

# 地磁気世界資料解析センター News

## INDEX

1. 新着地磁気データ
2. Dst 指数と ASY/SYM 指数
3. 2024 年 5 月 10 – 14 日の磁気嵐中の指数データについて
4. デジタル画像記録式ペットボトル磁力計による磁気的低緯度での偏角微小変動観測
5. 2023 年の kp 指数図表

## 1. 新着地磁気データ

前回ニュース (No.190、2024 年第 1 号) 以降入手、または、当センターで入力したデータのうち、オンラインデータ以外の主なものは以下のとおりです。

オンライン利用データの詳細は (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/catmap/index-j.html>) を、観測所名の省略記号等については、観測所カタログ (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/catmap/obs-j.html>) をご参照ください。

また、先週の新着オンライン利用可データは、(<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/onnew/onnew-j.html>) でご覧になれば、ほぼ 2 ヶ月前までさかのぼることもできます。

## 2. Dst 指数と ASY/SYM 指数

2023 年 7 月～12 月の Dst 指数暫定値 ([https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\\_provisional/index-j.html](https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/index-j.html)) を算出しました。また、2024 年 3 月～2024 年 6 月の ASY/SYM 指数を算出し、ホームページに載せました。(<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/index-j.html>) 2024 年 5 月の AE と Dst 暫定値指数については次章に記します。

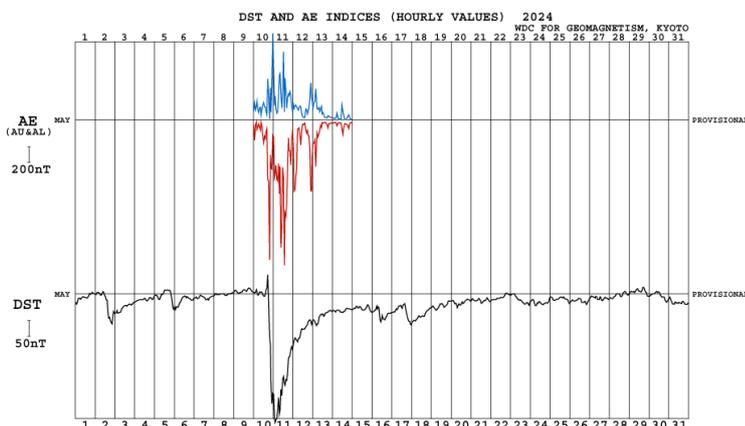
## 3. 2024 年 5 月 10–14 日の磁気嵐中の指数データについて

2024 年 5 月 10–14 日に発生した大規模磁気嵐期間の指数データに関して、多くのリクエスト頂いております。本センターでは、科学解析、論文等に使用可能な暫定値指数をこの期間に関して優先的に算出を行いました。AE、Dst 指数については 5 月の国際 5 日静音日が未発表のため、ベースライン・静音時日変動が前月 (4 月) のデータに基づいているため、将来的に更新されることにご留意ください。

各データの使える期間は以下のようになっています。

AE 指数 : 2024 年 5 月 10–14 日

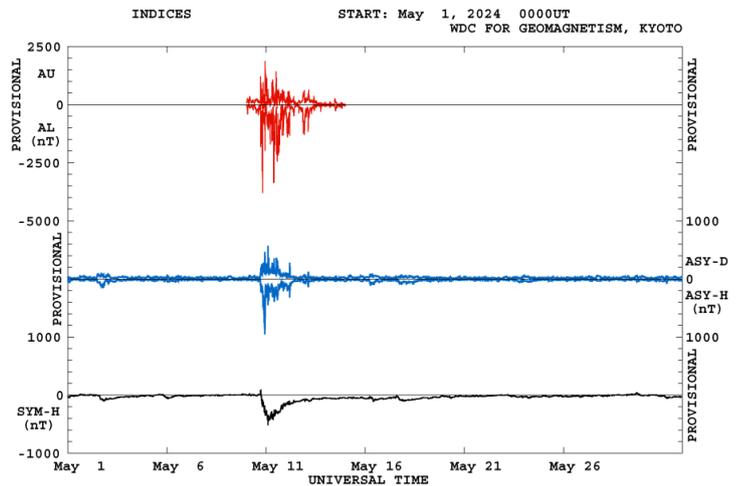
Dst 指数 : 2024 年 5 月 1–31 日



ASY/SYM 指数 : 2024 月 5 月 1-31 日

AE 指数、Dst 指数は [https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/ae\\_provisional/202405/index.html](https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/ae_provisional/202405/index.html) および [https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\\_provisional/202405/index.html](https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/202405/index.html) からご利用いただけます。また、いずれの指数もオンラインプロット・データ出力のページからも利用できます (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstae/index.html>、<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/index.html>)。

論文等に使用される場合は、Rules of the load (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/cresample.html>) に従い、データ DOI 引用をよろしくお願いいたします。



#### 4. デジタル画像記録式ペットボトル磁力計による磁気的低緯度での偏角微小変動観測 Observation of Declination Minute Fluctuations at Magnetically Low Latitudes with a Digital Image-Recording Soda Bottle Magnetometer (English version of this article is here)

現代の地磁気観測で用いられるセンサーは、fluxgate センサーなどといった電子機器が主流だが、磁力計のセンサーとしてもっとも古くから用いられているのは方位磁針である。地磁気が短時間的に微小変動していることは G. グラハム (1675-1751、英国) が、30 センチ程度の長い磁針を持ったコンパスの先端を虫眼鏡で拡大して観察することによりみだされた。この磁針の向きを拡大観察するという観測原理は、光学記録式吊り下げ型磁力計として長きにわたり用いられた (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/film/magnetoexp-j.html>)。

光学記録式吊り下げ型磁力計自体の構造は単純であり、教育目的の磁気センサーとして手作りのものが考案されてきた。もっとも有名なのが、1998 年に NASA IMAGE satellite project で考案された教材「Soda Bottle Magnetometer」である (<https://lasp.colorado.edu/wp-content/uploads/2011/08/magnetometer.pdf>) (以下 SBM と略す)。SBM は炭酸飲料の円筒型のペットボトルを切り、その中に鏡のついた磁石を吊り下げる構造をしている。鏡に高輝度電灯やレーザーをあて、反射した光を数メートル離れた場所にあてることで、磁石の角度の微小な変動を拡大表示する。光学記録式吊り下げ型磁力計で用いられる感光紙やそれを回転してスライドさせる装置は一般に手に入るものではないので、投影点付近に目盛りを貼り付け、人の目でそれを読み取り記録する。しかし、オーロラ帯直下のような非常に磁場変動の大きい地域を除けば、このやり方で自然の磁場変動を観測するのは難しいと思われる。事実、実際にこの実験方法で記録されたデータはほとんど公開されておらず、唯一データを示している Odenwald (2023) では、地磁気が非常にあれたときの中緯度で日変動が数時間の時間分解能で捉えられているようにみえるのにとどまる。また Odenwald (2023) では  $K_p < 4$  以下のさほど荒れてない状況では SBM では磁場変動が弱すぎて観測が難しいとある。では、京都のような磁気的低緯度における静音日の日変動や、より短時間で振幅の小さいオーロラ嵐の湾型変動といった現象を SBM で観測するのは難しいのだろうか。

SBM のセンサー自体は、糸が十分に細く磁石が自由に動ける状態であれば、ほぼ正確に磁場に平行に向くはずであり、原理的にはこの角度の変化をより細かく捉えることでその分だけ分解能 (感度) を高められるはずである。従来の実験の仕方では、読み取り誤差、人が出入りすることによるノイズ、高頻度や早朝・深夜の記録の困難といった問題があった。そこで、私は SBM に Web カメラを使った記録 (AD 変換)、プログラムによるレーザー光中心位置の推定、およびこれらの自動定期実行といったデータ記録システムを組み合わせることで、データの連続記録と感度の大幅な向上

を実現した。なお、このようなシステムを考えるきっかけとなったのは後期に新たに担当することになった実験の授業の題材のためであり、このシステムは一般的に手に入りやすく安価なものを使い、精度を要する工作が不要という条件のもとで考え出された。

図1にシステムの外観を示す。

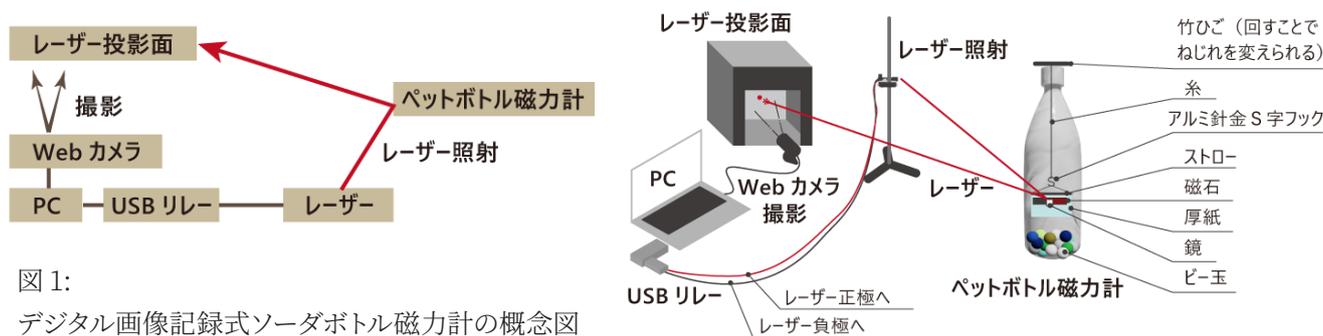


図1: デジタル画像記録式ソーダボトル磁力計の概念図

SBMのセンサーの作り自体はNASA IMAGE projectのものほとんど同じであるが、アルミ針金を曲げた極小のフックで磁石部と糸部でつなぐことで、工作の容易性を高め、また糸と磁石のみを交換するといったことが出来るようになっている。また感度を損なわないため、釣り糸の中でも最も細い(直径~0.03 mm)鮎釣り用の糸を使用した。

レーザーの電源供給はPCのUSBから行い、USBリレーを挟むことでレーザーのon/offをPCで制御する。レーザーをつけっぱなしにするとレーザーの摩耗が早まってしまうからである。

投影面は本棚や箱の奥に紙を貼り付け、その周りは黒い紙で覆い周りの光を入りにくくすることでレーザー光の相対的な輝度を高める。Webカメラは720pなど画素数がそこまで高くないものでも十分である。ビニルテープはあらかじめ幅をはかり、1 pixelの長さを求めるのに用いる(今回0.067mm/pixel)。ピントを合いやすくする役目もある。今回の実験ではセンサーと投影面の距離は約3.6mであり、Odenwald (2023)の実験の半分以下であるが、それによる感度低下はデジタル画像化とデータ処理で十分すぎるほど補われる。(その後の実験でさらにこの半分程度でも十分な感度が得られている)。

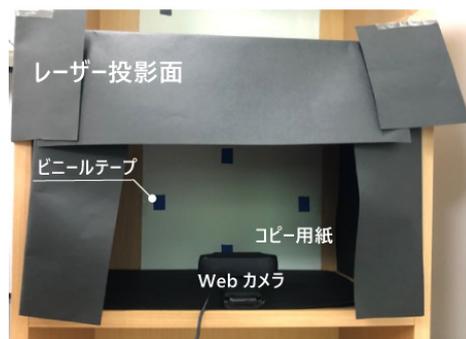


図2: 投影面の写真

データの記録は5分おきに4枚/sで96枚レーザー点を含む画像を撮影し、画像をpythonで読み込み各画像に対してRGB値のレッドの値を抜き出し、各画像に対して水平向きのピークのピクセル位置を推定する。磁石は磁力と慣性の働きで単振動するため、これを正弦波と1次関数の和のモデルで最小2乗フィッティングする。その定数項にあたる推定量をその時のレーザー光位置 [pixel] とする。すなわちデータは5分値であり(1日720サンプル)、人力では1日と継続が無理な頻度である。これらの制御や計算にはshellとpythonを用いた。このシステムも光学記録方式の一種ではあるが、デジタル画像記録方式とよぶことにする。

計測は自室(理学研究科1号館5階)で行った。例として2024/3/22-25に記録されたデータを図3にしめす。

図3の上のパネルの青線が自室でデジタル画像記録式SBMで観測された偏角変動である。地磁気の変動と思われるものが妥当であるかの判断材料として、気象庁柿岡観測所の磁場データの偏角成分を平均値を引いた変動分にしめす。驚くべきことに、両者の変動は非常に良く一致しており、磁気圏や電離圏由来の電流の作る磁場変動をとらえられているようである(ただし、場所が多少なりとも違うため同じになる必要はない)。正直あまりに作りが素人的で装置の加工も雑なので、あまりよい結果を期待しておらず、この一致を見たときは大いに興奮した。下のパネルには

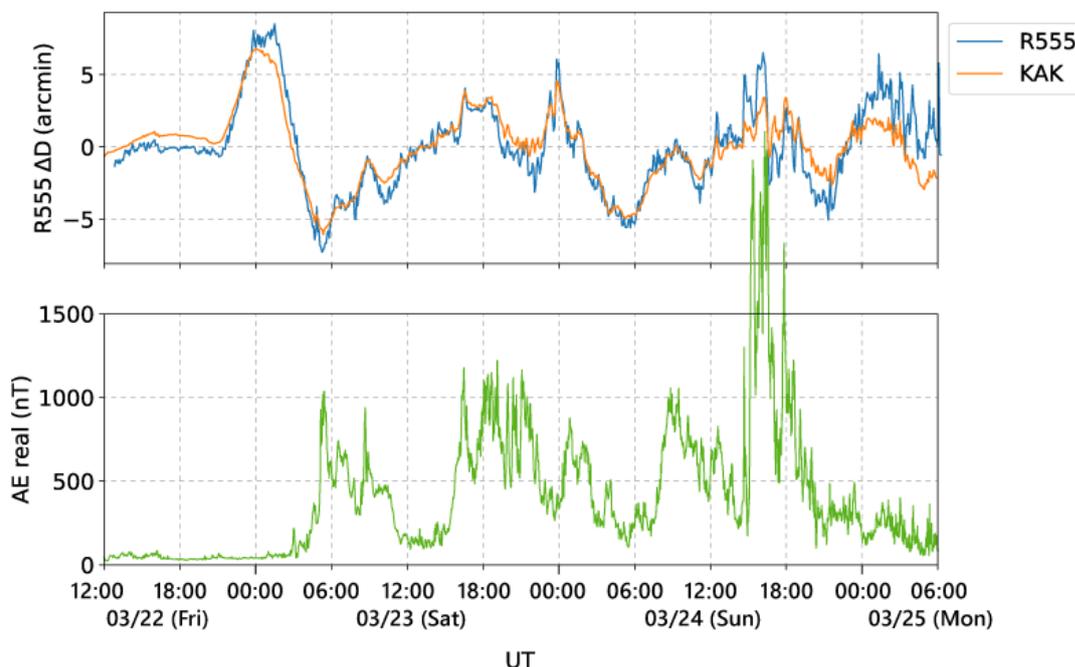


図3: 3/22 12:00-3/25 6:00 UTにおける観測例。上のパネルは自室(青)と柿岡(オレンジ)における偏角変動。下のパネルはAE指数の速報値。

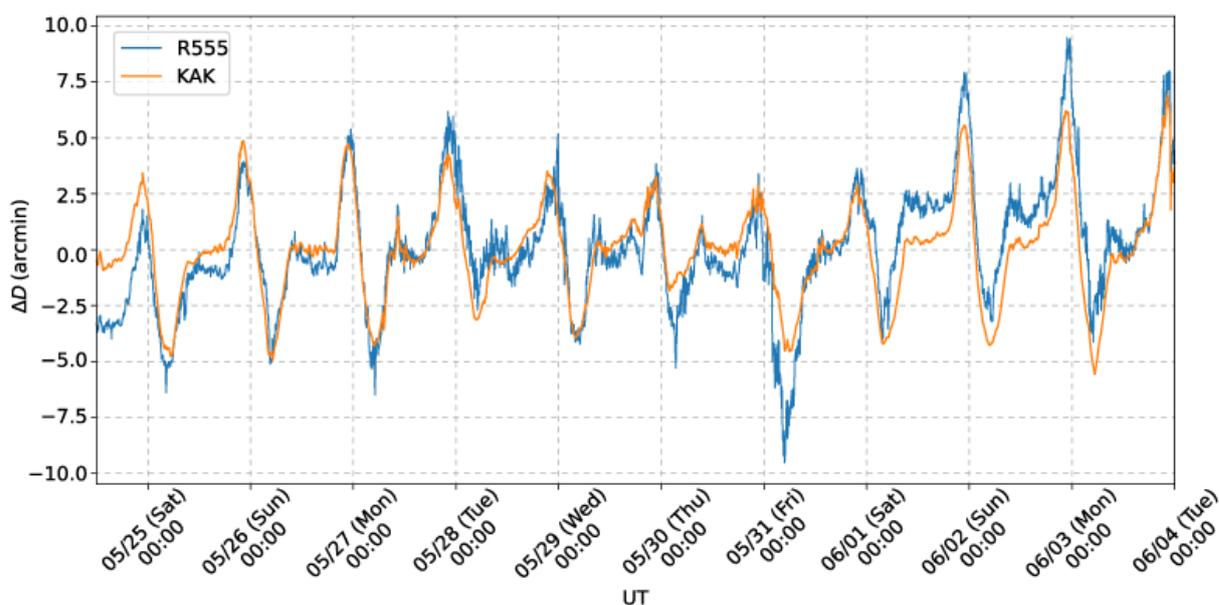


図4: 比較的静音なとき(2024/05/24 12:00UT-2024/06/04 00:00UT)における自室(青)と柿岡(オレンジ)における偏角変動。

極域の磁場から計算されたオーロラ活動度指標であるAEを示すが、夜側の変動がこのAEと対応があり、オーロラ嵐時のくさび形電流系(e.g., McPherron et al. 1973)によって見られる地磁気湾型変動が捉えられている。これは、十分な感度があることはもちろん、記録頻度が数分レベルであることによって捉えることができたといえる。

前の例は比較的地磁氣的に荒れているときだが、静穏なときではどうだろうか。図4は主に学会(JpGU)期間中に計測した11日分の計測結果である。時折ベースラインが変化する人工的な変動があるが、柿岡でも見られるSq電流系の南北電流成分に対応した両極型の日周期変動がはっきりと見られている。従って、このデジタル画像記録方式では約5 arcmin程度しかない低緯度の日変動磁場を十分に捉えることができる。

何故ここまでうまくいくのか考えてみた。計測場所は町中の大きな建物内で周囲は頻繁に人が出入りしており、非常にノイズ環境は悪いはずだが、不規則なノイズが小さいのは、磁石の慣性とデータ処理の恩恵であると考えられる。磁石の振動周期は約4秒であるためこれより大幅に短い周期の変動にはほとんど反応しないためローパスがかかりノイズが抑えられたと考えられる。また、仮に各画像から推定した中心に10 pixel(1.6mm 相当)の標準偏差を持つ誤差が含まれていたとしても、パラメタ推定量の共分散から計算されるレーザー位置誤差は $\sim 1 \text{ pixel} = 0.077 \text{ arcmin}$ に抑えられる。これは8mの距離を取って、2mmの読み取り誤差を仮定したOdenwald (2023)の0.85 arcminの1/10である。もっとも、各画像からのピーク推定も機械的に行っているため誤差1.6mmよりは大幅に小さいと思われるため実際の統計誤差は更に少ないだろう。機材の加工が雑であったり、普通のテーブルなどを台にしても問題がさほどないのは、結局のところ磁石が吊られて浮いているためと思われる。装置や台や建物が熱膨張などで多少傾いたり伸び縮みしても、磁石が方位角方向に角度を変えたときの拡大された光の点の移動に比べればほとんどわずかにしか変わらない(縦方向の伸縮や仰角方向の傾きはそもそも光の点の上下動にしか寄与しない)。実際、磁石を単に固定された鏡に変えたときに光の点の水平方向変化を計測すると1 arcminにも満たないほどの日変化しかしなかった。

また温度に対する安定性も十分にすぐれており、日変動を歪めるような温度ドリフトは見受けられなかったお陰でSqの変動もきれいに取れている。実は、観測の初期でかなり大きな温度ドリフトが観測されたのだが、SBMのセンサーの位置を窓近くから部屋の真ん中にかえると温度ドリフトは見られなくなった。ところが、温度計で測った2点での温度変化の大きさはさほど変わらず、また暖房をつけて温度変化させてもさほど反応しなかったのも、これは装置由来とは違いそうである。代わりに、非常に温度変化の激しい外に面した建物外壁中の鉄筋などの磁性体が、温度に寄ってその磁性を変化させたことで実際にセンサー位置での磁場が変化したことによるのではないかと考えている。

次の目標はH成分を磁場(水平磁場強度)の変化を計測することである。H成分変化を吊り下げ型磁力計で測るには糸をねじるなどして、磁石を磁場に垂直に向けた状態でその角度変化を測る。しかし、磁石を安定的に磁場に垂直に向けるというのが案外むずかしく、いろいろな方法を試してみたがことごとく失敗している。うまくいく方法がみつかったらまたどこかに書きたいと思う。

先に書いたように、この取り組みはもともと後期に予定している学部1年生向けの実験の授業のためのかるい予備実験のはずだった。しかし、思いの外自分自身にとって面白く、はまってしまい、ずいぶんとこれについて考えることになってしまった。携帯電話で自室の磁場をリアルタイムモニタリング出来るようにしているため、携帯を触る時間も長くなってしまった。この授業を受けることになる学生達にもこの面白さが分かってもらえたらうれしいなと思う。

出典:

Graham, George, 1724IV. An account of observations made of the variation of the horizontal needle at London, in the latter part of the year 1772, and beginning of 1723Phil. Trans. R. Soc.3396-107

Odenwald, Sten (2023), Exploring Space Weather with DIY Magnetometers: How to build and use simple magnetometers to study geomagnetic storms, Independently published, ISBN-13 : 979-8393399627.

McPherron, R. L., Parks, G. K., Colburn, D. S., & Montgomery, M. D.(1973) Satellite studies of magnetospheric substorms on August 15, 1968: 2. Solar wind and outer magnetosphere. United States. <https://doi.org/10.1029/JA078i016p03054>

※この章の英訳版は下記からダウンロードできる。

[https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/news/2407\\_4\\_Petbottle\\_magnetometer\\_en.pdf](https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/news/2407_4_Petbottle_magnetometer_en.pdf)

(今城 峻)

## 5. 2023 年の kp 指数図表

