

3. 波源域モデルを用いた四国沿岸域における津波リスクの評価

3.1 緒言

四国沿岸域を襲う津波リスクの評価については、これまでも高橋¹⁰⁾、羽鳥¹¹⁾、河田ら¹²⁾¹³⁾により研究が行われている。特に、河田らは断層モデルを南海トラフ沿いに移動させ、津波の発生位置を変化させる方法で津波リスクを評価している点が注目される。断層モデルを用いれば、正確に汀線や護岸前面までの津波高や湾の固有振動といった共振効果などが評価できるが、それには、計算領域の格子間隔を小さくする必要がある。河田らは、広領域を対象としたため、四国の沿岸領域を考察するには計算の格子間隔がやや粗いように思われる。

本節では、歴史津波の波源域を考慮しつつ、南海トラフ沿いに波源域を人為的に移動させ、波源域を楕円で与え、波向線・波峯線方程式により四国沿岸域に襲う津波の集中・発散状況を考察し、津波リスクを評価しようとするものである。

こうした手法は、湾に近づく津波の入射波の相対的分布を知るには、断層モデルを用いるよりも簡便である。また、この手法により、考察したい沿岸域についてリスクの高い津波の波源を推定し、その後、その波源で断層モデルを用いて詳細な計算を行うことにすれば、効果的な津波の予測ができるので、この方法は津波のリスク評価の第一段階として有効と考えられる。

3.2 数値計算

計算領域は、図4に示す351.25 km × 168.75 kmとし、X軸・Y軸は図中のようにとっている。図中には過去に南海道沖で発生した海溝性地震の年代と震源位置を●印で併記している。tを時間としたとき、解析に用いた波向線・波峯線方程式は、それぞれ以下の式(1)～(5)のように表される。

$$\frac{d\alpha}{dt} = \sin \alpha \frac{\partial c}{\partial x} - \cos \alpha \frac{\partial c}{\partial y} \quad (1)$$

$$\frac{H}{H_0} = k_r = \frac{1}{\sqrt{\beta}} \quad (2)$$

$$\frac{d^2 \beta}{dt^2} + p \frac{d\beta}{dt} + q\beta = 0 \quad (3)$$

$$p = -2 \left(\cos \alpha \frac{\partial c}{\partial x} + \sin \alpha \frac{\partial c}{\partial y} \right) \quad (4)$$

$$q = c \left(\sin^2 \alpha \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - 2 \sin \alpha \cos \alpha \frac{\partial^2 c}{\partial x \partial y} + \cos^2 \alpha \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

ここに、 α は波の進行方向とX軸とのなす角度、 c は波速、 H は波高、 H_0 は初期波高、 β は波向線間隔係数である。ここで、初期波高は楕円周上での波高(=1.0m)とした。

計算領域を格子間隔1,250mに分割し、そこでの平均水深を求めた。計算にあたり波源を後述するように楕円と仮定し、この周上をほぼ1,000m間隔に分割し、各分割点より単位幅あたりの波向きおよび波高を1秒ごとに求めた。

このような計算手法を用いれば、ここで用いたモデルとしての1946年昭和南海津波ばかりでなく、1707年宝永や1854年安政南海の津波などのように、より大きな波源を持つ津波に対しても、中心座標、長径および

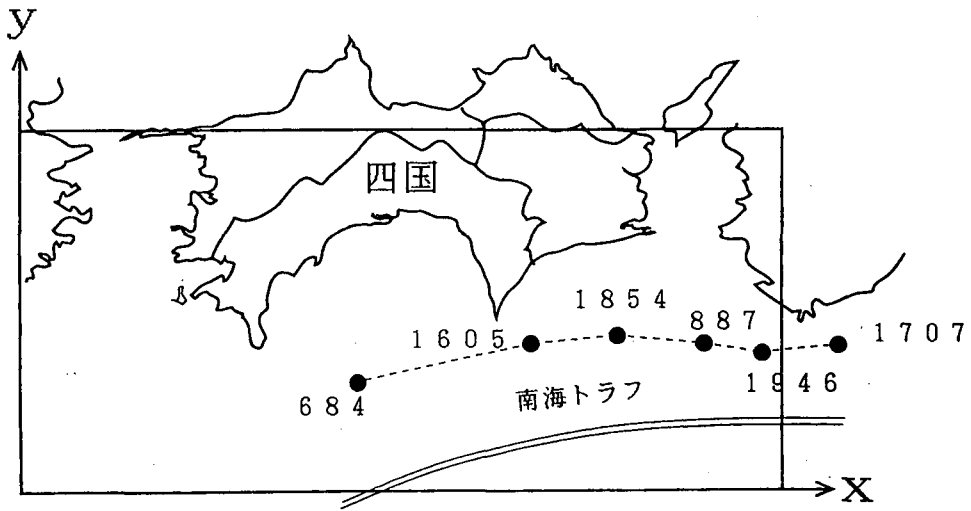


図4 計算領域と歴史地震の震央位置

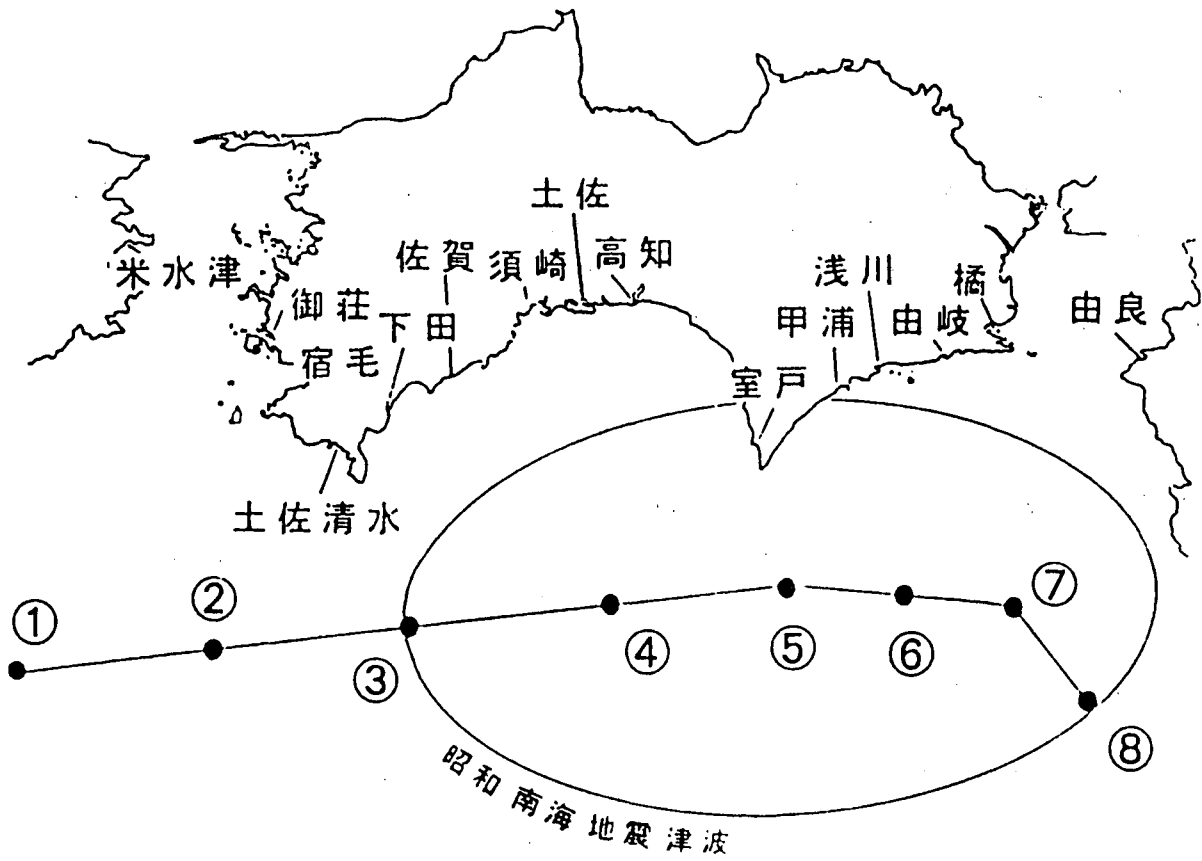


図5 波源域の移動基準

短径，回転角度を変化させて計算を行うことが容易である。

3.3 波源域

波源域の移動基準を歴史津波の震央位置を包括するよう以下のように設け，図5に示す全8種類の波源を持つ仮想津波を考えた。

全ての楕円形の波源に対し，設定初期値（長径，短径，回転角度）は1946年昭和南海津波をモデルの値として採用する。すなわち，長径126 km，短径70 km，回転角度 5° とする。

波源の移動は南海トラフに沿ったライン上で行う。ただし，このラインは南海トラフよりも四国沿岸側の海域に設定する。四国を襲った歴史津波の震央位置のほとんどが，ある1本のライン上に存在していることに着目し，まず，この震央を通るラインを描き，このライン上に全8種の点をとった。また，余震域と波源域はほぼ一致し，震央は波源域の中心とは一致せず，余震域の端に近いところにあることは既にわかっている。ここでは，1946昭和南海津波の波源域のモデルにおける震央位置と中心位置の距離 D をまず求め，先に設定した全8種の点を昭和南海地震津波の長軸方向に D だけ移動させることで，移動波源の中心座標とした。したがって，こうして得られる中心座標を結んだラインが，図5に示しているラインとなる。また，図5において各中心座標から得られる楕円が移動波源であり，以後，これら全8種の波源域のことを波源①～⑧と呼ぶ。なお，和歌山県南西部付近に歴史津波の震央が集中していることから，波源域の移動間隔を⑤～⑥，⑥～⑦，⑦～⑧では①～②，②～③，③～④，④～⑤に比べ $1/2$ と密にし，計算精度の向上を図った。

3.4 津波リスクに関する考察

図6に示すように四国の太平洋沿岸を中心に，海岸線に沿い， $1/200,000$ の地図上で等距離になるように14の領域に分割し，この分割領域に進入する波向および波高を求めて，以下に示すような津波リスクの考察を行った。なお，図中の領域1は豊後水道の九州側，領域2は同四国側，領域13は紀伊水道の四国側，領域14は同和歌山側の沿岸を示している。

3.4.1 津波の入りやすさ（集中度）

等距離に分割された各領域に進入する波向線の本数を比較すれば，津波の入りやすさ，すなわちその領域への津波の集中度を考察することができる。波向線本数が多ければ，その領域には多様な周期を持つ波が進入する可能性がある。もしその領域に湾があり，湾の固有周期と一致すれば湾水が共振現象を起こし，波高が増幅する可能性も多くなるといえよう。

図6は，1946年昭和南海地震津波に相当する波源⑤を持つ津波について，各領域に進入した波向線の本数 n （本）を棒グラフで示したものである。これによると，領域12（浅川～由岐）において，最も波向線が集中しており，次いで領域6，7で高い数値を示している。

なお，図中には1946年昭和南海津波の浸水高 H' （m）も一部一点鎖線で併記されている。本計算のように津波の入射波の集中度と湾内での波の変形も含まれた浸水高とは厳密には比較できないが，津波が集中するところで浸水高が大きくなるという傾向を示すことは興味深い。

図7は，全8種の波源域で計算した場合の，各領域に進入する波向線の総数 N （本）を示したものである。図から領域6，7，10および12は津波が集中しやすい領域であるといえる。また，図6と図7の集中度の傾向は類似していることから，1946年昭和南海津波の波源を考えれば，四国の津波の集中度の特性を考察することができるかと解釈してよいかもしれない。

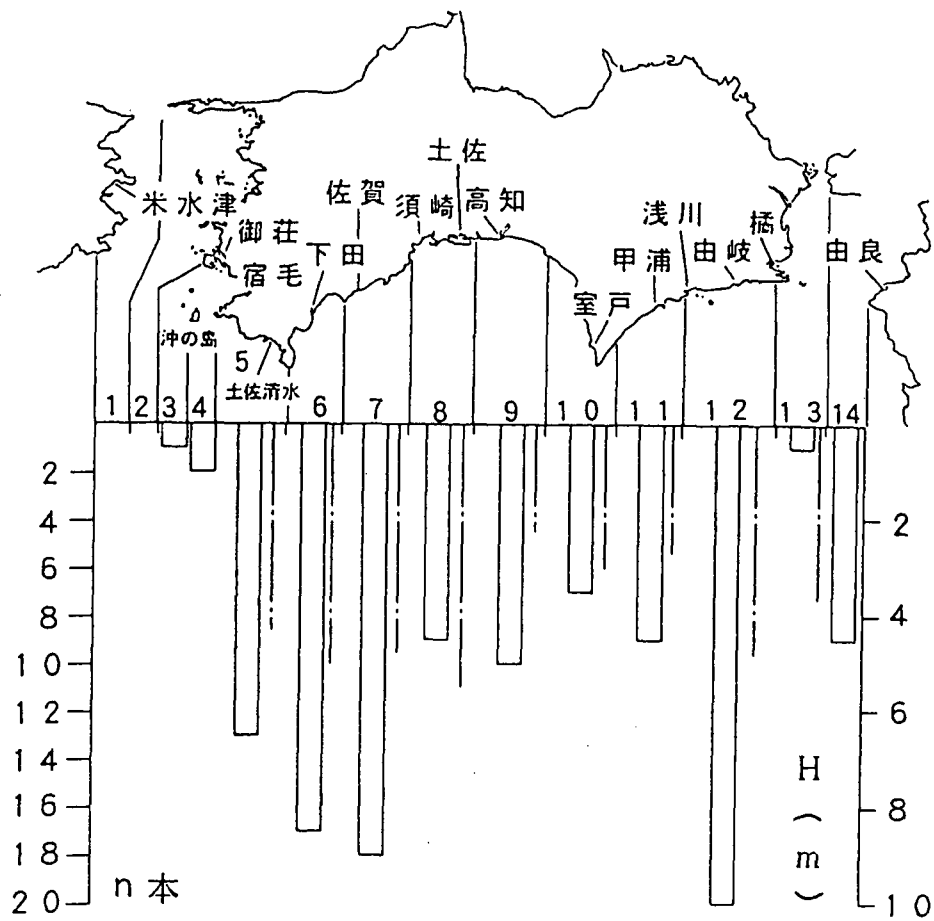


図6 1946年昭和南海津波の波向線本数

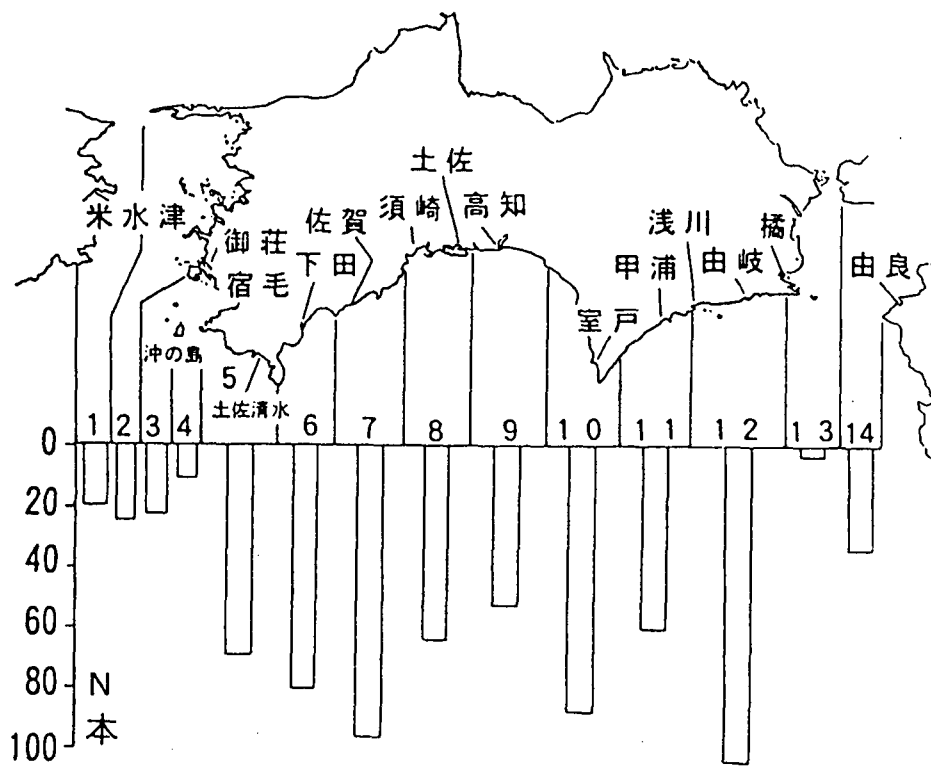


図7 波向線総数

3. 4. 2 津波エネルギー

ここでは各分割領域に到達する津波のエネルギーを考える。1波向線の津波エネルギーは小さくても、波向線が集中すれば全津波エネルギーは大きくなる。また、逆に1波向線の津波エネルギーは大きくても、進入する波向線が少なければ全津波エネルギーは小さくなるはずである。

図8は、各領域に進入する1波向線あたりの津波エネルギー e ($m^2/本$) の分布を示したものである。ここに、津波のエネルギーは津波波高の2乗で便宜的に定義している。図から、領域6、7および8は他の領域と比べ、1波向線あたりの津波エネルギーが大きくなっている。また、波向線総数が最も多かった領域12では、領域7に比べてエネルギーでいえばおよそ1/2であることもわかる。

図9は、各領域に進入する全津波エネルギーを示している。この図から、領域7（佐賀周辺）の津波エネルギーがもっとも大きくなるのがわかる。また、全体的に見ると、1波向線あたりの津波エネルギーが大きい領域で、全津波エネルギーもやはり大きくなっていることがわかる。すなわち、全津波エネルギーに影響を及ぼすのは、波向線総数よりもむしろ1波向線あたりの津波エネルギーであるものと考えられる。これは、波向線総数が1波向線あたりの津波エネルギーほど、各領域で明瞭な差が見られないことからわかる。

3. 4. 3 津波波高の空間分布

各分割領域に到達した波向線ごとの波高を、領域別に1本ずつみると、波源の変化があっても領域内での波高に大差のない領域と、大小さまざまな波高を持つ領域とがある。そこで、領域ごとに波高の空間分布の違いを考察した。

図10は、波源域を①から⑥まで移動させたときの、領域8（須崎～土佐）、9（高知周辺）および領域12における波高 H (m) について示したものである。これらの図から、領域8では平均波高が他の領域に比べ高いうえに、どの波源域から発せられた波も入りやすく、波源によっては平均波高の2倍以上にもなる波も、同じ領域には入ってくることを示している。これに対し、領域9ではどの波源域からの波も平均波高が低く、かつ、入ってくる波高の空間分布も小さい。また、平均波高が領域8と9の中間程度の領域12では、波高の空間分布も領域9以上、8以下となっている。このように平均波高の高い領域ほど、進入する波向線の波高の空間分布は大きくなる傾向にある。ここで、図8に示した1波向線あたりの津波エネルギーを考えると、津波エネルギーが大きい領域では、平均津波波高も大きくなる。したがって、この1波向線あたりの津波エネルギーが高い領域（6、7、8）では、同じ領域に大きな波高を持つ波が進入してくる頻度が高いといえる。

3. 4. 4 到達時間分布

図11に波源の移動によって得られた各領域での、最短到達時間 t (分) の分布状況を示す。この図をみれば、どの領域でも最短で数分から15分、領域13、14を除く領域では最長25～55分となっている。なお、紀伊水道において到達時間の幅が小さくなったのは、豊後水道側で波源を発生させた場合に波向線が進入しなかったため、遠距離波源に関する到達時間の値を得ることができなかったことによるものである。

また、最短到達時間が5分前後という値を示した領域3、4、5、6、7、10、11は、室戸・足摺の岬部分が波源域に含まれるような場合か、あるいは波源域にきわめて近い領域であり、地殻変動終了直後に津波が来襲すると考えた方が妥当であろう。これらの考察に基づき、到達時間分布について以下の考察結果を得た。全領域で津波がもっとも短時間で来襲するのは波源④のときであり、逆に全領域で津波の到達時間が遅くなるのは波源⑤のときであった。豊後水道、紀伊水道といった領域端部では、津波の発生位置によって到

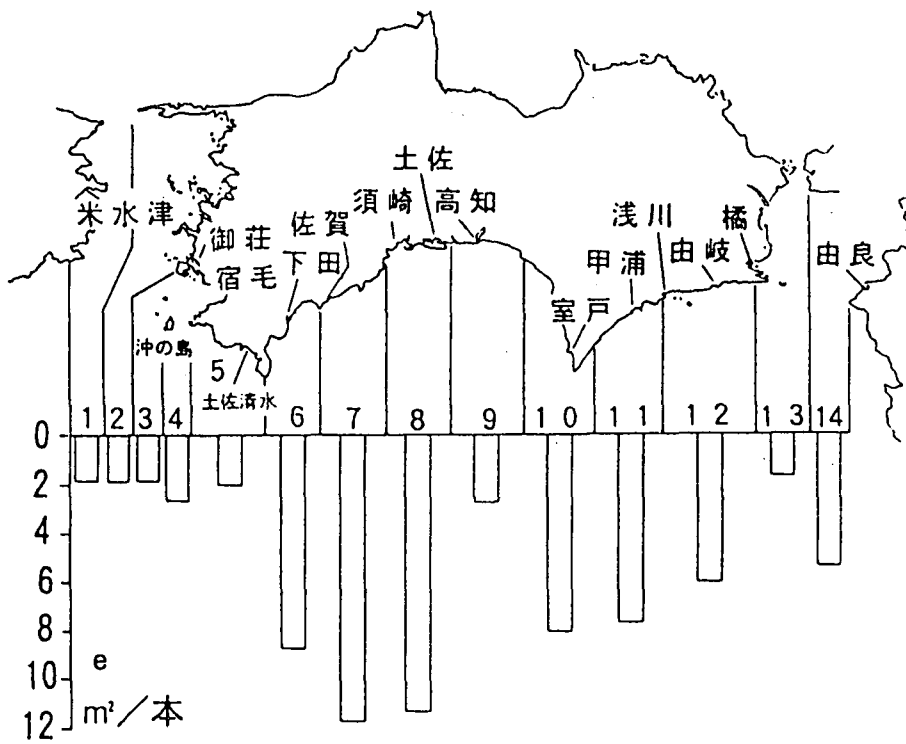


図8 1波向線あたりの津波エネルギー

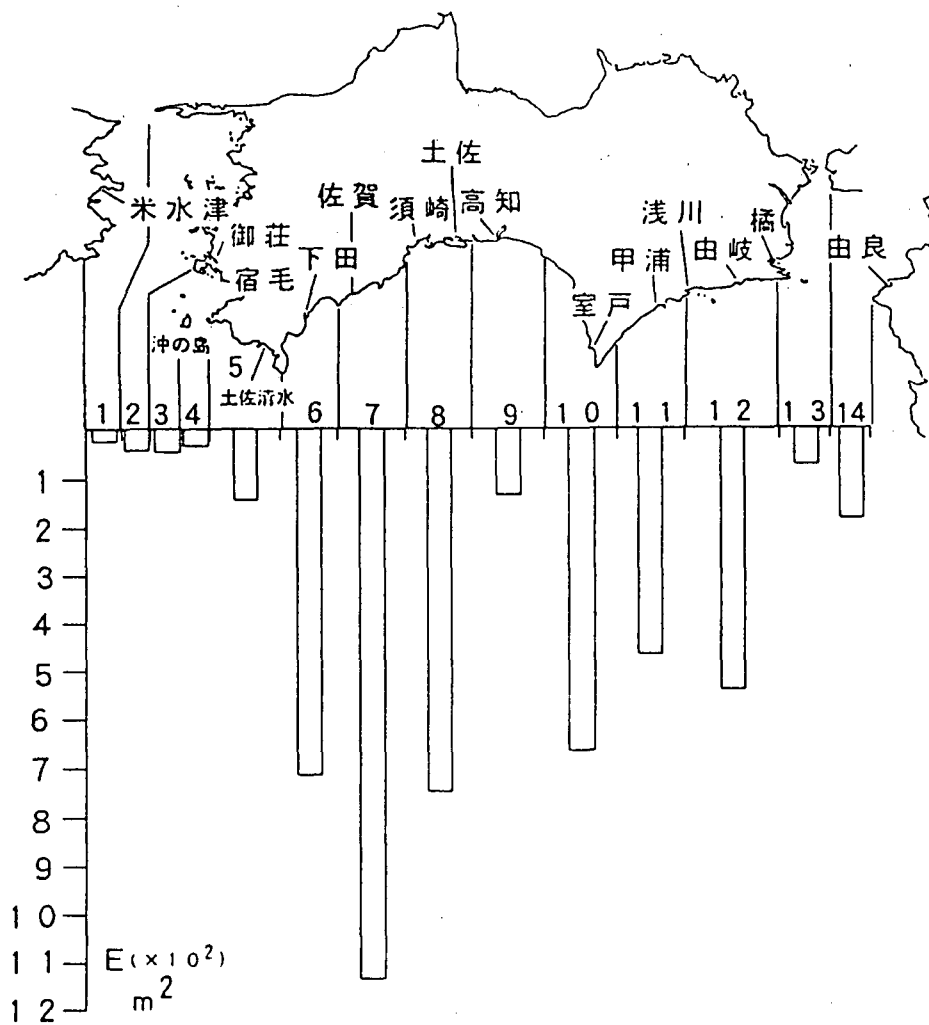


図9 全津波エネルギー

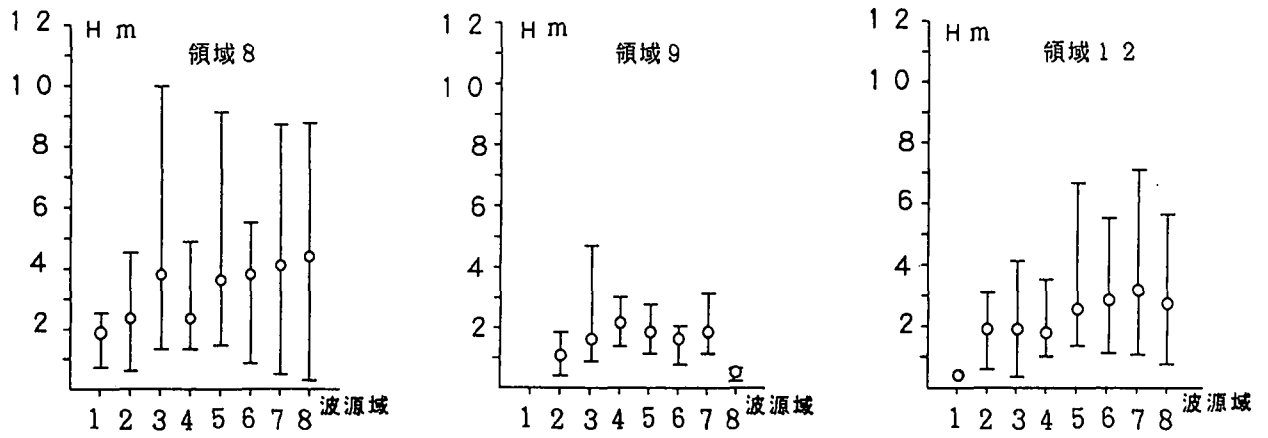


図10 領域8, 9および12の波高の空間分布

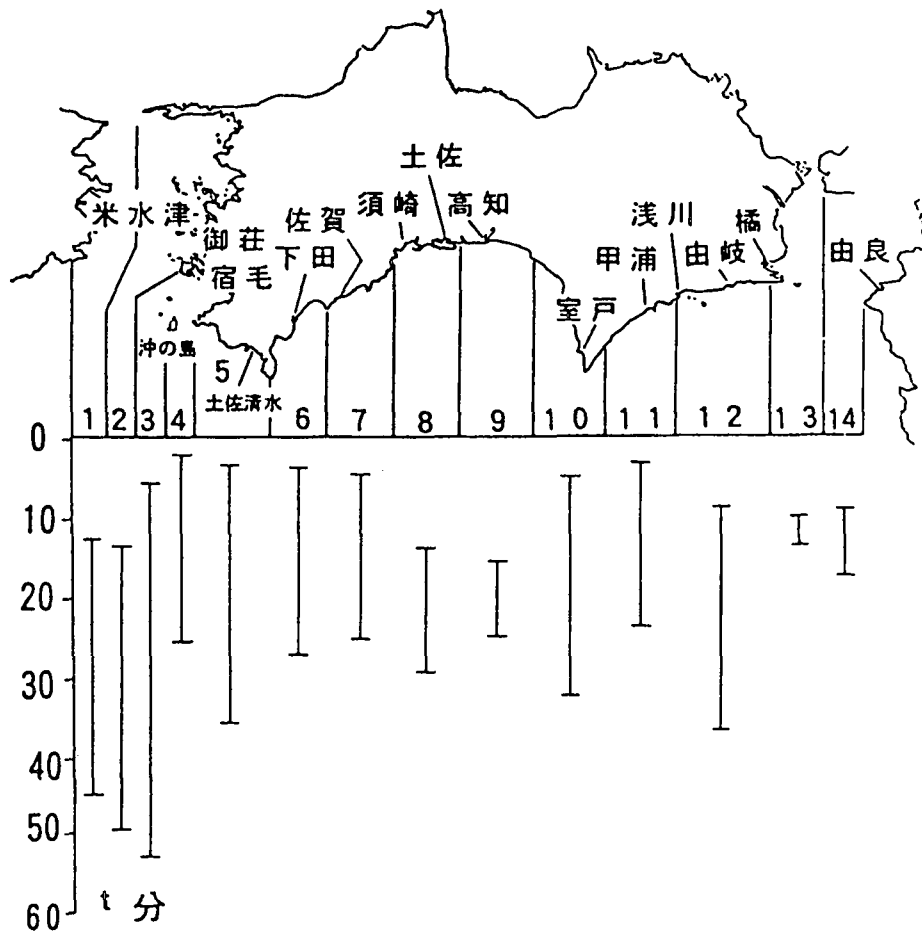


図11 到達時間分布

達時間は10～50分と大きく変化すること、土佐湾へは、津波の発生位置に関係なく、地殻変動終了後およそ30分以内で津波が到達することがわかった。

3. 4. 5 津波リスクの高い波源域の位置

各分割領域ごとに集中度、エネルギー、波高の空間分布といったリスクが高くなるような波源域をそれぞれについて調べたところ、どのリスクについても領域ごとに危険な波源域の範囲が存在し、かつ、同じ傾向を示すことがわかった。すなわち、津波のリスクが高くなる波源域の範囲は、領域によってほぼ決まっているといえる。

図12には、この危険な波源域の他に各領域ごとに最短時間で津波が到達する波源域を調べた結果も併記されているが、領域8を除けば、いずれも先に述べたリスクの高い波源域の範囲内にあることがわかる。たとえば、領域1に最短時間で津波が到達するのは波源②のときであり、危険な波源域とは波源①～④ということになる。また、各領域に最短で津波が到達する波源域は、領域1～4では波源②、領域5～9では波源④、領域10～14では波源⑤付近とはっきりと傾向が現れている。各分割領域のなかでも特にリスクが高いのは、図中の太線で示した領域6、7、8、10、11、12であることは、これまでに述べてきた。そこでこの領域において、リスクの高くなる波源域を考察した結果を以下に記す。図から領域6（足摺岬～下田周辺）、7（佐賀周辺）では、どこの波源域から津波が発生した場合でも、危険性は高い。次に領域8（須崎～土佐）、11（室戸岬～穴喰）および12（浅川～由岐）では、波源⑤～⑧の位置で津波が発生した場合に、最もリスクが高くなる。また、これらの波源域の位置は、1707年宝永、1854年安政南海および1946年昭和南海など四国を襲った巨大な歴史津波の波源域に相当する。領域10（安芸～室戸岬）では、波源②～③、⑥～⑦の位置で津波が発生した場合に、高い危険性を有している。

以上の考察から、リスクが高いと考えられる図中に太線で示した6つの領域に共通して大きな影響を及ぼすのは、波源⑤～⑧、すなわち、歴史津波の波源域付近で津波が発生したときであると思われる。また、この6つの領域は、波源⑤～⑧に向き合うように面した領域であることは興味深い。

3. 5 結言

波源域を南海トラフ沿いに移動させ、屈折計算を行うことで、四国沿岸域に入射する津波の種々のリスクを考察した。その結果、津波の集中度、エネルギー、波高の空間分布、最短到達時間は、対象とした領域・波源域によって異なり、そこには特定の傾向が見られることがわかった。

これまでに得られた主要な結果をまとめると、以下のようになる。

- (1) 分割された各領域に進入した波向線の総数から、領域6、7、10、12において津波の集中度が高くなることを示した。
- (2) 各分割領域に進入した波向線の有するエネルギーは、領域6、7、8で大きく、これらの領域には波高の大きい津波が来襲する可能性があることを示した。
- (3) 各分割領域に進入した波高の空間分布から、1波向線あたりの平均津波エネルギーの大きい領域ほど、領域内の波高の空間分布が大きく、大きな波高を持つ津波が来襲する可能性があることを示した。
- (4) 過去に四国沿岸を襲った巨大歴史津波の波源域付近で津波が発生した場合に、津波のリスクは高く、場所的には足摺～土佐、室戸～橘の間の沿岸域がそれにあたる。
- (5) 豊後水道および紀伊水道では、波源の位置によって津波の最短到達時間は10～50分と、大きく変化することがわかった。また、土佐湾への最短到達時間は、地震発生直後～20分以内と、ある程度限定されることが確認された。

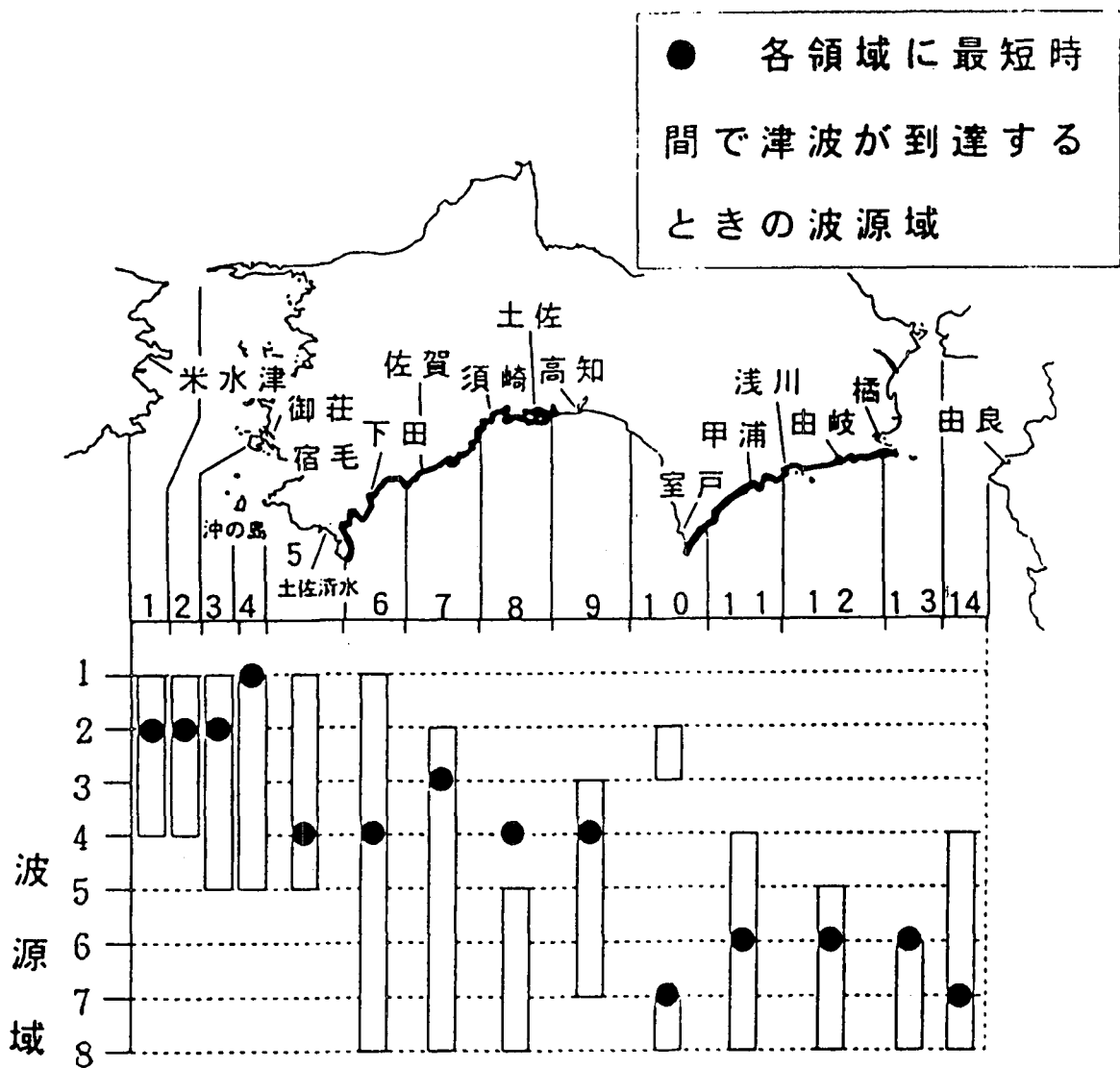


図12 各領域におけるリスクの高い波源域

以上のように結果を得たが、今後はここで指摘した領域、波源域について、断層モデルを用いたより詳細な数値解析を行うことが必要である。これらについては、次の第4節で述べるものとする。