

地下深部岩盤中における無線データ通信特性に関する検討

高村尚*1 奥津一夫*1 須賀原慶久*2 虎田真一郎*3 大内 仁*3

地下構造物の計測データの通信手段として、低周波電磁波（100[Hz]～10[kHz]程度の電磁波）を搬送波とした無線データ通信技術がある。しかしながら、この周波数帯域の電磁波は、テレビ電波や携帯電話等の高周波電磁波に比べて情報通信容量が少ないため、搬送波としてこれまであまり利用されることがなかった。一方、放射性廃棄物地層処分施設においては水理場への影響を低減するという観点からケーブルを使用しない地中無線データ通信技術が有効であると考えられる。本論文では、スウェーデン核燃料廃棄物管理会社(SKB)の地下研究施設(Äspö HRL)で実施した原位置通信試験結果にもとづき、岩盤中における無線データ通信特性に関する検討内容を報告する。

Keywords: 地中データ無線通信, 地層処分, 低周波電磁波, 花崗岩

A wireless transmission technology uses a low frequency electromagnetic wave (100[Hz]～10[kHz]) as a carrier wave to transmit signals in the deep underground geological condition. However, this electromagnetic wave has not been used so much, because the transmission capacity is less than a high frequency electromagnetic wave, which is used to televisions and cellular phones. On the other hand, the wireless transmission technology that doesn't use the cable is considered to be useful in the radioactive waste disposal repository from the viewpoint of decreasing the influence on the barrier. This paper shows the characteristics of the wireless transmission in the granite on the basis of the in situ testing implemented in the Äspö Hard Rock Laboratory of SKB.

Keywords: wireless transmission, geological disposal, very low frequency electromagnetic wave, granite

1 はじめに

我が国では、高レベル放射性廃棄物は地下 300[m]以深に地層処分されることとされている。地層処分は本質的に「受動的」なものであり、その長期安全性は廃棄物埋設後におけるモニタリング等の人間の関与には依存せず、人工バリアと天然バリアからなる十分に余裕をもたせたシステムによって確保することとしている。一方、海外では倫理的・社会的観点からモニタリングの必要性が認識されつつある[1]。

このような地下深部の処分場におけるモニタリングの信号を伝達する方法としては、ケーブルを用いる有線方式と、ケーブルを用いない無線方式が考えられる。有線方式は、情報通信の面では信頼性の高い方法であるが、その反面、ケーブルの切断の恐れやケーブル敷設作業が煩雑になるなどの問題を抱えている。かつ、処分場ではケーブルを通すことに起因する水みちにより周辺の水理場に影響を与えることが想定される[2]ため、できるだけ長距離の有線方式は避けることが好ましいと考えられる。

無線方式に関しては、低周波電磁波を利用した通信技術が開発されており、一部の土木工事の浅い地中において使用実績がある。しかしながら、空気中における通信等で利用されている高周波電磁波に比べて情報通信容量が少

ないため、その利用は限られてきたのが現状である。

本論文は、地下深部の岩盤中における無線データ通信特性（低周波電磁波伝播特性）に関して、理論的な考え方を示し、スウェーデン核燃料廃棄物管理会社(SKB)の地下研究施設(Äspö Hard Rock Laboratory : 以下, Äspö HRL)で実施した原位置無線データ通信試験結果[3-5]にもとづき、その特徴を検討・評価したものである。

2 地中無線通信技術

2.1 地中通信装置

テレビや携帯電話等に使用されている電波を用いた無線通信技術は、土中あるいは岩盤中では減衰が大きく地下での通信手段として不向きであるため、地中での無線通信には、弾性波や低周波電磁波等を使用した技術が開発されている。本研究で取り扱うのは、海底埋め立て土木工事における地盤沈下測定等で実績がある低周波電磁波を使用した通信装置[6]である。通信装置の基本仕様を Fig.1 と Table 1 に示す。なお、Table 1 の基本仕様のうち花崗岩中の通信距離は、本研究において実証したものである。



Fig.1 Transmission equipment.

A study on the wireless transmission characteristic in the deep underground by Hisashi Takamura (takamura@kajima.com), Kazuo Okutsu, Norihisa Sugahara, Shinichiro Torata, Jin Ohuchi

*1 鹿島建設株式会社 土木設計本部 Kajima Corporation Civil Engineering Design Division 〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30

*2 坂田電機株式会社 Sakata denki
〒202-0022 東京都西東京市柳沢 2-17-20

*3 原子力環境整備促進 資金管理センター Radioactive Waste Management Funding and Research Center
〒105-0001 東京都港区虎ノ門 2-8-10 第 15 森ビル 4 階

Table 1 Specification of the wireless transmission system used in this study.

Transmission distance	Apx.100[m](in the granite) Apx. 40[m](in the seawater)
Transmission period	20[years](1 measurement / day, 1 transmission/week)
Battery	Lithium battery
Frequency	1.2~1.6[kHz]
Velocity of Communication	75[bps]
Capacity of channel	19[ch]

2.2 低周波電磁波伝播理論

センサで得られたデータは送信機内の電磁コイルアンテナで発生した周波数 1.2[kHz]の低周波電磁波を介して岩盤中を伝送される。したがって、岩盤中における無線データ通信特性は、キャリア電磁波の伝播特性により示すことができる。

2.2.1 空気中における電磁コイルアンテナの極近傍の低周波電磁波伝播特性

本研究では通信距離が 100[m]程度の無線通信を検討している。これに対し、電磁コイルアンテナの直径は 30[cm]程度であり通信距離に対して十分小さい。したがって、電磁コイルアンテナの近傍における電磁界は、Fig.2 に示す微小ループ電流が作る電磁界として表現することができる。

空気中におかれた面積 S [m²]の微小ループに角速度 ω [Hz], 波長 λ [m]の電流 I [A]が流れるとき、微小ループから r [m]離れた地点、すなわち、曲座標表示の点(r, θ, ϕ)における電界成分 E_r, E_θ, E_ϕ および磁界成分 H_r, H_θ, H_ϕ の一般解は、自由空間における平面波に対する特性インピーダンスを Z_0 とすると Maxwell の波動方程式にもとづき次のようになる[7]。ここで、 j は虚数単位 $j = \sqrt{-1}$ である。

$$E_r = E_\theta = 0 \tag{1}$$

$$E_\phi = \frac{Z_0 \pi (SI)}{\lambda^2 r} \left(1 - j \frac{\lambda}{2\pi r} \right) \sin \theta e^{j(\omega t - 2\pi r / \lambda)} \tag{2}$$

$$H_r = j \frac{2\pi (SI)}{\lambda^2 r} \left\{ 0 + \frac{\lambda}{2\pi r} - j \left(\frac{\lambda}{2\pi r} \right)^2 \right\} \cos \theta e^{j(\omega t - 2\pi r / \lambda)} \tag{3}$$

$$H_\theta = -\frac{\pi (SI)}{\lambda^2 r} \left\{ 1 - j \frac{\lambda}{2\pi r} - \left(\frac{\lambda}{2\pi r} \right)^2 \right\} \sin \theta e^{j(\omega t - 2\pi r / \lambda)} \tag{4}$$

$$H_\phi = 0 \tag{5}$$

微小ループが作る電磁波について、電磁波の伝播に関する波動インピーダンス (E_ϕ と磁界 H_θ の比) を求めると次式のようなになる。

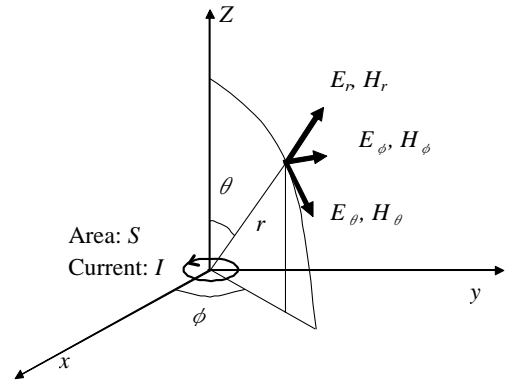


Fig.2 Electromagnetic field emitted by the small loop current.

$$Z_L = \frac{E_\phi}{-H_\theta} = Z_0 \frac{(2\pi r / \lambda)^2 - j(2\pi r / \lambda)}{(2\pi r / \lambda)^2 - j(2\pi r / \lambda) - 1} \tag{6}$$

このとき、 Z_L の大きさ $|Z_L|$ を式で示すと、次のようになる。

$$|Z_L| = Z_0 \sqrt{\frac{(2\pi r / \lambda)^4 - (2\pi r / \lambda)^2}{(2\pi r / \lambda)^4 - (2\pi r / \lambda)^2 + 1}} \tag{7}$$

ここで、本研究で対象とする通信距離は波長約 250[km] に対して高々 100[m]程度であるため、電磁コイル周辺の電磁界は一般解において、 $\lambda / (2\pi r) \gg 1$ とすることにより、次の近傍解として取り扱うことができる。

$$E_\phi = -j \frac{Z_0 (SI)}{2\lambda r^2} \sin \theta e^{j(\omega t - 2\pi r / \lambda)} \tag{8}$$

$$H_r = \frac{(SI)}{2\pi r^3} \cos \theta e^{j(\omega t - 2\pi r / \lambda)} \tag{9}$$

$$H_\theta = \frac{(SI)}{4\pi r^3} \sin \theta e^{j(\omega t - 2\pi r / \lambda)} \tag{10}$$

つまり、ループ近傍の電磁界は r^2 に反比例する項 (誘導電磁界) と、 r^3 に反比例する項 (準静界) が支配的となる。また、波源近傍の波動インピーダンス Z_L は、自由空間の特性インピーダンス Z_0 に対して次のようになる。

$$Z_L = jZ_0 \frac{2\pi r}{\lambda} \tag{11}$$

$$|Z_L| = Z_0 \frac{2\pi r}{\lambda} \tag{12}$$

Fig.3 は自由空間における、波源からの距離に対する波動インピーダンスの大きさ $|Z_L|$ を図示したものである。 $|Z_L|$ は r に比例する形で値が大きくなり、 $r = \lambda / 2\pi \approx 0.16 \lambda$ 付近で極値をとった後、若干小さくなり $|Z_L| = Z_0 = 376.7 \Omega$ に等しくなる。なお、この極値付近が近傍電磁界と遠方電磁界の境界である。

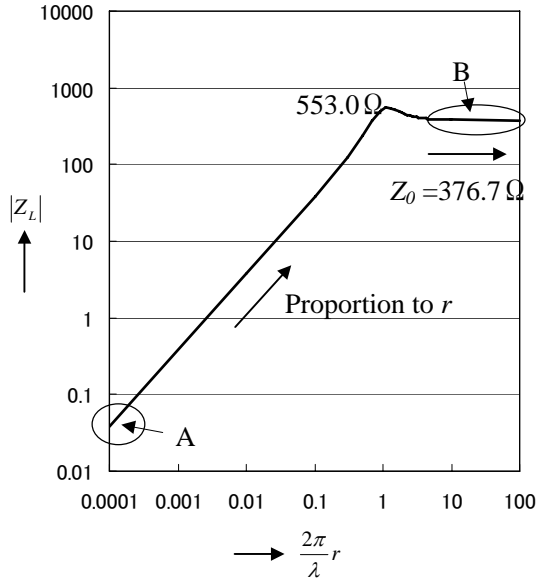


Fig.3 Wave impedance characteristic of the small loop current.

本研究での通信対象領域（100[m]程度）は Fig.3 のグラフの左端付近（Fig.3 中の A 部）であり、その波動インピーダンス Z_L は自由空間における平面波の特性インピーダンス Z_0 (Fig.3 中の B 部) に対して $5 \times 10^{-3} \sim 10^{-4}$ 倍小さな値となる。 $|E_\phi / H_\theta| \ll Z_0$ となることから、本研究におけるキャリア電磁波は、遠方電磁界 (B 部) における平面波と比較すると、磁界成分が大きく卓越 (99.99[%]が磁界成分であり、残りの 0.001[%]が電界成分) する特徴をもつ電磁波であるといえる。

このような電磁波を送信機内の電磁コイルアンテナにより発生し、受信コイルアンテナにおいて電磁誘導現象で励起された電気信号を読み取ることが、本研究で取り扱う地中通信装置の通信原理である。

2.2.2 均一な岩盤中における電磁コイルアンテナの極近傍の低周波電磁波伝播特性

電磁波は導電体、誘電体あるいは磁性体等の損失媒質中を伝播するとき、伝播距離に従い減衰する。岩盤を誘電率が ϵ [F/m], 透磁率が μ [H/m], 導電率が σ [S/m] の均質な媒質とした場合、電磁コイルを波源とし岩盤中を伝播する電磁界の近傍解は 2.2.1 と同様の手順で、次のように導かれる。

$$E_\phi = -j \frac{\omega\mu(SI)}{4\pi r^2} \sin \theta e^{-\gamma r} \quad (13)$$

$$H_r = \frac{(SI)}{2\pi r^3} \cos \theta e^{-\gamma r} \quad (14)$$

$$H_\theta = \frac{(SI)}{4\pi r^3} \sin \theta e^{-\gamma r} \quad (15)$$

ただし、 $\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)}$ (16)

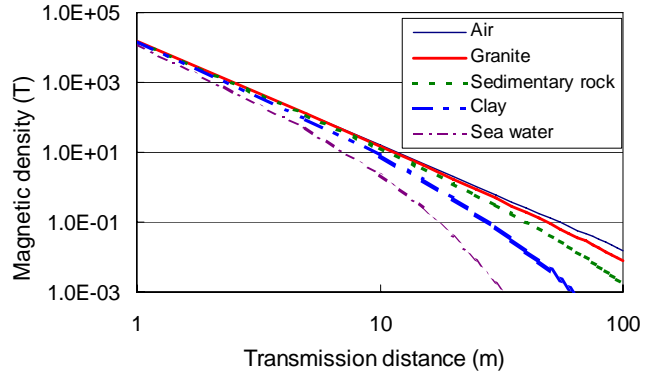


Fig.4 Attenuation characteristic of electromagnetic wave in various environments.

Table 2 Electric constants.

Environment	Electric conductivity [S/m]	Relative magnetic permeability
Air	0	1
Granite	5×10^{-3}	1
Sedimentary rock	5×10^{-2}	1
Cray	5×10^{-1}	1
Sea water	4	1

ここで、伝播定数 γ のオーダは、低周波領域において $\omega \epsilon \ll \sigma$ となるため、(16)式は次のように近似できる。

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu\sigma} \quad (17)$$

つまり、均一な岩盤中における電磁界は、空気中における電磁界と同様に距離の三乗に反比例し、磁界成分が卓越する準静界が、岩盤の透磁率と導電率に応じた減衰を受けつつ伝播することになる。

岩盤の比透磁率は鉄脈等の強磁性体を多く含む岩体以外ではほぼ 1 とみなすことができる[8]ので、岩盤中の低周波電磁波の減衰は岩盤の導電率に依存するといえる。

Fig.4 に、均質な岩盤中（花崗岩、堆積岩）における電磁コイルアンテナ軸上の低周波電磁波（1.2[kHz]）の伝播特性（距離減衰特性）を示す。波源近傍の電磁波は磁界成分が支配的であるため、伝播特性は(14)、(16)式によって代表させた。なお、電気定数は、一般的と考えられる Table 2 の値を使用した[9]。Fig.4 には比較のため、空気中、粘土中および海水中における電磁波伝播特性も示した。

Fig.4 より、花崗岩および堆積岩における電磁波の伝播特性は、空気中と比べてあまり低下しないことがわかる。これが低周波電磁波により地中通信が可能になる理由である。岩盤の導電率は岩盤の含水比と地下水成分によって大きく異なるが、最も保守的な条件である海水中での減衰特性よりは良い伝播特性を示す。

以上のとおり、均一な岩盤中での電磁界は式(13)~(15)

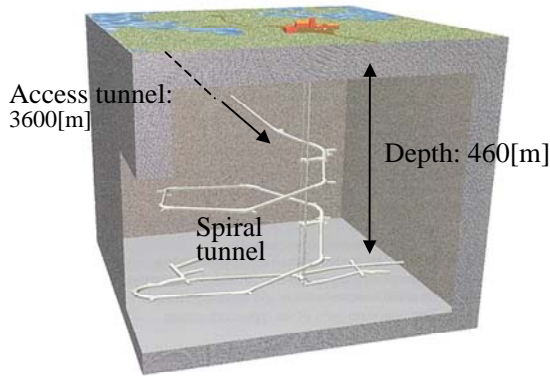
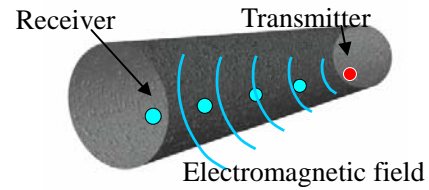
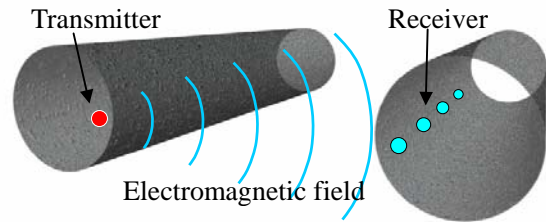


Fig.5 Äspö HRL.



(a) Transmission in one tunnel



(b) Transmission between two tunnels

Fig.7 Test image.

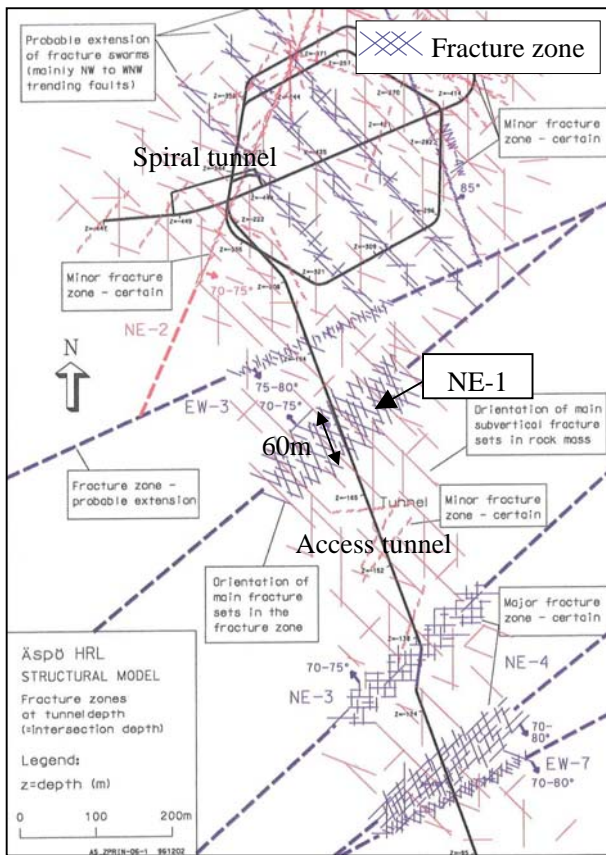


Fig.6 Fractures around Äspö HRL [11].

および式(17)により理論的に表現できる。

3 実際の岩盤中における低周波電磁波伝播特性

次に、Äspö HRL で実施した無線データ通信試験の結果をもとに、実際の岩盤中における低周波電磁波伝播特性を説明する。

3.1 試験サイト

Äspö HRL (Fig.5) は延長 3600[m]のアクセス斜坑、地表からの深度 460[m]まで続くスパイラル坑道、および 2

本の立坑からなる地層処分に関する地下研究施設である。地質は、主として 17~18 億年前の起源をもつ 4 種類の火成岩 (Småland 花崗岩, Äspö 花崗岩, 緑色岩, 粒状花崗岩) からなっており、平均的な密度は $2.75[\text{Mg}/\text{m}^3]$ 、間隙率は 0.35[%]である [10]。

岩盤の亀裂状態は Fig.6 のとおりである。大きな亀裂帯がアクセス斜坑部に五本存在し、これらの亀裂帯は地下水を多く含んでいる。実際に Äspö HRL でサンプリングした地下水の導電率は $0.7\sim 2.8[\text{S}/\text{m}]$ であった (海水は $3.5\sim 4.0[\text{S}/\text{m}]$ 程度)。

アクセス斜坑およびスパイラル坑道は幅、高さとも 5[m]の馬蹄形であり、一部はトンネルボーリングマシン (TBM) で掘削された直径 5[m]の円形断面となっている。坑道は基本的に無支保で掘削されているが、地質の弱部や坑道の拡幅部、交差部では、ロックボルト、吹付コンクリート、金網メッシュ等の支保工が使用されている。その場合の基本仕様は、次のとおりである。

- ・ロックボルト：長さ 3~4[m]、50~80[cm]ピッチ
- ・吹付コンクリート：一部鋼製ファイバ混合
- ・金網メッシュ：太さ 3[mm]、幅 5[cm]のメッシュ

3.2 試験方法

試験では、送信機と受信機を一本の坑道内 (Fig.7(a))あるいは異なる坑道内 (Fig.7(b))に設置し、送信機から送られる通信データを受信機で受信した。

受信機で受信する電圧の大きさは受信点における磁界強度 (H_r と H_θ の二乗平均値) に比例する。また、先述のとおり電磁コイルアンテナ近傍の電磁波伝播特性は磁界強度で示すことができる。したがって、受信機の位置を変えながら送信距離と受信電圧の大きさの関係を測定す

ることにより送信機・受信機間の電磁波伝播特性を把握することができる。

3.3 地表における通信特性

岩盤中における電磁波伝播特性の比較のため、Fig.8 および Fig.9 に、地表において確認した電磁波伝播特性を受信電圧で示す。

Fig.8 は、送信機の電磁コイルアンテナをコイルアンテナの軸が地表面に平行になるように設置したときのコイル周辺での電磁波伝播特性である。実際の受信電圧測定ポイントは図中のそれぞれの矢印の箇所であり、それらのポイントの電圧をもとにコンターとして示している。また、矢印の向きは磁界の向きを示している。磁界はコイルアンテナの周囲に大きく広がっていることがわかる。

Fig.9 に、電磁コイルアンテナ軸上 (Fig.2 における $\theta = 0 : Z$ 軸上) における受信電圧を理論値とともに示す。なお、磁界強度の理論値を電圧に換算する際の換算係数は、送信距離が 10[m] の位置における受信電圧と理論値から求めたものを使っており、以下のグラフでも同じ換算係数を用いている。

Fig.9 より、地上での通信では電磁波は理論値どおり距離の三乗に比例して減衰していることがわかる。

3.4 岩盤中における通信特性

岩盤中における電磁波伝播特性として、一本の坑道内に送信機と受信機を設置 (Fig.7 (a)参照) したときの、電磁コイルアンテナ軸上における電磁波の距離減衰特性を Fig.10 および Fig.11 に示す。

この場合、送信機と受信機の間には坑道内の空気が存在するが、その量は電磁波が伝播する領域全体から見れば非常に小さい。Fig.8 の結果のとおり、コイルアンテナで発生した電磁界はコイル周辺に大きく広がるため、ほとんど全ての電磁波は周辺の岩盤中を通過し、岩盤による減衰を受けたものとして考えることができる。なお、Fig.10 は深度 460[m] 付近の亀裂のない健岩部において無支保で掘削された坑道内での通信試験結果である。

Fig.10 には、岩盤の導電率 σ が 0[S/m] の場合と 0.010[S/m] (試験場所における地下水の導電率 (2.8[S/m]) と岩盤の間隙率 (0.35[%]) を乗じたもの) の場合の理論値も示した。結果は、 σ が 0[S/m] の場合に一致した。Fig.4 に均質花崗岩中における理論的な距離減衰特性を示したとおり、電磁波は周囲の岩盤によって岩盤の導電率に応じた減衰をうけるが、本サイトでの電磁波の距離減衰特性は地表でのものとはほぼ同じであった。

岩盤による減衰を全く受けていないことから、本サイトのマクロな岩盤の導電率は 0[S/m] に等しいといえる。

次に、岩盤中に高透水部が存在する場合の通信特性を示す。

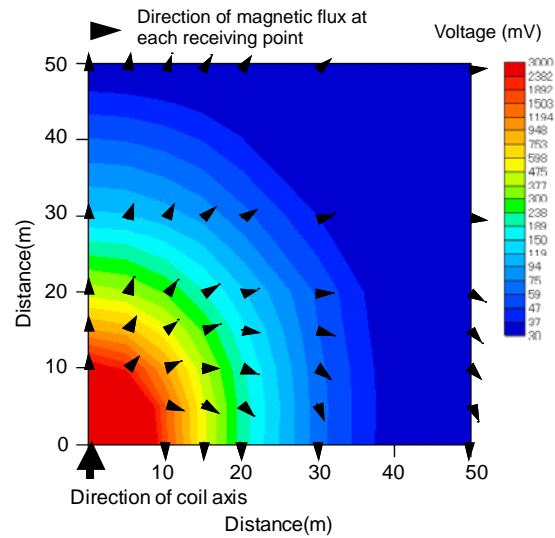


Fig.8 Strength of receiving voltage on the ground surface.

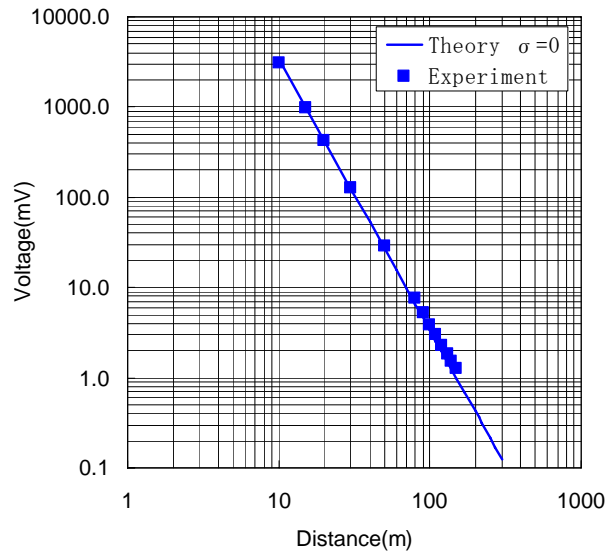


Fig.9 Attenuation characteristic of electromagnetic wave on the ground surface.

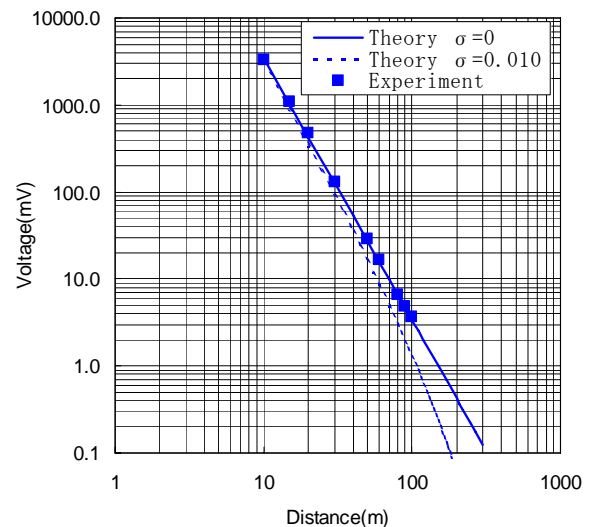


Fig.10 Attenuation characteristic of electromagnetic wave in one tunnel (Rock mass).

Fig.11 は亀裂が多く存在する岩盤中 (Fig.6 における NE-1 亀裂帯) での電磁波の距離減衰特性を示したものである。NE-1 亀裂帯は幅 60[m]にわたり地下水を豊富に含む高透水路が連続している箇所である。地下水の導電率は 1.7[S/m] で、亀裂部分の岩盤の平均間隙率は 2[%]である。Fig.11 には、岩盤の導電率 σ が 0[S/m]の場合と 0.034[S/m] (試験場所における地下水の導電率 (1.7[S/m]) と岩盤の間隙率 (2[%]) を乗じたもの) の場合の理論値も示した。

電磁波の距離減衰特性は、この場合も健全岩部と同様に σ が 0[S/m]の場合に一致した。導電率の高い地下水を豊富に含む亀裂が幅 60[m]にわたり卓越する岩盤中では、電磁コイルアンテナから放射された磁界によって高透水路に誘導電流が励起されることにより電磁エネルギーが消費され、健全岩部に比べて電磁波の距離減衰が大きくなるのではないかと考えられたが、電磁波距離減衰特性は空気中と等しいという結果が得られた。このことからこの亀裂帯における地下水は電気的には不連続であり、そこには誘導電流が励起されていないものと推察される。Äspö HRL における最も大きな亀裂帯である NE-1 亀裂帯において通信性能の低下が見られないことから、その他の花崗岩中においても一般的に見られる亀裂やそこに含まれる地下水による通信性能への影響は小さいと考えられる。

以上のとおり、Äspö HRL の岩盤中における通信特性、すなわち岩盤および亀裂が通信に与える影響はないということを確認することができた。

3.5 金属の影響を受ける場合の通信特性

実際の処分場には、坑道の支保工や廃棄体等様々な媒質が存在し、特に高導電性および高透磁性をもつ鋼製部材は電磁波伝播特性に影響を与える可能性が大きい。Äspö HRL の試験においても坑道内の設備が電磁波伝播特性に

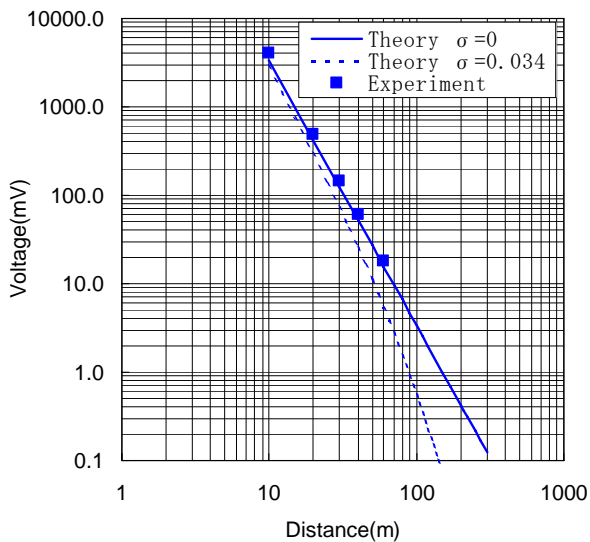


Fig.11 Attenuation characteristic of electromagnetic wave in one tunnel (Fracture zone).

影響を与える結果が得られており、それを以下に説明する。

試験は二本のほぼ平行する坑道 A および坑道 B を利用して行った (Fig.12)。送信機は坑道 A 内に、その送信方向が坑道 A の坑道軸方向 (Fig.12(a)) および坑道軸直角方向 (Fig.12(b)) となるように設置した。受信機は坑道 A と坑道 B に設置した。坑道間の距離は約 30[m]である。坑道 A は TBM で掘削された直径 5 [m]の円形坑道 (無支保) であり、坑道 B は発破掘削された幅 5[m]の馬蹄形坑道で坑道上部は吹付コンクリートで支保されている。

送信方向が坑道軸方向 (X 方向とする) の場合の試験結果を Fig.13、坑道軸直角方向 (Y 方向とする) の場合の試験結果を Fig.14 に示す。なお、Fig.13(a)および Fig.14(a)の横軸は送信機からの距離、Fig.13(b)および Fig.14(b)の横軸は送信機から坑道 B への垂線 (Line L) と坑道 B の交点から坑道 B 内の受信機までの距離である。

Fig.13 に示す坑道 A および坑道 B での受信電圧から、送信方向を坑道 A の坑道軸方向とした場合の電磁波は、3.4 で説明した試験結果と同様に理論どおりに伝播していることがわかる。

一方、送信方向を坑道 A の坑道軸に対して直角、すなわち坑壁方向にした場合の電磁界は、理論値 (岩盤の導電率: 0[S/m]) から大きくなる方向にシフトするという予想

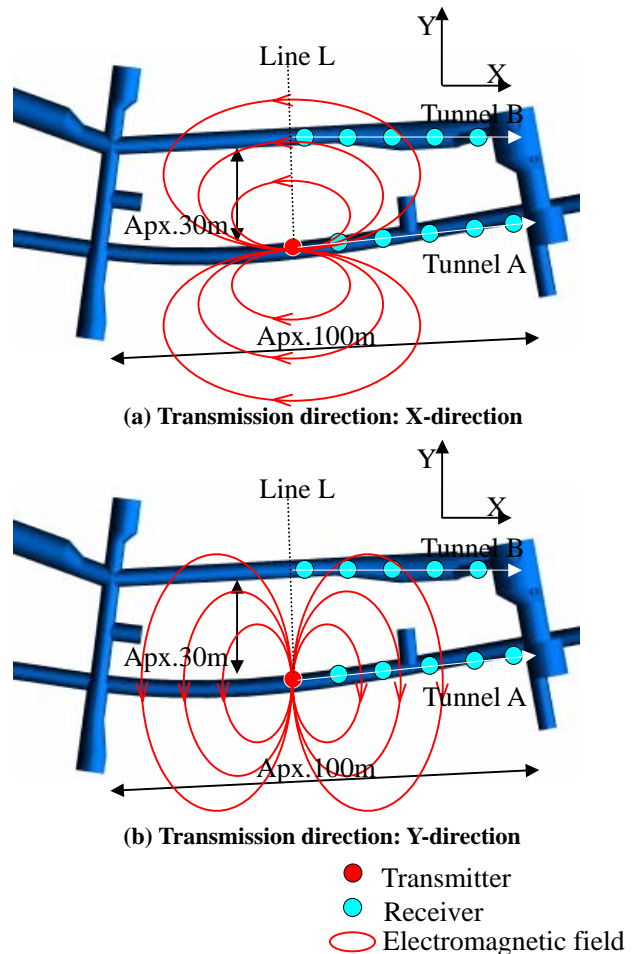


Fig.12 Image of the transmission test between two tunnels.

外の結果が得られた (Fig.14). 坑道 A 内では通信距離が大きくなるに従い, 増加の程度が大きくなり, 通信距離が 50[m]の地点で理論値よりも 6 倍程度大きくなっている. 坑道 B でも, 2~4 倍程度大きな値が得られている.

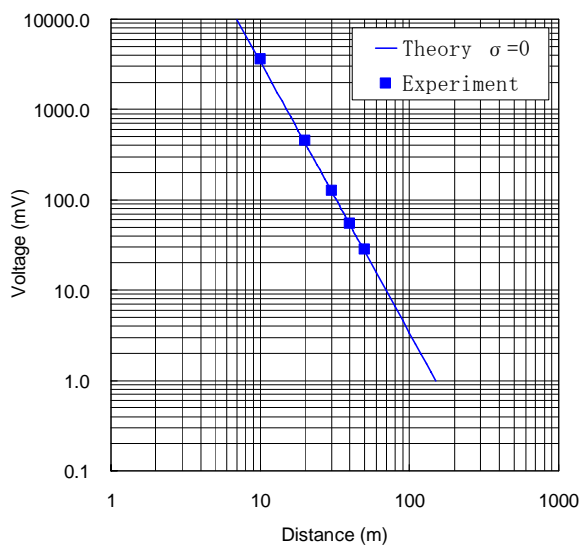
このように送信方向に違いにより電磁波の伝播挙動が異なる現象について以下に考察した.

岩盤中で電磁波が増幅する現象は, 鉱脈等の強磁性体等が存在する場所で稀に見られる[8]が, 本試験サイトでは, 先に説明した試験結果 (Fig.10, Fig.11) も考慮すると岩盤による影響とは考えにくい. 波長が約 250[km]の電磁波が幅 5[m]の坑道内で反射を繰り返し定常波として増幅する可能性もない.

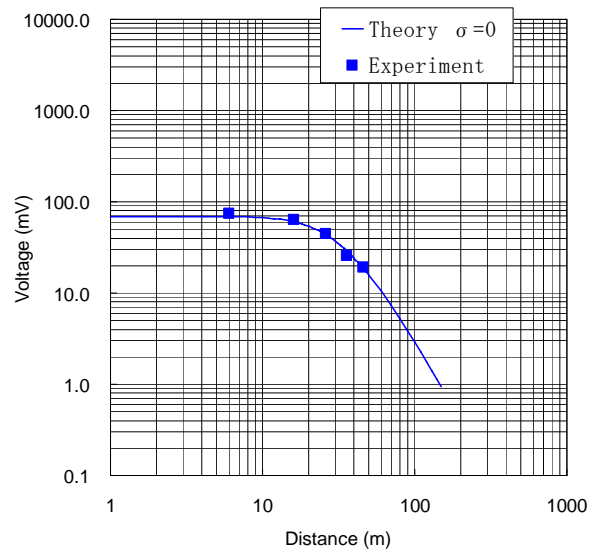
ところで, 坑道 A および B には側部の坑壁面にそって

地下研究所内で実施されている各種の試験データを伝送する通信ケーブルが敷設されている. ケーブルは高導電・高透磁材料であることから, これらのケーブルが電磁波伝播特性に影響を与えている可能性があるのではないかと考えた. そこで, その影響の可能性について三次元電磁界解析 (CST 社製 EM-Studio) により検討した.

解析では坑道 A および B を Fig.15 に示すとおりモデル化した. 離間距離は 30[m], それぞれの坑道の壁面には ϕ 50[mm]のケーブルを一本ずつモデル化した. 波源は坑道 A 内に設定し送信方向を X, Y 方向とした. 解析領域は波源を中心として X, Y 方向にそれぞれ 200[m], 300[m], 高さ方向に 200[m]とした. なお, 解析で使用した各媒質の電気定数を Table 3 に示す. 岩盤の導電率は先の試験結果に

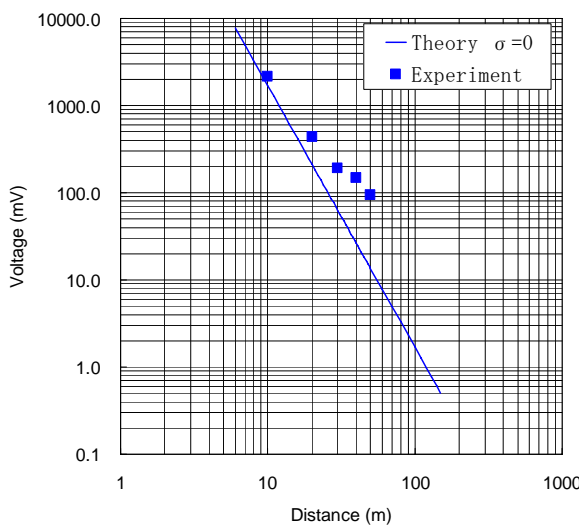


(a) Tunnel A

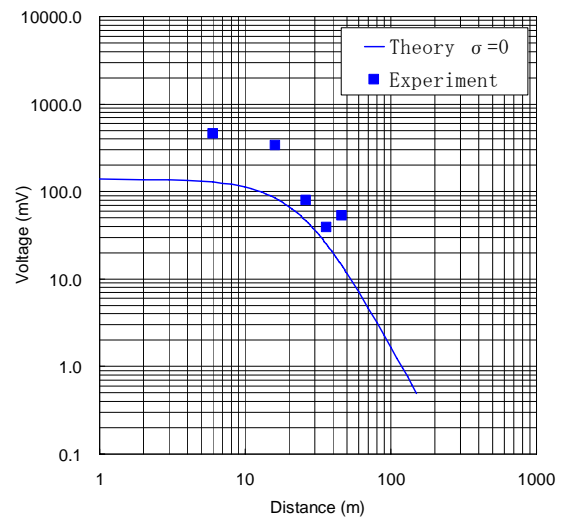


(b) Tunnel B

Fig.13 Attenuation characteristic of electromagnetic wave between two tunnels. Transmission direction: X-direction



(a) Tunnel A



(b) Tunnel B

Fig.14 Attenuation characteristic of electromagnetic wave between two tunnels. Transmission direction: Y-direction

もとづき $0[S/m]$ とした。

送信方向が X 方向の場合における X 軸上および Y 軸上の解析結果とそれぞれに相応する試験結果との比較を Fig.16(a)に示す。解析結果と試験結果はほぼ一致している。解析によっても、送信方向がケーブルの敷設方向と同じ場合にはケーブルが電磁波伝播特性に与える影響がないことがわかる。

Fig.16(b)に、送信方向が Y 方向の場合の解析結果と試験結果の比較を示す。X 軸上の電磁波の減衰の程度は通信距離に従い小さくなるという解析結果が得られ、試験結果と同じ傾向を示している。また、Y 軸上では坑道 B のケーブルの前後で電磁界強度が大きく増減するという解析結果が得られた。試験では、坑道 B 内の電磁界強度が増加する箇所では電磁界を受信していたものと考えると整合がとれる。

送信方向と平行にケーブルがある場合には、磁束の向きとケーブルの向きが同じでありケーブルが磁界に与える影響は小さい。一方、送信方向に対して垂直な面内にケ

ーブルがある場合には、送信機から放射された磁束の多くがケーブルと交差するため、高透磁材料のケーブルに磁界がひきよせられるようにゆがめられているものと考えられる。その結果、局所的にケーブル付近に磁界が集中し受信電圧が増加したものと考えられる。

4 結論

本研究では、地層処分場のような深部地下施設からのデータ通信に、従来技術に比して多くの利点を有する低周波電磁波を用いた地中無線の技術的可能性を検討した。

結論を以下にまとめる。

- ① 高導電・高透磁媒質の影響を受けない場合の花崗岩中における低周波電磁波の伝播特性は、理論どおりに評価できる。
- ② 花崗岩中では、導電率の高い海水系地下水が豊富に存在する亀裂帯においても無線通信性能が低下することがなく通信が可能である。

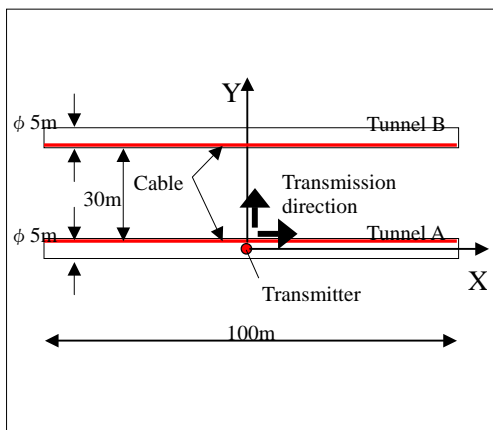
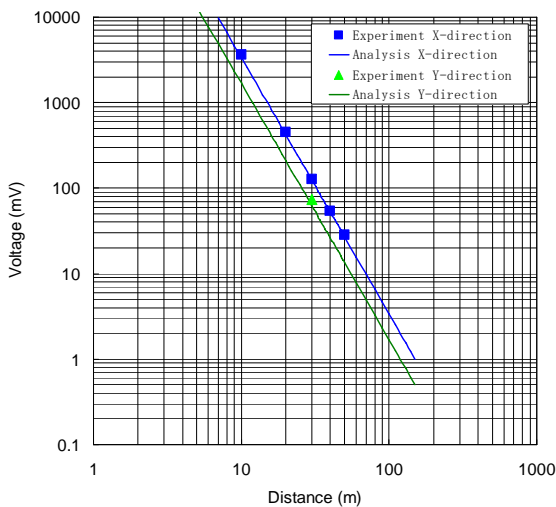


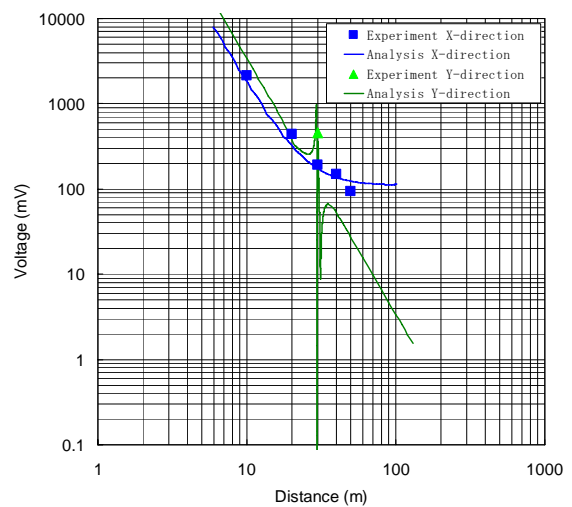
Fig.15 Analysis model.

Table 3 Electric constants for the analysis.

Component	Electric conductivity [S/m]	Relative magnetic permeability
Rock	0	1
Cable	1×10^5	2000
Air	0	1



(a) Transmission direction: X-direction



(b) Transmission direction: Y-direction

Fig.16 Comparison of electromagnetic wave between experiment and analysis.

- ③ 高導電・高透磁媒質等の影響を受ける場合の花崗岩中における低周波電磁波の伝播特性は、媒質と送信機・受信機との位置関係や送信方向との関係を適切に考慮することで評価することができる。

なお、電磁波伝播特性は地質や地下水の特性により変わりうるものであり、引き続き多様な環境下において無線通信性能に関するデータの充実を図ることが重要である。また、今後は地層処分施設の計測に関係して人工バリア等も模擬した実環境下における無線データ通信実証試験等を行う予定である。

謝辞

本研究で使用した Äspö HRL における通信試験データは、原子力環境整備促進・資金管理センターが経済産業省から受託実施した研究の中で得られた成果の一部であり、関係各位に深く感謝する次第である。

参考文献

- [1] 大内 仁 他:地層処分にかかわるモニタリングの研究—位置付け及び技術的可能性—, 原子力環境整備促進・資金管理センター, RWMC-TRJ-04003 (2004).
- [2] European Commission: Final Report, Thematic Network on the Role of Monitoring in a Phased Approach to Geological Disposal of Radioactive Waste, Contract No. FIKW-CT-2001-20130, European Commission (2003).
- [3] 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成14年度高レベル放射性廃棄物処分事業推進調査報告書—モニタリング機器技術高度化調査—, 原子力環境整備促進・資金管理センター (2003).
- [4] 吉村公孝 他:地中無線通信技術の放射性廃棄物地層処分モニタリングへの適用性検討, 物理探査学会第109回学術講演会講演論文集, 大阪, 平成15年10月14日-16日, pp.202-205 (2003).
- [5] 高尾肇 他:高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるモニタリングに係わる計測・伝送技術の検討, 土木学会第57回年次学術講演会講演概要集, 北海道, 平成14年9月25日-27日, pp397-398 (2002).
- [6] 遠目塚良一 他:無線による地中通信システムの開発 最新の地盤計測技術に関するシンポジウム発表論文, 大阪, 平成11年12月8日 (1999).
- [7] 清水康敬 他:最新電磁波の吸収と遮蔽, 日経技術図書, 東京 (1999).
- [8] 物理探査学会:物理探査ハンドブック手法編, 第6章電磁探査, 小宮山印刷工業, 東京 (1998).
- [9] 進士昌明:無線通信の電波伝搬, 電子情報通信学会, 東京 (1992).
- [10] Winberg, A. et al.: Äspö Hard Rock Laboratory, Final report of the first stage of the tracer retention understanding experiments, TR-00-07, SKB (2000).
- [11] Ingvar, R. et al: Äspö HRL –Geoscientific evaluation 1997/5 Models based on site characterization 1986-1995, TR-00-20, SKB (1997).

