

短時間フーリエ変換による地磁気脈動現象 Pi (irregular pulsations) の解析

平原秀行

地磁気観測所観測課

2015年1月21日受領, 2015年11月2日改訂, 2015年11月13日受理

要 旨

地磁気現象を高い時間分解能で周波数解析するため, 短時間フーリエ変換 (Short-time Fourier transform, STFT) を使って, 女満別観測施設の地磁気観測10Hz サンプリングデータのパワースペクトル1分値を求めた. そのパワースペクトル1分値が現象解析に有効であるか, 地磁気観測所が年報に報告している女満別観測施設で観測した地磁気脈動現象 (Pi) の周期や振幅などの読み取り値と比較して確かめた. 2012年, 2013年に報告された女満別 Pi2報告リストと, 求められたパワースペクトル1分値を比較した結果, 報告された振幅の読み取り値とその周期に対応するスペクトル値について良い対応を示し, 短時間フーリエ変換が地磁気短周期現象の把握に有効であることが示された.

1. はじめに

地磁気脈動は, 国際地球電磁気学高層物理協会 (IAGA) によって, 連続で規則的な波形を持つ脈動の Pc (continuous pulsations) と, 波形が不規則な Pi (irregular pulsations) の2つに分類され, さらにこれらは周期によって表1のように細かく分類されている.

特に, 周期40秒から150秒までの Pi2地磁気脈動は, 地球磁気圏におけるサブストームの発生と密接に関係していることが知られており (たとえば,

Sakurai and Saito, 1976a), Nosé et al., (2012) は, ウェーブレット解析を用い, Pi2地磁気脈動の周波数範囲にあたるウェーブレットパワーを1分ごとに計算した Wp 指数を提唱している.

地磁気脈動報告リストは, 女満別観測施設で観測される地磁気脈動について, 継続時間と周期から脈動の分類を, 振幅から明瞭度を表す Quality を付して作成している. Quality とは, 1957年の IAGA コペンハーゲン決議で現象報告の際に付けるよう勧告されたもので,

A=very distinct

B=fair, ordinary, but unmistakable

C=doubtful

と定義されているが, Quality に対する具体的な数値は定義されていない.

地磁気観測所では, 地磁気観測業務実施細則において, Quality の振幅を表2のように定め, 運用している (横山 他1998, 横山 他1999). また, 地磁気脈動リストは, 地磁気観測所年報や地磁気観測所ホームページ (<http://www.kakioka-jma.go.jp/>) で検索, 閲覧することができる.

地磁気観測所における地磁気脈動報告リスト作成業務は, 現在は10Hz サンプリングデータに遮断周期150秒のデジタルハイパスフィルタを通して紙出

表1 地磁気脈動の分類

連続型脈動(Pc)	
分類	周期[秒]
Pc1	0.2 - 5
Pc2	5 - 10
Pc3	10 - 45
Pc4	45 - 150
Pc5	150 - 600
Pc6	600 以上
不規則型脈動(Pi)	
分類	周期[秒]
Pi1	1 - 40
Pi2	40 - 150
Pi3	150 以上

表2 地磁気観測所で定めた地磁気脈動の Quality
 擾乱時とは、他の現象が混在し、波形を崩している場合である。

Quality	連続型脈動(Pc)		不規則型脈動(Pi)	
		擾乱時		擾乱時
A	1.8nT 以上	2.7nT 以上	6.0nT 以上	9.0nT 以上
B	0.7 - 1.8nT	1.0 - 2.7nT	3.0 - 6.0nT	4.5 - 9.0nT
C	0.4 - 0.7nT	0.6 - 1.0nT	1.0 - 3.0nT	1.5 - 4.5nT

力し、周期と振幅を定規を使って直接読みとり、フィルタの周波数特性を考慮して作成している。この作業は、地磁気変動の様々な周期の波が重畳しているため、それらを分離しながら読みとることに熟練を要し、読みとりの誤差も大きくなるなど、一定のレベルを保つことが困難であった。また、Piは発生数が多く、作業の煩雑化をまねいていた。

地磁気観測所は、柿岡で観測された10Hz サンプリングの地磁気 H 成分のダイナミックスペクトルをホームページで公開しているが、時間分解能が204.8秒(約3.4分)で成分も限られているため、おおよその出現時刻の把握しかできなかった。本調査では、短時間フーリエ変換によって周波数解析した3成分の地磁気脈動のスペクトルを1分毎に求め、報告リストの周期と振幅とを比較し、Pi報告リスト作成の補助的役割になるか検討した。

短時間フーリエ変換とは、連続するデータから一定時間の信号を切り出し、窓関数をかけたものをフーリエ変換することで、通常のフーリエ変換によるスペクトル解析より時間分解能を高くすることができる。この手法は、音声スペクトルなどの非定常信号の周波数成分の時間変化をとらえるために広く使われている。

2. 方法

2012年1月から2013年12月の女満別地磁気観測データを用いた。観測器は島津製作所製高感度フラックスゲート磁力計FM10を使い、データは3成分(X, Y, Z)で10Hz(0.1秒)サンプリング収録をしている。

本調査で用いる短時間フーリエ変換は、300秒間のハニング窓を用い、409.6秒間のフーリエ変換を行った。1回のフーリエ変換では10Hzデータ3000個を使う。オフセットと直線トレンドを差し引いた3000個のデータにハニング窓をかけたものと、さらに残りを0埋めした4096個のデータを1回分のデータとして、フーリエ変換を行いパワースペクトルを求めた。得られたパワースペクトルを、ハニング窓の面積で5分割し、それぞれの時刻に割り当てた。この処理を1分ずつずらしながらそれぞれの時刻の

パワーを足していき、5つ足した値を1分値とした。今回の調査で得られた1分値は、窓関数やデータ長の補正をしていないので相対値である。本調査では、周期20秒から410秒まで3成分のパワースペクトルを求めた。

3. 2013年6月9日の例

パワースペクトルの例として、2013年6月9日14時30分から15時30分のX成分のデータとダイナミックスペクトルを図1に示す。Pi報告リストによると、2013年6月9日14時51分(UTC)に周期60秒、振幅6.3nT、Quality AのPi2が報告されている。

図2から、出現時刻に対応した強い周期のパワーが確認できる。また、14時50分以降は強いパワーの周期が長いほうへ移動しており、Pi2が単周期の振動現象でない様子も見て取れる。

4. ハイパスフィルタとの違い

本調査における短時間フーリエ変換は、観測データをそのまま使っているが、地磁気観測業務における脈動現象読み取りでは、遮断周期150秒のデジタルハイパスフィルタ(以下、ハイパスフィルタ)を通したデータを使っている。そこで、観測データと現業用のハイパスフィルタを通したデータにおいて、ダイナミックスペクトル上で差があるか、Piの波形に模した継続時間の短い、長さ3/2波長の正弦波をサンプルデータとして確かめた。

ハイパスフィルタは、斉藤(1978)によるパワースペクトル特性の漸化式2次ハイパスフィルタである。ハイパスフィルタのゲインと位相特性を図2に示す。

各周期について、サンプルデータにハイパスフィルタをかけ、それぞれのパワースペクトルを求めた。そして、ハイパスフィルタの周波数-群遅延特性によるピーク時刻のずれを相互相関から求めた。波数4の波形とフィルタ処理後の波形とパワースペクトルを図3に、相互相関の結果を表3に示す。

表3からハイパスフィルタでは80秒より長い周期は、周波数-群遅延特性によってピーク時刻が1分遅れることがわかった。このことにより、地磁気観

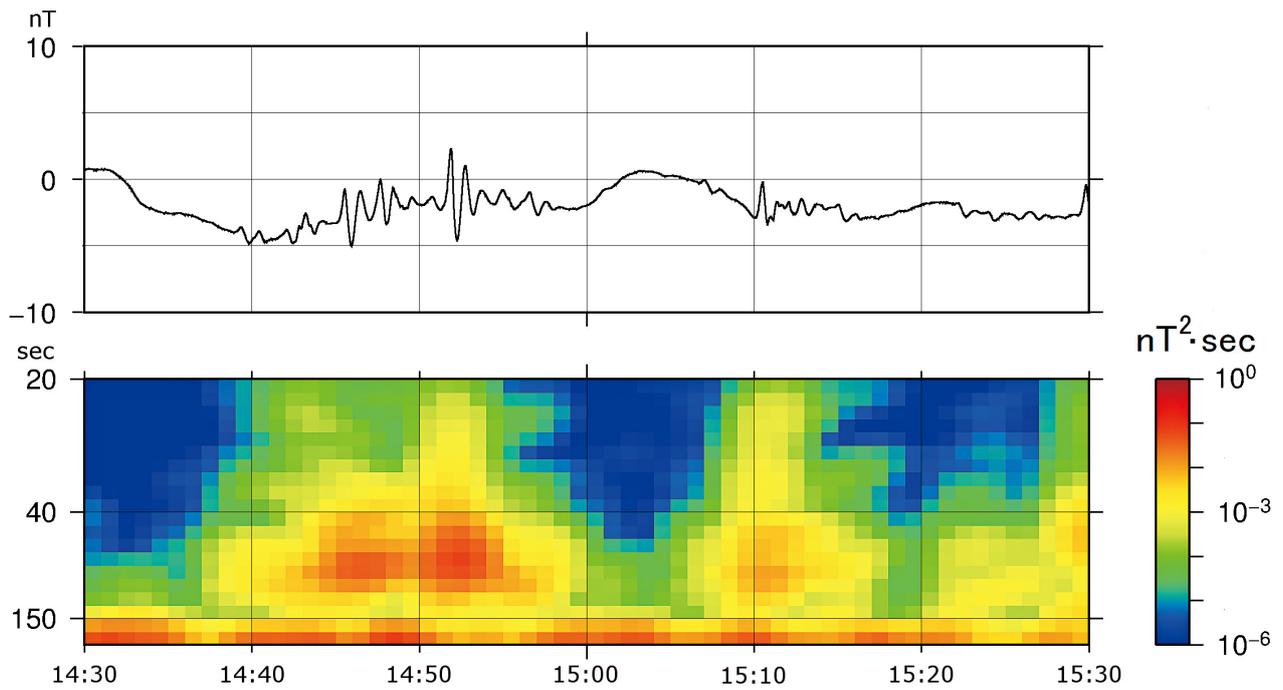


図1 2013年6月9日14時30分から15時30分のX成分のデータ(上)とダイナミックスペクトル(下). 横軸は時刻(UT). 上の縦軸は磁場の強さ. 下の縦軸は周期, 強さを色で表している.

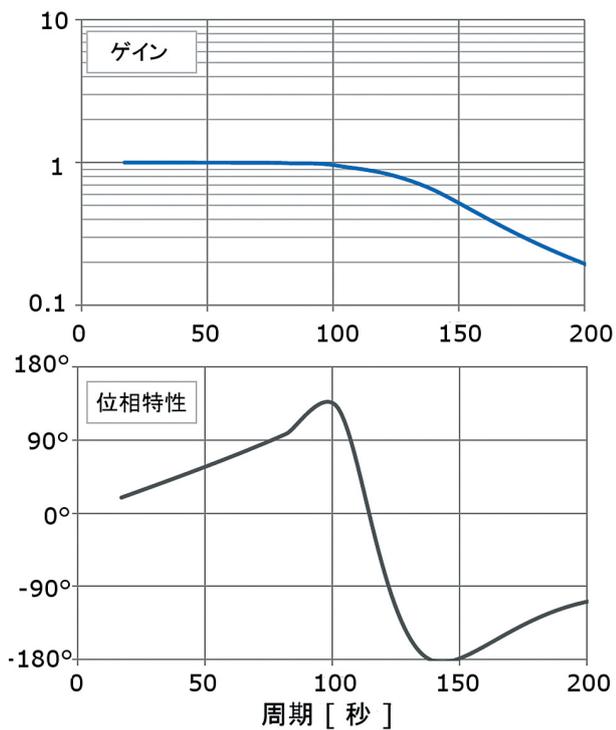


図2 デジタルハイパスフィルタのゲイン(上)と位相特性(下). 横軸は周期. 上の縦軸はゲイン, 下の縦軸は位相差.

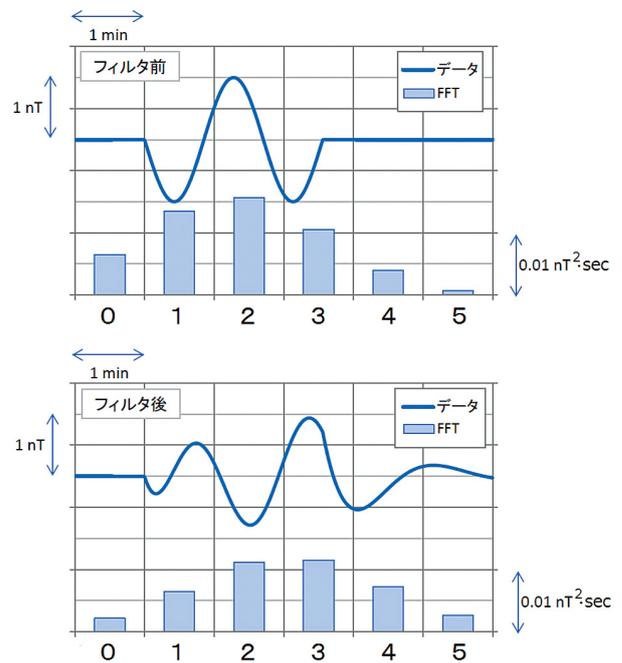


図3 周期102秒の長さ3/2波長の波形と短時間フーリエ変換の1分値. 元波形(上)とデジタルハイパスフィルタ処理後の波形(下). 横軸は時刻, 縦軸は実線が磁場の強さ, 棒グラフがパワーの1分値を表している.

表3 ハイパスフィルタの周波数-群遅延特性によるピーク時刻のずれ。
横軸は時間差、縦軸は周期、値は相関係数を示している。周期68秒まではピークの時間差は見られないが、周期81秒からはピークが遅れる。

周期[秒]	時間差[分]					相関係数
	-2	-1	0	1	2	
19	0.50	0.84	1.00	0.85	0.52	
20	0.50	0.84	1.00	0.85	0.52	
21	0.50	0.84	1.00	0.85	0.52	
22	0.50	0.84	1.00	0.85	0.52	
24	0.50	0.84	1.00	0.86	0.52	
25	0.50	0.84	1.00	0.86	0.52	
27	0.50	0.84	1.00	0.86	0.52	
29	0.50	0.83	1.00	0.86	0.53	
31	0.49	0.83	1.00	0.86	0.53	
34	0.49	0.83	1.00	0.87	0.53	
37	0.49	0.83	1.00	0.87	0.54	
40	0.48	0.82	1.00	0.87	0.55	
45	0.48	0.82	1.00	0.88	0.56	
51	0.47	0.81	1.00	0.89	0.57	
58	0.46	0.80	1.00	0.91	0.60	
68	0.44	0.78	1.00	0.94	0.64	
81	0.40	0.73	0.98	0.98	0.72	
102	0.31	0.58	0.82	0.89	0.73	
136	0.20	0.36	0.52	0.60	0.56	
204	0.09	0.13	0.16	0.18	0.18	
409	0.13	0.13	0.12	0.12	0.11	

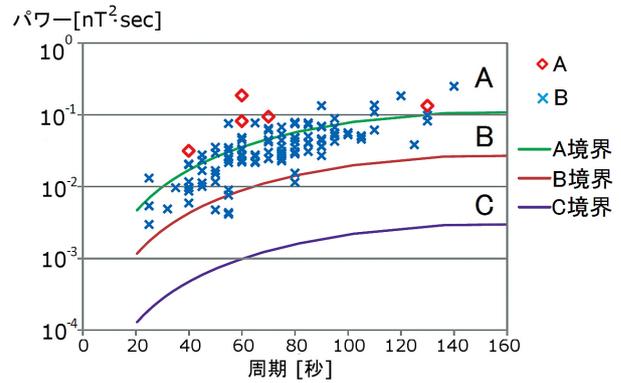


図4 Pi2報告値とパワースペクトル1分値の比較結果。
横軸は周期、縦軸はパワー。実線は長さ3/2波長のサンプルデータによるQuality境界を表している。

な役割を果たすが、パワー値は現象の継続時間による影響が大きく、パワー値からPiのQualityを求めることは困難であることがわかった。

測所が報告しているPiの時刻は、周期が80秒より長いものは1分遅れている可能性がある。

5. Pi 報告リストとの比較

調査期間の2012年から2013年までに地磁気観測所が報告したQuality A 5個、Quality B 111個のPiについて、Quality条件を満たした成分の振幅とその成分の報告された周期のパワーを比較した。その結果を図4に示す。Piの開始時刻は必ずしも最大振幅と一致しないため、報告された開始時刻から5分間のパワーの最大値をプロットした。

Quality AとBのプロットが重なっている部分がある。フーリエ解析は、入力データを無限に続く波の和として表現しているため、図3に示したようなPiの波形によく見られる、継続時間の短い長さ3/2波長のサンプルデータのような波形に対しては、小さく計算される。

そこで、静穏時のQuality A, BおよびCの境界である振幅6nT, 3nT, および1nTの、長さ3/2波長のサンプルデータ波形を入力データとしてパワー値を計算し、Quality A, B, およびCの境界を求め、図4に重ねて示した。

Quality AのPiは、すべてAの境界線の上であり、よい対応を示した。一方、Quality Bでは、境界線より下にもプロットがあった。これはPiの開始時刻が、条件を満たすピークの時刻よりかなり前にある場合であり、報告リスト作成時の読み取り間違いではなかった。

Pi報告リストと本調査で得られたスペクトルのパワー値はよい対応を示し、現象出現の把握には十分

6. 結論

本調査では、女満別観測施設の地磁気観測10Hzサンプリングデータを短時間フーリエ変換して、従来の周波数解析より高い時間分解能のパワースペクトル1分値を求めた。

その1分値で作成したダイナミックスペクトルにより、2013年6月9日の例から地磁気脈動Piの周期が短時間に変動している様子が見て取れた。このことから、1分値を使って新たな現象の発見や短周期現象の解析に使用することが期待できる。

Pi報告リストとの比較については、現象出現の把握には役立つものの、継続時間の短い不規則な変動から必ずしもスペクトルのパワー値からQuality判定ができないことがわかった。しかし、ダイナミックスペクトルをみることにより、短周期の地磁気現象を簡単に確認することができるため、現業業務において、現象の見落としや読み間違いなどの人為的ミスを少なくすることに貢献でき、十分な役割を得ることができる。

謝辞

本調査において、観測課大川隆志課長ならびに笹岡雅宏主任研究官に、大変有益なご助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- IAGA Copenhagen meeting, Annals of the International Geophysical Year, vol. IIB, 1957, pp. 668-709.
Nosé, M., T. Iyemori, L. Wang, A. Hitchman, J. Matzka, M. Feller, S. Egdorf, S. Gilder, N. Kumasaka, K.

- Koga, H. Matsumoto, H. Koshiishi, G. Cifuentes-Nava, J. J. Curto, A. Segarra, and C. Celik, Wp index: A new substorm index derived from high-resolution geomagnetic field data at low latitude, *Space Weather*, 10, S08002, doi:10.1029/2012SW000785, 2012.
- Sakurai, T. and T. Saito (1976a), Magnetic pulsation Pi 2 and substorm onset, *Planet. Space Sci.*, 24, 573-575, doi:10.1016/0032-0633(76)90135-5, 1976.
- 齊藤正徳, 漸化式デジタル・フィルターの自動設計, *物理探鉱*, 31, 240-263, 1978.
- 横山恵美, 福井史雄, 大和田毅, 地磁気変化量観測に関する調査—地磁気脈動現象読み取り基準に関する調査, *地磁気観測所技術報告* 第37巻 第03, 04号 (1998年3月)
- 横山恵美, 大和田毅, 福井史雄, 岩瀬由紀, 重野伸昭, 源泰拓, 地磁気脈動現象報告基準の調査について, *地磁気観測所技術報告* 第39巻 第01号 (1999年9月)

Analysis of geomagnetic irregular pulsations using the short-time Fourier transform

by

Hideyuki HIRAHARA

Kakioka Magnetic Observatory

Received 21 January 2015; received in revised form 2 November 2015;
accepted 13 November 2015

Abstract

In order to analyze the geomagnetic phenomena with high time resolution, the power spectrum one minute value of the geomagnetic 10Hz sampling data Memambetsu Magnetic Observatory is obtained using the short-time Fourier transform (STFT).

In order to confirm the one minute value is effective for phenomena analysis, we compared the one minute value of the power spectrum with the Memambetsu Pi2 lists reported by Kakioka Magnetic Observatory from 2012 to 2013. As the result, it showed a good correspondence between the period and the amplitude. Therefore, the STFT is effective method for understanding of geomagnetic short period phenomena.