

# 宮城県石巻・仙台平野および福島県請戸川河口低地における 869年貞観津波の数値シミュレーション

## Numerical simulation of the AD 869 Jogan tsunami in Ishinomaki and Sendai plains and Ukedo river-mouth lowland

行谷佑一<sup>1</sup>・佐竹健治<sup>1,2</sup>・山木 滋<sup>3</sup>

Yuichi Namegaya<sup>1</sup>, Kenji Satake<sup>1,2</sup> and Shigeru Yamaki<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 活断層・地震研究センター (AIST, Geological Survey of Japan, Active Fault and Earthquake Research Center, [yuichi.namegaya@aist.go.jp](mailto:yuichi.namegaya@aist.go.jp))

<sup>2</sup> 東京大学地震研究所 (Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

<sup>3</sup> シーマス (Seamus)

**Abstract:** An unusually large tsunami was generated by the AD 869 Jogan earthquake, off Miyagi prefecture along the Japan Trench. The tsunami brought deposits on the Ishinomaki and Sendai plains, both in Miyagi prefecture, and Ukedo river-mouth lowland of Namie Town, Fukushima prefecture. Horizontal distance between the most inland tsunami deposit and the estimated past coastline is about 3 km in Ishinomaki plain, 3-4 km in Sendai plain, and 1.5 km in Ukedo area. We computed tsunami inundation at these locations from two fault models of interplate earthquakes: one is a 100 km long fault with 10 m slip ( $M_w=8.3$ ) and the other is a 200 km long fault with 7 m slip ( $M_w=8.4$ ). We also examined four other fault models with variable fault depths and locations. In the simulation, artificial structures such as breakwaters and reclaimed lands were removed from the present topography, and the coastlines were modified to reproduce the topography at the time of the Jogan earthquake. Comparison of the computed inundation areas with the distribution of tsunami deposits indicates that source of a 200 km long fault with 7 m slip can reproduce the distribution of the tsunami deposits in both plains and Ukedo river-mouth lowland.

**キーワード:** 貞観津波, 石巻平野, 仙台平野, 請戸川河口低地, 津波堆積物, 津波シミュレーション

**Keywords:** Jogan tsunami, Ishinomaki plain, Sendai plain, Ukedo river-mouth lowland, Tsunami deposit, Tsunami simulation

### 1. はじめに

貞観十一年五月廿六日(ユリウス暦869年7月9日)に発生した地震(貞観地震)は, 宮城県仙台市周辺に大きな被害をもたらした. 平安時代に編纂された歴史書である『日本三代実録』には, 仙台市周辺で建物の倒壊や地割れにより人間や牛馬などに大きな被害が生じたことが記録されている. さらには, この地震により津波(貞観津波)が発生し, 溺死者は千人に及んだという.

貞観地震の断層モデルについては, これまでにくつかの研究がなされている(例えば, 羽鳥, 1998; 渡邊, 2000; 菅原・他, 2001; Minoura *et al.*, 2001; 河野・他, 2002; 佐竹・他, 2008). このうち, 佐竹・他(2008)は様々な断層モデルを仮定し, 石巻平野および仙台平野における貞観津波の堆積物の位置と, 計算浸水範囲とを比較することで, 最適な断層モデルを検討した. その結果, プレート境界型地震で, 断層の幅が100 km, すべり量が7 m 以上の場合(モデル8お

および10)に, 石巻平野と仙台平野の津波堆積物の位置まで(あるいはそれ以奥に)津波が浸水することを示した. ただし, 震源域の南端がどこまで達するかは, 石巻平野や仙台平野における津波浸水計算から推定することはできなかった.

一方で, 津波堆積物については現在も調査が進んでいる. 最近, 東北大学による調査(今泉・他, 2008; Suzuki *et al.*, 2009)により, 福島県双葉郡浪江町請戸地区(請戸川河口低地)において津波堆積物の調査が行われ, 貞観津波による堆積物が発見された. 請戸地区は仙台平野から南へ約50 kmに位置する.

そこで本研究では, 佐竹・他(2008)による2つの断層モデル(モデル8および10)の他, これらのモデルから断層の位置や深さを変更した4つの新しい断層モデルについて, 津波浸水計算を行った. そして, 石巻平野, 仙台平野および請戸地区における津波堆積物の位置と計算浸水範囲とを比較し, 貞観地震の断層モデルについて検討を行った.

## 2. 貞観津波の堆積物

津波浸水計算と比較する貞観津波の堆積物について、石巻平野および仙台平野では佐竹・他 (2008) で比較を行った津波堆積物の位置 (宍倉・他, 2007; 澤井・他, 2007; 2008) を用いた。福島県浪江町請戸地区については、今泉・他 (2008) や Suzuki *et al.* (2009) で明らかにされた津波堆積物の位置を用いた。以下に概要をまとめる。

石巻平野では、当時の海岸線は現在の海岸線に比べ1~1.5 km 内陸に位置すると推定され、当時の海岸線から3 km 以上内陸まで貞観津波の堆積物が分布している。仙台平野では、当時の海岸線は現在よりも約1 km 内陸に位置し、当時の海岸線から4 km 程度内陸まで貞観津波の堆積物が分布している。請戸地区では、当時の海岸線の位置については不明であるが、現在の海岸線から1.5 km 程度内陸まで貞観津波の堆積物が分布している。貞観津波は少なくともこれらの津波堆積物よりも内陸側まで浸水したと考えられる。

なお、佐竹・他 (2008) では、津波堆積物が貞観津波によるものである可能性によって津波堆積物をランク A およびランク B に分けた。ランク A は層序学的にみて貞観津波による堆積物とみなせるものを意味し、ランク B は層序学的証拠に乏しいが貞観津波による堆積物である可能性が高い堆積物を意味する。本研究では、その後の追加調査 (岡村・他, 2010) などに基づき、石巻平野および仙台平野の津波堆積物のランクの再評価を行った。その結果、佐竹・他 (2008) でランク A とされていたもののうちランク B になったもの、ランク B とされていたもののうち貞観津波の堆積物として認定されなくなったものがある。請戸地区については、全ての堆積物をランク A とした。

## 3. 断層モデル

貞観津波を発生させた地震の断層モデルとして佐竹・他 (2008) は、昭和三陸地震 (1933 年) と同様な海溝東側のプレート内正断層地震 (モデル 1)、明治三陸地震 (1896 年) と同様な海溝西側斜面に沿った津波地震 (モデル 2)、仙台湾内の断層による地震 (モデル 9)、及びプレート間地震 (モデル 3~8 およびモデル 10) の計 10 種類を検討した。

このうち、プレート間地震で断層の長さ 100 km、幅 100 km、すべり量 10 m のモデル 8 と、断層の長さ 200 km、幅 100 km、すべり量 7 m のモデル 10 について、石巻平野と仙台平野における津波堆積物の位置まで津波が浸水することがわかった。いずれのモデルも、断層の走向は日本海溝におよそ平行に 202° とし、傾斜角は現在の地震分布を参考にして 18° としている。

本研究では、佐竹・他 (2008) のモデル 8 および

モデル 10 を基にして、モデル 10 を傾斜角方向に深部 (上端深さ 31 km) に移動させたもの (モデル 11)、モデル 8 を走向方向に 50 km 南側に移動させたもの (モデル 12)、モデル 8 を傾斜角方向に浅部 (上端深さ 15 km) に移動させたもの (モデル 13)、およびモデル 13 を走向方向に 50 km 南側に移動させたもの (モデル 14) を検討した。剛性率を  $4 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$  と仮定すると、モーメントマグニチュードはモデル 10 およびモデル 11 で 8.4、モデル 8 およびモデル 12~14 で 8.3 となる。それぞれのモデルの諸元や位置などを、第 1 表および第 1 図にまとめた。

## 4. 津波シミュレーション

断層モデルによる海底・海岸の地殻上下変動を、Mansinha and Smylie (1971) の式で計算して、津波発生の初期条件とした。津波の伝播は移流項と海底摩擦項を含む非線形長波の運動方程式と連続方程式を連立して差分法で解いた。計算領域の最も外側の境界では、海水が自由通過するようにした。陸上への遡上を考慮しない領域 (後述の E 領域以外の領域) においては、海岸線に直交する流量成分をゼロとした。底面摩擦はマンギングの粗度係数を  $0.03 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$  として表現した。陸上遡上の境界条件は、岩崎・真野 (1979) の方法を用いた。シミュレーションの基本式や計算手法の詳細については、佐竹・他 (2003) を参照されたい。

差分の格子間隔は、外海では 2,025 m (A 領域、この範囲のみ線形計算) で、海岸に近づくにつれ、675 m (B 領域)、225 m (C 領域)、75 m (D 領域)、および 25 m (E 領域) と段階的に細かくした。遡上計算は E 領域でのみ行った。石巻平野および仙台平野における津波計算領域は佐竹・他 (2008) の第 3 図に示す領域を用い、請戸地区においては第 2 図に示す領域を用いた。計算時間間隔は差分法の安定条件を満たすよう 0.5 秒として、地震発生から 6 時間の津波伝播を計算した。

計算に用いた海底地形データは、石巻平野及び仙台平野周辺については、日本水路協会から公開されているデジタル水深データ (日本近海 1000 m メッシュ海底地形データ、沿岸の海の基本図) を用い、請戸周辺については、同協会発行のデジタル水深データ (海底地形デジタルデータ、日本近海 30 秒グリッド水深データ、日本全域海岸線データ) を用いて直交座標系に変換した。海水面は平均海面を基準とした。

陸上の地形データについては、石巻平野及び仙台平野の浸水計算では国土地理院から公開されている「数値地図 50 m メッシュ (標高)」に加えて、沿岸海域土地条件図の 1 m 等高線を用いて現況の標高データを作成した。請戸地区に関しては、同じく「数値地図 50 m メッシュ (標高)」に加えて、国土地理院

が所有する「海岸における 3D 電子地図」および福島県が所有する陸上地形データを用いて現況の標高データをコンパイルした。

つぎに、明治時代の迅速図と米軍の空中写真を基に、防波堤や埋立地などの人工物を取り除いて、自衛隊基地（石巻平野）や仙台空港（仙台平野）建設前の浜堤を再現した。なお、現在の地形を参考にして、浜堤の標高は 2.5 m、堤間湿地は標高 1 m とした。海岸線は、石巻平野で現在の海岸線より 1~1.5 km 内陸に、仙台平野では現在の海岸線より 1 km 内陸に設定した（佐竹・他（2008）の第 4 図）。福島県沿岸については、貞観地震当時の海岸線の位置は不明であるが、地形発達観の観点から、現在の海岸線とほぼ同じ位置にあると考えて、明治時代の迅速図や米軍の空中写真を参考に、現在の地形から人工物を取り除いたデータを用いた（第 3 図）。推定海岸線が現在の海岸線よりも若干沖側（あるいは陸側）に位置するが、これは明治時代の迅速図や航空写真から判読した海岸線を反映させた結果である。

## 5. 結果

各モデルによる陸上・海底の地殻上下変動（初期水位）の分布を、第 4 図に示す。いずれのモデルも初期水位は沖（東）側で大きく隆起し、陸（西）側で小さく沈降するパターンを示す。断層の上端深さが 31 km のモデル（モデル 8, 11, 12）は比較的大きな沈降域が陸域にかかるのに対し、同深さが 15 km のモデル（モデル 10, 13, 14）による陸域の沈降量は小さい。

これらの初期水位から計算された津波の最大水位分布を第 5 図に示す。断層の走向に直交する方向で水位が大きくなる指向性が顕著に現れている。断層の大きさや深さが同じで位置が異なるモデル同士（モデル 8 とモデル 12, モデル 13 とモデル 14）を比較すると、南側に位置するモデル（モデル 12 およびモデル 14）の方が、福島県における最大水位が高くなることがわかる。

石巻平野と仙台平野、および請戸地区における最大浸水深（地盤上の津波高）と津波堆積物分布とを比較したものを、それぞれ第 6 図、第 7 図および第 8 図に示す。また、石巻平野における 3 測線上での浸水高と津波堆積物の位置との比較を第 9a 図に、仙台平野における 5 測線上での比較を第 9b 図および第 9c 図に、請戸地区における測線上での比較を第 9d 図に示す。さらに、モデルの違いによる各測線での浸水距離と遡上高の違いを比較したグラフを第 10 図および第 11 図に示す。なお、各測線上における海岸線からの距離について、佐竹・他（2008）では隣接する格子に沿って測線を設定していたが、本研究では測線の両端を直線で結んだので若干異なる場合がある。

まず、石巻平野における津波堆積物の分布と計算された津波浸水域とを比較する（第 6 図、第 9a 図、第 10 図および第 11 図）。佐竹・他（2008）が報告したように、モデル 8（断層長さ 100 km）やモデル 10（同 200 km）による計算浸水域は、津波堆積物の分布を良く説明する。モデル 11（モデル 10 の上端深さを 15 km から 31 km に深くしたもの）による計算浸水域も津波堆積物の分布を良く説明する。しかしながら、モデル 12（モデル 8 を南側に移動させたもの）、モデル 13（モデル 8 の上端深さを 31 km から 15 km に浅くしたもの）、およびモデル 14（モデル 13 を南側に移動させたもの）による計算浸水域は、A1 測線および Y 測線沿いで最も内陸の津波堆積物まで到達していない。

仙台平野（第 7 図、第 9b 図、第 9c 図、第 10 図および第 11 図）については、石巻平野の津波堆積物の分布を良く説明するモデル 8, 10 および 11 に着目すると、いずれのモデルによる計算浸水域も津波堆積物の分布を比較的良く説明する。

請戸地区（第 8 図、第 9d 図、第 10 図、および第 11 図）については、モデル 10 やモデル 11 による浸水域は津波堆積物の分布を良く説明するのに対し、モデル 8 による浸水域は津波堆積物の位置に達しない。なお、モデル 8 の位置をずらしたモデル 12, 13, および 14 による計算浸水域はおおむね津波堆積物の分布を説明するが、これらのモデルは石巻平野や仙台平野において津波堆積物の位置までは到達しない測線が存在した。

これらの比較から、石巻平野、仙台平野、および請戸地区における津波堆積物の位置まで浸水するのは、断層の長さが 200 km（モデル 10 および 11）の場合であることがわかった。断層の長さが 100 km（モデル 8, 12, 13 および 14）の結果に注目すると、断層北端が 200 km モデルよりも南側だと石巻平野の津波堆積物の位置まで津波が浸水しない傾向にあり、逆に断層南端が 200 km モデルよりも北側だと請戸川河口域の津波堆積物の位置まで津波が浸水しない場合が存在した。すなわち、石巻平野、仙台平野、および請戸地区における津波堆積物の位置を同時に再現するには、断層の長さが 100 km では短いことがわかった。第 2 表および第 3 表は、石巻平野、仙台平野、および請戸地区における浸水距離や標高の比（シミュレーション/堆積物）を比較したものである。この比較には、ランク A および B を問わず、もっとも内陸側の津波堆積物の位置（海岸線からの距離と標高）を用いた。ただし、浸水距離の比に関しては、1 を越える場合（すなわち、計算浸水域が津波堆積物の位置より奥まで浸水する場合）には 1 として扱った。これによれば、モデル 10 および 11 の浸水距離の比の平均がもっとも大きく、それぞれ 0.97 および 0.99 と 1 に近い値を示す。また、これらの標準偏差は 0.04 や 0.01 と小さな値を示すことから、これらのモデル

が貞観津波の堆積物の位置まで浸水するモデルとして適切であることが示される。なお、津波堆積物のランクの再評価ならびに各測線上の海岸線からの距離の再計算に伴う、佐竹・他（2008）の第2表を改訂したものを付表として載せた。

## 6. 潮汐の影響

『日本三代実録』によれば、「陸奥國地大震動，流光如晝隱映」とある（大日本地震史料第1巻、「古代・中世」地震・噴火史料データベース（石橋，2009）による。この記述についてはImamura（1934）により英訳され，Sawai *et al.*（2008）に引用されている。）。この部分は、「陸奥國で大震動があり，光が流れて昼のように明るくなったり暗くなったりした」と解釈される。光の物理的な意味は不明であるが，貞観地震は夜間に発生したと考えられる。第12図は福島県相馬市相馬における貞観地震時の推算天文潮位を表す。夜間の潮位は，平均海面から最大で50 cm程度高い。そこで，津波来襲時の潮位を50 cm上げた状態で，各モデルに対する浸水計算を行った。その結果，いずれのモデルについても，津波来襲時の潮位を平均海面とした場合の浸水深に対して，おおむね50 cm程度高い浸水深となった。すなわち石巻平野，仙台平野，および請戸地区の場合，潮位の影響は，地点によって計算水位に顕著な差が生じるのではなく，津波の高さが一律的に大きくなるような変化をもたらすことが確認された。この場合においても，モデル8，12～14による浸水域は一部の測線で津波堆積物の位置まで達しない結果となった。断層の大きさや位置に関する検討においては，潮位の影響は大きくはないと考えられる。

## 7. まとめ

石巻平野，仙台平野，および請戸地区における貞観津波の堆積物の分布と，6種類のプレート境界型地震の断層モデルによる津波浸水計算結果とを比較した。検討を行った断層モデルは，断層の長さ100 km，幅100 km，すべり量10 m，上端深さ31 km（モデル8，Mw8.3）と，断層の長さ200 km，幅100 km，すべり量7 m，上端深さ15 km（モデル10，Mw8.4）の他，モデル8を南側に移動させたモデル（モデル12），浅部に移動させたモデル（モデル13および14），モデル10を深部に移動させたモデル（モデル11）である。

この結果，断層の長さが200 kmのモデル（モデル10および11）では，断層上端深さによらず，全地域で津波堆積物の分布を良く再現することができた。いっぽう，断層の長さが100 kmのモデル（モデル8）では，計算浸水域が請戸地区における津波堆積物の位置まで到達しなかった。また，モデル8の位置を南側や浅部へずらしたモデルでは，請戸地区

の津波堆積物は説明できるが石巻・仙台平野の津波堆積物を説明できないなど，全地域の津波堆積物の位置まで浸水する結果は得られなかった。

本研究では石巻平野から請戸地区における津波堆積物を用いて貞観地震の断層モデルを検討したが，断層の南北の広がり（長さ）などをさらに検討するために，今後，石巻平野よりも北の三陸海岸沿岸や，あるいは請戸地区よりも南の福島県，茨城県沿岸における津波堆積物の調査が必要である。

**謝辞** 本研究は東北大学から産総研活断層・地震研究センターに委託された，文部科学省「宮城県沖地震重点調査観測」の一環として実施された。福島県の地形作成においては，国土地理院から「海岸における3D電子地図」を提供して戴き，福島県から「福島県沿岸部地形データ」を提供して戴いた。東北大学大学院理学研究科の今泉俊文教授および石山達也博士には，福島県浪江町請戸地区の津波堆積物の調査結果を提供して戴いた。活断層・地震研究センターの岡村行信センター長，海溝型地震履歴研究チームの宍倉正展チーム長，澤井祐紀博士には，石巻平野・仙台平野における津波堆積物調査結果や地形調査データを提供して戴いたほか，貞観地震当時の地形や仙台湾内の活断層に関する情報を戴いた。査読者である建築研究所の藤井雄士郎博士には，原稿の細部にまでわたって有益な助言を戴いた。

## 文 献

- 羽鳥徳太郎（1998）貞観11年（869年）宮城多賀城津波の推定波源域。海洋号外，15，167-171。
- 今泉俊文・石山達也・原口 強・宮内崇裕・後藤秀昭・島崎邦彦（2008）東北地方太平洋沿岸域における地質調査。宮城県沖地震における重点的調査観測（平成19年度）成果報告書，107-132。
- Imamura, A. (1934) Past tsunamis of the Sanriku coast. *Japanese J. Astronomy Geophysics*, 11, 79-93.
- 石橋克彦（2009）歴史地震史料の全文データベース化。地震第2輯特集号，61，S509-S517。
- 岩崎敏夫・真野 明（1979）オイラー座標による二次元津波遡上の数値計算。海岸工学講演会論文集，26，70-74。
- 河野幸夫・高田 晋・今村文彦（2002）宮城県沖地震モデルによる貞観津波の解析。東北地域災害科学研究，38，87-92。
- Mansinha, L. and Smylie, D. E. (1971) The displacement fields of inclined faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 61, 1433-1440.
- Minoura, K., Imamura, F., Sugawara, D., Kono, Y., and Iwashita, T. (2001) The 869 Jogan tsunami deposit and recurrence interval of large-scale tsunami on the Pacific coast of northeast Japan. *J. Natural Disaster Sci.*, 23, 83-88.

- 岡村行信・藤原 治・澤井祐紀・藤野滋弘・行谷佑一 (2010) 地質調査・津波シミュレーションに基づく地震発生履歴に関する研究, 宮城県沖地震における重点的調査観測 (平成 21 年度) 成果報告書, 87-106.
- 佐竹健治・七山 太・山木 滋 (2003) 17 世紀に北海道東部で発生した異常な津波の波源モデル. 活断層・古地震研究報告, No.3, 315-362.
- 佐竹健治・行谷佑一・山木 滋 (2008) 石巻・仙台平野における 869 年貞観津波の数値シミュレーション. 活断層・古地震研究報告, No.8, 71-89.
- 澤井祐紀・宍倉正展・岡村行信・高田圭太・松浦旅人・Than Tin Aung・小松原純子・藤井雄士郎・藤原 治・佐竹健治・鎌滝孝信・佐藤伸枝 (2007) ハンディジオスライサーを用いた宮城県仙台平野 (仙台市・名取市・岩沼市・亘理町・山元町) における古津波痕跡調査. 活断層・古地震研究報告, No. 7, 47-80.
- 澤井祐紀・宍倉正展・小松原純子 (2008) ハンドコアラを用いた宮城県仙台平野 (仙台市・名取市・岩沼市・亘理町・山元町) における古津波痕跡調査. 活断層・古地震研究報告, No.8, 17-70.
- Sawai, Y., Fujii, Y., Fujiwara, O., Kamataki, T., Komatsubara, J., Okamura, Y., Satake, K., Shishikura, M. (2008) Marine incursions of the past 1500 years and evidence of tsunamis at Suijin-numa, a costal lake facing the Japan trench. *The Holocene*, 18, 517-528.
- 宍倉正展・澤井祐紀・岡村行信・小松原純子・Than Tin Aung・石山達也・藤原 治・藤野滋弘 (2007) 石巻平野における津波堆積物の分布と年代. 活断層・古地震研究報告, No.7, 31-46.
- 菅原大助・箕浦幸治・今村文彦 (2001) 西暦 869 年貞観津波による堆積作用とその数値復元. 津波工学研究報告, 18, 1-10.
- Suzuki, H., Imaizumi, T., Ishiyama, T., Miyauchi, T., Kagohara, K., Haraguchi, T., Marushima, N., Omachi, T. (2009) Holocene Tsunami deposits associated with earthquakes along Pacific coast, northeast Japan. *Eos Trans. AGU Fall Meet. Suppl.*, 90 (52), T33B-1884.
- 渡邊偉夫 (2000) 貞観 11 年 (869 年) の地震・津波と推定される津波の波源域 (総括). *歴史地震*, 16, 59-77.

(受付 : 2010 年 8 月 24 日, 受理 : 2010 年 11 月 29 日)

第 1 表. 本研究で検討する貞観地震の断層モデル.

Table 1. Parameters of fault models of the Jogan earthquake examined in this study. The fault locations (longitude, latitude, and depth) refer to the northeastern edge of the fault plane. Rigidity of  $4 \times 10^{10}$  N/m<sup>2</sup> is assumed for estimation of seismic moment (Mo).

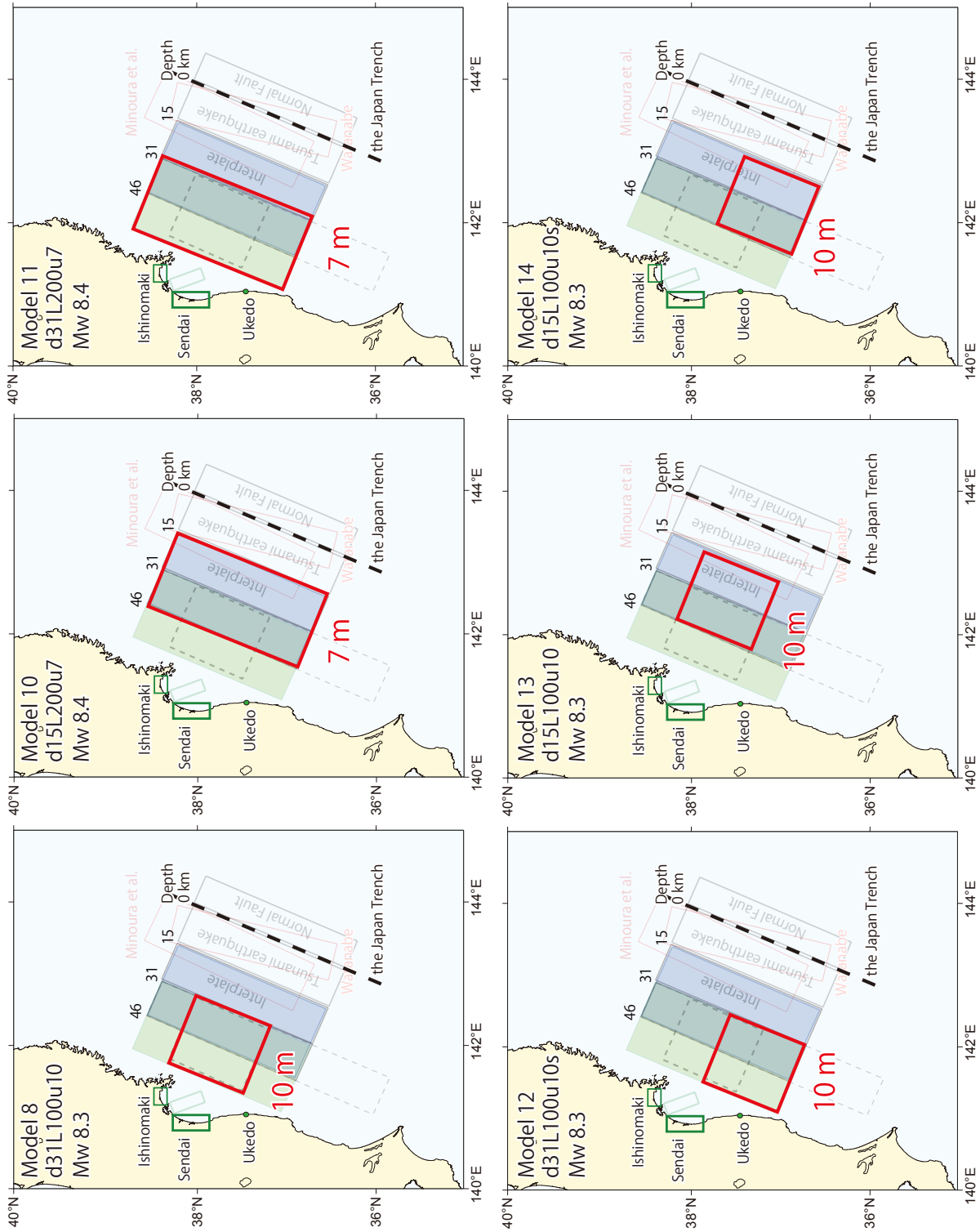
モデル Model	断層タイプ Fault type	断層位置 Fault location		深さ Depth	長さ Length	幅 Width	走向 Strike	傾斜角 Dip	すべり角 Rake	すべり量 Slip	地震モーメント Seismic moment	
		deg N	deg E	km	km	km	deg	deg	deg	m	Mo Nm	Mw
8	d31L100u10	38.00	142.68	31	100	100	202	18	90	10	$4 \times 10^{21}$	8.3
10	d15L200u7	38.24	143.41	15	200	100	202	18	90	7	$5.6 \times 10^{21}$	8.4
11	d31L200u7	38.41	142.91	31	200	100	202	18	90	7	$5.6 \times 10^{21}$	8.4
12	d31L100u10s	37.59	142.45	31	100	100	202	18	90	10	$4 \times 10^{21}$	8.3
13	d15L100u10	37.83	143.18	15	100	100	202	18	90	10	$4 \times 10^{21}$	8.3
14	d15L100u10s	37.42	142.95	15	100	100	202	18	90	10	$4 \times 10^{21}$	8.3

第2表. 貞観津波の6個のモデルから計算した浸水距離(km)と最も内陸の津波堆積物の海岸からの距離(km)との比較.  
 Table 2. Inundation distances (in km) along profiles computed for six models of the Jogan tsunami, compared with the distances (in km) between the estimated coast line and the most inland tsunami deposits. The lowest two lines indicate averages and standard deviations of distance ratio (simulated inundation distance / furthest tsunami deposit from coast). Both rank A and B deposits are included in the calculations. When the distance ratio becomes more than 1.0, it is assumed to be 1.0 for the calculation of average and standard deviation. The averages and standard deviations shown in bold are the preferred models.

Distance from coastline, km							
	Tsunami deposit	Model 8 d31L100u10	Model 10 d15L200u7	Model 11 d31L200u7	Model 12 d31L100u10	Model 13 d15L100u10	Model 14 d15L100u10
Ishinomaki							
WA	1.5	1.5	1.6	1.6	1.5	1.6	1.5
A1	3.3	3.4	3.0	3.8	2.2	2.2	2.2
Y	2.9	2.7	2.6	2.9	2.2	2.5	1.8
Sendai							
a	2.8	2.9	2.9	3.2	1.7	2.8	1.6
b	2.1	3.1	3.1	3.4	2.1	2.9	2.6
c	4.0	3.5	3.8	3.9	3.0	3.4	3.1
d	2.9	3.4	3.4	3.6	3.0	3.2	2.8
e	2.0	2.6	2.7	2.7	2.2	2.5	2.3
Ukedo							
U	1.4	0.9	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Distance ratio (Sim./Dep.)	Average	0.93	<b>0.97</b>	<b>0.99</b>	0.86	0.93	0.84
	Std. Dev.	0.13	<b>0.04</b>	<b>0.01</b>	0.17	0.12	0.19

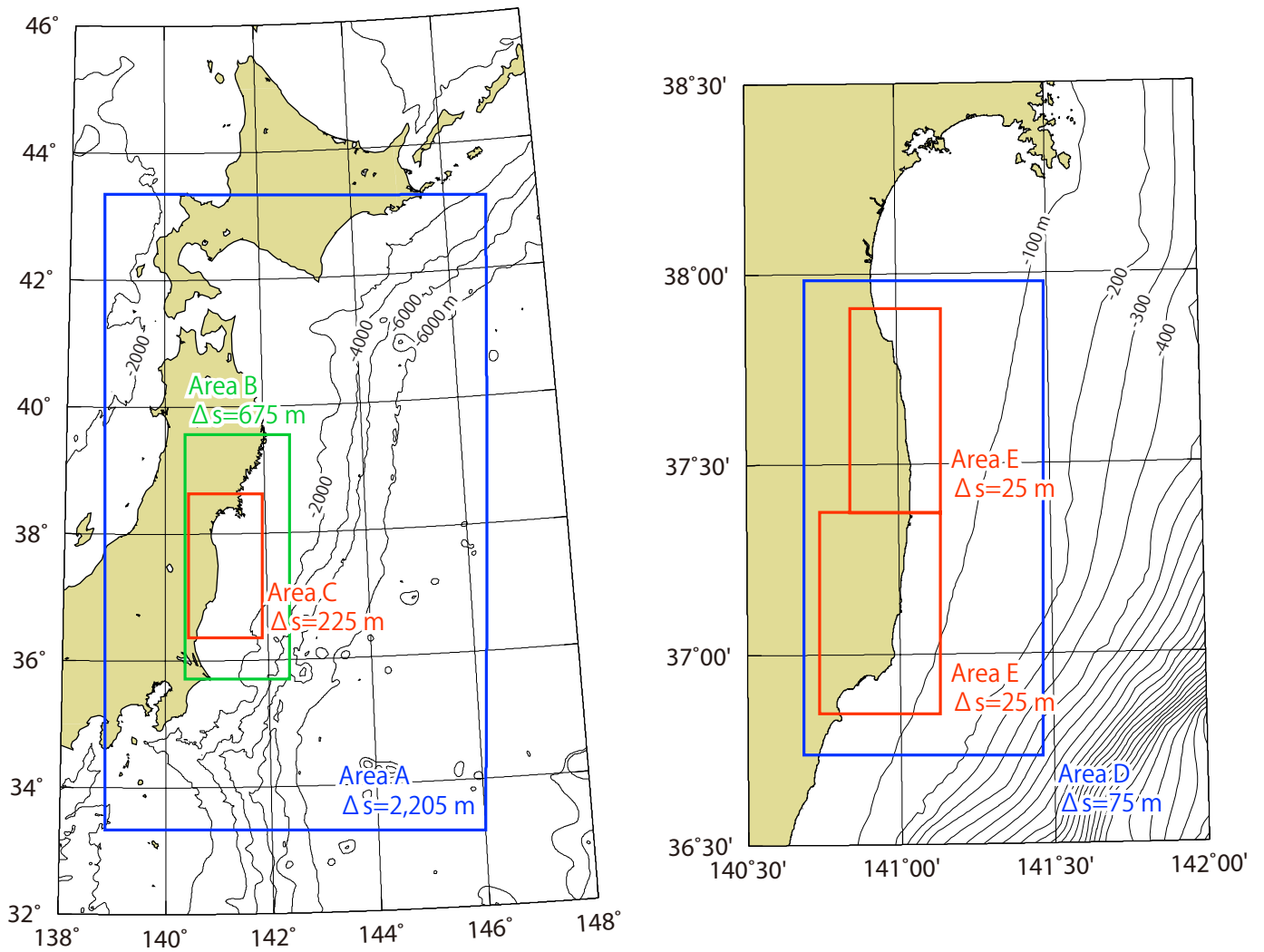
第3表. 貞観津波の6個のモデルから計算した遡上高さ(m)と最も内陸の津波堆積物の標高(m)との比較.  
 Table 3. The runup heights (in meters) along profiles computed for six models of the Jogan tsunami, compared with the altitudes (in meters) of the most inland tsunami deposits. The lowest two lines indicate averages and standard deviations of height ratio (simulated runup height / altitude of the most inland tsunami deposit). Both rank A and B deposits are included in the calculations. The averages and standard deviations shown in bold are the preferred models.

Altitude, m							
	Tsunami deposit	Model 8 d31L100u10	Model 10 d15L200u7	Model 11 d31L200u7	Model 12 d31L100u10	Model 13 d15L100u10	Model 14 d15L100u10
Ishinomaki							
WA	2.1	2.7	3.6	3.3	2.3	3.1	2.4
A1	1.7	1.9	1.7	2.1	1.3	1.4	1.4
Y	2.6	2.5	2.5	2.6	2.5	2.4	2.5
Sendai							
a	2.0	2.4	2.4	2.6	1.6	2.1	1.6
b	1.4	2.5	2.5	2.8	1.5	2.2	1.5
c	2.8	2.0	2.1	2.3	1.2	1.7	1.4
d	2.5	3.5	3.2	3.8	2.5	2.9	2.3
e	3.0	4.0	4.1	4.1	3.1	3.9	3.2
Ukedo							
U	4.6	4.2	7.1	4.9	6.7	4.9	8.9
Height ratio (Sim./Dep.)	Average	1.19	<b>1.29</b>	<b>1.33</b>	0.96	1.11	1.03
	Std. Dev.	0.32	<b>0.36</b>	<b>0.35</b>	0.28	0.30	0.39



第 1 図. 貞観地震の断層モデル (赤線枠). 赤数字はすべり量を表す. 黒数字は深さを表す. 背景にある矩形は, 佐竹・他 (2008) で検討を行った断層モデルの位置を表す.

Fig. 1. Fault models of the Jogan earthquake (red rectangles). Slip amounts are shown by red numbers. The black numbers are the top depth of the fault planes. The rectangles in the background indicate fault models discussed in Satake *et al.* (2008).

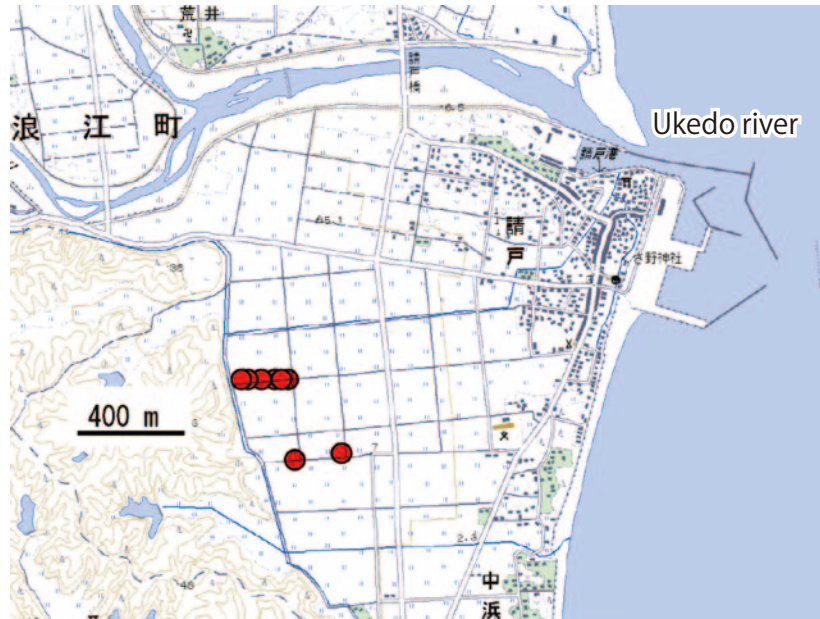


第2図. 津波シミュレーションの範囲. 計算格子は2,025 m (A領域), 675 m (B領域), 225 m (C領域), 75 m (D領域), 25 m (E領域) と段階的に細かくした. 福島県沿岸のシミュレーション範囲のみ示す. 石巻・仙台平野については, 佐竹・他 (2008) を参照.

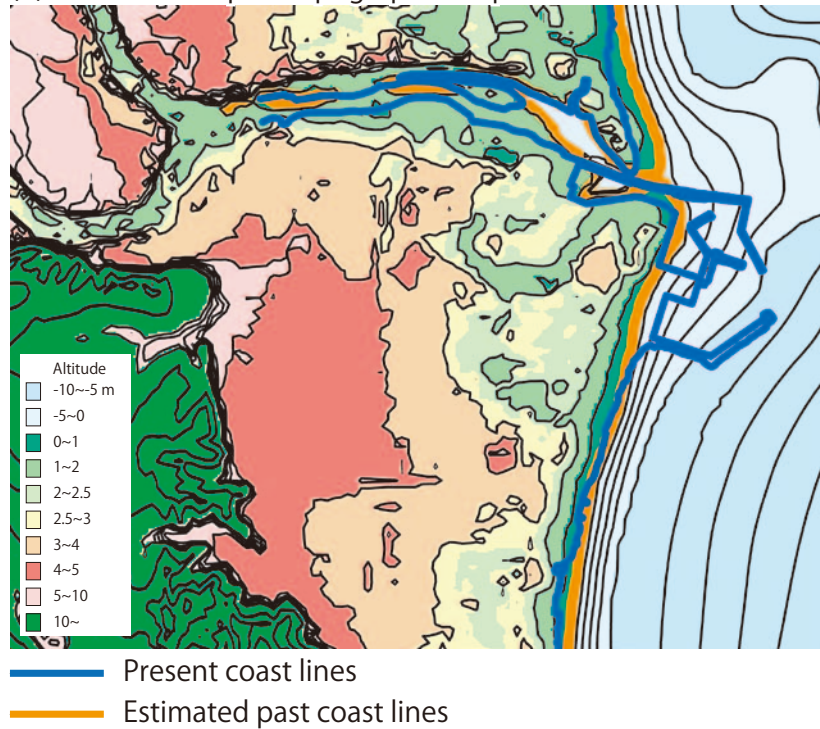
Fig. 2. Computational areas for tsunami numerical simulation for Fukushima prefecture. Grid sizes are 2,025 m (Area A), 675 m (Area B), 225 m (Area C), 75 m (Area D), and 25 m (Area E); smaller grids used near coasts. For the Ishinomaki and Sendai plains, see Satake *et al.* (2008).



(a) A present topographic map and locations of tsunami deposits at Ukedo

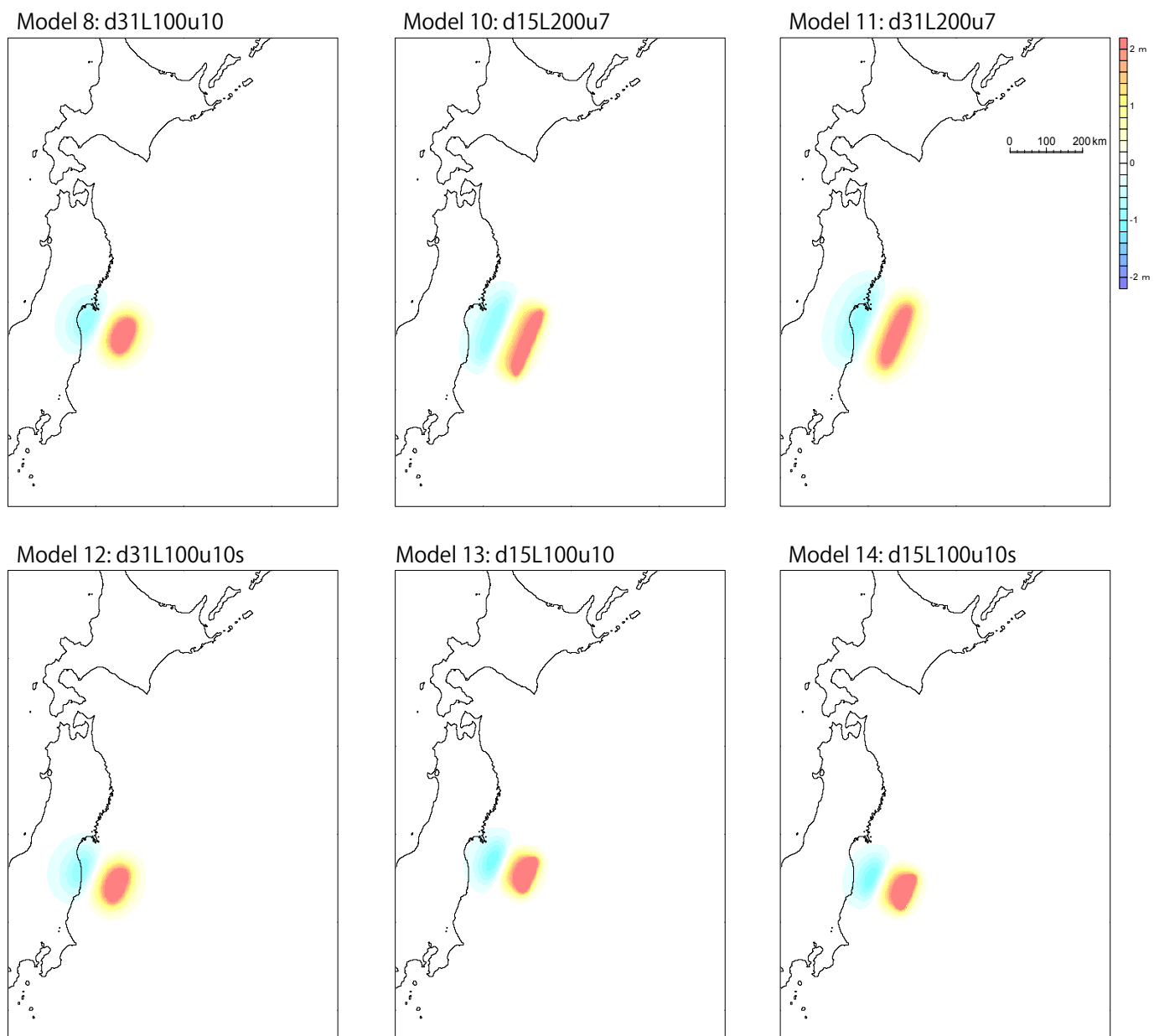


(b) An estimated past topographic map at Ukedo



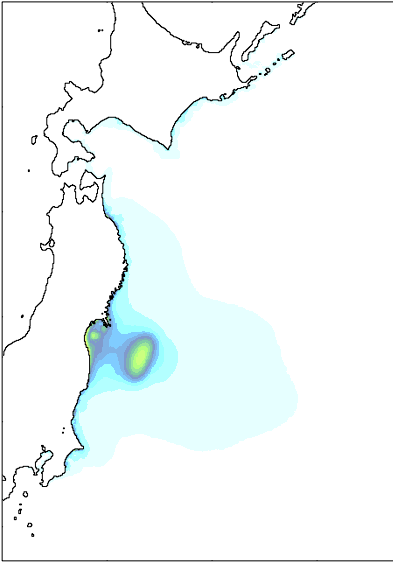
第 3 図. (a) 福島県双葉郡浪江町請戸地区における貞観津波の堆積物が見つかった位置 (赤丸) (今泉・他, 2008). 国土地理院発行の 2 万 5 千分の 1 地形図「磐城双葉」を使用. (b) 福島県請戸地区周辺の貞観当時の推定地形 (格子間隔 25 m). 青線は現在の海岸線を表し, オレンジ線は推定した貞観津波当時の海岸線の位置を表す.

Fig. 3. (a) Locations of the Jogan tsunami deposit at Ukedo, Namie town, Fukushima prefecture are shown by red circles (Imaizumi *et al.*, 2008). Topographic map “Iwaki-Futaba” published by Geospatial Information Authority of Japan is used. (b) Estimated topography of Ukedo at the time of AD 869 Jogan tsunami. Blue and orange lines indicate the present coastline and the coastline at the time of AD 869 Jogan tsunami, respectively. This area is gridded into 25 m interval for inundation modeling.

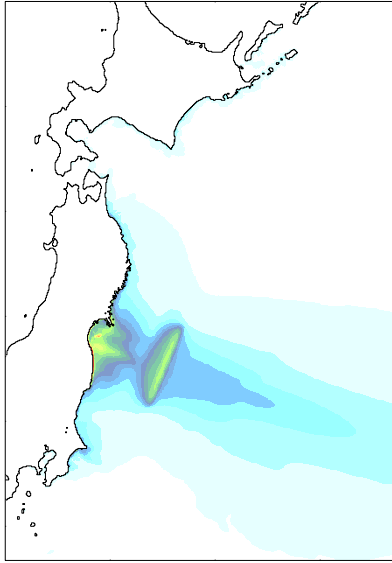


第 4 図. 各モデルによる初期水位分布.  
Fig. 4. Initial sea surface displacements for each model.

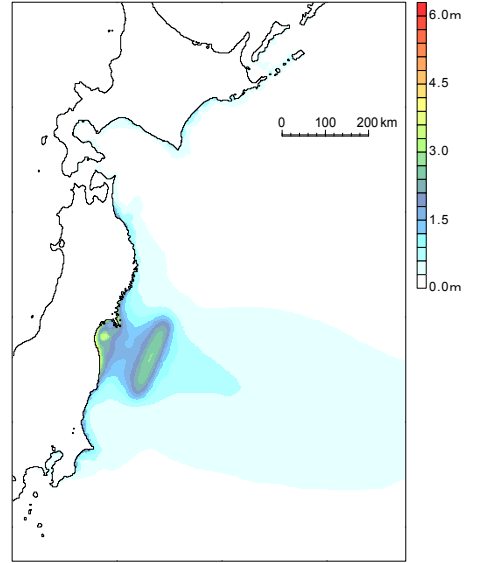
Model 8: d31L100u10



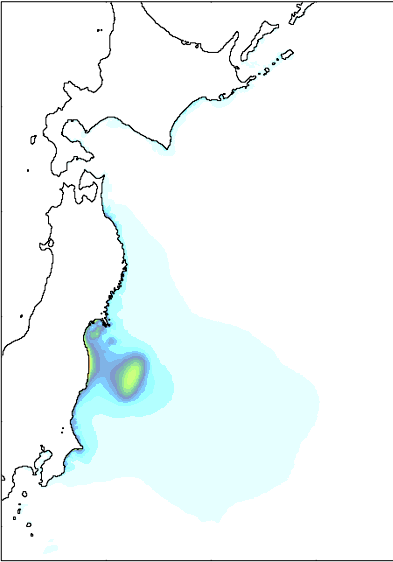
Model 10: d15L200u7



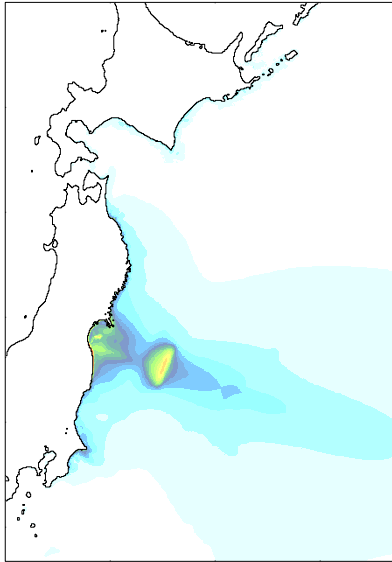
Model 11: d31L200u7



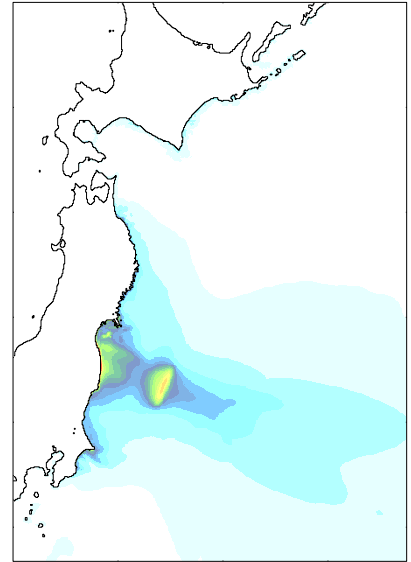
Model 12: d31L100u10s



Model 13: d15L100u10

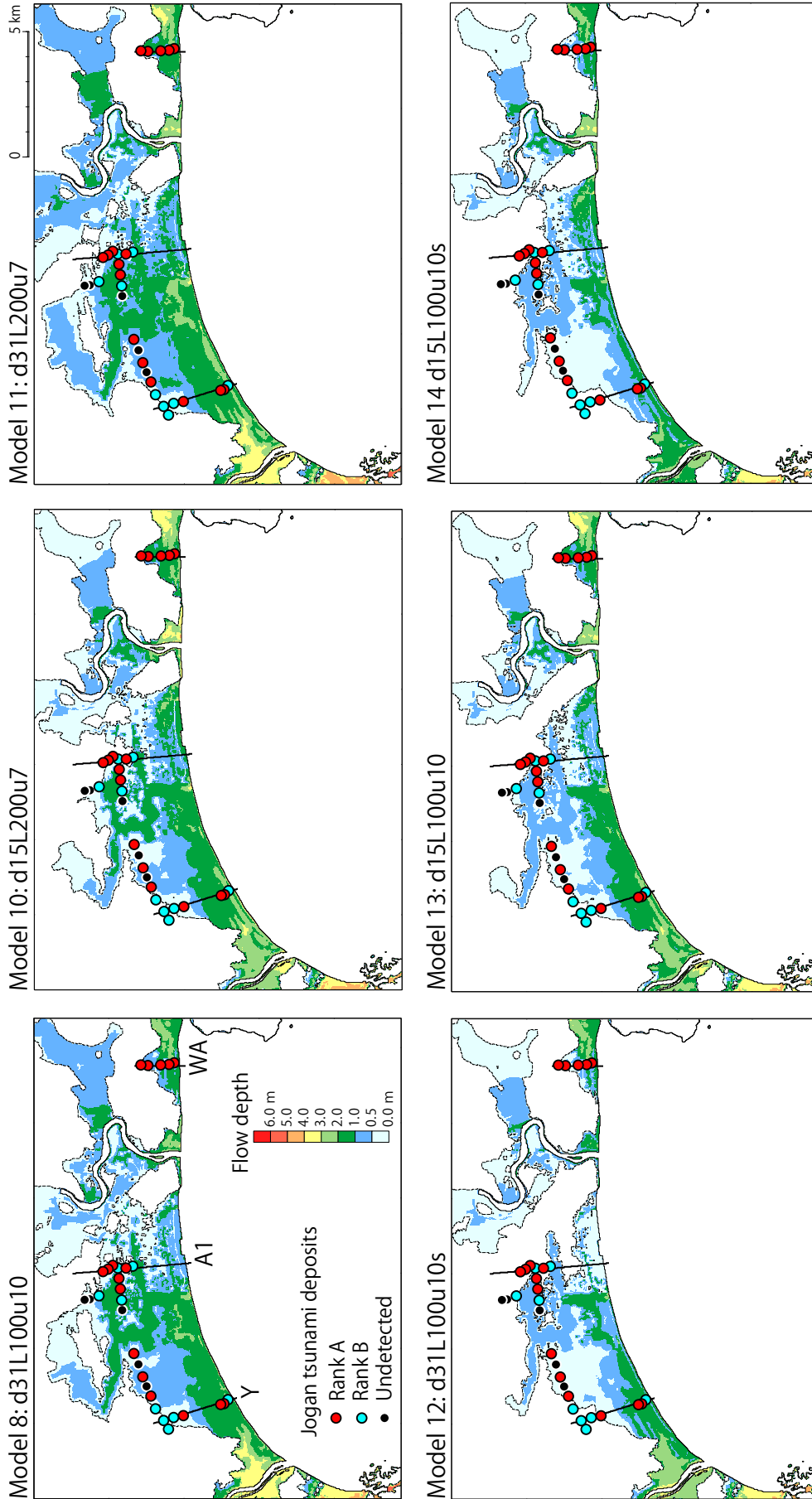


Model 14: d15L100u10s

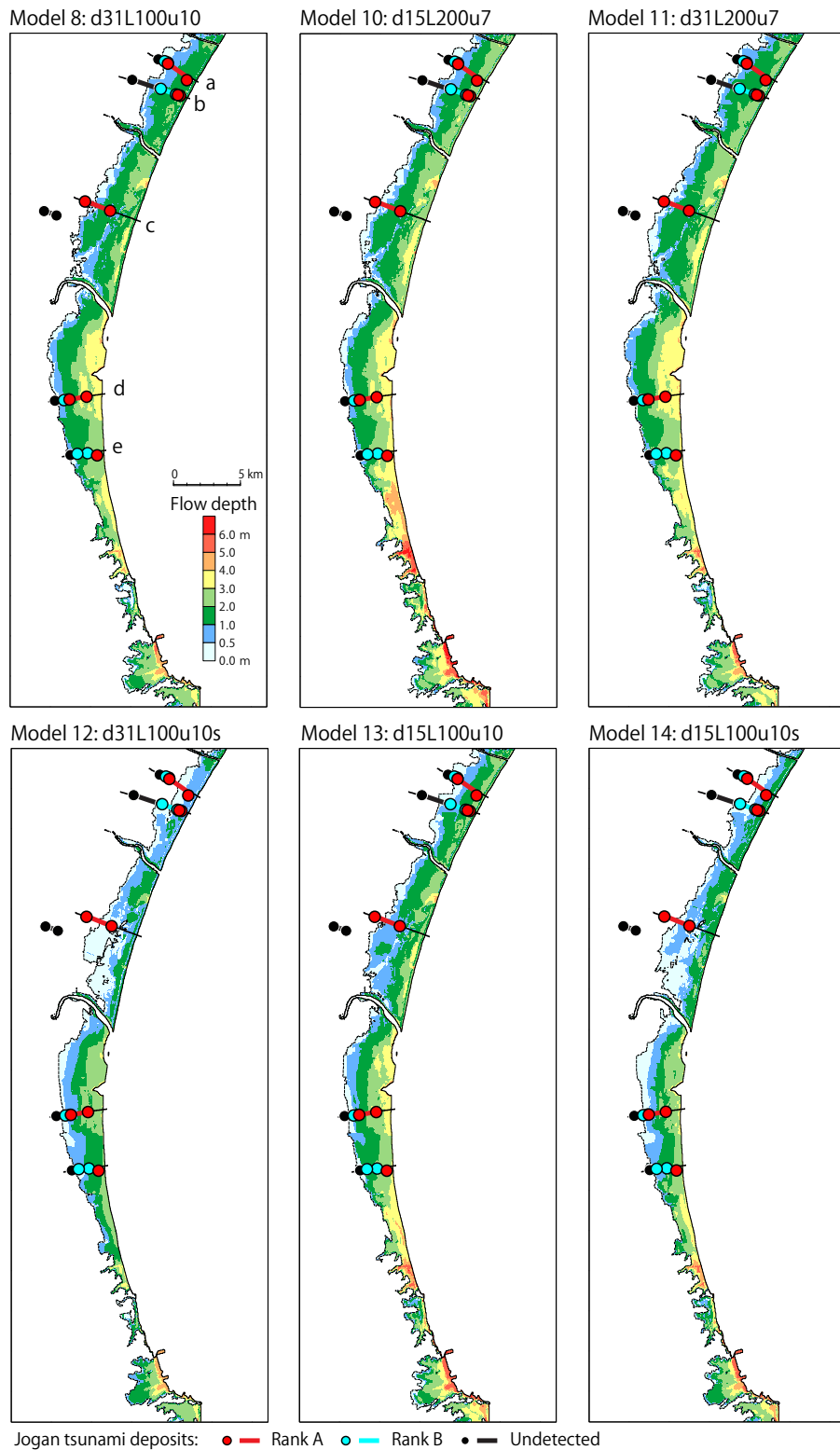


第 5 図. 各モデルによる最大水位分布.

Fig. 5. Maximum sea surface displacements for each model.

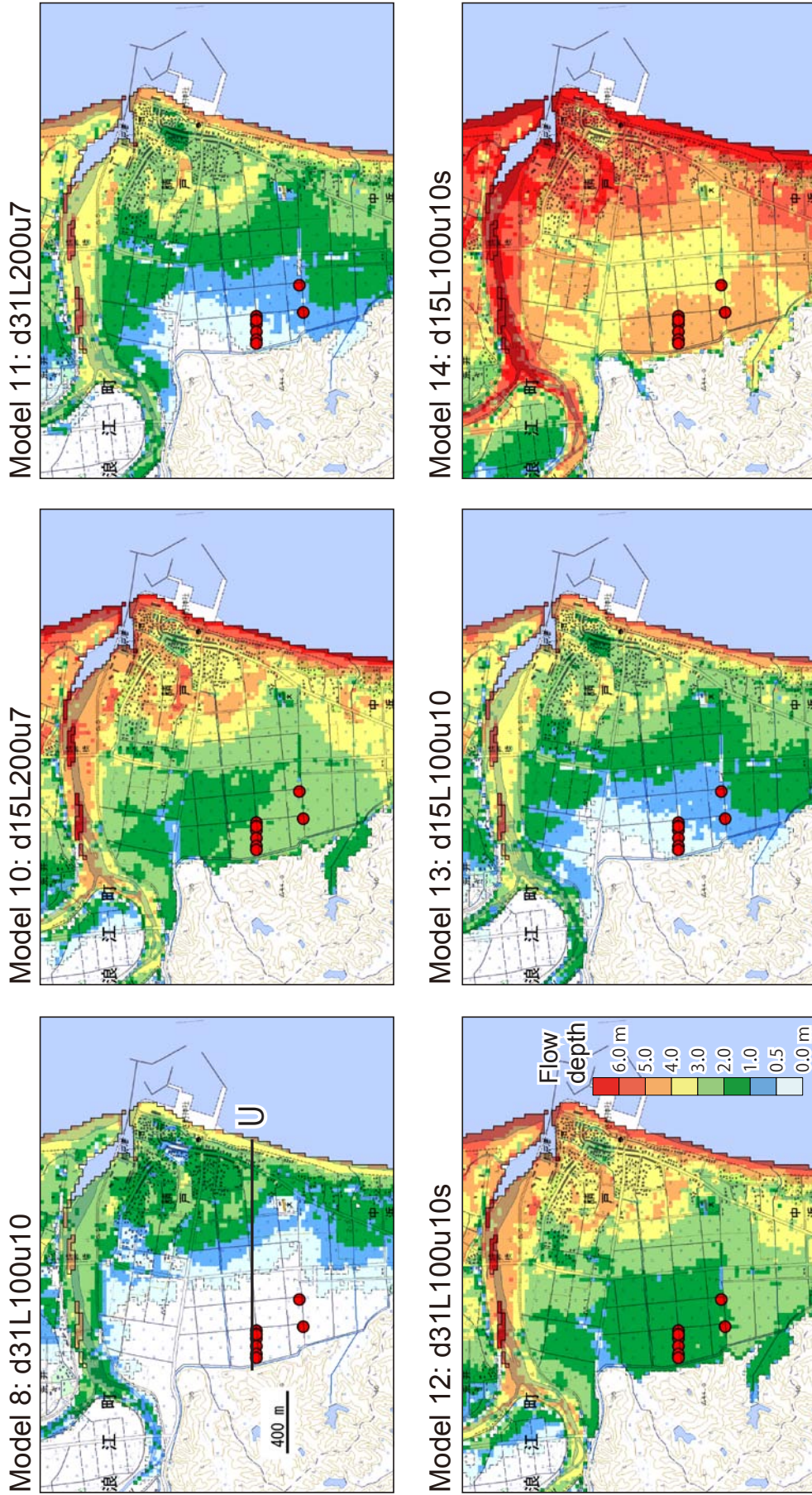


第 6 図. 各モデルによる石巻平野の最大浸水深と津波堆積物の分布. "WA", "A1", および "Y" と記した黒線は第 9a 図, および第 11 図に示す測線を表す.  
 Fig. 6. Maximum flow depth computed for each model and distribution of tsunami deposits (red or blue circles) in the Ishinomaki plain. Solid lines of "WA", "A1", and "Y" indicate profiles in Figs. 9a, 10, and 11. Red and blue circles indicate locations of assured (Rank A) and possible (Rank B) tsunami deposits of the Jogan tsunami, respectively. Black circles indicate excavated points where tsunami deposits are undetected.

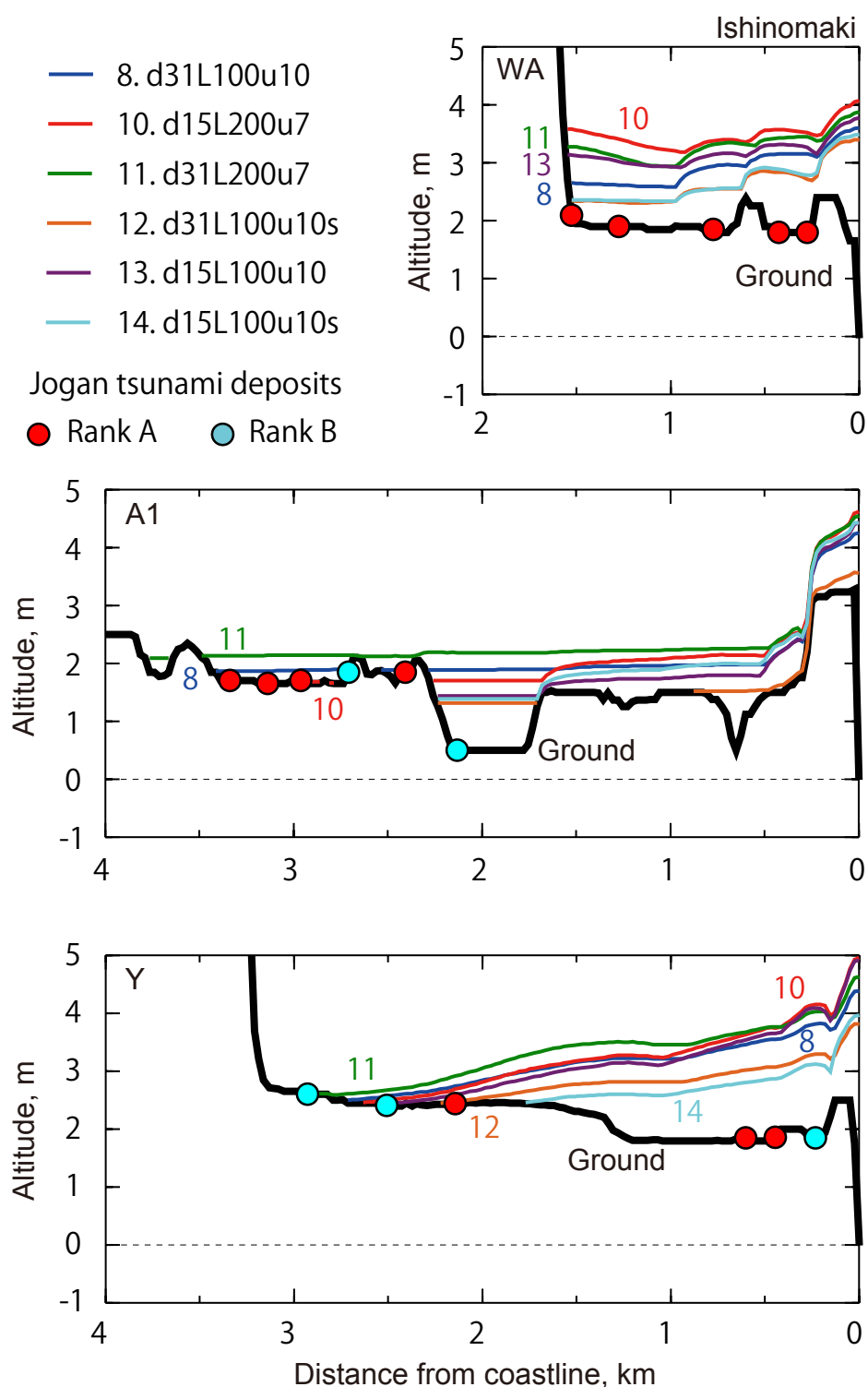


第 7 図. 各モデルによる仙台平野の最大浸水深と津波堆積物の分布. "a", "b", "c", "d", および "e" と記した黒線は第 9b 図, 第 9c 図, 第 10 図, および第 11 図に示す測線を表す.

Fig. 7. Maximum flow depth computed for each model and distribution of tsunami deposits (red or blue circles) in the Sendai plain. Solid lines of "a", "b", "c", "d", and "e" indicate profiles in Figs. 9b, 9c, 10, and 11. Red and blue circles indicate locations of assured (Rank A) and possible (Rank B) tsunami deposits of the Jogan tsunami, respectively. Black circles indicate excavated points where tsunami deposits are undetected.

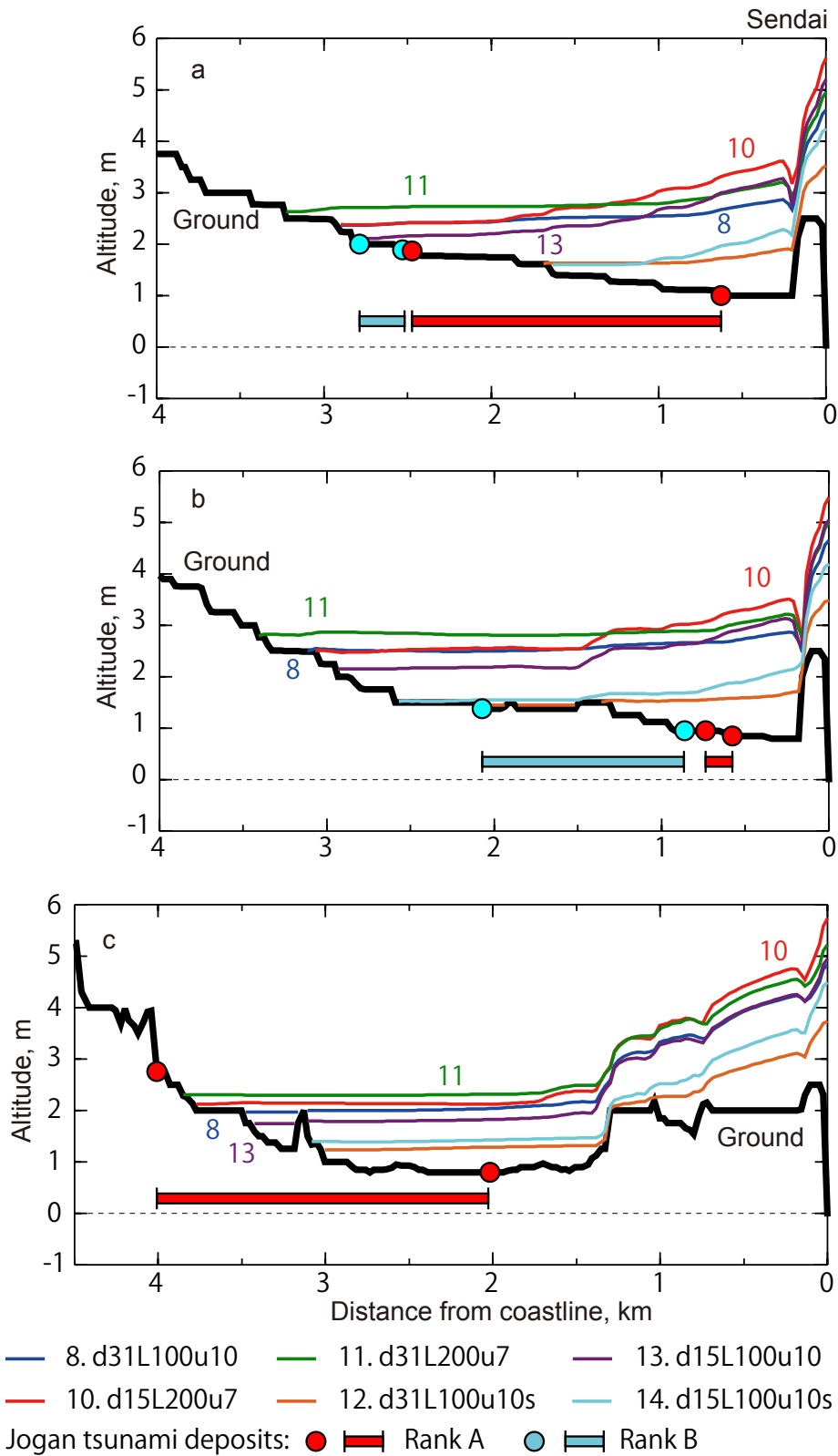


第8図. 各モデルによる請戸地区の最大浸水深と津波堆積物の分布. "U"と記した黒線は第9d図, および第11図に示す測線を表す.  
 Fig. 8. Maximum flow depth computed for each model and distribution of tsunami deposits (red or blue circles) in Ukedo. A solid line of "U" indicates a profile in Figs. 9d, 10, and 11. Red circles indicate locations of assured (Rank A) tsunami deposits of the Jogan tsunami.



第9a図. 石巻平野の3測線沿いの地形・津波水位断面図。津波堆積物の分布（宍倉・他, 2007）も示す。津波堆積物は最も近い測線上の点に投影しているため、津波堆積物の位置の標高とは異なる場合がある。

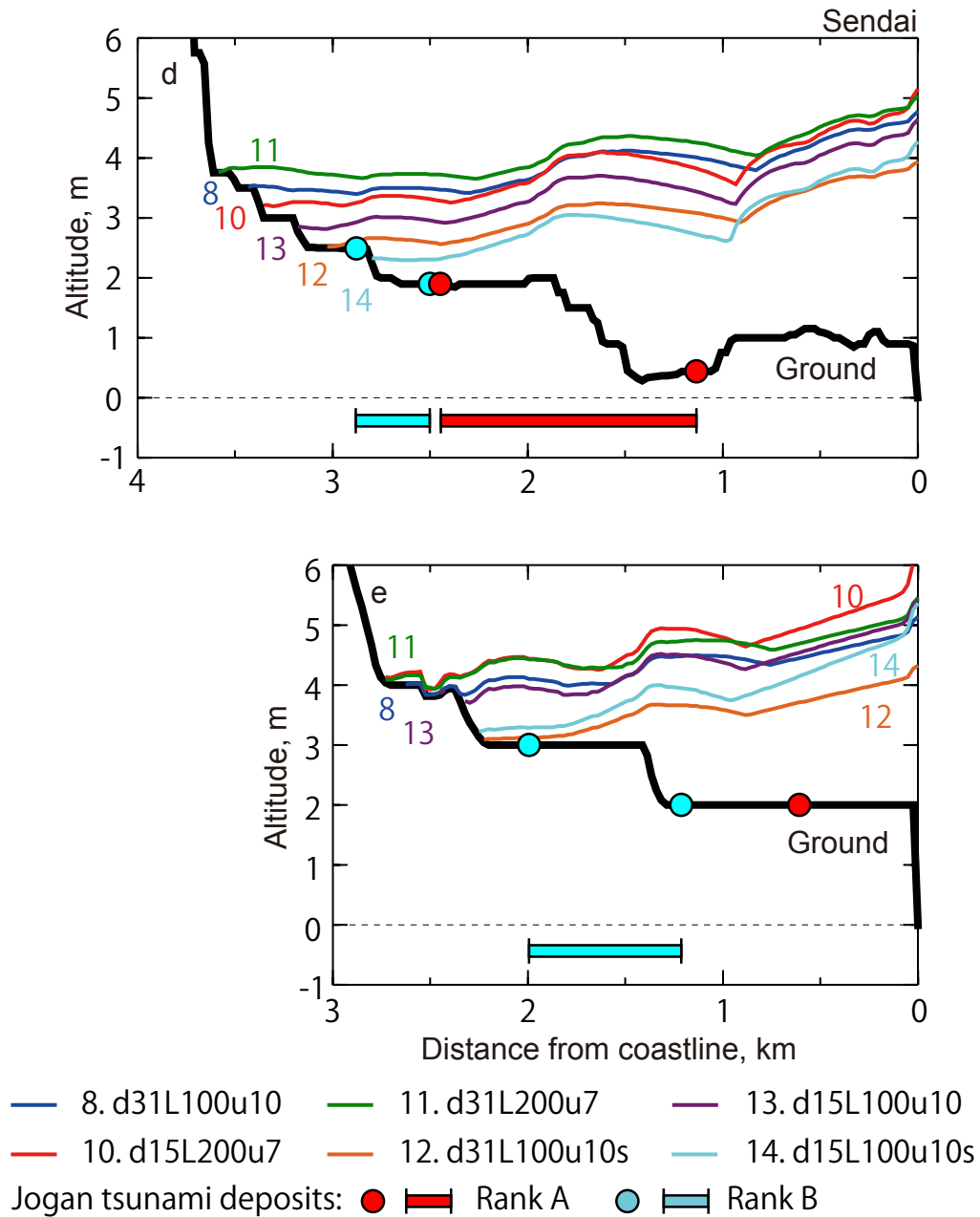
Fig. 9a. Topography and maximum water surface along three profiles in the Ishinomaki plain. Distribution of tsunami deposit (Shishikura *et al.*, 2007) is also shown. Because the locations of tsunami deposit are projected on the profiles, altitude of the deposits does not always indicate the actual altitude.



第9b図. 仙台平野の3測線沿いの地形・津波水位断面図。津波堆積物の分布(澤井・他, 2007; 2008)も示す。津波堆積物は最も近い測線上の点に投影しているため、津波堆積物の位置の標高とは異なる場合がある。赤色および青色のバーは、それぞれその範囲内に複数 Rank A および B の堆積物が発見されたことを意味する。

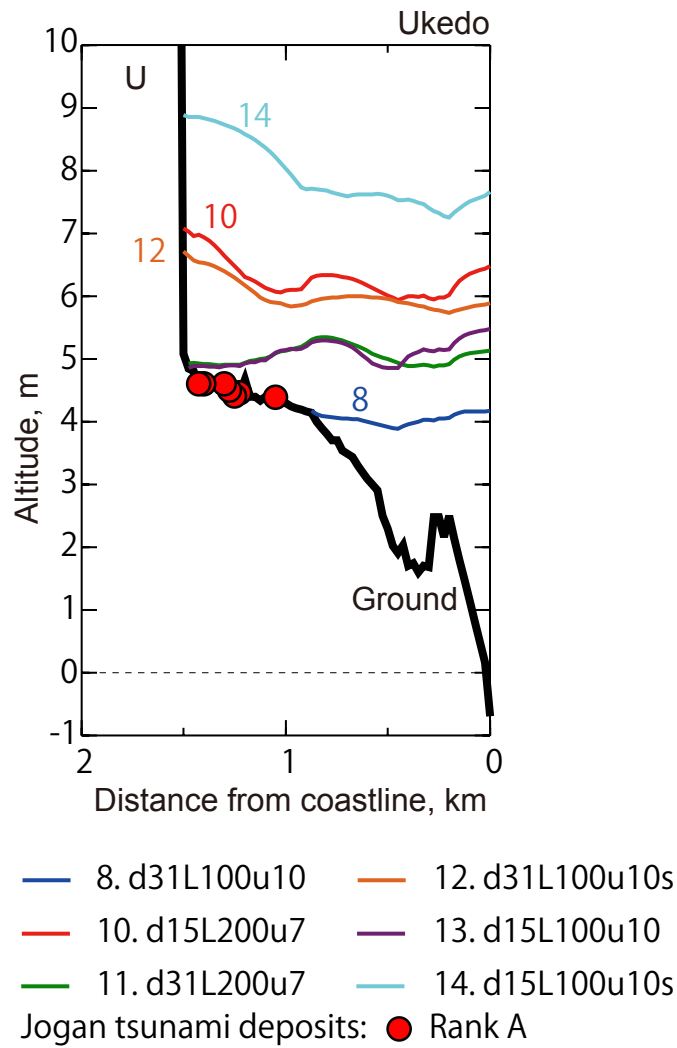
Fig. 9b. Topography and maximum water surface along three profiles in the Sendai plain. Distribution of tsunami deposit (Sawai *et al.*, 2007; 2008) is also shown. Because the locations of tsunami deposits are projected on the profiles, altitude of the deposits does not always indicate the actual altitude. Red and blue bar indicates range of multiple assured (Rank A) and possible (Rank B) tsunami deposits, respectively.





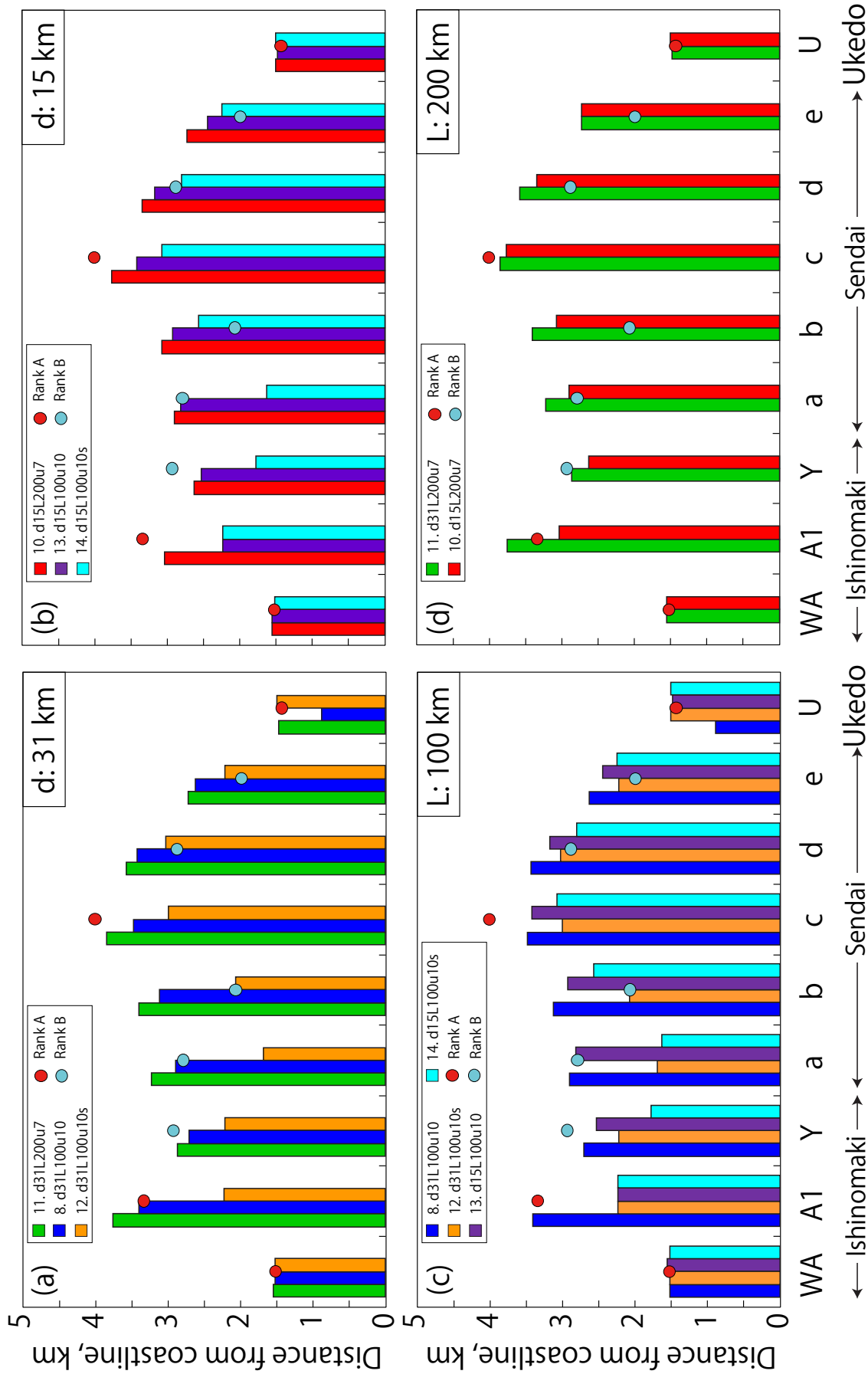
第 9c 図. 仙台平野の 2 測線沿いの地形・津波水位断面図. 津波堆積物の分布 (澤井・他, 2007; 2008) も示す. 津波堆積物は最も近い測線上の点に投影しているため, 津波堆積物の位置の標高とは異なる場合がある. 赤色および青色のバーは, それぞれその範囲内に複数 Rank A および B の堆積物が発見されたことを意味する.

Fig. 9c. Topography and maximum water surface along two profiles in the Sendai plain. Distribution of tsunami deposit (Sawai *et al.*, 2007; 2008) is also shown. Because the locations of tsunami deposits are projected on the profiles, altitude of the deposits does not always indicate the actual altitude. Red and blue bar indicates range of multiple assured (Rank A) and possible (Rank B) tsunami deposits, respectively.



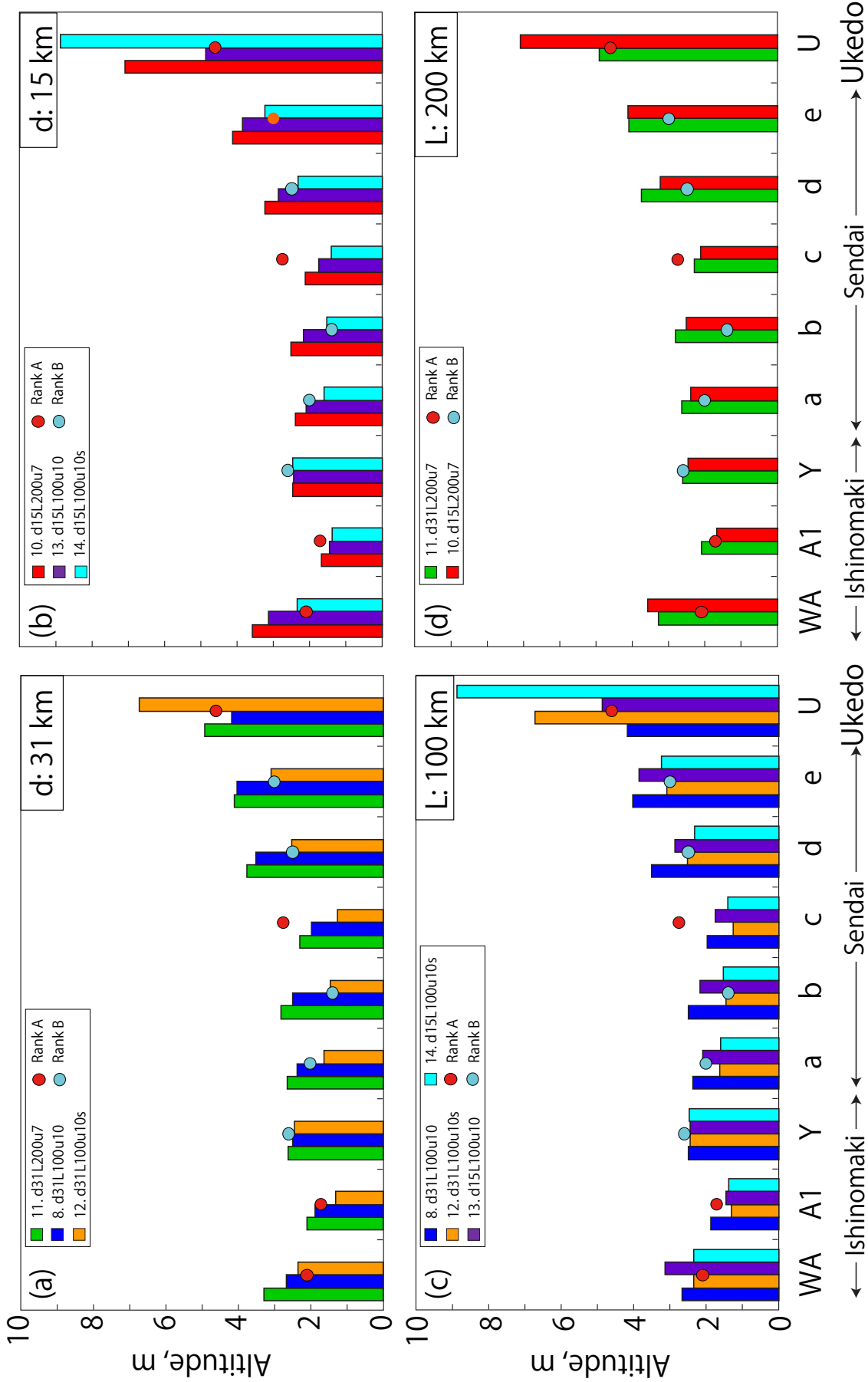
第9d図. 請戸の測線沿いの地形・津波水位断面図. 津波堆積物の分布(今泉・他2008)も示す. 津波堆積物は最も近い測線上の点に投影しているため, 津波堆積物の位置の標高とは異なる場合がある.

Fig. 9d. Topography and maximum water surface along a profile in Ukedo. Distribution of tsunami deposit (Imaizumi *et al.*, 2008) is also shown. Because the locations of tsunami deposits are projected on the profiles, altitude of the deposits does not always indicate the actual altitude.



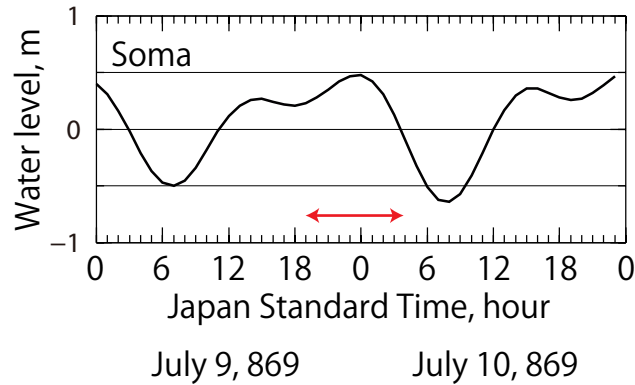
第 10 図. 石巻平野・仙台平野・請戸の 9 測線沿いの津波浸水距離と当時の海岸線から最も内陸の津波堆積物までの距離との比較. (a) 断層上端深さ  $d$  が 31 km のモデルによる比較. (b)  $d$  が 15 km のモデルによる比較. (c) 断層長さ  $L$  が 100 km のモデルによる比較. (d)  $L$  が 200 km のモデルによる比較.

Fig. 10. Comparison of computed inundation distance and distance between the estimated coast and location of the most inland tsunami deposits along nine profiles in the Ishinomaki plain, Sendai plain, and Ukedo, (a) for the models of the upper depth  $d$  of 31 km, for (b) the models of the depth of 15 km, (c) for the models of fault length  $L$  of 100 km, and (d) for the models of the length of 200 km.



第11図. 石巻平野・仙台平野・請戸の9測線沿いの津波高さともも内陸の津波堆積物の標高との比較. (a) 断層上端深さdが31kmのモデルによる比較.

(b) dが15kmのモデルによる比較. (c) 断層長さLが100kmのモデルによる比較. (d) Lが200kmのモデルによる比較.  
 Fig. 11. Comparison of runup heights and altitude of the most inland tsunami deposits along nine profiles in the Ishinomaki plain, Sendai plain, and Ukedo, (a) for the models of the upper depth d of 31 km, (b) for the models of the depth of 15 km, (c) for the models of fault length L of 100 km, and (d) for the models of the length of 200 km.



第 12 図. 福島県相馬市における貞観津波当時の推算天文潮位.  
貞観地震の発生時刻は赤線内に含まれると考えられる.  
Fig. 12. Calculated astronomical tide level at Soma, Fukushima prefecture, at the time of the Jogan earthquake. Occurrence of the earthquake is considered to be in the night, as shown by the double-headed arrow in red.

付表. 津波堆積物のランクの再評価および測線上の海岸線からの距離の再計算に伴う, 佐竹・他 (2008) の第 2 表の改訂版. 貞観津波の 10 個のモデルから計算した浸水距離 (km) と最も内陸の位置との比較を表す.

Appendix table. Revision of Table 2 in Satake *et al.* (2008) associated with the re-estimation of reliability of the Jogan tsunami deposits. Inundation distances (in km) along profiles computed for 10 models of the Jogan tsunami, compared with the distances (in km) between the estimated coast line and the most inland tsunami deposits. The lowest two lines indicate averages and standard deviations of distance ratio (simulated inundation distance/ furthest tsunami deposit from coast). Both rank A and B deposits are included in the calculations. When the distance ratio becomes more than 1.0, it is assumed to be 1.0 for the calculation of average and standard deviation. The averages and standard deviations shown in bold are the preferred models.

Distance from coastline, km											
Site	Tsunami deposit	Model 1 Normal fault	Model 2 Tsunami eq.	Model 3 d15W050	Model 4 d31W050	Model 5 d15W100	Model 6 d31W100	Model 7 d31L300	Model 8 d31L100u10	Model 9 Active fault	Model 10 d15W100u7
Ishinomaki											
WA	1.5	0.1	0.1	0.5	0.5	1.5	1.5	1.5	1.5	0.1	1.6
A1	3.3	0.0	0.0	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	3.4	0.0	3.0
Y	2.9	0.0	0.0	1.3	1.3	1.5	1.7	1.3	2.7	0.0	2.6
Sendai											
a	2.8	0.0	0.9	1.6	1.3	1.8	1.8	1.3	2.9	0.0	2.9
b	2.1	0.0	0.9	2.1	1.2	2.6	2.6	1.2	3.1	0.0	3.1
c	4.0	0.0	1.6	3.0	2.8	3.0	3.1	2.9	3.5	0.2	3.8
d	2.9	0.2	1.6	2.0	1.9	2.8	3.0	1.9	3.4	1.7	3.4
e	2.0	0.0	1.3	1.6	1.4	2.2	2.2	1.4	2.6	0.8	2.7
Distance ratio (Sim./Dep.)	Average	0.01	0.31	0.66	0.56	0.82	0.83	0.65	<b>0.97</b>	0.14	<b>0.97</b>
	Std. Dev.	0.02	0.26	0.21	0.14	0.19	0.18	0.18	<b>0.05</b>	0.23	<b>0.04</b>