

日本列島における地震発生メカニズムに関する研究

Earthquake Occurrence Mechanism in the Japanese Islands

佐々木努*・濱島良吉**

Tsutomu SASAKI and Ryoukichi HAMAJIMA

A slow Earthquake is continuing in the Tokai area, and the energy of approximately magnitude of 7.2 is estimated to have released. However, it is not known whether this slow Earthquake develops into the big earthquake. It is supposed that this Slow Earthquake happened by flaking and slipping of a Philippine Sea Plate. The extraordinary crustal movement at the wide area including Kanto and a central part area was clarified from the GPS observation result of the Geographical Survey Institute. This research was analyzed for clarifying the mechanism of the earthquake in the Japanese Islands. As the result, the movement of the tectonic lines which exists in the Japanese Islands, and crustal movement were clarified, and the earthquake occurrence places in the Japanese Islands was presumed dynamically.

Key Words: Crustal movement, Earthquake Occurrence Mechanism, Tectonic line

1. はじめに

東海地域は、唯一、国によって地震予知が行なわれている地域である(図-1)。本研究でも、国土地理院のプロジェクトにおいて3次元不連続体解析手法 FESM (Finite Element Spring Model)¹⁾を用いて地殻変動解析が進められた。そのような中で、この東海地域の動きについて極めて興味深い地盤の動きが国土地理院のGPS観測結果から明らかにされた²⁾。この変化が何に起因するかについて日本列島の地殻変動解析用ブロック構造モデル(2次元版)を用いて検討を行った。その結果、日本列島に存在する構造線及び、地盤の変動を解明し、地震発生場所を力学的に推定した。

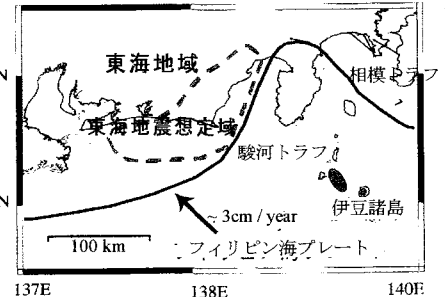


図-1 東海地震想定域²⁾

2. GPS 観測結果

1995 年 1 月に発生した兵庫県南部地震以後、GPS による観測網が強化され、日本列島の動きが詳細に把握できるようになった。図-2 に示す 1997 年から 3 年間の GPS 観測データと過去 100 年の三角測量の結果から、2001 年 2 月 19 日に地震予知連絡会に提出されたレポート(国土地理院・鷺谷ら)³⁾によれば、北米プレートとユーラシアプレートの境界は糸魚川-静岡構造線ではなく新潟と神戸を結ぶ幅数十〜二百キ

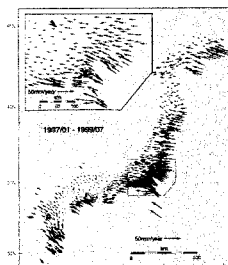


図-2 日本列島のGPS観測結果³⁾

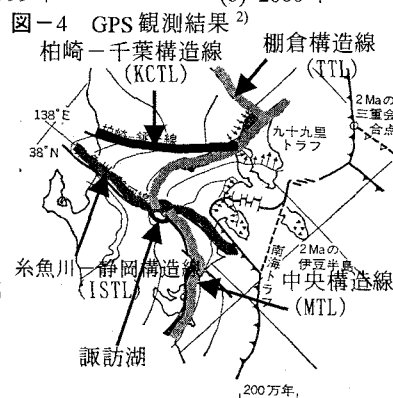
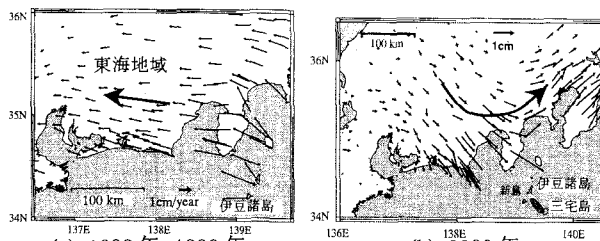


図-3 新潟-神戸構造帯³⁾

* 学生会員 修士(工学) 前橋工科大学大学院 工学研究科

** 正会員 工学博士 前橋工科大学 工学部 建設工学科

口の新潟－神戸構造帯であると提唱されている（図－3）。また、図－4(a)、(b)のGPS観測結果に示されるように地盤の変動が逆転を始めるという極めて異常な現象が生じている。このため、東海地域のみでなく関東、中部地域周辺に関して大きな地殻変動が発生しているといえる。本研究では、地殻変動解析を行うことにより、このような地殻変動の力学的メカニズムの解明を試みた。



3. 日本列島における構造線の形成

地球表面が10数枚のプレートに分割されているように、日本列島も大きな構造線によりいくつかのブロックに分割されているといえる。中部、関東地域の主な構造線としては図－5に示される中央構造線（MTL）、柏崎－千葉構造線（KCTL）、棚倉構造線（TTL）、糸魚川－静岡構造線（ISTL）が挙げられる。内陸地震の発生メカニズム解明のためにはこれらの構造線の形成過程及び活動の変遷を調べることが必要であり、併せて図－5 中部、関東地域の主な構造線本研究ではこれらの解明のために不連続体解析 FESM による地殻変動解析を行った。KCTLとISTLに挟まれたブロックがフォッサマグナであり、図－5に示されるようにこの部分で伊豆半島北上の影響によりMTLが大きく内陸部に湾曲している。またKCTL、MTL及びTTLは千葉県鹿島において合流する。MTLは約1億3千万年前の白亜紀の横ずれ運動により形成されたと推定され、KCTLは日本海の拡大時に形成された日本列島を横断する最初にできた大構造線である。その後伊豆・小笠原弧の衝突によりTTLが形成され、丹沢、伊豆半島ブロックの衝突によりISTLが形成されていった。日本海拡大の原動力としては約3500万年前からのインド大陸のユーラシアプレートへの衝突が推定されている。MTLは列島内でも最大級の構造線であるが、その全域にわたって活動しているわけではない。これはフィリピン海プレートの日本列島への潜り込み、伊豆半島の衝突・北上等が影響しあっているものである。またKCTL、TTLは断層形成後、大きく変動し、現在はB～C級活断層と推定されている。それに対し、ISTLは現在では日本列島でも最大級のA級活断層である。解析ではこうしたそれぞれの断層の形成過程を説明できる必要があり、本研究ではFESMを用いてこのような地殻変動解析を試みた。

4. 不連続体解析手法 FESM の特徴

本解析手法 FESM は、以下に示す特徴を有する。

- ①FESM では、変位関数を剛体変位と要素内の一定ひずみで表すため、要素毎に変形を独自に定めることができる。したがって要素間での相対変位を求めることが可能となり、不連続体としての解析が可能となる。
 - ②要素内及び要素境界面での弾塑性解析、断層面での破壊を容易に扱うことができる。現在、3次元場での弾性、弾塑性、粘弾性、動的解析、熱・流体・応力の連成解析、更に断層系を含んだ解析が可能である。
 - ③変位関数を要素重心の剛体変位と要素内一定ひずみで定義することにより、要素形状の制約がなくなり、任意の多角形要素（3次元では多面体）を使用することができる。
- 上記のような特徴をもつ FESM であるが、以下のような問題点も含んでいる。
- ④変位関数に一定ひずみの変位関数を使用しているので、厳密にはすべての変形状態を表現できるとは言えない。これに対して要素間剛性、要素内剛性を調節して近似的に変形場を表す。要素内で9割、要素間の等価剛性で1割の変形を受け持つ場合に、全体の変形の誤差が最小となりおよそ5%以内となる。

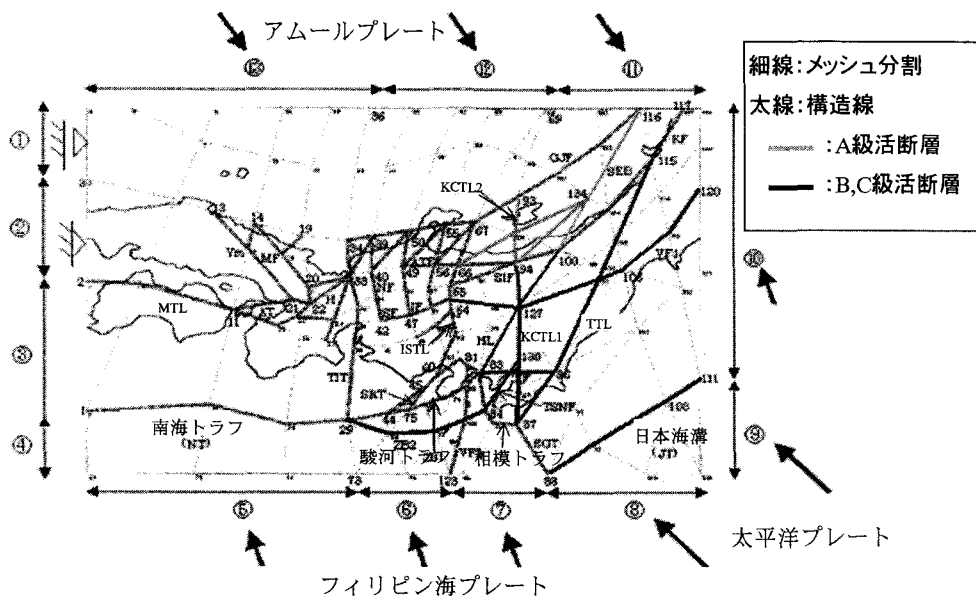


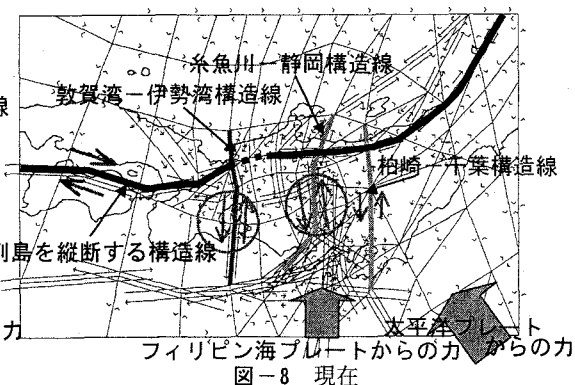
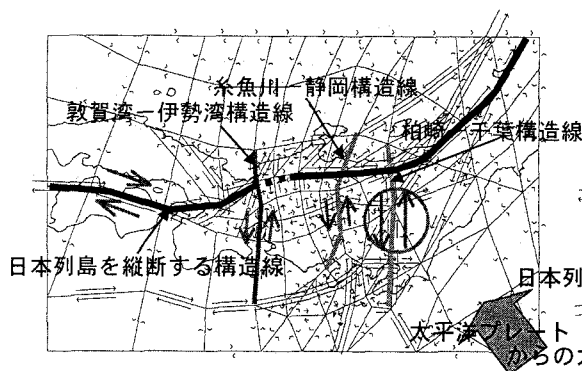
図-6 日本列島の地殻変動解析用ブロック構造モデル

5. 日本列島の地殻変動解析用ブロック構造モデル

- ① 図-6に示す日本列島の地殻変動解析用ブロック構造モデルは、日本列島の構造線の形成過程を踏まえ、メッシュ分割により再現し推定したものである。
- ② モデルにおいて太い実線が構造線を表し、細い実線はメッシュ分割を示している。また、グレーの線はA級活断層を表し、黒い線はB、C級活断層を表している。
- ③ 構造線部でのせん断剛性はA級及びB～C級活断層に対して、それぞれ要素剛性の $1/10000$ 及び $1/500$ の2種類を推定し、構造線部では既に完全弾塑性に近い値になっていると仮定している。これはサンアンドレス断層の掘削調査から断層に作用する応力が断層面にほぼ垂直である事が明らかにされており、このことからせん断剛性を小さく仮定している。ただし、KCTL、TTL等の断層は固着がある程度進んでいると仮定される事から、せん断剛性を大きめに推定している。
- ④ 図-6のモデルにおいてフィリピン海プレート、太平洋プレートの速度がおよそ1対2であることから、日本列島に作用する力を1対2とした。またアムールプレートからの力は、フィリピン海プレートと太平洋プレートに釣り合うように選んだ。拘束位置は図-6の左端境界の①及び②であり、②を固定境界、①を可動境界とした。
- ⑤ 引っ張り破壊が起きることにより、要素境界に生じている応力が解放され、周辺の応力に影響を及ぼす。

6. 断層の相対せん断変位

図-7、図-8は解析結果として得られた日本列島の変動初期と現在の断層の相対せん断変位を示している。まず、変動初期の相対せん断変位については、地殻内の破壊がまだ進展していない状態であり太平洋プレートからの力が主として作用する。この太平洋プレートからの力の影響により、柏崎-千葉構造線、糸魚川-静岡構造線、敦賀湾-伊勢湾構造線に左横ずれの成分を与えており、また柏崎-千葉構造線の左横ずれ成分が他と比べ、大きいことが確認できる。現在の相対せん断変位については、地殻内部の破壊が進展することになり太平洋プレートからの力に加えて、フィリピン海プレートの力が加わるため、柏崎-千葉構造線にはフィリピン海プレートの右横ずれの成分と太平洋プレートの左横ずれの成分が相殺されることにより、変動初期と比べ、左横ずれの成分が小さくなっていることが確認できる。それとは逆に、糸魚川-静岡構造線、敦賀湾-伊勢湾構造線についてはフィリピン海プレートと太平洋プレートの相互作用により変動初期と比べ、左横ずれ

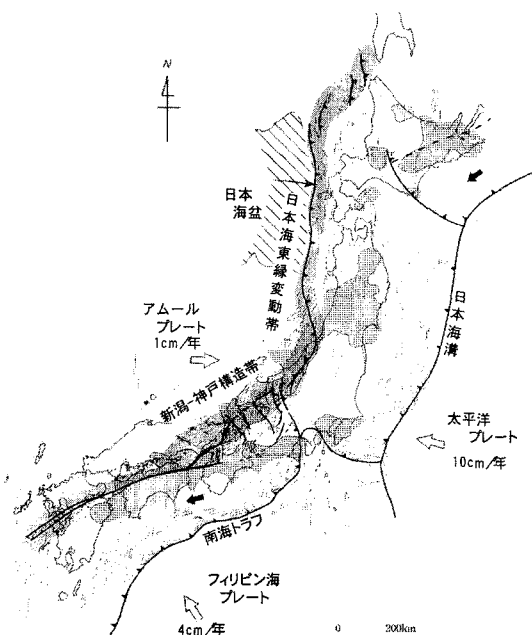


の成分が大きくなっていることが確認できる。

7. 日本列島における地震発生メカニズム

(1) 日本列島を縦断する構造線の存在

図-7の変動初期と図-8の現在の相対せん断変位からも右横ずれの断層帯が日本列島を縦断する形で存在していることがわかる。この断層帯は白亜紀の横ずれに起因するものと推測されるが国土地理院により新しく推定された新潟-神戸構造帯(図-3)、さらに平⁵⁾により示されている日本列島を縦断する構造線(図-9)と一部合致する。図-7、図-8では中央構造線-淡路島-神戸-跡津川断層-新潟・信濃川断層帯-秋田・北由利断層帯を通る右横ずれの構造線が存在する。図-3では新潟-神戸構造帯の延長線を新潟沖の破線部で示しているが、図-7、図-8で示されるように、これは左横ずれ構造線であり、新潟-神戸構造帯とは別系統の構造線と推定されよう。そのため、解析結果で示したように新潟より北に関しては、信濃川断層帯-秋田へ続く右横ずれのラインが日本列



次に、国土地理院によって新しく推定された北米プレート境界であるが、新潟より北に推定するラインの横ずれの違いや、新しいフィリピン海プレート境界はどのようなになるかなどの理由から、伊豆半島ブロックの衝突により生じた滑り線である糸魚川-静岡構造線を通り新潟～秋田沖へ抜ける従来のラインを北米プレート境界と推定するほうが力学的には妥当と推定される。しかし、この新潟-神戸構造帯を含んだ日本列島を縦断する構造線が北米プレート境界でないとしても、図-2に示した日本列島のGPS観測結果からわかるように、日本列島を縦断するラインの変動が大きいことは確認でき、このラインで地震が起こる可能性が推定される。

(2) 関東・中部地域の地震発生メカニズム

図-10の解析結果より東海地域の地震の可能性について検討を行う。まず、フィリピン海プレートが駿河トラフから潜り込むことによって、東海地域に大きな力を受けエネルギーが溜まると推定される。そして、フィリピン海プレートが徐々に剥離すること、いわゆる Slow Earthquake（ゆっくり地震）が起り、M7.2程度のエネルギーが現在までに解放されたと推定される。

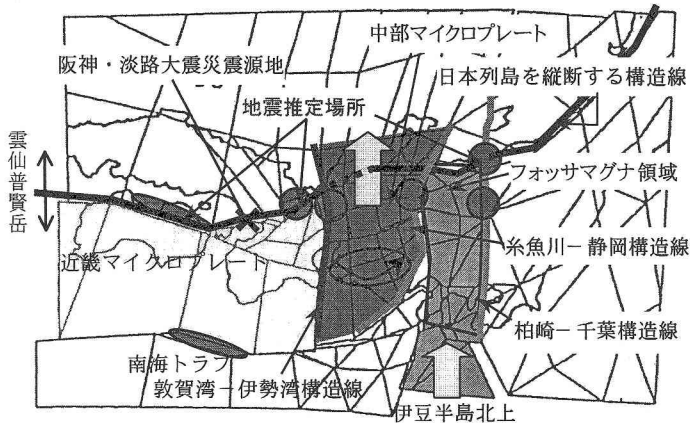


図-10 解析結果(変形図)

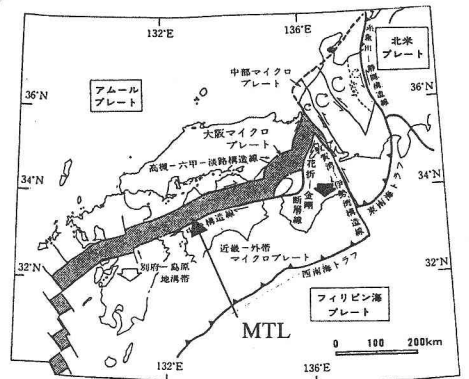


図-11 近畿-外帯マイクロプレート⁶⁾

中部、関東地域の異常な地殻変動の原因を推測すると図-8の解析結果よりフィリピン海プレート上面の一部が剥離することにより、伊豆半島が北上し始めたと推定される。このため、図-10に示す変形図のようにフォッサマグナ領域が北上し、連動して中部地域の地盤が北上しつつあると推定される。このことはフォッサマグナ領域の片側にある糸魚川-静岡構造線のみではなく、柏崎-千葉構造線の活動も推測され、現に、1200年ほど前には赤城山南麓で大地震が発生した記録が残されている。また、吾妻溪谷は伊豆半島の衝突による滑り線であり、溪谷沿いは地滑り地帯となっている。1855年の安政江戸地震時には、吾妻溪谷沿いの中之条で震度5程度が発生したと推定されている。1995年の兵庫県南部地震後、糸魚川-静岡構造線上の諏訪湖北部の牛伏寺断層において当時の地質調査所が行ったトレンチ調査によると、断層の活動度と推定規模M8以上の地震発生可能性が示唆され、また時期については、いつ地震発生があってもおかしくないということで、高瀬ダム、黒四ダムの当事者においてはかなりの動揺があったことは確かである。

敦賀湾-伊勢湾構造線上の図-10で示された付近ではM7±0.5程度の地震が発生する可能性が指摘されており、また、糸魚川-静岡構造線上の図-10で示された付近でM8以上の地震が発生する可能性が指摘されている。これはフォッサマグナ領域の北上に伴い、糸魚川-静岡構造線と、敦賀湾-伊勢湾構造線に挟まれた中部マイクロプレートが北に押し上げられることが推定され、これにより図-10に示す糸魚川-静岡構造線と中部マイクロプレートの境界と、敦賀湾-伊勢湾構造線と近畿マイクロプレートの境界が、断層形状より、その周辺で地震が起こる可能性も推定される。さらに、日本列島を縦断する構造線と柏崎-千葉構造線の交叉部においても大地震が推定される。

(3) 近畿-外帯マイクロプレートモデル

図-11は金折による兵庫県南部地震時の地殻変動モデルである。図-11に示す近畿-外帯マイクロプレートはアムールプレートと太平洋プレートにより東西方向から押されて下方に抜け出すとしている。この変動はフォッサマグナを押し上げ、それに連動し、敦賀湾-伊勢湾構造線に左横ずれの相対変位が生ずるためである。ただし四国の中央構造線部分は図-11に示されるように雲仙普賢岳の噴火の影響を強く受け、九州の中央部から両側に引き裂かれる動きを示している。この影響で四国の中央構造線は南北に開く力を受け、これが見かけ上図-11のようなモデルに繋がってくる。いずれにしても四国の中央構造線は、雲仙普賢岳の噴火の影響で南北に開く力を受け、また、兵庫県南部地震の影響で淡路島の半分まで破壊した状況から、両側を拘束していたものがはずれかかった状態といえ、図-11に示された中央構造線が右横ずれに変動することが予想される。この時、図-10に示された日本列島を縦断する構造線上の屈曲部である地震推定場所で大地震が発生する可能性が推定される。また、これが引き金となって、南海トラフ付近で地震が発生すると推定される。

次に、図-10に示された京都－琵琶湖周辺でも地震が発生すると推定される。この周辺は、大きな活断層が2つあり、1つは京都－大阪間の高槻市付近～六甲山の北側に伸びている有馬－高槻断層帯、もう1つは六甲山の南東側～淡路島北部にかけて走る六甲－淡路断層帯である。これらの2つの断層は大規模で活発な活断層でありながら、歴史上、はっきりした地震を起こしていないので、次の地震が近いのではないかと疑われていた断層であった。そんな中、1995年の兵庫県南部地震が起こり、この六甲－淡路断層帯の南部が活動した。しかし、この地震で、有馬－高槻断層帯と六甲－淡路断層帯の北部は動かなかった。そのため、有馬－高槻断層帯と六甲山北部周辺は、今後も要注意状態である推定される。

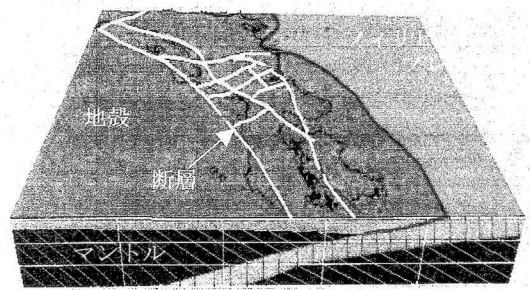


図-12 3次元地殻変動解析モデル

8. まとめ

日本列島は、現在、地震活動期に入っており、関東、中部地域のみでなく、列島全体の構造線が動き出している可能性があり、充分な警戒態勢が必要である。地震予知に関して東海地域のみが公表可能となっているが、地震は東海地域のみではなく、例えば、これまで大地震は起きないと信じられてきた群馬県においても、地震発生メカニズムからも、充分、大地震の発生の可能性がある。しかし、現在、東海地域で行われている予知体制で、はたして予知が出来るかどうか疑問である。他の手法により精度の高い予知が出来る可能性があるにもかかわらず、知り得た予知情報でも、100%の確実性が無ければ公表できない。いわゆる人心を惑わすからという理由である。このため、2日前までに予知の可能性もあり地震予知情報のあり方に関しては早急に見直しが必要と思われる。

また、本研究で推定した地震発生場所の四国の中央構造線付近には伊方原子力発電所が、敦賀湾－伊勢湾構造線および、京都－琵琶湖周辺には、敦賀原子力発電所と美浜原子力発電所が、日本列島を縦断する構造線と柏崎－千葉構造線の交叉部には、刈羽原子力発電所が、それぞれ存在し、本来なら非常に危険である。しかし、幸いなことに2日前までに予知が可能となれば、原発炉心を取りまく配管系内の熱水温度を安全な温度まで下げることが可能であり、原発の地震に対する恐怖は軽減される。

現在は、図-12に示す3次元の地殻変動解析モデルにより東海地域の詳細な検討を進めている。しかし、モデル化、物性値など多くの検討事項があり、これらを今後の課題としている。

参考文献

- 1) 濱島良吉：不連続体解析とその地殻変動解析への応用（文部省科学研究費）、1995、pp587-592
- 2) 第31回国土地理院技術研究発表会資料、2001年初頭から東海地方で発生している非定常地殻変動について、41-50（2002）
- 3) 読売新聞：2001年2月19日（朝刊）
- 4) 大竹政和、平朝彦、太田陽子：日本海東縁の活断層と地震テクトニクス、東京大学出版会、
- 5) 金折祐：甦る断層、近未来社
- 6) 平朝彦：日本列島の誕生、岩波書店
- 7) 建設省国土地理院：地殻活動観測データの総合解析技術の開発研究報告書、平成12年3月、p19
- 8) 濱島良吉、元島三明：Mechanics of Crystal Structure and its Application、第7回分子動力学シンポジウム講演論文集（日本材料学会）、88-93（2002）