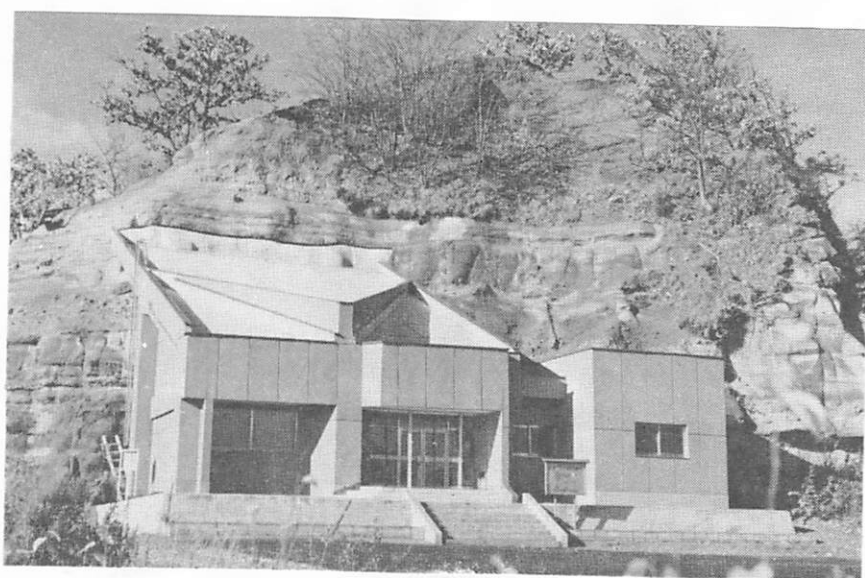


# 史跡 フゴッペ洞窟 保存工事報告



余 市 町

## 序

昭和28年11月14日付をもって国の史跡となった「フゴッペ洞窟」は、古代北方文化を解明するための貴重な資料として、世の注目を集めました。本史跡を永久に保存し後世に伝えるため、昭和29年と30年の2か年間にわたり、国庫補助を得て木造の覆屋を建築して、その保存をはかるとともに一般に公開して参りましたが、その後、自然風化、温湿度の急激な変化等、いろいろな影響によって洞窟壁面の彫刻が剝離・崩壊して不鮮明となり、消滅していく状況にありました。

そこで、昭和43年6月、文化庁、道教育庁に現地調査をお願いして、余市町と三者によって種々協議の結果、文化庁、道教育庁のご指導とご助言を得ながら、昭和45年までの3か年間を基礎調査期間と定め、基礎調査を東京大学ならびに北海道大学の諸先生をお願いし、現代科学の英知を結集の上、着手した次第であります。

昭和43～45年度に、国庫補助および道費補助を得て行なった基礎調査の結果、洞窟内部と外部を遮断し、壁面の温度と湿度を年間・昼夜を問わず一定に保つことが保存に適しているとの科学的結論を得ましたので、昭和46年と47年の2か年間を具体的な保存工事の実施期間として、昭和46年に覆屋および機械設備の設計と基礎工事を完了し、昭和47年において覆屋の建設と内部機械の設備一切の工事をいずれも国庫補助事業として行ない、昭和47年11月25日をもって竣工検査を完了した次第であります。

本事業はわが国における史跡保存工事としては初めての試みでありますと同時に、世界においてもあまり例のない試みであるといわれております。この貴重で重要な先人の歴史遺産が所在するわが郷土余市町に住んでいることを大いなる誇りとして、わたし達の力で先人が残した歴史遺産を永久に保護保存して後世に伝えるとともに、これを機会に、歴史ある郷土の「まちづくり」により一層の努力をする所存であります。

最後に、この史跡の保存事業にご指導、ご助言、ご協力を賜りました東京大学の岸谷孝一助教授、野村豪助教授、故岩塚守公助教授、北海道大学の田治米鏡二教授と、考古学者の名取武光、峰山巖の各先生、ならびに文化庁、北海道教育庁その他関係機関の方々に對し、心からお礼申し上げますとともに、今後も本町の史跡保護保存事業に對し、特段のお力添えをお願い申しあげる次第であります。

昭和48年3月

余市町長 小柄 義信

# 目 次

序	余市町長 小柄義信	3
I	フゴッペ洞窟遺跡—岩壁彫刻と洞窟前庭部について	
	フゴッペ洞窟発掘調査団	6
II	洞窟内外部の写真測量	牛川喜幸・伊東太作・佃 幹雄 10
III	洞窟基盤岩石の調査	岩塚守公・福田正己 14
IV	洞窟内部の温湿度測定	野村 豪 21
V	洞窟内部の振動測定	田治米鏡二・五十嵐享・笹谷 努
	殿内啓司・長能正武	26
VI	洞窟覆屋の設計	岸谷孝一 31
	総経費一覧表	46
	英文梗概	47

## <別 丁 図 版>

1. フゴッペ洞窟平面図
2. 同 内部平面図
3. 同 内部南壁立面図
4. 同 内部北壁立面図

# 図版・写真

[ I ]		Fig. 3 照明配線図	25
[ II ]		[ V ]	
Pl. 1 右奥壁上段の彫刻群	6	Fig. 1 振動計の配置	26
Pl. 2 左奥壁下段の人像と翼人	6	Fig. 2 洞窟の断面図	26
Fig. 1 フゴッペ洞窟発掘区	7	Fig. 3 加速度記録4 および9	27
Pl. 3 B-1, 2区の落盤	8	Fig. 4 水平加速度および振動継続時間と 車輛数との関係	27
Pl. 4 B-2区の波蝕台	8	Fig. 5 加速度記録14	28
Pl. 5 鹿の肩甲骨を収めた土器(A-1 区)	8	Fig. 6 線路からの距離による最大加速度 の減衰	29
Pl. 6 土器内の鹿の肩甲骨の状態	8	Fig. 7 線路からの距離の増加に伴われる 東西動の減衰記録	30
Pl. 7 土器を献供したピット(A-3区)	9	[ IV ]	
Pl. 8 墳墓に副葬された大刀, 刀子, 鉄 鏃(D-3区)	9	Fig. 1 設計フロー	31
Pl. 9 岩盤の彫刻(A-1区)	9	Fig. 2 イメージ図	32
[ III ]		Fig. 3 案内図	32
Fig. 1 写真測量の原理	10	Fig. 4 配置図	33
Fig. 2 実測基準点および撮影点配置図	11	Fig. 5 1階平面図	34
Pl. 1 内部写真対および基準点	11	Fig. 6 R階平面図	35
Pl. 2 近接撮影用カメラSMK40	12	Fig. 7 立面図	36
Pl. 3 写真経緯儀NAB 150	12	Fig. 8 カプセル平面図	37
Pl. 4 図化機	12	Fig. 9 カプセル北側立面図 カプセル北側展開図	37
Fig. 1 フゴッペ付近地形図	14	Fig. 10 A-A断面図	39
Pl. 1 偏光顕微鏡写真	15	Fig. 11 B-B断面図	39
Fig. 2 岩石試料内部の温度変化	16	Fig. 12 C-C断面図	40
Fig. 3 圧縮温度と凍結温度	16	Fig. 13 D-D断面図	41
Fig. 4 弾性波強度と凍結速度	18	Fig. 14 E-E断面図	41
Pl. 2 露岩表面のクギ打ちこみ状態	19	Fig. 15 ドレイン平面図・断面図	42
[ IV ]		Fig. 16 カプセル ジョイント部	43
Fig. 1 洞窟内気温・壁温・露点温度	23	Fig. 17 構造図I	44
Fig. 2 空調系統図	24	Fig. 18 構造図II	45

# I フゴッペ洞窟遺跡

## —岩壁彫刻と洞窟前庭部について

### フゴッペ洞窟発掘調査団

フゴッペ洞窟遺跡は名取武光を責任者とする調査団により1951年と1953年の2回にわたり洞窟内部の調査が行なわれ、1971年には洞窟前庭部の発掘調査を行なっている。洞窟内部の調査の結果、洞窟内に厚く堆積する遺物層に被覆された壁面に200個を越える彫刻が発見され、遺物層からは続縄文時代の後北式文化に属する人工遺物と自然遺物が多数発見された。現状での洞窟の大きさは奥行約7m、幅約6m、高さ7m以上であるが、1953年と1971年の調査により、洞口付近では、現底面より-3mまで遺物層が続いていることが確認されている。

彫刻はすべて磨研による陰刻で表現され、最深部は1.5cm前後の深さが普通である。大きさは人像によって例示すれば最大のものは高さ46cm、幅30cmであり、最小のものは高さ10cm、幅5cmである。描現手法には陰刻による陰絵様のものと線刻の輪郭によるものがあるが、前者が大部分を占めている。彫刻はさまざまな形態を示すが、人像、動物に仮装した人像、抽象化された幾何学的形象のほか、四足獣、海獣、魚、舟と漁人、屋舎形、凹点などに分けられ、数としては抽象化された幾何学的形象のものが最も多い。

名取は「これらの彫刻は生活記録と呪術的芸術の区別が困難であるから、主として芸術の呪術宗教的実利主義(Magicoreligious utilitarianism)の立場をとることにより、真に近いものが得られ、呪術の一種である交感呪術の原理はフゴッペ彫刻解明の鍵となるであろう」と述べている。フゴッペ洞窟遺跡の詳細については、フゴッペ洞窟調査団編の「フゴッペ洞窟」(ニュー・サイエンス社)を参照されたい。

洞窟前庭部の調査は、洞窟被覆建築の基礎工事の平面プランに従い、挿図のごとき発掘区を設定した。B-2区とC-4区は洞窟の基礎盤をなす波蝕台まで掘り下げ、他の小区は無

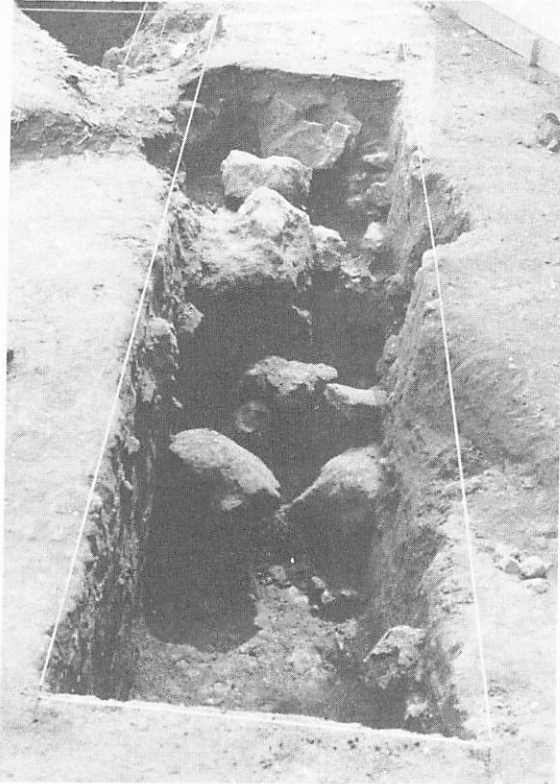


Pl. 1 右奥壁上段の彫刻群

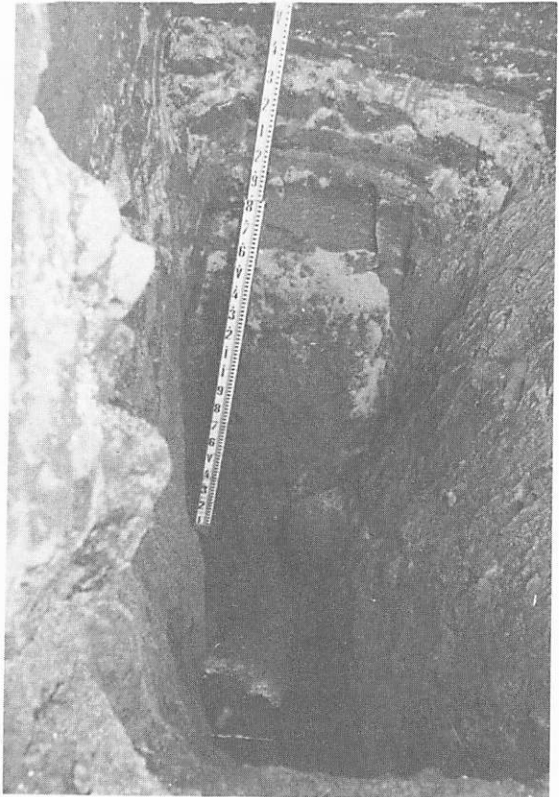


Pl. 2 左奥壁下段の人像と翼人





Pl. 3 B-1, 2区の落盤



Pl. 4 B-2区の波蝕台



Pl. 5 鹿の肩甲骨を収めた土器 (A-1区)



Pl. 6 土器内の鹿の肩甲骨の状態

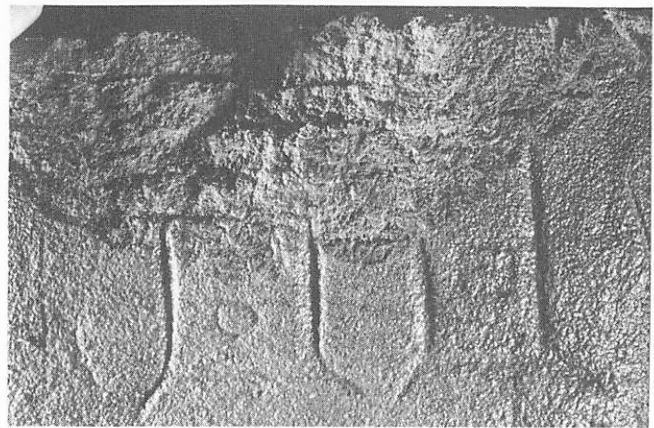
(2) 彫刻を施した岩盤

彫刻は岩盤の平坦な側面に施されている。その面は高さ約30cm、幅約95cmで地面に対し垂直に立ち、煤煙にいぶされ黒光をはなっていた。彫刻は右端にかたよったところに2個並び、上部は岩盤面の剥離により消失している。描現手法は線刻による輪郭によるもので、洞窟内のそれと無縁ではない。A-1区の北辺部にあり、上記の土器から1mほど離れている。

(3) 焚火址

A-1区の岩壁に接した南側に大形の板状の落盤が立っていて、その北面に14層の木炭を混ざる灰層が





PI.7 (左上) 土器を献供したピット  
(A-3区)

PI.8 (右上) 墳墓に副葬された大刀、  
刀子、鉄鍬 (D-3区)

PI.9 (右下) 岩盤の彫刻 (A-1区)

水平に堆積していた。灰層の厚さは4mmのものから4cmのものまで多様であり、間層の土層は3~10cmの厚さがあり、全層の高さは1.4mに達している。灰層の広がりには径約1.5mで、第1灰層の西辺に上述の土器があり、北辺部に彫刻を施した岩盤が置かれていた。

#### (4) 土器を献供するピット

A-3区の砂丘面に掘り込まれたピットの平面形は円に近い楕円で、東西径50cm、南北径50cm、深さ17cmの大きさのものである。ピット中にはフゴッペ5類a土器が収められ、その上部に4個の礫が配置されていた。

#### (5) 鉄器を副葬する墳墓

D-3区に発見されている。墓壇は砂層に掘り込まれ、長軸110cm、短軸80cm、深さ50cmほどの大きさで、長軸は北東-南西の方向を示している。人骨は保存が悪く、下顎の一部と腰関節の部分の採集しただけであるが、頭を北東に向けた屈葬であることは確かである。副葬の鉄器は大刀2点、刀子1点、鍬2点であり、土器の副葬はない。

#### (付記)

洞窟前庭部については「フゴッペ洞窟発掘調査概報」に基づいて記載した。なお、本稿に使用した図版の岩壁彫刻と岩盤彫刻は掛川源一郎の1972年10月撮影のものにより、その他は1971年の発掘時における調査団の撮影のものである。



## II 洞窟内外部の写真測量

奈良国立文化財研究所 牛川喜幸・伊東太作・佃 幹雄

### 1. 調査目的および期間

この調査は、地上写真測量を応用して、最近、凍結あるいは付近を通る函館本線の振動などによって、破損が目立ってきた史跡フゴッペ洞窟内の彫刻および外部の現状の精密な記録保存資料を得ることを目的とし、あわせて、同洞窟保存のための施設設計および施工に資するために実施したものである。

撮影は昭和44年10月に行ない、翌年1月に図化および測定を行なった。その後、補測のため昭和45年に一部再撮影をし、同年12月に図化を完了した。

### 2. 実測調査方法

実測調査は洞窟内外部とも、地上写真測量により行なった。その原理を簡単に説明する。

われわれが立体的な奥行を感じたり、遠近を知ることができるのは経験上遠いものほど小さく見えることを知っていることにもよるが、両方の目が約65mmへだたった位置から物を見ているからである。このような実体感覚は、直接に実物を見ているときばかりでなく、双眼鏡のような光学器械を通して観察する場合にも起こる。これはわれわれの目が、たんに目にはいってくる光線の最後の経路だけを認識するという性質によるためである。したがって、左右に適当な間隔をへだてた2地点から撮影した2枚の写真を、右の眼で右の写真、左の眼で左

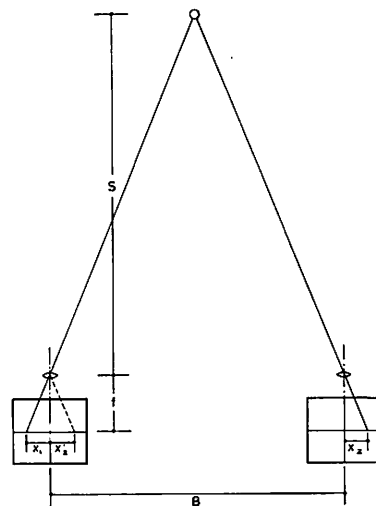


Fig. 1 写真測量の原理

の写真を眺めることができたなら、ちょうどカメラの位置に目をおいてながめると同じ感覚が得られ、しかも、この場合カメラの間隔は両眼の間隔より大きいから、実際に目でながめるよりも立体感がいっそう誇張されて見えることになる。

写真測量はこの原理を使って、誇張された立体像について測定を行なうのである。

地上写真測量では、適当な間隔（撮影基線）をへだててカメラを水平に整置し、平行に2枚の写真をとる。地上の点をX、Y、Z（Xは撮影基線、Yは奥行、Zは高さ）で表わすと、乾板面はX-Z面になり、カメラ軸はY方向にむく。たとえば第1図で、Sだけ離れた点にある物体を、焦点距離fのカメラでBだけ離れた位置で撮影したとすると、写真面にはそれぞれ画面の中心から $x_1$ 、 $x_2$ の位置にうつる。これから距離Sを $S = B \cdot f / x_1 + x_2$ で求めることができる。したがって、地上写真を使って位置を正確にきめようとすれば、撮影にあたって2つのカメラ位置を水平かつ平行に据えることのほかに、焦点距離、撮影基線が正確にきめられなければならない。また、小さい乾板に縮写された映像をもとにして測定するのであるから、レンズのわずかな収差も誤差の原因になるし、乾板面の凹凸や伸縮も、乾板面がレンズ軸に正確に垂直になっているかどうか、ということも精度に大きい影響を与える。このため写真測量には特殊なカメラ・図化機を必要とするが、しかし写真測量を応用すれば、作業が迅速で、精度にむらがなく、また乾板を保存する限り必要に応じていつでも撮影時の状態を再現できることなどの利点がある。

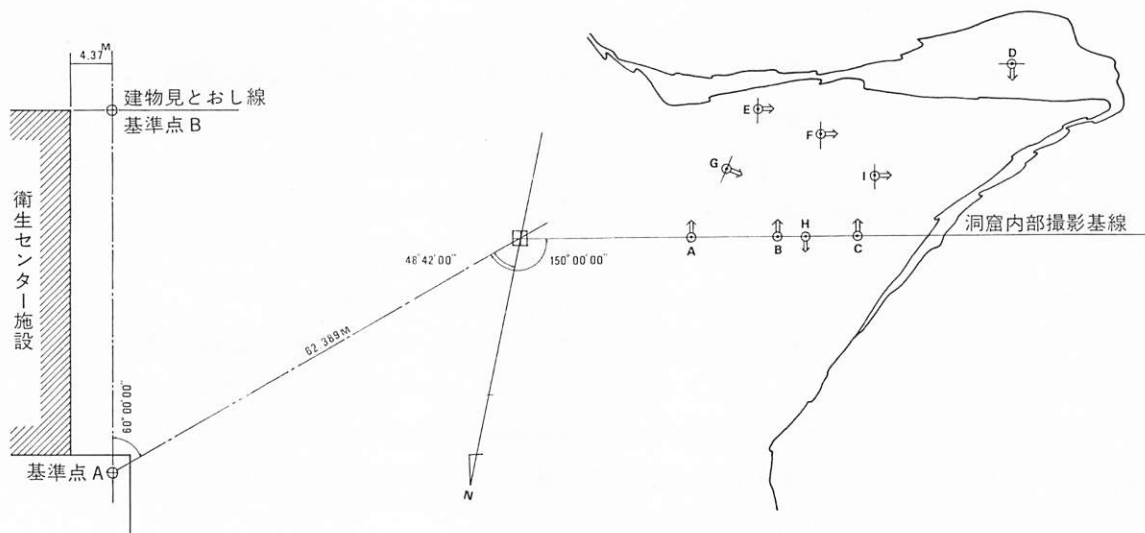


Fig. 2 実測基準点および撮影点配置図

今回の作業は (a) 投影面の設定, (b) 撮影点の決定, (c) 基準点の設置およびその計測, (d) 撮影, (e) 図化・測定の順序, で行なった。以下各作業について述べる。

a. 投影面の設定

先に述べたとおり, 写真測量では適当な間隔 (撮影基線) をおいてカメラを水平に整置し, 平行に 2 枚の写真をとる。この写真をもとに図化を行なうのであるが, できあがった図は撮影基線を含む鉛直面への正射投影図となる。したがって, 立面図を作成するためにはまず投影面を決定しなければならない。

不整形な洞窟内部で, 投影面をどう設定するか技術的に議論のわかれるところであったが, 結局, 比較的彫刻の残存状態がよく, しかも面積の広い洞窟南壁に平行な面を投影面とした (第 2 図)。そのため, 北壁開口部付近では投影面と壁面にかなりの角度が生じたが, この部分に彫刻がなく, 図化には直接支障がないため, とくに別な投影面の設定はしなかった。西壁の投影面は南北壁と直交する面を投影面とした。これらの投影面は後述する基準点からいつでも再現できる。

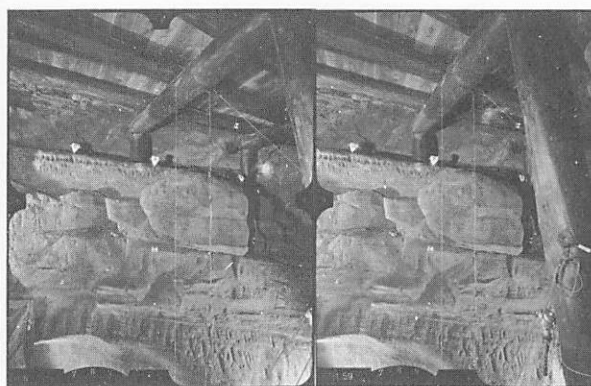
b. 撮影点の決定

撮影当時洞窟内部には, 補強のための坑木や洞窟内部の温度・乾湿度測定用の計器が設置してあり, 撮影点の決定にはかなりの制約をうけた。結局, 先に定めた投影面に平行および直交する面で第 2 図に示した A ~ I 点に撮影点を定めた。ただ図中 G 点は他の点の死角を補う意味で平面図作製用に, 投影面に対して任意の角度をとって撮影した点である。また, 各点ともカメラの高さを最高位置である 2.5m と, 中位の 1.2m の 2 段階で撮影し死角をできるだけ少なくするよう努めた。しかしなお, 坑木や測定器具にさえぎられ, 一部死角の部分が生じた。

外部撮影点については, 南部分は函館本線をこえた水田中, 東部分は衛生センターの前庭付近, 北部分は国道上にそれぞれ設置した。西部分については, 樹木が密生しているため撮影不可能であった。

c. 基準点の設置およびその計測

図化測定は東独 Zeiss 社製ステレオメトログラフ E 型で行なった。この図化機の機構を簡単にいえば, 投影器に乾板をのせ, その後



Pl. 1 内部写真対および基準点

方より光を送って現地と同じような光模像をつくり、この光模像について測定を行なうのである。したがって、測定精度を高めようとするれば、ここにできる光模像は実際の対象物の正確な縮図でなければならない。そこで2つのカメラの関係位置や、各方向から行なう測定の関係をつけるため、あるいは正確な縮尺をきめるためなどの目的で基準点を設置する必要がある。今回は、1モデルの乾板に最低3個の基準点が入るよう、洞窟内部に38点、外部に7点を設けた。図化に先立ち、これらの基準点の位置を適当な縮尺で図紙に展開しておき、写真から測定して得られた点とどの程度よく一致しているかによって、図全体の正確さを知ることができるし、また所望の精度になるまで図化機の規正を行なうよりどころとなるものである。そのため、その測定には細心の注意をもってあたり、精度を高める必要がある。今回、内部については1秒読みセオドライトと鋼巻尺、およびレベルで直接計測し、外部については同じく1秒読みセオドライトを使用し前方交会法により3次元座標を計測した。なお洞窟内部で定めた投影面基準線を洞窟外部に延長し外部基準点も同一座系に統一した。これは別々に図化される内部平面図と外部平面図を合成し、1つの平面図とするためである。

計測の精度は内部で $\pm 0.5\text{mm}$ 、外部で $\pm 1\text{cm}$ におさめた。なお内部の基準点標識は、それにより彫刻がかくされることのないよう、また乾板上でじゅうぶん判読できるよう5~2cm角の発泡スチロール製ターゲットを虫ピンどめにした。

なお、洞窟付近の基準杭は、洞窟保護工事の際そこなわれる可能性があるため、東面の衛生センター施設にコンクリート釘を打ち、フゴッペ洞窟測量の基準点とした。

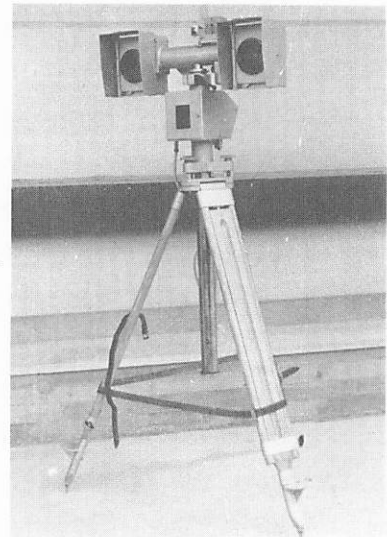
(第2図)

#### c. 撮影

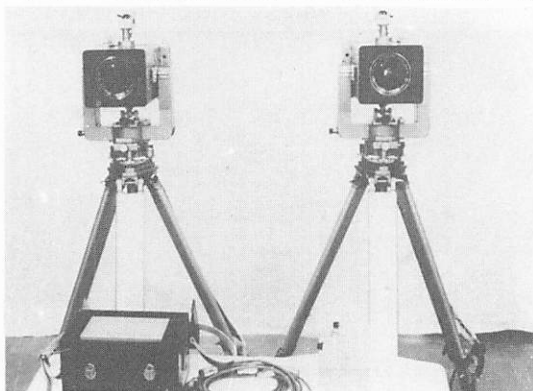
撮影には、洞窟内部では引きがじゅうぶんにとれないため、近接撮影用にとくに改造したZeiss社製広角ステレオカメラSMK40を使用した(写真2)。また、外部については同じZeiss社製CIII B写真経緯儀と、測機舎製NAB150写真経緯儀(写真3)を使用した。内部では測定に都合のよい、コントラストをおさえたフラット照明の撮影と、彫刻の輪郭がとらえやすい一方光線の撮影を合わせて行なった。なお、使用した乾板は内外部とも合わせて約10ダースであったが、このうち図化・測定に使用したのはその約3分の1である。

#### d. 図化

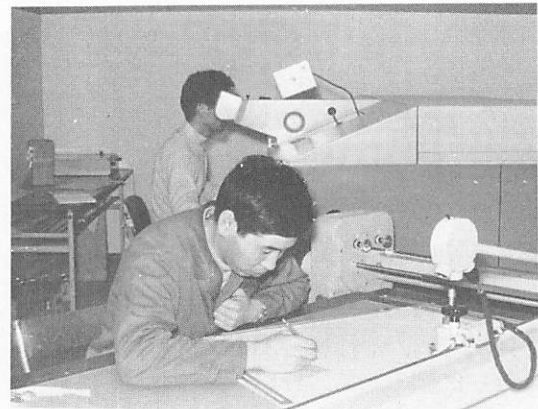
先に述べたとおり、図化・測定には東独Zeiss社製ステレオメトログラフE型を使用した。この器械は構造上Y軸とZ軸の切換えが



PI. 2 近接撮影用カメラ S M K 40



PI. 3 写真経緯儀 N A B 150



PI. 4 図化機

できるので、垂直に撮影された地上写真を用いる場合、一定の高さの水平面で切った断面線（地図の等高線と同じ）を描くこともできるし、撮影基線に平行な鉛直断面線を描くこともできる。

実際には、内部は輪郭線と1cm間隔の鉛直断面線で立面図を、50cm間隔の水平断面線で平面図をそれぞれ図化した。立面図については別色で彫刻、岩の亀裂などを表示した。また、測定座標値により、洞窟縦断面図、横断面図もあわせて図化した。

外部は、等高線間隔1mで平面図を図化した。また別に先の内部平面図と合成した1/50の平面図を作成した。

### 3. 成 果

今回の調査の成果品は

1. 平面図	縮尺 1/50 (等高線間隔 1 m)
2. 内部平面図	” 1/10 ( ” 0.5 m)
3. 内部南壁立面図	” 1/5 ( ” 1 cm)
4. 内部北壁立面図	” 1/5 ( ” 1 cm)
5. A-A' ; B-B' ; C-C' 断面図	” 1/10
6. A-A' ; B-B' ; C-C' 断面図	” 1/50

であり、そのうち1～4を別丁図版に収めた。

### III 洞窟基盤岩石の調査

東京大学 岩塚守公・福田正己

#### 1. はじめに

本報告は、フゴッペ洞窟の構成基盤岩石風化による崩壊についての調査概要である。風化した基盤岩石に対する地盤改良に関しては、従来土木工学的見地から主としてなされており、考古学上の遺跡保存を目的とした事例はない。そこで今回も、直接的に洞窟基盤の崩壊防止にとりかかる前に、まず必要とされる保存物の風化状態と崩壊の機構とを把握することを目的とした調査と試験を行なった。現地でのボーリングやサンプリングに併行して、各種の試験を行ない、その一部はすでに報告した<sup>1)</sup>。調査と実験は、岩塚守公、福田正己が主として行ない、実験については田沼邦雄（北海道大学・低温科学研究所）、調査については遠藤邦彦・大森博雄（東京大学・理学部地理学教室）の諸氏の協力を得た。

この報告については、岩塚のデータをもとに福田がまとめた。

#### 2. 地形概観（第1図参照）

余市町東北部地域では、なだらかな丘陵部がフゴッペ海岸付近で海岸にせまり、一部フゴッペ岬となって海蝕崖をつくる。洞窟のある部分も、この丘陵が谷で開析されて岬状ののびる末端部にあたる。山地部に入るフゴッペ沢、モチヤ沢、チブタシナイ沢を中心として、1次支流河川が丘陵全体を開析しているが、開析谷は深く切りこむことなく、谷壁が不明瞭となっているため、なだらかな丘陵地表面は、波状にローリングしている。地形形

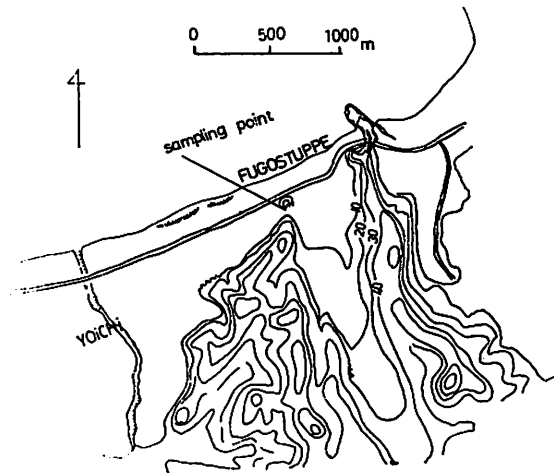


Fig. 1 フゴッペ付近 地形図

態としては、この特徴から周氷河性地形を呈している。これは、過去における寒冷な気候環境を示唆する。また、フゴッペ川、登川の中流部まで、低地が入りこんでいて、河川の流路沿いに段丘は発達せず、埋積谷状をなす。この付近の海岸には、海成段丘は見られない。海岸線に平行して、5 mほどのわずかな高まりが東西に走るが、これは海岸砂丘であり、国道はこの上を走っている。この砂丘の高まりは2列あって、登川の河口付近で切られている。しかし、砂丘の発達による河口の閉塞のため、登川下流には比較的広い低地が広がる。

以上の地形の概観から、この地域がひきつづく地殻の沈下運動と、寒冷な環境下において、地形の形成がなされたことが概括される。とくに、海岸線にそった砂丘状の高まりは、洞窟内の堆積と入口をおおう堆積とに関連していて、後に述べるボーリング調査の結果に、一定の説明を与えている。洞窟を含めて、この地域の丘陵を構成するのは、新第三系上部、鮮新世に属する朝里層相当層の凝灰岩および角礫凝灰岩である。

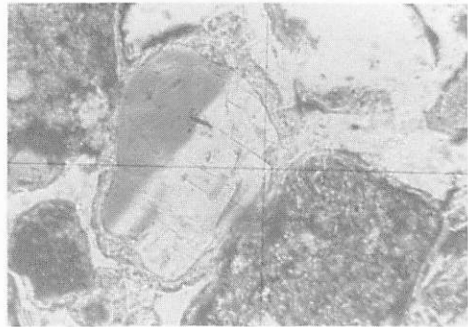
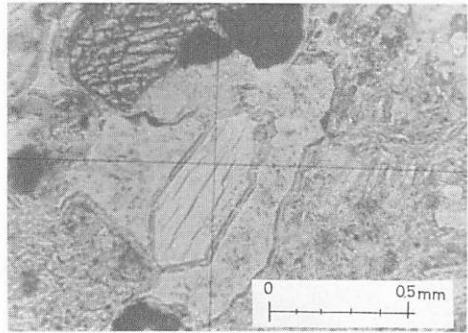
1) 田沼邦雄, 福田正己(1971): 寒冷な条件下で示す風化岩石の諸性質について 地学雑誌 Vol 80, 302~310

3. 風化した岩石の物理的性質

3-1 偏光顕微鏡による観察

洞窟全体は、第三紀層の凝灰岩および角礫質凝灰岩からなりたつ。岩相の変化がいちじるしいが、全体的には凝灰岩が卓越する。基盤は全体が褐色を呈し、一部含まれる黒色岩片と粘土化した軽石層をはさんでいる。洞窟外部の露岩部でみられる風化状態はかなりもろく、冬の吹きだまりの雪の上に砂粒状となって崩落している。岩体には何本かの節理が入り、この節理にそってブロック状に岩塊が落ちた部分もある。

こうした肉眼での風化状態をより明瞭にするため、岩石片をバルサムで固化させたのち薄片を作成し、偏光顕微鏡で観察した。これは、風化が進むにつれて増加・拡大する空隙の形状変化など、岩石の力学的強度に反映される内部構造を知る目的で行なった。その顕微鏡写真を写真1に示す。検鏡の結果によれば、無色鉱物では斜長石が多くを占め、若干の石英も見られる。有色鉱物では普通輝石が多数見られ、角閃石、シソ輝石もわずかに認められる。岩石の組織の上でもっとも特徴ある点は、多数の空隙の存在である。空隙の大きさは、大きいものでその間隔は0.5mmに達し、しかも空隙は相互に連結している。この多数の空隙の間には、たとえば直消光下で灰白色の複屈折を呈する結晶が、被膜状に鉱物粒子をおおっている。また、不透明不定形の結晶が、結晶表面に付着している。この多くの空隙と、その間に介在する風化物質とが、岩石の風化程度のいちじるしいことをよく示している。



Pl. 1 偏光顕微鏡写真

これらの内部構造が、力学的強度に反映されることに着目して、次に空隙率と一軸圧縮強度を測定した。また、この空隙へ他の物質、たとえばプラスチックやセメントを充填し、強度を増大させる試験を行なう予備として、じゅうぶんに水を吸収させて凍結させた状態の強度を求めた。これは土木工事施工の一つである凍結工法と同様の手法であり、今後の有効な保存法へ可能性を示すであろう。

これらの内部構造が、力学的強度に反映されることに着目して、次に空隙率と一軸圧縮強度を測定した。また、この空隙へ他の物質、たとえばプラスチックやセメントを充填し、強度を増大させる試験を行なう予備として、じゅうぶんに水を吸収させて凍結させた状態の強度を求めた。これは土木工事施工の一つである凍結工法と同様の手法であり、今後の有効な保存法へ可能性を示すであろう。

3-2 空隙率

岩石の見分け空隙率を求めた。これは各試料を強制乾燥し、また水分飽和したのちに重量を測定して行なった。比較のために、天北地域の第三紀層の泥岩をもあわせて測定した。次にその結果を示す。

岩石	地名	空隙率 (%)
凝灰質角礫石	フゴッペ	46.2
		41.1
		45.1
鬼志別層, 泥岩 (かなり風化している)	宗谷	32.2
大岬層, 泥岩	宗谷	26.5
玄武岩 (かなり風化している)	宗谷	10.4
(かなり新鮮)		1.65

この高い空隙率は、さきの顕微鏡による観察結果とよく一致している。もちろん、この岩石の形成過程で、揮発性ガスの放出に伴ってできた空隙もあるが、化学的風化過程によって、膠着物質が溶脱された部分も少なくない。つまり、風化の進行→膠着物質の溶脱→空隙の増加→力学的強度の低下へと関連しているためであろう。

3-3 一軸圧縮強度について

洞窟外部露岩部から、ことなる岩相の20kg程度の岩塊をはがしとり、5×5×5 (cm) 立方体に整形して、被試験試料とした。また、各試料について、以下のいくつかの含水条件をつくり、そののち、設定された低温室に放置したのちに圧縮試験を行なった。

強制乾燥 (110℃, 24時間放置)

飽和含水 (真空下のデシケーターの蒸留水内24時間放置)

自然含水 (蒸留水内24時間放置)

ところで、低温室内で岩石の温度変化を知るため、試料に穴をあけて熱電対を埋めこみ、内部温度変化を求めた。第2図に結果を示す。約7時間放置すれば設定した温度に達する。

実験結果を第1表に示す。それによると、乾燥した試料の強度は、湿潤状態に比べて大きい値を示す。この乾燥した試料を0℃以下まで冷却した場合の強度も、室温の場合とほとんど変わらない。すなわち、水を含まない岩石の圧縮強度は、温度による変化を示さない。湿潤状態、つまり岩石中に水を含んでいる場合には、その圧縮強度は乾燥状態の岩石と、かなり異なる値を示し、また破壊の様相も変化する。未凍結の場合は、含水状態は乾燥時よりも小さな圧縮強度の値を示す。

これについて次のような解釈が考えられる。つまり、岩石の空隙に含まれている水は、圧縮によって空隙が縮小すると、多くのものは外へ排出されるが、未排出の水は「くさび」として作用して粒子間隙や割れ目を押しひろげて鉱物粒子間の結合を弱める。じゅうぶんに水を含んだ状態で凍結させれば、空隙内の水の存在と量とで強度が変わる。つまり、岩石の破壊や強度低下は、主として岩石内に存在する空隙や割れ目と、それらを充填する物質に原因があると考えられている。ところで、もし空隙が他の固体物質、たとえば今回のように氷で充填されれば、岩石の強度は当然増大するであろう。実際に、凍結すると圧縮強度は大きくなっている。第3図によれば、温度のより低いほど、含水量のより多いほど、強度が増大する。つまり、氷の温度変化に応じた性質変化と、空隙内の水の凍結温度とに関連していると考えられる。一般に、岩石内部に析出した氷の結晶粒子が細かいほど強度は増加する。また氷の結晶粒子の大小は、凍結時の温度勾配つまり急速凍結かどうかによって影響をうける。急速凍結された氷は、微細粒子の多結晶氷となるので強度は大きな値を示す。次に、毛管内の水の凍結温度は、毛管の直径の減少とともに低下する。したがって、岩石の凍結温度は低くなるほど、岩石内のより細かい毛管つまり

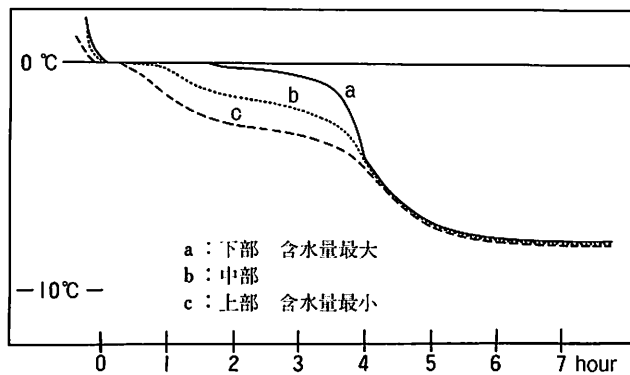


Fig. 2 岩石試料内部の温度変化

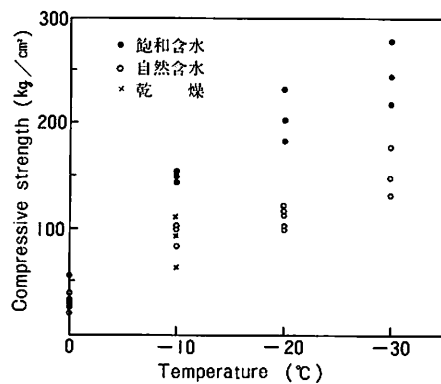


Fig. 3 圧縮温度と凍結温度



Tab. 1 各試料の状態および圧縮強度

state of sample	temperature (°C)	water content (%)	degree of saturation (%)	compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )		
乾燥	+15	0	0	105.0		
				64.9		
				96.2		
				80.9		
				85.2		
乾燥	-10	0	0	88.8		
				95.0		
				110.6		
飽和含水	+15			93.6		
				63.3		
				26.8		
自然含水	0	18.7	51.0	37.1		
				18.5	31.1	
				17.1	22.1	
	-10	19.8	54.0	100.3	34.4	
					22.8	100.0
					20.7	83.0
	-20	19.4	52.9	112.4	116.5	
					17.8	68.6
					16.7	98.0
	" "	22.5	61.0	102.6	122.3	
					" "	116.5
					" "	116.5
	-30	19.8	54.0	189.8	116.5	
					17.7	149.6
					12.9	130.0
自然含水	+15	36.7	100	59.7		
				47.9		
				57.3		
飽和含水	0	36.7	100	30.2		
				56.7		
				26.1		
	-10	36.7	100	154.5	150.7	
					150.9	
					142.0	
	-20	36.7	100	204.2	183.3	
					233.7	
					233.7	
	-30	36.7	100	219.1	245.9	
					245.9	
					280.0	

空隙の水も順次凍結するので、結果として未凍結の水が少なくなる。こうした一連のプロセスをへて、岩石の圧縮強度は、凍結温度の低下に伴い増加する。

### 3-4 超音波法による弾性波速度

岩石の圧縮強度と直接関係ないが、岩石内部の状態をよくあらわす値として、弾性波速度がある。そこで、前述の凍結時の強度の増加をうらづけるために、200kHzの超音波を透過することによって、弾性波速度を求めた。第4図に結果を示す。図の実線は飽和条件、点線は乾燥条件をあらわしている。乾燥していれば、たとえ-30℃でも速度の変化を示さないが、飽和している場合、つまり内部空隙を水が満たしていると、速度は数倍に達して増加している。これは、弾性波の伝わり方が内部の組織、とくに氷の存在に関連することを示している。このことは、一軸圧縮強度の増大とよく一致している。

## 4. 各種条件下での破壊試験

洞窟を構成する基盤岩石に、人工的な各種の変化を与えて、破壊試験を行なった。まず、気温の変化による岩石内部の温度変化がひき起こす破壊、これは、とくに冬季の条件、つまり0℃を前後する変化によって生ずる破壊作用を想定して行なった。次に洞窟表面からの剝離に直接的に影響を与える振動によって、ひき起こされる破壊である。この試験にさきだって、実際に洞窟内での振動の測定が行なわれた。その結果、洞窟のすぐ近くを通る函館本線を通過する列車により、10ガル程度の加速度振動が生じていることがわかった。このことから、岩石標本に一定の加速度振動を与えて、破壊試験を行なった(本書p.26~30参照)。

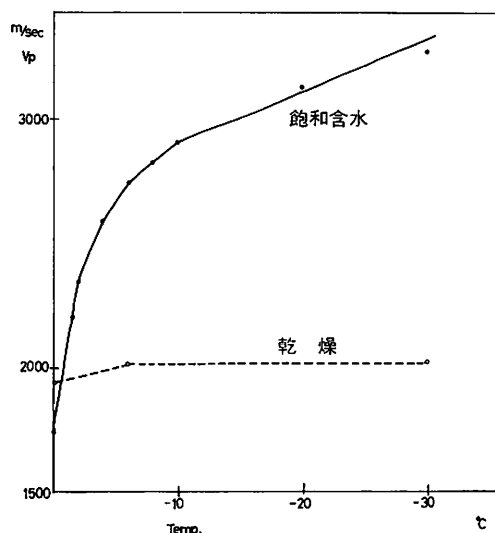


Fig. 4 弾性波強度と凍結速度

## 4-1 凍結—融解の繰り返しによる岩石表面の変化

実験は、次の条件を設定して行なった。周期1日1サイクル、温度幅+12℃~-10℃まで。岩石は水で飽和してある。また比較のために、宗谷地域の第三紀層が同一条件に置かれた。2~3サイクルをへたところで、宗谷地域の泥岩は、かなり明瞭な割れ目を生じ、11サイクル完了時には、試料は数片のブロックに分解した。これに対し、フゴッペの3つの試料は、そのうちの1つが2分したもの、他のものについてはブロック状の破壊がまったく見られなかった。しかし、フゴッペの試料のすべては、他の比較試料には見られなかった、次のような表面変化が生じた。すなわち、立方体の角や、あらかじめヤスリで刻みこんでおいた溝の上縁の角が剝離し、全体的に角ばった部分が円味を帯びるようになる。このような破壊の特性は、今後対策を考える上で、じゅうぶんに留意する必要がある。

## 4-2 振動実験

凝灰岩の破壊様式は、一般には表面から2~3mmの部分が殻状になって母岩から剝離されて、ひじょうに不安定になっている。またすぐ近くを函館本線が走り、列車通過時にはかなりの振動が及ぶので、これらが壁面の剝離に与える影響をじゅうぶんに検討しておく必要がある(前記報告を参照)。そこで、岩石の含水条件が違うとき、どのような振動が加えられれば、どの程度の表面剝離が生ずるかという点を明らかにすることを目的とした、振動台によつての種々の実験を試みた。

洞窟出口付近で、表面に影響を与えないように慎重に採取した岩塊から5×5cm断面の円柱試料を2本とり、そのうちの1本は、2日間の自然乾燥、他の1本は48時間水に浸して飽和の条件下で表面から物質の崩落状況を調べた。なお、同一条件の振動継続時間は、それぞれ30分である。

周期 (c / s)	加速度(ガル)	変化の状況
30	20	両者とも変化なし
30	40	"
30	60	乾：粘土がかすかに崩落しかし定量できず 湿：変化なし
30	80	両者とも変化なし
30	100	乾：微砂3粒崩落 湿：変化なし
20	100	乾：中砂5粒 細砂20粒崩落 湿：変化なし
5	100	乾：中砂2粒崩落 湿：変化なし
2.5	100	両者とも変化なし

以上の結果から、岩石が水分を多量に含む場合には、列車通過時の振動や地震などの衝撃では表面剝離がほとんど起こらないが、乾燥している場合には、30%、20ガル程度の振動で明瞭な剝離現象が起こることが明らかになった。

### 5. 露岩斜面の崩壊測定

洞窟出口上方の露岩斜面では、凍結-融解に伴う霜の作用と、乾湿の交代および風の作用などによって、年々、かなり多量の物質が崩落することが経験的に知られていた。そこで、この崩落を量的に知り、斜面の後退速度を明らかにすることを目的として、屋根の上に幅100cm、深さ50cmの木樋を設置し、約1年半の間に、そこにたまった崩壊物質の量から、斜面の後退速度を推定した。また、露岩表面上にクギを打ちこみ、打ちこみ長さの変化からも、表面剝離を測定した(写真2)。

崩落量……………54.00cm<sup>3</sup>—(A)

崩落斜面の面積…104.100cm<sup>2</sup>—(B)

斜面の後退速度… $A \times 0.8$  (修正係数)  $\div B = 0.408$  cm/8か月

この結果、洞窟出口上方の露岩斜面は、自然のまま放置すれば、1年に約5cmずつ後退することが明らかになった。



### 6. 洞窟付近の簡単なボーリング

この洞窟の入口をおおう堆積物について、その性質を知るため、PI.2 露岩表面のクギ打ちこみ状態  
2か所においてハンドオーガーによるボーリングを実施した。建物内では、1.5m深までは崩落ブロックを主とする堆積物である。外部ではこの崩落物による堆積物はうすい。それより以深では、すべて砂層となるが、その上部50cmほどは粒形が小さく、風成砂と考えられる。さらに下部には、やや粗粒な砂層がある。その堆積相からみて、海成砂層と考えられる。したがって、かつての海蝕による洞窟が、海岸のわずかな相対的隆起、あるいは卓越する海岸砂の堆積によって陸化したもので、それ以降、風成砂によって、洞窟出入口がふさがれるまでの期間が、洞窟を中心とした、先住人の生活期であったろう。現在、海岸線に平行する砂丘状の高まりの発達や風成砂層の比較的厚いことから、かなり短期間に洞窟の出入口が閉じられたことが予想される。

### 7. まとめ

フゴッペ洞窟の壁面保護を目的として、各種の調査を行なった。その中心は、主として基盤岩石の風化と崩壊においた。その結果、基盤岩石の凝灰岩の特異な風化状態、とくに風化に伴う空隙の増加と拡大とが指摘された。また、現在おかれた環境下で、有力に作用する外的営力として、凍結-融解を繰り返すような気温変化、湿-乾の変化(含水状態の)、風による風蝕、列車等の通過に伴う振動などがある。いずれがもっとも有力であるかは決めがたい。しかし、洞窟内の壁面が、出口を閉そくされた状態に長く保たれた間に、大きな崩落もせずに残されたことを留意する必要がある。つまり上述の気温や水分などの変化が、すべて外気と通じた条件下で生ずることである。また、列車の影響も、田治米らの測定と、その結果からの指摘にもとづく加速度振動テストから、岩石の一定の条件下(含水、恒温)では、表面剝離の少ないことが示されている。

結果として、具体的な条件を値にしてあらわしがたいものの、少なくとも、年間を通じて一定の気温と湿度とが、岩石の表面からの剝離を少なくおさえる効果があるものとする。その意味で、洞窟内と外気との直接的なつながりを断つような措置をほどこす必要を感じる。

<追記>

本項の調査を担当された東京大学岩塚守公助教授は、昭和47年12月11日、腹部肉腫のため治療のまいなく、国家公務員共済組合連合会虎の門病院において急逝されました。このため、本項のとりまとめは、故岩塚助教授のメモ等をもとにして、故人と実地調査および実験等をともにされた東京大学大学院博士課程福田正己氏にお願いしました。ここに付記いたします。

岩塚先生は、昭和25年3月、東京大学理学部地理学科を卒業され、建設省地理調査所をへて、昭和26年6月以来、東京大学理学部地理学科で教鞭をとられ、国内・海外で研究活動をつづけられ、研鑽をつまれる一方、文化財の保存に大きな関心を寄せられました。特別史跡・重要文化財大谷磨崖仏(栃木県宇都宮市)、史跡薬師堂石仏 附 阿弥陀堂石仏(福島県相馬郡小高町)、史跡観音堂石仏(同)、特別史跡・重要文化財臼杵磨崖仏(大分県臼杵市)における保存修理工事のための地学的調査を担当されましたが、本町の史跡フゴッペ洞窟の保存修理事業に関与されましたのは、昭和42年のことであります。昭和43年度より、フゴッペ洞窟の保存修理事業が開始されますと、先生は調査委員会の中心的存在として活躍されました。本工事が竣工をみましたのも、ひとえに先生の力によるものであります。ここに生前の余市町および余市町教育委員会のために尽されました先生に、心から感謝申し上げますとともに、つつしんで哀悼の意を表し、先生の御冥福をお祈りいたす次第であります。

(余市町・余市町教育委員会)

## Ⅳ 洞窟内部の温湿度測定

東京大学 野村 豪

### 1. 計画前の予見

洞内岩壁表面の彫刻は、発掘直後に比べて角部がかなり損耗し、徐々に平滑化しつつあるとのことであった。

気温、湿度、輻射等、気候的な現象が岩壁表面の損耗に及ぼす影響については、昭和43年の現場調査の際の観察により次のような事項が考えられた。すなわち、

- 1) 洞窟入口の覆屋の窓の遮光が不十分であったため、東面する欄間窓より太陽高度の低い朝の直射日光が洞窟の中までさし込むこと。したがって直射を受ける入口近くの岩壁面（砂岩系凝灰岩）が乾燥し、剥落しやすい状態となること。
- 2) 覆屋が不完全であったため外気の侵入が多く、洞窟奥の冷たい岩壁面に湿潤な空気が接触して、相当量の結露が岩壁表面に見られること。
- 3) 光があることと岩壁表面の湿潤さのために苔類が生え、表面を損耗させる一因となっていること。
- 4) 冬季に岩壁表面温が零度以下に下がるおそれがあり、したがって表面近くの水分の凍結融解によって岩壁表層が破壊される可能性のあること、などであった。

上記の点に対し、さしあたっての対策として、入口覆屋の欄間窓を遮蔽し、洞窟入口にビニールシートを張って気密性を高め、同時に凍結、結露の可能性を確かめ、かつ、当洞窟の岩石の風化試験の資料とするために洞窟内の気温、湿度の測定を実施することとした。

### 2. 洞窟内気候測定

洞窟内気候測定の目的は、

- 1) 冬季の凍結および全季節にわたる結露の状況を知ること。
- 2) 当洞窟の岩の風化試験のための基礎資料とすること。
- 3) なんらかの温湿度調整設備を設ける際の設計の基礎資料を得ること、である。

以下にその概略を述べる。

イ)測定日時 昭和43年6月～昭和44年3月

ロ)測定内容 洞窟内気温、湿度、岩壁面温度、洞窟外岩壁面温度

ハ)測定点 気温—洞窟内のほぼ中央において、地盤面より10cm、200cm、天井面近くの3点および洞窟最奥部で1点

湿度—洞窟内中央において、地盤面より200cmの高さの点

岩壁表面温度—洞窟内において壁面温度1点（地盤面上200cm）、洞窟外において山肌  
に1点

ニ)測定計器 横河電機KK製電子式自記記録計（6点、寒冷地用に改良）

測温子—サーミスタ

湿度検出器—塩化リチウム型

測定の実施に当たっては、余市町教育委員会の手をわずらわした。

## 22 <温湿度測定>

### 3. 測定結果よりの所見

ほぼ1年間の測定結果を第1図に示す。表示した温度は、各月の上旬および下旬各10日間の平均値である。

最も寒い期間の1～2月は計器不調のため良好な測定結果が得られなかったが、3月の値に見られるように洞窟内気温(○印)はほぼ零度、岩壁温度(△印)は1.5℃まで下がっている。この結果から見て最も寒い時期には岩壁面温度が零度以下に降下することも十分考えられ、表面近くの水分凍結のおそれも当然予測できる。

夏季には19℃前後にまで洞窟内気温、岩壁温ともに上昇し、苔類、かび類の生育に適した状態となる。

洞窟内露点温度(×印)よりも岩壁面温度が下まわったとき、岩壁面に結露が生じるが、8～9月にそのような現象が現われやすい。

これは気温上昇と相まって岩壁面への苔類等の発生に好条件となる。

上記の結果から見て、なんらかの温湿度調整装置を設けることが必要であろうとの結論を得た。

### 4. 洞窟内温湿度調整装置の計画

#### 1) 空調設計条件

洞窟内の温度の設定は、

- ①岩壁表面凍結防止のため洞窟内気温が5℃以下にならないようにすること。
- ②苔類等の発生を少なくするため、15℃以上にならないようにすること、を目標とした。

湿度に関しては特に制御機構を設けなが冷房回路が働くときには、ある程度の除湿が行なわれる。

ただし、今後の運転結果により湿度の制御が岩壁面保護に必要であれば、湿度制御回路を付加することは考えている。

なお、洞窟内すなわち洞窟保護室の外の前室は温熱環境上、外界と洞窟保護室との緩衝スペースとなるので温度制御を行なうこととし、設定温度は17～18℃とした。

#### 2) 空調システム

##### ①洞窟保護室

##### (ア)冷房

空調機械室に空冷チラーユニットを据え、ブライン(エチレングリコール)を、洞窟保護室内カプセル上部のファンコイルに循環させる。空冷チラーユニットを用いるのは、水冷の場合は冷却水の凍結が懸念されること、また直膨冷凍機では冷媒配管が長くなりすぎ、かつ制御が困難であること等による。またチラーユニットに関しては、やや低温使用のため、標準チラーユニットのコンデンサ部分に改造を要した。また積雪時を考慮して空冷コンデンサは室内に設置した。

風量調整に関しては、ファンコイル吹出口のレジスターによることとした。

制御は、洞窟内空気を検出し、モジュトルモータと三方弁により、バイパス流量比を比例制御する。さらに、外気温を検出し、これが一定温度を下まわる場合は、ブライン循環ポンプを停止させる。

##### (イ)暖房

ファンコイル内の多段電気ヒータによる。

制御は、洞窟内空気を検出し、モジュトルモータとステップコントローラによりヒータの段数制御を行なう。また、外気温が一定温度を上まわったときは、全部のヒータを停止させる。

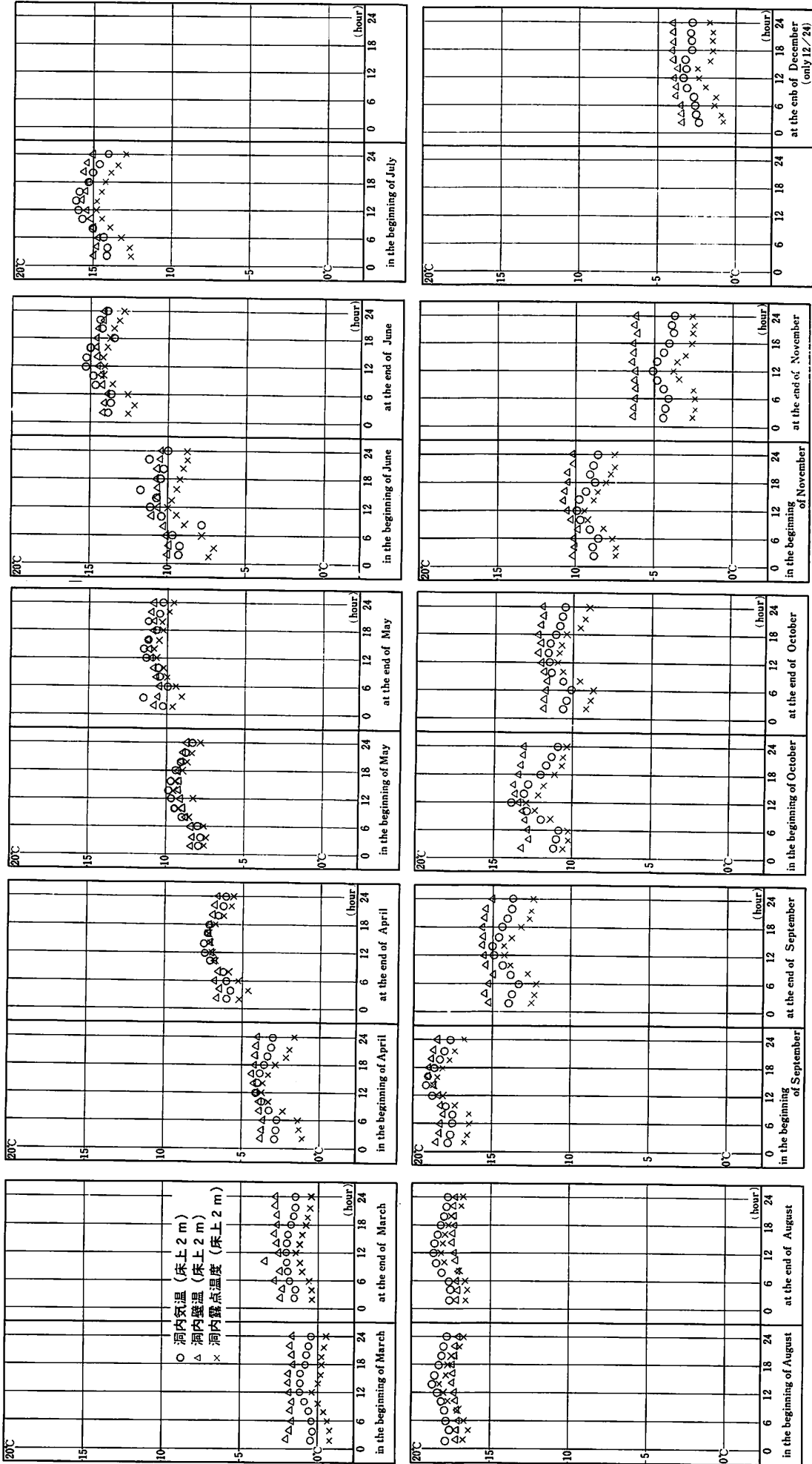


Fig. 1 洞内気温・壁温・露点温度



24 <温湿度測定>

②空調用前室

冷、暖房とも洞窟保護室と同様である。空冷チラーユニットは、洞窟保護室用のものと共用であり、グライントークより、循環ポンプで前室内ファンコイルに送る。

前室内ファンコイルは、機器制御室入口上部に設置した。

3) 温湿度測定

配電盤および空調制御盤を機器制御室内の鋼製パネルに納め、各機器の運転状況が監視できるようにするほか、同パネルに12点打点式のERを設置し、主として洞窟内の温湿度の測定結果を自動記録できるようにした。

測定は、温度に関しては、洞窟内垂直分布、水平分布、表面温度およびファンコイル吹出口温度、前室およびカプセル内空気温について、湿度に関しては、洞窟内と前室について行なう。温度測定には、測温抵抗体、湿度測定には、塩化リチウムを用いている。

空調系統図および照明配線図を第1図～第2図に示す。

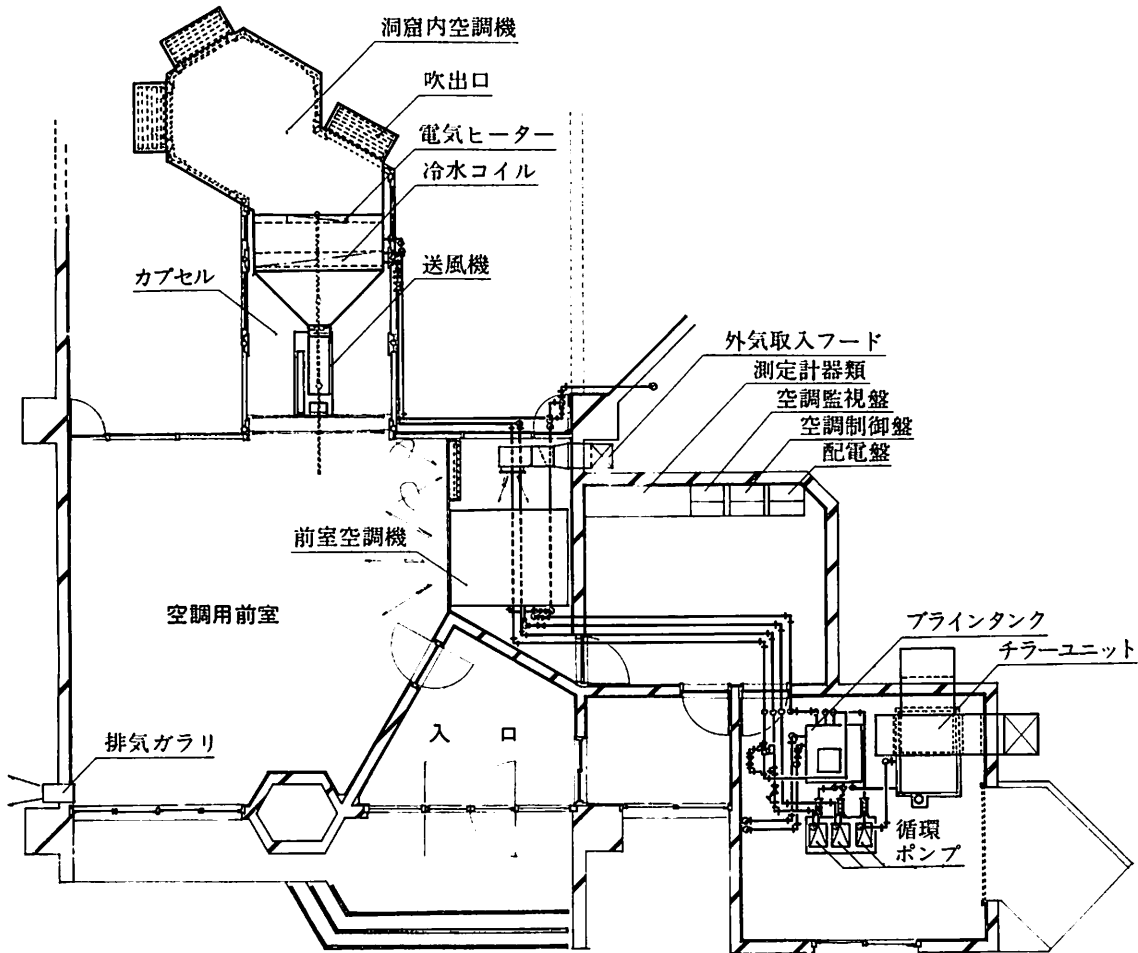


Fig. 2 空調系統図

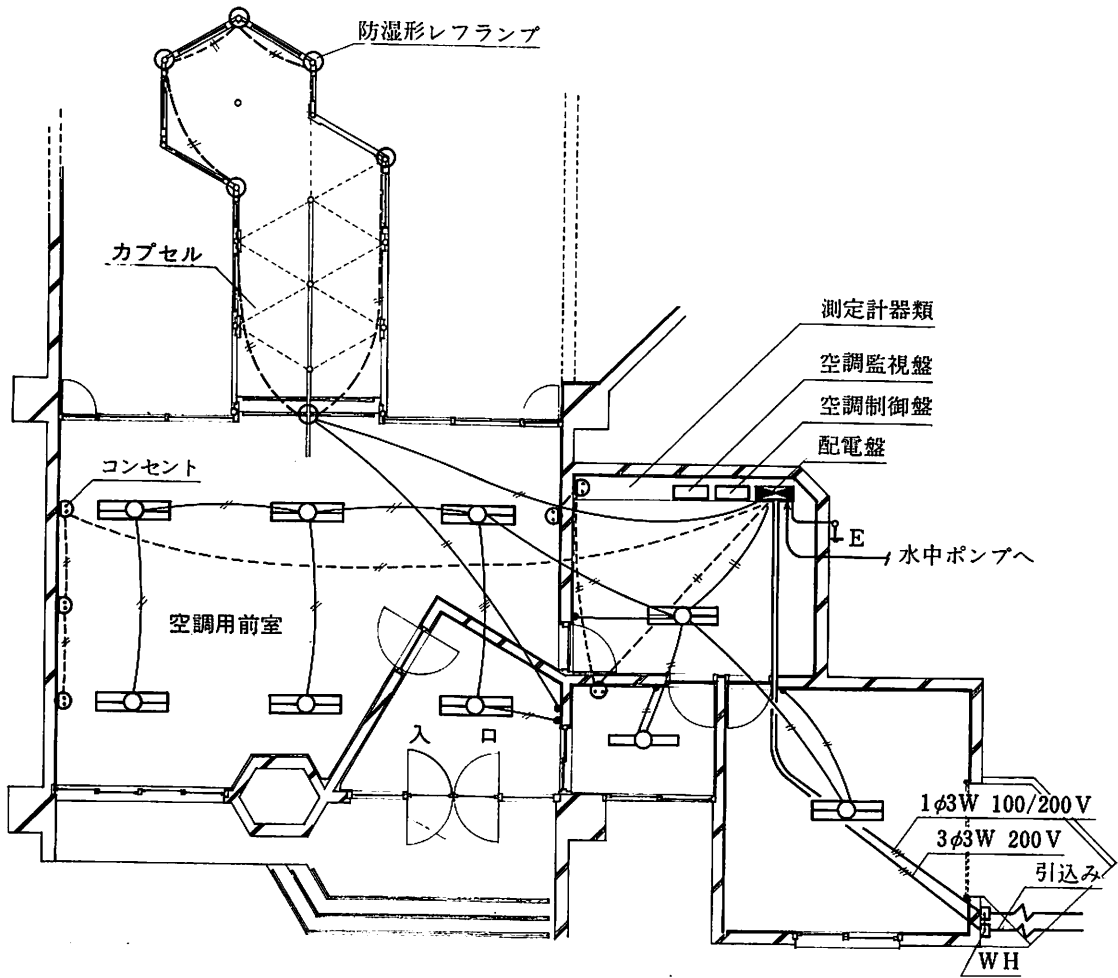


Fig. 3 照明配線図

## V 洞窟内部の振動測定

北海道大学 田治米鏡二・五十嵐 享・笹谷 努  
殿内啓司・長能正武

### 1. 測定状況

フゴッベ洞窟の壁面の破損の原因の1つであるかも知れぬ振動状態の測定を行なった。

国道5号線も洞窟の近くを走っているの、トラックなどによる振動の影響も考えられぬこともないが、さらに近くを走っている国鉄函館本線のほうに注目した。

第1図の▲印の位置に加速度計3成分(上下動, 南北動, 水平動)ずつを置き, △印の位置に変位計3成分を置いた。第2図に示されているごとく, Aは壁面面の上方にあり, Bは洞窟の床面にある。かくのごとき配置のままで, 1970年4月6日15時から22時まで, および4月7日8時から15時まで, 列車通過時の振動測定を行なった。ここを通過する列車の本数は上下合わせて1日に約50本である。これらの列車の構成はディーゼルカーと蒸気機関車とが約半々であって, 1列車の車輛数はたかだか12輛である。貨物列車も長くない。

加速度計の固有周期は1/3秒であって, 今回の測定のために作られた減衰器を通して電磁オシログラフに直結されている。変位計の固有周期は1秒であって, 減衰器と増幅器を経てビシグラフとデータレコーダーとにつながれている。これらの計器の動的特性<sup>1)</sup>および感度はあらかじめ検定されている。

第1図の……は4月7日15時から16時の間に行なわれた測定のための加速度計の配置である。線路ぎわ1mから40mまでの加速度の減衰を調べるのがその目的である。△印の位置に置かれた変位計は微動を測定するのが主目的であったが, 列車通過時には感度を下げて, 加速度計との同時測定を行なった。

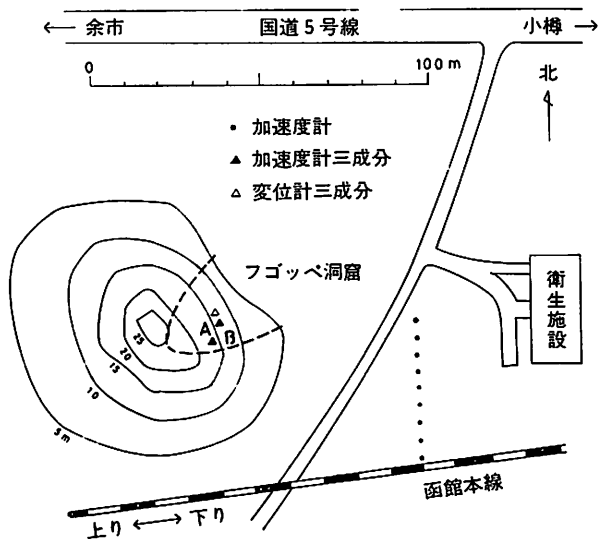


Fig. 1 振動計の配置

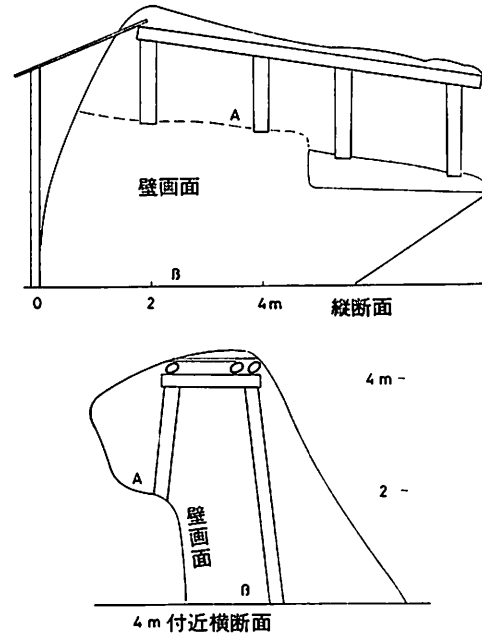


Fig. 2 洞窟の断面図

1) 田治米鏡二・他 1970;青森県津軽大橋(長泥橋)の振動測定, 北大地物報告, 24, 169-190

2. 測定結果

洞窟内で測定された加速度記録の2, 3の例が第3図と第5図とに示されている。刻時は1秒である。壁面の上方に置かれた上下動の加速度計は正常の動作をしていない。

測定された記録の中のあるものは振幅が大きすぎてスケール・アウトした。また、あるものは振幅が小さすぎて加速度の数値を算出しえなかった。良好な各記録の中から最大振幅の部分を選び出し、加速度を求めた数値が第1表にあげられている。大きな振幅の周期はいずれの場合も1/30~1/40秒である。

これらの測定結果を概観すると、上下動、水平動(東西、南北)とも振動の大きさに大差ない。壁画面上方の振動は洞窟床面の振動よりも約6倍大きい。このことは注目に値する。

第1表の東西動と南北動とから合成された水平加速度と各列車の車輛数との関係を見ると第4図のごとくなる。実測値にはかなりのバラツキはあるものの、だいたいの傾向は実線で描かれた曲線で表わされる。詳しく見ると、加速度の大きさは、車輛数にのみならず、列車の速度にも関係がありそうである。これらに反し、蒸気機関車とディーゼルカーとの間に顕著な差はない。

今回測定された水平動の最大加速度は壁画面の上部で約70ガルであった。この数値は気象庁の震度階では震度Ⅳに相当する。この際の床面上の水平動の加速度は10ガルであったが、これは震度Ⅲに相当する。このような場合には、洞窟内では壁画面の上部ではもちろん有感であったし、床面上においても振動を感じる事ができた。しかし、第1図に示している衛生施設の内外では、いかなる列車の振動も人体で感じることはない。この経験は洞窟内の振動を直観的に過少評価させがちである。そこで、線路ぎわからの距離による振動の減衰を測定した。9個の加速度計を5m間隔で第1図の...のごとく配置して列車通過時の振動を測定した。4輛編成のディーゼルカーが通過した際の東西動の記録例が第7図に示されている。

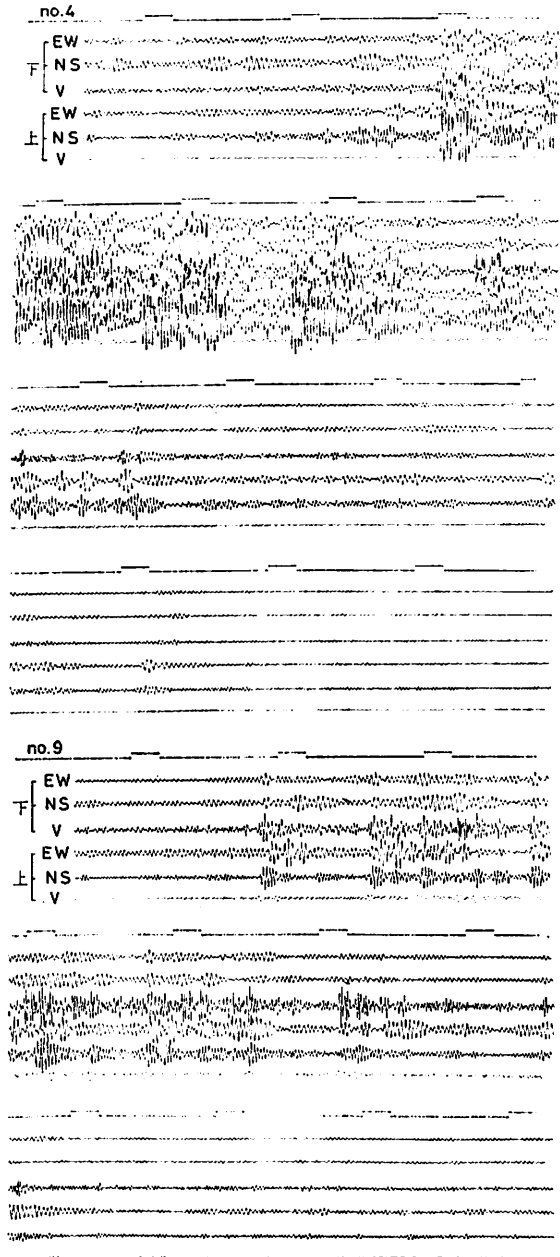


Fig. 3 加速度記録4および9

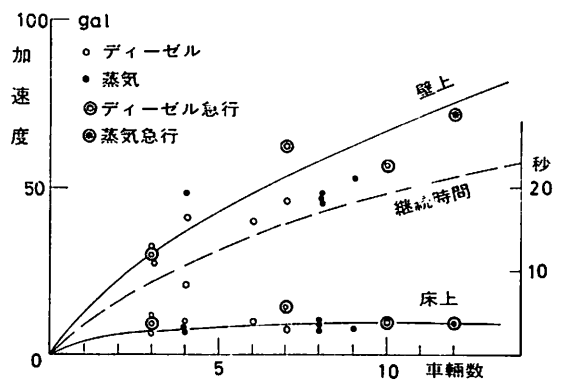


Fig. 4 水平加速度および振動継続時間と車輛数との関係

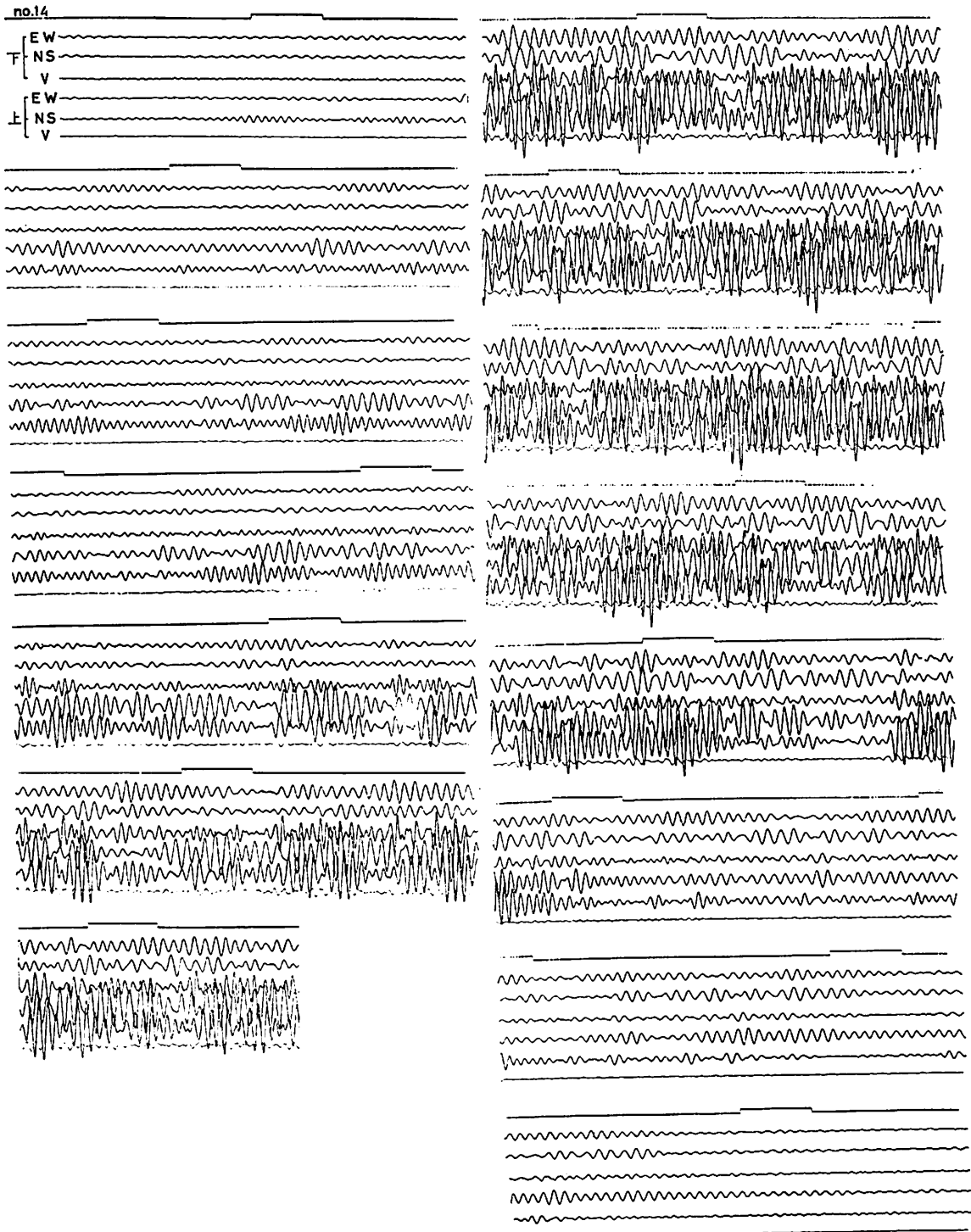


Fig . 5 加速度記録14

Tab. 1 測定された加速度 (単位はガル)

記録	車種	壁面上		壁面下		
		南北	東西	上下	南北	東西
4	ディーゼル3輛(上り)	23	17	7.6	5.6	3.6
5	蒸気4輛(下り)	30	38	6.3	5.9	—
6	蒸気8輛(上り)	31	43	7.5	6.5	6.6
7	ディーゼル10輛(急, 下り)	30	48	10	6.6	7.4
8	蒸気12輛(急, 上り)	45	55	9.5	8.6	9.4
9	ディーゼル3輛(急, 上り)	23	21	7.5	4.1	3.4
10	ディーゼル4輛(上り)	12	13	8.1	3.6	4.4
11	蒸気8輛(下り)	22	40	6.3	9.2	7.4
12	ディーゼル6輛(下り)	27	30	8.5	5.7	5.0
13	ディーゼル3輛(上り)	24	24	7.8	5.7	4.4
14	ディーゼル7輛(下り)	33	31	7.0	3.5	3.8
16	ディーゼル4輛(下り)	32	26	6.3	—	3.2
17	ディーゼル7輛(特急, 下り)	43	44	12	—	7
18	蒸気8輛(上り)	24	41	8	—	5.6

これらの記録を見ると、0から40mまでの距離では振動周期には変化が認められず、どこでも約1/30秒の周期の振動が卓越している。各トレースの最大振幅部に着目し、そこから算出した加速度が第6図に示されている。

これによると、線路からの距離が増すと加速度は急激に減り、15m以上になると、加速度は10ガル程度になってしまう。線路から洞窟の床までの最短距離は約35mなので、そこでの加速度はたかだか10ガル程度であったことがよく理解される。

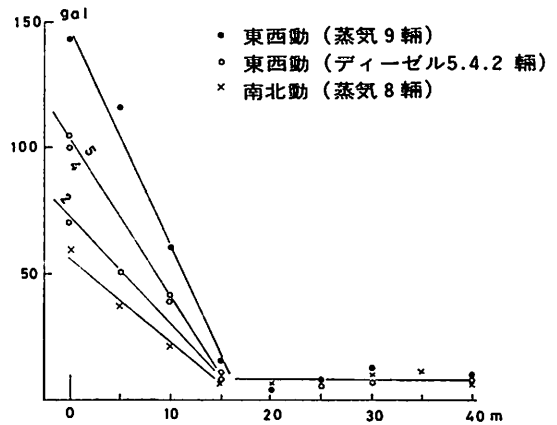


Fig. 6 線路からの距離による最大加速度の減衰

3. 測定結果に対する考察

先に述べたごとく、地震の際の加速度10ガルは震度IIIに相当する。とすれば、列車通過の際の振動は衛生施設で有感であるはずである。しかしながら、列車通過の際の振動周期は地震の周期に比しきわめて小さいので、加速度は同じでも、変位は周期の2乗に比例して小さい。このために、列車通過時の振動は人体には鈍感になるものと思われる。このように考えると、人体には鈍感であっても、10ガルの加速度は壁画面の突出部の崩壊に悪影響を与えぬとはいえない。まして、壁画面の上部では列車の通過ごとに、数十ガルの振動が約20秒続くのである。

洞窟内の床面上で測定された、列車の通らない静かな時の雑微動の大きさはだいたい第2表にあげたようなものであった。これらの値から合成される水平動の加速度は0.14ガルである。ゆえに、列車通過時の洞窟内の加速度はふだんよりも70~80倍大きくなる。

ただし、列車通過時の振動記録を見ればわかるとおり、列車通過時といえども数十ガルの振動が列車通過時間中に絶え間なく続いているのではない。加速度の極大値は約1秒ごとに断続的に現われるので

Tab. 2 雑微動

	周波数 (cps)	速度 (kine)
上下	9	$0.39 \times 10^{-3}$
南北	29	$0.49 \times 10^{-3}$
東西	25	$0.58 \times 10^{-3}$

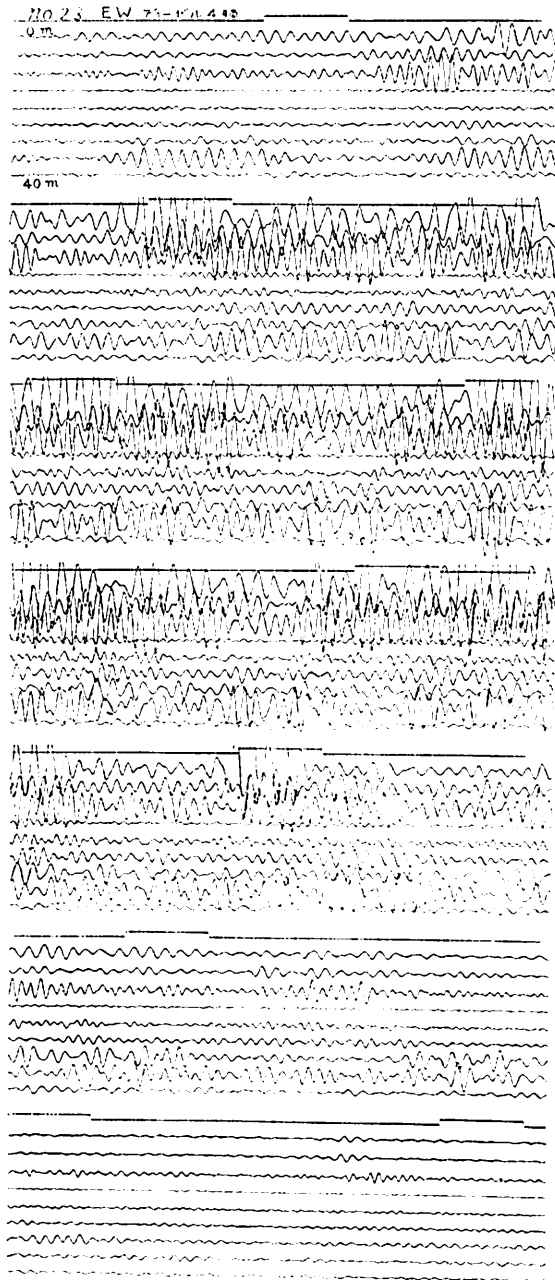


Fig. 7 線路からの距離の増加に伴われる東西動の減衰記録

#### <謝辞>

今回の測定は余市町教育委員会の依頼によって行なわれた。測定に際しては道指導部社会教育課にもお世話になった。測定は北後志衛生施設組合の施設内で記録された。同組合にも感謝する。今回の測定は東京大学の岩塚守公氏により計画されたのであって、予備調査の段階では同氏と現地に行き、その際に、測定の具体的方針が定められたのである。

ある。最大加速度と極大間の小さな加速度との比は10にも及ぶ。ゆえに、列車通過時にはまったく静かではありえぬとしても、断続的に現われるこの大きな加速度の部分をなくすことができれば、列車通過時の洞窟内の大振動の大きさを現在の約1/10に減じることができる。

この断続的な大加速度の原因は、列車がレールの継目を通過する際の衝撃によるものと思われる。一度発生してしまった振動から逃れることはきわめて困難である。むしろ、妨害になる振動を発生させぬように心がけるべきである。このためには、壁画面から100m以内にあるレールの継目をなくすことが第一にたいせつである。次に、洞窟の付近で列車が加速をしないでよいように、線路の曲りや勾配を設計すべきである。

一方では、洞窟の岩石標本に対し、30 cps程度の1～100ガルの加速度を加え、微細な崩壊の状況を調べるべきであろう。この実験の結果、10ガル程度の振動なら無害であることがわかったとすれば、上記のごとく、現在の線路に少々手を加えれば振動による害は防がれる。これに反し、1ガル程度でも有害との実験結果になれば、現場の振動による害を防ぐことはきわめて困難である。

洞窟内での肉眼観察によれば、列車通過の振動が床面で有感の場合にも、壁画面からの砂粒などの脱落は認められなかった。壁画面が湿気を帯びているので、破粒の脱落が防止されているのであろう。ただし、短時間の観察しか行なっていないので、長時間のうちには現状においても、砂粒の脱落はないとはいえない。



## VI 洞窟覆屋の設計

東京大学 岸谷孝一

### 1. 設計方針と概要

今回の工事のおもな目的は、200種類にも及ぶ紋様の彫刻がある当洞窟内壁面の剝離、落下を防止することである。事実、洞窟の岩質はきわめて弱く(本書 p.14~20)、寒冷地であることも加味され、自然の風化、人為的な損傷など、外的な条件のもとで、洞窟および洞窟を含む小山の劣化がいちじるしい。

昭和44年から約1か年にわたり実施された調査で、洞窟内を空調し、気温を一定低温に保つことが、彫刻のある内壁面保護に有効であることがわかった。また、これまでの彫刻面の欠損については、人為的な理由(人が触れること)も考えられることから、壁面を見学者・観察者から物理的に遮断することも、この際有効である。

したがって、設計に当たり、特に考慮すべき点は、壁面保護、洞窟入口周辺部の保護を確実化すること、また、洞窟内において、今後、新たな発掘が予想されること、である。

下図は、設計イメージを簡単にまとめたものである。洞窟壁面保存のための建屋は、前室・見学カプセルに分け、空調用機械室を付属させる。洞窟内の空調を確実化するため、空調システムを、洞窟内と前室・見学カプセルの2系統とし、効果を高めるため洞窟入口周辺全体をおおう構造とすることがある。洞窟入口上部は、GL上、高い位置にあるため、洞窟全体の保護・施工上の観点から、建屋を洞窟前庭部に置き、積雪を考慮して片流れ屋根とする。洞窟前庭部には、なお遺跡・遺物が埋蔵されている可能性があるため、今後発掘することを考慮し、建屋の柱の数をできるだけ減ずる。したがって、建屋大梁にP.C.材を用いた長スパン構造とする。

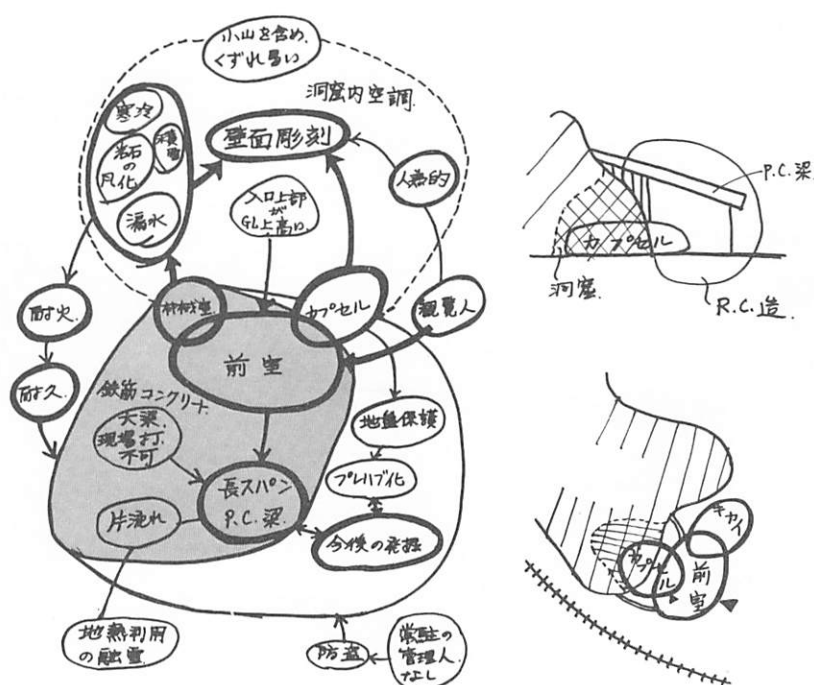


Fig. 1 設計フロー



Fig .2 イメージ図

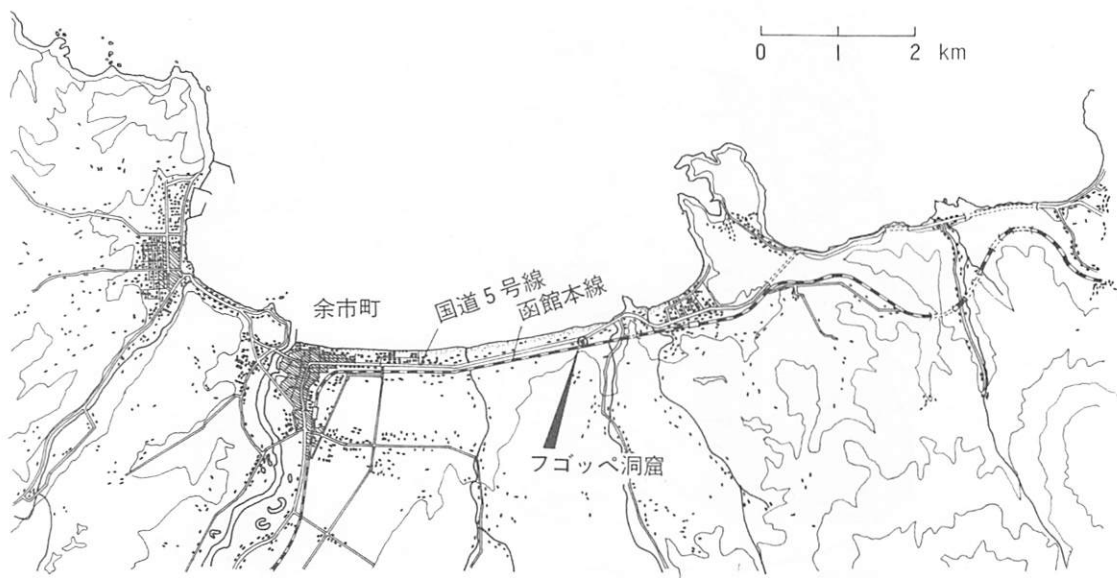


Fig .3 案内図

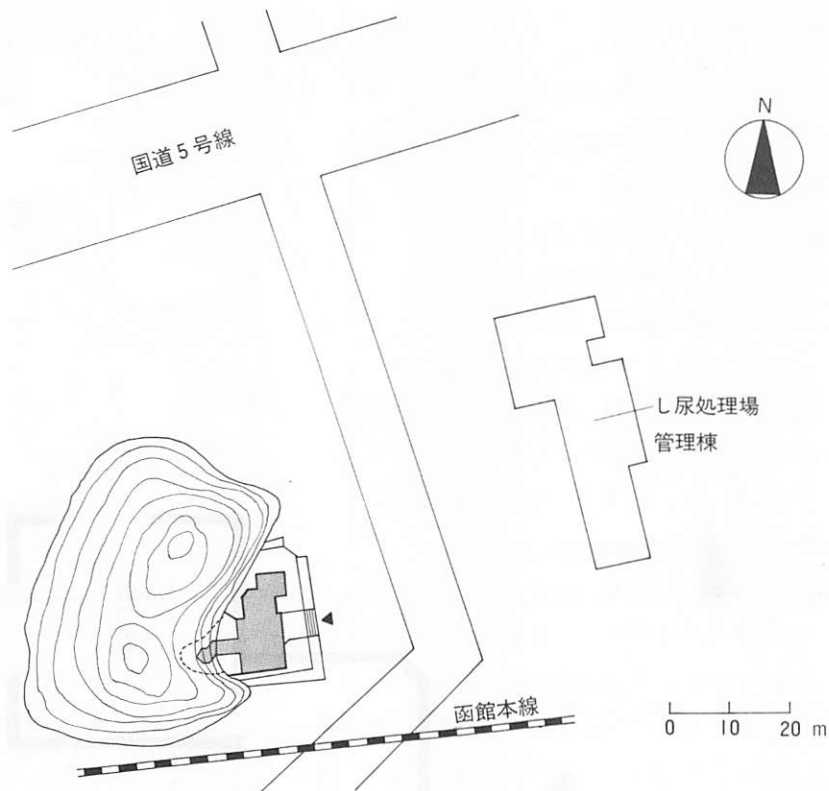


Fig. 4 配置図

## 2. 平面計画

- 1) 建屋は玄関ホール・機械室前室・見学カプセルを含み、空調機械室はこれに付属させる。
- 2) 建屋は洞窟前庭部に建築するが、洞窟入口部がGL上、高い位置にあり、小山の近くで大梁を現場打ちできないので、P.C.梁を用いた長スパン構造とする。
- 3) 前室は空調効果上、洞窟内部とは境界壁を設けて分離する。また同じ理由により、前室入口は玄関ホールを設けて直接外気の侵入がないよう配慮する。
- 4) 前室には、見学者のことも考慮して、洞窟内部へ通じるカプセルを設ける。
- 5) 建屋正面の壁は屋根面の降雪排除を能率的にし、また、雪おさえの効果があるようV字形にし、屋根面から上部へ突き出す。また、小山地肌保護の目的で雪崩のない屋根勾配とする。積雪は地熱を利用して溶かし、ドレインへ導くように配慮する（ドレインの詳細図参照）。
- 6) 機械室、同制御室、同予備室をまとめて機械棟とし、建屋に付属させる。この時、小山の南側に鉄道があるため、機械室を前室の北側へ配置する。
- 7) 遺跡の保護を図るため、建屋はこれにふさわしい外観とする。

## 3. 一般構造上のおもな注意点

- 1) 建屋大梁は、先に述べたようにP.C.梁を用い、ラーメン構造の躯体に傾斜させてのせる形をとる。
- 2) 小山と屋根面の接合部は、モルタルを充填するなどの工事をし、小山の保護と空調の確実化を図る。
- 3) 建屋側壁と小山の接合部も2)と同様の配慮をする。
- 4) 遺跡を保存するための建屋であるから、耐火構造とし、耐久性に富むよう材料の選択を考慮する。
- 5) 建屋には常駐の管理人がいないので、盗難予防上、窓の少ない構造とする。

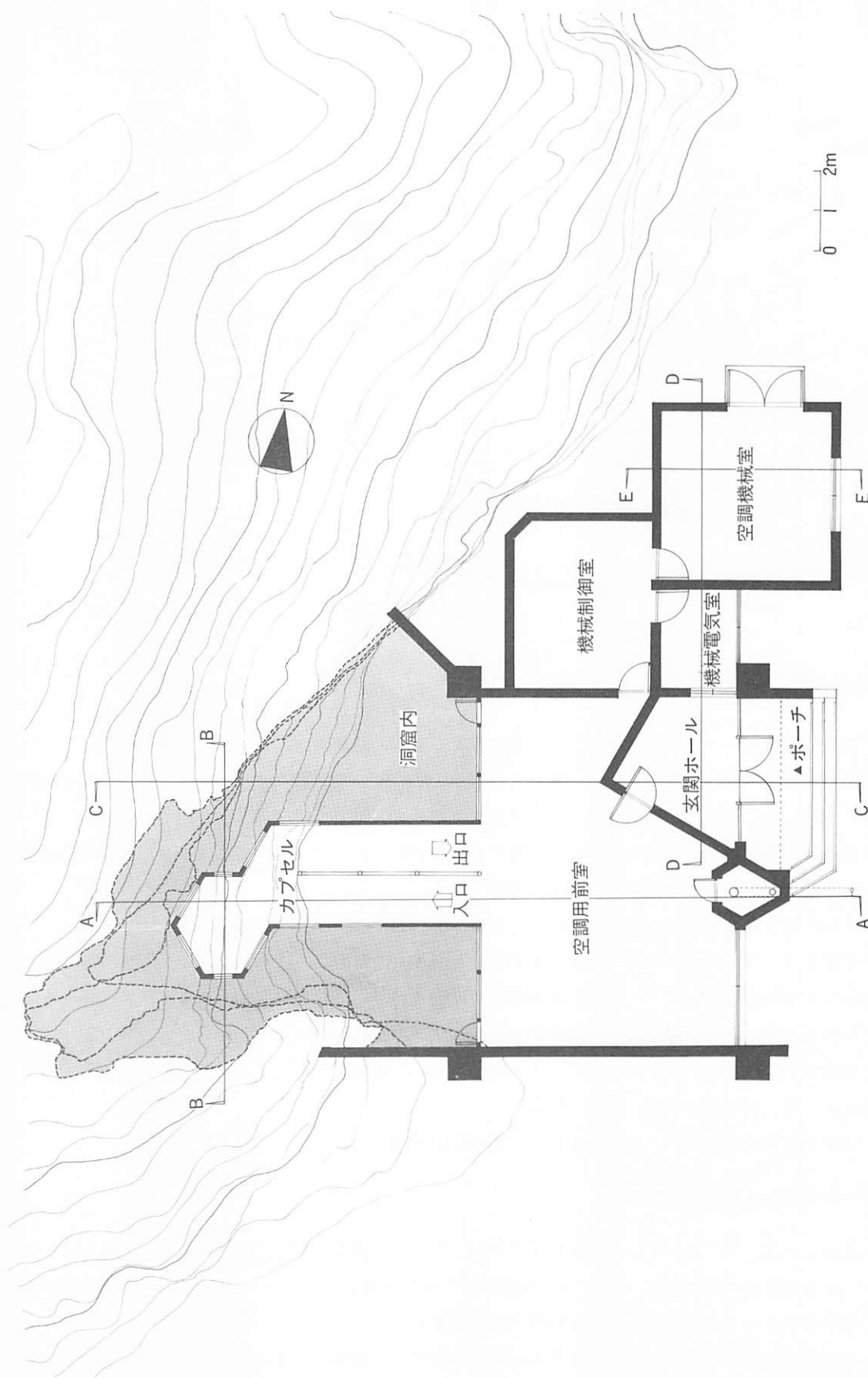


Fig. 5 | 1階平面図

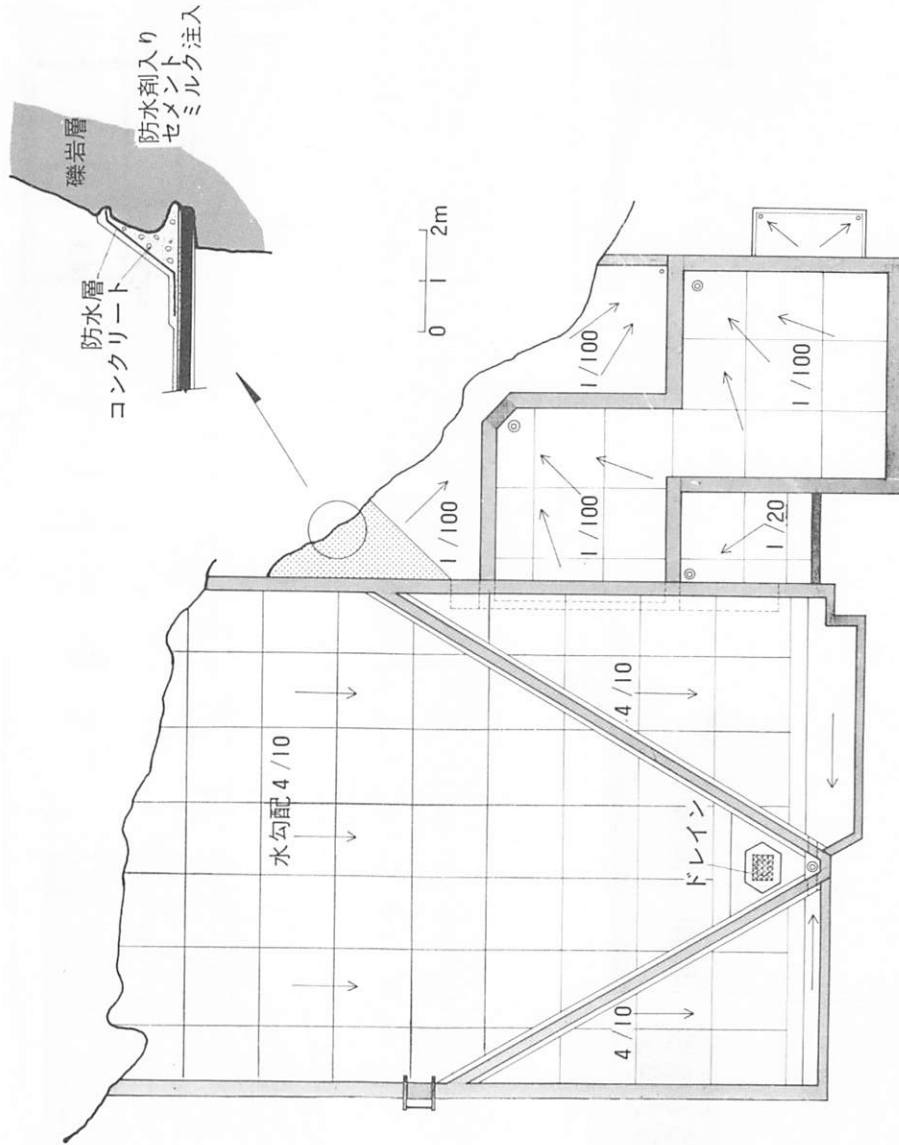


Fig. 6 R階平面図

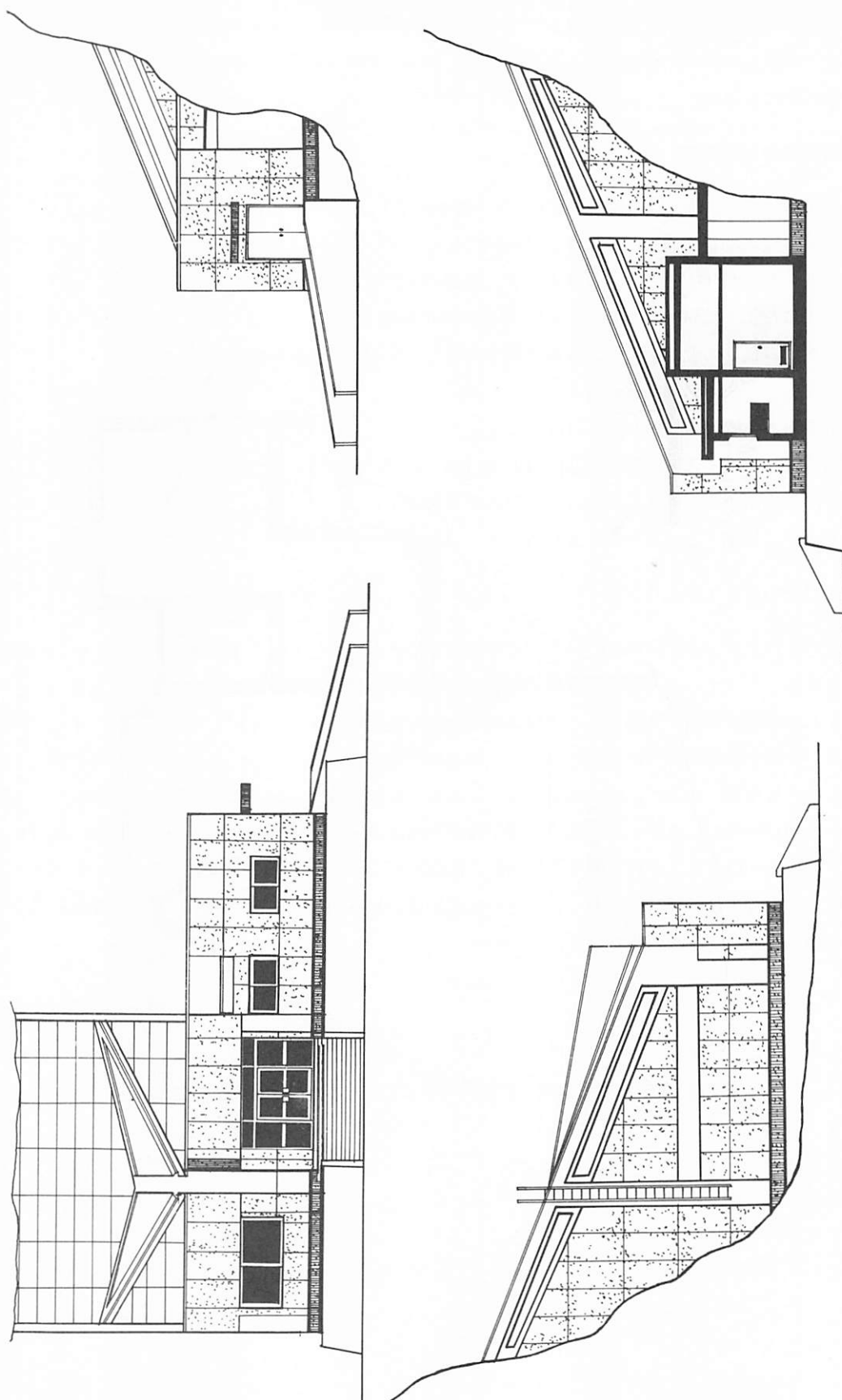
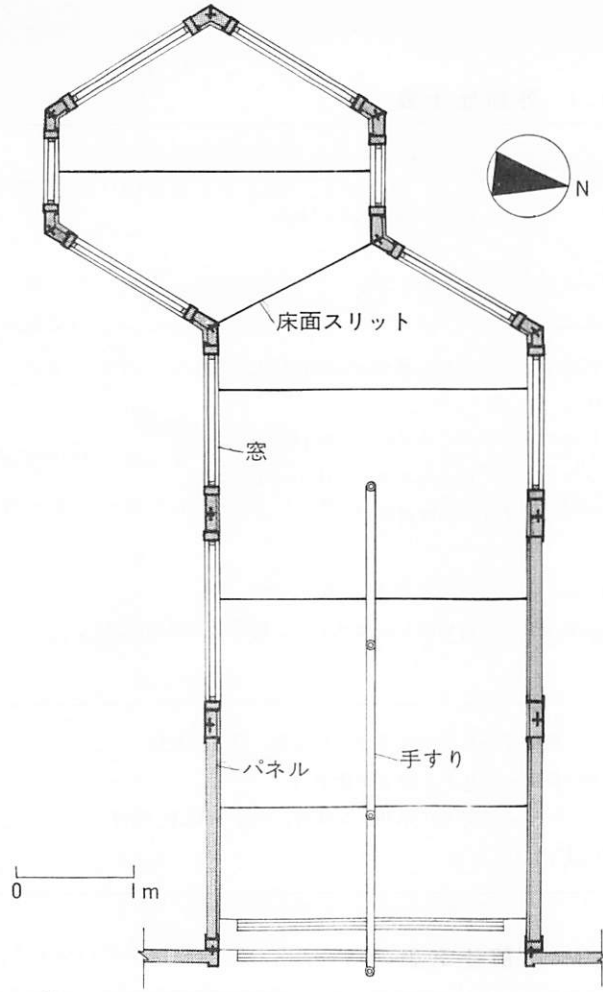


Fig. 7 立面图



#### 4. カプセル

カプセルは、洞窟内の状況を常に監視するためのものであるが、同時に洞窟内壁面の人為的損傷を防止し（人が直接触れることを防ぐ）、あわせて、空調効果を高めることができる。

カプセルには軽量のアルミ型材を用い、重量軽減と工事の簡素化を図る。また、床には、図に示すように、スリットを入れて細分し、工事の簡素化と同時に、今後の発掘に備える。

Fig . 8 カプセル平面図

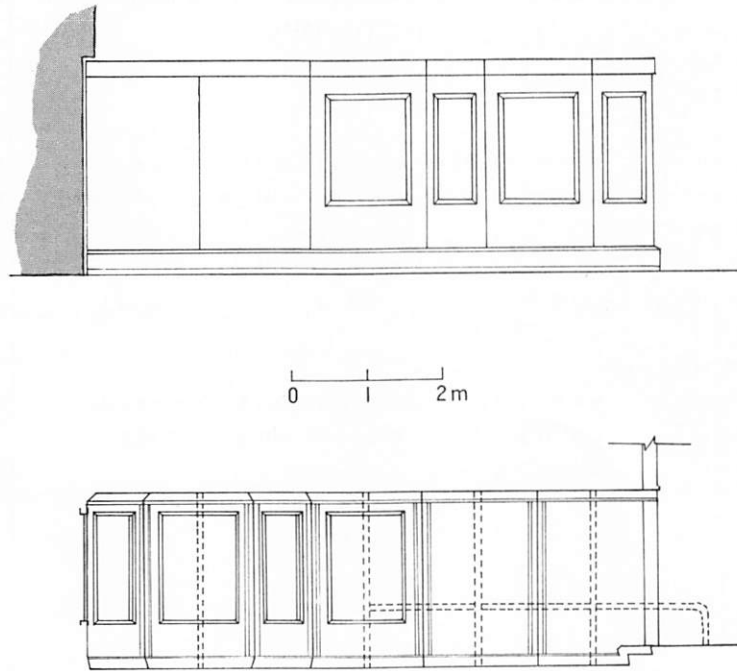


Fig . 9 (上)カプセル北側立面図, (下)カプセル北側展開図

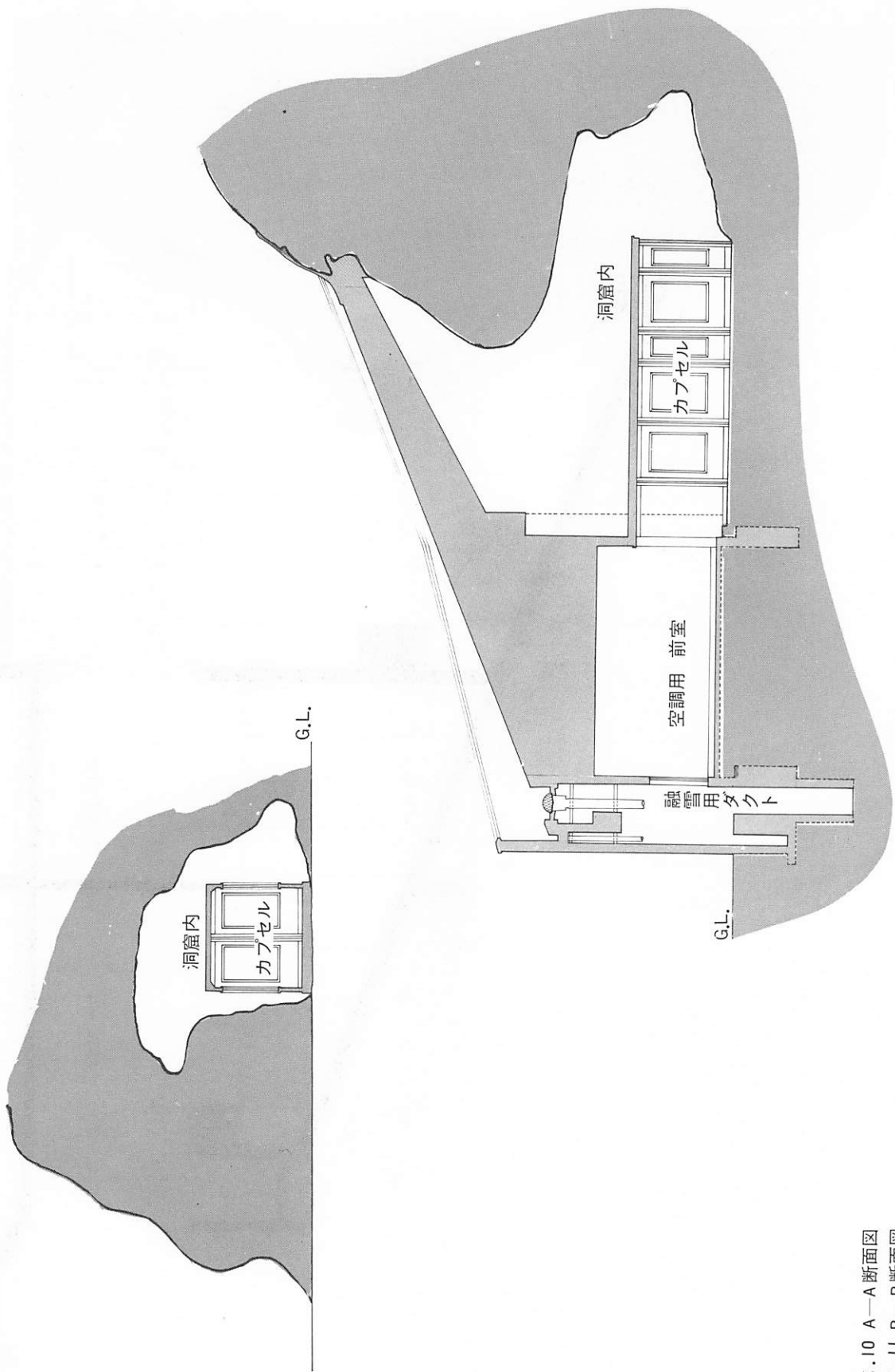


Tab. 1 外部仕上表

		仕 上
カプセル	外 壁 屋 根 建 具	ラワン合板, 下地, アルミプレート貼, 断熱材入りパネル (同 上) 角型ステンレス窓枠, タテ線入りミガキ板ガラス
建 屋	外 壁 P.S. 梁 柱, 梁型 屋 根 バラベツト 笠 木 幅 木 ポーチ	コンクリート打放し, 目地切り, アクリル系リシン吹付仕上 アクリル系リシン吹付仕上 コンクリート打放し, 目地切り, アクリル系リシン吹付仕上 均しモルタル, アスファルト防水, 押えモルタル, 仕上げモルタル コンクリート打放し, アクリル系リシン吹付仕上 着色亜鉛鉄板 モルタルハケビキ仕上 土間コンクリート, 均しモルタル人造研出し白セメント, 降雪時入口の雪囲い, スチール軽量シャッター
その他	建 具 機械室入口 庇 鋼製サルバシゴ	正面—ステンレスサッシ, 機械室—スチールフラッシュ戸, O.P.仕上 斜路—モルタルハケビキ, 側面—モルタル金ゴテ仕上 防水モルタル金ゴテ仕上, ハナーアクリル系リシン吹付, ウラーV.P.吹付 鉄筋, 16φ, @ 300, O.P.仕上

Tab. 2 内部仕上表

	床	幅木	壁	天井	備考
カプセル	現場打コンクリートパ ネル 均しモルタル 仕上モルタル	アルミプレート加工	ラワン合板(タイプI) メラミン化粧板	有孔石線セメント板	廻り縁—アルミプレー ト加工 手摺サッシ枠, ノンスリップ—ステン レス
空調用前室	土間コンクリート 均しモルタル 仕上モルタル	プラスチック目地挿入レ 人造研出し白セメント	外部に接する壁のみ 発泡スチロール打込み ラスボード貼 モルタルハケヌリ	石コウボード ヒル石系吹付材仕上	廻り縁—プラスチック 建具枠、額縁—ラワン
入口ホール	土間コンクリート 均しモルタル 人造研出し白セメント	(同 上)	(同 上)	(同 上)	(同 上)
機械制御室	土間コンクリート 均しモルタル 仕上モルタル	モルタル金ゴテ V.P.仕上 目地棒プラスチック	外部に接する壁のみ 発泡スチロール打込み ラスボード貼 モルタル金ゴテ V.P.仕上	石コウボード V.P.仕上	屋根床板—発泡スチロ ール 廻り縁, 建具, 額縁 —ラワン
機械電気室	(同 上)	(同 上)	(同 上)	(同 上)	(同 上)
空調機械室	土間コンクリート モルタル金ゴテ仕上	(同 上)	(同 上)	(同 上)	(同 上)
洞窟内部			発泡スチロール打込み セメント仕上	石コウボード	屋根床板—発泡スチロ ール
前室天井裏			(同 上)	発泡スチロール打込み	



右 Fig. 10 A—A 断面図  
左 Fig. 11 B—B 断面図

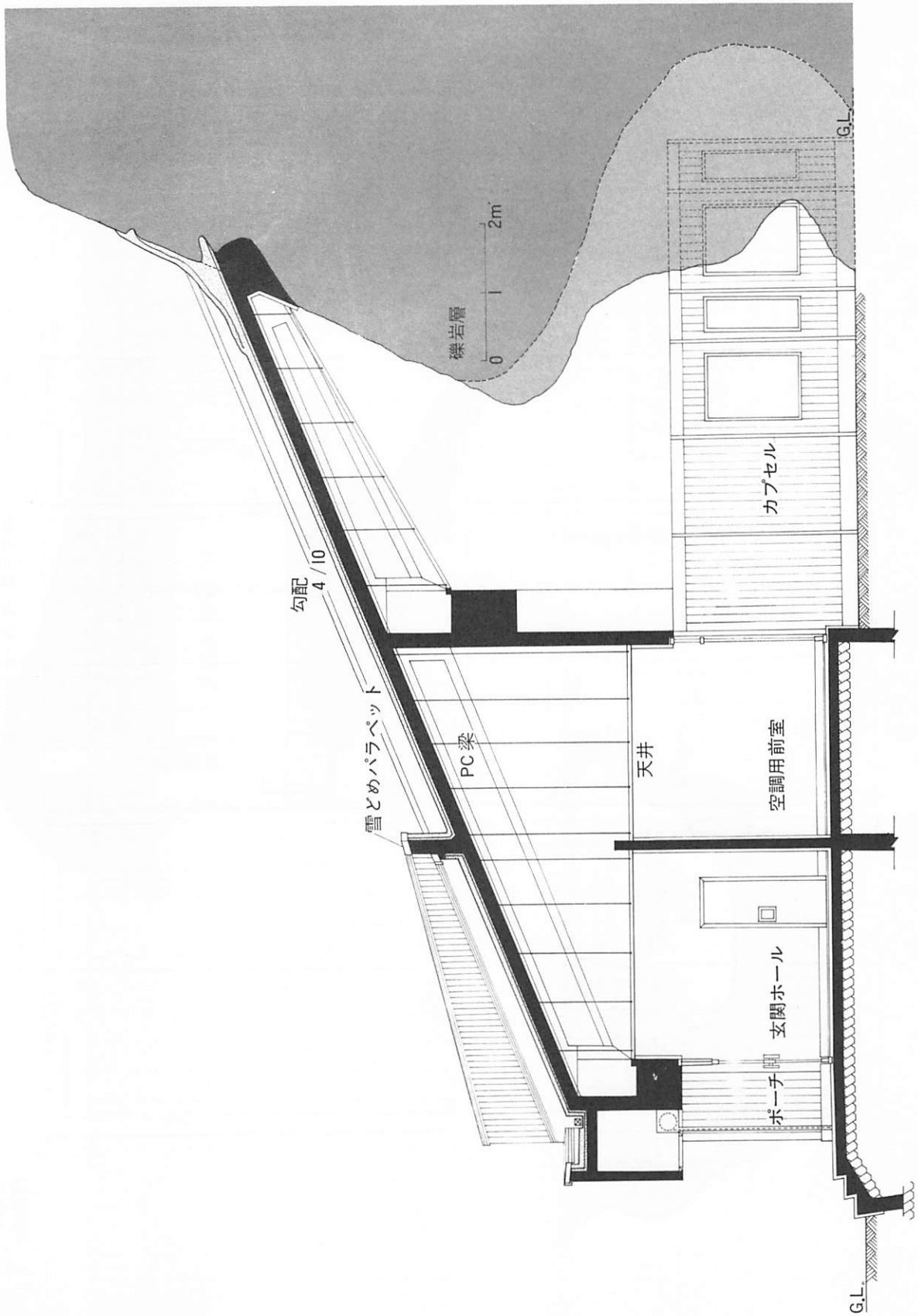


Fig .12 C—C断面図

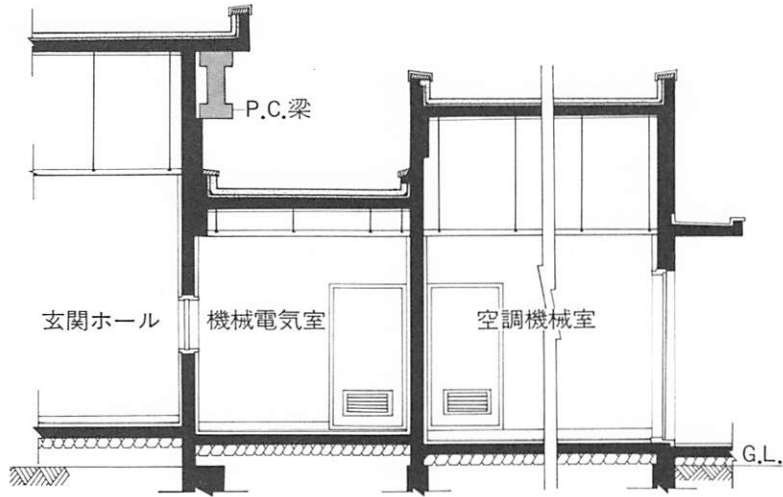


Fig .13 D—D断面図

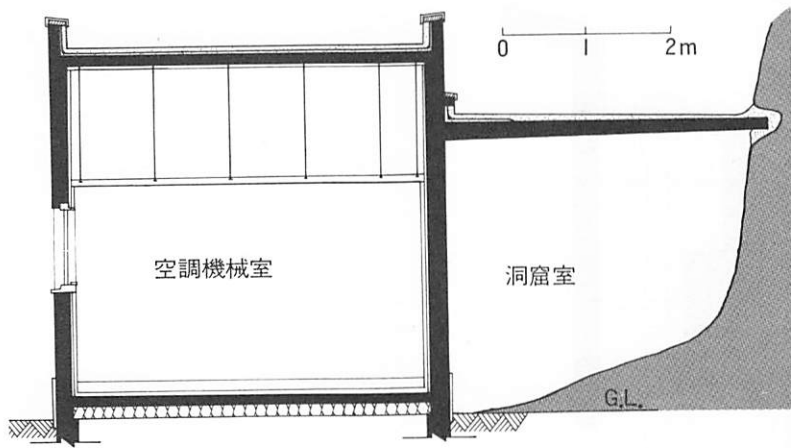


Fig .14 E—E断面図

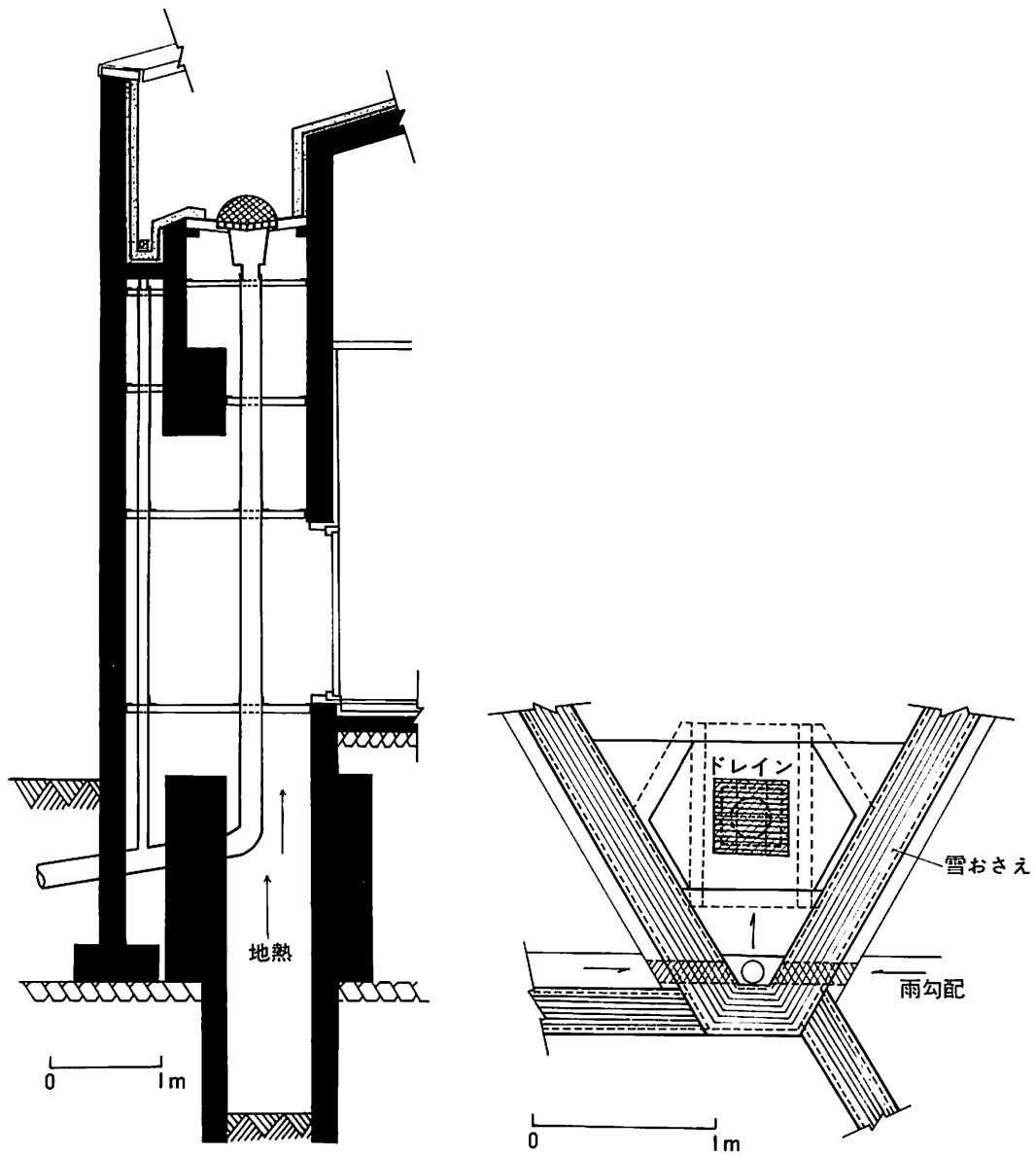


Fig .15 ドレイン平面図(右), 断面図(左)

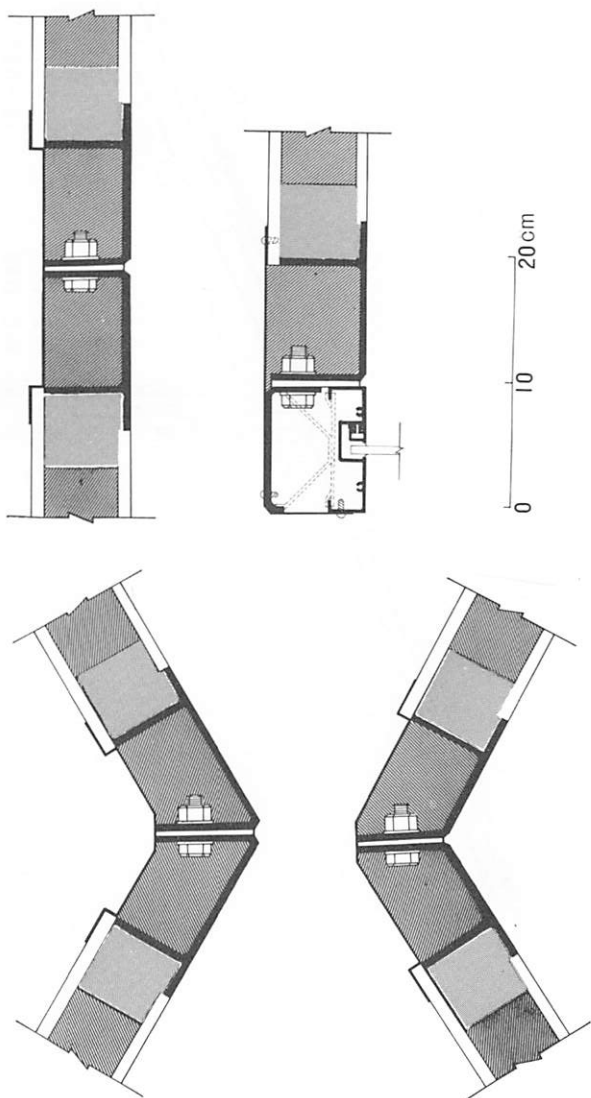
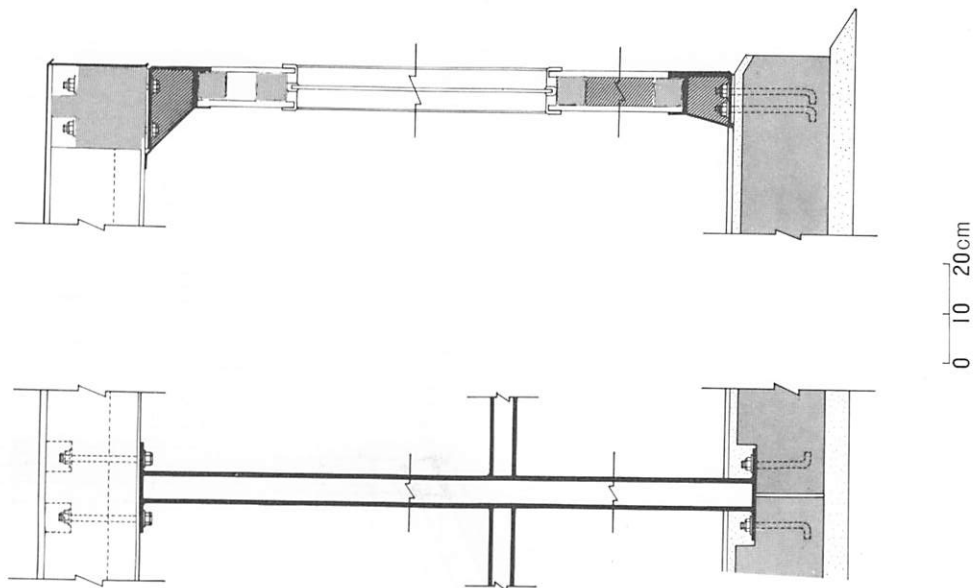


Fig. 16 カブセル ジョイント部

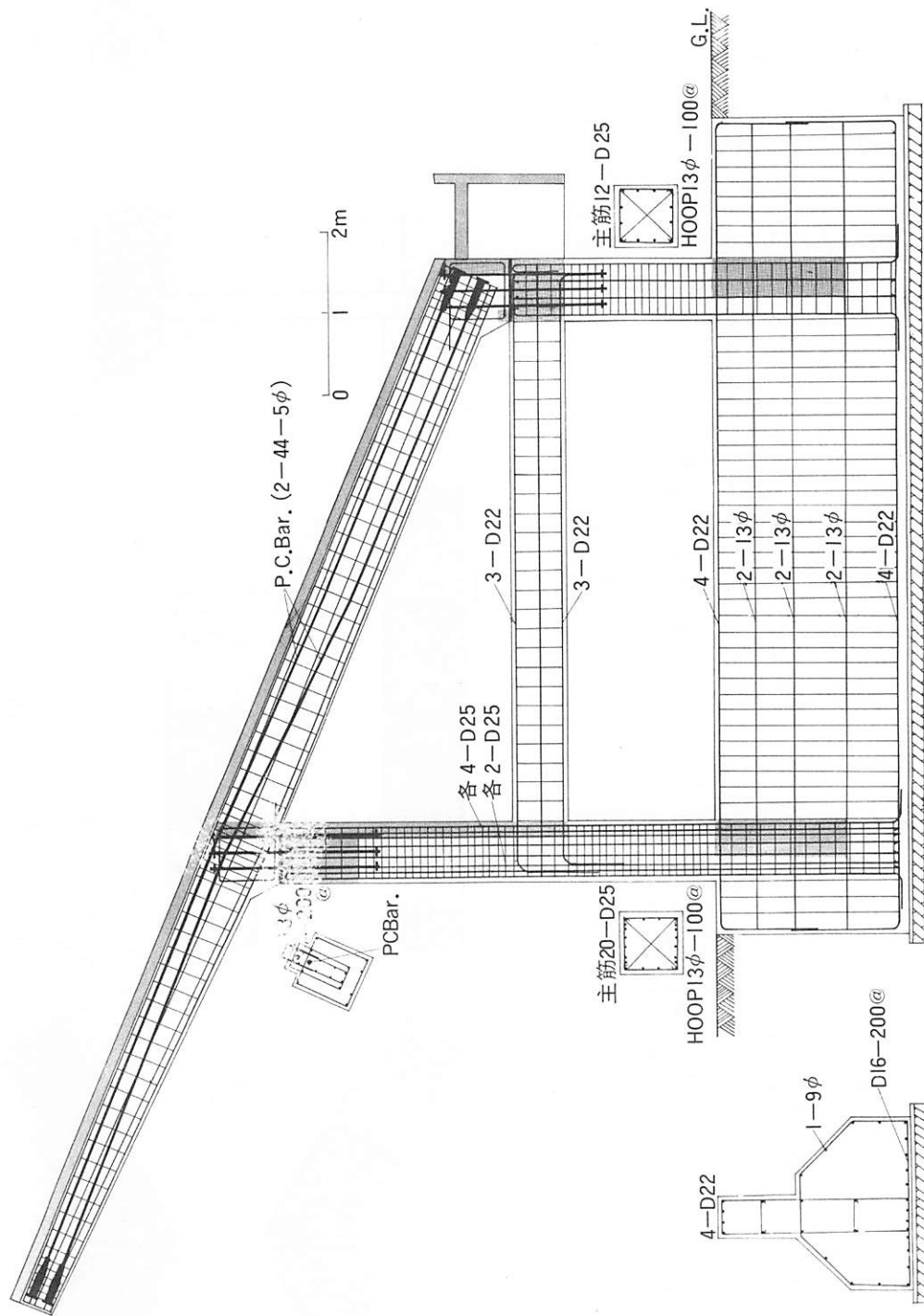


Fig. 17 構造図 I

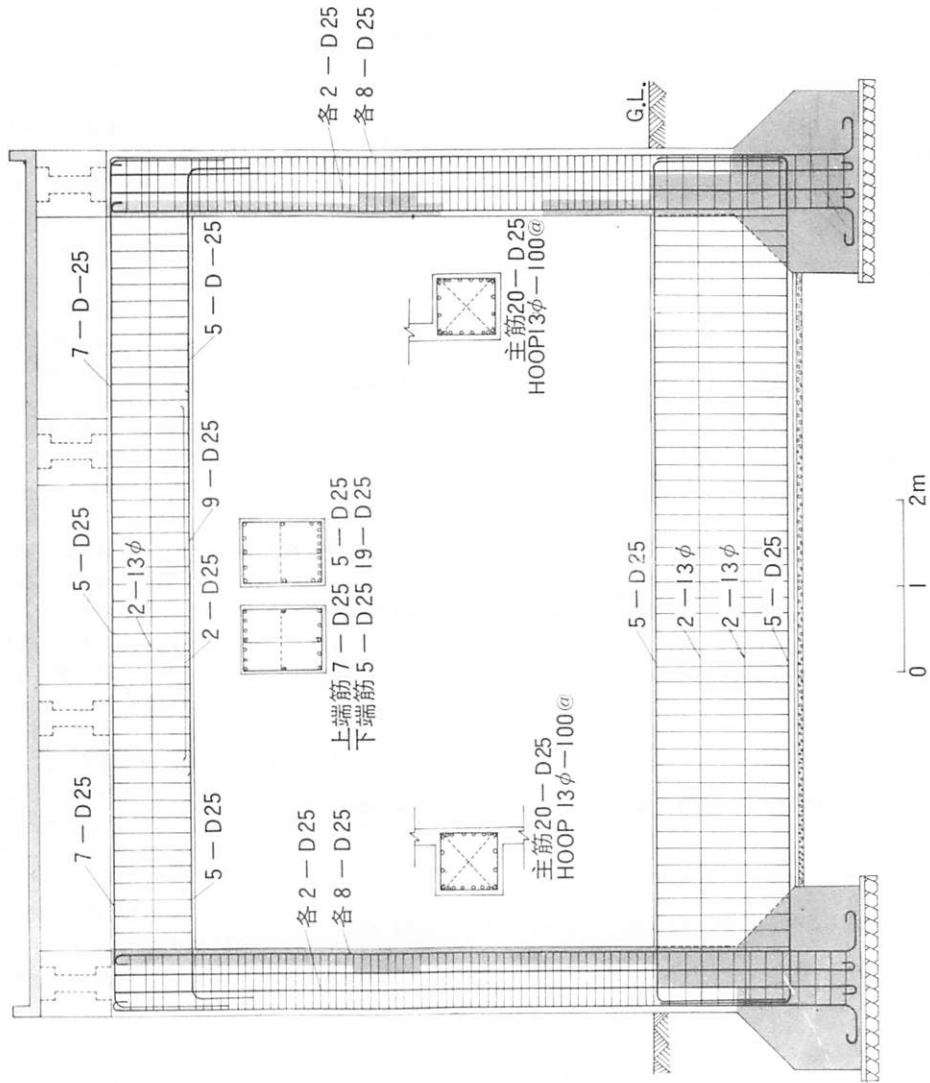


Fig. 18 構造図 II



## 総経費一覧表

史跡フゴッペ洞窟の保存工事に要した総経費は44,209,000円であるが、その内訳明細は下表のとおりである。

年度	金額	財源内訳			備考
		国庫補助金	道費補助金	町負担金	
43	1,500,000	750,000	375,000	375,000	①工事請負費（洞窟内部配電工事、落石防止工事、ビニールカーテン張りおよび欄間板張り工事）445,000 ②備品費294,000 ③委託料（洞窟内外部の温湿度および岩石表面温度の調査と壁面剥落等の原因究明調査、洞窟内外部の地質形成調査、洞窟内外部の温湿度および通風調査）590,000 ④事務費171,000
44	2,000,000	1,000,000	500,000	500,000	①工事請負費（ベンチマーク設置工事、覆屋根トタン張替工事）(123,850) ②委託料（岩石風化実験・地質調査、震動調査、温湿度調査、防災工事調査、洞窟内部ボーリング調査、洞窟内外部写真実測調査）1,675,000 ③事務費201,150
45	1,082,000	541,000	270,000	271,000	①工事請負費（覆屋の天井雨漏り防止補修工事、覆屋壁板補修工事、洞窟内ビニール隔壁補修工事）75,000 ②委託料（岩石振動モデル実験調査、ポロシテー精密実験調査、岩石化学組成実験調査、X線による鉱物学的実験、他物質による補強実験調査、温湿度測定分析調査、写真実測調査および図化）740,000 ③事務費267,000
46	10,000,000	5,000,000	2,500,000	2,500,000	①工事請負費（覆屋基礎工事）4,700,000 ②委託料（覆屋工事設計委託2,680,000 洞窟前庭部〈覆屋工事基礎工事部分〉発掘調査委託2,411,000）5,091,000 ③事務費209,000
47	29,627,000	14,763,000	7,381,000	7,483,000	①覆屋工事請負費27,370,000 ②委託料988,000 ③事務費1,269,000

## RÉSUMÉ

### THE CAVE FUGOPPE (IN YOICHI-CHO, HOKKAIDO, JAPAN)

#### FOREWORD

The Cave Fugoppe was designated by the Japanese Government as a historical site on November 14, 1953. Digging surveys of the cave interior were carried out in 1951 and 1953, and as a result, it was found on the wall surfaces covered by the layers of remains deposited in the cave, more than 200 carvings consisting of reliefs made by abrading and inscribed lines expressing various human images, geometrical hieroglyphic patterns, four-legged animals, marine animals, fishes, boats and houses. This cave, judging by the artifacts unearthed, is a wave-eroded cave used by humans in the Late Jomon Period to the Upper Jomon Period. The carvings are thought to have sorcerous meanings and furnish precious historical scientific data in comparison studies of the northern culture of Japan and other northern cultures such as of Siberia.

With the purpose of preserving the wall carvings, various basic investigations and studies were conducted from 1968 to 1970 with the late Shukoh Iwatsuka, Associate Professor, Faculty of Science, University of Tokyo in charge of physical geography, Takeshi Nomura, Associate Professor, Faculty of Engineering, University of Tokyo in charge of temperature and humidity investigations, Kyozi Tajime, Professor, Faculty of Science, Hokkaido University in charge of vibrational studies and Koichi Kishitani, Associate Professor, Faculty of Engineering, University of Tokyo in charge of building planning. After repeated deliberations based on the results of these studies, a sheltering building and various facilities for preserving the Cave Fugoppe were completed in the 1971~1972 fiscal year. The foundation survey, construction of the building and installation of equipment were carried out with the township of Yoichi-cho as the owner. The work required a total amount of 44,209,000 yen of which expense 50%, 25% and 25% were borne by the national government, Hokkaido and Yoichi-cho respectively. Designing of the sheltering building and various equipment installations was put together by Yamaki Architectural Design Office and construction was done under warranty by Matsumura-Gumi Co., Ltd.

#### I. EXCAVATION SURVEY ON THE FRONT COURTYARD OF CAVE FUGOPPE

##### Cave Fugoppe Excavation Survey Team

Prior to construction of the sheltering building to preserve the wall carvings of the cave, an excavation survey of the front courtyard of the cave was carried out in 1971. The layers of relics were denser the closer to the entrance of the cave and down to -2.5m there were thin intermittent layers of remains in seven levels of shells. Underlying the layers of remains are thick irregular layers of humus soil and colluvial deposits, while further below is a sand layer intercalated with thin lines of reddish brown fine clay reaching to a wave-eroded bed at approximately 7m from the ground surface.

Chief of the relics unearthed in the study were pottery containing the shoulder blades of deer, carved bedrock, etc., besides which there were also remains of fires, pits for ritualistic offerings of pottery and burial pits for interment of iron implements as grave good.

## II. PHOTOGRAMMETRY OF INTERIOR AND EXTERIOR OF CAVE

Yoshiyuki Ushikawa, Daisaku Itoh and Mikio Tsukuda  
(National Cultural Treasures Research Institute of Nara)

Ground photogrammetry was carried out in order to obtain accurate records and preservation data of the approximately 200 carvings on the interior walls of the cave and of the exterior, and also to provide information for design and construction of a protective sheltering building for the cave.

The method of photogrammetry was to take pictures of an object from two points separated a suitable distance apart and combining the two photographs to obtain a vivid stereoscopic image on which measurements were made. The sequence of the work consisted of selection of the surface to be photographed, determination of the points from which to take photographs, establishment of reference points, instrumentation, photographing, stereo-plotting and measurement.

As a result of the survey, a plan of the interior of the cave, elevations of the rock walls and cross sections of the cave were accurately obtained.

## III. INVESTIGATIONS ON BASAL ROCK OF CAVE

Shukoh Iwatsuka and Masami Fukuda  
(University of Tokyo)

The entire cave consists of tuff and brecciated tuff of the Tertiary Period. Weathering of the exposed rock portion is severe and crumbling in the form of sand granules has occurred. There are a number of joints in the rock mass and at some parts blocks of rock have fallen out following the lines of the joints.

With the purpose of obtaining a concept of the state of weathering and crumbling of the cave walls, investigations and experiments consisting of microscopic examinations of rocks, measurements of void ratios and monoaxial compressive strengths, measurements of elastic wave velocities by ultrasonic methods, freezing and thawing tests, vibration experiments and measurements of crumbling of exposed rock slopes were carried out in the present study.

As a result, the peculiar weathered condition of the basal rock, especially the increase and enlargement of voids accompanying weathering was pointed out. However, when the cave had been closed off for a long period, the cave walls were preserved with relatively little weathering, and attention should be paid to this feature.

It appears that maintaining temperature and humidity constant throughout the year will have the effect of reducing spalling of the rock surfaces.

## IV. TEMPERATURE AND HUMIDITY MEASUREMENTS INSIDE CAVE

Takeshi Nomura  
(University of Tokyo)

In the climatic studies of 1968, 1) drying and spalling due to the sun, 2) dew condensation, 3) growth of moss, and 4) freezing and thawing were found to be causes of wearing of the rock wall surfaces. Therefore, measurements were made of temperatures and humidities at various parts inside the cave to clarify the manner in which dew condensation and freezing and thawing occur and to obtain information for conducting weathering tests of the rock of the cave.

As a result of the measurements, it was learned that temperatures both inside the cave

and at the surfaces of the rock walls rise to around 19°C during the summertime to provide a condition suited to growth of mosses and fungi, while in the winter temperatures drop below freezing point at times and there is fear of freezing of moisture. It was concluded in this study that closing off the cave from the outside elements and regulating temperature and humidity would be effective in protecting the wall surfaces.

The conditions for air-conditioning would be to keep the temperature within the cave above 5°C to prevent freezing and below 15°C to prevent growth of moss, and to cause some degree of moisture removal to occur when the cooling circuit is working. Furthermore, a fore-chamber should be provided as a buffer space between the cave interior and the exterior and the temperature of this chamber should be controlled at 17~18°C.

## V. MEASUREMENTS OF VIBRATIONS OF THE CAVE AT FUGOPPE IN YOICHI-CHO, HOKKAIDO

Kyozi Tajime, Toru Igarashi, Tsutomu Sasatani, Keiji Tonouchi and Masatake Nagano  
(Hokkaido University)

One factor of the damage might be due to the vibration of the wall caused by the train which runs very near the cave.

Accelerations were measured at two sites, the foot and the top of the wall, with three component transducers. During the passage of each train, maximum accelerations were found as large as several tens gals on the top but nearly ten gals on the foot. The larger the number of cars and the velocity of the train, the larger the acceleration observed. Frequencies of the large vibration were 30 to 40 cps. These vibration are attenuated from hundreds gals near the rail to only ten gals on the ground far 15m from the railway.

The present authors don't know whether this amount of vibration may have any effect to the damage of the picture or not. If it will be preferable to diminish the maximum acceleration within 10 gals on the top of the wall, it may be done by using jointless rails near the cave. In the absence of the train the acceleration of the microtremor on the foot was only 0.14 gals, being its frequencies nearly 30 cps.

## VI. DESIGN OF SHELTERING BUILDING FOR CAVE

Koichi Kishitani  
(University of Tokyo)

As a result of various studies carried out for approximately one year from 1969, it was concluded that air-conditioning the interior of the cave and maintaining the air temperature at a constant low temperature would be effective in protecting the inner walls on which the carvings exist.

It was decided that in carrying out the design of the sheltering building for the cave considerations would be given to ensuring protection of the interior walls through air-conditioning and protection of the area surrounding the entrance to the cave and part of the exposed rock areas, to making the building fire-resistant as well as having an appearance becoming of a structure for preservation of a historic relic, and to the expectation that further new unearthing work would be done in the future in the vicinity of the cave.

The sheltering building will be separated into an entrance hall, machinery room fore-chamber, and cave interior inspection capsule, and an air-conditioning equipment room will be attached to this sheltering building. The capsule would be for watching the condition inside the cave at all times, but it would also prevent the wall surfaces of the cave from being damaged by humans and at the same time increase the effect of air-conditioning.

Since there is a possibility that more ruins and relics are still buried under the front courtyard part of the cave, the number of columns will be held to a minimum in consideration of future excavation. Further, since the cave entrance is at a point higher than ground level, it will not be possible to place concrete in situ for beams near the exposed rock. Therefore, a long-span structure using precast prestressed concrete for the main girder of the cover building will be provided. The roof will be a penthouse type sloping from the cave considering accumulation of snow and the slope will be such that avalanches will not occur in order that the exposed rock will be protected. Accumulated snow will be melted utilizing geothermal heat and led off to a drain.

As described, the structure will be such as to cover the entire cave while there will be two air-conditioning systems, one for the interior of the cave and the other for the fore-chamber and capsule to provide sure air-conditioning for the cave interior.

---

史跡 フゴッペ洞窟保存工事報告

編者 北海道余市郡余市町

発行 昭和48年3月31日

---

製作者 績文堂出版株式会社

住所 東京都新宿区山吹町81番地

---

発行所 北海道余市郡余市町

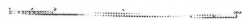
住所 北海道余市郡余市町朝日町26番地

---

フゴッペ洞窟 内部南壁立面図

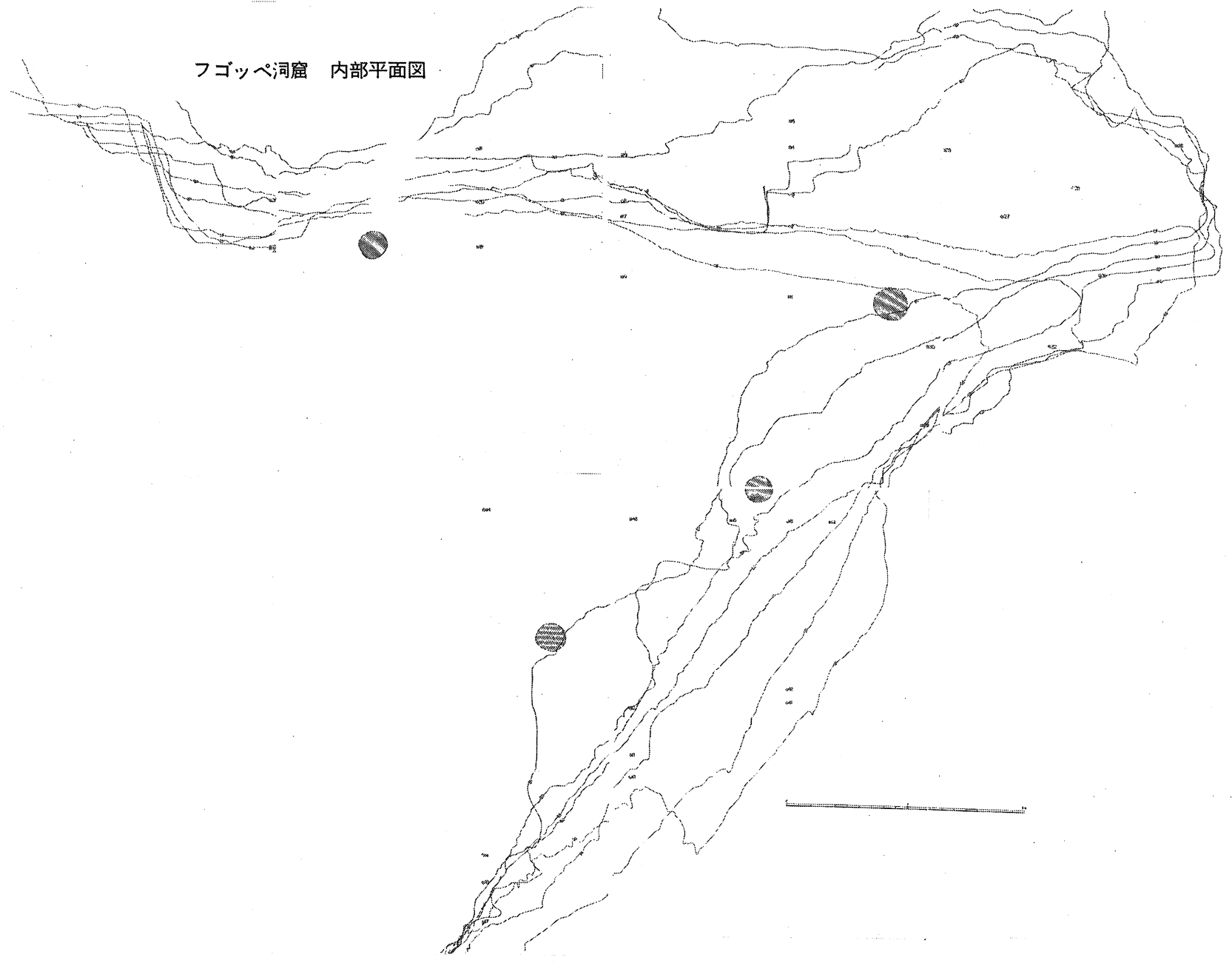


フゴッペ洞窟 内部北壁立面図





フゴッペ洞窟 内部平面図



フゴッペ洞窟 平面図

