

浜田釜山間海底ケーブルに誘起される微小電圧変動 と対馬暖流流速変動のクロススペクトル解析

川建, 和雄
九州大学応用力学研究所 : 教授

田代, 昭正
九州大学応用力学研究所 : 文部技官

石橋, 道芳
九州大学応用力学研究所 : 文部技官

篠崎, 高茂
九州大学応用力学研究所 : 文部技官

他

<https://doi.org/10.15017/4743891>

出版情報 : 應用力學研究所所報. 68, pp.167-182, 1989-10. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



浜田釜山間海底ケーブルに誘起される微小電圧変動 と対馬暖流流速変動のクロススペクトル解析

川 建 和 雄*	田 代 昭 正†
石 橋 道 芳†	篠 崎 高 茂†
長 浜 智 基‡	金 子 新§
水 野 信二郎§	小 島 淳 一〃
青 木 俊 実¶	石 本 達 治¶
崔 秉 昊**	金 坵††
三井田 恒 博‡‡	大 内 康 敬§§

摘 要

浜田釜山間に敷設されている海底ケーブルに誘起される微小電圧変動と、対馬暖流流速変動の、クロススペクトル解析を行い、両者間に高い相関があることを示した。

Key words: voltage variation in submarine cable, speed variation of Tsushima warm current, cross-spectral analysis, Faraday's law on electromagnetic induction

1. 緒 言

磁束が変化すれば電場が生ずる。Faraday の法則である。磁場中を導体が動けば、その両端に電位差が生ずる。水は導体であるから、地球磁場中を流れるとき、その両端に電位差を生じている。これを測るため、Faraday は、1832 年 1 月 10 日 Kensington 宮殿の池、次いで 1 月 12 日 Thames 川 Waterloo

* 九州大学教授，応用力学研究所

† 文部技官，応用力学研究所

‡ 九州大学助手，応用力学研究所

§ 九州大学助教授，応用力学研究所

〃 国際電信電話株式会社目黒研究所

¶ 国際電信電話株式会社浜田国際中継所

** 成均館大学校教授，大韓民国

†† ソウル大学校教授，大韓民国

‡‡ 福岡県豊前水産試験場長

§§ 福岡県福岡水産試験場研究一課長

橋に於いて、実験を行ったという¹⁾。期待した実験結果はその時得られなかったけれども、その志は後に引継がれた。Wollaston は、1851 年 Dover 海峡を横切る電信線上の潮流に基く電圧変動を記録し、Faraday の予測が正しいことを示した²⁾。

海底に敷設されたケーブルに誘導される微細な電圧変動を測定することによって、海峡の流れを計測する試みが、例えば、英佛間 Dover 海峡²⁾³⁾、米国 Florida 海峡、そして豪ニュージランド間 Tasman 海⁴⁾等に於いて行われている。これにより、海流の横断面上分布は判からないけれども、海峡全体を横切る流量を推定する途が開ける。

福岡水産試験場と応用力学研究所は、1983 年から対馬暖流に関し共同研究を行っている。著者の一人崔は、去 1986 年 9 月韓国を訪れた他の一人川建に、Faraday の予測を紹介し、これに関する世界の趨勢を述べると共に、対馬海峡に於ける計測の重要性を力説した。これを契機に、国際電信電話株式会社が加わり共同研究が開始された。

海底ケーブル電圧測定による断面全体の流量と、係留線による一点或は数点の流速分布は、対馬暖流の全体像を把握する上で、互いに相補い、貴重なデータとなり得る。更に、海底ケーブル電圧測定による流量推定法が確立されれば、海流の長期計測が可能となり、海洋を知る有力な手段が得られることになる。海洋学の発展及び海洋開発に貢献するところ大であると考えられる。

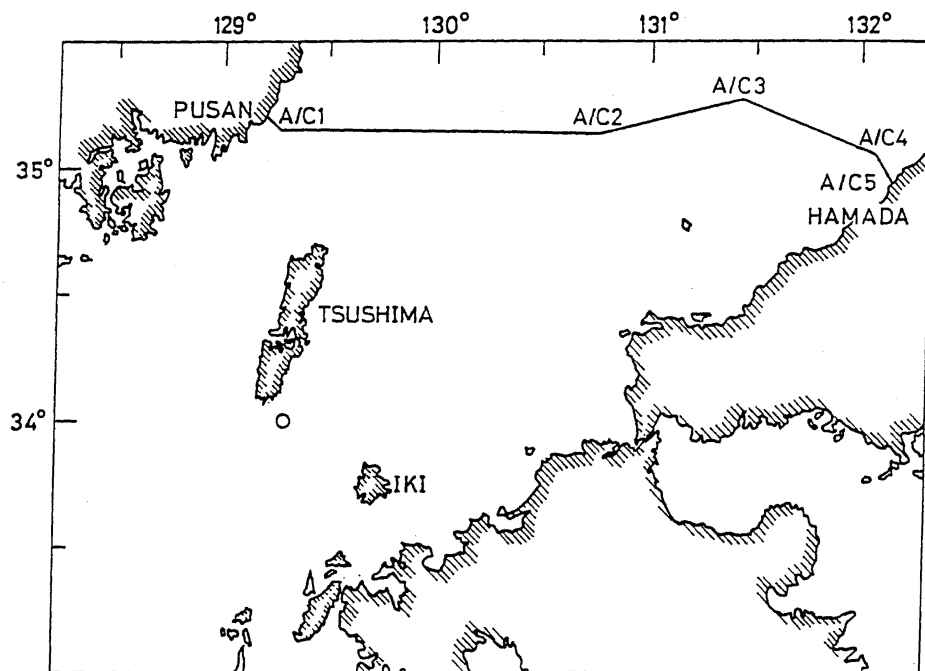


図 1a 海底ケーブル及び係留線配置図

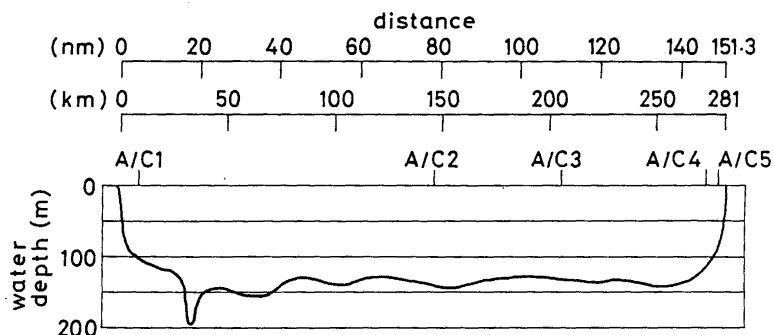


図1b 海底ケーブル配置部水深図

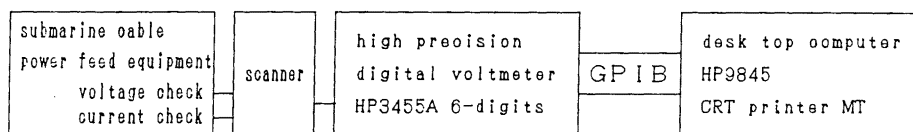


図2 電圧及び電流計測系統図

2. 計測と解析の概要

2.1 計測場所

浜田釜山間に、国際通信用海底ケーブルが敷設されている。その概要を図1aに示す。又、海底ケーブル沿いの水深を図1bに示す。海流計測用係留線は、対馬南東 $34^{\circ}00'20''N$, $129^{\circ}19'40''E$ 水深110 mに設置した。図1a中に○印で示す。

2.2 計測方法

海底ケーブル用給電装置 Power Feed Equipment での給電電圧、電流を、図2に示す様に測定装置を配置し、自動計測した。卓上計算機 HP9845 で制御を行い、6桁表示の計数型電圧計 HP3455A を用いて、15分間隔で計測した電圧及び電流を、印字出力すると共に、カセット磁気テープに格納した。この時、電源の電圧1000 Vが1 Vに、電流156 mAが1.56 Vになるよう予め調整した。

係留線には流速計3台を装着した。係留線の概要を図3に示す。敷設及び揚収は、福岡水産試験場所属げんかい139総トンにより行った。流速計は、流速、流向、水温及び水深を10分間隔で計測し、カセット磁気テープに格納する。

2.3 スペクトル計算法

スペクトル密度函数等の定義には、幾つかの流儀がある。本報告では、以下の様なものを採用した。

データは、時間間隔 ΔT 、総数 N 個、得られているものとする。離散的且つ有限個数なので、要すれ

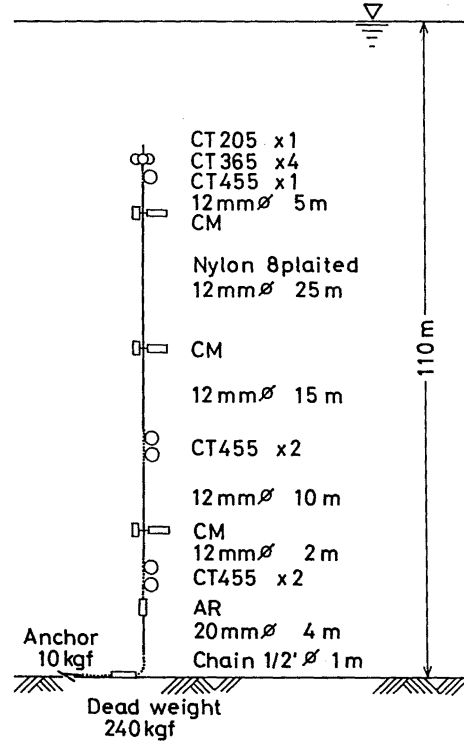


図3 係留線概略

ば、データを周期的に拡張して用いる⁵⁾⁶⁾。即ち、流速変動を x 、電圧変動を y とし、

$$x(i\Delta T) = x(\bar{i} \pm N\Delta T),$$

$$y(i\Delta T) = y(\bar{i} \pm N\Delta T),$$

と仮定する。又、相互相関関数を

$$R_{xy}(l\Delta T) = \frac{1}{N} \sum_{s=0}^{N-1} x(\bar{l} + s\Delta T) y(s\Delta T), \quad l = 0, 1, \dots, N-1,$$

等と定義する。そして、例えば、 x 等の Fourier 変換を、 $j' = \sqrt{-1}$ として、

$$X(nf_0) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k\Delta T) \exp\left(-j' \frac{2\pi nk}{N}\right), \quad n = 0, 1, \dots, N-1,$$

等と表す。ここに基本振動数 $f_0 = 1/(N\Delta T)$ である。 y に就いても同様に表す。相関関数 R_{xy} 等の Fourier 変換であるスペクトル密度関数は、

$$S_{xy}(nf_0) = \frac{1}{f_0} X(nf_0) Y^*(nf_0), \quad n = 0, 1, \dots, N-1,$$

等となる。ここに $*$ は複素共役数を表す。図示する場合には、物理的に実現可能なスペクトル密度関数

$$G_{xy}(nf_0) = \begin{cases} 2S_{xy}(nf_0), & n = 1, 2, \dots, N/2-1, \\ S_{xy}(nf_0), & n = 0, N/2, \end{cases}$$

$$= C(nf_0) - j'Q(nf_0),$$

を用いる⁷⁾。ここに、 C 及び Q は、コスペクトラム及びクオッドスペクトラムである。

流速変動 x を入力、電圧変動 y を出力と考え、インパルス応答関数 h によって、

$$y(k\Delta T) = \Delta T \sum_{i=0}^{N-1} h(i\Delta T)x(k-i\Delta T), \quad k = 0, 1, \dots, N-1,$$

と与えられるものとする。周波数応答関数

$$H(nf_0) = \Delta T \sum_{l=0}^{N-1} h(l\Delta T) \exp\left(-j' \frac{2\pi nl}{N}\right) \\ = |H(nf_0)| \exp(-j' \theta_H(nf_0)), \quad n = 0, 1, \dots, N-1,$$

は、スペクトル密度関数と

$$G_{xy}(nf_0) = H^*(nf_0)G_{xx}(nf_0),$$

によって結ばれている。又、コーヒーレンス関数は

$$\gamma^2(nf_0) = \frac{|G_{xy}(nf_0)|^2}{G_{xx}(nf_0)G_{yy}(nf_0)},$$

で与えられる。

計算は、高速フーリエ変換法 FFT⁵⁾、及び自己回帰模型法 AR⁶⁾ により行った。但し、FFT 法による場合、出力結果にフィルタをかけないと、 $\gamma^2 = 1$ となることに、注意しなければならない。本報告では、後述の理由により、主として AR 法に基く結果を示している。

3. 結 果

電圧及び電流は 1987 年 7 月 9 日から 1988 年 2 月 16 日まで計測された。流速等は、1987 年 6 月 26 日から同年 9 月 21 日まで計測された。電源及び係留線に於ける両方の計測期間が一致するものの中から、問題のある部分を除き、連続してデータの得られた、1987 年 8 月 7 日から同年 9 月 20 日まで 45 日間 (1080 時間) の電圧及び流速を示す。電圧は 15 分間隔で得られたので、Godin filter $4 \times 4 \times 5$ 、流速は 10 分間隔で得られたので $6 \times 6 \times 7$ を掛け、各々 $1h$ 毎のデータとした。表 1 に Godin filter の重み係数

表 1 Godin Filter 重み係数 w_k
 $x'_n = \sum_{k=-m}^{k=m} w_k x_{n+k}$, Godin 1972

$\pm k$	$4 \times 4 \times 5$	$6 \times 6 \times 7$
0	14/80	30/252
1	13/80	29/252
2	10/80	26/252
3	6/80	21/252
4	3/80	15/252
5	1/80	10/252
6		6/252
7		3/252
8		1/252

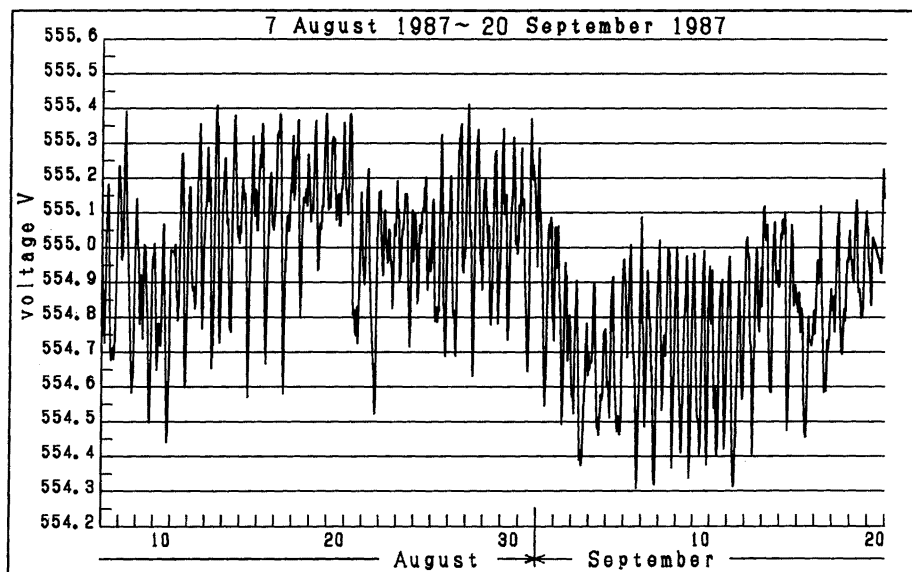
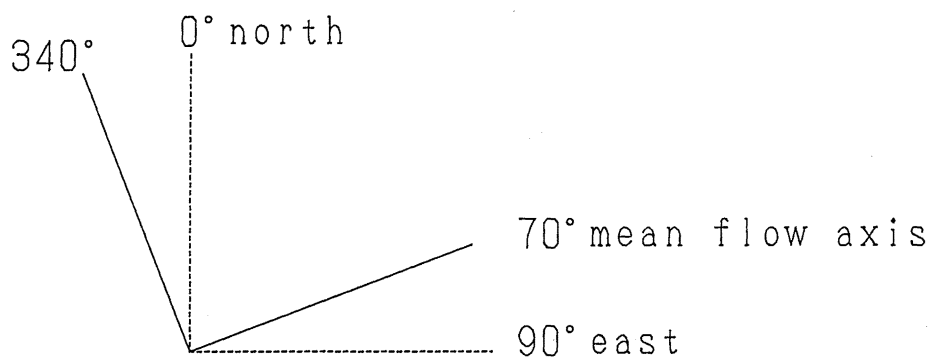


図4 電圧変動



7 August 1987 - 20 September 1987
 34° 00' 20" N
 129° 19' 40" E
 110m bottom depth
 49m instrument mean depth

図5a 平均流速

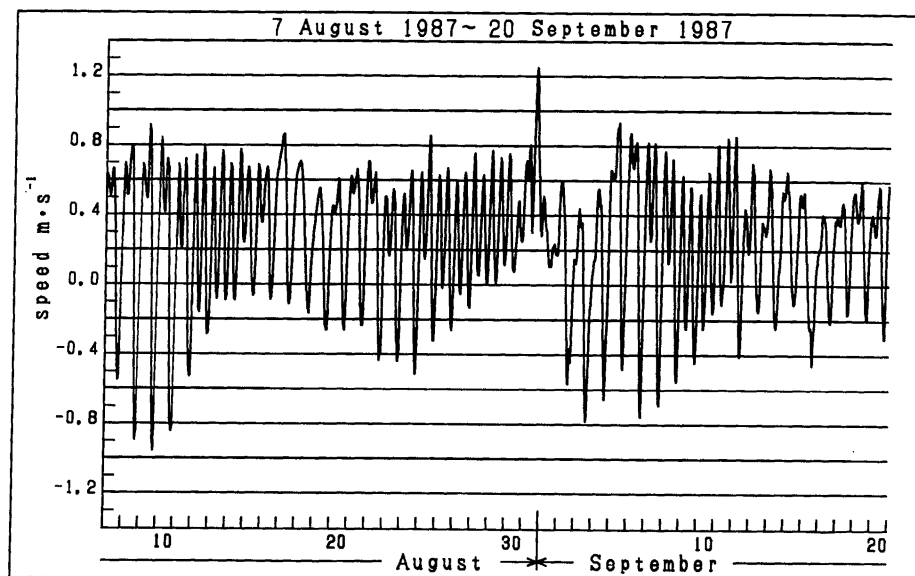


図5b 流速変動 平均流軸方向

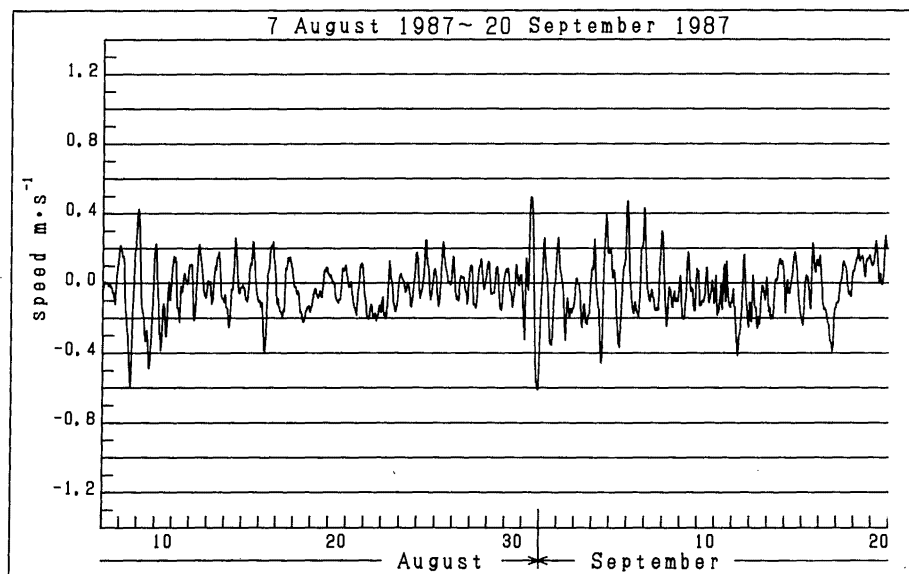


図5c 流速変動 流軸に垂直方向

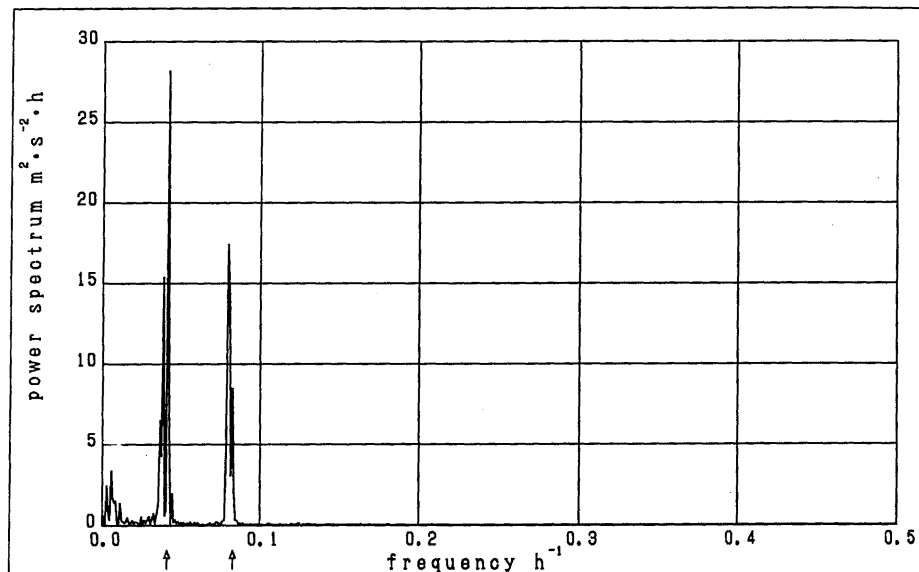


図6a パワースペクトル 流速 FFT法 未フィルタ

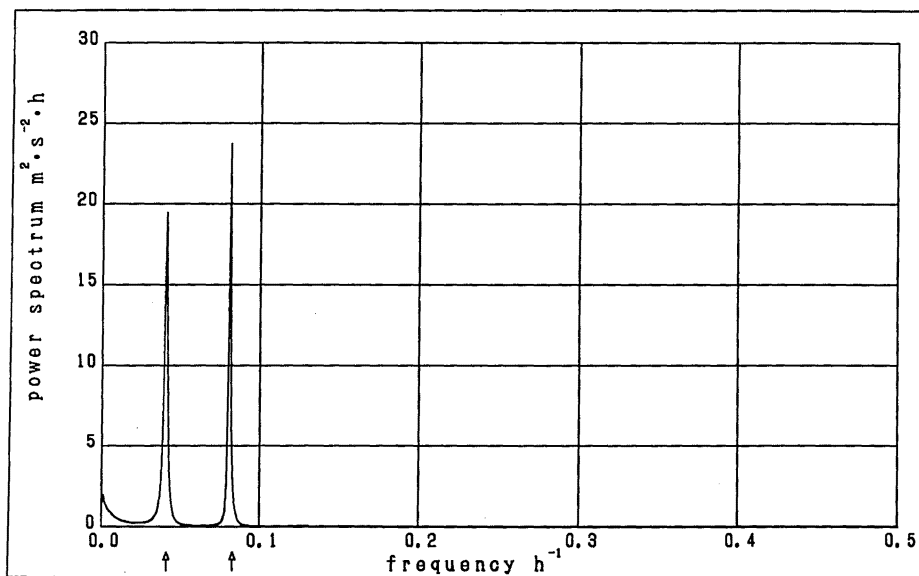


図6b パワースペクトル 流速 AR法

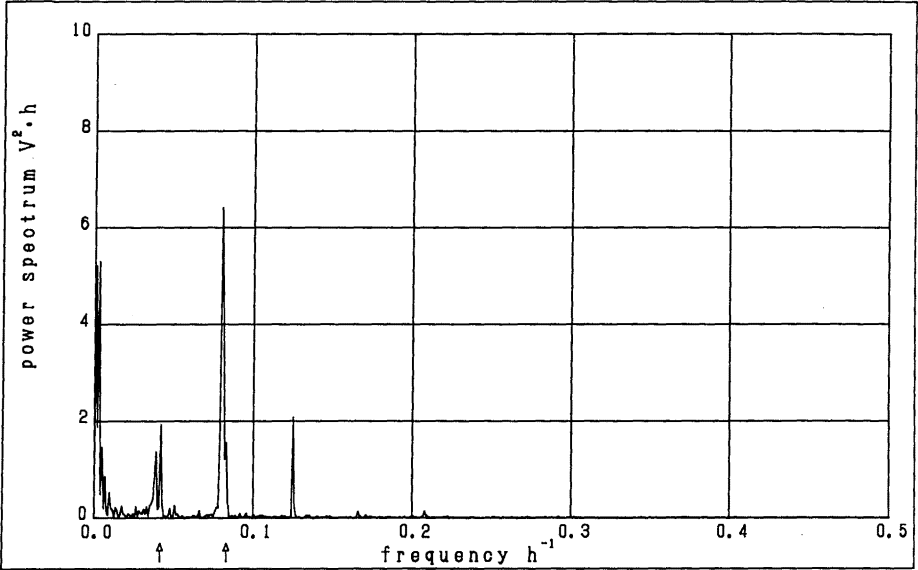


図 6c パワースペクトル 電圧 FFT 法 未フィルタ

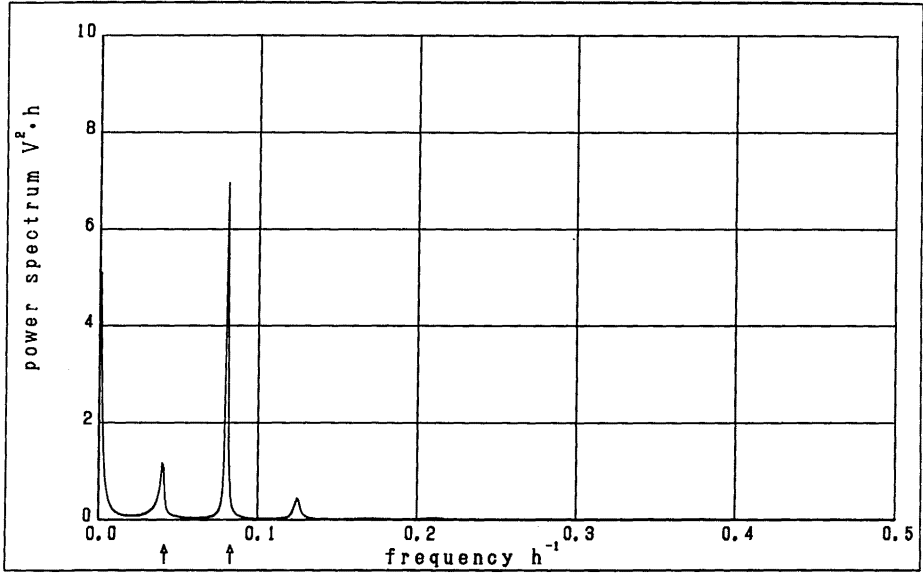


図 6d パワースペクトル 電圧 AR 法

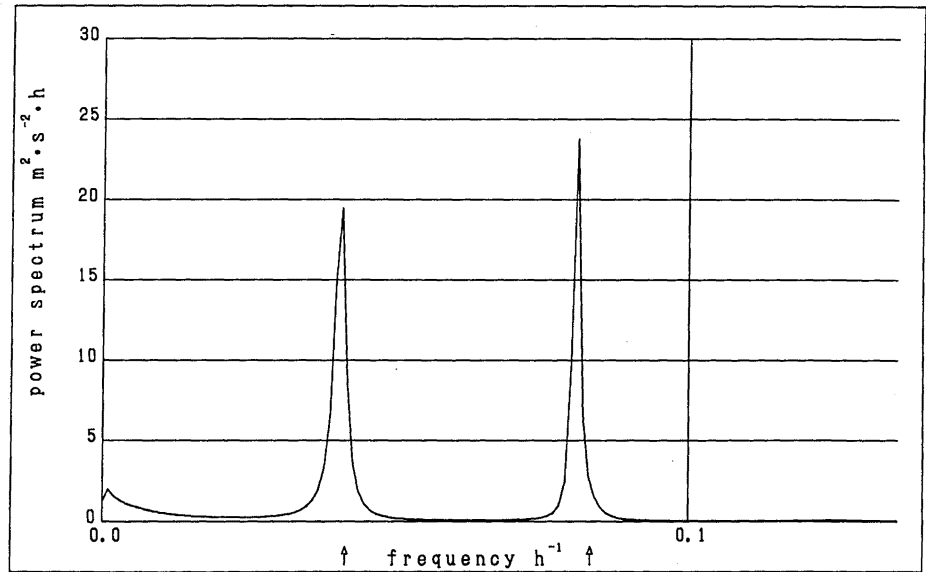


図7 パワースペクトル 流速

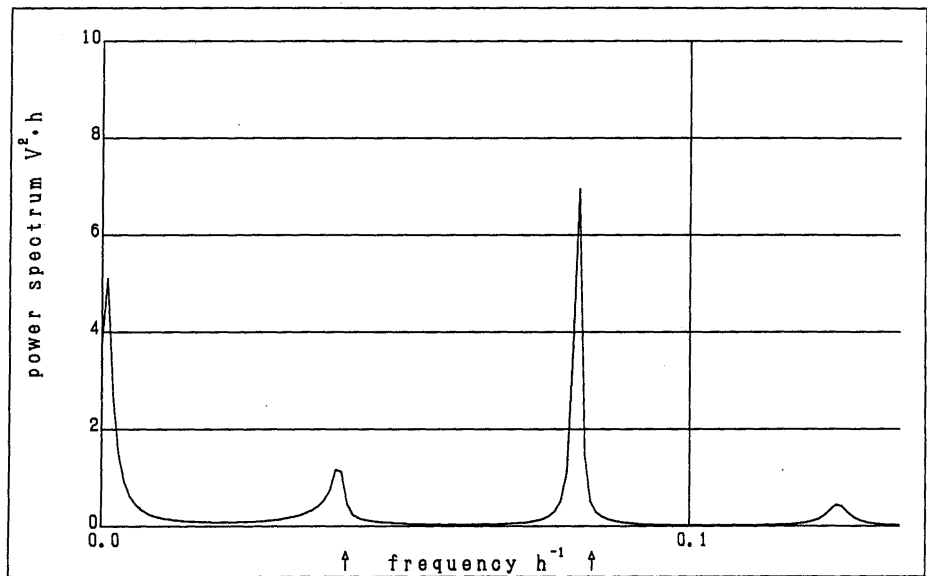


図8 パワースペクトル 電圧

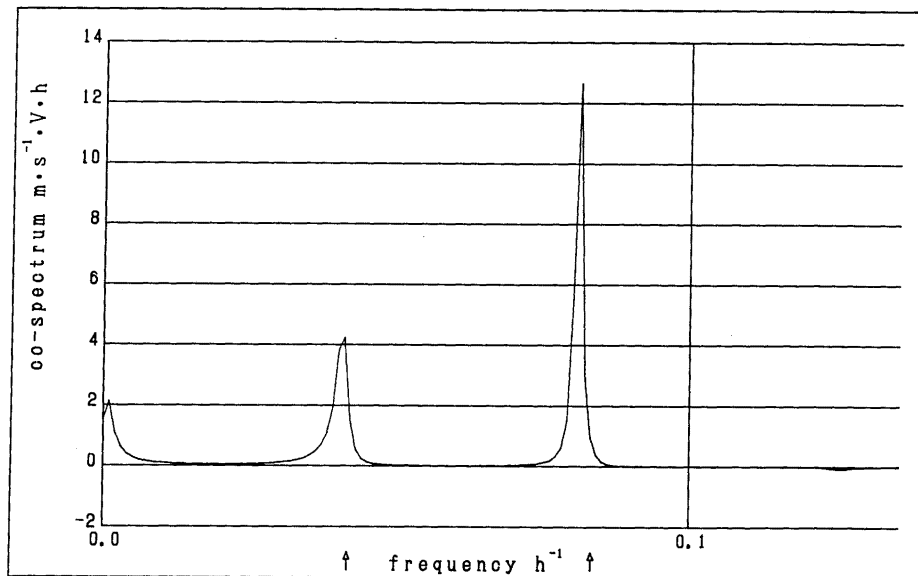


図9a コスペクトル

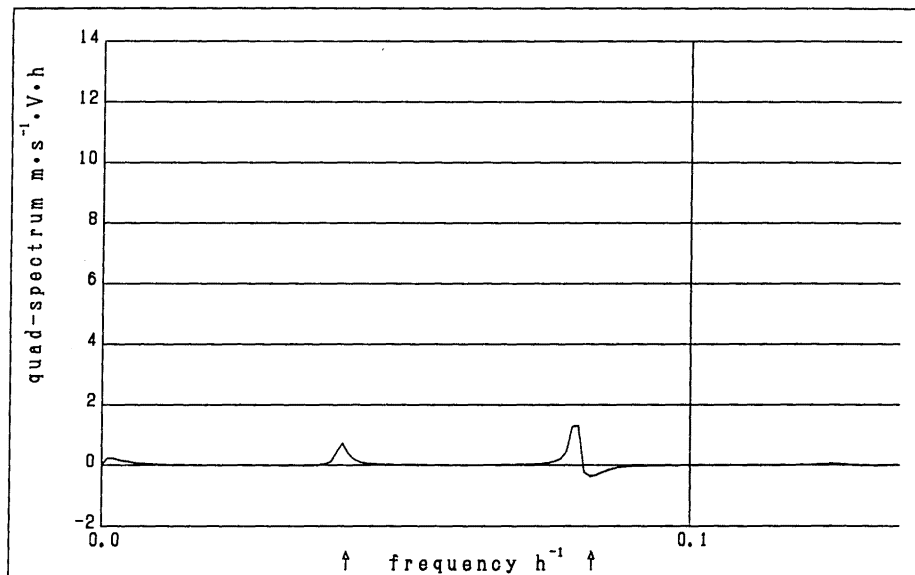


図9b クオドスペクトル

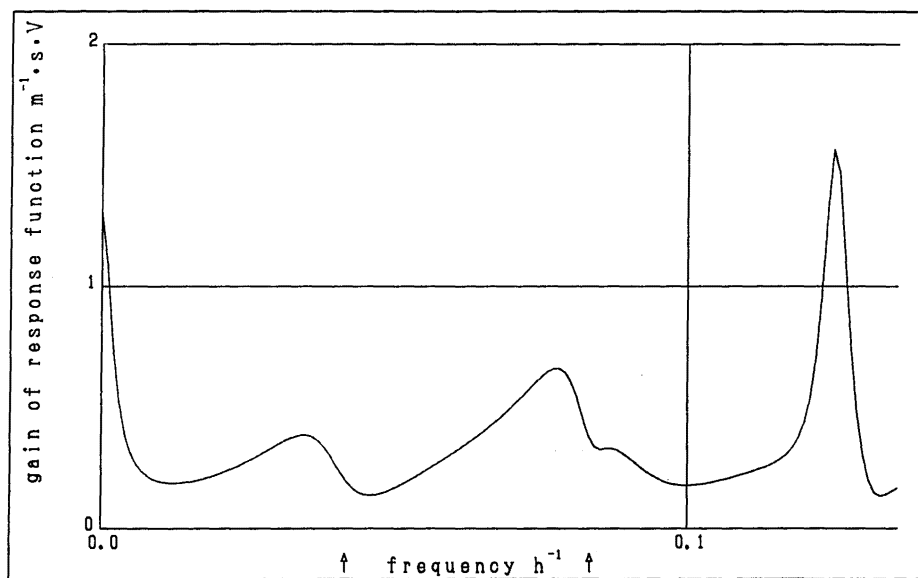


図 10 a 応答函数 利得

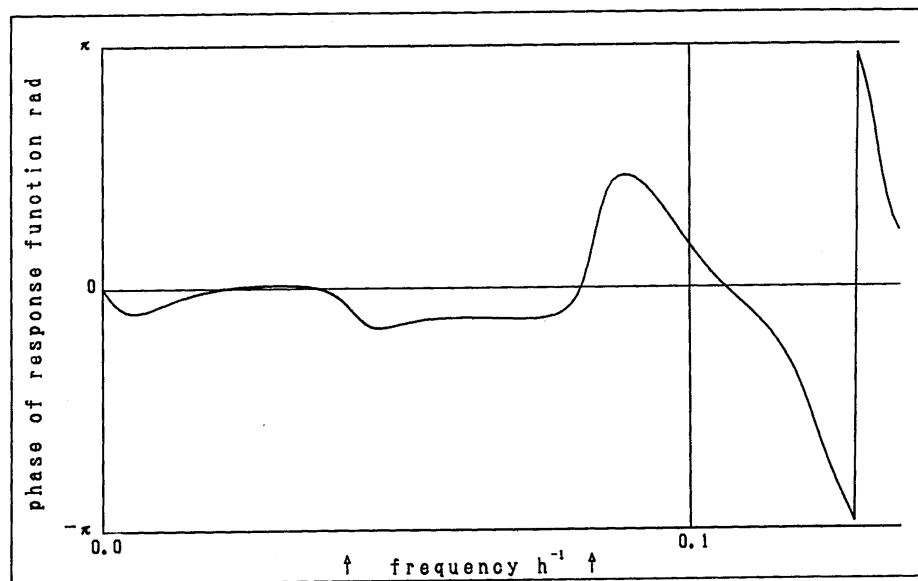


図 10 b 応答函数 偏角

を掲げる。電圧変動を図4に示す。平均流軸は、図5aに示すように、 70° であった。流軸方向速さ及びそれに垂直方向の速さを、各々、図5b及びcに示す。台風が1987年8月31日対馬海峡を通過した。その影響であろう。流速が大きく顕れている。

平均流軸方向の流速変動と電圧変動のクロススペクトル解析を行った。比較のためFFT及びAR両法を用いた。FFT法を利用するため、1987年8月7日9時から同年9月18日15時まで、1024時間即42日16時間のデータを使用した。データ間隔 $\Delta T = 1$ hデータ総数 $N = 1024$ であり、基本周波数 $f_0 = 1/(N\Delta T) = 0.977 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$ ナイキスト周波数 $f_{N/2} = 1/(2\Delta T) = 0.5 \text{ h}^{-1}$ となる。両データとも、最小自乗法に基いて、トレンド $at + b$ を求め、これを取除いたものを、解析の対象とした。流速データでは $a = -0.9069 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $b = 0.3141 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、電圧データでは $a = -0.3281 \times 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $b = 551.1 \text{ V}$ であった。そして、この両データにAR法を適用すると、現在のデータを過去25時間或は未来25時間のデータの一次結合で表す時、赤池の多次元最終予測誤差⁹⁾は最小となった。

流速のパワースペクトル G_{xx} を、図6にFFTに基くものa、及びAR法に基くものbとして示した。図中、横軸 0.0417 h^{-1} 及び 0.0833 h^{-1} 、周期に換算して12h及び24hのところに矢印を付した。電圧のパワースペクトル G_{yy} を、同じく図6にFFT法に基くものc、及びAR法に基くものdとして示した。FFT法に基く結果に、周波数軸に沿ってのフィルタは未だかけていないので、雑音成分がそのまま残っている。大略、FFT法とAR法の与える結果は、良く似ている。又、周波数が高いところで、パワースペクトルは殆んど零となっている。従って、以後、周波数 f を0から 0.14 h^{-1} まで、即ち $f = nf_0$ として $n = 0$ から143まで、AR法に基く結果を示すことにする。

流速パワースペクトルは、図7に示す様に、周波数 0.081 h^{-1} 周期にして12h20minのところで $23.7 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{h}$ 、 0.041 h^{-1} (24h23min)のところに $19.5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{h}$ の極大値を持つ。半日周長及び日周長変動である。又、周波数 $0.977 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$ 周期1024hに現われた極大は、リンク効果によるものであろう。電圧パワースペクトルは、図8に示す様に、 0.081 h^{-1} (12h20min)で $6.95 \text{ V}^2 \cdot \text{h}$ 及び 0.040 h^{-1} (24h59min)で $1.16 \text{ V}^2 \cdot \text{h}$ の極大値を持つ。この時 0.041 h^{-1} (24h23min)では、 $1.1 \text{ V}^2 \cdot \text{h}$ である。又、 0.125 h^{-1} (8h00min)のところに、 $0.434 \text{ V}^2 \cdot \text{h}$ の極大値が現われた。この理由は、未だ判からない。コスペクトル C 及びクオドスペクトル Q を図9に示す。周波数応答函数の利得 $|H|$ 及び偏角 θ_H を図10に示す。又、コーヒーレンス函数 γ^2 を図11に示す。周波数 0.081 h^{-1} (周期2h20min)で、0.9826、 0.080 h^{-1} (12h29min)で0.9698、 0.041 h^{-1} (24h23min)で0.8519、 0.040 h^{-1} (24h59min)で0.8512、 0.125 h^{-1} (8h00min)で0.3133である。半日周長及び日周長でのコーヒーレンスは高い。次いで $\gamma^2 G_{yy} = |H|^2 G_{xx}$ を図12に示す。雑音を除いた電圧パワースペクトルは、 0.081 h^{-1} (12h20min)で $6.8321 \text{ V}^2 \cdot \text{h}$ 、 0.041 h^{-1} (24h23min)で $0.9481 \text{ V}^2 \cdot \text{h}$ 、 0.040 h^{-1} (24h59min)で $0.9881 \text{ V}^2 \cdot \text{h}$ 、そして 0.125 h^{-1} (8h00min)で $0.1360 \text{ V}^2 \cdot \text{h}$ となる。半日周長のものが最強、次いで日周長のものである。

上に述べた様に、クロススペクトル解析法を適用すると、流速変動と電圧変動の間に高い相関のあることが判かる。他の因子を無視するならば、周波数 0.081 h^{-1} (周期12h20min)及び 0.041 h^{-1} (24h23min)或は 0.040 h^{-1} (24h59min)のところで、流速変動によって電圧変動が誘導されることになる。

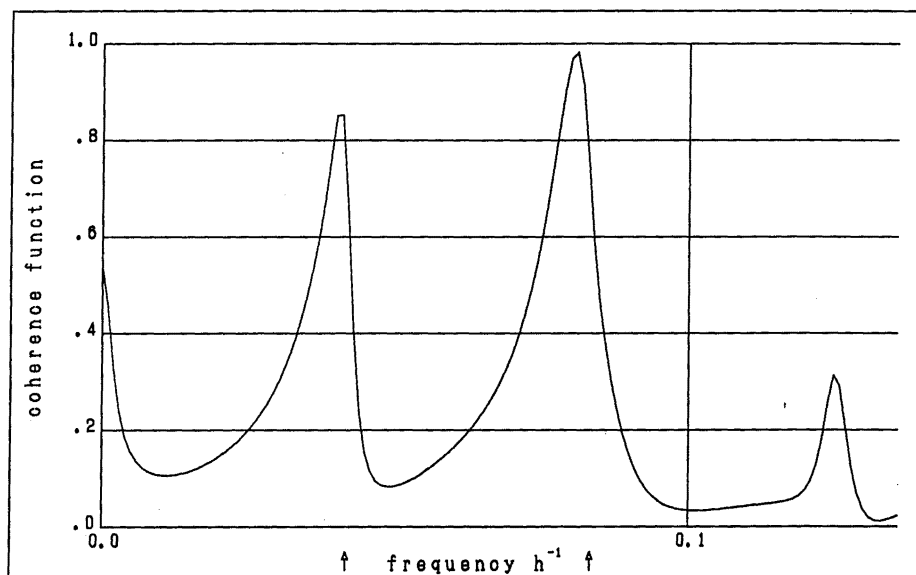


図 11 コヒーレンス函数

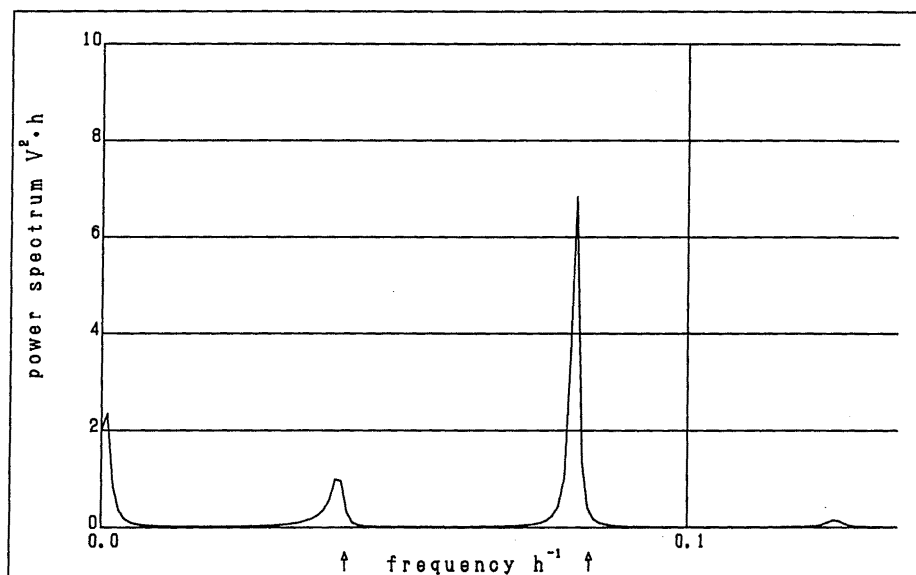


図 12 パワースペクトル 電圧

4. 結 言

今回は、電圧変動と流速変動の2種類のデータに、クロススペクトル解析法を適用し、流速変動により電圧変動が誘導されると、結論した。磁束密度変動は、解析に取入れなかった。仮に、電圧変動と磁束密度変動¹⁰⁾の2種類のデータを取扱う機会があるとすれば、同様に、磁束密度変動により電圧変動が生ずると、結論するかもしれない。多分するであろう。水温変動が、電圧変動に影響していることも、既に報告されている¹¹⁾。地形の影響、更に、海底沈殿物、地殻、マントル等による発生電圧の短絡等も問題であると言う⁴⁾。色色な因子の影響が考えられる。少くとも、電圧、流速、及び磁束密度の3種類のデータを用いて、相関を調べることが必要である。

地球環境は、日、旬、月、季節、年等々、種々の周期に従って変動している。今回はデータにスペクトル解析を施した。これとは独立に、調和解析を行い、日令、月令…等々の変動を明確にしていけることが必要である。そのためには、長期に亘るデータの集積を行うことが不可欠である。又、今回の解析に用いた流速データは、1箇所で、3箇月弱期間の計測により得られたものである。電圧変動は、海峡全体に亘る効果を表すものであることを考えると、流速計測点を複数、少くとも2箇所以上にすることが望ましい。この様に、長期且つ広範囲に亘るデータの取得集積が必要である。

海況の予測という最終目標に近付くため、今後とも数数の努力が為されなければならない。

謝 辞

国際電信電話株式会社取締役海底線部担当次長石原英雄氏には、本研究遂行に関し、万端に亘り御高配賜わった。同社調査役目黒研究所計測制御研究室長白崎勇一氏には、計測に関し、種種御指導戴いた。又この間、本社海底線部、目黒研究所、大阪支社運用施設部(当時)、及び浜田国際中継所の多くの方々の知遇を得た。同社挙げての懇篤なる御配慮がなかったならば、本研究の遂行は不可能であった。

九州大学工学部立居場光生助教授には、本研究開始に先立って相談にのって戴き、国際電信電話株式会社に著者の一人を紹介してくださる等、多大の御世話に相成った。

福岡水産試験場所属げんかい139総トン磯部又一船長以下乗組員の方々は、係留線敷設揚収に当たり、海流計測を無事遂行してくださった。

応用力学研究所光易恒教授には、本研究遂行に関し、数数の激励を頂戴した。同所橋本良夫講師は、Faradayの実験及び磁束密度変動に関し、教示くださった。

ここに記して厚く謝意を表す。

文 献

- 1) 中山正敏：電磁誘導（共立出版，1984），p. 24.
- 2) Alcock, G. A. and Cartwright, D. E.: *An analysis of 10 year's voltage record from the Dover-Sangatte cable*, A voyage of discovery, George Deacon 70th Anniversary Volume, Supplement to Deep-Sea Research (1977), M. Angel, editor, pp. 341-365.
- 3) Prandle, D. and Harrison, A. J.: *Relating the Potential Difference Measured on a Submarine Cable to the Flow of Water through the Strait of Dover*, Sonderdruck aus der Deutschen

Hydrographischen Zeitschrift, Band 28, Heft 5 (1975), pp. 208-226.

- 4) Baines, P. G. and Bell, R. C.: *The relationship between ocean current transports and electric potential differences across the Tasman Sea, measured using an ocean cable*, Deep-Sea Research, Vol. 34, No. 4 (1987), pp. 531-546.
- 5) Brigham, E. O.: *The Fast Fourier Transform* (Prentice Hall, Tokyo, 1974), pp. 99.
- 6) 大崎順彦: 地震動のスペクトル解析入門 (鹿島出版会, 東京, 1977), pp. 99.
- 7) Bendat, J. S. and Piersol, A. G.: *Measurement and Analysis of Random Data* (John Wiley and Sons, Inc., Fourth Printing, 1968), pp. 82-83.
- 8) 川建和雄: クロススペクトル解析に使われている自己回帰モデルを用いた算法の改良(寄書), 九州大学応用力学研究所所報第 48 号 (1978), pp. 77-82.
- 9) 赤池弘次, 中川東一郎: ダイナミックシステムの統計的解析と制御(サイエンス社, 東京, 1975), pp. 55-58.
- 10) 小口 高, 河野 長: 地球から宇宙へ, プラズマの海の孤島 (丸善, 1988), pp. 136-142.
- 11) 村上康憲, 元松和利: 日中間海底ケーブルシステム 2 年間の実績, 国際通信の研究 (1979), pp. 395-405.

(平成元年 5 月 30 日 受理)