南海トラフの地震発生の連動性が地域別津波ハザードに及ぼす影響 PROBABILISTIC TSUNAMI HAZARD ASSESSMENT CONSIDERING TIME-LAG OF SEISMIC EVENT ON NANKAI TROUGH

杉野英治¹⁾、岩渕洋子²⁾、國司晴生³⁾、坂上正治⁴⁾、蛯沢勝三⁵⁾ Hideharu SUGINO¹, Yoko IWABUCHI², Haruo KUNISHI³, Masaharu SAKAGAMI⁴, Katsumi EBISAWA⁵

1) 原子力安全基盤機構、上席研究員 工修

¹ Senior Researcher, Japan Nuclear Energy Safety Organization, M. Eng. e-mail : sugino-hideharu@jnes.go.jp

2) 原子力安全基盤機構、主任研究員 工博

² Chief Researcher, Japan Nuclear Energy Safety Organization, Dr. Eng.

e-mail:iwabuchi-yoko@jnes.go.jp

3) 伊藤忠テクノソリューションズ、工修

³ Itochu Techno-Solutions, , M. Eng.

e-mail : haruo.kunishi@ctc-g.co.jp

4) 原子力安全基盤機構、専門職 理博

⁴ Senior Expert, Japan Nuclear Energy Safety Organization, Dr. Sci.

e-mail : sakagami-masaharu@jnes.go.jp

5) 原子力安全基盤機構、総括参事 工博

⁵ Associate Vice-President, Japan Nuclear Energy Safety Organization, Dr. Eng.

e-mail : ebisawa-katsumi@jnes.go.jp

ABSTRACT: In the area in front of Nankai trough, tsunami wave height may increase if tsunamis attacking from some wave sources overlap because of time-lag of seismic event on Nankai trough. To evaluate tsunami risk of important facilities located in front of Nankai trough, we proposed the probabilistic tsunami hazard assessment considering uncertainty on time-lag of seismic event on Nankai trough and we evaluated the influence that the time-lag gave to tsunami hazard at several representative points near each earthquake source.

キーワード: 南海トラフ、津波、連動性、時間差、確率論的安全評価、ハザード評価

1.はじめに

南海トラフでは、これまでに海溝型の地震およびそれに伴う津波がおよそ100年~150年の周期で繰り 返し発生している。地震調査推進本部がまとめた長期評価¹⁾によると、南海トラフの過去の地震は、図1 に示した3つの震源域(領域X,Y,Z)の内、1つあるいは2つ以上が組み合わさって活動したと考えられて いる。表1に既往の地震と震源域の対応を示す。中でも1707年宝永地震は3つの震源域がほぼ同時に、1854 年の安政東海地震と安政南海地震は32時間の時間差をもって活動した例もある。このように複数の震源 域(波源域)が空間的かつ時間的に連動する場合、南海トラフに面する地域では、そのタイミングによ って複数の波源から来襲する津波が重畳し、波高が増幅する可能性がある。河田ら²⁾ は、この点に着目 し、南海トラフに面する各地点において波高が最も大きくなる津波発生のシナリオ(津波発生の順序と 時間差)を提案し定量評価したところ、その時の波高は、個々の波源域において単独に津波が発生する 場合よりも増幅されることを示した。しかし、そのシナリオの発生の可能性(発生確率)までは言及し ていない。

原子力安全基盤機構では、原子力発電所の津波に対するリスクを定量的に評価するために、津波に対

する確率論的安全評価(津波PSA)手法の開発・整 備を進めている³⁾。津波PSA手法は、プラント情報の 収集および事故シナリオの概略的分析をはじめ、津 波波高とその発生確率の関係を評価する津波八ザー ド評価、津波波高に応じた設備の機能喪失確率を評 価する津波フラジリティ評価、そして、設備の機能 喪失により炉心損傷に至る事故の発生確率を評価す る事故シーケンス評価で構成されている。これらの うち、津波八ザード評価は、津波波源特性の不確実 さや津波波高を推定するための津波伝播モデルの不 確実さなどを考慮し、確率論的手法に基づいて津波 波高とその発生確率の関係を評価する手法である。

この方法によれば、例えば重要施設の設計敷地高を 超える津波の発生確率を把握することができ、対策 の必要性を判断するための有用な情報である。原子 力発電所のように臨海部に立地する重要施設の津波 に対する安全性を考えるとき、想定される最も危険 なシナリオによる波高を評価することは重要である が、それと同時にそのシナリオの発生の可能性(発 生確率)もまた重要な情報となる。

南海トラフからの将来の津波の発生を考えると、3 つの波源域がどのような組合せで、どの程度の時間 差をもって発生するかといった地震発生の連動性に 関する知見は、現段階では確定されていない。その ため、南海トラフに面する地域の津波ハザードの評 価においては、地震発生の連動性も津波波源特性の 不確実さの1つとして捕らえる必要がある。

本報では、南海トラフに面して立地する重要施設 の津波リスクを評価するために、地震発生の連動性 を考慮した確率論的手法による津波ハザード評価手 法を提案するとともに、本手法を南海トラフ沿いの 複数地点に適用し、地震発生の連動性が津波ハザー ドにおよぼす影響を把握する。

2.地震発生の連動性を考慮した確率論的津波ハザー ド評価手法の概要

確率論的津波ハザード評価の手順を図2に示す。ま ず、評価地点を設定し、その地域に来襲した既往津 波などの情報から、将来、津波の発生が想定される 地震の震源位置や規模、発生確率など、地震起因の 津波波源のモデル化を行う。次に、波源から評価地



*地震調査推進本部¹⁾より引用 図1 南海トラフの地震の震源域

表1 南海トラフの既往地震と震源域の対応

発生年月日	地震名	領域X	領域Y	領域Z
1498.09.20	明応東海地震			
1605.02.03	慶長地震			
1707.10.28	宝永地震			~
1854.12.23	安政東海地震			
1854.12.24	安政南海地震			
1944.12.07	昭和東南海地震			
1946.12.21	昭和南海地震			

(注) :ほぼ全域が震源域

、 :一部が震源域





点までの津波伝播のモデル化を行い、来襲する津波の最大波高を評価する。そしてこの津波伝播モデル の不確実さを考慮するため、評価された値を中央値とし標準偏差を用いた確率分布を仮定し、想定され る全ての津波について集計した結果、最大波高とその発生確率(超過確率)との関係を表す津波ハザー ド曲線が得られる。

確率論的手法を用いる場合には、不確実さをもたらす要因は、物理現象のランダム性による偶然的不 確実さと、知識および認識の不足による認識論的不確実さに大別される⁴⁾。南海トラフの波源のモデル 化では、不確実さ要因の1つとして地震発生の連動性(地震発生の組合せと連動の時間差)をランダムな 性質を持つものとし、偶然的不確実さに分類する。また、南海トラフの既往の地震に伴う津波を表現す るための断層モデルが複数提案されており、これらを認識論的不確実さに分類する。これらの不確実さ 要因の取扱いについては、以降の関連する章にてその詳細を述べる。

なお、南海トラフに面する地域では、近海の海底活断層に想定される地震に伴う津波やチリ地震津波 などの遠地津波の影響も考えられるが、本報では、最も支配的と思われる南海トラフに想定される地震 に伴う津波に着目して津波ハザードに及ぼす地震発生の連動性の影響を検討する。

3. 南海トラフの津波波源のモデル化

南海トラフに想定される3つの地震の震源域及び評価対象地点を図3に示す。これらの震源域は、東から東海地震、東南海地震、南海地震にそれぞれ対応する。南海トラフに面する地域において、これら複数の波源(震源)から来襲する津波が重畳する場合、評価地点とこれらの震源域との位置関係によって 津波ハザードに及ぼす影響が異なると考えられる。そこで、3つの震源域の中央部および境界部付近に着

目し、菊川、大泊、浦戸、美々津の4つの地点を 評価対象とする。

南海トラフの地震は、いずれもプレート境界に おいて発生する典型的な海溝型地震に分類され る。このような地震は、時間軸上でほぼ一定の間 隔(周期)で繰返し活動していることが知られて いる。地震調査研究推進本部では、このような特 徴を踏まえて南海トラフの地震の長期評価が行 われている¹⁾。本報でもこれに倣い、地震の発生 間隔や最新活動からの経過時間などを考慮した 更新過程モデル(Brownian Passage Time分布)⁵⁾ を用いてこれらの地震活動をモデル化するが、確 率論的地震動予測地図作成手法に関する藤原ら⁶⁾ の研究を参考に、南海トラフの地震活動に関する 基本的な仮定を設定する。

南海トラフでは、3つの震源域における地震は、 時間的にそれぞれ独立した個別の更新過程に従って発生することとする。ただし、対象とする期 間に複数の地震が共に発生する場合には、予め定 められた確率でそれぞれの地震が連動すると仮 定する。

この仮定に基づき、まず、それぞれの震源域に おける過去の活動記録から個々の震源域で地震 が発生する確率を算出する。各震源域に想定され る地震の平均活動間隔や最新活動時期等のパラ メータを表1のとおり設定する。これらの条件で、 2009年1月1日時点から今後30年間の各地震の発 生確率を算出した結果を表3に示す。



図3 南海トラフの震源域と評価対象地点

売 つ	冬††1]	い活動問隔	に関す	ス諸元
18 /		7/D \$/11011/14		<u>ω π</u> Η /Ι.

	平均活動 間隔(年)	最新活動 時期	活動間隔の ばらつき
南海地震	90.1	1946.12.21	0.2
東南海地震	86.4	1944.12.7	0.2
東海地震	118.8	1854.12.23	0.2

表3 各地震の発生確率

	経過時間(年)* 30年発生確率		
南海地震	62.1	52.9%	
東南海地震	64.1	64.2%	
東海地震	154.1	85.8%	

*経過時間は2009年1月1日時点とする。

次に、南海トラフにおける地震発生の組合 せを整理しその発生確率を算出する。地震発 生の組合せは大別すると、対象とする期間内 に1つの震源域のみ活動する場合と、2つある いは3つが活動する場合、さらにどれも活動し ない場合の4つに分類できる。そして、2つ以 上の震源域が活動する場合には、相互に活動 する時間的間隔(以下、時間差という)が、 数日から数年程度の比較的長い場合と、数分 から数時間程度の短い場合に分けられる。こ れは、時間差が大きくなればなるほど相互の 波高の重ね合わせの影響が小さくなり、やが て単独に発生した場合と変わらなくなるため である。従って、本報では前者を単独ケース、 後者を連動ケースと呼ぶ。

これらの全ての組合せを整理したものを表 4に示す。同表中の矢印線は評価期間中に活動 する震源域の範囲を、また×印は同期間中に は活動しないことをそれぞれ表す。この分類

表4 南海	iトラこ	7の地震発生の組合せと発生確率 [。]

No.	南海 地震	東南海 地震	東海 地震	30年発生 確率(%)	
1	×	×	×	2.2	
2	$ \longleftrightarrow $	×	×	2.7	
3	×	\blacklozenge	×	4.3	
4	×	×	$ \qquad \qquad$	14.5	
5	$\stackrel{\bullet}{\longleftarrow}$	\leftarrow	×		2.4
6	◆		×	4.8	2.4
7	\longleftrightarrow	×	${\longleftarrow}$	16.3	
8	×	\longleftrightarrow	\leftarrow	00 0	13.0
9	×	•		26.0	13.0
10	✦	\longleftrightarrow			7.3
(1)	•		\leftarrow	00.0	7.3
12	\longleftrightarrow	•		29.2	7.3
(13)	•				7.3

*2009年1月1日時点

の方法は、地震動評価を対象とした藤原ら[®]を参考としているが、彼らの研究では、連動ケースとして 同時発生(時間差ゼロ)のみを対象としており、本報では数分から数時間程度の時間差発生も対象とす るところに違いがある。

地震動の場合には、伝播速度が速くサイトへの到達時間が数秒程度であり、継続時間が数十秒程度と 短いのに対して、津波の場合には、サイトへの到達時間が数分から数十分であり、しかも継続時間が数 時間にも及ぶため時間差発生の影響が無視できなくなり、同時発生のみでは不十分であると考えられる。

表4に示した組合せのうちケースNoに丸印を付けたものが連動ケースの組合せである。この場合の発生確率は、可能性がある事象が全て等確率で発生すると仮定して算出する。ケースNo.5と6を例に発生確率の算出方法を次に示す。

表3に示した南海、東南海、東海の各震源域の地震発生確率をそれぞれ*P_x、 P_y、 P_z*とする。ケース No.5と6は、共に、南海地震と東南海地震が共に発生し、東海地震が発生しない場合であり、その確率を *P_{xy}*とする。ケースNo.5と6の発生確率*P₅*と*P₆*は次の通り表される。

$$P_{XY} = P_X \times P_Y \times (1 - P_Z) \tag{1}$$

$$P_{5} = P_{6} = P_{XY} \times \frac{1}{2}$$
(2)

各13ケースについて同様に算出した今後30年間の発生確率を表4に合わせて示した。

ところで、連動ケースとして時間差発生を考慮する場合、連動ケースと単独ケースを区別する定義が 必要となる。そこで連動ケースとは、「評価期間中の比較的短い時間の中で、連続して震源域が活動す ること」とし、この時間を「連動位相幅」と呼び、予め設定した連動位相幅の中で時間差を設定する。 評価期間中に複数の震源域が活動する場合でも、相互の時間差がこの連動位相幅より長く、影響が無視 し得る場合は単独ケースとする。なお、連動ケースの時間差の設定方法については、次章にて後述する。

また、南海トラフにおける津波評価のための断層モデルにおける認識論的不確実さを考慮し、中央防 災会議の東南海・南海地震等に関する専門調査会報告に示されたモデル⁷⁾と、土木学会の「原子力発電所 の津波評価技術」の断層面固定モデル⁸⁾を用いる。また、既往津波を再現した断層面固定モデルのすべ り量を参照する。

4. 津波伝播のモデル化と時間差の設定方法

4.1 津波伝播モデル

表4に示したそれぞれのケースの評価地点にお ける最大波高を推定するため、波源から評価地点 までの津波伝播をモデル化する。津波伝播モデル として、線形長波理論に基づく数値解析手法(線 形長波モデル)を用いる。ただし、連動ケースに ついては、時間差発生を考慮すると無数の組合せ が考えられ、これら全てを数値解析によって推定 することは現実的ではない。そこで、連動ケース の最大波高の推定には、河田ら¹¹の重ね合わせの 原理を利用する。

重ね合わせの原理を用いた連動ケースの津波 波高の推定イメージを図4に示す。まず、各震源 域が単独に活動した場合の津波伝播計算を行い、 評価地点における波高時系列を求める。次いで、 予め設定された連動位相幅の中で時間差を与え、 単独ケースの波高時系列を時間差分だけ時間軸 方向にずらして重ね合わせることにより連動ケ ースの波高時系列が求まる。そして、継続時間中 の最大波高を得る。津波伝播モデルの支配方程式 が線形であれば重ね合わせが可能である。

津波伝播計算には、直交座標系の線形長波理論 に基づく支配方程式をリープフロッグ法により 差分化した解析手法を用いる。計算領域は図3に



示した範囲とし、一律1350mの空間格子の海底地形モデルを用いる。計算時間間隔は1秒とし、8時間の 津波挙動を再現する。境界条件として、沖側で自由透過、沿岸部で完全反射とする。

4.2 連動ケースの時間差の設定

連動ケースの時間差は、予め設定した連動位相幅内で一様ランダムに与える。設定方法にはモンテカ ルロ法を用い、擬似乱数の発生にはメルセンヌ・ツイスター法⁹⁰を用いる。ただし、乱数の種が結果に影 響を及ぼすことがないよう、十分なサンプリング数を確保する必要がある。そこで、乱数の種とサンプ リング数の影響について予備検討を行った。図5に検討結果を示す。表4のケースNo.13の連動ケースにつ

いて連動位相幅を1時間とした ときの菊川における最大波高分 布の統計量を示した。ここでは、 連動位相幅(60分)をサンプリン グ数で除した平均サンプリング 間隔(1~5分間隔)で整理した。 その結果、平均サンプリング間 隔が1分であれば最大波高の統 計量の変化は小さく、乱数の種 の影響をほとんど無視できるこ とが分かる。



5. 南海トラフの津波ハザード評価

5.1 津波ハザード曲線の算定方法

前章までに示した条件下で評価対象地点の津波ハザードを評価する。図6に南海トラフの津波波源モデ ルおよび津波伝播モデルに関して、本研究で扱う各種の不確実さをロジックツリーに整理して示す。こ れらの他に津波伝播モデルが有する偶然的不確実さが対数正規分布に従うとし津波ハザード曲線を算定 する。評価期間T年における最大波高の超過確率Ph(w)は次式で算定される。

$$P_{h}(w) = \sum_{i=2}^{13} \sum_{j}^{m} \left\{ Pe_{ij}(w) \cdot Pn_{i}(T) / m \right\}$$
(3)

$$Pe(w) = \int_{w}^{w_{upper}} f_A(w') dw'$$
(4)

ここに、

Pn(T) : 今後*T*年以内に津波が発生する確率

Pe(w) : 地震発生の各組合せ時の評価対象地点での最大波高wの超過確率

f₄(w) :津波伝播計算によるwの確率密度関数

m : 連動ケースの全サンプリング数

添え字のiは表4に示したケースNo.を、jは連動ケースのサンプリングNo.をそれぞれ表す。本報では、 最大波高の確率密度関数には対数正規分布を適用し、その対数標準偏差 を0.4、確率分布の打切り上限 値を"中央値+3"として津波八ザード曲線を評価した。



図6 ロジックツリーの設定

5.2 南海トラフの地震発生の連動の影響

上記の方法を用いて、対象地点の津波ハザ ードを評価した結果を図7に示す。図中には、 地震発生の連動の影響を分析するために、連 動位相幅を0,1,2,3時間としたときの津波 ハザード曲線を中央値で示した。

菊川では、時間差ケース(連動位相幅1~3時 間)の超過確率が、同時ケース(同0時間)に比 べて増大しており、他の地点と比べても時間 差発生の影響が大きいことが分かる。また、 時間差ケースの比較では、全ての地点におい て連動位相幅1~3時間の違いによる影響は小 さい。

菊川とその他の地点では、時間差発生の影響が大小異なっており、その要因を以下で考察する。

まず、菊川と大泊について比較分析する。 時間差ケース(連動位相幅1時間)について、確 率分布を設定する前の最大波高のヒストグ ラムを図8に示す。図中には、時間差ケース の最大波高分布の中央値と同時ケース(連動



位相幅(0時間)の最大波高を合わせて示した。こ の図から分かるように、菊川では、同時ケース の最大波高の値は、時間差ケースの中央値より 小さくなっているが、大泊ではその逆の傾向に なっている。この傾向の違いが、菊川と大泊に おける時間差発生の影響の違いを生じた要因と 考えられる。同時ケースが連動ケースの特殊な 場合であることは明確であり、南海トラフに面 する地域の津波八ザードを評価する上で同時ケ ースのみを対象とすることは過小評価となる場 合がある。

次に、菊川と浦戸について比較分析する。個々 の震源域が単独で活動した場合の評価地点にお ける波高時系列を図9に示す。浦戸の場合、菊川 とは異なり1つの地震(南海地震)による津波が 支配的であるため、時間差発生を考慮して他の 地震による津波の波高時系列を重ね合わせても、 その影響は小さい。その結果として時間差発生 の影響が小さくなると考えられる。このことは、 美々津でも同様の傾向になっていることを確認 した。

6. おわりに

本研究では、南海トラフにおける地震発生の 連動性を考慮した確率論的津波ハザード評価手 法を提案するとともに、本手法を適用して地震 発生の連動性が津波ハザードに及ぼす影響につ いて検討した。その結果、以下の知見を得た。

- 南海トラフに面する地域の津波ハザード に及ぼす時間差発生の影響は地点によっ て異なる。
- ・菊川のように、決定論的評価において複数の波源からの津波の影響が無視できない場合で、しかも同時ケースの最大波高が時間差ケースの最大波高分布の中央値より小さくなる地点では、時間差発生を考慮することにより津波ハザードが増大する。
- 南海トラフに面する地域の津波ハザード 評価において時間差ケースを考慮する時 の連動位相幅は、無数に想定されるが、 数時間程度を考慮すれば十分である。

このように、南海トラフに面する地域の津



0 2 4 6 時間⁸ 0 2 4 6 時間⁸ 津波発生からの経過時間 津波発生からの経過時間 (a)菊川 (b)浦戸

図9 南海トラフの地震による津波の波高時系列

波ハザード評価において、同時発生のみを考慮することは、連動ケースの特殊な場合だけを扱うことと なり、地域によって評価精度にばらつきが生じてしまい適切ではない。南海トラフにおける地震活動に 関して、次の活動が連動するかどうか、また連動する場合の時間差を特定することができない現状では、 時間差発生を含めた連動性を適切に考慮することが必要である。ただし、南海トラフの地震発生の連動 性については、文部科学省等で調査・研究が進められており、これらの研究の発展によってより適切な 地震活動のモデル化が可能になれば、本手法において取入れていく必要がある。なお、本報で示した津 波ハザードの結果は、地域別の傾向を相対的に比較することを目的としたものである。原子力発電所な どの特定地点の評価では、津波波高の推定においてより詳細な地形モデルを用いる必要がある。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、東北大学大学院今村文彦教授、原子力安全基盤機構亀田弘行技術顧問より 貴重な助言を頂きました。ここに記して御礼申し上げます。

参考文献

1) 地震調査推進本部 地震調査委員会: 南海トラフの地震の長期評価、2001年.

2) 河田惠昭、鈴木進吾、高橋智幸:東海・東南海・南海地震の発生特性による広域津波の変化、海工論 文集、第50巻、2003年、pp.326-330.

3) Sugino, H., Y. Iwabuchi, M. Nishio, H. Tsutsumi, M. Sakagami and K. Ebisawa : Development of Probabilistic Methodology for Evaluating Tsunami Risk on Nuclear Power Plants, 2008, 14th WCEE(CD).

4) 日本原子力学会:原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準、2007年、pp.28-29.
 5) 地震調査推進本部 地震調査委員会:長期的な地震発生確率の評価手法について、2001年.

6)藤原広行、河合伸一、青井真、功刀卓、奥村俊彦、石井透、早川譲、森川伸之、小林京子、大井昌弘、 先名重樹、奥村直子:全国を対象とした確率論的地震動予測地図作成手法の検討、防災科研研究資料、 第275号、2005年、pp. 75-79.

7) 中央防災会議:東南海、南海地震等に関する専門調査会(第16回)資料、2003年.

8) 土木学会編: 原子力発電所の津波評価技術、2002年、pp. 2・61-2・63.

9) Matsumoto, M., and T. Nishimura : Mersenne Twister: A 623-Dimensionally Equidistributed Uniform Pseudorandom Number Generator. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation, 1998, 8(1):3–30.