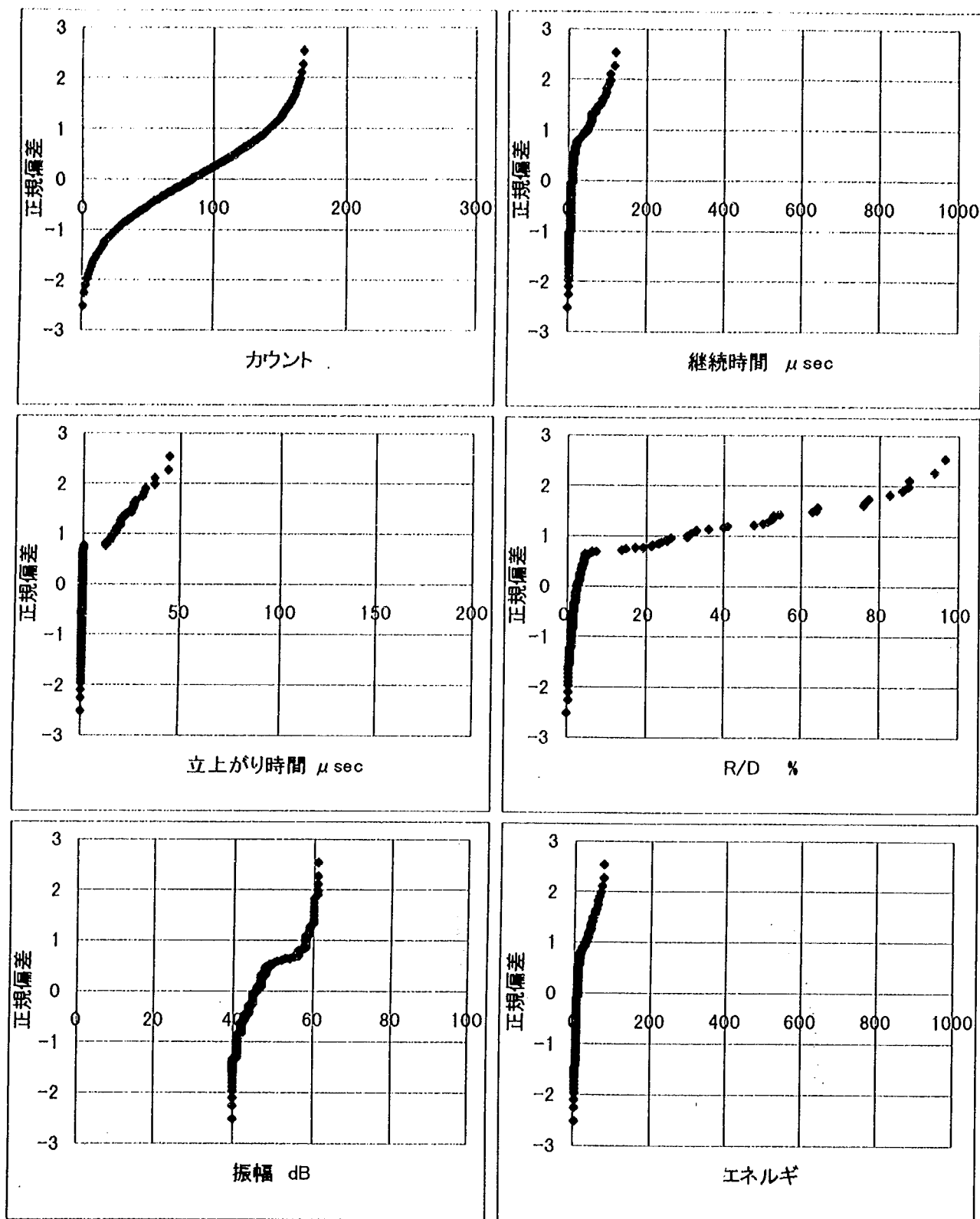


センサ : ch-3 (高周波) N=486

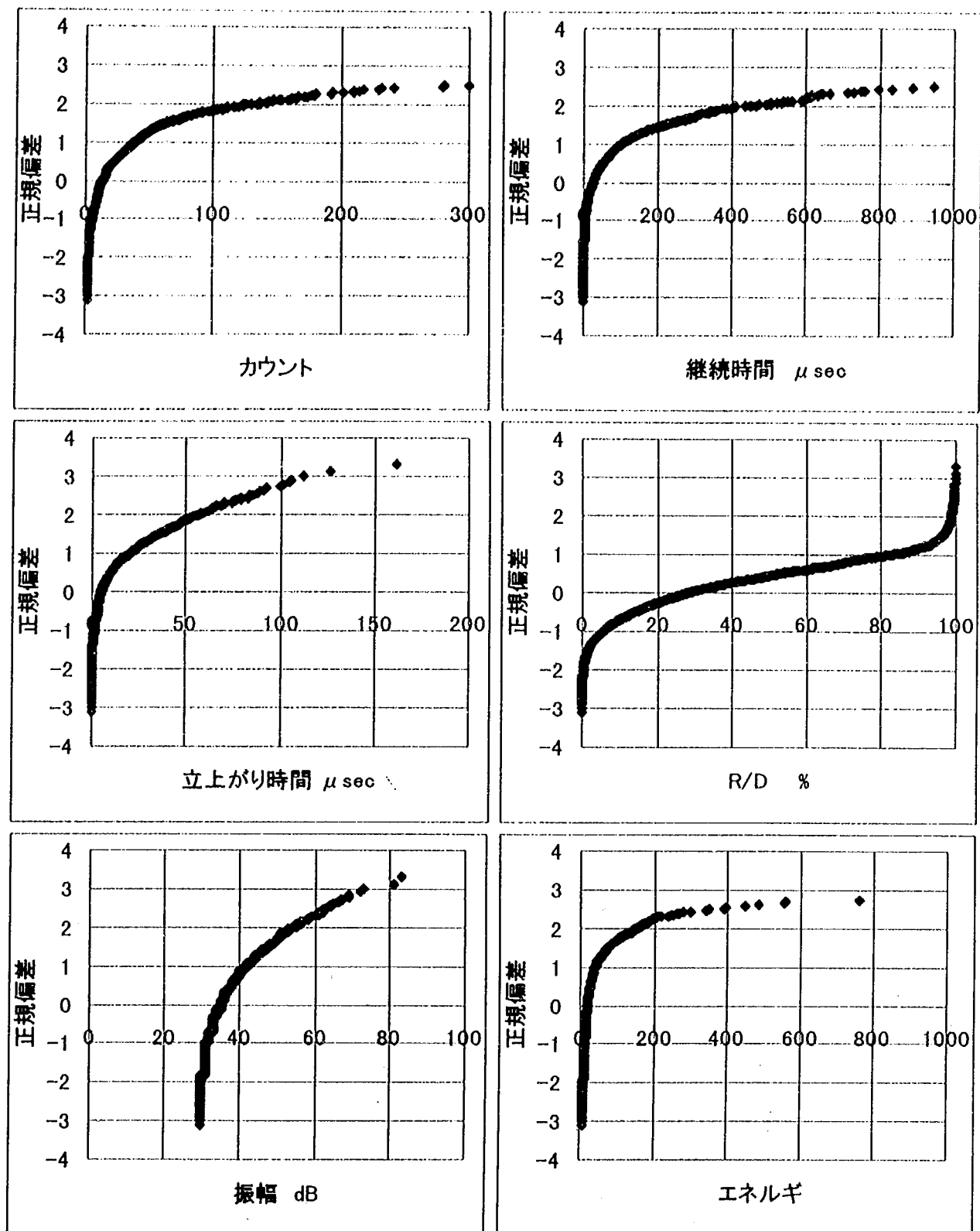
図-6.3.11 大雨時のAEパラメータ



センサ : ch-3 (高周波) N=77
 図-6.3.12 日射時のAEパラメータ

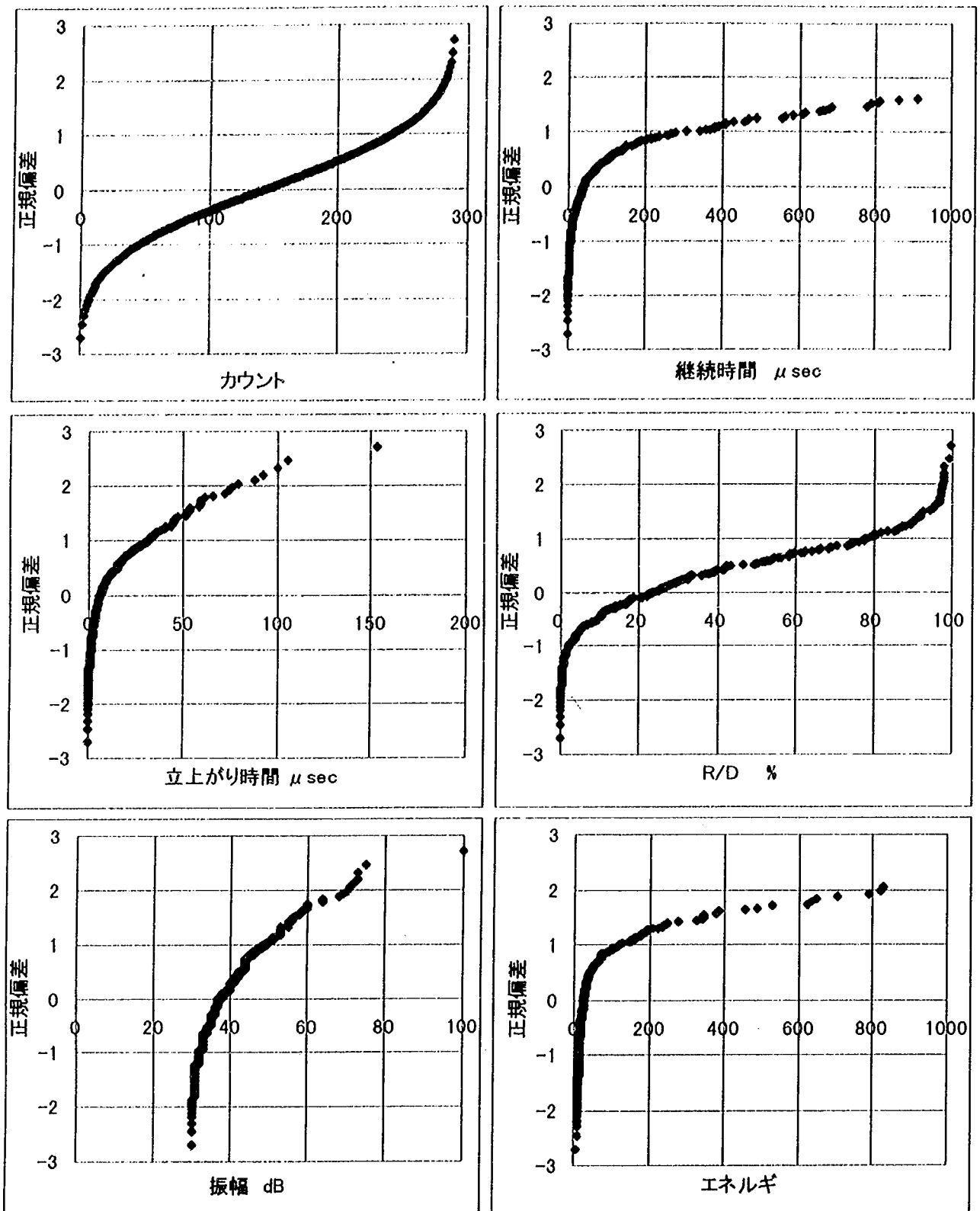


センサ : ch-3 (高周波) N=168
 図-6.3.13 静穏時のAEパラメータ



センサ : ch-5 (高周波) N=2135

図-6.3.14 油圧ジャッキによる人工崩壊時のAEパラメータ



センサ : ch-3 (高周波) N=288

図-6.3.15 破砕剤による人工崩壊時のAEパラメータ

以上の結果から、最も振幅、エネルギーが大きいという点で特徴的であり、瞬間的ではあるが岩盤の破碎によるAEが多く発生していると思われる破碎剤施工時のデータについて、再度、検討を試みる。ここでは、油圧ジャッキ、破碎剤による破壊時のR/Dの分布は、R/Dが0%に近いものと100%に近いものに多く分布するという特徴があり（図-6.3.16）、他のデータにこの傾向が明確に認められないことから、R/Dに着目して検討する。

ここで、R/Dは図-6.3.17の模式図に示すように、大まかなAE波形の形状を示す指標と考えられる。いずれの波形が岩盤の亀裂によるAE波形と近いものかは断定できないが、瞬間的な破壊によるAEが散乱の影響が少ない状態で到達したとすれば、R/Dは小さくなる傾向を示すと思われる。

まず、岩塊の破壊に関連していると思われるエネルギーの大きな（他の測定ではあまり認められないエネルギー>200の）波のみを抽出してこれを正規確率紙にプロットしたものが図-6.3.18である。図から energy>200 のものは、立上がり時間と継続時間の比であるR/Dが20%以下のものしかなく、データのほとんどが10%以下であることがわかる。以上の結果から、岩塊の破壊、崩落時にはR/Dの小さなAEが多く発生する可能性が高いことが予測される。つまりR/Dの小さなAEの出現率に着目すれば、岩塊崩落を検知できる可能性があると思われる。

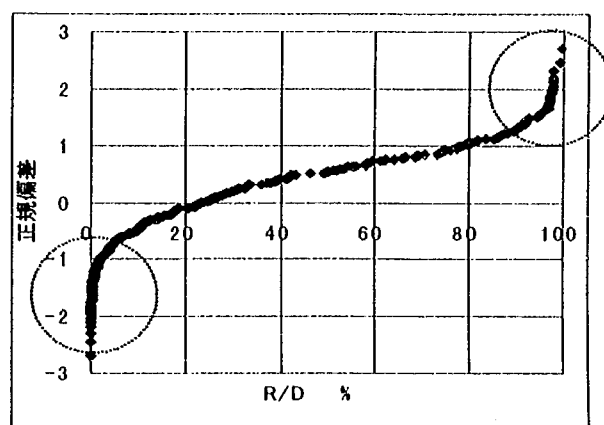


図-6.3.16 破碎剤施工時のR/Dの分布

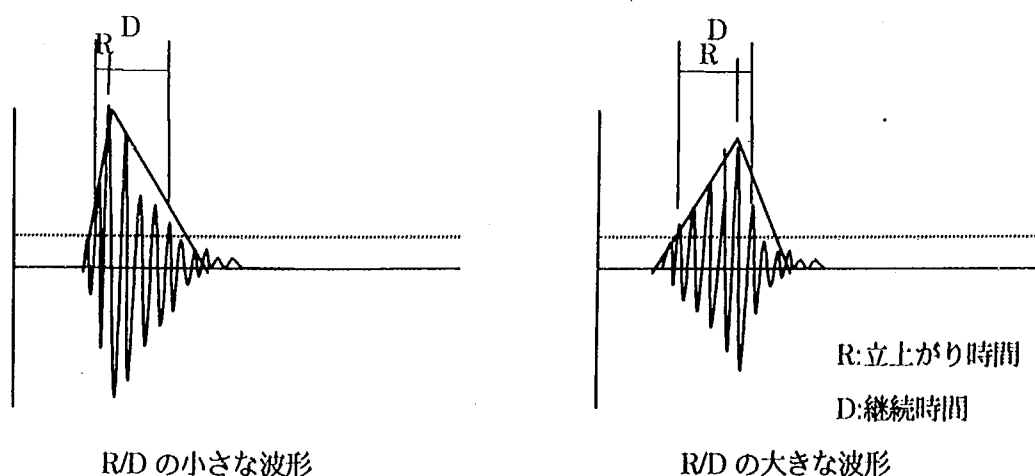
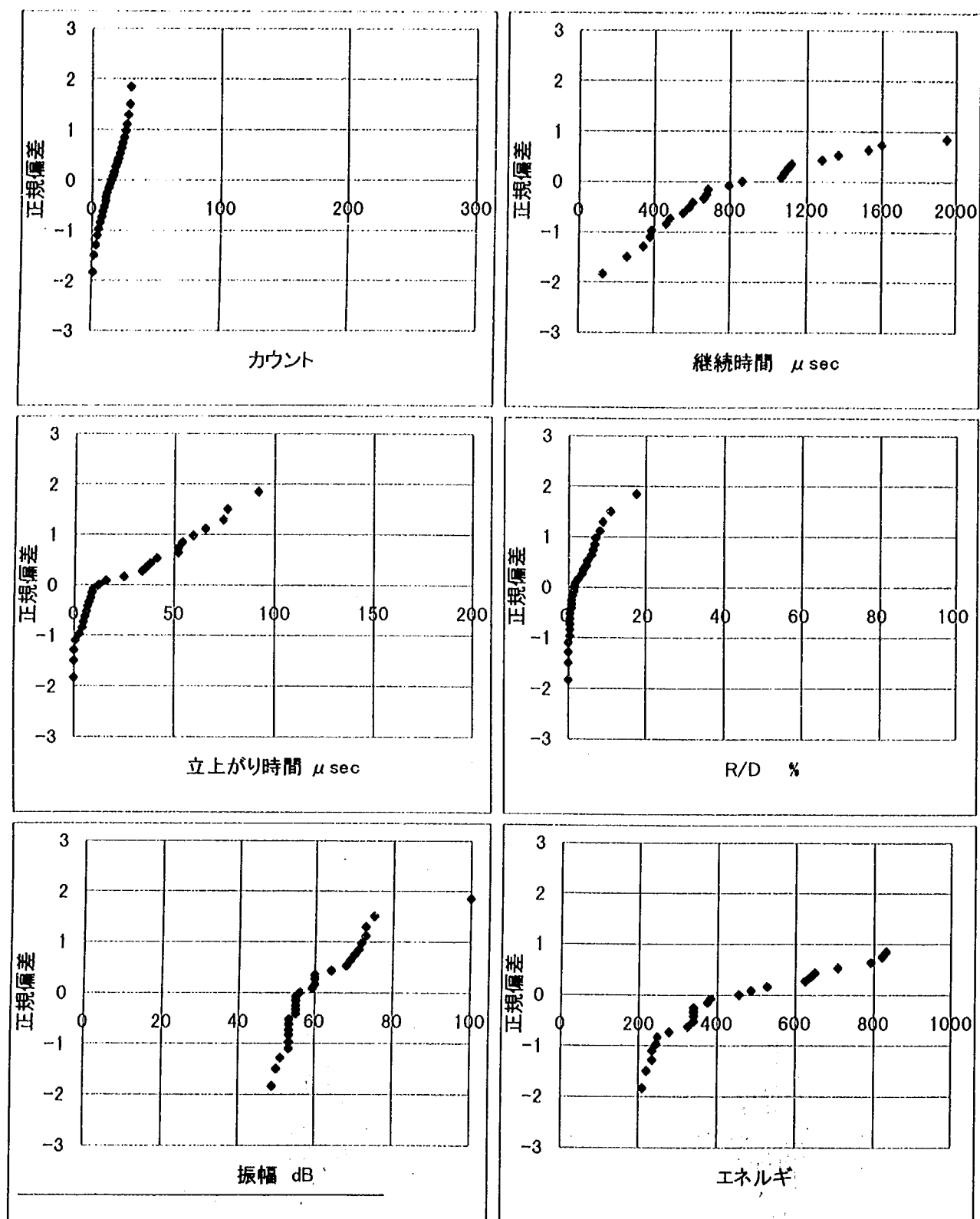


図-6.3.17 R/Dの違いによる波形の差異の模式図



センサ : ch-3 (高周波) N=29 エネルギー>200

図-6.3.18 エネルギーの大きなAEの分布(破碎剤)

3) 判定方法の提案

R/D の小さな A E の出現率に着目して、各条件ごとに R/D が 10% 以下の A E の出現率を求めたものを表-6.3.1 に示す。なお、大雨時、静穏時の測定結果から立上がり時間の非常に小さな波が数多く採取されて、それより大きな立上がり時間の分布と大きく異なっているため、何らか別のノイズによる A E と判断し、立上がり時間 $1\mu\text{s}$ 以下のものは除外して、出現率を算定した。

表によれば、破砕剤施工時、油圧ジャッキ施工時、自然崩壊時に R/D が 10% 以下の音が多く発生していることがわかる。このような指標を用いることによって、ノイズの多い自然環境下においても、斜面崩壊予知の可能性があらわれるものと考えられる。

ただし、その他の現象において R/D の小さな A E が多く発生する現象について検討していないこともあり、さらに実現象と R/D 出現率の比較を行っていく必要があるものと思われる。

表-6.3.1 R/D が 10% 以下の A E の出現率

測定条件	A E 総数	R/D が 10% 以下の A E 数	出現率 %
小雨	392	37	9.4
大雨—1	331	12	3.6
大雨—2	1075	112	10.4
日射—1	64	4	6.3
日射—2	87	7	8.0
静穏—1	13	0	0.0
静穏—2	37	0	0.0
油圧ジャッキ	1884	371	19.7
破砕剤	250	69	27.6
自然崩壊	10	2	20.0
合計	4143	614	14.8

(3) デジタルテープに記録した波形観察による定性的評価

AE 計測によって斜面の動態を監視するとき、検出された AE 信号と実際の物理現象との対応を明確にすることが重要である。特に大規模な崩壊の前兆現象を AE で検知する場合、他の計測機器に変状が現れる以前に AE が発生するため、その発生要因が特定できなければ単なるノイズとして片付けられ、AE 計測そのものの実用性を問われる結果となることが多い。このような目的から、一般に AE 信号の波形パラメータを利用して物理現象の推定が試みられている。比較的実験条件の明確な室内実験においては波形パラメータの特性からある程度その破壊現象を推定することが可能であるが、自然現象として発生する斜面崩壊時の AE は複雑であり、必ずしも室内実験と同様の方法でその物理現象を推定できるとは限らない。また、現位置の計測では電氣的な雑音や雨滴などのノイズも多く混入するため、現象の解明を一層困難なものとしている。

デジタルテープへの AE 信号の記録は人間の聴覚を積極的に利用して物理現象を推定するために使用する。市販のデジタル録音装置の周波数特性が 22kHz までの可聴音を対象としているため計測対象の周波数帯域が限定されるが、記録された音を再生することにより内部で発生している現象を聴覚で判断することができる可能性がある。この方法は聴覚を利用するため推定結果が定性的になりやすく、またテープを聞く必要があるためリアルタイムな判断ができないなどの欠点があり、現在の方法では、現場での監視方法としては不十分である。

しかし、自然斜面で計測される AE データの評価方法が確立されていない現状では連続的に記録された信号を観察することはその評価方法を確立するためにも非常に重要である。録音テープに記録された信号の特徴をまとめると次のようになる。

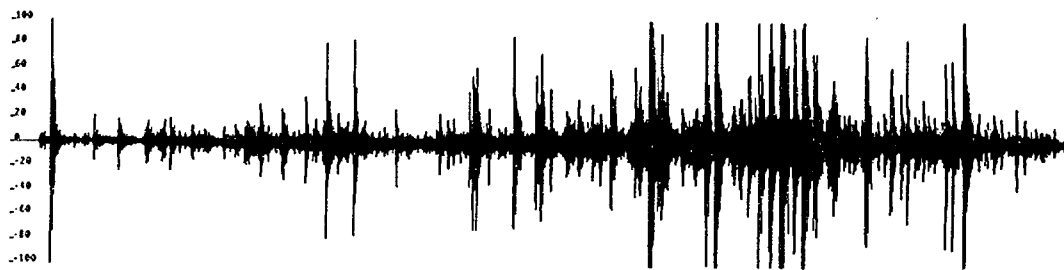
- ① 岩盤の破壊現象では微小なクラックが集中して発生したときに目視できるような比較的大きな亀裂が発生する。これに伴い初期の段階では突発型の AE が多く発生し、微小クラックが集中し始めると突発型の AE の発生間隔が短くなり、大きな亀裂が発生するときにはいくつかの AE が重なり合った連続型の AE が発生する。実際の現場ではこのような亀裂が累積してさらに大きな崩壊へと進展していくものと思われる。したがって、崩壊の監視には突発型の AE が発生する段階においてはその発生間隔が大きな意味を持ち、短い連続型の AE が発生した場合には部分的な亀裂が発生したと考えることができる。
- ② 土砂斜面の AE は岩盤とは異なり初期の段階ではほとんどが突発型の AE であり、大きく変位が進展したときに連続型の AE が観測される。崩壊の最終段階では長い連続型の AE が観測されるので連続型 AE の持続時間が重要な情報となる。
- ③ 対象物の破壊とは関係のないノイズは多くの場合突発型の AE である。しかし、その波形の形状は微小な亀裂による AE とほとんど同じか、もしくはより整った形状をしているため、波形パラメータから推定することを難しくしている。

図-6.3.19～21 に、静的破碎実験時の AE、岩盤斜面での発生した AE、各種ノイズ信号、砂の三軸試験で計測された AE 信号の変化状況を示す。

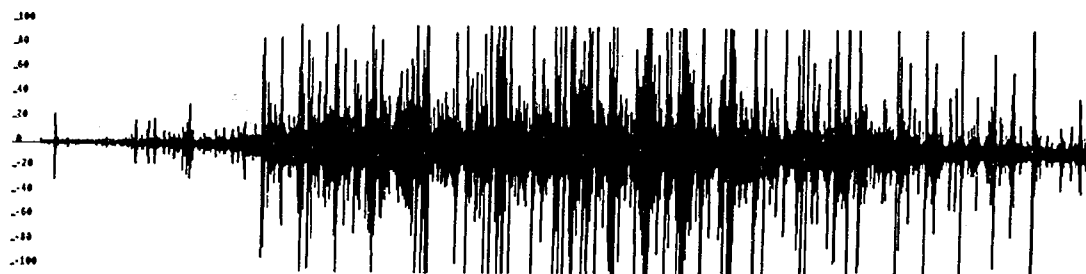
砂岩の静的破碎実験における破壊時のA E



コンクリートの静的破碎実験における破壊時のA E



現位置における岩盤破碎時のA E



500 msec.

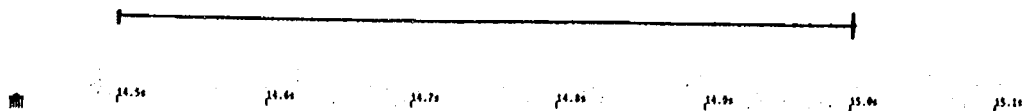


図-6.3.19 破壊時のA E信号の波形例

木更津土砂斜面計測時の雨滴によるAE



削岩機による穿孔時の振動



打撃音



無線音



電源ノイズ

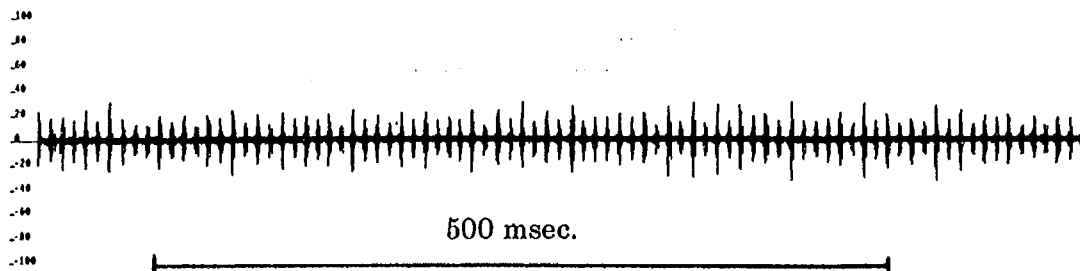
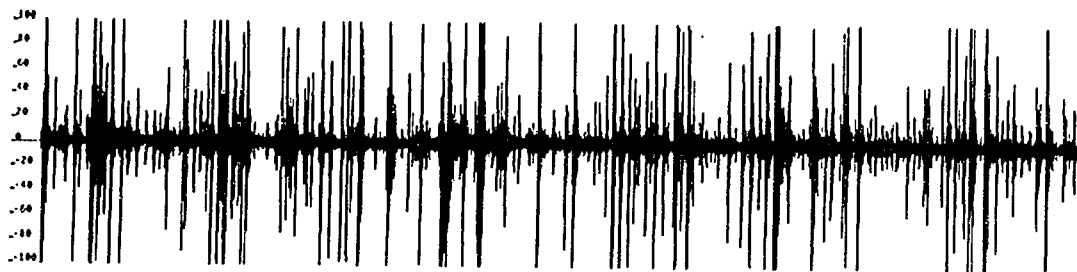


図-6.3.20 現位置AE計測におけるノイズの波形例

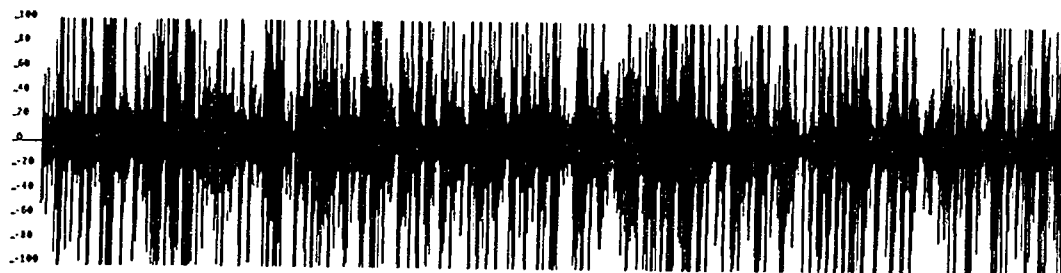
砂の三軸せん断試験時のA E（荷重50%前後）



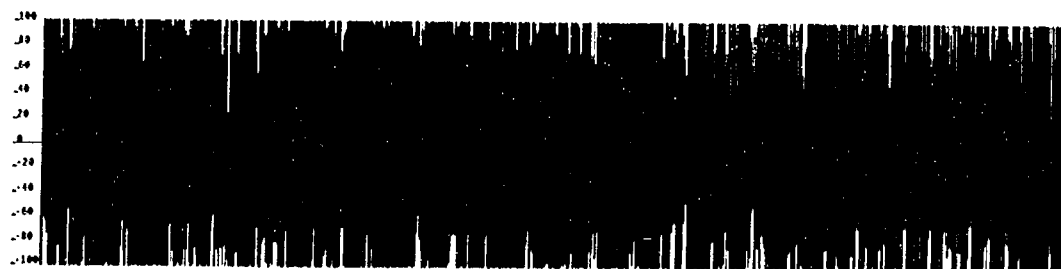
砂の三軸せん断試験時のA E（荷重80%前後）



砂の三軸せん断試験時のA E（荷重90%前後）



砂の三軸せん断試験時のA E（すべり破壊時）



500 msec.

図-6.3.21 砂の三軸試験時におけるA E発生状況の変化

(4) バックグラウンドノイズ監視用センサの活用

斜面の崩壊は、降雨が誘因となる場合が多く、降雨によって多量の AE を検出するようであると、AE による斜面動態観測は困難となる。したがって、AE センサはできる限り、降雨ノイズ等を検出しない条件で設置することが望ましい。しかし、実際には、斜面変状の検出感度を上げた場合、降雨ノイズも同時に検出することが多い。このため、降雨による AE と斜面変動に起因する AE をいかに分離するかが重要な問題となる。

そこで、安定斜面に埋設した AE センサによりバックグラウンドの AE を計測し、このバックグラウンド AE を降雨ノイズと判断し、他の AE センサで検出した AE ヒット数から差し引くことを考えた。

図-6.3.22 に計測器の配置を示す。計器を設置した斜面は、しらすの切土斜面であり、斜面をほぼ垂直に整形し、斜面の両脇を掘り込み、側面からの拘束のない開放状態とした斜面である（斜面高さ×幅×奥行き、6m×5m×3m）。AE センサは、2種類のウェーブガイドに取り付け設置した^{12),13)}。

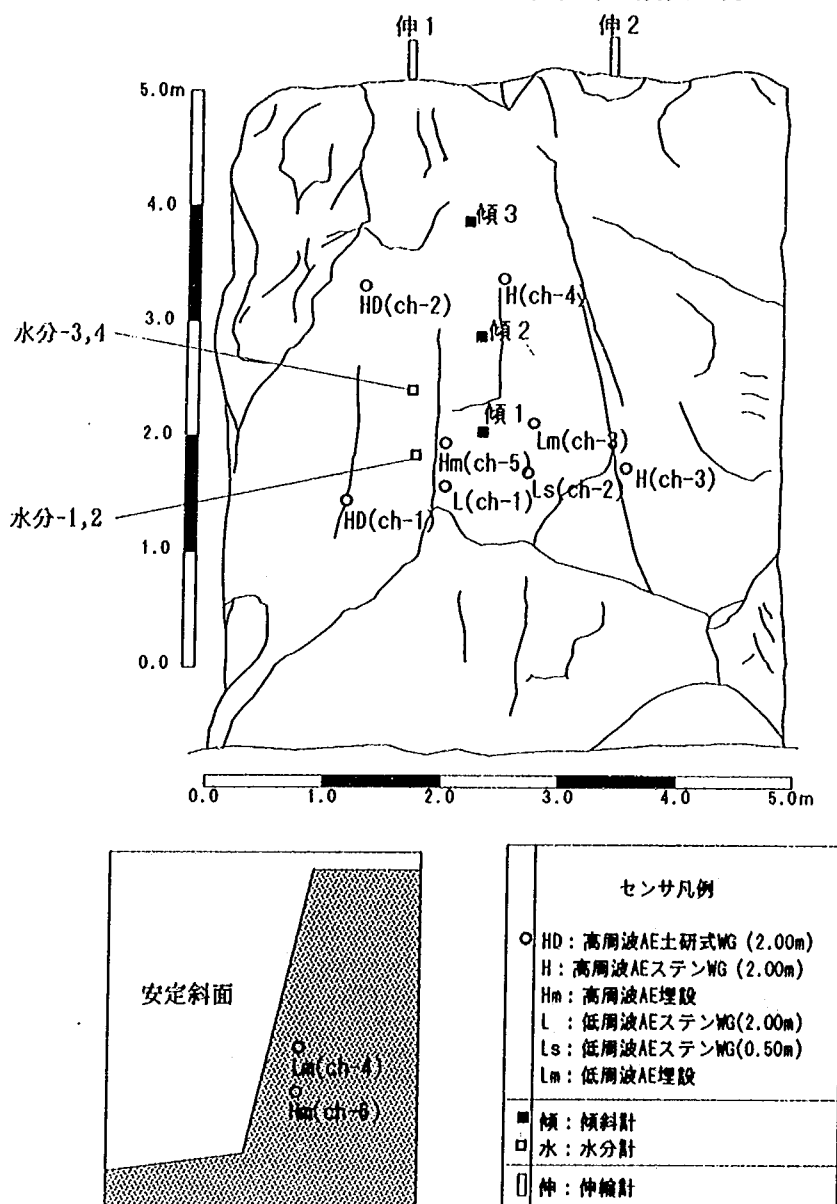
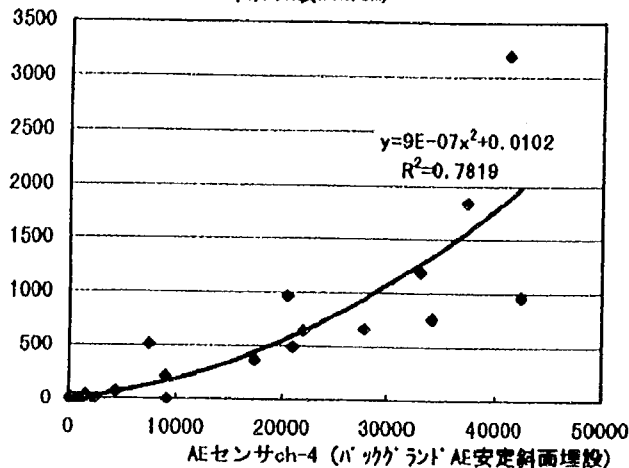


図-6.3.22 計測器の配置状況

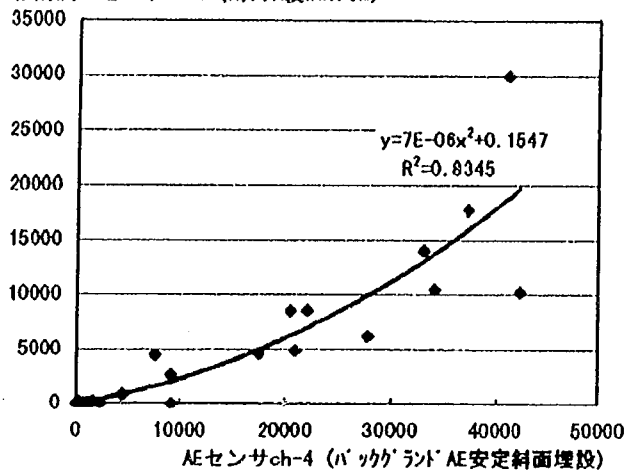
バックグラウンド監視用 AE センサと対象斜面に設置した AE センサでは、センサの埋設状態（表面からの埋め込み深さや斜面の勾配など）に相違があることが想定され、これが両センサの絶対値としての AE 検出量の差となる可能性が考えられた。そこで、あらかじめ、斜面に変状がない時点において、対象斜面に設置した AE センサとバックグラウンド監視用 AE センサの降雨による AE の検出量の関係を導くことにした。

図-6.3.23 に、降雨時における対象斜面の各 AE センサとバックグラウンド監視用 AE センサの 1 分あたりの AE ヒット数の関係を示す。この図が示すとおり、降雨による AE ヒット数はセンサ間で高い相関があり、バックグラウンド監視用 AE センサから各 AE センサにおける降雨による AE ヒット数を推測することができることが確認できた。

低周波 AE センサ ch-1 (ステンレス製 W02.0m)



低周波 AE センサ ch-2 (ステンレス製 W0.5m)



低周波 AE センサ ch-3 (直接埋設)

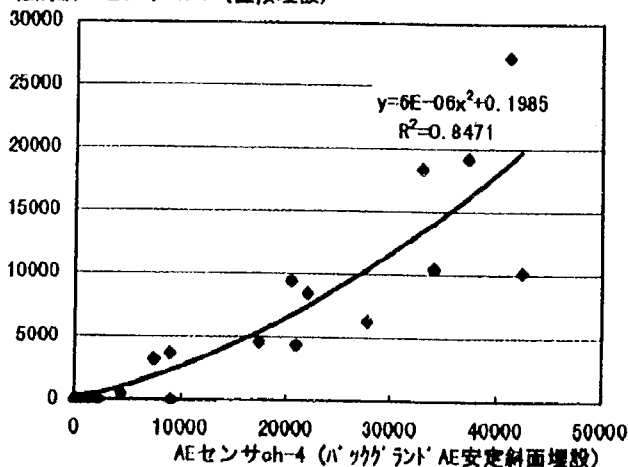
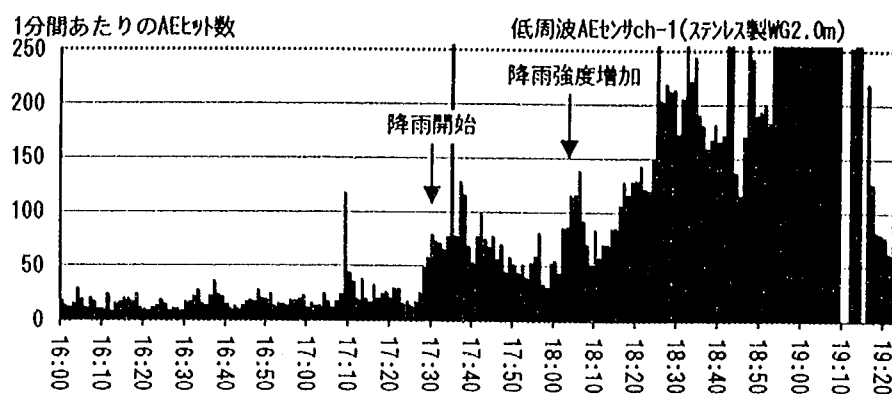
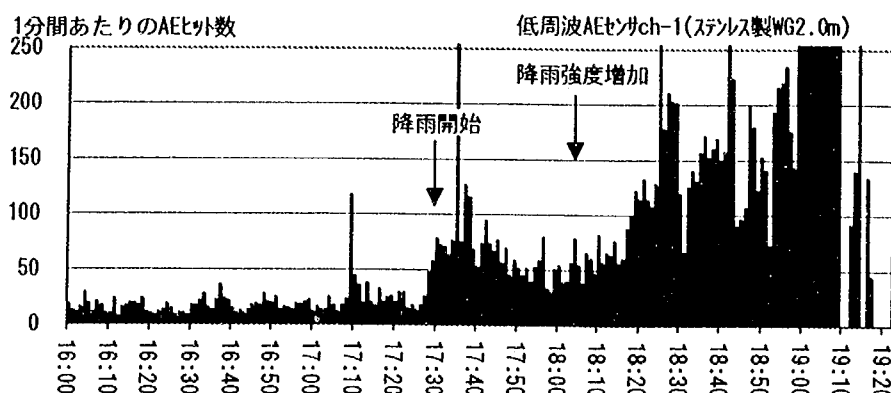


図-6.3.23 降雨時における各 AE センサとバックグラウンド監視用 AE センサの AE ヒット数の関係

そこで、崩壊時における対象斜面に設置した AE センサの計測結果から、バックグラウンド AE センサで推測した降雨による AE ヒット数を差し引いてみた。この結果を図-6.3.24 に示す。この図-6.3.24 の(a)、(b)を比較すると、推測した降雨データを差し引いていない(a)では、降雨強度が増加した 18:00~18:10 に AE ヒット数が増加しているが、差し引いた(b)では増加していない。また、差し引き処理により除去された部分が降雨ノイズであることは、図-6.3.25 に示す降雨ノイズを検出していない高周波 AE センサの挙動との比較からも確認できる。



(a) 差し引き処理前の AE 発生状況



(b) 差し引き処理後の AE 発生状況

図-6.3.24 比較結果

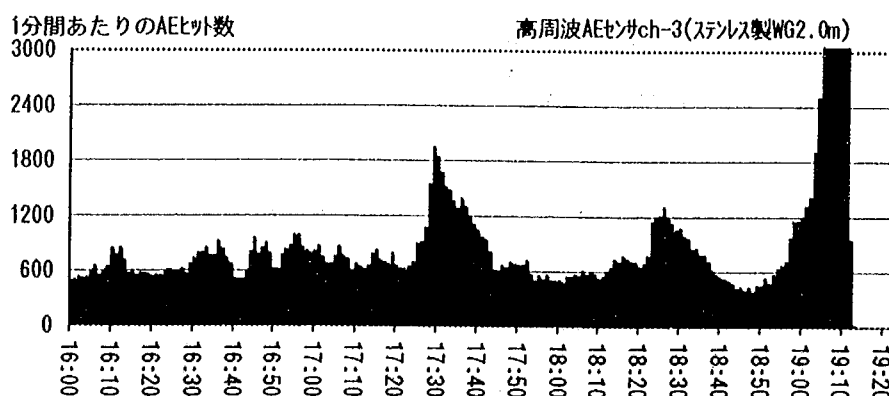


図-6.3.25 高周波 AE センサ ch-3 の AE ヒット数の経時変化

6.3.2 斜面の変状位置の推定

斜面崩壊を予知・予測するためのAE計測においては、AE信号波形を解析することによって、AE源を標定して空間分布や時間分布(変化)を明確することは、亀裂の伸長する方向や落石のあった位置を特定することにつながるため、極めて重要な事項であると考えられる。しかるに、原位置のAE計測では、S/N比の良好なAE波形データが得られにくいなど、AE源の標定において解決すべき様々な課題点が存在することも事実である。

このため、日光岩盤斜面における動作確認試験での疑似AE信号波形(打撃振動)を使用し、その発生位置を標定することによって、原位置におけるAE源を標定する上での課題と解決策について、若干の考察を加えてみた。

AE源の標定に使用した手法は、逐次近似計算法とテーブルルックアップ法を組み合わせた手法である。

(1) AE源の標定方法

逐次近似計算法とテーブルルックアップ法を組み合わせた手法の特徴を下記に示す。

- ・P波あるいはS波で、同一位相の到達時間差のみを利用する。この場合、P波を使用する場合とS波を使用する場合とは、それぞれ適切な弾性波速度値を選定する必要がある。
- ・地盤の弾性波速度がわかっている場合、最低3ヶ所のセンサのAE信号波形があれば標定が可能である。
- ・計算上の残差に留意すれば、伝播経路が多少複雑な場合でもAE源の標定が可能である。
- ・簡易法とは異なるため、AE波形にノイズが混入し、同一位相の到達時間差の読み取りが多少不明確になっても、位置標定が可能である(ただし、精度は低下する)。
- ・AEセンサを設置後その位置を3次的に測量し、さらに、数多くの人工振動源(ただし、発生位置が既知であること)からの疑似AE波形を使用して同様の解析処理を行うことによって、地盤の弾性波速度分布を求めることができる。

今回実施したインバージョン法の概要を以下に略記する。

- ・地盤モデルは、地盤が一様に均一であるとする半無限の弾性体モデルを採用する。
- ・仮AE源(仮振動源)を図-6.3.26のように定め、各AEセンサまでの直線距離を計算し、あらかじめ決定した地盤の弾性波速度を使用して、仮AE源から各AEセンサへ弾性波が到達する時間を計算する。
- ・仮AE源の周囲に1辺が0.25mの立方体メッシュを図-6.3.27のように設定し、各仮AE源からの平均残差時間(詳細、後述)を図-6.3.28のように計算する。
- ・平均残差時間が予め設定した収束範囲内に入らない場合には、仮AE源の位置を最初の位置から最も残差時間の小さな方角に移動させて、同様の計算を繰り返す。

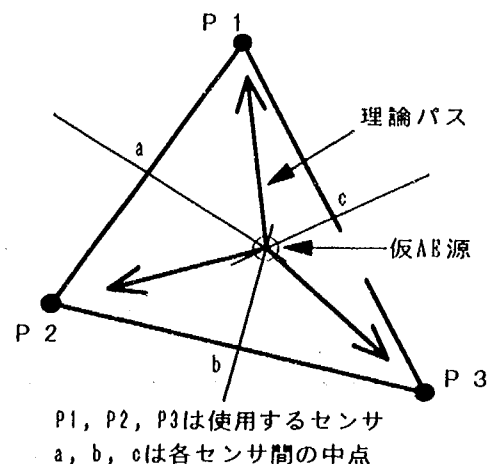


図-6.3.26 仮AE源の決定方法

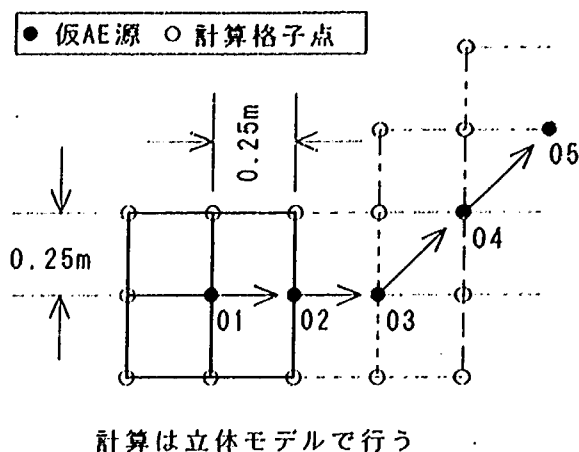


図-6.3.27 仮想AE源(震動源)の移動方法

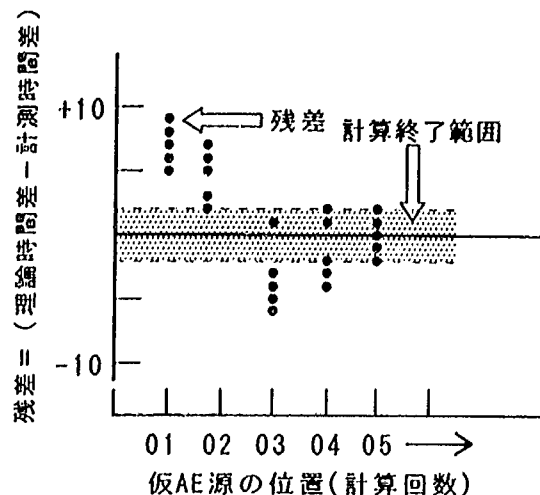


図-6.3.28 残差範囲と計算終了

- ・この計算処理を何回か繰り返し、予め設定した平均残差時間に納まった場合に計算を終了させる。

本手法の場合、留意しなければならないことは、AE(人工振動)が発生した時刻がわからないために、実際に既知である時刻情報は、各AEセンサに到着した同一位相の到達時間差のみであるという点である。すなわち、同一のAE波形(位相)で最も早く到着したAEセンサの時刻を基準とし、他のAEセンサとの到達時間差を求める必要がある。さらに、理論的な到達時間差を求める場合にも、同様にして最も近いAEセンサを基準とする理論到達時間差を計算する。

従って、残差 = 理論到達時間差 - 計測到達時間差 となる。

(2) 動作確認試験における人工AE源の標定結果

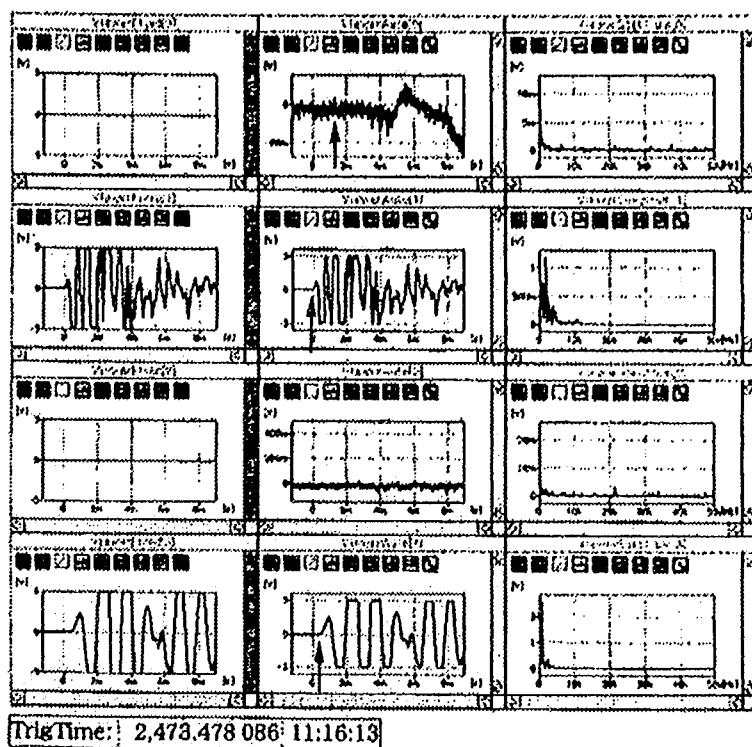
これらのAE信号波形を検出したセンサの位置座標を表-6.3.2に示す。これらは、斜面の全景写真と簡易反射板の相対位置から計算によって求めたため、精度は0.5m程度と思われる(AE3の位置座標を原点とした)。

表-6.3.2 低周波AEセンサの設置位置座標

番号	斜面直角(谷)	斜面左右(川)	斜面上下	備考
AE3	0m	0m	0m	Bブロック表面削孔設置
AE4	-0.5m	-1m	2m	Bブロック表面削孔設置
AE5	-0.5m	4m	1m	Aブロック表面設置
AE6	0m	-1m	1.5m	Bブロック表面設置

今回使用した人工AE信号波形は、動作確認試験における打撃振動波形のうち、低周波AEセンサで検出されたCase-1とCase-2の2ケースである(動作確認の項参照)。その波形と読取り時間を図-6.3.29に示した。

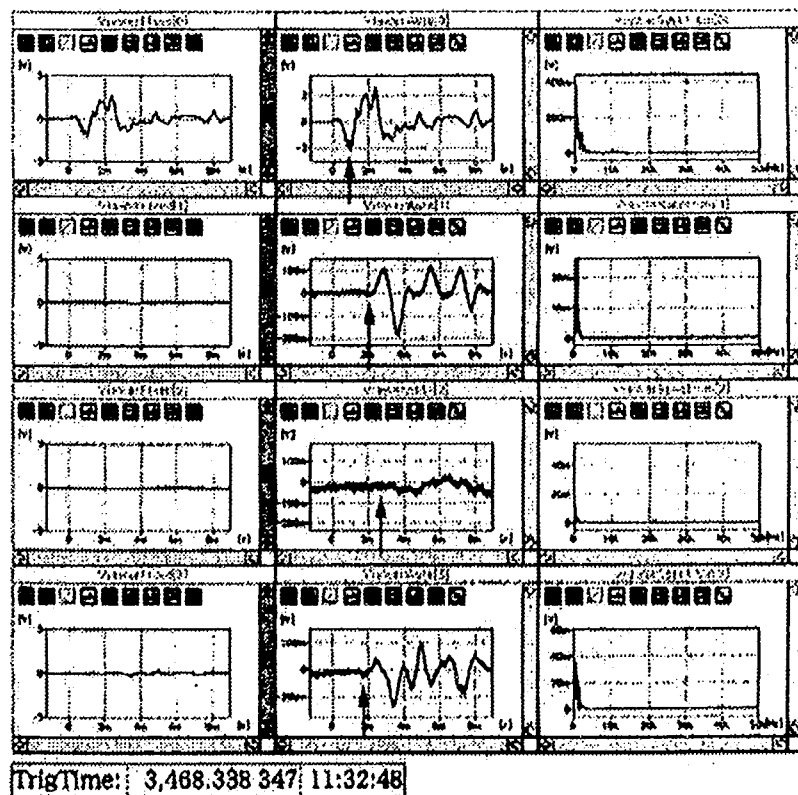
ch	読取時間
ch-3	1.4msec
ch-4	0.0msec
ch-2	—
ch-6	0.3msec



Case-1 : Cブロック上部打撃 1997/05/08 11:16:13 使用ch : 3、4、2、6

[初動は読めない]

ch	読取時間
ch-3	1.0msec
ch-4	2.0msec
ch-5	2.4msec
ch-6	1.8msec



Case-2 : Bブロック右側打撃 1997/05/08 11:32:48 使用ch : 3、4、5、6

図-6.3.29 計算に使用した人工AE(打撃振動)波形と読取り時間

AE源の位置を標定計算するためには、対象斜面の正確な弾性波速度分布状況を決定する必要があるが、今回の長期計測では、AEセンサを設置した対象斜面の弾性波速度分布は探査していない。このため、弾性波速度を変化させて人工AE源を複数標定し、計算上の残差や標定された人工AE源の位置変化から、ほぼ正しいと思われる弾性波速度値を推定することにした。表-6.3.3は、その結果である。

表-6.3.3 弾性波速度によるAE源位置の変化

Case	Case-1 : Cブロック上部						Case-2 : Bブロック右側					
位 置	弾性波速度(km/sec)						弾性波速度(km/sec)					
	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7
谷方向	-0.25	0.0	-0.25	-0.25	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	-0.5	-0.25	-0.75
川方向	0.25	0.25	-0.25	-0.5	-0.75	-1.25	1.25	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
上 下	3.0	3.75	2.75	2.5	3.25	5.0	1.0	1.25	1.25	1.0	1.0	0.75
残 差	0.04	0.04	0.02	0.01	0.02	0.02	0.22	0.17	0.08	0.06	0.03	0.08

単位はm (AE3からの距離)、平均残差は距離(m)に換算した
谷方向は手前が+、川方向は下流が+、上下は上が+

Case-1 (Cブロック上部)では1.3km/secの場合、Case-2 (Bブロック右側)では1.6km/secの場合に、それぞれの残差が最も小さくなっているところから、それぞれの人工AE源(打撃地点)は当該の弾性波速度値によって標定された位置であろうと考えた。

結果を写真-6.3.1に示す。



写真-6.3.1 人工AE源(打撃地点)の標定結果

今回得られた弾性波速度値の大きさからP波であろうと考えられるが、日光での伝播試験結果(平均3.3km/sec)から比べると比較的遅いため、対象岩盤には相当大きな亀裂が分布するものと思われる。

人工AE源の標定結果と動作確認試験を対比してみると、人工AE源(打撃)地点は、誤差は見られるものの、少なくとも打撃した岩塊と同一のブロック内に標定されている。

したがって、同一のAE信号波形を多くのAEセンサで同時に計測・記録し、逐次計算法とテーブルルックアップ法を組み合わせた手法を適応することによって、AE源を標定することは十分に実用になることが確認できた。

(3) 今後の課題と解決策

日光岩盤斜面での動作試験において記録された、低周波AEの信号波形を使用してAE源の標定を行い、その過程で判明した課題と解決策を以下のようにまとめた。

① S/N比の大きな波形を必要とする。

到達時間差をいかに正確に読み取るかが重要なポイントとなる。

例えば、図-6.3.29に示したように、S/N比が良好な波形が得られているのは、人工AE源(打撃地点)からせいぜい1m程度の範囲にとどまり、3m以上離れた場合には技術者が目視で確認しない限り、到達時間差を自動的に読みとることは不可能であった。モニタリングのためには、到達時間差の自動読み取りが不可欠となるが、その可否はこの部分にかかっていると行っても過言ではない。したがって、AE源を標定するためには、センサ間隔を狭める必要があるが、莫大な費用が必要となろう。

② 弾性波速度分布を調べる必要がある。

AE源の位置はセンサの位置、到達時間差、弾性波速度分布から計算される。このため、標定を迅速に行うためには、予め対象斜面の弾性波速度分布を求めておく必要がある。

しかしこの場合、改めて弾性波探査を行う必要はない。すなわち、センサを設置した後で、測量してその位置を明らかにした複数の人工AE源において、打撃などの人工AE(振動)を発生させ、その到達時間差を読み取ることによって、斜面の弾性波速度を計算することができる。

人工AEを発生させる場所はセンサを取り囲むように設定するか、メッシュ状に設定するのが最良であるが、最低でも数ヶ所程度は設置すべきである。

③ 全ての計測装置の時刻信号を合わせる必要がある。

今回の長期計測では、低周波AE計測システムと高周波AE計測システムが独立していたように、設置するAEセンサの数によっては、複数の計測システムを用意する必要が発生するものと思われる。同一のAEを複数のシステムで同時に検出する場合、正しい到達時間差を求めるためには、時刻信号(タイムマーク)を揃える必要がある。

6.3.3 斜面崩壊時刻の予測

(1) レートプロセス解析

大津¹²⁾は、コンクリート供試体の一軸圧縮試験下で AE 発生挙動が微小ひび割れの発生過程に対応していると考え、AE 発生数 N と破壊荷重に対する荷重レベル V (%) の関係を以下の式(6.7)で精度良く表せるとした。

$$N = CV^a \exp(bV) \quad (6.7)$$

ここで、 a 、 b は定数、 C は積分定数であり、これらは各荷重レベルでの AE 発生数によって、最小二乗法により決定することができる。コンクリートが破壊に至るまでの AE 挙動が精度良く近似可能とされるレートプロセス理論は、材料こそ異なるが斜面の崩壊より得られる AE 挙動にも都合良くフィッティングできる可能性がある。以下に、レートプロセス式を模型斜面の崩壊実験に適用した例を紹介し、その有効性を示す。

(2) レートプロセス理論の斜面崩壊への適用性^{13), 14), 15)}

レートプロセス理論を崩壊時間予測に適用するために、湿潤砂からなる模型斜面の傾斜箱実験で 10 秒ごとに得られた AE イベント累積数に式 (6.7) を適用した。

図-6.3.30 にモデル砂斜面の傾斜実験より得られた AE イベントの経時曲線 (実線) と式 (6.7) を荷重レベル V の関数ではなく、時間 t の関数として近似した曲線 (点線) を表す。相関係数は 0.985 となり、AE イベントの経時曲線が式 (6.7) により近似可能であることが認められている。

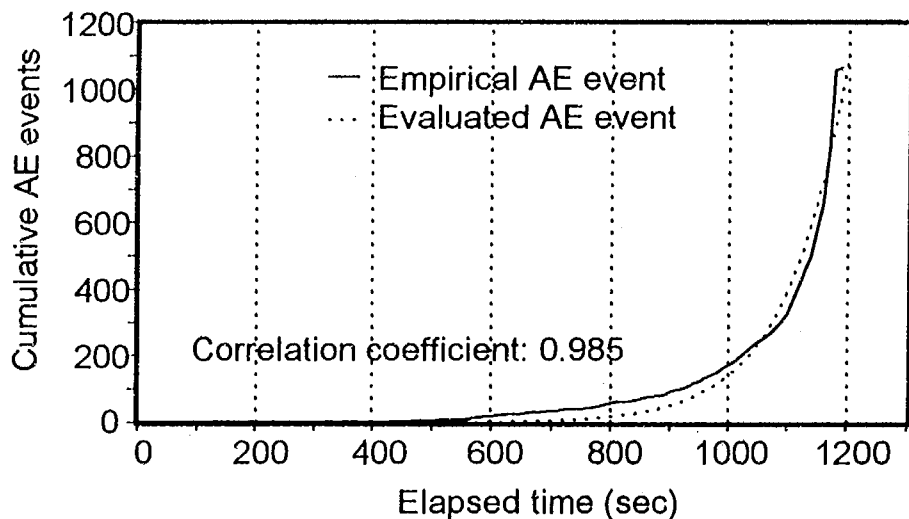


図-6.3.30 レートプロセス式の AE 経時曲線へのフィッティング

1) レートプロセス理論による斜面崩壊時間予測結果

図-6.3.31 に崩壊角度に対する傾斜レベル 0~50、0~60、0~70、0~80(%)までの AE イベントデータを用いてレートプロセス解析を行い、解析傾斜レベル以降の AE 経時曲線を外挿した結果を示す。図中の実線で示された曲線は解析に用いた各傾斜レベルの AE イベント曲線であり、点線が外挿した AE イベント曲線である。なお、

崩壊予測時間は、実崩壊時間における AE イベント総数:1063 個に至るときの時間として算出し、以下の考察を行っている。

図-6.3.32 は、横軸に解析を行った各傾斜レベル(%), 縦軸に実崩壊時間と解析によって得られた崩壊時間との差を示している。ただし、図-6.3.32 で行った傾斜レベルに加え、更に 85、90、95%までの AE イベントデータを用いた予測結果も付加している。傾斜レベル 50%までの AE イベントデータを用いた場合、崩壊予測時間は 950 秒となり、実崩壊時間 (1190 秒) と比較すると 240 秒の誤差が生じる。傾斜レベルが 60(%)では、予測誤差は 50 秒と急激に向上し、70(%)以降の予測誤差は 50 秒以内にすべて収まる。一方、AE 経時曲線の図式解法^{16)・17)}より最適な改良 b 値の低下時間を基準時間として誤差が 50 秒以内となるのは、崩壊の 140 秒前、つまり、傾斜レベルが 88%となった時点である。それに対し、レートプロセスにより得られた結果は、傾斜レベル 70%となり、図式解法に比べ格段の予測精度の向上が認められている。これらから、斜面の安全監視に AE を適用し、得られた AE データにレートプロセス解析を適用することで、早期に、精度の良い崩壊時間予測が行える可能性があると考えられる。

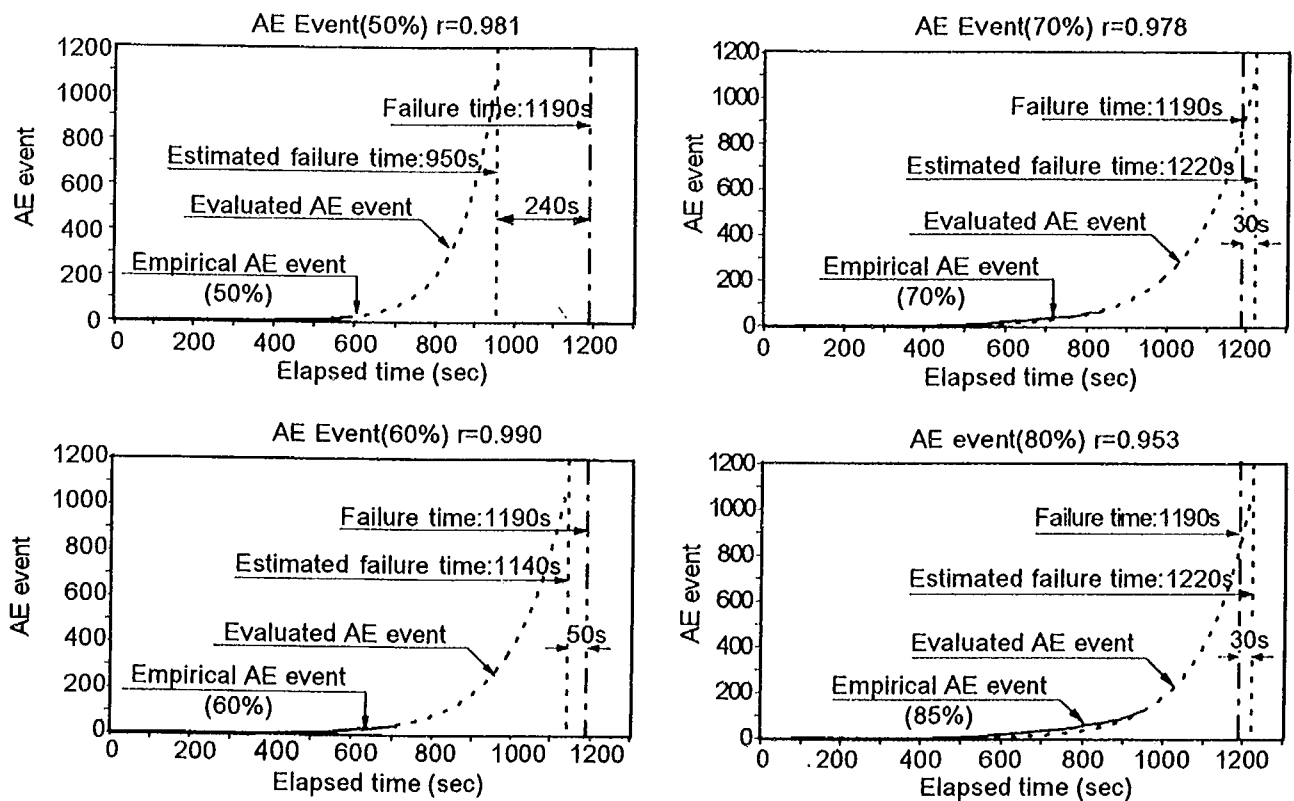


図-6.3.31 レートプロセス理論による崩壊予測結果

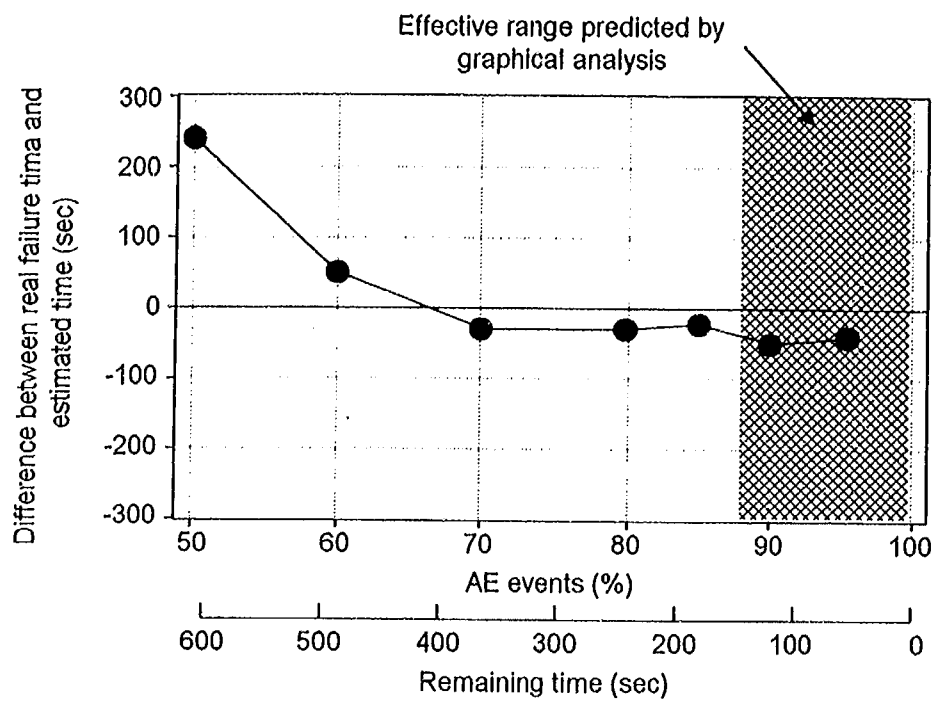


図-6.3.32 各傾斜レベルにおけるレートプロセス予測結果と従来の図式解法結果の比較

(2) カウントレートの逆数による監視^{12), 20)}

カウントレートの逆数による監視については、本共同研究内で実施したしらす斜面崩壊実験結果をもとに検討しており、実験の詳細はしらす斜面崩壊実験の章に示すとおりである。

伸縮計や傾斜計の変化を詳細に監視するためにはサンプリング速度を短くとる必要があり、時間分解能に限界がある。これに対して AE は信号が検出された時点でリアルタイムにそのデータ記録・表示するため、前兆時間の短い現象を観測するのに適している。また、検出される 1 つ 1 つの AE 信号のなかに AE パラメータとして様々な情報を含んでいる点も重要である。

図-6.3.33 に、代表的な崩壊前兆時 (16 時) の AE 波形と崩壊直前 (19 時 10 分) の AE 波形を示す。両者を比較すると、崩壊直前の AE 波形がかなり長くなっていることがわかる。また、図-6.3.34 は、崩壊前兆時と崩壊直前にそれぞれ発生する AE の継続時間の頻度分布を比較したものであるが、崩壊直前に長い継続時間を有する AE の発生する頻度が明らかに多くなっていることが確認できる。この継続時間の相違については、崩壊直前では破壊の形態がせん断が卓越し、破壊の形態が変化するためとの考え方もできる。しかし、この現象はむしろ破壊が連続的に進行するため、幾つもの AE が重なり、重合波になっているためであると考えられる。

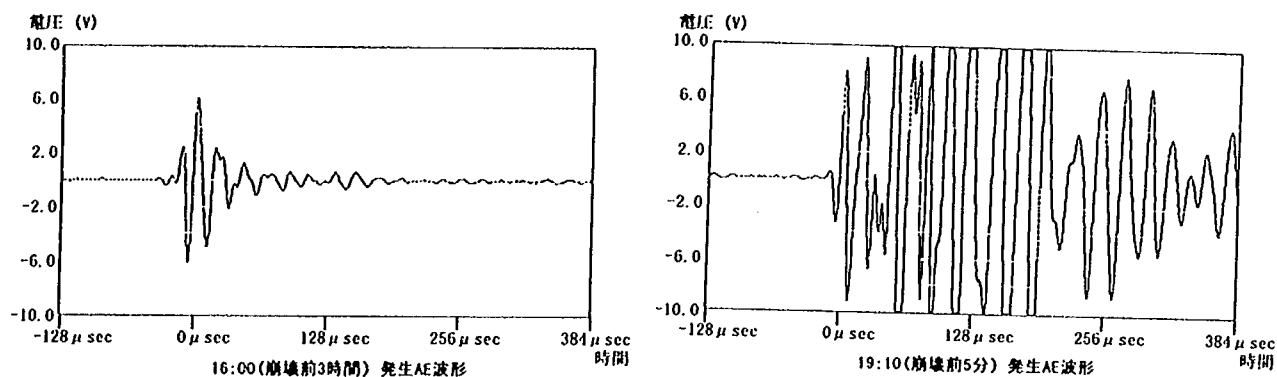


図-6.3.33 崩壊余裕時間による波形の相違

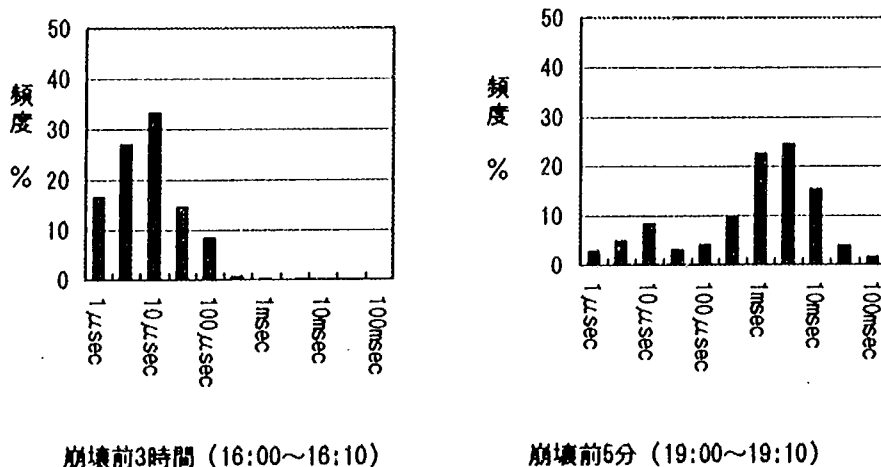


図-6.3.34 崩壊余裕時間による継続時間の頻度分布

図-6.3.35 は、最終崩壊時における単位時間あたりの AE ヒットと AE カウント(以下カウントと称する)の比較を行ったものであるが、崩壊の直前 5 分ほどで AE カウントが 2 次関数的に増加しているにもかかわらず AE ヒットは急激に減少している。これは、瞬間的に膨大な破壊が発生しているため、無数の AE が重合していることを示しているものと判断される。

この現象は、AE の計測システムの設定にも依存しているが、基本的に AE により崩壊の最終状態をモニタリングするには、AE ヒットよりも AE カウントを用いることが望ましいことを示している。

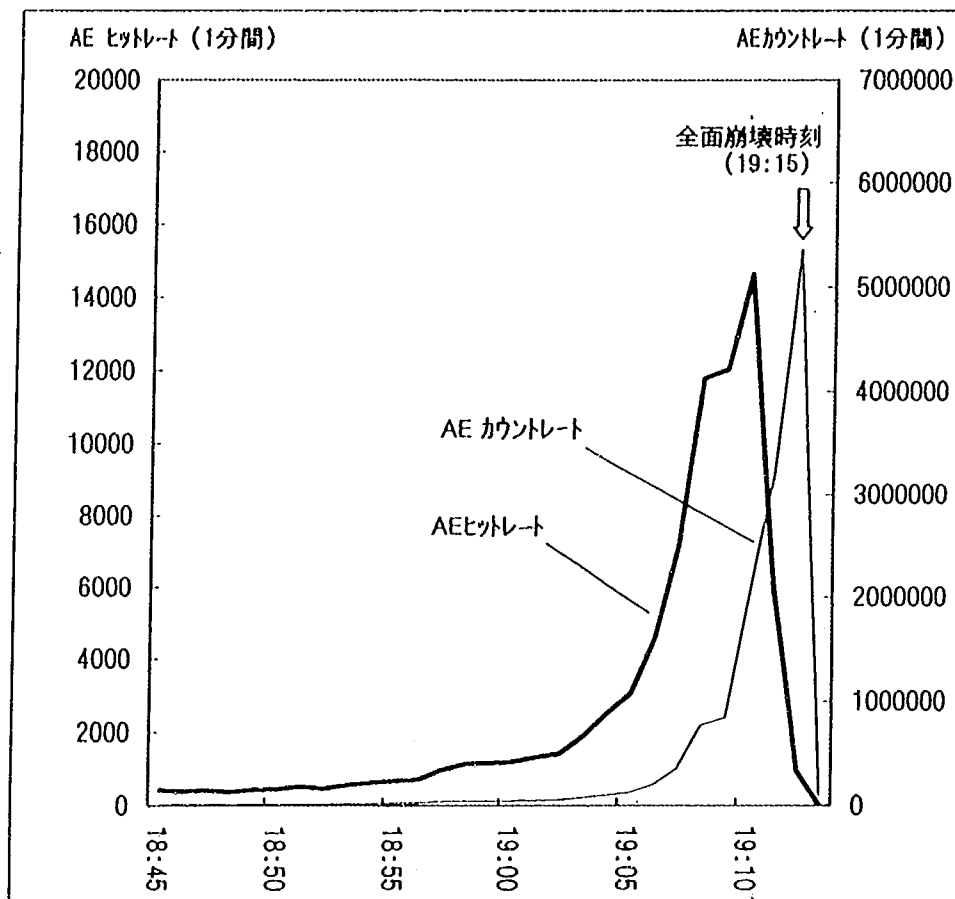


図-6.3.35 最終崩壊時における単位時間あたりの AE ヒットと AE カウントの比較

図-6.3.36 は、今回の実験における崩壊直前の AE カウント (ch-3) の総和および表面移動量 (伸縮計 2) を比較したグラフである。図-6.3.36 に示されるとおり、伸縮計の挙動と AE の発生挙動は酷似しており、クリープ曲線に対応していることが明らかである。

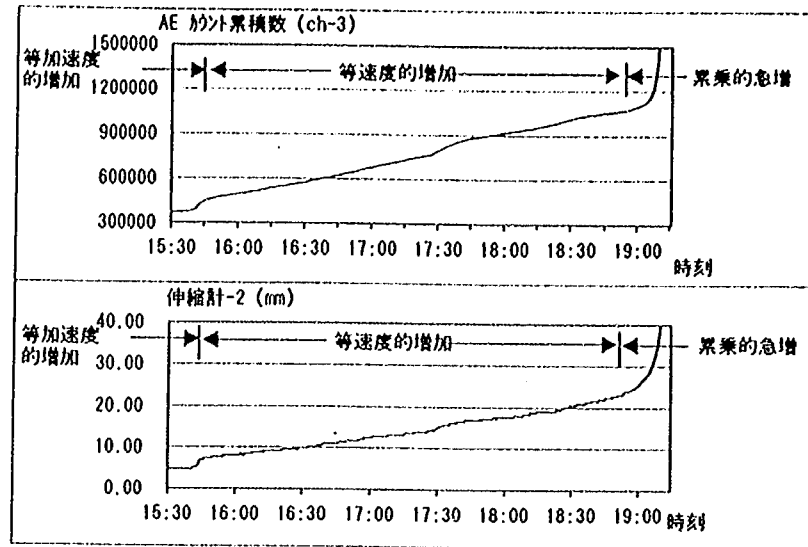


図-6.3.36 崩壊直前の伸縮計の挙動と AE の発生挙動

福岡らは、表面移動速度の逆数がゼロになる時刻すなわち表面移動速度が無限大になる時間を算出することにより、崩壊時刻を予測する方法を確立している²¹⁾。AE の発生挙動では、単位時間あたりの AE の発生量が、この表面移動速度に対応している。そこで、同様に、単位時間あたりの AE カウント (AE カウントレート) 逆数の時系列変化を図-6.3.37 に示す。この図に示されるとおり、18:50 以降、単位時間あたりの AE カウントの逆数は、ゼロに向かってほぼ直線的に収束している。このことは、福岡らが表面移動量のデータを用いて崩壊時刻の予測した方法が AE データを用いてもできる可能性を示している。

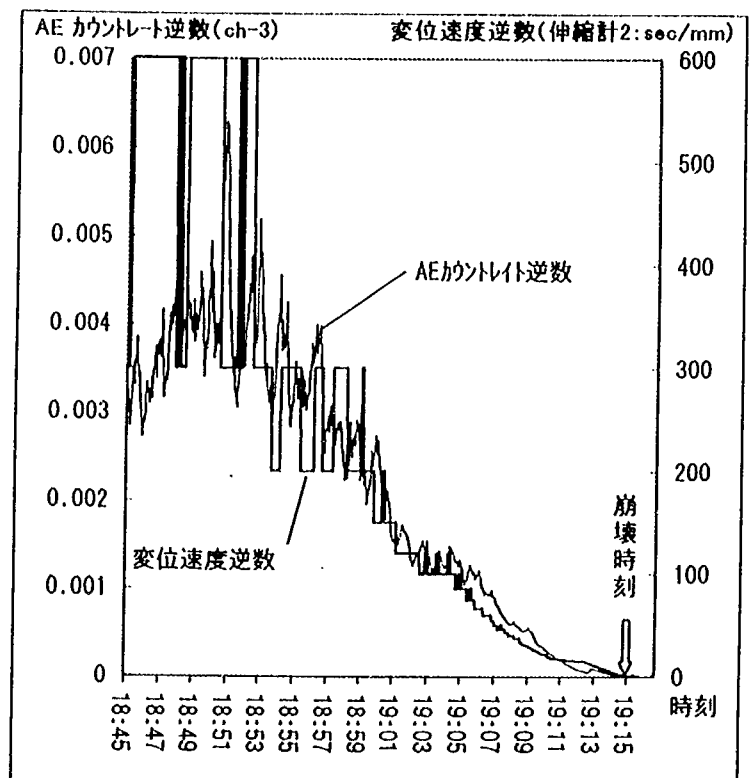


図-6.3.37 AE カウントの逆数による崩壊時刻の予測

6.4 AE法による斜面動態計測の実用性

本共同研究において明らかになった「AE法による斜面動態計測方法」を表-6.4.1に示す。表-6.4.1に示したAE計測システムを日光岩盤斜面、木更津土砂斜面、しらす斜面に適用した結果、それぞれの斜面においてAEにより斜面の変状を詳細に捉えられる可能性があることが確認された。

また、一方では、AE計測システムには以下の問題点があることが明らかになった。

- ①気象ノイズ・電気ノイズに弱い。
- ②装置が大型で、取り扱いが難しい。

しかし、これらの問題点については、本共同研究のなかで解決の方向性が見出されており、今後徐々に解消されるものと判断される。

また、今回の共同研究において、斜面崩壊の機構について未だ十分に明らかにされていないことが改めて確認された。今後、斜面崩壊の機構を明らかにするうえでも、AE計測のような詳細に斜面の動態を監視できる技術が必要なものと考えられる。今後は、試験的運用も含めたAE計測データの蓄積が不可欠なものと判断される。

表-6.4.1 AE法による斜面動態計測方法のまとめ

AE計測システム	AEセンサ			ノイズ対策	評価方法
	センサ種類 ウェーブガイド	対象	設置方法		
AE計測装置は以下のように大別される。 ①単位時間あたりのAEの発生数だけを記録する装置。 ②個別のAEについて最大振幅値、継続時間などのAEパラメータを記録する装置。 ③個別のAEパラメータだけでなく、波形データまで記録する装置。 これらのAE計測装置は、計測対象斜面の条件や危険度に応じて選定を行なう。また、最近のAE計測装置には通信機能を備えたものもあり、山間地における監視などに特に有効である。 なお、本共同研究においては、同一斜面を対象に約1年半を通じてAE計測を実施したが、この間AE計測装置はほぼ順調に作動し、AE計測装置が野外での長期の監視に耐えうることを確認した。	AEセンサの周波数は監視範囲と設置条件により選定する。AEセンサはプリアンプ内蔵型・防水・絶縁仕様とする。 一般に、比較的狭い範囲を感度よく計測するためには高周波センサ（共振周波数：約60kHz）を、ある程度広い範囲を監視するためには低周波センサ（共振周波数：約20kHz）を使用することが望ましい。	土砂斜面	土砂斜面はAE波の減衰が大きいと、ウェーブガイドの使用が前提となる。ウェーブガイドは打ち込みあるいは埋設により設置する感度の高い計測を行なうためには、移動土塊と不動土塊の境界を横切るように設置する。	降雨などの気象条件に起因するノイズは、できる限り検出しない条件でセンサを設置する。 このために、土砂斜面では表面から少なくとも数10cm、岩盤斜面では2m以上の深度で埋設することが必要である。また、センサは絶縁型のものを用いて、地電流などの影響を受けないようにする。	(1)斜面変状モニタリング 斜面変状モニタリングのための評価手法としては以下のものがある。 ①改良b値による評価 ②正規偏差による評価 ③波形記録・判読による評価 (2)斜面の変状位置の推定 AEの特徴の1つとして位置評定技術がある。これは、ウェーブガイドを用いた1次元的位置評定、複数のセンサを用いた2次元、3次元の位置標定などがある。 (3)崩壊時刻の予測 斜面崩壊時刻の予測技術については、以下のものが提案されている。 ①レートプロセス解析 ②カウントレートの逆数による監視
		岩盤斜面	岩盤へのAEセンサの設置方法としては以下のものがある。 ①表面設置 変状箇所を設置可能 防護キャップが必要 ノイズの影響大 ②表面削孔・孔内設置 変状箇所を設置可能 掘削深度に限界がある ③垂直削孔・孔内設置 ノイズの影響が少ない 岩盤表面から離れる		

【参考文献】

- 1) Koerner, R.R.M., McCabe, W.M., "Acoustic Emission Behavior and Monitoring of Soils", ASTM, Acoustic Emissions in Geotechnical Engineering Practice, 1981.6
- 2) Shinotani, T., Sakaino, N., "Acoustic Emission Diagnosis of Concrete Pile Damaged by Earthquakes", Fourth Far East Conference on Nondestructive Testing, 1997.10
- 3) 大津政康：アコースティック・エミッションの特性と理論（構造物の稼働時の非破壊検査法），森北出版，第2章AE計測法，pp. 10-23，1988. 8.
- 4) 大津政康：アコースティック・エミッションの特性と理論（構造物の稼働時の非破壊検査法），森北出版，pp. 21，1988.
- 5) 宇津徳治：地震学，共立全書，pp. 133-140，1977.
- 6) 力武常次：地震予報・警報論，学会出版センター，pp. 99-100，1979.
- 7) 金森博雄：地震の物理，岩波書店，pp. 236，1991.
- 8) 石本己四雄、飯田波事「微動計による地震観測（一）地震動の大きさ空間的分布」震研彙報 17，pp.443-478，1939.
- 9) Ishimoto, M. and K. Iida, "Observation sur les seismes enregistres par le microsismographe construit dernièrement (a)," Bulletin of Earthquake Research Institute, Vol.17, pp. 443-478, 1939.
- 10) Shiotani, T., K. Fujii, T. Aoki and K. Amou, "Evaluation of Progressive Failure using AE Sources and Improved b-value on Slope Model Tests," JSNDI, Progress in Acoustic Emission VII, pp. 529- 534, 1994. 1.
- 11) 塩谷智基、藤井清司「AE 振幅分布より得られる b 値の改良とその斜面崩壊監視パラメータへの適用性に関する研究」土木構造材料論文集第 10 号，九州橋梁構造工学会・土木学会西部支部，pp.45-50，1994. 11.
- 12) 門間敬一、海老原和重、吉松弘行「AE を用いたしらす斜面の崩壊予知」、土木技術資料、Vol.40 No.6, pp20-25, 1998.6
- 13) 海老原和重、門間敬一、石橋晃睦、藤原鉄朗、「AE を用いた斜面動態観測におけるノイズ除去に関する検討」、第 37 回地すべり学会研究発表講演集、pp237-240, 1998.8
- 14) Ohtsu, M., "Rate process analysis of AE activity in uniaxial compression test of core sample," Progress in Acoustic Emission V, JSNDI, pp. 311-316, 1990.
- 15) 塩谷智基・青木朋也・藤井清司：AE レートプロセス理論による斜面崩壊時間予測，土木学会第 50 回年次学術講演会（III 部門），pp. 812 - 813, 1995. 9.
- 16) Shiotani, T., T. Aoki and M. Ohtsu, "Prediction of Slope Failure Based on AE Activity," ASNT, The First US-Japan Symposium on Advances in NDT Proceedings Book, pp. 239 - 244, 1996. 6.
- 17) Shiotani, T. and M. Ohtsu, "Prediction of Slope Failure Based on AE Activity," Acoustic Emission: Standards and Technology Update, ASTM STP 1353, S. J. Vahaviolos, Ed., ASTM, 1998.
- 18) 塩谷智基・青木朋也・藤井清司・天羽恵子：AE 振幅分布より得られた改良 b 値を利用した斜面崩壊時間予測，土木学会第 49 回年次学術講演会（III 部門），pp. 894-895, 1994. 9.
- 19) 塩谷智基・青木朋也・藤井清司：AE 経時曲線を利用した砂質土斜面の崩壊時間予測，第 30 回土質工学会研究発表会，pp. 1809 - 1810, 1995. 7.

- 20) 藤原鉄朗、門間敬一、「シラス斜面の動態モニタリングへのA E法の適用」、土木学会 第 53 回年次学術講演会 (III 部門)、, pp. 492-493、1998.10
- 21) 福田輝旗「斜面崩壊時の表面変位速度と加速について」土木学会第 36 回年次学術講演会概要集第 3 部、pp302-303、1981

7.まとめ

本共同研究は、以下の4つの研究項目に従って実施した。

- ① 斜面崩壊予測に関する予備検討
- ② 現地実証試験
- ③ 計測データの解析と評価手法についての検討
- ④ 現地計測機器としてのAE計測システムの開発

以下に上記の研究項目ごとに研究成果を整理する。

(1) 斜面崩壊予測に関する予備検討

本共同研究では、斜面崩壊を斜面の構成材料から岩盤斜面崩壊と土砂斜面崩壊に分類し、それぞれについてAE法の適用性を検討した。本検討では、全国20箇所以上の斜面を対象に斜面崩壊のパターンや規模、AE法による崩壊予知の可能性について考察を行なった。この結果、日光稲荷川岩盤斜面、木更津土砂斜面、鹿児島しらす土砂斜面の3地点を現地実証試験の現場に選定した。また、これらの現場については、既存の研究事例を参考にAE計測計画および人工崩壊実験計画を作成した。

(2) 現地実証試験

日光稲荷川岩盤斜面、木更津土砂斜面、鹿児島しらす土砂斜面の3地点における現地実証試験から得られた知見を以下に示す。

- ① 現地斜面においての約20ヶ月間の長期にわたるAEデータを取得した。こうした長期間のデータには季節による長期的な変動やより短期的な気象による変動および落石、地震時等の情報が反映されており、貴重な実測データを取得することができた。
- ② 本来の目的である岩盤斜面の崩壊予兆については、自然条件下での崩壊が見られなかったことから、後述する人工崩壊実験を実施し、人工崩壊時のAEデータを取得した。この結果、岩盤崩落において特徴的なAEが発生することが認められ、AEによる斜面モニタリングが有効であることが確認された。
- ③ しらす土砂斜面の実験では、AE法が伸縮計などの既存の計測装置に比較して詳細に斜面モニタリングするのに適していることが確認され、AE法により精度の高い土砂斜面崩壊予知が可能であることが示された。
- ④ その他各実験に関連して実施された要素試験から、AEパラメータの検討によって降雨に起因するAEを判別できる可能性が示された。

また、予備検討および現地実証試験をとおしてAEセンサの仕様、設置位置および設置方法に関して以下の事項が明らかになった。

- ① 気象条件等の影響はセンサの周波数のみではなく、設置方法に大きく依存することが、主に日光稲荷川岩盤斜面の長期計測結果から確認された。

- ② 岩盤、土砂斜面いずれにおいても、現場計測では電気的なノイズ対策として、絶縁型センサの利用が不可欠である。特に地中埋設型では事前の対策が重要である。
- ③ 斜面監視に適するAEセンサの周波数特性は今回の実験からは明らかにできなかった。
- ④ 岩盤斜面ではボーリング孔内設置方法が外部の気象条件等の影響をほとんど受けないことが確認された。これに対して表面設置や表面削孔型では降雨や気温の変化などの影響を大きく受けることを確認した。
- ⑤ 岩盤斜面では崩壊に影響を与えると予測される不連続面近傍にAEセンサを設置する必要がある。
- ⑥ 土砂斜面では、不動土塊と移動土塊の横切るように設置したウェーブガイドを用いてAEセンサを設置することが望ましい。

(3) 計測データの解析と評価手法についての検討

- ① AE計測データの評価では、特に崩壊現象に関連するAEとそれ以外のものを判別することが重要である。これについて各種AEパラメータの検討などを実施し、改良 b 値や正規偏差による方法などが検討され、それぞれ岩盤崩壊実験では、一定の判別が可能であることが示された。
- ② しらす崩壊実験ではカウントレート(AE発生率)の逆数を用いる解析等で崩壊時刻の予測が可能であることが示された。
- ③ 岩盤斜面での予備実験において、表面打撃法による実験データをもとにAE発生位置の標定し、センサの配置などの条件が整えば、AE発生位置が推定できることが示された。

(4) 現地計測機器としてのAE計測システムの開発

既往のAE計測事例の中には長期計測中によりAEセンサが破損し、計測不能になる例があった。共同研究の現地検証試験においても、同様のセンサ不調が発生した。そこで、本共同研究では、AEセンサの現地耐久性について検討を行い、絶縁性および耐水性を強化した長期野外計測用のAEセンサを開発した。

また、本共同研究では、現地計測機器としてのAE計測システムに求められる機能を検討し、以下の課題を抽出した。

- ① 通信機能：公衆回線を用いた通信機能によるAEの発生状況の常時監視機能
- ② 電源安定機構：電源を安定化することにより電源ノイズを除去する機能
- ③ データバックアップ機能：電源異常などの事態においてもデータを保護する機能
- ④ 自動終了・立ち上げ機能：異常終了時にシステムを自動で立ち上げ、計測を再開する機能
- ⑤ センサの自動感度確認機能：埋設後のセンサ感度を計測機から確認できる機能

なお、これらのシステムについては一部製品化されつつあり、近い将来AE現地計測システムとして確立できるものと考えられる。

AEによる斜面動態計測システム ISSN 0386-5878
に関する共同研究報告書

土木研究所資料第228号

平成11年6月(1999)

建設省土木研究所
(財)砂防・地すべり技術センター

要旨

自然斜面の異常変動を早く時期にとらえ、かつ崩壊・規模等の予測手法として、現地観測に適したAE計測技術開発を目的として行った。岩盤斜面、土砂斜面におけるAEセンサーの反応と斜面動態との関係を検討し、AEセンサーの特性を明らかにした。

キーワード：AE計測、斜面動態特性

郵便はがき

50円切手を
はって下さ
い

3 0 5 0 8 0 4

建設省土木研究所

砂防部急傾斜地崩壊研究室御中

茨城県つくば市大字旭一番地

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第 228 号 部

上記のとおり受領しました。

所属(住所)

氏 名 _____ 印 _____