

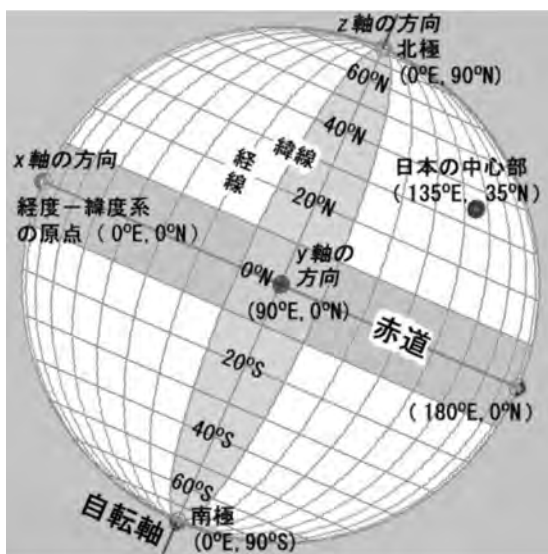
日本列島に沿って擬似赤道(大円)を引く擬似経度-緯度座標系(PLLCS, JILLS)の試み

-東日本3弧系下への太平洋プレート沈み込みへの適用事例-

茂野 博¹⁾

1. はじめに

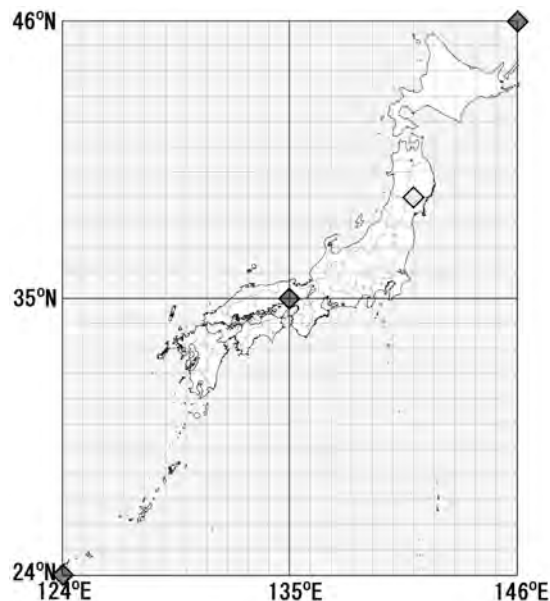
地図を作成する場合には、様々な投影法(大きくは方位図法, 円筒図法, 円錐図法, その他の図法に分類される)が用いられる。しかし, 3次元の地球の表面を2次元の面に投影するため, これらの方法には本質的な無理があり, 各種の投影法は長さ・面積・方向などの正確さについて各々問題を抱えている。問題は, 特に小縮尺地図(例えば, 200万分の1以下)の場合に大きい。このような地図投影法については, 例えば



第1図 地球の経度-緯度座標系。黄道面上の無限遠方から見た正射方位図法による地図で, 東半球について示す。本文2.~3.の擬似経度-緯度座標系への回転操作のためのz軸・y軸・x軸の方向も示した。

Wikipedia (WWW), 米国地質調査所(以下USGSと略記, WWW), 株式会社オープンGIS (WWW)などによって紹介されている(なお, 各WWWサイトのURLについては, 末尾の一覧を参照)。

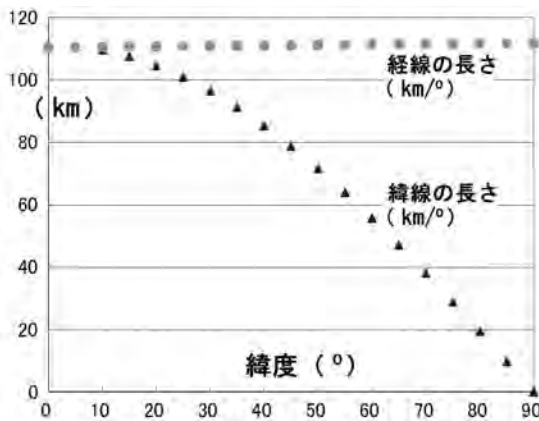
近年, 地理・地球科学情報の処理では, 便宜的に経度-緯度座標系(第1図参照)を直接的に直交座標系として地図表示を行う場合が少なくない(第2図参照; 「正距円筒図法」と呼ばれる)。このような例は,



第2図 通常の経度-緯度座標系を直交座標系(経線長/緯線長比 = 1.22)として表示した日本列島。海岸線・県境データは国土地理院(2000)による。本文2.のJILLSと3.のJILLS-EJAの原点・標点の位置を, 各々◆と◇で示した。なお, 本図は茂野(2008a)などの中で基図として使用されている。

1) 産総研 地図資源環境研究部門

キーワード: 経度-緯度座標系, 座標系変換, 斜めメルカトル図法, 擬似経度-緯度座標系, オイラー角, 東日本弧系, 震源分布, 太平洋プレート, スラブ沈み込み, シミュレーション



第3図 地球の緯度と経線の長さ・緯線の長さとの関係
(日本地図センター(1999)に基づく)。

日本の標準地域メッシュ系のデータの処理を、表計算ソフトウェアなどで簡易的に行う場合などにはよく見受けられる。しかし、赤道から離れるに従って緯線長/経線長比は急激に小さくなる(第3図参照)ため、中緯度に位置し経線-緯線系に斜めに分布する日本列島(第2図)では、この方法は目的によっては大きな問題を生じる可能性がある。

世界地図を見ると、インドネシアは赤道(大円)に沿って細長く(概略的に緯度 5° N \sim 10° Sの範囲に)分布している。従って、直接的に経度-緯度直交座標系(また、赤道に接する円筒面上に地図を投影する通常のメルカトル図法)に基づく地図によって、インドネシアは非常に正確に縮小表現される。残念ながら、日本列島はその幸運には恵まれない。日本では、大縮尺 \sim 中縮尺(2.5千分の1 \sim 20万分の1程度)の地図投影法としてはユニバーサル横メルカトル図法が利用され、また投影地図に対応したUTM座標系・平面直角座標系が使用される場合(例えば、国土地理院・日本地図センター, 1998)が多い。しかし、この方法は、経度(および緯度)範囲ごとに北極点・南極点を通る大円に接する円筒面に地図を投影するものであり、日本列島が19区画に区分される。従って、日本全図のような小縮尺の地図の作成への適用には問題が多い。また、地図投影計算など(国土地理院・日本地図センター, 1998)がかなり複雑である。

さて、日本列島についても、比較的容易にもっともらしさが高い広域地図を作成する方法がある。その一つは、日本列島に沿った大円に接する円筒面に地

図を投影する斜めメルカトル(oblique Mercator; 斜方あるいは斜軸メルカトルとも呼ばれる)図法を利用することである。斜めメルカトル図法は、大円に近い軌道を持つ地球観測衛星の撮影画像から、地図の作成やデータ処理を行う場合などに応用されている(例えば、USGS, WWW)。この方法について、投影法から座標系へと発想を転換すれば、便宜的・仮想的に上記の大円を「擬似赤道」とした「擬似経度-緯度座標系」を設定することができる。本説では、その手法と地球科学的な応用例を紹介する。

2. 手法

2.1 基本

地球の座標系としては、球面座標系である北極-地球中心-南極(自転軸)と赤道(大円)に基づく経度-緯度座標系(longitude-latitude coordinate system; 180° W \sim 180° E, 90° N \sim 90° S)が一般に用いられる(第1図参照)。これに準じて、任意に地球中心を通る直線軸とそれに直交する大円(擬似赤道)を選び、その大円上の任意の点を座標系原点(0° E', 0° N')として、擬似的な経度-緯度座標系を作ることが可能である。本説では、これをPLLCS(pseudo-longitude-latitude coordinate system; 180° W' \sim 180° E', 90° S' \sim 90° N')と仮称し、以下2.2で説明する。

その具体例として2.3では、日本列島に擬似赤道に沿い、日本列島の中心を座標系原点(0° E', 0° N')とした場合の擬似的な経度-緯度座標系を、JILLS(Japanese-Islands-based pseudo-longitude-latitude coordinate system)と仮称して説明する。また2.4では、擬似的な経度-緯度座標系の利点と欠点を整理する。その後3.では、具体的な事例として東日本弧系の地球科学データ処理に利用した場合のものを、JILLS-EJA(JILLS for East Japan arcs)と仮称して紹介する。

2.2 座標系変換処理の流れと式群

本来の経度-緯度座標系(LLCS; Lon, Lat)から今回の擬似的な経度-緯度座標系(PLLCS; Lon', Lat')への変換処理は、3つの段階からなる。第4図に、処理の流れと式群を示す。まず、(1)本来の経度-緯度座標系(Lon, Lat)から、対応する3次元直交座標系(X, Y, Z)への変換を行う。次に、(2)この直交座標系

第1段階 経度-緯度座標系から3次元直交座標系への変換

(Lon, Lat (°) から X, Y, Z へ)

```
LonR = Lon / 180 * Pi
LatR = Lat / 180 * Pi
X = Cos(LatR) * Cos(LonR)
Y = Cos(LatR) * Sin(LonR)
Z = Sin(LatR)
```

第2段階 オイラー角を用いた3次元直交座標系の回転操作

(θz, θy, θx (°) が z-y-x 系回転操作の各回転角)

(X, Y, Z から X', Y', Z' へ)

```
S1 = Sin(θz / 180 * Pi); C1 = Cos(θz / 180 * Pi)
S2 = Sin(θy / 180 * Pi); C2 = Cos(θy / 180 * Pi)
S3 = Sin(θx / 180 * Pi); C3 = Cos(θx / 180 * Pi)
zyx(1,1) = C1 * C2
zyx(1,2) = -C2 * S1
zyx(1,3) = S2
zyx(2,1) = C3 * S1 + C1 * S2 * S3
zyx(2,2) = C1 * C3 - S1 * S2 * S3
zyx(2,3) = -C2 * S3
zyx(3,1) = S1 * S3 - C1 * C3 * S2
zyx(3,2) = C3 * S1 * S2 + C1 * S3
zyx(3,3) = C2 * C3
X' = zyx(1,1) * X + zyx(1,2) * Y + zyx(1,3) * Z
Y' = zyx(2,1) * X + zyx(2,2) * Y + zyx(2,3) * Z
Z' = zyx(3,1) * X + zyx(3,2) * Y + zyx(3,3) * Z
```

第3段階 3次元直交座標系から新経度-緯度座標系への変換

(擬似経度-緯度座標系への変換)

(X', Y', Z' から Lon', Lat' (°) へ)

```
LonR' = Atn(Y' / X')
LatR' = Atn(Z') / Sqr(X' * X' + Y' * Y')
Lon' = LonR' / Pi * 180
(ここで, X' < 0 の場合) Lon' = Lon' + 180
(ここで, Lon' > 180 の場合) Lon' = Lon' - 360
Lat' = LatR' / Pi * 180
```

第4図 通常の経度-緯度座標系から擬似経度-緯度座標系(PLLCS)への変換処理の流れと式。Lon, Latは通常の経度, 緯度, Lon', Lat'は求める擬似経度, 擬似緯度である。また, θz, θy, θxは, z-y-x系の回転操作によるz軸(経度0° E-緯度90° N方向), y軸(当初, 同90° E-0° N方向), x軸(当初, 同0° E-0° N方向)の回りのオイラー角である(第1図参照)。なお, 関数表記などには, プログラム言語(Visual Basic v.6)による表現法を用いた。Sqrは平方根, Atnはアークタンジェントを意味する。

(X, Y, Z)から別の直交座標系(X', Y', Z')への変換を行う。最後に, (3)この直交座標系(X', Y', Z')から擬似的な経度-緯度座標系(Lon', Lat')への変換を行う。

上記の(2)では, オイラー角(Euler angle)(例えば,

Wikipedia, WWW)を用いた座標系の回転操作を行っている。この操作には, 地球中心を通り直交する3つの回転軸(基準座標系の3軸)x軸, y軸, z軸の使用の順番によって12の方法(系)があるが, 今回の処理が最も簡単となるz-y-x系を用いた(地球は動かさずに, 地球に被せた網である座標系を回転させることに注意)。z-y-x系では, まず1)北極方向のz軸回りの回転(θz(°, 時計の針の回転方向が正)), 次に2)当初の北極点と座標系原点とに直交する座標系の方向(当初90° E, 0° Nの方向)のy軸回りの回転(θy(°, 同)), 最後に3)当初の座標系原点方向のx軸回りの回転(θx(°, 同))を行う(第1図参照)。

対象地域に応じて, 上記のオイラー角θz, θy, θxに適当な値を与えて第4図の一連の処理を行うことにより, 具体的に擬似経度-緯度座標系が設定されることとなる。

2.3 日本列島向けの擬似的な経度-緯度座標系 (JILLS)

ここではPLLCSの具体例として, 日本列島全体の利用に適した擬似的な経度-緯度座標系(JILLS)を取り上げる。通常の経度-緯度座標系(Lon, Lat)からJILLS(Lon-JI, Lat-JI; -JIはJILLSに基づく擬似系であることを示す; 以下同様)への変換には, 上記のθz, θy, θxを具体的に決める必要がある。JILLSの場合にその決定条件は, JILLSが日本列島に沿った擬似赤道(大円)を持ち, その座標系原点(0° E-JI, 0° N-JI)が日本列島の中心(本説では135° E, 35° N)にあたるということである。

今回, JILLS用のθz, θy, θxの各値の探索は, 次の方法で行った。すなわち, 第1表に示す3つの標点が擬似赤道近傍に調和的に位置する条件を満たすθz, θy, θxの値の組み合わせを求める。このために, θz, θy, θxを3つのパラメータとし, 各々の値を系統的に-180°から+180°まで変化させて(各1°刻み), 第4図の(1)~(3)の処理を繰り返し行い, 条件に合う組み合わせを求めた。この目的で, Microsoft社のVisual Basic v.6(以下VB6と略記)を用いてプログラム(PLLCS-QzQyQx-Search)を作成した。処理の結果得られた多数の組み合わせの中で, 最適の組み合わせはθz = -135°, θy = +35°, θx = -51°となった(第1表)。z-y-x系の座標系の回転操作でオイラー角θz = -135°, θy = 35°が最適とな

第1表 日本列島向けの擬似経度-緯度座標系(PLLCS, JILLS)への交換のために使用した標点, 探索条件と求められた最適のオイラー角(z-y-x系)の一覧表.

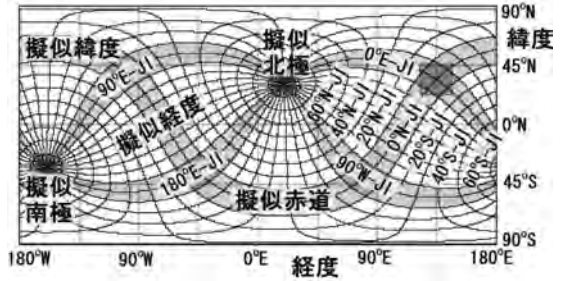
経度-緯度座標系			JILLS
標点 No.	Lon(No.) (°)	JILLSの探索条件	Lon-JI(No.) (°)
	Lat(No.) (°)		Lat-JI(No.) (°)
1	124.0000	Lon-JI(1) < Lon-JI(3)	-14.5107
	24.0000	Lat-JI(1) ~ 0	1.2288
2	135.0000	Lon-JI(2) ~ 0	0.0000
	35.0000	Lat-JI(2) ~ 0	0.0000
3	146.0000	Lon-JI(1) < Lon-JI(3)	13.7358
	46.0000	Lat-JI(3) ~ 0	1.2422
求められたオイラー角(z-y-x系)			
$\theta_z = -135^\circ; \theta_y = +35^\circ; \theta_x = -51^\circ$			
Lon-JI(No.)の負値は擬似経度の西経を示す。			

るのは, 原理的に当然である(第1図を参照).

通常の経度-緯度座標系からJILLSへの試料点群の座標変換処理は, 上記のプログラムを改変して行った(PLLCS-LonLat-Changeシリーズ). すなわち, 上記で得られた $\theta_z, \theta_y, \theta_x$ の3つの値を与え, 処理の対象となる経度-緯度系(Lon, Lat)の点データ群(テキスト形式)を入力ファイルから読み込んで, 各々第4図の(1)~(3)の処理を行って変換されたJILLS(Lon-JI, Lat-JI)の点データ群を出力ファイル(テキスト形式)に書き出した. 第5図には, この方法を用いて網羅的に計算した地球の経度-緯度座標系とJILLSとの関係を, 前者を基準にした地図上に示す. なお, JILLSから通常の経度-緯度座標系への座標変換は, 正負を反転したオイラー角を用いた逆順序の逆回転操作(x-y-z系)で可能である(例えば, Wikipedia(WWW)を参照).

第6図には, JILLSを用いた日本列島の地図(海岸線・県境)を示す. なお, 使用した国土地理院(2000)のデータは旧日本測地系によっているが, 今回対象とした小縮尺の地図の場合には問題は小さい. 第6図には, 比較のために第2図の経度-緯度座標系のメッシュも表示した. 第6図を反時計回りに 51° 回転させて(経度 135° Eの線が縦方向に平行となる), 地図の縁辺部とともに擬似経線-緯線群を消去すれば, もっともらしさが高い長方形の日本地図とすることができる(第2図と比較参照されたい).

JILLS(第6図)では, 日本列島は概略的に擬似経度が 15° W~ 15° E-JIの範囲内, 擬似緯度が 4° N~ 4° S-JIの範囲内にある(小笠原諸島などの一部の地



第5図 通常の経度-緯度座標系と日本列島向けの擬似経度-緯度座標系(PLLCS, JILLS)の全地球的な関係図. 経度(横軸)-緯度(縦軸)の直交座標系の上にJILLSを表示した. 右上の濃灰色の四角は, 第2図の範囲を示す.

域を除く). 従って, 広域的に日本列島が長さ, 面積, 相対方向などに関して, もっともらしく平面地図上に表現されている. すなわち, 上記1.で述べたインドネシアの地図環境に, 日本列島を擬似的に置いたことになる.

2.4 擬似的な経度-緯度座標系の利点と欠点

上述した擬似的な経度-緯度座標系(PLLCS)の利点としては, 以下の点が挙げられる.

(G1) 広域的な地域, 特に細長い地域(擬似緯度範囲が擬似赤道から $\sim 15^\circ$ 以内)について, 簡単な直交座標系を用いてもっともらしさが高い地図を作成することができる.

(G2) 擬似経線・擬似緯線の各 1° がともに長さ約111kmである(第3図参照)ため, 地点間の距離や面積などを, 容易に計算・比較することができる.

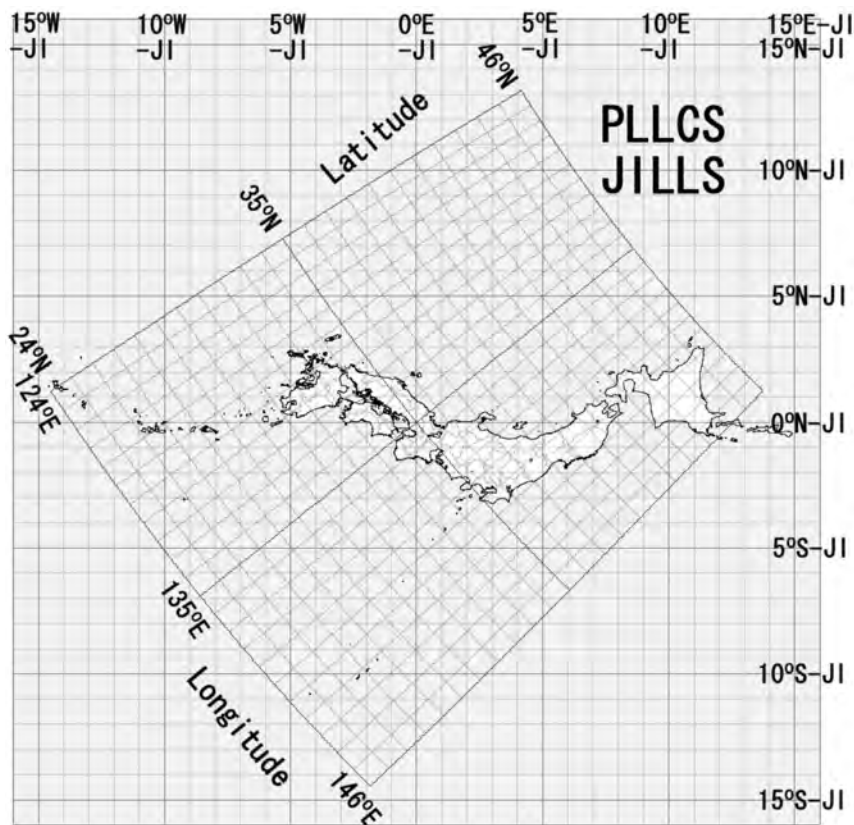
(G3) 上記の地域について, 必要に応じて任意に, 長さ・幅・角度・面積について均一性の高いメッシュ系・グリッド系を, 容易に作成・利用できる.

(G4) 上記の地域について, 広域的な地下深部までの断面図として, 大円に沿ったもっともらしさが高いものが容易に作成できる.

(G5) 通常の経度-緯度座標系からの座標系変換計算が, 比較的容易である(逆変換計算も同様).

(G6) 通常の経度-緯度座標系からの単純明快な変換方法であるため, 共通規格的な方法として様々なに利用し易い.

一方, PLLCSの欠点としては, 以下の点が挙げられる.



第6図 日本列島向けの擬似経度-緯度座標系 (PLLCS, JILLS) で地図表示した日本列島 (座標変換操作のオイラー角は, $z-y-x$ 系で $\theta_z = -135^\circ$, $\theta_y = +35^\circ$, $\theta_x = -51^\circ$). 比較のために通常の経度-緯度座標系 (第2図参照) も表示した. 日本列島 (国土地理院, 2000) の大部分は, 擬似緯度が擬似赤道に沿った狭い範囲内 ($4^\circ N \sim 4^\circ S$ -JI; 小笠原諸島などを除く) にある.

(B1) 基本的に, 通常の経度-緯度座標系からの変換処理作業が必要である.

(B2) 地球が楕円体である点について補正を行っていない. なお, 地球は球体に近いため(扁平率は約 $1/298$), 非常に高い精度が求められる場合を除いてその点での問題は小さいと考えられる.

(B3) 通常の経度-緯度座標系との混乱を生じる可能性がある. 従って, 表記などに十分な注意を払うなどの必要がある.

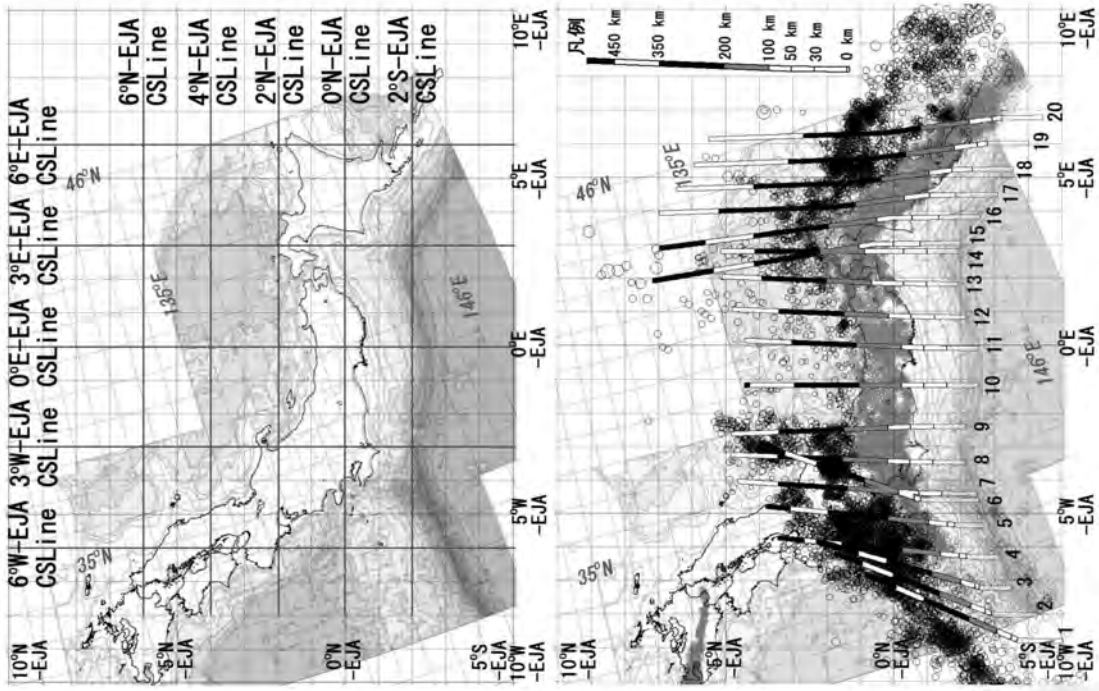
(B4) 特に方位 (実際の北極・南極や赤道との関係) について, 分かり難くなる (第5図参照).

PLLCSは, 地球科学情報の解析・表示に有力な手法であり, 上記の利点・欠点を考慮の上, 対象地域や検討対象の条件に応じた多様な利用が望まれる.

3. 応用事例

3.1 東日本弧系向けの擬似的な経度-緯度座標系 (JILLS-EJA)

ここでは事例として, 東日本弧系 (千島弧南部, 東北日本弧, 伊豆-小笠原弧北部) の震源分布をもっともらしく地図上に表示し, 太平洋プレート-スラブの沈み込みとの関係の解析を進める目的で, それに適した擬似的な経度-緯度座標系 (JILLS-EJAと仮称) を作ることにする. JILLS-EJAでは, 擬似赤道を東北日本弧に沿わせ, 座標系原点を東北日本弧の中央部 ($141^\circ E$, $39^\circ N$) に置く. また, 擬似北極 (擬似経線) の方向を, 太平洋プレートの進行方向と想定される WNW 方向に置く (通常の経度-緯度座標系で, 茂野 (2008a) の表現法では $+70^\circ$).



第7図 東日本弧系向けの擬似経度-緯度座標系(PLLCS, JILLS-EJA)によって地図表示した東日本弧系(座標変換操作のオイラー角は、 $z-y-x$ 系で $\theta_z = -139^\circ$, $\theta_y = +39^\circ$, $\theta_x = -70^\circ$)。擬似経度が縦方向に配置されていることに注意。左は、海岸線(国土地理院, 2000), 水深(日本海洋データセンター, WWW), 通常の経度-緯度座標系とともに, 第8図の10の垂直断面線(CSL)の位置を示す。右は、海岸線・水深とともに, 深度100~200km(灰色)および200km以深(黒色)の震源分布(気象庁, 2006)と太平洋プレート-スラブの分布の簡易シミュレーション結果を示す。シミュレーションの方法は茂野(2008a)を, そのパラメータ値は第2表を参照。

上述した2.3の方法によれば, 条件を満たすオイラー角は $\theta_z = -139^\circ$, $\theta_y = +39^\circ$, $\theta_x = -70^\circ$ となる(第7図)。処理対象データの経度-緯度座標系(Lon, Lat)からJILLS-EJA(Lon-EJA, Lat-EJA)への座標変換についても, 2.3と同じ方法で処理可能である。

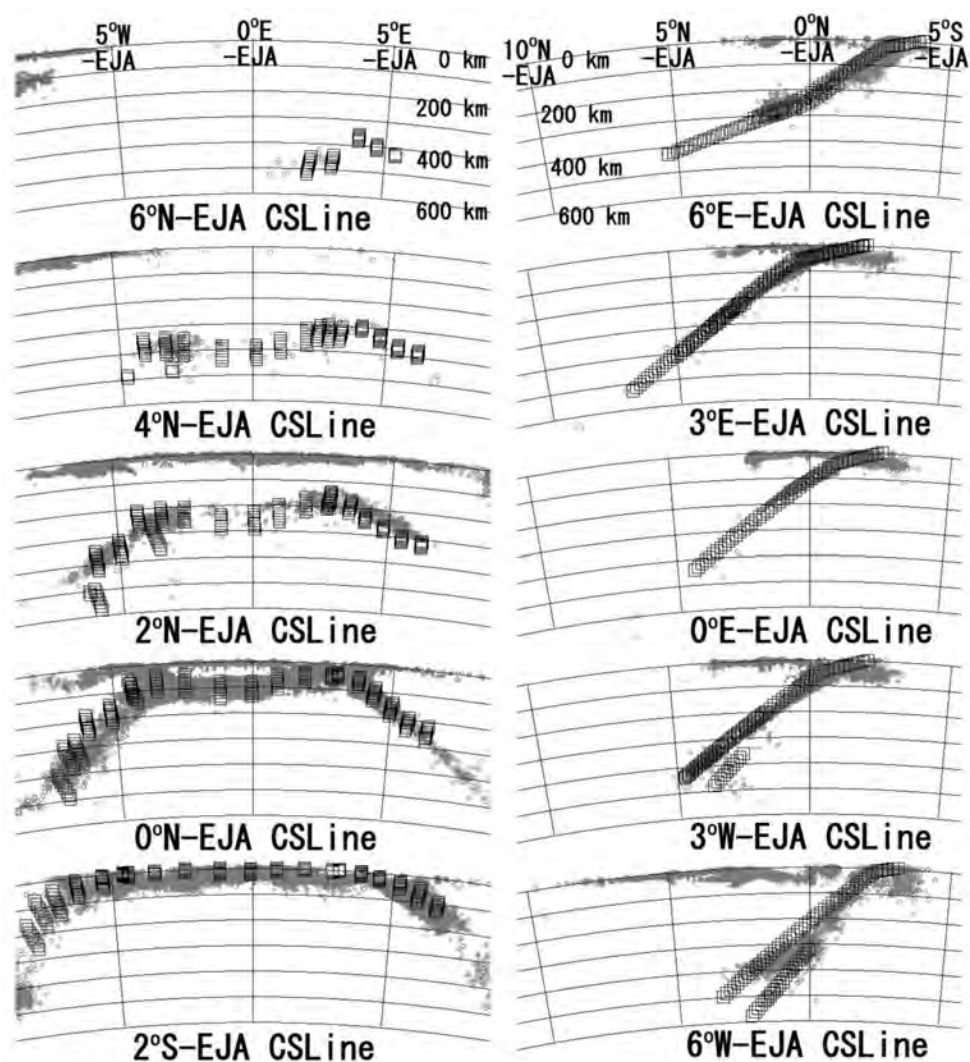
3.2 JILLS-EJAを利用した太平洋プレート-スラブの沈み込みの解析・表示の方法と結果

茂野(2008a)は, 日本周辺の深部震源分布と海洋プレート-スラブの沈み込みの関係を, 簡易的なスラブの斜め沈み込みの幾何学モデルと数値シミュレータ(SSSS)を用いて検討した。しかし, この場合は通常の経度-緯度座標系をそのまま(ただし, 経線長/緯線長比を1.22(緯度 35° Nの値)に設定)平面3次元直交座標系として用いたため, 特に広域的な(南北方向に幅広い)太平洋プレート-スラブの沈み込みの検討には問題が残った(茂野, 2008a, p.20(3))。今回, 3.1

第2表 東日本弧系下へ沈み込む太平洋プレート-スラブの分布の簡易シミュレーション(SSSSによる; 茂野(2008a)参照)に使用したパラメータ値の一覧表。

EJA No.	Lon deg	Lat deg	Lon-EJA deg	Lat-EJA deg	VA deg	0A cm/y	0p1 deg	0d1 deg	Time1 My	0p2 deg	0d2 deg	Time2 My	0p3 deg	0d3 deg	Time3 My
1	143.0	29.0	-8.802	-5.046	10.0	0	40	10	1.5	40	65	9.0			
2	142.5	30.0	-8.017	-4.266	10.0	0	40	10	1.5	40	62	9.0			
3	142.0	31.0	-7.228	-3.533	10.0	0	30	10	1.0	30	55	9.0			
4	142.0	32.0	-6.289	-3.188	10.0	0	20	10	1.0	20	41	9.0			
5	142.0	33.0	-5.351	-2.838	10.0	0	20	10	1.0	20	40	9.0			
6	142.0	33.8	-4.601	-2.556	10.0	0	40	10	2.0	40	60	9.0			
7	142.0	34.0	-4.413	-2.466	10.0	0	20	15	2.0	20	35	9.0			
8	142.0	35.0	-3.476	-2.136	10.0	0	10	15	2.0	10	35	9.0			
9	142.5	36.0	-2.396	-2.163	10.0	0	-10	15	2.0	-10	35	9.0			
10	143.5	37.0	-1.172	-2.551	10.0	0	0	15	2.0	0	35	9.0			
11	144.0	38.0	-0.095	-2.550	10.0	0	10	15	2.0	10	35	9.0			
12	144.0	39.0	0.834	-2.177	10.0	0	10	15	2.0	10	35	9.0			
13	144.2	40.0	1.819	-1.946	10.0	0	10	15	2.5	10	35	9.0			
14	144.7	40.9	2.797	-1.957	10.0	0	0	15	3.0	0	35	9.0			
15	144.9	41.1	3.040	-2.020	10.0	0	-35	15	3.0	-35	45	12.0			
16	146.0	41.6	3.823	-2.586	10.0	0	-35	15	3.0	-35	40	12.0			
17	147.0	42.0	4.489	-3.106	10.0	0	-35	15	2.5	-35	40	6.0	-35	20	12.0
18	148.0	42.5	5.251	-3.576	10.0	0	-35	15	2.0	-35	40	6.0	-35	20	12.0
19	149.0	43.0	6.017	-4.029	10.0	0	-35	15	1.5	-35	40	6.0	-35	20	12.0
20	150.0	43.5	6.787	-4.466	10.0	0	-35	15	1.5	-35	40	6.0	-35	20	12.0

Lon-EJAの負値は擬似経度の西経を, Lat-EJAの負値は擬似緯度の南緯を示す。灰色は, 茂野(2008a)から追加・修正した部分を示す。



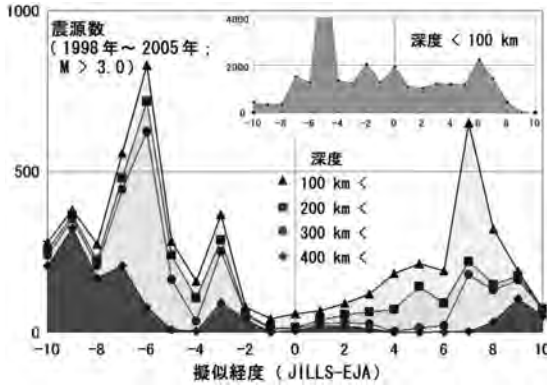
第8図 東日本弧向けの擬似経度-緯度座標系 (PLLCS, JILLS-EJA) によって垂直断面図上に表示した震源分布と太平洋プレートスラブの分布の簡易シミュレーション結果。左は、5つの擬似東西断面図 (データの刈り幅は断面線から片側0.5°) を示す。右は、5つの擬似南北断面図 (同) を示す。断面線の位置は第7図を参照。震源データは気象庁 (2006) による。シミュレーションの方法は茂野 (2008a) を、そのパラメータ値は第2表を参照。

で述べた東日本弧系へ最適化されたJILLS-EJAに基づいて、もっともらしさが改善された位置空間を使用した検討を試みた。

今回の簡易的なプレートスラブの斜め沈み込みの数理モデルと数値シミュレーションの方法は、茂野 (2008a) と基本的に同一である。ただし、通常の経度-緯度座標系の代わりに、JILLS-EJAを使用した点が異なる。

今回の簡易シミュレーションに使用したパラメータ

値を第2表に示す。今回の太平洋プレートスラブの簡易シミュレーションでは、茂野 (2008a) と類似のパラメータ値を使用したが、以下の3点に調整・変更を加えた。(C1)シミュレーションの点の配置を千島海溝に沿って北東方向に延長し、4点 (No. 17~20) を追加した。(C2) 上記の追加シミュレーション点では、スラブの進行を従来の2段階モデルから3段階モデルに換えて処理を行った。また、パラメータ値について若干の調整を加えた。(C3)シミュレーションの全期間



第9図 東日本弧系向けの擬似経度-緯度座標系(PLLCS, JILLS-EJA)に基づいた、擬似経度範囲別と深度範囲別の分布震源数(M > 3.0). 右上の小図は深度100km以浅, 本体図は深度100km以深の震源数を示す. 対象とした擬似緯度範囲は、5° S~10° N-EJAである(ただし、琉球弧周辺の震源は除外). 震源データは気象庁(2006)による. 擬似経度の負号は西経を示す.

(Time2あるいはTime3)を、伊豆-小笠原弧と東北日本弧に沿ったシミュレーション点では900万年間に、千島弧に沿った点では1200万年間に揃えた. なお、東日本弧系に対する太平洋プレートの移動速度は10 cm/yで、相対方向は3.1の条件から、JILLS-EJAを用いて茂野(2008a)の表現法で0°となっている.

第7図の平面図には、JILLS-EJAに基づいて深部震源分布(深度100km以深)とともに、スラブの分布(概略的に深部震源分布がスラブの上面に対応すると想定)の簡易シミュレーション結果を示す. 第8図の断面図群には、JILLS-EJAに基づいて震源分布とともに、スラブ分布の簡易シミュレーション結果を示す. さらに第9図には、JILLS-EJAの擬似経度範囲別(および深度範囲別)に分布震源数(マグニチュード(以下Mと略記)が3.0以上)を整理した. なお、作図プログラムは、平面図にはQMM(およびQMM-CLineなどの改良版)、断面図にはQMM-Crossの改良版(地球に対応した弧状表示)を用いた(地質調査総合センター(2007), 茂野(2008b)参照).

3.3 太平洋プレート-スラブの沈み込みについての若干の考察

東日本弧周辺の震源分布と太平洋プレート-スラブの沈み込みを巡っては、多数の研究が行われており

様々な考え方がある(例えば、宇津, 1999)が、ここではJILLS-EJAによる第7図~第9図に基づいて、若干の考察を行うこととする.

本地域の深部震源分布について特に興味深い点として、以下の(E1)~(E3)が挙げられる.

(E1) 第9図が統計的に示すように、東日本弧系には擬似経度と深度によって、深部震源分布(地震活動度)に大きな不均一性が存在する. 中央の東北日本弧(2° W~2° E-EJA)は、深部震源分布に顕著に乏しい. 一方、伊豆-小笠原弧北部(8° W~3° W-EJA)と千島弧南部(4° E~8° E-EJA)の両者は、深部震源分布に富む. しかし、前者では深度300km以深の深い地震、後者では深度100~300kmの地震が卓越する. なお、第9図右上の小図に示すように、深度100km以浅の震源は、分布密度がより高く、分布は均一的である(対象地域の両端の8° W-EJA以西と8° E-EJA以东および特異的な5° W-EJAなどを除く).

(E2) 第8図の擬似南北断面図では、中央の東北日本弧(0° E-EJA CSL)では深部震源分布が直線的に分布しているのに対して、両側の伊豆-小笠原弧北部(6° W-EJA CSL)と千島弧南部(6° E-EJA CSL)では、震源分布が曲線的(斜めS字状)になっている. 一方、擬似東西断面図では、中央の東北日本弧では深部震源分布が凹型となる傾向を、両側の伊豆-小笠原弧北部と千島弧南部では、各々擬似西方と擬似東方に単傾斜する傾向を示す.

(E3) 島弧会合部については、第9図の伊豆-小笠原弧と東北日本弧の会合部(5° W~2° W-EJA)と千島弧と東北日本弧の会合部(2° E~5° E-EJA)とに、深部震源分布(深度200km以深)の高密度化が認められる. 特に前者では、深部震源分布(特に深度300km以深)の複雑化と高密度化が顕著である.

太平洋プレート-スラブの斜め沈み込みの簡易シミュレーション結果を参考に、上記の(E1)~(E3)の震源分布に対応して、以下の(S1)~(S3)が推測される.

(S1) 中央の東北日本弧では、日本海溝から太平洋プレート-スラブが直交的に緩傾斜(低い θd 値)で沈み込んでいる. このため、スラブは周辺のマントルから受ける抵抗が比較的小さく、上記(E1)のように深部地震は相対的に発生し難い傾向にあると推測される.

(S2) これに対して、両側の伊豆-小笠原弧北部と

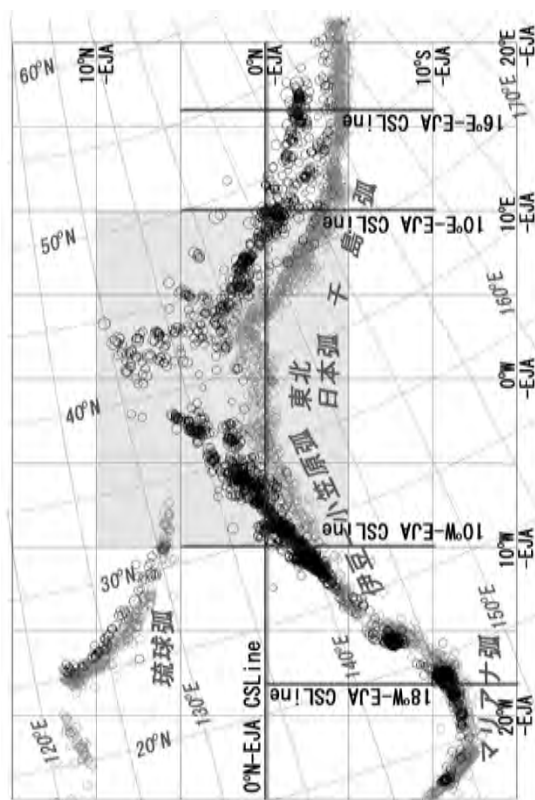
千島弧南部では、太平洋プレート-スラブが斜交的により急傾斜で沈み込んでいる。このため、幾何学的にスラブは周辺のマントルから受ける抵抗が相対的に大きく、上記 (E2) のように深部地震が発生し易い傾向にあると推測される。プレートの進行方向とスラブの見掛けの沈み込み水平方向との不一致の程度 ($\theta_p - \theta_A$) に応じて、今回の擬似経度の単位幅あたり(プレートの進行方向に平行)のスラブの表面積には $1/\cos(\theta_p - \theta_A)$ の係数が掛かるため、 $\theta_p - \theta_A$ が大きいほど沈み込みへの抵抗は大きくなると考えられる。実際は、この効果を補正した以上に、伊豆-小笠原弧北部と千島弧南部の深部震源数は多い(第9図参照)。

(S3) 島弧会合部では、両側の島弧下に沈み込む2つのスラブが幾何学的に収斂・衝突するため(例えば、Aoki, 1974; 宇津, 1999; 茂野, 2008a), 深部震源数が増加すると推測される。上記 (E3) のように、伊豆-小笠原弧と東北日本弧の会合部および千島弧と東北日本弧の会合部ともに、その傾向が明らかである。特に、前者では伊豆-小笠原弧下に沈み込む太平洋プレート-スラブの傾斜角度 (θ_d) が大きいため収斂・衝突の程度が大きく(茂野, 2008a), 深部震源数がより多くまた複雑化していると推測される。

今回のJILLS-EJAを利用した上記の検討結果は、基本的には茂野(2008a)の結果と整合的であるが、特に以下の2点が特記される。

(A1) 日本列島の遙か西方(擬似経度-緯度範囲が $0^\circ \text{E} \sim 4^\circ \text{E-EJA}$; $5^\circ \text{N} \sim 9^\circ \text{N-EJA}$) に分布する最深部(450km以深)の震源分布(第8図・第9図)については、茂野(2008a)の推測と同様に千島弧と東北日本弧の会合部下に沈み込み衝突する太平洋プレートの2つのスラブによって、かなりの程度説明することが可能と考えられる。なお、千島弧(背弧海盆としてオホーツク海を持つ)については、茂野(2008a)と同様にスラブ沈み込み期間を長く(1200万年間)想定する必要がある。

(A2) 千島弧下のスラブはセグメント化しており、今回シミュレーションを追加した千島弧の4点(No. 17~20)については、上記(A1)の2点(No. 15・16)とは異なって、震源分布が深度200~300kmで塊状に集中化する地域にあたる。このため、3.2で述べたように、スラブの沈み込みのモデルを3段階化する必要がある。第3段階目の沈み込み傾斜角度 (θ_{d3}) を低く調整し

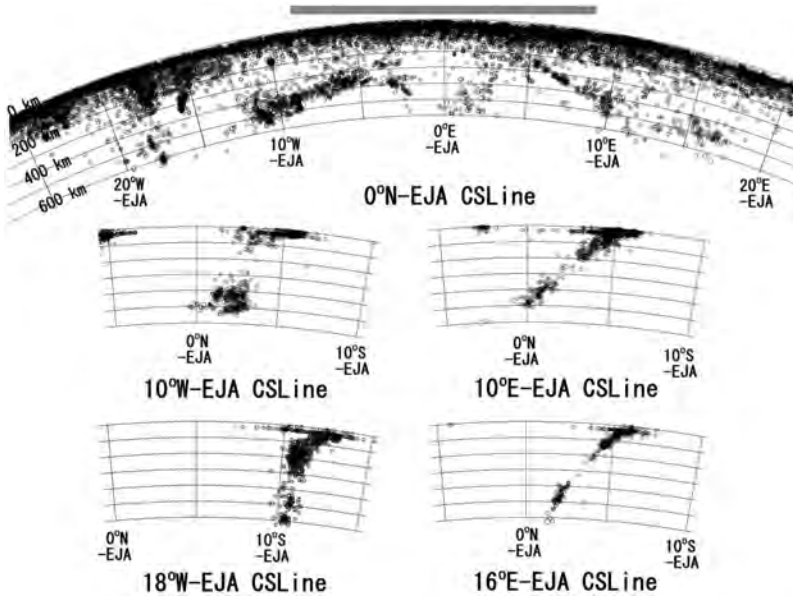


第10図 広域的な千島弧北部~マリアナ弧周辺の深部震源分布(1990年以降; $M > 4.0$)の平面図。擬似経度が縦方向に配置されていることに注意。USGS (WWW)が提供するデータに基づいて、深度100~200km(灰色)および200km以深(黒色)の震源分布を示す。また、第11図の5本の断面線の位置を示す。東日本弧系向けの擬似経度-緯度座標系(PLLCS, JILLS-EJA)を用いて地図表示したが、合わせて通常の経度-緯度座標系メッシュも示した。中央部の薄い灰色の領域は、第7図の範囲を示す。

た。従って、シミュレーション結果(第8図・第9図)は、スラブ先端の最深部の深度が400km程度に留まっている。

3.4 千島弧北部~マリアナ弧間の深部震源分布との関係について

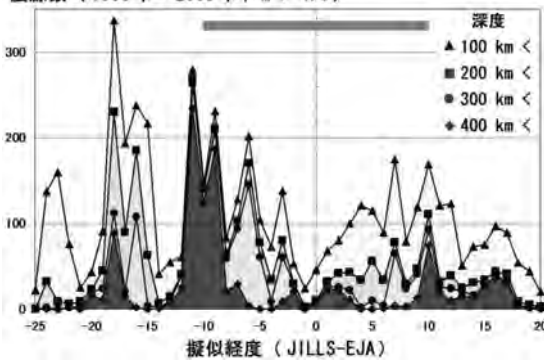
近年、世界的に地震関係の各種データがインターネットで提供されるようになった。今回、USGS (WWW)が編集・公開する震源カタログのデータを用いて(例えば、酒井, WWW), 上記の東日本弧系より



第11図

広域的な千島弧北部～マリアナ弧周辺の震源分布(1990年以降; $M > 4.0$)の垂直断面図。東日本弧系向けの擬似経度-緯度座標系(PLLCS, JILLS-EJA)に基づく、断面線の位置は、第10図を参照。上の擬似東西断面図は $15^{\circ} S \sim 15^{\circ} N$ -EJAの範囲内の、下の4つの擬似南北断面図は各断面線から片側 1° の刈り幅内の震源分布(USGS, WWW)を示す。上の灰色の線は、第8図の範囲を示す。

震源数(1990年～2009年; $M > 4.0$)



第12図 広域的な千島弧北部～マリアナ弧周辺の擬似経度範囲別と深度範囲別の分布震源数(深度 100km 以深; $M > 4.0$)。東日本弧系向けの擬似経度-緯度座標系(PLLCS, JILLS-EJA)を使用した。対象とした擬似緯度範囲は、 $15^{\circ} S \sim 15^{\circ} N$ -EJAである(ただし、琉球弧周辺の震源は除外)。震源データは、USGS(WWW)による。擬似経度の負号は西経を示す。灰色の線は、第9図の範囲を示す。

も広域的に千島弧北部～マリアナ弧の震源分布(1990年以降; $M > 4.0$)の表示を試みた。

第10図の平面図、第11図の断面図、第12図の頻度分布図は、それぞれ第7図、第8図、第9図の広域版にあたる。これらの図も、3.1で述べたJILLS-EJAに基づいており、北緯 $10^{\circ} N \sim 60^{\circ} N$ の広範囲の対象地

域について、もっともらしさが高い空間表現となっている。震源分布は、擬似緯度が $12^{\circ} S \sim 12^{\circ} N$ -EJAの好ましい範囲内に納まっている。

第10図～第12図に示すように、太平洋プレートスラブに起因する深部震源の分布は不均一性が高く多様であるが、上述した3.2～3.3との関係で重要な点として、以下の(R1)～(R2)が挙げられる。

(R1) 第9図と第12図を比較すると、前者の主要部($8^{\circ} W \sim 8^{\circ} E$ -EJA)については深部震源分布がかなりよく一致している。しかし、前者の縁辺部については、不一致が著しいという問題がある。これは、地震観測点配置の制約によって、日本列島の周辺の島嶼部では小規模な地震($M < 3.0$)の震源が必ずしも十分には決定・報告されていないことに起因すると推測され、問題の地域の深部震源分布については第12図(1990年以降; $M > 4.0$)の方が妥当性が高いと考えられる。

(R2) 第10図～第12図は、伊豆-小笠原弧($12^{\circ} W \sim 3^{\circ} W$ -EJA)と千島弧($3^{\circ} E \sim 18^{\circ} E$ -EJA)では、全域的に深部震源が分布しており(不均一性は存在するが)、深部震源分布に乏しい東北日本弧($2^{\circ} W \sim 2^{\circ} E$ -EJA)が特異的であることを示している。このことは、基本的に上記3.2～3.3の検討結果を支持している。なお、第11図の擬似断面図群に示されるように、伊豆-小笠原弧と千島弧では、各々東北日本弧との会合部から遠ざかるに従って震源の最深深度が深く

なり、震源分布の傾斜が急角度化するとともに、深度200～400kmに震源空白域が顕著となる傾向にあり興味深い。

なお、第10図～第12図には伊豆-小笠原弧の南方のマリアナ弧(概略的に13°N～21°N; 25°W～15°W-EJA)とその側方の地域、琉球弧なども含まれるが、本説では検討の対象外とした。

4. おわりに

本説は、電子地理・地球科学情報を利用した地熱資源の評価手法の継承-発展的な研究(茂野, 2008a, 2008b, 2008c, 2009など)として、筆者が進めている各種の検討の一部を紹介したものである。その端緒は、茂野(2008a)の懸案問題を解決することにあつた(上記3.2を参照)が、検討の基礎とした擬似経度-緯度座標系(PLLCS; 特に日本列島向けの場合にJILLSシリーズ)手法の有効性の紹介を中核に、今回取りまとめを行った。

擬似経度-緯度座標系を利用することによって、様々な地球科学情報の処理・表示の可能性が広がると思われる。本説の3.では、大円に沿った地球深部(深度～600kmまで)の断面図表示、均一刈り幅データの統計処理などが、非常に広い地域についても比較的容易に行えることを事例によって示した。

擬似経度-緯度座標系の手法は、直交座標軸回転操作の3つの角度(オイラー角)を適当に決めることによって、地球上の様々な地域・国に対して適用が可能である。特に、南米のチリ国のように南北方向に伸びた地域、北欧のノルウェー国のように高緯度の細長い地域などでは利用価値が高いと思われる。なお、Longley *et al.* (2005, p.111・p.121)によれば、英国の公的な地理グリッド系(National Grid of Great Britain)は、斜めメルカトル図法で作成した地図に基づくようである(階層的に一辺500kmから100mの正方形からなり、アルファベットによる系統的なグリッド名を持つ)。

本説の1.で紹介した斜めメルカトル図法による地図の作成は、近年のパーソナルコンピュータと市販の地理情報システム(GIS)の普及化・高機能化によってかなり容易に可能となっている。例えば、米国のESRI社のArcGIS、MicroImages社のTNTmipsなどでは、地図投影法の選択として斜めメルカトル図法の使用

が可能である。また、UNIX系のオープンソフトウェアであるThe Generic Mapping Tools (GMT) (University of Hawaii, WWW)でも、斜めメルカトル図法による地図の作成などが可能である。本説では、地質調査総合センター(2007)の簡易統合的手法に継承-発展的なソフトウェア群を作成・使用したが、上記の市販のソフトウェアなどを上手く利用することによつても、擬似経度-緯度座標系の手法を様々な問題に適応することが可能と思われる。

本説の2.で紹介したオイラー角を用いるデータ処理法は、幅広い応用分野を持っている。工学分野では、3次元のロボット腕の操作やコンピュータ・ゲームのアルゴリズムなどに広く使われているようである(例えば、Dunn and Parberry, 2008)。天文学分野では、赤道座標系、黄道座標系、銀河座標系間の座標系変換処理に利用されている(例えば、海老沢, WWW)。本説の取りまとめでは、特に海老沢(WWW)の講義資料が参考となった。

地球科学分野では、地球表層のプレート運動を表現するために、オイラーの回転定理(Euler's rotation theorem; オイラーの定理、固定点定理などとも呼ばれる)に基づいてオイラー回転、オイラー極などの用語が使用されている(例えば、上田, 1989; 新妻, 2007; Kearey *et al.*, 2009)。プレート運動の地図上の表示・解析では、斜めメルカトル図法が多用される。この場合は通常、各プレートの進行方向が本説の擬似赤道・擬似緯線に平行に揃うように、各プレートについて3つのオイラー角の設定(すなわち、各オイラー極の推定・検定)が行われる。これは、3.1で述べた島弧系下へのプレートスラブの沈み込みの検討の場合(プレートの進行方向を擬似経線に平行にする)に対して、直交する設定になっていることに注意を願いたい。

文 献

- Aoki, H. (1974): Plate tectonics of arc-junction at Central Japan. *Jour. Phys. Earth*, 22, 141-161.
- 地質調査総合センター(2007):九州-大分-豊肥地域の地熱データ処理集「地理情報システム(GIS)を利用した地熱資源の評価の研究(2001-2005年度)」のまとめと簡易統合的処理データ・プログラム集(CD-ROM)。数値地質図, GT-3.
- Dunn, F. and Parberry, I. (松田晃一 訳) (2008): 事例で学ぶゲーム3D数学。オライリー・ジャパン, 484p.
- Kearey, P., Klepeis, K. A. and Vine, F. J. (2009): *Global Tectonics*, 3rd ed. Wiley-Blackwell, 482p.
- 気象庁(2006):地震年報平成17年(CD-ROM)。

- 国土地理院・日本地図センター(1998):数値地図ユーザーズガイド(第2版補訂版). 471+29p.
- 国土地理院(2000):数値地図25000(行政界・海岸線)(CD-ROM版).
- Longley, R. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J. and Rhind, D. W. (2005): *Geographic Information Systems and Science, 2nd ed.* Wiley, 517p.
- 日本地図センター(1999):地理情報データハンドブック. 204p.
- 新妻信明(2007):プレートテクトニクス -その新展開と日本列島-. 共立出版, 292p.
- 茂野 博(2008a):海洋プレートスラブの斜め沈み込みの簡易数値モデルと数値シミュレーション -電子地球科学情報の統合解析による近畿地方の高温温泉の検討(1)-. 地質ニュース, no.646, 6-21.
- 茂野 博(2008b):プレートテクトニクスに基づく湯の峰・有馬温泉の生成環境のモデル化 -電子地球科学情報の統合解析による近畿地方の高温温泉の検討(2)-. 地質ニュース, no.647, 25-38.
- 茂野 博(2008c):相模トラフ域-関東平野におけるフィリピン海プレートスラブの沈み込み -公開電子地球科学情報を利用した簡易モデル化-数値シミュレーションによる検討-. 地質ニュース, no.648, 20-33.
- 茂野 博(2009):九州の火山・地熱活動の時空変化とフィリピン海プレートスラブの沈み込みの関係 -電子地球科学情報を利用した簡易モデル化-シミュレーションによる検討-. 地質ニュース, no.656, 10-28.
- 宇津徳治(1999):地震活動総説. 東大出版会, 876p.
- 上田誠也(1989):プレート・テクトニクス. 岩波書店, 268p.
- インターネット-WWWのURL一覧(2009年7月時点)
- 海老沢 研:宇宙科学II講義ノート.
(<http://plain.isas.jaxa.jp/~ebisawa/TEACHING/2008Komaba/2008Komaba.pdf>)
- 株式会社オープンGIS:TNT入門, 地図投影の概要.
(<http://www.opengis.co.jp/getstartj/project.pdf>)
- 日本海洋データセンター:500mメッシュ水深データ(J-EGG500).
(http://jdoss1.jodc.go.jp/cgi-bin/1997/depth500_file.jp)
- 酒井 敏:世界の地震.
(<http://www.gaia.h.kyoto-u.ac.jp/~sakai/visual/1/world/world.htm>)
- United States Geological Survey: Earthquake Hazards Program.
(<http://neic.usgs.gov/neis/epic/>)
- United States Geological Survey: Map Projection.
(<http://edc2.usgs.gov/pubslists/MapProjections/projections.php>)
- University of Hawaii: The Generic Mapping Tools (GMT).
(<http://gmt.soest.hawaii.edu/>)
- Wikipedia: Euler angle.
(http://en.wikipedia.org/wiki/Euler_angles)
- Wikipedia: Map projection.
(http://en.wikipedia.org/wiki/Map_projection)

SHIGENO Hiroshi (2009): Pseudo-longitude-latitude coordinate system (PLLCS) for Japanese Islands - An application case study of the Pacific plate subduction beneath the East Japan three-arc system.

< 受付: 2009年7月14日 >