

大阪湾臨海都市域の津波脆弱性と防災対策効果の評価

河田恵昭*・鈴木進吾**・越村俊一***

臨海都市域はその集積性および空間利用の多様性から、一旦津波が浸入すると甚大な被害を受けることが指摘されている。本研究は大阪湾沿岸都市域を対象に、この地域に整備されている防潮堤に付随する防潮扉を閉鎖することによる市街地の減災計画手法について検討した。第一に長期評価が発表された大阪湾断層帯で発生する津波の特性を解析した。第二に防潮扉の物理的機能維持や閉鎖体制などに内在する不確定性を確率で表すことにより、防災対策効果を含んだ地域脆弱性の評価手法を開発した。第三に防潮扉ごとの閉鎖強化による浸水危険域面積および一般資産被害の軽減効果を量る指標を検討し、その優先順位を決定する手法を考案した。

1. 序 論

大阪湾沿岸に代表される臨海都市域に津波が浸入すると甚大な被害拡大を招くことが危惧されている。その理由として人口、家屋、経済、エネルギー、産業、運輸交通、情報など被災する可能性のある要素の集積が進んでいること、高度化・多様化した空間利用によりこれまで想像もしなかった被災シナリオが潜在することなどが挙げられる。この地域には、従来高潮対策として防潮堤が整備されているが、この防潮堤に設置された防潮扉を津波の到達までに閉鎖することが、津波によって堤内地に発生する被害を軽減するための要件となっている。特に港湾部においてはこの防潮扉が多数配置されており、これらの防潮扉を確実に閉鎖するための対策が臨海市街地での被害を軽減することになる。

中央防災会議は2005年3月、東南海・南海地震の人的被害および経済被害を半減させるとした明確な数値目標を示す防災戦略を策定した。これに伴い沿岸自治体も津波減災目標を設定し、目標を達成することが要請される。この目標を効率よく実効的に達成するためには、地域の現在の防災力を反映した津波脆弱性を把握し、各種防災対策実施の優先順位を決定することが重要となっている。そのためには、地域防災計画における津波対策強化の手引きなどに述べられているように、地域に来襲する津波の特性を把握し、防災施設整備やまちづくりによる被害抑止と、防災体制による被害軽減を組み合わせ、対策を策定することが重要である。

現在、大阪湾沿岸域においては、近い将来発生するとされている東南海・南海地震津波を対象とした防災対策の検討が進められているが、この地域に存在する大阪湾断層帯の長期評価結果が2005年1月、地震調査研究推

進本部より公表された（地震調査研究推進本部、2005）。これによると、大阪湾断層帯はマグニチュード7.5程度の地震を発生させる逆断層であり、この断層帯で地震が発生すると大阪湾沿岸に津波が来襲する危険性がある。東南海・南海地震に特化して進められている防災対策において、この地震による津波が予想外の外力となって来襲することも考えられ、この津波の来襲特性を把握しておくことが必要である。

これらの背景から、本研究では、大阪湾沿岸域を対象に、大阪湾断層帯において発生する地震津波による沿岸の津波来襲特性を評価する。さらに、防潮扉が多数存在する大阪市を対象に、防潮扉の閉鎖による現況の防災対策の効果を見込んだ津波脆弱性を評価する。また、防潮扉の閉鎖を強化する対策を、どの防潮扉から実施していくか、その優先順位を検討する手法について考察を行う。

2. 大阪湾断層帯の地震による津波の来襲特性

2005年1月、政府の地震調査研究推進本部は大阪湾断層帯に関する長期評価結果を公表した。これによると大阪湾断層帯は神戸市沿岸から大阪湾を縦断して大阪湾南部に位置する活断層帯で和田岬断層、真耶断層、六甲アイランド断層、大阪湾断層からなる。図-1に断層帯の位置を示す。大阪湾断層帯は断層帯全体が1つの区間として活動し、マグニチュード7.5程度の地震が発生すると推定されており、最新の活動時期は9世紀以後、平均活動間隔は約3千年～7千年であった可能性がある。

大阪湾断層帯での地震の発生確率は南海地震に比べてかなり低いものの、ゼロではなく、現在、東南海・南海地震に特化して進められている現状の防災体制にとって、この津波が予想外の超過外力となる可能性もあり、事前にその津波の特性を評価して把握しておくことが危機管理上重要である。

(1) 断層パラメータ

地震調査研究推進本部がまとめた大阪湾断層帯の特性によると、数々の地質構造調査から、断層帯の位置およ

* フェロー 工博 京都大学教授防災研究所

** 学生会員 修(工) 京都大学大学院情報科学研究科社会情報学専攻

*** 正 会 員 博(工) 東北大学助教授工学研究科災害制御研究センター

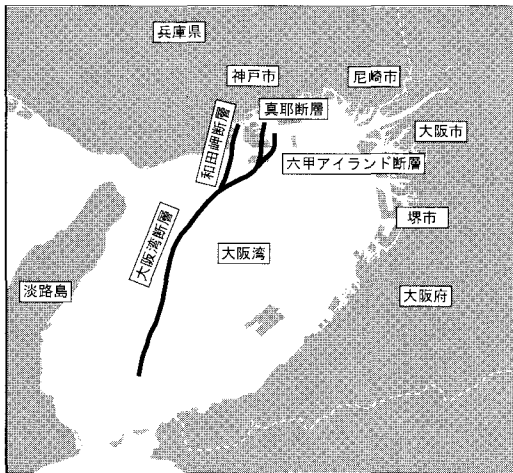


図-1 大阪湾断層帯の位置

び長さ、走行は図-1の通りで、断層上端の深さは0 km、断層帯の西側が東側に対して相対的に隆起する逆断層である。地質構造、反射法音波探査結果などから傾斜角は 60° ～ 80° と推定されており、これと地震発生層の下限の深さから断層幅は約15 km～20 kmと推定されている。1回の地震による変位量の上下方向成分は音波探査記録から約2～3.5 mとしている。

(2) 想定モデル

大阪湾断層帯で発生する地震による津波の数値解析を行う上で、地震による地殻変動即ち津波の波源を想定するために断層パラメータを設定する。

断層帯の位置、長さ、走行、深さは地震調査研究推進本部の特性を用いる。傾斜角、断層幅、ずれの量の上下成分については長期評価結果においても、幅を持って推定されているため、これらを変動させて表-1に示す通り8ケース設定した。ずれの向きに関しては北西側隆起の逆断層となるように 90° に設定した。Model-Iの初期水位を図-2に示す。これらすべてのモデルに関して、非線形長波理論に基づく津波数値解析を50 m～16.67 m格子で実施し、津波の到達時刻、沿岸での津波高を求めた。

(3) 各モデルの沿岸津波高と到達時刻

域内の大部分において最も大きな津波高となったモデルはModel-I、最も小さな津波高となったモデルはModel-IIであった。その他のモデルはこの2つのモデルの中間の値となった。関西国際空港に近い大阪湾沿岸域において大阪湾断層帯による津波の高さは最も高くなり、Model-Iを想定した場合5～6 mに達する。Model-Iを想定した場合とModel-IIを想定した場合の沿岸部の津波高の差は大阪府南部において1.5～2.5 m、神戸市沿岸で1～2 m、大阪市沿岸で0.5 m程度であっ

表-1 断層モデル

	傾斜角 ($^{\circ}$)	断層幅 ($^{\circ}$)	ずれの量の 上下成分(m)
Model-I	60	20	3.5
Model-II	80	15	2
Model-III	60	20	2
Model-IV	80	15	3.5
Model-V	60	15	3.5
Model-VI	80	20	2
Model-VII	80	20	3.5
Model-VIII	60	15	2

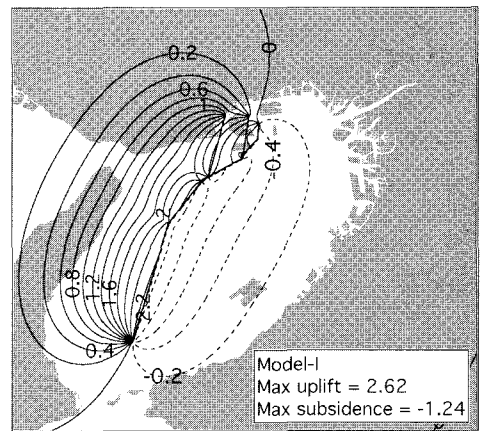


図-2 Model-Iの初期水位

た。

大阪湾断層帯での地震発生後、この地震によって発生した津波は大阪湾を横断し約10分後に関西国際空港へ到達する。また同時に大阪府南端に到達し、約30分後までには大阪港、堺泉北港など湾奥部に存在する重要港湾へ到達する。一方、大阪湾南部で反射した津波は地震発生から1時間後に神戸市沿岸域に襲来する。

(4) 東南海・南海地震津波との比較

大阪湾断層帯モデルModel-I、Model-IIによる沿岸津波高を、中央防災会議想定 of 東南海・南海地震(Model-A)および大阪市防災会議想定 of 南海地震(Model-B)による沿岸津波高と比較して図-3に示す。

この図から、大阪湾の湾奥部にあたる堺泉北港北部から大阪港を経て尼崎西宮芦屋港、東神戸港までは東南海・南海地震を想定した津波の方が大阪湾断層帯地震を想定した津波より津波高が大きくなる。逆に神戸港以西、淡路島沿岸、堺泉北港南部以南では大阪湾断層帯地震を想定した津波の方が南海地震を想定した津波よりも津波高が高くなるのが分かる。特に南部では遥かに高くなるところがあり、注意が必要である。

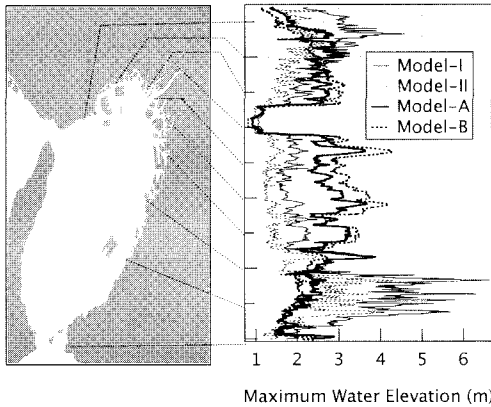


図-3 東南海・南海地震津波と大阪湾断層帯による津波の沿岸津波高の比較

3. 津波脆弱性と減災効果の評価手法

次に多数の防潮扉が配置されている臨海都市域を対象として、津波脆弱性の評価と、防潮扉の閉鎖に関わる防災対策の実施によって実現される減災効果の評価を行う。はじめに防潮扉の閉鎖の不確定性を考慮した地域の津波脆弱性の評価手法について説明する。本手法の流れを図-4に示す。津波脆弱性の評価は主に次の4つの手法の組み合わせで行う。(1)対象津波の海域伝播計算、(2)モンテカルロ法による防潮扉の閉鎖対応シミュレーション、(3)市街地氾濫計算、(4)地域内の各点における浸水深に関する被害額関数計算、である。

(1) 対象津波の海域伝播計算

計算の簡略化のために、波源域から沿岸の防潮堤および防潮扉（以下、防潮ライン）までの津波伝播計算と、防潮ライン上の開放状態にある防潮扉からの津波浸水計算を分離して行う。

波源域から沿岸の防潮ラインまでの津波伝播計算は非線形長波方程式を支配方程式としスタaggerド・リーブ・フロッグ法で差分化した一般的な領域接続計算法を用い、1350 m 格子から50 m 格子までは中央防災会議の海底地形データ、最小16.667 m 格子領域はレーザー・プロファイラデータから作成した地形データを使用する。境界は防潮ラインで完全反射させ、防潮扉位置で水位変動の時系列を記録する。初期条件となる地震時鉛直地殻変動量は、中央防災会議想定の大南海・南海地震同時発生 (Model-A)、大阪市防災会議想定の大南海地震 (Model-B)、前章で作成した大阪湾断層帯 (Model-I, Model-II) を想定した。

(2) モンテカルロ法による閉鎖対応シミュレーション

各防潮扉が地震後の津波警戒対応時に閉鎖できるという事象は、防潮扉が地震動作用後も物理的に閉めること

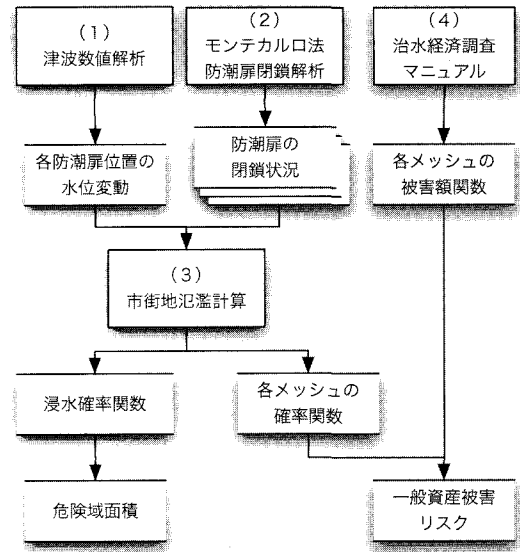


図-4 津波脆弱性解析の流れ図

ができその防災機能を維持し、かつ現地に閉鎖要員が到達できることが必要である。そこで、各防潮扉の閉鎖確率は、地震動作用後の防潮扉の物理的機能維持確率、および非自動化・非遠隔操作化の防潮扉の手動閉鎖を行う緊急対応計画の成功確率からなるとし、これらの確率の積で表す。

各防潮扉に関してこの閉鎖確率を設定すると、各防潮扉の閉鎖確率に従ったモンテカルロ法を行うことで緊急対応をシミュレートでき、緊急対応の結果としての全域にわたる防潮扉の開閉状況を表すベクトル（状態ベクトル）を多数生成することができる。

(3) 市街地氾濫計算

(2)で生成した多数の各状態ベクトルに従って、開放状態にある防潮扉位置に、(1)で記録したその防潮扉位置での津波波形を入力し、市街地氾濫計算を実行する。(2)で生成した状態数を N_A とし、その中で市街地氾濫計算の結果メッシュ G_{ij} の浸水深 z がある区間 $(X \leq z < Y)$ になった状態数を $N_{X \leq z < Y}$ とすると、 G_{ij} の浸水深 z がある区間 $(X \leq z < Y)$ になる確率 $P_{ij}(X \leq z < Y)$ は、次式で表される。

$$P_{ij}(X \leq z < Y) = N_{X \leq z < Y} / N_A \dots \dots \dots (1)$$

これは、各メッシュにおける浸水深区分に関する確率関数である。今、 Y を定義せず X を最小危険水位として0.5 m とすると、各メッシュが最小危険水位以上に達する確率を求めることができる。この確率とメッシュの面積を掛けたものを全領域にわたって合計を取った値を期待浸水危険域面積として1つの評価指標とする。

(4) 一般資産被害解析

臨海都市域の市街地は高度に資産が集中しており、一般資産に被害が発生する。一般資産被害の推定法については洪水対策の経済調査の観点から策定された治水経済調査マニュアル（建設省，2000）がある。開放状態の防潮扉からの津波氾濫と洪水氾濫では、開口部の幅、漂流物の多少などの要因から、堤内地における水流および被害発生過程には差異があると考えられるが、ここでは単純に外力ではなく被害を求める手法として治水経済調査マニュアルによる一般資産被害推定手法を用いる。

始めに治水経済調査マニュアルに定められている被害率関数を用いるために、前節の浸水深区分（ X, Y ）を治水経済調査マニュアルと同様の区分、即ち、床下浸水、床上浸水50 cm 未満、50 cm 以上1 m 未満、1 m 以上2 m 未満、2 m 以上3 m 未満、3 m 以上の6区分とし、各メッシュにおいて浸水深区分に関する確率関数を求める。次に治水経済調査マニュアルに定められた方法で、国勢調査メッシュ統計データから、各メッシュの浸水深が仮に各浸水深区分になった場合の各メッシュの被害額を求め、これを各メッシュの被害額関数とする。最後に各メッシュにおいて浸水深区分ごとに確率関数の値と被害額関数の値を掛け合わせ、全浸水深にわたって合計をとると、そのメッシュの被害額の期待値となる。これを全領域にわたって合計を取った値を期待被害額として2つ目の評価指標とする。

(5) 閉鎖強化対策の減災効果の計算

次に各防潮扉の閉鎖強化による減災効果を計算する手法について説明する。ある防潮扉の閉鎖確率を増大させることが、その背後の堤内地の浸水あるいはそれによる被害の逓減にどれほど寄与するかといった、閉鎖強化対策の減災効果を調べることは今後の防災戦略策定の際に重要である。即ち、この減災効果が高い防潮扉ほどその防潮扉への閉鎖強化対策実施は重要であり、減災効果の評価値にしたがって閉鎖強化対策を実施する防潮扉の優先順位を決定することで被害の極小化を実現できると考えられる。この減災効果の評価指標を検討する。

ここで、問題を簡略化するために、2つの防潮扉 A, B による浸水危険がある地域を考える。例えばグリッド G_{ij} が0.5 m 以上浸水する確率 P_{ij} は、防潮扉 A の閉鎖確率 P_A および防潮扉 B の閉鎖確率 P_B を用いて以下のように表される。

$$P_{ij} = C_{ij}^A(1-P_A)P_B + C_{ij}^B(1-P_B)P_A + C_{ij}^{AB}(1-P_A)(1-P_B) \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 C_{ij}^A 、 C_{ij}^B 、 C_{ij}^{AB} はそれぞれ防潮扉 A 、 B 、 A かつ B からの津波流入があった場合に G_{ij} が0.5 m 以上浸水する時1、しない時0である。この時、0.5 m 以上浸水する面積の期待値 E は、グリッド G_{ij} の面積 S_{ij} を用い

て、

$$E = \sum_j \sum_i P_{ij} S_{ij} \dots\dots\dots (3)$$

であるから、これを P_A に関して微分すると、

$$\frac{\partial E}{\partial P_A} = \sum_j \sum_i (-C_{ij}^A P_B + C_{ij}^B - C_{ij}^B P_B - C_{ij}^{AB} + C_{ij}^{AB} P_B) S_{ij} \dots\dots\dots (4)$$

P_B を固定して考えると、右辺は定数となり、防潮扉 A が開いているという条件（ $P_A=1$ ）の下での期待値から防潮扉 A が閉まっている条件（ $P_A=0$ ）の下での期待値を差し引くことで求められる。この値で防潮扉 A の閉鎖確率の変化が浸水面積の期待値に寄与する度合いが量れ、閉鎖強化対策の減災効果を量る感度指標となる。防潮扉が多数に上る場合も他の防潮扉の閉鎖確率を一定にした場合、同様である。

4. 結 果

大阪市大正区のゼロメートル地帯5.34 km²を対象に計算を行った。この地域には現在約30の防潮扉があり、そのうち14基は常時閉鎖、5基は汀線または河川からはなれているので除外し、残り11基について検討を行う。この地域は地形分類上、三角州または後背湿地であり埋め立て地等に続いて液状化は発生しやすく、翠川・松岡（1995）によるとこの地形分類の液状化を発生させる地表面速度は25 m/s である。内閣府が発表した東南海・南海地震によるこの地域の想定震度は5.3～5.5 であり、地表面速度に直すと約27～34 m/s となる。これから、物理的機能の維持確率を0.6～0.4に設定する。一方閉鎖要員派遣計画の成功確率は日中などの比較的対処可能な時間帯を想定して0.9、および夜間などの対処が遅れる時間帯を想定して0.5とする。なお、これらの確率は、本来防災会議等で専門家、実務者が協議して決定すべき値であるが、今回は手法の確立を主目標とするために筆者が設定した値であるので、結果は現在の地域脆弱性を正確に表すものではない。

始めに各想定地震断層モデルの津波伝播計算による各防潮扉位置での最大水位を防潮扉の敷居高と比較して図-5に示す。この図から大阪湾断層帯モデルではこの地域で最も津波高が大きくなる Model-I による津波でも、開放時に越流する防潮扉は1基であったため、本論文ではこの津波に関する地域脆弱性解析は行わない。

(1) 津波脆弱性

モンテカルロ法を組み込んだ浸水解析の結果、各ケースを想定した場合の、津波脆弱性として浸水面積、および一般資産被害額の期待値を計算することができた。この結果を表-2に示す。

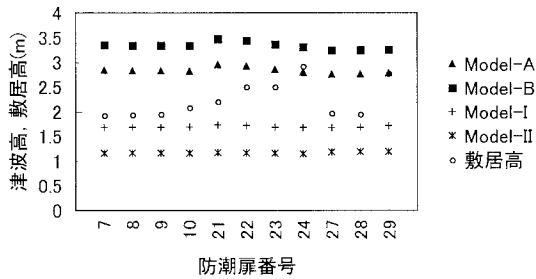


図-5 各モデルの最大水位と防潮扉の数居高

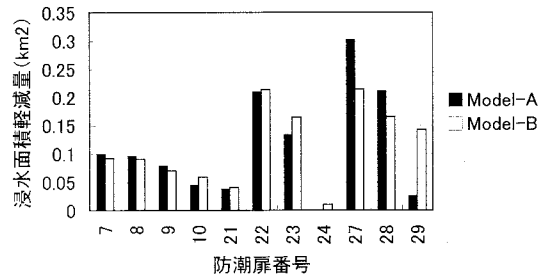


図-6 各防潮扉の期待浸水面積軽減量

表-2 津波脆弱性

閉鎖要員派遣 の成功確率	津波モデル	期待浸水危険 域面積 (km ²)	期待一般資産 被害 (十億円)
0.9	Model-A	1.04	90
0.5	Model-A	1.24	112
0.9	Model-B	1.53	165
0.5	Model-B	1.76	206

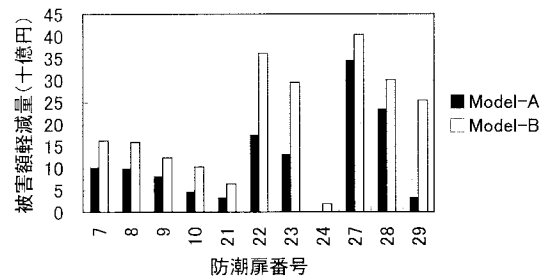


図-7 各防潮扉の期待被害額軽減量

(2) 減災効果

期待浸水危険域面積を評価指標とした場合の各防潮扉の閉鎖体制の強化による、評価指標の減少量を図-6に、期待一般資産被害を評価指標とした場合を図-7に示す。これらの図から本手法を用いて計算した各評価指標の減少量を用いて、対策の優先順位を検討することができる。

期待浸水危険域面積減少量を指標とした場合、外力の大きさ (Model-A, Model-B) による違いはあまり無いが、期待被害額減少量を評価値とした場合、浸水深が増大すると被害率が大きくなるため、外力の大きさによって評価値に違いが出ている。

5. 結 論

本研究で明らかになった結論を以下に示す。

a) 大阪湾断層帯の地震による大阪湾沿岸の来襲津波特性について数値解析を行って明らかにした。この結果大阪湾の湾奥部では東南海・南海地震による津波の方が、それ以外の地域では大阪湾断層帯による津波の方がそれぞれ高くなることが分かった。また、大阪湾断層帯での地震による津波は、地震発生後10分～30分で大阪府臨海部全域に到達し、1時間以上の余裕がある南海地震に比べて閉鎖のための時間的猶予が極端に少ないことが分かった。

b) 防潮扉の施設機能維持確率、閉鎖体制を考慮した、地域の津波脆弱性を面的に把握する手法を開発した。また、ある閾値以上の浸水危険がある面積の期待値、および一般資産被害額の期待値を評価指標として、どの防潮扉から閉鎖強化対策を実施していくことが効率的か、優

先順位を決定する手法を開発した。

しかしながら、防潮扉の閉鎖強化対策効果を考慮した地域脆弱性の効果と優先順位の決定には、モンテカルロ法で作成された多数の閉鎖状況において、多数の市街地氾濫計算を行わなければならない、実務に利用するには負荷が大きい。このことから今後の課題として、早期に最適解に到達できる簡易な計算手法の開発が残された。

謝辞：本研究で使用した水門・陸間に関する資料は大阪市港湾局より提供を受けた。ここに記して謝意を表する。なお、本研究は文部科学省の大都市大震災軽減化特別プロジェクト（代表：河田恵昭）の一環として行われたものである。

参 考 文 献

- 大阪市防災会議(2002)：大阪地域防災計画（資料編），461p.
- 河田恵昭・鈴木進吾・越村俊一(2004)：防災対策の不確定性を考慮した津波減災効果の評価手法，海岸工学論文集，第51巻，pp. 1311-1315.
- 建設省河川局(2000)：治水経済調査マニュアル（案），87p.
- 国土庁・農水省構造改善局・農林省水産庁・運輸省・気象庁・建設省・消防庁(1997)：地域防災計画における津波対策強化の手引き，99p.
- 地震調査研究推進本部(2005)：大阪湾断層帯の長期評価について，<http://www.jishin.go.jp/main/>，参照 平成17年1月12日.
- 翠川三郎・松岡昌志(1995)：国土数値情報を利用した地震ハザードの総合的評価，物理探査，第48巻，第6号，pp. 519-529.