

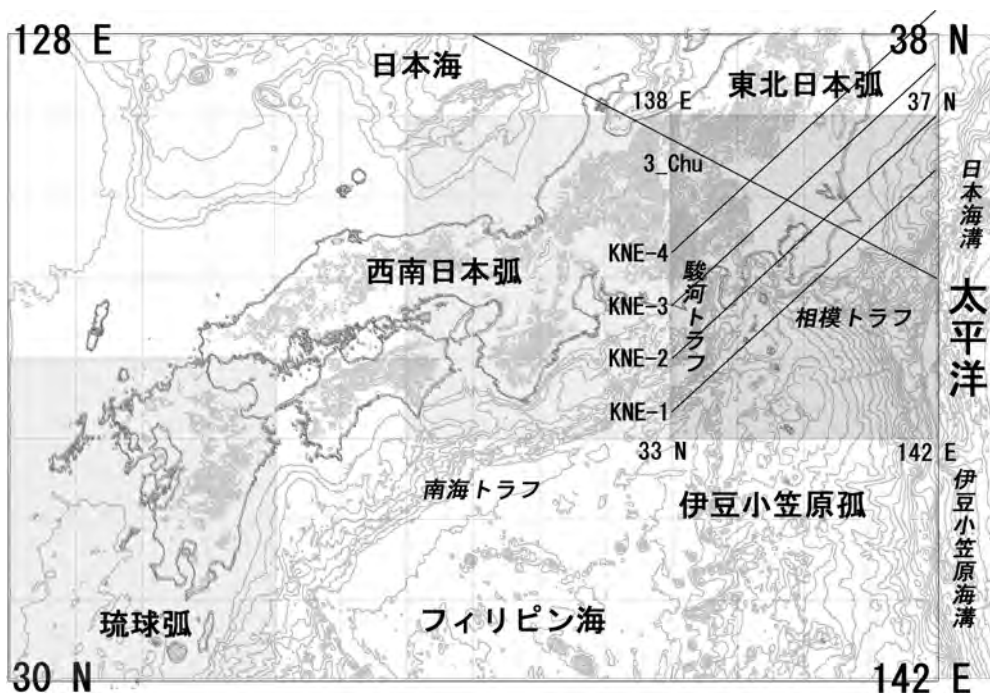
相模トラフ域-関東平野におけるフィリピン海プレート スラブの沈み込み-公開電子地球科学情報を利用した 簡易モデル化-数値シミュレーションによる検討-

茂野 博¹⁾

1. はじめに

日本最大規模の関東平野は、地質学的には関東堆積盆地、関東構造盆地とも呼ばれており、新第三紀以降の堆積岩類が厚く(最大厚4000m程度)分布し水溶性型の天然ガス資源も賦存している。本地域の中心部は日本最大の大都市圏であり、エネルギー需要が非常に大きい。このため1973年頃の「第1次エネ

ギー(石油)危機」の後に、厚い堆積岩類中に賦存する地層水を「深層熱水」として大規模に利用する可能性が検討された(例えば、茂野, 1982)。しかし、関東平野の地温勾配は日本の堆積盆地の中では最も低く(～20℃/km)、その開発経済性には問題が多いことが明らかにされた(例えば、安藤, 1982)。その後進展したプレートテクトニクスの知見に基づけば、その原因は関東平野が島弧屈曲-衝突域に生成した新しい



第1図 関東地方の索引図と断面線の位置図。フィリピン海プレートの北縁部について、今回対象とした関東地方の範囲(第3図)とともに近畿地方(茂野, 2008b)・九州地方(地質調査総合センター, 2007)の範囲を淡灰色で示す。また、第2図・第5図の断面図の位置を示す。背景の標高データは国土地理院(1997)、水深データは日本海洋データセンター(WWW)による。

1) 産総研 地図資源環境研究部門(地質調査総合センター)

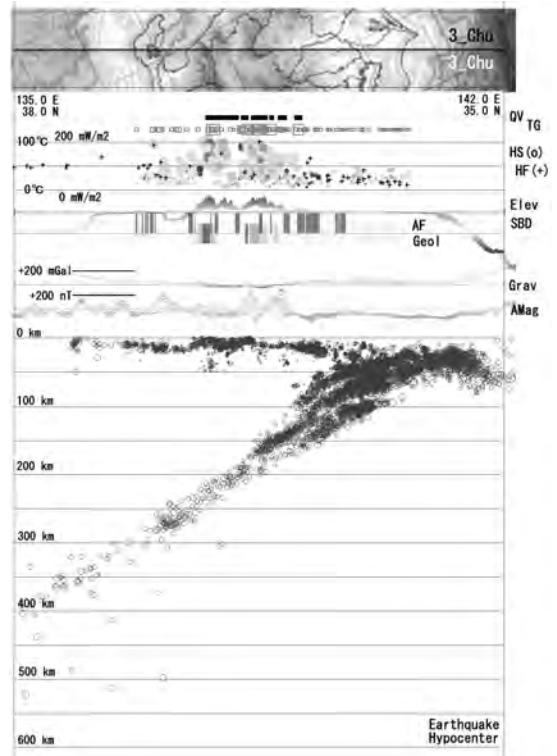
キーワード: 相模トラフ, 関東平野, フィリピン海プレート, スラブ, 沈み込み, 震源, 電子地球科学情報, 統合解析, 数値シミュレーション, 地熱

堆積盆地であることに加えて、その地下に特異的にフィリピン海プレートの冷たい部分(伊豆小笠原弧の前弧域)が沈み込んでいることにあるらしい。東北地方と伊豆諸島-富士・箱根地域に顕著な第四紀火山の分布も、関東平野周辺では遙か西方に位置している。

近年、国内外で大規模な地震災害が発生しており、プレートテクトニクス理論を基盤として様々な調査・研究が進展している。その中で、相模トラフ域-関東平野の地震とプレートテクトニクスを巡っては、非常に多数の様々な研究が行われてきた。それらの成果は、膨大な個別の論文(例えば、杉村, 1972; 中村・島崎, 1981; Ishida, 1992; Wu *et al.*, 2007)のほか、雑誌の特集号(例えば、瀬野, 1986; 石橋, 2007; Hori, 2007)、単行本(例えば、石橋, 1994; 新妻, 2007)、報告書・地図類(例えば、地質調査所, 1997)などとして公表されている。しかしながら、相模トラフ域で沈み込むフィリピン海プレート-スラブは複雑な履歴-環境の場にあるため、必ずしも十分には統合的な理解が進んでいないようである(例えば、石橋, 2007; 小川, 2007; 江口・掘, 2007)。

第1図に、関東地方-相模トラフ域の位置図を示す。また第2図に、中部地方-関東地方のNW-SE方向の断面図を示す。第2図によれば、関東平野には第四紀火山(QV)の分布がなく、温泉湧出温度(HS)・地温勾配(TG)・熱流量(HF)も非常に低い値が分布することが明らかである。また第2図では、関東平野の地下における複雑に多層化した(斜めに~4層の)震源分布を見ることができる。これらの層状の震源分布は沈み込むスラブを起源としており、下位の2層は厚い太平洋プレート-スラブ(厚さ80km程度)に、上位の2層はフィリピン海プレート-スラブ(厚さ30km程度?)に対応すると推測されるもので、日本列島とその周辺では最も複雑な状況にある。

最近、茂野(2008a, 2008b)は「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)・(2)」として、斜めに沈み込む海洋プレート-スラブの簡易数理モデル-数値シミュレータ(SSSS)を作成し、日本列島の概況と近畿地方の事例についてその応用結果を報告した。この検討の機会に、筆者は複雑な相模トラフ域におけるフィリピン海プレート-スラブの沈み込みについて、偶然一つのアイデアを得た。しかし、上記の報告には含めずに、相模トラフ域をモデル-シミュレーションの空白域として残した。本説で



第2図 関東-中部地方の各種電子地球科学情報の重合断面図(NW-SE方向)。茂野(2008a)の第10図(1)の3_Chuを一部修正した。断面線の位置は第1図を参照。原典データについては第1表を参照。

は、その後新たに試行的に簡易的ではあるが様々なモデル化検討した結果を紹介する。

本説が、様々な関連分野の方々の知見に何らかの参考となれば幸いである。特に、公開電子地球科学情報を利用した簡易的な統合化処理手法(地質調査総合センター, 2007)、斜めに沈み込むプレート-スラブの簡易モデル化-数値シミュレーション手法(SSSS)の有効性-発展可能性をご理解頂ければ幸いである。

2. 使用データ・処理方法・作成図

今回の検討で使用した電子地球科学情報を、一覧表にして第1表に示す。これらは、基本的に地質調査総合センター(2007)、茂野(2008a, 2008b)と同じである。特に重要な震源分布データには、気象庁(2006)を使用した。

これらを利用した各種の重合地図(平面図・断面

第1表 使用した電子地球科学情報の一覧表(地質調査総合センター(2007)・茂野(2008b)を参照)。

項目(略号)	出典および備考
第四紀火山(QV)	地質調査所(2000a)日本の新生代火山岩の分布と産状 Ver. 1.0. 数値地質図, G-4.
地温勾配(TG)	地質調査総合センター(2004)日本列島及びその周辺域の地温勾配及び地殻熱流量データベース. 数値地質図, P-5.
温泉温度(HS)	地質調査総合センター(2005a)日本温泉・鉱泉分布図及び一覧(第2版)(CD-ROM版). 数値地質図, GT-2.
熱流量(HF)	地質調査総合センター(2004)日本列島及びその周辺域の地温勾配及び地殻熱流量データベース. 数値地質図, P-5.
標高(Elev)	国土地理院(1997)数値地図250mメッシュ(標高)(CD-ROM版).
水深(SBD)	日本海洋データセンター(—)500mメッシュ水深データ(J-EGG500). (WWWダウンロードによる)
活断層(AF)	中田 高・今泉俊文編(2002)活断層詳細デジタルマップ(DVD2枚), 東大出版会.(製品シリアル番号:DAFM0345)
同上	地質調査総合センター(2005b)全国主要活断層活動確率地図. 構造図, no. 14. (電子数値データは未公表.) (第2図・第5図の5断面図には不使用.)
地質(Geol)	地質調査所(1995)100万分の1日本地質図第3版, CD-ROM版. 数値地質図, G-1.
重力異常(Gravity)	地質調査所(2000b)日本重力CD-ROM. 数値地質図, P-2. (仮定密度, 2.67g/cm ³)
磁気異常(Mag)	Geological Survey of Japan(1996)Magnetic anomaly map of East Asia 1:4,000,000, CD-ROM version. DGM P-1.
震源(EQHC)	気象庁(2006)平成17年地震年報(CD-ROM).

図)の作成方法も,地質調査総合センター(2007),茂野(2008a, 2008b)と同一である.平面図作成の主要範囲は経度138°~142°E,緯度33°~37°Nで,原図の仕様は縮尺1/100万,A2判縦72dpi印刷となっている.

第3図に,関東地方の各種電子地球科学情報(標高・水深,地質・温泉,重力異常・地温勾配,第四紀火山・活断層)の平面分布図((A)~(D)の4小図に編集・作成)を示す.なお,これらの図には,今回の簡易数値モデル化-数値シミュレーションに関する情報が一部追加されている.第4図には,関東地方の深度0~120kmの範囲の震源分布を,深度10kmごとの12小図として示す.第5図には,関東地方の11種の電子地球科学情報について,NE-SW方向の4つの重合断面図を示す.

なお,より広域の地球科学情報(標高・水深,重力異常,震源などの分布)については,茂野(2008a, 2008b)に平面図・断面図表示されている.必要に応じてこれらを参照願いたい.

3. 相模トラフ域の概要とスラブ沈み込みモデル

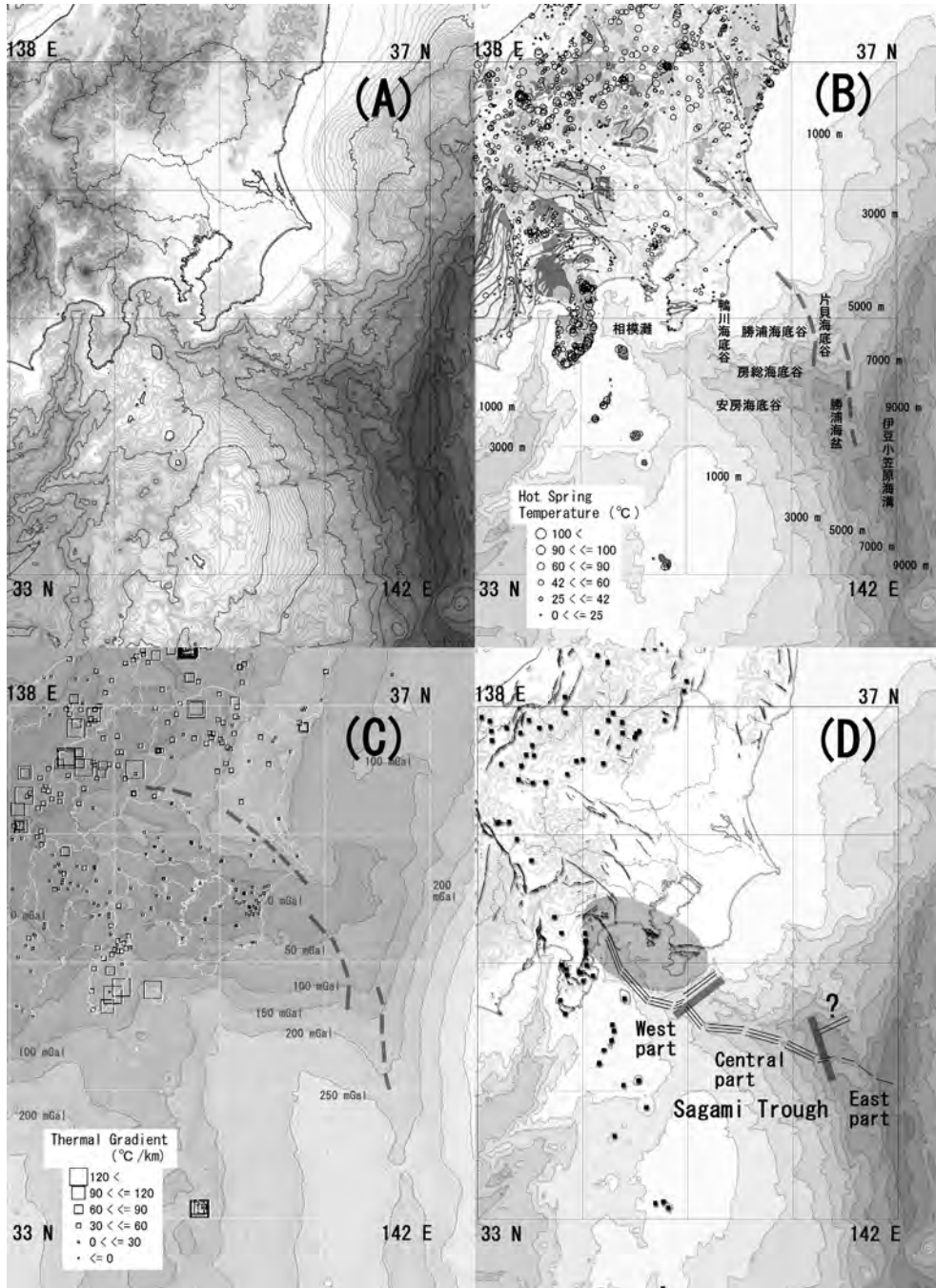
3.1 相模トラフ域の概要

フィリピン海プレートは,伊豆小笠原弧-マリアナ弧を東縁部上の島弧系として,その西方に縁海であるフィリピン海の海洋底が広がっており,概略的に全体としてNW方向に4cm/year程度の相対速度で移動し,北縁部で琉球弧-西南日本弧-東北日本弧(南端部)の下に沈み込んでいる.この沈み込み型プレート境界は,西方の南海トラフ域ではWSW-ENE方向に伸

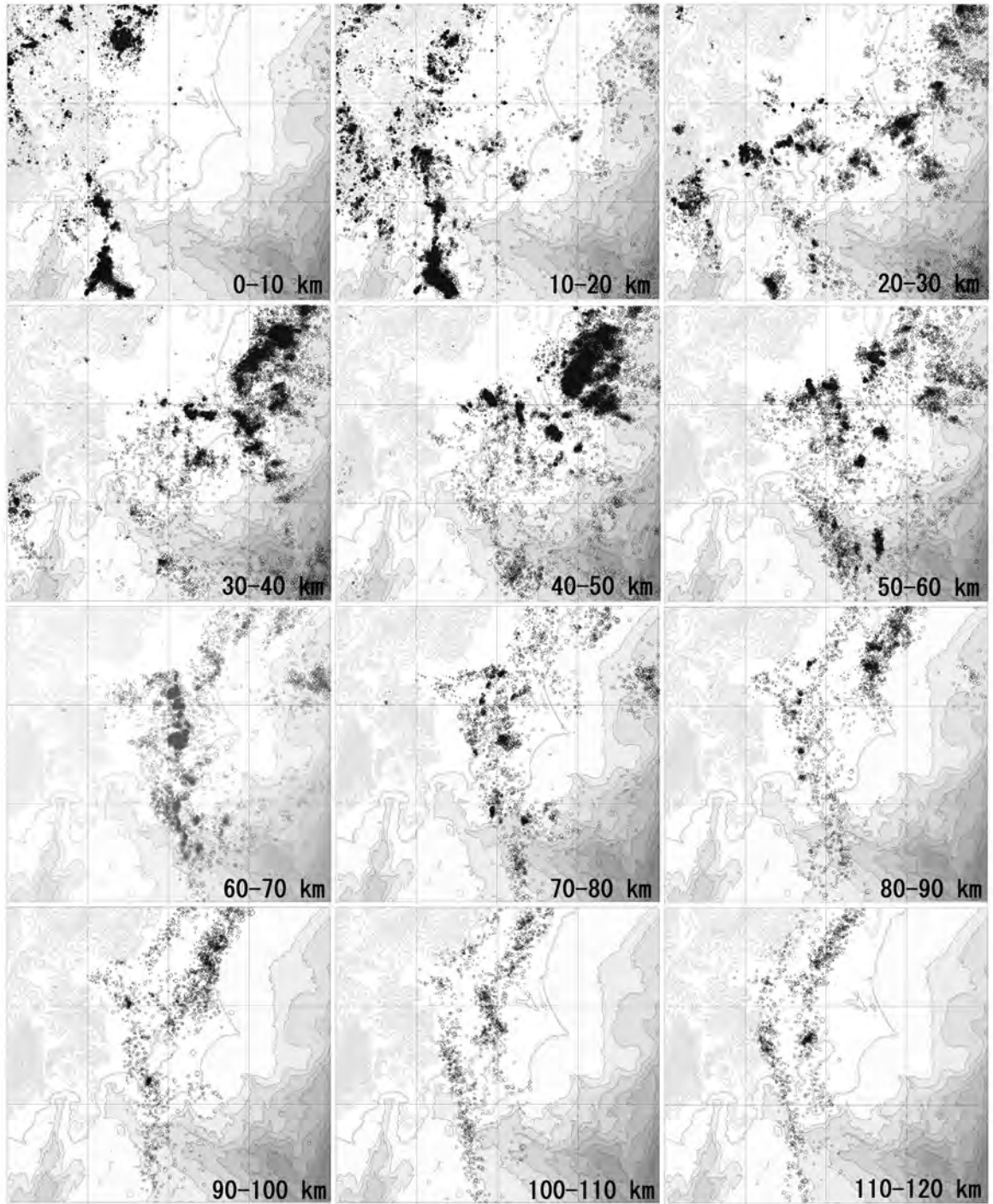
びているが,伊豆半島周辺域で伊豆小笠原弧が西南日本弧-東北日本弧に衝突している(島弧(~大陸地殻)間の衝突型プレート境界をなす)ために,フィリピン海プレート東北端部の相模トラフ域では概略的にWNW-ESE方向に伸びている(第1図参照).

現在プレートテクトニクスの用語として「相模トラフ」と呼ばれている地域は,伊豆半島東方(足柄平野-相模湾西部)と日本海溝のプレート3重会合点(フィリピン海,太平洋およびユーラシア-北アメリカの2海洋・1大陸の合計3プレート)とを結ぶ海域で,深度が深い点を滑らかに結んだ線を指す場合が多い.この線は西方から概略的に,相模灘ではNW-SE方向へ伸び,房総半島の南端部を取り囲むように回転してWSW-ENE方向となるが,その後WNW-ESE方向に長く伸びる(第3図(A)参照).しかし,この地域は海底地形が複雑であり(例えば,貝塚ほか編,2000;海上保安庁水路部,1994),房総半島の南東沖から東方ではWNW-ESE方向の海底谷が並走するほか,NNW-SSE方向の海底谷なども分布し,さらに最東部では海盆・海底扇状地が発達しており,研究者の考え方や縮尺などによって地図上の「相模トラフ(プレート境界)」の位置はかなり大きく異なっている.

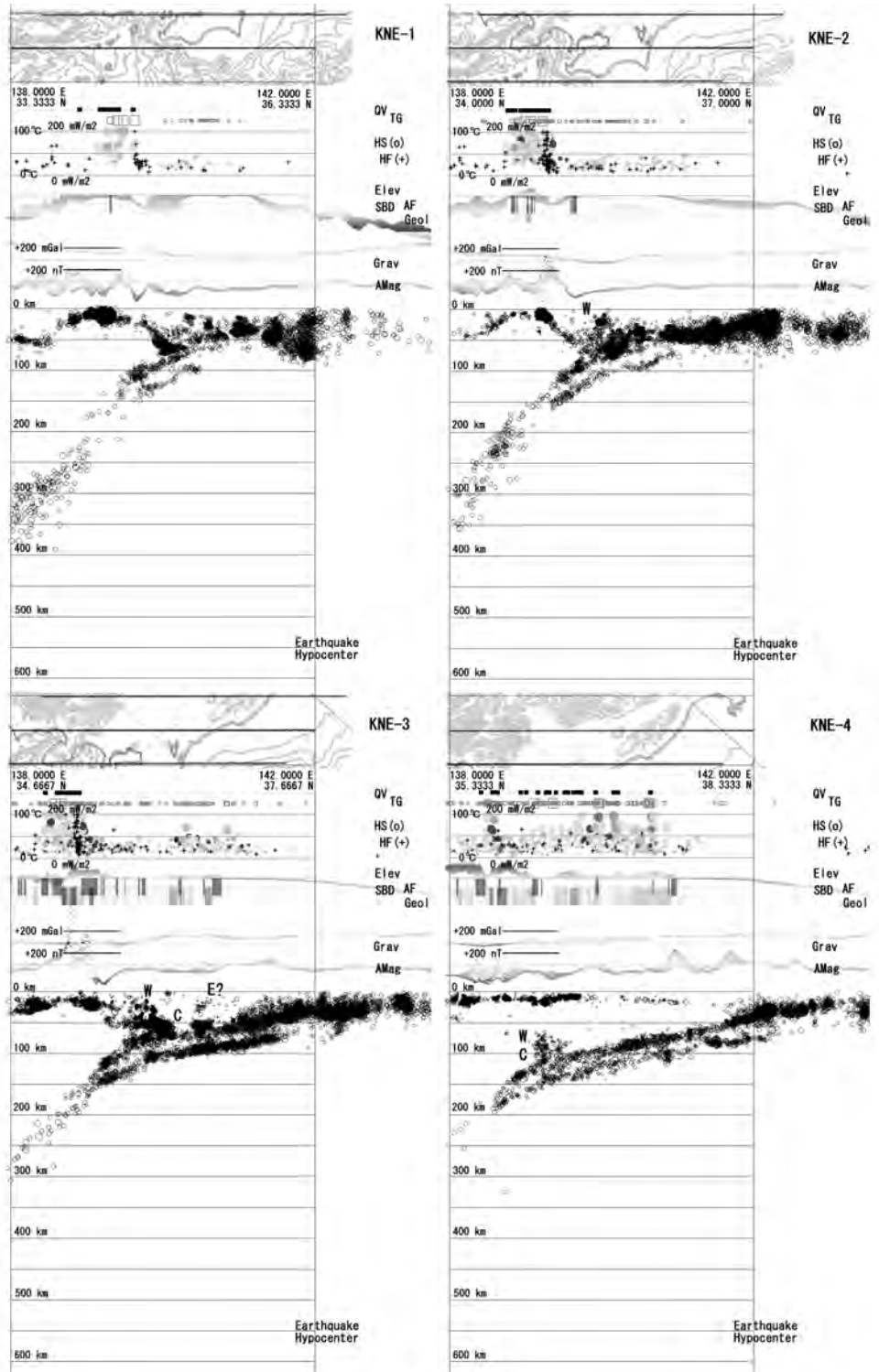
上述したフィリピン海プレート北縁の沈み込み境界は,沈み込みの開始時(~6Ma)には南海トラフ域-駿河トラフ域-相模トラフ域を通じてWSW-ENE方向に直線的に伸びていたが,伊豆小笠原弧の北進による衝突の結果,相模トラフ域ではプレート境界の位置・方向が変化したと考えられている(例えば,新妻,1986, 2007).さらに,この地域は上述したようにプレート3重会合点近傍に位置しているため,継続的な東



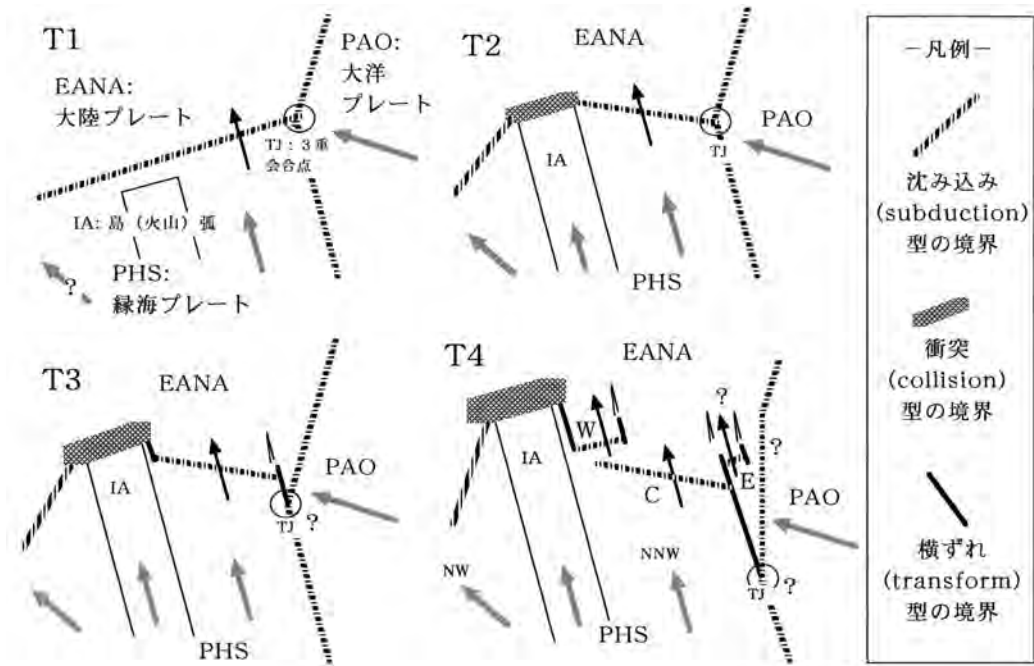
第3図 関東地方の各種電子地球科学情報の平面図。(A) 標高(Elev)・水深(BSD), (B) 地質(Geol)・温泉温度(HS, ○), (C) ブーゲー重力異常(假定密度, 2.67g/cm³)(Grav)・地温勾配(TG, □), (D) 第四紀火山(QV, ■)・活断層(AF)の平面分布を示す。作図に使用したデータについては第1表を参照。(B)地質の凡例は原典データを参照。(B)・(C)の破線は、沈み込むフィリピン海プレート-スラブの東縁-北縁に対応している可能性がある相模トラフ東部-犬吠崎-赤城山付近を結ぶ構造線を示した。(D)では、破線で相模トラフの概略の位置を示すとともに、相模トラフを西部・中部・東部に3区分した(本文参照)。(D)の中央の灰色の領域は、元禄関東地震・大正関東地震で地殻変動が大きく、震源域と推定される地域を示す。



第4図 関東地方の深度範囲別の震源平面分布図(深度0~120km). 地図の範囲は経度138°-142° E, 緯度34°-37° Nで, 深度範囲10kmごとの震源分布図を表示した. 震源データは気象庁(2006)の1998~2005年の8年間のデータファイルを使用した. 背景地図は第3図を参照.



第5図 関東地方の各種電子地球科学情報の重合断面図(SW-NE方向). 4垂直断面図(KNE-1～KNE-4)を示す. 断面線の位置は第1図を参照. 原典データについては第1表を参照. 震源分布のW・C・E(?)は第8図を参照.



第6図 相模トラフ域のプレート境界の概念的な時空間変遷モデルと現状モデル。T1→T2→T3へのプレート境界の位置・形式分布の経時変化の説明は、本文を参照。PAOは太平洋プレート、PHSはフィリピン海プレート、EANAはユーラシア-北アメリカプレート、IAは伊豆弧(火山列)を抽象化した。T4は、今回の概念的な現在状況のモデルである(第3図(D)参照)。

方からの太平洋プレートの沈み込みの影響に加えて、長期的に3重会合点の移動の影響を受けている。また、この地域は伊豆小笠原海溝-日本海溝(深度~10 km)へ向けて急傾斜をなす伊豆小笠原弧および東北日本弧の前弧域にあたる。従って、海底地形はプレート境界の位置・方向・特性の変化、褶曲・断層の形成、地形崩壊などによる大きな影響を受けて非常に複雑化している。

3.2 今回のスラブ沈み込みモデル

今回、相模トラフ域について第6図に示す概念的な履歴モデル(T1→T2→T3)と現在状況のモデル(T4)を想定した。これは、最初に新妻(1986)などを参考に初期の作業モデルを作成し、続いてこれに基づいた簡易数理モデル化-数値シミュレーションの結果(後述)の妥当性に基づいて、漸次改良を加えて行ったものである。

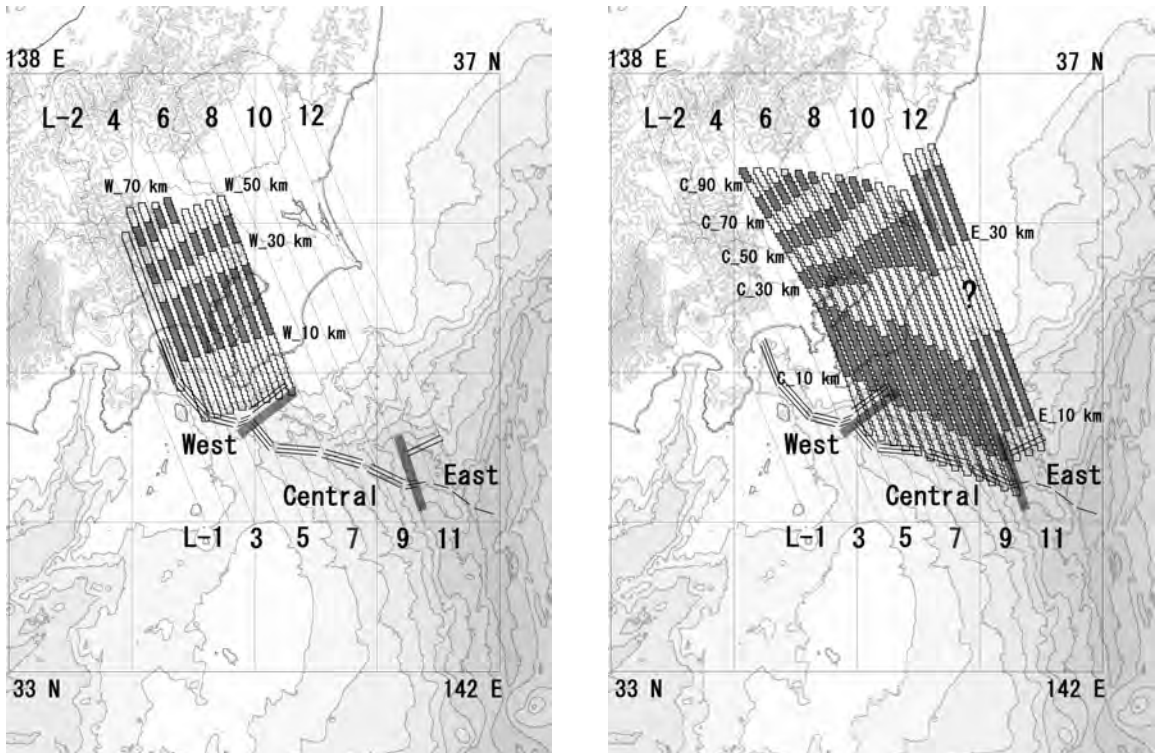
現状モデル(T4)では、相模トラフ域から沈み込むフィリピン海プレートのスラブは大きく3つにセグメント

化(短冊状化)していると考え、これに対応して以下のように相模トラフ域を西部(W)・中部(C)・東部(E)に3区分する(第3図(D)を参照)。

(1) 西部は、伊豆半島周辺域での島弧間衝突によってフィリピン海プレートの沈み込み線が複雑な分布をしている地域である。今回のモデルでは、沈み込み線は相模灘ではNW-SE方向へ伸び、房総半島の南端部を取り囲むように回転してWSW-ENE方向となるが、さらにENE方向へ鴨川海底谷まで続くと想定する(第3図(B)・(D)参照)。すなわち、(2)の中部の主要な沈み込み線から分岐して、その北西に海底地形に調和的に副次的な沈み込み線を引く。

(2) 中部は、WNW-ESE方向の海底谷地形が並走する地域である。フィリピン海プレートの沈み込み線として、北方の房総海底谷、勝浦海底地溝-勝浦海底谷なども想定可能であるが、今回のモデルでは中村・島崎(1981)を参考に最南部の安房海底谷を想定する(第3図(B)・(D)参照)。

(3) 東部は、勝浦海盆から伊豆小笠原海溝へと続



第7図 相模トラフ西部域および中部(・東部)域におけるフィリピン海プレートのスラブ沈み込みについての簡易数値シミュレーション結果(平面図)。左図に西部域から、右図に中部(・東部)域から沈み込むスラブ(上面)の深度分布を示した(第3図(D)参照)。計算に使用したプレート沈み込み点群のパラメータ値については第2表を参照。震源分布との関係は、図中に示したNNW-SSE方向の12断面線(L-1~L-12)についての断面図(第8図)を参照。簡易数値モデル化と数値シミュレーションの手法は茂野(2008a)を参照。背景地図は第3図を参照。

く地域で、伊豆小笠原弧の前弧斜面がSSE方向の延長部で欠落している地域(第3図(A)・第1図参照)にあたる。今回のモデルでは、フィリピン海プレートの沈み込み線は本地域の西半部では北方にシフトして房総海底扇状地の北縁に移動し(なお、走行もWSW-ENE)、東半部では欠落すると想定する(第3図(D)参照)。なお、上記の沈み込み線については存在の確度が低く、必ずしも想定する必要はないかもしれない。そのため、本文・図中で多くの場合に括弧書きや疑問符付きの表現とした。

4. 簡易数値シミュレーションの方法と結果

4.1 簡易数値シミュレーションの方法

上記の概念モデル(初期-漸次改良)に基づき、相模トラフ域のフィリピン海プレート-スラブの沈み込みについて数値モデル化-数値シミュレーションを行っ

た。使用した方法は、茂野(2008a, 2008b)と基本的に同一である。しかし、複雑な環境に対応して、シミュレーションを実施した点の分布密度は高く、パラメータ値の分布も複雑となっている。今回の数値シミュレーションでは、概略的にスラブの上面の3次元的分布を計算し、その結果が関東平野の震源の断面図分布と整合するように、沈み込み線の位置の調整、計算点のパラメータ値の組合せの調整などを試行錯誤的に繰り返した。

今回のモデル-シミュレーションの主要な設定・仮定、処理の流れなどは以下の通りである(分かり易くするために長い説明を加えた場合がある)。

(1) 3.2で述べたように、相模トラフ域を西部・中部・東部に3分割し、沈み込むスラブを3つにセグメント化してモデル化した(第3図(D)参照)。今回の最終結果となる数値シミュレーションを行った合計25点(西部, 9点; 中部, 13点; 東部, 3点)の分布を第7図

第2表 相模トラフ西部・中部(・東部)域に沈み込むフィリピン海プレート-スラブの点群のパラメータ値一覧表

West No	VA cm/y	θA deg	$\theta p1$ deg	$\theta d1$ deg	Time1 My	$\theta p2$ deg	$\theta d2$ deg	Time2 My
1	2.0	20	-70	10	2.0	-70	40	6.0
2	3.0	20	20	10	3.0	20	34	6.0
3	3.0	20	20	10	3.0	20	33	6.0
4	3.5	20	20	10	2.8	20	32	5.0
5	3.5	20	20	10	2.8	20	31	5.0
6	4.0	20	20	10	2.5	20	30	4.0
7	4.0	20	20	10	2.5	20	29	4.0
8	4.0	20	20	10	2.5	20	28	4.0
9	4.0	20	20	10	2.5	20	27	4.0

Cent. No	VA cm/y	θA deg	$\theta p1$ deg	$\theta d1$ deg	Time1 My	$\theta p2$ deg	$\theta d2$ deg	Time2 My
1	4.0	20	-20	12	2.5	-20	45	6.0
2	4.0	20	-20	12	2.7	-20	43	6.0
3	4.0	20	-20	12	2.8	-20	41	6.0
4	4.0	20	-20	12	3.0	-20	39	6.0
5	4.0	20	-20	12	3.2	-20	37	6.0
6	4.0	20	-20	12	3.3	-20	35	6.0
7	4.0	20	-20	10	3.5	-20	33	6.0
8	4.0	20	-20	10	3.7	-20	30	6.0
9	4.0	20	-20	10	3.8	-20	27	6.0
10	4.0	20	-20	10	4.0	-20	24	6.0
11	4.0	20	-20	10	4.2	-20	21	6.0
12	4.0	20	-20	10	4.3	-20	18	6.0
13	4.0	20	-20	10	4.5	-20	15	6.0

East No	VA cm/y	θA deg	$\theta p1$ deg	$\theta d1$ deg	Time1 My	$\theta p2$ deg	$\theta d2$ deg	Time2 My
1	4.0	20	20	8	4.5	20	10	6.0
2	4.0	20	20	8	4.5	20	10	6.0
3	4.0	20	20	8	4.5	20	10	6.0

に、各点のパラメータ値を整理して第2表に示す。なお、今回は沈み込み点の水深(km)も計算に使用した。

(2) 全期間を通じて相模トラフ域におけるフィリピン海プレートの相対運動の速度(VA)は4cm/year, 方向(θA)はNNW(茂野(2008a)の表記法で+20°)とした。ただし、衝突域に近い西部では、速度は最低2cm/yearまで低下していると仮定した。方向(θA)については、南海トラフ域の場合(茂野, 2008b)と同様にNWとしたシミュレーションでは、沈み込みの傾斜角度が小さなスラブの水平移動方向はプレートの運動方向とほぼ同一となる(茂野, 2008a)ため、相模トラフ域のスラブの計算分布は震源分布と適合性が低

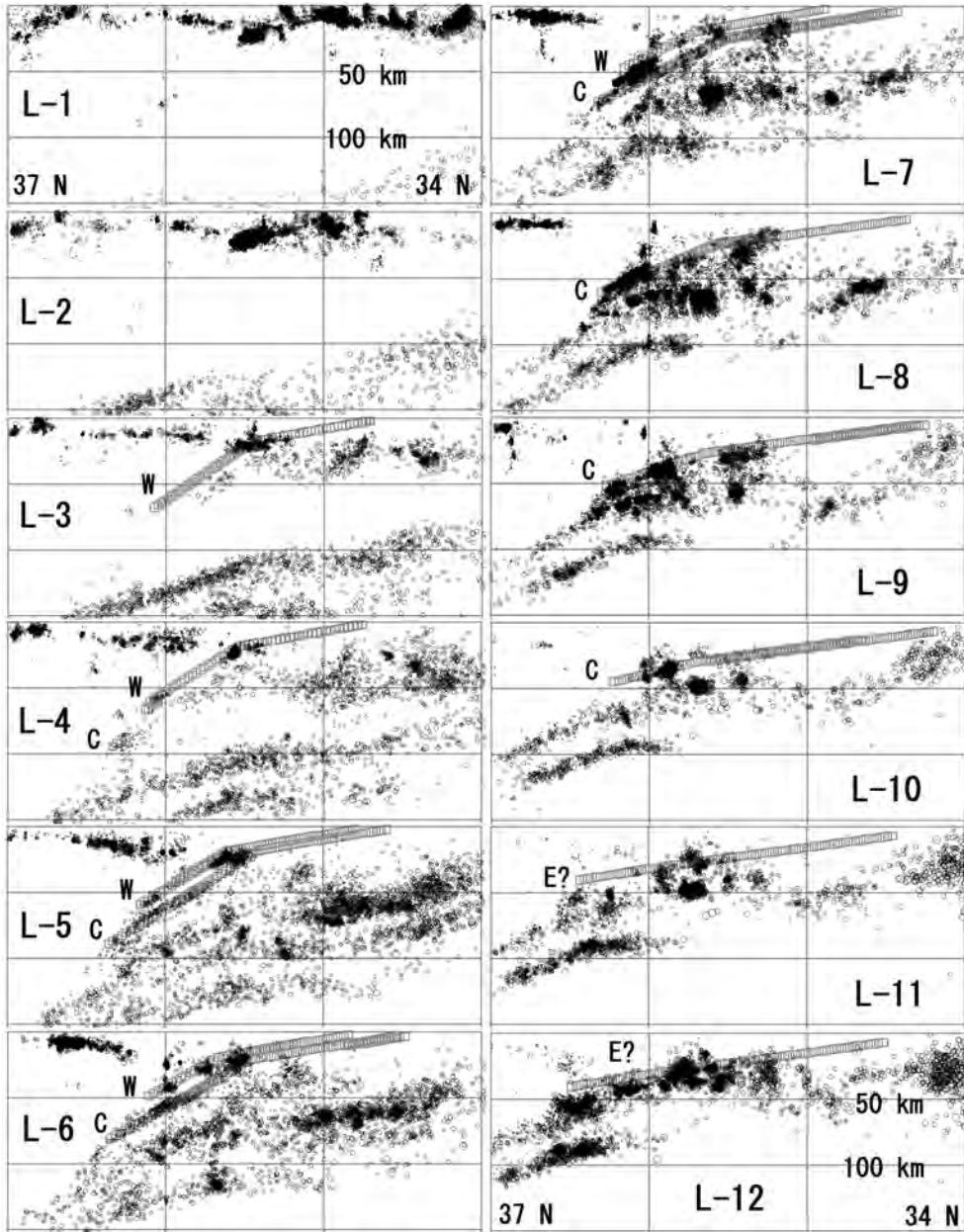
い結果となる。NNW方向の設定は、伊豆弧の背弧拡大の効果などを考慮すれば妥当と思われる。なお、プレート運動の速度と期間は、茂野(2008b)による南海トラフ域の場合と同様である。

(3) フィリピン海プレート-スラブの沈み込みは、基本的に現在の沈み込み線の位置で同じ見掛けの方向($\theta p1 \cdot \theta p2$)で、全期間(Time2)となる600万年間継続していると仮定した。ただし、西部の沈み込み線がENE方向に延長されて中部のものと2重化している地域では、沈み込みの期間が短い(~4Ma以降)と仮定した。計算ステップは最大60(時間間隔10万年)である。なお、数理モデルとして「相模トラフ」の伸びの方向が当初(~6Ma)のWSW-ENEからWNW-ESEに回転変化した履歴を加えることが望ましいが、スラブの沈み込み長が短い期間は周辺のマントル物質の抵抗が小さく、概略的に沈み込み線の移動に従ってスラブも追従し平行的に移動したと推測することができよう(第6図参照)。すなわち、現在の沈み込み線の位置・方向で全期間沈み込みが継続したと大胆に仮定しても、それほど大きな誤りは生じないと考えられる。

(4) プレート-スラブの沈み込み開始直後のトラフ近傍のスラブの沈み込み角度が小さな期間(Time1まで)は、陸域に近い西方の点ほど系統的に短くした(200万年~450万年間の範囲)。その見掛けの沈み込み角度($\theta d1$)は共通的に10°としたが、中部の西半部では12°に増加調整した。これは、スラブの分布のシミュレーション結果について、セグメント化した西部と中部の2スラブ間の衝突を避けるために必要となった。なお、東部については8°に調整した。

(5) その後の期間(Time1~Time2の間)については、各点に各々一定のスラブの見掛けの沈み込み角度($\theta d2$)を与えた。その角度は西方の点ほど系統的に大きくした(45°~10°の範囲)。その理由は、西方ほどその下に分布する太平洋プレート-スラブの深度が大きいために、その上位のマントルウェッジが厚く温度が高くて密度が小さく、スラブが沈力(負の浮力)を受け易いと考えられることによる。また、東方(特に東部)では大太平洋プレートの沈み込みによって地下比較的浅部からその厚いスラブが分布しており、その上位に沈み込むフィリピン海プレートのスラブの沈み込み角度が制約されるという効果も考慮した。

(6) フィリピン海プレート-スラブ(上面)に対応する



第8図 震源分布(観測データ)とフィリピン海プレートスラブの分布(シミュレーション結果)の比較断面図. 第7図に示したNNW-SSE方向の12断面線について, 左上から右下へ西方(L-1)から東方(L-12)へ配置した. シミュレーション結果はスラブの上面にほぼ対応している. W・C・E(?)は, 相模トラフの西部・中部(・東部)域から沈み込んだスラブであることを示す. L-4~L-7では, 相模トラフ西部域と中部域からの2枚のスラブが示されていることに注意.

と考えられる震源分布に調和するように、上記(2)～(5)の数値シミュレーションのパラメータの値を系統的に調整した。これらのパラメータ値の調整は、地点ごとに震源とスラブ上面の深度分布を合わせる様に恣意的に行ったものではなく、広域的に整合性が高くなるように空間1次関数的に規則的に行った。なお、この調整には数学的な最適化逆解析手法は用いず、12の断面図上で震源分布とシミュレーション結果のスラブの上面分布とを整合化させる(第8図参照) 試行錯誤的な方法を用いた。

4.2 簡易数値シミュレーションの結果

今回の一連の試行的な数値シミュレーションの最終結果を、平面図として第7図に示す。第7図の左には相模トラフの西部域から、右には中部(・東部)域から沈み込むスラブ(上面)の分布のシミュレーション結果を示す。相模トラフ域の環境が複雑なために今回はこのような形の2図分割の表現としたが、両図を重ね合わせたものが相模トラフ域から沈み込むフィリピン海プレートのスラブについての今回の数値シミュレーションの結果である。

また、今回の一連の試行的な数値シミュレーションの最後結果を、垂直断面図として第8図に示す。第8図では、NNW-SSE方向に平行等間隔の12断面について、震源分布とスラブ(上面)の分布のシミュレーション結果を示した。断面線の位置については第7図を、震源の平面分布については第4図を参照されたい。

5. 考察

5.1 関東平野の震源分布の概要

東北日本弧最南部の関東平野～相模トラフ域には多数の震源が分布している(第4図・第5図・第8図参照)。これらは、以下のように概略的に3グループに区分される。ただし、ユーラシア-北アメリカプレートに該当する東北日本弧-西南日本弧の地殻浅部～中部(～深度20km以浅)を除く。なお、若い堆積盆地となっている本地域の中心部については、地殻浅部～中部に震源分布が少ないことが日本列島の中で特徴的である。

(G1) 東方からの厚い太平洋プレート-スラブの沈み込みに対応する震源が、広く多数分布している。こ

の震源群は、第4図の各小図の東部で浅く、中央部(関東平野西部)では深度～100km程度で明瞭に「く」の字状を呈し2層化しており、西方ではさらに深くなる(第2図参照)。太平洋プレート-スラブの厚さは概略的に80km程度であり、2層分布を示す震源群は概略的にその上面と中上部とに対応すると考えられている(第8図参照)。

(G2) 南方から移動して来た伊豆小笠原弧(フィリピン海プレート上)と西南日本弧-東北日本弧(ユーラシア-北アメリカプレート上)との衝突帯に対応する震源も多数分布している。この震源群は、伊豆半島-伊豆諸島を囲むように、概略的に深度0～70kmに分布している(第5図参照)。

(G3) さらに第4図の各小図の南東部、相模トラフ域からのフィリピン海プレート-スラブの沈み込みに対応する震源が、関東平野とその周辺海域の地下深度20～100kmに多数分布している。この震源群は、基本的に(G1)の上位、(G2)の北東方向に分布しているが、3次元空間的に他の震源群との関係および震源群内部の分布構造は複雑である。

上記(G3)の震源分布を巡っては関東平野の大地震災害との関係で様々な検討が行われており、Ishida(1992)、Hori(2007)、江口・掘(2007)、野口(2007)などによって震源の等深度分布図などが報告・整理されている。これらの解析結果はかなり類似性が高く、関東平野の地下におけるフィリピン海プレートのスラブ(概略的に上面)の分布をかなり正確に推測していると考えられる。今回第8図に断面図として示した震源分布(気象庁,2006)は、これらの報告に対応していると推測される。

これらのフィリピン海プレート-スラブ(主に上面)の沈み込みに対応する震源分布の特徴は、(1) 関東平野の北縁部と西縁部とが概略の分布限界となっていること、(2) 相模トラフ域の東部と犬吠崎を結ぶ海底地形に沿った線(第3図)が概略的に東の分布限界となっていること、(3) 関東平野の北西端(群馬県前橋市付近)に最深部(深度約100km)が存在すること、(4) そこからSE～SSE方向に震源深度が浅くなり、その傾斜は比較的緩やかで一定していること、(5) 概略的に丹沢山地-霞ヶ浦付近を結ぶ深度30kmの等深線を北限として、その南東側では震源の深度分布の規則性が不明瞭となること、(6) 深度10～40kmでは、房総丘陵-東京湾北縁部-多摩丘陵域に震源分布が

多いことなどである。

5.2 今回のシミュレーション結果からの考察

フィリピン海プレート-スラブの分布についての今回の簡易的な数理モデル化-数値シミュレーションの結果(第7図・第8図)は、基本的に5.1(G3)に述べたフィリピン海プレート-スラブの沈み込みに対応すると考えられる関東平野の地下の震源分布に調和的である。すなわち、「現在の相模トラフ域」を主要な沈み込み帯と仮定したモデルで、関東平野下のフィリピン海プレートのスラブの分布がかなりの程度説明可能である。

第8図の12断面図について、震源分布と数値シミュレーションで計算されたスラブ分布との関係は、次のように整理・解釈される。なお、第7図(左・右)・第4図も同時に参照されたい。

(1) 最も西方の断面図(L-1・L-2)では、孤立的に36°N付近の深度70~90kmに少数の震源が分布している。これらの震源は、伊豆小笠原弧の衝突以前にその前方(北方)に分布したフィリピン海プレートが沈み込んだスラブに対応している可能性が高いと考えられる。このスラブについては、その沈み込み域が現在の相模トラフ域ではないため、今回のシミュレーション結果には現れていない。なお、L-2は相模トラフ域の西端部にあたるが、ここでは現在のフィリピン海プレートの進行方向とスラブの見掛けの沈み込み方向とが直交するために、スラブは沈み込まずに右横ずれを生じる環境となっている(茂野(2008a)を参照)。

(2) 相模トラフの西部域から沈み込んだスラブ(概略的に上面)に対応する震源は、西方の断面図(L-3~L-7)に現れており、その最大深度は70km程度である。L-4~L-7では、中部域から沈み込んだスラブに対応する震源が下位に出現しており、両者が重層化した震源分布は厚く(合計最大50km+)複雑になっている。西部域は恐らく伊豆小笠原弧の島弧地殻の厚さが急変する地域にあたっており(第3図(B)のプーゲー重力異常図を参照)、西部域から沈み込んだスラブの厚さは、東西方向に大きく変化している可能性がある。中部域からのスラブと重層化する部分(L-5~L-7)では、西部域からの分岐的なスラブの厚さはごく薄い(厚さ~10km)可能性が高いと思われる。なお、第4図(平面図)の深度10~40kmの浅い震源の線状

配列は、西部域から沈み込んだスラブの平面分布の輪郭にほぼ対応するよう見え、スラブの分布を反映する可能性が指摘されて興味深い。また、関東平野における活断層の分布域(第3図(D))もこの平面分布域にほぼ対応している。

(3) 相模トラフの中部域から沈み込んだスラブ(概略的に上面)に対応する震源は、中央部の断面図(L-4~L-10)に現れており、その最大深度は100km程度(L-4)である。(2)で述べたように、L-4~L-7では中部域からのスラブは西部域からの分岐的なスラブと重層化しており、上位の西部域からのスラブと下位の太平洋プレートのスラブに挟まれる環境にあるため、中部域からのスラブには全体的に多数の震源が分布すると推測される。一方、東方のL-9~L-10では、上位の西部域からのスラブが分布せず、また下位の太平洋プレートのスラブの深度が浅い(概略50km)ため、震源の分布は単純化している。中部域からのスラブの厚さは最大40km程度(L-6など)と想定されるが、東方では20km程度となっているようである。なお、中部域からの沈み込みの傾斜角度がかなり大きなスラブは、斜め沈み込みの効果(茂野, 2008a)によってやや西方へ偏向しており、L-4ではスラブ先頭の最深度のみが断面図に出現する(群馬県前橋市付近)という状況も発生している。

(4) 相模トラフの東部域から沈み込んだと想定したスラブ(概略的に上面)に対応する震源は、東方の断面図(L-11~L-12)に現れており、その最大深度は40km程度である。本スラブは、フィリピン海プレート東縁の伊豆小笠原海溝に近い部分が起源となっており、厚さはごく薄いようである(~10km)。本地域は太平洋プレート-スラブの沈み込み深度が概略的に50km以浅と浅くなっており、その上位へ東部域から沈み込んだスラブの傾斜角度は非常に小さくなっている。また、沈み込み線が北方に位置するために、中部域に比較してスラブの先端はより北方に到達している。なお、第4図の深度20~50kmでは、東部域のスラブの分布域~そのやや東方にNNW-SSE方向に震源が高密度で分布しており興味深い。

5.3 地熱環境・地震災害との関係

1. はじめに述べたように、関東平野には第四紀火山が分布せずに、温泉湧出温度・地温勾配・熱流量も広域的に非常に低い値が分布する。今回この状

況について、第3図の各種平面図、第5図の断面図に示した。今回の簡易モデルに基づく数値シミュレーションの結果は、フィリピン海プレートの東北端部-伊豆小笠原弧の前弧域を起源としたスラブが、相模トラフ域から約600万年の期間を通じて関東平野の地下深度～100kmまで広く沈み込んでいることを示している。これは、南海トラフ域における若い暖かい海洋(背弧-縁海)プレートの沈み込みとは異なって、関東平野には特異的に冷たいスラブ(伊豆小笠原弧前弧の比較的古いプレートとその上の堆積物)が沈み込んでいるということであり、上記の温泉湧出温度・地温勾配・熱流量の低異常の原因となっているという考え方を支持している。

関東平野の周辺、特に北西方向には第四紀火山、高温温泉地などが多数分布している。これらの地域は、上記のフィリピン海東北端部-伊豆小笠原弧前弧域を起源とした冷たいスラブが下位に存在している関東平野を通り過ぎて、相対的に厚いマントルウェッジの下位に太平洋プレート起源のスラブが直接分布する地域(スラブ上面深度～100km以深)にあたり、マグマ-深部流体の生成-上昇が効率的に行われる環境にあると考えられる。なお、一部の第四紀火山、高温温泉には、深部に到達したフィリピン海プレート-スラブ(100km以深で高温化して震源を伴わない6Ma以前のもの)が関与したマグマ-深部流体の供給が存在する可能性もあろう。

関東平野においては、歴史的に大規模な地震災害が繰り返し発生しており(例えば、地質調査所, 1997; 石橋, 1994)、近い将来に大規模な地震災害が発生することが危惧されている。今回の簡易モデルに基づく数値シミュレーションの結果は、相模トラフ域では沈み込むフィリピン海プレートのスラブは西部・中部・東部にセグメント化しており、それに対応した地震災害の研究・対策が必要であることを示唆している。

歴史的に有名な元禄関東地震(1703年; ~M8.1)、大正関東地震(1923年; ~M7.9)は相模湾～房総半島南部を震源域としており(第3図(D)参照)、今回の検討結果では相模トラフの西部域を起源としたスラブに対応するものと考えられる。一方、関東平野の地下には、その下位により広域的に相模トラフの中部域を起源としたスラブが分布している。また、東方の海域の地下にも相模トラフの中部-東部域を起源とした

スラブが広く分布している可能性がある。さらにその下位には、東方からより高速で沈み込む太平洋プレート起源の厚いスラブがより広く分布している。これらのスラブを起源としたと推測される大地震(M7.0<;例えば818年)も歴史的に多数知られている(例えば、地質調査所, 1997; 石橋, 1994)。加えて駿河トラフ～南海トラフ域でも、フィリピン海プレートのスラブが繰り返し巨大地震を発生させてきた。このようなフィリピン海プレートのセグメント化したスラブ間およびこれらと太平洋プレート起源のスラブ、さらにユーラシア-北アメリカプレートとの相互作用は非常に複雑であると推測されるが、発想の転換によっては簡易的な統合モデル化が可能かもしれない。

6. おわりに

本説では、相模トラフ域で沈み込むフィリピン海プレート-スラブについて、公開電子地球科学情報の簡易統合的な処理図作成、簡易数理モデル化-数値シミュレーションによる検討結果を紹介した。本説の結論は、地史的にまた現在の相模トラフの環境は非常に複雑であるが、セグメント化した西部-中部-東部域におけるフィリピン海プレート-スラブの沈み込みの簡易数理モデル化-数値シミュレーションによって、関東平野と周辺海域の地下における複雑な震源分布(最大深度～100km)が、ある程度もっともらしく説明出来るということである。しかし、今回の簡易数理モデル化-数値シミュレーションの手法-結果は試行的なものであり、よりよい理解のためには今後より総合的・多面的な詳しい検討が必要であろう。

本説の手法・結果が、プレートテクトニクス的に多様・複雑な地域における地熱資源の実態把握などに今後寄与する機会があれば幸いである。また、近い将来に首都圏に大災害をもたらすことが危惧されている大地震に向けた研究・対策などに、何らかの参考となれば幸いである。同時に、現状では問題が多い電子地球科学情報の利用に関して、簡易的ではあるが統合的な手法(地質調査総合センター, 2007)の応用例として参考となれば幸いである。

本説の取りまとめに当たっては多数の多様な文献を閲覧したが、相模トラフ域が非常に複雑な履歴を持ち現在も複雑な環境にあるため様々なデータや考え方があり、必ずしも十分に検討・理解・引用できな

かった場合がある。本説の不十分な点については、試行的な検討の紹介としてご容赦願いたい。

謝辞: 本説の原稿について、産業技術総合研究所北海道センターの中川 充氏(地質調査総合センター所属)に貴重なご意見を頂いた。記して感謝します。

文献(本文中に非引用で、図作成に使用した電子情報は第1表を参照)

- 安藤 武(1982): 深層地下水地熱資源。地熱開発総合ハンドブック, フジ・テクノシステム, 748-766.
- 地質調査所(1997): 50万分の1活構造図8 東京(第2版).
- 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.
- 江口孝雄・堀 貞喜(2007): 首都圏直下とその周辺でのフィリピン海プレートスラブの形態. 地学雑誌, **116**, 325-369.
- Hori, S. (2007): Seismic activity associated with the subducting motion of the Philippine Sea plate beneath the Kanto district, Japan. *Tectonophysics*, **417**, 85-100.
- 石橋克彦(1994): 大地動乱の時代-地震学者は警告する-. 岩波書店, 234p.
- 石橋克彦(2007): 伊豆の衝突と神奈川県西部の地震・火山テクトニクス. 月刊地球, 号外, no.57, 5-8.
- Ishida, M. (1992): Geometry and relative motion of the Philippine Sea plate and Pacific plate beneath the Kanto-Tokai district, Japan. *Jour. Geophys. Res.*, **97**, B489-513.
- 海上保安庁水路部(1994): 房総-伊豆沖海底地形図. 50万分の1海の基本図 6603.
- 貝塚爽平・小池一之・遠藤邦彦・山崎晴雄・鈴木毅彦 編(2000): 日本の地形4 関東-伊豆小笠原. 東大出版会, 349p.
- 気象庁(2006): 地震年報 平成17年(CD-ROM).

- 中村一明・島崎邦彦(1981): 相模・駿河トラフとプレートの沈み込み. 科学, **51**, 480-498.
- 新妻新明(1986): 変動している日本列島-新第三紀テクトニクスとプレート沈み込み-. 平 朝彦・中村一明編, 日本列島の形成. 岩波書店, 266-274.
- 新妻新明(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.
- 野口伸一(2007): 関東地域のフィリピン海スラブと太平洋スラブの震源分布と収束形態. 月刊地球, 号外, no.57, 42-53.
- 小川勇二郎(2007): 伊豆島弧北東端部における斜め沈み込み現象の理解-海陸からの情報のレビュー-. 月刊地球, 号外, no.57, 10-18.
- 瀬野徹三(1986): 相模トラフ-三重点のテクトニクス. 月刊地球, **8**, 206-213.
- 茂野 博(1982): 非火山性地域の地熱資源 深層熱水. 地質ニュース, no.332, 202-203.
- 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.
- 杉村 新(1972): 日本付近におけるプレートの境界. 科学, **42**, 192-202.
- Wu, F., Okaya, D., Sato, H. and Hirata, N. (2007): Interaction between two subducting plates under Tokyo and its possible effects on seismic hazards. *Geophys. Res. Lett.* **34**, L18301.

SHIGENO Hiroshi (2008): Subduction of the Philippine Sea plate-slab from the Sagami trough area to the Kanto plain, Japan: Simplified modeling and numerical simulation using open electronic earth-sciences information.

<受付: 2007年12月18日>