

高潮災害時における沿岸農地への土砂流入部の予測モデル

桐 博英¹・中矢哲郎²・丹治 肇³

沿岸部の農地における高潮や津波の被害では、海水の浸入に伴う塩害ばかりでなく、海水とともに流入した土砂の除去が復旧上の課題である。本研究では、沿岸農地への土砂流入経路の推定を目的とした土砂流入箇所推定の、越水部分の最大流速を指標にした比較的単純なモデルにより、試みた。9918 号台風に伴う八代海高潮における沿岸農地の被災を再現し、土砂堆積箇所の調査結果と比較したところ、主要な土砂流入箇所の推定ができた。氾濫域における土砂の堆積域を予測するには、土砂の流動・堆積の詳細なモデルが必要であるが、本手法により、復旧に時間と費用を要する土砂流入の対策を効果的に行うことが可能になる。

1. はじめに

沿岸部の農地は、圃場の面積が大きく生産性が高い反面、高潮や津波などの被害を受けやすい。沿岸部の農地は、干拓や大規模圃場整備など多くの資金が投入されている一方で、災害時には住民の生命、社会インフラや生活基盤への影響が少ないことから、復旧への取組みが遅れがちである。

沿岸部の農地における高潮や津波被害では、海水の浸入に伴う塩害ばかりでなく、写真-1に見られるように、海水とともに運ばれた土砂の堆積が問題となる。農地では、土砂が堆積したり、塩分の洗い出しが見込めない場合、圃場毎に表土(作土層)を剥ぎ取り、交換する工法がとられ、多くの時間と費用を要する。さらに、農地では、次の作期までに復旧事業を終える必要があり、速やかな復旧が求められることから、災害リスクの評価は重要な課題である。

一方、近年、高潮災害のリスク評価システムは、佐藤ら(2000)に見られるような高潮の発生リスクを評価するものから、実際に高潮が発生した場合の湛水被害の推定へと発展が展望されている(Takahashi ら, 2005)。農地では、あらかじめ土砂が流入する危険性が高い箇所が推定できれば、効果的な対策が可能となり、農地の高潮被害を減らすことが期待できる。

本研究では、沿岸部の農地における高潮被害のうち、特に土砂流入対策を効果的に行うことを目的として、数値解析による土砂流入箇所の推定を試みた。

2. 解析モデル

(1) 氾濫解析モデルの概要

高潮や津波による被害は、海岸堤防からの氾濫だけで

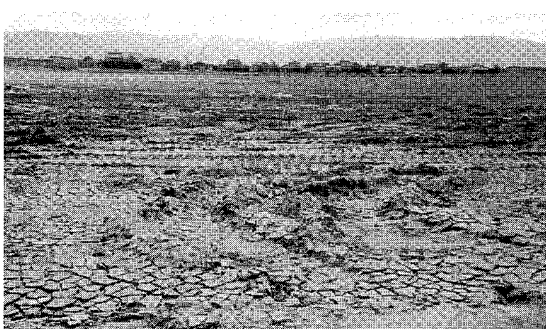


写真-1 高潮による農地への土砂流入の例(沿岸域の水田に潟土が堆積、乾燥している)

なく、河川を遡上し、上流域の低位部からの浸水が被害拡大の一因となることがわかっている(中矢ら, 2005 など)。沿岸域に位置する農地では、河川や整備された排水路網が浸水被害の拡大に影響することが予想される。このため、本研究では、高潮の氾濫解析には、水路網が整備された農地における氾濫解析を目的として開発された、氾濫域を 2 次元、水路・河川を 1 次元でモデル化したモデル(桐ら, 2004a)を用いた。本モデルの詳細は桐ら(2004a)に譲ることとし、本章ではその概要を述べる。

本モデルは、高潮氾濫域を 2 次元浅水長波流れ、農地内に整備されている水路や河川を 1 次元不定流でモデル化したものである。水路と氾濫域の解析において、基礎方程式は、水路・河川では式(1)、(2)で表される 1 次元不定流の式、海域、氾濫域では式(3)、(4)、(5)で表される 2 次元浅水方程式を用いる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = q \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = q \dots \dots \dots (3)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) =$$

1 正会員 (独法)農業・食品産業技術総合研究機構
2 正会員 博(農) (独法)農業・食品産業技術総合研究機構
3 正会員 農博 (独法)農業・食品産業技術総合研究機構

$$fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \dots \dots \dots (4)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{M^2}{D} \right) =$$

$$-fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 M 、 N はそれぞれ x 、 y 方向の流量フラックス、 η は静水面からの水位偏差 (m)、 f はコリオリ係数、 D は水深 (m)、 g は重力加速度 (m/s^2)、 n はマンニングの粗度係数、 ρ は水の密度、である。また、 τ_{bx} 、 τ_{by} は底面摩擦応力であり、式 (6)、(7) で表される。

$$\tau_{bx} = \frac{gn^2 |M| M}{D^{7/3}} \dots \dots \dots (6)$$

$$\tau_{by} = \frac{gn^2 |N| N}{D^{7/3}} \dots \dots \dots (7)$$

式 (4)、(5) 中の A_h は水平渦動粘性係数であり、要素面積 $S(\text{m}^2)$ を基に Richardson の 4/3 乗則により式 (8) で与えた。

$$A_h = 4.64 \times 10^{-4} \times (2S)^{2/3} \dots \dots \dots (8)$$

なお、式 (1)、(2) で表される水路の基礎方程式において、 x 方向は水路流下方向とする。高潮による氾濫域の解析は、式 (1)～(5) の基礎方程式を空間方向には Galerkin 有限要素法、時間方向には 2 次精度の予測子修正子法により離散化した。また、氾濫域の移動境界手法には、Kawahara・Umetsu (1986) のモデルを用いて解析した。

(2) 土砂流入部推定手法

本研究では、沿岸部の農地を対象にした高潮氾濫モデルに以下の土砂移動の判定基準を組み込み、高潮災害時の土砂流入箇所を推定した。

河川における河床砂礫の移動限界は、底質の粒径から移動限界速度を求め、評価する手法がとられている。このため、沿岸域における土砂の移動限界においても、高潮氾濫解析で得られた流速を判定基準とし、底質の種類により異なる判定基準を設定する必要があると考えられる。一方、有明海や八代海のように底質が極めて細粒の粘土質の場合、河川のような砂礫とは異なり、土粒子間の吸着力が大きく、流速が速くなると底質の塊が剥がれるように流れ出すことが知られている。

以上のことから、本解析では、土砂流入部の推定には、高潮氾濫解析で得られた最大流速を元に判定することとした。

3. 9918 号台風による高潮被害との比較

(1) 9918 号台風による八代海高潮の概要

本モデルの検証例として、直近の台風で高潮による農

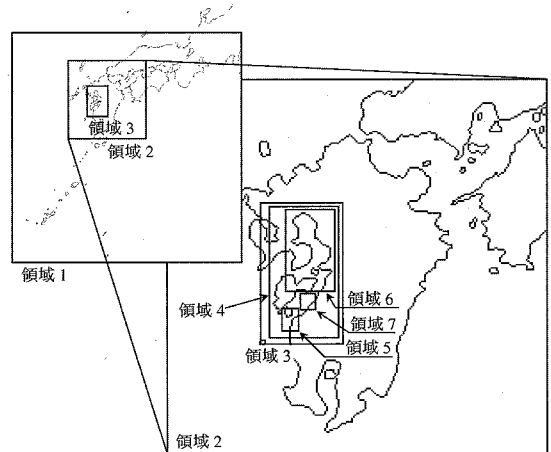


図-1 9918 号台風による気圧、風速分布解析領域 (桐ら (2004b))

地被害が大きかった台風 9918 号に伴う八代海高潮を再現した。台風 9918 号は、1999 年 9 月 23 日夜深から 9 月 24 日早朝にかけて九州地方に上陸した。この台風は、台風 9119 号よりも規模が小さかったが、九州地方に接近した時間帯が大潮の満潮に近かったため、各地で高潮の被害をもたらした。台風 9918 号による高潮では、八代海湾奥部の松合地区で 12 名の犠牲者が出た (滝川ら、2000) のをはじめとして、山口県など多くの被害が報告されている。

一方、本台風による農地への被害では、松合地区の対岸の旧不知火干拓地において、高潮による浸水で排水路の損壊や塩害および濁土の堆積などの被害があった (久保田ら、2002)。

(2) 沿岸農地における高潮の再現

高潮の解析では、台風による気圧分布は Myers の式を用い、差分法により得られた気圧分布から傾度風を求め、これらを外力として高潮の氾濫を解析した。

台風に伴う気圧および風速分布の推定に用いた解析領域を示したのが図-1 である。図-1 中の領域 6 が有明海と八代海に相当し、格子幅は 200 m である。なお、台風モデルのパラメータは、桐ら (2004b) で行った 9918 台風の再現計算で得られたものを用い、有明海周辺の 4 地点の観測データとの比較により決定した。

八代海湾奥部の高潮および氾濫の解析領域を示したのが図-2 である。本解析では、解析領域を有明海に隣接する八代海の湾奥部に位置する松合地区の対岸側に当たる不知火干拓で造成された農地とした。高潮の氾濫解析に用いた有限要素分割図を図-3 に示す。解析領域のうち、八代海湾奥部と氾濫域を三角形一次要素、小河川および海岸堤防を線要素で分割した。本要素分割は、総節点数は 6,385、要素数は、三角形要素が 12,140、線要素が 942 である。また、要素サイズ (単位: m、三角形要

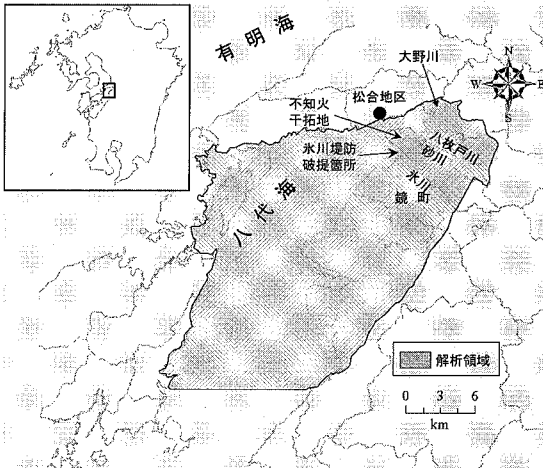


図-2 解析領域位置図



図-3 八代海湾奥部の有限要素分割図

表-1 要素サイズ一覧 (単位 m)

	平均	最大	最小
八代海	330.224	720.650	95.284
氾濫域	210.588	449.851	105.003
水路, 堤防	248.436	471.796	94.625

素は、 $\sqrt{2S}$ で評価)を領域別に整理すると表-1のとおりである。

解析では、1999年9月23日午前0時から9月24日正午までを再現した。

図-4は、高潮が襲来した1999年9月24日の八代港における潮位変化の再現結果を実測値(滝川, 2000)と比較したものである。本解析による潮位の再現結果では、2つ観測されている潮位のピークを再現できていない。この高潮の2つ目のピークは、自由進行波となり南下した高潮が八代海南端で反射し、再度北上した長波成分で

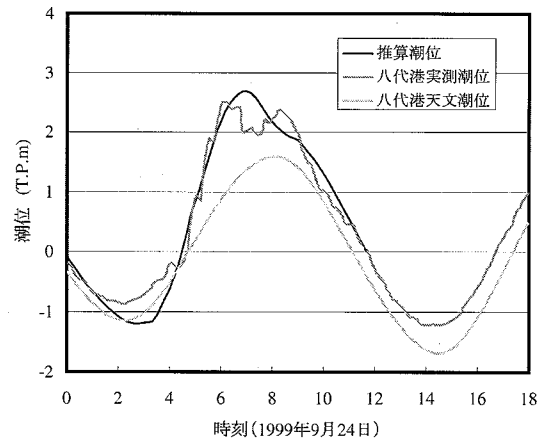


図-4 八代港における高潮襲来時の潮位の変化

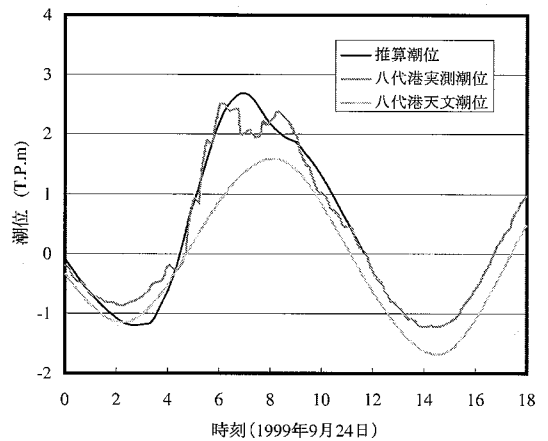


図-5 不知火干拓地前面と八代港における推算潮位の比較

あることが山下・中川(2001)により指摘されている。このため、本解析で用いた解析領域では、この反射波の影響を再現することができなかったものと考えられる。

一方、不知火干拓地における調整池と潮遊池の高潮来襲時の水位変化を海岸堤防前面の潮位の解析結果とともに示したのが図-5である。本解析では、不知火干拓前面で最大潮位がT.P.+4.45mを記録した。この潮位は、近隣の砂川、氷川などでの調査結果であるT.P.+4.1~4.2mやや高めであった。しかし、対岸ではあるが、氷川などよりも近い距離にある松合地区での高潮の痕跡高T.P.+4.1~4.5m(山田ら, 2000)と比較すると、ほぼ妥当な値を示していると考えられる。

一方、高潮による被害域を、衛星データをもとに判定した水稻栽培への影響範囲と比較した。図-6は、高潮災害の13日後である1999年10月7日に取得されたLandsat TMデータから抽出した高潮被災農地の状況である(久保田ら, 2002)。図-6において、色の濃い部分が長時間にわたって(最長6時間程度)海水が湛水し、被

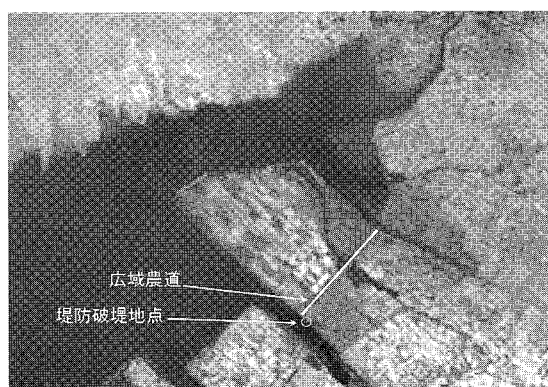


図-6 衛星画像による高潮被災農地の分布状況
(久保田ら, 2002に加筆)

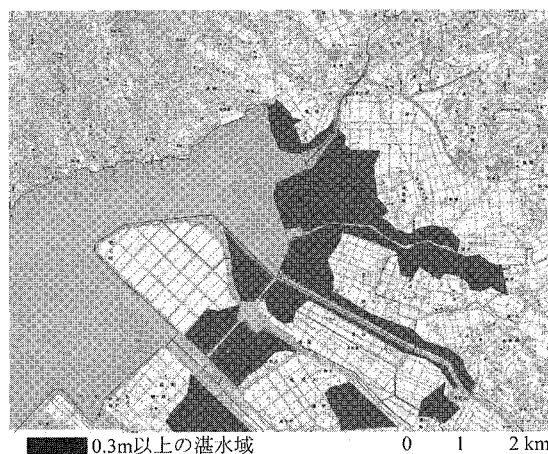


図-7 高潮による湛水域再現結果 (湛水深 0.3m 以上)

害を受けたと考えられる農地を表している。

台風 9918 号に伴う高潮では、9 月 24 日午前 6 時頃に氷川の河川堤防が破堤し、海水が氾濫したことがわかっている。破堤地点を衛星データによる農地被害と比較すると、被害農地が破堤地点よりも上流側に広がっていることがわかる。これは、破堤地点直下流側を走る広域農道の標高が高く、堤防として機能したため、破堤地点から流入した海水の下流側農地への氾濫を防いだと考えられる。

図-7 に示すのは、高潮氾濫解析の結果、湛水深が 0.3 m を越えた範囲を示したものである。陸地の地盤標高データには国土地理院発行の 50 m メッシュを用いており、氾濫解析を行うには精度が充分ではないことから、氾濫域の範囲については、充分でない部分がある。しかし、本解析による結果でも氷川の堤防破堤地点よりも上流側に湛水深が深い領域が出たことが再現されているなど、土砂流入箇所を推定するには充分な精度であったと

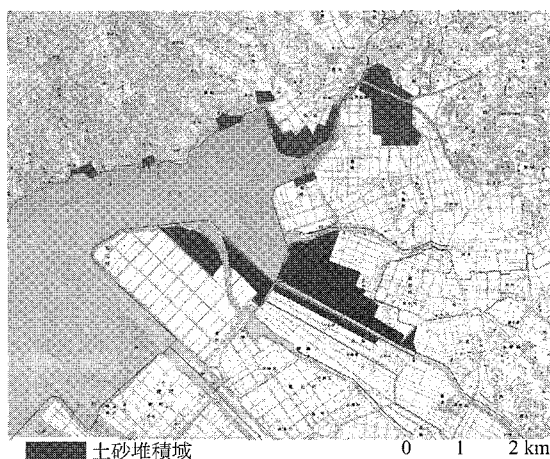


図-8 台風 9918 号高潮に伴う土砂堆積域 (調査結果)

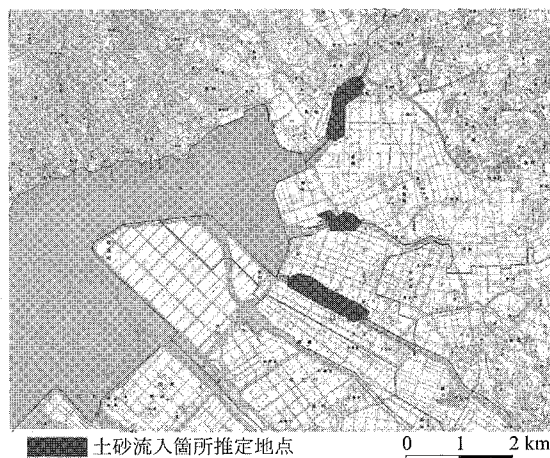


図-9 台風 9918 号高潮に伴う土砂流入箇所の推定結果

考えられる。

(3) 土砂流入箇所の推定結果

解析対象の八代海湾奥部では、比較的粘土質の底質をもつ干潟が広がっており、有明海内部の潟土の流動限界といわれている 1.6 m/s を土砂移動の判定基準とした。

台風 9918 号高潮による土砂堆積域の調査結果を図-8 に示す。土砂堆積域の調査結果では、不知火干拓地北側を流れる砂川および八枚戸川（砂川と八枚戸川は、並列に並んで八代海に注ぐ）の両岸に土砂の堆積が確認できる。また、八代海最奥部の大野川では、川を遡上した高潮が上流部で氾濫し、土砂を堆積させたことがわかる。

本解析で得られた土砂流入箇所を示したのが図-9 である。図-9 の予測では、砂川・八枚戸川から土砂が流入したことが推定されており、この結果は、実際の現象をほぼ再現していると考えられる。

八枚戸川と大野川の間付付近を流れる五丁川の河口に

において、極めて短い区間であるが、土砂流入箇所が推定されている。この地点は、現地では河口が汽水湖を形成しており、汽水湖の堤防を解析で十分に再現できず、流速が過大評価されたものと判断できる。

また、大野川では、河口部右岸側と上流域において土砂の堆積が確認されており、本解析でも、大野川河口部の河川堤防から上流域の土砂の流入が推定されている。大野川河口部右岸側に堆積した土砂の流入源は、堆積域の結果だけでは判断するのが困難ではあるが、本解析で推定された流入地点は、実際の土砂流入地点よりもやや上流側に位置すると考えられる。しかし、本解析では大野川を遡上した上流域での土砂流入の危険性を推定しており、良い推定結果が得られたと考えられる。以上のことから、本解析による土砂流入箇所の推定結果は、現地調査結果による土砂堆積域から推定される土砂流入箇所をほぼ再現していると判断した。

4. おわりに

本研究では、高潮とともに沿岸部の農地に流入する土砂の流入箇所を推定することを目的として、最大流速を指標にした比較的単純なモデルを用い、その再現性を検証した。

台風 9918 号による八代海湾奥部の農地への土砂流入現象を再現し、現地調査の結果と比較したところ、一部において過大評価した部分もあったが、実際の土砂流入の状況をほぼ再現できたと考えられた。この結果は、復旧に時間と費用を要する流入土砂への対策を行う箇所を特定する手法へと発展が期待される。本研究で用いたデータは、沿岸海域地形図や 50 m メッシュ標高データなど、比較的容易に入手が可能なものが多く、海域の底質の状況がわかれば他の地域にも容易に適用が可能である。

一方、今回の解析でも明らかになったが、土砂の流入現象は、高潮の氾濫解析に左右される部分が多い。しかし、高潮時の潮位などの解析結果が 100 % 当時の現象を再現しているとはいいい切れず、潮位がわずかでも堤防高を超えると計算では氾濫が生じる。本研究で主眼とした土砂流入箇所の推定には、氾濫域に関しては高精度の解析が必要ではないが、高潮による流れの再現性が高まれば、土砂の流動・堆積をモデル化することで、氾濫域における土砂の堆積域を予測へと発展させることができる。このような土砂堆積域の分布の予測は、高潮による農地

被害額の把握を可能にし、海岸事業の費用の算定に有効であると考えられ、今後の検討課題である。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金（課題番号：18688014）の助成を得て実施した。また、（独法）農業・食品産業技術総合研究機構 久保田富次郎主任研究員からは、衛星データによる被害農地の分析結果を御提供いただいた。なお、本研究で行った解析には、農林水産研究計算センターの大規模アプリケーションサーバを使用した。ここに記し、関係各位に深謝の意を表す。

参 考 文 献

- 桐 博英・久保田富次郎・登坂宣好・丹治 肇・中矢哲郎 (2004a)：有限要素法による小水路を考慮した農地氾濫モデル、応用力学論文集，土木学会，Vol.7 No.1，pp. 423-430
- 桐 博英・丹治 肇・中矢哲郎 (2004b)：地球温暖化後の台風に伴う高潮潮位偏差の変化，海岸工学論文集，第 51 巻，pp. 241-245
- 久保田富次郎・大場和彦・山田正雄 (2002)：台風 9918 号による干拓地の高潮災害と作付への影響，農業土木学会誌，70 巻 5 号，pp. 49-52
- 佐藤孝夫・山本 悟・橋本典明・平石哲也・北澤壮介・松島健滋・大川都夫 (2000)：周防灘海域における台風 9918 号による高潮被害および危険度判定手法について，海岸工学論文集，第 47 巻，pp. 316-320
- 滝川 清 (2000)：台風 9918 号による不知火海高潮災害 その残したもの，土木学会誌，Vol.85，pp. 41-45
- 滝川 清・田淵幹修・山田文彦・井手俊範 (2000)：台風 9918 号による不知火海海岸の被災特性，海岸工学論文集，第 47 巻，pp. 296-300
- 中矢哲郎・丹治 肇・桐 博英 (2005)：インド洋津波によるタイ南部農業被害の現地調査，海岸工学論文集，第 52 巻，pp. 1361-1365
- 山下隆男・中川勇樹 (2001)：白波碎波せん断応力を考慮した波浪・高潮混合モデルによる台風 9918 号による八代海の高潮の再現，海岸工学論文集，第 48 巻，pp. 291-295
- 山田文彦・滝川 清・永野良祐 (2000)：台風 9918 号による不知火町松合地区高潮氾濫の災害特性とその数値解析，海岸工学論文集，第 47 巻，pp. 301-305
- Kawahara, M. and T. Umetsu (1986)：Finite element method for moving boundary problems in river flow, Int. J. for Num. Method in Fluids, Vol 6, pp. 365-386
- Takahashi, S., H. Kawai, T. Tomita, and T. Takayama (2005)：Proposal of real time of storm surge based on prepared scenarios, Proc. of the 3rd International Conference on Asian and Pacific Coasts, pp. 307-310