

# 津波数値予報の可能性に関する研究

## —津波数値シミュレーションの精度—

今村 文彦<sup>\*</sup>・後藤 智明<sup>\*\*</sup>・首藤 伸夫<sup>\*\*\*</sup>

### 1. 序論

本研究では、津波常襲地帯のひとつである三陸沿岸を主な対象として日本近海で発生した津波を数値計算し、沿岸各地の津波の高さをその来襲前に量的に予報する事の実現性を予報精度と予報速度の関連において考察する。

三陸沿岸は有史以来、幾度となく津波の来襲を体験している。なかでも明治29年(1896)と昭和8年(1933)に起こった三陸大津波が大きい。この2回の三陸大津波による犠牲者は30,000余名を数える。

近年、これらの度重なる津波の来襲に対して、沿岸各地に津波防潮堤や湾口防波堤など津波対策のための施設が多く建設されて來ている。しかし、これら津波防災施設は中規模の津波を対象としているものであり、大規模の津波を防ぐものではない。従って、今後の津波対策には防災施設のみならず、防災地域計画、防災体制を含めた総合的な防災のあり方を考えなければならない。なかでも、まず始めに考えなければならないことは津波予報に関してである。これは、正確で適切な予報ができ、かつ伝達手段が完備されているならば、人的損害の相当数を軽減できる可能性があるからである。

現在、気象庁が津波の予警報を担当している。予報文は大津波、津波、津波注意および

津波なしの4種類に分けられ、これらの区別は震央距離、地震波の全振幅および津波の大きさとの間の統計的な関係を利用して決められたものである。従って、現状の津波予報は比較的広い範囲の平均的な情報を与えるものにすぎないと言うことができよう。実際、津波予報に対する地元住民の反応を調べてみると、信頼されていることは事実であるが、その内情は必ずしも簡単ではないことがわかる。避難など最終判断は現地の責任者が下すのであるが、「現在の予報文ではいかに行動すべきか迷うことが多い。」、「あまりにも頻繁に警報が出され、しかもこれまでいた津波ではなかったことが多いので、警戒心が緩みがちである。」といった反応が増えつつあるのである。また、住民の一部には警報発令と共に避難とは逆に海岸へ見物にでかける者が増加している。この原因のひとつに、ある程度の津波防災施設が完成し、安心感を与えていていることがあげられる。従って、このままで推移するとまたしても多数の人的被害が生ずる可能性があり、これを防ぐには沿岸各地先での具体的な津波高を伝える以外に効果的な方法が考えられない。

津波発生のもととなる地震の予知に関してはこれまでいろいろな研究がなされているが、現在のところまだ可能と言える段階ではない。しかし、津波の数値予報に関しては、津波が波源から長波のかたちで伝わって来るという性質を利用し数値シミュレーションを用いることにより、数値計算の精度など若干の問題は残されているものの実現が困難であるとい

\* 東北大学大学院、工学研究科

\*\* 東北大学講師、工学部土木工学科

\*\*\*東北大学教授、工学部土木工学科

う理由は見当たらないと考えてもよい。実際、首藤ら<sup>1)</sup>の研究をはじめとする多くの津波数値シミュレーション結果から、津波初期波源を正確に与えることができると、津波の陸上週上高を良好な精度で計算できることが知られている。

津波数値予報の具体的な方法としては次の2種類の方法が考えられる。ひとつは地震の頻発地帯および空白地帯がある程度判明していることを利用して、あらかじめこの頻発地帯、空白地帯を対象とした何種類かの数値シミュレーションを行なっておき、発生した地震の特性と合致する津波初期波形を用いた数値シミュレーション結果を津波の数値予報として採用する方法である。とのひとつは、地震発生と共に、その地震波などの情報を捉え、これから推定された断層モデルによる津波初期波源を用いた数値シミュレーションを行ない、予報に供するものである。

どちらの手法を採用するにせよ数値シミュレーションを用いた津波数値予報を行なう上で問題となることは、迅速な津波初期波形の法定法と数値シミュレーションの高精度及び高速度化の2つである。前者の津波初期波形の決定に関しては Kanamori・Given<sup>2)</sup>及び泉谷・平沢<sup>3), 4)</sup>の研究例があり、精度向上など今後の研究を待たねばならない事項が残されているものの比較的容易にかつ短時間で決定できる予想はついていると言ってもよい。本研究で取り扱うのは後者の問題である。特に、数値シミュレーションの精度すなわち支配方程式の近似度及び数値計算の誤差について詳細な検討を行なう。

現実の現象と数値シミュレーション結果との差すなわち誤差は次のようにまとめることができる。数値シミュレーションに用いた支配方程式の近似度によるものと数値計算上発生するものとに大きく分けられ、さらに、数値計算上の誤差は初期値・境界値誤差、丸め誤差及び打ち切り誤差に分けられるのである。なかでも津波の数値シミュレーションの問題

で重要と思われるものは支配方程式の近似度と打ち切り誤差である。

一般に、高精度の支配方程式を用い離散間隔を小さくとれば誤差は小さくなることが知られているが、逆に計算の記憶容量や演算時間がそれに比例して増加することも事実である。したがって、津波シミュレーションの高精度化と言っても無闇に精度の向上を計るのではなく、問題の必要性に応じた範囲で精度を考えれば良いのである。津波予報で重要なことは津波の最大水位があるので、この最大水位に焦点を絞った精度の検討を本研究では行なっている。また、津波の数値予報では演算時間の高速化も重要な課題であり両者の兼合に関しても考えている。

以下、本研究の内容を簡単に説明する。2.では三陸沿岸の津波数値予報を目的とした代表的な津波数値シミュレーション法を提案する。3.では、1次元伝播問題を取り上げ支配方程式と計算の差分間隔の検討を行なう。4.では2次元伝播問題を深海部及び浅海部に分け同様な検討を行なう。5.では、三陸地方の代表的な湾である宮古湾を対象とした津波の詳細な計算を実施し最大水位の精度に関する防波堤・防潮堤及び陸上週上の効果について考察を行なう。

## 2. 対象海域と数値シミュレーション法

まず始めに、津波の数値予報のための数値シミュレーション手法を簡単に説明する。

対象とした領域は図-1に示す北海道根室半島から東北地方の宮城県沿岸までの東経 $139^{\circ} 40'$ から $145^{\circ} 20'$ まで、北緯 $36^{\circ} 20'$ から $43^{\circ} 00'$ の範囲である。この領域をAからDの4段階に分割を行ない、深海部では空間格子長を $5.4\text{ km}$ （1領域）とし、沿岸付近の浅海部では次第に格子長を細かくし $1.8\text{ km}$ （4領域）、 $0.6\text{ km}$ （5領域）とし、最終的に $0.2\text{ km}$ （22領域）まで細分化している。図中のA、B及びCはそれぞれの領域を表わし、

斜線部はD領域の22箇所を表わす。計算領域の諸元の詳細は表-1に示す。また、図-1には羽鳥<sup>5)</sup>により推定された津波の波源域も示してある。

支配方程式は線形長波理論であり、計算法にはリープフロッギ法を用いている。したがって、この数値シミュレーションモデルでは津波の陸上週上及び人工構造物の効果は考慮していない。津波数値予報におけるこれらの効果の重要度に関しては後に詳細に検討する。なお、数値計算の詳細は他の報告<sup>6)</sup>を参照されたい。

本研究では入力津波として明治三陸大津波(1896)と十勝沖地震津波(1968)を用いている。津波の初期波形の決定には相田<sup>7)</sup>のモデルを使用しており、表-2に断層パラメータを示す。

### 3. 1次元伝播問題による検討

支配方程式の精度というのは、その支配方程式を導く際に設けた仮定又は近似が現実の現象にどの程度近いかということである。津波の現象を近似する理論には線形長波理論、それに有限振幅項、移流項を考慮した浅水理論、さらに波数分散項を考えた非線形分散波理論などがあり、項の数が増すほど精度があるものと考えて良い。一方、計算の誤差は差分格子間隔に比例して大きくなると考えて良い。しかし、津波の数値予報を考える場合には精度と共に演算時間の高速化という問題もあり両者の兼合を考えて決める必要がある。

そこで、ここでは簡単なため1次元伝播問題を取り上げ支配方程式及び差分格子間隔の違いによる計算結果の差と演算時間の検討を行なう。

計算に用いたのは図-1のa-a', b-b', c-c'に示す3断面の水深分布と明治三陸大津波と十勝沖地震津波の初期波形である。これは高次近似項の大きさ及び計算誤差が初期波形、水深分布及び伝播距離により異なるた

め、現実的な問題で検討することを考えたためである。計算の支配方程式には、海底摩擦(マニングの粗度係数0.025)を考慮した線形長波理論、浅水理論及び非線形分散波理論の一一種であるPeregrineの式<sup>8)</sup>を用いている。

まず始めに、水深500m以上である深海域の支配方程式に関して検討を行なう。図-2は断面a-a'における明治大津波の計算結果を示したものである。ここでは支配方程式の検討のため計算誤差が小さくなるように通常の計算で用いられるものより十分細かい空間格子間隔1.35kmを用いている。また、時間格子間隔は2.5sであり、津波発生後から100s間隔に500sまで出力している。図中の実線がPeregrineの式、破線が線形長波理論、丸印が浅水理論による計算結果である。縦軸は波高、横軸は格子番号を表わす。

図から深海部における線形長波理論と浅水理論の波形の差はほとんど見られないことがわかる。Peregrineの式を用いた計算結果は津波発生後100sすでに高周波数成分が含まれており、以後、伝播するにつれこの高周波数成分の振幅は徐々に増幅されている。これは、先に述べたようにPeregrineの式には水深に関係する波数分散効果が含まれているためである。

図-3は断面b-b'の明治三陸大津波の計算結果である。断面b-b'は断面a-a'に比べ斜面勾配が小さい場合である。図-4は断面c-c'の十勝沖地震津波の計算結果である。いずれも図-2の結果と同様な傾向を示している。

図-5は断面a-a'のPeregrineの式を用いた計算における運動方程式の各項の大きさを調べたものである。縦軸はその地点での各項の最大値(絶対値)を局所項の最大値(絶対値)で基準化したものであり、横軸は計算の格子番号を示す。この図から、津波の初期波源では分散項が局所項の約1/2程度の大きさとなるが、伝播するにつれ、局所項と重

力項が主要な釣り合いとなることがわかる。  
(ただし、津波の初期波源付近で分散項が大きいのは初期波形が崩れる瞬間だけである。)また、この深海部における移流項は他の項に比べ無視できる程小さいこともわかる。

次に、浅海部における支配方程式を検討する。図-6に断面a-a'（明治三陸大津波）の結果を示す。入射津波は図-2の計算で用いたものと同じものである。浅海部では空間格子間隔を0.2 km、時間格子間隔を1.5 sとし、津波発生後450 sから150 s毎の波形を出力している。津波発生後600 sまでは深海部と同様な傾向を示すが波峰が水深200 mの地点から浅水理論とPeregrineの式を用いた計算結果の伝播速度が線形長波理論より速くなることがわかる。また、物理的な波数分散効果を含むPeregrineの式を用いたものと比較すると無視できるぐらいい小さいが、線形長波理論や浅水理論の結果についても波峰の後ろに高周波数成分が成長するようになる。これは数値計算の打ち切り誤差（数値分散性）によるものである。他の断面についての計算結果を図-7、図-8に示す。図-7は断面b-b'での明治三陸大津波、図-8は断面c-c'での十勝沖地震津波の結果である。図-6の結果と同様な傾向がうかがえる。

図-9には浅水理論の運動方程式の各項の比較を行なった結果の一例（断面a-a'）を示す。この図も縦軸は各項の最大値（絶対値）を局所項の最大値（絶対値）で基準化され描かれている。各図よりわかるように水深50 m以深では運動に関与するのは局所項、重力項だけであると言っても良いが、水深50 m以浅では移流項及び海底摩擦項も無視できないこともわかる。

次に、最大水位に関する支配方程式と差分間隔の違いによる計算結果の差を検討する。図-10に示すのは支配方程式による最大水位の比較である。計算の差分格子間隔は1.35 kmである。縦軸は波高、横軸は波源中央からの津波の伝播距離を表わす。いずれの図から

も線形長波理論と浅水理論との間の有意な差はほとんど見られないこと及びPeregrineの式を用いた計算結果は波数分散性のため最大水位が他のものに比べ多少小さめのものとなることがわかる。図-11には差分間隔の違い（1.35, 2.7, 5.4, 10.8 km）による最大水位の差を示す。これは断面a-a'に関するものであり、計算に用いた支配方程式は浅水理論である。また、浅海部は差分格子による海岸線近似の影響が大きく1次元伝播計算で検討することは難しいためここでは深海部に関してのみ行なっている。計算結果は打ち切り誤差（数値分散性）のため差分間隔が大きい程最大水位が小さくなっている。2で提案した津波数値予報のためのモデルの深海域差分間隔は5.4 kmであり、この場合1.35 kmのものに比べ約8%低い水位となることがわかる。

最後に、演算時間の比較を行なったものを表-3に示す。線形長波理論を用いた計算の演算時間の比で表わしている。線形長波理論及び浅水理論では陽差分（リープフロッギング）法を使用しているのに比べ、Peregrineの式を用いた計算では計算の安定性のため陰解法を用いており線形長波理論の17倍程度の時間を必要とすることがわかる。また、1次元伝播問題では差分間隔を倍にすると演算時間が約4倍になることもわかる。

以上の1次元計算結果から次のような結論を得る。

- ①三陸沿岸を対象とした津波の数値シミュレーションでは分散項の効果を無視しても良い。
- ②特に、水深500 m以上の深海部では移流項も省略しても良い。
- ③水深50 m以浅では海底摩擦項も重要である。
- ④深海部の差分間隔は先に提案した5.4 kmで十分である。

#### 4 2次元伝播計算による検討

##### (1) 深海部

ここでは深海部における2次元計算を行な

い、差分格子間隔の違いによる計算結果及び演算時間の差について検討する。さらに、コリオリカの効果についても若干の考察も行なう。支配方程式には前節の結果から線形長波理論を用いている。深海部に焦点をあてた検討を行なうために水深 1000 m 以浅をすべて 1000 m におきかえ計算している。比較検討する差分格子間隔は 2.7, 5.4, 10.8 km の 3 種類であり、計算の詳細は表-4 に示す。計算は地震発生の後津波が伝播し三陸沿岸に到達するまでの 30 分間にわたり実施している。想定した津波は明治三陸大津波である。

図-12 に差分格子間隔 2.7 km (正方格子) の計算結果を示す。図は地震発生後 10 分毎の空間水位分布を示す。図中の数字はメートル単位の水位を示す。破線の直下の数字は領域中での最大及び最低水位である。下段の図は破線で示される断面波形を表わしている。初期波形は北西方向にやや傾いた矩形を呈し、西側では水面が沈降し東側では逆に隆起している。地震発生後 10 分には津波の主要部が 2 つに別れ、三陸沿岸に向う波と北海道根室沖に向う波が生じている。20 分後にはすでに津波は三陸沿岸に到達し、30 分後では沿岸で反射した波が見られる。この様子を津波発生後 2 分毎に立体透視図化したものが図-13 の a - j である。図は鉛直方向に拡大されて描かれているので注意が必要である。初期波源の最大水位は 4.0 m である。一方、水平方向の距離は約 50 km である。

同様にして差分格子間隔 5.4, 10.8 km の計算結果をそれぞれ図-14, 15 に示す。差分格子間隔が大きくなると津波の伝播の過程が粗く表現されるのがよくわかる。

以上の 3 種類の差分格子間隔による計算結果の最大水位分布について比較したものを図-16 に示す。最大水位は等水位線で表わされ数字はメートル単位の最大水位である。最大水位分布に関する格子間隔の違いによる差は波源域周辺および三陸沿岸部において比較的大きいものとなる。細かい差分格子間隔を用

いたものが高く、粗いものは低くなるといった差が見られる。差分格子間隔 2.7 km と 5.4 km の差は海岸線の近似具合が異なるため北海道および東北地方の沿岸に添って大きいものとなるが平均すると 10% 程度の差である。差分格子間隔 5.4 km と 10.8 km の差は約 20% である。したがって、差分格子間隔 10.8 km のものは 2.7 km のものに比べ約 30% 以上の最大水位の過小評価となっている。

図-17 は差分格子間隔の異なる 3 種類の計算の水位経時変化について比較したものである。実線、破線、丸印はそれぞれ格子間隔 2.7, 5.4, 10.8 km の計算結果を表わす。出力地点は浅海部計算への接続を考慮して水深 1000 m の等水深線上に 16箇所を選んでいる。図中の数字は差分格子間隔 2.7 km の計算結果による最高水位と最低水位を表わす。各地点いずれも引き波が始まり津波発生後 10 から 15 分頃に第 1 波目のピークを生じている。第 1 波の波高は先の最大水位分布の比較と同様に差分格子間隔が小さい方が高いものとなる。これは、打ち切り誤差により格子間隔が粗いほど数値分散性の効果が大きいために波高が減衰するためである。また、図から主要の周期 10 分程度の波は波高の差こそあれ周期はさほど変わらないが後続する単周期波の周期が異なることがわかる。しかも差分格子間隔が細かいほど高い周波数の成分が現われている。これはサンプリング間隔とエイリアジングの関係に似て、数値計算においても格子間隔が粗らさに比例する一種のローパスフィルターが働くため、高周波成分を落とすのである。

つぎに、コリオリカの効果を調べた結果を図-18 に示す。計算には 5.4 km の差分格子間隔、線形長波理論にコリオリ項を組み入れた支配方程式を用いている。図はコリオリ力を考えないものとの差を百分率で表わしたものである。襟裳岬の東側で多少高くなっているのが図から分かるように最大でも 7% 程度の差であり三陸沿岸を対象とした津波数値シミュレーションでは無視してかまわないと思わ

表-1 計算領域の諸元

領域	計算格子サイズ		支配方程式
	$\Delta x$ , $\Delta y$	$\Delta t$	
A	5.4 km	3 s	線形長波理論
B <sub>1</sub> - B <sub>4</sub>	1.8 km	3 s	"
C <sub>1</sub> - C <sub>5</sub>	0.6 km	3 s	"
D <sub>1</sub> - D <sub>22</sub>	0.2 km	3 s	"

表-2 断層パラメータ（1896 明治三陸大津波）

L (km)	w (km)	u <sub>d</sub> (m)	u <sub>s</sub> (m)	$\theta_d$ (°)	$\delta$ (°)	$\eta_{max}$ (m)
180	100	-4.7	-6.2	S 66W	20	2.8

L : 断層の長さ, w : 断層の幅, u<sub>d</sub> : 逆断層の縦ずれ成分, u<sub>s</sub> : 右横ずれ成分, $\theta_d$  : 断層傾斜の方位角,  $\delta$  : 断層傾斜角,  $\eta_{max}$  : 鉛直方向最大地盤変位

表-3 1次元伝播での計算条件および演算時間

	支配方程式	DX	DT	IG × JG	STEP	演算時間	
							比
1	線形長波理論	1.35 km	2.5 s	209 × 1	560	0.33"	1.0
2	浅水理論	"	"	"	"	0.53"	1.6
3	Peregrine's	"	"	"	"	5.65"	17.1
4	線形長波理論	10.8	20.0	26 × 1	75	$5.53 \times 10^{-3}"$	1.0
5	"	5.4	10.0	53 × 1	140	$2.21 \times 10^{-2}"$	4.2
6	"	2.7	5.0	105 × 1	280	$8.39 \times 10^{-2}"$	15.2
7	"	1.35	2.5	209 × 1	560	$3.30 \times 10^{-1}"$	59.7

表-4 深海部での計算条件および演算時間

	支配方程式	D X	D T	IG × JG	STEP	演 算 時 間	
							比
1	線形長波理論	10.8 <sup>km</sup>	20 <sup>s</sup>	65×45	90	2.36"	0.14
2	"	5.4	10	130×90	180	16.91"	1.00
3	" + オリカラ	5.4	10	130×90	180	38.95"	2.30
4	線形長波理論	2.7	5	260×180	360	2' 04.99"	7.39

表-5 浅海部での計算条件および演算時間

	支配方程式	D X (D領域)	D T	STEP	演 算 時 間	
						比
1	線形長波理論	600 <sup>m</sup>	3 <sup>s</sup>	1,800	9' 58.7"	0.05
2	"	300	3	1,800	16' 41.8"	0.65
3	"	200	3	1,800	25' 58.8"	1.00
4	浅水理論	200	2	2,700	4hr 25' 15.0"	10.00

表-6 宮古湾での計算条件および演算時間

	支配方程式	防波堤	週上	D X	D T	STEP	IG × JG	演 算 時 間	
									比
1	浅水理論	あり	あり	50 <sup>m</sup>	1 <sup>s</sup>	3,600	170×150	1 hr 23' 9.6"	68.3
2	"	なし	あり	50	1	3,600	170×150	1 hr 21' 39.6"	67.0
3	"	なし	なし	50	1	3,600	170×150	51' 4.0"	41.9
4	"	なし	あり	100	2	2,700	84×74	11' 13.9"	9.2
5	"	なし	なし	200	4	1,350	42×37	1' 13.1"	1.0

潮位は T.P. 0 m とする。

図-23に宮古湾の水深分布と水位の経時変化を示す。水位の変化を表わす実線、破線、丸印がそれぞれ格子間隔 0.05, 0.1, 0.2 km の計算結果である。湾口付近では津波発生後約20分で水面下がり始め、30分過ぎに第1波のピークが表われる。宮古湾は南北方向に奥行きの深い湾であるため、湾口付近の出崎埠頭と湾奥部の津軽石地区には6分程度の来襲時刻の差がある。図からわかるように格子間隔による水位経時変化の差はあまり見られない。

次に、水位及び流速分布に関する比較を行う。図-24 a-f に津波発生後20分から45分までの5分毎の計算結果を示す。図は格子間隔 0.05 km のもので陸上週上、人工構造物の効果を共に考慮したものである。宮古湾の明治三陸大津波は引き波で始まり25分頃湾全体の水位が下がり始める。30分で湾口付近に第1波の波峰が到達し、その5分後には湾中央部に達する。このとき閉伊川河口、藤原埠頭では津波が広範囲に週上している。40分では波峰が湾奥の津軽石地区に達し、その後津軽石川を週上して行く。図-25 a-f は格子間隔 0.05 km で陸上週上ののみ考慮したものである。両図の比較から防波堤の影響としては、藤原地区の防波堤が湾中央付近までのびてることにより、防波堤の前面及び背後に渦を形成していること、また、防波堤、防潮堤の効果により陸上週上域はかなり小さくなっていること、そして人工構造物の有無で流速ベクトルがかなり異なることがわかる。しかし、水位分布に関しては藤原地区の防波堤付け根付近を除き差はあまり見られない。図-26 a-f は格子間隔 0.05 km で陸上週上、人工構造物の効果を共に考慮しないものである。陸上週上ののみを考慮したものに比べ閉伊川周辺、各埠頭周辺及び津軽石地区など津波が陸上週上している周辺の細部においてはかなり流速分布が異なるが、週上域を離れるとその差は大きくない。しかも、水位分布は週上域

周辺においても顕著な差は見られない。したがって、陸上週上、防波堤の効果はその付近で流況を大きくかえるが水位に関しては大きく変化されないと見える。

図-27 a-f 及び図-28 a-f は格子間隔 0.1, 0.2 km の計算結果である。格子間隔が粗くなると幾分流速分布が変化していくがやはり水位の変化量は小さい。格子間隔 0.2 km の結果は先に提案した津波数値予報のモデルと同じであり、陸上週上及び人工構造物の効果をまったく考えてなく流速分布は相当異なったものとなるが水位に関してはあまり変わらないものとなる。

次に、最大水位分布について検討する。図-29 a, b はそれぞれ格子間隔 0.05 km で陸上週上、人工構造物の効果を考慮したもの及び格子間隔 0.2 km の結果である。両者の差を百分率で表わしたものと図-30に示す。藤原地区の防波堤の前面で 0.05 km の計算結果の方が防波堤があるため水位が高く、その背後では低くなっているといった、多少の差はあるものの、平均的な差は 15% 弱である。

最後に、演算時間の比較を表-6に示す。格子間隔 0.2 km の演算時間を基準として比率で表わしている。陸上週上などを含む高精度計算では格子間隔を倍にすると演算時間は約 10 倍になる。

以上の計算結果の検討から次のような結論を得る。

①陸上週上及び人工構造物は津波の流況に大きく作用するが水位に関してはその効果は小さい。

②先に提案した津波数値シミュレーションモデルを格子間隔 0.05 km で陸上週上、人工構造物を考慮した高精度計算と比較した結果、津波の流速に関しては精度が劣るが、津波数値予報上重要な水位についてはその差は小さく、十分な精度をもつものと判断できる。

## 6. 結 言

本研究では、三陸沿岸を対象として近海に発生する津波を数値シミュレーションを用いて予報することの実現性を予測精度と予測速度の関連で検討した。種々の角度から考察した結果、津波の最大水位に主眼をおく数値予報では、ここで提案した数値シミュレーション法で十分な精度をもって実施し得ることを明らかにした。

また、現状では90分間の津波を再現するのに約27分程度の演算時間を必要とするが、スーパーコンピューターのベクトル演算機能を用いることにより2分程度で終了させることができると見通しもある。したがって、地震発生から三陸沿岸に津波が襲来するまで20分間程度の余裕があるものとすると、数値予報業務に約10分必要としても残り10分で避難できることになり、リアルタイムとしての津波数値予報も可能である。

**謝辞**：数値計算には東北大学学部生佐山順二君の助力を得た。また、本研究の一部は文部省科学研究費（代表 東北大学工学部教授首藤伸夫）及び石原藤次郎研究奨学基金による。

## 参 考 文 献

- 1) Shuto, N., Suzuki, T., Hasegawa, K. and Inagaki, K. : A study of numerical technique on the tsunami propagation and runup, International Tsunami Symposium, 1985.
- 2) Kanamori, H. and Given, J. H. : Use of long-period seismic waves for rapid evaluation of tsunami potential of large earthquakes, Tsunamis ; Their Science and Engineering, 1983.
- 3) 泉谷恭男, 平沢朋朗 : 強震動の継続時間と震源パラメタ, 第21回自然灾害科学シンポジウム, 1984.
- 4) 泉谷恭男, 平沢朋朗 : 加速度記録を用いた断層パラメタ即時的推定の試み, 地震学会講演予稿集, 1985.
- 5) 羽鳥徳太郎 : 東北日本太平洋側における津波の波源, 地震 27, 1974.
- 6) 後藤智明, 小川由信 : Leap-frog法を用いた津波の数値計算法, 東北大工学部土木工学科, 1982.
- 7) 相田勇 : 200 m等深線上の津波波形と浸水高, 地震 30, 1977.
- 8) Peregrine, D. H. : Long waves on a beach, JFM, 1967.
- 9) 伊木常誠 : 三陸地方津波実況取調報告, 震災予防調査報告11号.
- 10) 松尾春雄 : 三陸津波報告, 土木試験所報告.

れる。

最後に、演算時間の比較をしたものと表-4に示す。この表から2次元伝播問題では差分格子間隔を2倍にすると演算時間が約1/6になることがわかる。コリオリ力を考慮した計算は約2倍の演算時間が必要となることもわかる。

以上の事からここでは次のような結論を得る。

①津波の数値予報では精度と共に計算の高速化が必要であるという観点から考えると深海部計算の差分格子間隔としては5.4 km程度がよいと思われる。

②三陸近海で発生する津波を対象とする数値シミュレーションではコリオリ力を考慮する必要はない。

## (2) 浅海部

ここでは浅海部の津波計算に関して支配方程式、空間格子間隔の違いによる計算結果及び演算時間の差について検討する。

浅海部の計算といつても、深海部の計算を省くわけではなく、2で説明したように深海部から浅海部まで連続的に計算する方法を採用している。計算領域はAからDまでの4段階に分かれており、ここでは沿岸域のD領域における差分格子間隔を3種類(0.2, 0.3, 0.6 km)に変え実施している。深海部の支配方程式には線形長波理論を用い、浅海部では線形長波理論と浅水理論の2種類を採用している。計算の諸元を表-5に示す。対象とした津波は明治三陸大津波である。

図-19の左側に格子間隔の違いによる海岸線形状の差を示す。格子間隔0.2 kmのものは領域分割と水深分布が描かれている。0.2, 0.3 kmのものでは海岸線が比較的滑らかに表現されているが、0.6 kmのものでは格子が粗く階段上の形状が目立つ結果となる。したがって、粗い差分格子間隔を採用すると計算の打ち切り誤差以外に海岸からの反射に関する誤差も大きくなることが予想される。この境

界近似の誤差の影響をも簡単には評価できないためこれを含めて計算結果の比較により考察する。

図-19の右側のものは三陸沿岸の最大水位に関する線形長波理論を用いた計算結果の比較である。格子間隔0.2, 0.3, 0.6 kmの計算結果をそれぞれ太実線、実線及び丸印で表わしている。また、津波の痕跡記録<sup>9), 10)</sup>も同時に示している。痕跡値には同地点であっても観測者の違いにより差があるものもあり、このようなものに関しては最大値と最小値を結びエラーバーで表わしてある。痕跡値が1つしかない場合には白印を用いている。

明治三陸大津波は三陸沿岸全体で比較的波高の高い結果となる。特に、田老や白浜付近で30 m以上の水位となる。一般に、水位が高くなる地点は外海に直接面した開放性の湾

(平井賀、田老) や海岸線の複雑に入り組んだ湾奥(両石、釜石)である。逆に、比較的水位が低いのは湾口が狭いところ、湾口が北向きや南向き(宮古、山田)そして海岸線が直線状である(種市、有家)場所である。

計算結果と痕跡値を比較すると平均的にはよく一致していると言えるが、野田、玉川、大田名部、羅賀、平井賀、島ノ越、二十一浜では計算結果の方が多少小さく、両石、釜石で高い結果となる。差分格子間隔の違いでは0.2, 0.3 kmの計算結果は比較的よく合致しているが0.6 kmのものは所々水位が小さくなる地点がある。これは先に述べた差分格子間隔の差による打ち切り誤差と境界近似の誤差のためである。特に、羅賀、平井賀のような水深変化が急であり、津波が北山崎で複雑な屈折をする地点や両石、釜石、吉浜など複雑な地形では格子間隔0.6 kmの結果は低くなっている。

図-20 a- $\ell$ に船越湾から釜石湾までの領域D<sub>II</sub>の空間水位分布及び流速ベクトルに関する計算結果の一例を示す。図は津波発生後21分から2分毎のものである。右側の図が線形長波理論を用いた計算結果であり、左側は

浅水理論によるものである。差分格子間隔は0.2 kmである。図中の数字はメートル単位の水位を示す。横軸、縦軸の数字は格子点番号を意味する。また、図-21 a-1は線形長波理論を用いた計算結果を立体透視図化したものである。これも先に示した深海部の立体図と同様に縦横歪がある。

図-20から線形長波理論と浅水理論との水位分布に関する差は浅水理論の結果の方が多少滑らかなものとなるがその高さの差はさほど大きいものにはならないことがわかる。しかし、流速分布の方は大きく異なったものとなる。特に、水深50 m以浅の地点では流向、大きさ共に顕著な差が見られる。

図-22は最大水位分布の差を比較したものである。図は三陸沿岸全域について線形長波理論及び浅水理論の計算結果の差を百分率で表わしたものである。斜線部は線形長波理論に比べ浅水理論による計算結果の方が高くなかった地点を示す。浅水理論を用いた計算結果が高くなるのは汀線から多少離れた沖合であり、沿岸部は線形長波理論の方が高くなると言うことができる。これは両者の波速の違いによるものとおもわれ、襲来する津波の周期との兼合があるようである。

最後に、表-5に演算時間の比較を示す。浅海域のみ変化させたため差分格子間隔0.2 kmの演算時間は0.6 kmものに比べ3倍程度増えただけであるが、浅水理論の演算時間は線形長波理論を用いたものに比べ約10倍にもなり、支配方程式の違いによる差は大きいことがわかる。

以上の計算結果の検討から次のような結論を得る。

①最大水位分布は格子間隔が粗い程低い結果になる。数値予報を行なう上で最大水位の過小評価は危険であり、十分に細かい格子間隔を採用する必要がある。

②しかし、格子間隔を細かくすると計算量が増加するため演算時間との兼ね合いのためおのずと限界が生じる。本研究ではその限界を

0.2 kmとし痕跡記録と比較を行ない良好な結果を得た。

③浅水理論と線形長波理論との差は最大水位に関しては小さいが流速分布では相当異なったものとなる。

④浅海域の差分格子間隔の違いによる演算時間の差はさほど大きいものとはならないが、支配方程式による差はかなり大きいものになる。

## 5. 最大水位に関する陸上週上及び人工構造物の効果

前節において、浅水部での格子間隔0.2 kmの計算について検討したが、その計算には陸上週上や防波堤、防潮堤といった人工構造物の効果を含んではいなかった。ここではこれらの効果を考慮したより詳細な津波数値シミュレーションモデルを用いた計算結果と比較検討する。

対象としたのは三陸海岸のはば中央に位置する宮古湾である。格子間隔0.1, 0.05 kmを用いかつて陸上週上、人工構造物の効果を含む高精度の計算を行ない、先に提案したモデルと比較している。この高精度計算は記憶容量の関係で津波発生および外洋での伝播を主に取り扱う外海計算と宮古湾内の津波の挙動を詳細に取り扱う近海計算に分割して行なっている。外海計算では線形長波理論を用いて津波発生から90分再現している。この時、近海計算のための境界値を水深約100 m地点で出力している。近海計算ではこの境界値を境界条件として浅水理論を用いて行なった。防波堤、防潮堤などの人工構造物は昭和55年当時のものを用いている。宮古湾内の防波堤、防潮堤の天端の高さは各地で異なり、閉伊川防波堤、藤原および出崎の両埠頭がT.P. 5.26 m, 神林木材港がT.P. 6.7 m, 白浜地区がT.P. 8 m, 高浜地区がT.P. 5.5 m, 金浜、赤前、津軽石地区がT.P. 6 mである。なお、想定した津波は明治三陸大津波であり襲来時の天文

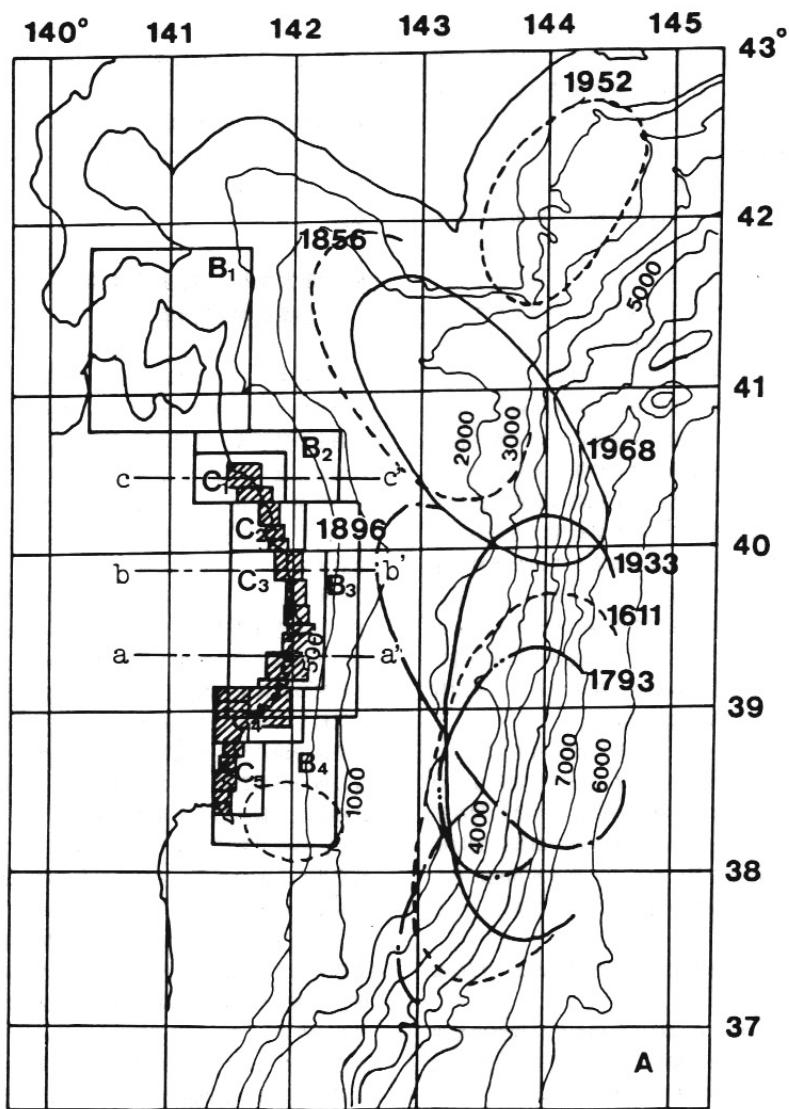


図-1 三陸沖津波波源域および計算領域

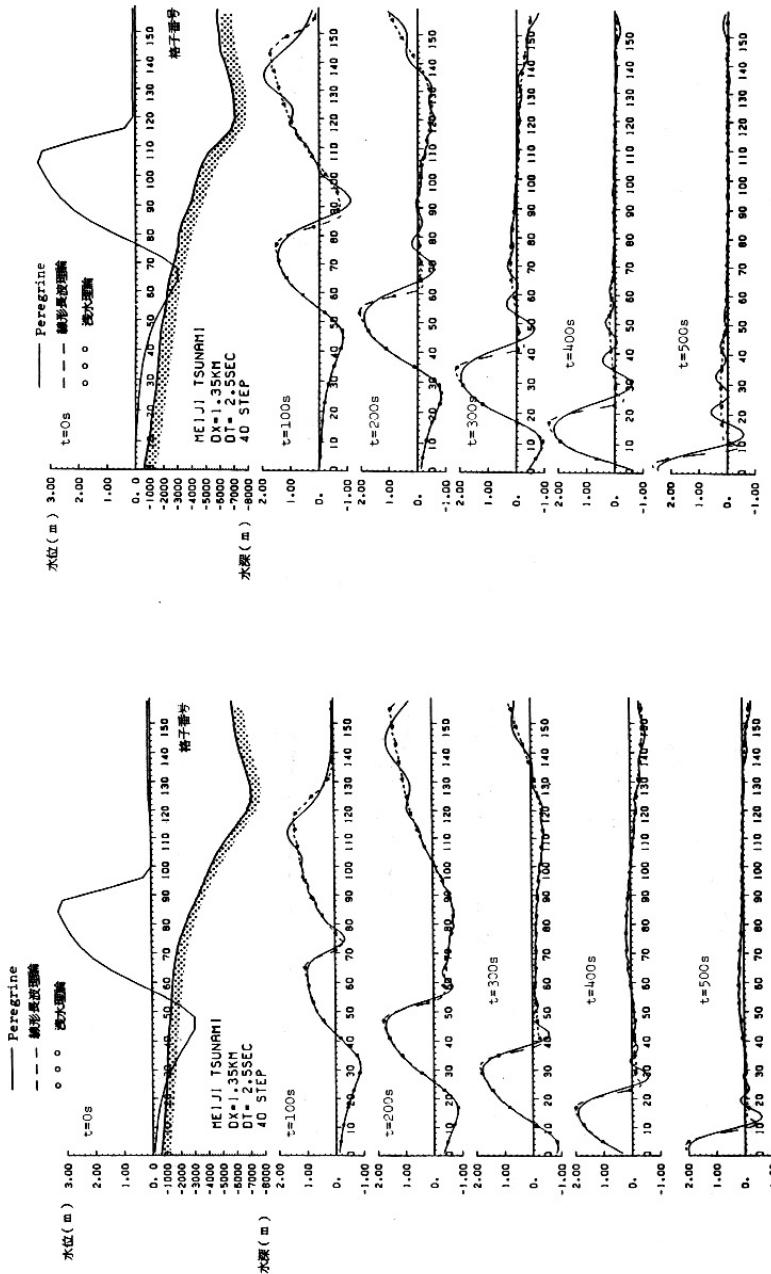
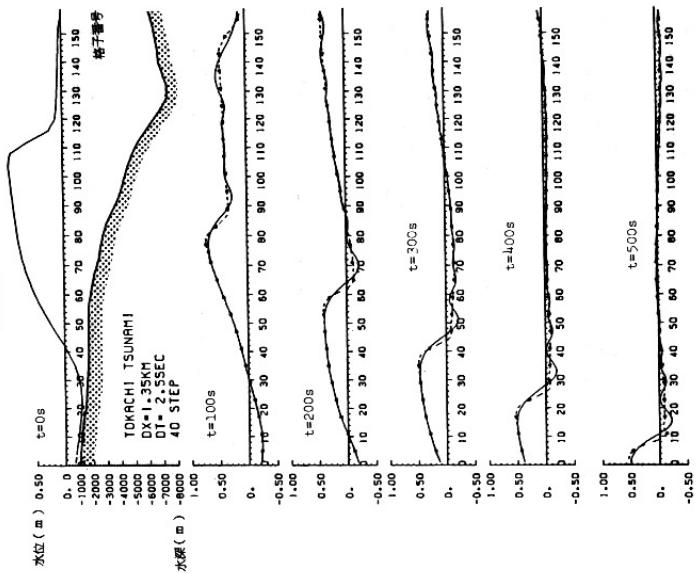


図-2 明治三陸大津波の1次元伝播計算結果  
(測線a、海岸部)

図-3 明治三陸大津波の1次元伝播計算結果  
(測線b、深海部)

— Peregrine  
 - - - 線形整流理論  
 ○ ○ ○ 深水理論



- 36 -

図-4 十勝沖地震津波の1次元伝播計算結果  
(測線C, 深海部)

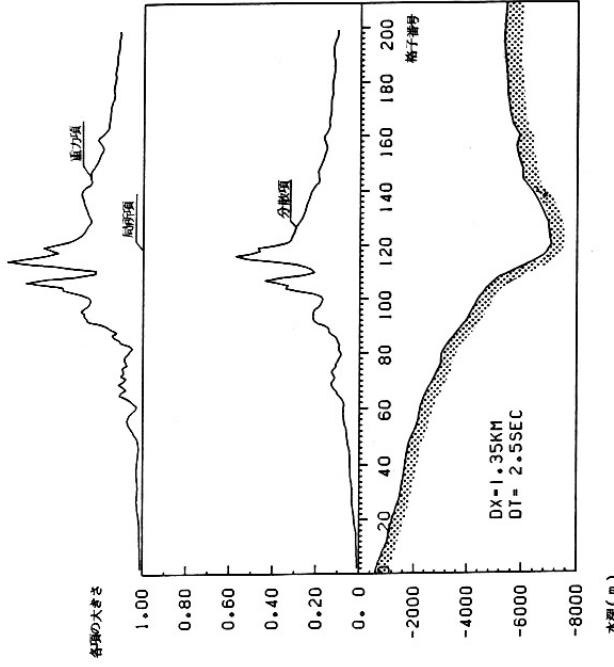


図-5 運動量方程式 (Peregrine の式) の  
各項の大きさの比較  
(測線 a, 明治三陸大津波)

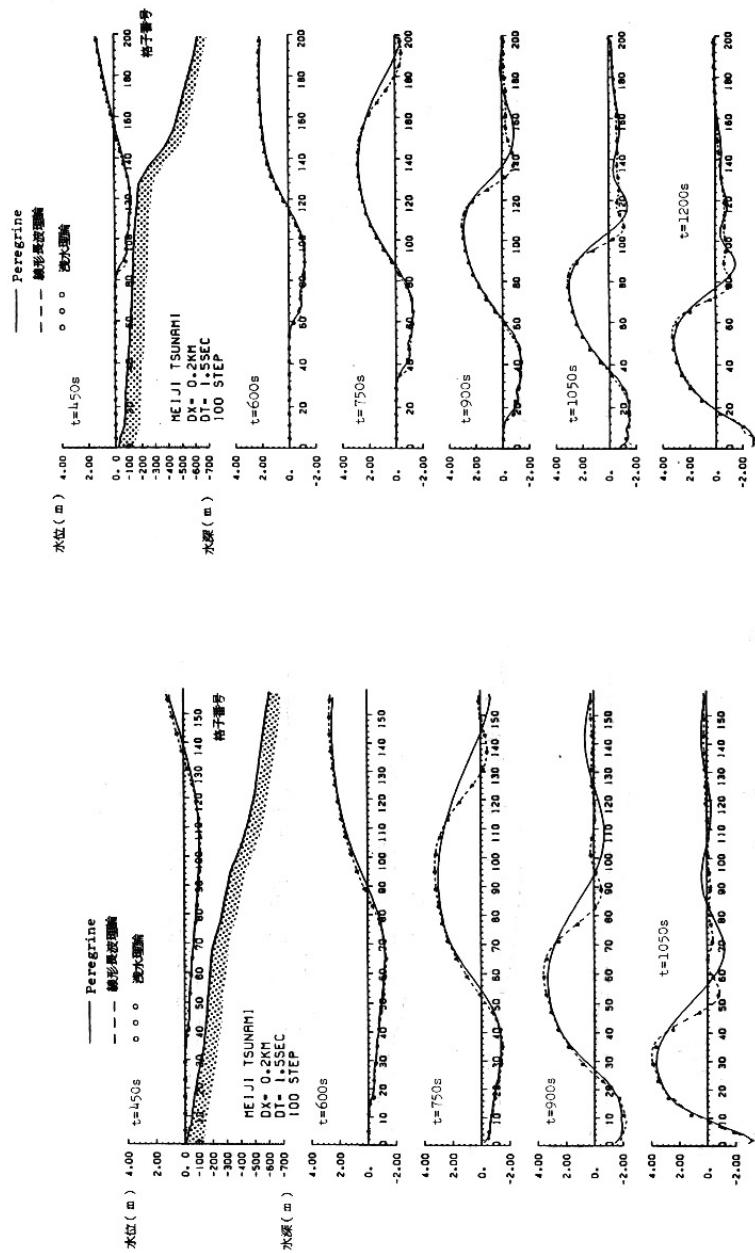
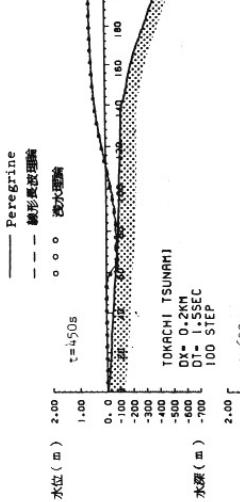


図-6 明治三陸大津波の1次元伝播計算結果  
(測線b, 浅海部)

図-7 明治三陸大津波の1次元伝播計算結果  
(測線b, 海部)



- 38 -

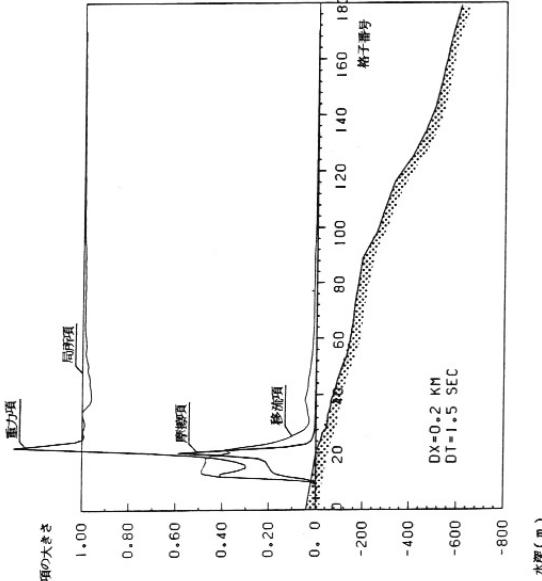


図-9 運動量方程式(浅水理論)の各項の  
大きさの比較  
(測線 a, 明治三陸大洋波)

図-8 十勝沖地震津波の1次元伝播計算結果  
(測線 c, 浅海部)

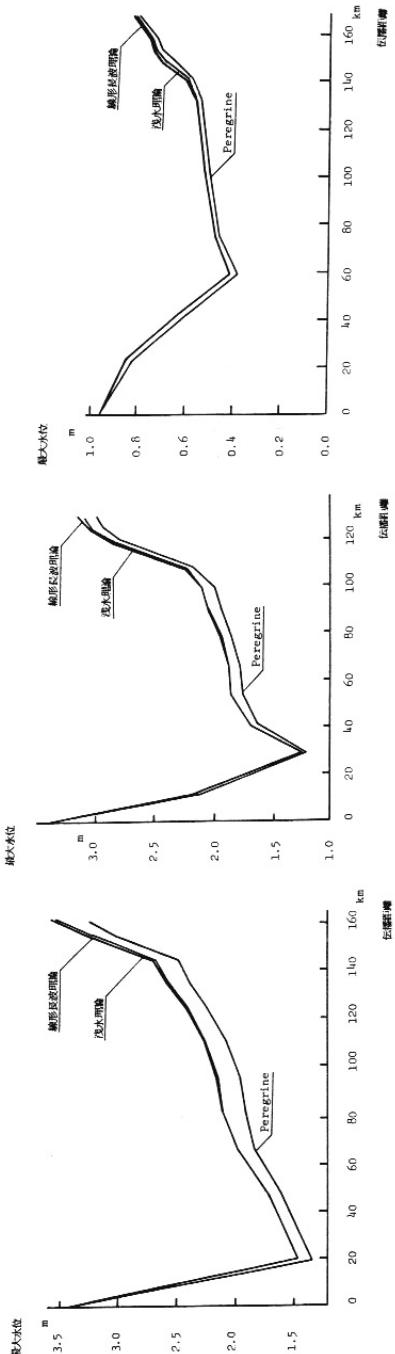


図-10a 支配方程式による最大水位の変化  
(測線 a, 明治三陸大津波)

図-10b 支配方程式による最大水位の変化  
(測線 b, 明治三陸大津波)

図-10c 支配方程式による最大水位の変化  
(測線 c, 十勝沖地震津波)

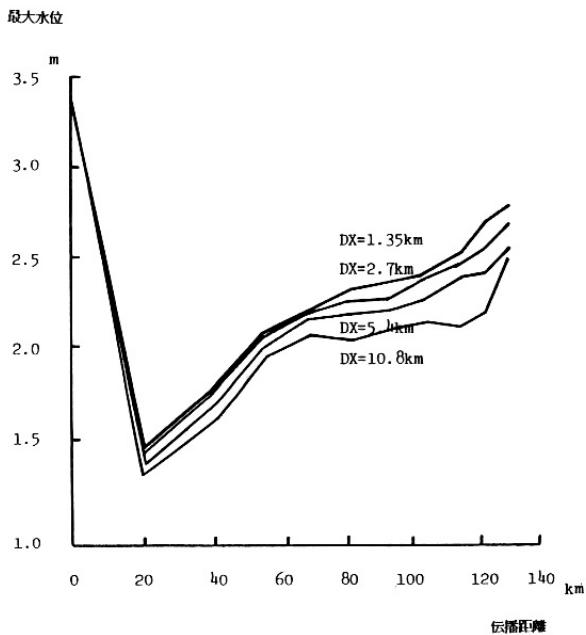


図-11 計算格子間隔による最大水位の変化

(測線a, 明治三陸大津波, 深海域)

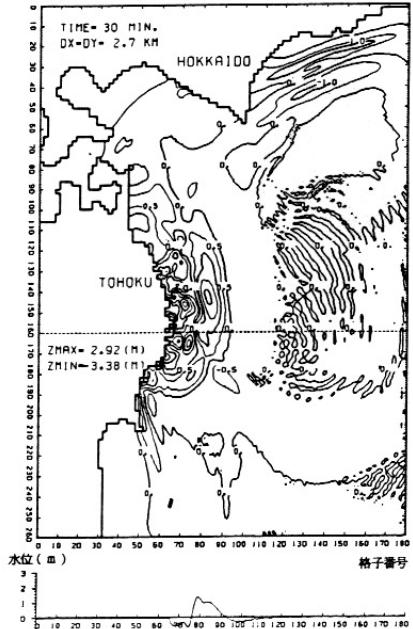
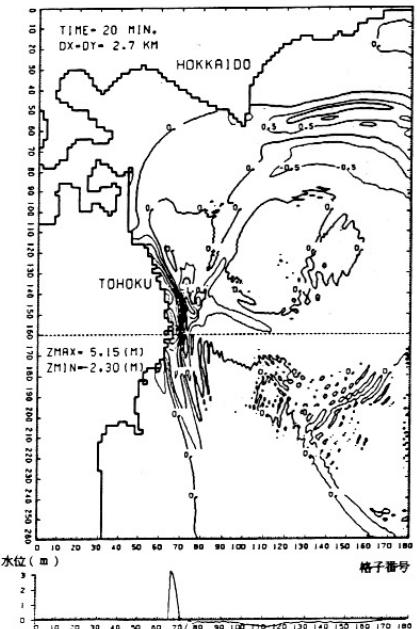
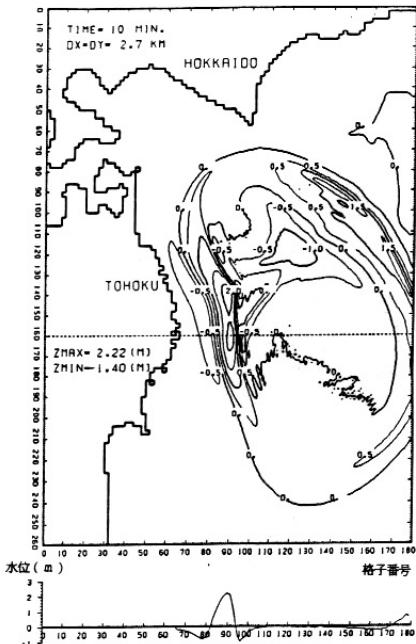
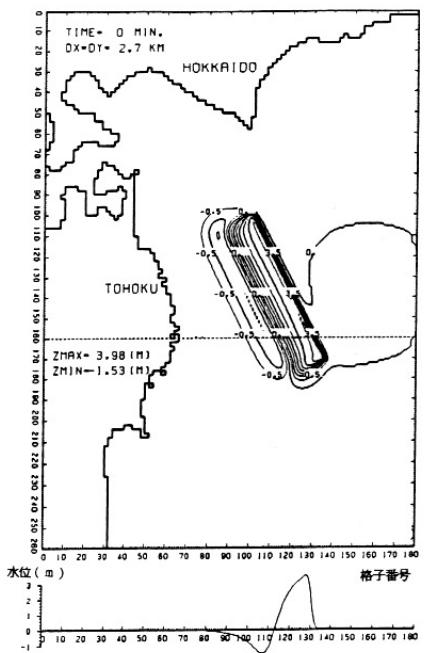


図-12 深海部における2次元伝播計算結果 (DX = 2.7 km)

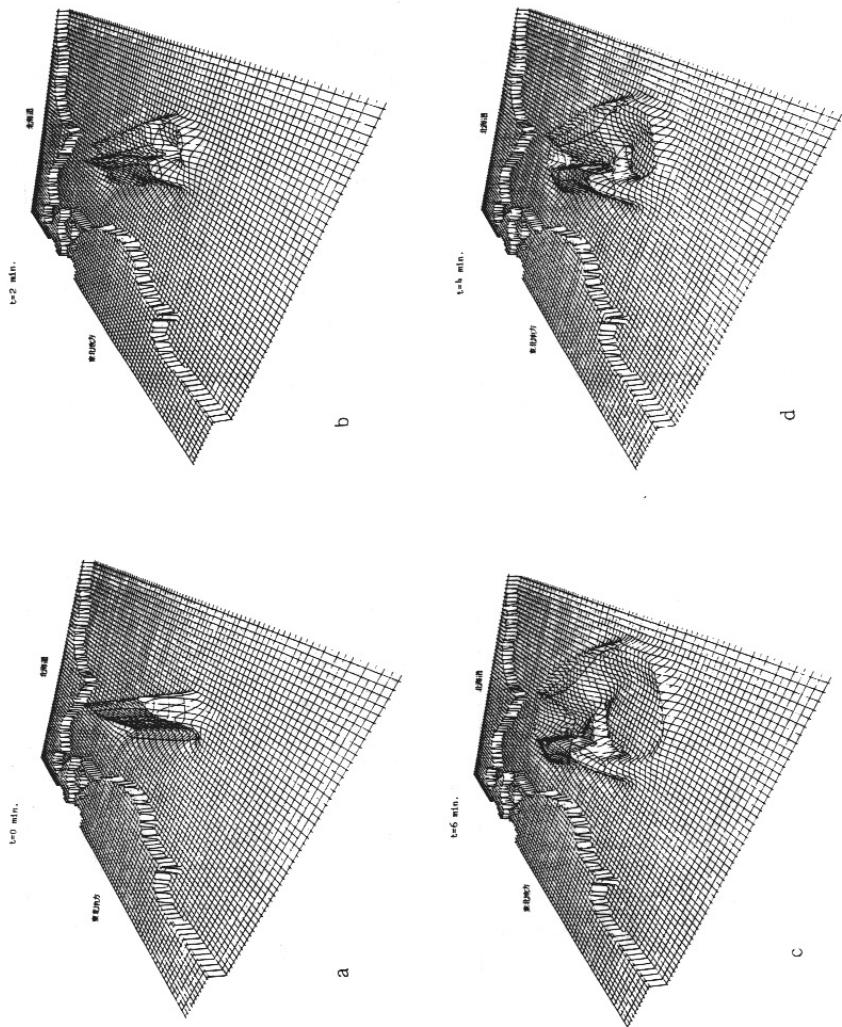


図-13 a ~ d 深海部における2次元伝播計算結果 ( $DX = 2.7 \text{ km}$ , 立体透視図)

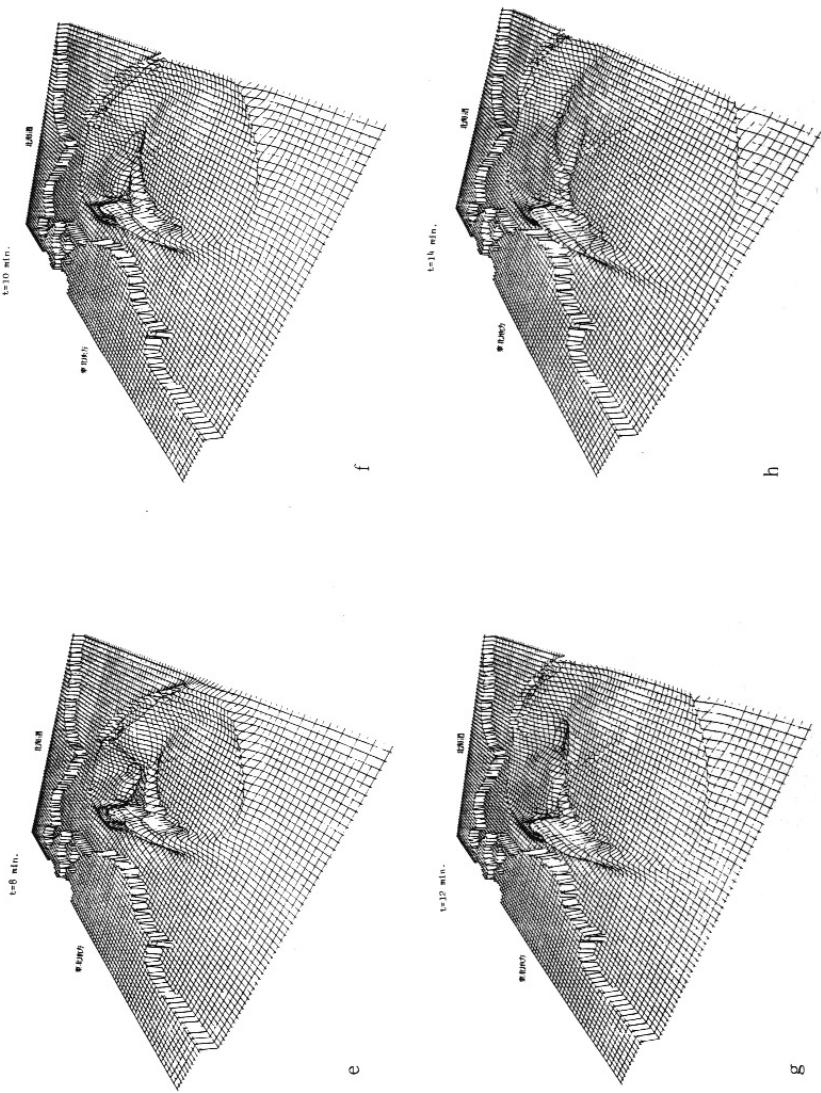


図-13e~h 深海部における2次元伝播計算結果 ( $DX = 2.7 \text{ km}$ , 立体透視図)

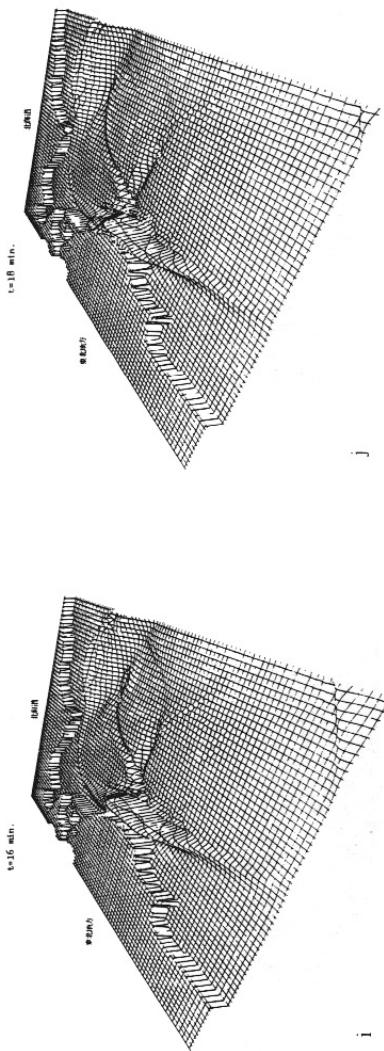


図-13 i ~ j 深海部における2次元伝播計算結果 ( $DX = 2.7 \text{ km}$ , 立体透視図)

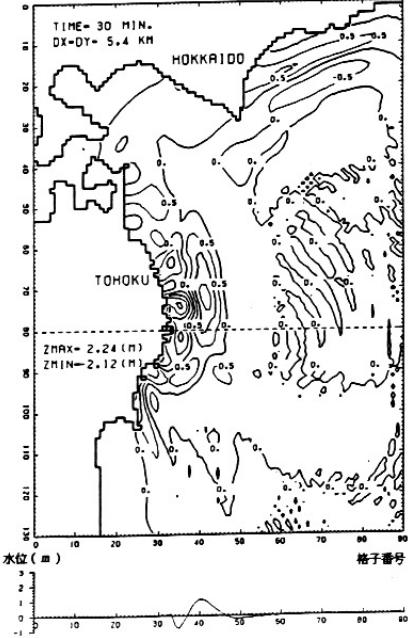
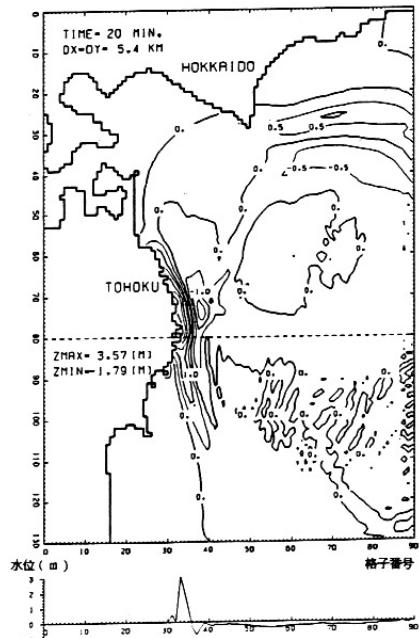
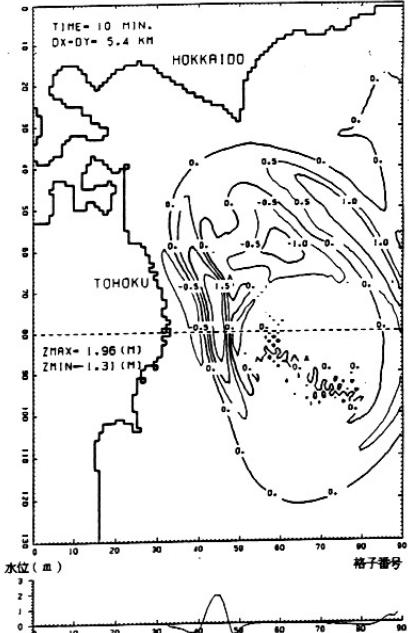
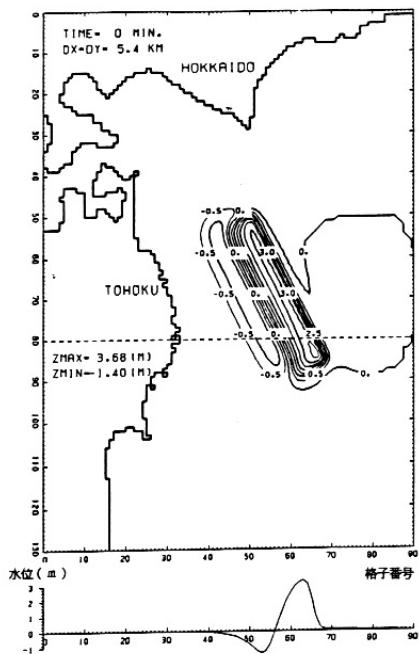


図-14 深海部における2次元伝播計算結果 (DX = 5.4 km)

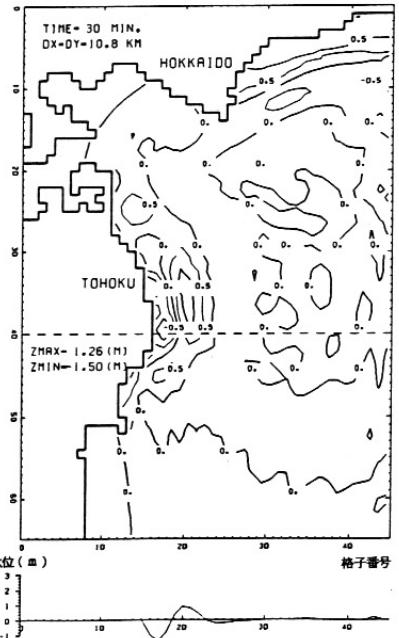
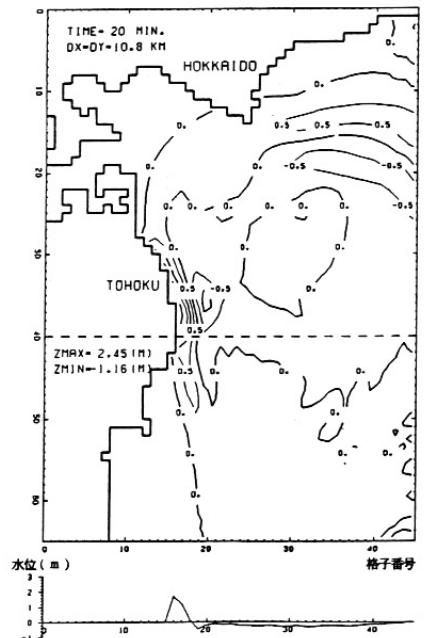
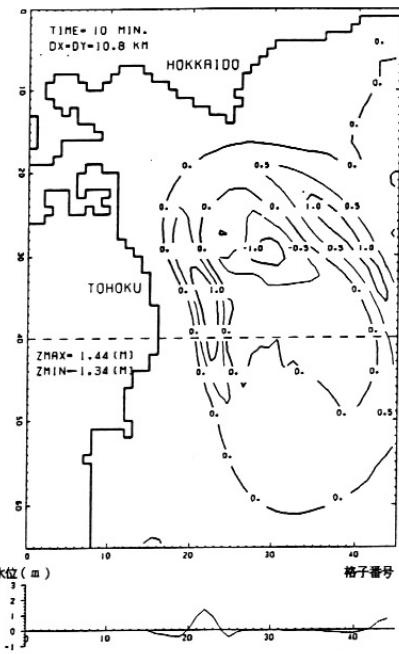
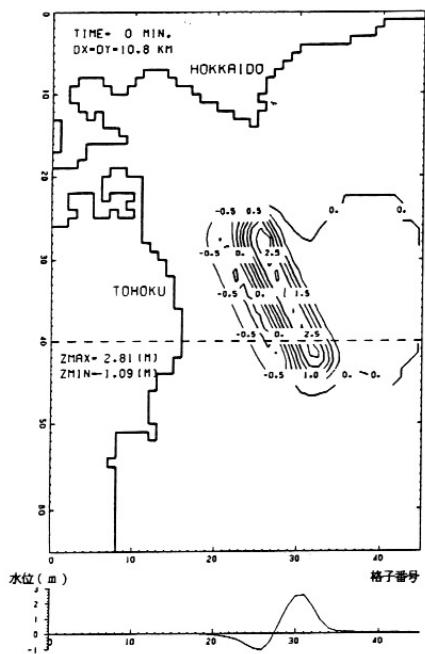


図-15 深海部における2次元伝播計算結果 (DX = 10.8 km)

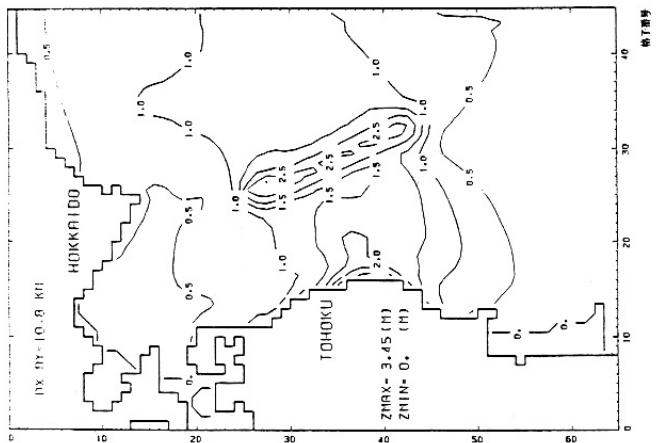


图-16c 最大水位分布 (DX = 1.08 km)

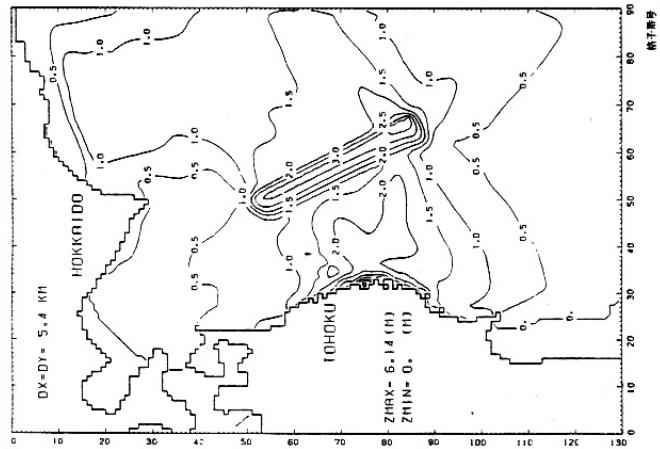


图-16b 最大水位分布 (DX = 5.4 km)

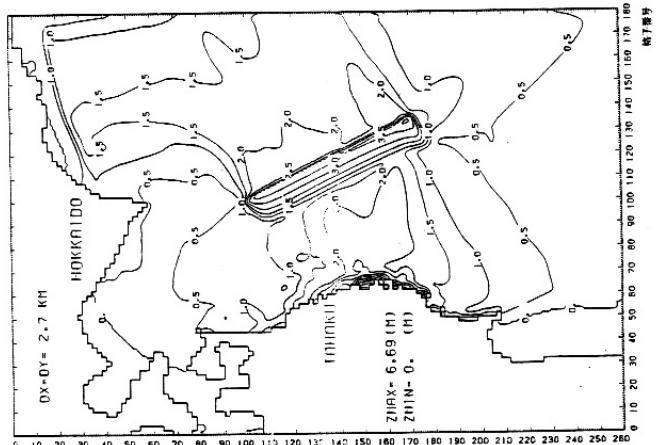


图-16a 最大水位分布 (DX = 2.7 km)

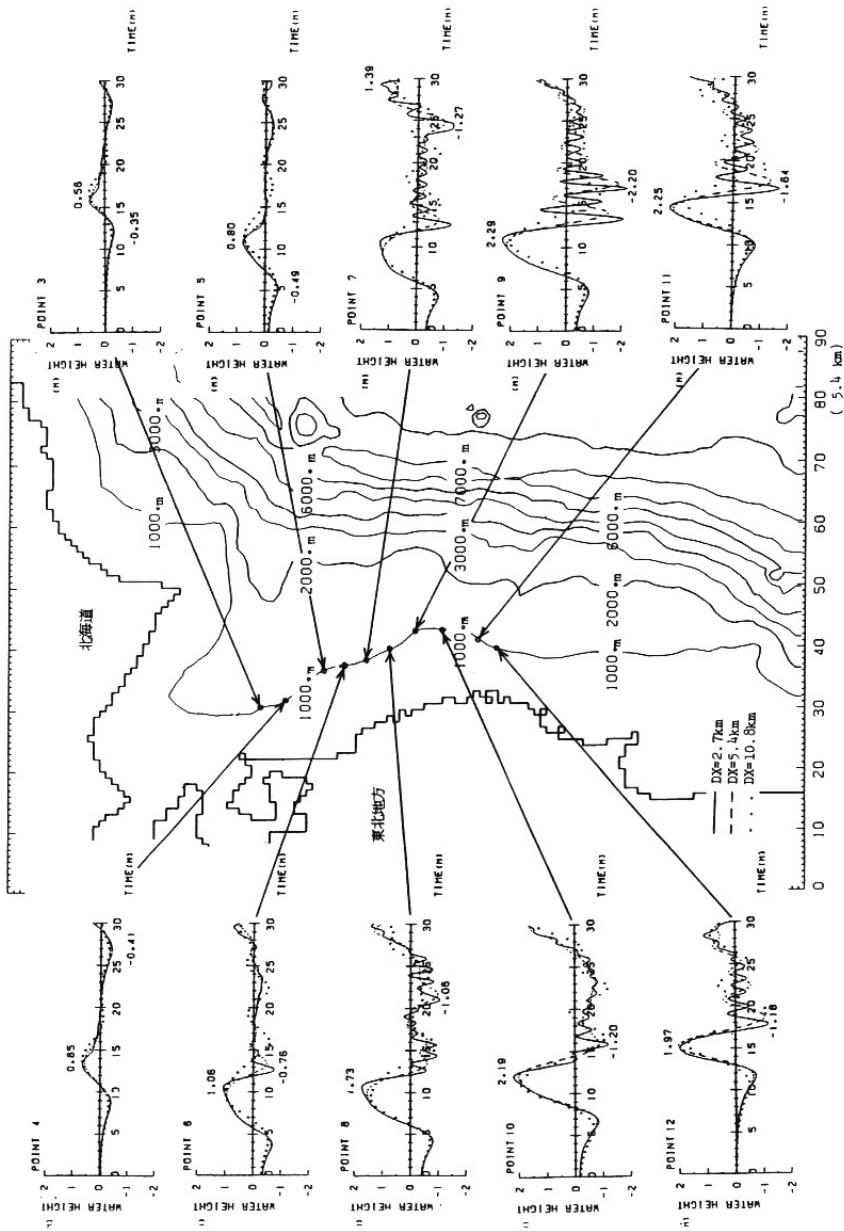


図-17 深海部での水位経時変化

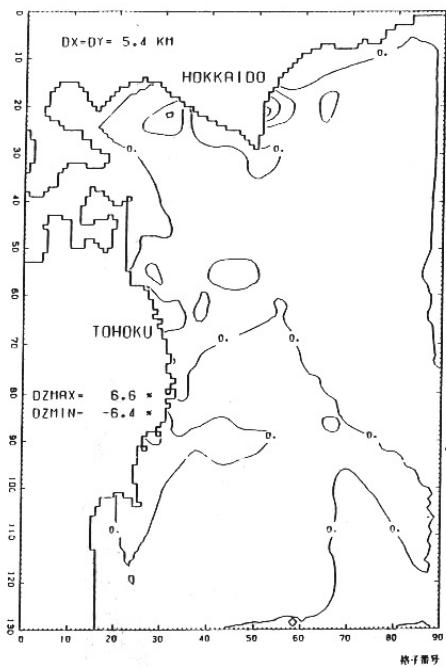


図-18 最大水位分布の差（コリオリ力の効果）

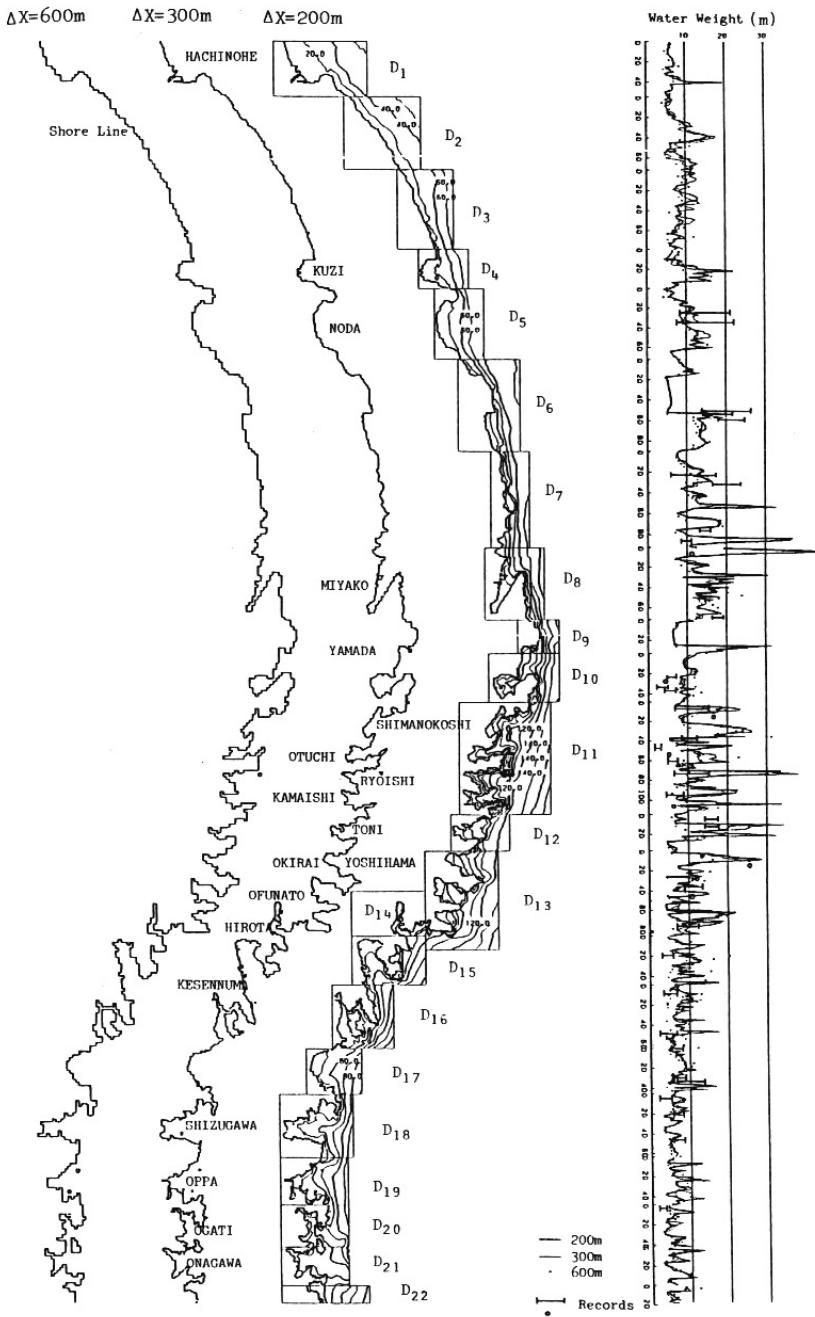


図-19 浅海部における海岸線形状および最大水位分布

図-20 a 浅海部（領域D<sub>11</sub>）における計算結果

線形長波理論

透水理論

a

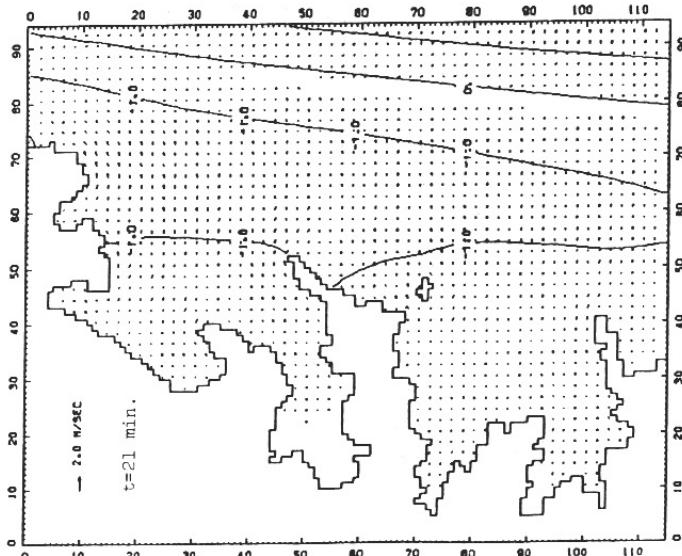
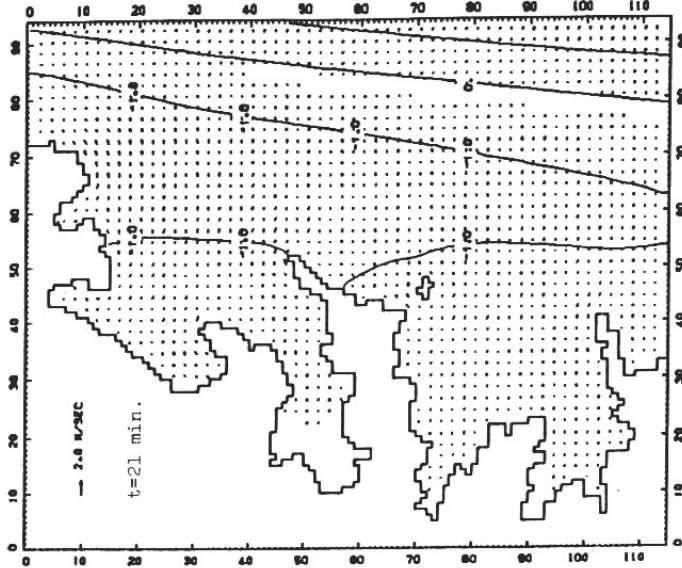
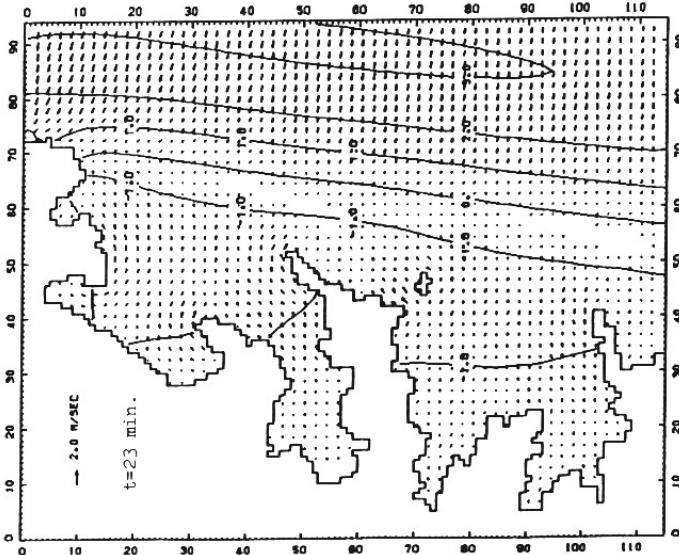
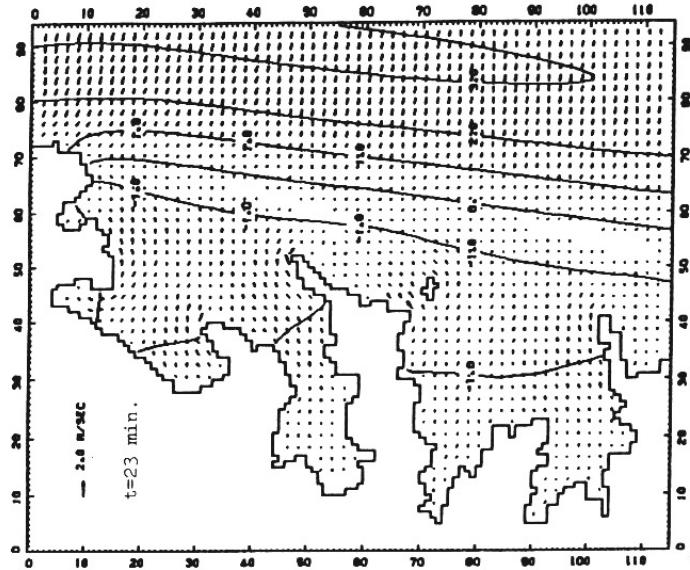


図-20 b 淡海部（領域  $D_{11}$ ）における計算結果

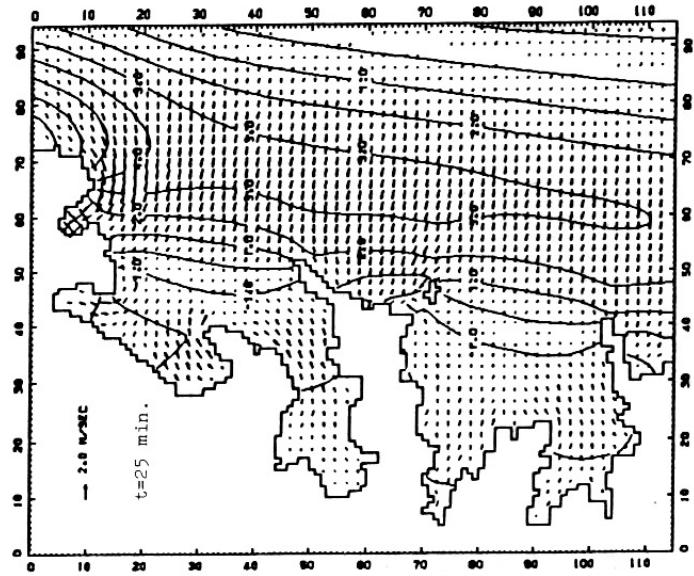
楕形長波理論

浅水理論

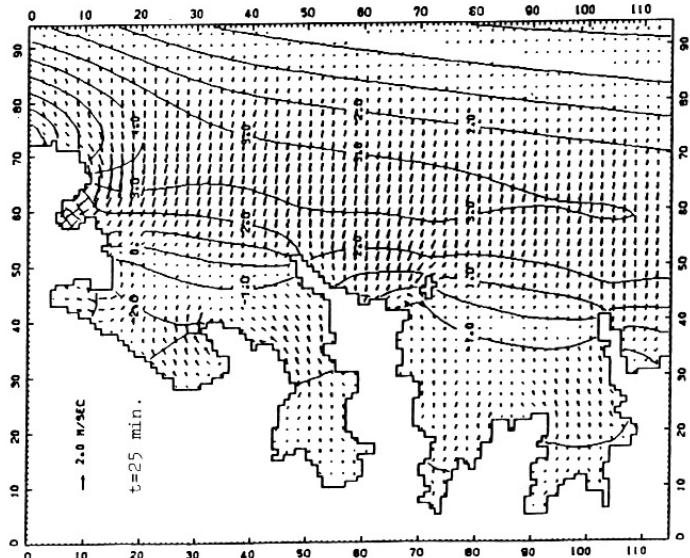
b



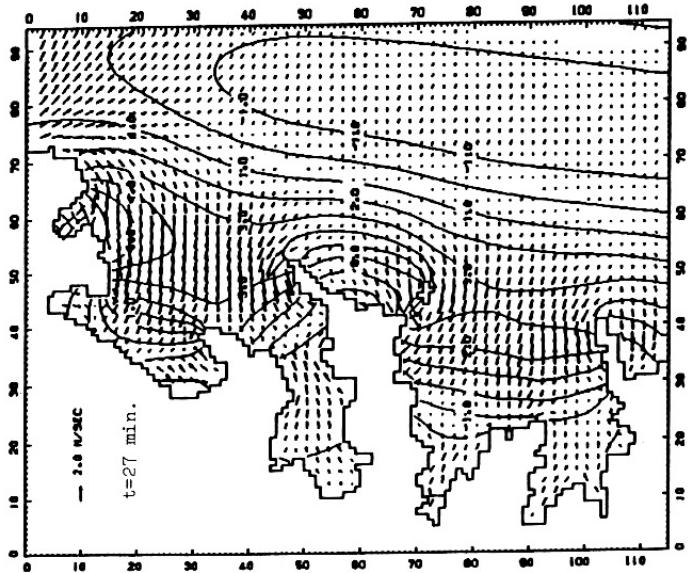
線形長波理論

図-20c 濃海部（領域D<sub>11</sub>）における計算結果

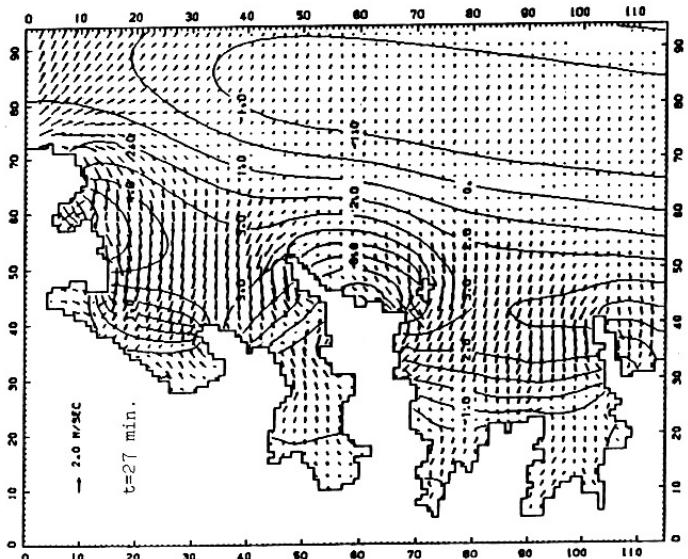
弱水理論



C



線形長波理論



浅水理論

図-20 d 浅海部（領域D<sub>11</sub>）における計算結果

図 - 20 e 滄海部（領域  $D_{11}$ ）における計算結果

線形長波理論

高水理論

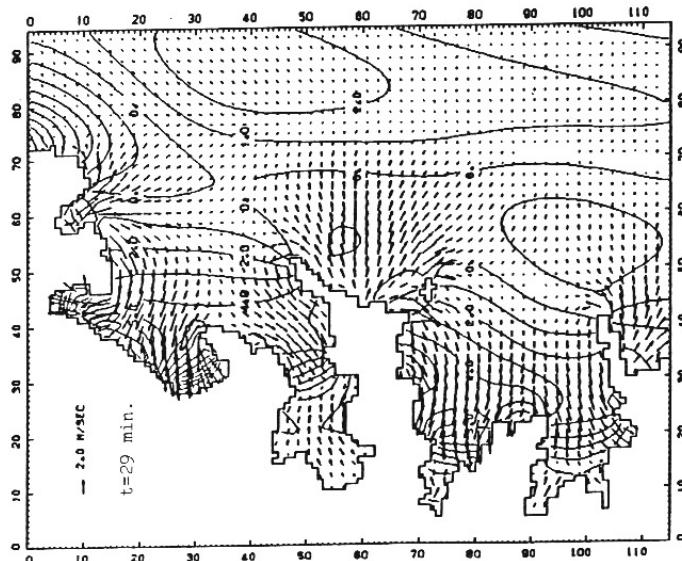
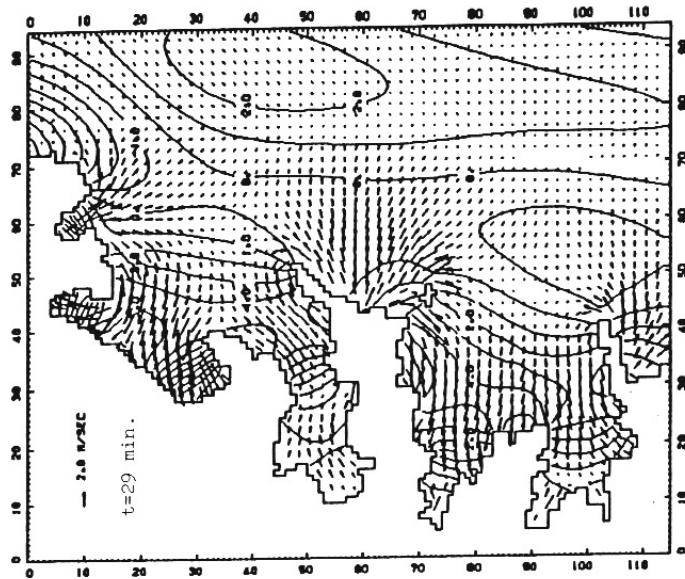


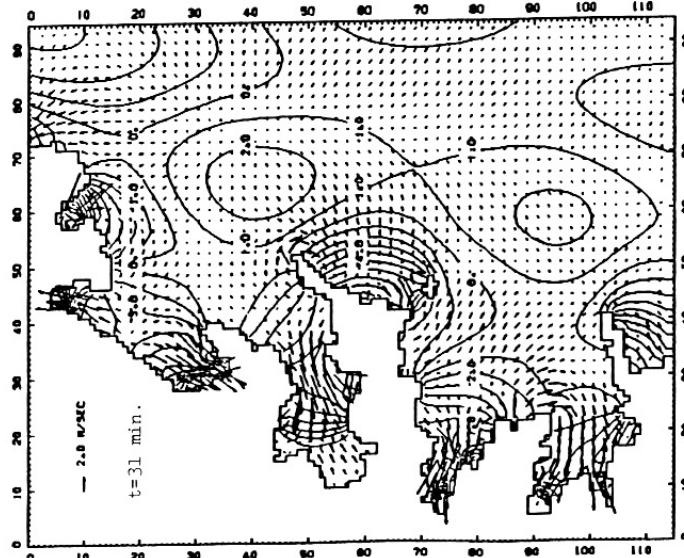
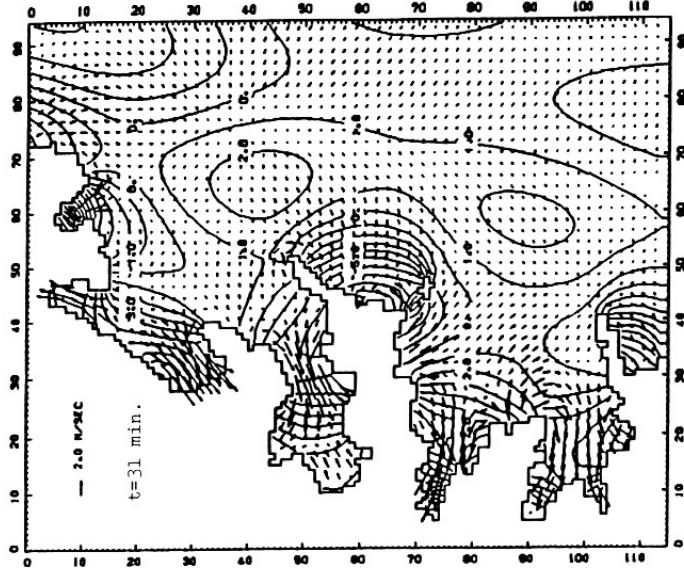
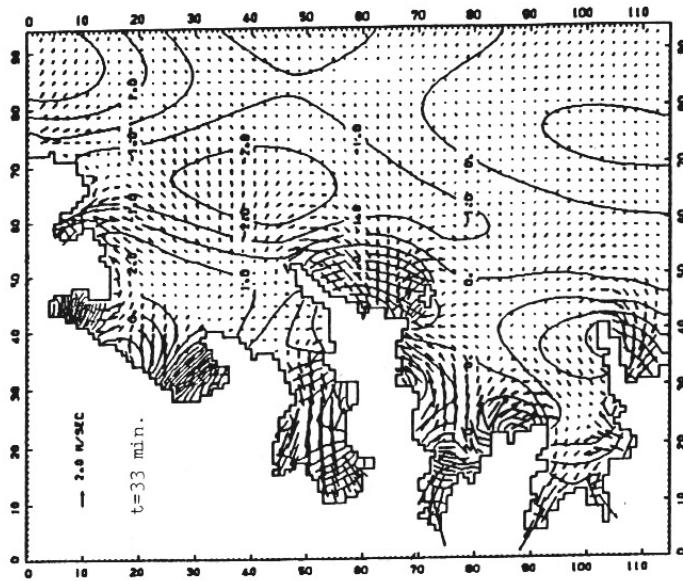
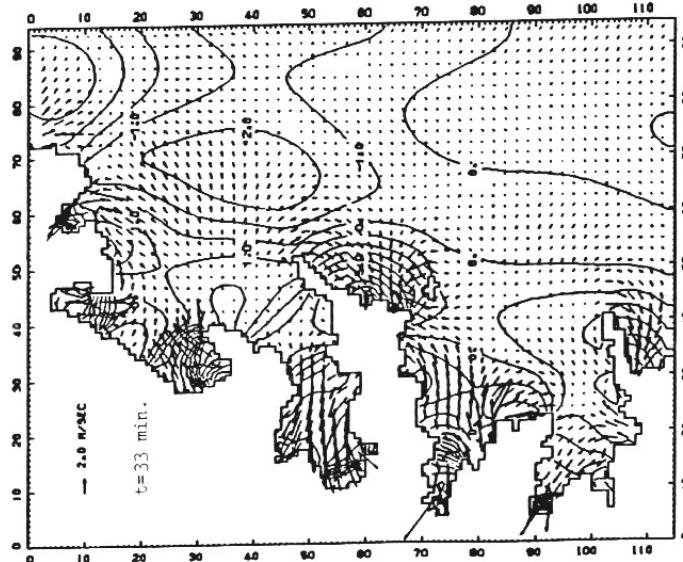
図-20 f 浅海部（領域D<sub>11</sub>）における計算結果

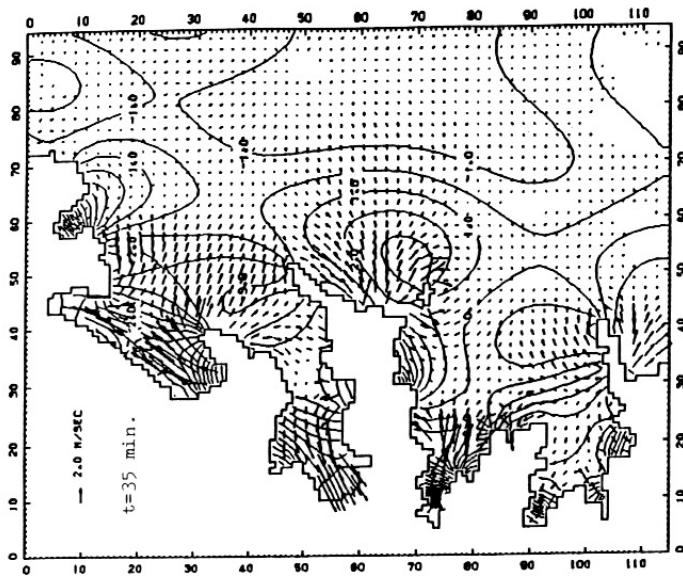
図-20 g 浅海部（領域D<sub>11</sub>）における計算結果

線形長波理論



港水理論





線形長波理論

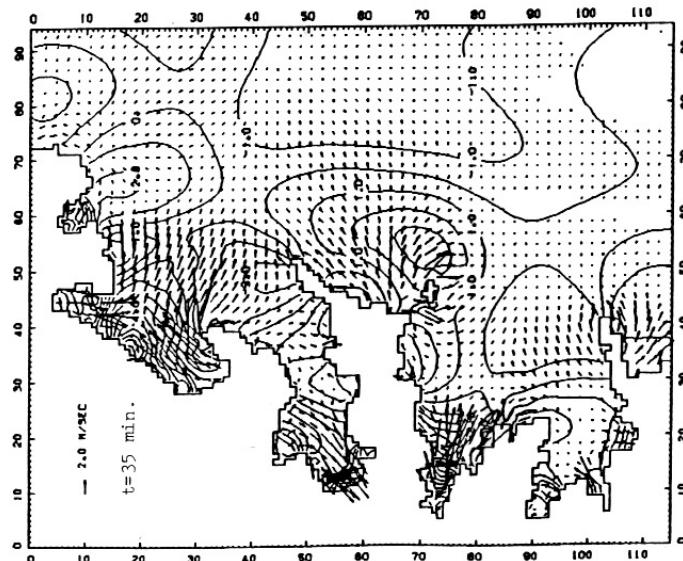
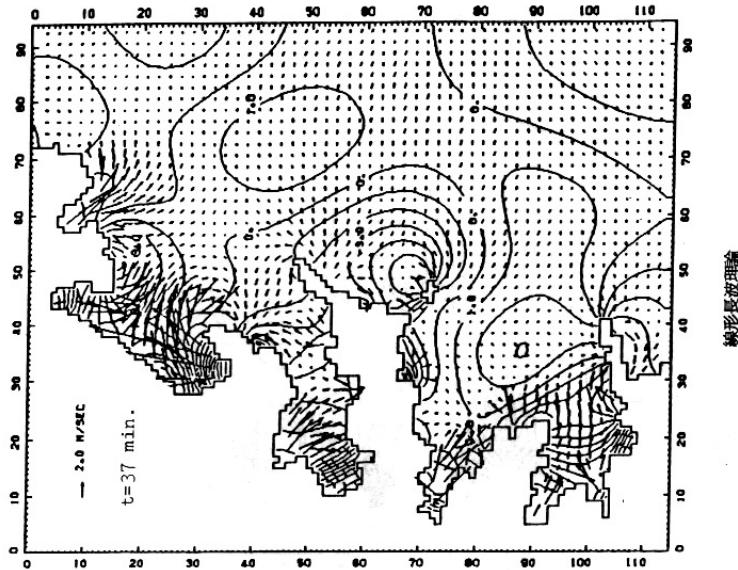
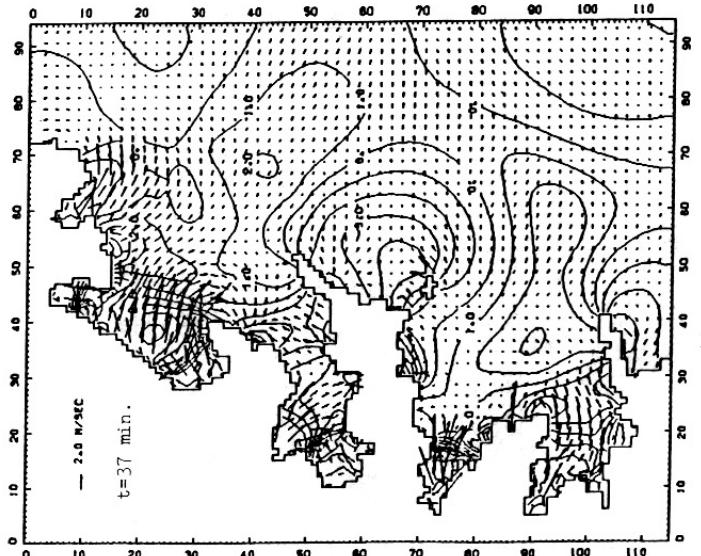


図-20 h 浅海部(領域D<sub>11</sub>)における計算結果



線形長波理論



港水理論

図-20 i 淡海部（領域D<sub>11</sub>）における計算結果

線形長波理論

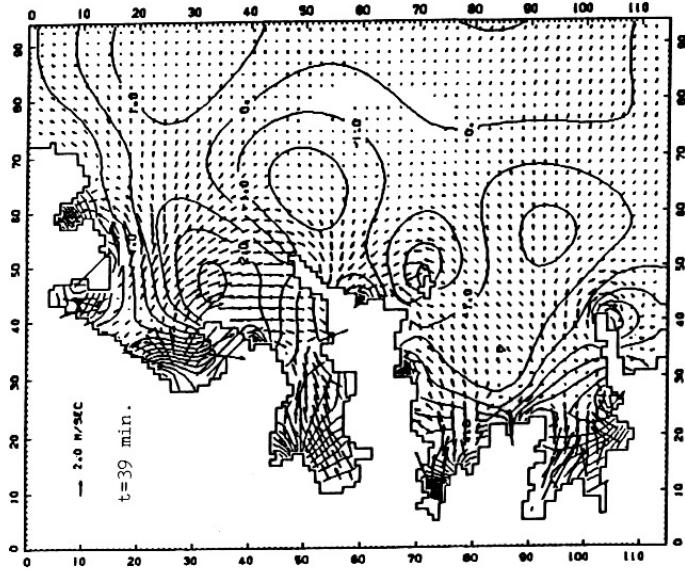
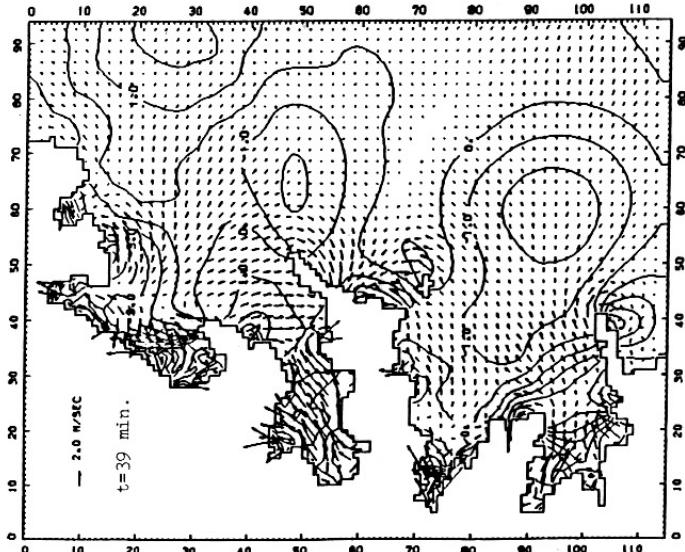
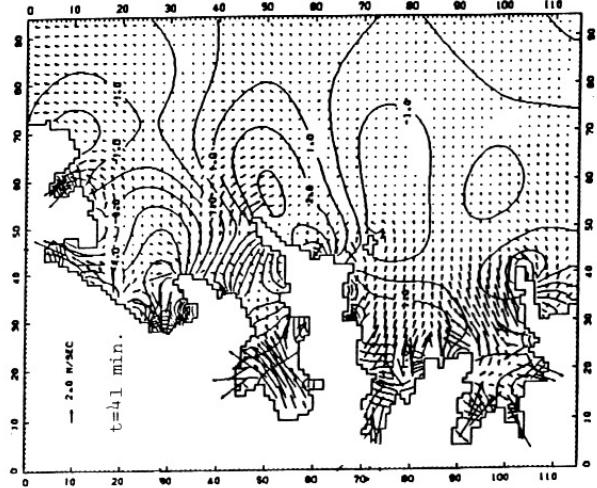


図-20 j 浅海部（領域D<sub>11</sub>）における計算結果

浅水理論

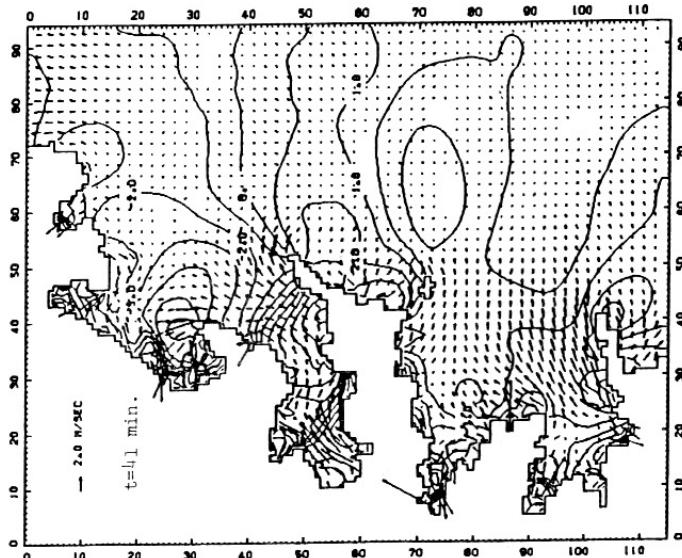


j



線形長波理論

図-20 k 浅海部（領域  $D_{11}$ ）における計算結果



浅水理論

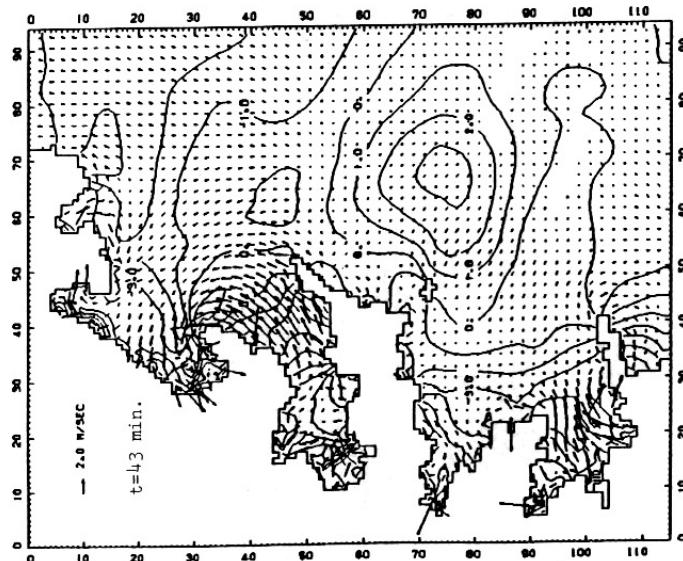
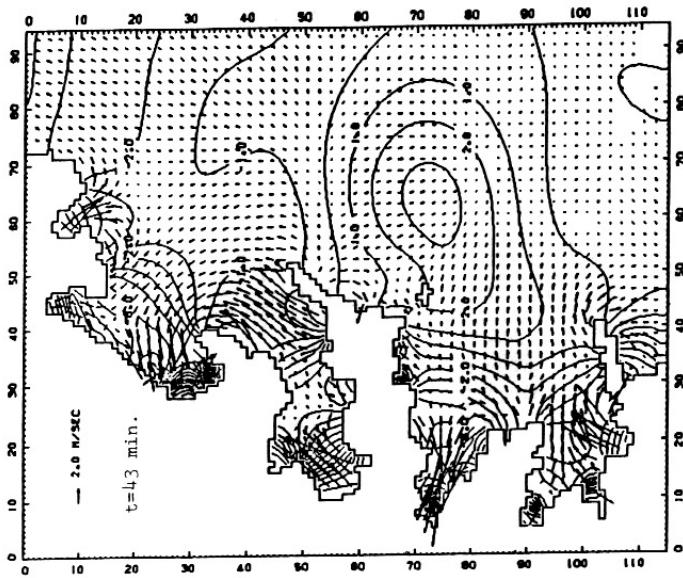
図-201 浅海部（領域  $D_{11}$ ）における計算結果

図-21 a ~ d 浅海部（領域  $D_{11}$ ）における計算結果（立体透視図）

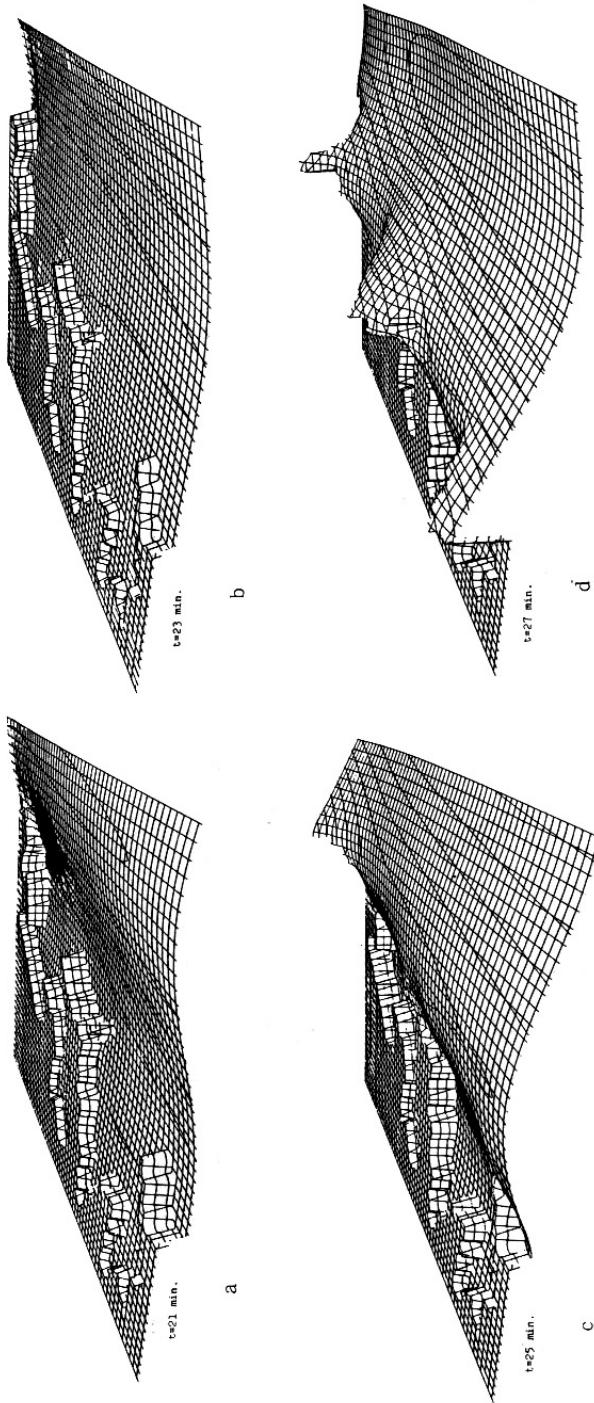
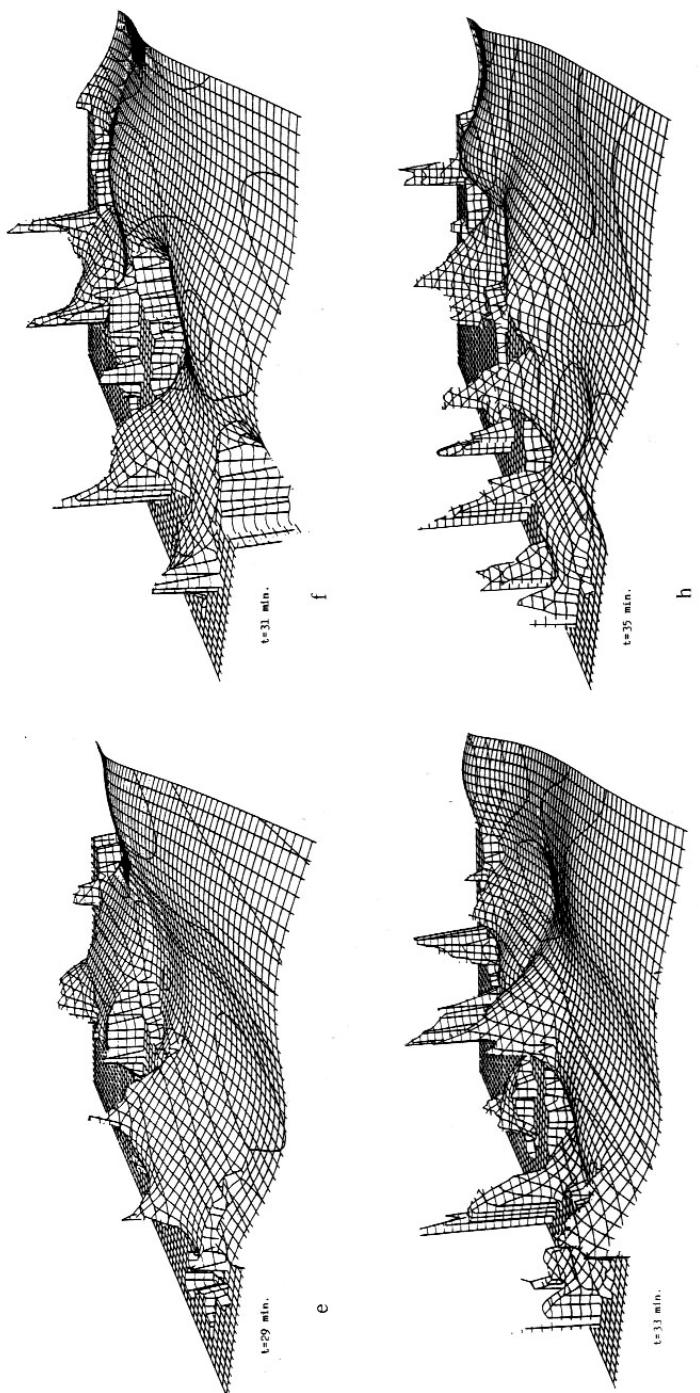


図-21 e ~ h 浅海部（領域D<sub>11</sub>）における計算結果（立体透視図）



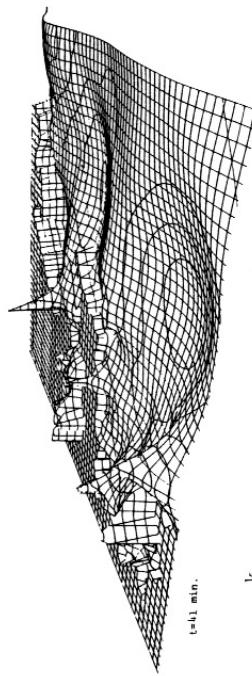
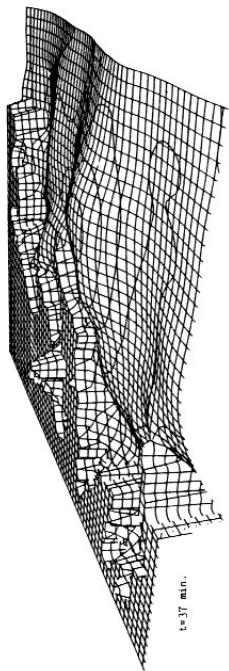
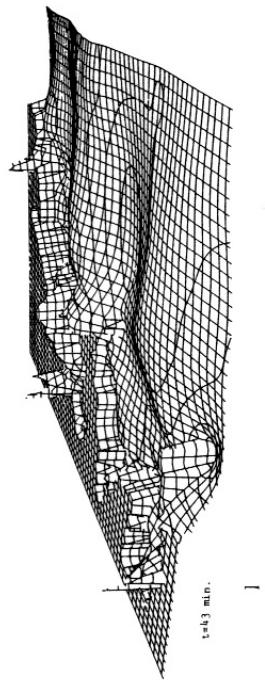
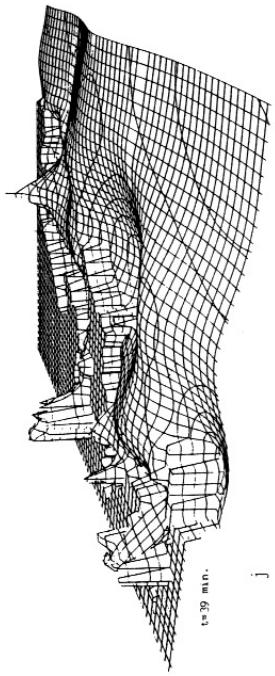


図-21i~l 滄海部（領域 $D_{11}$ ）における計算結果（立体透視図）

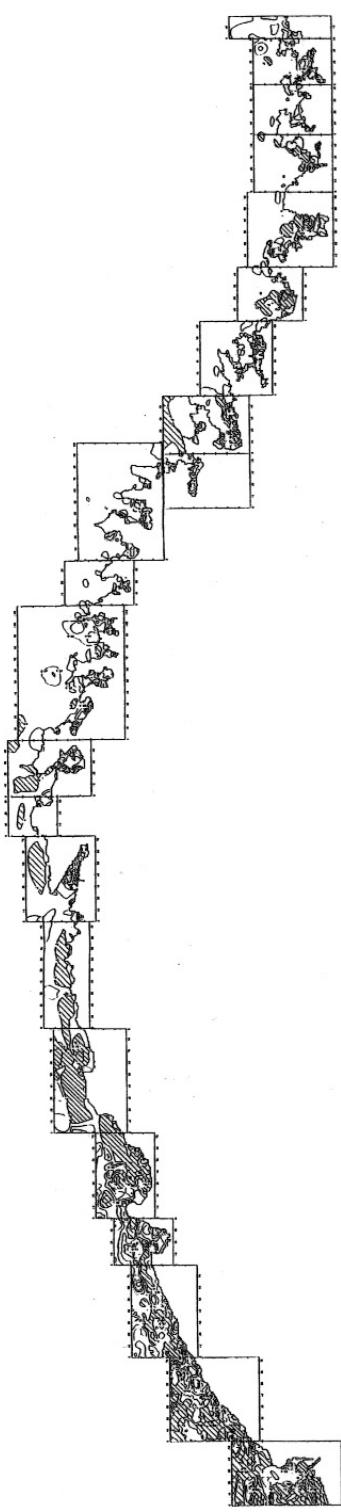


図-22 最大水位分布の差（線形長波理論と浅水理論）

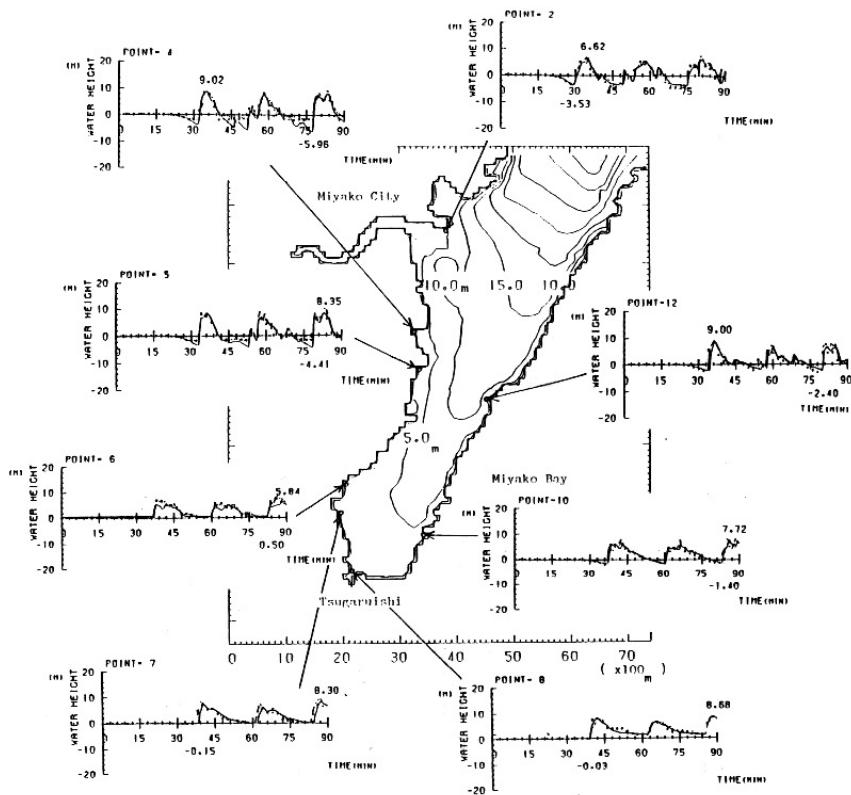


図-23 宮古湾での水深分布と水位経時変化

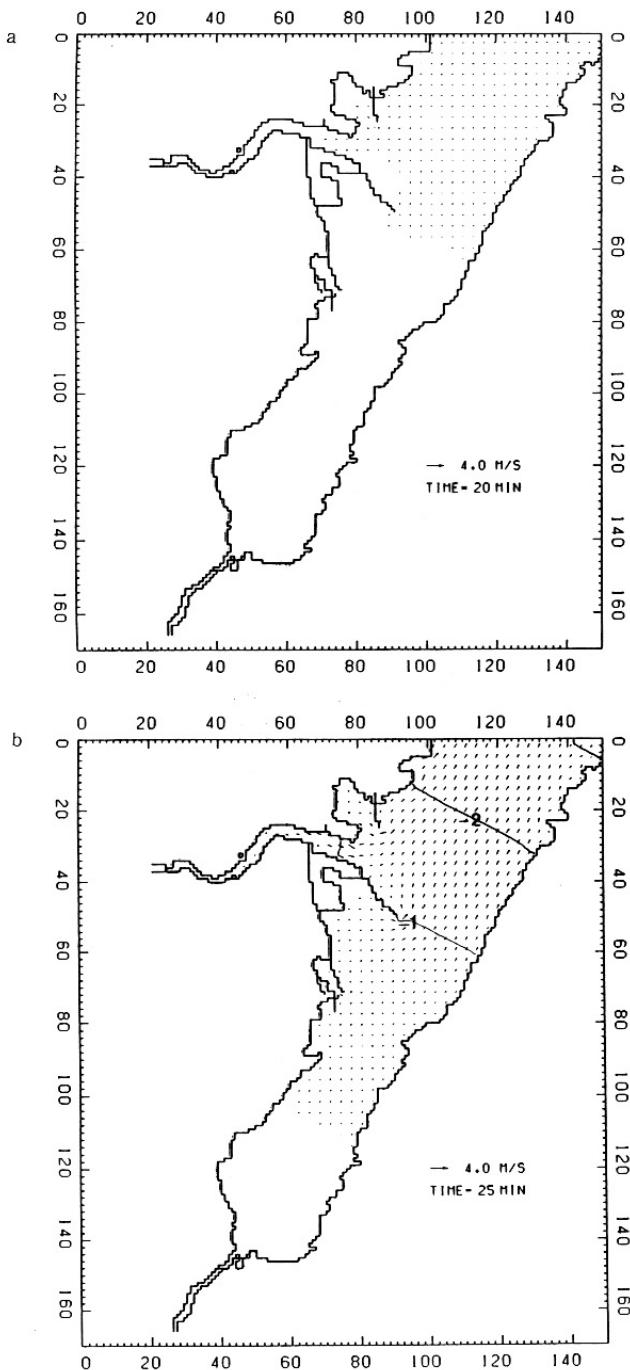


図-24a~b 宮古湾における明治三陸大津波の計算結果  
( $DX = 0.05 \text{ km}$  人工構造物あり, 陸上週上あり)

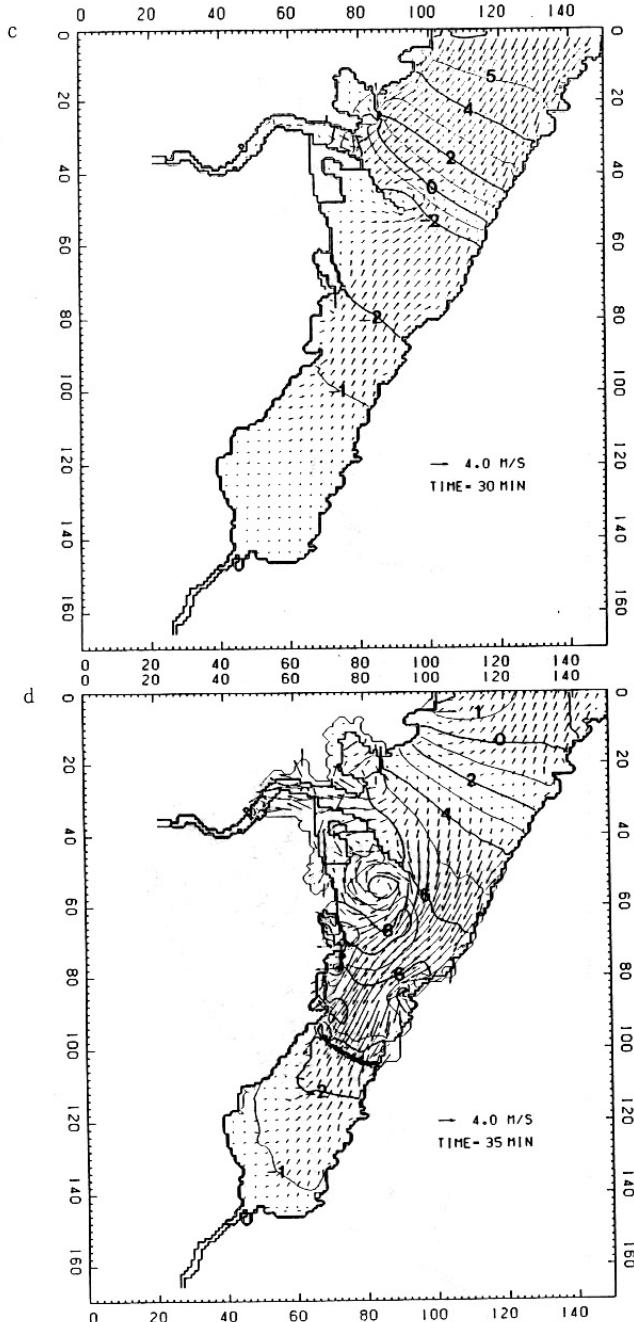


図-24c～d 宮古湾における明治三陸大津波の計算結果  
(DX = 0.05 km 人工構造物あり, 陸上遇上あり)

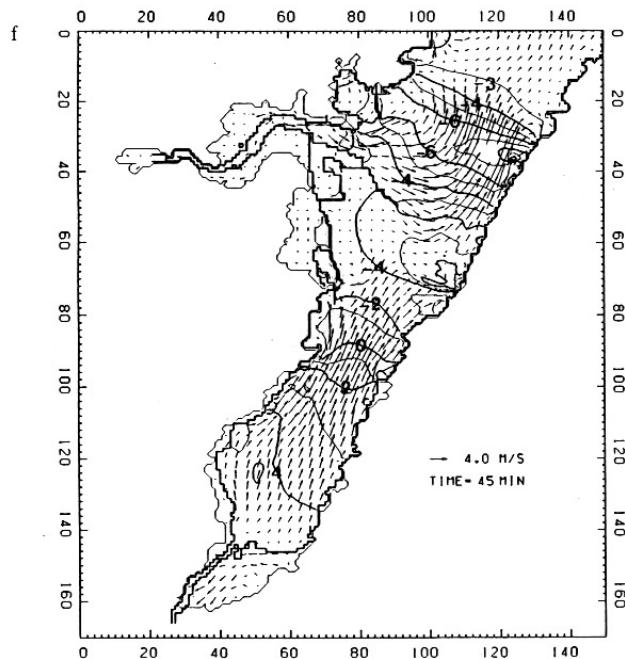
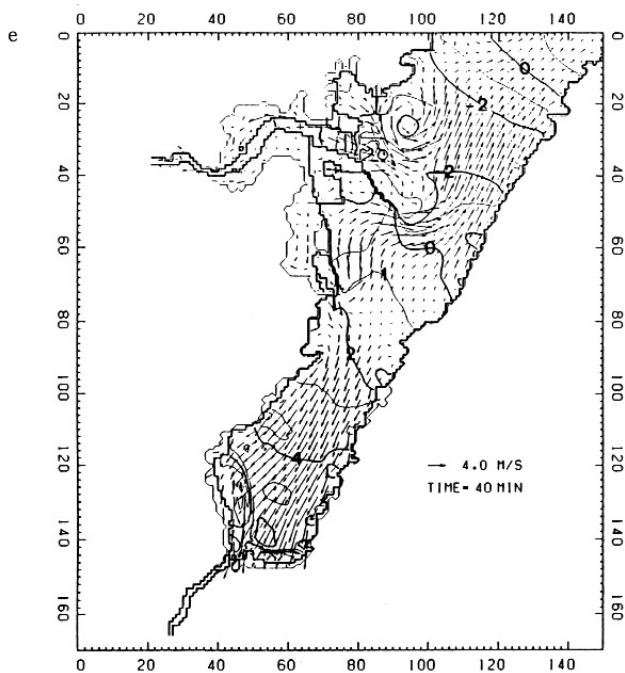


図-24 e ~ f 宮古湾における明治三陸大津波の計算結果  
(DX = 0.05 km 人工構造物あり, 陸上週上あり)

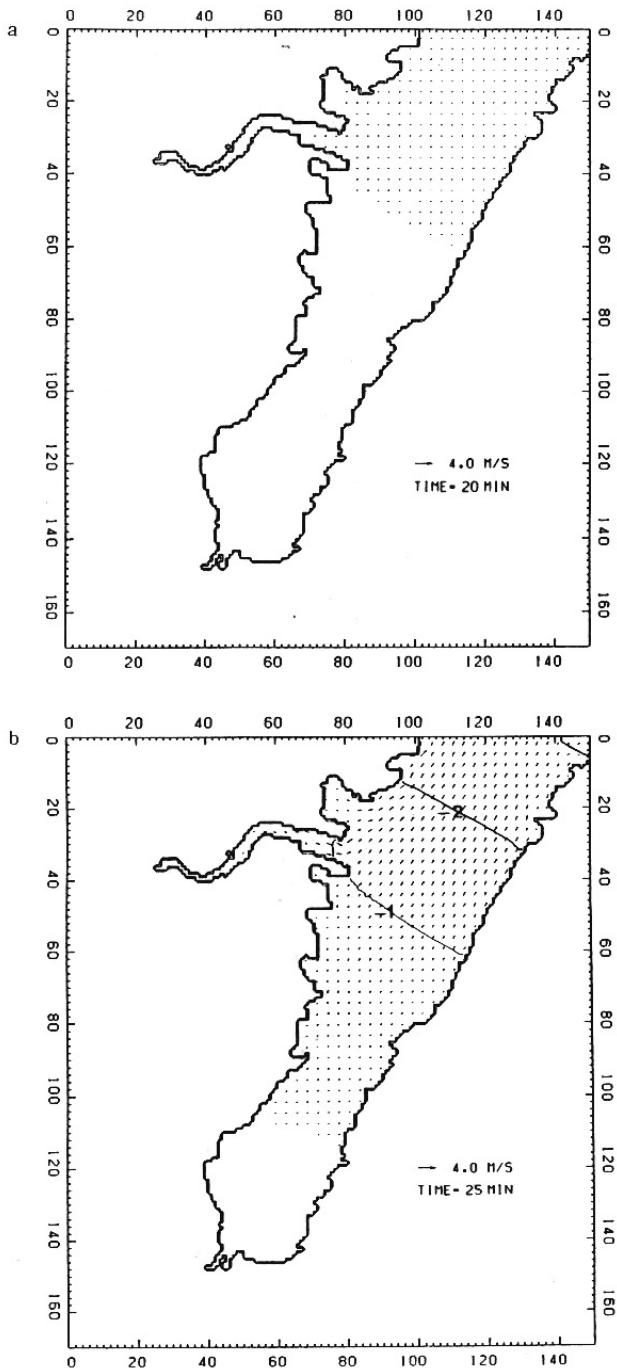


図-25 a~b 宮古湾における明治三陸大津波の計算結果  
 (DX = 0.05 km, 人工構造物なし, 陸上遇上あり)

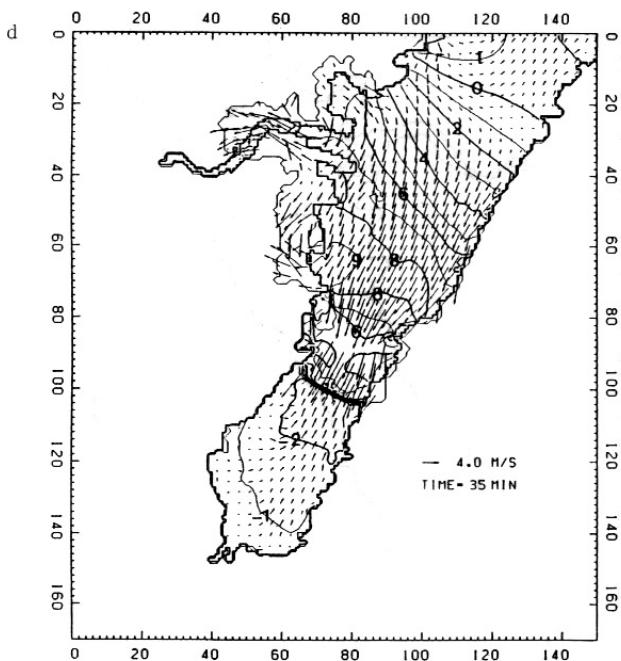
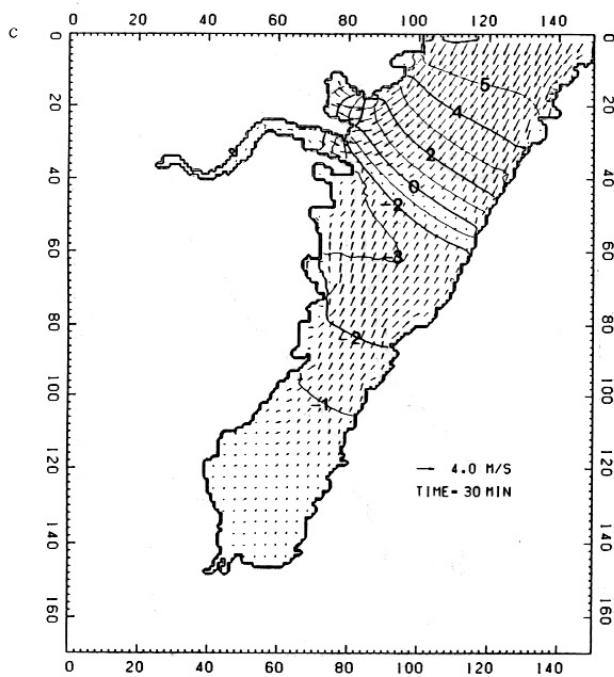


図-25c～d 宮古湾における明治三陸大津波の計算結果  
(DX = 0.05 km 人工構造物なし, 陸上週上あり)

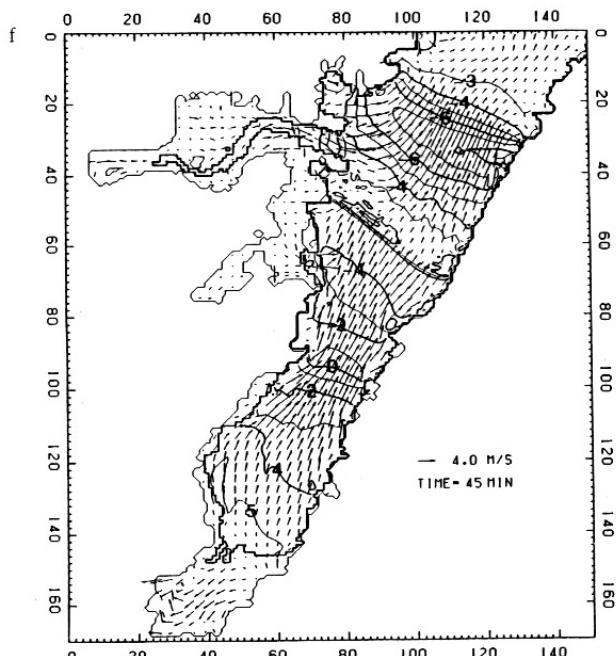
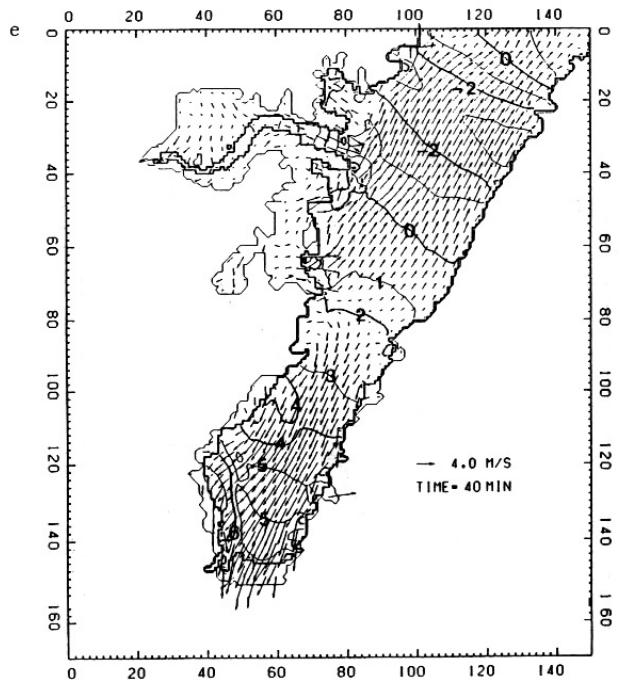


図-25e～f 宮古湾における明治三陸大津波の計算結果  
(DX = 0.05 km 人工構造物なし, 陸上週上あり)

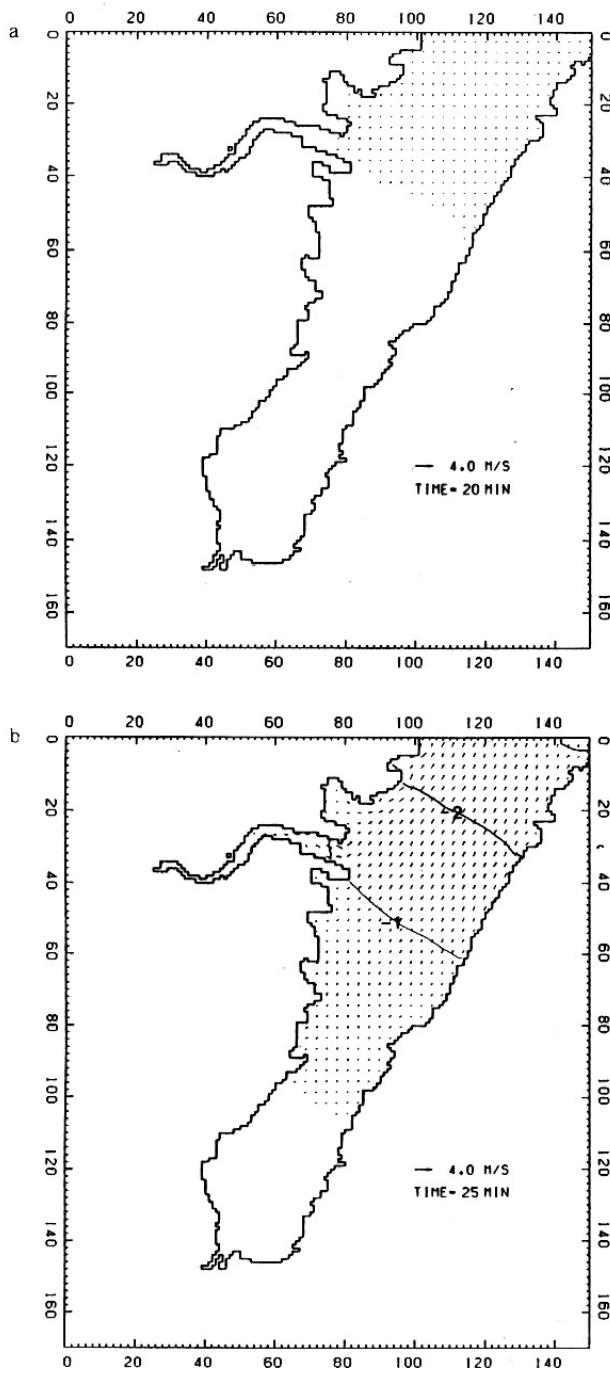


図-26 a ~ b 宮古湾における明治三陸大津波の計算結果  
(DX = 0.05 km 人工構造物なし, 陸上週上なし)

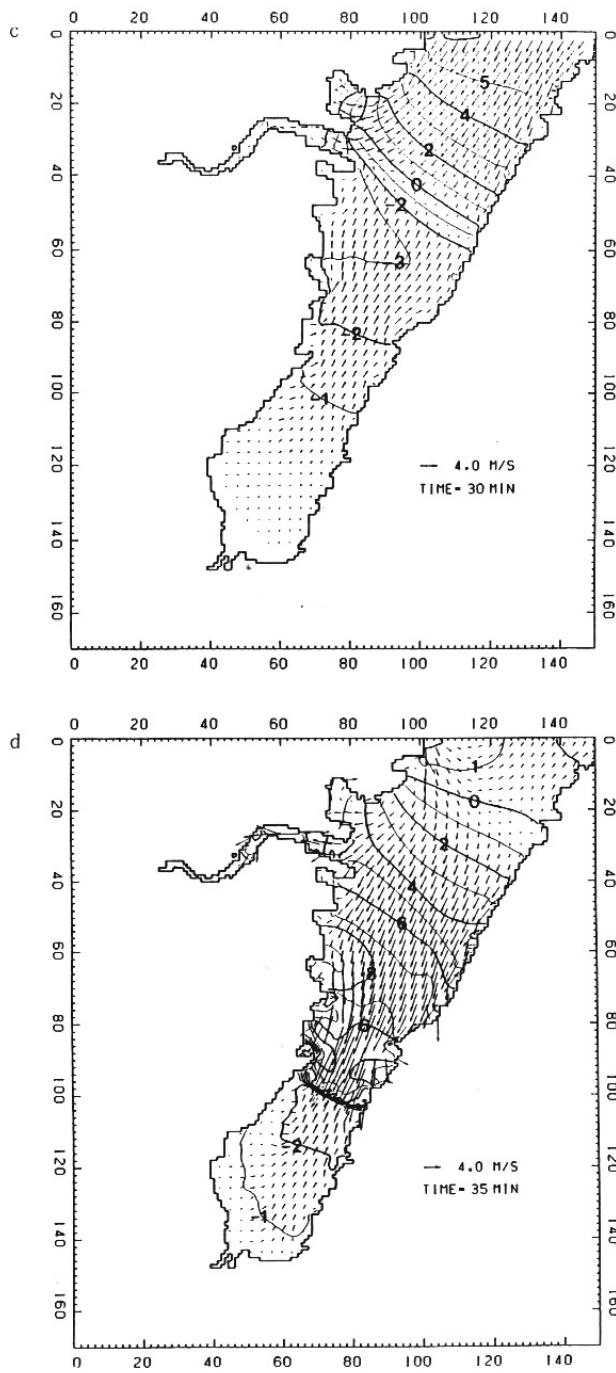


図-26 c ~ d 宮古湾における明治三陸大津波の計算結果  
(DX = 0.05 km 人工構造物なし, 陸上週上なし)

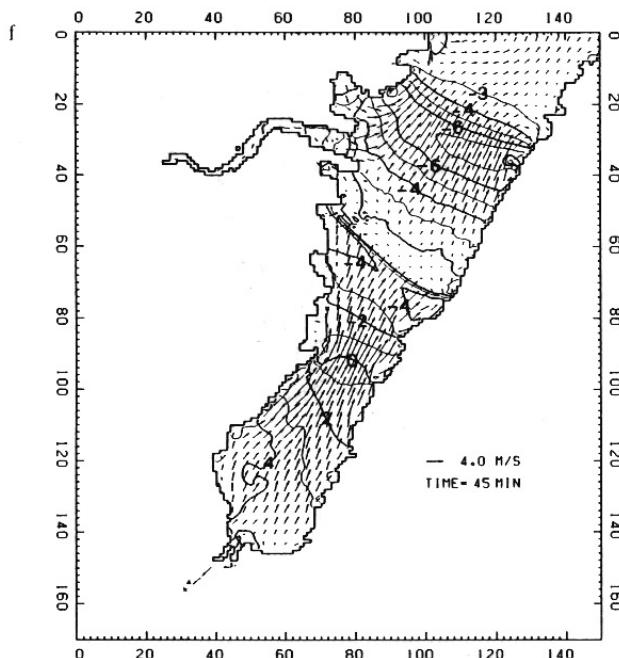
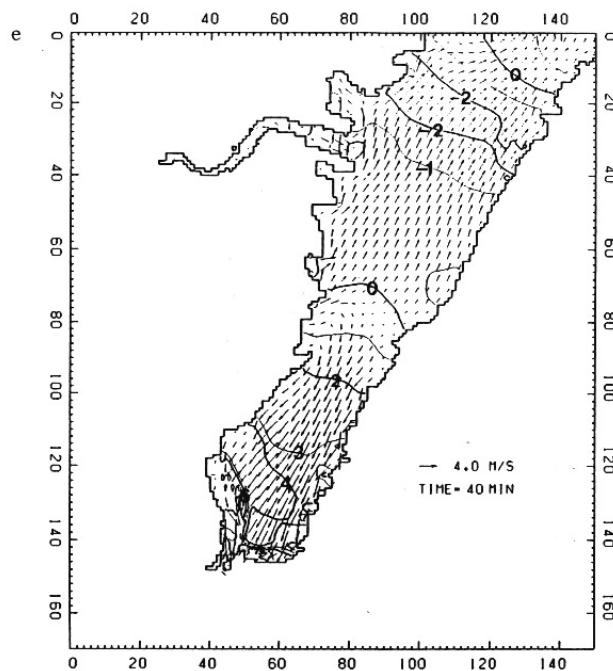


図-26e～f 宮古湾における明治三陸大津波の計算結果  
(DX = 0.05 km 人工構造物なし, 陸上週上なし)

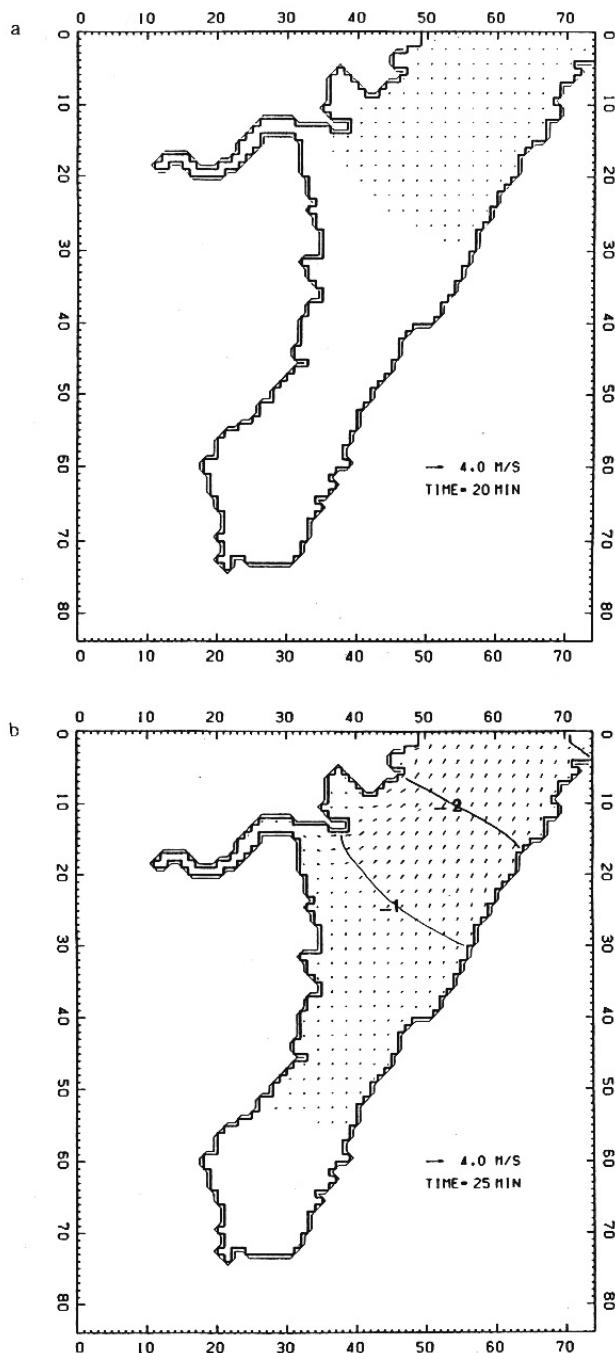


図-27a~b 宮古湾における明治三陸大津波の計算結果  
(DX = 0.1 km 防波堤なし, 陸上遇上あり)

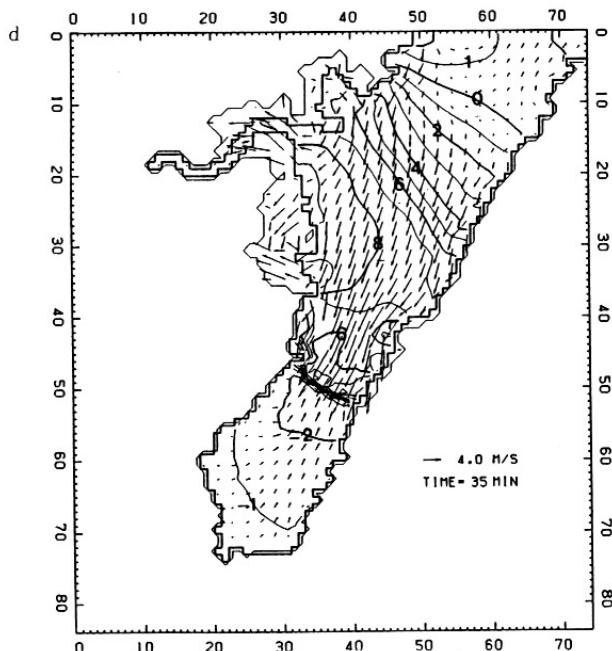
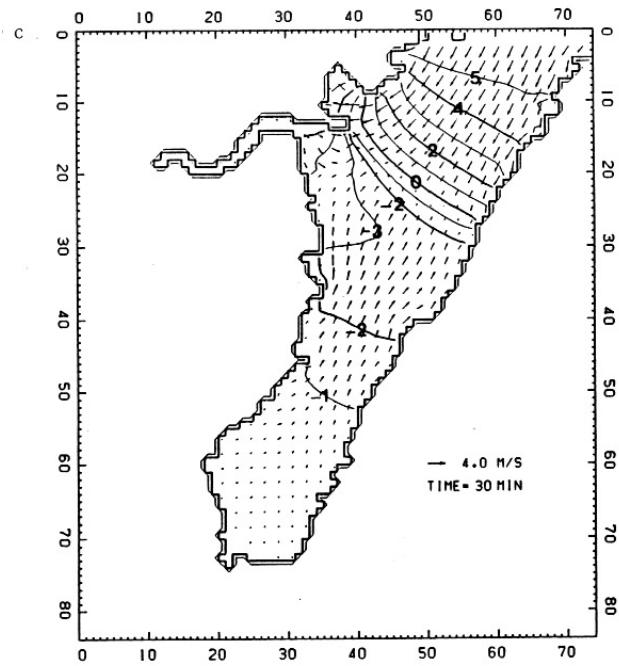


図-27c～d 宮古湾における明治三陸大津波の計算結果  
(DX = 0.1 km 防波堤なし, 陸上週上あり)

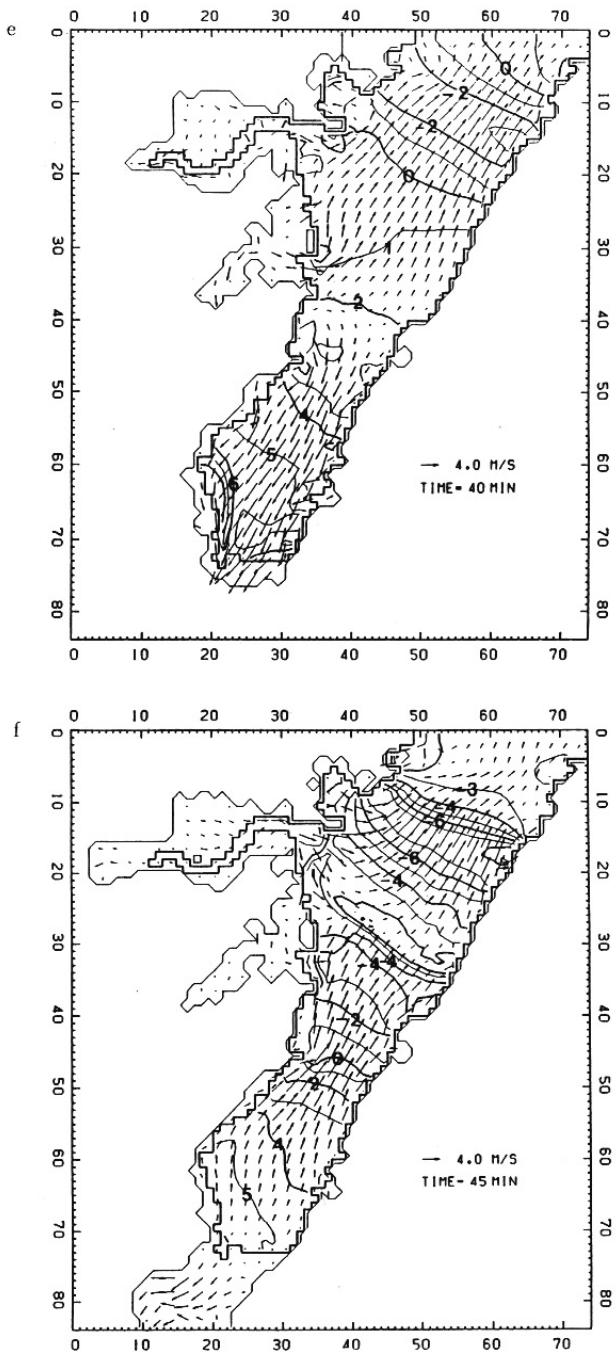


図-27 e~f 宮古湾における明治三陸大津波の計算結果  
(DX = 0.1 km 防波堤なし、陸上遇上あり)

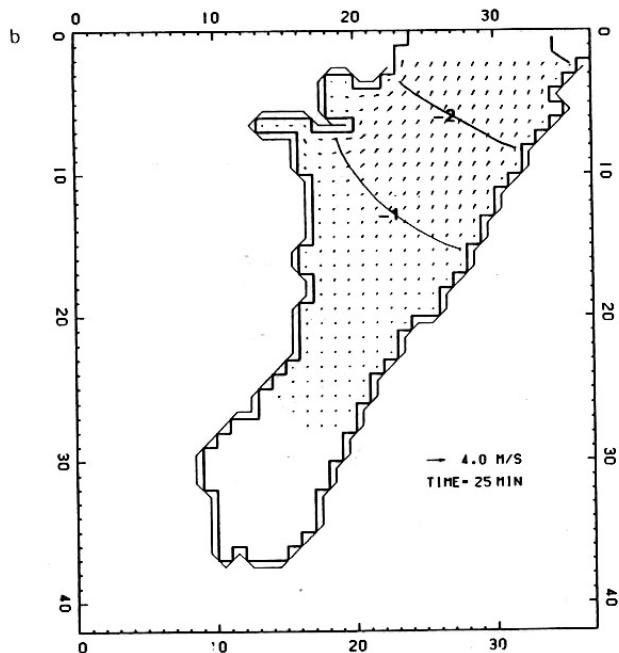
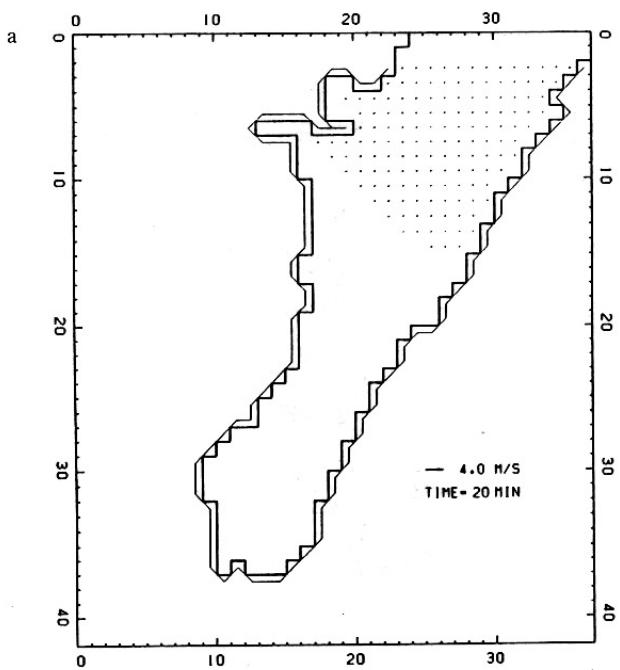


図-28 a ~ b 宮古湾における明治三陸大津波の計算結果  
(DX = 0.2 km 防波堤なし, 地上越上なし)

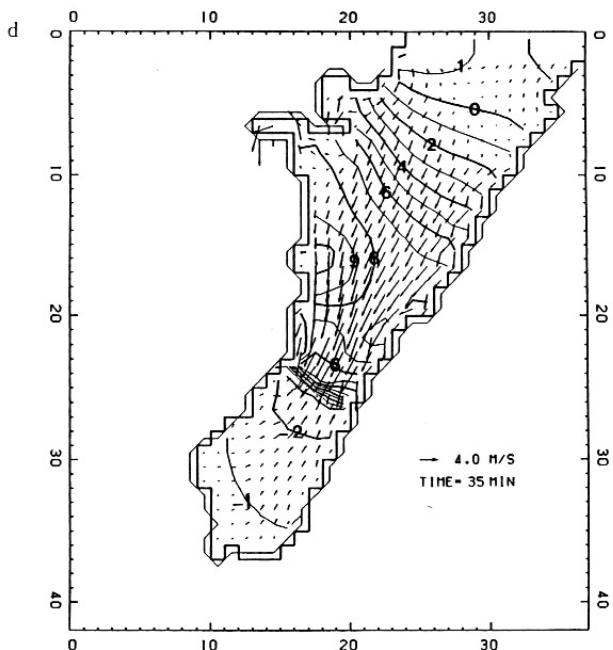
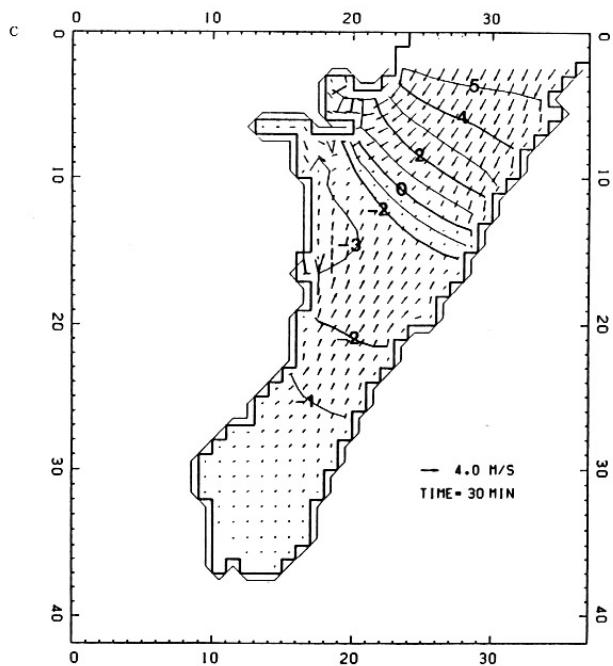


図-28c～d 宮古湾における明治三陸大津波の計算結果  
(DX = 0.2 km 防波堤なし, 陸上週上なし)

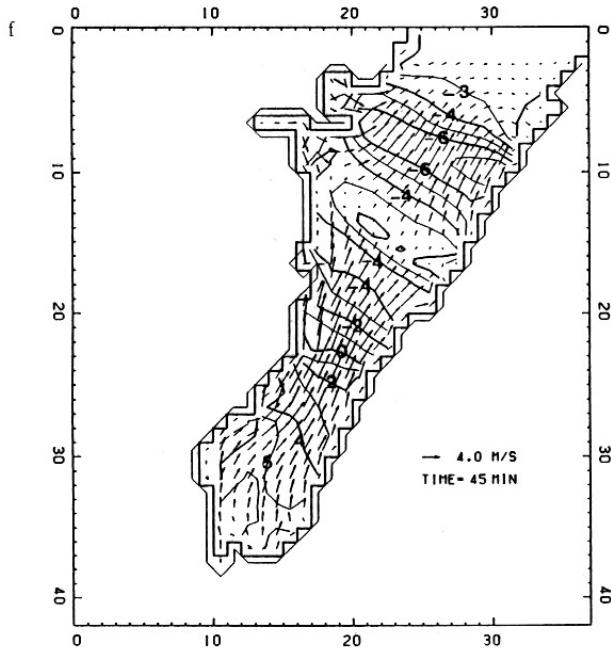
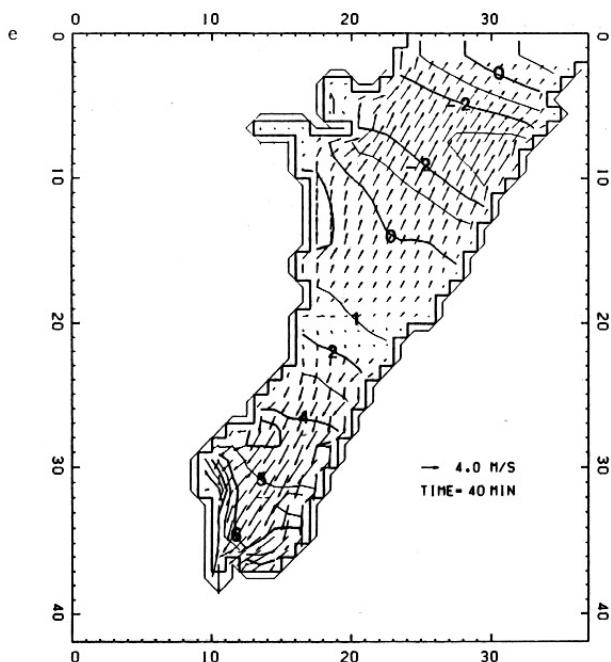


図-28 e~f 宮古湾における明治三陸大津波の計算結果  
 (DX = 0.2 km 防波堤なし, 地上週上なし)

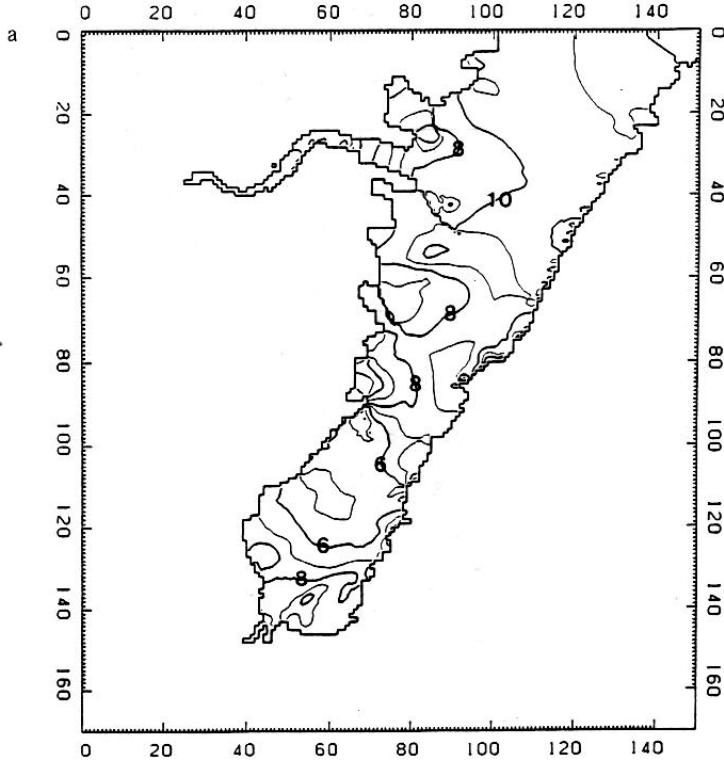


図-29a 最大水位分布 ( $DX = 0.05 \text{ km}$  人工構造物あり, 陸上週上あり)

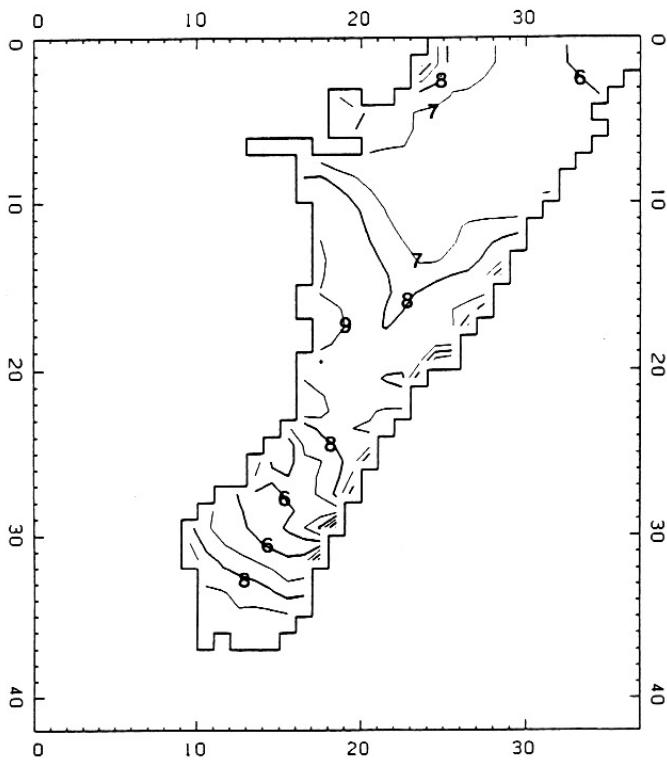


図-29b 最大水位分布 ( $DX = 0.2 \text{ km}$  人工構造物なし, 陸上週上なし)

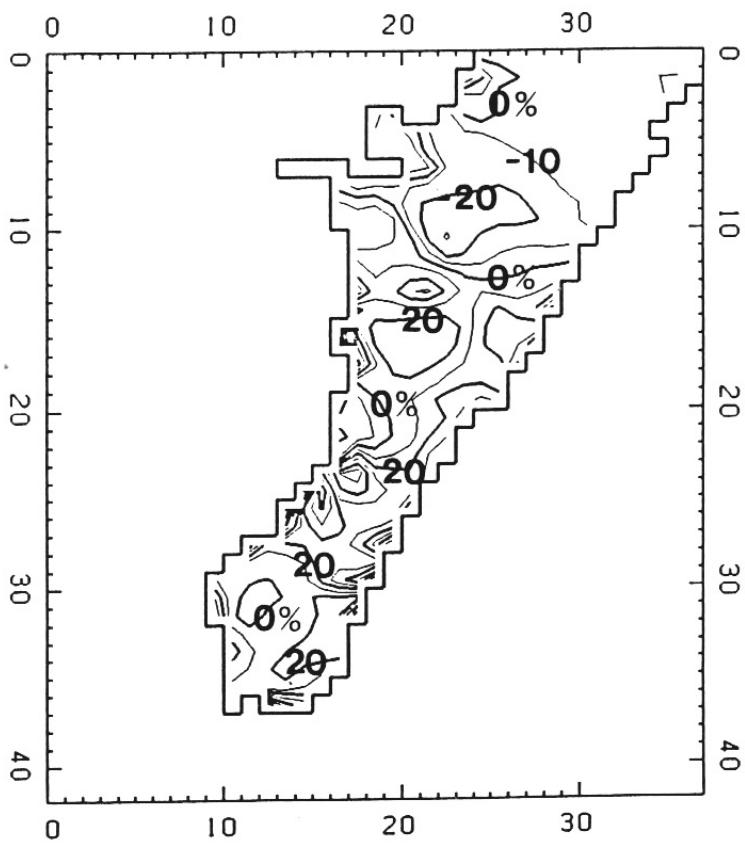


図-30 最大水位分布の差 (DX = 0.05 km と DX = 0.2 km)