

地殻変動解析ソフトウェア(CHIKAKU システム)による神奈川県西部地域周辺のプレート境界における接触解析

丹保俊哉*、棚田俊收*

Contact analysis of the plate boundary in the western area of Kanagawa prefecture with the crustal movement analysis software "CHIKAKU system"

by

Toshiya TANBO* and Toshikazu TANADA*

1. はじめに

温泉地学研究所(以後、温地研と呼称)は、神奈川県西部地域における神奈川県西部地震の予知研究や箱根火山の活動のモニタリングを目的とした各種の地殻変動観測を、1989(平成元)年から1990年代にかけて開始し現在も精力的におこなっている(温泉地学研究所、1999)(図1)。これらの観測結果を基にして温地研では、県西部地域における地殻変動の定性的な解釈をおこない、また県西部地震の予知研究に基づいて異常変化の検知が試みられてきた(横山ほか、1992;横山ほか、1995;板寺、1999;棚田ほか、2002a;棚田ほか、2002b;代田ほか、2002など)。地震が発生するまでの応力蓄積過程を解明することは、地震予知研究において重要な位置を占める。そこで温地研ではこれまで蓄積してきた地殻変動データや国土地理院のGPS連続観測網(GEONET)の観測データな

どに基づき、2001(平成13)年より神奈川県西部地域の定常的地殻変動に伴う応力蓄積過程、および神奈川県西部地震に伴う前兆すべり(プレスリップ)の定量的な予測を試みるべく、地殻変動の数値シミュレーションについて取り組んでいる。それにより将来的に、実際の地殻変動の異常を検出した際、地震の前兆であるかどうかという判断を容易にすることが期待される。

本報告ではそのうち、県西部地域の定常的地殻変動に伴う応力蓄積過程の予測を試みるため、神奈川県西部地域のグリッドモデルの構築、および同モデルを用いて有限要素法による静的接触解析をおこなった結果について述べる。

2. CHIKAKU システムについて

本研究で数値シミュレーション技術として用いた「CHIKAKU システム」は理化学研究所、日本原子力研究所によるCHIKAKUプロジェクトによって開発されたソフトウェアである。このソフトウェアは非線形有限要素法(nonlinear Finite Element Method; FEM)を使って地震発生メカニズムの解明と、強震動による地震波伝播予測を目的としている(金井ほか、2001a;金井ほか、2001bなど)。CHIKAKU システムの最大の特長は、グリッドモデルの構築、非構造格子の生成、並列計算のための領域分割、FEM 並列計算によるシミュレーション、そしてそれらの計算結果の可視化といった一連の処理をシームレスかつ効率よく発揮できることに開発の重点を置いていることにある。これにより有限要素法について必ずしも精通した知識を必要としなくなり、一般の地震学者に門戸を大きく開いたFEMソフトウェアであるといえ、本研究に当ソフトウェアを用いたことの最も大きな要因でもある。なおかつ、CHIKAKU システムは研究者に対して無償で配布されている公益性の高いソフトウェアでもある。CHIKAKU システムの構成については以下の章にて個別に紹介する。

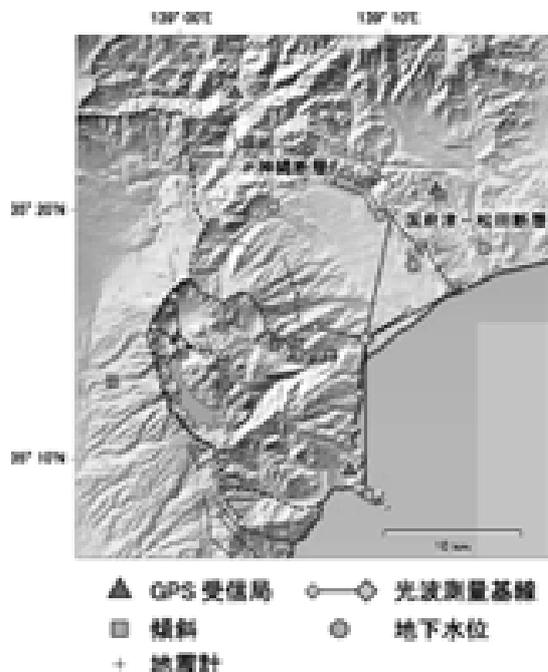


図1 温地研における2003(平成15)年現在の地震、地殻変動の観測点分布

* 神奈川県温泉地学研究所 〒250-0031 神奈川県小田原市入生田586
報告, 神奈川県温泉地学研究所報告, 第35巻, 17 - 28, 2003.

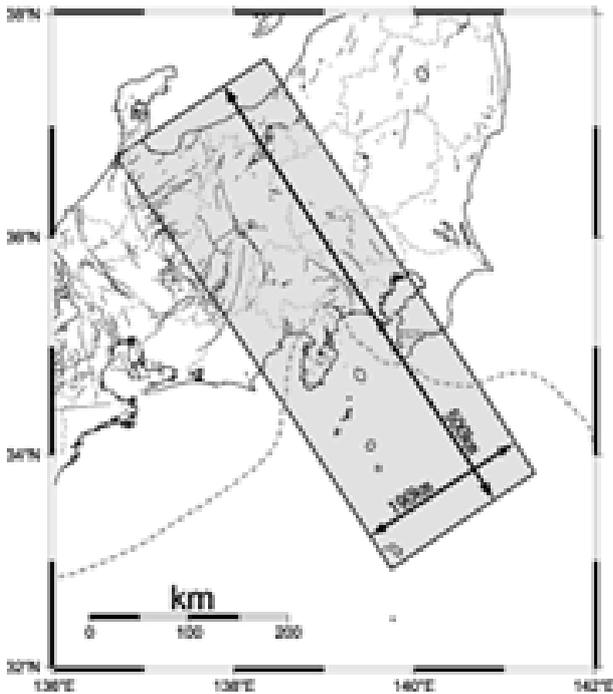


図2 グリッドモデルの範囲。深度方向には5km から -100km までを表現した

3. モデリング

本報告で構築した、神奈川県西部地域を中心としたグリッドモデルの対象範囲を図2に示す。なお、グリッドモデルの深さは地表から100kmまでを対象としている。このモデルでは、長辺軸を相模湾付近におけるフィリピン海プレートの運動方向と一致させるようにした。これは、Seno *et al.* (1993) がプレートの剛体運動から求めた方位 $N35^{\circ}W$ 、速度 3.0 cm/年 という値を参考としている。フィリピン海プレートおよび地殻形状のモデリングと加工には、

- ・Ishida (1989) (フィリピン海プレート)
- ・Zhao *et al.* (1992) (モホ面・コンラッド面)
- ・国土地理院 250m 数値標高モデル(地表)
- ・浅田、沖野 (1998) (海底)

を参考にした。これらのデータの一連の加工はまず、CHIKAKU DB ソフトウェアでおこなう。CHIKAKU DB ソフトウェアはこれらのデータの等深度サンプル点に対して2次元補間をおこなった後、境界面データとして3次元グリッドを作成し次のモデル構築行程であるCHIKAKU CAD ソフトウェアにデータを受け渡す。

CHIKAKU CAD ソフトウェアは、CHIKAKU DB ソフトウェアによって作成された境界面グリッドデータをパラメトリック曲面に変換し集合演算を行った後に3次元ソリッド形状データとしての地殻構造のモデルを作成する役割を担っている。図3に作成した県西部地域のソリッド

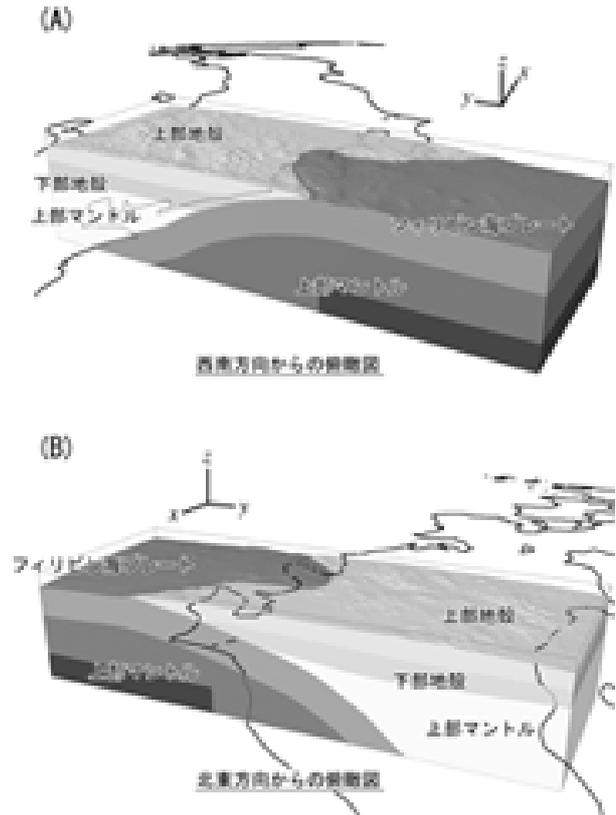


図3 CHIKAKU CAD で作成した神奈川県西部地域を中心とする地殻構造のソリッドモデル

ドモデルをその座標軸と合わせて表す。CHIKAKU CAD ソフトウェアで作成されたソリッドモデルをメッシュジェネレータであるCHIKAKU MESH ソフトウェアにデータを受け渡すには、図形要素の記述方法のANSI(米国規格協会)規格である、IGES5.3(Initial Graphics Exchange Specification)フォーマットが用いられる。

CHIKAKU MESH ソフトウェアは、日本原子力研究所が開発した並列計算機対応の汎用格子生成システムJAERI-MESH/UNST ソフトウェア(村松ほか、1997)に改良を加え、6面体要素の非構造格子を大規模に効率よく生成できる格子生成システムとしたものである(村松ほか、2000)。図4にCHIKAKU MESH によって格子分割したモデルの概略を東側面の境界について表した。格子分割をする際、後に観測データとの比較検討することを容易にするため、足柄平野付近の要素一つ一つをなるべく小さくすることが望ましい。今回、足柄平野付近の格子点間隔は水平方向で4~8km、垂直方向で約2km程度に分割した。モデル全体では、節点数115,103、要素数103,500となった。FEM解析においてはこれらの数が少ない(簡素な)モデルほど解析時間は短縮し、逆に数が多い(複雑な)モデルほど解析に時間を消費する。つまり、解析する最小領域(要素)をより大きくすることで、迅速な解析ができるわけであるが、一般的に要素領域が大き

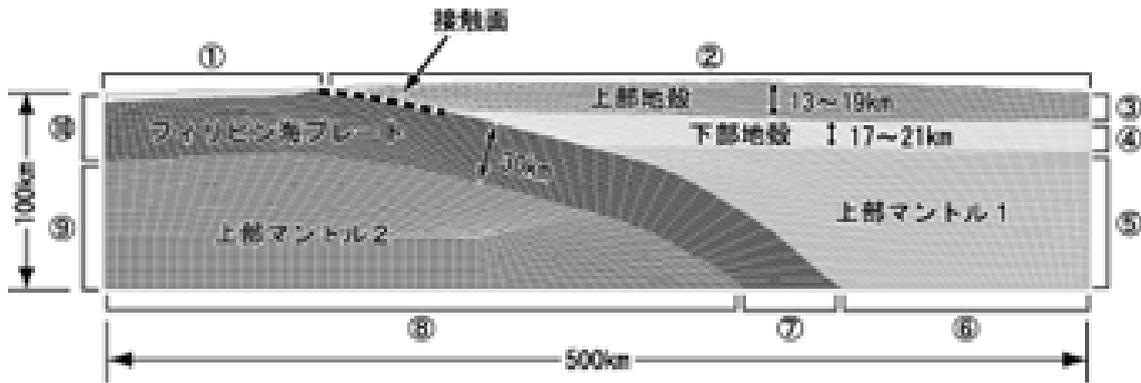


図4 CHIKAKU MESH で作成したグリッドモデルの東側面図。足柄平野はちょうどモデルの中央に位置する

から 表1における境界番号を表す。

表1 グリッドモデルに設定した境界条件

境界番号	強制変位 (km)		
	x	y	z
①	自由	自由	自由
②	自由	自由	自由
③	0.0	0.0	自由
④	0.0	0.0	自由
⑤	0.0	0.0	0.0
⑥	0.0	自由	0.0
⑦	自由	自由	自由
	自由	8.5	-5.3
⑧	0.0	自由	0.0
⑨	0.0	0.0	自由
⑩	0.0	10.0	自由
側面	自由	自由	自由
	0.0	自由	自由

表2 計算条件

境界面	境界条件 (強制変位設定)						
	東			西			
	x	y	z	x	y	z	
I	自由	自由	自由	自由	自由	自由	
II	自由	8.5	5.3	自由	自由	自由	
III	自由	自由	自由	0.0	自由	自由	
IV	自由	8.5	-5.3	0.0	自由	自由	

表3 各構造の物性値

	密度 (g/cm ³)	ポアソン比	ヤング率 (GPa)
上部地殻	2.65	0.25	90.5
下部地殻	3.03	0.28	117.9
上部マントル	3.45	0.27	183.6
フィリピン海プレート	3.00	0.26	97.3

いほど得られる解析結果は荒い近似解しか求まらなくなるため、それぞれのバランスと計算機環境を十分把握して格子分割することが重要となる。

図4の境界面の番号は、表1の境界条件における各ブロック(上部地殻、下部地殻、上部マントル1、フィリピン海プレート、上部マントル2)の境界番号に対応する。本研究におけるFEM解析の基本は、フィリピン海プレートの後端面である境界⑦のy軸方向に対して10kmの押し強制変位を加えることにある。また幾つかの計算条件として、フィリピン海プレートの下端面(境界⑤)に対して本モデルの下面における平均的なプレート沈み込みの伏角34°の方向に10kmの引きの強制変位を与える条件と、モデルの東と西の側面(図4において正面と背面に相当)に、x方向の変位を自由または固定にする条件を加え計4パターンの計算条件を設定した(表2)。これらの計算条件は、モデルよりも更に下に存在するプレートの自重の効果(スラブ引っ張り力)を与えてみる試み、および境界の有無に対するプレートの運動方向の束縛効果を知るためにおこなった。また、プレート境界面のうち、上部地殻をmaster、フィリピン海プレートをslaveとした接触探索を図中の点線部分についておこなう。

解析に用いた各構造の物性値には、国立天文台(1997, 2003)による代表的な岩石の密度、ポアソン比を参考にし、ヤング率はそれらの地震波速度 V_p 、 V_s を基に計算し、これらを表3にまとめた。

4. 数値シミュレーション

応力蓄積過程の予測をする静的接触解析はCHIKAKU Staticソフトウェアが担う。ここでは、CHIKAKU Staticソフトウェアのマニュアルからその解析理論について簡単に抜粋して記述する。

地殻変動解析において、断層運動やプレート境界の運動を計算するためには、2つの物体の接触を考慮する必要がある。CHIKAKU Staticソフトウェアでは2つの変形体同士の接触を扱い、その解析をおこなうためにペナルティ法による接触問題を定式化している。ペナルティ法は厳密な接触力(物体同士が接触しているときに作用する力学的な力; 摩擦力、垂直抗力など)の導出を目指すのではなく、物体間の幾何学的境界条件を満足することを目的とした解法である(日本塑性加工学会編、1994)。2つの物体(masterとslave)が接触しているかどうかを知る

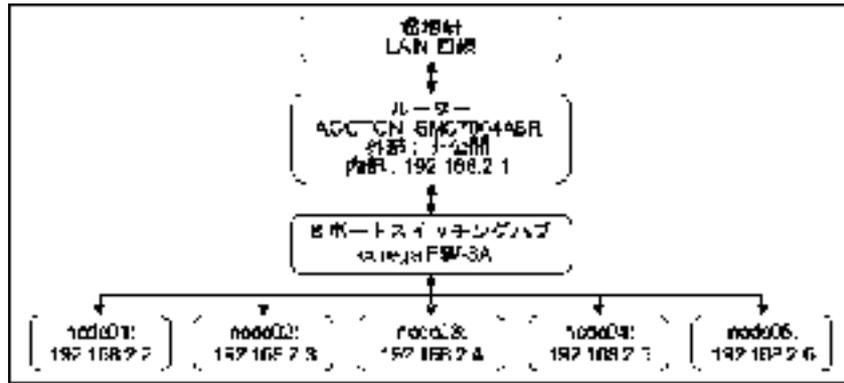


図5 並列計算機のネットワーク構成

表4 構築した並列計算機のノード構成

ノード構成						
PC	node01	node02	node03	node04	node05	
IP adress	192.168.2.2	192.168.2.3	192.168.2.4	192.168.2.5	192.168.2.6	
CPU	Dual Pentium II	Pentium 4 2.4GHz	Dual Pentium II	Pentium 4 2.4GHz	Pentium 4 2.4GHz	
RAM	1024Mb	1024Mb	1024Mb	1024Mb	1024Mb	
OS	Red Hat Linux 7.3	Red Hat Linux 8.0	Vine Linux 2.5	Red Hat Linux 8.0	Red Hat Linux 7.2	
kernel	2.4.18-3smp	2.4.18-14	2.4.18-0v13smp	2.4.18-14	2.4.18-27.7	
Fortran	Intel Compiler 7.1					
MPI	mpich-1.2.3					
port	telnet	223	323	423	523	623
	ftp	221	321	421	521	621
	http	280	380	480	580	680
	xdmcp	277	377	477	577	677

ためには、接触する可能性がある面のうち、slave側の接触可能面上にある節点(slave節点)のみを考え、その節点がmaster面上にあるか、またはその内部にあるか、あるいは離れていて接触していないかを探索する(master節点がslave面に接触しているという探索はおこなわれない。探索は常に一方のみである)。この探索をおこなう方法として、CHIKAKU StaticはInside-Outside Algorithm(Wang and Nakamachi、1997)を採用している。

有限要素法の並列化には、一般的な領域分割法を用いている。領域分割法の並列環境への実装方法には様々な手法があるが、CHIKAKU Staticソフトウェアではひとつの部分領域をひとつのProcessing Element(PE)に割り当てる方法を採用している。各部分領域の処理をおこなうプログラムはアナライザと呼ぶ。

接触問題では、接触の発生によりこれまで関連性の無かった節点の間に新たな関連性が生じる。それに従い剛性行列の非零成分の構造や、隣接する部分領域間の接続情報が変化する。CHIKAKU Staticソフトウェアでは、接触探索や領域間の接続情報等の更新はコンタクトコント

ローラーと呼ばれる1個のPEでおこなう。コンタクトコントローラーで計算された情報は各アナライザに送信される。また、接触探索には、最新の節点変位ベクトル等が必要になるため、コントローラーはこれらの情報を各アナライザから受け取る。応力積分のように部分領域毎に計算できるものは、アナライザで計算がおこなわれる。

有限要素法に領域分割法を適用する場合には、メッシュを分割することになる。その分割方法としてCHIKAKU Staticソフトウェアは節点ベースの手法を用いている。これは、CHIKAKU Staticソフトウェアが連立一次方程式を解くための線形ソルバーにGeoFEMソフトウェア(Okuda *et al.*、2003)を用いているからである。この節点ベース領域分割法ではメッシュを節点単位で部分領域に分割する。すなわち、各部分領域間で重複する節点は存在しない。この方法は剛性行列を行単位で分割することに相当する。CHIKAKU StaticソフトウェアではGeoFEMプロジェクト(<http://geofem.tokyo.rist.or.jp/>)で提案されたデータ構造をそのまま採用している。

FEM解析をおこなうに当たって表4および図5のよう

な並列計算機の構築をおこなった。CHIKAKU Static ソフトウェアや PC の並列化を担う MPI (Message Passing Interface; 分散メモリ型の並列計算機で 2 つのプロセス間でのデータをやりとりするために用いるメッセージ通信操作の仕様標準) 実装系である MPICH は、Fortran 90 で記述されているところがあるため Linux OS に標準の Gnu Fortran では正常にコンパイルすることが出来ない。そこで温地研は、非商用ノンサポート版に限りフリーで配布されている Intel Fortran Compiler 7.1 for Linux を用いることで安価に並列環境を構築した。また、並列計算の実行中には PC 間を結ぶネットワーク (LAN) を経由して多量のデータがやり取りされるため、それが他の無関係な PC のポートに流れ込みネットワークの実行速度を低下させる一因となることがある。また、他の PC からのパケットも無作為に流れ込み計算速度が低下することもあるため、これを防ぎ、更にセキュリティの品質を維持するため、プライベートな LAN 環境を用意しその中でクラスターの構築をおこなった。

モデルの領域分割について GeoFEM ソフトウェアがサポートしている手法は、RCB、Greedy、そして METIS の 3 種類である。本研究では METIS (<http://www-users.cs.umn.edu/karypis/metis/>) を選択した。METIS は安定かつ高速の手法で、任意の領域数の分割が可能となっている。本来ならば分割数は、コンタクトコントローラーに 1PE 使うため、6 ブロックとなるが各 PC の CPU 性能にばらつきがあるため、高速な PC では計算に無駄な空き時間を生じ、非効率になる。そこで、高速な PC に対して複数のプロセスを流すことにした。つまり、領域分割数を 11 ブロックとして、node01 と node03 にはそれぞれ 2 ブロック、高クロックの node02、node04 には 3 ブロック (コンタクトコントローラーを担わせた node05 には 1 ブロック) を割り当てることとした。実際の解析に当たって、まだ余力はあったがこれ以上の分割をおこなうと計算機間の通信量が飽和したためか、計算が不安定となってしまったので以後の並列計算の環境はこれを基本とした。

5. 解析結果および検討

CHIKAKU Static ソフトウェアで扱える接触問題は現在のところ、固着状態か摩擦なしの場合の弾性変形解析に限られている。今回は、表 2 の 4 つの計算条件下で固着状態と摩擦なしの計 8 パターンの解析をおこなった。1 回の解析時間は約 30 分で、線形ソルバーによる解の収束は良好であった。CHIKAKU Static ソフトウェアによって出力される解析結果は、モデル全体における各接点の変位ベクトル、そして各要素のミーゼス相当応力

(通常、応力はテンソルで表し、3 つの直交する主応力に統合できる。それを更に単軸引張応力に置き換えたもの。) が出力される。更に、接触探索をおこなった master 面の要素と slave 面の節点毎に接触力 (本研究では、摩擦力の計算はおこなわれなため、主として垂直抗力に相当する) 変位ベクトルが出力される。これらの解析結果は膨大で簡単には処理できないフォーマットのものも含まれていたため、本報告ではデータ処理の比較的容易であった接触探索の結果のうち、上部地殻側 master 面の解析結果について記述する。

図 6 - 1 から図 6 - 4 はシミュレーションモデルに強制変位を与えたときの上部地殻の master 面における接触力解析結果である。それぞれの図は順に、表 2 の からの計算条件下の、フィリピン海プレートと上部地殻との接触面における摩擦が固着状態の場合 (上図) と、全く存在しない場合 (下図) の接触力分布を表している。なお、図はグリッドモデルを真上から表示し、同一スケールの地図上に投影してある。垂直方向の格子間隔は約 1.7km で、深さ約 + 1 ~ - 16 km の範囲に分布する (図 4 の接触面を参照) 。

プレートが固着している場合、計算条件 からの解析結果は共通して、国府津 - 松田断層と神縄断層の接合部 (以後、A 域と呼称) に最も強く接触力が作用し、千葉県館山市の南西沖付近 (以後、B 域と呼称) にもやや大きい接触力が作用した。このときの接触力は 10^{13} N/m^2 (10^4 GPa) オーダーの値となっている。本研究における FEM 解析は静的な弾性変形解析であるため、塑性変形を起こさせる初期降伏応力は設定されない。また脆性破壊も生じない。そのため、モデルには極端な弾性変形または応力の蓄積が生じる。ただしこれは、上部地殻とフィリピン海プレート間の形状による変形や応力集中の効果の知見を得る点に関して都合がよい。これら 2 箇所の接触力の集中は、境界曲面が急な部分と一致する。フィリピン海プレートに作用させた強制変位の方位に対して平行な境界面ではプレートの変位を保持するだけの接触力が上部地殻側に作用しにくい。したがってそれを補うため、上記の 2 箇所に接触力が大きく作用する結果になったと考えられる。計算条件 には接触面の東側と西側の境界の要素に不自然な接触力の集中が生じている (図 6 - 4)。また計算条件 にも同様の傾向が見られる (図 6 - 3)。計算条件 、 の解析は、モデルの側面における変位を自由に許した設定だが、実際の地殻構造はグリッドモデルの四方にも存在し、外部の構造により運動の束縛を受ける。これを考慮するために計算条件 、 では、モデルの東西側面における x 軸方向の変位を固定

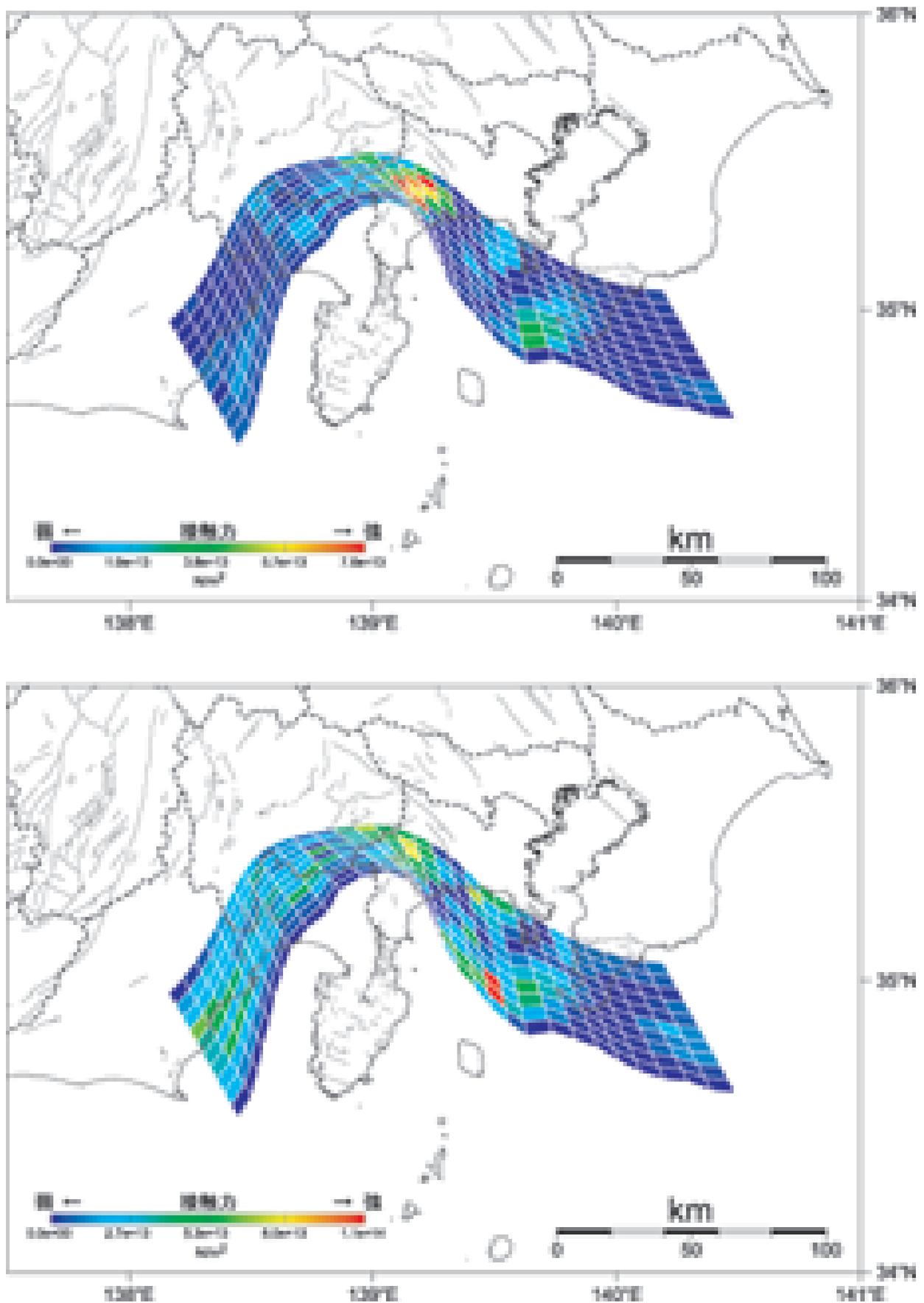


図6 - 1 CHIKAKU Static で表2の計算条件Iを基に解析した上部地殻の接触面における接触力分布
 (上図：固着状態、下図：摩擦なし)

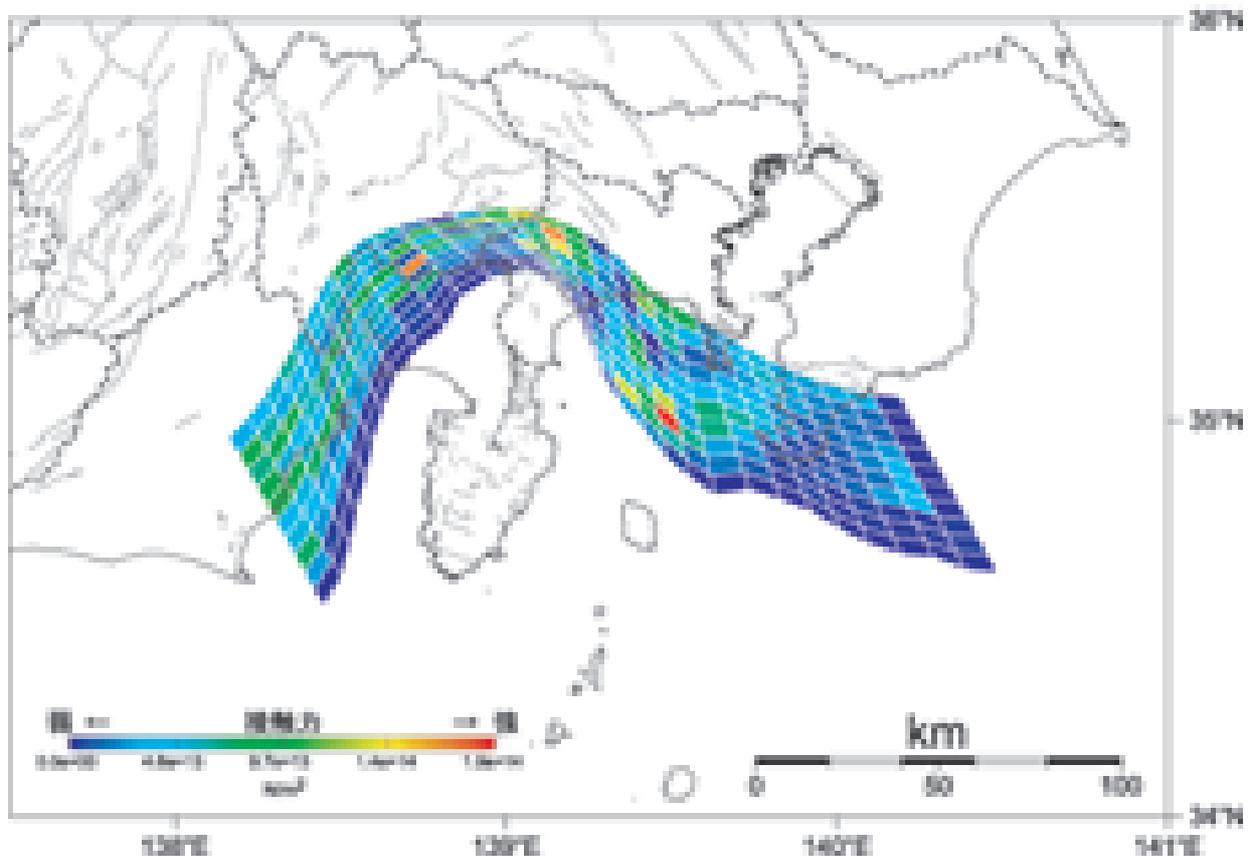
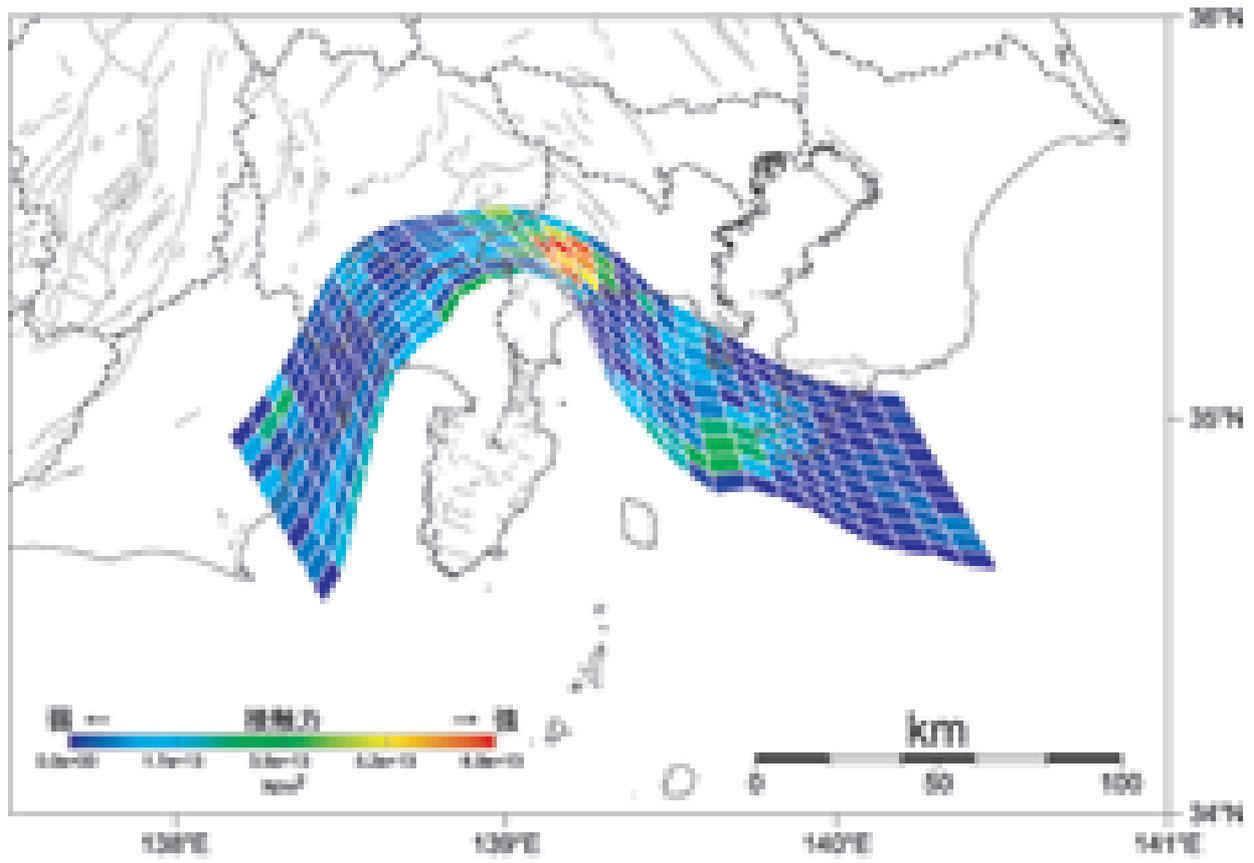


図6 - 2 CHIKAKU Static で表2の計算条件Ⅱを基に解析した上部地殻の接触面における接触力分布
(上図：固着状態、下図：摩擦なし)

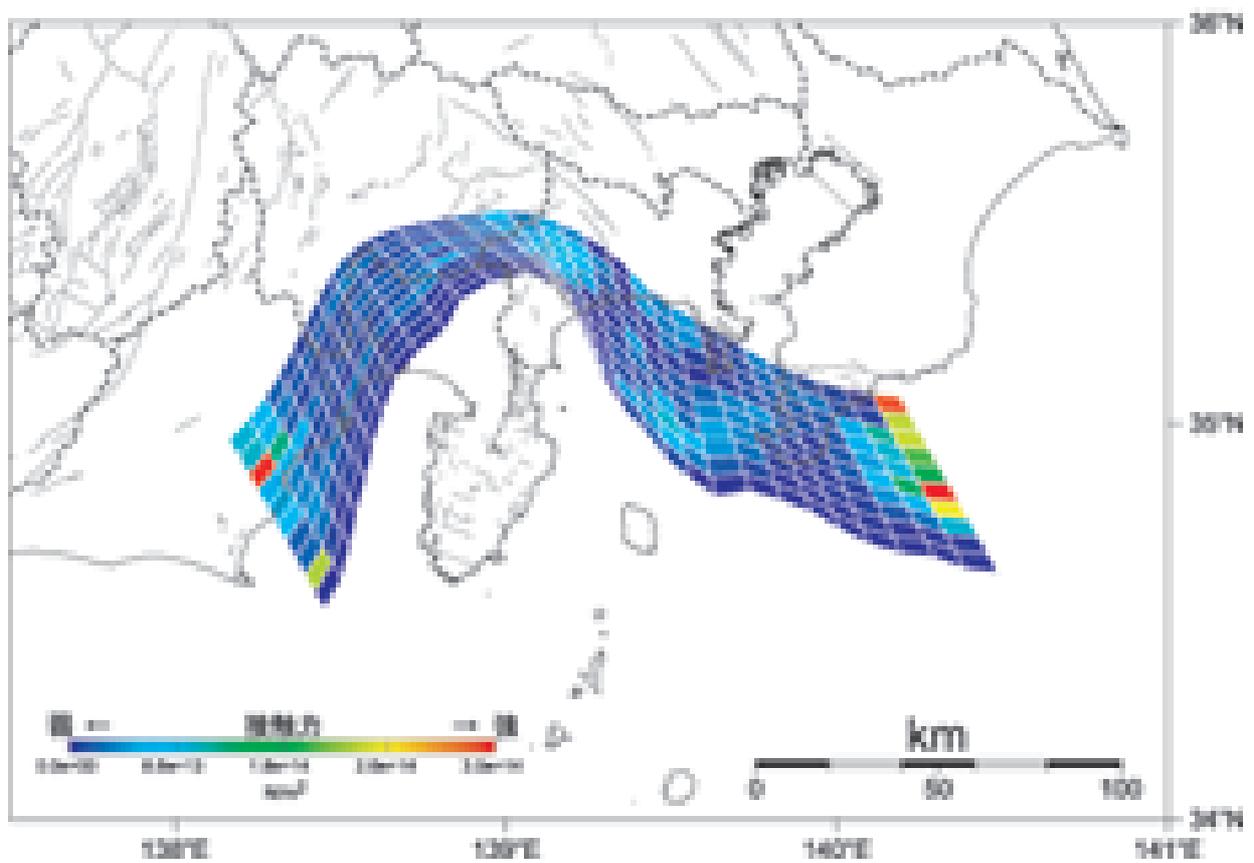
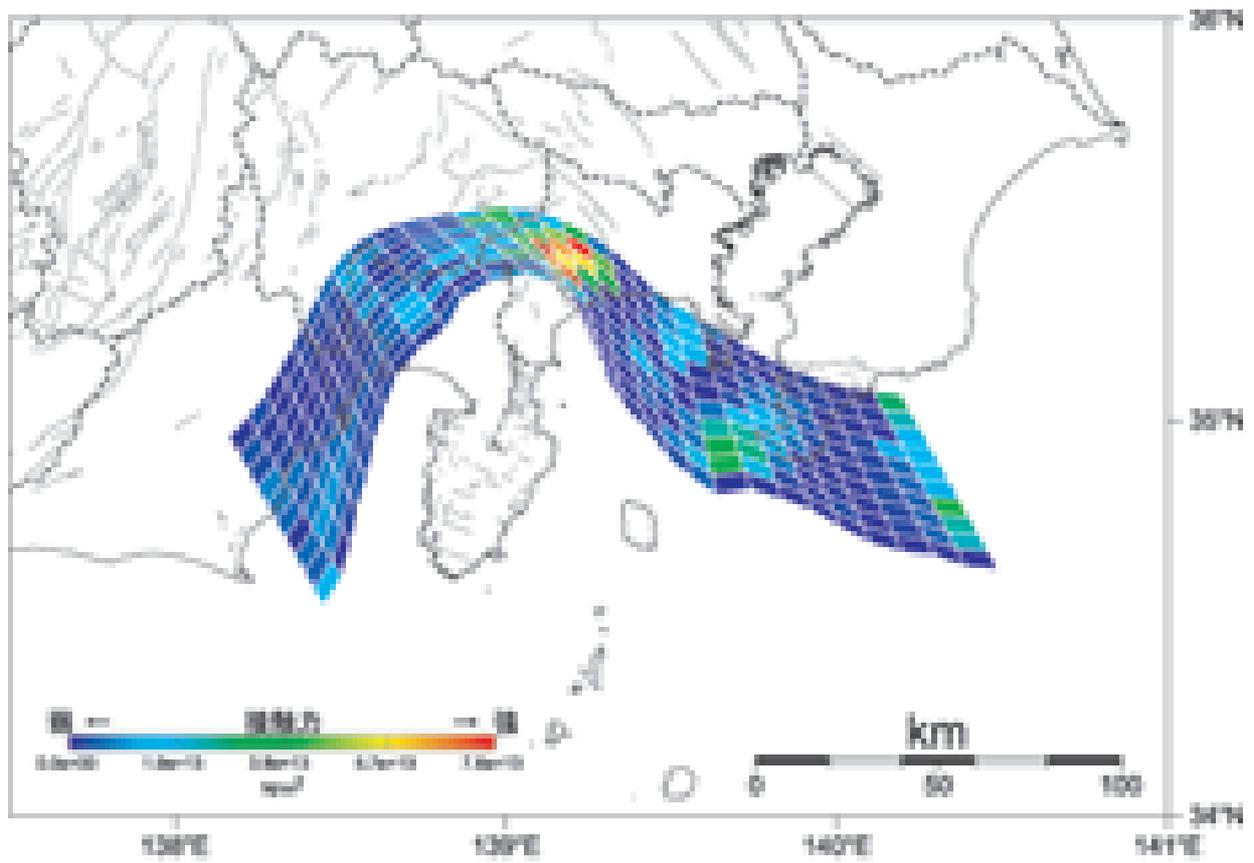


図6 - 3 CHIKAKU Static で表2の計算条件Ⅲを基に解析した上部地殻の接触面における接触力分布
 (上図：固着状態、下図：摩擦なし)

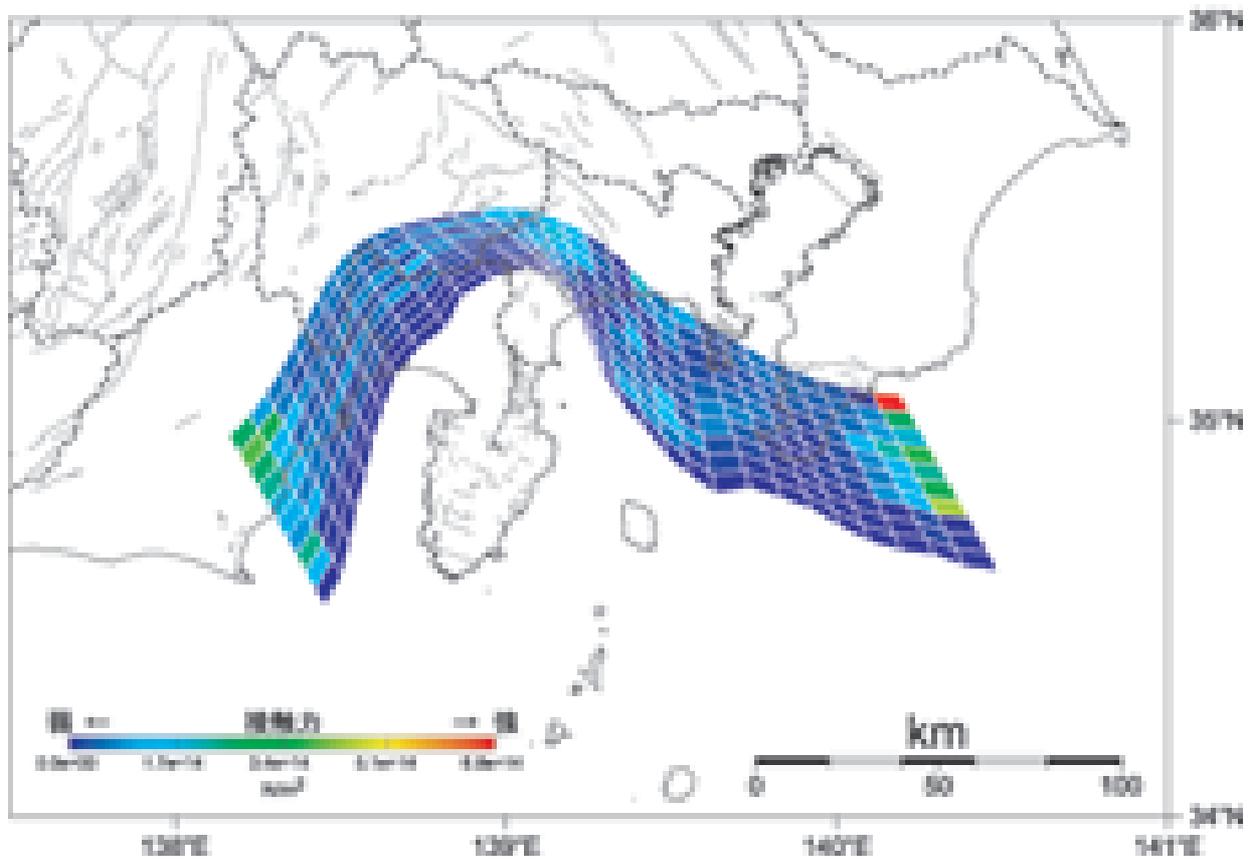
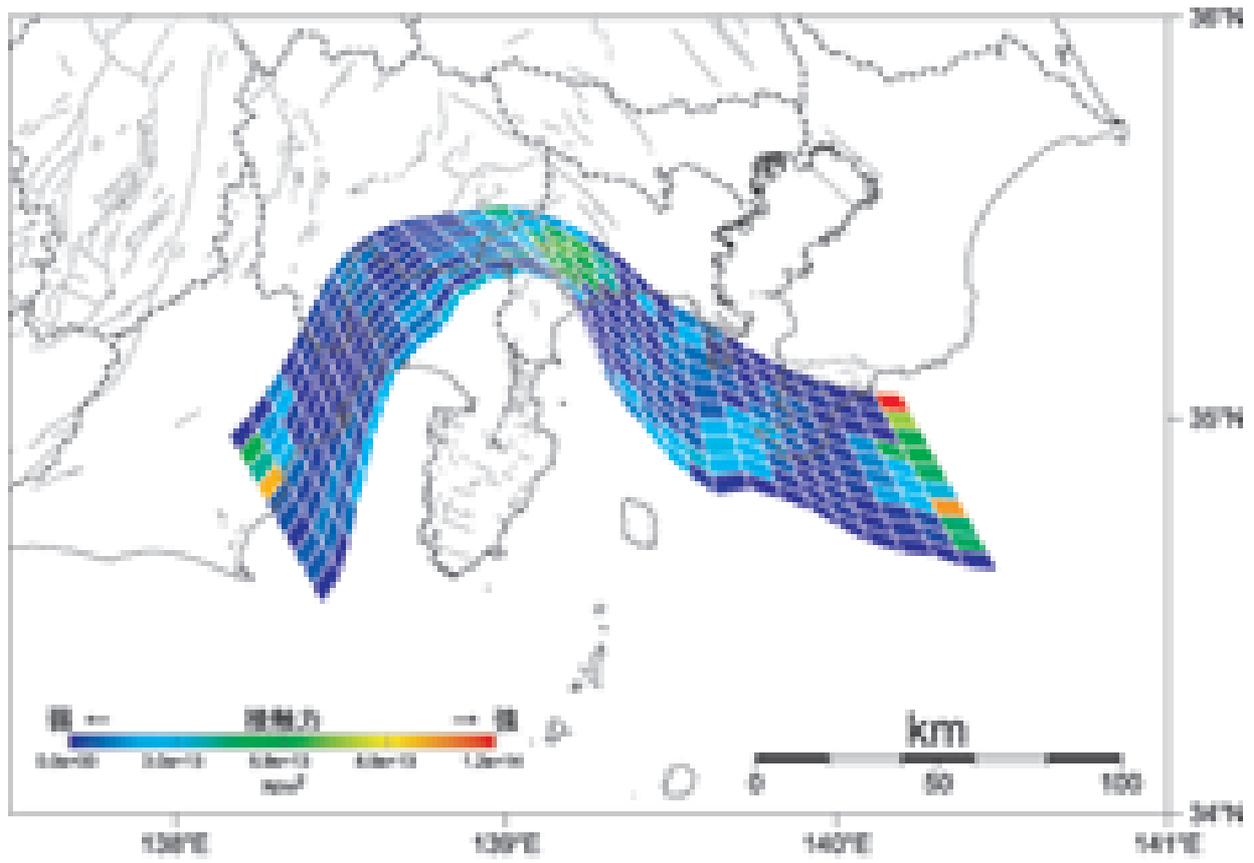


図6 - 4 CHIKAKU Static で表2の計算条件Ⅳを基に解析した上部地殻の接触面における接触力分布
 (上図：固着状態、下図：摩擦なし)

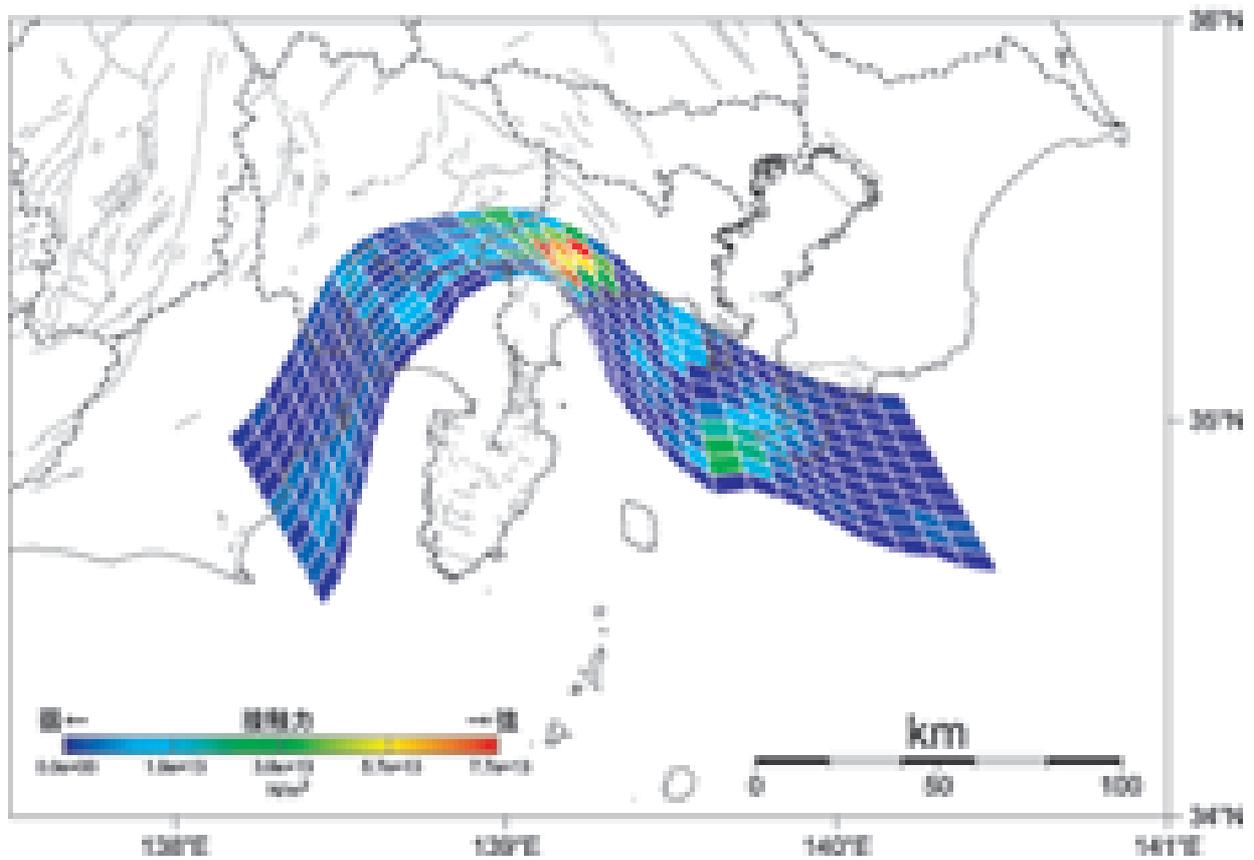
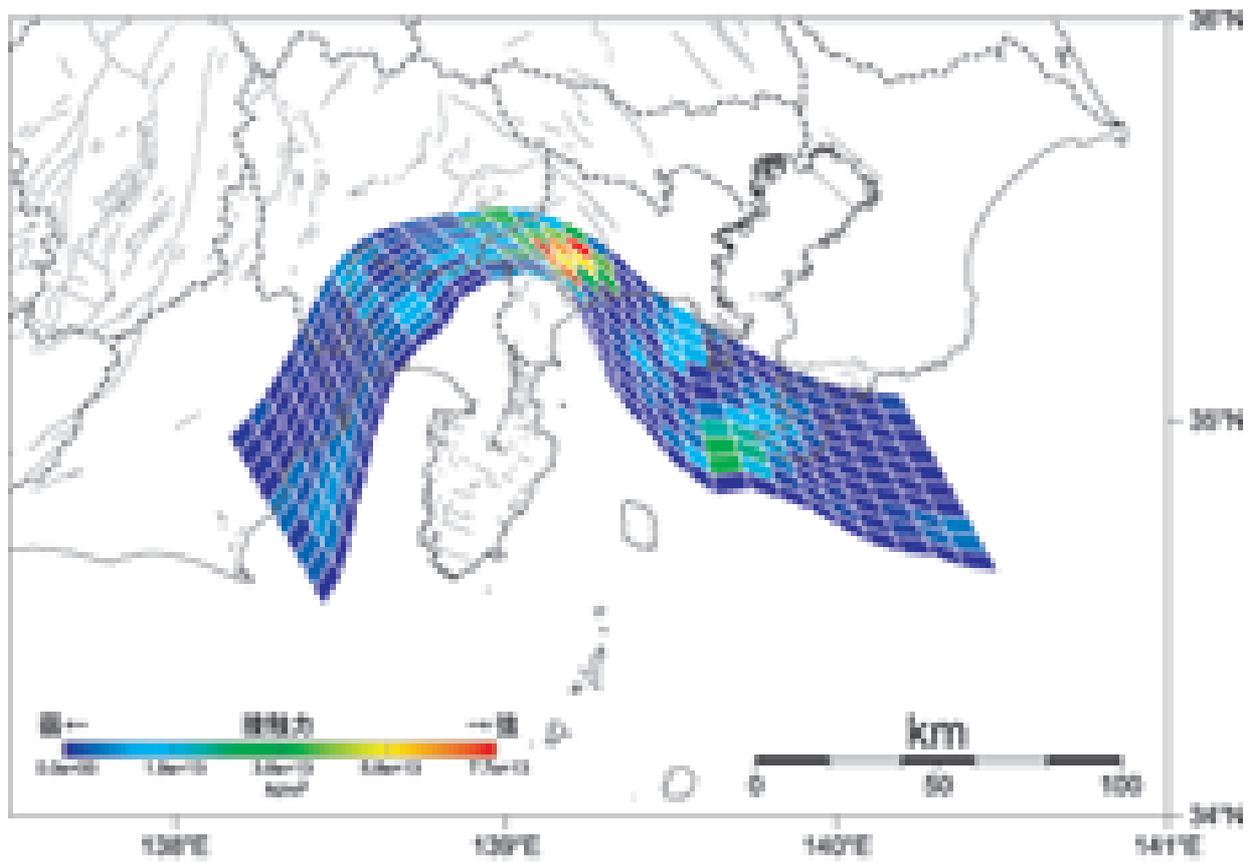


図7 表2の計算条件Iにおいて強制変位量を90mに再設定し解析した上部地殻の接触面における接触力分布
 (上図：固着状態、下図：摩擦なし)

した。このことが両側面の要素に大きな接触力が作用した原因である。この境界付近の接触力は半ば強制的に作用したものであるため考慮しない。問題は、より内側の接触面で作用する接触力が側面を(x 軸方向について) 自由端としたときと固定端としたときに、どのような違いを生じているかである。結果的には接触力の集中箇所、数値ともにはほぼ同じ範囲に収まっている。また、計算条件、のスラブ引張り力を考慮した境界条件の設定においても、おおむねこの特徴に変わりはない。つまり、フィリピン海プレートの押しを基本とした境界条件は上記2箇所(国府津-松田断層と神縄断層の接合部付近と、千葉県館山市の南西沖)に接触力の集中が認められた。4種類の計算条件を試みた結果、この特徴に際だった変化はなく、少なくとも接触面の形状効果だけを考慮するものとして、上記2箇所は潜在的な応力集中域またはアスペリティになりえるのではないかと考える。

摩擦なしの境界条件では接触面の広範囲に接触力が作用した。接触が強い領域は固着条件と同様でA域、B域に分布した。ただし、もっとも強い接触力がB域で作用し、その領域は固着状態の場合よりも西に移っている。更に、計算条件では1要素だけであるが、富士山下付近で接触力が強く作用した。固着状態の場合、接触面付近の変位が制限されるため、接触力はフィリピン海プレートの突出するA、B域の2箇所に集中して働く。それに対して、摩擦なしの場合では接触面付近での変位も大きくなるため、これまでフィリピン海プレートを保持してきたA、B域の接触面が変形することで、他の領域に新たな接触が生じたのではないかと考える。

これまでフィリピン海プレートの強制変位量を10kmとしたが、これは非常に大きい値であるため、試みに国府津-松田断層の活動間隔と考えられている、3000年分(山崎、1993)のフィリピン海プレートの変位量(90m)を与えて再度解析をおこなった。図7は計算条件の設定で同変位量を与えたときの固着状態と摩擦なしの解析結果である。固着状態のときの結果はこれまでの解析結果とほぼ同じで、接触力集中箇所および数値はほぼ一致している。これによって、固着時における接触力の最大値がほぼ 10^{13}N/m^2 のオーダーであることが分かる。つまり、フィリピン海プレートの変位量が90mの時点ですでに接触力の上限に達しており、これ以上は構造の変形によって緩和するものと考えられる。一方で、摩擦なしのときの接触力の分布は固着時のものとほとんど同一であった。これについては、上部地殻とフィリピン海プレートの主要な接触がA域とB域に集中しており、変形も始めに両域から生じていくものと予想され、その他の接触面では接触力が作用していないことが考えられる。

6. まとめ

神奈川県西部地域の定常的地殻変動を予測するためのグリッドモデルをCHIKAKUシステムによって作成した。このグリッドモデルを基に、CHIKAKU Staticソフトウェアによる静的な弾性変形解析を実行した結果、県西部周辺における上部地殻とフィリピン海プレートの接触面の2箇所(国府津-松田断層と神縄断層の接合部付近と、千葉県館山市の南西沖)に接触力の集中が認められた。4種類の計算条件を試みた結果、この特徴に際だった変化はなく、少なくとも接触面の形状効果だけを考慮するものとして、上記2箇所は潜在的な応力集中域またはアスペリティになりえるのではないかと考える。

謝辞

本研究を推進するに当たり、日本大学工学部情報工学科の宮村倫司氏から大変貴重なご指導を頂きました。ここに、感謝の意を表します。

本研究は平成15年度重点基礎研究(創成型)「GPS測量等の地殻変動データに基づく地殻変動モデル解析に関する研究」の一部として実施したものです。

参考文献

- 浅田 昭、沖野郷子 (1998) 日本周辺海域の500mメッシュ海底地形データファイルの作成, 1998年海洋調査技術学会研究成果発表会予稿集.
- 代田 寧、伊東 博、棚田俊收、八巻和幸 (2002) 神奈川県西部地域における最近2年間の傾斜観測結果, 温地研報告, 33, 43-48.
- Ishida (1989) The configuration of the Philippine Sea plate beneath the Kanto-Tokai district, Japan, Abstract the 25th IASPEI.
- 板寺一洋 (1999) 温泉地学研究所の観測井における地下水水位変化の特徴とその補正について, 温地研報告, 29(1, 2), 57-64.
- 金井 崇、大石善雄、牧野内昭武、本間高弘、宮村倫司 (2001a) CHIKAKUモデリングシステム - 地震発生及び地震波伝播予測のための地殻データベース / CADソフトウェア -, 日本地震学会2001年秋季大会予稿集.
- 金井 崇、大石善雄、佐藤龍夫、土井良二郎、牧野内昭武、宮村倫司、本間高弘 (2001b) CHIKAKU DB/CADによる日本列島付近の地殻構造モデルの構築, 情報処理学会研究報告, 2001-CG-105, 5-10.
- 国立天文台編 (1997) 理科年表, 70, 丸善, 771.
- 国立天文台編 (2003) 理科年表, 76, 丸善, 657.
- 村松一弘、村上弘幸、東田明宏、柳沢一郎 (1997) 並

- 列計算機上での構造格子生成システムの開発, 計算工学講演会論文集, 2(1), 113-116.
- 村松一弘、島田昭男、村上弘幸、東田明宏、若月滋人 (2000) 並列計算機上での非構造格子生成システムの開発, 計算工学講演会論文集, 5(1), 349-352.
- 日本塑性加工学会編 (1994) 非線形有限要素法 - 線形弾性解析から塑性加工解析まで, コロナ社, 247 p.
- Okuda, H., Nakajima, K., Iizuka, M., Chen, L. and Nakamura, H. (2003) Parallel Finite Element Analysis Platform for the Earth Simulator: GeoFEM, RIST/Tokyo GeoFEM Report 2003-001.
- 温泉地学研究所 (1999) 温泉地学研究所における「神奈川県西部地震」の取り組み, 温地研報告, 29(1, 2), 3-40.
- Seno, T., Stein, S. and Gripp, A. E. (1993) A model for the motion of the Philippine Sea plate consistent with NUVEL-1 and geological data, J. Geophys. Res., 98, 17941-17948.
- 棚田俊收、伊東 博、代田 寧、板寺一洋 (2002 a) 神奈川県西部地域における光波測量結果とその特徴について, 温地研報告, 33, 25-30.
- 棚田俊收、伊東 博、代田 寧、板寺一洋 (2002 b) 神奈川県西部地域における GPS 観測結果とその特徴について, 温地研報告, 33, 31-42.
- Wang, S. P. and Nakamachi, E. (1997) The inside-outside contact search algorithm for finite element analysis, International J. Num. Meth. Eng., 40, 3665-3685.
- 山崎晴雄 (1993) 南関東の地震テクトニクスと国府津・松田断層の活動, 地学雑誌, 102(4), 365-373.
- 横山尚秀、板寺一洋、小鷹滋郎、平野富雄 (1992) 神奈川県西部の地震予知研究用観測井における地下水位変化の特徴とその要因, 温地研報告, 24(1), 1-18.
- 横山尚秀、小鷹滋郎、板寺一洋、長瀬和雄、杉山茂夫 (1995) 神奈川県西部地震予知研究のための地下水位観測施設と地下水位解析, 温地研報告, 26(1, 2), 21-36.
- Zhao, D., Hasegawa, A. and Horiuchi, S. (1992) Tomographic Imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan, J. Geophys. Res., 97, 19909-19928.