

鹿屋の地電流と海洋潮汐

白木正規・田中靖章*

概 要

地磁気の変化では、太陰日変化は、太陽日変化に比べて非常に小さい。この関係は、地磁気変化によって生じた地電流の日変化にも期待される。ところが、鹿屋 (Kanoya; $31^{\circ}25'$, $130^{\circ}54'E$) で観測された地電流の太陰日変化は太陽日変化よりも大きい。この原因として、海洋潮汐が原因で生じた地電流が考えられる。これが事実ならば、地電流の中に海洋潮汐に対応したスペクトルのピークがみられるはずである。このことから、鹿屋の地電流の NS 成分のスペクトル構造を調べ、鹿屋の近くの検潮所の潮汐資料と比較してみた。検出されたスペクトルの大きさは、地磁気変化によって生じたことでは説明がつかないが、海洋潮汐が原因で生じたと考えると説明しやすい。このことから、鹿屋の地電流には、海洋潮汐が原因である変化が、太陰日変化ばかりでなく、太陽日変化にもかなり含まれているようである。

1. はじめに

地電流を起す原因にはいろいろあるが、その一つに地磁気の変化に伴うものがある。日変化に限っていえば、地磁気日変化の大部分は太陽日変化 (S) である。太陰日変化 (L) も存在するが、太陽日変化に比べてその変化は小さく、大きさは太陽日変化の $1/10$ 以下である。太陽日変化と太陰日変化のこのような関係は、地磁気の誘導で起きる地電流の日変化の場合にも期待できる。

ところが、鹿屋 (Kanoya; $31^{\circ}25'N$, $130^{\circ}54'E$) で観測された地電流では、太陰日変化の方が太陽日変化よりも大きいことが知られている。Y. Yokouchi の解析結果⁽¹⁾によれば、 L_2/S_2 の値は、EW 成分で 1.2, NS 成分で 3.5 にも及んでいる。このように大きな地電流の太陰日変化は地磁気変化の誘導で生じたことでは説明がつかない。彼は、更に、鹿屋の太陰日変化の様子を調べ、地磁気の普通の変化の様子とは異なることを示し、この非常に大きな太陰日変化の大部分は海洋潮汐によるらしいと述べている。

Yokouchi の解析で得られた太陰日変化は、解析の方法からもわかるように、

$$L_n = C_n \sin \{n\tau + (n-2)\nu + \epsilon_n\}$$

という式で表現される周波数の成分について求められたものである。この式は Chapman の phase law と呼ばれている⁽²⁾。 $L_2(n=2)$ は太陰半日周期の変化であり、潮汐ポテンシャル⁽³⁾の M_2 項に対応するものである。 $L_1(n=1)$ と $L_3(n=3)$ は、 L_2 項が太陽一日周期の変調を受けた成分であり、 $L_4(n=4)$ は太陽半日周期の変調を受けた変化である。

潮汐ポテンシャルには、 M_2 項以外に、 O_1 , N_2 , $2N_2$ といったようないろいろの太陰日変

* センチユリ・リサーチ・センター株式会社

化のスペクトル項が存在する。これらの太陽項に対応した変化は、地磁気変化の中にあるにはあるが、その大きさは非常に小さく検出は容易でない。 O_1 や N_2 項は長期間の資料からようやく検出できる大きさである⁽⁴⁾。一年程度の資料からは、 M_2 項以外はほとんどノイズレベルと同じ大きさであり検出ができない⁽⁵⁾。これから推測すると、地磁気の変化によって起きた地電流の O_1 や N_2 項も、変化が非常に小さく、一年程度の資料の解析からは容易に検出できないと考えられる。

しかし、Yokouchi の解析で示されたように、鹿屋の地電流の M_2 項は非常に大きな振幅をもっている。そして、彼が推測したように、これが海洋潮汐が原因で生じたものなら、地磁気では検出が容易でない O_1 や N_2 項が容易に検出できるはずである。そのうえ、検出されたスペクトル項の大きさは、これらに対応した海洋潮汐の大きさと比例関係にあることが期待できる。この点を確かめるために、鹿屋の地電流の半年間の資料から日変化領域の周期構造を調べた。そして、得られた結果と鹿屋の近くの検潮所の潮汐の資料との比較を簡単に行った結果を述べる。

2. 解析方法と資料

周期構造を調べる方法として、ここでは、調和解析の方法を用いた。 n 個の等間隔（ただし、間隔は $4t$ ）の資料 $f(i)$ は、

$$f(i) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^m a_k \cos \frac{2\pi ki}{n} + b_k \sin \frac{2\pi ki}{n}$$

という形に展開できる。この式の a_0 , a_k , b_k は

$$a_0 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{n-1} f(i)$$

$$a_k = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{n-1} f(i) \cos \frac{2\pi ki}{n}$$

$$b_k = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{n-1} f(i) \sin \frac{2\pi ki}{n}$$

という式から計算できる。そして、それぞれの調和項の \sin と \cos の組は、

$$C_k \cos \left(\frac{2\pi ki}{n} - \psi_k \right)$$

という形に書かれ、この調和項の周期は

$$T_k = \frac{n \Delta t}{k}$$

で表わされる。この T_k という周期に対して、 C_k および ψ_k を計算すれば、これらは $f(i)$ の振幅スペクトルと位相スペクトルである。

鹿屋の地電流の観測は 1950 年から始まったが、毎時値が年報として報告されているのは、1957—60 年の 4 年間である⁽⁶⁾。ここでは、この期間のうち、1959 年 10 月から 1960 年 3 月

までの半年間の NS 成分の毎時値を解析に用いた。この期間を用いたのは、この期間にほとんど欠測がないためである。解析の方法が連続した資料を必要とするので、この期間のいくつかの欠測は前後の値から内挿した。また、この期間は地磁気観測も行なわれたので、将来、地磁気の資料も合わせて解析して関係を調べるときに都合がよい。この期間は太陽活動がかなり活発であり、地磁気擾乱がかなりみられたので、どちらかといえばこの擾乱の影響の小さい成分だけを解析の対象とした。

資料の時間間隔が一時間であり、期間が半年間であることから、スペクトルは周期が 183 日から 2 時間まで求まる。しかし、潮汐ポテンシャルのスペクトル項の存在する周期の領域は限られているので、地電流の調和項は約 6 時間の周期のところまで計算した。求められたスペクトルのうち振幅スペクトルが、第 2 図に図示されている。

一方、地電流と海洋潮汐のスペクトル構造を比較するために、鹿屋の近くの検潮所の潮汐の資料が用いられた。用いた検潮所は、鹿児島 (Kagoshima; $31^{\circ}36'N$, $130^{\circ}34'E$) と油津 (Aburatsu; $31^{\circ}35'N$, $131^{\circ}25'E$) の 2 か所である。鹿屋とこれらの検潮所の位置は第 1 図に示されている。鹿児島と油津の潮汐の資料は、潮汐予報のために気象庁海洋課で行なわれた解析から得られた潮汐定数を用いた。この論文の地電流の解析を行なった期間についての潮汐定数は求められていないが、潮汐定数は年によってそれほど変わらないので、ここでは 1967 年の潮汐資料から求められた定数を用いた。第 3 図に、2 つの検潮所で潮汐項の振幅が 1 cm をこえるものについて、潮汐ポテンシャルの記号と共に示されている。潮汐定数は一年の資料から求められているので、例えば一日周期の領域で K_1 と P_1 といったような接近したスペクトルの分離ができる。しかし、比較する地電流は半年間の資料の解析なので分解能からみて K_1 と P_1 の分離はできない。このことを考えて、第 3 図では、半年間の資料で分離できないものはまとめられており、振幅の大きい方の記号が示されている。

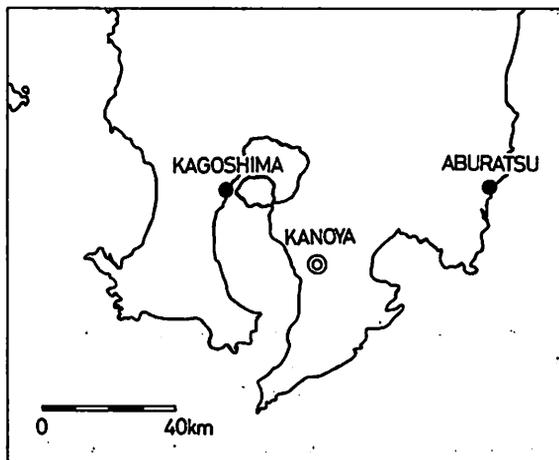


Fig. 1. Sites of Kanoya, Kagoshima and Aburatsu.

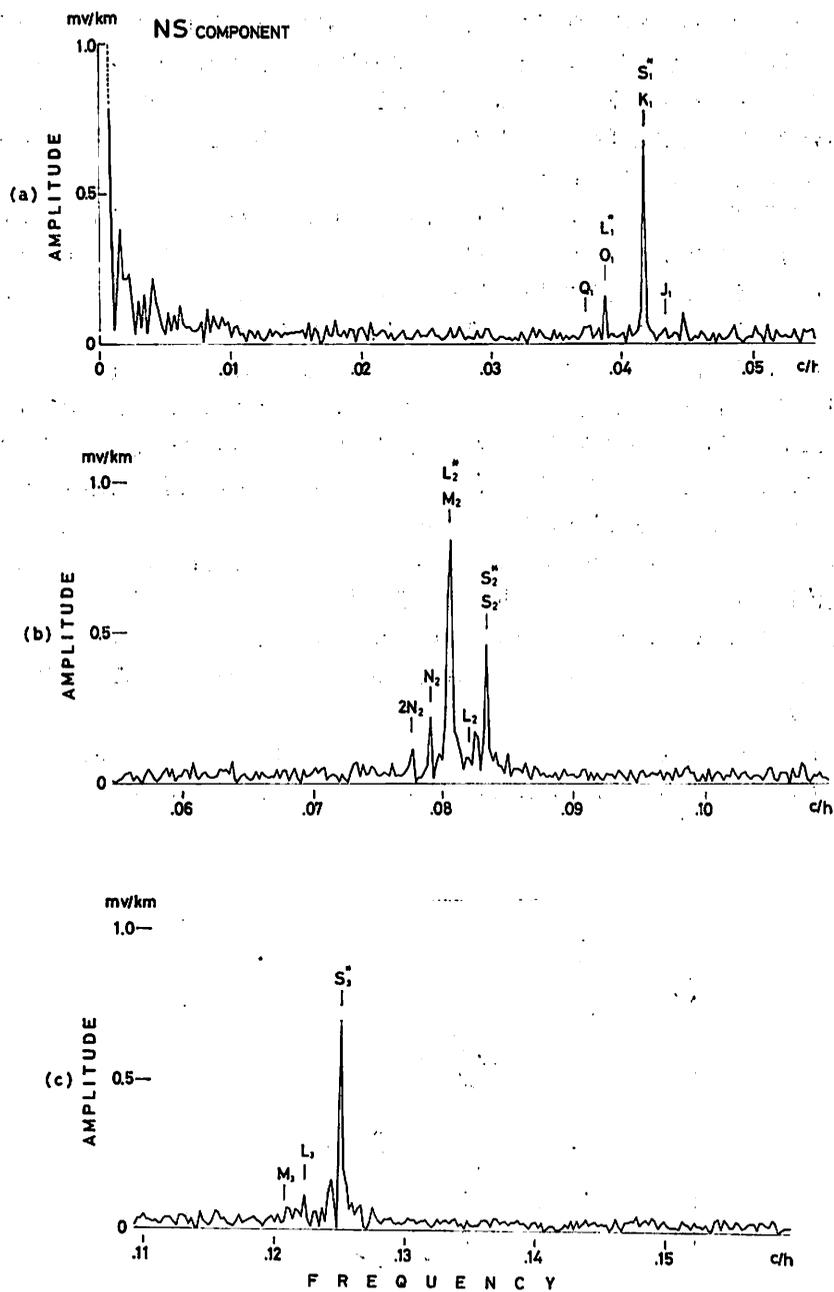


Fig. 2. Amplitude spectrum of earth current at Kanoya. The interval of analysis is half a year from October 1, 1959 to March 31, 1960. The frequency in the figure is shown by cycle per hour.

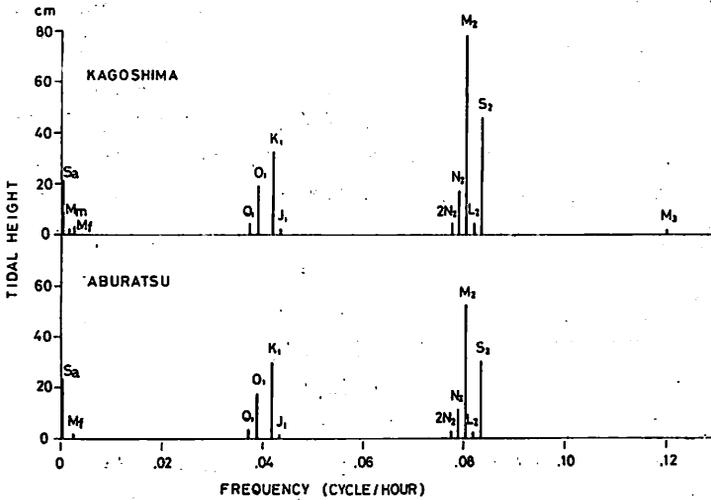


Fig. 3. Amplitude spectrums of oceanic tides observed at Kagoshima and Aburatsu in 1967.

3. 解析結果とその考察

第2図の地電流のスペクトルの図には、第3図に挙げられた海洋潮汐のスペクトルの位置が記号と共に示されている。図から明らかなように、海洋潮汐のスペクトルに対応して、地電流のスペクトルにピークがみられる。しかし、これらのピークに対応した周期の変化が地磁気の変化にもみられる⁽⁵⁾。 K_1 と S_2 という周期の変化は、太陽一日周期および半日周期の変化であり、地磁気日変化では太陰項に比べて非常に大きい。また、地磁気日変化には1/3日周期の変化も含まれている。この周期に対応したピークは、第2図(c)にはっきりみられる。これらの周期の変化は、地磁気日変化によって生じた変化の意味で、 S_1^* 、 S_2^* 、 S_3^* という記号で位置が示されている。地磁気日変化の大部分は太陽日変化であるが、1でも述べたように変化は小さいが太陰日変化も含まれている。地磁気の変化から容易に検出される太陰日変化は、 M_2 項に関係した変化である。これらの周期の位置が、 L_1^* 、 L_2^* 、 L_3^* という記号で示されている。このうち、 L_1^* と O_1 の周期は非常に近いので、半年間の資料から分離できない。また、 L_2^* はちょうど M_2 に一致している。このほかに太陰日変化として、第2図の O_1 や N_2 に対応した周期の変化が、その大きさは非常に小さく、半年程度の資料の解析からは検出が容易ではないが、地磁気の変化に検出されている⁽⁴⁾。こうしてみると、地電流にみられるピークには、地磁気変化にも対応した周期の変化がある。しかし、太陰日変化の大きさを太陽日変化の大きさと比べてみると、地磁気変化に伴って生じたものとは考えることができない。これらは、むしろ、海洋潮汐に原因があると考えた方が説明がしやすい。

まず、 M_2 (L_2^*) という周期の変化は、1でも述べたように、地磁気の変化の太陰項の中では最も変化が大きい、太陽日変化と比べると非常に小さい。柿岡 (Kakioka; $36^{\circ}14'N$, $14^{\circ}11'E$) の地磁気変化では、偏角の場合に、 L_2/S_2 の値は1/7程度である⁽⁵⁾。そして、こ

れに対応した柿岡の地電流の成分の値は $1/5$ 程度である⁽⁷⁾。どちらの値も 1 よりかなり小さい。鹿屋の地磁気の太陰日変化の解析はないが、地磁気変化の場合に柿岡と鹿屋のような距離で、著しい違いがあるとは考えられない。地磁気太陽日変化の場合には、柿岡と鹿屋はほぼ同じ変化を示している⁽⁸⁾。鹿屋の地磁気の L_2/S_2 の値も柿岡と同じ程度の値が期待される。ところが、第 2 図の鹿屋の地電流の場合には、 $M_2(L_2^*)$ という周期の変化は、太陽日変化の S_1^*, S_2^*, S_3^* のどれよりも大きく、 L_2^*/S_2^* の値は 1.8 である。このような大きな値が、地磁気変化から生じたことでは説明がつかない。鹿屋の特殊な原因で起ったものと考えられる。Yokouchi も推測したように、第一に考えられるのは海洋潮汐の影響である。第 2 図でみられるように、 M_2 が全部のピークの中で最も大きいということは、第 3 図の海洋潮汐のスペクトルの場合と同じであり、海洋潮汐との関係を示すものであろう。

第 2 図の L_3^* というピークは、鹿屋の地電流がここで議論しているように海洋潮汐の影響を大きく受けているとしても、海洋潮汐にはその対応したスペクトルがないので、純粋に地磁気の変化だけから生じたものであろう。地磁気の 1 年程度の資料からは、 L_3^* はようやく検出できる程度であり、 N_2 や $2N_2$ という周期に対応した変化は検出が容易でない。ところが、第 2 図の鹿屋の地電流では、たった半年の資料から、それもかなり擾乱が含まれている資料から、 N_2 と $2N_2$ という太陰項が明瞭に検出されている。そして、これらのスペクトルの大きさは、 L_3^* よりも大きいか、ほぼ同じである。このことから、これらの周期の太陰項は地磁気変化によって生じたものでは説明がつかない。

第 2 図の S_3^* というピークも、 L_3^* と同じように海洋潮汐に対応するスペクトル項がないので、地磁気変化だけに伴って生じたものであろう。 L_3^*/S_3^* の値は、 $1/6$ 程度であり、柿岡の地磁気の L_3/S_3 が $1/20$ 程度であるから、鹿屋の地磁気の太陰項と太陽項の関係が特に異常であるとは思われない。

また、地磁気の変化では L_1^* 項はそれほど明瞭に検出できないが、第 2 図の場合には非常にはっきりしたピークが L_1^* という周期のところにみられる。 L_1^* と O_1 とは周期が近いのでこの解析では分離できないことから、海洋潮汐の O_1 項が原因で生じたものと考えられる。ピークのはっきりしていることが説明しやすい。海洋潮汐の O_1 項は、太陰項の中では M_2 に次いで大きい項である。

地電流と海洋潮汐のスペクトル項が対応するものについて、それぞれのスペクトルの大きさの関係は、第 4 図に示されている。 S_1^* 項を除けば、地電流の大きさと海洋潮汐の大きさは、ほぼ比例関係にある。 O_1 項と N_2 項をみると、海洋潮汐では O_1 の方が大きい。地電流の場合は N_2 の方が大きい。これは、地電流の O_1 には地磁気変化で生じた L_1^* の変化が重なっているため、両者の位相が異なれば、観測される地電流のピークは小さくなる。

このように、鹿屋の地電流の太陰項の大きさは、海洋潮汐が原因で起きたものと考えられると説明しやすい。逆に、鹿屋の地電流に海洋潮汐で生じた変化が重なっていると、海洋潮汐には、 K_1, S_2 というスペクトル項があるので、鹿屋の地電流の太陽日変化の一日周期成分と半日周期成分には、海洋潮汐が原因となっている変化が含まれていることになる。 K_1, S_2 は第 3 図からわかるように M_2 の約半分の大きさなので、第 2 図の $K_1(S_1^*)$ というピークの約半分は、海洋潮汐の K_1 により生じたものであり、 $S_2(S_2^*)$ についてはそのほと

んどが、海洋潮汐の S_2 が原因で生じたことになる。これまで、鹿屋の地電流の太陽日変化を議論するとき、このような海洋潮汐の影響を考慮していないが^{(11),(9)}、地磁気の変化による分と海洋潮汐による分が同じくらいであるとすると、海洋潮汐が原因で生じた変化の分を除かないことには、地磁気と地電流の関係を議論することはできない。

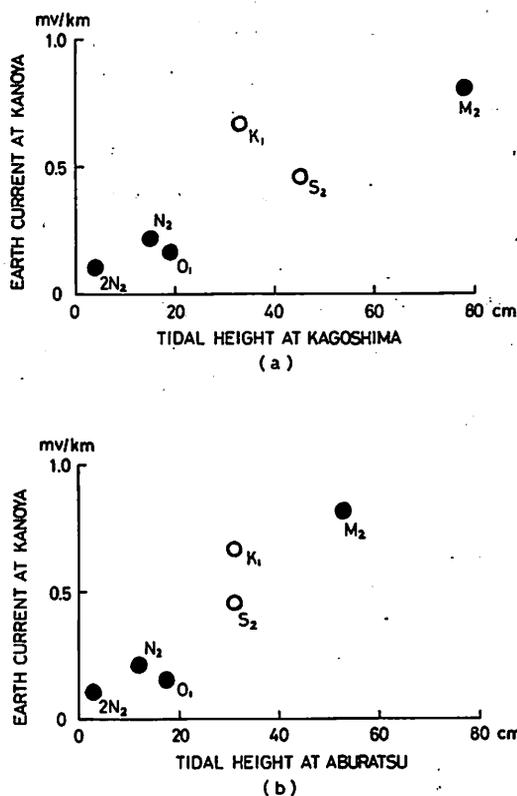


Fig. 4. Correlations between amplitudes of earth current at Kanoya and thoes of oceanic tides (a) at Kagoshima and (b) at Aburatsu. Black and white circles indicate lunar and solar components, respectively.

第4図から、海洋潮汐と地電流の関係は、鹿児島島の潮汐定数を用いた場合には、1 cm の潮位あたり、約 0.01 mV/km の地電流を生ずることになる。しかし、ここで地電流のスペクトル解析に用いた方法では、それぞれの項に近い周期のところで計算されているだけで、定量的な議論には適当な方法でない。このためには、適当な方法（例えば、コンボルジョーン法）を用いて、周期に対応した振幅、位相を決める必要があるだろう。また、海洋潮汐の資料も同じ方法で解析するのが望ましい。ここでは議論に用いなかったが、それぞれのスペクト

ル項の位相についても考慮しなければならない。また、 M_2 項の場合、そのほとんどが海洋潮汐によって生じたものと思われるが、地磁気の変化によるものを除いた方がよい。 S_2^* 、 L_2^* という項が地磁気の変化だけから生じたものであるから、地磁気と地電流の関係を定めることができる。さらに、地電流の EW 成分についても解析を行なわねばならない。今後、これらの点について解析をすすめてゆく予定である。

海洋潮汐が地電流に影響するのは、潮汐の干満によって磁場の中を電気伝導度が非常に高い海水が動くために起電力が生じ、これによって海水や陸地に電流が流れるためであると考えられる。このような現象は、世界のいくつかの地点で観測されている⁽¹⁰⁾。しかし、第3図でわかるように、鹿児島と油津の潮汐の大きさを比べると、どのスペクトル項の大きさも鹿児島の方が大きい。鹿屋はこれらの2地点のほぼ中間にあることから、潮位の差が地電流を起す原因となっている可能性もある⁽¹¹⁾。第4図で、海洋潮汐では O_1 項の方が N_2 項より大きいのが、観測された地電流では N_2 項の方が大きい。先には、地磁気の変化による L_1^* 項でこれが説明できると述べたが、潮位の差でみると、 O_1 項よりも N_2 項の方が大きい。このことから考えると、潮位の差が鹿屋の地電流の原因となっているのかも知れない。鹿児島と油津の潮位の差と地電流の大きさとの関係は、第5図に示されている。鹿屋の地電流が、うゑに述べたどちらの原因で生じたものか、あるいは、これらとは別な原因で生じたのかは、今後の解析で明らかになるであろう。

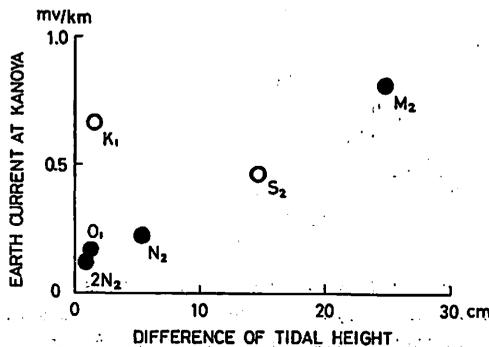


Fig. 5. Correlation between amplitudes of earth current at Kanoya and amplitude differences of the two tidal stations. Black and white circles indicate lunar and solar components, respectively.

終りにあたって、この研究に際して終始ご指導いただいた地磁気観測所長柳原一夫博士と技術課長河村謙博士に心からお礼を申し上げる。また、この研究に用いた潮汐資料の調査に関してご便宜をはかっていただいた気象庁海洋課 河野幸男・岡田正実の両氏に心から謝意を表したい。

参 考 文 献

- (1) Yokouchi, Y., Mem. Kakioka Mag. Obs., 9, No. 1, p. 7-20, 1959.
- (2) Chapman, S. and J. Bartels, Geomagnetism, Vol. I, p. 247, 1940.
- (3) Doodson, A.T., Proc. Roy. Soc. London, A, 100, p. 305-329 1922.
Bartels J., Encyclopedia of Physics (Handbuch der Physik), Vol. XLVIII, p. 734-774, 1957.
- (4) Winch, D.E., J. Geomag. Geoelec., 22, p. 319-328, 1970.
- (5) 白木正規, 地磁気観測所要報に投稿予定
- (6) 柿岡地磁気観測所報告, No. 37, 1966 及び No. 49, 1967.
- (7) 横内幸雄, 地磁気観測所要報, 2, No. 2/3, p. 65-68, 1939.
- (8) Shiraki, M., Mem. Kakioka Mag. Obs., 15, No. 1, p. 19-30, 1972.
- (9) 柳原一夫, 地磁気観測所要報, No. 2, p. 143-152. 1956,
白木正規・柳原一夫, 地磁気観測所要報, 14, No. 2, p. 143-152, 1956.
- (10) Chapman, S. and J. Bartels, Geomagnetism, Vol. I, p. 445-448, 1940.
Brown, G.M. and W.G. Woods, J. Atmosph. Terrest. Phys., 33, p. 289-293, 1971.
- (11) T. Yoshimatsu, Mem. Kakioka Mag. Obs., Supple. 1, p. 1-76, 1957.

Earth Current at Kanoya and Oceanic Tide

Masanori SHIRAKI and Yasuaki TANAKA*

Abstract

Geomagnetic lunar daily variation is very small compared with the solar one. This relation is expected also for the daily variation of earth current induced by the geomagnetic variation. However, the observed lunar variation of earth current at Kanoya ($31^{\circ}25'N$, $130^{\circ}54'E$) is larger than the solar one. This fact may be explained by earth current due to oceanic tide. In this case spectral peaks in the earth current at Kanoya may be found corresponding to those in tidal spectrum. With this presupposition the spectral structure of NS component of earth current at Kanoya was calculated and compared with the tidal constants at Kagoshima ($31^{\circ}36'N$, $130^{\circ}34'E$) and Aburatsu ($31^{\circ}35'N$, $131^{\circ}25'E$). Magnitudes of detected peaks in earth current spectrum cannot be explainable by the usual electromagnetic induction effect of the geomagnetic variation as it is supposed, but it may be explained by the tidal origin. The effect of oceanic tide on the earth current at Kanoya is fairly large for the solar daily variation as well as the lunar one.

* Century Research Center Co., Ltd.