

地質調査総合センター研究資料集 no.614

GSJ Open-File Report no.614, 2015

## 国際標準地球磁場 I G R F とその計算ソフトウェア (5)

### Calculation of the International Geomagnetic Reference Field (5)

中塚 正 (産総研 地質情報研究部門)

**Tadashi Nakatsuka** (Institute of Geology and Geoinformation, GSJ/AIST)

2015 年 2 月

産業技術総合研究所 地質調査総合センター

# 国際標準地球磁場 IGRF とその計算ソフトウェア (5)

中塚 正 (産総研 地質情報研究部門)

## 1. はじめに

本資料は、『地質調査総合センター研究資料集 no.423』に記した同じ題名の資料 (中塚, 2005) の改訂版である。2009 年末に第 11 世代 IGRF (IGRF-11), 2014 年末に第 12 世代 IGRF (IGRF-12) が決定されたのに伴って, その記載と係数データを追加した。また, IGRF 計算プログラムについては, 論理的に特異点とならざるを得ない極点とその近傍の高緯度域を対象外と考えていたが, 標準磁場を表現する数学モデルの次数が段階的に引き上げられたこととも関連して, 極域 (とくに緯度 85 度以上) での計算結果に著しい誤差の累積が見られることが判明したので, 今回の改版でその対策を行った。

国際標準地球磁場 (IGRF: International Geomagnetic Reference Field) は, 国際地球電磁気学会 (IAGA: International Association of Geomagnetism and Aeronomy) において決議された標準地球磁場モデルであり, 全世界の地磁気観測所の観測データおよび人工衛星をはじめとする各種の移動観測による地磁気測定データを基礎にして作られている。このモデルは, 地球内部に起因する地磁気分布の大局的傾向を示すものであり, 主として地球中心核内の電磁流体现象に起因する成分を表現していると考えられている。地質調査所, 産総研地質調査総合センターで出版された空中磁気図 (no.6 以降) および海洋地質図に添付された地磁気異常パターン図オーバーレイの作成にあたっては, 磁気異常値計算の基準として IGRF が用いられている。

磁気探査結果は通常, 大局的な傾向を除去した残差磁気異常図の形で図化表示されるが, その基準としては, 古くは各探査区域毎の傾向面解析に基づく 1 次 (または 2 次) の傾向面が使われた。しかしこの方法によると, 隣接する探査区域の間で傾向面が異なるため, 磁気図のコンターがつながらないことになり, 広域的な視点で磁気図を見るときに不都合である。このため, 残差計算の基準として各地域毎でなく全世界的な傾向面を用いることが考えられ, 今日では専ら IGRF が基準として用いられている。

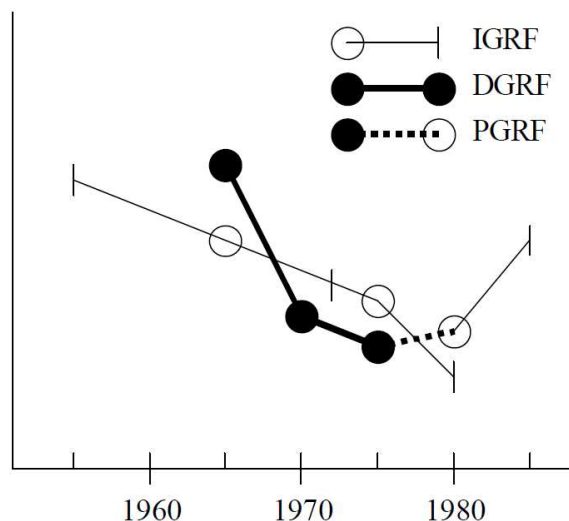
## 2. IGRF の概要 (採択の歴史)

IGRF の第 1 世代のもの (IGRF 1965) が IAGA において初めて承認されたのは, 1968 年 10 月ワシントンでの IAGA のシンポジウムのときであり, このモデルは, 1965.0 年における値とその経年変化率を与えるものであった (IAGA Commission 2 Working Group

No.4, 1969) . この経年変化項は、当時、1955.0–1972.0年の期間に適用するとされたが、1973年9月京都での IAGA 第2回学術総会において、その期間を1975.0年まで延長することが決議された (IAGA, 1973) .

次に、1975年9月にグルノーブルで開かれた国際測地学地球物理学連合 (IUGG: International Union of Geodesy and Geophysics: IAGA を含む国際学会の連合組織) の第16回総会では、IAGA 総会において1975.0年における値と1975.0–1980.0年間の経年変化率を与える IGRF 1975 が採択された (IAGA Division Study Group, 1975) . 第2世代であるこの IGRF 1975 は、IGRF 1965 との連続性を尊重して決められており、この IGRF 1975 の1975.0年における値は、第1世代の IGRF1965 の経年変化補正を施した1975.0年における値に一致する。しかし、IGRF1965 の経年変化項が採択以後の実際の経年変化と異なっていたため、IGRF1975 には実測と合わない面が残されたと言われている。このため第3世代以降の IGRF の決定にあたっては、将来予測部分を含めた連続性の確保は断念されることとなった。

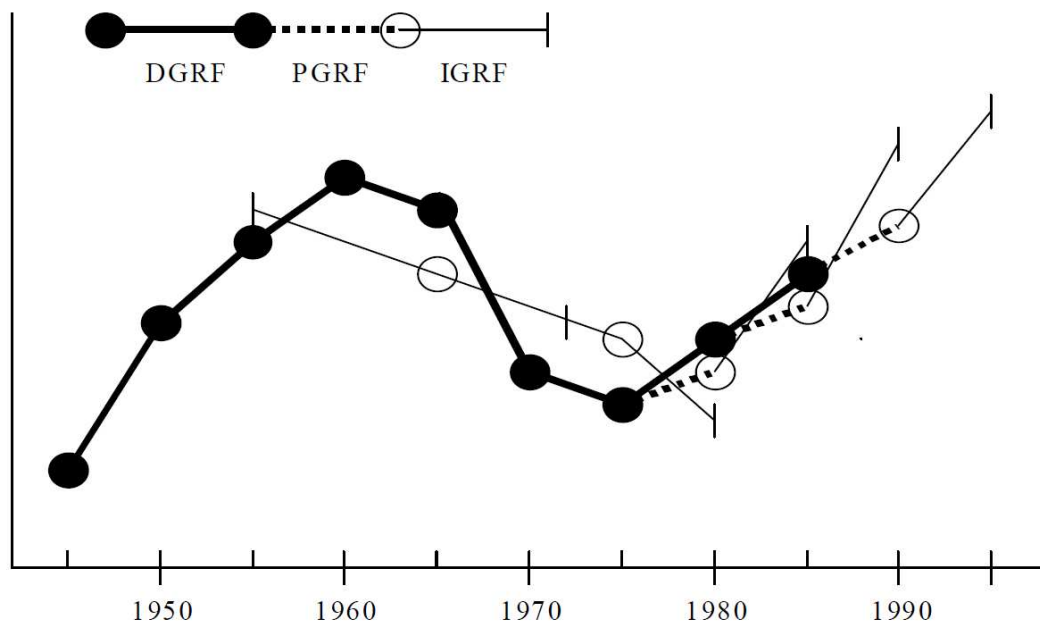
1981年8月エディンバラで開かれた IAGA 第4回学術総会において、第3世代の IGRF 1980 が採択された (Peddie, 1981) が、このとき新たに確定国際標準地球磁場 (DGRF: Definitive IGRF) なる概念が導入され、従来の予測値の意味をもつ IGRF に対して確定値を与えるものとされた。この1981年に採択されたのは、DGRF の1965.0, 1970.0, 1975.0年の値、および IGRF の1980.0年の値とその1980.0–1985.0年の経年変化率である。この DGRF の導入により、さらに DGRF と IGRF とを接続する意味で、暫定国際標準地球磁場 (PGRF: Provisional IGRF) なる概念も定義されている。すなわち、PGRF 1975 は、DGRF の1975.0年の値と IGRF 1980 の1980.0年の値を線形的に補間して得られるものである。なお、DGRF は5年毎の年における値が与えられており、その隣接する2個の値を線形的に補間して得られる。ここまでの IGRF 体系の制定状況は模式的には第1図のとおりである。



第1図  
IGRF体系の1981年  
までの制定状況

第4世代のIGRFは、1985年8月プラハでのIAGA第5回学術総会において決定された(IAGA Division I Working Group 1, 1985)。このIGRF 1985は、第3世代制定のときの考え方を踏襲しており、DGRFの1980.0年における値、およびIGRFの1985.0年における値と1985.0–1990.0年の経年変化率を与えた。これによりPGRF 1980も定義された。またこのとき、1965.0年よりも以前の磁場モデルについても確定版を作成する試みがなされ、1945, 1950, 1955, 1960年の4個のモデルが未確定版IGRFとして公表されたが、この4モデルについては、さらに検討ののち、1987年に確定版DGRFの採択を予定することとされた。実際に、1987年8月バンクーバーでのIUGG第19回総会のときにIGRF Revision 1987として、DGRFの1945.0, 1950.0, 1955.0および1960.0年の値が採択された(IAGA Division I Working Group 1, 1987)。このときの採択には狭義のIGRFの新たな制定はないが、IGRF体系が更新された意味で第5世代と呼ばれる。

第6世代のIGRFは、1991年8月ウィーンで開かれたIUGG第20回総会の場において決定された(IAGA Division V Working Group 8, 1991)。このIGRF 1990では、第4世代制定のときと同様に、DGRFの1985.0年における値、およびIGRFの1990.0年における値と1990.0–1995.0年の経年変化率を与えた。従って、1992年時点のIGRF体系の状況は、模式的には第2図のとおりとなった。



第2図 1992年時点のIGRF体系の制定状況

第7世代のIGRFは、1995年7月米国ボールダーで開かれたIUGG第21回総会の場において決定された(IAGA Division V Working Group 8, 1995)。このときは例に習って、DGRFの1990.0年における値、およびIGRFの1995.0年における値と1995.0–2000.0年の経年変化率を与えた。加えて1900年から1940年にいたる5年毎のモデルも採択され、

1945 年以後の DGRF と合わせて、1900 年以後 5 年毎のモデルが揃う状況となった。しかしこの 1900–1940 のモデルは、十分な観測データを基礎にできているとは言い難く、将来、更新される可能性もあると考えられ、DGRF ではなく IGRF のままである。この IGRF は、IGRF-1965 以降の IGRF とはやや位置づけを異にする。

その次の第 8 世代の IGRF は、当初、コンピュータの 2000 年問題も考慮されて、1999 年 7 月英国バーミンガムで開かれた IUGG の第 22 回総会の場で決定すべく準備されたが、IAGA Working Group V-8 では、精度の高いデータの集積が不十分と判断された。また、地磁気観測衛星のエルステッド (Ørsted) が同年 2 月に打ち上げられており、そのデータが集まりつつあるので、それを待って IGRF-2000 モデルを決定するのが適当と判断された。これにより、当該 Working Group に、Task Force を設けて Ørsted 衛星のデータを取り入れた IGRF の新しいモデルを同年末までに決めるように付託された (Lowe, 2000)。このような経過で決定された IGRF の 2000.0 年における値と 2000.0–2005.0 年の経年変化率を与える IGRF-2000 (IAGA Division V Working Group 8, 2000) は、Working Group の正副議長の名 (Mandea and Macmillan, 2000) でオーソライズされている。しかし、通例なら同時に採択される DGRF の 1995.0 年の値については、Task Force への付託もされておらず、未決定のままとなった。このため、1995.0~2000.0 年に対する PGRF も決定されず、逆に第 7 世代 IGRF の 1995.0 年の値と第 8 世代 IGRF の 2000.0 年の値とを線形補間する広義の IGRF モデルが第 8 世代として規定された形となった。

このような状況のもとで、2001 年 8 月にハノイで開かれた IAGA/IASPEI 合同学術総会の際の会合では、来るべき 2003 年札幌で開催予定の IUGG 総会で、DGRF の 1995.0 年および 2000.0 年のモデルを議論することが確認され、IGRF/DGRF モデルの球関数展開次数を 2000 年以降、経年変化項は別にして現在の 10 次までを 13 次までに拡大する方向性も示された (<http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/min2001.html>, 23 September, 2003)。

2003 年 7 月に札幌で開催された IUGG 第 23 回総会の場において、第 9 世代の IGRF が決定された (IAGA Division V Working Group 8, 2003)。2001 年ハノイの議論に沿って、DGRF の 1995.0 年の値 (係数は 10 次まで) と 2000.0 年の値 (係数は 13 次まで) および 2000.0–2005.0 年の経年変化率の予測値が採択された。ここで、問題となるのは、IGRF の 2005 年モデルが未構築のうちに DGRF の 2000 年モデルが採択され、IGRF–PGRF–DGRF の流れを乱す点と、同じ 2000–2005 年の予測値を示すモデルが複数できたことである。DGRF 2000 の方は出版を控えるなどの案も議論されたが、結局のところ、基準年を示してモデルを区別していた従来の方法をあきらめ、今後は IGRF の世代番号 (Generation Number)  $n$  を付して IGRF- $n$  の形式で標準磁場モデルの区別を表現することとなった。すなわち、今後は DGRF, PGRF などの区分明示ではなく、IGRF 体系の世代番号と計算年を基準にすればよいことになる。

なお、この札幌での会議では、IGRF モデルの係数の採択とともに、計算に用いる標準地球楕円体として従来の IAU 1966 楕円体にかえて WGS84 楕円体の使用が推奨されることとなった。但し、その変更に伴う磁場計算値の差は 1nT 未満である。また、この時点で予測モデルは 2005.0 年までが与えられたが、2005.0 年以降の予測モデルを議論する機会が 2005 年夏（ツールズ）になると見込まれたので、2005.0–2010.0 年の予測モデル構築を Task Force に付託することとなった (<http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/min2003.html>, 27 October, 2003).

その付託を受けて Task Force で仕上げられた予測モデルは、2004 年 12 月に Working Group の副議長と議長の名で、第 10 世代の IGRF (IGRF-10) としてアナウンス (Maus and Macmillan, 2005)され、少し遅れて誌上にも公表 (IAGA Division V Working Group VMOD, 2005) されている ([http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/Minutes\\_VMOD\\_2005.pdf](http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/Minutes_VMOD_2005.pdf), 5 August, 2005).

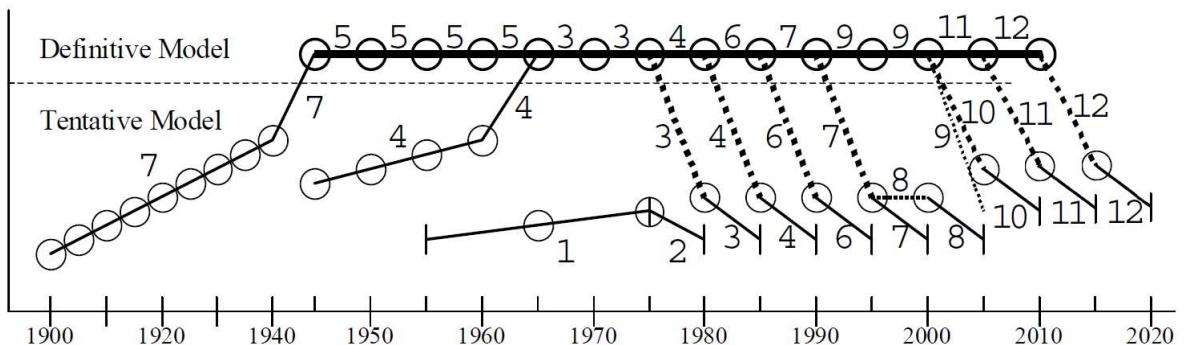
以上のように、5 年ごとの予測モデル構築が定着する一方、IAGA 総会が適切なタイミングで開かれるわけではないことから、2004 年に行ったように早い段階で Task Force (現実には IAGA Working Group V-MOD の正副議長が Task Force のリーダーも務める) を立ち上げてその専門家集団に予測モデル構築を付託するのがよいと認識されるようになった。すなわち、2009 年 8 月には、ハンガリーの Sopron で開催された IAGA 学術総会での Working Group V-MOD 会合では、モデル構築に重要な役割を果たす Ørsted・CHAMP 衛星の磁場データ供給状況とその予測の検討をもとに、IGRF-11 の構築に向けた手順・日程が議論され ([http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/WG-V-MOD\\_Minutes\\_IAGA-2009.pdf](http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/WG-V-MOD_Minutes_IAGA-2009.pdf), 9 September, 2009), それにのっとなって 2009 年 12 月に IAGA Working Group V-MOD の名で第 11 世代の IGRF (IGRF-11) が採択された (IAGA Working Group V-MOD, 2010). その際、モデル構築に協力して候補モデルの提起・評価を行った研究の成果は、EPS 誌 (Earth, Planets and Space) の特集号 Vol.62, no.10 (2010)として出版されている。

また、最新の第 12 世代の IGRF (IGRF-12) の採択に向けて、2011 年 7 月にオーストラリアの Melbourne で開催された IUGG 総会での Working Group V-MOD 会合では、2013 年に予定される IAGA 学術総会での Task Force の立ち上げに向けて、1) IGRF モデルの次数を 15 次に引上げる、2) 経年変化項をより高次まで決定し、Ring Current の影響を示す外部起源ダイポール場もモデルに取り込むなどの案を検討する議論も出た ([http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/Minutes\\_IUGG-2011\\_V-MOD.pdf](http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/Minutes_IUGG-2011_V-MOD.pdf), 9 September 2011). しかし、実際の 2013 年 8 月にメキシコ (ユカタン半島の) Merida で開かれた IAGA 第 12 回学術総会での V-MOD 会合では、期待される磁場観測衛星 Swarm が未打上げの状況や従来の衛星磁場データを利用した磁場モデルの経年変化率の予測精度が十分に高くはないと考えられたらしく、第 12 世代の IGRF (IGRF-12) は IGRF-11 と同様の仕様でモデ

ル構築する線で提案された。議論の中では，Swarm 衛星のデータが利用可能になる時期の不確定さもあって，そのデータを用いて経年変化項をより高次まで決定できる可能性の模索も含めて Task Force で扱ってもらうこととなった。

これを受けて，第 12 世代の IGRF (IGRF-12) は 2014 年 12 月に，IGRF-11 と同じ仕様で，Working Group 議長の名で採択の報告がされた (<http://www.ngdc.noaa.gov/AGA/vmod/igrf.html>, 22 december,2014).

現在までの IGRF 体系の設定状況を図示すると，第 3 図のようになる。横軸の各年代に対応して，上段に太い横線が引かれているところは，付記された数字の世代番号のときに Definitive Model (DGRF) が定義されていることを示し，下段に細い傾いた実線が引かれているところは，付記された数字の世代番号において狭義の IGRF (Tentative Model) が定義されたことを意味する。また，両者を斜めにつなぐ点線は，その世代番号において PGRF が定義されたことを示す。なお，2000 年以後の斜めの点線は，確定版 DGRF と予測値としての IGRF とを暫定的につないだと言う意味で PGRF 相当であるが，前述のように PGRF なる概念が曖昧になっているので，例えば PGRF2010 のような呼び方はしない。(世代番号  $n$  を付した形式で「IGRF- $n$  の  $xxxx.x$  年の値」のように表記する。)



第3図 現在までのIGRF体系の設定状況図

### 3. IGRF 計算基本式

IGRF の計算式は球関数展開式として与えられており，地球の形を回転楕円体に近似している。地心距離  $r$ ，地心余緯度  $\theta$ ，経度  $\lambda$  なる点の磁場 (IGRF) は磁場ポテンシャル  $V(r, \theta, \lambda)$  の傾斜 ( $-\text{grad } V$ ) として与えられるので，北( $-\theta$ )方向成分  $Xc$ ，東( $+\lambda$ )方向成分  $Y$ ，下( $-r$ )方向成分  $Zc$  および全磁力  $F$  は，

$$F = \sqrt{Xc^2 + Y^2 + Zc^2} \quad (1)$$

$$Xc = \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} \quad (2)$$

$$Y = -\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \lambda} \quad (3)$$

$$Zc = \frac{\partial V}{\partial r} \quad (4)$$

で与えられ、

$$V = a \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} [g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda] P_n^m(\cos \theta) \quad (5)$$

である。ここに、 $a$  は基準球面の半径（6371.2 km）であり、 $g_n^m$  および  $h_n^m$  は基準年における値と経年変化率から計算されるガウス係数である。

$$\left. \begin{aligned} g_n^m(t) &= g_n^m(t_0) + (t-t_0)\dot{g}_n^m \\ h_n^m(t) &= h_n^m(t_0) + (t-t_0)\dot{h}_n^m \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

また、 $N$  はモデルによって与えられる球関数の最大次数であり、 $P_n^m(\cos \theta)$  はシュミット擬正規化ルジャンドル陪関数とよばれ、 $\cos \theta = \mu$  とおいて、

$$P_n^m(\mu) = \frac{1}{2^n n!} \left[ \frac{\varepsilon_m (n-m)!}{(n+m)!} (1-\mu^2)^m \right]^{1/2} \frac{d^{m+n}}{d\mu^{m+n}} (\mu^2 - 1)^n \quad (7)$$

で表現される。ここで  $\varepsilon_m$  は、 $m=0$  のときに 1、 $m \neq 0$  のときに 2 なる定数である。

以上により磁場の計算は行えるが、地理的な緯度・経度で与えられた点における値を求めるためには、測地緯度  $\phi$ 、高度  $\eta$  に対する地心余緯度  $\theta$ 、地心距離  $r$  を求める必要がある。IGRF の計算で用いる地球楕円体は、従来は国際地球楕円体（IAU, 1966）（赤道半径  $R_e$  が 6378.160 km、扁平率  $f$  が 1/298.25 であり、極半径  $R_p = R_e (1-f)$  は 6356.775 km となる。）を用いるのが原則とされてきたが、2003 年 7 月の札幌での会議で、今後は WGS84 楕円体（ $R_e = 6378.13700$  km,  $R_p = 6356.75231$  km,  $f = 1/298.25722$ ）の利用が推奨されることとなった。後で示す計算プログラムでは、世代番号に応じた IGRF 計算を行う「サブルーチン `gigrf`」でのみ、WGS84 楕円体のパラメータを用い、DGRF/PGRF/IGRF の種別に応じた計算を行うサブルーチンでは、従来の計算結果との整合を取る意味で国際地球楕円体（IAU, 1966）のパラメータを用いるようにコーディングしてある。

$\phi$ 、 $\eta$  が与えられたとき  $r$ 、 $\theta$  を求める式は、回転楕円体の考察から、

$$r^2 = \frac{R_e^4 \cos^2 \phi + R_p^4 \sin^2 \phi}{R_m^2} + 2\eta R_m + \eta^2 \quad (8)$$

$$\cos \theta = \frac{\sin \phi}{r} \left( \frac{R_p^2}{R_m} + \eta \right) \quad (9)$$

$$R_m^2 = R_e^2 \cos^2 \phi + R_p^2 \sin^2 \phi \quad (10)$$



で表される.

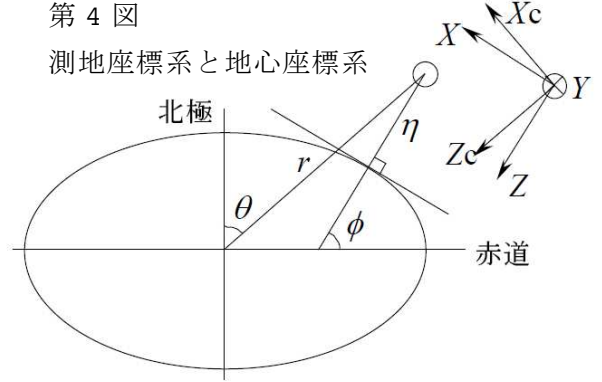
なお, 全磁力の計算は (1)–(4) 式で十分であるが, 測地座標系での 3 成分を求めるためには北向 ( $X$ ) および下向 ( $Z$ ) 成分が地心座標系と異なるため (第 4 図参照), 次式による変換が必要となる.

$$X = Xc(\cos\theta\sin\phi + \sin\theta\cos\phi) - Zc(\cos\theta\cos\phi - \sin\theta\sin\phi) \quad (11)$$

$$Z = Xc(\cos\theta\cos\phi - \sin\theta\sin\phi) + Zc(\cos\theta\sin\phi + \sin\theta\cos\phi) \quad (12)$$

ここで  $\phi$  が未知のときは, (8)–(10) から得られる次の関係を用いて  $\phi$  を求める必要がある.

$$\frac{R_e^2 - R_p^2}{\sqrt{R_e^2 + R_p^2 s^2}} + \frac{r\cos\theta}{s} - r\sin\theta = 0 \quad (s = \tan\phi) \quad (13)$$



#### 4. 計算アルゴリズム

(2)–(5) 式より 3 成分  $Xc, Y, Zc$  は,

$$Xc = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} [g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda] \frac{d}{d\theta} P_n^m(\cos\theta) \quad (14)$$

$$Y = \frac{1}{\sin\theta} \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n m \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} [g_n^m \sin m\lambda - h_n^m \cos m\lambda] P_n^m(\cos\theta) \quad (15)$$

$$Zc = - \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n (n+1) \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} [g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda] P_n^m(\cos\theta) \quad (16)$$

により与えられる. ここで,  $P_n^m(\cos\theta)$  および  $(d/d\theta)P_n^m(\cos\theta)$  の計算が必要となるが, その実際の計算においては, 漸化式を用いる方法が有利である. ここで用いている計算方法を Chapman and Bartels (1940) に基づいて略述する.

$P_n^m(\cos\theta)$  は非正規化ルジャンドル陪関数  $P_{n,m}(\cos\theta)$  を用いて,

$$P_n^m(\cos\theta) = \left[ \frac{\varepsilon_m \cdot (n-m)!}{(n+m)!} \right]^{1/2} P_{n,m}(\cos\theta) \quad (17)$$

で表されるので,

$$G_n^m \equiv g_n^m \left[ \frac{\varepsilon_m \cdot (n-m)!}{(n+m)!} \right]^{1/2}, \quad H_n^m \equiv h_n^m \left[ \frac{\varepsilon_m \cdot (n-m)!}{(n+m)!} \right]^{1/2} \quad (18)$$

$$Q_{n,m}(\cos\theta) \equiv \frac{d}{d\theta} P_{n,m}(\cos\theta) \quad (19)$$

とおくと, (14)–(16) は,

$$Xc = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} [G_n^m \cos m\lambda + H_n^m \sin m\lambda] Q_{n,m}(\cos \theta) \quad (20)$$

$$Y = \frac{1}{\sin \theta} \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n m \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} [G_n^m \sin m\lambda - H_n^m \cos m\lambda] P_{n,m}(\cos \theta) \quad (21)$$

$$Zc = - \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n (n+1) \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} [G_n^m \cos m\lambda + H_n^m \sin m\lambda] P_{n,m}(\cos \theta) \quad (22)$$

となる.  $P_{n,m}$ ,  $Q_{n,m}$  の計算は, Chapman and Bartels (1940) の p.623 の (51aa), (52a), (53a), (54a), (55a) と p.610 の (10) の各式を用いて求めた以下の漸化式により計算できる.

[今回の改訂では, 極域での計算誤差の低減のため, 前回までは多用されていた  $\sin \theta$  での割算操作が問題とならぬように, また逆に  $\cos \theta$  での割算操作は赤道域での計算誤差への影響が大きいためそれが問題とならぬように, アルゴリズムを見直した.]

イ) (51aa) の  $n$  に  $(n-1)$  を代入し,  $m=0$  とおいて整理すると,

$$P_{n,0} = \frac{1}{n} [(2n-1)\cos \theta P_{n-1,0} - (n-1)P_{n-2,0}] \quad (23)$$

ロ-1) (51aa) の  $m$  に  $(m-1)$  を代入し, (52a) との間で  $P_{n+1,m-1}$  を消去すると,

$$P_{n,m} = \frac{1}{\sin \theta} [(n+m-1)P_{n-1,m-1} - (n-m+1)\cos \theta P_{n,m-1}] \quad (24-1) \text{ [極域外に適用]}$$

ロ-2) (53a) の  $m$  に  $(m-1)$  を代入し, (51aa) との間で  $P_{n+1,m}$  を消去すると,

$$P_{n,m} = \frac{1}{\cos \theta} [P_{n-1,m} + (n-m+1)\sin \theta P_{n,m-1}] \quad (24-2) \text{ [極域に適用]}$$

ハ) (10) に  $m=n$  を代入したものと, さらにその  $n$  に  $(n-1)$  を代入したものとを比較すると,

$$P_{n,n} = (2n-1)\sin \theta P_{n-1,n-1} \quad (25)$$

ニ) (55a) から,  $Q_{n,0} = -P_{n,1}$  (26)

ホ) (54a) から,  $Q_{n,m} = \frac{1}{2} [(n+m)(n-m+1)P_{n,m-1} - P_{n,m+1}]$  (27)

ヘ) (25) を  $\theta$  で微分すると,

$$Q_{n,n} = (2n-1) [\cos \theta P_{n-1,n-1} - \sin \theta Q_{n-1,n-1}] \quad (28)$$

(23)–(28) を用いると,  $P_{0,0}$  および  $P_{1,0}$  が与えられれば,  $n > 0$ ,  $n \geq m \geq 0$  なる  $n$  と  $m$  のすべての組合せについて  $P_{n,m}$  および  $Q_{n,m}$  が計算できる. なお,  $P_{0,0}$  と  $P_{1,0}$  は (7) と (17) より,  $P_{0,0} = 1$ ,  $P_{1,0} = \cos \theta$  となる.

## 5. 計算プログラムの機能概要

前章までに述べた計算式に基づいて IGRF の計算を行うための C 言語サブプログラムのソースコードを付属 CD-ROM 内のファイル igrf.c に収容してある。このソースコードは、内容理解のためのコメントとごく一般的なプリプロセッサ命令を除くと、グローバル変数の宣言・定義と多数の関数群の定義からなる。

各関数は、(0) 内部関数、(1) 実計算に必要な手順を系統的に区分した基本計算関数、(2) 基本計算関数を用い実計算を慣用的に行うに適した実用関数、(3) 前項の実用関数の Fortran 言語インターフェイスに大別でき、それらの機能は下記の通りである。ここでは、ソースコードの並び順に記載するが、実プログラムの動作では後寄りの関数を呼出すことにより必要に応じてより前寄りの関数が内部的に呼出される関係になっている。

### (0) 内部関数 **fcalc**

内部の他の関数 **mfldg**, **mfldc** のみから、計算の準備が整った段階で呼出され、IGRF の地心座標系での 3 成分  $X_c$ ,  $Y$ ,  $Z_c$  と全磁力の計算を行う。

### (1-1) 関数 **field**

使用する地球楕円体のパラメータと基準球面半径( $a$ )、計算に用いるガウス係数の次数を設定する。内部的には、**gigrf**, **sigrf**, **sdgrf**, **spgrf** から呼出される。

### (1-2) 関数 **tcoef**

計算に使用するガウス係数の基準年の値 ( $g_n^m(t_0), h_n^m(t_0)$ ) とその経年変化率 ( $\dot{g}_n^m, \dot{h}_n^m$ )、基準年値 ( $t_0$ ) および地球外部起源の磁場を含んだモデルの計算を行う場合 (現状の IGRF 計算では使用しない) のパラメータを設定する。内部的には、**gigrf**, **sigrf**, **sdgrf**, **spgrf** から呼出される。

### (1-3) 関数 **tyear**

実計算年 ( $t$ ) を受取り、それに対応した  $G_n^m, H_n^m$  (18) を計算する。内部的には、**gigrf**, **sigrf**, **sdgrf**, **spgrf** と Fortran インターフェイス **tyear\_** から呼出される。前項のガウス係数の組を切替える機能はないので、その組で許容される範囲の実計算年を指示する必要がある。

### (1-4) 関数 **mfldg**

実計算点の地理的な緯度・経度・高度を受取り、地心余緯度と地心距離を求めた上で、**fcalc** を呼出して磁場計算を行い、3 成分  $X_c$ ,  $Y$ ,  $Z_c$  と全磁力の値を返す。内部的には、**igrfc** のみから呼出される。

### (1-5) 関数 **mfldc**

実計算点の地心座標の余緯度・経度・地心距離を受取り，**fcalc** を呼出して磁場計算を行い，3成分  $X_c, Y, Z_c$  と全磁力の値を返す．内部的にはどこからも呼出されない．

#### (1-6) 関数 **gcomp**

直前に **mfldg** または **mfldc** の呼出しが行われていることを前提に，その際に得られた地心座標系での3成分  $X_c, Y, Z_c$  から地理座標系での3成分  $X_g, Y, Z_g$  を計算して返す．その際，測地座標系での緯度が既知でない場合には，地心余緯度から測地緯度への変換のため (13) 式を用いてニュートン法によるイテレーションを行う．

#### (2-1) 関数 **gigrf**

IGRF の世代番号と計算年 ( $t$ ) を受取り，世代番号に対応するガウス係数データファイルを読み取り，計算年 ( $t$ ) に応じてガウス係数の基準年の値 ( $g_n^m(t_0), h_n^m(t_0)$ ) とその経年変化率 ( $\dot{g}_n^m, \dot{h}_n^m$ )，基準年値 ( $t_0$ ) を抽出する．また，**field・tcoef・tyear** の呼出しにより，当該世代番号・当該計算年での IGRF 計算の準備を整える．内部的には，Fortran インターフェイス **gigrf\_** のみから呼出される．

なお，用いられる地球楕円体パラメータは，関数 **sigrf/sdgrf/spgrf** の場合に国際地球楕円体 (IAU, 1966) の値となるのに対し，この **gigrf** の場合には WGS84 楕円体の値が採用される．

#### (2-2) 関数 **igrfc**

実計算点の地理的な緯度・経度・高度(m単位)を受取り，**mfldg** を呼出して磁場計算を行い，全磁力の値のみを返す．内部的には，Fortran インターフェイス **igrfc\_** のみから呼出される．

#### (2-3) 関数 **igrfm**

直前に **mfldg** または **mfldc** の呼出しが行われていることを前提に，得られた地心座標系での3成分  $X_c, Y, Z_c$  から (**gcomp** 呼出しにより) 地理座標系での3成分  $X_g, Y, Z_g$  を求め，さらに水平成分  $H$ ・伏角  $I$ ・偏角  $D$  を計算して， $X_g, Y, Z_g, H, I, D$  からなる6成分値の配列を返す．内部的には，Fortran インターフェイス **igrfm\_** のみから呼出される．

#### (2-4) 関数 **sigrf**

計算年 ( $t$ ) を受取り，(世代番号によらず) DGRF-PGRF-IGRF の区分に応じたモデル選択 (予測値としての IGRF) に基づいて，それに対応したガウス係数データ (プログラム内にコーディングされている) を抽出する．また，**field・tcoef・tyear** の呼出しにより，当該選択モデル・当該計算年での IGRF 計算の準備を整える．内部的には，Fortran インターフェイス **sigrf\_** のみから呼出される．

妥当な計算年 ( $t$ ) の値の範囲は，1955.0～2005.0 である．なお，1995.0 年以後 2000.0 年以前 (2000.0 年を含まない) に対しては，第 7 世代のガウス係数の組が用いられるの

で、第 7 世代 IGRF の 1995.0 年の値と第 8 世代 IGRF の 2000.0 年の値とを線形補間するモデルは、(2-1) の関数 **gigrf** に世代番号 8 を指定して計算する必要がある。

#### (2-5) 関数 **sdgrf**

(2-4) の関数 **sigrf** と同様であり、DGRF の計算を行うことを指定する。妥当な計算年 ( $t$ ) の値の範囲は、1945.0～1990.0 である。内部的には、Fortran インターフェイス `sdgrf_` のみから呼出される

#### (2-6) 関数 **spgrf**

(2-4) の関数 **sigrf** と同様であり、PGRF の計算を行うことを指定する。妥当な計算年 ( $t$ ) の値の範囲は、1975.0～1995.0 である。内部的には、Fortran インターフェイス `spgrf_` のみから呼出される

### (3) Fortran インターフェイス関数

`gigrf_ / igrfc_ / igrfm_ / sigrf_ / sdgrf_ / spgrf_ / tyear_`

上記の (2-1)・(2-2)・(2-3)・(2-4)・(2-5)・(2-6) および (1-3) の関数群を、Fortran 言語と同じ名称のサブルーチンとして扱えるようにそのインターフェイスを用意してある。内部的にはどこからも呼出されない。

C 言語向けの関数における引数は、**gigrf** の第 1 引数 (世代番号) が整数値であるのを除いて、倍精度型実数であるのに対し、Fortran インターフェイス関数における浮動小数点引数はすべて単精度の実数となっている。

## 6. プログラム内容について

本節では、C 言語ソースプログラムの内容について、理解の参考のため若干の解説と補足を述べる。

### 6.1 世代番号対応のガウス係数データファイル読み込み

関数 **gigrf** の処理では、計算を行う世代番号と年の値に応じた適切なガウス係数の組をファイルから、配列 `cb[]` および `cv[]` に読み込んでいる。ここで、ガウス係数データのファイル名は、世代番号が‘??’で表されるとしたとき、

```
/home/SHARE/data/IGRFCOEF/igrf???.coef
```

となるようにルール付けされている。ファイルの存在するディレクトリ名は、記号定数を規定するプリプロセッサ命令 (`#define` ディレクティブ) を修正すれば容易に変更できるようになっているが、ファイル名部分を変更したい場合は、関数 **gigrf** 内の文字列変数 `file[]` の内容の操作状況を理解して変更されたい。

世代番号に対応するガウス係数データファイルのデータ書式は、係数データ部分は表

形式となっており、実ファイルの内容を(等幅フォントで)単純テキストとして表示すれば容易に理解されるであろう。その内容は左から、g/h の区分、n 次数値、m 次数値に続いて 1 個以上(k 個)の 5 年毎の基準年に対応した  $g_n^m, h_n^m$  値が並び、末尾に最後の基準年以後の経年変化率  $\dot{g}_n^m, \dot{h}_n^m$  が記されている。

この書式に対して、その前に第 1・第 2 の 2 行のヘッダが必要となる(それらヘッダ以外に有用な情報をメモとして記しておくことも許容している)。第 1 ヘッダは、ガウス係数の最大次数(N)・前記の表形式データの列数についての情報(k)・この係数データを使った計算が許容される年範囲(開始年 y1 と終了年 y2) を記述する。その書式は、先頭桁が空白であり、あとは任意個数の空白で区切られたフリーフォーマットの数値の並びでよい。第 2 ヘッダは、上に「5 年毎の基準年」と書いたがその年情報を正しく読み取らせるものであり、従来からの IAGA から供給されたデータの書式を踏襲して、行頭が“g/h n m” の 8 文字であり、そのあとに (k-1) 個の基準年の値が並ぶことを想定している(その後には、経年変化率の値に対して何らかの表示があるのが一般的であるが、その内容の規則は求めない)。(第 1 ヘッダより前には、先頭桁が空白でない任意の行を、第 1 ヘッダと第 2 ヘッダの間には、先頭 8 文字が“g/h n m” でない任意の行をコメントとして記入できる。)

## 6.2 ガウス係数関係データの配列への収容順位

関数 **sigrf** の定義部分の直前には、世代番号 8 までの (IGRF-PGRF-DGRF の区分に応じて選択する) ガウス係数の組が配列 `rf[7][120]・sv[7][80]・df[10][120]` の形で宣言・定義されている。ここで配列 `rf[j][i]・sv[j][i]・df[j][i]` は、それぞれ IGRF の基準年における値、IGRF の経年変化率 および DGRF の値に対応し、各配列の前側の添字 j が世代番号に対応する。配列 `rf` と `sv` については、j の 0-6 の値に対応して、IGRF の 1965, 1975, 1980, 1985, 1990, 1995, 2000 の各モデルのガウス係数が与えられ、配列 `df` については、j の 0-9 の値に対応して、DGRF の 1945-1990 の 5 年毎の各モデルに対応する。各配列の後側の添字 i は、1 組のガウス係数の順序づけを示しており、 $g_n^m$  および  $h_n^m$  との対応は  $g_1^0, g_1^1, h_1^1, g_2^0, g_2^1, h_2^1, g_2^2, h_2^2, g_3^0, g_3^1, h_3^1, g_3^2, h_3^2, g_3^3, h_3^3, \dots$  の順である。これと同様なデータの並びは、世代番号に対応したガウス係数データのファイルにも記録されている。

一方、(18)の計算式で示される  $G_n^m, H_n^m$  で示される係数の組は、一つの配列 `g[][]` にコンパクトに詰められる。各係数と配列要素との対応は、 $G_n^m$  が `g[m][n]`、 $H_n^m$  が `g[n][m-1]` に相当する(第 5 図参照)。また、4 つの配列 `vgh, vght, gh, ght`

は、配列  $g$  と全く同じ配置になっており、それぞれ、 $g_n^m$  と  $h_n^m$  の基準年における値、経年変化率、 $G_n^m$  と  $H_n^m$  の基準年における値、経年変化率が収容される。

$i \backslash j$	0	1	2	3	.....	$N-1$	$N$	$n \backslash m$
0	$\times$	$H_1^1$	$H_2^1$	$H_3^1$	.....	$H_{N-1}^1$	$H_N^1$	1
1	$G_1^0$	$G_1^1$	$H_2^2$	$H_3^2$	.....	$H_{N-1}^2$	$H_N^2$	2
2	$G_2^0$	$G_2^1$	$G_2^2$	$H_3^3$	.....	$H_{N-1}^3$	$H_N^3$	3
3	$G_3^0$	$G_3^1$	$G_3^2$	$G_3^3$	.....	$H_{N-1}^4$	$H_N^4$	4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	.....	⋮	⋮	⋮
$N-1$	$G_{N-1}^0$	$G_{N-1}^1$	$G_{N-1}^2$	$G_{N-1}^3$	.....	$G_{N-1}^{N-1}$	$H_N^N$	$N$
$N$	$G_N^0$	$G_N^1$	$G_N^2$	$G_N^3$	.....	$G_N^{N-1}$	$G_N^N$	$\times$
$n \backslash m$	0	1	2	3	.....	$N-1$	$N$	

第 5 図 2次元配列  $g[j][i]$  の中での変数群の配置

なお、配列  $p[][]$  には、 $P_{n,m}$  と  $Q_{n,m}$  の値が収容されるが、添字との対応は  $g[][]$  等とは僅かに異なっており、 $P_{n,m}$  が配列要素  $p[m][n]$  に相当するが、 $Q_{n,m}$  は配列要素  $p[n+1][m]$  に相当する。

### 6.3 同一計算繰返し省略のためのフラグ

内部関数 **fcalc** の中では、 $kr, kth, kph$  の 3 つのフラグが利用される。これらは、計算点の地心距離  $r$ 、地心余緯度  $\theta$ 、経度  $\lambda$  の値が、前回の計算と同じであるか否かに従って、各変数に関する一連の計算を繰り返さずに済ますためのものである。fcalc の中で当該計算を実施した際に、フラグの値を 0 とし、計算を要求する側（関数  $mfdg, mfdc$ ）が各変数値が前回と異なる場合にフラグ値を 1 に設定する。（前回の計算に用いられた各変数の値を保存するため、変数  $br, bhi, bthe, bthc, blon$  が用いられている。）

ほかに、 $kg, kgc$  の 2 つのフラグがある。kg は、計算点が地心座標系 ( $kg=0$ )・測地座標系 ( $kg=1$ ) のいずれかで与えられたかを示し、 $kg=0$  のとき  $kgc$  は、測地緯度の算出が済んでいる ( $kgc=1$ ) か否 ( $kgc=0$ ) かを示す。これらは、関数 **gcomp** が地心座標

での磁場 3 成分を地理座標の方向成分に換算する際に、地心余緯度と地心距離から地理緯度情報を計算し直す必要性の判断に用いられる。また、関数 mfl dg では地心余緯度の計算が必要か否かの判断に用いられたのち kg=1 に設定し、関数 mfl dc は kg=0 に設定する。

## 7. 使用法 (例)

本ソフトウェアを Fortran 言語プログラムから呼出して用いる場合の標準的な使用法を以下に例示する。

<プログラム>

```
DIMENSION F(6)
WRITE(6,20)
CALL GIGRF(12, 2015.1)
DO 1 I=0,60,5
  FI = 35. + FLOAT(I)/60.
DO 1 K=0,60,5
  FK = 139. + FLOAT(K)/60.
CALL IGRFC(FI, FK, 1500., T)
CALL IGRFM(F)
WRITE(6,10) 35., I, 139., K, T, (F(N),N=1,3)
1 CONTINUE
STOP
10 FORMAT(3X, F5.0, I2, 2H'N', F6.0, I2, 2H'E', 4F12.2)
20 FORMAT(29X, 1HF, 11X, 1HX, 11X, 1HY, 11X, 1HZ)
END
```

このプログラムは、高度 1500 m における IGRF-12 の 2015.1 年の全磁力および 3 成分 ( $X, Y, Z$ ) の値を、北緯 35–36° 東経 139–140° の範囲内の緯経度とも 5 分毎の格子状の点について計算し、印字出力するものである。

## 文献 (年代順)

- Chapman, S. and J. Bartels (1940) Spherical harmonic analysis in geophysics, *Geomagnetism*, vol.2, 606-638. Oxford Univ. Press, New York.
- International Astronomical Union (IAU) (1966) Proceedings of the Twelfth General Assembly, Hanburg, Germany, *Trans. IAU*, **12B**, 594-595.
- IAGA Commision 2 Working Group No.4, Analysis of the Geomagnetic Field (1969) The International Geomagnetic Reference Field 1965.0, *J. Geomag. Geoelectr.*, **21**, 569-571; *J. Geophys. Res.*, **74**, 4407-4408.
- International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA) (1973) Transactions of the Second General Scientific Assembly, Kyoto, Japan, *IAGA Bull.*, no.35, 147, Resolution 18.
- IAGA Division I Study Group, Geomagnetic Reference Fields (1975) International Geomagnetic Reference Field 1975, *J. Geomag. Geoelectr.*, **27**, 437-439; *Eos Trans. AGU*, **57**, 120-121 (1976); *J. Geophys. Res.*, **81**, 5163-5164 (1976); *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, **44**, 733-734 (1976).



- Peddie, N. W. (1981) International Geomagnetic Reference Field 1980: a report by IAGA Division I Working Group 1, *J. Geomag. Geoelectr.*, **33**, 607-611; *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, **68**, 265-268 (1982); *Geophysics*, **47**, 841-842 (1982).
- IAGA Division I Working Group 1 (1981) International Geomagnetic Reference Fields: DGRF 1965, DGRF 1970, DGRF 1975, and IGRF 1980, *Eos Trans. AGU*, **62**, 1169.
- Peddie, N. W. (1982) International Geomagnetic Reference Field: the third generation, *J. Geomag. Geoelectr.*, **34**, 309-326.
- Peddie, N. W. (1983) International Geomagnetic Reference Field—its evolution and the difference in total field intensity between new and old models for 1965-1980, *Geophysics*, **48**, 1691-1696.
- IAGA Division I Working Group 1 (1985) International Geomagnetic Reference Field Revision 1985, *J. Geomag. Geoelectr.*, **37**, 1157-1163; *IAGA News*, no.24, 60-64; *Pure Appl. Geophys.*, **123**, 641-645; *Eos Trans. AGU*, **67**, 523-524 (1986); *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, **85**, 217-220 (1986); *Geophysics*, **51**, 1020-1023 (1986).
- 中塚 正 (1986) 国際標準地球磁場 IGRF とその計算ソフトウェア, 地質調査所研究資料集, no.27, 25p.
- Barracough, D. R. (1987) International Geomagnetic Reference Field: the fourth generation, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **48**, 279-292.
- IAGA Division I Working Group 1 (1987) International Geomagnetic Reference Field Revision 1987, *J. Geomag. Geoelectr.*, **39**, 773-779; *IAGA News*, no.26, 87-92; *Eos Trans. AGU*, **69**, 557-558 (1988); *Geophys. J.*, **93**, 187-189 (1988); *Geophysics*, **53**, 576-578 (1988); *Phys. Earth Planet. Inter.*, **50**, 209-212 (1988); *Pure Appl. Geophys.*, **127**, 155-160 (1988).
- IAGA Division V Working Group 8 : Analysis of the Main Field and Secular Variation (1991) International Geomagnetic Reference Field, 1991 Revision, *J. Geomag. Geoelectr.*, **43**, 1007-1012; *IAGA News*, no.30, 69-76; *Pure Appl. Geophys.*, **137**, 301-308; *Eos Trans. AGU*, **73**, 182 (1992); *Geophys. J. Int.*, **108**, 945-946 (1992); *Geophysics*, **57**, 956-959 (1992); *Phys. Earth Planet. Inter.*, **70**, 1-6 (1992).
- Langel, R. A. (1992) International Geomagnetic Reference Field: the sixth generation, *J. Geomag. Geoelectr.*, **44**, 679-707.
- 中塚 正 (1992) 国際標準地球磁場 IGRF とその計算ソフトウェア(2), 地質調査所研究資料集, no.184, 27p. + 1 FD.
- IAGA Division V Working Group 8 (1995) International Geomagnetic Reference Field, 1995 Revision, *J. Geomag. Geoelectr.*, **47**, 1257-1261; *Geophys. J. Int.*, **125**, 318-321 (1996); *Phys. Earth Planet. Inter.*, **97**, 23-26 (1996); *Pure Appl. Geophys.*, **147**, 195-202 (1996).
- Barton, C. E. (1997) International Geomagnetic Reference Field: the seventh generation, *J. Geomag. Geoelectr.*, **49**, 123-148.
- IAGA Division V Working Group 8 (2000) International Geomagnetic Reference Field 2000, *Geophys. J. Int.*, **141**, 259-262; *Phys. Earth Planet. Inter.*, **120**, 39-42; *Pure Appl. Geophys.*, **157**, 1797-1802.
- Mandea, M. and S. Macmillan (2000) International Geomagnetic Reference Field - the eighth generation, *Earth Planets Space*, **52**, 1119-1124.
- Lowes, F. J. (2000) The working of the IGRF 2000 Task Force, *Earth Planets Space*, **52**, 1171-1174.
- IAGA Division V Working Group 8 (2003) The 9th Generation International Geomagnetic Reference Field. *Earth Planets Space*, **55**(8), i-ii; *Geophys. J. Int.*, **155**, 1051-1056.
- Macmillan, S. and S. McLean (2003) IAGA Division V-MOD Geomagnetic Field Modeling: Minutes Hanoi 2001. <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/min2001.html>, 23 September, 2003.
- Macmillan, S. and S. McLean (2003) IAGA Division V-MOD Geomagnetic Field Modeling: Minutes Sapporo 2003. <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/min2003.html>, 27 October, 2003.
- 中塚 正 (2004) 国際標準地球磁場 IGRF とその計算ソフトウェア(3), 地質調査総合センター研究資料集, no.402, 39p. + 1 FD.
- Maus, S. and S. Macmillan (2005) 10th Generation International Geomagnetic Reference Field, *EOS*, **86**(16), 159.

- 中塚 正 (2005) 国際標準地球磁場 IGRF とその計算ソフトウェア(4), 地質調査総合センター研究資料集, no.423, 39p. + 1 FD.
- IAGA Working Group V-MOD (2005) IAGA Working Group V-MOD “Geomagnetic Field Modelling” Minutes of WG Meeting on 20.7.05, [http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/Minutes\\_VMOD\\_2005.pdf](http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/Minutes_VMOD_2005.pdf), 5 August, 2005.
- IAGA Division V Working Group VMOD (2005) The 10th international geomagnetic reference field. *Phys. Earth Planet. Interior*, **151**, 320-322.
- Macmillan, S. and S. Maus (2005) International Geomagnetic Reference Field - the tenth generation. *Earth Planets Space*, **57**(12), 1135-1140.
- Thébault, E. (2009) V-MOD business meeting IAGA 2009 (Tuesday 25 August). [http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/WG-V-MOD\\_Minutes\\_IAGA-2009.pdf](http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/WG-V-MOD_Minutes_IAGA-2009.pdf), 9 September, 2009.
- IAGA Working Group V-MOD (2010) International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation, *Geophys. J. Int.*, **183**(3), 1216-1230.
- Finlay, C.C., S. Maus, C.D. Beggan, M. Hamoudi, F.J. Lowes, N. Olsen, and E. Thébault (2010) Evaluation of candidate geomagnetic field models for IGRF-11. *Earth Planets Space*, **62**(10), 787-804.
- Thébault, E. (2011) Minutes of 2011 Business Meeting of IAGA Working Group V-MOD, Saturday 2nd July 2011, Melbourne. [http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/Minutes\\_IUGG-2011\\_V-MOD.pdf](http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/Minutes_IUGG-2011_V-MOD.pdf), 21 September, 2011.
- Beggan, C. (2013) Minutes of Business Meeting of IAGA Working Group V-MOD, Wednesday 28th August 2013. <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/WG-V-MOD-minutes-2013.pdf>, 21 November, 2013.
- Thébault, E. (2014) IAGA V-MOD Geomagnetic Field Modeling: International Geomagnetic Reference Field IGRF-12. <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>, <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf12coeffs.txt>, 22 December, 2014.

## 付属の CD-ROM メディアの内容

この研究資料集の付属CD-ROMには，以下のファイルが収容してある．

(ファイル名)	(形式)	(内 容)
openfile0614.html	HTML文書ファイル	本資料集紹介Webページ用原稿 (和文主体)
no0614/	サブフォルダ (下記ファイル群を収容)	
igrf.5.pdf	PDFファイル	本資料集の本文部分 (和文) (この文書)
igrf.c	テキストファイル	C言語プログラムのソース
igrf01.coef	テキストファイル	第1～第12世代のガウス係数データファイル (IAGAから発表されたデータファイルに，本資料集のプログラムで読み込むためのヘッダ情報を付加したものとなっている)
igrf02.coef		
igrf03.coef		
igrf04.coef		
igrf05.coef		
igrf06.coef		
igrf07.coef		
igrf08.coef		
igrf09.coef		
igrf10.coef		
igrf11.coef		
igrf12.coef		
index.html	HTML文書ファイル	本資料集の英文概要
indexJ.html	HTML文書ファイル	本資料集の和文概要