

VLF—EM 法による石灰岩層中の空洞調査

Investigation of Caves in Limestone Beds by the VLF-EM Method

寺岡 伸幸* 本館 静吾** 今井 秀紀*** 岡崎 健治***

Nobuyuki TERAOKA, Seigo MOTODATE,

Hideki IMAI and Kenji OKAZAKI

一般道道島牧村河鹿トンネル地質調査において、石灰岩層中に地震探査における低速度帯が検出された。石灰岩層中には、しばしば空洞（いわゆる鍾乳洞）が存在することがある。この石灰岩層中における低速度帯は、それを示している可能性がある。

しかし、従来の方法では、空洞の有無の判断はきわめてむずかしい。そこで、今回ほとんど実例のない VLF 法により空洞の検出を試みた。その結果、トンネル縦断方向で地震探査における低速度帯と VLF 異常位置がほぼ一致した。また、横断方向でも VLF 異常が検出され、縦横断の VLF 異常地点の連続性が示唆された。

このため、石灰岩層中に空洞が水を含んで存在している可能性が大きいことが推定された。

《電磁探査；VLF—EM 法；空洞調査》

While conducting a geological survey for the Kajika tunnel on the general prefectural road in Shimamaki, a low velocity zone was detected in a limestone bed by seismic prospecting. Caves (so-called limestone caves) are sometimes found in limestone beds. The low velocity zone in limestone may represent caves.

However, it is extremely difficult to judge by existing methods whether caves exist or not. We tried this time to detect caves by the VLF method, which has only rarely been used in the past. The results show that in the direction of vertical section of the tunnel the low velocity zone found in the seismic prospecting almost corresponded with the VLF abnormal location. VLF abnormality was also detected in the direction of the cross section and a succession of VLF abnormal zones in the vertical and cross sections were indicated.

It is therefore highly probable that caves containing water exist in the limestone bed.

Keywords: electromagnetic method, VLF-EM method, investigation of cave.

1. まえがき

最近、発達しつつある電磁探査法のひとつである VLF 法は、これまで調査がむずかしいと

*地質研究室研究員 **同室主任研究員 ***同室員

されていた、主に岩盤裂か水探査において、簡便で有効な手法とされている^{1),2)}

今回、河鹿トンネル地質調査において、石灰岩層中で地震探査を行ったところいくつかの低

速度帯が検出された。石灰岩層中には、空洞（いわゆる鍾乳洞）が存在することがある。この地震探査における低速度帯は、それを示している可能性があるため、空洞との関係を調査する必要がある。しかし、空洞が存在するかどうか不明であり、かつ存在したとしても従来の方法ではその検出はかなりむずかしい。

そこで、VLF法により石灰岩中の空洞の検出を試みた。

本論では、この調査解析で明らかにできたことがらとそれらに対するいくつかの所見を述べる。

2. 調査概要

2.1 VLF法の原理

VLF (Very Low Frequency) 法は、対潜水艦通信用に設置した世界各地の大電力送信所（図-1）、（表-1）から発射されているVLF電波（3～30kHz）をソースエネルギーとして使用する。図-2に示すように、送信アンテナからは水平な一次磁界が同心円状に発射されている。日本では、愛知県刈谷市の送信局（NDT）が周波数17.4kHz、出力500kWの電波を通常金曜日を除いて送信している。日本ではこのほかに、NWC（オーストラリア）、NPM（ハワイ）の電波も条件により受信可能である。しかし、これら以外の送信局は、測定中に送信が途絶えたりし、使用しない方が無難である。

VLF法は、いくつかの文献^{2),4),5),6)}で原理、

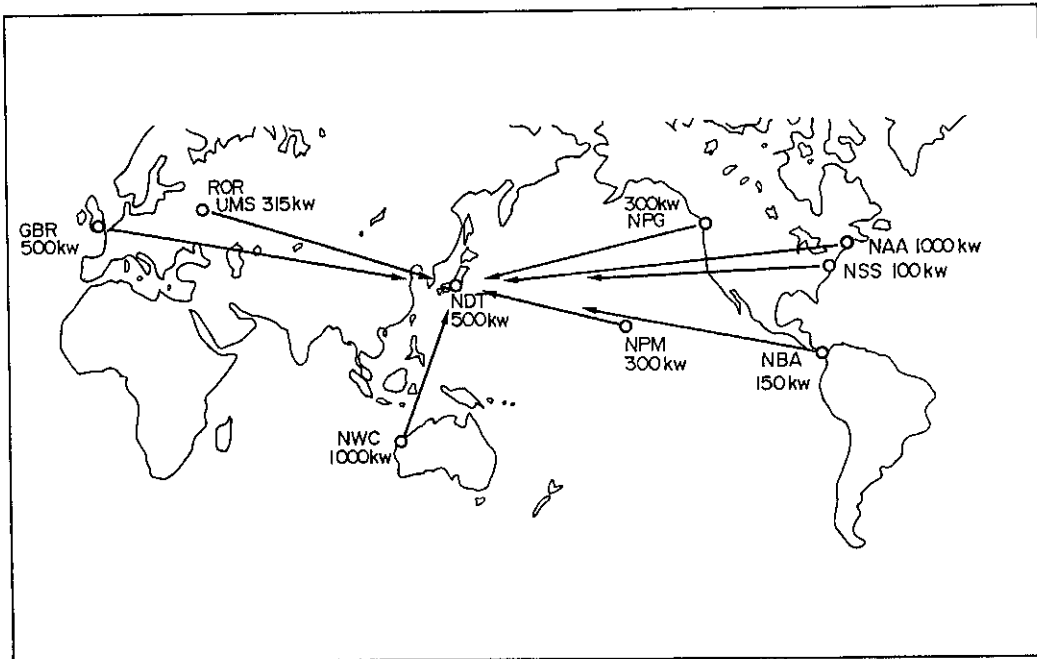


図-1 VLF大送信局の位置

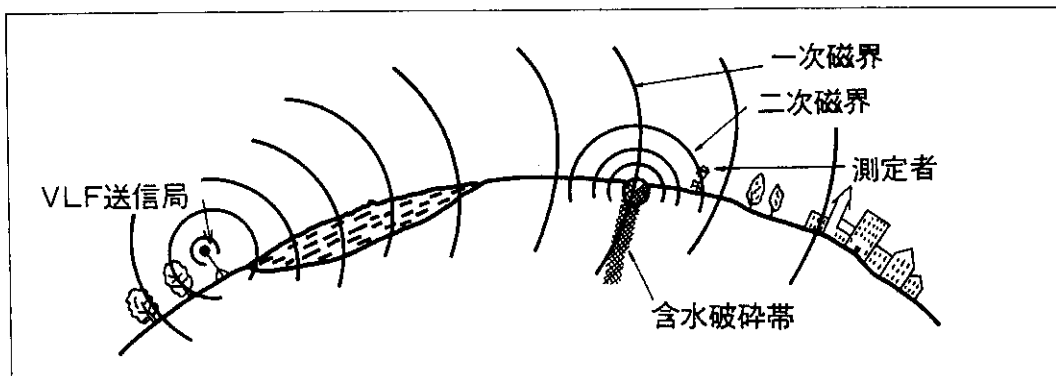


図-2 VLF法の測定原理

応用例について詳細な報告を行っているが、本報文でも説明の都合上原理について簡単に述べる。

図-2に見るように、VLF送信局から発信された電波が一次磁界として地下の良導体を通り抜けると導体内に渦電流を生じ、一次磁界と異なる方向の成分、位相をもつ二次磁界が発生する。図-3の一次磁界Hと二次磁界ΔHにおいては、次の関係式が成り立つ。図において

$$H_x = H \cos \omega t$$

$$H_y = 0$$

$$\Delta H_x = \Delta H \cos(\omega t + \phi) \cos \alpha$$

$$\Delta H_y = \Delta H \cos(\omega t + \phi) \sin \alpha$$

ここで、 ϕ はHと ΔH の位相差、 α は測点と

表-1 VLF代表送信局と諸元

局名	位置	周波数	出力
		kHz	kW
I D O	イタリア	27.2	50.0
L P Z	アルゼンチン	23.6	72.0
N S S	アメリカ	19.0	100.0
R O R	白ロシア	17.0	315.0
U M S	ロシア	17.1	200.0
U F T	フランス	20.7	61.0
N A A	アメリカ	17.8	1000.0
N B A	パナマ	24.0	150.0
NPG(NLK)	アメリカ	18.6	300.0
N P M	アメリカ	23.4	300.0
N W C	オーストラリア	15.5	1000.0
G B R	イギリス	16.0	500.0
N D T	日本	17.4	500.0

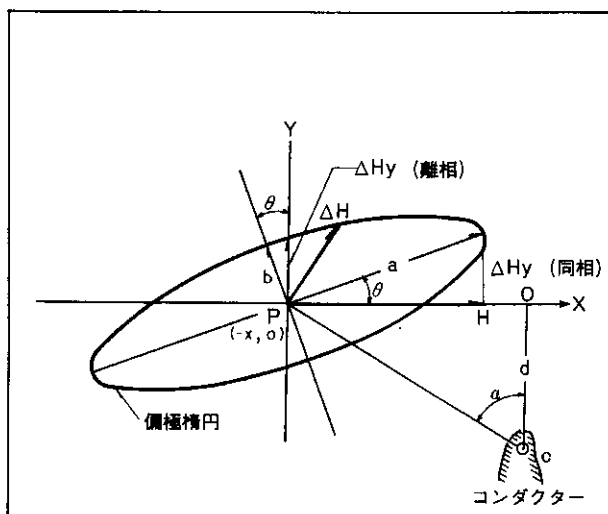


図-3 偏極楕円概念図

良導体の位置関係から決まる角度であり、 ΔH の方向はCPに直角の方向であって時間tの変化とともに、Hと ΔH の合力は水平面から角度 θ だけ傾く偏極楕円を描く。

筆者らが使用した測定器(WADI)は、この偏極楕円の軸の傾き(以後、同相部という)と偏平率(以後、離相部という)両方を測定する。この同相部の垂直磁界と水平磁界の比(%)が大きい場合、つまり垂直成分が卓越しているところ(以後、異常という)には、地下に低比抵抗帯が存在する可能性が高いというものである。また、離相部は導体の質を決める要素になるとされている²⁾

また、導体に二次磁界を発生させるためには、つまり誘導が起こるためには、導体の長さが約50m以上、深さ約10m以上、厚さ約0.5m以上必要とされる。しかもVLF磁界は、これに直交しなければならないとされている³⁾すなわち、VLF局は導体の走向方向でなければならない。

また、測定データ(オリジナルデータ)は、測定方向に向かって最大値のピークが導体の前方に、最小値のピーク(負のピーク)が後方に現われる。解析ソフト(SECTOR)は、この異常曲線を簡単に導体上のピークに変換するため、フィルター処理を行うものである。この曲線は、指定された深度での等価地電流密度として物理的に理解できる⁴⁾ SECTORは、Karous, Hjelt 両氏の設計した次式に示すフィルターリング技術⁵⁾を使用している。このフィルターからの出力信号は、地中のある深さの点での等価地電流密度 $I(0)$ である。

$$I(0) = K (-0.102H_{-3} + 0.059H_{-2} - 0.561H_{-1} + 0.561H_1 - 0.059H_2 + 0.102H_3)$$

ただし、Kは測定間隔に関する定数(dx)

Hは測定計算されるI番目の測点で、後方が-で前方が+である。

また、フィルターを異なる測定間隔(dx, 2dx, 3dxなど)に応用することで、深さによる変化での電流密度が得られる。しかし、解析ソフトの性能上、解析可能深度は地表面から最大60mである。

2.2 調査個所の地形地質

調査個所を図-4に示す。島牧郡島牧村の泊川溪谷に位置する。この付近の標高は500~1,200mで、泊川の東側山腹斜面を形成する大平山の山裾に位置する。地質は先第三系の泊川層群の粘板岩、凝灰岩(緑色岩)、チャート、石灰岩などからなり、しばしば硬砂岩などを挟在する(図-5)の地質構造は、主にN40°E前後の走向で西に50°前後傾斜している。走向はところにより20°程度振れることもあるが、全体にその変化は少ない。また、第三紀の貫入岩と見られる花崗岩岩脈がしばしば認められる。

図-5は、トンネル地質縦断面図である。図に見るように、ボーリング調査結果(RQD, 岩質)および地震探査結果、地質踏査結果などを示す。

また、地質踏査では層理面にはほぼ平行な破碎帯が頻繁に観察される。一方、トンネル縦断面方向には、ほとんど破碎帯は見られない。

2.3 測定方法

測定は図-4に示すように、地震探査A測線沿いに第1測線(N28°W)、再現性を確認するためにさらにこれと西方に3m隔てて平行に第2測線を設けた。また、異常帯が存在すれば、その位置と範囲を調査するため、トンネル横断方向に第3測線および第4測線(地震探査B測線沿い)、第5測線をそれぞれ平行(N52°E)に設けた。しかし、後述するが第3測線および第4測線、第5測線は、どの受信局も受信状態が一定せず、測定可能な状態にはいたらなかったため、前述と同様の目的で第6測線(N42°E)を設けた。

3. 測定結果および考察

3.1 第1測線および第2測線

図-6および図-9に、第1測線および第2測線の水平磁界に対する垂直磁界の比率のオリジナルデータを示す。図中の同相は、VLF波による一次磁界の位相に対応(同位相)して発生する比率であり、離相はそれより90°遅れた位相における比率である。図-7および図-10

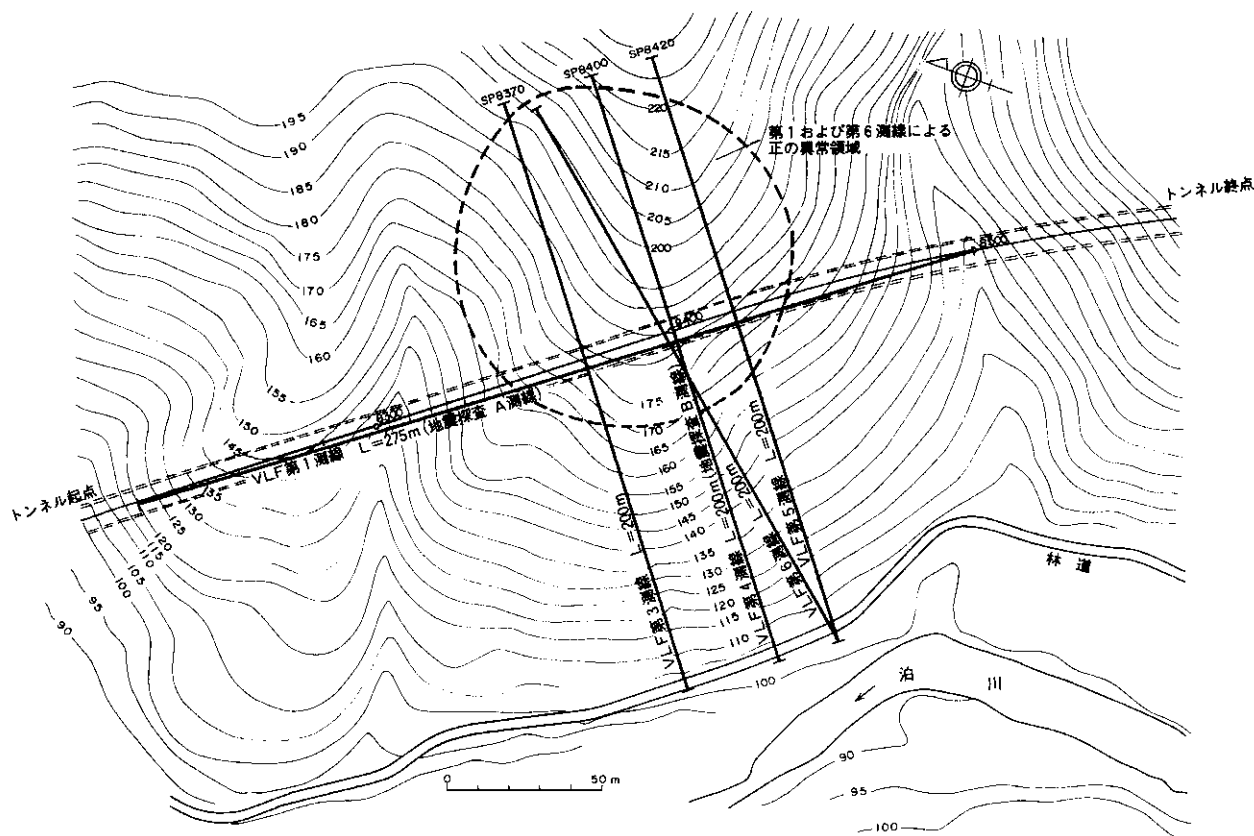


図-4 調査個所平面図

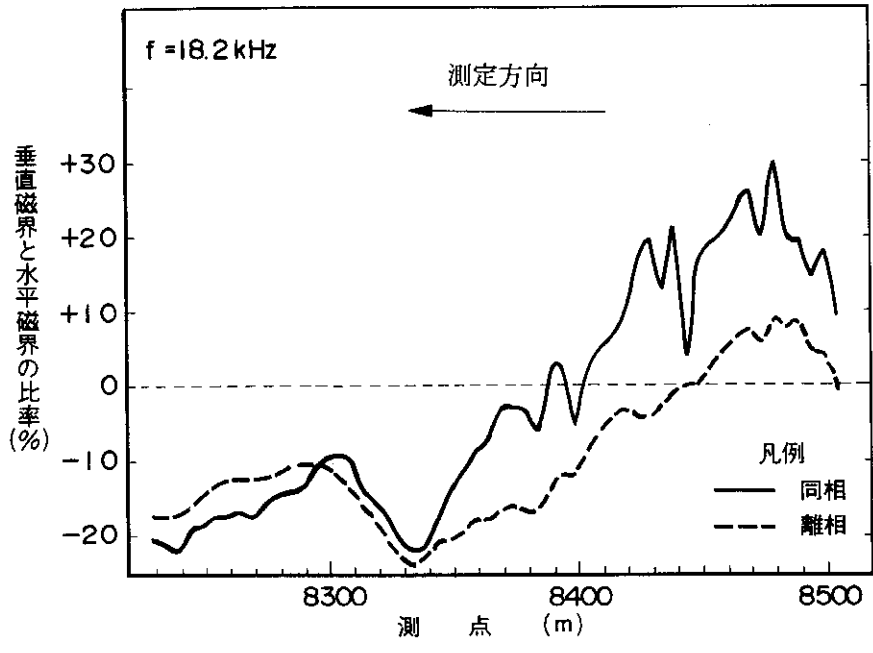


図-6 河鹿第1測線測定断面図 (オリジナルデータ)

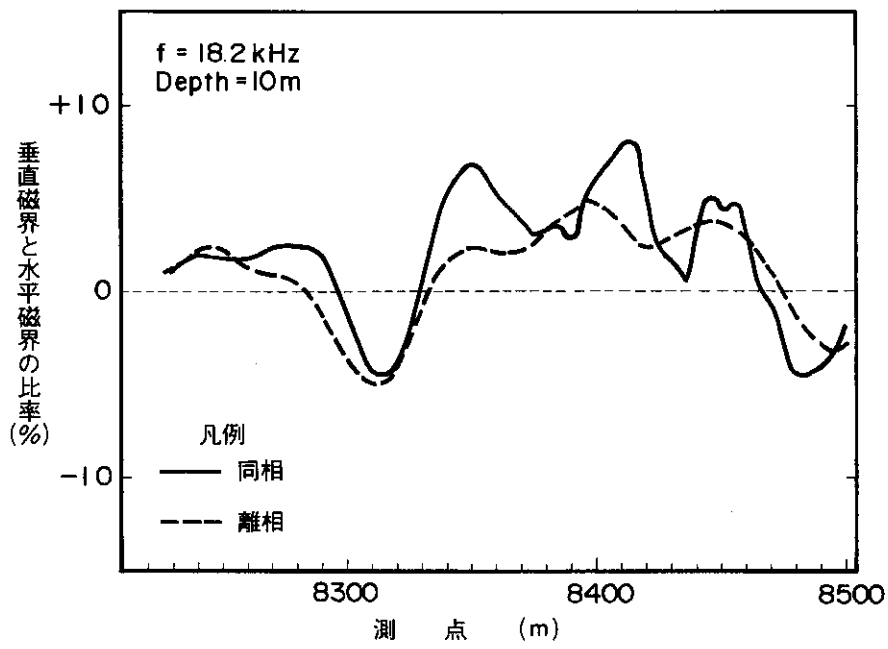


図-7 河鹿第1測線測定断面図 (フィルター処理)

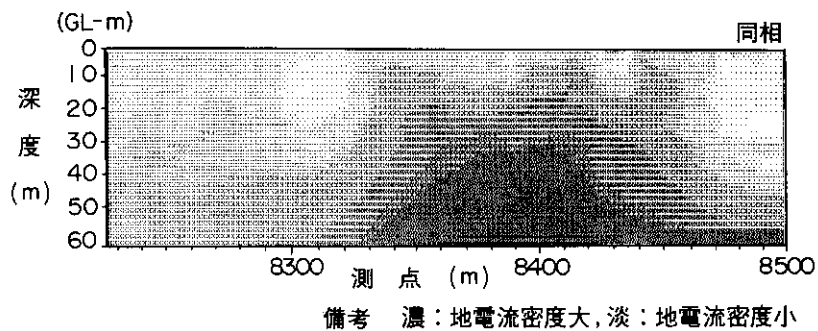


図-8 河鹿第1測線地電流密度断面図

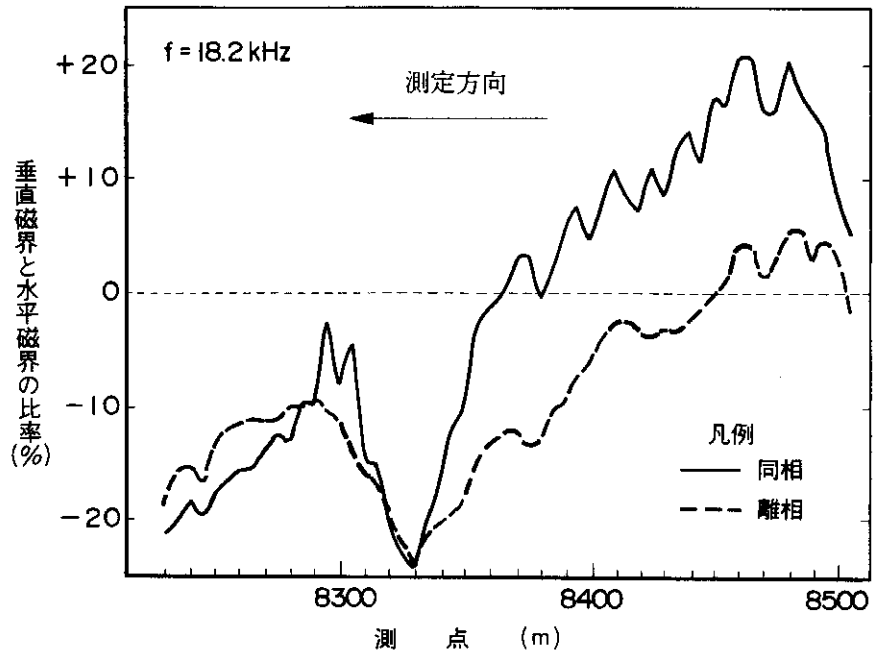


図-9 河鹿第2測線測定断面図 (オリジナルデータ)

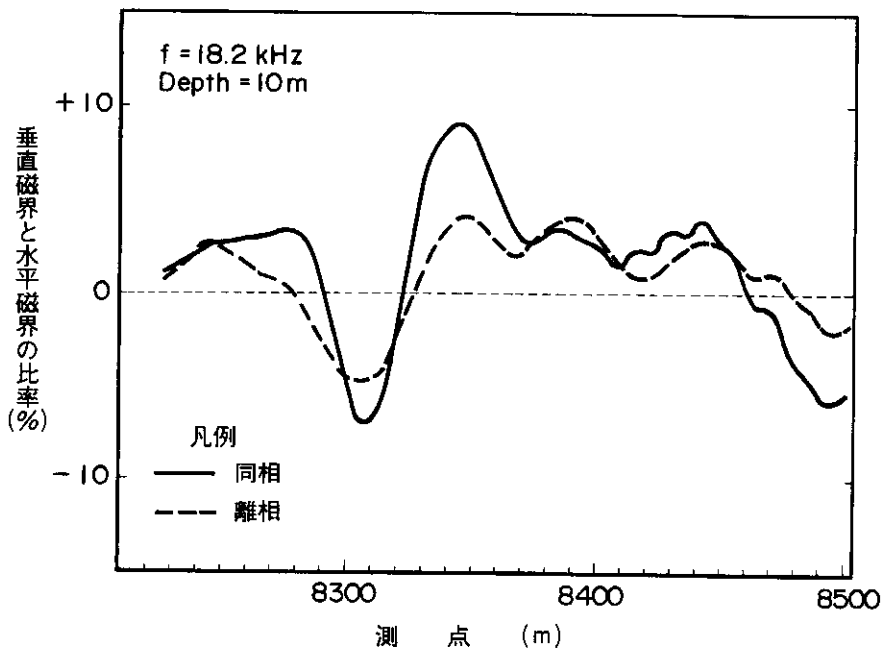


図-10 河鹿第2測線測定断面図 (フィルター処理)

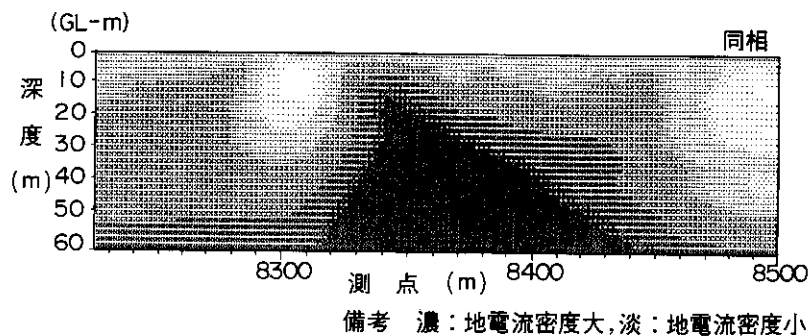


図-11 河鹿第2測線地電流密度断面図

は、前述のフィルタリング技術によるもので、第1測線および第2測線の各測点での地表面下10mのところの水平磁界に対する垂直磁界の比率（すなわち、地電流密度）を示す。図-8および図-11に、第1測線および第2測線の同相の地電流密度断面を示す。地電流密度の断面は測定された地電流密度の大小を解析断面の中で相対的に区分し、白黒の濃淡で図示するものであり、濃いほど地電流密度が大きいことを示す。この結果、第1測線の測定断面および地電流密度断面図は、第2測線とよく対応しており、測定値の再現性はよいことがわかる。

また、図-7のフィルターの処理した測定断面図より同相、離相ともに、SP8400を中心にSP8350～SP8430区間に正の異常があり、図-8の地電流密度断面図より同測点の深度50m以深において、地電流密度が大きくなっているのが明瞭にわかる。地電流密度が大きいということは、電流が流れやすいこと、つまり比抵抗値が小さいことを示す。

図-5のトンネル地質縦断面図に、VLF法による解析限界深度と正の異常領域（第1測線）を示す。これらの結果から一般的に考察すると、地電流密度が大きいところは、①～③のいずれかに該当すると推測される。

- ①低い比抵抗の岩石からなる。例えば、風化岩や変質岩。
- ②含水破砕帯が存在する。
- ③石灰岩層に空洞が存在し、それが地下水面下にあり、水で充填されている。

さらに、地電流密度の大きいゾーン（SP8350～8430）は、図-5の地震探査による低速度帯（SP8380～8420）の位置とほぼ一致すること、および地質踏査の結果から、割れ目の多い岩盤をなす②、③のいずれかに該当する可能性が高い。つまり、空洞や亀裂ゾーンが存在するとすれば、地下水が存在することによって、周囲の岩盤より地電流密度が大きくなることになる。

3.2 第3測線および第4測線、第5測線

第1測線および第2測線より、今、仮に石灰岩層中に空洞が存在し、それが地下水面下であり、水で充填されていると仮定する。その場

合、前述の原理よりこの測線に直交する方向、つまり地層の走向方向（既存の調査よりほぼN40°E前後）に数測線の測定を行えばVLF異常が検出され、その規模もおおよそ推測できる。

したがって、水を含む空洞の存在の有無を明らかにするために、トンネル横断方向（N52°E）に第3測線および第4測線、第5測線を設けた結果、受信状態が悪く、一次磁界の強度が一定でなくなったため、測定不能となった。しかし、VLF送信局は世界中をカバーしているにもかかわらず、このような現象が起こる理由にははっきりしないが、測定を2カ月隔てて行っても同様であったことから磁気嵐による影響でなく、地形などの影響が関係している可能性があり、注意が必要である。このような場合、送信器を持つVLF測定器を併用するなど、なんらかの対策が必要とされる。

3.3 第6測線

第5測線の起点より、できる限りトンネル横断方向に、かつ受信状態が適する方向を検索したところ、N42°EでNWC局が受信できたため、第6測線を設けた。その結果、図-12にオリジナルデータを、また図-13に各測点での地表面下10mのフィルター処理した測定断面図を示す。測定断面図より同相、離相ともに、SP150を中心にSP100～SP200区間に正の異常があり、また、図-14に同相の地電流密度断面図を示す。これより同測点の深度40m以深において、地電流密度が大きくなっているのが明瞭にわかる。

図-15に、第4測線（SP8400）の地質断面と地震探査結果を示す。また、これに第1測線および第6測線の測定断面図および地電流密度断面図から得られたVLF異常と地震探査A測線（第1測線）の低速度帯を、地形を考慮して投影した結果を示す。これらに対比すると、地震探査B測線（第4測線）におけるSP150付近の低速度帯と第6測線のVLF異常地点がほぼ一致する。しかし、この第1測線および第6測線のVLF異常の前後に低速度帯は検出されていない。これは、むしろ地層の走向傾斜などから、図-5における縦断方向のSP8350付近

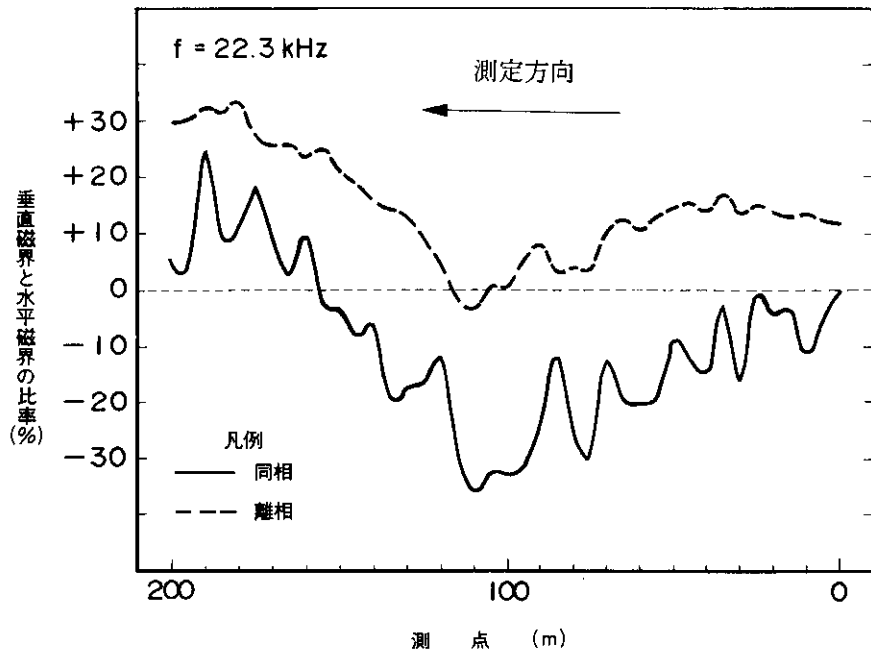


図-12 河鹿第6測線測定断面図 (オリジナルデータ)

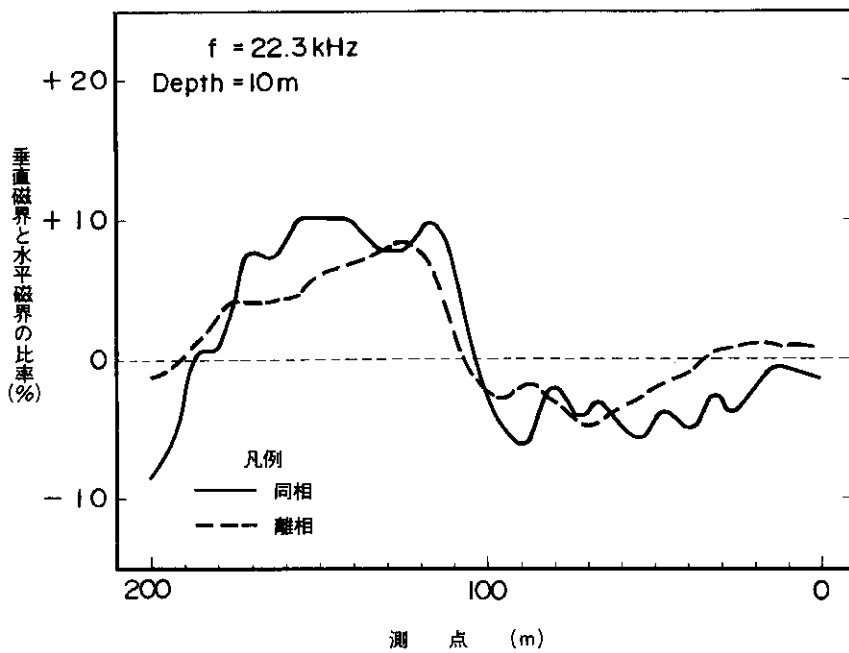
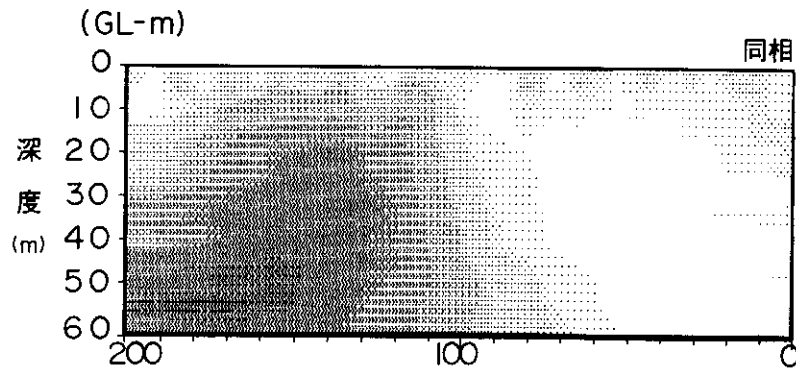


図-13 河鹿第6測線測定断面図 (フィルター処理)



備考 濃：地電流密度大，淡：地電流密度小

図-14 河鹿第6測線地電流密度断面図

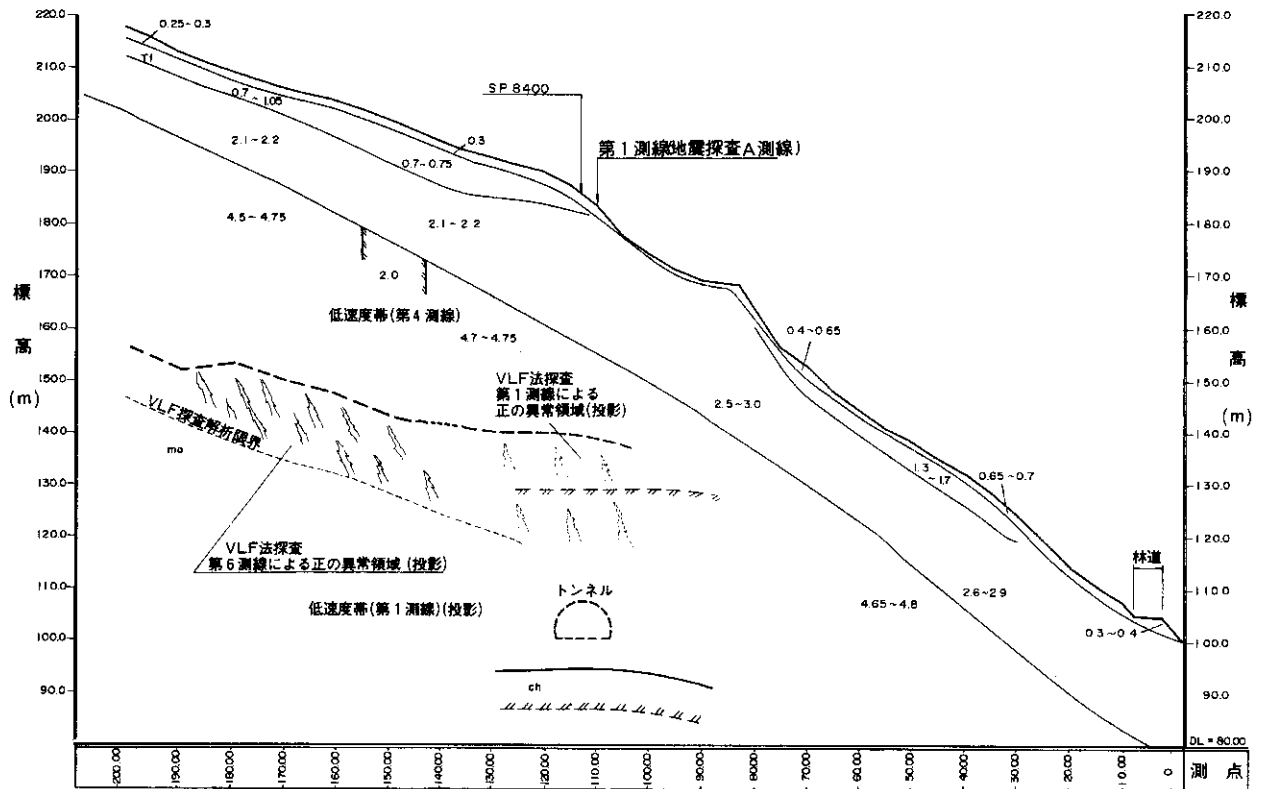


図-15 河鹿第4測線(地震探査)地質横断面図

の低速度帯に一致し、地質踏査よりこの地点で見られた比較的軟らかい地層を形成するものと考えられる。しかし、図に見るように第6測線のVLF異常地点は第1測線の異常地点と近接している。深度もほぼ一致しており、両者が連続する傾向にある。

これらの結果と前述の原理などを総合すると、地層の走向傾斜、破碎帯の方向などの地質調査から、トンネル縦断方向に破碎帯の存在はない。つまり、破碎帯の方向からいって、トンネル横断方向での測定では原理上、VLF異常は検出されない。しかし、トンネル横断方向での測定においてVLF異常が検出され、その地点が縦断方向の異常に近接、深度もほぼ一致し、両者が連続する傾向にある。さらに、トンネル縦断方向での地震探査の低速度帯とVLF異常地点がほぼ一致する。その結果、破碎帯の存在よりも石灰岩層に大規模な空洞もしくは小規模な空洞が集合体として水を含んで存在している可能性が大きいことが推定される。

これらを考慮すると、図-4に破線で示す第1測線および第6測線による正の異常領域を

ボーリングなどにより重点的に調査し、亀裂ゾーンや空洞の有無を確認することが妥当と考えられる。

4. まとめ

(1) VLF法により、トンネル縦断および横断方向で地質調査を実施した結果、トンネル縦断方向で地震探査における低速度帯と同相部の正の異常がほぼ一致した。さらに、トンネル横断方向でのVLF異常の検出、その地点が縦断方向の異常に近接、深度もほぼ一致し、両者が連続する傾向にあることが示唆された。よって、地質調査および原理などを勘案すると、石灰岩層中に大規模な空洞もしくは小規模な空洞が集合体として水を含んで存在している可能性が大きいことが推定された。

(2) 電磁法の中でもVLF法は、他の手法に比較し簡便で、安価である。断層破碎帯の検出、岩盤裂か水探査のみならず、空洞調査でも有効な調査法として期待できる。

(3) VLF法は、測定値の再現性がよいとされているが、本測定でも縦断方向の平行な第1測

線と第2測線で、ほぼ同一地点に異常が現われよく対応することが確認された。一方、本調査では人工物（電線、埋設金属パイプなど）の影響がほとんどないにもかかわらず、第3測線および第4測線、第5測線において測定不能状態になった。VLF送信局は世界中をカバーしているが、受信状態は地形などの影響により異なる可能性があり、注意が必要である。

5. あとがき

今回、河鹿トンネルの縦断方向のVLF探査において、VLF異常や地震探査の低速度帯などの結果から、石灰岩層中に大規模な空洞もしくは小規模な空洞が集合体として水を含んで存在している可能性が示唆された。しかし、実際に空洞ないし破碎帯の存在が確認されたわけではない。今後さらに、数年後のトンネル掘削に向けて、空洞ないし破碎帯の規模をより正確に調査し、VLF法の有効性を実証していきたい。

最後に本研究において、調査測定に多大な御協力をいただいた小樽開発建設部寿都道路建設

事業所および地質研究室の関係各位に対し、厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 根岸正充ほか：VLF法による岩盤の裂か水の探査，開発土木研究所月報，No. 466, 2-9, 1992.
- 2) Tohmas Enmark: WADI Instruction Manual, ABEM Co., 1989.
- 3) 小樽開発建設部：河鹿トンネル地質調査業務報告書，1992.
- 4) 竜神正夫：VLF電磁探査法と測定器について，物理探鉱 Vol. 23, No. 5, pp. 35-42, 1970.
- 5) 内田利弘：断層調査のための電磁法の現状，物理探鉱 Vol. 37, No. 5, pp. 69-83, 1984.
- 6) N. R. Paterson, V. Ronka: Five years of surveying with the VLF-E. M., Geoprospection, Vol. 9, pp. 7-26, 1971.
- 7) M. Karous, S. F. Hjelt: Linear filtering of VLF Dipangle Measurement, Geophysical Prospecting, pp. 782-794, No. 31, 1983.

*

*

*