

第 4 章 解 析

Bamnet-Narong における追加試錐の岩芯調査，日本に搬入した試料による化学分析，物性試験などによって得られた諸データに基づいて技術的解析を行った。以下にこれらについて要約を述べる。

4.1 地 質

(1) タイ国北東地域の地質概況

タイ国北東部地域はコラート高原地方と呼ばれており，半乾燥の地帯である。この高原地方には古くから処々に含塩土壌，含塩水井，塩水泉などの分布が知られていた。1952年以降にこの地域で実施されてきた地下水調査試錐によって多くの箇処で岩塩層の存在が確認された。岩塩層の賦存する箇処は地質的にベーズン構造の地域であり，岩塩層には石膏，硬石膏，カリ塩などが付随している。この岩塩層は含有する諸成分，胚胎する地質構造などからみて海水が長年にわたって蒸発し生成された海成蒸発鉱床 (Marine Evaporite Deposits) と考えられる。

コラート高原は殆んどがコラート層群より構成されており，このコラート層群は上部トリアス紀から白亜紀に至る堆積層で，一般に平坦乃至緩傾の構造をもつものであるが，2ヶ所に広大なベーズン構造が存在し，北側のものは Sakon-Nakhon basin，南側のものは Khorat basin と呼ばれている。Bamnet-Narong 岩塩鉱床は Khorat basin の西側に位置する。

コラート層群は一般に，泥岩，頁岩，砂岩，粘土層，礫岩および岩塩層からなるが，南部地方には第三紀の火成岩のストックや岩脈がみられる。古生層はこの地域の基盤をなすもので，北西部および西部にみられる。

この地域の一般地質層序，地質図は Table 4.1，Fig 4.1 に示した。

(2) Bamnet-Narong 地区の岩塩層およびその区分

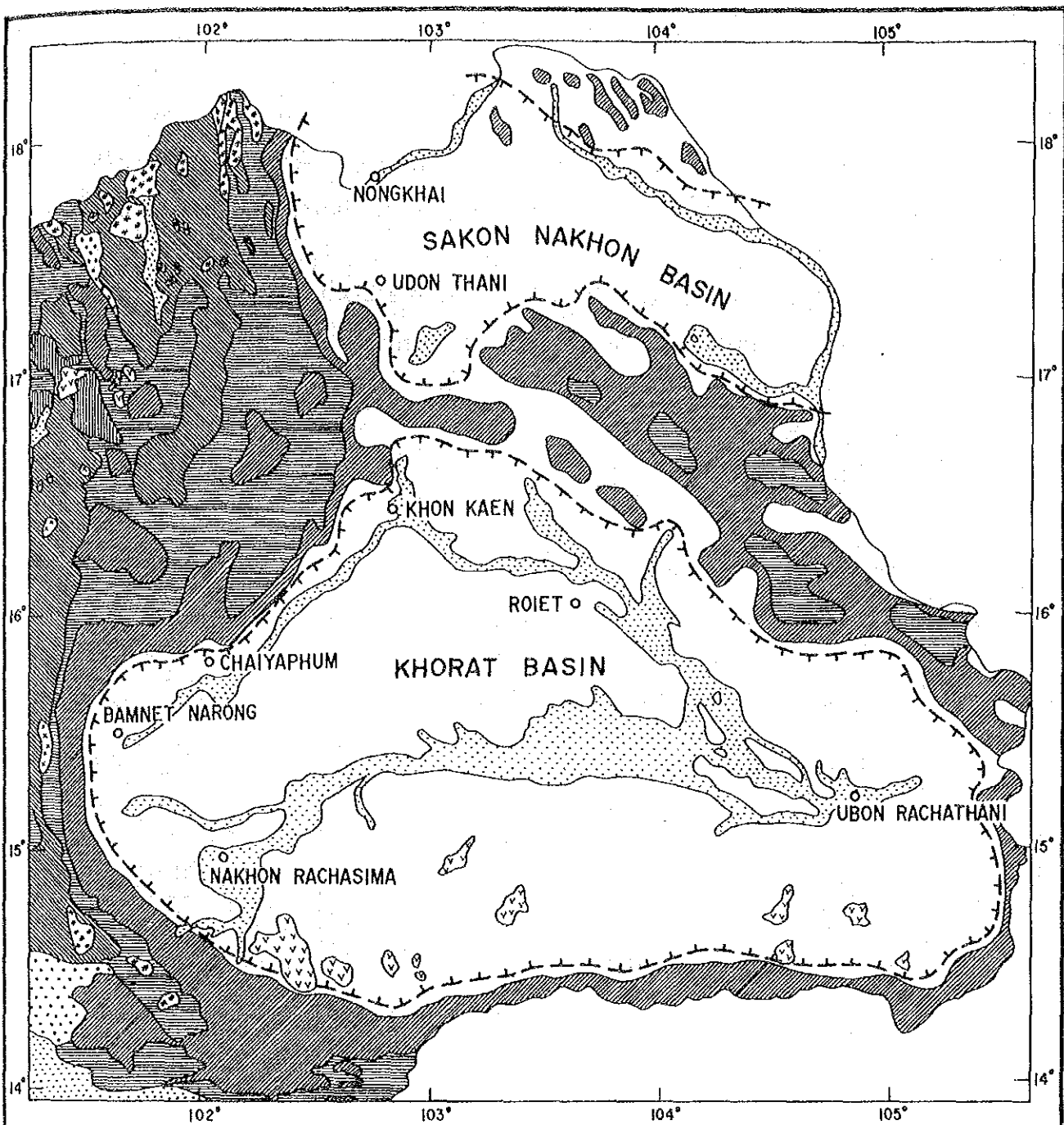
コラート層群は Maha Sarakam 層，Phu Phan 層，Phu Khadung 層の3層に区分されているが，岩塩層はこれら3層にそれぞれ賦存している。

Bamnet-Narong 岩塩鉱床はコラート高原地域で実施した多くの試錐結果から Maha Sarakam 層に属する岩塩層であることが知られている。

Bamnet-Narong 地区には追加試錐を含めて既に20本以上の試錐が掘進されている。これらの試錐によって厚さ100m～280m程度の岩塩層が確認され，この地区に埋蔵する岩塩量は膨大なものと考えられる。

Table 4.1 Stratigraphy of Northeastern Thailand
(Herbert S. Jacobson and Charles T. Pierso 1969)

Age	Rock Units		Character	
Quaternary	Unnamed		Unconsolidated clay, sand, and gravel; laterite.	
Tertiary	Unnamed		Basalt flows (only overlying, Khorat Series on Khorat Plateau).	
Cretaceous	Khorat Series	Upper	Maha Sarakam Foramtion Khok Kruat Formaiton	Sandstone, siltstone, shale, salt, and anhydrite-gypsum. Sandstone, siltstone, and shale.
		Middle	Phu Phan Formation Sao Khua Formation Phra Wihan Formation	Massive sandstones with conglomerate sandstone, siltstone, and shale.
Lower			Phu Khadung Formaiton Nam Phong Formation	Sandstone, siltstone, and conglomerate (including basal conglomerate).
Triassic		Unnamed		Andesite, rhyolite, tuff, agglomerate.
		Unnamed		Granodiorite and other intrusive rocks.
Permian		Kanchanaburi Series	Ratburi Limestone	Massive limestone with shale and sandstone.
Carboniferous	Unnamed		Sandstone, siltstone, shale, tuff and limestone.	
Devonian	Unnamed		Sandstone, quartzite, phyllitic shale, slate, and limestone.	
Silurian and older	Unnamed		Argillite, quartzite, slate, phyllite, schist.	



EXPLANATION

QUATERNARY		Aluvium		Basalt
CRETACEOUS		Sandstone, Shale Siltstone, Rock-Salt		Andesite Rhyolite
JURASSIC		Sandstone, Shale Conglomerate		Granite Granodiorite
JURASSIC		Shale, Sandstone		Porphyry
TRIASSIC		Conglomerate		Ultramafic
TRIASSIC		Sandstone, Siltstone, Conglomerate		Basin
CARBONIFEROUS		Sandstone, Siltstone, Shale, Limestone		

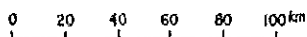


Fig.4-1 Geological map of northeastern Thailand

Map modified from The geologic map of Thailand
compiled by Jumchet C. Javanaphet (1969)

追加試錐 4 本による岩塩賦存状況は Fig. 4.2 の通りである。追加試錐 2.18 孔, 2.19 孔においては岩塩層は 2 層よりなり, 本文では下位岩塩層を Halite-A, 上位岩塩層を Halite-B と呼称する。

これに対し, 2.20 孔, 2.21 孔においては 1 層の岩塩層よりなり, これは次項で述べるように Halite-A 層に対比し得るもので, これも Halite-A 層と呼称する。

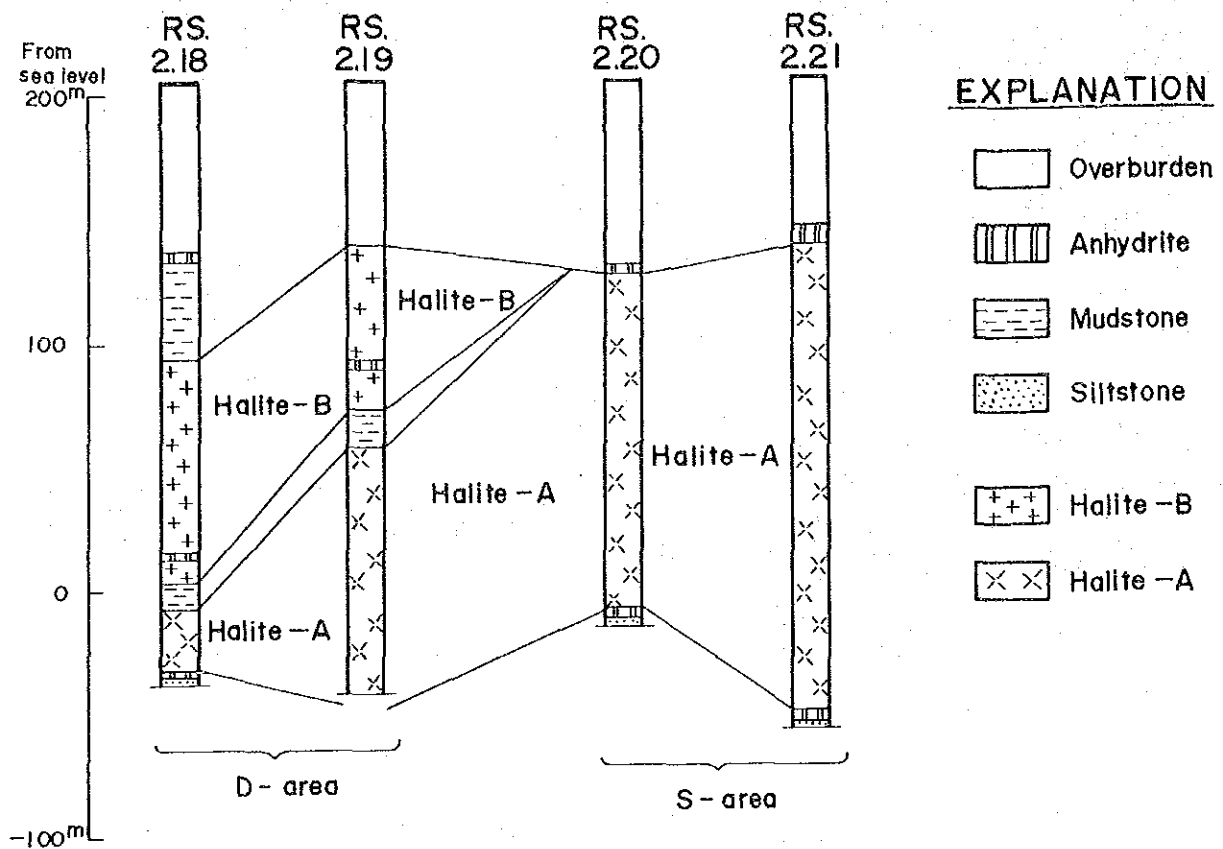


Fig.4.2 Columnar-stratigraphic sections of additional drill holes at Bamnet - Narong

さらに、Halite-AとHalite-Bが重なって賦存する地帯、例えば2.18孔、2.19孔の地帯をD-area (Double rock salt beds area)、Halite-Aのみが賦存する地帯、例えば2.20孔、2.21孔地帯をS-area (Single rock salt bed area)と呼ぶことにする。

追加試錐の岩芯調査および旧試錐資料解析結果から、Bamnet-Narong地区のD-areaとS-areaの分布状況はFig. 4.3の通りである。これによるとBamnet-Narong岩塩鉱床のほぼ中央部はS-areaによって占められており、周囲がD-areaになっている。また模式断面図をFig. 4.4に示した。

(3) 岩塩層の特徴

追加試錐4本によって得られた諸データを基にした岩塩層の特徴は以下の通りである。

- (a) Halite-Aは硬質シルト岩を基盤とし、その上に厚さ1m前後の硬石膏を経て賦存する。
- (b) Halite-Bは層位的にHalite-Aの上位に位置しており両者間には厚さ1~1.5m程度の粘土層がみられる。
- (c) 肉眼観察ではHalite-AはHalite-Bに比較して夾雑物が少なく品質的に優れている。
- (d) 化学分析結果によってもHalite-AはHalite-Bに比較してNaClの平均品位が高く且バラツキが少ない。
- (e) Halite-Aは上部にカリを含有する場合がある。
- (f) S-areaのHalite-AはD-areaのHalite-Aに比較すると岩塩層が厚い。
- (g) これは、Halite-Aの堆積後に局部的に浸蝕などにより小ベーズンが形成され、これに泥岩などの堆積物さらにはHalite-Bが堆積し(即ち、D-area)、これら堆積の進行と共に荷重が加わり、S-areaが流動上昇した結果とも考えられる。
- (h) しかし、S-areaのHalite-AとD-areaのHalite-Aは、後節で述べるようにBr、Mgなどの含有状態が異なっており、岩塩堆積時の塩濃度が異なったものであることがうかがわれる(Fig. 4.6(a)~(d))。
- (i) 従って、同じHalite-AでもD-areaのものとS-areaのものでは異なった堆積環境で生成されたことが推定される。
- (j) Halite-AをD-areaのものとS-areaのものとを比較するとTable 4.2のようになる。
- (k) なお、Halite-Aは北東タイ地域に賦存するMaha-Sarakham層のLower-Salt層に、Halite-BはMiddle-Salt層に対比できるものである。

以上、追加試錐4本による岩塩層の区分、そしてそれらの比較を行ったが、これらを確認するためにはBamnet-Narong地区の旧試錐資料の解析が更に必要である。

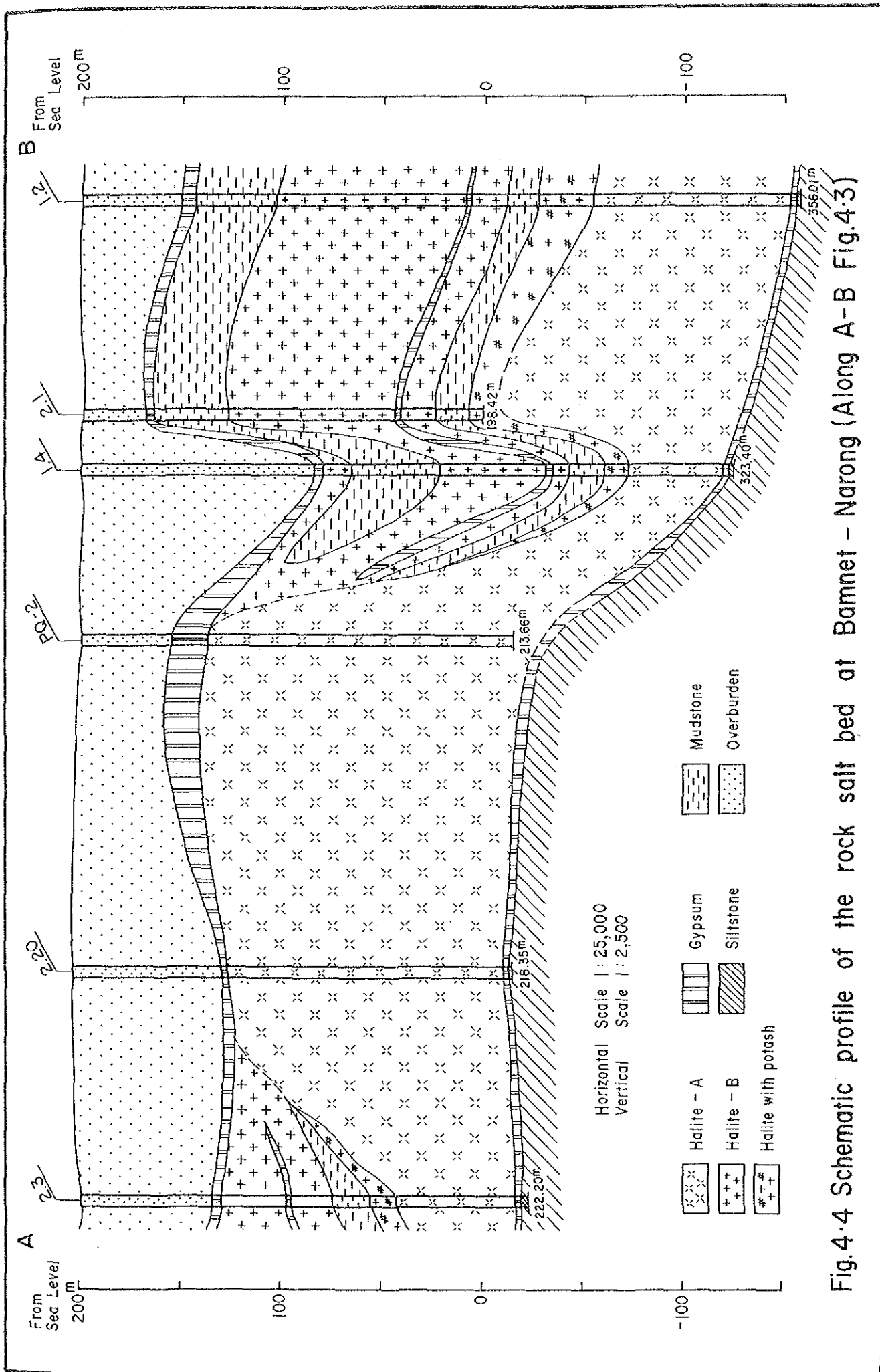


Fig.4.4 Schematic profile of the rock salt bed at Bamnet - Narong (Along A-B Fig.4.3)

Table 4.2 Comparison between Halite-A in D-area and that in S-area

	Contents by chemical analysis						Rock salt bed thickness
	NaCl	I.M.	SO ₄	K	Mg	Br	
Halite-A in D-area	96.92%	1.29%	1.01%	occurs in upper part	the upper, the higher gradually	the upper, the higher gradually	thin
Halite-A in S-area	97.86%	0.51%	0.90%	not occurs	occurs uniformly	occurs uniformly	thick

(4) 採掘対象岩塩層

採掘対象岩塩層の決定については第2次評価調査時において更に高度な解析を加えて行わねばならないが、追加試錐4本によって現在まで得られた地質的資料、次節で述べる化学分析資料から、S-areaのHalite-Aが適していると考えられる。

4.2 化学分析

(1) 塩主成分

追加試錐4本より採取した試料210ヶについて塩主成分を分析したがこのうち、NaCl 90%以上の197ヶについてNaCl分析値の度数分布を調べるとFig. 4.5(a)のようになる。これは、弱いながら明らかに「双峰分布」を示しており、やや異質のものが含まれていることを示唆している。これを4.1(2)で区分したHalite-Aのみについて度数分布を調べるとFig. 4.5(b)のようになり「双峰分布」は消える。このことは4.1(2)で地質層序に区分したHalite-AとHalite-Bは化学成分的にも区分し得ることを示すものである。

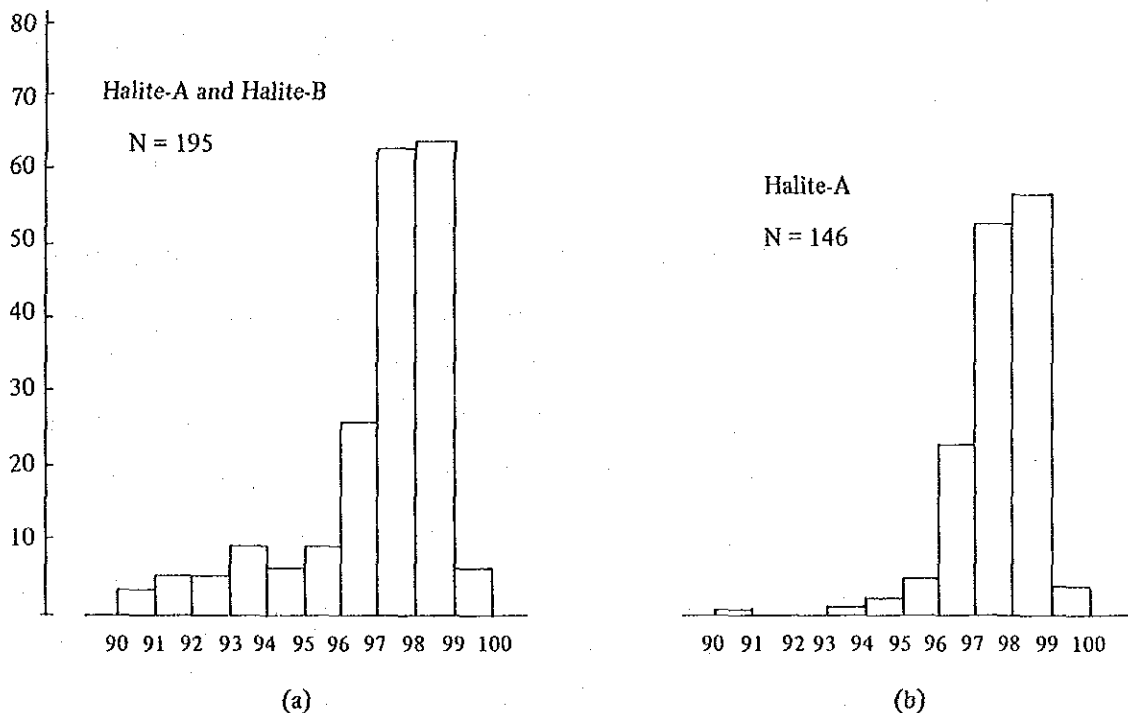


Fig. 4.5 Histograms showing NaCl content distributed in rock salt of additional drill holes

追加試錐4本について塩主成分分析値の垂直変化図を(Fig. 4.6(a)~(d))に示した。これによると、明らかにHalite-AとHalite-Bとでは塩主成分の含有に差が認められる。すなわち、NaClはHalite-AがHalite-Bに比して含有割合が安定しており且含有値が高い。SO₄,

I.M (水不溶解残渣物)はHalite-AがHalite-Bに比して含有値が低い。Kは2.18孔, 2.19孔のHalite-Aの上位に含有するが, 2.20孔, 2.21孔のHalite-Aには殆んど含有しない。またMgはHalite-Bの方がHalite-Aに比して平均含有値は高い。同じHalite-Aでも2.18孔, 2.19孔はMgの含有値が下位より上位にかけて漸増する傾向を示している。

以上を要約すると, 追加試錐4本の岩塩層に含有する塩主成分は, 4.1(2)で区分したHalite-AとHalite-Bに対応して異なった含有状況を示している。また, 同じHalite-AでもD-areaに属する2.18孔, 2.19孔とS-areaに属する2.20孔, 2.21孔ではMg, Kの含有状況に顕著な差が認められる。

(2) 微量成分

塩主成分を分析した試料より17ヶを抽出してCd, Cr, Hg, Fe, Cu, Zn, Pb, As, VそれにMnの10成分を分析したが, 全般的に低く岩塩鉱床採掘にあたってとくに問題となるような含有値ではない。

(3) SO₄ とNaCl との関係

追加試錐の塩主成分分析値 Fig.4.6 (a)~(d)においてNaClとSO₄の含有値が負の相関関係を示すことが読みとれるが両者の値をFig.4.7に示し検定を行った。これによると, Halite-AとHalite-Bとでは別々のグルーピング傾向がみられる。一次回帰による相関係数は各 $r = -0.76$, $r = -0.86$, でHalite-Aがまとまった分布傾向を示している。

(4) Br とK との関係

一般に, 海水起源の岩塩が堆積するためには, 閉塞された海洋盆地乃至は準閉塞状態の海洋盆地が存在することが必要である。この盆地が太陽熱などによって蒸発作用のみが行われて海洋からの海水の補給がない場合(乃至はすくない場合)は残液中に岩塩の堆積が進行し, そのうえ徐々に残液海水の塩濃度が増加し遂には蒸発が終了する。このような場合には塩濃度の増加とともにBrが漸増し, 蒸発が殆んど完了し, 母液塩水が高塩濃度に達した時期に急激にカリ鉍物が晶出する。いわゆる「Br漸増型岩塩層」である。

一方, 岩塩が堆積する程度の塩濃度をもつ盆地であっても, 海洋から海水の流入補給が適宜に行われた場合(乃至は盆地が巨大で海水量が多量な場合)には塩濃度はそれ以上増加しない。このような場合には岩塩中のBr含有値は低く, 且含有値は変化しない。従ってカリ鉍物の晶出はみられない。いわゆる「Br不変型岩塩層」である。

追加試錐4本のうち, カリは2.18孔, 2.19孔において岩塩に付随して賦存しており, 鉍物はシルバイト, カーナライト, タチハイドライトなどである。これに反して, 2.20孔, 2.21孔では殆んどカリを含有していない。

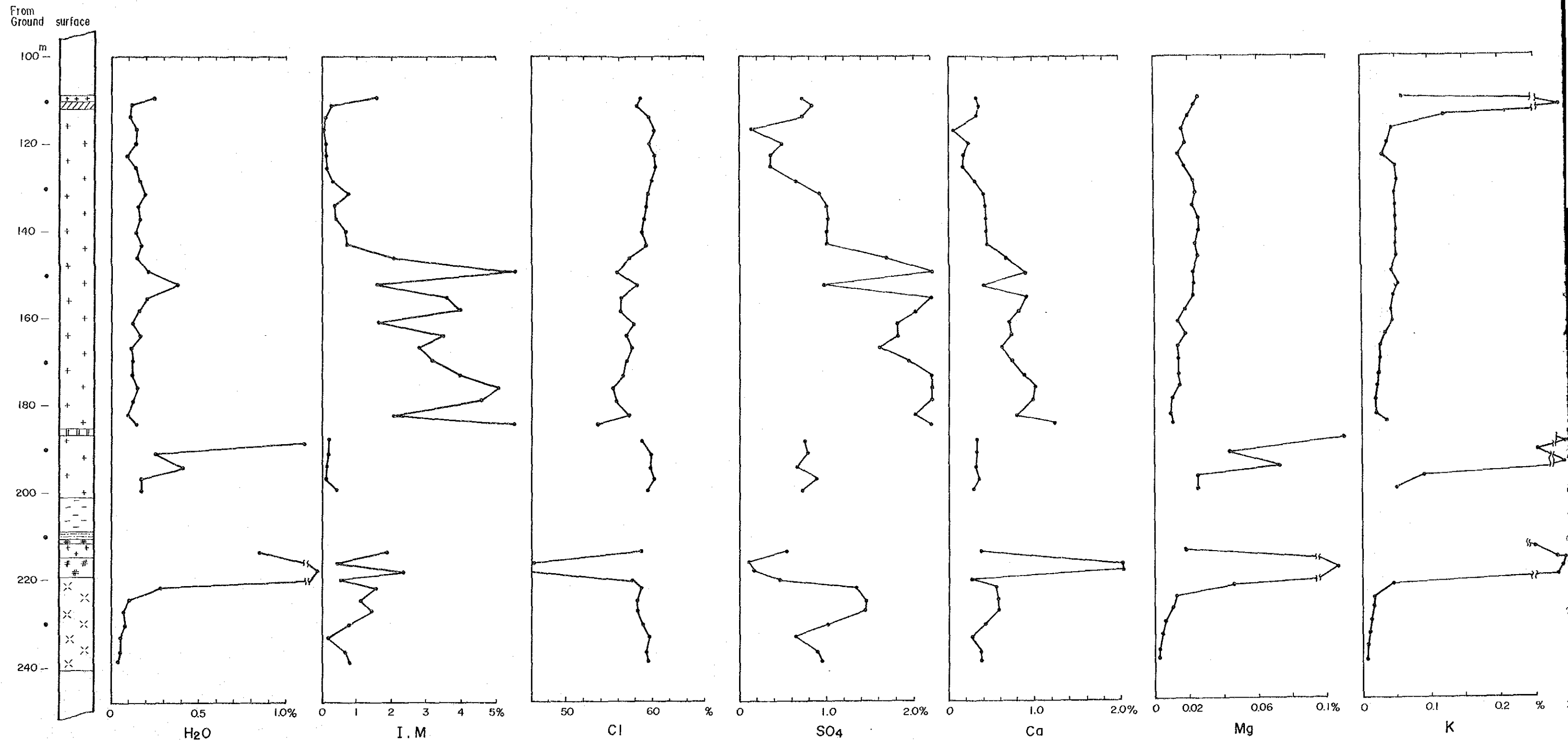
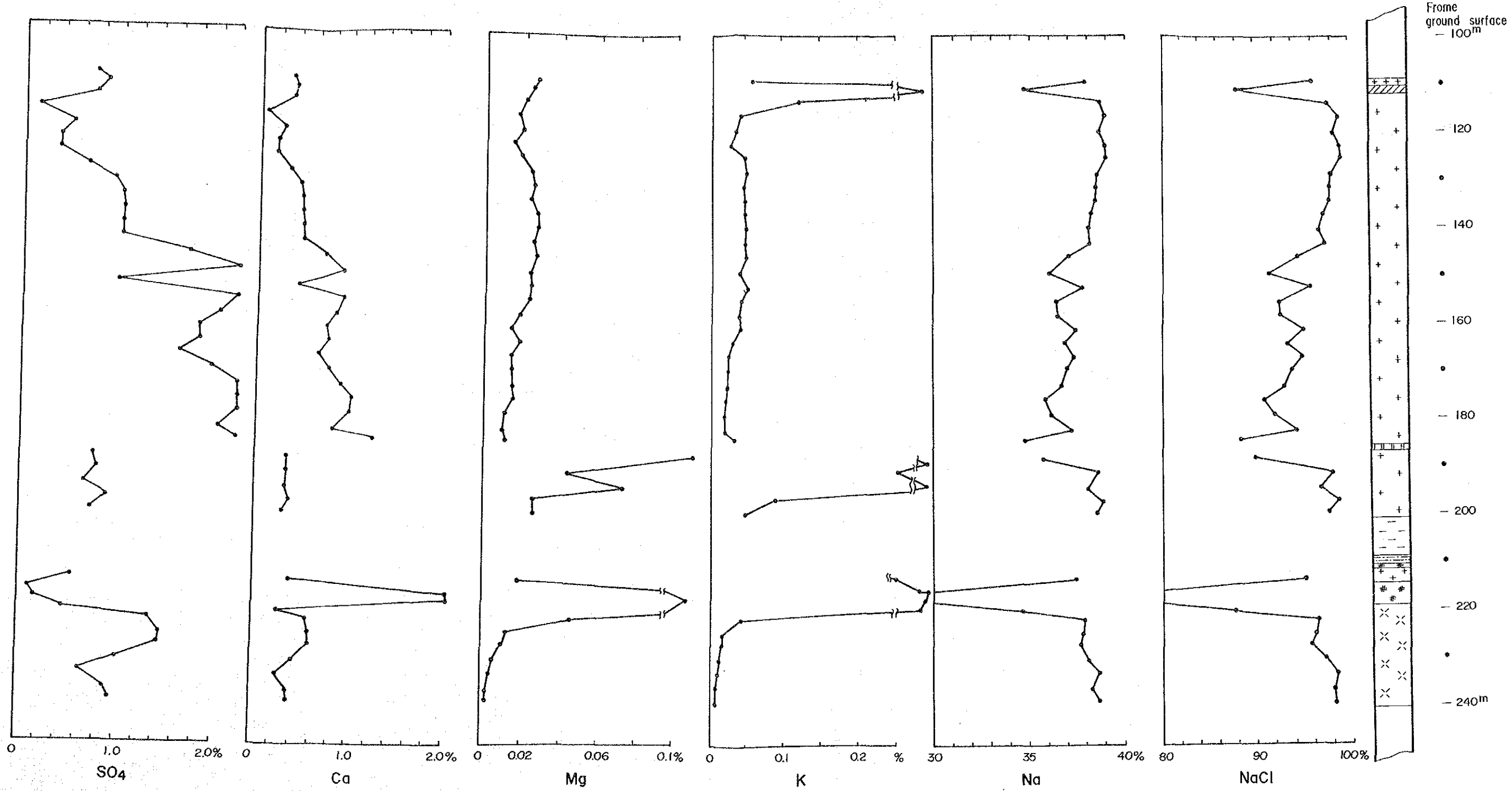
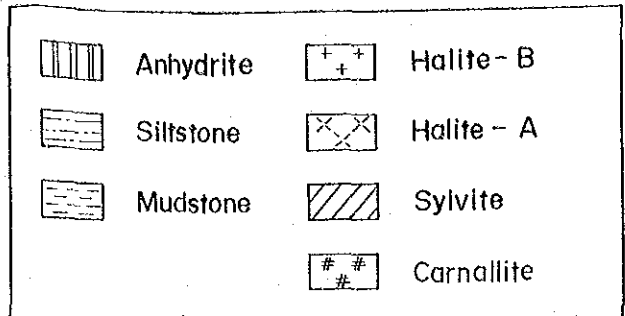


Fig.4-6 (a) Vertical variation of main components of rock salt in the drill hole RS.18

Legend



salt in the drill hole RS.18

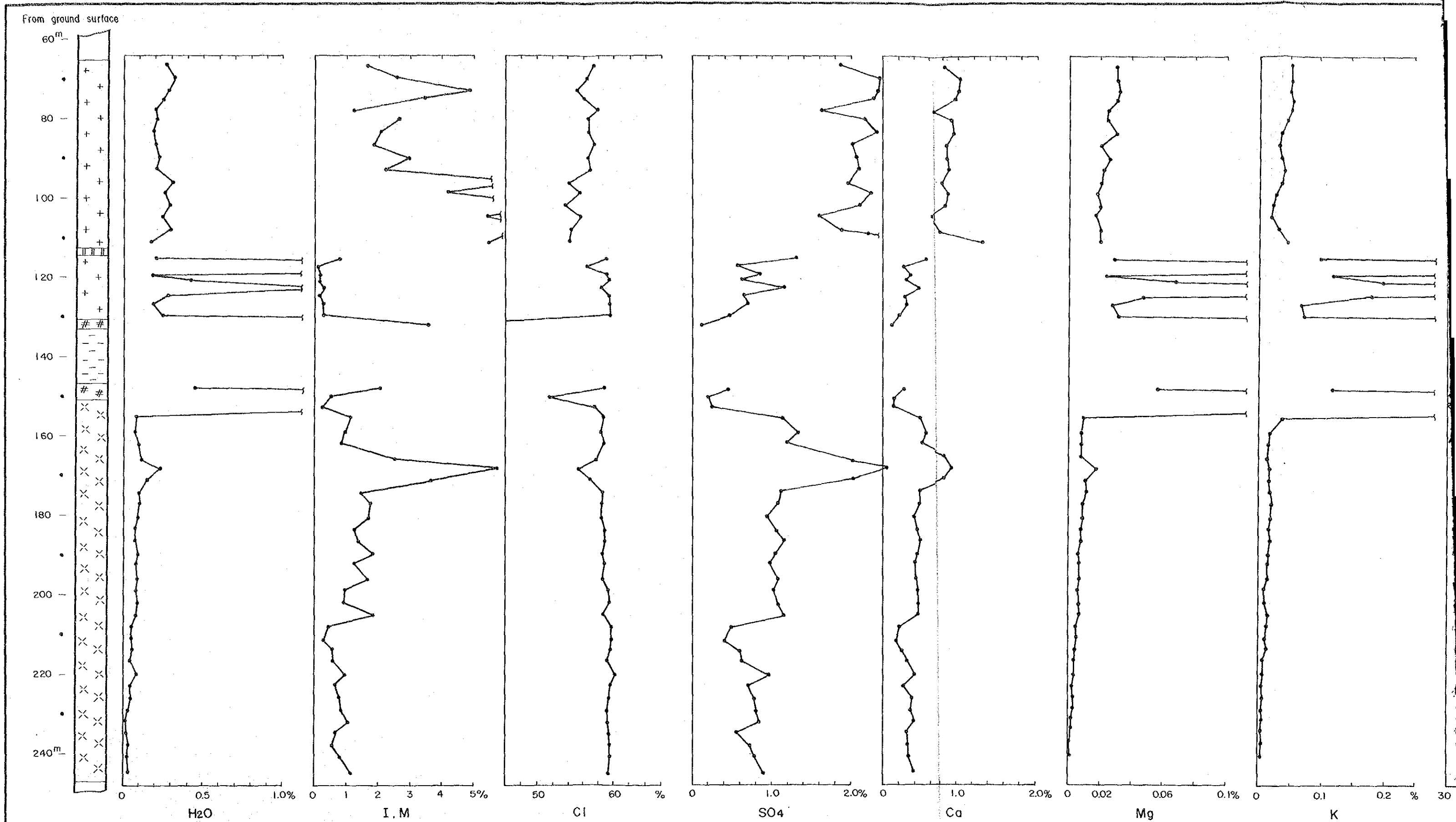
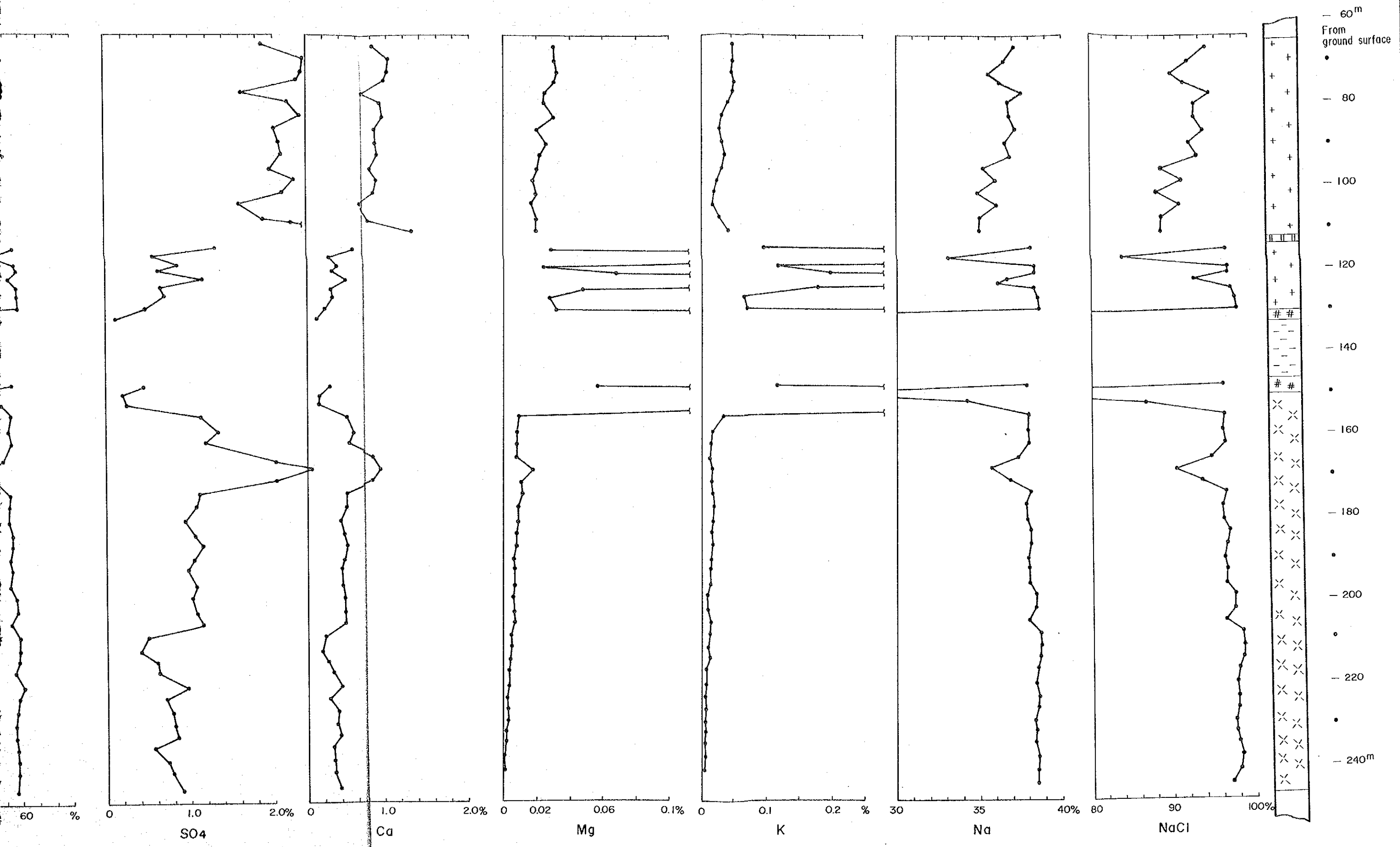


Fig.4-6(b) Vertical variation of main components of rock salt in the drill hole RS.19

For legend, see Fig. 4-6 (a).



rock salt in the drill hole RS.19

From ground surface

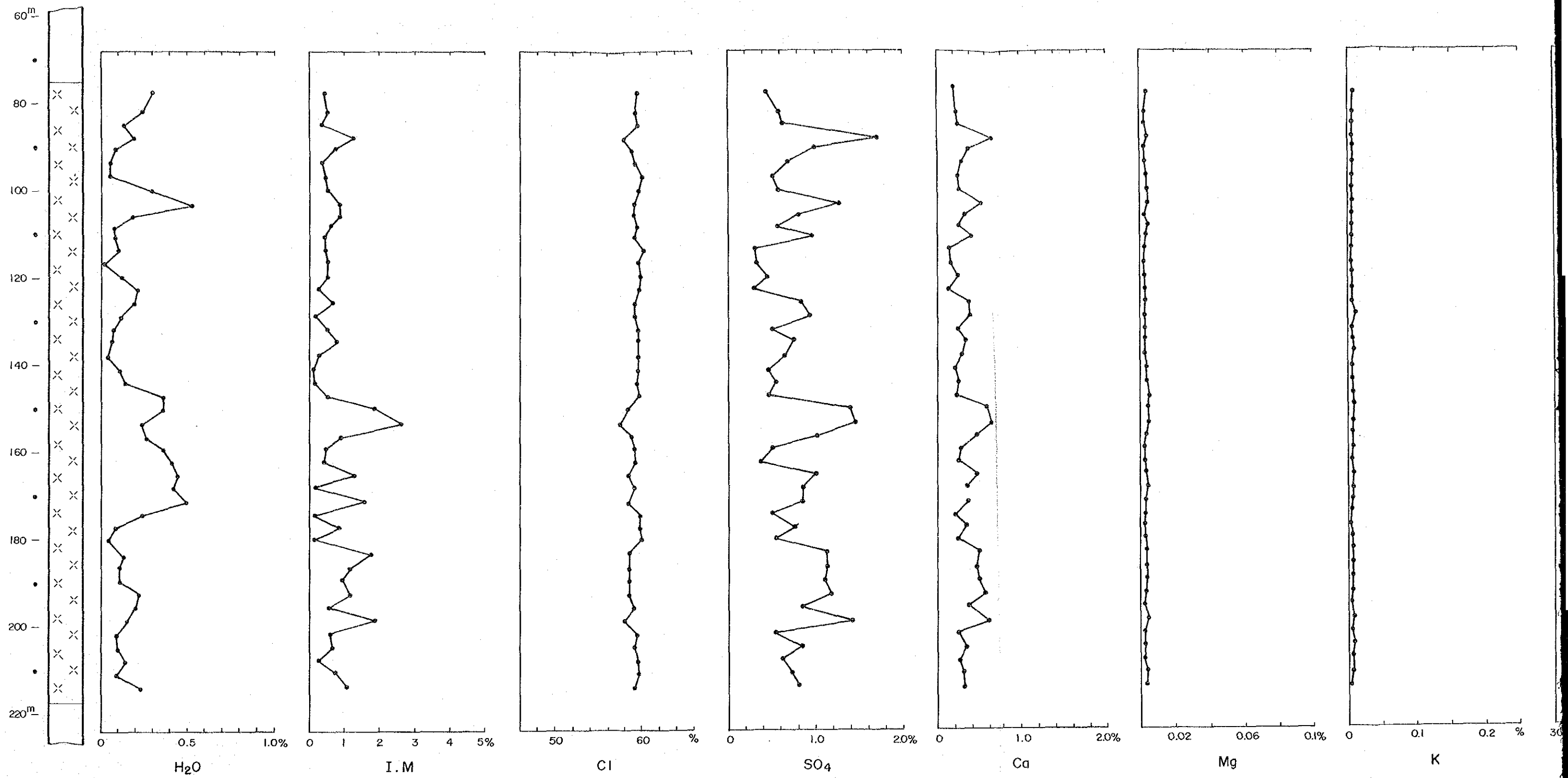
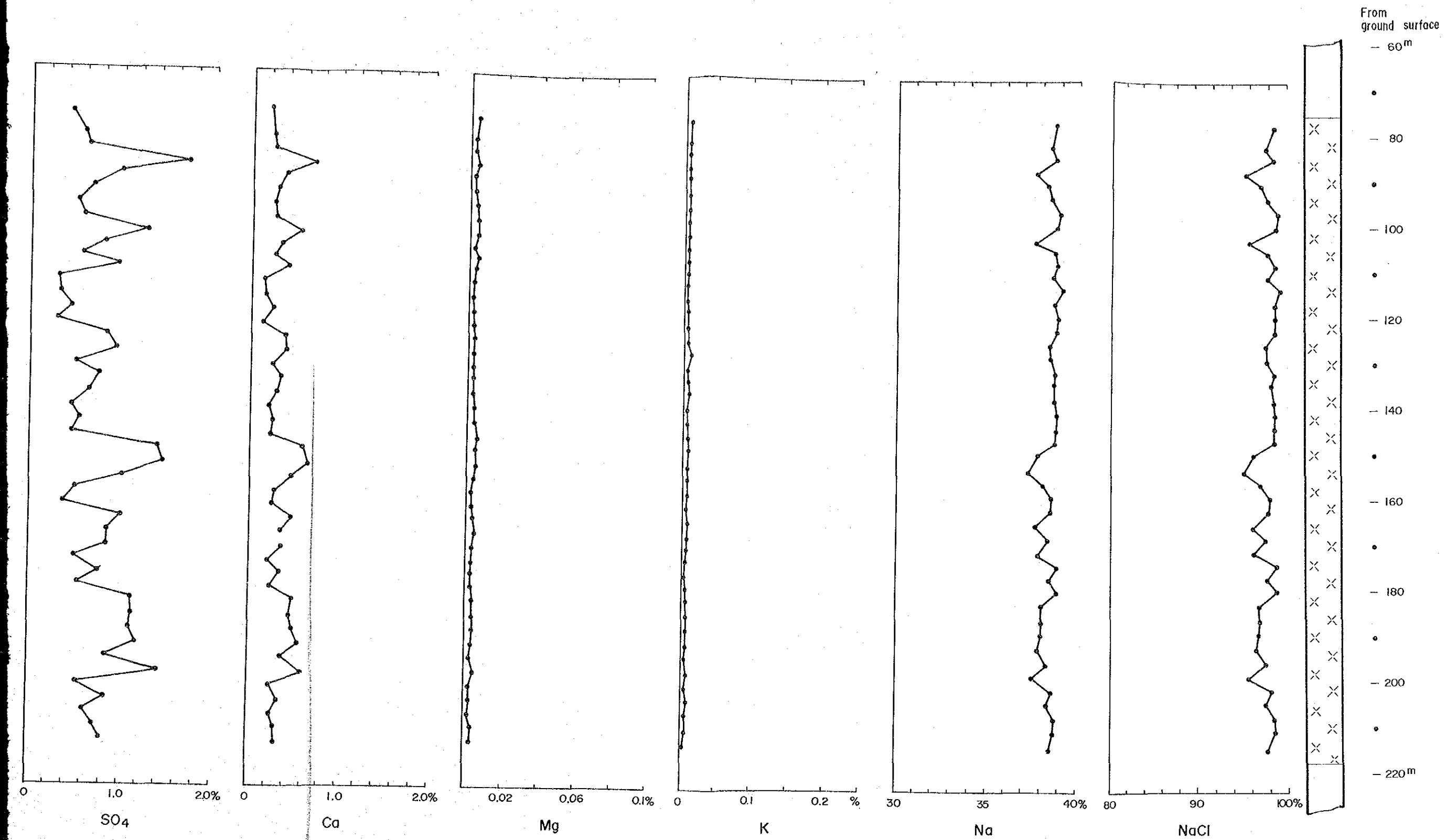


Fig. 4-6 (c) Vertical variation of main components of rock salt in the drill hole RS.20

For legend, see Fig.4-6 (a).



in the drill hole RS.20

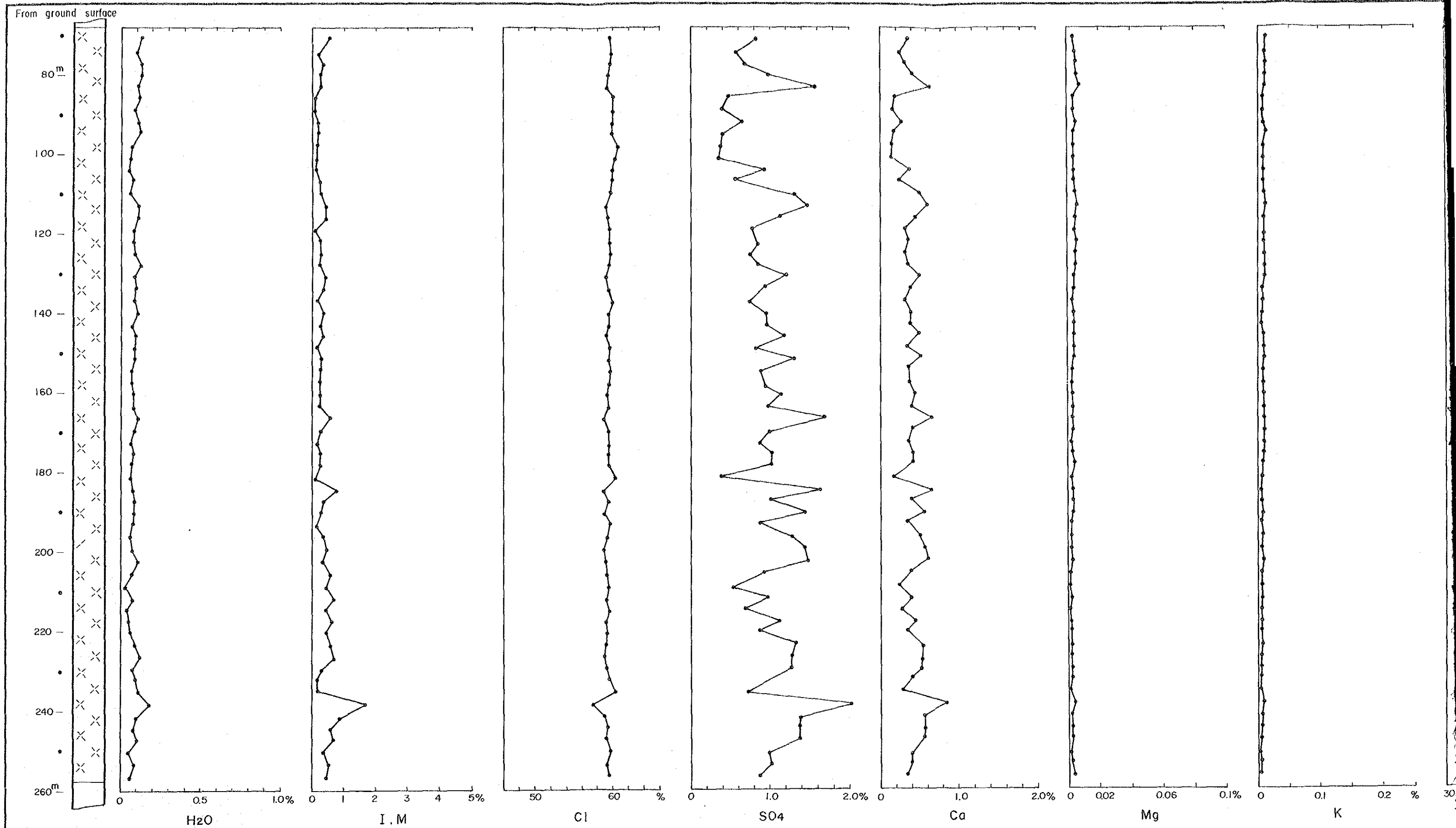
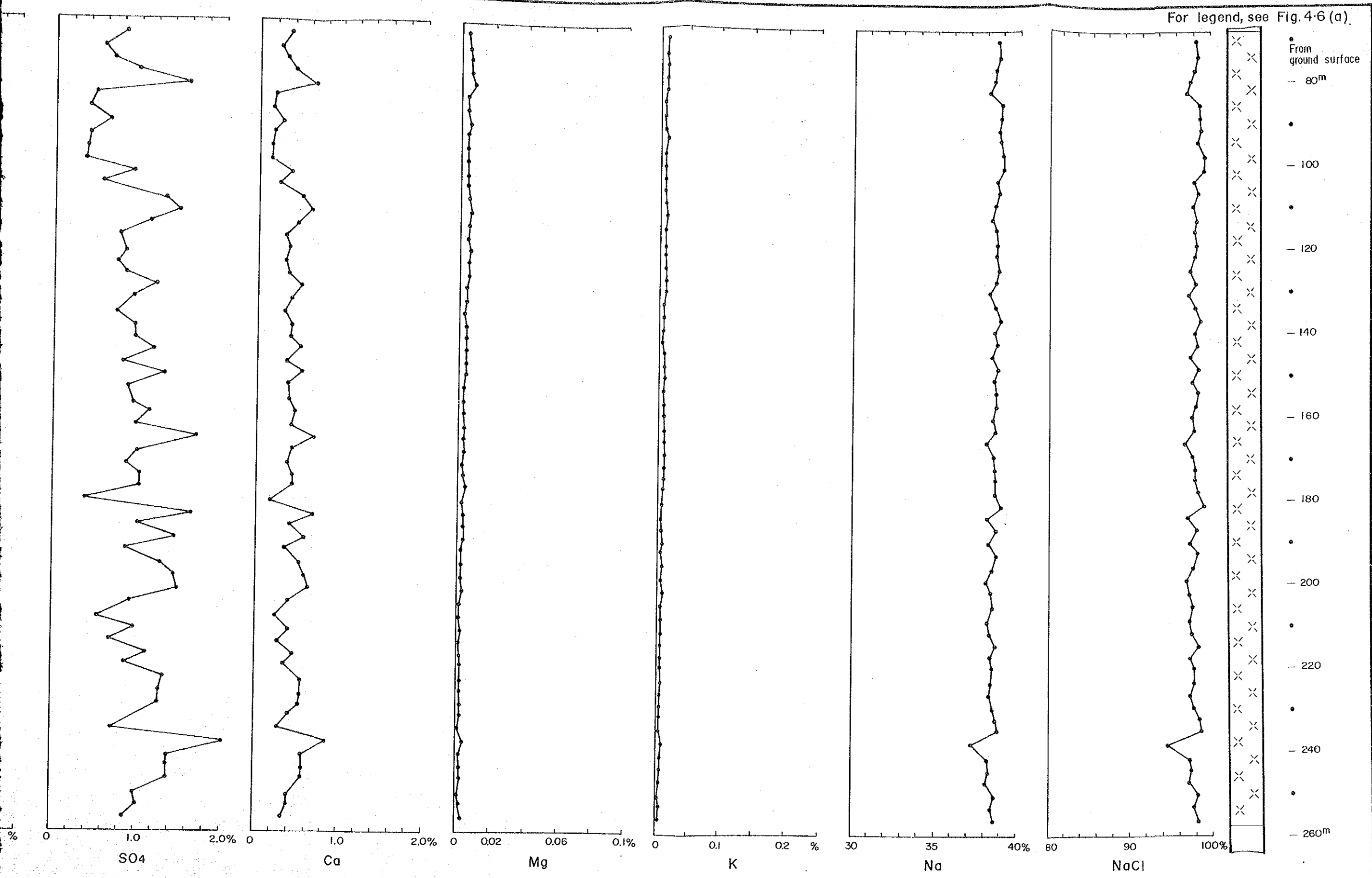


Fig.4.6 (d) Vertical variation of main components of rock salt in the drill hole RS.21



salt in the drill hole RS.21

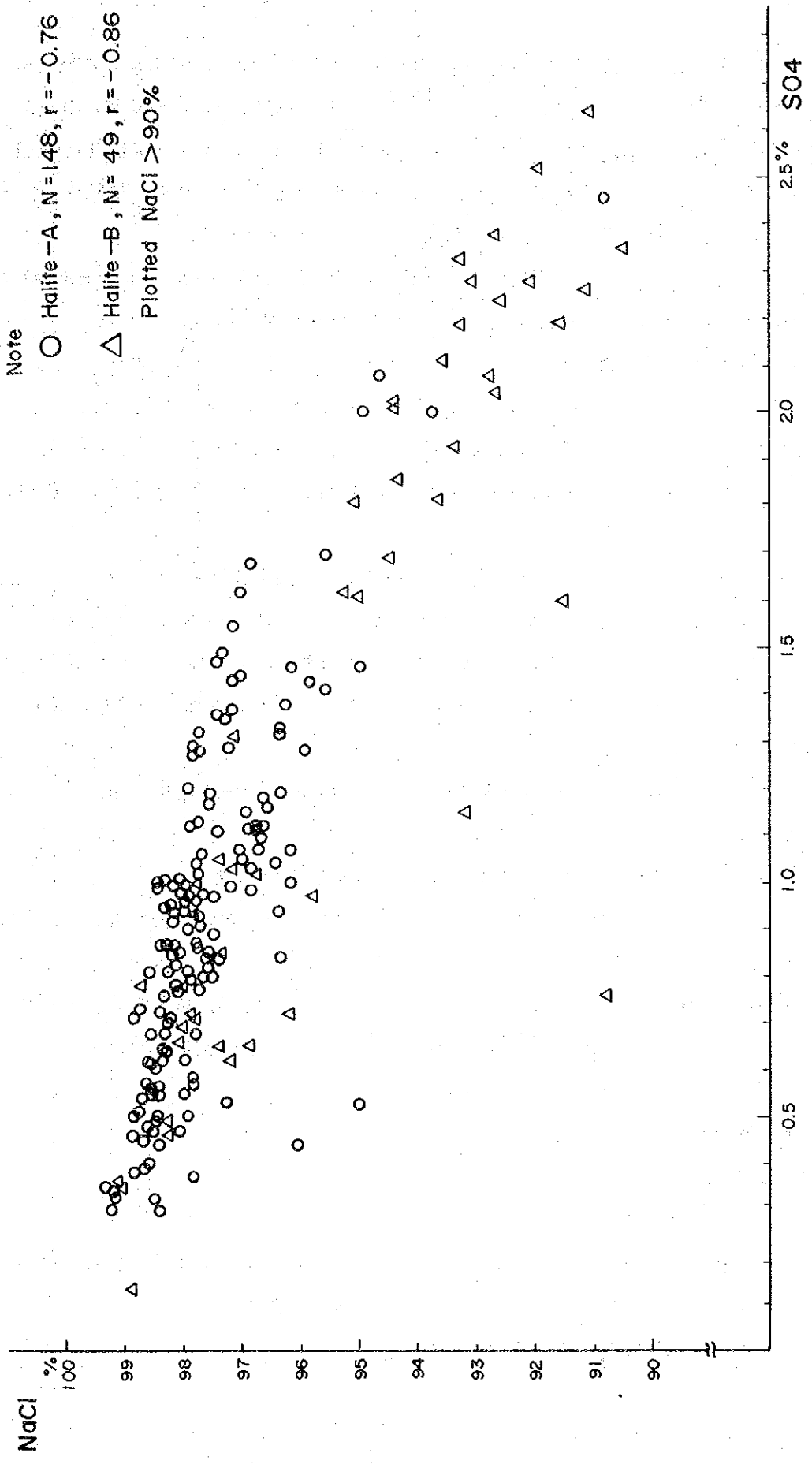


Fig.4-7 Relation between NaCl content and SO4 content in the drill hole samples
(RS.2.18, RS.2.19, RS.2.20, RS.2.21)

カリは、2.18孔ではHalite-Aの頂部、Halite-Bの下位側の厚さ1m弱の硬石膏の直下、Halite-Bの頂部の3レベルに賦存している。2.19孔ではHalite-Aの頂部、Halite-Bの下位側の厚さ1m弱の硬石膏の下の2レベルに賦存している。2.19孔ではHalite-Bの頂部にカリは賦存しないが、これはおそらく、試錐作業時の溶失か、または浸蝕作用によって溶失したもので、一次的にはカリは賦存していたものと推定される。

これらのカリを含有する2.18孔、2.19孔の岩塩はFig.4.8(a)(b)の垂直変化図にみられる通り、Halite-Aでは1回、Halite-Bでは下位側の硬石膏を境にして2回、合計3サイクルのカリおよびBrの規則的变化がみられる。すなわち2.18孔、2.19孔においてはHalite-AおよびHalite-Bの両岩塩層とも、いわゆる「Br漸増型岩塩層」に属している。

カリの賦存しない、2.20孔、2.21孔はHalite-Aのみよりなるものであるが、岩塩層中のBr含有値は、Fig.4.8(c)(d)の通り変化がない。いわゆる「Br不変型岩塩層」に属している。

以上のように、カリの賦存する岩塩は「Br漸増型岩塩層」に属しており、また、Halite-AはD-areaに賦存するもの(2.18孔、2.19孔)と、S-areaに賦存するもの(2.20孔、2.21孔)ではBrの分布状態は異なっている。前者は、いわゆる「Br漸増型岩塩層」であり、後者は、いわゆる「Br不変型岩塩層」である。すなわち両者は同じHalite-Aであっても岩塩堆積環境が異なっていたことを示している。

なお、以上述べたBrとKの垂直分布関係は、今後の他のコラート高原地域における岩塩およびカリ探鉱に充分活用できるものである。

(5) DMR(タイ国工業省鉱山局)分析値とJICA分析値との比較

既にタイ国DMRで化学分析を実施した試料50ヶについて化学分析を実施した(Appx.4)。これらのうちNaCl、SO₄、Mgの分析結果について比較を行った結果をFig.4.9に示した。これによるとNaClではそれ程の差はみられないが、SO₄、Mgでは若干の差がみられる。

なお、DMR側とJICA側で分析用に用いた試料は完全な同一試料ではない。

4.3 硬石膏の賦存状況

(1) 分布および形状

硬石膏の分布、形状は次の通りである。

- 岩塩の堆積サイクルにおいて、岩塩の堆積に先行して基底部に層状に堆積しているもの
- 岩塩層中にバンド、斑点状、不規則状に賦存しているもの
- 岩塩層中に微細に含有しているもの

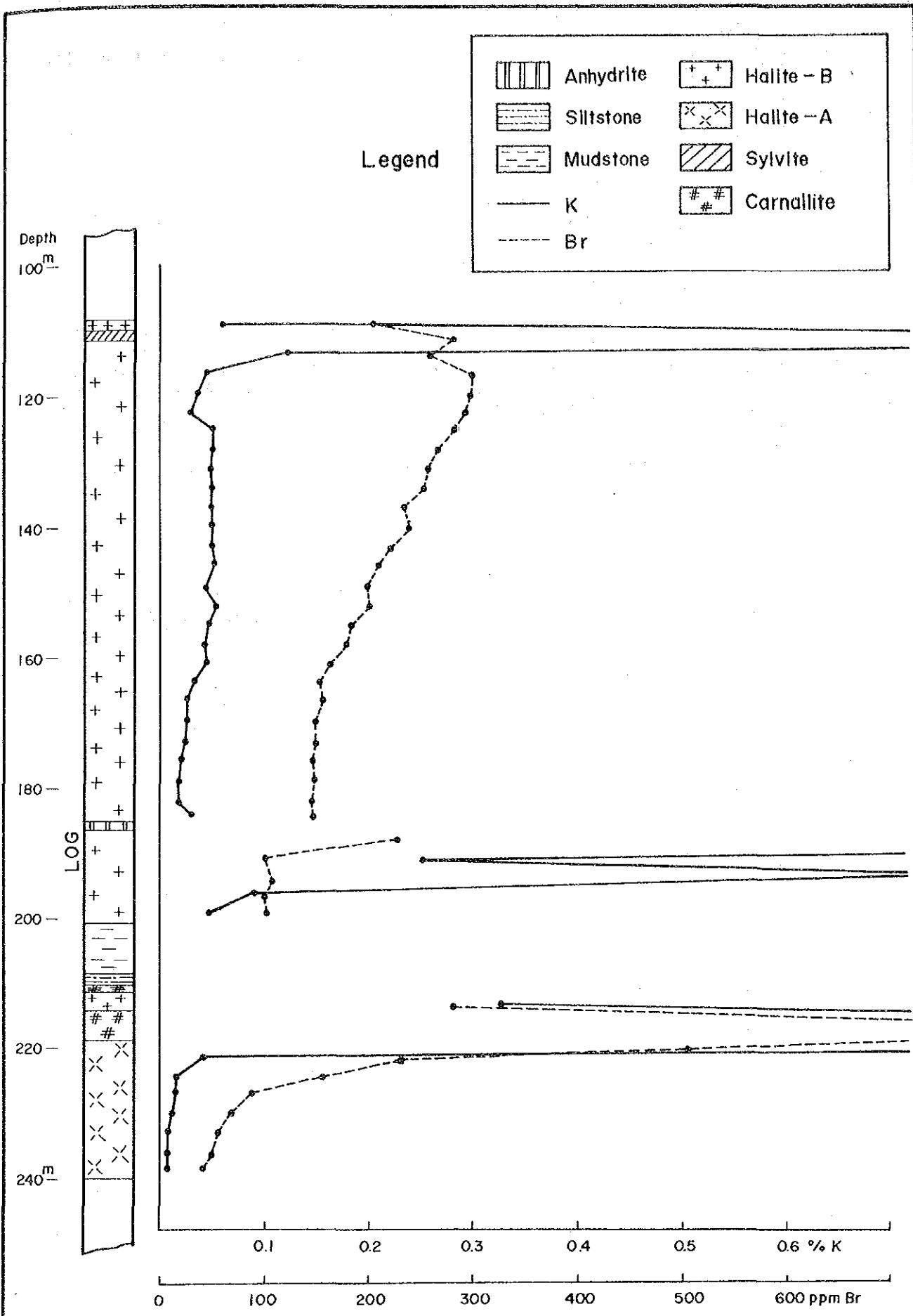


Fig.4-8 (a) Bromine and potassium distribution through halite of drill hole RS.2.18

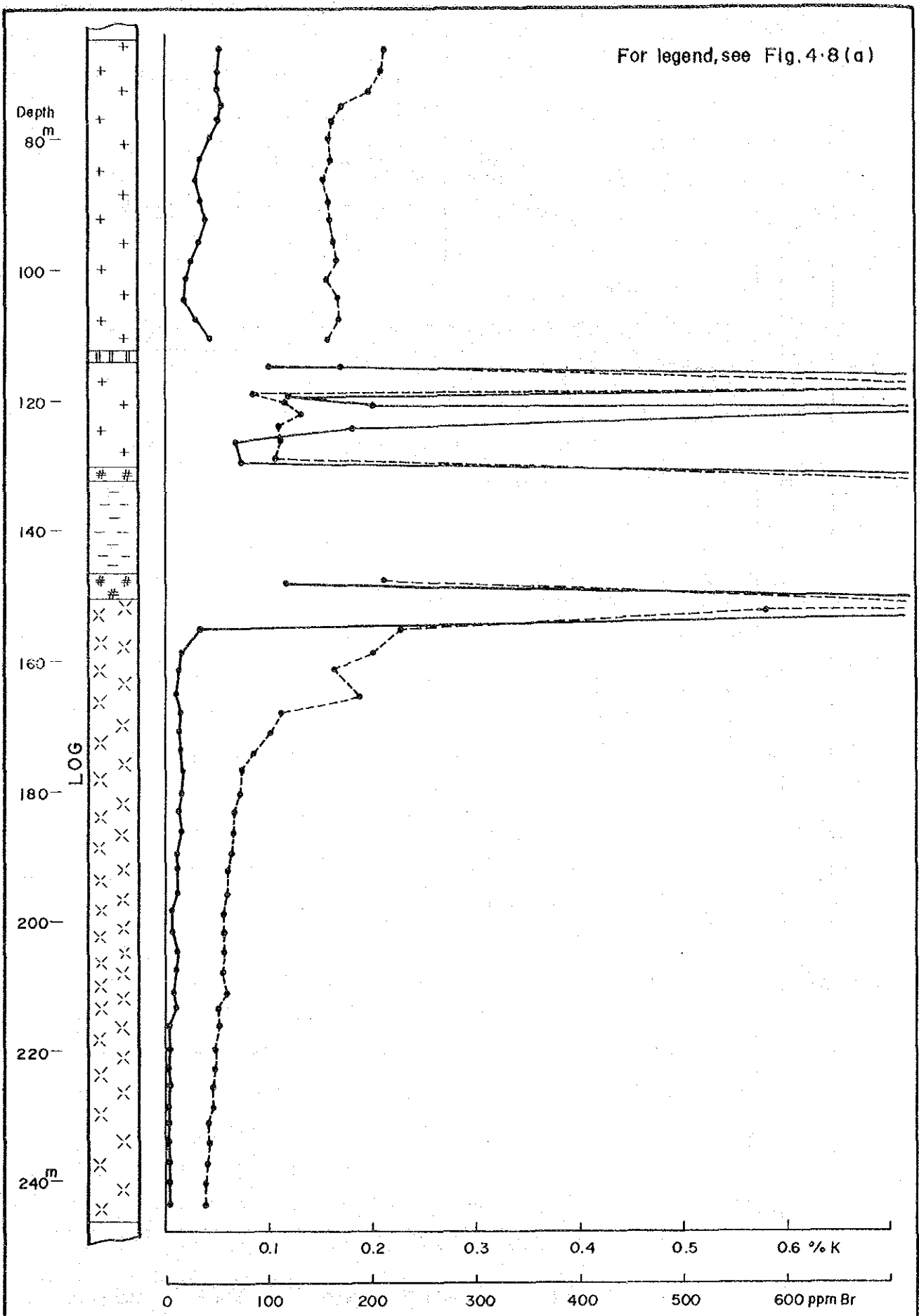


Fig. 4-8(b) Bromine and potassium distribution through halite of drill hole RS. 2. 19

For legend, see Fig. 4-8(a)

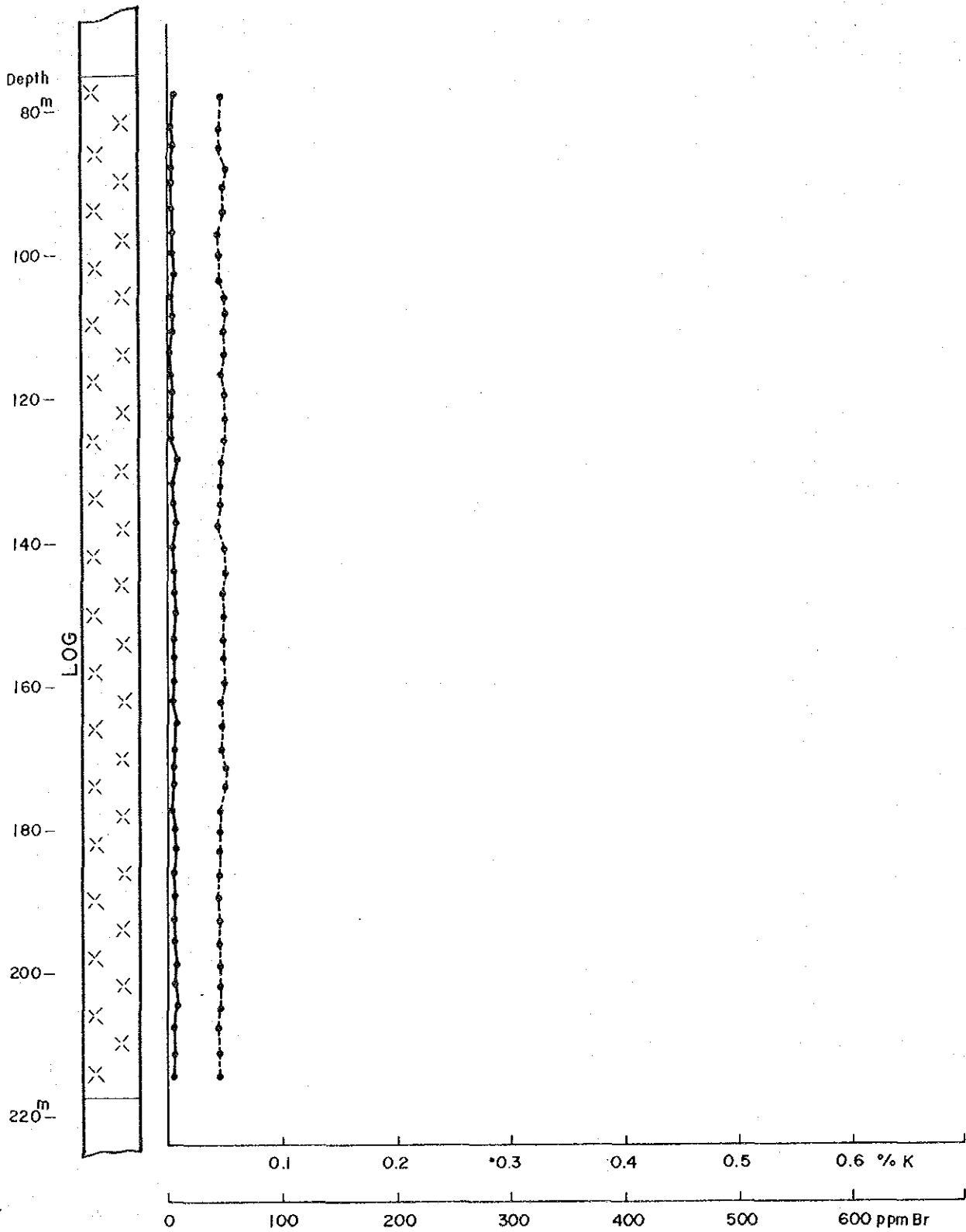


Fig.4-8(c) Bromine and potassium distribution through halite of drill hole RS.2.20

For legend, see Fig. 4-8 (a)

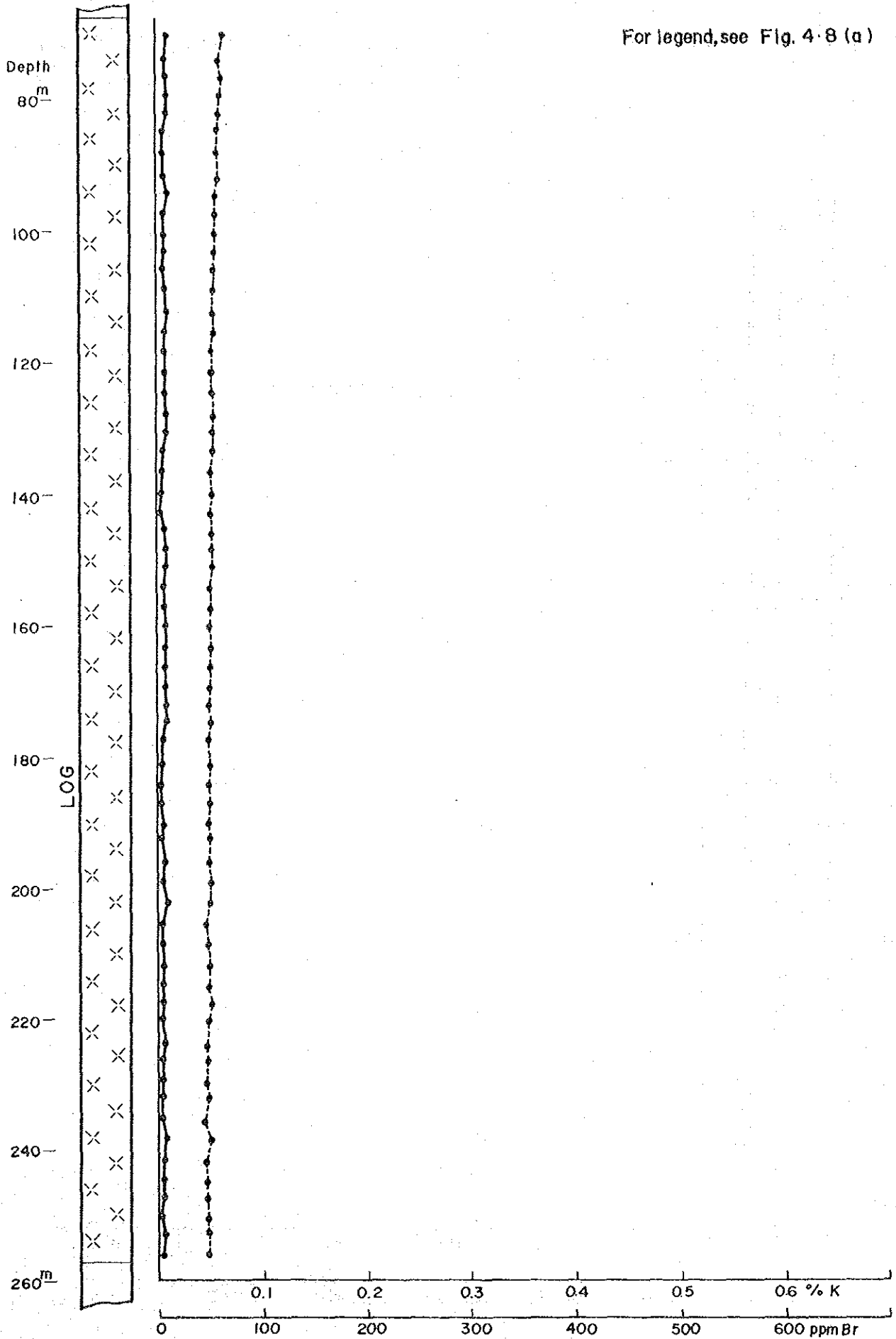


Fig.4-8(d) Bromine and potassium distribution through halite of drill hole RS.2.21

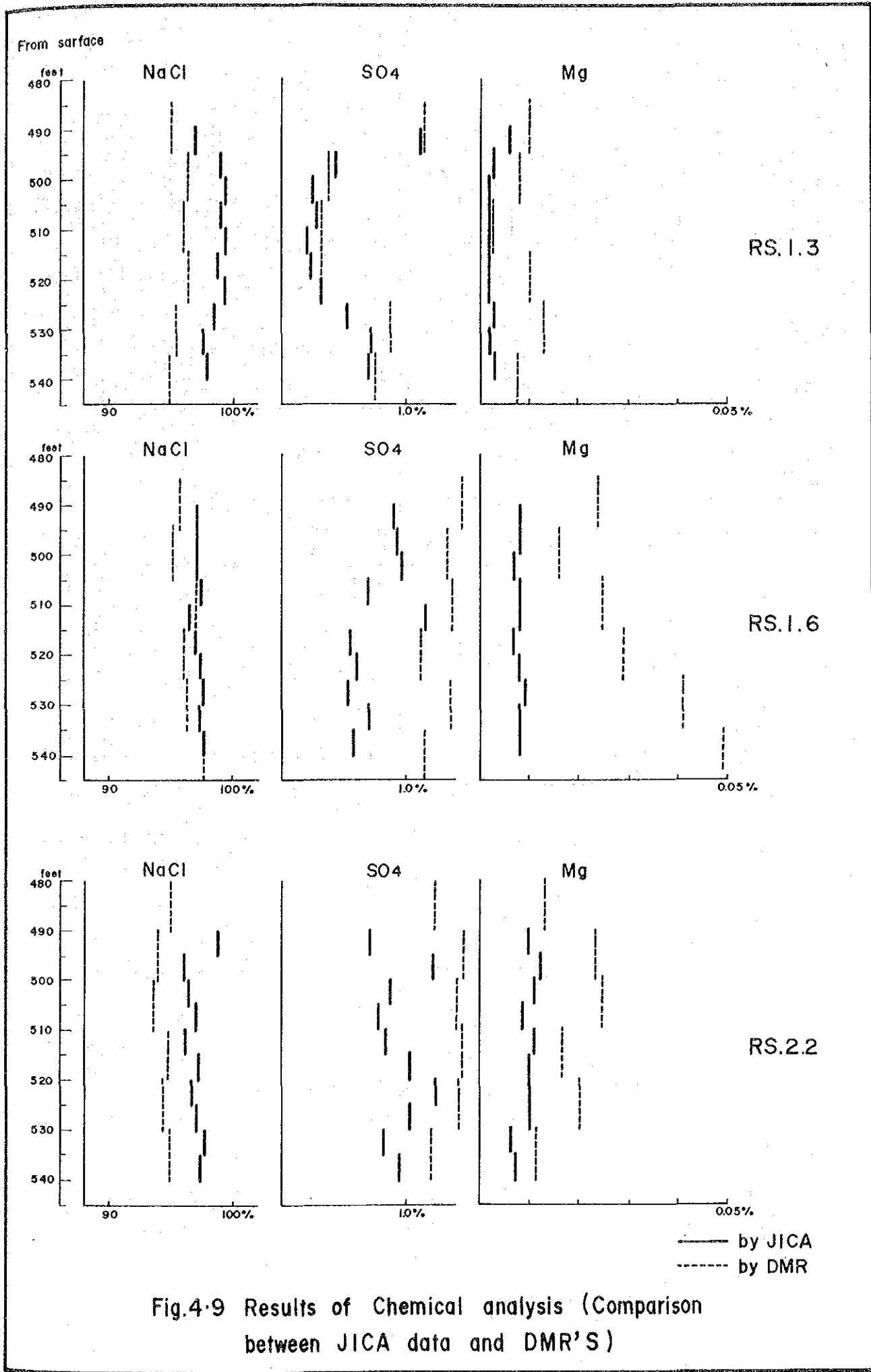
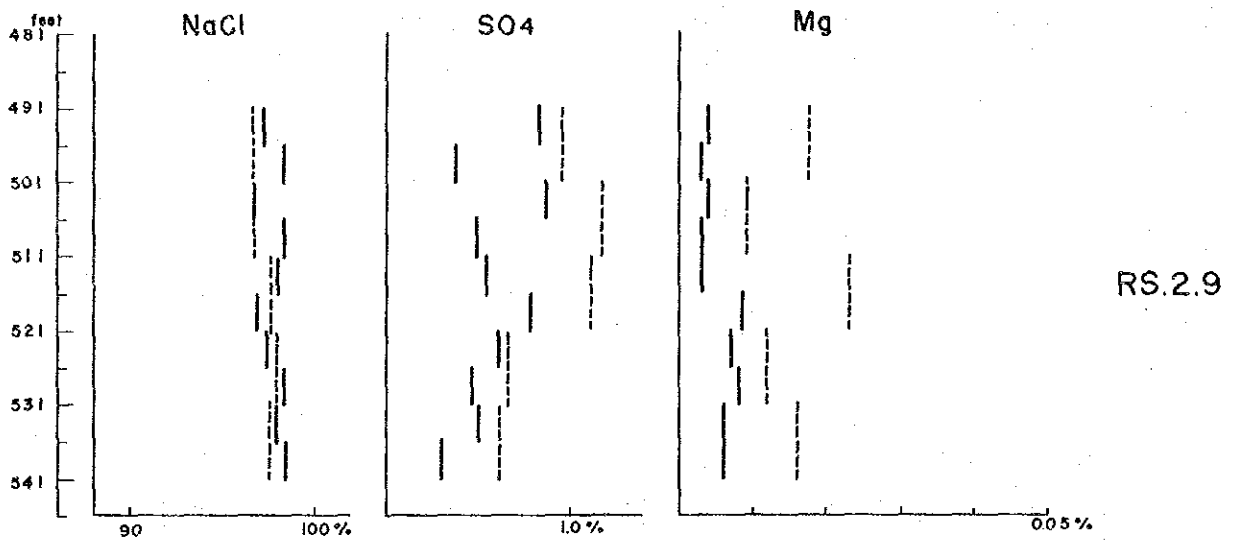
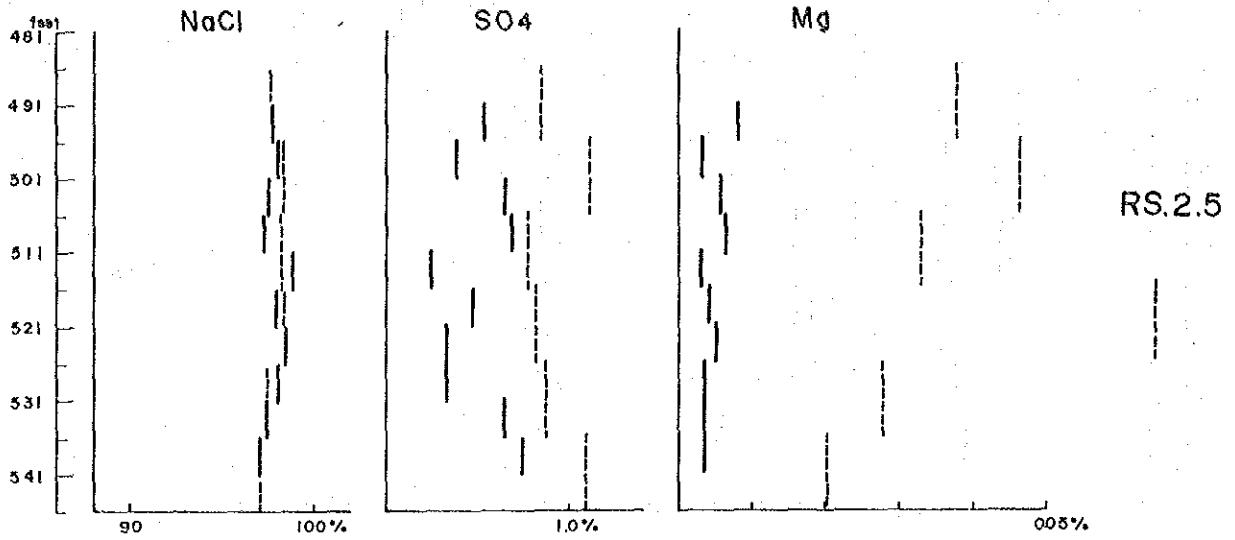


Fig.4-9 Results of Chemical analysis (Comparison between JICA data and DMR'S)

From surface



— by JICA
- - - by DMR

Fig. 4.9 (continued)

などがあるが、これらのうち(a), (b)は肉眼で明瞭に観察することができる。(Fig. 4.10)

しかし、(c)は肉眼的には観察され得ない微細な硬石膏を含んでいる場合がある。肉眼的には高純度岩塩と思われるものでも化学分析によっては SO_4 含有量が高いものがみられる。このようなものについてX線回折および顕微鏡観察を行い硬石膏の含有の確認および含有状態、サイズなどの検討を行った。

(2) X線回折

試料は試錐岩芯のうちから肉眼的には白色透明でやや脂感を持つ 比較的NaCl品位の高い岩塩(試料20-18, R.S. 2.20孔, 深度126.80m~129.85m), それに周辺に硬石膏を含む薄茶色の岩塩(試料19-5, R.S. 2.19孔, 深度75.00m~78.00m)の2ヶを用いた。

これら2ヶの試料はX線回折の結果(Appx. 5)にみられるように、硬石膏を含有する岩塩であることが同定された。すなわち肉眼上では一見高純度岩塩でも微細な硬石膏を含有しているものが存在している。

(3) 顕微鏡観察

岩塩層中に含有する微細な硬石膏の形状、サイズを確認するために顕微鏡観察を行った。試料はX線回折に用いたものと同じ試料を用いた。この結果はFig. 4.11に示した通りであるが、硬石膏は微細結晶、微細斑点状、微細リボン状に入りこんでいる。硬石膏の単結晶のサイズでは0.05 μm 以下のものもみられ、岩塩層中にこのように微細に入りこんでいる硬石膏は物理的な方法では除去することは困難である。

4.4 不溶解残物

Bamnet-Narong岩塩は前節で述べた SO_4 の含有がやや高いこととともに、不溶解残物(I. M)が多いことが注目される。

不溶解残物の検量は日本専売公社の「塩務に関する分析方法」に則った分析法によって算出した値であり、「水に対する不溶解残渣(Water-insolubles)」である。

(1) X線回折

塩主成分の化学分析を行った試料から5ヶを抽出して、これらの不溶解残物の鉱物組織を同定するためX線回折を行った。(Appx. 6)

これらをまとめるとTable 4.3のようになる。

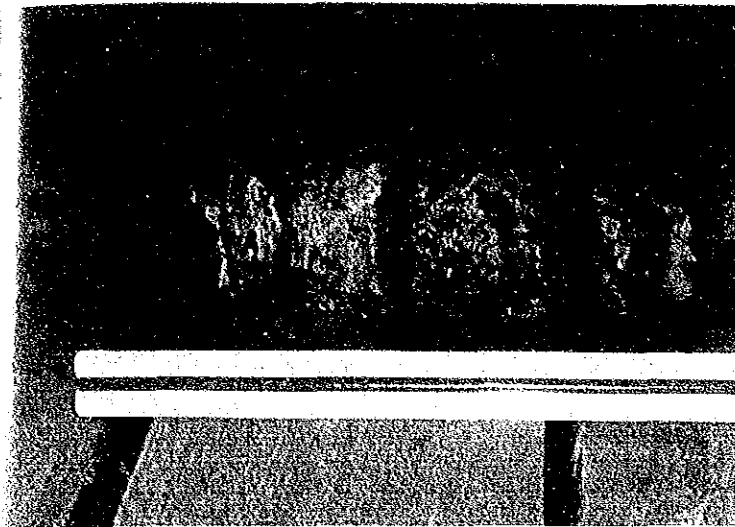
すなわち、不溶解残物中の鉱物としては普へん的に硬石膏が含まれており、その他にドロマイ、マグネサイト、石英、長石、雲母、緑泥石、モンモリロナイトが含まれている。

Table 4.3 X-Ray Diffraction Analysis of Water-insolubles

Sample	Locality	I.M	X-ray diffraction of I.M										
			A	Ms	D	Q	F	Mc	C	M			
18-14	RS. 2. 18: 147.00 m - 150.00 m	5.29%	++		-								
18-31	RS. 2. 18: 197.96 m - 200.28 m	0.41%	+	+	-	?	-	-	+				-
19-3	RS. 2. 19: 70.35 m - 72.38 m	4.88%	++		-	++							
19-11	RS. 2. 19: 93.30 m - 96.35 m	7.04%	++		+	?							
20-4	RS. 2. 20: 86.00 m - 89.00 m	1.22%	++		+	?							

++ : Abundant
 + : Medial
 - : A little

I.M : I.M % of original samples
 A : Anhydrite
 Ms : Magnesite
 D : Dolomite
 Q : Quartz
 F : Feldspar
 Mc : Mica
 C : Chlorite
 M : Montmorillonite



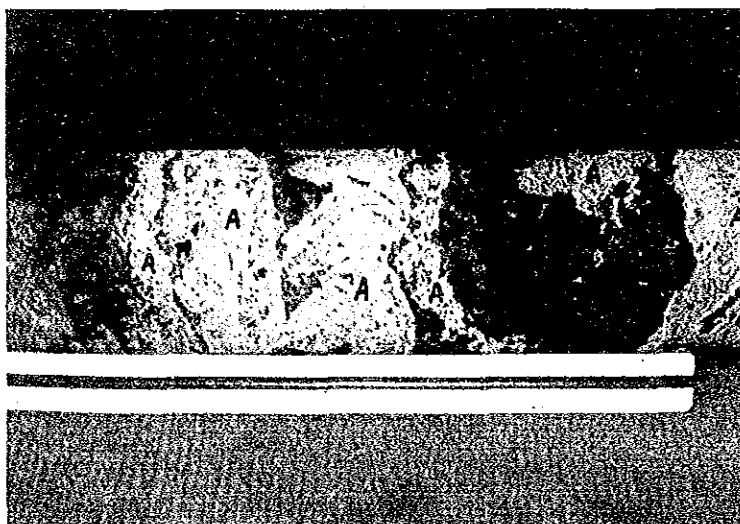
Typical contact between halite bed and underlying anhydrite (Drill core RS. 20.18, 185m in depth)

H: halite
A: anhydrite



Anhydrite layer in halite bed (Drill core RS. 20.18, 176m in depth)

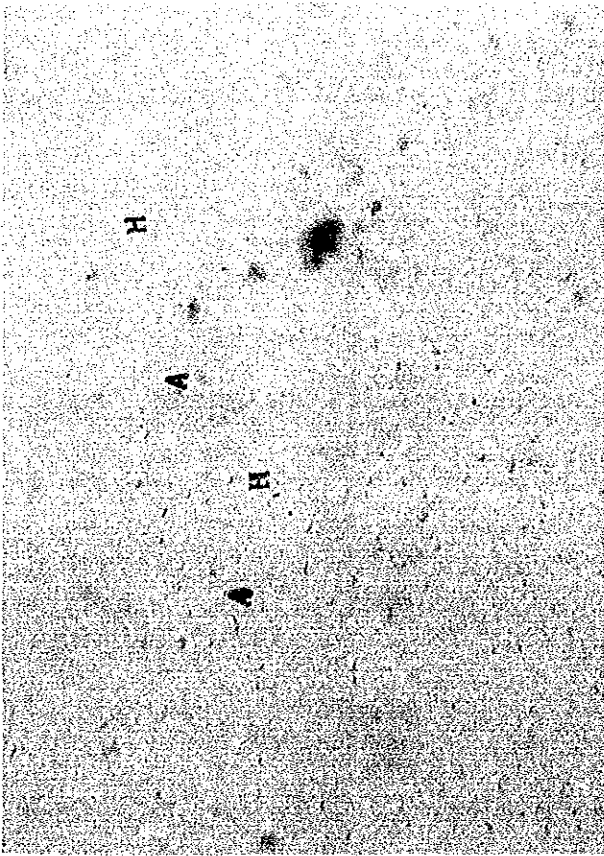
H: halite
A: anhydrite



Nodular anhydrite in halite bed (Drill core RS.20.19, 112.10m in depth)

H: halite
A: anhydrite

Fig. 4.10 Photographs showing anhydrite in rock salt



Open nicol



Crossed nicols

0 0.5mm

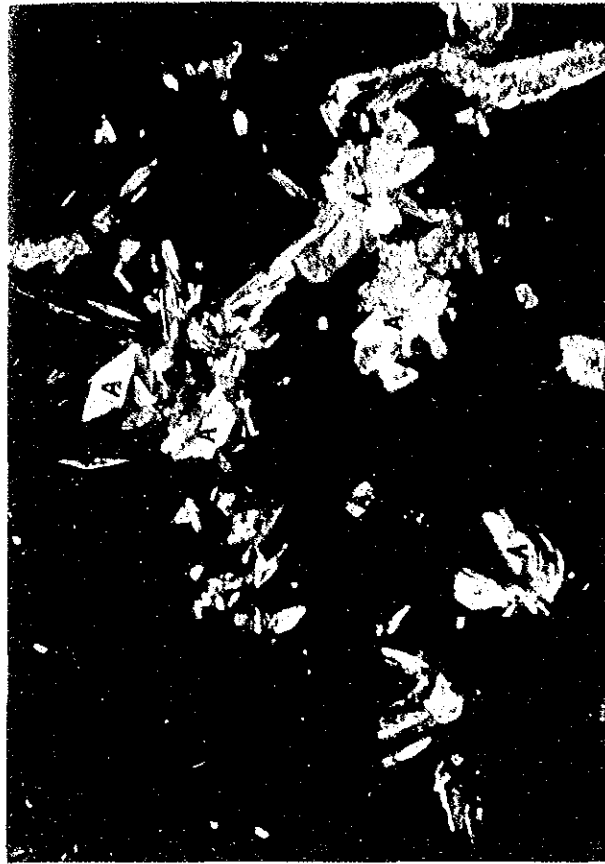
H: halite A: anhydrite

(Drill core RS. 2.18, 230m in depth)

Fig. 4.11 Photomicrographs of anhydrite in thin sections



Open nicol



Crossed nicols

0 0.5mm

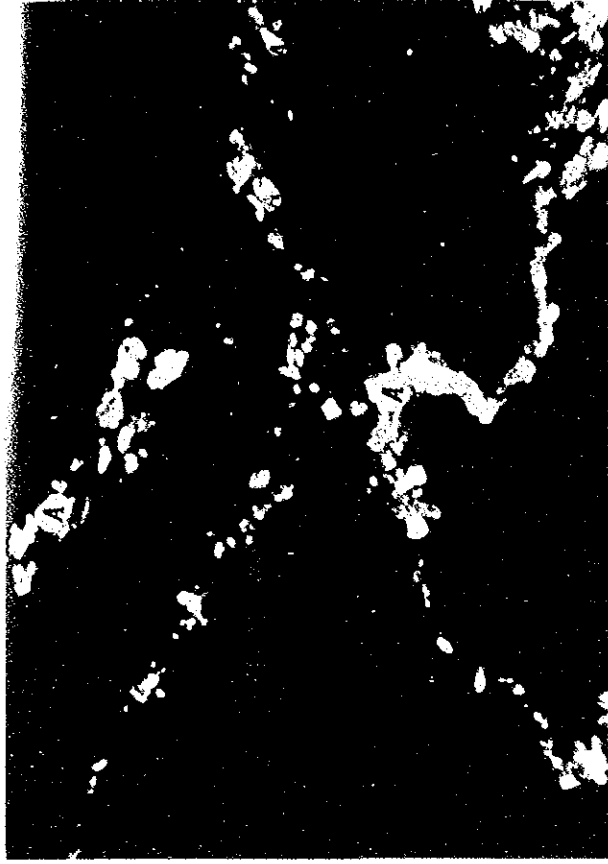
H: halite A: anhydrite

(Drill core RS. 2.19, 75m in depth)

Fig. 4.11 Photomicrographs of anhydrite in thin sections (cont'd)



Open nicol



Crossed nicols

0 0.5mm

H: halite A: anhydrite

(Drill core RS. 2.20, 126m in depth)

Fig. 4.11 Photomicrographs of anhydrite in thin sections (cont'd)

硬石膏、ドロマイト、マグネサイトは岩塩生成時に同時に海水中より晶出した、いわゆる内成的な鉱物であり、また石英、長石、雲母、緑泥石、モンモリロナイトは岩塩堆積盆地外の陸上からの外来鉱物である。

天日塩が人工的製塩であるのに対して岩塩は全くの天然産物であり、しかも地質時代に永年に亘って天日塩とは本質的に異なった環境で生成されたものである。従って、上記のいわゆる、内成鉱物や外来鉱物を混入することは当然なことである。

4.5 平均含有成分

すでに述べてきたように Bamnet-Narong 岩塩鉱床は、地質構造、含有成分から Halite-A と Halite-B に区分され、さらに、Halite-A は含有成分の分布状態、岩塩賦存形態から、D-area のものと S-area のものに区分される。

本節においては、上記の岩塩層区分に対応した塩主成分の平均値について述べる。

(1) 塩主成分の平均値

追加試錐 4 本より採取した試料のうち NaCl 90% 以上の 197 ヶについて、各岩塩層に対応した平均値を Table 4.4 および Fig. 4.12 にまとめた。

この表であきらかなように、S-area の Halite-A は Halite-B および D-area の Halite-A にくらべて品質的に優れている。また、世界各地にみられる岩塩層の品質に比較しても劣るものではない。他の岩塩鉱床の平均品位の一例を Table 4.5 に示した。

(2) 日本輸入塩との比較

Bamnet-Narong 岩塩鉱床の操業時における生産品位は、試錐によって得られた平均品位と必ずしも合致するわけではなく、採掘方法、採掘レベル、採掘量などによって規制されるものである。

試案として、前節で求めた、S-area の Halite-A の平均含有値を最近の日本輸入塩(天日塩)と比較したものを Fig. 4.13 に示した。

これによると、S-area の Halite-A は日本輸入塩にくらべて、NaCl, I.M, Ca, SO₄ は高く、K, Mg は低い。とくに I.M, SO₄, Ca が高いことが注目される。SO₄, Ca の含有は 4.3 で述べたように岩塩中に硬石膏を含有しているためであり、また I.M が高いのは 4.4 で述べたように岩塩堆積時に同時生成された、いわゆる、内成的な鉱物と外来鉱物の影響によるものである。このように、岩塩が半人工的に生成された天日塩とくらべて、SO₄, Ca, I.M が高いのは普遍的なことであり、かつ、宿命的なものである。

Table 4.4 Calculation Result of the Mean Contents of Chemical Components of Rock Salt from Additional Drilling Cores at Bamnet-Narong

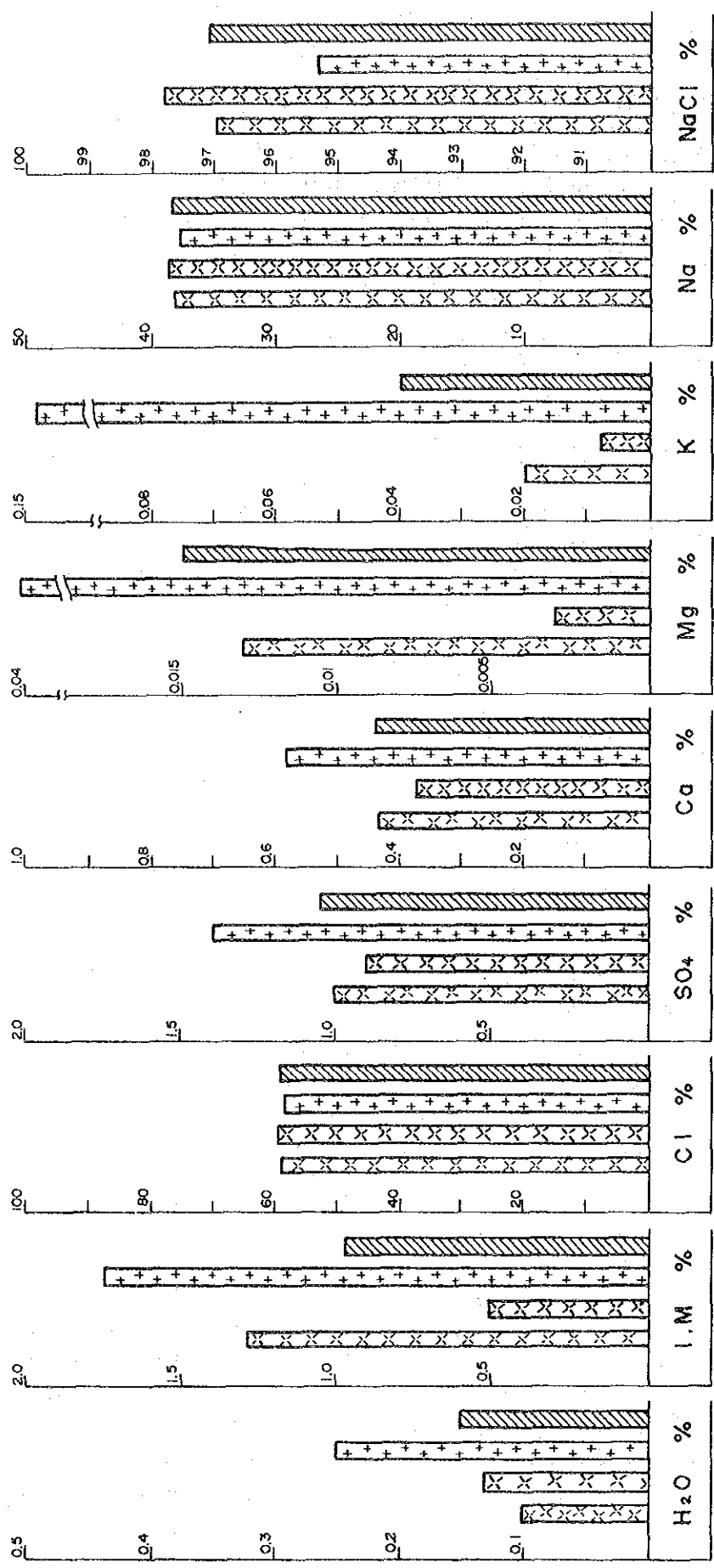
		Halite-A			Halite-B	Total
		D-area	S-area	Sub Total		
H ₂ O	N	39	109	148	49	197
	\bar{X} (%)	0.10	0.10	0.12	0.25	0.15
	σ	0.14	0.09		0.24	
LM (water-insolubles)	N	39	109	148	49	197
	\bar{X} (%)	1.29	0.51	0.71	1.76	0.97
	σ	0.97	0.43		1.66	
Cl	N	39	109	148	49	197
	\bar{X} (%)	58.88	59.40	59.26	58.05	58.96
	σ	0.84	0.52		1.57	
SO ₄	N	39	109	148	49	197
	\bar{X} (%)	1.01	0.90	0.93	1.40	1.05
	σ	0.43	0.36		0.72	
Ca	N	39	109	148	49	197
	\bar{X} (%)	0.43	0.37	0.39	0.58	0.44
	σ	0.16	0.14		0.28	
Mg	N	39	109	148	49	197
	\bar{X} (%)	0.013	0.003	0.006	0.042	0.015
	σ	0.029	0.001		0.087	
K	N	39	109	148	49	197
	\bar{X} (%)	0.020	0.007	0.010	0.140	0.040
	σ	0.053	0.001		0.363	
Na	N	39	109	148	49	197
	\bar{X} (%)	38.13	38.50	38.40	37.47	38.17
	σ	0.57	0.34		1.02	
NaCl	N	39	109	148	49	197
	\bar{X} (%)	96.92	97.86	97.61	95.24	97.02
	σ	1.45	0.85		2.58	

N: Number of analysis \bar{X} (%): Mean σ : Standard deviation (Calculated for sampels with NaCl > 90%)

Table 4.5 Average Chemical Composition of Salt Rocks of the Dead Sea Group (w%)

Number of analyses	Water soluble salts								Insoluble residue
	Na	K	Mg	Ca	Cl	Br	SO ₄	Total	
23	21.6	0.05	0.12	0.53	33.3	0.0160	0.8	56.4	-
7	12.9	0.13	0.17	0.59	21.8	0.0075	0.7	36.3	-
16	37.7	0.03	0.02	0.18	58.6	0.0113	0.2	96.7	2.75
6	37.1	0.01	0.06	0.37	58.4	0.0159	1.0	97.0	1.08
5	37.3	0.02	0.03	0.71	57.8	0.0110	1.7	97.6	2.37
115	36.6	0.57	0.10	0.62	56.6	0.0142	1.4	95.9	2.66
9	36.4	-	-	-	56.1	0.0112	-	92.5	3.28
19	36.4	0.02	0.02	0.47	56.3	0.0052	1.3	94.5	3.46
2	36.5	0.32	0.11	0.35	59.2	0.0100	0.2	96.7	-
101	37.6	0.16	0.07	0.52	57.9	0.0098	1.4	97.6	1.45

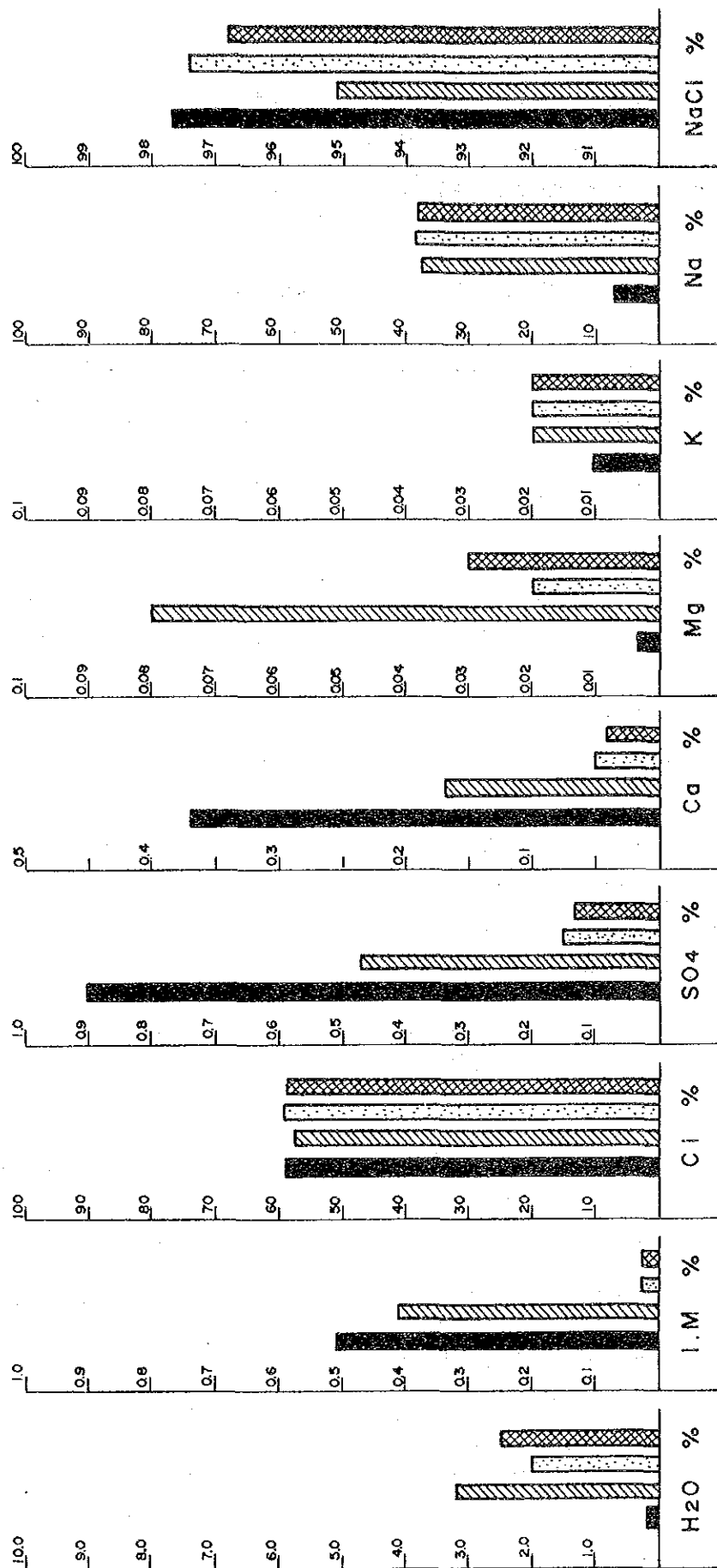
(Data of Israel Zak, 1973)



Halite - A in D - area,
 Halite - A in S - area,
 Halite - B,
 All Halite

Fig.4.12 Average contents of rock salt components of Bamnet - Narong

(Refer to calculation in Table 4.5)



mean contents of components of Halite - A in S - area, from additional drilling cores at Bamnet - Narong

note; CHINA, MEXICO and AUSTRALIA Solar Salt
 Bamnet - Narong Rock Salt

Fig. 4-13 Comparison of chemical components between Bamnet - Narong rock salt and Japan - imported salt .

4.6 圧縮強度と引張強度の特性

(1) 試錐孔別の差異

各試錐孔の圧縮強度、接線ヤング率、引張強度の平均値及び標準偏差を Table 4.6 に示す。

Table 4.6 Physical Properties by Drill Hole

Drill Hole No.	Compressive Strength (kg/cm ²)	Tangential Young's Modulus (x 10 ³ kg/cm ²)	Tensile Strength (kg/cm ²)	Brittleness Index
2.18	313 ± 20	38.6 ± 11.7	19.6 ± 3.6	16
2.19	287 ± 13	32.4 ± 14.8	18.9 ± 4.4	15
2.20	202 ± 35	18.3 ± 8.4	14.2 ± 3.5	14
2.21	218 ± 46	11.8 ± 3.5	11.6 ± 2.9	19

Remark: Brittleness = Compressive Strength / Tensile Strength

表に示すように、圧縮強度、引張強度、ヤング率は 2.18, 2.19 孔が大で 2.20, 2.21 孔は共に小であり、かつ、値も近似している。

脆性度は 2.21 孔が非常に高い値を示している。

(2) 硬石膏バンドの有無による差異

試験片を肉眼により Band の有無別に分類して、平均値を求めた。Table 4.7 にその結果を示す。

Table 4.7 Difference in Physical Properties between Test Pieces with and without bands

Item	Compressive Strength Sc (kg/cm ²)	Tangential Young's Modulus E tan (x 10 ³ kg/cm ²)	Tensile Strength St (kg/cm ²)	Brittleness Index (Sc/St)
With Band	318 ± 31	41.4 ± 8.9	21.0 ± 5.2	15
Without Band	264 ± 49	29.0 ± 14.2	17.1 ± 3.9	15

同表は、圧縮強度、引張強度ともに Band のある試験片の方が大であり、接線ヤング率も大であることから Band のある試験片の方が変形しにくいことを示している。

Band の大半が 4. 3.(1)に述べた如く、硬石膏である為に大きい値を示していると考えられる。

(3) 層別の差異

試験結果を層別に分類し、結果を Table 4.8 に示す。

圧縮強度、P-wave 速度ともに Halite-A 層は低い値を示している。

すなわち、各層の強度は次のような順序である。

$$\text{Halite B} > \text{Halite A in D-area} \gg \text{Halite A in S-area}$$

Table 4.8 Difference among Halite Beds

Halite Beds	Density ρ	P-wave Velocity V_p	Compressive Strength S_c	Young's Modulus		Poisson's Ratio	
				E (tan)	E 80% sec	ν (tan)	ν 80% sec
	(g/cm ³)	(x10 ³ m/sec)	(kg/cm ²)	(x10 ³ kg/cm ²)	(x10 ³ kg/cm ²)		
Halite A in S-area	2.1	2.9 ± 0.61	211 ± 40.4	14.8 ± 6.86	8.2 ± 3.37	0.24 ± 0.118	0.68 ± 0.183
Halite A in D-area	2.2	3.7 ± 0.15	297 ± 11.6	27.6 ± 5.25	10.0 ± 0.74	0.27 ± 0.066	0.68 ± 0.145
Halite B in D-area	2.2	4.2 ± 0.26	301 ± 29.2	44.1 ± 10.92	12.8 ± 2.64	0.28 ± 0.09	0.65 ± 0.087

4.7 P 波速度の特性

Table 4.9 P-Wave Velocity by Drill Hole

Drill Hole	P-Wave Velocity (x 10 ³ m/sec)
2 - 18	4.1 ± 0.34
2 - 19	3.8 ± 0.24
2 - 20	3.2 ± 0.65
2 - 21	2.6 ± 0.28

P波速度は圧縮強度と同じ傾向を示しており、2.18, 2.19孔は値が大であり、2.20, 2.21孔は小である。すなわち、P波速度と圧縮強度とは相関関係にあることが推定できる。次に相関関係を調べてみた。

両者の相関係数は $r = 0.65$ であり、P波速度と圧縮強度の関係は次式で表わすことができる。

$$Y = 10.56X + 795.04$$

Y : P-wave velocity

X : Compressive strength

Fig. 4.14に両者の関係を示す。

4.8 硬度特性

2.18, 2.19, 2.20孔の硬度は、凡そ10である。然し2.21孔は6.4~7.4である。

4.9 クリープ特性

クリープは岩塩の物性の特徴である。試験結果をレオロジーモデルを用いて表わすことを試みた。レオロジーモデルはFig. 4.15に示すBurgersモデルである。

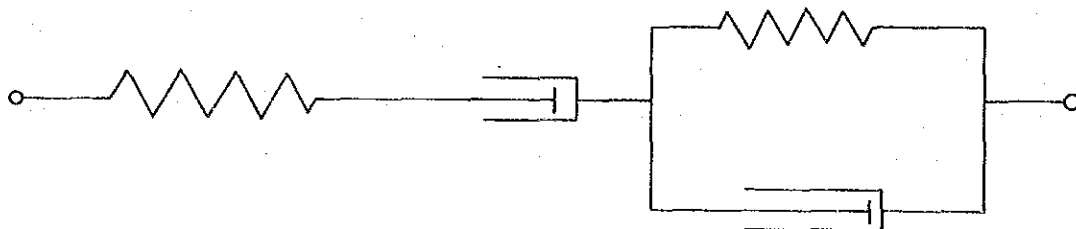


Fig. 4.15 Burgers Model (1-Maxwell and 1 Voigt)

Burgers Modelについて一定応力 $\sigma = \sigma_0$ をかけた時発生する時間依存性の歪 $\epsilon(t)$ は次式で表わせる。

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2} t\right) \right] + \frac{\sigma_0}{\eta_1} \dots\dots\dots (4.9.1)$$

測定されたデータについて、(1)式をあてはめる為、最小二乗法標準プログラム(SALS)を用いて、粘弾性定数 E_1 , η_1 , E_2 , η_2 を算出した。SALSに於ける解法は、モデル関数及び微分行列を計算するサブルーチンを用い、非線形 Gauss-Newton法を適用している。Table 3.9に

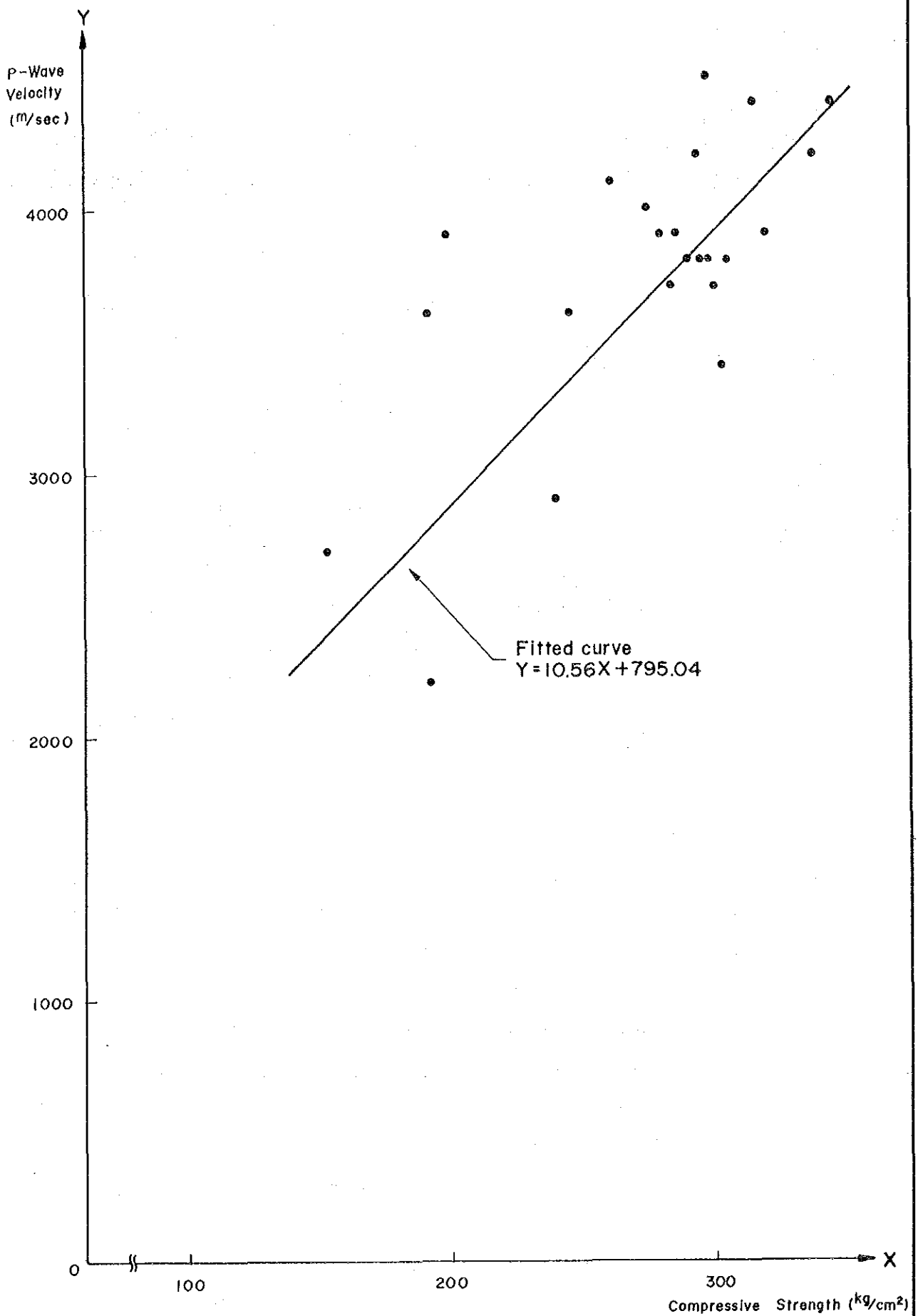


Fig.4-14 Relationship between P-Wave Velocity and Compressive Strength

結果を示す。

表中、※印は Fig. 4.15 のモデルにあてはめたが、遷移クリープの初期（約 150 分後まで）において著しくずれる為に、一般化 Voigt モデルをあてはめた値である。一般化 Voigt モデルは Fig. 4.16 に示す。

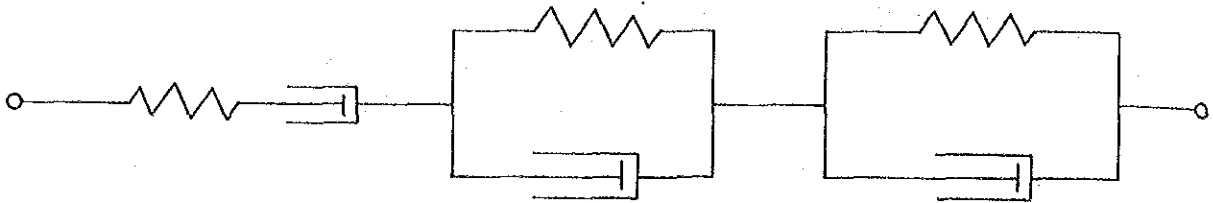


Fig. 4.16 Voigt Model (1-Maxwell and 2-Voigt)

このモデルにおける歪 $\epsilon(t)$ は、次式で表わすことができる。

$$\epsilon(t) = \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{1}{E_3} \right) \sigma_0 - \frac{\sigma_0}{E_2} \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2} t\right) - \frac{\sigma_0}{E_3} \exp\left(-\frac{E_3}{\eta_3} t\right) + \frac{\sigma_0}{\eta_1} \cdot t \quad \dots\dots\dots (4 \cdot 9 \cdot 2)$$

$E_1 \sim E_3$: 弾性係数

$\eta_1 \sim \eta_3$: 粘性係数

t : 時間 (分)

(2)式を先と同様に SALS を用いて計算し、 $E_1, E_2, E_3, \eta_1, \eta_2, \eta_3$ を算出した。Table 3.9 に結果を示す。又、Fig. 3.4 (a)(b)(c)(d) に歪-時間線図を示す。

18-6 の試験結果は、次式に表わせる。 ϵ の単位は μ である。

$$\epsilon(t) = 15065 - 5389.9 \exp(-0.0051896 t) + 1.0166 t$$

但し応力レベル : 243 Kg/cm², 78 %

レオロジーモデル : 1-Maxwell and 1-Voigt

19-14 の試験結果は、次式に表わせる。

$$\epsilon(t) = 55014 - 14467 \exp(-0.015702 t) - 2625.4 \exp(-0.017167 t) + 0.50870 t$$

但し応力レベル : 227.3 Kg/cm², 79 %

レオロジーモデル：1-Maxwell and 2-Voigt

21-11の結果は、次式に表わせる。

$$\epsilon(t) = 27573 - 2659 \exp(-0.002635t) + 0.06140t$$

但し応力レベル：67.8 Kg/cm², 34%

レオロジーモデル：1-Maxwell and 1-Voigt

21-13の結果は、次式に表わせる。

$$\epsilon(t) = 19053 - 1059 \exp(-0.01123t) + 0.0455t$$

但し応力レベル：73.3 Kg/cm², 37%

レオロジーモデル：1-Maxwell and 1-Voigt

4.10 封圧下における特性

Table 3.10から応力円(Mohr's circle)を描くことができる。応力円から内部摩擦係数(coefficient of internal angle)と粘着力(cohesion)が算出される。

すなわち、今、応力状態が (σ_1, σ_3) であるとき、応力円の頂点は $\sigma - \tau$ 平面上で $((\sigma_1 + \sigma_3)/2, (\sigma_1 - \sigma_3)/2)$ ※と表わすことができる。これらの頂点を通る直線 $\tau = (C + k\sigma)$ から内部摩擦角 ϕ (deg), 粘着力 c (Kg/cm²)は算出できる。

応力円の頂点を通る直線群を最小二乗法で計算し、 c, ϕ を求めると以下のようになる。

内部摩擦角	55.8 度
粘着力	16.9 Kg/cm ²
相関係数	0.999

三軸圧縮試験の結果からは、天盤、ピラー等について拘束力が強ければ強いほど許容変形量、許容荷重を増すことが出来るといえる。採掘設計に当ってロックボルト、バンド等が有効な手段になることを示唆している。Fig. 4.17に周圧と圧縮強度の関係を示す。

<参考>

以上は弾性論に基づいて算出した値であり、岩塩のように変形量の多い物体に対しては、変形、破壊挙動を明確に表わしているとは言いがたい。

そこで、直径方向の変化が、軸方向変位量と以下のような関係があると仮定する。

※ $\sigma_1 - \sigma_3$ は差応力(differential stress)を意味し、 σ_3 は周圧(Confining stress)を表わす。

$$d = 49.30 + a \cdot x$$

d : 変化した直径

a : 係 数

x : 軸変位量

この式から、前述のデータを補正すると、内部摩擦角、粘着力は以下のようなになる。

補正した内部摩擦角	37.3 度
補正した粘着力	43.7 Kg/cm ²
相関係数	0.994

設計に際し、各々安全サイドの値を採用することが望ましい。

4.11 その他

物性値が深度、化学的品位 (I.M, SO₄, NaCl) と相関関係を有するかどうかを検定したが、有意の水準に達していなかった。

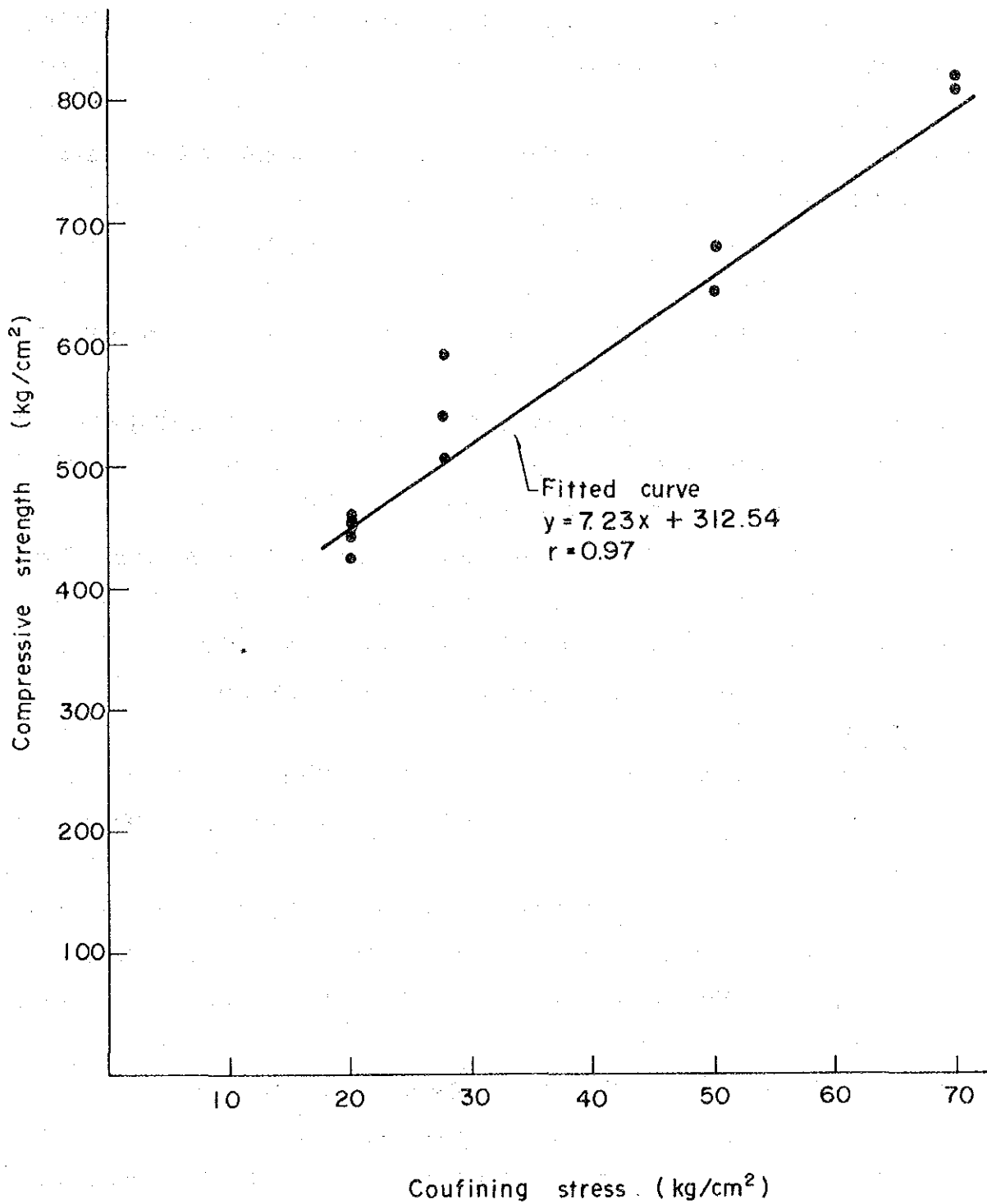


Fig.4-17 Relationship between confining stress and compressive strength

第 5 章 結 論

追加試錐 4 本に対する以上の調査によって Bamnet-Narong 岩塩鉱床に対する多くの事実が明らかになった。その主なものは下記の通りである。

地 質

- (1) Bamnet-Narong 地区に賦存する岩塩は厚さ約 100~280 m のものが地表下約 60 m 以深に賦存しており、その埋蔵量は龐大なものである。
- (2) この岩塩層は、地質層序的に 2 層よりなり、下位の岩塩層を Halite-A、上位のものを Halite-B と名づけた。
- (3) Halite-A は Halite-B にくらべて NaCl 値が高く、そのバラツキもすくない。また、硬石膏の平均含有値も Halite-A の方が低い。
- (4) 本地区には Halite-A の上位に Halite-B が分布する地域 (D-area) と Halite-A のみが分布する地域 (S-area) とがある。

すなわち、Halite-A は D-area と S-area にまたがって賦存している。

- (5) S-area に賦存している Halite-A と D-area に賦存している Halite-A では Br, K などの分布状態が異なっており、両域は異なった岩塩堆積環境であったことが推定される。
- (6) Halite-A は S-area に賦存するものが D-area のものより規模、品質ともに優れており、第 2 次評価調査においてはこれを採掘対象岩塩層として検討するべきである。

化学成分および品質

- (1) 岩塩中の Br の垂直分布には「Br 漸増型」と「Br 不変型」があるが、前者の岩塩層上部にはカリが賦存しており、この相互関係はコラート地方における今後のカリおよび岩塩探査の重要な指針となり得る。
- (2) S-area に賦存する Halite-A の塩主成分の値を現在の日本輸入塩 (天日塩) にくらべると、NaCl, K, Mg は優れており、 SO_4 , I.M (水不溶解残渣) は高い値を示している。これらについては、第 2 次評価調査において工業塩、一般塩の原料としての適合性について十分に検討する必要がある。
- (3) SO_4 は硬石膏 (CaSO_4) に由来するものであり、また、I.M は硬石膏、ドロマイト、マグネサイト、石英、長石、雲母、緑泥石などより構成されている。
- (4) 岩塩中に含まれる硬石膏は肉眼的に識別可能な大きさのものから、不可能な微細なものまである。
- (5) 岩塩中に微細な硬石膏が含まれている場合は物理的な方法で、これを除くことは困難である。

(6) 岩塩が天日塩にくらべて、 SO_4 、I.Mを多く含有していることは、岩塩の生成機構上から宿命的なものである。

物 性

(1) Bamnet-Narong 地区の Halite-A 層の圧縮強度は 210 Kg/cm^2 程度であり、坑内採掘に充分耐え得る。

(2) S-area の Halite-A、D-area の Halite-A、及び Halite-B の三種類の圧縮強度は以下の順であり、S-area の Halite-A が最も弱い。

$$\text{Halite-B} > \text{Halite-A in D-area} \gg \text{Halite-A in S-area}$$
$$(301 \text{ Kg/cm}^2) \quad (297 \text{ Kg/cm}^2) \quad (211 \text{ Kg/cm}^2)$$

(3) 弾性波速度(Y)は圧縮強度(X)と次の関係を有する。

$$Y = 1.056X + 795.04$$

この関係を用いて、簡略に圧縮強度を推測することが出来る。

(4) 封圧下に於ける強度は、著しく強くなる性状であるから、ルーフボルト、バンド等で鉋柱を補強することは有効な支保方法となるであろう。

(5) 脆性度は高いので(14-19)機械的切削方法が可能であろう。

(6) クリープ現象の生じやすい性質であるから、採掘域は応力集中の発生しない構造とし、かつ後退式採掘法を採用することが望ましい。又、鉋柱設計や採掘実収率を検討する際には、二次クリープが著しく発生しない応力レベル(35~40%)とすべきである。

綜 合

Bamnet-Narong 岩塩鉋床は膨大な岩塩量を包蔵しており、この岩塩は坑内採掘法を採用するのに十分な物性をそなえている。

採掘対象岩塩層としては、地質構造、化学分析などの結果から S-area の A 層が適当と考えられる。

品質的には、S-area A 層が優れているが、日本の輸入塩(天日塩)に比較すると純分、不純分において若干の優劣が認められる。

第2次評価調査においては、これらの諸事実を加味して、岩塩採掘計画を立案する必要がある。

