土木学会論文集B2（海岸工学）
Vol. 66，No.1，2010，196-200

高波の影響を考慮した高潮・高波氾濫モデルの構築とその精度検証

Development of Storm Surge and High Wave-Induced Inundation Model Considering Influence of High Wave and Its Accuracy Validation

川崎浩司[1]・丹羽竜也[2]・水谷法美[3]

Koji KAWASAKI, Tatsuya NIWA and Norimi MIZUTANI

A storm surge and high wave-induced inundation model was developed in this study, which consists of the Myers-based typhoon model, a depth-averaged flow model with an one-way nesting method, the wave model SWAN and an inundation flow model using a CIP method. The influence of high wave on storm surge and inundation flow was taken into account by adding the half value of the siginificant wave height obtained from the SWAN to storm surge fields at each time step. The validity of the model was verified by comparing with the experimental result of flood inudation due to dam break and the observation data of storm surge and inundation induced by Ise bay typhoon.

1. はじめに

近年，地球温暖化に伴う台風の強大化が指摘されており，高潮・高波災害の増大が懸念されている．高潮・高波災害を事前に検討する手段の一つとして，数値計算は有効であり，これまで数多くの数値モデルが開発されてきた．例えば，柴木ら（2008）は，越流と越波に起因して発生する高潮浸水被害を表現した数値計算手法を提案し，伊勢湾台風来襲時における伊勢湾奥部の浸水状況を再現している．しかし，これまでの数値モデルでは，高潮時の陸域氾濫に及ぼす高波の影響を考慮したものはあまりなく，未だ精緻な高潮氾濫モデルの確立には至っていない．

本研究では，高波の影響を考慮した高潮・高波氾濫モデルを提案・構築することを主たる目的としている．そして，既往の実験結果と計算結果の比較から，構築した氾濫モデルの計算精度を確認する．さらに，1959年の伊勢湾台風を対象に高潮・高波氾濫の再現計算を実施し，潮位の時系列および湾奥部での氾濫域を当時の観測記録と比較することで，本モデルの妥当性・有用性を検証する．

2. 高潮・高波氾濫モデルの概要

本研究で構築する高潮・高波氾濫モデルは，Myersによる台風モデル，one-wayネスティング手法を導入した単層流動モデル，第3世代波浪推算モデルSWAN（Simulating WAves Nearshore）（The SWAN Team，2009），Yabe and Aoki（1991）が開発した高精度な移流計算が可能なCIP（Constrained Interpolation Profile）法に基づく氾濫モデルで構成されている．

計算の流れとして，まずMyersの台風モデルから得られた気象場に基づき，SWANを用いて波浪場を推算し，ラディエーション応力と有義波高を算出する．ついで，単層流動モデルと氾濫モデルに，気象場と波浪場の情報を取り込むことで高潮・高波氾濫計算を行う．なお，本計算では，高潮氾濫時における高波の影響を，後述する簡易的な手法により考慮できるように工夫した．

以下に，各モデルについて概説する．

（1）one-wayネスティング手法を導入した単層流動モデル

単層流動モデルで使用した支配方程式は，球面座標系における連続式と運動方程式を水深方向に積分平均化した平面2次元長波近似方程式である．高潮計算では，台風による気圧・風等の影響を十分に考慮すべきであるため，計算領域を広く設けることが一般的である．一方，沿岸付近では微地形を対象とすることから，計算格子間隔を小さく設定する必要がある．そこで，本研究では，**図-1**に示すように，計算領域を計算格子間隔の大きい領域と小さい領域に分割し，大領域から小領域に情報を与えて領域接続を行うone-wayネスティング手法を導入した．なお，**図-1**からわかるように，本計算では，大領域と小領域の格子間隔比および計算時間間隔比$\Delta t_1/\Delta t_2$をそれぞれ3と設定した．

（2）CIP法に基づく氾濫モデル

氾濫モデルの支配方程式は，上記の単層流動モデルと同じであるが，より高精度な高潮氾濫モデルを構築することを目的に，中山ら（1998）にならい，運動方程式の移流項だけにCIP法を採用した．また，氾濫水先端の取り扱いに関しては，小谷ら（1998）の波先端条件を使用し，海岸護岸等の構造物周辺における越流量の算定には，本間の越流公式（土木学会，1971）を用いた．

1 正会員　博（工）　名古屋大学准教授　大学院工学研究科社会基盤工学専攻
2 正会員　修（工）　パシフィックコンサルタンツ（株）
2 正会員　博（工）　名古屋大学教授　大学院工学研究科社会基盤工学専攻

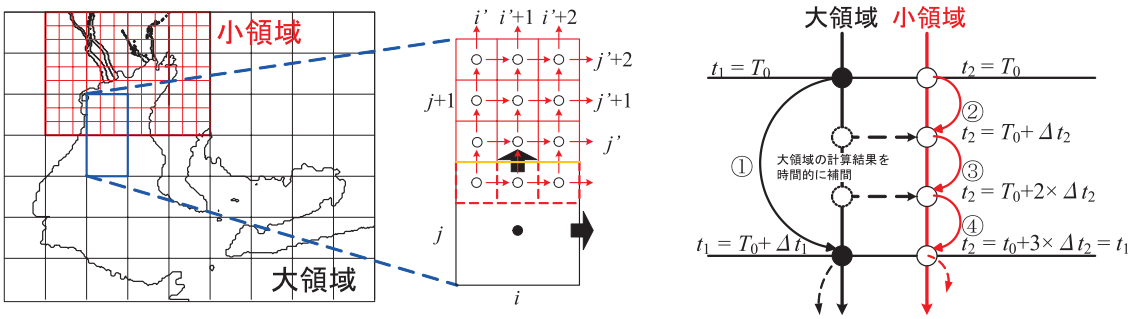


図-1　大領域と小領域の接続方法

(3) 高波影響のモデル化

台風によって，高潮氾濫が発生する際には，高潮に加えて高波が重なることで，陸域における氾濫規模が大きくなる．このメカニズムを再現し，モデル化することは高潮氾濫をより正確に把握する上で重要である．しかし，未だ確立した手法は存在していない．そこで，本研究では，高潮・氾濫時において時々刻々と不規則に変動する高波の影響を，簡易的に高潮場に導入する手法を提案する．

図-2は高潮・氾濫に及ぼす高波影響のモデル化に関する概念図を示したものである．モデル化前を示す図からわかるように，風による吹き寄せ，低気圧による吸い込み，砕波によるwave setupなどの効果により，海面が上昇し，高潮が発生する．そして，水位が堤防高を超えると，越流あるいは越波が生じ，背後地への氾濫を引き起こす．さらに，このとき強風が続き，波が発達すると，高潮によって上昇した海面にのるようにして高波が発生する．高波の影響がさらに海面を上昇させ，背後地への氾濫規模を増大させる．このように，高潮時における高波の影響は，高潮・氾濫に大きな影響を及ぼすものの，高波の時空間変動をどのようにとらえるかが大きな問題である．

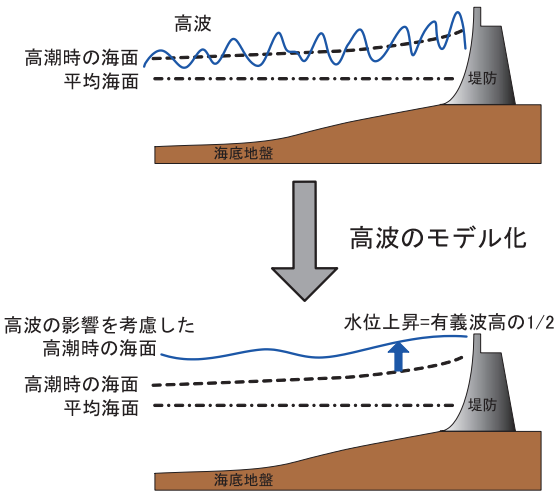


図-2　高潮・氾濫に及ぼす高波影響のモデル化

そこで，本研究では，図-2のモデル化後の図に示すように，不規則に変動する高波の影響を平均的な水面上昇とみなすこととした．すなわち，本計算では，不規則に変動する高波の波高を有義波高$H_{1/3}$として取り扱っているため，有義波の振幅，つまり有義波高$H_{1/3}$の1/2を水位上昇量として，計算時間間隔ごとに高潮場に与えることで高波効果を考慮することとした．

3. 平面2次元貯水槽部分決壊問題への適用

平面2次元氾濫に対する本モデルの妥当性・有用性を検証するため，川崎ら（2004）と同様，Fraccarollo and Toro（1995）が実施した貯水槽が部分的に決壊した時の氾濫水挙動に関する水理模型実験の再現計算を行った．

(1) 計算条件

計算領域は，図-3に示すように，貯水槽と氾濫原を設けた．初期状態は，計算領域左側（x,y）=（-1.0～0.0，-1.0～1.0）の貯水槽に初期水位0.6mを与え，右側（x，y）=（0.0～3.0，-1.0～1.0）の氾濫原には水位をゼロとして，水の存在しない状態としている．また，x = 0.0には貯水槽と氾濫原を仕切る壁が存在し，中央部y = -0.2～0.2には幅0.4m，高さ0.6mの決壊部がある．Fraccarollo and Toroによる水理実験では，氾濫原の側方および下流端は取水するための横桶と水槽が設置されており，それを模擬するために側方および下流端の境界条件を勾配ゼロ条件による開境界とした．その他の計算条件は，川崎ら（2004）を参考に，表-1に示すように設定した．なお，

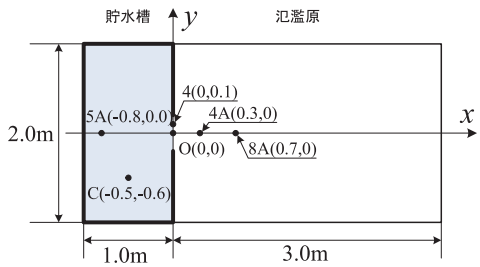


図3　計算領域および計測点

氾濫水挙動を定量的に検証するため，図-3の平面図に示す計測点を設定し，Fraccarollo and Toroの実験結果および川崎らの計算結果との比較を行った．

（2）氾濫水の挙動

貯水池が部分的に決壊したときの氾濫水の挙動に関する計算結果を図-4に示す．同図より，氾濫水が貯水槽の決壊部から流出し，円弧状に段波を形成しながら領域外へ流出していくことが確認される．また，貯水槽に着目すると，決壊部を中心とした静振を伴いながら，水深が徐々に減少していく様子が認められる．

図-5に，代表的な計測点における水深の時系列変化を示す．図中の実線は本モデルによる計算値，点線は川崎ら（2004）による計算値，○印はFraccarollo and Toro（1995）による実験値を示す．同図より，各計測点において，本氾濫モデルによる計算結果は実験値の傾向を良好に再現していることがわかる．特に，氾濫原に配置した測点4Aにおいては，川崎らの計算値と比較すると，より実験値に近づく結果となっている．その原因として，川崎らの計算では，連続式と運動方程式の両方の移流段階にCIP法を採用している点があげられる．以上のことから，本モデルは実験結果を精度よく再現しているとともに，既往の氾濫モデルと同等以上の計算精度をもっているといえる．

表-1　氾濫シミュレーションの計算条件

計算時間間隔［s］	0.01
格子間隔［m］	x方向：0.1，y方向：0.1
解像度	40×20
マニングの粗度係数	0.0
最小浸水深［m］	0.001

4. 伊勢湾台風による高潮・高波氾濫再現計算

前章では，本研究で構築したCIP法に基づく氾濫モデルを平面2次元貯水槽部分決壊問題に適用し，氾濫モデルの計算精度を確認した．本章では，第2章で提案した高波の影響を考慮した高潮・氾濫モデルを用いて，1959年の伊勢湾台風による高潮・高波氾濫の再現計算を行い，本モデルの妥当性と有用性を検証とするとともに，高潮時における高波のモデル化の信頼性について議論する．

（1）計算条件

伊勢湾台風経路を図-6に示すように設定し，1959年9月26日午後12時から翌27日午前3時まで再現計算を実施した．計算領域は，外洋を含むArea1，伊勢湾を含むArea2～Area4，伊勢湾湾奥部のArea5に分割して設定した．各領域の設定条件を表-2に示す．また，図-7に，伊勢湾海域の海底地形と観測点を図示する．なお，陸域氾濫計算を行うArea5に関しては，国土地理院の50mメッシュ数値地図をもとに，当時の伊勢湾湾奥部の海岸護岸を再現して作成した．また，陸上でのマニングの粗度係数は0.03，最小浸水深は0.1mに設定し，それ以下の水深のときに流速を0とした．初期条件は，流量を0として与え，静水状態とした．また，水位の初期条件については，計算の安定性を考え，計算領域全体に気圧低下による吸い上げ効果分の潮位偏差を与えた．

（2）伊勢湾海域の高潮

陸域への氾濫を考慮せず，海岸線を不透過条件として

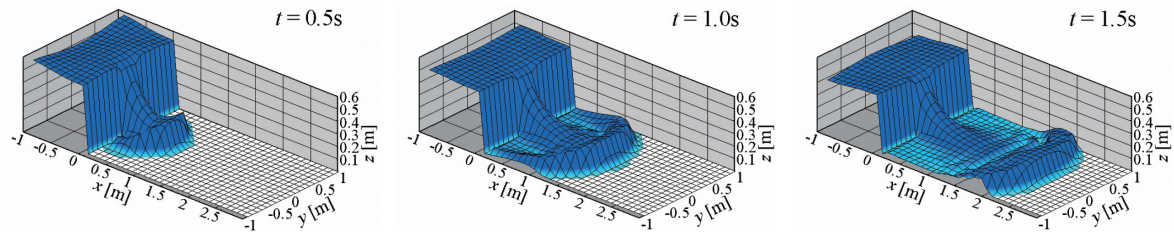
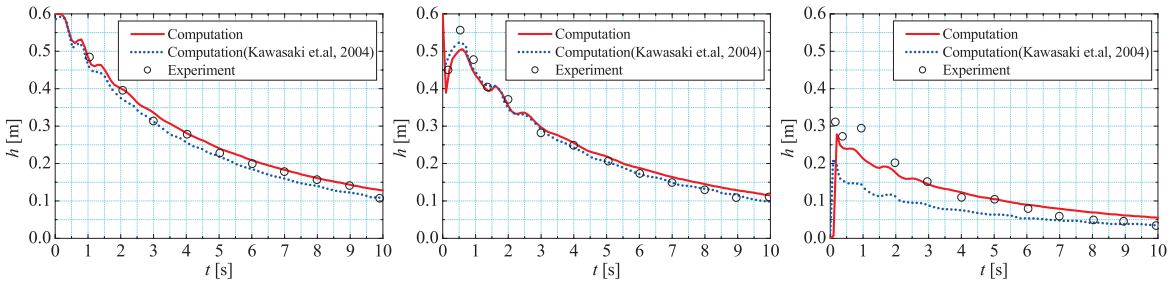


図-4　氾濫水の挙動に関する計算結果



(a)測点 5A　　(b)測点 O　　(c)測点 4A

図-5　各計測点での水深の時系列

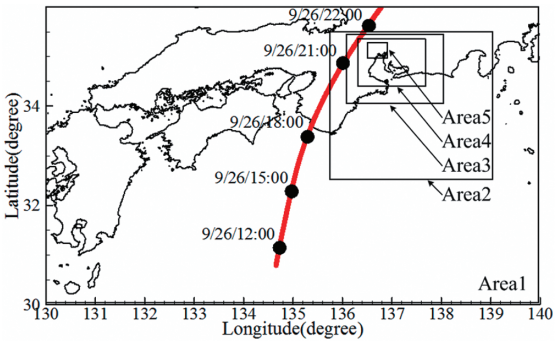


図-6　計算領域と伊勢湾台風の経路

表-2　計算領域の設定条件

	Area1	Area2	Area3	Area4	Area5
格子間隔（degree）	3/40	1/40	1/120	1/360	1/1080
解像度	130×80	135×126	243×171	360×288	402×300
時間間隔（s）	24.3	8.1	2.7	0.9	0.3

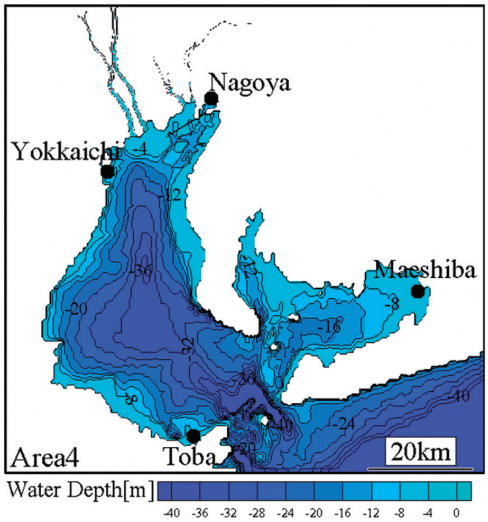


図-7　伊勢湾海域の海底地形と観測点

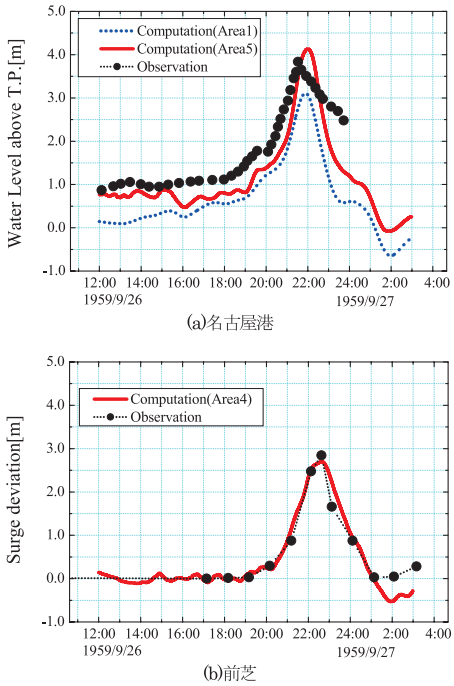


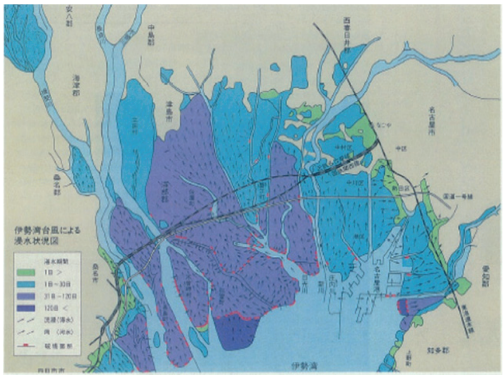
図-8　各観測点の高潮偏差の時系列

高潮のみを計算した場合における名古屋港および前芝での高潮偏差の時系列変化を図-8に示す．なお，計算値については，名古屋港で大領域Area1と小領域Area5の計算値，前芝でArea4での計算値を示す．同図より，両観測点とも，台風の接近に伴い潮位偏差が増大し，台風の通過とともに潮位偏差が減少するといった高潮現象の特徴をとらえていることがわかる．よって，本モデルが伊勢湾台風時における伊勢湾海域で高潮特性を良好に再現していると判断される．また，図-8（a）をみると，大領域Area1の計算値に比べて，小領域Area5の計算値の方が観測値と良好な一致を示していることがわかる．このことは，計算効率を考慮して本計算で導入したone-wayネスティング手法の有意性を示すものであり，本モデルの有効性と妥当性が確認される．

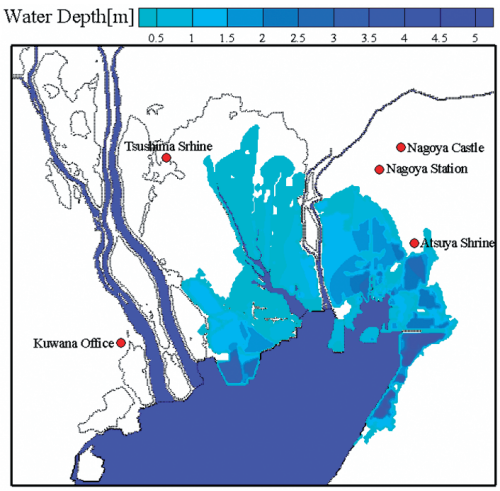
（3）伊勢湾湾奥部の氾濫状況

図-9は，伊勢湾台風時の伊勢湾湾奥部における氾濫状況を図示したものである．ここで，（a）は伊勢湾台風時の実際の氾濫域（中央防災会議，2008）を，（b）と（c）はそれぞれ高波の影響を考慮しない場合，考慮した場合における最大浸水深の計算結果を示す．同図から明らかなように，高波の影響を高潮場に導入することで，伊勢湾台風時の氾濫域を良好に再現可能であるといえる．したがって，陸上氾濫を高精度に評価・予測するためには，高潮のみならず高波の影響を考慮することが重要であるといえる．

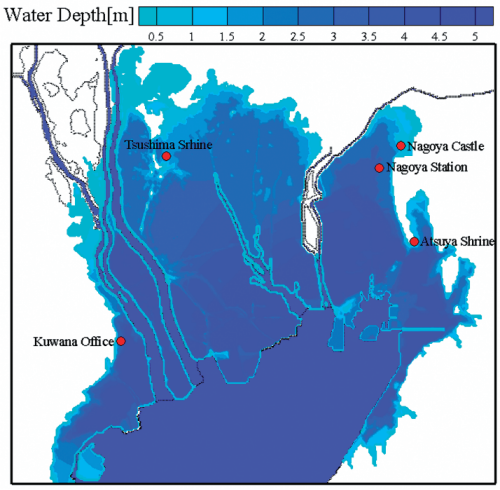
次に，本研究で提案した高潮に及ぼす高波影響のモデル化について検証する．まずここでは，水面変動ηを，高潮・高波時の平均海面からの水位上昇として定義する．そして，高潮・高波氾濫計算により得られた水面変動ηから高波成分η_h（$=H_{1/3}/2$）を差し引いた値を水面変動の高潮成分η_sとみなし，名古屋港での当時の高潮偏差の観測値と比較した．その結果を図-10に示す．同図より，水面変動の高潮成分η_sは，図-8に示す高潮の計算結果と同様，高潮の観測値を良好に再現していることが明らかとなった．これは，本研究で提案した高潮・陸域氾濫に及ぼす高波影響のモデル化に妥当性があることを示唆するものといえる．



(a) 伊勢湾台風時の氾濫状況（中央防災会議，2008）



(b) 高波の影響を考慮しない場合の最大浸水深の計算結果



(c) 高波の影響を考慮した場合の最大浸水深の計算結果

図-9　伊勢湾台風時の伊勢湾湾奥部における氾濫状況

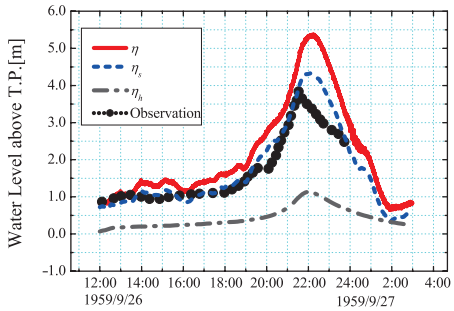


図-10　名古屋港での水面η，高潮η_s，高波成分η_hの時系列

5. おわりに

本研究では，高波影響を考慮した高潮・高波氾濫モデルを提案・構築した．そして，平面2次元氾濫の水理模型実験の再現計算および伊勢湾台風を対象とした高潮・高波氾濫再現計算を行い，実験値および伊勢湾台風当時の観測値と計算値の比較から，本モデルの妥当性・有用性を示した．また，高潮・高波氾濫再現計算において，高潮場・陸域氾濫に及ぼす高波影響の導入方法に妥当性があることを確認した．ただし，本計算では伊勢湾湾奥部のみを対象に検討を行っており，今後，他の地域に対しても，本モデルの適用性について検証していく予定である．

謝辞：本研究の一部は，科学研究費補助金・若手研究（A）（研究代表者：名古屋大学・川崎浩司，課題番号：21686046）であることをここに付記し，感謝の意を表する．

参　考　文　献

川崎浩司・小野稔和・Napaporn Piamsa-nga・熱田浩史・中辻啓二（2004）：CIP法とSMAC法に基づく平面2次元氾濫流モデルの構築，水工学論文集，第48巻，pp. 565-570.

小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫（1998）：GISを利用した津波遡上計算と被害推定法，海岸工学論文集，第45巻，pp. 356-360.

柴木秀之・鈴山勝之・江崎竜夫（2008）：越流と越波を考慮した高潮浸水の数値計算，海洋開発論文集，第22巻，pp. 70-74.

中央防災会議（2008）：災害教訓の継承に関する専門調査会報告書　1959　伊勢湾台風.

中山恵介・佐藤圭洋・堀川康志（1998）：CIP法を用いた浅水流方程式の数値計算の開発，水工学論文集，第42巻，pp. 1159-1164.

土木学会（1971）：水理公式集，昭和46年改訂版，265p.

Fraccarollo, L. and E. F. Toro (1995): Experimental and numerical assessment of the shallow water model for two-dimensional-dambreak type problems, Journal of Hydraulic Research, Vol. 33, pp. 843-864.

The SWAN Team (2009): SWAN user manual, SWAN Cycle III Version 40.72ABCD.

Yabe, T. and T. Aoki (1991): Universal solver for hyperbolic equations by cubic-polynominal interpolation I. one-dimensional solver, Computer Physics Communications, Vol. 66, pp. 219-232.