

安中正<sup>1</sup>·稲垣和男<sup>2</sup>·田中寛好<sup>3</sup>·柳沢賢<sup>4</sup>

<sup>1</sup>東電設計株式会社技術開発本部地震・地震動解析専門職(〒110-0015東京都台東区東上野3-3-3)
 E-mail: annaka@tepsco.co.jp
 <sup>2</sup>株式会社ユニック環境水理解析研究室(〒153-0041東京都目黒区駒場3-5-18)
 E-mail: inagaki@unic-co.co.jp
 <sup>3</sup>財団法人電力中央研究所流体科学部上席研究員(〒270-1194千葉県我孫子市我孫子1646)
 E-mail: hi-tanak@criepi.denken.or.jp
 <sup>4</sup>東京電力株式会社原子力技術部土木調査グループ(〒100-0011東京都千代田区内幸町1-1-3)
 E-mail: yanagisawa.ken@tepco.co.jp

南海トラフ沿いで1498年以降に発生したM8クラスの7個の大地震を対象として、プレート境界面(フィ リピン海プレート上面の等深線)と整合する位置に設定した断層モデル(4個のセグメントから構成)を 用いた津波数値シミュレーションを行い、セグメントの位置と形状を変えずにすべり量とセグメントの組 み合わせを変えたモデルにより、既往津波の痕跡高がほぼ説明でき、南海トラフ沿いではほぼ同一の断層 面が繰り返し活動してきたと考えられることを示した.また、駿河湾沿いのセグメントが1605年の地震の 際に活動した証拠はなく、他のセグメントとは活動間隔が違う可能性があることや各セグメントのすべり 量の変動の特徴などを示した.

Key Words : Nankai trough, tsunami, numerical simulation, fault model

## 1. まえがき

南海トラフ沿いでは、過去に繰り返し大地震が発 生し、沿岸に大きな津波を生じさせてきた.これら の大地震は、沈み込むフィリピン海プレートと陸側 プレートの境界面で発生するプレート間地震と考え られる.しかし、これまでに提案されてきた津波波 源断層モデルの中にはプレート境界面と明らかに異 なる位置に設定されているモデルも存在する.本研 究では、将来発生する想定津波の波源をプレート境 界面に設定することの妥当性を明らかにするために、 近年の研究で推定されている沈み込んだプレートの 形状、特にプレート上面の等深線と整合する位置に 断層モデルを設定し、断層面の位置と大きさを固定 し、すべり量だけを変動させるモデルにより津波デ ータをどの程度説明できるかを検討した.

# 2. 断層モデルの設定

南海トラフ沿い海域では,断層セグメントの区分 が明確であり,地震により破壊するセグメントの組 み合わせが変化している. セグメント区分に関する 既往の検討<sup>1)など</sup>及びプレート境界面(フィリピン海 プレート上面の等深線<sup>2)など</sup>)との整合を考慮して設 定した断層面の分布を図-1に,断層面の位置と既往 の研究によるプレート境界面との関係を図-2に,断 層面のパラメータを表-1に示す.

断層モデルは4個のセグメントから構成されている. N2セグメントをさらに2つに区分するモデルもあるが、両者が過去の地震で常に同時に破壊していると推定されること、1枚の断層面でも充分近似できると考えられることから、1つのセグメントとした。断層面の深さと傾斜角( $\delta$ )は、図-2に示されているように、既往文献によるプレート境界面と一致するように設定した。断層面のすべり角( $\lambda$ )はプレートの相対運動の方向(約 N50°W)を参考に設定した.

#### 3. 数値シミュレーションの方法

1498年以降に発生したM8クラスの7個の大地震を 対象として,非線形長波方程式<sup>3)</sup>に基づき,差分法



図-2 各断面における断層セグメントと既往文献による プレート境界面との位置関係

を用いて津波の数値シミュレーションを行った.時間積分スキームはリープフロッグ法,変数の配置はスタッガードシステム,保存移流項はドナーセル法,摩擦項は不安定にならないように陰的に近似した.マニングの粗度係数は0.03m<sup>-1/3</sup>sとした.

計算領域及び格子分割を図-3に示す.計算格子は 6400mから100mまで徐々に細分化した.津波の痕 跡高と比較する沿岸の格子間隔は400m以下である.

海底面の鉛直変位分布は断層モデルからMansinha and Smylieの式<sup>4)</sup>により計算した.その際,断層面の 上縁深さは,**表**-1のd(平均海面からの深さ)に水 深を考慮して設定した.

## 4. 数値シミュレーションの結果

対象とした7個の大地震に対し、検討に用いた津 波の痕跡高<sup>5)~9)など</sup>のデータ数、断層面の位置と大き さを固定した条件で津波の痕跡高を良好に再現する ように設定した断層モデル(セグメントの組み合わ せと各セグメントのすべり量),痕跡高と断層モデ ルによる計算値との適合度(相田<sup>10)</sup>による幾何平 均Kと幾何標準偏差 $\kappa$ ),既往の断層モデルを用い た場合のKと $\kappa$ の一覧を**表**-2に示す.また,地震毎 に,破壊した断層セグメントの組み合わせ,海岸線 沿いの計算津波高さの分布と痕跡高の分布の比較を 図-4に示す.

表-2において,幾何平均Kが1.0に近づくことを目標としたが,各セグメントのすべり量がプレートの

表-1 南海トラフ沿いのセグメントのパラメータ一覧

|    | N<br>(°) | Е<br>(°) | d<br>(km) | θ<br>(°) | δ<br>(°) | $_{(^{o})}^{\lambda}$ | L<br>(km) | W<br>(km) |
|----|----------|----------|-----------|----------|----------|-----------------------|-----------|-----------|
| N1 | 35.120   | 138.706  | 6.9       | 193      | 20       | 71                    | 120       | 50        |
| N2 | 33. 823  | 138.235  | 7.8       | 246      | 10       | 113                   | 205       | 100       |
| N3 | 33.006   | 136.074  | 11.2      | 251      | 12       | 113                   | 155       | 100       |
| N4 | 32.614   | 134. 481 | 12.6      | 250      | 8        | 113                   | 125       | 120       |



図-3 津波の計算領域と格子間隔分布

相対運動の速度と平均発生間隔から期待されるすべ り量に比べあまり大きくなりすぎないようにした. そのため1605年慶長地震津波のKは1.53と1.0に比べ やや大きくなっているが,残りの地震については 1.0に近い値となっている.

モデルの適合度をより直接的に示すのは幾何標準 偏差ĸであり、1.0に近づくほど適合度はよい.断層 面の位置と大きさを固定するという制約条件を課し ていない既往の断層モデルによる結果と比べ、本研 究による断層面固定モデルのĸはやや小さいか同程 度であり、既往の断層モデルと遜色ない程度の再現 性がある.このことは南海トラフ沿いのプレート境 界でほぼ同一の断層面が繰り返し活動してきたこと を示していると考えられる.

図-4の計算津波高さの分布に明確に見られるよう に、N1セグメントが活動すると、駿河湾内の地点 の津波高さがかなり大きくなることから、N1セグ メントの活動の有無は駿河湾内における5m程度以 上の痕跡高の有無である程度判断できると考えられ る.そうした観点で痕跡高の分布を見た場合、1707 年宝永地震津波と1854年安政東海地震津波の際には N1セグメントが活動したと推定されるが、1605年 慶長地震津波では活動したことを示すデータがみら

表-2 南海トラフ沿いの津波波源モデル及び痕跡高と計算津波高さの適合度の評価一覧

| 马布油油   | データ | 断層面固定モデル(本研究) |                 |               |       |      |       | 既往モデル |       |                                |  |
|--------|-----|---------------|-----------------|---------------|-------|------|-------|-------|-------|--------------------------------|--|
| 刈豕伴仮   | 数   | N1            | N2              | N3            | N4    | К    | κ     | К     | κ     | モデル                            |  |
| 1498 年 | 7   | 7.0m          | F 9m            |               |       | 1 02 | 1 44  | 0.89  | 1.70  | 相田 11)                         |  |
| 明応     | (   | 7. Um         | э <b>.</b> эт   |               |       | 1.05 | 1.44  | 1.09  | 1.43  | 相田 12)                         |  |
| 1605 年 | 0   |               | 7.0m            | 6 0m          | 0.7m  | 1 59 | 1 60  | 1 59  | 1 00  | ±H III 12)                     |  |
| 慶長     | 0   |               | <i>i</i> . 0III | 0.011         | 9.711 | 1.05 | 1.00  | 1.52  | 1.90  | 作目口                            |  |
| 1707 年 | 61  | E Gm          | 7.0             | E Gm          | 0.0   | 1 05 | 1 95  | 1.04  | 1 45  | += += 12)                      |  |
| 宝永     | 01  | э <b>.</b> 6Ш | 7. Om           | э <b>.</b> 6m | 9.2m  | 1.05 | 1. 55 | 1.04  | 1.45  | 作日日                            |  |
| 1854 年 | 80  | E 97m         | 5               |               |       | 1 00 | 1 47  | 1.89  | 1.66  | Ando <sup>13)</sup>            |  |
| 安政東海   | 89  | 5.27m         | ə.əm            |               |       | 1.08 | 1.47  | 1.29  | 1.56  | 石橋 14)                         |  |
| 1854 年 | 60  |               |                 | 1 0m          | 0.7m  | 1 00 | 1 49  | 1 10  | 1 20  | <b>±H t</b> 15)                |  |
| 安政南海   | 00  |               |                 | 4. 011        | 0.7Ш  | 1.09 | 1.42  | 1.19  | 1. 30 | 作日 口                           |  |
| 1944 年 | 19  |               | 4 9.5m          |               |       | 1.04 | 1 50  | 0.79  | 1.52  | Inouch and Sato <sup>16)</sup> |  |
| 東南海    | 40  |               | 4.2011          |               |       | 1.04 | 1.00  | 0.91  | 1.55  | 石橋 14)                         |  |
| 1946 年 | 150 |               |                 | 4. 0m         | 4 9m  | 1.04 | 1 60  | 1 1 2 | 1 57  | <b>±H II</b> 15)               |  |
| 南海     | 199 |               |                 | 4.9M          | 4. JM | 1.04 | 1.60  | 1.12  | 1.57  | 竹口口                            |  |



図-4(1) 1498 年明応地震の津波高さ分布の比較



図-4(2) 1605 年慶長地震の津波高さ分布の比較

れない. 近い将来にNIセグメント単独で地震が発 生せず,次の東南海(N2セグメントの活動)と連 動して活動する可能性があることも考慮すると, NIセグメントの平均活動間隔は他のセグメントよ りも長い可能性がある.

データが比較的豊富な最近の3回(1707年,1854 年,1944年~1946年)の繰り返しサイクルに対して 各セグメントのすべり量の変動を見ると,N2セグ メントについては連動セグメントの数が多くなるほ どすべり量が大きい傾向が見られ,4つのセグメン トが全て活動した1707年宝永地震津波のすべり量



図-4(3) 1707 年宝永地震の津波高さ分布の比較



図-4(4) 1854 年安政東海地震の津波高さ分布の比較

(7.0m)に対し、2つのセグメントが活動した1854 年安政東海地震津波のすべり量は約80%、単独で活 動した1944年東南海地震津波のすべり量は約60%と なっている.N3セグメントとN4セグメントにおい ても、4つのセグメントが全て活動した1707年宝永 地震津波のすべり量が2つのセグメントが活動した 1854年安政南海地震津波や1946年南海地震津波のす べり量よりも大きくなっている.ただし、1854年安 政南海地震津波の14セグメントのすべり量は1946 年南海地震津波のすべり量よりも1707年宝永地震津 波のすべり量に近い.



図-4(5) 1854 年安政南海地震の津波高さ分布の比較



図-4(6) 1944年東南海地震の津波高さ分布の比較

# 5. あとがき

セグメントの位置と形状を変えずにすべり量とセグメ ントの組み合わせを変えたモデルにより,既往津波の痕 跡高がほぼ説明でき,南海トラフ沿いではほぼ同一の断 層面が繰り返し活動してきたと考えられることを示した. また,その結果から,駿河湾沿いのNIセグメントが他の セグメントとは活動間隔が違う可能性があること,各セ グメントのすべり量の大きさと連動するセグメントの数 にある程度の関連がある可能性があることを示した.本 研究では,断層面上ですべり量が一様な矩形モデルを用 いたが,アスペリティを考慮した場合の影響(痕跡高と の適合度の改善の程度や一様すべりモデルとの違い)や 中央防災会議で用いられているようなより複雑な形状モ デルを用いた場合の影響などについてさらに検討する必 要があると考えられる.

謝辞:本研究は10電力共通研究により行われた.また,研究を進めるにあたり土木学会原子力土木委員 会津波評価部会(主査:首藤伸夫岩手県立大教授) の皆様に貴重なご意見を賜った.記して感謝します.

#### 参考文献

1) 石橋克彦・佐竹健治:古地震研究によるプレート境 界大地震の長期予測の問題点-日本付近のプレート



図-4(7) 1946年南海地震の津波高さ分布の比較

境界沈み込み帯を中心として-,地震第2輯,第50巻 別冊,1-21,1998.

- 山崎文人・大井田徹: 中部地方におけるフィリピン海 プレート沈み込みの形状, 地震第2輯, 第38巻, 193-201, 1985.
- 3) 後藤智明・小川由信:Leap-frog 法を用いた津波の数値 計算法,東北大学工学部土木工学科, 1-52, 1983.
- Mansinha, L. and D. E. Smylie: The displacement fields of inclined faults, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.61, No.5, 1433-1440, 1971.
- 5) 地震予知総合研究振興会:遠州灘沖の歴史地震に関 する規模等の調査, pp.363, 1982.
- 新原尊禮編著:古地震探究-海洋地震へのアプローチ, 東京大学出版会, pp.160-251, 1995.
- 羽鳥徳太郎:宝永・安政津波の現地調査による波高の検 討,海洋科学, Vol.12, pp.495-503, 1980.
- 羽鳥徳太郎:瀬戸内海・豊後水道沿岸における宝永 (1707)・安政(1854)・昭和(1946)南海道津波の挙動,歴史 地震,第4号, pp.37-46, 1988.
- 渡辺偉夫:日本被害津波総覧[第2版],東京大学出版 会,238p,1998.
- 10) 相田勇: 三陸沖の古い津波のシミュレーション, 東京 大学地震研究所彙報, Vol.52, 71-101, 1977.
- 相田勇:東海道沖におこった歴史津波の数値実験,東 京大学地震研究所彙報, Vol.54, 367-390, 1981.
- 12) 相田勇: 東海地震津波の挙動-その数値実験-, 月刊 地球, Vol.7, No.4, 204-215, 1985.
- Ando, M.: Source mechanisms and tectonic significance of historical earthquakes along the Nankai trough, Japan, Tectonophysics, Vol.27, 119-140, 1975.
- 14) 石橋克彦: 東海地方に予測される大地震の再検討--駿 河湾大地震について-,地震学会講演予稿集, No.2, 30-34, 1976.
- 15)相田勇:南海道沖の津波の数値実験,東京大学地震研究所彙報,Vol.56,713-730,1981.
- 16) Inouchi, N. and H. Sato: Vertical crustal deformation accompanied with the Tonankai earthquake of 1944, Bulletin of the Geographical Survey Institute, Vol.21, 10-18, 1975.

(2003.9.10 受付)