

第2章 コアサンプルの物性測定

II-2-1 調査項目および数量

4孔の調査ボーリング孔のコアサンプルを用いて、物性測定を行った。測定した項目は帯磁率、分極率、比抵抗値の3項目である。帯磁率を測定したサンプル数は867個であり、分極率・比抵抗を測定したサンプル数は49個である。なお、分極率、比抵抗値の測定は時間領域法で行った。一般的に、コアを用いたサンプルの物性は、原位置における状態を忠実に再現するものではないが、大局的な傾向を反映しているものと考えられ、本年度空中物理探査の結果を解釈する際に参考となり、また今後の物理探査を考える上で重要である。

II-2-2 使用機器およびサンプル処理

II-2-2-1 帯磁率測定

帯磁率計は小型軽量のKAPAMETERを使用し、測定はボーリング現場で行った。性能はTable II-2-1に示す。このKAPAMETERはフィールド測定、サンプル測定両用に作られたもので、感度は $0.01 \times 10^{-3} \text{ S. I.}$ であり、cgs単位に換算して約 $0.8 \times 10^{-6} \text{ cgs}$ と高感度である。

II-2-2-2 IP・比抵抗値測定

使用した機器をTable II-2-1に示す。分極率、比抵抗測定用のサンプルは、5~10cm程度の長さのボーリングコアを切断したもので、約一日間水道水に浸した後、測定を行った。

使用機器のチャンネルに対応するサンプリング時間と幅を以下に示す。

チャンネルNo.	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Width(msec)	20	40	40	80	80	140	140	230	230	360	360
Mid-Point(°)	60	90	130	190	270	380	520	705	935	1230	1590

Table II - 2 - 1 Equipment for Measurement of Geophysical Properties

機器	メーカー	形式	仕様・性能	数量
IP 送信機	IRIS インストメント	IP-L型 時間領域；サブIP専用	出力：1 μ A~100 μ A max10V	1台
IP 受信機	SCINTREX	IPR-12型 時間領域；サブIP専用	仕様：8チャンネル，14ビット Input Range：50 μ V~14V	1台
電極		白金線		1式
帯磁率計	Geofyzika Brno Czechoslovakia	KAPPAMETER model KT-5	精度：0.01 $\times 10^{-3}$ SI 測定範囲：0.00~999 $\times 10^{-3}$ SI	1台

II-2-3 測定結果と解析

測定結果をTable II-2-2に示す。また、全ての帯磁率測定結果をTable II-2-3(1)~(6)に、比抵抗・IP測定の詳しい結果をTable II-2-4に掲載した。さらに、孔別岩相別の帯磁率平均値をTable II-2-4に、岩相別の比抵抗・IP値平均値をTable II-2-5に示した。

IP値として最も標準的に使われる12チャンネル(Mid-point 935msec)のデータを解析の対象とした。

II-2-3-1 帯磁率データの解析

孔別柱状帯磁率分布をFig. II-2-6に示す。Table II-2-2、Table II-2-4、Fig. II-2-6から各孔の磁気的な特徴と磁気解析図に見られる小規模磁気異常について考察を行った。結果を以下に示す。

MJNM-1：表層カルクリート下部および不整合面直下のドロマイト層上部の帯磁率は比較的高く、この部分の岩石は帯磁率が高いほど赤色を呈する。岩石は角礫化している部分や脈に切られる部分も見られマトリクスは赤色物質であり、鉄酸化物が比較的多いものと考えられる。下位のドロマイト、鉱化部分は共に $0.01\sim 0.02\times 10^{-3}\text{SI}$ で低帯磁率である。この付近の小規模な磁気異常は深度70~90m付近の鉄酸化物によるものと考えられる。

MJNM-2：帯磁率のやや高い部分は、表層のカルクリート、深度150m、180m付近の頁岩などであり、下部のドロマイトにもやや高いものが見られる。しかし、顕著に高いものは無く、この付近の小規模磁気異常および磁気リニアメントの原因は比較的高磁化をもつ頁岩などによるものと考えられる。

MJNM-3：カルクリート層は薄いやや高い帯磁率を有する。下位の岩相は殆ど低帯磁率のドロマイトであるが、僅かに鉄酸化物の充填した割れ目付近の帯磁率が高い。しかし、顕著な高帯磁率が連続する箇所は検出できず、磁気異常の原因は特定できない。

MJNM-4：表層のカルクリートは比較的に高帯磁率を有するが、その中に1mm角大の磁鉄鉱粒が見られ、この部分の帯磁率はかなり高い。このような表層のカルクリートに含まれる磁性鉱物が磁気異常の原因であると考えられる。

II-2-3-2 比抵抗、IPデータの解析

(1) 岩石の比抵抗

岩石に代表される大地を構成する物質は、一部の金属鉱物および石墨を除いて、水分が存在しなければ絶縁体である。従ってこれらの比抵抗は、主に孔隙水の量や分布形態およびその比抵抗に依存する。岩石・土壌の比抵抗は含水率が高くなると減少し、低くなると急激に増加する。孔隙水の比抵抗は溶存電解質の量が多いほど低くなる。これらの関係を数式化したものが

Table II - 2 - 2 Result of Geophysical Test of Core Samples

Sample No.	Depth m	Rock, Mineral name	Physical properties		
			Mag.sus. *1E-3 SI	Resistivity $\Omega \cdot m$	IP(MI2) mV/V
MJNM-1-1	1.10	Calcrete	0.02	989	0.30
MJNM-1-2	20.00	Calcrete	0.07	2,322	0.24
MJNM-1-3	40.00	Sandy Calcrete	0.05	247	0.50
MJNM-1-4	61.00	Coarse pebbles	0.11	289	4.40
MJNM-1-5	78.90	Coarse pebbles	0.55	390	0.52
MJNM-1-6	99.90	Grainite	0.03	423	0.86
MJNM-1-7	111.58	Sphalerite Galena disseminated	0.02	9,440	3.33
MJNM-1-8	112.30	Galena ore	0.02	9,971	2.84
MJNM-1-9	120.05	Dolomite	0.03	859	1.26
MJNM-1-10	139.65	Grey dolomite	0.02	2,491	0.29
MJNM-1-11	160.00	Massive dolomite	0.02	1,089	1.82
MJNM-1-12	180.16	Dolomite	0.02	1,453	1.10
MJNM-1-13	200.00	Dolomite	0.02	908	0.25
MJNM-1-15	220.00	Dolomite	0.01	1,535	0.23
MJNM-1-16	239.80	Dolomite	0.02	1,554	0.39
MJNM-1-17	259.90	Dolomite	0.02	1,597	0.25
MJNM-1-18	245.75	Sphalerite pod	0.02	576	1.21
MJNM-1-19	279.00	Dolomite	0.01	1,503	0.43
MJNM-1-20	299.90	Dolomite	0.01	1,545	0.38
MJNM-2-1	3.00	Calcrete	0.01	961	1.36
MJNM-2-2	30.25	Calcrete	0.02	1,800	2.50
MJNM-2-3	60.70	Brecciated Calcrete	0.04	2,381	2.89
MJNM-2-4	81.00	Dolomite	0.01	14,646	1.33
MJNM-2-5	99.90	Dark grey dolomite	0.01	8,158	1.16
MJNM-2-6	115.00	Black dolomitic shale	0.02	24,827	0.35
MJNM-2-7	151.00	Black dolomitic shale	0.13	805	1.37
MJNM-2-8	185.00	Shale & Dolomite	0.15	244	2.42
MJNM-2-9	195.10	Oolitic chert	0.02	26,726	0.15
MJNM-2-10	227.70	Sandstone	0.05	17,569	0.13
MJNM-2-11	251.15	Dolomite	0.09	12,045	1.28
MJNM-2-12	272.33	Massive dolomite	0.55	19,755	1.10
MJNM-2-13	298.40	Massive dolomite	0.11	5,553	3.56
MJNM-3-1	4.00	Calcrete	0.05	1,232	2.94
MJNM-3-2	29.80	Massive dolomite	0.02	38,567	0.34
MJNM-3-3	60.00	Massive dolomite	0.03	2,289	0.63
MJNM-3-4	75.52	Calcareous sandstone	0.02	500	0.11
MJNM-3-5	91.05	Dolomite	0.02	4,082	0.14
MJNM-3-6	119.75	Dolomite	0.07	37,988	3.00
MJNM-3-7	149.20	Med.-fine dolomite	0.02	26,039	0.11
MJNM-4-1	9.50	Dark grey dolomite	0.02	24,721	0.10
MJNM-4-2	30.80	Grey fine dolomite	0.13	25,175	0.39
MJNM-4-3	60.70	Black sandy shale	0.03	7,654	1.51
MJNM-4-4	94.00	Cream limestone	0.03	3,360	4.68
MJNM-4-5	119.40	Druse rich dolomite	0.02	3,797	5.11
MJNM-4-6	149.90	Dolomite with sericite layer	0.03	1,793	0.76

Table II - 2 - 3 (I) Magnetic Susceptibility of Drill Cores

Depth (m)	MJNM-1		MJNM-2		MJNM-3		MJNM-4	
	Mag.sus. *1E-3(SI)	Lithology No.	Mag.sus. *1E-3(SI)	Lithology No.	Mag.sus. *1E-3(SI)	Lithology No.	Mag.sus. *1E-3(SI)	Lithology No.
0			0.05	2 Calcrete				
1	0.02	1 Calcrete						
2	0.01	1 Calcrete	0.03	2 Calcrete				
3	0.01	1 Calcrete	0.01	2 Calcrete	0.05	1 Calcrete		
4	0.02	1 Calcrete			0.05	1 Calcrete		
5	0.03	1 Calcrete	0.02	2 Calcrete	0.03	1 Calcrete	0.02	2 Calcrete
6	0.05	1 Calcrete	0.03	2 Calcrete	0.10	1 Calcrete	0.02	3 Dolomite
7	0.05	1 Calcrete	0.01	2 Calcrete	0.10	1 Calcrete	0.07	3 Dolomite
8	0.05	1 Calcrete	0.03	2 Calcrete	0.07	1 Calcrete	0.09	3 Dolomite
9	0.05	1 Calcrete	0.03	2 Calcrete	0.02	1 Calcrete	0.04	3 Dolomite
10	0.05	1 Calcrete	0.03	2 Calcrete	0.02	1 Calcrete	0.02	3 Dolomite
11	0.05	1 Calcrete	0.01	2 Calcrete	0.02	1 Calcrete	0.04	3 Dolomite
12	0.05	1 Calcrete	0.07	2 Calcrete	0.02	3 Dolomite	0.04	3 Dolomite
13	0.05	1 Calcrete	0.01	2 Calcrete	0.02	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite
14	0.05	1 Calcrete	0.02	2 Calcrete	0.03	3 Dolomite	0.04	3 Dolomite
15	0.05	1 Calcrete	0.01	2 Calcrete	0.02	3 Dolomite	0.04	3 Dolomite
16	0.07	1 Calcrete	0.01	2 Calcrete	0.02	3 Dolomite	0.04	3 Dolomite
17	0.03	1 Calcrete	0.01	2 Calcrete	0.05	4 Dolomite	0.04	3 Dolomite
18	0.07	1 Calcrete	0.01	2 Calcrete	0.02	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite
19	0.07	1 Calcrete	0.05	2 Calcrete	0.02	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite
20	0.07	1 Calcrete	0.01	2 Calcrete	0.02	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite
21	0.03	1 Calcrete	0.01	2 Calcrete	0.02	3 Dolomite	0.04	3 Dolomite
22	0.03	1 Calcrete	0.01	2 Calcrete	0.02	3 Dolomite	0.04	11 Shale
23	0.03	1 Calcrete	0.01	1 Calcrete	0.02	3 Dolomite	0.05	3 Dolomite
24	0.03	1 Calcrete	0.01	1 Calcrete	0.02	3 Dolomite	0.04	11 Shale
25	0.05	1 Calcrete	0.01	1 Calcrete	0.02	3 Dolomite	0.05	3 Dolomite
26	0.03	1 Calcrete	0.02	1 Calcrete	0.02	3 Dolomite		
27	0.03	1 Calcrete	0.02	1 Calcrete	0.02	3 Dolomite		
28	0.03	1 Calcrete	0.02	1 Calcrete	0.02	3 Dolomite	0.05	3 Dolomite
29	0.05	1 Calcrete	0.02	1 Calcrete	0.02	3 Dolomite	0.04	3 Dolomite
30	0.05	1 Calcrete	0.02	1 Calcrete	0.02	3 Dolomite	0.07	3 Dolomite
31	0.05	1 Calcrete	0.03	1 Calcrete	0.02	3 Dolomite	0.13	3 Dolomite
32	0.07	1 Calcrete	0.01	1 Calcrete	0.02	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite
33	0.05	1 Calcrete	0.01	1 Calcrete	0.02	3 Dolomite	0.04	3 Dolomite
34	0.05	1 Calcrete	0.03	1 Calcrete	0.02	3 Dolomite	0.04	3 Dolomite
35	0.07	2 Calcrete	0.05	1 Calcrete	0.02	3 Dolomite	0.02	10 Chert
36	0.03	2 Calcrete	0.03	1 Calcrete	0.02	3 Dolomite		
37	0.03	2 Calcrete	0.05	1 Calcrete	0.02	3 Dolomite		
38	0.03	2 Calcrete	0.05	1 Calcrete	0.02	3 Dolomite	0.05	3 Dolomite
39	0.05	2 Calcrete	0.03	2 Calcrete	0.02	3 Dolomite		
40	0.05	2 Calcrete	0.03	2 Calcrete	0.02	3 Dolomite		
41	0.05	2 Calcrete	0.02	2 Calcrete	0.02	3 Dolomite		
42	0.08	2 Calcrete	0.05	2 Calcrete	0.02	3 Dolomite		
43	0.07	2 Calcrete	0.05	2 Calcrete	0.03	3 Dolomite	0.04	3 Dolomite
44	0.07	2 Calcrete	0.05	2 Calcrete	0.02	3 Dolomite		
45	0.08	2 Calcrete	0.04	2 Calcrete	0.02	3 Dolomite		
46	0.07	2 Calcrete	0.04	2 Calcrete	0.02	3 Dolomite		
47	0.07	2 Calcrete	0.04	2 Calcrete	0.03	11 Shale		
48	0.08	2 Calcrete	0.05	2 Calcrete	0.03	11 Shale	0.04	3 Dolomite
49	0.13	2 Calcrete	0.04	2 Calcrete	0.03	7 Dolomite		
50	0.05	2 Calcrete	0.09	2 Calcrete	0.03	7 Dolomite		

Table II - 2 - 3 (2) Magnetic Susceptibility of Drill Cores

Depth (m)	MJNM-1		MJNM-2		MJNM-3		MJNM-4	
	Mag.sus. *1E-3(SI)	Lithology No.	Mag.sus. *1E-3(SI)	Lithology No.	Mag.sus. *1E-3(SI)	Lithology No.	Mag.sus. *1E-3(SI)	Lithology No.
51	0.10	1 Calcrete	0.07	2 Calcrete	0.02	3 Dolomite		
52	0.07	1 Calcrete	0.07	2 Calcrete	0.03	3 Dolomite		
53	0.08	1 Calcrete	0.07	2 Calcrete	0.02	3 Dolomite	0.01	11 Shale
54	0.10	1 Calcrete	0.09	2 Calcrete	0.02	3 Dolomite		
55	0.10	1 Calcrete	0.09	2 Calcrete	0.03	3 Dolomite		
56	0.15	1 Calcrete	0.05	2 Calcrete	0.02	3 Dolomite		
57	0.13	2 Calcrete	0.05	2 Calcrete	0.02	3 Dolomite	0.04	16 Shale/Dol
58	0.07	2 Calcrete	0.02	2 Calcrete	0.02	3 Dolomite		
59	0.11	1 Calcrete	0.07	2 Calcrete	0.02	3 Dolomite		
60	0.10	1 Calcrete	0.05	2 Calcrete	0.03	3 Dolomite	0.01	16 Shale/Dol
61	0.11	2 Calcrete	0.04	2 Calcrete	0.01	3 Dolomite	0.03	16 Shale/Dol
62	0.08	2 Calcrete	0.02	3 Dolomite	0.07	3 Dolomite	0.03	4 Dolomite
63	0.10	2 Calcrete	0.01	3 Dolomite	0.03	3 Dolomite	0.02	4 Dolomite
64	0.13	2 Calcrete	0.02	3 Dolomite	0.01	3 Dolomite	0.02	4 Dolomite
65	0.07	2 Calcrete	0.36	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite	0.01	4 Dolomite
66	0.08	2 Calcrete	0.02	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite	0.02	4 Dolomite
67	0.08	2 Calcrete	0.01	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite
68	0.07	2 Calcrete	0.01	3 Dolomite	0.03	3 Dolomite	0.03	3 Dolomite
69	0.11	2 Calcrete	0.01	3 Dolomite	0.01	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite
70	0.16	2 Calcrete	0.02	12 Dol.Chert	0.02	3 Dolomite	0.01	3 Dolomite
71	0.16	2 Calcrete	0.04	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite
72	0.18	2 Calcrete	0.02	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite	0.03	3 Dolomite
73	0.18	2 Calcrete	0.02	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite	0.03	3 Dolomite
74	0.13	2 Calcrete	0.02	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite	0.03	3 Dolomite
75	0.20	2 Calcrete	0.04	3 Dolomite	0.02	15 Sandstone	0.01	3 Dolomite
76	0.10	2 Calcrete	0.05	3 Dolomite	0.02	15 Sandstone	0.11	3 Dolomite
77	0.13	2 Calcrete	0.05	3 Dolomite	0.02	15 Sandstone	0.02	11 Shale
78	0.36	2 Calcrete	0.01	3 Dolomite	0.01	3 Dolomite	0.03	11 Shale
79	0.55	2 Calcrete	0.01	3 Dolomite	0.03	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite
80	0.33	2 Calcrete	0.01	3 Dolomite	0.03	3 Dolomite	0.01	3 Dolomite
81	0.49	2 Calcrete	0.01	3 Dolomite	0.01	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite
82	0.20	2 Calcrete	0.04	3 Dolomite	0.01	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite
83	0.10	2 Calcrete	0.01	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite
84	0.07	2 Calcrete	0.02	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite
85	0.15	2 Calcrete	0.04	3 Dolomite	0.03	3 Dolomite	0.01	3 Dolomite
86	0.02	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite	0.01	3 Dolomite	0.03	3 Dolomite
87	0.02	3 Dolomite	0.01	3 Dolomite	0.01	3 Dolomite	0.03	3 Dolomite
88	0.02	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite	0.01	3 Dolomite
89	0.16	3 Dolomite	0.01	3 Dolomite	0.03	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite
90	0.03	3 Dolomite	0.01	3 Dolomite	0.03	3 Dolomite	0.01	3 Dolomite
91	0.02	4 Dolomite	0.01	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite	0.03	5 Dolomite
92	0.02	11 Shale	0.01	3 Dolomite	0.01	3 Dolomite	0.02	5 Dolomite
93	0.02	11 Shale	0.01	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite	0.02	4 Dolomite
94	0.02	11 Shale	0.01	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite	0.03	3 Dolomite
95	0.03	5 Dolomite	0.02	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite	0.01	3 Dolomite
96	0.05	5 Dolomite	0.01	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite	0.03	3 Dolomite
97	0.02	5 Dolomite	0.01	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite		
98	0.02	5 Dolomite	0.01	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite		
99	0.03	5 Dolomite	0.01	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite		
100	0.03	13 Mineraliza.	0.01	3 Dolomite	0.03	3 Dolomite	0.01	3 Dolomite

Table II - 2 - 3 (3) Magnetic Susceptibility of Drill Cores

Depth (m)	MJNM-1			MJNM-2			MJNM-3			MJNM-4		
	Mag.sus.	Lithology		Mag.sus.	Lithology		Mag.sus.	Lithology		Mag.sus.	Lithology	
	*1E-3(SI)	No.		*1E-3(SI)	No.		*1E-3(SI)	No.		*1E-3(SI)	No.	
101	0.02	13	Mineraliza.	0.02	11	Shale	0.02	3	Dolomite	0.07	3	Dolomite
102	0.02	13	Mineraliza.	0.01	11	Shale	0.02	3	Dolomite	0.02	3	Dolomite
103	0.02	13	Mineraliza.	0.01	11	Shale	0.01	3	Dolomite	0.03	3	Dolomite
104	0.02	13	Mineraliza.	0.01	11	Shale	0.02	3	Dolomite	0.03	5	Dolomite
105	0.02	3	Dolomite	0.01	11	Shale	0.02	3	Dolomite	0.02	5	Dolomite
106	0.02	3	Dolomite	0.01	11	Shale	0.02	3	Dolomite	0.02	5	Dolomite
107	0.02	3	Dolomite	0.01	11	Shale	0.02	3	Dolomite	0.03	5	Dolomite
108	0.01	3	Dolomite	0.01	11	Shale	0.02	3	Dolomite	0.03	5	Dolomite
109	0.02	3	Dolomite	0.01	11	Shale	0.02	3	Dolomite	0.02	5	Dolomite
110	0.03	3	Dolomite	0.01	11	Shale	0.02	3	Dolomite	0.02	11	Shale
111	0.02	3	Dolomite	0.01	11	Shale	0.02	3	Dolomite	0.02	11	Shale
112	0.02	3	Dolomite	0.02	11	Shale	0.01	3	Dolomite	0.03	11	Shale
113	0.01	3	Dolomite	0.02	11	Shale	0.02	3	Dolomite	0.03	11	Shale
114	0.02	3	Dolomite	0.02	11	Shale	0.02	3	Dolomite	0.03	11	Shale
115	0.02	3	Dolomite	0.02	11	Shale	0.03	3	Dolomite	0.02	11	Shale
116	0.02	3	Dolomite	0.02	11	Shale	0.02	3	Dolomite	0.02	11	Shale
117	0.02	3	Dolomite	0.02	11	Shale	0.02	3	Dolomite	0.01	4	Dolomite
118	0.01	3	Dolomite	0.02	11	Shale	0.02	10	Chert	0.01	3	Dolomite
119	0.02	3	Dolomite	0.02	11	Shale	0.05	7	Dolomite	0.02	3	Dolomite
120	0.03	4	Dolomite	0.04	11	Shale	0.07	3	Dolomite	0.02	3	Dolomite
121	0.02	4	Dolomite	0.01	11	Shale	0.03	5	Dolomite	0.03	3	Dolomite
122	0.02	3	Dolomite	0.02	11	Shale	0.01	5	Dolomite	0.02	3	Dolomite
123	0.01	3	Dolomite	0.01	11	Shale	0.02	5	Dolomite	0.03	3	Dolomite
124	0.11	3	Dolomite	0.01	11	Shale	0.02	5	Dolomite	0.03	3	Dolomite
125	0.02	4	Dolomite	0.01	11	Shale	0.02	5	Dolomite	0.02	3	Dolomite
126	0.01	4	Dolomite	0.02	11	Shale	0.01	5	Dolomite	0.03	4	Dolomite
127	0.02	4	Dolomite	0.01	11	Shale	0.02	5	Dolomite	0.02	4	Dolomite
128	0.02	4	Dolomite	0.04	11	Shale	0.02	5	Dolomite	0.03	4	Dolomite
129	0.01	5	Dolomite	0.01	11	Shale	0.02	5	Dolomite	0.03	4	Dolomite
130	0.02	5	Dolomite	0.01	11	Shale	0.03	3	Dolomite	0.03	4	Dolomite
131	0.02	4	Dolomite	0.01	11	Shale	0.02	3	Dolomite	0.02	4	Dolomite
132	0.01	4	Dolomite	0.01	11	Shale	0.02	3	Dolomite	0.03	4	Dolomite
133	0.01	4	Dolomite	0.02	11	Shale	0.02	3	Dolomite	0.03	4	Dolomite
134	0.02	4	Dolomite	0.01	11	Shale	0.02	3	Dolomite	0.03	4	Dolomite
135	0.01	4	Dolomite	0.02	11	Shale	0.03	3	Dolomite	0.01	4	Dolomite
136	0.02	5	Dolomite	0.02	11	Shale	0.02	3	Dolomite	0.02	4	Dolomite
137	0.02	5	Dolomite	0.01	11	Shale	0.01	3	Dolomite	0.02	4	Dolomite
138	0.02	5	Dolomite	0.01	11	Shale	0.02	3	Dolomite	0.02	4	Dolomite
139	0.02	5	Dolomite	0.01	11	Shale	0.03	3	Dolomite	0.02	4	Dolomite
140	0.02	5	Dolomite	0.04	11	Shale	0.02	3	Dolomite	0.03	4	Dolomite
141	0.01	3	Dolomite	0.07	11	Shale	0.01	3	Dolomite	0.02	4	Dolomite
142	0.02	3	Dolomite	0.11	11	Shale	0.01	3	Dolomite	0.02	4	Dolomite
143	0.02	3	Dolomite	0.11	11	Shale	0.01	3	Dolomite	0.02	4	Dolomite
144	0.02	3	Dolomite	0.07	11	Shale	0.01	3	Dolomite	0.02	4	Dolomite
145	0.01	3	Dolomite	0.18	11	Shale	0.03	3	Dolomite	0.02	4	Dolomite
146	0.02	12	Dol Chert	0.15	11	Shale	0.02	3	Dolomite	0.03	4	Dolomite
147	0.03	3	Dolomite	0.09	11	Shale	0.02	3	Dolomite	0.01	4	Dolomite
148	0.02	3	Dolomite	0.11	11	Shale	0.01	3	Dolomite	0.02	4	Dolomite
149	0.02	3	Dolomite	0.22	11	Shale	0.02	3	Dolomite	0.03	12	Dol Chert
150	0.03	3	Dolomite	0.20	11	Shale	0.03	3	Dolomite	0.03	12	Dol Chert

Table II - 2 - 3 (4) Magnetic Susceptibility of Drill Cores

Depth (m)	MJNM-1		MJNM-2		MJNM-3		MJNM-4	
	Mag.sus.	Lithology	Mag.sus.	Lithology	Mag.sus.	Lithology	Mag.sus.	Lithology
	*IE-3(SI)	No.	*IE-3(SI)	No.	*IE-3(SI)	No.	*IE-3(SI)	No.
151	0.02	3 Dolomite	0.13	11 Shale				
152	0.03	12 Dol.Chert	0.07	11 Shale				
153	0.02	11 Shale	0.18	11 Shale				
154	0.02	5 Dolomite	0.20	11 Shale				
155	0.02	4 Dolomite	0.13	11 Shale				
156	0.02	4 Dolomite	0.04	11 Shale				
157	0.02	4 Dolomite	0.05	11 Shale				
158	0.02	4 Dolomite	0.01	11 Shale				
159	0.02	4 Dolomite	0.04	11 Shale				
160	0.02	3 Dolomite	0.04	11 Shale				
161	0.02	3 Dolomite	0.02	11 Shale				
162	0.03	3 Dolomite	0.01	11 Shale				
163	0.02	3 Dolomite	0.02	11 Shale				
164	0.03	3 Dolomite	0.02	11 Shale				
165	0.02	3 Dolomite	0.01	11 Shale				
166	0.02	3 Dolomite	0.02	11 Shale				
167	0.02	3 Dolomite	0.01	11 Shale				
168	0.02	3 Dolomite	0.04	11 Shale				
169	0.02	3 Dolomite	0.02	11 Shale				
170	0.05	3 Dolomite	0.02	11 Shale				
171	0.01	3 Dolomite	0.04	11 Shale				
172	0.02	3 Dolomite	0.05	11 Shale				
173	0.02	3 Dolomite	0.07	11 Shale				
174	0.02	3 Dolomite	0.02	11 Shale				
175	0.02	3 Dolomite	0.02	11 Shale				
176	0.02	3 Dolomite	0.01	11 Shale				
177	0.02	3 Dolomite	0.05	11 Shale				
178	0.02	3 Dolomite	0.09	11 Shale				
179	0.02	3 Dolomite	0.04	11 Shale				
180	0.02	3 Dolomite	0.02	11 Shale				
181	0.02	3 Dolomite	0.05	11 Shale				
182	0.02	3 Dolomite	0.16	11 Shale				
183	0.02	3 Dolomite	0.16	11 Shale				
184	0.01	3 Dolomite	0.18	11 Shale				
185	0.02	3 Dolomite	0.15	11 Shale				
186	0.04	3 Dolomite	0.16	11 Shale				
187	0.02	3 Dolomite	0.18	11 Shale				
188	0.01	3 Dolomite	0.13	11 Shale				
189	0.01	3 Dolomite	0.05	11 Shale				
190	0.01	3 Dolomite	0.05	11 Shale				
191	0.02	3 Dolomite	0.04	11 Shale				
192	0.01	3 Dolomite	0.05	11 Shale				
193	0.02	3 Dolomite	0.04	12 Dol.Chert				
194	0.02	3 Dolomite	0.01	12 Dol.Chert				
195	0.02	3 Dolomite	0.02	10 Chert				
196	0.02	3 Dolomite	0.02	10 Chert				
197	0.01	3 Dolomite	0.01	10 Chert				
198	0.01	3 Dolomite	0.04	11 Shale				
199	0.02	3 Dolomite	0.07	11 Shale				
200	0.02	3 Dolomite	0.05	11 Shale				

Table II - 2 - 3 (5) Magnetic Susceptibility of Drill Cores

Depth (m)	MJNM-1			MJNM-2			MJNM-3			MJNM-4		
	Mag.sus.		Lithology	Mag.sus.		Lithology	Mag.sus.		Lithology	Mag.sus.		Lithology
	*IE-3(SI)	No.		*IE-3(SI)	No.		*IE-3(SI)	No.		*IE-3(SI)	No.	
201	0.02	3	Dolomite	0.04	12	Dol Chert						
202	0.01	3	Dolomite	0.05	12	Dol Chert						
203	0.02	3	Dolomite	0.02	12	Dol Chert						
204	0.02	3	Dolomite	0.02	12	Dol Chert						
205	0.02	3	Dolomite	0.02	5	Dolomite						
206	0.02	3	Dolomite	0.05	5	Dolomite						
207	0.02	3	Dolomite	0.05	5	Dolomite						
208	0.04	3	Dolomite	0.05	5	Dolomite						
209	0.02	3	Dolomite	0.05	5	Dolomite						
210	0.01	12	Dol Chert	0.02	14	Shale Sand						
211	0.01	13	Mineraliza.	0.02	5	Dolomite						
212	0.02	13	Mineraliza.	0.01	5	Dolomite						
213	0.02	13	Mineraliza.	0.04	5	Dolomite						
214	0.04	8	Dolomite	0.04	5	Dolomite						
215	0.02	8	Dolomite	0.05	5	Dolomite						
216	0.04	8	Dolomite	0.07	5	Dolomite						
217	0.02	8	Dolomite	0.07	5	Dolomite						
218	0.02	8	Dolomite	0.02	5	Dolomite						
219	0.02	8	Dolomite	0.11	17	Conglo.						
220	0.01	8	Dolomite	0.09	3	Dolomite						
221	0.01	8	Dolomite	0.09	3	Dolomite						
222	0.02	13	Mineraliza.	0.09	3	Dolomite						
223	0.01	13	Mineraliza.	0.04	3	Dolomite						
224	0.01	13	Mineraliza.	0.09	3	Dolomite						
225	0.02	8	Dolomite	0.09	3	Dolomite						
226	0.02	8	Dolomite	0.09	3	Dolomite						
227	0.01	8	Dolomite	0.09	18	Clay min.						
228	0.02	8	Dolomite	0.05	15	Sandstone						
229	0.02	8	Dolomite	0.04	15	Sandstone						
230	0.02	8	Dolomite	0.07	15	Sandstone						
231	0.01	8	Dolomite	0.05	15	Sandstone						
232	0.02	8	Dolomite	0.07	15	Sandstone						
233	0.02	8	Dolomite	0.04	15	Sandstone						
234	0.02	8	Dolomite	0.02	15	Sandstone						
235	0.01	8	Dolomite	0.05	15	Sandstone						
236	0.02	8	Dolomite	0.05	5	Dolomite						
237	0.01	8	Dolomite	0.04	5	Dolomite						
238	0.01	8	Dolomite	0.02	5	Dolomite						
239	0.02	8	Dolomite	0.01	5	Dolomite						
240	0.02	4	Dolomite	0.01	5	Dolomite						
241	0.02	4	Dolomite	0.01	5	Dolomite						
242	0.02	4	Dolomite	0.01	5	Dolomite						
243	0.02	13	Mineraliza.	0.04	5	Dolomite						
244	0.02	4	Dolomite	0.05	5	Dolomite						
245	0.02	13	Mineraliza.	0.02	5	Dolomite						
246	0.02	13	Mineraliza.	0.04	5	Dolomite						
247	0.02	4	Dolomite	0.05	3	Dolomite						
248	0.02	4	Dolomite	0.05	3	Dolomite						
249	0.02	4	Dolomite	0.11	3	Dolomite						
250	0.01	12	Dol Chert	0.13	3	Dolomite						

Table II - 2 - 3 (6) Magnetic Susceptibility of Drill Cores

Depth (m)	MJNM-1		MJNM-2		MJNM-3		MJNM-4	
	Mag.sus.	Lithology	Mag.sus.	Lithology	Mag.sus.	Lithology	Mag.sus.	Lithology
	*1E-3(SI) No.		*1E-3(SI) No.		*1E-3(SI) No.		*1E-3(SI) No.	
251	0.02	3 Dolomite	0.09	3 Dolomite				
252	0.02	3 Dolomite	0.07	3 Dolomite				
253	0.02	3 Dolomite	0.13	3 Dolomite				
254	0.02	3 Dolomite	0.11	3 Dolomite				
255	0.01	3 Dolomite	0.09	3 Dolomite				
256	0.02	3 Dolomite	0.09	3 Dolomite				
257	0.02	3 Dolomite	0.09	5 Dolomite				
258	0.02	3 Dolomite	0.04	5 Dolomite				
259	0.02	3 Dolomite	0.04	5 Dolomite				
260	0.02	3 Dolomite	0.05	5 Dolomite				
261	0.02	3 Dolomite	0.02	5 Dolomite				
262	0.02	3 Dolomite	0.07	5 Dolomite				
263	0.02	3 Dolomite	0.01	5 Dolomite				
264	0.02	3 Dolomite	0.04	12 Dol.Chert				
265	0.01	12 Dol.Chert	0.01	3 Dolomite				
266	0.01	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite				
267	0.02	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite				
268	0.02	3 Dolomite	0.04	3 Dolomite				
269	0.01	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite				
270	0.02	3 Dolomite	0.04	3 Dolomite				
271	0.02	13 Mineraliza.	0.04	3 Dolomite				
272	0.01	3 Dolomite						
273	0.02	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite				
274	0.01	13 Mineraliza.	0.02	3 Dolomite				
275	0.02	12 Dol.Chert	0.04	3 Dolomite				
276	0.01	3 Dolomite	0.01	3 Dolomite				
277	0.02	12 Dol.Chert	0.02	3 Dolomite				
278	0.02	3 Dolomite	0.02	3 Dolomite				
279	0.01	3 Dolomite	0.01	3 Dolomite				
280	0.02	12 Dol.Chert	0.01	3 Dolomite				
281	0.02	3 Dolomite	0.01	3 Dolomite				
282	0.02	13 Mineraliza	0.01	3 Dolomite				
283	0.02	3 Dolomite	0.01	3 Dolomite				
284	0.01	13 Mineraliza	0.01	3 Dolomite				
285	0.02	3 Dolomite	0.02	12 Dol.Chert				
286	0.01	3 Dolomite	0.02	12 Dol.Chert				
287	0.01	3 Dolomite	0.01	3 Dolomite				
288	0.02	3 Dolomite	0.01	3 Dolomite				
289	0.04	3 Dolomite	0.01	3 Dolomite				
290	0.01	3 Dolomite						
291	0.02	3 Dolomite						
292	0.01	3 Dolomite	0.01	3 Dolomite				
293	0.01	3 Dolomite	0.07	3 Dolomite				
294	0.01	3 Dolomite	0.01	3 Dolomite				
295	0.01	4 Dolomite	0.02	5 Dolomite				
296	0.01	4 Dolomite	0.01	5 Dolomite				
297	0.01	4 Dolomite	0.07	5 Dolomite				
298	0.02	4 Dolomite	0.11	5 Dolomite				
299	0.01	12 Dol.Chert	0.11	5 Dolomite				
300	0.01	4 Dolomite	0.07	3 Dolomite				

Table II - 2 - 4 Acquired Values of Resistivity and IP of Samples

Sample No.	Depth m	Rock/Mineral name	Electric property													
			Resistivity $\Omega \cdot m$	M ₄	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
MJNM1-1	1.19	Calcrete	989.22	0.68	0.58	0.57	0.53	0.42	0.45	0.43	0.38	0.30	0.22	0.15		
MJNM1-2	20.00	Calcrete	2322.10	2.31	1.59	1.16	0.83	0.58	0.41	0.34	0.27	0.24	0.24	0.25		
MJNM1-3	40.00	Sandy Calcrete	247.18	3.49	3.26	2.88	2.44	2.06	1.64	1.16	0.84	0.50	0.21	0.10		
MJNM1-4	61.00	Coarse pebbles	288.90	20.04	18.20	16.14	13.87	11.68	9.36	7.34	5.75	4.40	3.35	2.49		
MJNM1-5	78.90	Coarse pebbles	389.80	3.02	2.28	1.94	1.51	1.22	0.98	0.78	0.60	0.45	0.35	0.21		
MJNM1-6	99.90	Granite	423.04	5.49	4.21	3.28	2.51	1.93	1.51	1.22	1.01	0.86	0.73	0.64		
MJNM1-7	111.58	Sphalerite Galena disseminated	9439.72	12.91	11.25	9.79	8.34	7.07	5.93	4.95	4.13	3.33	2.70	2.12		
MJNM1-8-1	112.30	Galena ore	10597.90	76.43	67.11	58.89	50.90	43.70	37.25	31.65	26.70	22.46	18.78	15.65		
MJNM1-8-2	112.30	Galena ore	14893.88	2.05	1.45	1.10	0.83	0.63	0.47	0.38	0.28	0.22	0.18	0.14		
MJNM1-8-3	112.30	Galena ore	6279.21	18.25	15.59	13.40	11.37	9.58	8.03	6.74	5.61	4.60	3.88	3.21		
MJNM1-9	120.03	Dolomite (well bedded)	858.79	5.64	4.55	3.79	3.12	2.58	2.13	1.79	1.50	1.26	1.06	0.89		
MJNM1-10	139.65	Grey dolomite (sandy)	2490.98	2.28	1.57	1.64	1.64	1.61	1.61	1.61	1.61	1.61	1.61	1.61		
MJNM1-11	160.00	Dolomite (Massive)	1088.97	10.05	8.31	6.96	5.68	4.59	3.67	2.91	2.31	1.82	1.42	1.12		
MJNM1-12	180.10	Dolomite (Massive)	1452.62	5.09	4.12	3.43	2.84	2.33	1.92	1.59	1.32	1.10	0.92	0.76		
MJNM1-13	200.00	Dolomite (Massive)	908.33	1.45	0.69	0.72	0.69	0.63	0.54	0.45	0.34	0.25	0.17	0.10		
MJNM1-15	220.00	Dolomite (Styrolite dev.)	1535.28	2.04	1.48	1.38	1.30	0.93	0.60	0.35	0.29	0.23	0.17	0.11		
MJNM1-16	239.80	Dolomite (Styrolite dev.)	1553.93	2.15	1.54	0.98	0.74	0.73	0.68	0.59	0.49	0.39	0.31	0.22		
MJNM1-17	259.90	Dolomite (Massive)	1596.87	1.34	1.10	0.89	0.78	0.42	0.41	0.37	0.32	0.25	0.19	0.13		
MJNM1-18-1	245.75	Sphalerite pod	626.70	42.52	38.43	34.73	30.95	27.37	23.98	20.91	18.08	15.57	13.30	11.31		
MJNM1-18-2	245.75	Sphalerite pod	459.54	4.34	3.48	2.90	2.39	1.94	1.60	1.34	1.10	0.95	0.80	0.67		
MJNM1-18-3	245.75	Sphalerite pod	661.92	2.43	2.06	2.09	1.18	1.22	1.22	1.20	1.17	1.12	1.07	1.03		
MJNM1-19	279.00	Dolomite (Massive)	1503.24	1.43	1.07	0.96	0.87	0.83	0.76	0.66	0.54	0.43	0.33	0.24		
MJNM1-20	299.90	Dolomite (well bedded)	1545.36	2.04	1.46	1.31	0.98	0.68	0.63	0.57	0.47	0.38	0.29	0.21		
MJNM2-1	3.00	Calcrete (brecciated)	960.51	4.31	3.62	3.58	3.41	3.10	2.69	2.25	1.79	1.36	0.97	0.66		
MJNM2-2	30.25	Calcrete	1800.36	9.58	8.10	6.97	5.96	5.00	4.25	3.55	2.99	2.50	2.11	1.78		
MJNM2-3	60.70	Calcrete (brecciated)	2380.60	10.57	9.01	7.83	6.59	5.43	4.71	4.06	3.32	2.89	2.35	2.00		
MJNM2-4	81.00	Dolomite	14646.26	8.43	6.82	5.57	4.44	3.50	2.74	2.13	1.68	1.33	1.04	0.83		
MJNM2-5	99.90	Dark grey dolomite	8157.66	4.88	3.92	3.28	2.73	2.23	1.86	1.56	1.32	1.16	0.93	0.78		
MJNM2-6	115.00	Black dolomitic shale	24826.55	1.01	0.97	0.85	0.69	0.69	0.60	0.53	0.43	0.35	0.29	0.21		
MJNM2-7	131.00	Black dolomitic shale	804.63	8.70	6.75	5.36	4.24	3.36	2.68	2.14	1.72	1.37	1.10	0.87		
MJNM2-8	185.00	Shale & Dolomite	243.89	17.90	14.10	11.03	8.40	6.40	4.93	3.85	3.03	2.42	1.89	1.50		
MJNM2-9	195.10	Opilite chert	26726.17	1.73	1.49	1.21	1.01	0.63	0.37	0.28	0.18	0.15	0.10	0.07		
MJNM2-10	227.70	Sandstone	17368.51	1.53	0.95	0.68	0.51	0.33	0.24	0.19	0.15	0.13	0.13	0.11		
MJNM2-11	251.15	Dolomite	12045.42	6.78	5.42	4.44	3.57	2.91	2.35	1.92	1.56	1.28	1.05	0.87		
MJNM2-12	272.33	Massive dolomite	19754.93	5.64	4.57	3.78	3.09	2.50	2.00	1.63	1.35	1.10	0.90	0.75		
MJNM2-13	298.40	Massive dolomite	5352.94	16.94	14.19	11.95	9.94	8.19	6.70	5.46	4.42	3.56	2.86	2.28		
MJNM3-1	4.00	Calcrete	1232.13	12.24	10.46	8.98	7.59	6.37	5.26	4.37	3.59	2.94	2.41	1.86		
MJNM3-2	29.80	Massive dolomite	38567.28	2.48	1.86	1.42	1.04	0.78	0.60	0.50	0.36	0.34	0.28	0.19		
MJNM3-3	60.00	Massive dolomite	2289.04	3.56	2.72	2.18	1.73	1.34	1.10	0.90	0.72	0.63	0.53	0.46		
MJNM3-4	79.52	Calcareous sandstone	500.03	0.86	0.51	0.30	0.27	0.13	0.08	0.07	0.06	0.11	0.08	0.07		
MJNM3-5	91.05	Dolomite	4082.28	1.15	0.74	0.59	0.43	0.47	0.23	0.18	0.15	0.14	0.14	0.14		
MJNM3-6	119.75	Dolomite	37987.64	12.72	10.64	9.01	7.57	6.33	5.27	4.40	3.63	3.00	2.48	2.05		
MJNM3-7	149.20	Med. - fine dolomite	26039.26	1.19	0.76	0.56	0.40	0.20	0.20	0.14	0.12	0.11	0.09	0.08		
MJNM4-1	9.50	Dark grey dolomite	24721.50	1.35	0.87	0.62	0.43	0.30	0.21	0.14	0.11	0.10	0.08	0.08		
MJNM4-2	30.80	Grey fine dolomite	25175.09	2.54	1.89	1.50	1.19	0.95	0.71	0.57	0.45	0.39	0.31	0.25		
MJNM4-3	60.70	Black sandy shale	7653.76	7.55	6.18	5.12	4.17	3.43	2.78	2.27	1.83	1.22	1.00	0.80		
MJNM4-4	94.00	Green limestone	3359.60	21.51	18.03	15.25	12.66	10.45	8.54	6.99	5.69	4.68	3.75	2.99		
MJNM4-5	119.40	Druse dolomite	37979.04	22.72	19.17	16.26	13.57	11.25	9.24	7.63	6.26	5.11	4.16	3.47		
MJNM4-6	149.90	Dolomite with scribble layer	1793.40	4.74	3.37	2.44	1.80	1.33	1.02	0.81	0.79	0.76	0.70	0.65		

Table II - 2 - 5 Mean Values of Magnetic Susceptibility by Drill Hole and Lithofacies

Magnetic susceptibility average (geometric mean)									
Rock name with Lithological description	litho. num.	MJNM-1		MJNM-2		MJNM-3		MJNM-4	
		Average *10E-3SI	sum	Average *10E-3SI	sum	Average *10E-3SI	sum	Average *10E-3SI	sum
Calcrete (Less stratified)	1	0.046	42	0.020	16	0.039	9		
Calcrete (Gravel brecci.)	2	0.100	43	0.030	44			0.018	1
Dolomite (Massive)	3	0.017	119	0.022	81	0.017	120	0.025	65
Dolomite (Well bedded)	4	0.014	29			0.049	1	0.019	30
Dolomite (Sandy)	5	0.019	13	0.031	36	0.015	9	0.023	8
Dolomite (Stromatolitic)	7					0.037	3		
Dolomite (Stylolite developed)	8	0.016	23						
Chert	10			0.014	3	0.016	1	0.018	1
Shale	11	0.016	4	0.029	95	0.033	2	0.023	12
Chart&Dolomite	12	0.014	9	0.023	10			0.033	2
Mineralization	13	0.015	18						
Shale//Sandstone	14			0.018	1				
Sandstone	15			0.046	8	0.016	3		
Shale//Dolomite	16							0.022	3
Conglomerate	17			0.109	1				
Clay mineral zone	18			0.091	1				
Whole drill core		0.024	300	0.027	296	0.018	148	0.023	122

Table II - 2 - 6 Mean Values of Resistivity and IP values by Lithofacies

Drill core resistivity & I.P. value average (geometric mean)				
Rock name with Lithological description	litho. num.	sum	Resistivity $\Omega \cdot m$	IP(M12) mV/V
Calcrete (Less stratified)	1	4	1,502	0.85
Calcrete (Gravel brecci.)	2	5	576	1.35
Dolomite (Massive)	3	17	6,033	0.75
Dolomite (Well bedded)	4	4	2,770	0.44
Dolomite (Sandy)	5	2	1,027	0.50
Dolomite (Stylolite developed)	8	2	1,545	0.30
Chert	10	1	26,726	0.15
Shale	11	4	2,471	1.15
Mineralization(Pod, Veinlets)	13	7	2,914	2.02
Sandstone	15	2	2,964	0.12
Limestone	19	1	3,360	4.68

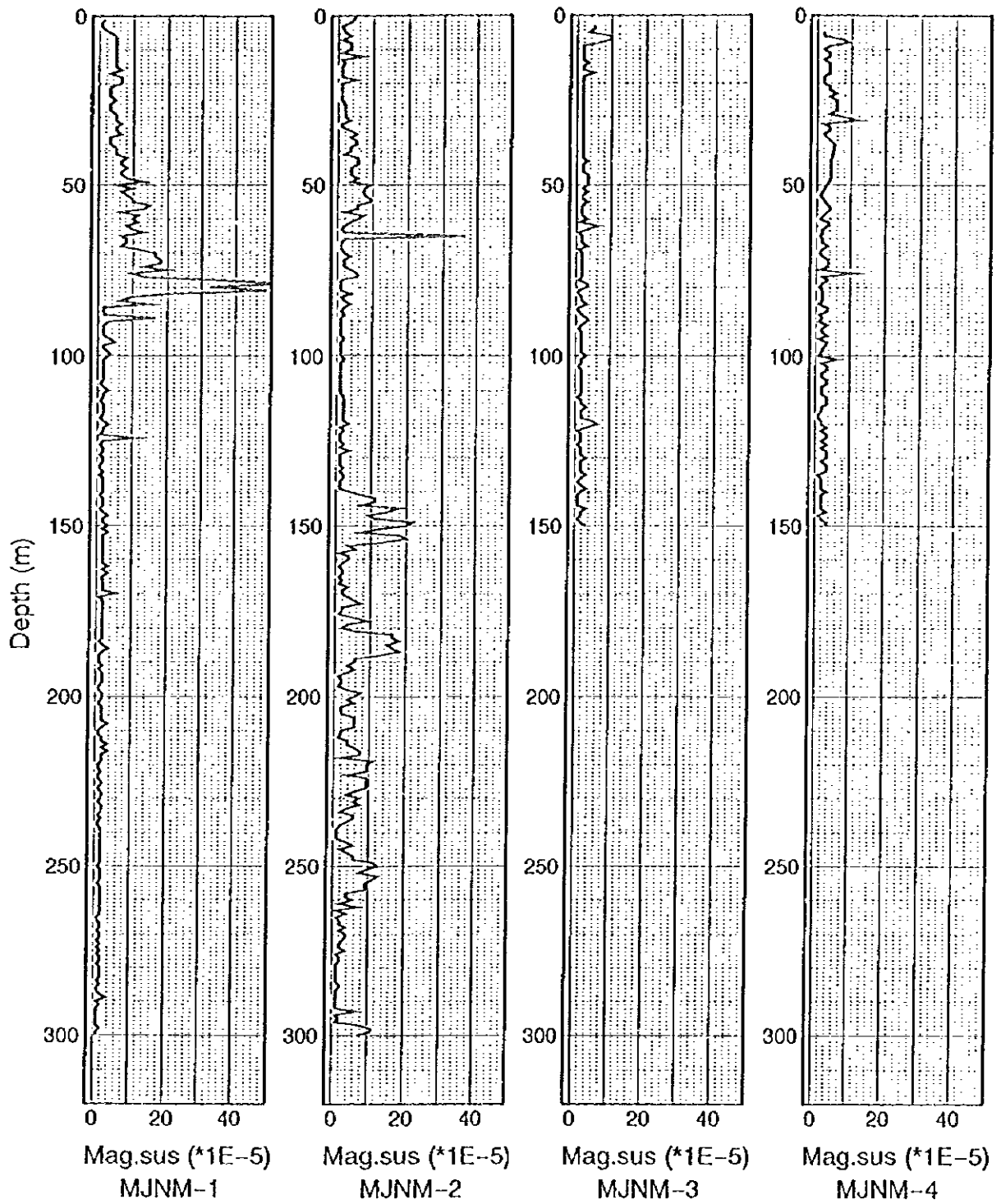


Fig. II - 2 - 1 Magnetic susceptibility distribution of drill holes

Table II - 2 - 7 Electric Conductivity of Ground Water

Location	Observed data			Temperature = 20°C		
	Date	Conductivity mS/cm	Reisitivity Ω · m	Water temp. °C	Conductivity mS/cm	Reisitivity Ω · m
Near the MJNM-2	11/4/96	1.275	7.84	30.0	1.020	9.80
Max Planck Station	11/4/96	1.014	9.86	28.0	0.852	11.74
Otjikoto Lake	11/4/96	0.970	10.31	28.0	0.815	12.27
Near the MJNM-4	11/4/96	0.974	10.27	26.0	0.857	11.67
Around Abenab	11/4/96	0.960	10.42	28.0	0.806	12.40
Grasvlakte farm	11/10/96	1.270	7.87	36.4	0.853	11.72
Tamboti park	11/10/96	1.100	9.09	29.5	0.891	11.22
Guinab farm	11/11/96	1.113	8.98	26.9	0.959	10.42
Average					0.882	11.41

Archieの式である。

$$\rho_s = a \rho_w / \phi^m S^n$$

{ ρ_s : 岩石 (砂岩) の比抵抗 ; a : 比例定数 ; ρ_w : 水の比抵抗 ; ϕ 間隙率
 S : 水の飽和度 ; m : cementation factor ; n : 飽和指数 (= 2) }

試料中に金属鉱物等の電導性鉱物が存在する場合、その種類や量によって岩石の比抵抗は大きく変化する。電導性鉱物の量比が増加するほど比抵抗は低くなり、この量比が5%程度では殆ど影響はないが25%以上ではその電導性鉱物の比抵抗の1/2以下になり、比抵抗は全体として著しく減少する。

粘土鉱物が存在する場合はArchieの式で評価出来ない。例として泥質岩はArchieの式に従わず、予測値よりも大幅に低い比抵抗を示す。粘土鉱物の電気伝導は鉱物表面に沿い、電気二重層過剰イオン等に左右されるため、表面積が大きいものほど大きくなる。また、粘土鉱物固有の陽イオン交換容量 (CEC:cation exchange capacity) の大きさにも依存し、この容量が大きければ電気伝導度は大きくなる。例として、パーミキュライトのCECはかなり大きく、これを多く含む風化土壌、岩石は著しく低比抵抗になる。一般に、塩基性岩石の風化による粘土鉱物の方が、酸性岩起源の粘土鉱物よりも低比抵抗となり、(Palacky, 1986) によれば前者は 2~20 Ω·m、後者は20~200 Ω·m程度である。

これらの、岩石比抵抗に関する特徴は特に空中物理探査の結果の解釈に重要である。

(2) IP法の原理

地面に電流を流すと地面を構成する媒質中に各種の電気化学的現象が発生するが、このうち、IP法で測定されるのは次の2つである。

Over voltage effect

通電により硫化物や金属導体の表面に電気二重層を生じ、電流を切ると通電方向とは逆の方向に放電する。この現象はイオン伝導と電子伝導の組み合わせによる効果である。この現象を起こすものは電子伝導性をもつ鉱物であって、IP法の探査対象になる。

岩石・土壌の比抵抗に及ぼす諸要因		
低 湿 (水の比抵抗が支配要因)	←----	岩石・土壌の比抵抗値 ρ 乾・湿状態 ----> (電導性鉱物の量が支配要因)
低 (イオン濃度大) 大	←----	孔隙水の比抵抗 ρ_w 孔隙率 (飽和度) 少
大	←----	孔隙水の飽和度 少
多 (25%以上影響大)	←----	電導性鉱物の量 少 (5%以下殆ど影響無し)
多 大	←-----	粘土鉱物 粘土鉱物の陽イオン交換能 -----> 少

建設省土木研究所；共同研究報告書 第113号より引用

Normal effect 又はBackground

通常の岩石が通電によっていくらか分極するもので、これは岩石の空隙に少量混在する粘土鉱物の膜分極が主因である。種々の粘土鉱物のうちではモンモリロンナイトが最大であり、カオリンは小さい。また、粘土の容積比が5%程度の時に膜分極が最大値を示すが、容積比がその前後のときは減少する。

膜分極の最大値はモンモリロンナイト石量比5%付近にあってFE値で表せば約2%であり、硫化鉱物のOver Voltage effectに比べ極めて小さい。

IP法のIP効果測定値は分極率と呼ばれ、 $V_s(t_n)/V_p$ {mV/V} で表される。

参考までに、周波数法およびタイムドメイン法における分極率は実験値として、それぞれ1%と5mV/Vが対応する。

(3) 測定結果の解析

第1年次に行った物性測定結果と比較する目的で、この時用いた分類を適用して Fig. II-2-2を作成し、解釈を行った。この図の分類は測定結果を解釈するうえで、比抵抗、分極率をそれぞれ、3分類、4分類したもので、区分の基準は物理探査に視点を置いており相対的なものである。以下にその範囲の特徴と測定結果との対比を行った。

II-2-4 考 察

(1) 緻密な塊状ドロマイト中にポッド状の方鉛鉱を含む鉱化部分のサンプルは比抵抗が平均で $10000\Omega\cdot m$ と高い。鉱石そのものは低比抵抗であると考えられるが、鉱石周辺に低比抵抗鉱染帯が伴わないことが原因であると考えられる。このような鉱化が散在している場合、直流電気探査では見逃してしまう可能性がある。しかし、電磁探査の場合は周辺の高比抵抗岩相を透過して、低比抵抗部分を抽出できる。

(2) 表層のカルクリートのなかでかなり高いIP値をもつものが見られる。特に、レキを含むものは低比抵抗でもあり、表層からの直流電気探査を困難にする要因と考えられる。

範 囲	特 徴 と 測 定 結 果
比抵抗 A-----300Ω・m以下	塊状硫化鉱物、風化粘土鉱物に相当するゾーンである。頁岩、カルクリート（レキを含む）がこの範囲に含まれ、探査の大きな障壁となる。
B-----300~4000Ω・m	マクロ的に見て、母岩中に鉱石が点在する場合、風化した頁岩等に相当する範囲と考えられる。実際の比抵抗探査での対象領域となる可能性があるが、今回の測定結果の多くはこの範囲に入り、探査の障壁となる。
C-----4000Ω・m以上	新鮮な岩石に相当する範囲で、今回の測定結果では塊状のドロマイトの多くがこの範囲に入る。また、ポッド状の方鉛鉱を含む鉱化部分のサンプルも含まれる。
分極率 I-----100mV/V以上	塊状硫化鉱物に相当するゾーンである。量的に多ければ十分探査の対象となる。今回のサンプルでは見られなかった。
II-----100~10mV/V	母岩中に鉱石が点在する場合に相当するものと考えられる。実際のIP探査での最も一般的な対象領域である。今回のサンプルでは、鉱化部分の一部のものがこの範囲に入る。
III-----10~1mV/V	弱鉱染体、粘土鉱物の多い岩石に相当するものと考えられる。今回のサンプルでは鉱化部分がこの範囲に入るが、他の岩相では半数がこの範囲に入り、レキを含んだカルクリートが比較的大きな値をもっている。
IV-----1mV以下	低IP帯である。主にドロマイト、チャート、塊状のカルクリート等がこの範囲に入る。

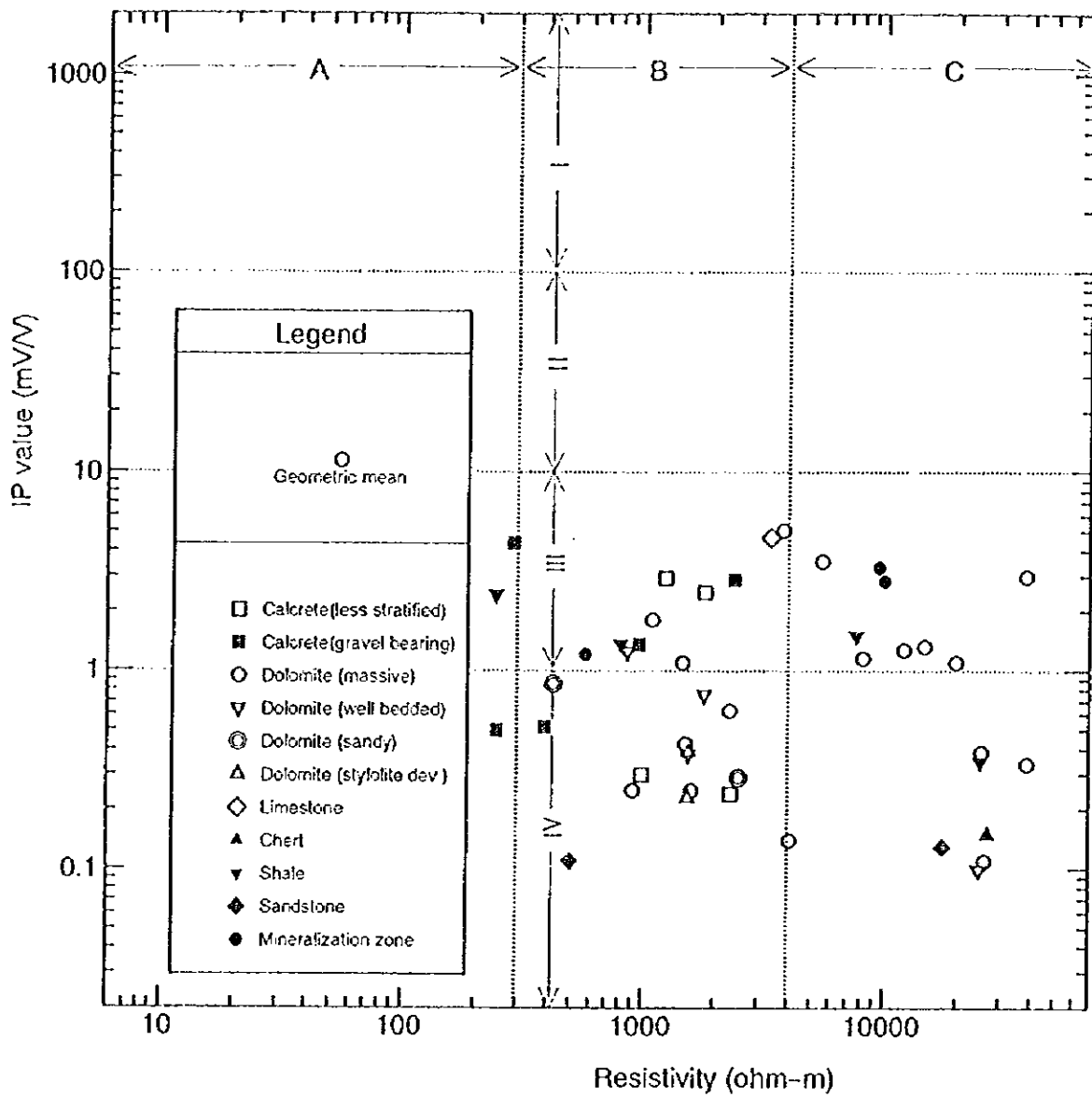


Fig. II - 2 - 2 Core sample resistivity v.s. IP value

第3章 空中物理探査

II-3-1 空中電磁探査の目的と手法

カルクリートに覆われ、上部原生代の地層が露出してない地域において、地下の比抵抗分布を調べ、硫化物鉱床に起因する低比抵抗異常を抽出することを目的とする。

電磁探査法 (Electromagnetic method EM法) とは、電磁誘導作用を利用して地下に存在する鉱体等の電導体を探査し、同時に大地の比抵抗分布を調査する方法である。電磁探査法の測定装置は多種類あるが、今回の調査に用いた Digheem V型 空中電磁法装置は同相/離相 (inphase/quadrature) 方式を採用している。

同相/離相方式は、一組の送信コイル (Tx) と受信コイル (Rx) の間隔を一定に保ち、大地の電磁誘導の影響によって変化する両コイル間の相互インダクタンスの位相成分 (同相成分と離相成分) を測定する。EM装置を測線上で移動しつつ相互インダクタンスの変化を観測し、後記の理論により測定値を解析することにより、測線下の大地の電気比抵抗の分布が求められる。

Fig. II-3-1 にEM法における電磁誘導作用の概念を示す。

送信コイル (Tx) に交流を流すと、実線で示されるような1次場 (交流磁場) が発生する。1次場が地中の電導体を横切る時、電導体の中に渦電流が流れる。渦電流は図中に破線で示されるような2次場を形成する。受信コイル (Rx) では、この2次場が測定される。

地下の電導体と送信・受信コイルとの電磁応答を定性的に理解するために、簡単な導体モデルとして抵抗R、自己インダクタンスLを持つ1巻コイルを考える。送信コイルに周波数f [Hz]の交流電流を流すと1次場 (Hp) が作られる。1巻コイル中の誘導電流は2次場 (Hs) を作る。受信コイルは Hp と Hs の合成磁場を検出する。Hs と Hp の比は次式で表される (Grant and West 1967)。

$$H_s/H_p = K \cdot \frac{\alpha^2 + j\alpha}{1 + \alpha^2} = K \cdot f(\alpha), \quad \alpha = \omega L/R, \quad \omega = 2\pi f$$

Kは、自己インダクタンスとコイルの相対位置で決まる3個の相互インダクタンスを含む係数で、電磁応答の振幅を表す。コイル間隔が大きくなるとKは小さくなり、EMセンサーの高度が高いほど振幅が減少することを示している。

f(α) は応答関数と呼ばれる複素関数で、Hs が実数部と虚数部を持つことを示している。実数部はHpと同相 (in-phase) であり、虚数部は離相 (out-of-phase, quadrature) である。f

(α) の絶対値は1より小さく、抵抗Rが大きいとき0に近く、Rが小さいとき1に近くなる。これは大地の比抵抗値が低いほど電磁応答が大きくなることを意味している。

Fig. II-3-2 は1次場 Hpと2次場 Hsの位相関係を示す。同相成分 Hiと離相成分 Hqを

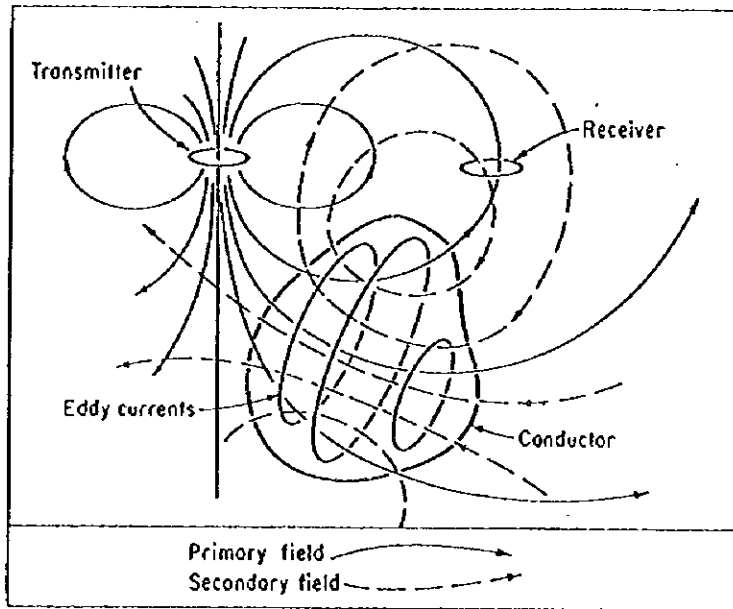


Fig. II - 3 - 1 Concept of EM induction

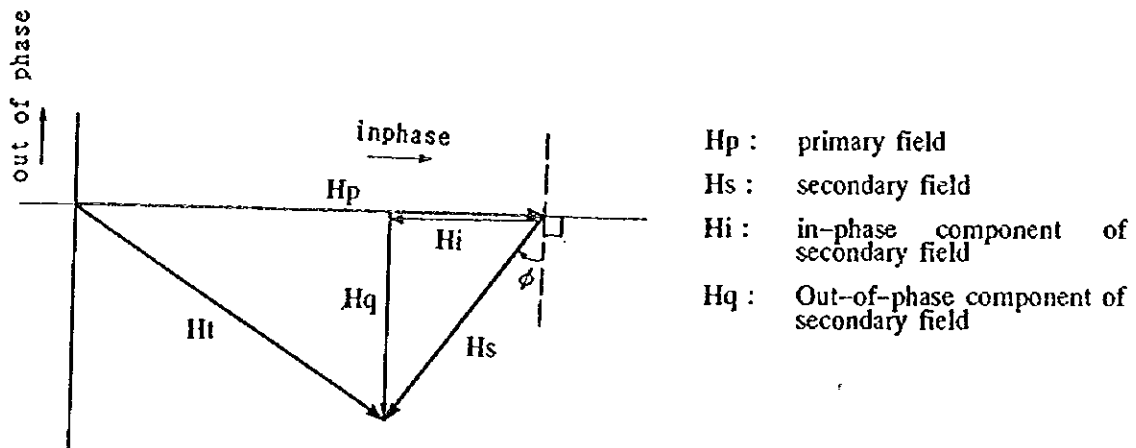


Fig. II - 3 - 2 Diagram of phase relationship

同時測定すれば α を計算できるので、1巻きコイルの電氣的性質を推定することができる。

空中電磁法は航空機やヘリコプターにEM装置を積載して、広い地域の大地の導電率（比抵抗）分布を調査する方法である。計画測線の上を30m~100mの対地高度でEMセンサーを曳航して電磁応答を連続記録し、記録を解析して大地比抵抗の分布図を作成する。 Airborne Electromagnetic method と言いAEM法と略記される。また航空機としてヘリコプターを用いる場合にはHelicopterborne EM method と呼ばれ、HEM法と略記される。

II-3-2 調査仕様と測定装置

II-3-2-1 調査仕様

主な調査仕様は次のとおりである。

(1) 調査位置および面積

Fig. II-1-1 に示す調査範囲（面積904 km²）において比抵抗データおよび磁気データを取得した。

(2) 飛行測線方向は、原則として南北（真北方向）に測線間隔200m、タイラインはこれに直交する方向に測線間隔5kmとした。最短測線は2500m。測線総延長は4895 km。

(3) 航空機は Bell-Long Ranger III ZS-RFA ヘリコプターを使用した。

(4) 飛行高度は、電磁機測定機器で35m、磁気で50mとした。

(5) 水平サンプリング間隔は6m以内とした。

(6) 航法はGPS-ビデオ・トラッキング併用法を用いた。

飛行航跡図をFig. II-3-3 に飛行測線の境界座標をTable II-3-1 に掲げる。

Table II - 3 - 1 Boundary Points of the Survey Area

	XTM	YTM	緯 度			経 度		
			度	分	秒	度	分	秒
1	131410E	303956S	19	15	00.000S	17	45	00.000E
2	131503E	316871S	19	08	00.000S	17	45	00.000E
3	63118E	317233S	19	08	00.000S	18	24	00.000E
4	63083E	307087S	19	13	30.000S	18	24	00.000E
5	87617E	306986S	19	13	30.000S	18	10	00.000E
6	87579E	299053S	19	17	48.000S	18	10	00.000E
7	105096E	298960S	19	17	48.000S	18	00	00.000E
8	105126E	304126S	19	15	00.000S	18	00	00.000E

II-3-2-2 測定装置

今回の空中電磁法調査にはカナダのDIGHEM社製のDIGHEM V型空中電磁法システムを用いた。DIGHEM Vシステムは、EM装置（電磁応答測定装置）、高感度磁力計、電波高度計、GPS航法装置、アナログ記録計、デジタル記録計およびビデオ・カメラから成っている。主要装置の仕様をTable II-3-2 に示す。

Fig. II-3-4 に測定時の概観を示す。今回の調査にはGeodass社所有のベル社製 Long Ranger III型ジェットヘリコプターを用い、機内にEMコンソールを搭載した。

EMセンサー（EMバード）及び磁気センサー（磁気バード）は長さ30mのケーブルで曳航される。曳航ケーブルはスチールワイヤーの付随した多芯ケーブルである。安全のためにEMバードに衝撃荷重が掛かった場合にはシアピンが切れて、ケーブルとバードはヘリコプターから切り離されるように工夫してある。

EM装置は電磁センサーとEMコンソールに組み込まれたEM測定回路とから成る。EMバードは長さ9m、直径50cmの強化プラスチック円筒で、5組の送信・受信コイルペアを内蔵しており、ケーブルでEMコンソールに接続されている。

DIGHEM V型装置で測定する電磁応答は5周波数の各々について2次場の同相と離相、合計10成分であり、同相成分 H_i/H_p 、離相成分 H_q/H_p がデジタル記録される。3組の水平コイル配置（Horizontal-coplanar）は多層構造の比抵抗マッピングに適し、他の2組の鉛直コイル配置（Vertical-coaxial）は鉛直脈状構造の検出に優れている。

AEM法の場合、2次場の大きさは1次場と比べて非常に小さいので、2次場を高精度で測定するためにEM装置の回路は1次場を除去して2次場を高精度で測定するように設計してある。

磁力計は、磁気センサーと磁気測定回路から成り、地磁気の全磁力を測定する。磁気センサーは長さ3m、直径20cmの強化プラスチック円筒の中に高感度セシウム磁力計を内蔵している。磁気測定回路は機内のEMコンソールの中に組み込まれており、全磁力測定値はデジタル記録計に収録される。

GPSアンテナはキャビンの上の機外に装着した。GPS計算機はEMコンソールに組み込まれている。位置座標測定値はデジタル記録計に収録される。

航跡確認用ビデオカメラ及び電波高度計アンテナは、機体後部に装着した。電波高度計で測定されるヘリコプターの対地高度はデジタル記録計に収録される。測定時の各種装置の電源はヘリコプターのバッテリーを利用する。

II-3-3 測定方法

飛行調査開始の前に、地上でEM機器の調整を行う。測定回路を30分以上ウォーミングアップした後、受信コイルに近い所定位置にフェライト棒を置いて各周波数ごとの同相及び離相成分の位相調整を行い、次にQコイルを置いて増幅器の利得調整を行う。

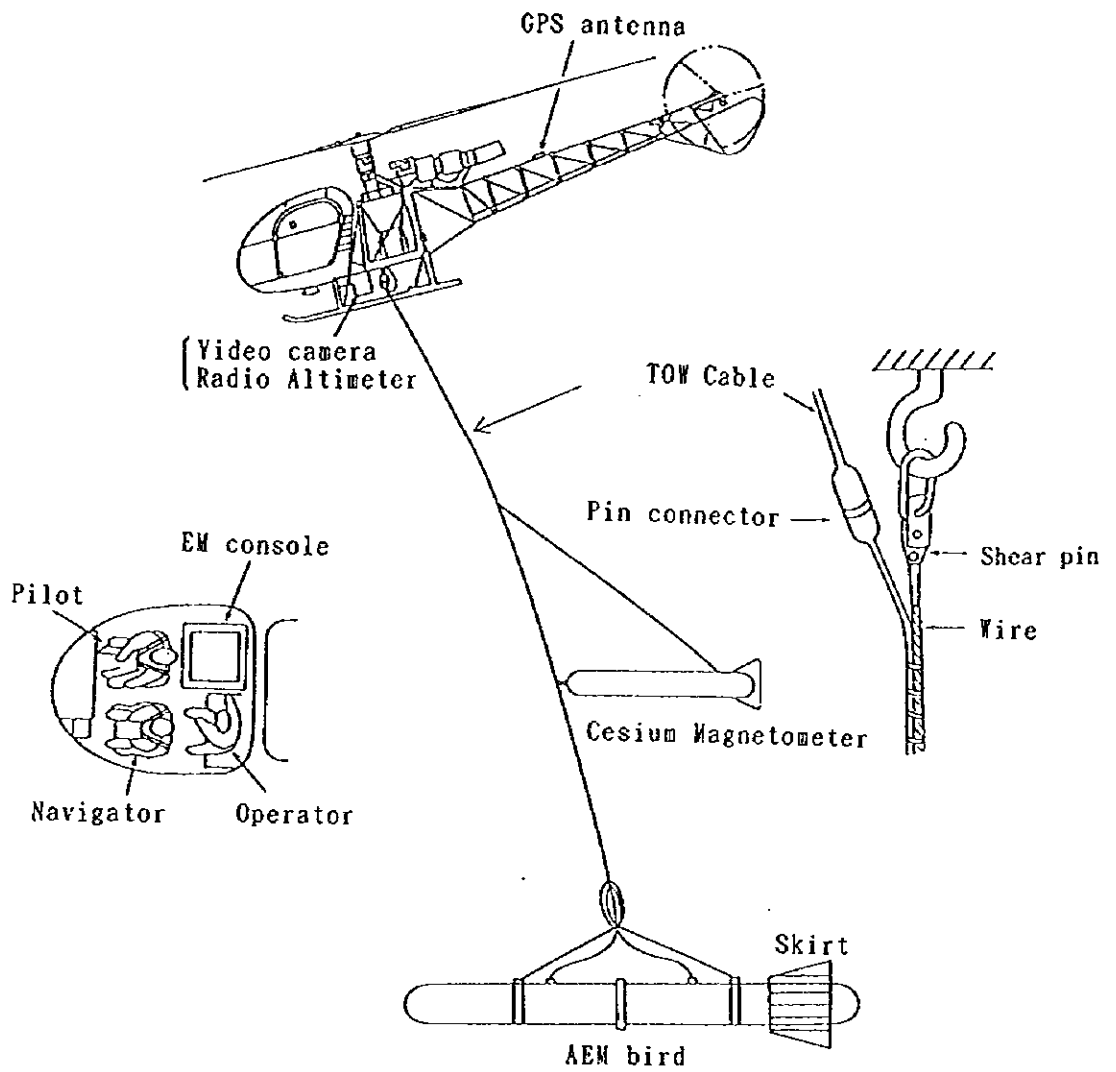


Fig. II - 3 - 4 AEM instruments in use

Table II - 3 - 2 Specifications of Equipment for Airborne Electromagnetic Survey

機 器	メーカー・型 式・仕 様等	数 量
航 空 機 (ヘリコプター)	Bell Long Ranger L3-ZS-RFA	1 機
磁 気 測 定 機	Scintrex H8 セシウム磁力計	1 台
空中電磁測定システム	RMS DAS 8 RMS 4183A マイクロコンピュータ部 RMS 4185A フラッグインプット部 RMS 4239A テープインターフェイス部 RMS 4272A スマートシリアルインターフェイス部 RMS 4137A デジタルインターフェイス部 RMS TDC 3620 テープカトリッジ記録計 RMS GR33A チャート記録計	1 式
補 正 機	RMS AADC II, 27 項目	1 台
航跡確認システム	National Panasonic AG-7450 S-VHS ビデオシステム	1 台
航行航跡修正方式	NovAtel 3151R GPS	2 台
高度計測システム	Sperry 2000-A 型レーダー-リニア高度計 Intellisensor Air-DB-2B デジタル気圧計	1 台 1 台
地上固定磁気測定機	Scintrex H8型 Cs 磁力計	1 台
同 受信機	NovAtel 3151 GPS レシーバー NovAtel GPScardTM Performance 3151R 使用	1 台

ヘリポートの近くに設置した自動記録式のプロトン磁力計は磁気嵐のモニターや地磁気の変動を記録し、全磁力測定値の日変化補正に用いられる。

ヘリコプターにはパイロット、オペレーター及びナビゲーターの3人が搭乗した。

ヘリポートを飛び立ち測線の測定飛行に入る前に大地の影響が入らないように300m以上の上空を飛行して各EM測定成分のゼロレベルのドリフトのリセットを行う。また飛行調査中にも15～20分ごとにリセットを繰り返す。

EMバードの対地高度を30m～100m程度に保つように、ヘリコプターは対地高度を60m～130mで飛行する。飛行速度は地形状況に応じて異なり、山岳部で30～40km/h、平野部で100km/h程度である。

今回の調査飛行には主としてGPS航法を採用し、一部では可視航法を併用した。

GPS航法装置はGPS衛星からの情報を受信して航空機の現在位置を測定し、パイロットの前面に設置したインジケーターに予定測線と現在位置とを表示する。飛行航跡の座標は0.1秒ごとにデジタル記録され、測線図作成に用いられる。

可視航法では、1/50,000の地形図に飛行予定測線を記入し、ナビゲーションに用いた。ナビゲーターはヘリコプターが地上の識別し易い目標物を通過したときフィデューシャル番号を測線図上にマークする。このフィデューシャル番号は計器に0.1秒ごとに表示される通し番号で、ビデオ画像にも表示されている。後に地形図上にマークした番号とビデオ画像とを対比することにより航跡が標定される。

オペレーターは測定器類が正常に動作しているかどうかを確認すると同時にモニター用のアナログ記録を監視し、データの品質管理を行う。特に空電ノイズ(sferics)の出現、EM記録のゼロレベルのドリフトに注意する。

約2時間の測定飛行の後に給油のために基地へ戻る。着陸の際には地上員がEMバードと磁気バードを空中で受け止め、衝撃が無いように地上に置く。給油時間は20分～30分程度である。測定回路のドリフトを抑えるため、給油中も地上電源により測定装置に給電する。

以上のサイクルの繰り返しによって測定作業は続行される。乱気流の発生時にはヘリコプターの航行が困難であり、また空電ノイズが多く発生する時にはデータにノイズの混入が著しいために、それぞれ測定飛行は中止する。

飛行記録表をFig. II-3-3に掲げる。

II-3-4 解析方法

データを取得してからの見掛比抵抗平面および断面が得られるまでの解析フローチャートをFig. II-3-6に示す。

(データベース)

デジタル記録計で磁気テープに記録された同相/離相成分、全磁力、対地高度、GPS測位

Table II - 3 - 3 Production Summary of Airborne Electromagnetic Survey

Date	Day	Flight No.	LineKm	Comments
19-Sep-96	Thur.			Mobilise from Windhoek to Tsumeb Work on EM bird (frequency change)
20-Sep-96	Fri.			Work on EM bird
21-Sep-96	Sat.			Work on EM bird
22-Sep-96	Sun.			First flight aborted - nav. problems
23-Sep-96	Mon.	1,2,3,4	400	Operations normal
24-Sep-96	Tues.	5	100	Work on EM bird - one flight only
25-Sep-96	Wed.			100 hour inspection
26-Sep-96	Thur.			100 hour inspection
27-Sep-96	Fri.	6,7,8,9	650	Operations normal
28-Sep-96	Sat.	10,11,12	430	Very turbulent
29-Sep-96	Sun.	13,14	265	Cut short due to turbulence
30-Sep-96	Mon.	15a,15b,16	265	Mag spiking & EM noise
1-Oct-96	Tues.	17		Mag console u/s & EM frequency problems
2-Oct-96	Wed.	18	100	Mag u/s, infield frequency change on EM
3-Oct-96	Thur.			Analog input module failed
4-Oct-96	Fri.			Request replacement parts
5-Oct-96	Sat.			Collect parts in Windhoek
6-Oct-96	Sun.			Gearbox mount problem
7-Oct-96	Mon.			Wait for parts to be sent to Windhoek
8-Oct-96	Tues.			Helicopter to Windhoek
9-Oct-96	Wed.			Helicopter repaired and return
10-Oct-96	Thur.	19	150	One flight due to intermittent mag console problem
11-Oct-96	Fri.	20,21,22	504	Operations normal
12-Oct-96	Sat.	23,24,25,26,27	556	Operations normal
13-Oct-96	Sun.	28,29,30	420	Operations normal - spherics in pm
14-Oct-96	Mon.	31,32,33	337	Operations normal, late start due to GPS batteries low - replaced
15-Oct-96	Tues.	34,35,36	337	Operations normal
16-Oct-96	Wed.	37,38,39	275	Operations normal
17-Oct-96	Thur.			Final processing & packing
18-Oct-96	Fri.			Demobilise

座標など各種の測定データは電子計算機で編集されて、記憶装置の中にデータベースとして格納され、以後の各種のデータ処理および解析に用いられる。

(飛行測線図の作成)

飛行航跡のGPS座標データを用いて測線図を作図する。GPS衛星データの欠落部や誤差の大きい部分はビデオ記録テープと水系図(地形図)を対比して測線図を修正する。

(見掛比抵抗の計算)

1個の周波数で測定された同相成分と離相成分の値から、以下に記述する電磁応答理論により見掛比抵抗値が計算される。

EM法で利用される周波数は変位電流の影響が無視できるほど十分に低いので、マクスウェルの式から導かれる基本式は次のように表される。

$$\text{導電体内: } \nabla^2 H = j \mu \omega \sigma H \quad (\text{ベクトルの拡散方程式})$$

$$\text{導電体外: } \nabla^2 H = 0 \quad (\text{ラプラスの方程式})$$

ここで H は磁場ベクトル、 j は虚数単位 $\{=\text{SQR}(-1)\}$ 、 μ は透磁率、 σ は電導度である。

大地を水平2層構造と仮定した場合のEM応答の表現式は基本式から導かれて、次式で与えられている (Frischknecht, 1967)。

$$\text{Horizontal-coplanar coil-pair: } (H_s/H_p)_H = B^3 T_H$$

$$\text{Vertical-coaxial coil-pair: } (H_s/H_p)_V = B^2 (T_V - B T_H) / 2$$

ここで

$$T_H(A, B) = \int_0^{\infty} R(D, g) g^2 e^{-gA} J_0(gB) dg$$

$$T_V(A, B) = \int_0^{\infty} R(D, g) g^2 e^{-gA} J_1(gB) dg$$

$$R(D, g) = 1 - 2g \frac{\{(U+V)+(U-V)e^{-UD}\}}{(U+g)(U+V)-(U-g)(U-V)e^{-UD}}$$

$$U = (g^2 + 2j)^{1/2}$$

$$V = (g^2 + 2jk)^{1/2}$$

J_0 : 0次のベッセル関数

J_1 : 1次のベッセル関数

g : 積分変数

$$\delta = \left[\frac{2}{\rho_1 \mu \omega} \right]^{1/2} \quad (\mu: \text{透磁率}), \quad \omega = 2\pi f$$

$$k = \rho_1 / \rho_2$$

$$A = 2h / \delta \quad (h : \text{バードの対地高度})$$

$$B = s / \delta \quad (s : \text{送信・受信コイル間隔})$$

$$D = 2d / \delta \quad (d : \text{第1層の厚さ})$$

大地の見掛比抵抗値を計算するにはフェーザー図 (phasor diagram) を利用する。

フェーザー図 (phasor diagram) は均質大地の比抵抗 (ρ) と EM センサーの高度 (h) とを媒数として特定の EM 装置と均質大地との電磁応答を理論式で計算し、複素数平面の横軸に同相成分を、縦軸に離相成分をとり、2つの媒数に対応する2組の曲線群を作図したものである。

Fig. II-3-5 は Horizontal-coplanar 配置、 $s = 8.0\text{m}$ 、 $f = 900\text{Hz}$ の装置に適用されるフェーザー図の例である。測定された同相、離相成分をプロットすると見掛比抵抗値 (ρ_a) と見掛の高度 (h_a) を読み取ることができる。同図から測定高度が高くなると応答振幅が減少すること、大地の比抵抗が低くなると H_i/H_q の比が大きくなることが分かる。

DIGHEM V 装置の5組のコイルペアに対応して5枚のフェーザー図が用意されており、4種類の各周波数について見掛比抵抗 (ρ_a) が計算される。自動解析に用いられるコンピューター・ソフトウェアには上述のフェーザー図が数値データとして組み込まれており、データベースから同相及び離相成分が入力されると見掛比抵抗 $\rho_a[\Omega \cdot \text{m}]$ が出力される。

(比抵抗マッピング)

上記の方法で計算された見掛比抵抗値を用いて 900 Hz, 7200 Hz, 56000 Hz の3種類の周波数について見掛比抵抗値分布平面図を作図した。作図にはカラープロッターを用いた。

II-3-5 測定結果と解析

コプランナーコイル配置の3周波数を用いて見掛比抵抗平面図を作成した。また、ディファレンシャル比抵抗・深度の計算方法 (Huang, Fraser, 1996) を用いた見掛比抵抗断面図を作成した。Fig. II-3-7~Fig. II-3-12に平面図を、Fig. II-3-13に断面図を示す。なお、Fig. II-3-10~Fig. II-3-12は比抵抗リニアメントを強調するための陰影図である。第1年次の磁気探査解析図と対比するために、磁気探査で用いた地域のインデックスを適用した。

II-3-5-1 56000Hzの比抵抗分布の解析 (Fig. II-3-7, Fig. II-3-10)

(1) 3周波数の見掛比抵抗平面図のうち、56000Hzは最も浅部の構造を反映していると考えられる。各周波数とも探査深度は大地の比抵抗によって変化するが、56000Hzでは断面図に見られるように $10000\Omega \cdot \text{m}$ 程度の高比抵抗域で約 100m、 $100\Omega \cdot \text{m}$ の低比抵抗領域では 10m ほどである。

(2) 3周波数ともに共通するが、地質図や磁気異常図との対比により、比抵抗構造は概ね地質構造を反映している。A~Dの領域ではほぼ並行した東西方向の背斜構造と向斜構造が4

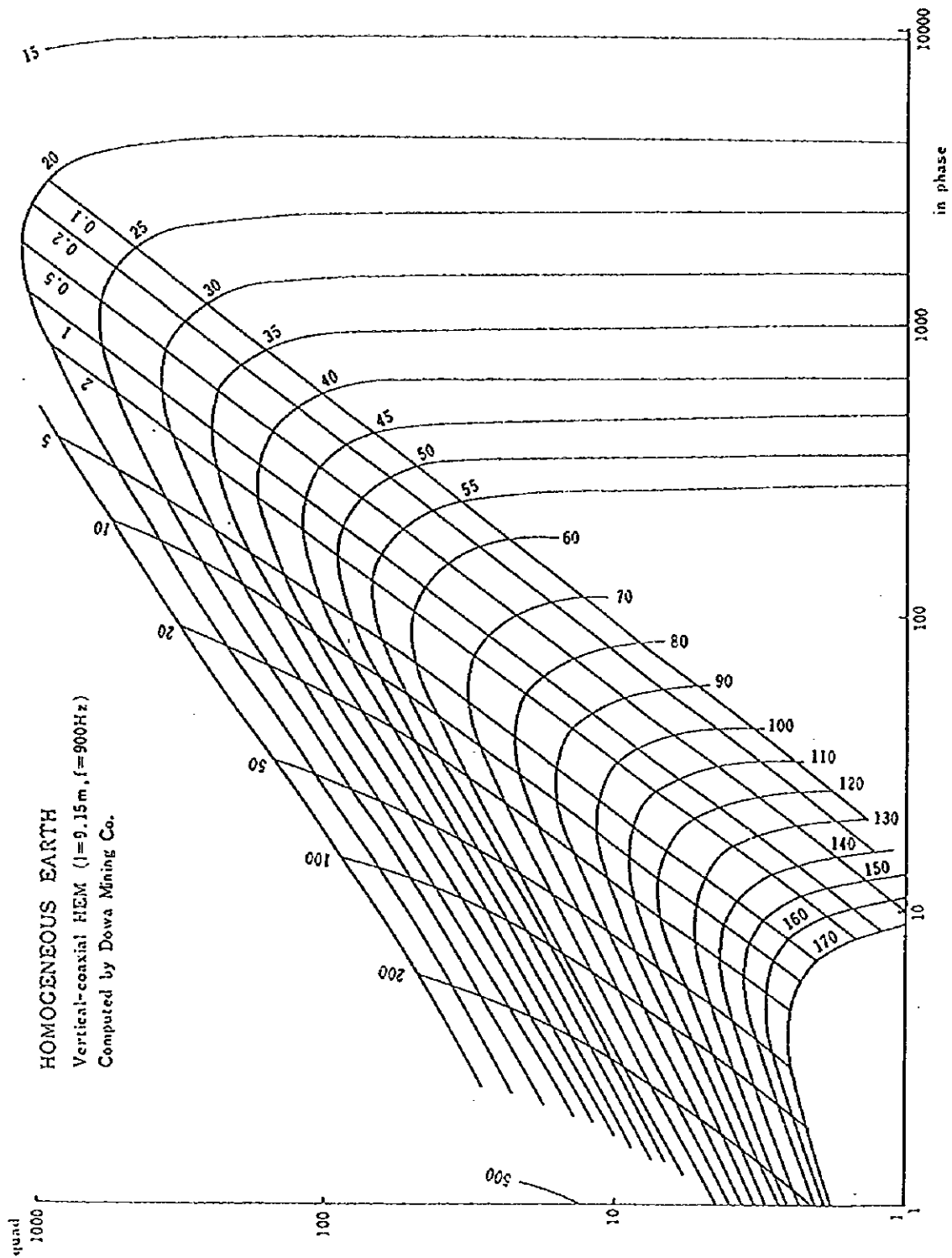


Fig. II - 3 - 5 Phasor diagram

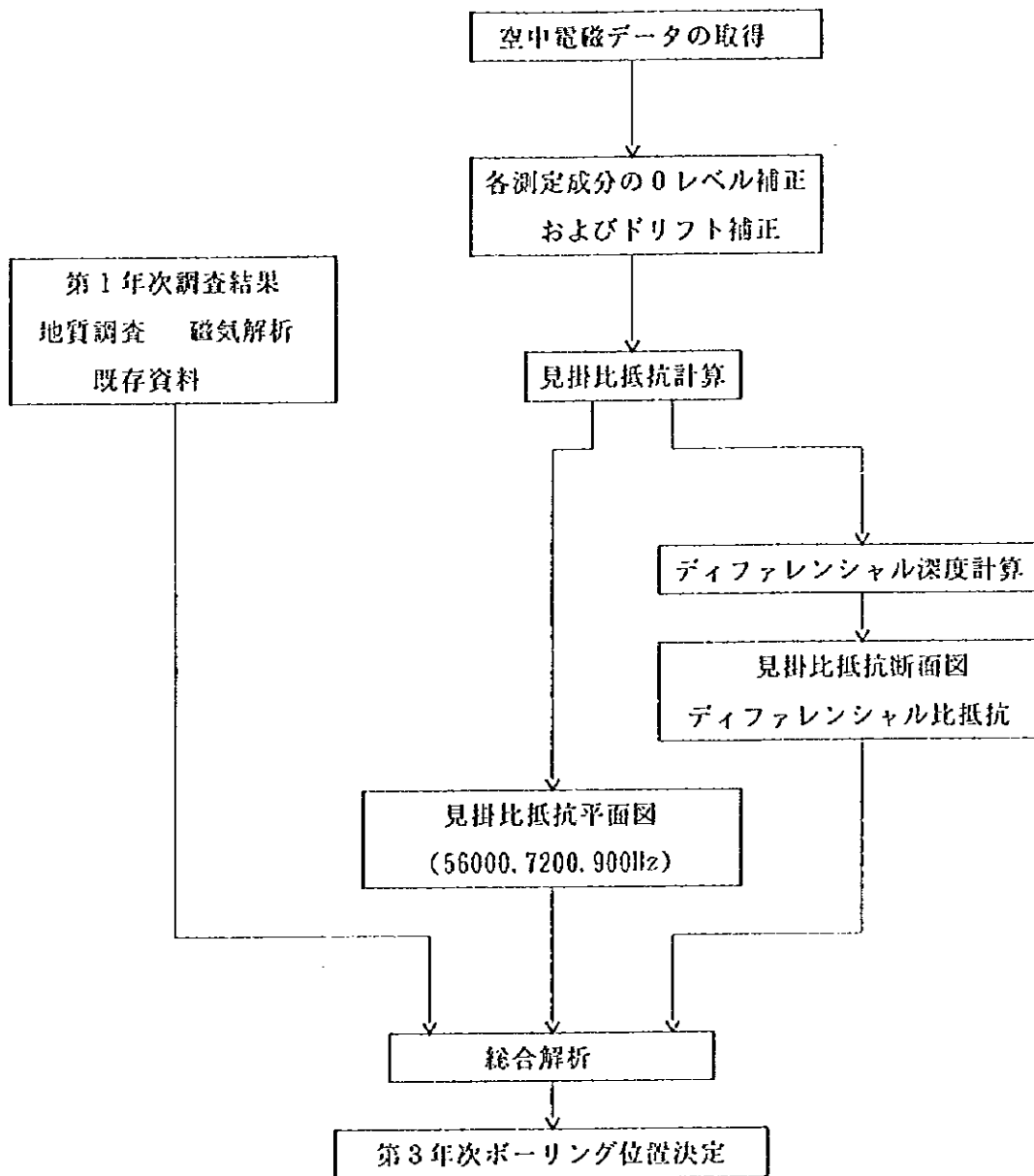


Fig. II - 3 - 6 Flow chart of the electromagnetic survey

本見られる。地域西側のA、B領域では東にブランチし、D4領域では西にブランチする。その中間域（B3南）では褶曲構造は閉じている。向背斜構造の翼部に沿った蛇行した低比抵抗帯はTsumeb亜層群上部の比較的泥質あるいは砂質の層準と想定される。さらに、その内側の高比抵抗帯はTsumeb亜層群最上位のドロマイトであり、またさらにその内側の広い低比抵抗域がMulden層群と考えられる。この比抵抗によるTsumeb亜層群とMulden層群との境界は磁気探査で推定したそれと良く一致する。

(3) 地域西側Bで同じMulden層群が地下に存在すると推定される地域でも、南側の方が低比抵抗である。南側はより高比抵抗の表層カルクリートが無いが薄いためと考えられる。

(4) 地域東側については全体的に高比抵抗であるが、一部E4地域に低比抵抗域が見られる。この比抵抗境界は磁気探査で推定したTsumeb層と基盤岩が浅部にある地帯を区切る断層にほぼ一致する。

(5) C3中央域に長さ約2Km幅500m程度の独立した低比抵抗域が、Tsumeb層ドロマイトと考えられる高比抵抗地域の中に見られる。伸張方向が褶曲軸とほぼ平行であり、推定層準がTsumeb層上位であることから、この層準中の低比抵抗な岩相と考えるのが最も妥当である。しかし、3周波とも約50~100Ω・m程度の同ような比抵抗値を持ち、深度150mあるいはそれ以上にまで達しているものと考えられる。

(6) A2、A3境界付近に見られる広い低比抵抗域は56000Hzで最も顕著であり、より低い周波数では範囲が狭まり、かつ高比抵抗となることから浅部の風化層による異常か、あるいは地下水によるものと考えられる。比抵抗は表層部で50Ω・m、50m下で150Ω・m程度であり、それより深部では数百Ω・mとなる。

II-3-5-2 7200Hzの比抵抗分布の解析 (Fig. II-3-8、Fig. II-3-11)

(1) 大局的な傾向は56000Hzに準ずるが、全体的に、より低比抵抗になる。探査深度は8000Ω・m程度の高比抵抗領域で300m、100Ω・mの低比抵抗領域で50mほどである。

(2) 56000Hzの(2)で述べたTsumeb層上位の低比抵抗層準はより低比抵抗となるが、一方A3中部域のMulden層群は逆にやや比抵抗が高くなる。このことは、前者がより深部に達しているのに対し、Mulden層群の層厚はこの地点では薄いか、あるいは極表層が風化によって低比抵抗化していることを意味すると考えられる。

(3) B2、3に分布が想定されるMulden層群はより低比抵抗となる。

(4) 地域中央E3からH3にかけて、Tsumeb層上位の低比抵抗バンドをキーベッドとして地層境界が追跡できる。また、G3、H3に西にブランチするMulden層向斜構造を表す低比抵抗領域が認められる。

(5) 磁気探査で推定された地域南東部の基盤岩地域は全体的に低比抵抗となる。塩基性岩体の風化による粘土鉱物(Saplorite)によるものと考えられる。なお、断面図からはこの低比抵抗層の厚さは50m程度であり、その下位は新鮮な高比抵抗基盤が考えられる。

(6) H2、3にNW系の低比抵抗リニアメントが認められる。56000Hzでは殆ど認められず、逆に900Hzでも明瞭なことから、深部につながる低比抵抗帯であることが予想される。このリニアメントは付近の堆積岩の構造を切り、褶曲軸と重なる付近でより低比抵抗となり、後述するように鉱床探査上、非常に興味深い。なお、MJNW-1はこのリニアメントから派生する低比抵抗突起の縁に位置する。

さらに、このリニアメントに平行してG2、3に比抵抗境界が認められる。この境界より東側はより低比抵抗となっており、何らかの構造運動、変質作用の差異を反映している可能性がある。なお、この方向は磁気探査で推定した粗粒玄武岩リニアメントと平行し、その集合地帯の西縁に一致する。

(7) 56000Hzの(6)で述べた低比抵抗領域はより狭まるが、このなかにスポット的に数点、磁気異常に見られるNE系の粗粒玄武岩のリニアメントに平行して、低比抵抗箇所が見られる。この特徴は900Hzでも明瞭なことから、粗粒玄武岩の部分的な粘土化による異常、あるいは何らかの鉱化に伴う異常であることも考えられるが、地形図との対比によると人工構造物によるノイズの可能性が高い。

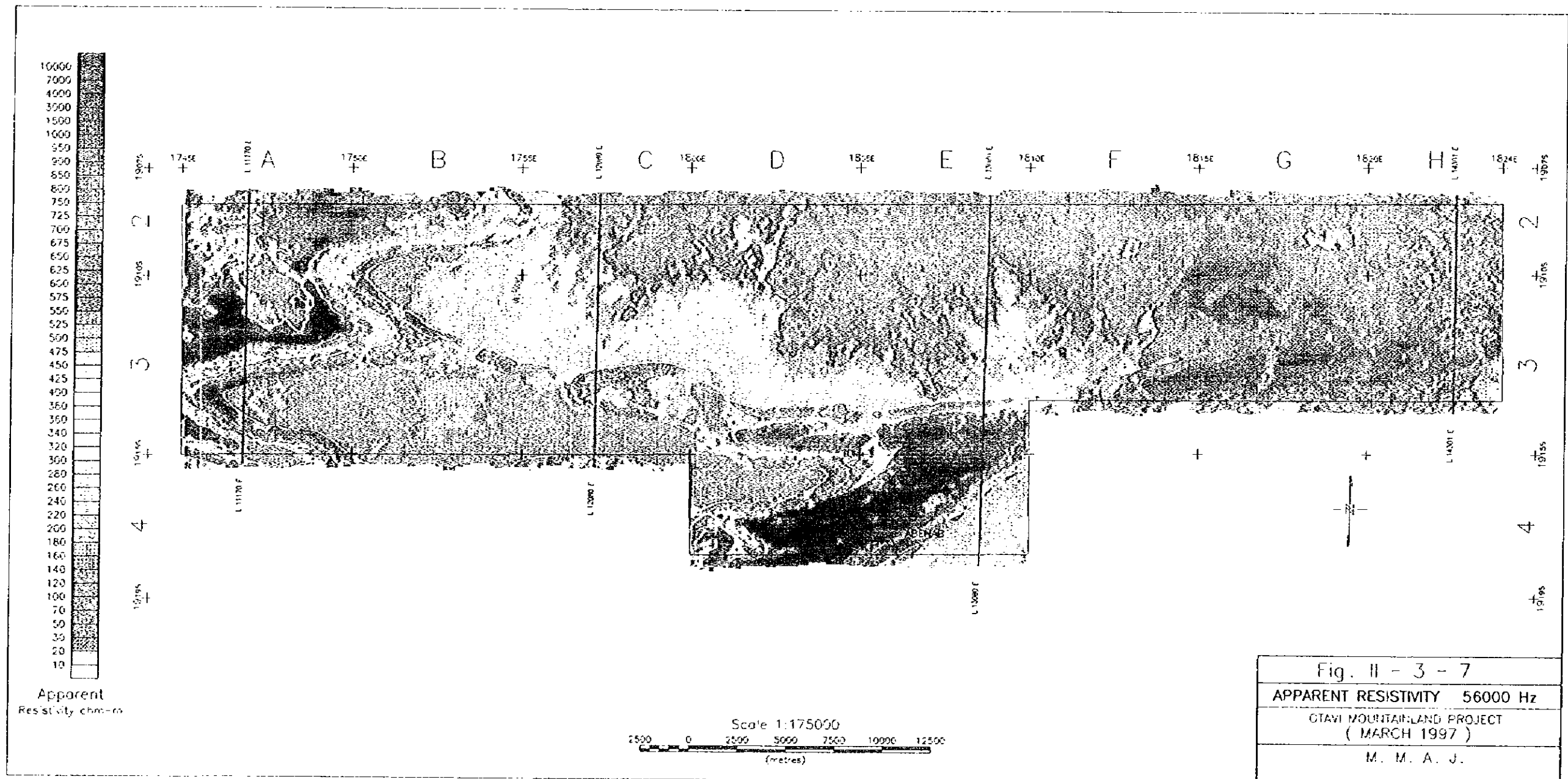
II-3-5-3 900Hzの比抵抗分布の解析 (Fig. II-3-9、Fig. II-3-12)

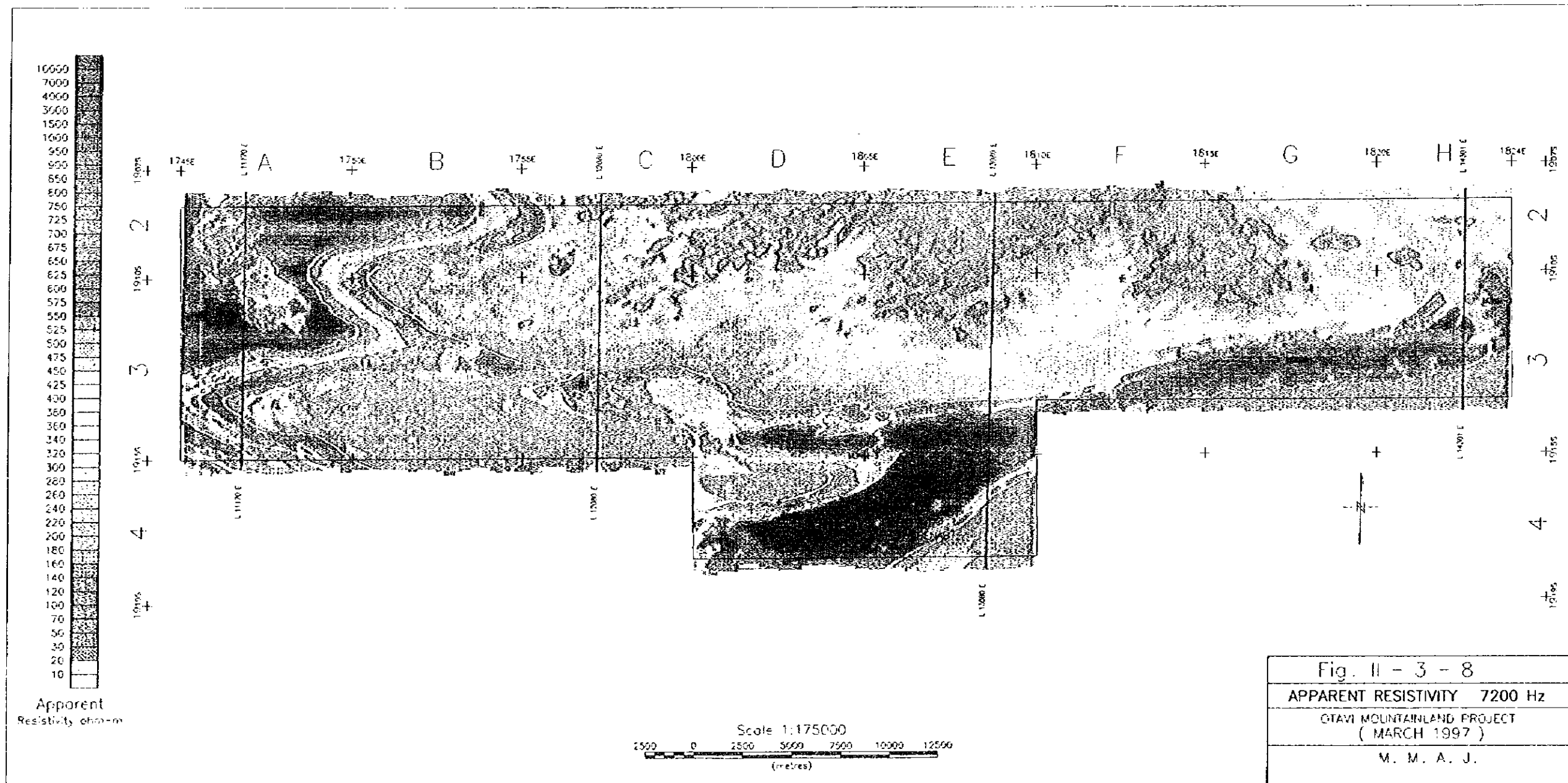
(1) 全体的な傾向は56000Hz、7200Hzのものと同じであるが、最も深部情報を含んでいる。探査深度は数千 $\Omega\cdot\text{m}$ 程度の高比抵抗領域で300m以上、100 $\Omega\cdot\text{m}$ 程度の低比抵抗領域が表層から連続する場合で150m程度、表層100m程度に1000 $\Omega\cdot\text{m}$ 位の高比抵抗層があり、その下に100 $\Omega\cdot\text{m}$ 程度の低比抵抗層がある場合は200~300m程度である。

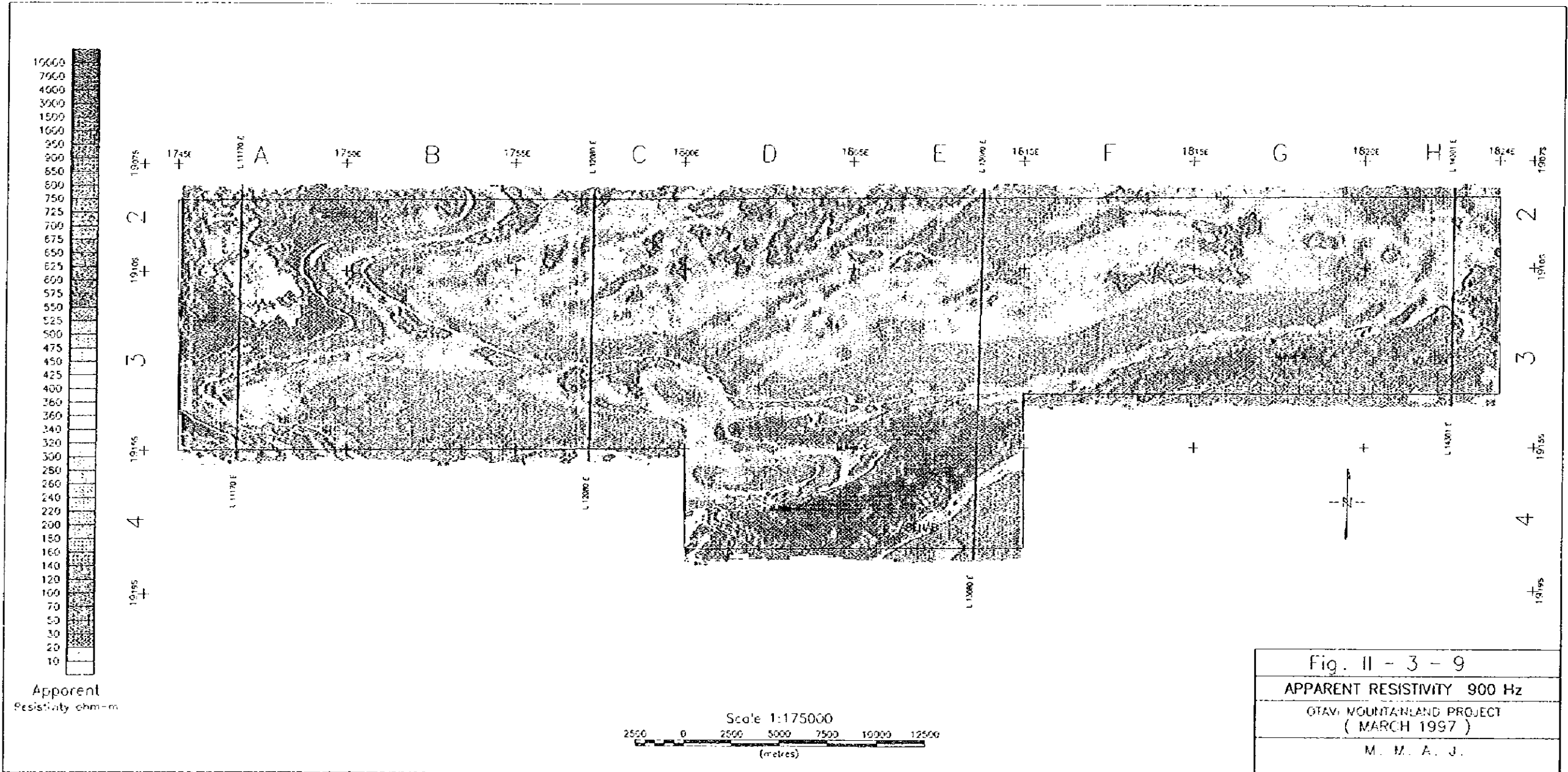
(2) 7200Hzの(3)で述べたMulden層群と考えられる低比抵抗帯が地域東部から中部にかけて明瞭に識別できる。

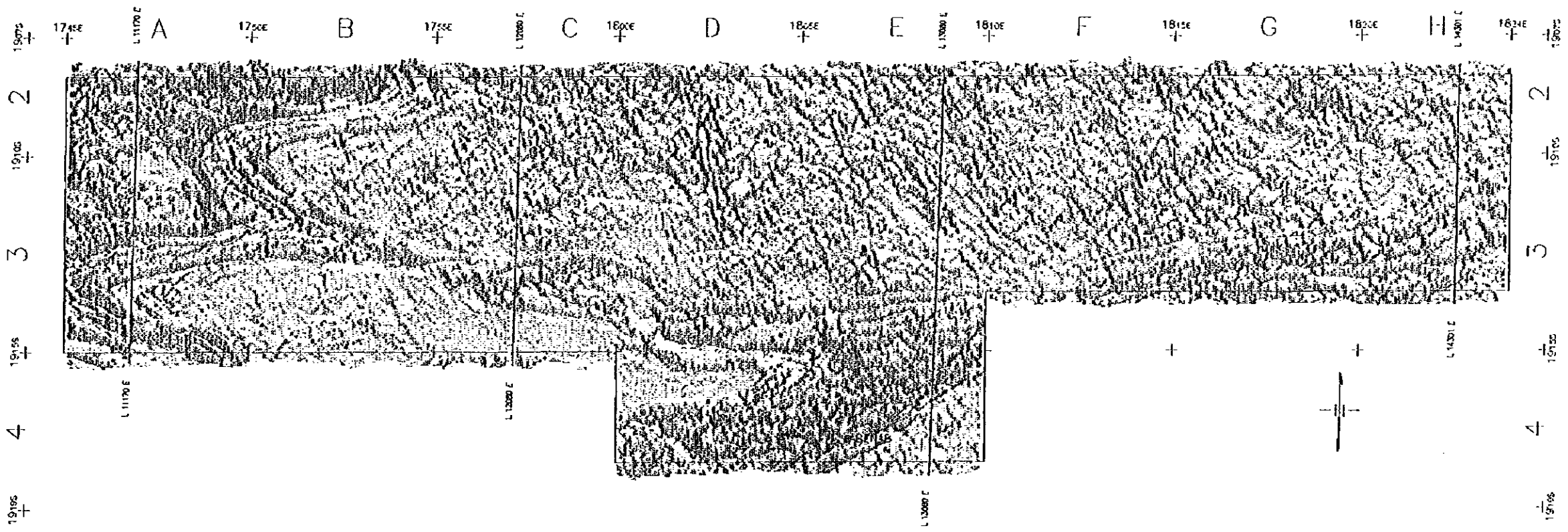
(3) E2、D3区域にNW系の断層が数本確認できる。この中の一部は磁気解析で捉えられた、断層を伴う粗粒玄武岩岩脈と推定されるリニアメントに一致する。この他に磁気解析では見られなかった平行するリニアメントが何本も見られる。この特徴は陰影図でより明瞭に現れている。また、56000Hz、7200Hzの平面図では出現しないことから、表層には達しない断層系であると考えられる。この断層を境に低比抵抗のMulden層群が東側で南に変位している。

(4) C2、D2、E2、F2に東西系の低比抵抗リニアメントが見られる。これは、Tsumeb層との不整合付近のMulden層群下部かあるいはTsumeb層上位の低比抵抗層準と見なすことができる。



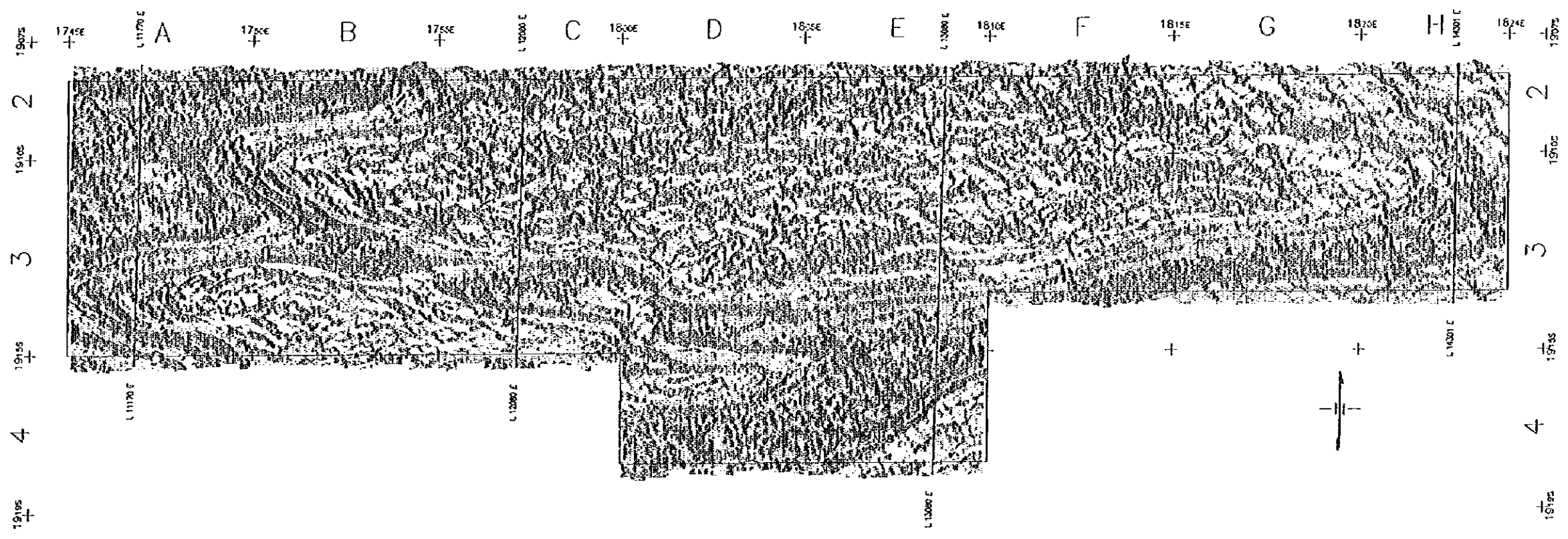






Scale 1:175000
 2500 0 2500 5000 7500 10000 12500
 (metres)

Fig. II - 3 - 10
IMAGE PROCESSING MAP 56000 Hz
OTAVI MOUNTAINLAND PROJECT (MARCH 1997)
M. M. A. J.



Scale 1:175000
 2500 0 2500 5000 7500 10000 12500
 (metres)

Fig. II - 3 - 11
IMAGE PROCESSING MAP 7200 Hz
OTAVI MOUNTAINLAND PROJECT (MARCH 1997)
M. M. A. J.

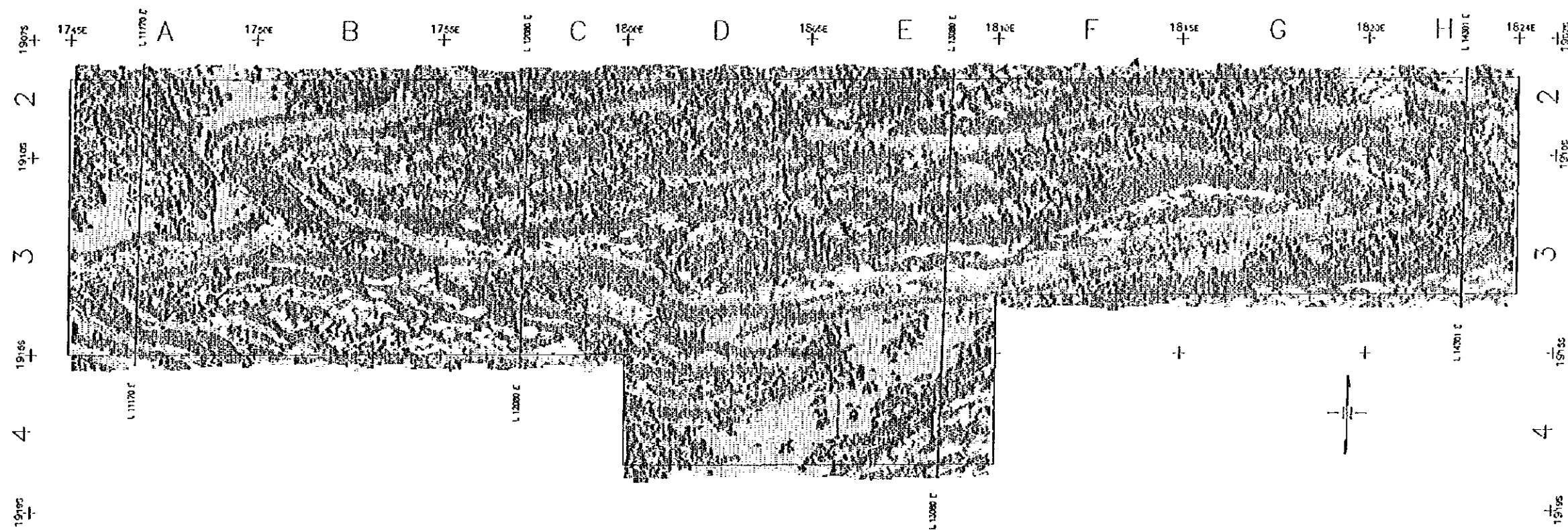
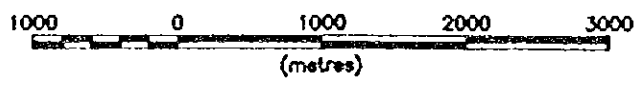
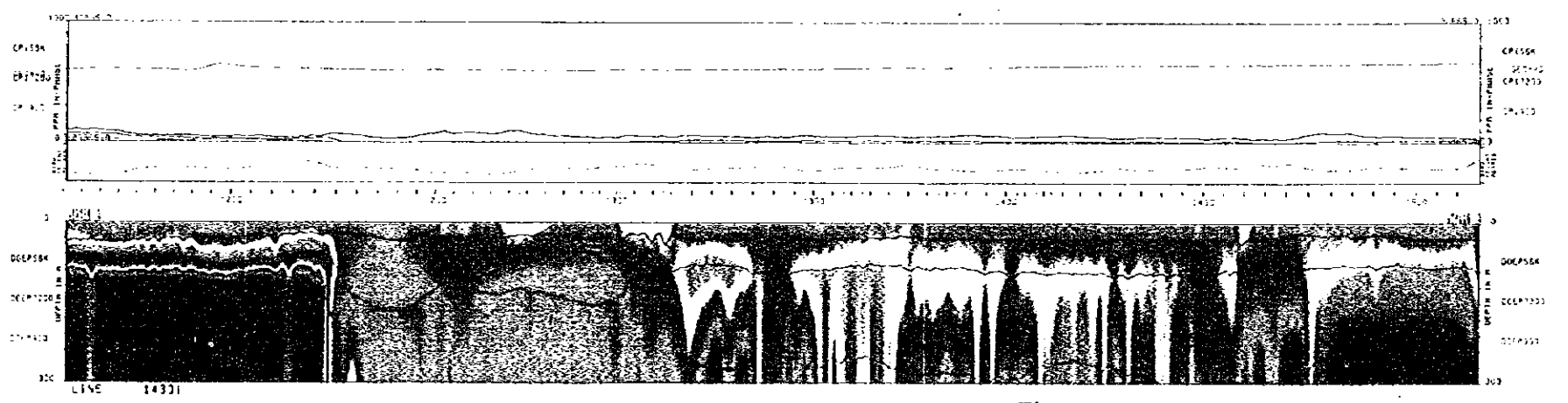
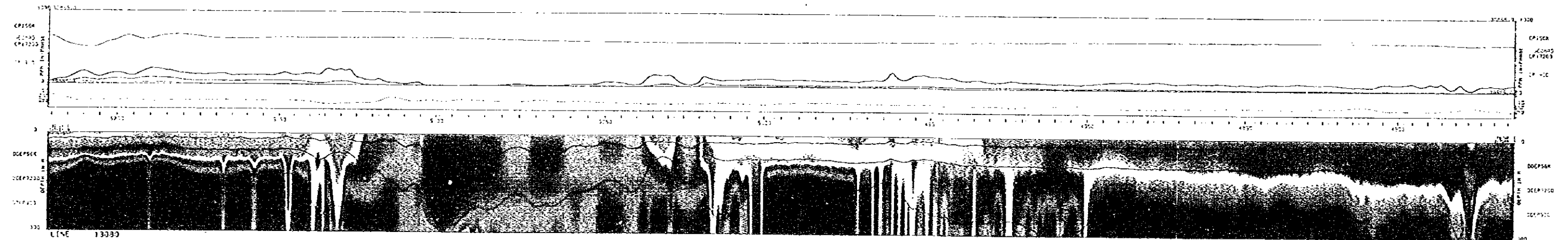
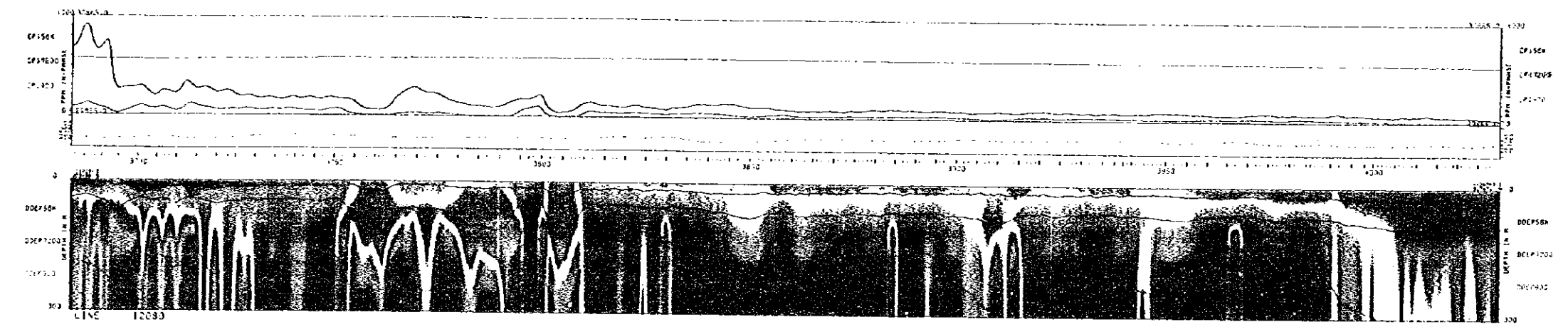
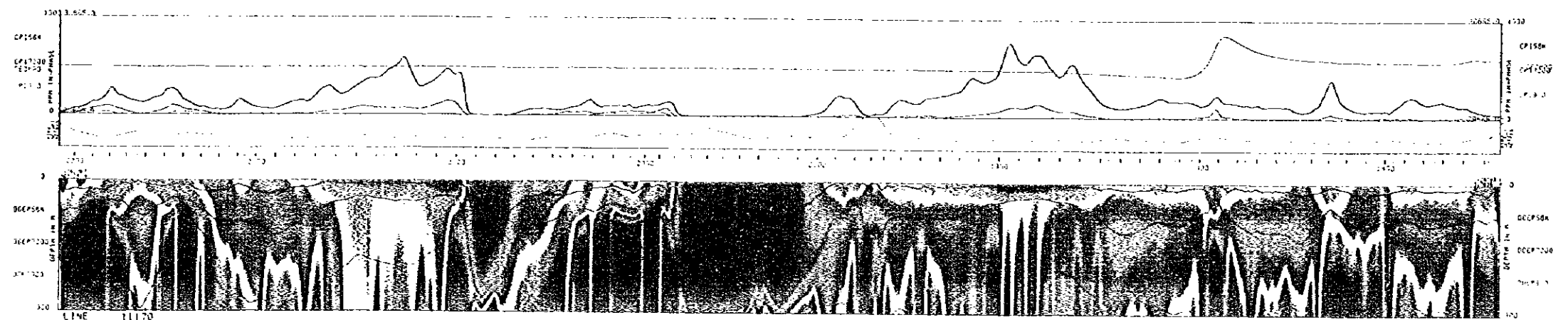
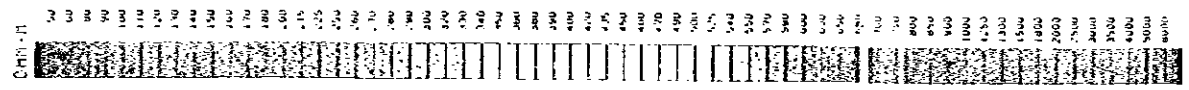


Fig. II - 3 - 12
 IMAGE PROCESSING MAP 900 Hz
 OTAVI MOUNTAINLAND PROJECT
 (MARCH 1997)
 M. M. A. J.



--103-101-- Fig. II - 3 - 13 Resistivity cross sections

II-3-6 考 察

II-3-6-1 各岩相の比抵抗値および特徴

(1) 表層カルクリート

サンプル測定から表層カルクリートの上部は緻密塊状であり、 $1500\Omega\cdot m$ 程度と高比抵抗である。しかし、下部はレキを含む箇所もあり、低比抵抗となるものが見られる。空中電磁探査の結果から上部、下部を識別することは困難であるが、カルクリート下部は $500\sim 1000\Omega\cdot m$ 程度で中～高比抵抗と考えられる。カルクリートが厚い地域に見られる 56000Hz の不規則なりニアメントは表層に達する断裂系に伴うものよりも、このようなカルクリートの岩相変化あるいは、地下水によるものが多いと考えられる。

(2) Mulden層群

Mulden層群は $50\sim 150\Omega\cdot m$ 程度とかなり低比抵抗であり、東西に延びる閉じた向斜構造の内側に広く分布している。

(3) Tsumeb亜層群上位層

Tsumeb亜層群上位に位置する、泥質岩を含むと思われる岩相は表層から深部に至るまで低比抵抗で、 $100\Omega\cdot m$ 程度であり、 $10\Omega\cdot m$ を示す箇所もある。Tsumebタイプの鉱化母岩の層準はこの層の直上のTsumeb層最上位の高比抵抗ドロマイトなので、この層をキーベットとして用いることができる。

(4) Tsumeb亜層群ドロマイト

Tsumeb亜層群のドロマイトは本地域では最も高比抵抗であり、 $1000\sim 10000\Omega\cdot m$ 程度である。表層の方がより深部よりも高比抵抗である傾向が見られる。

(5) 浅部基盤岩

地域南に見られる浅部基盤岩は $1000\Omega\cdot m$ 程度の薄い高比抵抗表層カルクリート直下に、著しく低い比抵抗層として認識される。 900Hz での見掛け比抵抗は $15\sim 40\Omega\cdot m$ である。基盤岩とDamara系の堆積岩類との境界は、磁気探査で捉えられた境界と一致し、断層と考えられる。なお、断面図からはこの低比抵抗層の厚さは 50m 程度であり、その下は新鮮な高比抵抗基盤であると考えられる。

II-3-6-2 地下水について

現地で測定した地下水の比抵抗は調査地域全域に渡ってほぼ一定で、約 $10\Omega\cdot m$ （電導度： 1mS/cm ）であり、地下水としては低い値を持ち、塩類が多く含まれていることが予想される。このような地下水が地下空洞や多孔質なカルクリート中に充填している場合は硫化鉱床と同じように低比抵抗となることが予想される。厚いカルクリート分布域で 56000Hz にのみ見られる $200\sim 300\Omega\cdot m$ 程度の小規模な低比抵抗域はこのような地下水に起因する異常であると推定される。

II-3-6-3 鉱床による異常について

期待される塊状硫化鉱床は高比抵抗母岩中に胚胎すると考えられ、高比抵抗なTsumeb亜層群最上位ドロマイト中に単独に低比抵抗スポットが分布する形態となり、明瞭な電磁応答が期待される。しかし、本地域は低比抵抗の地下水を伴う低比抵抗層が様々な形態で存在するため、比抵抗のみによって鉱床による応答を識別することは困難である。更に、Tsumeb-Kombat型塊状硫化物パイプはMulden層群の分布域の下部のドロマイトが鉱床母岩に適しているが、この場合、

Mulden層群が一般に低比抵抗域であるため、下位の低比抵抗異常を検出しにくい。このため、鉱床有望地点として、低比抵抗であること以外に、鉱床モデルを考慮して以下の3種類のタイプの異常域を抽出した。

(1) 低比抵抗リニアメントに関連するもの

7200Hzの見掛比抵抗断面図の解析(6)で取り上げた低比抵抗域で、長さ約8Km幅500~1000mであり、鉱床母層であるTsumeb亜層群最上部を通過し、褶曲軸と交差する点付近では深度100~200mで200~300 Ω ・m程度にまで比抵抗が低下する。

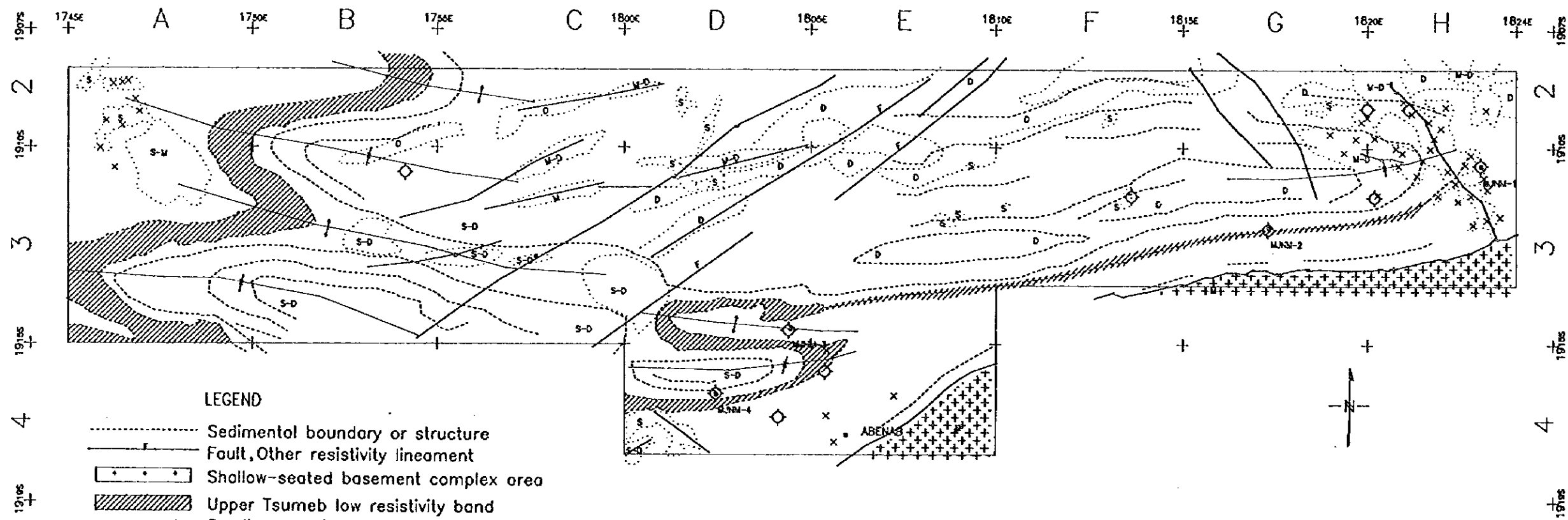
(2) TM境界付近の低比抵抗帯で磁気異常帯と重なるもの

7200Hz、900Hzで見られるB2、3地域の向斜構造を示すTM (Tsumeb亜層群/Mulden層群)境界北翼では、低比抵抗であると同時に、20nT程度の比較的大きな磁気異常を示す磁気異常帯がある。

(3) Abenab Westタイプの独立した低比抵抗スポット

ミシシッピーバレー型の鉱化と考えられるMJNM-1号付近に(1)で述べた比抵抗リニアメントから派生する低比抵抗域あるいは低比抵抗スポットが幾つか認められる。このような異常域はAbenab Westタイプのポテンシャルがある。

これらの異常域は互いに重なる部分があり、このような箇所では、更に鉱化のポテンシャルは高くなると考えられる。



- LEGEND**
- Sedimental boundary or structure
 - Fault, Other resistivity lineament
 - Shallow-seated basement complex area
 - ▨ Upper Tsumeb low resistivity band
 - ◇ Small magnetic anomaly
 - × Low resistivity spot (target)
 - ⋯ S,M,D Low resistivity zone S=shallow, M=medium, D=deep
 - ⌒ Anticline
 - ∩ Syncline

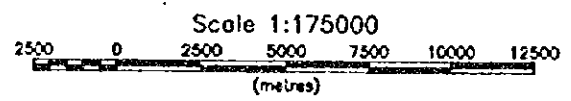


Fig. II - 4 - 1
 Compilation and interpretation map
 OTAVI MOUNTAINLAND PROJECT
 (MARCH 1997)
 M. M. A. J.

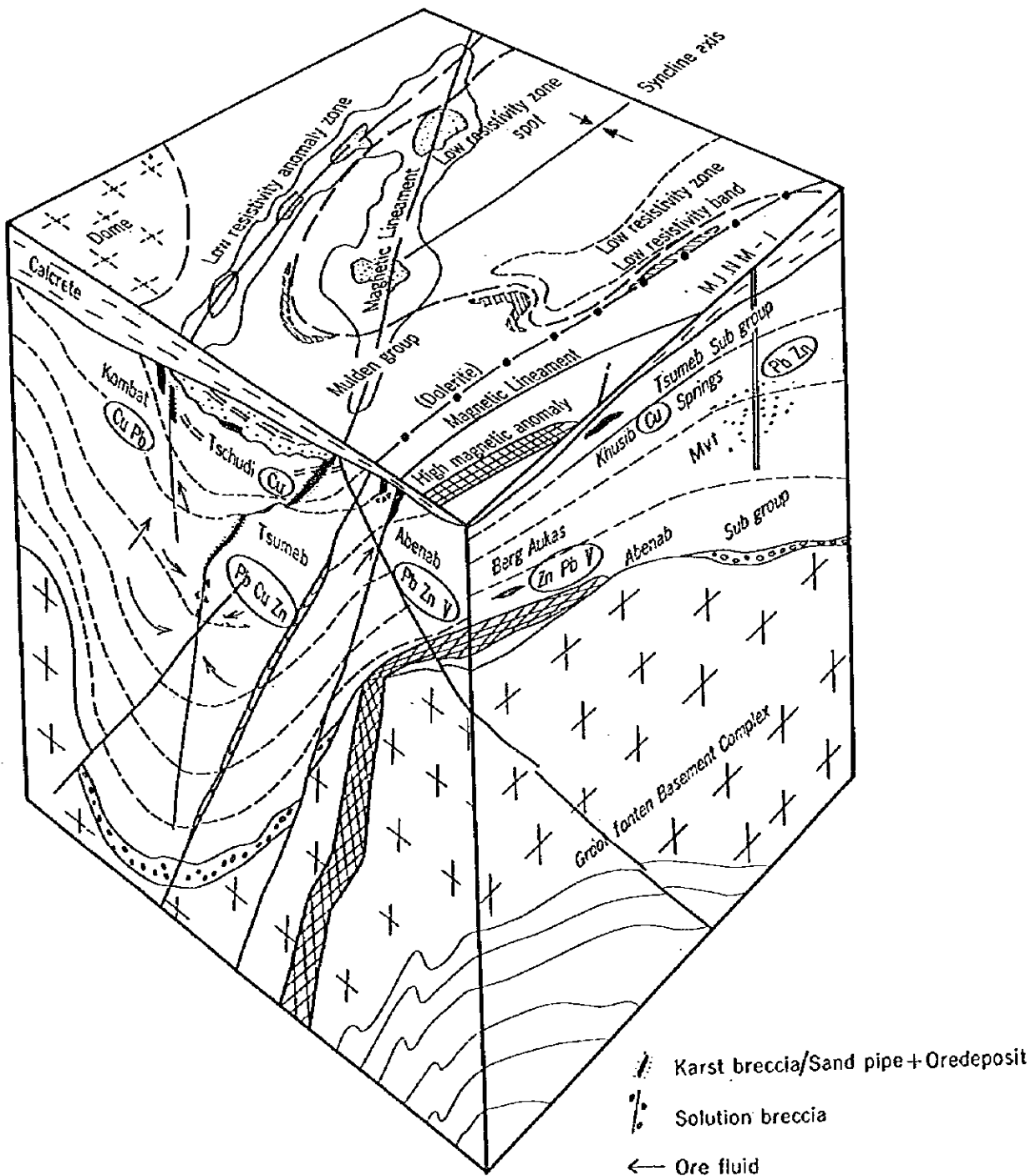


Fig. II - 4 - 2 Model for geological setting, ore deposits
and airborne geophysical anomalies

①

②

③

第4章 総合解析および考察

第1年次および第2年次調査結果を総合的に解析した結果をFig. II-4-1に示す。

本年次のボーリング調査で捕捉した鉱化作用はカルストプレッチャや溶解プレッチャを伴わない鉛・亜鉛鉱染状ないし細脈状低ないし中品位鉱床で、母岩の構造や鉱物組み合わせから、TsumebやKombatとは異なる。コアの鏡下の観察では鉱化の母岩は砂質ドロマイトが多く、ドロマイト化と珪化作用に伴われていることから、いわゆるミシシッピーバレー型鉱床の鉱化作用と考えられる。

既存資料によれば、Tsumeb Kombat地域ではボーリングにより同様な特徴をもつ鉱徴が分布しており、胚胎層準はAbenab亜層群Gauss層からTsumeb亜層群Huttenberg層にかけてのドロマイト層で、特にElandshoek層およびHuttenberg層(T5およびT6)の砂質ドロマイト層に集中している傾向がある。本年次捕捉した鉱化作用の母岩の層序も、岩相からT6に対比されると考えられる。

一方、空中物理探査(電磁法)による比抵抗構造と既存地質図は、ほぼ調和的である。本調査地域は大別してカルクリート、Mulden層群、Tsumeb亜層群およびAbenab亜層群以下のドロマイト層および基盤岩からなるが、頁岩などの粘土質岩やカルクリート中の帯水層は低比抵抗帯を、塊状ドロマイトや基盤岩は高比抵抗帯を形成している。このためドロマイト層中の頁岩層は比抵抗構造の鍵層となっており、カルクリートに覆われた地域での地質構造を顕著に反映している。この他に地質構造を切る低比抵抗帯が局所的に存在し、断層や破砕帯の存在を暗示している。

ボーリング調査で得られたコアサンプルを用いた物性試験の結果では、本年次捕捉した低品位鉛・亜鉛鉱徴は比抵抗異常として直接捕らえることは困難である。しかし、構成鉱物がTsumebやKombatのように輝銅鉱や黄銅鉱を多量に伴う鉱床型では、十分に電磁法による比抵抗異常として応答する可能性がある。

また、第1年次実施した空中磁気探査異常をターゲットとした本年次のボーリング調査の結果、磁気異常として不整合面下のドロマイト層中の赤色粘土帯の中に含まれる酸化鉄に起因することがわかった。したがって独立した磁気異常はTsumeb・Kombat型(Ore pipe)鉱床の探査には必ずしも有効ではない。

本年次のボーリング調査から調査地域では、当初から探鉱ターゲットとしてきた塊状硫化物パイプの他にいわゆるミシシッピーバレー型鉱床の賦存ポテンシャルがあることが判明した。しかし、大部分カルクリートで覆われた地域では物理探査による応答も期待できない。

一方、空中電磁探査でMulden層群の分布がさらに明確になったことから、本年次調査地域内にTsumeb Kombat型塊状硫化物鉱床の賦存の可能性は十分残されている。Mulden層群の構造に斜交する磁気および比抵抗リニアメントに注目した調査が望まれる。

第2年次調査結果を基礎にした第3年次調査計画の作成に想定した地質構造と鉱床および空中物理探査異常モデルをFig. II-4-2に示す。

0

0

0