

ガウシアンフィルタを適用した地磁気毎分値の作成について

浅利晴紀¹, 神谷亜希子¹, 弘田瑛士²

¹地磁気観測所技術課, ²地磁気観測所観測課

2023年3月9日受領, 2023年3月14日受理, 2023年3月31日刊行

要 旨

気象庁地磁気観測所では地磁気デジタル毎秒値の収録を始めた1983年から現在まで、地磁気毎分値の算出方式として毎秒値60個の単純平均を採用している。他方、海外の主要な観測所では、現在その多くがインターマグネットが推奨するガウシアンフィルタを用いて毎分値を算出している。そこで、将来的に毎分値作成処理を国際標準的な方式へ転換する可能性も視野に入れ、両方式による毎分値の性質の相違点を検証した。単純平均とガウシアンフィルタは、ローパスフィルタとしての大局的な傾向では類似するが、周期1分付近の帯域で前者のゲインの方が顕著に小さくなる。擾乱時の柿岡毎秒値から得た毎分値XYZ成分の周波数解析では、単純平均により生じるエイリアシングの方がやや小さく現れており、ガウシアンフィルタにアンチエイリアシングにおける優位性は認められない。両方式によって得られる毎分値の乖離はssc等の急変化現象の発生時において数nT程度に達することもあるが、その出現率は低く、太陽活動極大期においても、99.9%は0.3nT以下である。毎分値算出方式の切り替えによってそのデータ特性に重大な不連続が生じるという程でもなく、国際観測網のデータ均質性の観点からガウシアンフィルタを採用することにも合理性はあろう。

1. はじめに

科学研究を目的とする系統的な地磁気観測の歴史は、1830年代にカール・フリードリヒ・ガウスとアレクサンダー・フォン・フンボルトが中心となって設立されたゲッティンゲン磁気協会 (Göttingen Magnetic Union) の全球的観測事業に始まる。以降、約190年間に渡る国際協力の下で地磁気観測網は拡大・維持され、その成果は地球の内部と外部に起源を有する地磁気の様々な現象に関する理解の深化をもたらした。事業の黎明期から1世紀半ほどの間は、感光紙に写し取られたアナログ記録 (マグネトグラム) として地磁気3成分 (H: 水平分力, Z: 鉛直分力, D: 偏角) が記録され、そこから1時間毎に手で読み取られた分解能1nTの数値が、確定毎時値として各観測所の年報に掲載され出版される時代が続いた。1970年代になると、柿岡による先駆的な観測システムKASMMERの導入を皮切りに、ようやく世界の地磁気観測もデジタル化の方向へと転じ始めた。その後、デジタル地磁気データのリアルタイム流通を促進する国際協力事業「インターマグネット (INTERMAGNET)」が発足したのが1990

年のことである。ここに至ってようやく国際地磁気観測網においてデジタル観測が標準化されたと言える。既に観測機器および計算処理システムの性能も向上し、観測量や時間の分解能も高まっていたことから、インターマグネットでは事業開始当初より分解能0.1nTの確定「毎分値」の収集・配信を行っている。近年では、毎秒値の収集も開始しているが、毎秒値を提出できる加盟観測所は全体の3分の1にも満たず、データ品質も超高層研究からの要望に従い定められた推奨要件 (分解能を1pTとする等 (St-Louis, 2020)) に完全に応えられているとは言えない。現在でもインターマグネットの主要プロダクトは毎分値である。

毎分値とは、文字通り1分につき1つの値を持つ時系列データのことであり、地磁気観測の業界においては、その統一的な定義は特に定められていない。例えば、単純に正分の瞬間値を記録したものが該当するほか、より高い時間分解能で取得したデータに何らかのデジタルフィルタを適用してリサンプリングしたのも毎分値と見なせる。後者については、単純平均ばかりではなく加重平均により求める

方法も含まれる。これまで毎分値の生成手順を公式に規定しようとする国際的な動向は特に無く、現状ではデータ生産者に毎分値の仕様が委ねられている。特に、歴史的な観測所ではそれぞれ独自の方式を採用していることが多い。気象庁地磁気観測所においては、KASMMERの運用が開始された1976年1月から正分の瞬間値が報告されたが、1980年7月以降、より高いサンプリングの単純平均が毎分値として採用されている。1983年2月まではサンプリングが3秒毎であったことから、時刻hh時mm分の毎分値が20個の3秒値(mm-1分30秒からmm分27秒まで)の単純平均により生成された(中島・岡本, 1981)。こうして得られた毎分値の厳密な時刻はhh時mm分01.5秒となるが、当時の観測基準においては1.5秒程度の時間差は特に問題視されず、わざわざ正分を中央とするウィンドウを導入することもなかったようである。毎秒サンプリングの収録が始まった1983年3月からは、60個の毎秒値(mm-1

分30秒からmm分29秒まで)の単純平均をもって毎分値を算出するようになった。その定義は現在に至るまで変わらず踏襲されている。現在の毎秒値と毎分値の仕様を表1に示しておく。

インターマグネットでは、毎分値の生成の方式について厳格な要件は定義されていない。推奨される方式として、ガウシアンフィルタを適用することがテクニカルマニュアル(St-Louis, 2020)に記載されているだけである。約120の現インターマグネット認定観測所(IMO)では、特に加盟時期の比較的遅かったIMOを中心に、テクニカルマニュアル付録のフィルタ係数をそのまま使用するケースは多い。ただ、元となるデータのサンプリング間隔に従って独自算出の係数を使用している観測所も少なくない(表2)。また、カナダ天然資源省(NRCan)の運用する観測所のように、多段でフィルタを適用して毎分値を算出しているケースもある(Jankowski and Sucksdorff, 1996)。一方、ガウシアンフィルタを全

表1 気象庁における現行の毎秒値と毎分値の仕様。

	毎秒値	毎分値
記録上の分解能	0.01nT	0.1nT
生成方法	hh時mm分ss.00秒からss.99秒の100Hz値100個の単純平均	hh時mm-1分30秒からhh時mm分29秒の毎秒値60個の単純平均
記録上の時刻	hh時mm分ss秒	hh時mm分
実際の時刻	hh時mm分ss.495秒	hh時mm-1分ss.995秒
欠測とする条件	なし	20個/60個未満で欠測観測要領に記載なし)

表2 世界の主要な観測機関で採用されているフィルタ。いずれも毎秒値から毎分値を作成するのに用いられる。

国名・機関名	機関名(省略形)	毎分値データ作成
■ ガウシアンフィルタを採用している代表的な観測機関		
アメリカ・地質調査所	USGS	91点ガウシアンフィルタ
フランス・パリ地球物理学研究所	IPGP	91点ガウシアンフィルタ
オーストラリア・地球科学研究機構	GA	91点ガウシアンフィルタ
ロシア・科学アカデミー極東支部	FEB RAS	181点ガウシアンフィルタ
ニュージーランド・地質核科学研究所	GNS science	91点ガウシアンフィルタ
南アフリカ・国立宇宙機関	SANSA	19点ガウシアンフィルタ
ドイツ・地球科学研究センター	GFZ	91点ガウシアンフィルタ
■ その他のフィルタを採用あるいはガウシアンフィルタと併用している代表的な観測機関		
イギリス・地質調査所	BGS	61点コサインフィルタ
カナダ・天然資源省地質調査所	NRCan	49点ガウシアンフィルタ(毎秒→5秒) 19点ガウシアンフィルタ(5秒→毎分)
スウェーデン・地質調査所	SGU	151点ガウシアンフィルタ
日本・気象庁	JMA	60点単純平均

く採用しないIMOは少数である(表3)。上述のような単純平均を採用する気象庁のIMO(柿岡・女満別・鹿屋)を除くと、独自の余弦フィルタ(Green, 1985)を採用するイギリス地質調査所(BGS)の6つのIMOが代表的である。なお、ドイツ地球科学研究センター(GFZ)が運営する2つのIMOでは、かつてmm分00-59秒の毎秒値の単純平均をもってmm分の毎分値としていたが、2015年にガウシアンフィルタを使用する方式に切り替えられた。

柿岡は1990年から、女満別と鹿屋はそれぞれの1994年と2001年からIMOとして認定され、国際的な地磁気観測網の枠組みでは東アジア域における中核拠点を担っている。その毎分値の性質が、大多数のIMOのものとは異なっているとしたら、それはあまり好ましい状況とは言えない。KASMMER初期に由来する現行方式に理論あるいは実践上の優位性があるならば、これを継続する根拠にもなる。しかし、そこに特段の優位性が認められないならば、データセットの均質性の観点から、(事実上の)国際基準に準拠する方式へ移行するほうが望ましい。気象庁地磁気観測所も上述のGFZの事例のような変更踏み切るかどうか検討するべきであり、国際的な情勢を鑑みてもその期は十分に熟している。そこで本調査では、その判断の材料として、ガウシアンフィルタ方式で生成される毎分値の性質を実際に調べておくことにする。将来的に同方式へ移行する場合、情報処理システムや収録装置の更新整備に合わせて実装されることになろうが、その開発予算を要求する上でも、導入の合理性について根拠は与えておきたい。

本調査では、実際に柿岡の確定毎秒値にガウシア

ンフィルタを適用して毎分値を算出する。これを現行の方式による毎分値と比較することで、フィルタ特性の相違が毎分値の算出結果にどのように現れるか検証する。以下、本稿ではまずインターマグネット推奨のガウシアンフィルタの背景を簡単にレビューし(第2節)、本調査で導入するフィルタの係数および特性を示す(第3節)。次に、異なる方式で得られる毎分値の違いを周波数領域にて比較し(第4節)、時間領域での比較も踏まえ毎分値の算出方式の変更に関する考察と展望を記してまとめる(第5節)。

2. インターマグネット推奨ガウシアンフィルタ

地磁気の観測における基本的な思想は、環境の地磁気変動を記録する際に、それ以外のノイズ成分を極力取り除くことである。例えば、現実の観測データには観測機器や近隣からの人工擾乱に起因する成分が重畳する。これらはノイズに該当するため常時監視し、重大なものは自動/手動の補正処理により除去する必要がある。また、データ処理の結果として出現する見掛けの変化成分もノイズであり、時系列のサンプリングによって生じるエイリアシング(折り返し雑音)もこれに該当する。従ってデジタルデータのサンプリング(或いはリサンプリング)の実施にあたり、出来るだけアンチエイリアシング処理、すなわち適切に設計されたローパスフィルタを適用することが望まれる。一般的にフラックスゲート磁力計の増幅回路にはアナログのローパスフィルタが実装されている。例えば、気象庁の成分変化観測用の主測器として2010年に整備された島津製作所による高感度フラックスゲート磁力計では、5 Hzをカットオフとしたローパスフィルタが適用されている。ただし、交流感度の測定結果によると、高周波側のゲインが桁で低下するような設計にはなっておらず、また0.01-1Hzの帯域におけるゲインはほぼ1である(山崎・三島, 2013)。地磁気のパワースペクトル密度は、一般的に周波数が高くなるにつれて低下するものの、ナイキスト周期が2分(0.0083Hz)である毎分値のサンプリングにおいては、磁力計のアナログフィルタのみではアンチエイリアシングとして不十分だろう。適切なデジタルフィルタを適用しつつリサンプリングする必要がある。

最も理想的なローパスフィルタは矩形フィルタと呼ばれるもので、通過帯域(周期2分以上)のゲインが1で、阻止帯域(2分未満)が0となる特性を持つものである。これを実現するにはsinc関数を使って記述される無限の幅を持つカーネル(インパ

表3 IMO採用する毎分値生成用フィルタの内訳(2016年のインターマグネット確定毎分値データセットのメタ情報より抽出)。単純平均には気象庁のIMO(柿岡・女満別・鹿屋)が含まれる。

フィルタ種別	個数	%
ガウシアンフィルタ	87	83
余弦フィルタ	6	6
単純平均	5	5
多段フィルタ	4	4
フィルタなし	1	1
不明	1	1
合計	104	100

ルス応答関数)が必要となり (Love et al., 2010), 有限の数値計算からなるデジタルフィルタでは実現し得ない. そこでインターネットでは, 有限範囲内で近似した正規分布関数をカーネルとした以下のようなガウシアンフィルタの適用を推奨している. ローパスフィルタとして定義されている要件は, カットオフ周期2分におけるゲインが-3 dBとなることだけである. これを満たすようなカーネル $g(t)$ は, $\tau_g = 15.90062182$ として

$$g(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\tau_g}} \exp\left(-\frac{t^2}{2\tau_g^2}\right)$$

と記述される (Jankowski and Sucksdorff, 1996). これを有限の範囲で離散化したものがガウシアンフィルタ係数 $g_i (i = -N, \dots, +N)$ であり, データ時系列 x_i に対して数値的な畳み込み

$$\tilde{x}_i = \frac{\sum_{j=-N}^N g_j x_{i+j}}{\sum_{j=-N}^N g_i} = \sum_{j=-N}^N \bar{g}_j x_{i+j}$$

により, フィルタ適用後 \tilde{x}_i の時系列を得る. ここで \bar{g}_i は加重平均の重み, 即ち, 総和が1となるように既に正規化 ($\bar{g}_i = g_i / \sum_{j=-N}^N g_i$) された係数である. テクニカルマニュアル (St-Louis, 2020) の付録には, 参考資料として正分を中央とした91個の毎秒値, 19個の5秒値, 或いは11個の10秒値に適用する場合の加重係数 \bar{g}_i が掲載されている (図1). ただし, 付録の係数は, 毎秒値などに欠測が無い場合に限り適用できるものであり, 欠測を含む場合にはそれに応じて係数を正規化し直す必要がある. なお, インターマグネット確定値の仕様では, (加重) 平均を取る対象のデータ区間の10%以上に欠測がある

場合は, ダウンサンプリング処理 (毎秒値→毎分値のほか, 毎分値→毎時値, 毎分値→毎年値) そのものを行わない. 例えばガウシアンフィルタを適用する毎秒値に10個以上の欠測があるときは, 毎分値も欠測となる.

上述のガウシアンフィルタのカーネル幅は91ないし101秒に及ぶため, 時間的に隣同士の毎分値の算出に共通のデータが使用される. 一方, 気象庁が採用する矩形カーネル (60個の毎秒値の単純平均) や, BGSによる余弦カーネル (Green, 1985) の幅は60秒以内であり, このようなフィルタを採用する場合は, 連続する毎分値も互いに独立したデータから生成される. 狭いカーネル幅を選択することは毎分値の独立性を担保するが, その一方で, 次節で述べるように, そのようなカーネルには理想とするフィルタ特性を得にくくするデメリットが伴う.

3. ガウシアンフィルタと単純平均の特性

本調査では柿岡の確定毎秒値からインターネット推奨のガウシアンフィルタを適用して毎分値 (以降「ガウシアン毎分値」) を生成する. ただし91点ガウシアンフィルタ係数は用いない. やや変則的ではあるが, カーネル $g(t)$ から導出される偶数長 (90点) の係数 \bar{g}_i (表4) を用いた加重平均

$$\tilde{x}_i = \sum_{j=-45}^{44} \bar{g}_{i+j} x_j$$

によりガウシアンフィルタを適用することにする (つまり mm 分の毎分値を, mm-1分15秒から mm 分44秒の毎秒値から計算する). これは現行の毎秒値 (以降「確定毎秒値」) の時刻が hh 時 mm 分 ss 秒

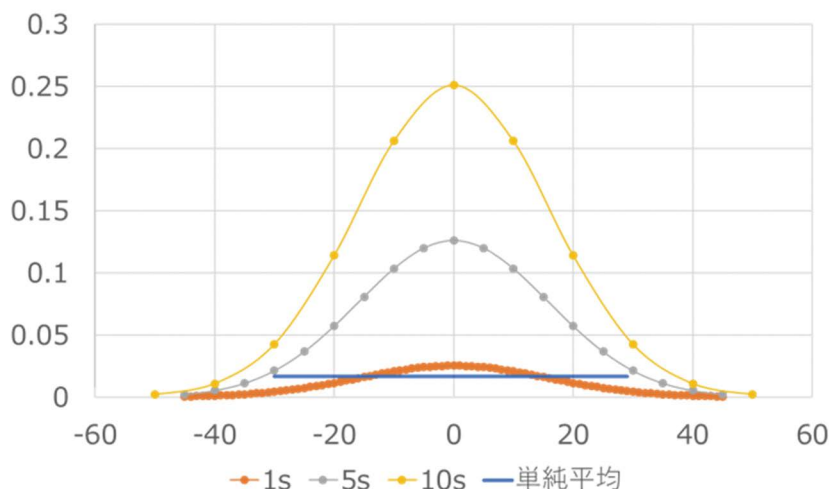


図1 インターマグネットのテクニカルマニュアル (St-Louis, 2020) の付録に掲載されているガウシアンフィルタと60点単純平均の加重係数.

ではなく hh 時 mm 分 ss.50秒であることを考慮したものである(表1)。上記のような加重平均を定義することで、実際は-44.50秒から+44.50秒までの90個の値を使うこととなり、結果として0.01秒の精度で正分(hh時mm分ss.00秒)のガウシアン毎分値が出力される。また、第1節でも述べた通り、単純平均による毎分値(以降「単純毎分値」)はmm-1分30秒からmm分29秒までの確定毎秒値の単純平均により定義されているが、こちらも-29.50秒から+29.50秒までの60個の値を使用することに相当するため、その出力値の時刻は同様となっている(hh時mm分ss.00秒)。実質的に両者の処理は正分に関して対象な偶数長の(加重)平均に相当するた

め、どちらも回転を伴わない位相特性を持つ。以下では、振幅特性のみに注目する。

図2に本調査で比較する90点ガウシアンフィルタと60点単純平均のゲインを示す。ここにプロットしたガウシアンフィルタのゲインは、それぞれ離散化したカーネルに高速フーリエ変換(FFT)を適用して絶対値を取ったもので、両者とも解析的に記述されるゲインの数値近似である。ガウシアンフィルタの振幅特性は、周波数 f の関数として

$$G(f) = \exp\left(-\frac{(2\pi f / f_g)^2}{2}\right)$$

のように記述される。-3dBカットオフ周期と

表4 90点ガウシアンフィルタの加重係数。

t	g_t	t	g_t	t	g_t
±0.5	2.519535E-02	±15.5	1.567386E-02	±30.5	4.004158E-03
±1.5	2.509588E-02	±16.5	1.471262E-02	±31.5	3.542071E-03
±2.5	2.489813E-02	±17.5	1.375582E-02	±32.5	3.120940E-03
±3.5	2.460442E-02	±18.5	1.281046E-02	±33.5	2.739024E-03
±4.5	2.421819E-02	±19.5	1.188298E-02	±34.5	2.394353E-03
±5.5	2.374391E-02	±20.5	1.097913E-02	±35.5	2.084792E-03
±6.5	2.318703E-02	±21.5	1.010398E-02	±36.5	1.808088E-03
±7.5	2.255381E-02	±22.5	9.261886E-03	±37.5	1.561918E-03
±8.5	2.185129E-02	±23.5	8.456457E-03	±38.5	1.343938E-03
±9.5	2.108707E-02	±24.5	7.690589E-03	±39.5	1.151814E-03
±10.5	2.026924E-02	±25.5	6.966472E-03	±40.5	9.832584E-04
±11.5	1.940622E-02	±26.5	6.285622E-03	±41.5	8.360554E-04
±12.5	1.850660E-02	±27.5	5.648925E-03	±42.5	7.080836E-04
±13.5	1.757900E-02	±28.5	5.056680E-03	±43.5	5.973325E-04
±14.5	1.663198E-02	±29.5	4.508658E-03	±44.5	5.019147E-04

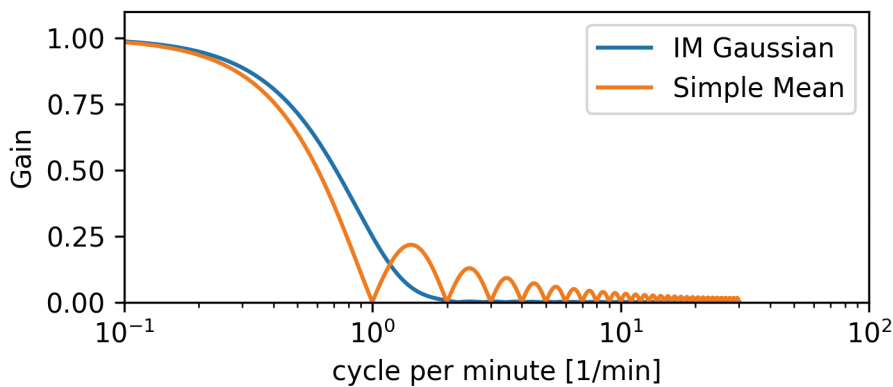


図2 FFTにより数値的に算出した90点ガウシアンフィルタ(青)と60点単純平均(橙)のゲイン。

ナイキスト周期を一致させる要件から $f_g = 1/\tau_g = 1/15.90062182$ と定義されているため、周期 2 分 ($f = 1/120\text{Hz}$) にてゲイン $|G|$ が実際に $0.7071 (= 1/\sqrt{2})$ であることが確認できる。その設計の背景には、アンチエイリアシング性能をある程度譲歩し、2分に近い通過帯域のシグナル減衰を極力抑える意図があることが窺える。

一方、単純平均の振幅特性は、sinc 関数

$$H(f) = \frac{\sin(\pi f / f_a)}{\pi f / f_a}$$

を用いて記述される (Love et al., 2010)。ここで $f_a (= 1/60\text{Hz})$ は矩形関数の幅の逆数である。周期 2 分におけるゲイン $|H|$ は $0.6366 (= 2/\pi)$ であり、同周期におけるゲイン比 $|G|/|H|$ は $1.1107 (= 2^{-3/2}\pi)$ となる。図 2 からわかる通り、ゲインの大小が逆転する周期約 51 秒 (1.18cpm) より長い帯域では、単純平均の減衰の方が一様に大きい (本来は通過させたい 2 分以上のシグナルの損失もより大きい)。一方、(通過を阻止したい) 約 51 秒より短い周期帯では、ガウシアンフィルタの減衰の方が大きい。つまり、単純毎分値と比較して、ガウシアン毎分値は約 51 秒から 2 分の周期帯の変動によるエイリアシングを受けやすいが、逆に約 51 秒より短い周期帯の変動によるエイリアシングは受けにくい。

以上を定性的にまとめる。ガウシアンフィルタはアンチエイリアシングに特化したフィルタではないため、ナイキスト周期よりやや短い周期帯から折り返されるエイリアシングを十分に免れない。一方、単純平均には、その矩形カーネルの狭さと滑らかではない形状のため、ガウシアンフィルタには伴わないサイドローブが見られ、広い帯域の短周期変動がエイリアシングとして折り返される恐れがある。全体的な振幅特性の傾向については、ガウシアンフィルタと単純平均は概ね類似しており、ゲインの比較だけからアンチエイリアシングにおける優劣を判定することは難しい。

4. ガウシアンフィルタと単純平均による地磁気毎分値のスペクトル比較

ここでは同一の確定毎秒値から得られるガウシアン毎分値と単純毎分値の違いを周波数領域にて比較した結果を示す。用いるのは UTC で 2017 年 9 月 5 日 00 時 00 分 00 秒から同月 15 日 23 時 59 分 59 秒までの柿岡 3 成分 (XYZ) 確定毎秒値 (全 950400 秒) である (Kakioka Magnetic Observatory, 2013)。生データには観測機器に起因するスパイクノイズが含まれるため、ss 秒の毎秒値と、前後データを含む計

3 個の連続する毎秒値 (ss-1 秒, ss 秒, ss+1 秒) の中央値との間に、3 nT または $0.3'$ 以上の差がある場合は、この ss 秒の毎秒値を欠測とした。その後、10 nT 以上のスパイクノイズに対して自動処理された欠測と合わせて、前後の値からの線形補完により欠測を解消する処理を行った。上記期間には外部擾乱が断続的に生じており (K 指数日合計の平均 19.2)、7 日に発生した比較的顕著な急始型地磁気嵐 (H 成分較差 232 nT) のほか、小規模であるが 12 日と 14 日にもそれぞれ急始型地磁気嵐が記録されている。Storm sudden commencement (ssc) 等の急変化現象を含む短周期変動が卓越することから比較的エイリアシングを生じやすい期間である。

図 3 に、90 点ガウシアンフィルタと 60 点単純平均を 1 秒毎に適用して得られたそれぞれ 950310 個の毎秒値 (以降それぞれ「ガウシアン毎秒値」「単純毎秒値」) のパワースペクトル密度 (PSD) を示す。これらは、地磁気の XYZ 各成分の時系列に FFT を施して得られたものである (ハニング窓等の窓関数は適用していない)。ガウシアンフィルタと単純平均による減衰の効果の差は、2 分をより短い周期 ($>0.5\text{cpm}$) で判別できるが、特に約 51 秒よりも長い周期 ($<1.18\text{cpm}$) では、前節に示したゲインの違いを反映して、ガウシアンフィルタの減衰の効果が小さいことがわかる。

ガウシアン毎秒値および単純毎秒値から正分の値のみを抽出した 15839 個の毎分値時系列 (つまりガウシアン毎分値と単純毎分値) を FFT して求めた PSD を図 4 に示す。図 3 と図 4 を比較すると、ガウシアン毎分値と単純毎分値のいずれにもナイキスト周期 ($=0.5\text{cpm}$) の近傍で振幅の増加が見られる。このことは両者が共にアンチエイリアシングにおいて不完全なものであることを示している。帯域 $0.45\text{cpm}-0.50\text{cpm}$ (周期 120-133 秒) を拡大すると、ガウシアン毎分値の方が単純毎分値よりも概して大きな振幅を有していることがわかる (図 5)。更に、ガウシアン毎分値と単純毎分値の振幅スペクトルの比は (表 5)、ゲインの比の理論値 $1.1107 (= 2^{-3/2}\pi)$ を上回っている。これはエイリアシングがガウシアン毎分値の方により大きく出現していることを示唆している。その主たる要因は、約 51 秒から 2 分 ($0.5-1.18\text{cpm}$) の周期帯におけるゲインの差 (ガウシアンフィルタ $>$ 単純平均) に求められよう。一方、約 51 秒より短い周期帯ではゲインの大小が逆転するが (単純平均 $>$ ガウシアンフィルタ)、短周期変動が卓越する外部擾乱時の単純毎分値に実際に及ぶエイリアシングは、ガウシアン毎分値のそれほどではない。以上の結果を総合すると、少なくともアンチ

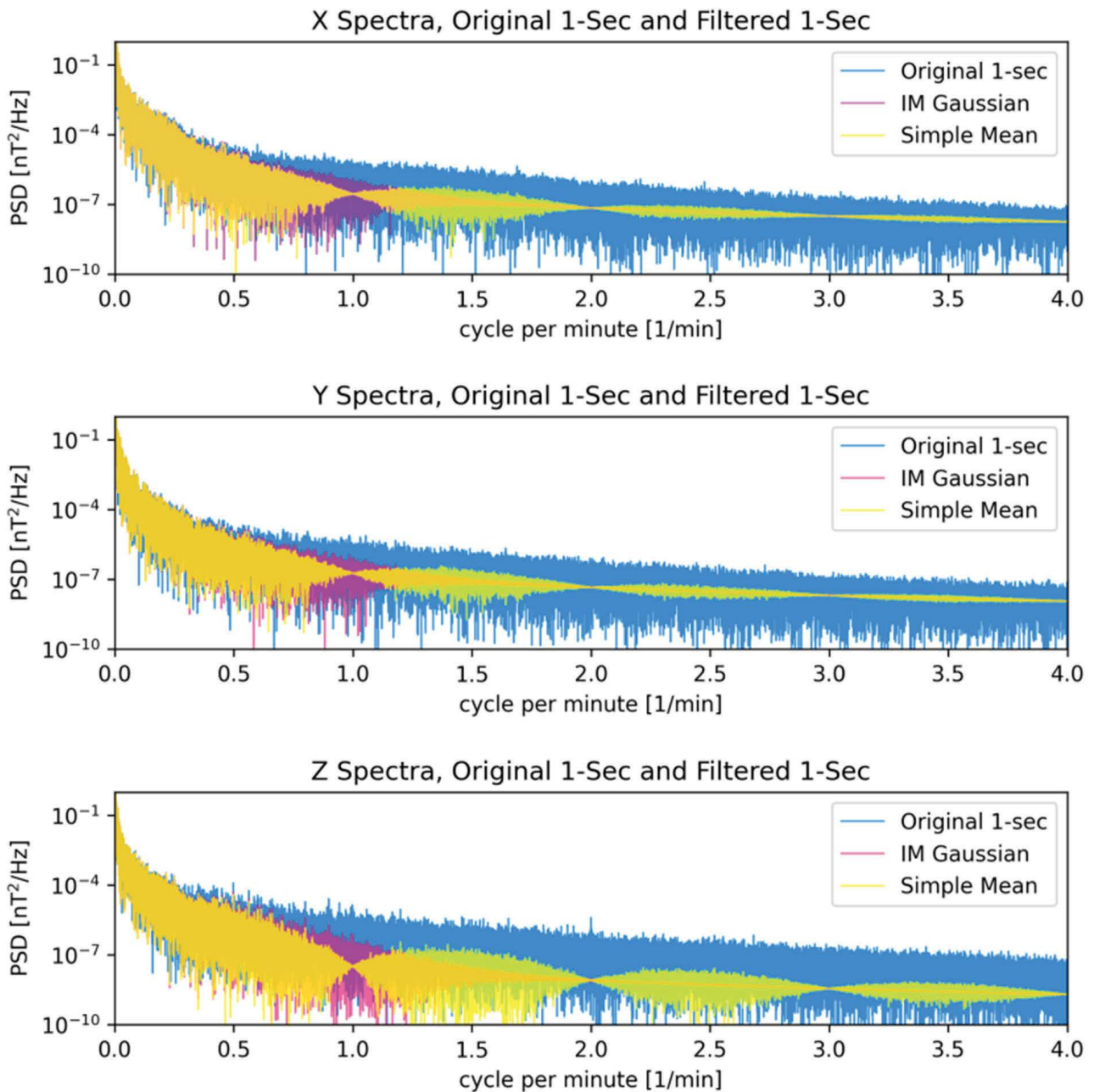


図3 X成分(上段), Y成分(中段), Z成分(下段)における確定毎秒値(シアン), ガウシアン毎秒値(マゼンタ), 単純毎秒値(黄)のPSD

エイリアシング効果に関してはインターマグネット推奨ガウシアンフィルタに優位性は認められない。

5. 考察とまとめ

本稿のまとめとして、気象庁の確定毎分値を従来の単純毎分値からガウシアン毎分値に変更することを想定した考察を行っておきたい。これまで示したように、ガウシアンフィルタと単純平均のゲインの差は、両毎分値に一定の乖離を生じるはずである。特にその乖離が大きい事例については、具体的な原因を特定し、さらにはその頻度を統計的に調べてお

くべきだろう。観測精度と比べて有意に大きい乖離が頻出するならば、変更前後の毎分値の特質に無視できない程度の不連続性が存在することになるためである。

2021年1月から11月の柿岡4成分(HZDF)のガウシアン毎分値と単純毎分値を調べたところ、両者の変化は大局的にはほぼ一致していた(図6)。実際、全期間に対する毎分値前後差の相関係数は1に近い(H:0.981, Z:0.970, D:0.978, F:0.984)。ただし、両者の乖離が顕著となる事例が皆無というわけではない。そのような事例を具体的に調べるため、両者

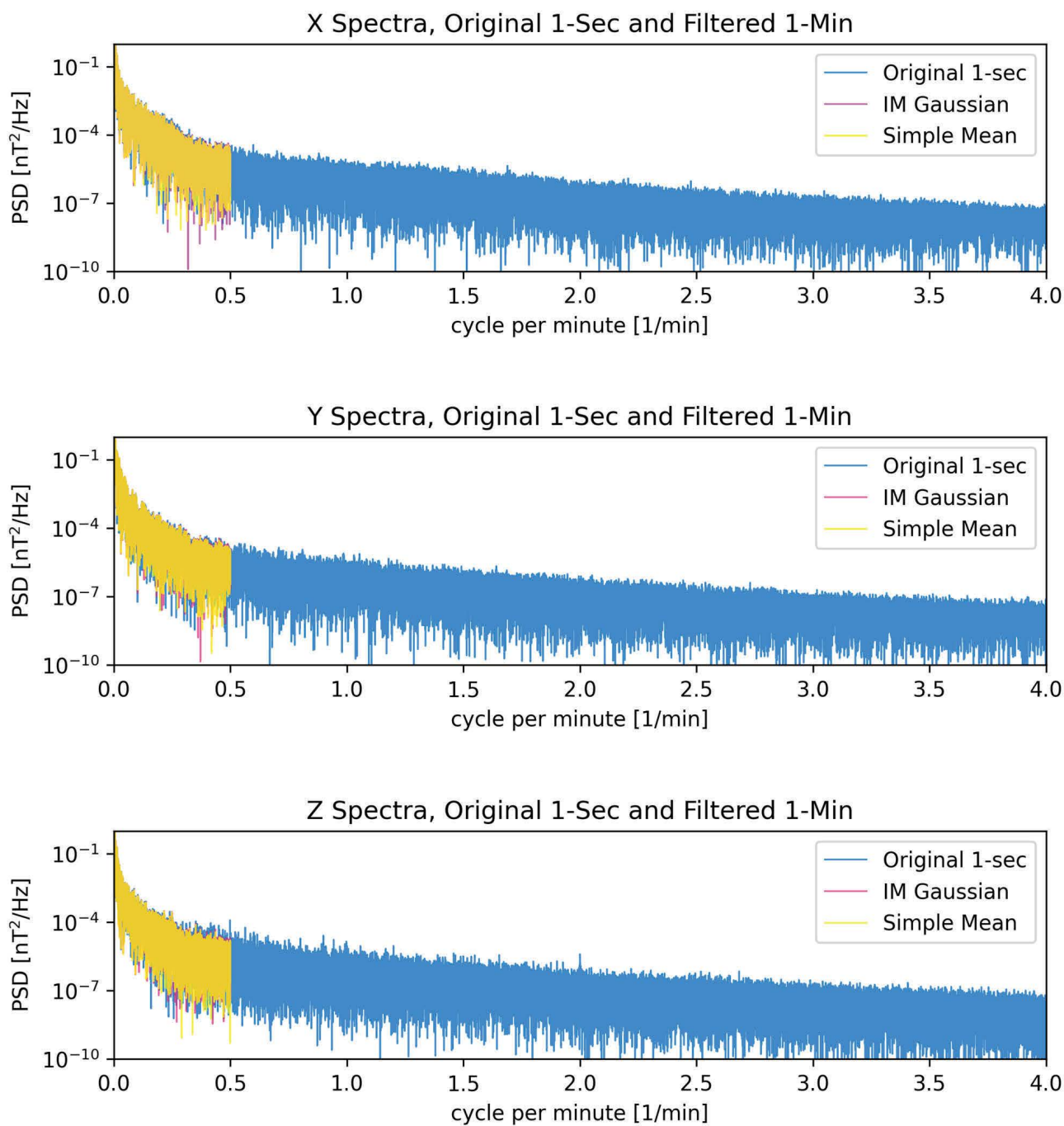


図4 X成分(上段), Y成分(中段), Z成分(下段)における確定毎秒値(シアン), ガウシアン毎分値(マゼンタ), 単純毎分値(黄)のPSD.

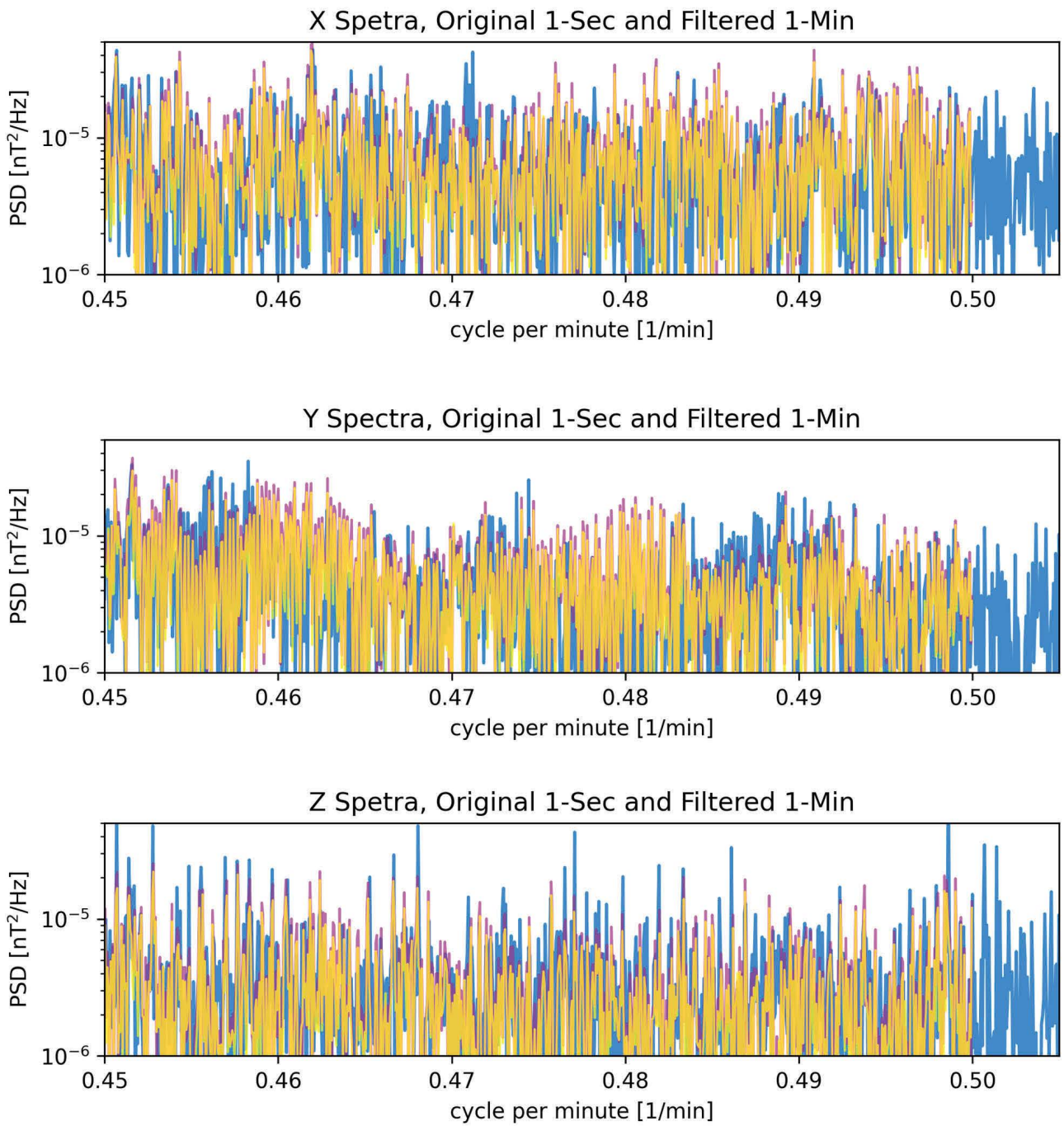


図5 図4の拡大 (0.45-0.55cpm).

表5 振幅スペクトル比 (ガウシアン毎分値/単純毎分値, 及びガウシアン毎秒値/単純毎秒値) の異なる帯域に関する平均値.

	毎分値			毎秒値		
	X	Y	Z	X	Y	Z
0.45 - 0.50cpm (120 - 133秒)	1.202	1.253	1.383	1.170	1.152	1.251
0.30 - 0.50cpm (120 - 200秒)	1.155	1.214	1.252	1.107	1.105	1.146
0.00 - 0.50cpm (120秒 -)	1.080	1.102	1.144	1.054	1.053	1.071

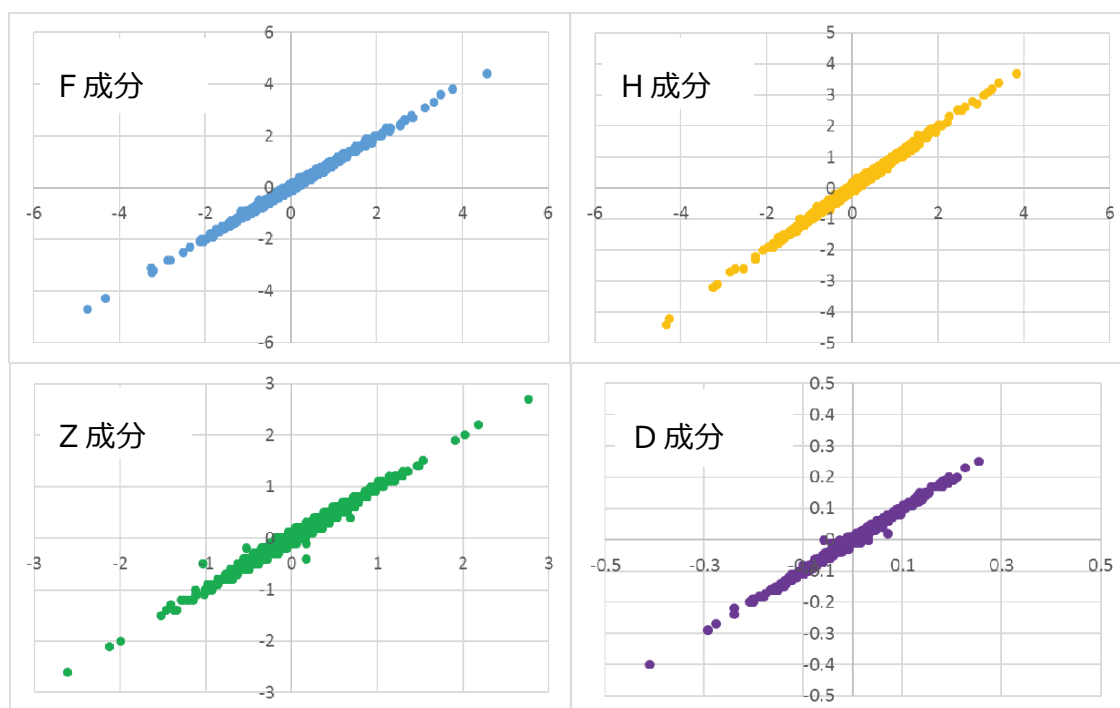


図6 ガウシアン毎分値 (縦軸) と単純毎分値 (横軸) の散布図.

の絶対差が0.5nTを超えるケースの抽出を行った結果、16事例が特定された。発現率としては0.003%と稀である。乖離の発生原因を個別に分析したところ、14事例がピーク状のノイズに起因するものであった。ガウシアンフィルタの加重は、正分からの時間差によって異なるため(表4)、ノイズの寄与率はその発生時刻に依存する。ガウシアンフィルタと単純平均の加重には、正分付近、及び正30秒付近で0.01程度の差がある(図1)ことから、毎秒値がそのような時刻に10nT程度のノイズを5個程度含んでいれば、両毎分値に0.5nT程度の乖離を生じ得る。

地磁気の短周期現象も両毎分値の乖離の原因となる。実際、残りの2事例は地磁気嵐の最中のもので、正分付近にピークを持つような地磁気変化が起

きていた。これは、乖離の発生頻度が太陽活動の状態に伴って変動することを示唆する。その統計については既に気象庁内で調査されており(大川・海東, 2020)、ここでは柿岡についての結果を引用する(表6)。太陽活動の極小期にあった2009年、2018年および2019年においては、両毎分値の乖離は0.2nT以内に限られる。柿岡の毎分値の異常値基準0.3nTにも満たないことから、その違いは実質的に無視しても良いだろう。極大期にあった2003年および2004年でも、毎分値の異常値基準である0.3nTを超える乖離の発現率は0.1%に及ばない。一部の極端な事例では数nTに及ぶこともあり、2003年10月29日に発生した大規模地磁気嵐(ハロウィン・ストーム)の急始時(1分以内の変化量が+80nTのssc)には6nTを超えている(図7)。なお、図7ではガウシ

表6 ガウシアン毎分値と単純毎分値の絶対差の大きさごとの発現率(大川・海東, 2020). F,H,Z成分とD成分についての絶対差は, それぞれ0.1nTと0.01分まで丸めたものである.

	F,H,Z D	0.4 nT以上	0.3 nT	0.2 nT	0.1 nT	0.0 nT
		0.04 分以上	0.03 分	0.02 分	0.01 分	0.00 分
2003年	F	0.05	0.04	0.13	2.03	97.76
	H	0.09	0.04	0.16	2.46	97.24
	Z	0.05	0.01	0.03	0.51	99.40
	D	0.08	0.04	0.12	2.04	97.72
2004年	F	0.03	0.02	0.06	0.87	99.02
	H	0.08	0.02	0.07	1.06	98.77
	Z	0.06	0.00	0.01	0.28	99.65
	D	0.07	0.01	0.04	0.84	99.03
2009年	F	0.00	0.00	0.00	0.28	99.71
	H	0.00	0.00	0.00	0.32	99.67
	Z	0.00	0.00	0.00	0.23	99.77
	D	0.00	0.00	0.00	0.23	99.76
2018年	F	0.00	0.00	0.01	0.79	99.19
	H	0.00	0.00	0.02	0.83	99.14
	Z	0.00	0.00	0.00	1.01	98.99
	D	0.00	0.00	0.01	0.63	99.36
2019年	F	0.00	0.00	0.01	0.68	99.31
	H	0.00	0.00	0.02	0.71	99.26
	Z	0.00	0.00	0.00	0.95	99.05
	D	0.00	0.00	0.01	0.55	99.44

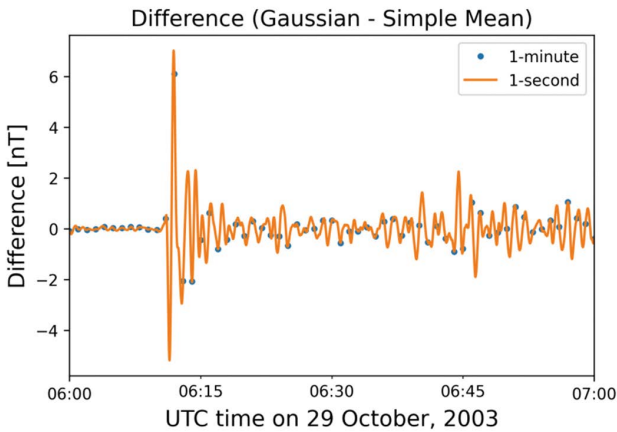


図7 2003年10月29日の ssc 発生前後のガウシアン毎秒値と単純毎秒値の差(橙), 及び正分における毎分値の差(青).

アン毎秒値と単純毎秒値の差には, 周期1分前後の卓越周期が見て取れるが, これは同帯域で最大となるゲインの差による(図3). ガウシアンフィルタに比べて単純平均の方がステップ状の変化に対する平滑化の効果が大きく, 地磁気現象の中でも特に ssc のような急峻な変化に対してはその効果の差が如実に現れやすい. ただし, ハロウィン・ストーム級の急変化現象の発生頻度は低いので, ガウシアンフィルタへの移行を阻む程の懸念にはならないだろう. そもそも毎分値は, 急変化現象の諸元の読み取り等の詳細な解析に用いられるものでもない. むしろ, 現象の空間分布の解析では異なる観測所からのデータを統合して使用することから, インターマグネットに代表されるような観測網の中では, 採用す

るフィルタは出来るだけ統一すべきだろう.

本調査の結果からは, 単純平均に替えてガウシアンフィルタを積極的に採用するための客観的な優位性は見出されなかった. それどころか, むしろエイリアシングの点では僅差であるがガウシアンフィルタの採用にやや消極的となる結果が示された. しかし, 現行の単純平均を維持する限り, 急変化現象の出現時に国際観測網との相違がデータに反映される状態のままである. 国際的に均質なデータを提供するという観点では, 将来的にはガウシアンフィルタの採用に踏み切ることが望ましいだろう. 毎秒値の生成においても, USGS を始めとした主要機関 (GFZ や Geoscience Australia, 私信) の多数が128Hz 等の高サンプリングデータにガウシアンフィルタを(多段で)適用している. 毎分値生成方式を更新するならば, これに併せて現行の毎秒値生成方式も更新し, 確定毎秒値もインターマグネットの定める一般仕様(適切に設計されたローパスフィルタを適用すること, タイムスタンプを0.01秒の確度で正秒とすること, 等 (St-Louis, 2020)) に沿うようにしたい.

参考文献

Green, C.A., Geomagnetic hourly average and minute values from digital data, Edinburgh, UK, British Geological Survey, 20pp. (WM/GM/85/019), <https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/527369/>, 1985

Jankowski, J., and Sucksdorff, C., IAGA Guide for Magnetic Measurements and Observatory Practice, International Association of Geomagnetism and Aeronomy, 1996

Kakioka Magnetic Observatory, Kakioka geomagnetic field 1-second digital data in IAGA-2002 format [dataset], Kakioka Magnetic Observatory Digital Data Service, doi:10.48682/186bd.58000, 2013

Love, J. J., Tsai, V. C., and Gannon, J. L., Averaging and sampling for magnetic-observatory hourly data, *Ann. Geophys.*, 28, 2079-2096, <https://doi.org/10.5194/angeo-28-2079-2010>, 2010

中島新三郎, 岡本明久, KASMMER 毎分値の瞬間・平均値の比較, 地磁気観測所技術報告, 第21巻, 第3,4号, 10-16, 1981

大川隆志, 海東恵美, 地磁気1分値算出方法について(+おまけでγpについて), 地磁気観測所所内セミナー資料, 2020

St-Louis, B., INTERMAGNET Operations Committee, & INTERMAGNET Executive Council, INTERMAGNET Technical Reference Manual, Version 5.0.0., Potsdam: GFZ Data Services, 2020

山崎明, 三島稔明, 柿岡, 鹿屋, 女満別の高感度フラックスゲート磁力計の周波数特性, 地磁気観測所テクニカルレポート, 第10巻, 第1号, 9-16, 2013

Geomagnetic 1-minute values produced by applying the Gaussian filter

by

Seiki ASARI, Akiko KAMIYA and Eiji HIROTA

Kakioka Magnetic Observatory

Received 9 March 2023; accepted 14 March 2023; published 31 March 2023

Abstract

Since Kakioka Magnetic Observatory initiated digital recording of the geomagnetic 1-second values in 1983, the geomagnetic 1-minute values have been calculated by means of simple average of sixty 1-second values. Presently most of the major magnetic observatories in the world adopt the Gaussian filter recommended by INTERMAGNET to produce their 1-minute values. In prospect of possibly conforming to the international standard method, we examine differences between the properties of the 1-minute values derived by the two methods. While the simple average and Gaussian filter are similar in their general performances as low-pass filters, the gain of the former is noticeably smaller in the period band around 1 minute. According to the frequency analysis of 1-minute values of each XYZ component derived from the Kakioka 1-second values during disturbance times, the aliasing due to the simple average appears slightly smaller, implying that the Gaussian filter has no advantage in terms of anti-aliasing. The discrepancies between the 1-minute values for the two methods can reach several nT when extreme phenomena such as ssc take place. Nevertheless, these cases are so seldom that the discrepancy is less than 0.3 nT for over 99.9% of the time even during the solar maximum. No significant discontinuities should be yielded in the data quality by changing the methods. It would rather be reasonable to use a Gaussian filter from the viewpoint of data homogeneity in the international observation network.