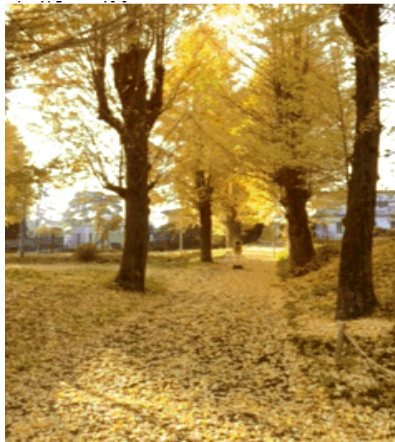


地磁気観測所ニュース

No. 76

令和3年(2021年)12月



目次:

○論文紹介	1
・感光印画紙記録のデジタル化による地磁気毎分値データの抽出	
○研究発表	2
・地磁気絶対観測の新手法の精度評価	
○南極だより	3
○コラム	4
・地磁気観測の歴史 番外編 ~すごいぞ ガウス!~	

論文紹介

Digitization of Bromide Paper Records to Extract One-Minute Geomagnetic Data (訳: 感光印画紙記録のデジタル化による地磁気毎分値データの抽出)

増子徳道

紹介論文書誌情報:

Mashiko, N., Yamamoto, T., Akutagawa, M. and Minamoto, Y.
Digitization of Bromide Paper Records to Extract One-Minute Geomagnetic Data.
Data Science Journal, 12, pp.WDS254-WDS257. 2013.
DOI: 10.2481/dsj.WDS-046

本記事では、2011年に開催されたThe First ICSU World Data System Conference (第1回国際科学会議世界科学データシステム会議)にて筆者が発表し、その後Data Science Journal誌に掲載された論文(原文は英語)を紹介します。

地磁気の定常観測は日本では1880年代に東京の赤坂で始まり、1913年に現在の地磁気観測所(茨城県石岡市柿岡)に移転してから現在に至るまで100年を超える歴史があります。しかしデジタル収録が開始される以前は、地磁気の変化を感光印画紙として記録するアナログ記録が唯一のデータ収録媒体でした(柿岡では1976年からデジタル収録が開始)。本研究ではこれらの印画紙記録を正確に読み取り、応用範囲が広く利用価値が高いデジタルデータへと変換させるための手法開発を行いました。

デジタル収録化以前の地磁気変化観測は、吊り磁石式変化計(糸で吊り下げられた磁石と反射鏡および光源のセットで構成された磁力計)を用いて地磁気の向きと大きさを検出し、その時間変化を感光印画紙に記録していました。地磁気の変化は、縦20cm×横50cmほどの印画紙に折れ線グラフ状の線として記録され(図1)、現在も貴重な記録として保管されています。

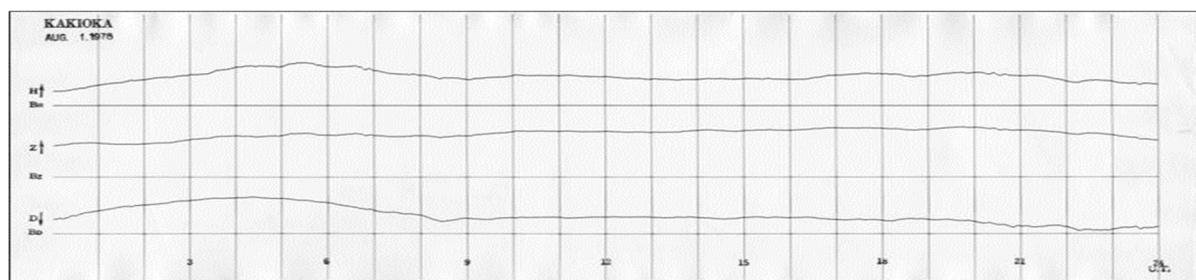


図1: 1日分の地磁気印画紙記録(1978年8月1日の柿岡H, Z, D成分)

横軸は時間で、20mm間隔と定められた時刻線（毎時0分を示す縦線）が24本記録されています。縦軸は地磁気変化の大きさと、上から順にH（水平）成分、Z（鉛直）成分、D（偏角）成分の変化の大きさがベースライン（横直線）からの高さで表現されています。

デジタル化以前は、日々の観測者がこの印画紙記録から物差しで読み取って算出した毎時値が唯一の数値データでしたが、この地磁気毎時値データはそのデータ期間の長さや安定性から、太陽や地球内部の長期的な活動を把握するための貴重な資料として現在でも世界中の研究者に利用されています。

一方、太陽フレアなどの激しい太陽活動に伴って生じる短周期の地磁気変動については、毎時値ではその変化の様子を詳細に捉えることができませんでした。そこで、本研究では、過去の印画紙記録を高精度で高分解能のデジタルデータに変換する手法を開発し、従来の60倍の時間分解能である毎分値データを作成することで過去の地磁気変化を詳細に再現しました。

開発したデジタルデータ化手法は、大まかに以下の手順で構成されています。

1. 印画紙記録をデジタル画像に変換

高精度スキャナを用いて、印画紙記録を1画素が印画紙記録上の0.04mm、観測時間の7.5秒および地磁気変化の0.1nTにそれぞれ相当する高解像度のデジタル画像に変換します。

2. デジタル画像から記録線を抽出し時系列データに変換

新たに開発したアルゴリズムにより、デジタル画像上に存在する、時刻線、ベースライン、HZD各成分の地磁気変化線を、自動的にそれ以外の画素から分離します。（図2）。認識した記録線は、位置座標値として数値化した上、記録線間の位置から時刻情報を復元し、約7.5秒間隔の時系列データに変換します。

3. 時系列データを地磁気の数値に変換

時系列データに、変化計の感度データや基線値データを適用し、約7.5秒間隔の地磁気時系列データに変換し、更に平均処理を行って毎分値データを作成します。

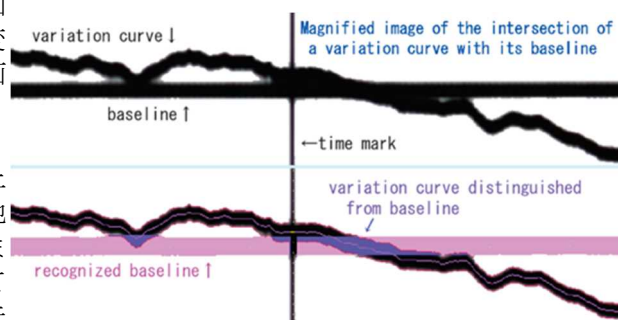


図2：ベースラインとZ成分を自動的に分離した例
上：元の印画紙記録
下：自動認識箇所を色分けして表示

本手法により印画紙記録から得られた地磁気毎分値が、どの程度観測値を再現しているかについての検証は、吊り磁石式変化計とデジタル磁力計による観測が並行して行われていた期間の記録を用いました。並行観測期間である1984年の比較例では、地磁気の変動幅が最大で180nT近くもありますが、印画紙記録からの再現結果と並行デジタル磁力計との差はそのほとんどが±0.2nTに収まっており、並行デジタル磁力計の毎分値が0.1nT単位であることを踏まえても非常に高精度の変換が成功したといえます（図3、4）。

本手法では、条件の良い印画紙記録であれば十分に高精度時系列データに変換できます。激しい地磁気現象が観測された際や記録がかすれているなどの認識が難しい印画紙記録についても変換できるよう、引き続き開発を進めていきます。

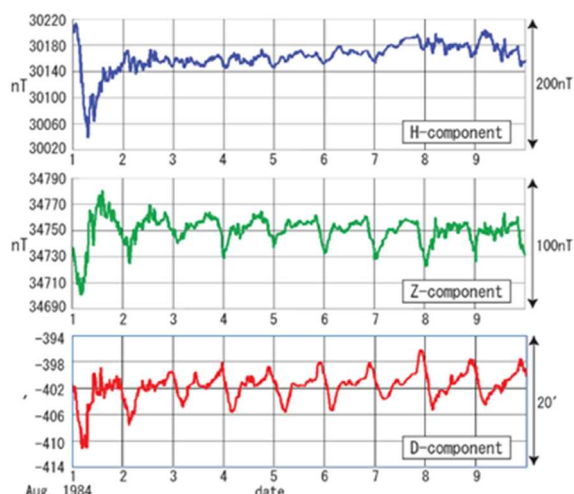


図3：印画紙記録から再現した地磁気変化HZD成分（1984年8月1日～9日）

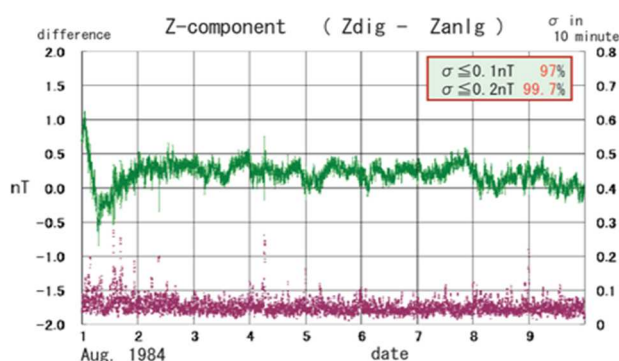


図4：印画紙記録から再現した値と同時刻のデジタル磁力計の値との差（1984年8月1日～9日）
緑色線：再現値とデジタル磁力計との差（左軸）
紫色点：差の10分間標準偏差（右軸）

日本地球惑星科学連合2021年大会（令和3年6月3日、オンライン発表）
電気伝導度・地殻活動電磁気学セッション
「地磁気絶対観測の新手法の精度評価」

平原秀行、仰木淳平、海東恵美、浅利晴紀

地磁気絶対観測とは、地磁気ベクトル3成分の絶対値を得るための観測であり、特定の地点と時刻に対する全磁力（F）・偏角（D）・伏角（I）の測定から構成されます。Fの測定には、プロトン磁力計などのスカラー磁力計が、DとIの測定には、DIメータと呼ばれる磁気儀が用いられます。DとIの測定は手動で実施され、測定の精度（0.1分角以下）を担保するため観測者には一定の測量技術が要求されます。

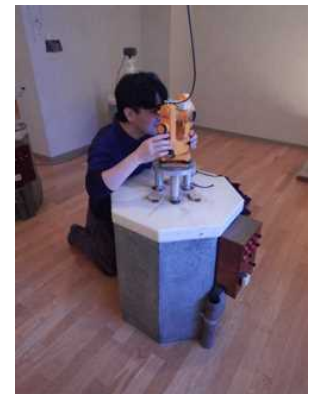
現在、世界の主要な地磁気定常観測施設では、独ツァイス社製の非磁性経緯儀THE0に1軸フラックスゲート磁力計を搭載したDIメータが採用されています。DまたはIの決定には、それらに直交する複数の指定方位（ゼロ磁場方位）の測定値が用いられます。

これまで国内に普及している手法である「ゼロ磁場方式」には、磁力計軸をゼロ磁場方位（磁力計出力値が0.0nTとなる方位）に厳密に合わせる操作が必要です。その際、微動ノブによる調整には熟練を要するため、例えば、経験の浅い観測者が野外の環境で限られた時間内に実施する必要がある状況では、精度を保った観測に困難を伴う場合もありました。

これに対し、近年では「弱磁場方式」と呼ばれる手法が世界的に主流になりつつあります。この方式では、ゼロ磁場方位の近傍に適当に向けた磁力計軸の方位と、その時の磁力計の出力値から、ゼロ磁場方位を算出します。磁力計軸をゼロ磁場方位に正確に合致させる繊細な微動ノブの操作が無いと、観測者の心身の負担軽減、初心者への習得の速さのほか、観測者の非磁性の緩和など、省力化の上での複数の利点が期待されます。

本講演では、2020年4月から2021年1月までの10か月間に渡り実施された弱磁場方式による地磁気絶対観測の精度評価試験の結果を報告しました。精度評価試験は、DIメータを用いた弱磁場方式によるDとIの測定を行い、地磁気観測所の基準器であるDI-72角度測定器との差（器差）を測定しました。その結果、DI-72角度測定器との器差は0.1分角以内に収まり、当所職員が定期的に行っているDIメータによるゼロ磁場方式との器差は変わらないことが確かめられました。また、観測時間は室内の観測環境の良い場所でも弱磁場方式を用いることでおおむね短縮されることがわかりました。このことは、野外など環境的・時間的に制限がある場合では、弱磁場方式は測定時間を大幅に短縮できることが期待されます。

今後は、野外で絶対観測を行う父島地磁気観測点での運用を目指したいと考えています。



DIメータによる絶対観測
上：女満別観測施設
下：父島地磁気観測点

南極だより

第62次越冬隊として昭和基地に到着してから早いもので1年が経とうとしています。今回は、昭和基地到着後の夏作業と越冬生活についてお話しします。

南極といえば、1年中、雪と氷に包まれた極寒の地という印象が強いと思いますが、実は南極にも夏があります。南極の夏期間は12月～2月頃で、昭和基地周辺は雪が溶け、地面が露出します。この夏期間に前次隊からの観測業務引き継ぎ、昭和基地周辺での建築等の力仕事や野外作業を行いました。その他にも、ヘリコプターに乗って昭和基地から80km以上離れた大陸沿岸部（スカーレン、インホブデ）と南極大陸の内陸（観測点H68）に設置してある無人磁力計の保守点検に行きました。無人磁力計は、太陽光発電を動力源にして地球の磁場を測る装置です。スカーレンの夏期間は雪も解け、露岩もあちこちに見えました。少し歩けばコケ類等の植物も存在し、南極大陸ではめずらしく生命にあふれた場所です。



スカーレン

一方で、観測点H68は標高約1000mの内陸にあります。標高が高いため風は強く、気温も低く、あたり一面雪に覆われており、夏期間であっても白と青の2色だけの綺麗な世界でした。磁力計は雪の中に埋まっており、汗をかきつつ黙々と掘り出し作業を行いました。いずれも日帰りの作業でしたが、南極の自然の美しさと厳しさを感じることができた素晴らしいひとときでした。



観測点H68



基本観測棟に向かう隊員

夏期間が終わると前次隊や夏隊の隊員はしらせに乗って帰って行きます。いよいよ越冬生活の始まりです。越冬生活は、日本から持ち込まれた物資を計画的に使用しながら31人の隊員で、約1年間過酷な環境を過ごします。昭和基地周辺は低気圧がよく通過するため、度々ブリザードに襲われます。ブリザードとは一般的に地吹雪を伴う強風のことで、昭和基地では視程1km未満、風速10m/s以上、継続時間6時間以上のものをブリザードとしています。62次隊では、3月中旬から9月下旬にかけて20回を超えるブリザードに見舞われました。ブリザードの最中は雪で視界が悪くなり、ひどいときには自分の手も見えなくなります。強風と視界不良で自分の位置や進んでいる方向が分からなくなるため、短い距離の移動でも建物間に張ってあるライフロープを伝い、2名以上で移動します。特に強いブリザードの時は、外出禁止となります。そしてブリザードがおさまると建物の風下側に溜まった雪を手分けして除雪します。限られた人手・重機での除雪作業は重労働です。

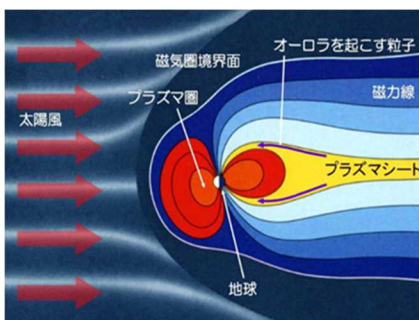
越冬中の私が担当する業務のひとつにオーロラの観測があります。オーロラは太陽から放出された粒子が地球の磁場に沿って降り注ぎ、地球の大気に高速で衝突することで発生します。そのためオーロラは太陽活動と密接な関係があり、特に活発な太陽活動（磁気嵐）に伴い現れたオーロラは、緑や赤色を発しながら激しく大空を駆け巡ります。過酷な環境の中ですが、このような自然現象には心が癒されます。オーロラ観測はカメラなどの光学的観測機器を用い夜間に行うため、白夜が終わり空が暗くなる2月末に始まり、10月半ばに終わりました。

さて、そろそろ私の越冬生活も終わりが見えてきました。残り少ない貴重な時間を有効に活用して、観測業務を遂行していきたいと思います。

(稲村友臣)



重機による除雪作業



太陽活動とオーロラの関係



昭和基地で観測されたオーロラ

コラム

地磁気観測の歴史 番外編 ～すごいぞ ガウス！～

地磁気観測業務について知っていただくために、地磁気観測所の歴史をコラムとして掲載しています。今回は歴史についてはちょっとお休みし、番外編として地磁気観測に多大な功績を残したガウスについて特集します。少し難しい話も含まれますが、お付き合いいただければ幸いです。

・ガウスってどんな人？

数学や科学にあまり関心のない人でも「ガウス」という名前、もしくは言葉はどこかで聞いたことがあるのではないのでしょうか？Wikipediaに「ガウスにちなんで名づけられたものの一覧」なるページがあるのですが、そこには実に36個もの言葉が並んでいます。それだけ後世に多大な影響を残した人物だと言え、19世紀最大の数学者の一人、または18世紀のオイラーと並んで数学界の二大巨人の一人などと呼ばれることもあります。

ドイツに生まれたガウス（カール・フリードリヒ・ガウス、1777年4月30日 - 1855年2月23日）は、幼いころから並外れた神童っぷりを発揮していたといい、7歳のころの算数の授業で出された「1から100までの数字すべてを足せ」という問題に対してわずか数秒で「5050」の答えを導き出したといわれています。彼は「 $1+100=101$ 、 $2+99=101$ 、 \dots 、 $50+51=101$ で、101の集まりが50個できるため、 $101 \times 50 = 5050$ 」と解いたというのですが、この逸話が事実であれば、高校数学で学習する「等差数列の和」の概念にわずか7歳にして独自に到達したことになります（図1）。おそるべし！

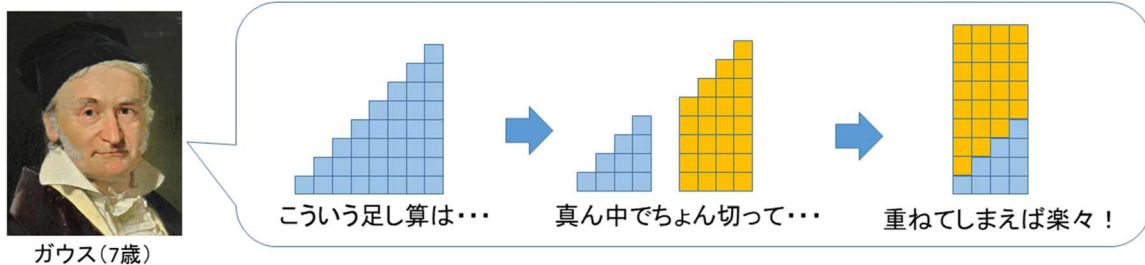


図1：等差数列の和の概念

そんなガウスの残した功績は数学のみにとどまらず、物理学や天文学など幅広い分野にわたります（前回コラムで紹介した、ガウスの設立した地磁気観測所がゲッティンゲン大学であったのも、ガウス自身が1807年からゲッティンゲン大学の天文台長を務めていたからでもあります）。しかし、彼は研究成果を発表することにあまり積極的ではなく、日記や手紙にしたためられただけで、彼の死後ようやく世に知られるようになった研究成果も数多くあったようです。彼が発表に消極的だった理由は、「美しい研究成果を得ただけで満足した」とか、「完璧主義者で完全に納得するものしか発表しなかった」とか、「誤解や無理解による無駄な論争を嫌った」などと言われています。真偽のほどは定かではありませんが、どれも天才ならではの考え方に思えますね。

・ガウスの功績・その1：地磁気を測る

前回のコラムで、ドイツの探検家フンボルトが「方位磁針に振動を与えると、その振動の周期が場所によって違う」ことを発見したことをご紹介しました。さて、これはいったい何を意味するのか考えてみましょう。地磁気の大きさを H 、磁石の強さ（磁気モーメント）を M 、磁石の重さや形から決まる定数（慣性モーメント）を I とすると、その磁石の振動する周期 p は $p = 2\pi\sqrt{I/(MH)}$ と表せます。「数式が苦手」という人のために日本語に訳してみると、「地磁気が強くなると振動する周期が短くなるし、磁石が強くなっても周期が短くなる、一方で磁石が重くなると周期が長くなる」という意味になります。フンボルトはおそらく探検中は同じ方位磁針、すなわち「強さも重さも同じ磁石」を用いて観測を行ったものと推測されます。その状況で「振動の周期が場所によって違う」ということは「地磁気の強さが場所によって異なる」ことを意味します。フンボルトはこの発見をもとに、世界中で地磁気を観測する意義を訴えました。


しかし、実際に世界中で観測を行うには越えなければいけないハードルがありました。それは、「フンボルトと同じ方法で地磁気の強さを比べるには、世界中で同じ強さの磁石を使わなければならない」という問題です。そもそも磁石の強さを正確に測ることが困難な時代、全く同じ強さの磁石を作って世界中に配る、というのは（少なくとも19世紀当時としては）不可能だったでしょう。しかし、この問題を解決したのが我らがガウスでした（図2）。

ガウスはフンボルトの方法（以後は「振動測定」と呼ぶことにします）に加えて「偏向測定」という別の測定を組み合わせることで、磁石の強さが分からなくても地磁気の強さを測定できる方法を編み出しました。偏向測定には振動測定で使った磁石と、それとは別にもうひとつの磁石を使用します。


はじめに、もうひとつの磁石を方位磁針と同じようにつるします。この磁石が向いている方向が磁場の方向です。そして、振動測定に使った磁石を、地磁気の方とちょうど垂直になるようにセットします。すると、吊るされたもうひとつの磁石は、振動測定に使った磁石が発する磁気の影響を受けて向きが変わります。その角度 α をまた数式で表すと、 r を2つの磁石間の距離として、 $\tan\alpha = 2M/(Hr^3)$ となります（ \tan は三角関数のタンジェント）。これも日本語に訳すと、「磁石が強いほど角度が大きくなる、一方で地磁気が強いほど、磁石間の距離が離れるほど角度が小さくなる」という意味になります。

さて、数学や物理に詳しい方は、この2つの数式を見てピンときたかもしれません。これらの数式を組み合わせると、地磁気の強さをこのように表すことができます。 $H = 2\pi/p\sqrt{2I/(r^3\tan\alpha)}$ もう日本語に訳してもついていけないかもしれません。でも、この数式の重要なところは、測定が難しい磁石の強さ M はもはや現れず、 p, r, I, α という測定が可能なもののみで表せている点です。これはつまり、「世界中でばらばらな強さの磁石を使って測定しても、きちんと地磁気の大きさを測れる」ことを意味します。さらに「何年か経って、もし磁石の強さが変わってしまったら、観測に誤差が出ない」ことも意味します。こうしてガウスのおかげで「世界規模で長期間」の観測を行う下地が整いました。

ガウスの方法に若干の修正を加えた Gauss・ラモン法は、20世紀中ごろまで世界中の地磁気観測所で採用されていました（もちろん柿岡でもこの方法を用いた観測機器が使用されていました。それらの機器は次回以降のコラムでご紹介します）。また、最後の数式には「地磁気大きさを絶対的な数字で表すことができる」という重要な意味もあります。これは、前回のコラムで述べた「2つの地点で標高の差は分かったとしても、実際の標高は分からない」と同じ状況だったのが、「標高が実際に何mか分かるようになった」ということです。このような Gauss の功績を考えると、磁場の単位が「Gauss」と名づけられたのも当然と言えます。すごいね！ Gauss！



フンボルト




ガウス

磁石の強さ問題、どうにかならんかねえ・・・

2つの独立した方程式が得られる測定をやれば、いけるんじゃない？

えっと・・・、どういうこと？ （この会話はフィクションです）

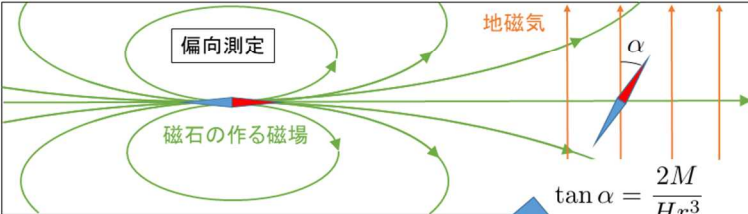
振動測定



$$p = 2\pi \sqrt{\frac{I}{MH}}$$

H: 地磁気 (測りたい)
p: 振動周期 (測れる)
I: 慣性モーメント (測れる)
M: 磁石の強さ (測れない・・・)

偏向測定



磁石の作る磁場

地磁気

$\tan \alpha = \frac{2M}{Hr^3}$

H: 地磁気 (測りたい)
p: 振動周期 (測れる!)
I: 慣性モーメント (測れる!)
r: 磁石同士の距離 (測れる!)
 α : 振れ角度 (測れる!)

H: 地磁気 (測りたい)
r: 磁石同士の距離 (測れる)
 α : 振れ角度 (測れる)
M: 磁石の強さ (測れない・・・)

2式を組み合わせる！

$$H = \frac{2\pi}{p} \sqrt{\frac{2I}{r^3 \tan \alpha}}$$

図2： Gauss の考案した振動観測と偏向観測の組み合わせ

・ Gauss の功績・その2：地磁気を表す

前々回のコラムではハレーが作った世界最初の磁気図をご紹介しました。やはり「観測結果はこうでした」と文章で書かれるよりも地図上に描いてくれる方がずっと理解しやすいですね。しかしこのような磁気図を描くためには、実際には観測を行っていない場所での値をどうにかして推測しないといけません。ハレー自身がどのようにして磁気図を描いたかは定かではありませんが、誰でもできる簡単な方法は「たぶんこうじゃないかな」と直感したように線を引いてしまうことです。もちろんこのようにして描いた図が特徴を正しく捉える可能性はありますが、科学者はやはり、「人の勘」のようなあいまいなものではなく、科学的な根拠に従って描きたいと考えるものです。

では当時の科学者たちは地磁気をどのような科学的根拠に基づき描こうとしたのでしょうか。前々回のコラムでご紹介したように、17世紀のギルバートは地球が大きな磁石であると考えました。18世紀の天文学者マイヤーはこの考えをもとに、地球の中心に磁石があるのではなく、中心から少しずれた位置に磁石があると考え、この磁石が作る磁場として地磁気を表現しようとした。また、Gauss と同時代の天文学者ハンステンは、地球の中に二個の磁石を配置して地磁気を表現しようとした。しかし、どちらの方法も観測結果をうまく説明することができませんでした。

これに対して我々が Gauss は、「ポテンシャル」と「球関数展開」という方法を試みました（図3）。また専門用語が出てきましたね。「ポテンシャル」とはざっくり言うと、重力などの「力」を数学的に取り扱う手法です。Gauss はそれを磁力に応用したわけですね。「球関数展開」もざっくり言うと、地磁気が実際には複雑な分布をしていても、比較的単純な分布の重ね合わせで表現してしまおう、という方法です（フーリエ展開についてご存じの方は、それと似たような方法だと思えばイメージしやすいかもしれません）。この Gauss の試みは大成功し、観測結果をすっきりと説明し、観測を行っていない場所での値の予測も可能になりました。この Gauss の方法は現在でも地磁気を表現する方法として実際に使用されており、「Gauss 係数」の名で知られています。Gauss の行った球関数展開は、物理的には複数の磁石の配置（物理用語では「多重極子」と言います）で作られる磁場の足し合わせに対応しており、実はハンステンが行った方法の拡張版になっているのですが、面白いことに Gauss 自身はそのことに気づいていなかったようです。Gauss ほどの人物がこのことに気づかなかったのは不思議にも思えますが、これは当時の物理学の研究が Gauss に追いついていなかったためだという意見もあります。どちらにしても、Gauss が時代を先取りしていたことは間違いありません。

やっぱり Gauss はすごい！

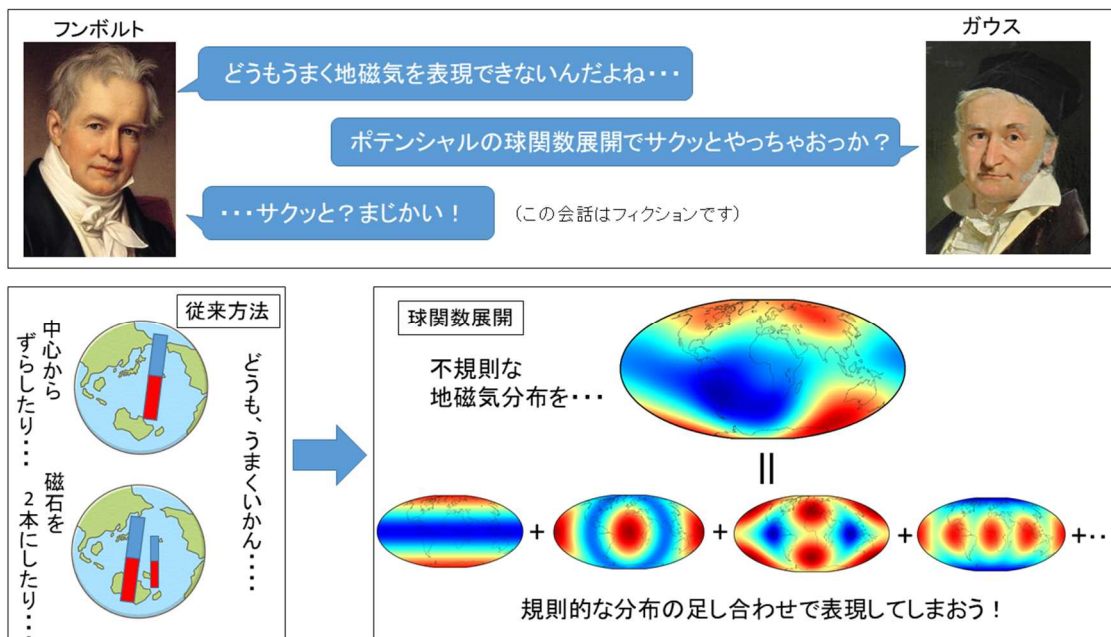


図3：ガウスの考案した地磁気の表現方法

・科学の発展は巨人の肩を借りながら

このようなガウスの功績をもとに、近代的な地磁気の観測と研究が形作られていきます。まさに、地磁気観測、地磁気研究はガウスの肩の上で成り立っているのです。これは科学のあらゆる分野についてもいえることで、科学は過去の巨人の肩を借りながら発展してきました。そしてこれは今後も続いていくことでしょう。我々地磁気観測所の観測データは、地磁気研究を行う上で基礎となる大事なデータです。地磁気研究の分野にも将来ガウスのような巨人が現れたとき、我々の観測データがその巨人の足元を支える礎となることを願ってやみません。

次回は中央气象台（現在の気象庁）での地磁気観測のお話です。お楽しみに！

（参考文献）

吉田晴代「Gaussの地磁気ポテンシャル」1996，第7回数学史シンポジウム報告集
https://www2.tsuda.ac.jp/suukeiken/math/suugakushi/sympo07/7_3yoshida.pdf
 植村栄治「地磁気に関するガウスの研究について」2011，第22回数学史シンポジウム報告集
https://www2.tsuda.ac.jp/suukeiken/math/suugakushi/sympo22/22_luemura.pdf

年2回(6, 12月)発行

編集・発行 気象庁地磁気観測所 総務課

〒315-0116 茨城県石岡市柿岡595

TEL：0299-43-1151（総務課）

ホームページ：<https://www.kakioka-jma.go.jp/>

E-mail：kakioka@met.kishou.go.jp

表紙写真：地磁気観測所構内の銀杏の紅葉（平原秀行）