

CHIKAKU DB/CAD による日本列島付近の地殻構造モデルの構築

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***

理化学研究所 CHIKAKU プロジェクトチーム

* 慶應義塾大学 †(株) リンクス・リセウム ‡ 理化学研究所 ** 日本大学 *** (株) 富士総合研究所

E-mail: chikaku@postman.riken.go.jp

本報告では、地震発生メカニズムの解明、および強震動による地震波伝播予測を目的としたシミュレーションソフトウェア開発プロジェクトの成果の一つである、CHIKAKU DB/CAD について述べる。CHIKAKU DB/CAD は、地殻構造に関連する観測データのデータベース化から、シミュレーションに必要なソリッドモデルの構築までを担当するソフトウェアである。現状では、地殻構造の形状を計測することは極めて難しい。ここでは、与えられた観測情報から地殻構造を推定し、日本列島近海の地殻ソリッドモデルを構築する方法についても述べる。

Reconstruction of 3D Tectonic Solid Models in and around Japanese Islands Using CHIKAKU DB/CAD

TAKASHI KANAI* YOSHIO OISHI† TATSUO SATO† RYOZIRO DOI†
AKITAKE MAKINOUCHI‡ TOMOSHI MIYAMURA‡ TAKAHIRO HOMMA**

RIKEN, CHIKAKU Project Team

* Keio University † Lynx Lyceum Co. Ltd.

‡ The Institute of Physical and Chemical Research ** Nihon University *** Fuji Research Institute Co.

E-mail: chikaku@postman.riken.go.jp

We have developed the systems of reconstructing the 3D computational models of tectonic structure called CHIKAKU DB/CAD as a part of the project of developing simulation softwares, for the purpose of the clarification of the mechanism of earthquakes, and the prediction of the earthquake wave propagation. The main purpose of the development of CHIKAKU DB/CAD is to manage measurement data such as hypocentral points, to edit the upper plate data from such data, and to offer the data for the tectonic simulation. Today, it is quite difficult to measure the tectonic structure directly. Here we also discuss the method for creating 3D tectonic models of in and around Japanese Islands from given measurement data.

1 はじめに

地球温暖化やエルニーニョ現象等の地球規模の現象を計算機シミュレーションによって解明しようとする試みは非常に有意義かつ野心的である。このような地球環境の変動現象の解明・予測を目標とした地球シミュレータ計画 [1] が、1997 年に科学技術庁 (現文部科学省) により開始された。今年で 5 年目を迎え、専用ハードウェア (超高速並列計算機システム) はほぼ完成の域に達しつつある、という状況である。

我々の研究チーム (CHIKAKU プロジェクトチーム) は、計画当初からその中の固体地球科学部門に携わっており、固体地球変動、特に日本列島付近における地殻・マントル活動を解明するための並列ソフトウェア開発を行っている。今回、我々はその中のソフトウェアの 1 つである CHIKAKU モデリングシステム

[2] を開発しリリースしたので、ここに報告する次第である。この CHIKAKU モデリングシステムの詳細の他に、本モデリングシステムによる、日本列島近海の三次元地殻構造モデルの構築過程をも併せて説明する。

2 CHIKAKU プロジェクトと CHIKAKU システム

CHIKAKU プロジェクト [3] では、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する非線形有限要素法 (FEM) ソフトウェアシステムである CHIKAKU システムの開発を、1997 年より行っている。これらのシミュレーションを実施するために、地殻データから解析用非構造メッシュを作成し、そのモデルを使ってシミュレーション計算を行

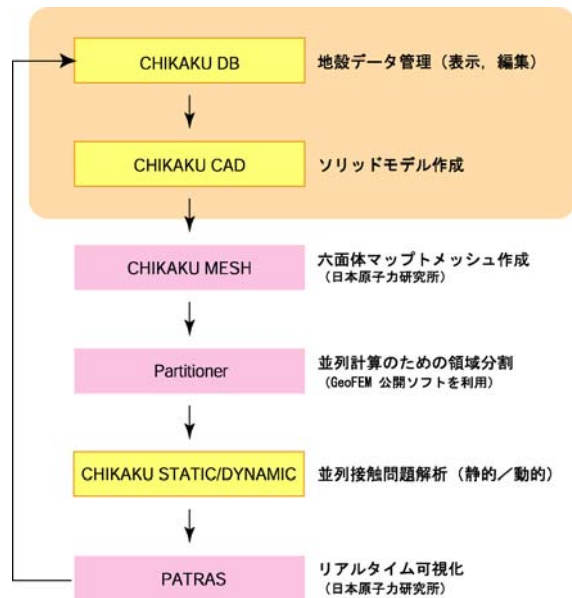


図 1: CHIKAKU システムの構成

い、最後に出力された大量の結果データを可視化処理するといった、一連の機能をシームレスかつ効率良く発揮できるシステムの構築を目指している。

図 1 に CHIKAKU システムの構成を示す。このシステムは、(1) 地殻データの管理 (表示, 編集), (2) 三次元ソリッドモデル構築, (3) 解析用六面体メッシュ生成, (4) 並列計算のための領域分割, (5) FEM 並列計算 (静解法と動解法), (6) 計算結果の可視化, の一連の作業を支援するためのソフトウェア群よりなる。このうち、我々のチームが開発しているのは主に (1), (2), (5) であり, (3), (6) は日本原子力研究所が開発を行い, また (4) は GeoFEM [4] の公開ソフトウェアを利用している。これらの研究機関との協力のもとにシステム全体の開発を進めており, 遅くとも 2002 年 3 月には一連のソフトウェア群が一通り揃う予定である。

今回対象とする CHIKAKU モデリングシステムは, 上記の六つのソフトウェア群のうち, 最初の二つである (1), (2) を担当するソフトウェアである。CHIKAKU DB は主に地殻構造に関する観測データの管理, およびデータ作成を行うためのソフトウェアであり, CHIKAKU CAD は, 三次元地殻ソリッドモデルの構築を行うためのソフトウェアである。1998 年より開発を開始し, 2001 年 8 月にバージョン 1.0 をリリースした。これらは, 専用ハードウェアの上ではなく, PC 上で動作する Windows 用のソフトウェアとなっており, 日本の地震関係の各研究・教育機関には無償で配布している。

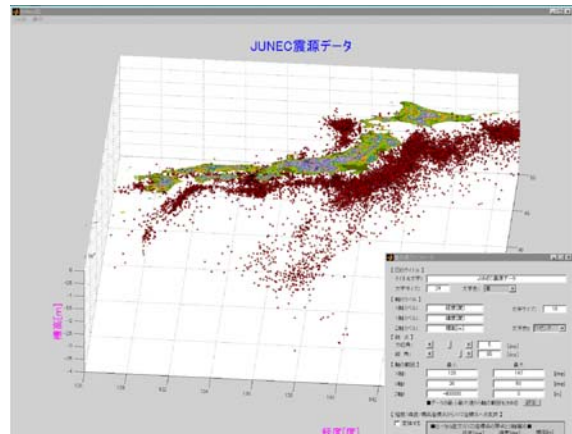


図 2: 震源データ JUNEC

3 CHIKAKU DB によるプレート境界面の生成

3.1 CHIKAKU DB と観測データ

CHIKAKU DB は, 地殻構造用観測データのデータベース機能, 表示機能, および編集機能より構成されている。

地殻構造の構築に必要なデータは, 主にいくつかの機関が保持している観測データである。表 1 に日本近海の地殻構造に関する観測データの一部をまとめたものを示す。このうち, 現在本ソフトウェアが保持, 管理できるデータは,

震源データ (JUNEC) 過去 10 年間の地震の震源位置と大きさを表したデータ。

地表標高データ (数値地図 250) 2 万 5 千分 1 地形図に描かれている等高線を計測してベクトルデータを作成し, それから計算によって求めた数値標高モデル (DEM: Digital Elevation Model) データ。

海底面標高データ (SEAMAP) 水路測量データをメッシュ単位で統計処理し, 格納したデータ。

海岸線データ (数値地図 200000) 2 万 5 千分 1 地形図に描かれている情報のうち, 行政界・海岸線についてベクトル形式で数値化したデータ。

の四つである。例として, 図 2 に震源データを本ソフトウェアで表示した例を示す。これらのデータは有償または無償で手に入るものばかりであるが, それぞれ扱うデータフォーマットや格納形式, スケール (例えば何 m 刻みでデータが記録されているか, など) は, データによってまちまちである。

そこで, データベース機能と表示機能については地下構造要素の一般形を想定して設計・開発している。

	データ名	管理
震源	国立大学観測網地震カタログ震源ファイル (JUNEC)	東京大学地震予知情報センター
震源	気象庁震源データ	気象庁 気象業務センター
地表標高	数値地図 {50, 250, 10000} (標高)	建設省国土地理院
GIS 用データ	数値地図 2500 (空間データ基盤)	建設省国土地理院
地表ベクトル	数値地図 {25000, 200000} (海岸線・行政界)	建設省国土地理院
海底面標高	3次メッシュ水深データ	海上保安庁 水路部
海底面標高	SEAMAP	(有) ジオデータサプライ
断層	FAULTL, FAULTG	海上保安庁 水路部

表 1: 日本列島近海の地殻構造に関する観測データ (一部)

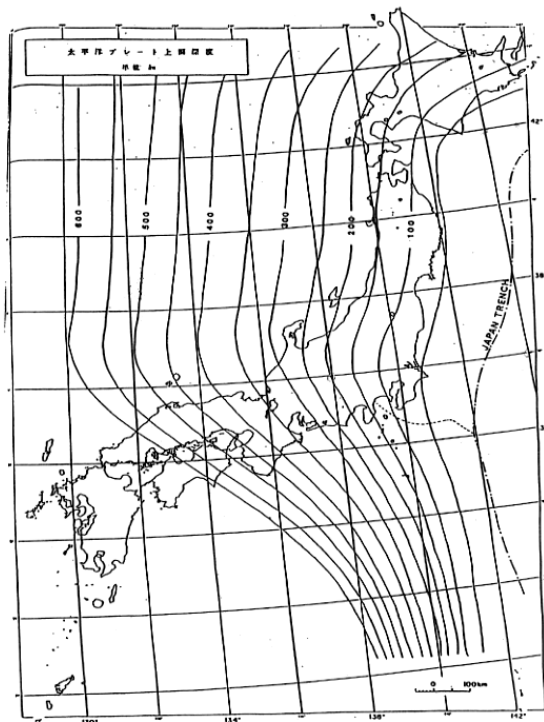


図 3: 太平洋プレート上面の等深線分布 [5]

本ソフトウェアはデータをポイント型、リンク型、グリッド型の独自フォーマットでファイル単位で管理している。例えば、ポイント型であれば、経度、緯度、標高といった位置情報と共に、実数型・整数型・文字型の任意の属性を定義することが可能である。従って新規データを本ソフトウェアに登録する場合は、その幾何学的形状が用意されているタイプで表現できるかを判別すればよいことになる。タイプさえあれば属性定義に制限はないと言える。

3.2 プレート境界面の作成

CHIKAKU DB では、地殻構造のためのデータ構築のための編集機能が用意されている。何故データの編

集機能が必要かという点、表 1 に挙げられている観測データだけでは、地殻構造を構築するのに不十分だからである。

一般的に、地殻構造 (ここでは大体地下深度 600km までの構造を考える) は、いくつかプレートの沈み込みにより形成されている。本来ならば、断層と呼ばれる地層の切れ目によりさらに複雑な形状をしているが、ここでは特に考慮しないものとする。地震は、プレートの境界面における、プレート同士の「ずれ」から起こるものとされている。従って、特に地震発生過程のシミュレーションに利用するための地殻構造モデルを構築するには、まずこのプレート境界面を構築することが大変重要な課題である。図 3 に、例として太平洋プレート上面の等深線分布を示す。このような面はいくつか考える必要がある。例えば、日本列島近海に存在する境界面データとして、太平洋プレート上面の他に、フィリピン海プレート上面、モホ面 (モホロビッチ不連続面)、コンラッド面の深度分布データが挙げられる。これらのデータは紙媒体でのみ文献に記載されている [5]。

プレート境界面データは、現状では正確にその形状を求めることは、直接的な観測データが得られない以上まず不可能である。よって、観測により得られる間接的なデータを参照しながら、地震学者が「推定」する作業が必要となる。この「推定」作業は、常に地震学者の研究の種になる部分であり、様々な学説があることから、一概には決めることができない。例えば図 3 は、防災科学技術研究所の石田瑞穂氏が作成したもので、いわゆる「石田モデル」と呼ばれるデータである。

また、参照データには主に震源データが使用される。震源地がちょうどプレート境界面がずれを起こした位置と推測できるので、この震源地の付近にプレート面が横たわっていると考えられるからである。

我々は、現在紙媒体で記録されているこれらの境界面データをデジタル化するのではなく、推定作業そのものにあたる編集機能及びインターフェースを

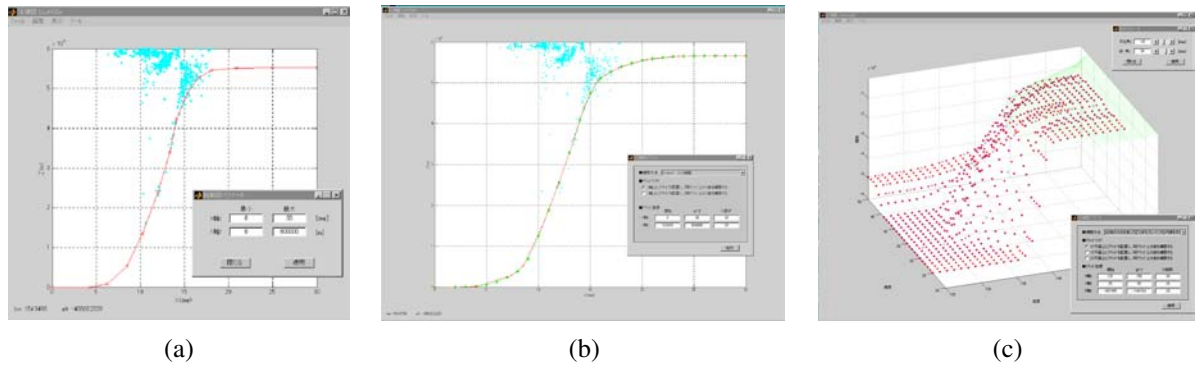


図 4: プレート境界面編集機能による編集手順: (a) 切断面における点のマニュアル入力 . (b) 切断面における補間曲線からの点列の生成 . (c) 複数の切断面からの曲面補間による境界面グリッドデータ .

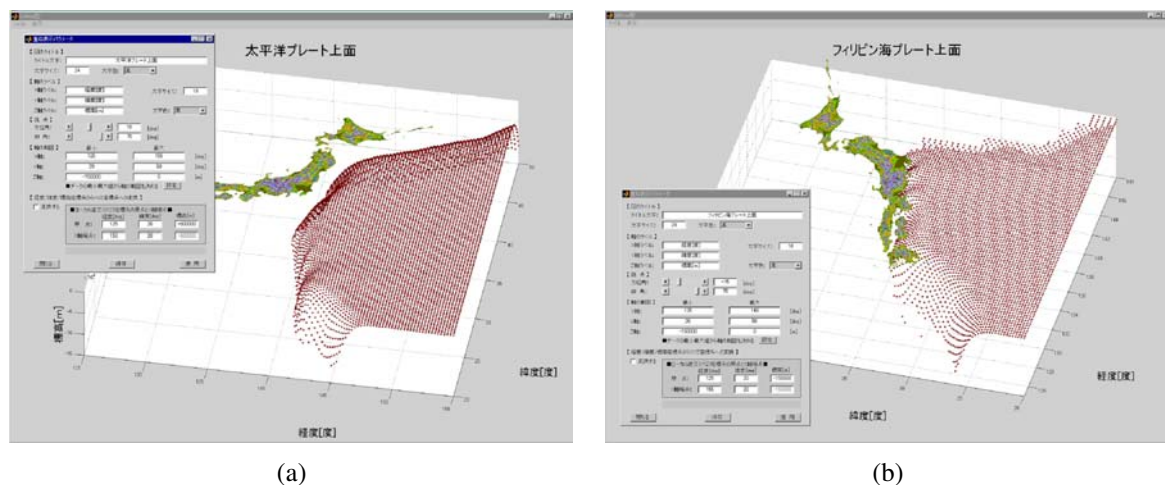


図 5: 編集機能により生成したプレート上面データ: (a) 太平洋プレート上面 . (b) フィリピン海プレート上面 .

CHIKAKU DB の中で実装している . この編集機能を実装するにあたり , 地殻構造モデルを過去に実際にプレート境界面を構築しシミュレーションを行っている地震学者の作業モデル [6] を参考にした .

図 4 に , 本ソフトウェアにおけるプレート面編集機能手順の一部の結果を示す . 編集は具体的には以下のような手順で行われる .

1. 日本列島付近のプレート面を含むと推定される領域の中に , 複数の切断面を定義する . 切断面は緯度線に平行な面もしくは垂直な面で , 等間隔にとる .
2. 各切断面に , 近傍で発生した震源位置を投影しプロットする .
3. 震源位置の分布状況を参照しながら , プレート上面と推定される点を数点マニュアル入力する (図 4(a)) . これらの入力点は , 削除 , 移動が可能である .
4. 入力した点を曲線補間し , 切断面上でのプレ

ト上面の形状を点列として決める (図 4(b)) . すべての切断面上で 1-4. の処理を行うと , 等間隔で平行な点列が並んでいることになる .

5. すべての点列を使い , 曲面補間によって格子状の境界面を作成する . (図 4(c))

これらの面は , 最終的には図 4(c) のような格子状のグリッドデータとして出力される . 曲線補間や曲面補間のための手法は , 線形補間や 3 次補間 , 区分 3 次エルミート補間の中から自由に選ぶことが可能である . 図 5 に , 上記の機能により生成した (a) 太平洋プレート上面のデータ , および (b) フィリピン海プレート上面のデータを示す .

4 CHIKAKU CAD によるソリッドモデルの生成

CHIKAKU CAD の開発の主な目的は , CHIKAKU DB で編集されたデータを入力とし , 地殻変動シミュレーションに必要なデータを提供することである . シ

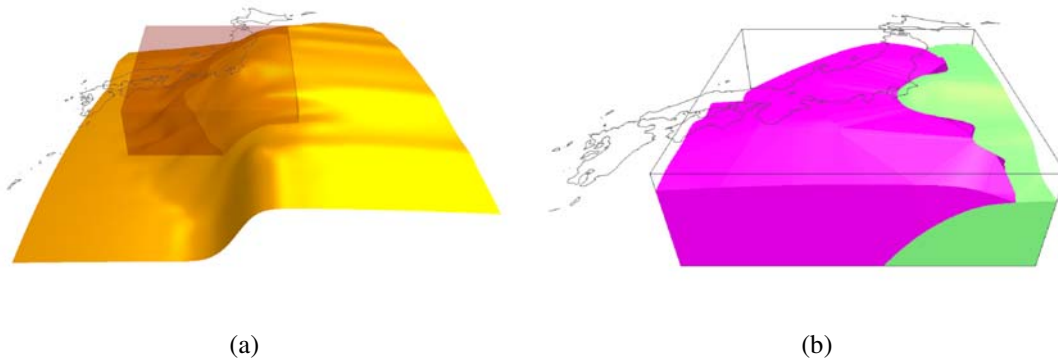


図 6: CHIKAKU CAD によるソリッドモデル作成: (a) 定義されたソリッドモデルと自由曲面による境界面モデル. (b) 切断された複数のソリッドからなる地殻構造ソリッドモデル.

ミュレーションには六面体や四面体等から構成される非構造メッシュを必要とするため、これらのメッシュをメッシュジェネレータで作成するための、立体的な構造をもつソリッドモデルデータを出力する。

このソフトウェアの開発に先立ち、我々は市販の機械設計 CAD システムをもとに地殻 CAD プロトタイプシステムを開発し評価を行ってきた [7, 8]。市販の CAD システムは機能的には豊富である一方、システムとしては大規模なものとなり、かつ汎用的に作られているため処理速度が遅い、高価である、等の問題があった。

これらの事項を考慮した上で、我々は必要な機能だけに絞って一から開発する、という方針をとっており、その結果ソフトウェアのパフォーマンスは向上したと言える。また、本ソフトウェアは、CHIKAKU DB とは異なり、その用途が地殻変動シミュレーションへの接続目的と限定されるものである。よって本ソフトウェアは、データのやり取りだけができるようにした上で CHIKAKU DB とは切り離し、Windows 上で動作する独立したソフトウェアとして開発した。

CHIKAKU CAD の主な機能としては、CHIKAKU DB のデータの入力機能、自由曲面生成機能、地殻ソリッドモデル定義機能、立体切断機能、ソリッドモデル出力機能である。以下に各機能について示す。

1. データ入力機能、自由曲面生成機能：CHIKAKU DB からはグリッド型のデータ（例えばプレート境界面がこれにあたる）を随時入力し、自由曲面へと変換される。本ソフトウェアでは自由曲面として B スプライン曲面を用いている。
2. ソリッドモデル定義機能：地殻ソリッドモデルとして、まずユーザによって緯度・経度により定義された直方体が定義され、これが地殻構造

モデルのベースとなる（図 6(a)）。

3. 立体切断機能：ベースとなるソリッドモデルを、自由曲面により切断するための機能。この機能によりプレートを表現することができる（図 6(b)）。
4. ソリッドモデル出力機能：メッシュジェネレータへデータを渡すための、データ出力機能。IGES フォーマットファイルを出力する。

これらの機能を実現するための幾何処理エンジンであるソリッドモデリングカーネルは、(株)精密形状処理研究所の曲線・曲面処理ライブラリである GHL (Geometric Handling Library) [9] をもとに開発した。また、メッシュジェネレータとの接続に関しては、日本原子力研究所により開発している CHIKAKU MESH への入力テストを終えている。図 7 に、CHIKAKU MESH により生成された非構造六面体メッシュの例を示す。

5 おわりに

本報告では、我々の研究チームが開発した、CHIKAKU モデリングシステムの概要、および、システムの中での日本列島近海における三次元地殻構造モデルの構築過程について述べた。このシステムは主に地震学者が使用することを目的としており、そのために特化した機能を設計、実装した。

今後、システムの機能の拡張のために考慮すべき課題が多々残っている。まず、本システムを入力データ作成だけでなく FEM 計算結果の可視化からのフィードバックにも対応するために、3次元グリッド型やベクトル型のデータ構造もサポートすべきであると考え

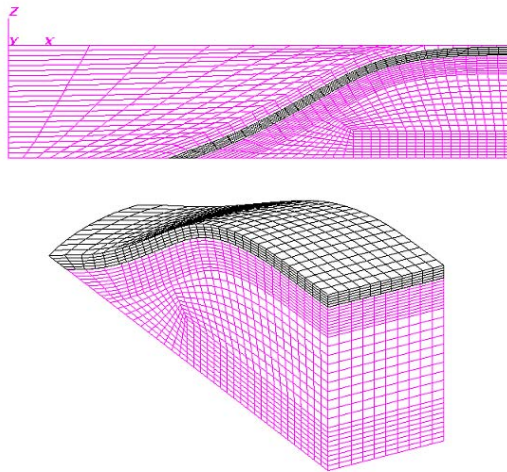


図 7: CHIKAKU MESH により生成された非構造六面体メッシュ

構造的要素で言えば、現状はプレート上面だけが対象であるが、断層も対象にする場合には、どのようなデータ構造が相応しいかを検討する必要がある。また、シミュレーションで用いられる物性情報はメッシュジェネレータで指定するという前提であるが、本システムで定義したものがメッシュジェネレータに反映される仕組みを考えるとという方向性も考えられる。いずれにしても、地震学者の方々に本システムを使っていたいただき、改めてヒアリングして改良していきたい。

なお、この CHIKAKU モデリングシステムは現在も継続して開発が進められており、いくつかの修正、改良を加えた後、2002 年 3 月にはバージョン 2.0 をリリースする予定である。

6 謝辞

本システムは、文部科学省により進められている「地球シミュレータ」計画の中の「固体地球変動解明のための並列ソフトウェア開発の」の成果の一部である。なお CHIKAKU DB の開発にあたっては、青地秀雄氏（日本学術振興会海外特別研究員）より多くの貴重なアドバイスを頂いた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- [1] 地球シミュレータ計画. 文部科学省, 1997–2001. <http://www.es.jamstec.go.jp>.
- [2] 金井崇, 大石善雄, 牧野内昭武, 本間高弘, 宮村倫司. 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, October 2001.

- [3] CHIKAKU プロジェクト. 理化学研究所 ものつくり V-CAD プログラム内, 1997–2001. <http://www.riken.go.jp/lab-www/CHIKAKU/>.
- [4] GeoFEM プロジェクト. (財) 高度情報科学技術研究機構, 1997–2001. <http://geofem.tokyo.rist.or.jp>.
- [5] 萩原尊禮 (編). 日本列島の地震 - 地震工学と地震地体構造 -. 鹿島出版会, 1990.
- [6] Naoshi Hirata, Takaya Iwasaki, Hideo Aochi, and Mitsuhiro Matsu'ura. Modeling of plate boundaries and intra-arc active fault systems in and around Japanese Islands. In *Proc. 1st ACES Workshop*, pp. 171–175, Brisbane and Noosa, Queensland, Australia, January 1999.
- [7] 金井崇, 牧之内昭武, 中川朝彦. 地殻専用 CAD システムおよび地殻構造の三次元立体形状モデルの構築. 1999 年地球惑星科学関連学会合同大会, June 1999.
- [8] Takashi Kanai, Akitake Makinouchi, and Yoshio Oishi. Development of tectonic CAD/database systems. In *International Workshop on Solid Earth Simulation and ACES WG Meeting*, January 2000.
- [9] Geometric Handing Library, (株) 精密形状処理研究所. <http://www.pml.co.jp>.