

微弱磁界計測のための低周波環境磁界計測と解析

Environmental Low-Frequency Magnetic Field Analysis for Measurement of Weak Magnetic Fields

小林宏一郎・山崎慶太* 東京電機大学・*竹中工務店

K. Kobayashi and K. Yamazaki*, Tokyo Denki University and *Takenaka Corporation

Biomagnetic signals are very weak compared with those of environmental magnetic fields created by large mechanical devices such as trains and motorcars. In Japan, it is supposed that trains, especially direct-current electric railcars, are among the main sources of magnetic noise, which affects the environmental magnetic field. In this paper, first, the relationship between environmental magnetic fields and the electric current of direct-current electric railcars using personal tracks is discussed. A method for calculating the magnetic fluctuation from that of the electric current of the feeder line, taking account of the leakage electric current to the ground, is then proposed, and its validity is verified by comparison with measurements.

Key words: environmental magnetic field, weak magnetic field, direct-current electric railcar, leakage electric current

1. はじめに

近年、電磁界の生体影響などの環境に対する話題が多く聞かれるようになった。電磁界の生体影響について、「電磁界の生体影響に関する現状評価と今後の課題」¹⁾では、電磁界の実態と実験研究で得られた成果をもとに評価をすれば、通常の居住環境における電磁界が人の健康に影響するとは言えないとしている。一方、生体磁気計測などの微弱磁界の計測や半導体製造装置のエレクトロンビームマスク描画装置、電子顕微鏡の精度は、低周波環境磁界変動の影響を受け、磁気シールド技術が必要になる場合がある。したがって、環境磁界変動の大きさ、周波数特性を予測、把握することは重要である。

通常、100 Hz以下の環境磁界変動の要因としては、電車の送・帰電流^{2), 3)}、自動車やエレベータ、鉄扉などの鉄で構成された磁性体の地磁気中の移動⁴⁾、あるいは送電線の電流⁵⁾やファン・ポンプの回転体などが挙げられる。その中でも、国内外の都市の環境磁界の測定結果においては、経時変動における振幅値、周波数スペクトルは、近傍の直流電車が運転している時間帯（日中）と運転していない時間帯（深夜）で大きく異なる場合が多く、直流電車の運転が環境磁界変動の主な要因であると考えられている²⁾。特に、ラッシュ時における混雑の激しい大都市の鉄道では、短い

駅間隔において、大量の乗客を乗せた十台程度の車両で構成された一編成の列車を大きな負荷で起動・停止させる必要があるため、交流駆動より直流駆動が用いられるケースが多く、起動電流も大きくなる。そのため、直流電車は、DCに近い数 Hz以下の低周波環境磁界変動の主な要因となると予測される。

さらに、鹿児島市内の垂直方向の環境磁界と市電（道路に敷設してある路面電車：併用軌道）の各路線の架線電流を同時に計測した結果、軌道に近傍した計測点では、ラッシュ時、日中通常時の時間帯では両者の間に強い相関が認められ、低周波領域における周波数スペクトル（振幅値）の傾きは両者でほぼ一致した³⁾。また、その変動の大きさは、主にレールから地盤への漏れ抵抗によって決まる漏洩電流に起因する架線と帰線の不平衡電流と、一編成車両の走行に要する電流（特に起動するために要する電流）、同時走行する電車の台数に依存することが確認できた。

そこで筆者らは、 10^{-11} T以下の微弱な生体磁気計測やローレンツ力を用いたエレクトロンビームマスク描画装置に大きく影響し、さらに磁気シールドルームの性能の設計に重要である、地下鉄、私鉄、JRなどの専用軌道の直流電車が走行する一般的な都市の環境磁界をさらに定量的に把握・予測するため、JR線の架線電流とその周辺の環境磁界を測定し、比較・検討した。

まず、宮城県多賀城市において、主に10 Hz以下の低周波環境磁界を連続測定し、その主な要因が付近を走行する直流電車のJR仙石線であることを確認した。次に、低周波環境磁界とJR仙石線の架線電流の変動を同時に測定し、いろいろな時間帯における両者の周波数特性、経時変動を比較検討し、相関を評価した。さらに、両者の相関の高い時間帯では、直流電車の送・帰電流に起因する環境磁界変動の発生メカニズムを定量的に検討し、架線電流の変動から環境磁界変動の予測を試みた。また、軌道からの距離をパラメータに多数の点で環境磁界を測定し、付近の一般的な砕石道床の専用軌道を走行する直流電車に起因する磁気ノイズの距離減衰特性を把握した。

2. 測定地点および測定方法

Fig. 1にJR仙石線の駅とA変電所および6つの測定点

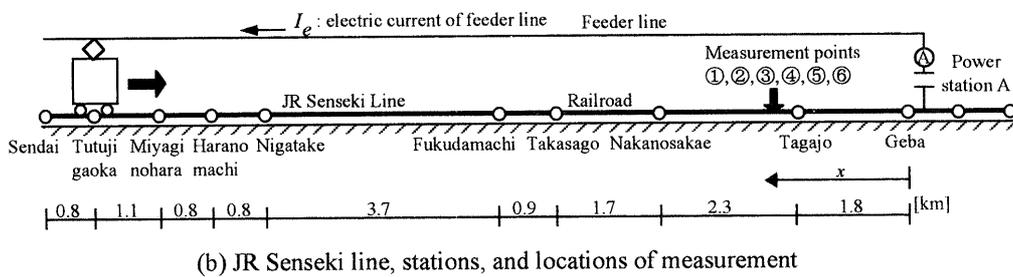
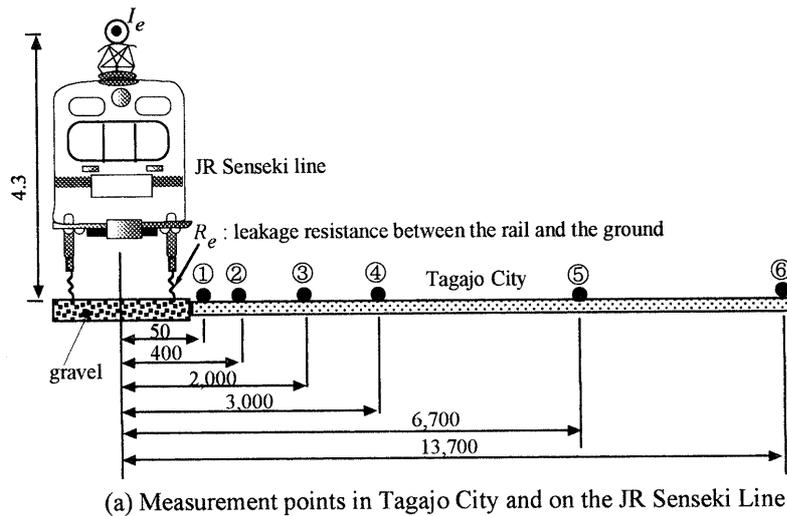


Fig. 1 Measurement points, stations, and railroad.

の関係を示す。測定は、A変電所が送電しているJR仙石線上り、下りの架線電流と①～⑥の測定点における環境磁界（垂直方向）を連続記録した。軌道からの最短距離は、それぞれ、①点で50m、②点で400m、③点で2,000m、④点で3,000m、⑤点で6,700m、⑥点で13,700mである。環境磁界の測定を垂直方向のみとしたのは、変動の要因が架線、帰線の水平方向の電流と推測され、軌道のごく近傍の測定点を除けば、磁界の方向はほぼ垂直に限定されると考えられたためである。JR仙石線は直流駆動、軌道は複線の専用軌道、通常の車両は4両編成である。JR仙石線は、ほとんど各駅停車であり、発着本数は、日中で上下それぞれ毎時5本程度うち1～2本が快速電車、朝のラッシュ時の7時台では上下それぞれ9本程度で快速1～2本である。

電流および磁界の測定日は、曇り時々晴れ一時雨であり、前日は、大雨であった。

3. 測定結果

3.1 環境磁界変動の一昼夜連続測定結果

Fig. 2に、①点における環境磁界変動の一昼夜連続測定結果を示す。環境磁界変動は、直流電車が走行している日中と、停止している深夜の時間帯で大きく異なっており、環境磁界変動が主に直流電車に起因していると考えられる（後述の Fig. 3, Fig. 6 からわかる）。

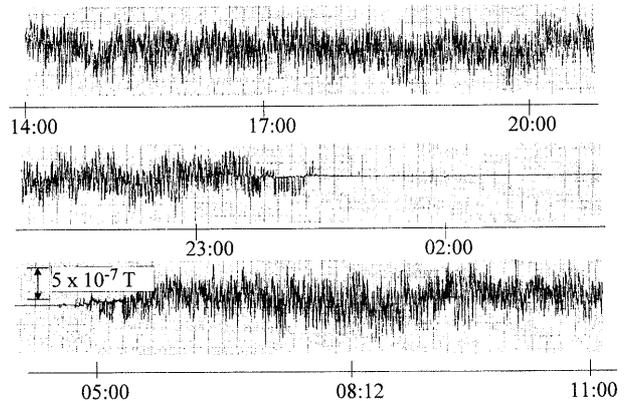


Fig. 2 Fluctuation of the magnetic field in the vertical direction at point ① from one day to the next.

3.2 周波数スペクトル

Fig. 3に、深夜1:00（電車無稼働時）、日中12:00（電車稼働時）の各地点における100 Hz以下の環境磁界垂直成分の周波数スペクトル、および同一時間帯のA変電所から供給される上りの架線電流の周波数スペクトルを示す。Fig. 3(a), (b)に示す①、②点の磁界の周波数スペクトルは、特に10Hz以下で日中電車稼働時、Fig. 2(c)のA変電所から供給される架線電流とはほぼ同じ $1/f \sim 1/f^{1.25}$ の傾きになっている。しかも、電流がほぼ0である深夜の電車無稼働時の環境磁界は、日中電車稼働時とは大きく異なっ

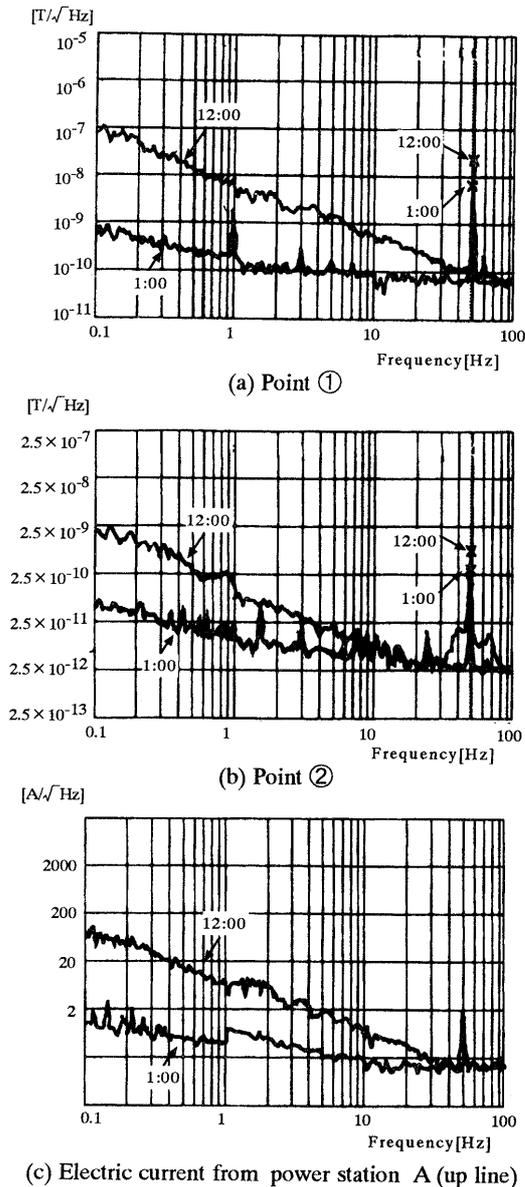


Fig. 3 Spectrum density of the environmental magnetic field (vertical component) and current of the feeder line.

ているので、環境磁界の周波数スペクトルでは、架線電流の影響が大きいと考えられる。環境磁界、架線電流の周波数スペクトルの低周波における傾きは、文献3)の鹿児島市内の環境磁気ノイズ、市電の架線電流とおおむね一致している。

3.3 環境磁界と架線電流、環境磁界間の相関

一例として Fig. 4 に①点と③点の日中(12:00~12:10)の環境磁界(垂直方向: 図中 B_z で示す)および A 変電所の架線電流の変動を示す。日中 12 時台の列車本数は、5 本(下り)・5 本(上り)である。①、③点における環境磁界の最大変動幅は、 7.0×10^{-7} T、 2.0×10^{-8} T である。各測定点の波形は似通っており、しかも時間帯にかかわらず最大変動幅は、①点では 7.0×10^{-7} T、③点では 2.0×10^{-8} T 程度であり、ほぼ軌道からの距離に反比例して減衰する傾

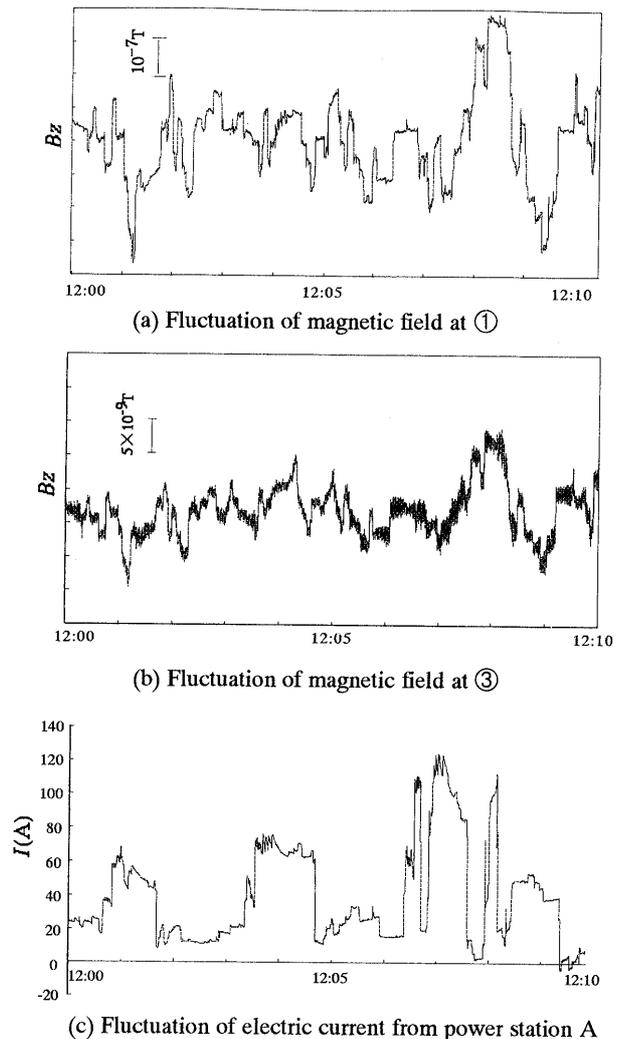


Fig. 4 Fluctuation of the magnetic field and electric current.

向が認められた。今回の測定結果では、各測定点での最大変動幅は時間帯にかかわらずほぼ一定である傾向が認められた。これは、鹿児島市の市電と異なり JR 仙石線の 1 時間当たりの発進台数がラッシュ時でも他の時間帯に比べて大幅に台数が増大せず、複数の電車の同時起動がほとんどないため、環境磁界が依存する電流値に大きな変動がないことによると考えられる。

また、架線電流と各環境磁界の波形の相関係数は 0.5 程度と低い結果となった。この結果は、路線一系統ごとに単独に電流を供給しているために高い相関が得られている鹿児島市電と環境磁界の関係と異なり、同じ電車に複数の変電所から電流が供給される、一系統から複数の電車に電流が供給されるなどの理由で、環境磁界と架線電流には相関が認められなかったと推測される。一方、環境磁界間の相関係数は、0.8 以上で強い相関が認められた。これは、各測定点の磁界が同じ信号源に影響されていることを示している。

最終電車走行時では、他に電車が走行していないことや複数の変電所から同様な形状(電流の強度は異なるが波形

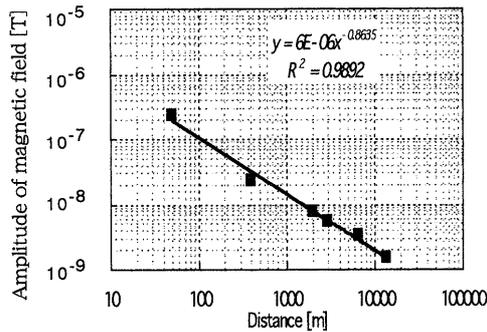


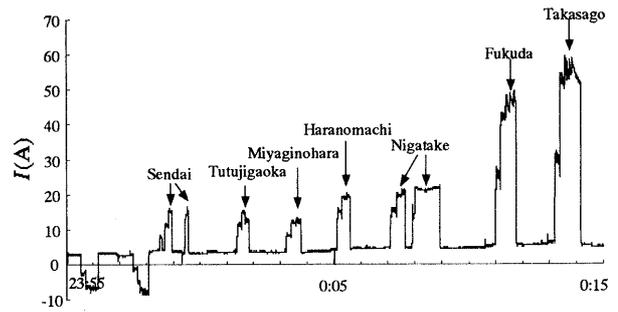
Fig. 5 Relation between the amplitude of the magnetic field (B_z) and the distance from the railroad.

は類似している)の電流が供給されるため、環境磁界と架線電流の間には強い相関が認められる。一例として、①点の磁界変動とA変電所(下り)の電流では、0.82の相関が認められた。また、最終電車走行時では、一編成車両のみに供給される電流の影響による磁界を把握することができる。Fig. 5に最終電車の①~⑥点における同じ駅の出発時の起動電流による磁界変動幅と各測定点の軌道からの距離の関係を示す。Fig. 5において、近似式 $y = 6 \times 10^{-6} x^{-0.86}$ は、対数表示における磁界変動幅(y)と軌道からの距離(x)の関係を示し、 R^2 は寄与率を示す。各測定点における変動幅は、およそ距離に反比例して、減衰する傾向が認められた。

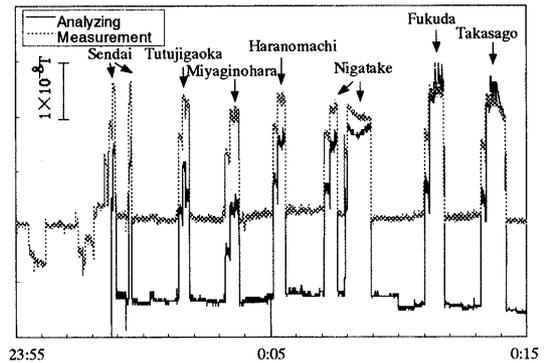
4. 考 察

最終電車走行時において、架線電流値と各測定点環境磁界には比較的強い相関が認められたので、架線電流値から磁界変動の大きさを予測することができると考えられる。JR仙石線の各駅停車電車の場合、架線電流の顕著な変動は駅での起動電流によるものである。また、最終電車の走行時は、対象とする駅間に一編成車両のみ走行しているため、時刻表より、架線電流の波形を各駅の起動電流に同定することが可能である。一方、架線の電流値の変動のみから磁界変動を求めると、実測値より1桁程度大きくなる。そのため、電車に起因する磁界変動は、レールから地盤への漏洩電流による架線と帰線の差(不平衡電流)の変動に起因すると考えられた。この不平衡電流の架線電流に対する割合は、軌道方式、軌道の施工法などに依存する。そこで、文献6)による(1)~(2)式を用いて、実際に測定した各駅起動時の起動電流と供給される変電所から駅への距離と、軌道に用いられたレールの抵抗、接地抵抗から求めた特性距離 x_c によって地盤への漏洩電流を求めることによって、磁界の変動を予測できると考えた。磁界変動は、測定結果ではほぼ距離に反比例して、減衰する傾向が認められたので、地盤への漏洩電流による不平衡電流を無限長電流と仮定した(3)式によって求めた。

$$I_n = I_0(1 - e^{-x/x_c}) \quad (1)$$



(a) Fluctuation of the electric current from power station A



(b) Fluctuation of the magnetic field at ③ obtained by analysis from the electric current applied by power station A and by measurement.

Fig. 6 Fluctuation of the electric current from power station A and fluctuation of the magnetic field (B_z) at ③ obtained by analysis from the electric current applied by power station A and by measurement.

$$x_c = \sqrt{\frac{R_e}{R_r}} \quad (2)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 I_n}{2\pi l} \quad (3)$$

ここで、 I_0 : 架線電流測定値[A], x_c : 特性距離[m], x : A変電所から各駅(起動電流発生場所)までの距離[m], R_r : レールの長さ当たりの電気抵抗[Ω/m] (今回は $20 \mu\Omega/m$ を用いた^{7), 8)}, R_e : レールの対地漏れ抵抗[Ωm] (今回は $10 \Omega km$ を用いた^{7), 8)}, l : 軌道からの距離[m], μ_0 : 真空の透磁率($4\pi \times 10^{-7}$).

Fig. 6に、解析に用いたA変電所の架線電流および②点の測定結果と解析結果を示す。A変電所の架線電流は、40A程度と電車の起動時に使用する電流に比べ少ない値であるが、実際の電車には他の変電所からも電流が供給されている。しかし、最終電車走行時の測定点(②点)近傍の架線には、A変電所から供給される電流のみが流れており、他の変電所から最終電車に送られる電流は、②点の磁界にあまり影響を与えていないため、解析にはA変電所の電流を使用した。

仙台駅、榴ヶ岡駅、宮城野原駅起動時には解析結果の磁界変動幅が実測結果とほぼ一致し、原ノ町駅、苦竹駅、福田町駅、高砂駅起動時では解析結果が実測結果よりやや大

きめになっていた。A変電所から供給される電流がほぼ同じ40 A程度であっても、最も遠い仙台駅、榴ヶ岡駅、宮城野原駅起動時の順に磁界変動幅が小さくなり、電流がやや高くなる原ノ町起動時で大きくなる傾向は、解析結果と実測結果はおおむねよく一致していた。

以上の結果から、架線、帰線の不平衡電流に起因する低周波磁界変動は、電車の起動する駅（起動電流発生場所）と電流を供給する変電所の距離と漏洩電流が大きくなるに従い、大きくなるといえる。そのため、今回の測定では、測定点（①～③点）から10 km以上離れた仙台、榴ヶ岡での電車起動時における40 A以下の測定点近傍の架線電流に起因する環境磁界変動が測定できた。

これらの磁界変動は、生体磁気計測などの微弱磁界計測には影響があるが、最も軌道に近い①点においても人体に影響すると考えられるレベルに比べて2桁以上低いレベルである⁹⁾。

5. ま と め

砕石道床の専用軌道、直流駆動のJR仙石線電車の架線電流と軌道近傍の垂直方向の主に10 Hz以下の低周波環境磁界変動を同時に測定した結果、電車に起因する低周波磁界変動について以下のことが明らかになった。

(1) 環境磁界変動の一昼夜連続測定結果より、環境磁界変動が主に直流電車に起因していた。

(2) 軌道からそれぞれ50 m、400 mの①点、②点における低周波環境磁界の昼中電車稼働時の周波数スペクトルは、架線電流とほぼ同じ $1/f \sim 1/f^{1.25}$ の傾きで、電流がほぼ0である深夜の電車無稼働時とは大きく異なっているので、架線電流の影響が大きいと考えられた。

(3) 軌道からの距離をパラメータに環境磁界変動を測定した結果、変動幅はほぼ距離に反比例して、減衰する傾向が認められた。

(4) 最終電車走行時の一編成車両のみに電流が供給される時間帯には、環境磁界と架線電流には比較的強い相関が認められた。

(5) 上記以外の時間帯は、同じ電車に複数の変電所から電流が供給される、一系統から複数の電車に電流が供給されるなどの理由で、環境磁界と架線電流には相関が認められなかった。また、これらの朝ラッシュ時、日中、夜間の時間帯では、磁界の変動幅に大きな差異は認められなかった。

(6) 軌道に用いられたレールの抵抗、接地抵抗から得た特性距離と、実際に測定した各駅起動時の起動電流と変電所から起動する駅への距離をパラメータとして地盤への漏洩電流を求め、最終電車走行時の磁界の変動を予測した。予測された環境磁界変動は、その変動状況、大きさとも測

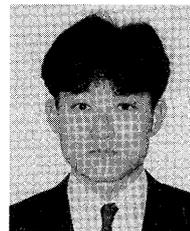
定結果と比較的よく一致しており、架線、帰線の不平衡電流に起因する低周波磁界変動は、電車の起動する駅（起動電流発生場所）と電流を供給する変電所の距離が大きくなるに従い漏洩電流が増大することによって大きくなる。

謝 辞 JR仙石線の架線電流等の測定に快くご協力いただいた、東日本旅客鉄道(株)仙台第一電力区の大澤光雄区長をはじめとした仙台第一電力区の皆様、仙台第二電力区の佐藤哲夫区長に深謝致します。また、貴重なご意見、ご助言、および測定の協力をいただいた、東北学院大学の芳賀昭教授ならびに同研究室のメンバー、マグバン(株)社長・松葉博則氏、東日本旅客鉄道(株)・出野市郎氏に謝意を表します。

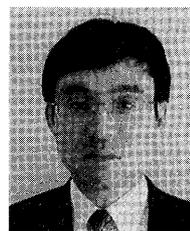
文 献

- 1) 「電磁界の生体影響に関する現状評価と今後の課題」：(電気学会出版, 1998).
- 2) 山崎慶太, 湯ノ口万友, 栗城真也, 内川義則, 小林宏一郎, 鎌田清孝, 中瀬知哉, 西本英彦, 藤原耕二: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-97, 25 (1997).
- 3) 山崎慶太, 湯ノ口万友, 鎌田清孝, 内川義則: 日本生体磁気学会論文誌, 10(2), 29 (1997).
- 4) 鎌田清孝, 湯ノ口万友, 山崎慶太, 中瀬知哉, 藤原耕二, 高橋則夫: 日本応用磁気学会誌, 23, 1509 (1999).
- 5) J. Vrba: "SQUID Gradiometer in Real Environments," SQUID Sensors, p. 117, ed. by H. Weinstock (Kluwer Academic Publishers, 1996).
- 6) 松葉博則, 藤巻則夫, 宮内 哲: 日本生体磁気学会論文誌, 10(2), 1 (1997).
- 7) 電気学会腐食防止研究委員会編: 電食・土壌腐食ハンドブック (1982).
- 8) JR 東日本仙台第一電力区, JR 東日本の出野氏による.
- 9) IRPA: 国際放射線防護協会による.

(2001年7月3日受理)



小林宏一郎 こばやし こういちろう
平6 東京電機大学大学院理工学研究科応用電子工学専攻修士課程修了, 同年 池上通信機(株)入社, 平7 東京電機大学理工学部応用電子工学科助手, 平10 東京電機大学超電導応用研究所助手, 現在に至る。
専門 生体・環境磁気計測 (工博)



山崎慶太 やまさき けいた
昭57 早稲田大学大学院理工学研究科建設工学専攻修士課程修了, 同年 竹中工務店入社, 現在に至る。
専門 建設・磁界環境 (工博)