

食違い弾性理論による地震時の地殻変動予測の問題抽出に関する文献調査

大草 陽太郎^{1*}・谷 和夫²

¹横浜国立大学大学院 工学府社会空間システム専攻 (〒240-00 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

²横浜国立大学大学院 工学研究院 (〒240-00 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

*E-mail: d09gc103@ynu.ac.jp

食違い弾性理論を用いた地震時の地殻変動予測は、広範囲を対象としたものが多い。土木構造物を建設する際には、ある地点においての地表の変位量を高い精度で得ることが求められ、広範囲を対象とした地殻変動予測の精度をより向上させる必要がある。そこで、本稿では、食違い弾性理論を用いた地震時の地殻変動予測の問題点を抽出することを目的として、文献調査を行った。調査した結果、食違い弾性理論を用いた地震時の地殻変動予測に様々な問題があることが分かった。

Key Words : elasticity theory of dislocation , crustal movements , fault , literature survey

1. はじめに

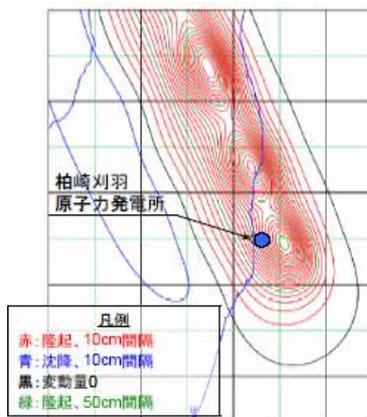
(1) 背景・目的

構造物の付近に断層があり、その断層がずれた場合、構造物の安定性にどの程度影響を与えるか知る必要がある。そして、構造物の安定性を評価するためには、地震時の地殻変動を予測する必要がある。そこで、必要とされる予測すべき範囲は、構造物の規模にもよるが数十 m~数百 m程度とする。

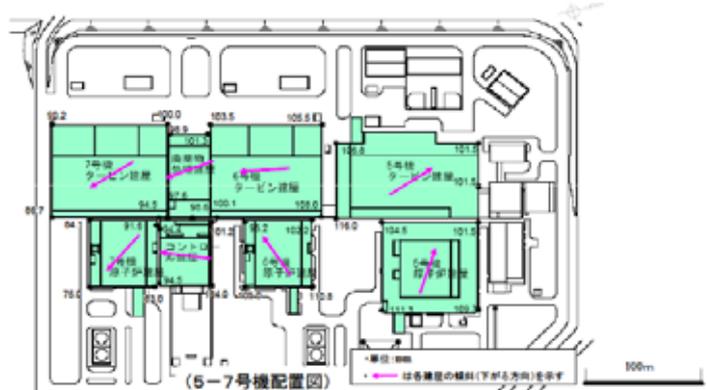
地震時の地殻変動予測に用いられる理論としては、食違い弾性理論がある。この理論は、地震の力学に基づくものであり、数十 km~数百 km と言った広い範囲で、地殻変動量や津波の予測に用いる海底の変動解析に用い

られている。また、得られる結果は、実際の事例と概ね一致することが経験的に知られている¹⁾。

しかし、今回対象とする構造物の安定性の評価に必要な、数十 m~数百 m の狭い範囲では、予測した解析値と実測値が異なる。例えば、図-1 に国土地理院モデルによる 2007 年新潟県中越沖地震の解析結果と柏崎原子力発電所の敷地内で発生した地表変位を示す²⁾。図-1 (a) には、鉛直変動量の解析結果が示されており、原子力発電所地点は、西南西の方角に傾斜していることがわかる。しかし、図-1 (b) に示す原子炉建屋(大湊側)の変動量・傾斜では、図-1 (a) に示した解析結果と異なる。7号機タービン建屋・原子炉建屋、6号機タービン建屋は南東に傾斜しており、廃棄物処理建屋およ



(a) 国土地理院モデルによる 2004 年新潟中越沖地震の解析結果



※建屋レベル変動図は、地震前水準測量(平成18年5月に実施)に対する地震後水準測量第2回(平成20年8月に実施)の差分

(b) 2004 年新潟中越沖地震に伴い生じた原子炉建屋の変動量・傾斜 (大湊側)

図-1 2004 年新潟県中越沖地震で生じた地殻変動²⁾

びコントロール建屋は南に傾斜している。さらに、5号機タービン建屋は北東に、5号機原子炉建屋は北西に傾斜している。図-2に2004新潟県中越沖地震で生じた建屋の上下変動量の国土地理院モデルによる解析値と実測値の比較を示す²⁾。横軸に、国土地理院モデルを用いた解析による上下変動量、縦軸に実測値をとりばらつきを示している。この図からも数十m~数百mと言った範囲では、解析値と実測値が異なって異なっていることがわかる。また、このように、数十m~数百mの範囲では、解析結果と実測値が一致しておらず、これは、断層近傍に位置する構造物の安定性にとっては大きな問題と言える。

現在、このような条件での予測する方法が無いため、新たな予測手法が必要となる。そのため、数十m~数百mの範囲を対象とした予測について検討することが必要である。本稿では、食違い弾性理論による地震時の地殻変動予測の問題点を抽出することを目的として、文献調査を行い問題点を整理した。

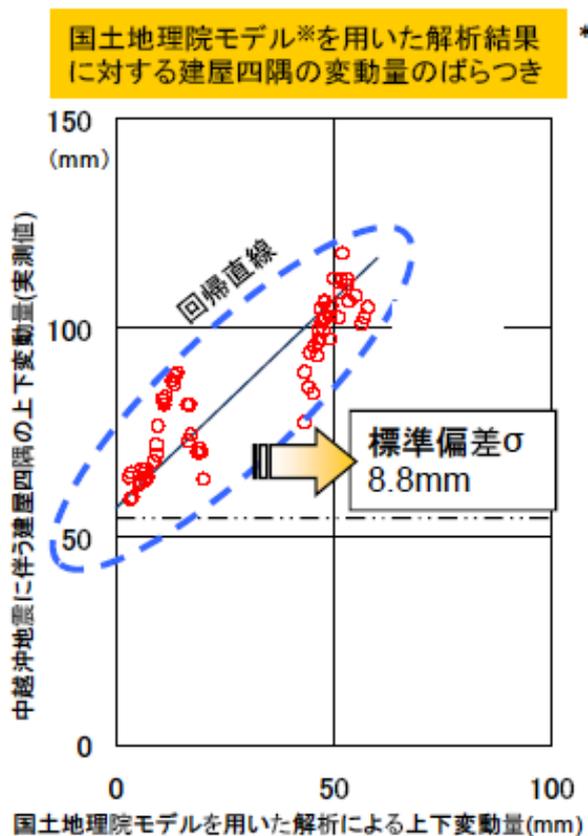


図-2 2004新潟県中越沖地震で生じた建屋の上下変動量の国土地理院モデルによる解析値と実測値の比較²⁾

(2) 食違いの弾性理論

20世紀初頭、Volterra(1907)は弾性体内に食違いを生じた場合の任意の点における変位を算定する公式を導いていたが、Steketee(1958)は地球物理学への応用を目的とし

て、この"Volterra dislocation"に基づく断層の力学モデルを提唱した³⁾。

食違いの弾性理論 (elasticity theory of dislocation) では、地殻を均質な半無限弾性体と仮定している。また、「力食違いの等価性」 (force-dislocation equivalence) の定理が成り立つものとしている⁴⁾。詳しくは、Mansinha & Smylie(1971), Okada,Y.(1985,1995)を参照されたい^{5),6),7)}。

2. 文献調査の方法

文献調査に用いた検索サイトを示す。CiNii NII 論文情報ナビゲータ (国立情報学研究所)、地盤工学会電子図書室キーワード検索、土木学会目録書誌検索、岩の力学 文献調査 (岩の力学連合会)、GEOLIS+地質文献データベース (産業技術総合研究所)、OPAC 総合目録データベース (国立情報学研究所、各大学附属図書館) の6つの検索サイトを使用した。

また、使用したキーワードは、地殻変動 (crustal movement・diastrophism・tectonism・tectonic deformation)、断層 (fault)、食違い・くいちがい (dislocation) を組み合わせて検索した。そして、食違い弾性理論について記載されている論文と、食違い弾性理論を用いた2000年以降の解析事例について記述された論文を選定した。

それらの文献から、地殻変動に影響を与える因子を挙げ分類した。分類した因子の内、考慮されていない因子を問題点として抽出した。詳しくは3章で述べる。

3. 調査結果

(1) 食違い弾性理論の理論式とそれを用いた解析事例

6件の理論文献と9件の事例報告文献を選定した。食違い弾性理論の理論式には、Okada(1985,1992)式があることがわかった⁸⁾⁻¹⁶⁾。この理論式の概略を図-3に示す。

地表面は水平とし、地盤は均質で連続的な地質構造であり、一様で等方な半無限弾性体と仮定している。また、断層は、震源断層を考慮しており、震源断層面は長方形で断層型は矩形であるとして、断層面内でのすべりは一様であると仮定している。

2003年宮城県北部地震では、Okada(1992)式が使われていることがわかった⁸⁾。ここでは、地盤を、均質な半無限弾性体としている。2005年福岡県西方沖地震、2005年宮城県沖地震、2007年新潟県中越沖地震、2008年岩手・宮城内陸地震では Okada(1985)式が使われていることがわかった⁹⁾⁻¹⁶⁾。ここでは、地盤は、半無限弾性体と仮定している。

(2)地殻変動に影響を与える因子

図-4 に食違い弾性理論を用いた地殻変動予測の問題点の概略を示す．図-5 に地殻変動に影響を与える因子の分類を示す．

図-5 に示すように，地殻変動に影響を与える因子を地盤と断層の2つに分類した．そして，地盤は，地表面と地中の2つに分類し，それぞれを地形，地質構造，非一様性，異方性と分類した．まず，地殻変動に影響を与える因子として，地形が挙げられる．図-3 に示す地表面が水平な場合と図-4 に示す地表面に起伏や，大規模な構造物がある場合に，地表の変位は，影響を受けることが考えられる．次に，地質構造とは，地盤の不均質性および不連続構造を意味している．具体的には，図-4 に示す，階層構造，褶曲，堆積盆，震源断層でない断層と言った比較的規模の大きな構造を指す．非一様性とは，同一の地質構造であっても場所や深度によって力学特性が異なることを意味する．異方性とは，地盤材料の諸性質が等方的でなく，方向により異なることを意味する．また，堆積時の異方的な土粒子配列による初期異方性と異方的な応力履歴による誘導異方性を含む¹⁷⁾．

図-5 に示すように，断層は，断層面とずれの2つに分類し，それぞれを，形状，寸法，位置・方向，個数と，非一様性，断層破砕面，ずれの時間，ずれのセンス方向に分類した．断層面の形状，寸法，位置・方向，個数は，直接的に地殻変動に影響する．ずれの非一様性は，アスペリティなどによるものである．ずれが生じる際に，時間（速度）が生じ，地殻変動に影響を与えることが考えられる．震源断層から続く，表層の地盤での断層破砕面については，地表近くで破砕面が分岐するフラワー構造や，地表面に現れる断層面が地殻変動に影響を与えると考えられる．

(3) 検討および考慮がなされている地殻変動に影響を与える因子

ここでは，地殻変動に影響を与える因子の中で，検討ないしは考慮がなれているものを示す．

図-5 に点線の枠で示したものが既に検討ないしは考慮がなされている因子である．

まず，地盤の非一様性を考慮した方法として，多層媒質に対する Wang et al.(2003)の方法がある．これは，対象とする地盤を等方で均質な多層の弾性体と仮定している¹⁸⁾．

次に，断層面の数を考慮した場合として，2003年宮城県北部地震が挙げられる．ここでは，走向の異なる2枚の矩形断層を用いることにより，1枚の断層のみを仮定したモデルの約半分まで残差を小さくすることができた報告がある⁹⁾．

続いて，ずれが非一様な場合を考慮した事例を示す．

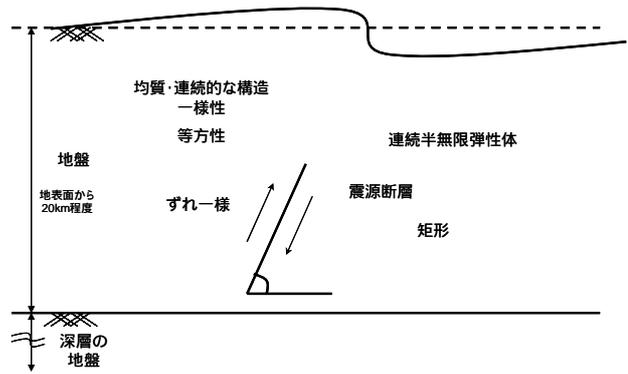


図-3 食違い弾性理論の概略

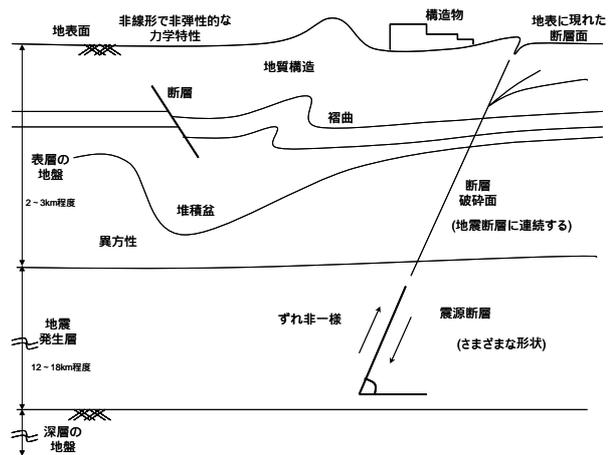


図-4 食違い弾性理論を用いた地殻変動予測の問題点の概略

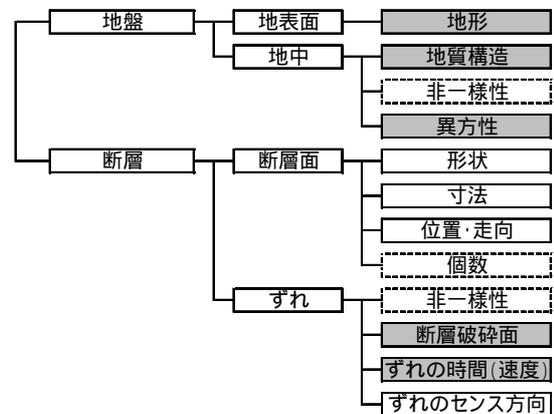


図-5 地殻変動に影響を与える因子の分類

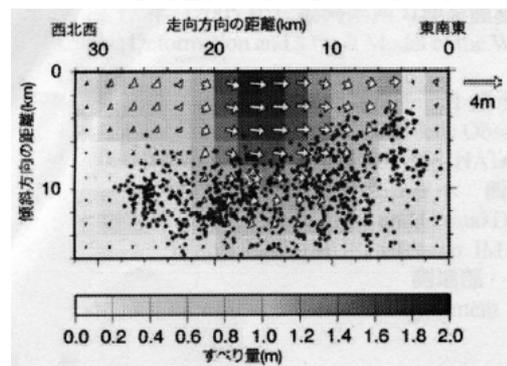


図-6 断層面のずれの非一様な場合を考慮した事例⁹⁾

図-6 は、2005 年福岡県西方沖地震において断層面のずれ分布を考慮した事例である⁹⁾。断層面を分割し、すべりベクトルを推定することですべりの非一様性を考慮している。この事例の他に、2007 年新潟県中越沖地震で推定された断層面を長さ 48km、幅 24km に拡張し、2km×2km の大きさに分割し、すべりベクトルを推定している¹⁰⁾。

(4) 食違い弾性理論による地震時の地殻変動予測の問題点

図-5 に検討ないしは考慮がなされていない、地形、地質構造、異方性、断層破砕面、ずれの時間(速度)の 5 つの地殻変動に影響を与える因子を網掛けで示した。ここに示した、地殻変動に影響を与える因子が、構造物の安定性を評価するために必要な、数十 m~数百 m と言った範囲で解析する場合に課題となる、食違い弾性理論による地震時の地殻変動予測の問題点である。

これらの問題点を、構造物の安定性に影響を与えるという観点からそれら因子の重要度を検討し、重要度が高いと考えられる順に列挙した。

第一に、地表面の地形が挙げられる。地形の起伏や構造物の立地によって、その場所で許容される地表面の変位が変わる。そのため、構造物の安定性を考慮する上では地表面の地形の考慮が最も重要だと考える。

第二に、表層の地盤の地質構造が挙げられる。図-4 に示す、階層構造、褶曲、堆積盆、震源断層でない表層の断層と言った比較的規模の大きな地質構造が存在することで、地震発生層より生じた変位が、様々な地質構造

を持つ表層の地盤で変化することが考えられる。地形および構造物の立地を考慮した上で、構造物近傍の地質構造を考慮した検討が必要であると考えられる。

第三に、断層破壊面が挙げられる。震源断層がずれることにより生じる、断層破壊面は、地表付近で分岐するフラワー構造を成す場合や、地表まで断層破壊面が達する場合がある。フラワー構造の場合には、震源断層の幾何学的条件と大きく異なる。また、地表まで断層破壊面が達する場合には、地表に局所的に大きな変位が生じることとなり、構造物の安定性を考慮する上で重要な因子と言える。

第四に、異方性が挙げられる。堆積時の異方的な土粒子配列による初期異方性と異方的な応力履歴による誘導異方性いずれも断層面の生じ方に影響を及ぼすことが考えられる。

第五に、震源断層面がずれる場合の時間(速度)が挙げられる。ずれが瞬時に生じたと仮定する場合とずれが進行的に生じると仮定した場合とでは地殻変動に違いが生じることが考えられる。ずれが進行的に生じる場合では、図-4 のような地盤条件では、破壊面が発達する過程において、地質構造あるいは地盤の異方性などの理由により、変位が局所的に生じることが考えられる。

4. 問題点に対するアイディア

構造物の安全性を評価するために、数十 m~数百 m の範囲における、食違い弾性理論による地震時の地殻変動

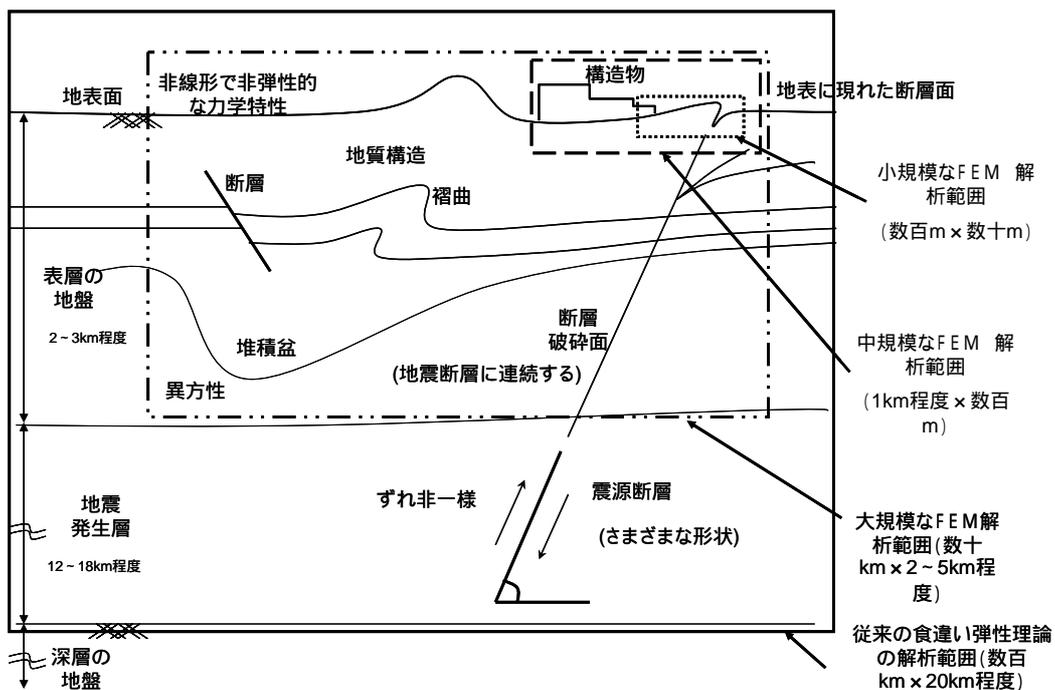


図-7 問題点に対するアイディアの概要

動予測の問題点を前章で述べた。ここでは、いくつかの問題点を考慮する方法を検討する。問題点を抽出し、整理した結果、表層の地盤の考慮が必要であると考えられる。弾性理論では、表層の地盤のような複雑な条件を検討することは困難である。そこで、地震発生層に関しては食違い弾性理論を適用し、表層の地盤では、問題点で示したような条件を考慮できる方法を考える。

地盤の複雑な条件を考慮できる方法の一つとして、FEM 解析が挙げられる。FEM の特徴は、地盤が弾性状態と塑性状態とが混在する弾塑性状態でも表現可能であること。また、地盤の不均質性の考慮や複雑な境界条件の設定が可能であること。そして、地盤と構造物の相互作用問題の解析が可能であることが挙げられる¹⁹⁾。

そこで、食違い弾性理論による解析と FEM 解析を組み合わせた解析を考える。従来の食違い弾性理論を用いた解析範囲は図-7 に示す通り、数百 km×20km 程度の範囲で広域での地殻変動を対象としている。しかし、本件では、構造物の安定性に対して検討する必要がある。そのため、FEM 解析の範囲と食違い弾性理論を用いた解析の組合せを3種類考えた。

まず、地震発生層よりも地表面側で、幅は数十 km で、深さは 2km~5km 程度の大規模な範囲の FEM 解析を提案する。ここでは、堆積盆や褶曲、断層破砕面を考慮できる範囲となっている。次に、幅は 1km 程度で深さは数百 m の中規模な範囲の FEM 解析を提案する。ここでは、構造物および構造物の敷地を対象として大規模な F 範囲での FEM 解析よりも詳細な地表面形状を反映することができる。また、地中の微細なクラックや地表面付近の地質構造を考慮できると考える。最後に、数百 m×数十 m の小規模な範囲で FEM 解析を行う。ここでは、地表に現れた断層破砕面や構造物の一部を対象として考える。

5.まとめ

断層近傍に位置する構造物の地震時の地殻変動に対する安定性を評価することが求められている。そのような背景の下、数十 m~数百 m の範囲を対象とした食違い弾性理論による地震時の地殻変動予測の問題点を抽出することを目的として、文献調査を行い地殻変動に影響を与える因子を整理し、問題点を抽出した。また、いくつかの問題点に対して検討ないしは考慮の方法を提案した。

地殻変動に影響を与える因子としては、図-5 に示すように、まず、地盤と断層の2つに分類した。そして、地盤は、地表面と地中の2つに分類し、それぞれを地形、地質構造、非一様性、異方性と分類した。断層は、断層

面とずれの2つに分類し、それぞれを、形状、寸法、位置・方向、個数と、非一様性、断層破砕面、ずれの時間、ずれのセンス方向に分類した。

それら地殻変動に影響を与える因子のうち、地盤の非一様性、複数の断層面、断層面のずれが非一様な場合については既に考慮がなされていることが文献調査よりわかった。一方、構造物の安定性を評価する上で、検討ないし考慮が必要であると考えられる因子を5つ挙げた。そして、それら問題点を、構造物の安定性に影響を与えるという観点からそれらの重要度を検討し、重要度が高いと考えられる、地形、表層の地盤の地質構造、断層破砕面、異方性の順に列挙した。

いくつかの問題点を検討するために、一つの方法として食違い弾性理論と FEM 解析を組合せた解析方法を提案した。大規模な範囲の FEM 解析では、堆積盆や褶曲、断層破砕面を考慮し、中規模な範囲の FEM 解析では、構造物および構造物の敷地を対象とする。そして、小規模な範囲で FEM 解析は、地表に現れた断層破砕面や構造物の一部を対象として考える。

今後は、食違い弾性理論より得られたひずみ分布ないしは応力分布より、FEM 解析に与える境界条件を設定方法、また、考慮する地質構造などを設定する必要がある。

参考文献

- 1)笠原慶一(1983),地震の力学:近代近代地震学入門,鹿島出版会,pp.66-83.
- 2)原子力安全・保安院(2009),柏崎刈羽原子力発電所の建屋の上下変動・基礎地盤について,中越沖地震における柏崎刈羽原子力発電所に関する調査・検討状況の住民説明会配布資料,pp.6-9.
- 3)大塚康範(1978),地震断層のずれにともなう地盤・岩盤の変形解析(その1),応用地質,19巻,3号,pp.9-18.
- 4)Stekette,J.A.(1958),On Volterra's dislocation in a semi-infinite elastic medium, Can. J. Phys. Earth, 22, pp.213-221.
- 5)Mansinha,L. and Smylie,D.E. (1971), The displacement fields of inclined faults, Bull.Seism.Soc.Am.,61,pp.1433-1440
- 6)Okada, Y. (1985), Surface deformation due to inclined shear and tensile faults in a half-space,Bull.Seism.Soc.Am.,75,pp.1135-1154.
- 7)Okada, Y. (1995), Internal deformation due to inclined shear and tensile faults in a half-space,Bull.Seism.Soc.Am.,82,pp.1018-1140.
- 8)西村拓也・今給黎哲郎・矢来博司・村上亮・海津優・小澤拓(2004),2003年7月26日宮城県北部を震源とする地震による地殻変動と断層モデル-測地観測データ

- の総合解析結果-，国土地理院時報，No.104，pp.101-107.
- 9) 小清水寛・畑中雄樹・根本盛行・西村拓也・今給黎哲郎・村上亮・藤原智(2006)，平成17年(2005年)福岡県西方沖を震源とする地震に伴う地殻変動と断層モデル，国土地理院時報，No.109，pp.45-49.
- 10) 防災科学技術研究所(2008)，PALSAR/InSARによる2007年新潟県中越沖地震に伴う地殻変動および断層モデル，地震予知連絡会会報，No.79，pp.493-495.
- 11) 佐竹建治・行谷佑一・吉見雅行(2008)幾つかの断層モデルから計算される地殻変動と津波，地震予知連絡会会報，No.79，pp.500-505.
- 12) 今給黎哲郎・西村拓也(2006)，地殻変動観測から見た新潟中越地震の断層モデル，月刊地球/号外，No.53，pp.76-81.
- 13) 今給黎哲郎・小沢慎三郎・西村卓也・水藤尚(2006)，2005年8月16日の宮城県沖の地震に関連した地殻変動と断層モデル，国土地理院時報，No.110，pp.95-100.
- 14) 小沢慎三郎・今給黎哲郎・飛田幹男・矢来博司・西村卓也・水藤尚(2008)，平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震による地殻変動と地層断層モデル，国土地理院時報，No.117，pp.79-80.
- 15) Yobuki, T. and Mutsu'ura, M.(1992) : Geodetic data inversion using a Bayesian information criterion for spatial distribution of fault slip, Geophys.J.Int.109, pp.363-375.
- 16) 今給黎哲郎・西村卓也(2006)，地殻変動観測から見た新潟地震中越地震の断層モデル，月刊地球/号外 No.53, pp.76-81.
- 17) 地盤工学会(2006)，地盤工学用語辞典，地盤工学会，pp.168-169.
- 18) 東京電力株式会社(2008)，第13回地震，地質・地盤に関する小委員会配布資料，新潟県原子力安全対策課，pp.1-21.
- 19) 地盤工学会 地盤技術者のためのFEMシリーズ編集委員会(2003)，はじめて学ぶ有限要素法，地盤工学会，pp.1-8.

LITERATURE SURVEY ON THE ESTIMATION OF CRUSTAL MOVEMENTS DURING EARTHQUAKES BY THE ELASTIC THEORY OF DISLOCATIONS

Yotaro OKUSA and Kazuo TANI

The estimation of crustal movements during earthquakes by the elastic theory of dislocations has many applications across a broad area. In order to build civil engineering structures, the displacement of a given point on the Earth's surface must be determined with high accuracy, and it is necessary to still further improve the accuracy of crustal movement estimation for a broad range of applications. Therefore, in this paper a literature survey is carried out with the aim of distilling the problems associated with estimating crustal movements during earthquakes using the elastic theory of dislocations. As a result of this survey, it is shown that there are various problems in estimating such crustal movements using the elastic theory of dislocations.