

独立行政法人港湾空港技術研究所

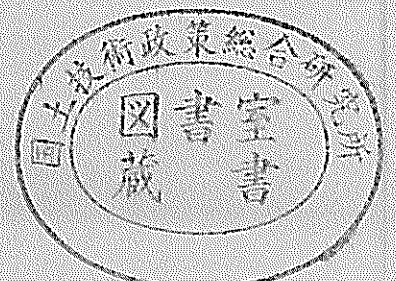
港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

VOL.43 No.2 June 2004

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE



港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 43 卷 第 2 号 (Vol. 43, No. 2), 2004 年 6 月 (June 2004)

目 次 (CONTENTS)

1. 臨海部の複層都市空間における MARS 法を用いた高精度な浸水解析
..... 安田 誠宏・平石 哲也 3
(Highly Accurate Inundation Simulation by MARS Method on Compound Coastal Urban Area
..... Tomohiro YASUDA, Tetsuya HIRAISHI)
2. 盤洲干潟周辺海域における底生系と浮遊系のカップリングに関する研究
..... 中村 由行・野村 宗弘・神尾 光一郎 35
(Field observation and analysis of benthic-pelagic coupling in Banzu tidal flat and the adjoining coastal area of
Tokyo Bay
..... Yoshiyuki NAKAMURA, Munehiro NOMURA, Koichiro KAMIO)
3. 塩害環境下に15年間暴露されたコンクリートの耐久性および表面被覆材による
塩害防止効果
..... 山路 徹・小牟禮 建一・濱田 秀則 73
(Durability of 15-year Old Concrete Specimens with Surface Coating under Marine Environments
..... Toru YAMAJI, Ken-ichi KOMURE, Hidenori HAMADA)

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 43 卷 第 2 号 (Vol. 43, No. 2), 2004 年 6 月 (June 2004)

目 次 (CONTENTS)

1. 臨海部の複層都市空間における MARS 法を用いた高精度な浸水解析
..... 安田 誠宏・平石 哲也 3
(Highly Accurate Inundation Simulation by MARS Method on Compound Coastal Urban Area
..... Tomohiro YASUDA, Tetsuya HIRAISHI)
2. 盤洲干潟周辺海域における底生系と浮遊系のカップリングに関する研究
..... 中村 由行・野村 宗弘・神尾 光一郎 35
(Field observation and analysis of benthic-pelagic coupling in Banzu tidal flat and the adjoining coastal area of
Tokyo Bay
..... Yoshiyuki NAKAMURA, Munehiro NOMURA, Koichiro KAMIO)
3. 塩害環境下に15年間暴露されたコンクリートの耐久性および表面被覆材による
塩害防止効果
..... 山路 徹・小牟禮 建一・濱田 秀則 73
(Durability of 15-year Old Concrete Specimens with Surface Coating under Marine Environments
..... Toru YAMAJI, Ken-ichi KOMURE, Hidenori HAMADA)

臨海部の複層都市空間における MARS 法を用いた 高精度な浸水解析

安田誠宏*・平石哲也**

要 旨

功刀(1997)が開発した自由表面を含む多相流の直接解析法 (MARS 法: Multi-interface Advection and Reconstruction Solver) は, 界面勾配を考慮した VOF 値の輸送と格子境界での VOF 値の連続性を保持することで, 精度よく界面形状を捉えることができる手法である. 本研究では, この MARS 法を組み込んだ汎用流体解析法を応用し, 臨海部の複層都市空間を対象に高精度な浸水解析を行い, その有用性を検討した.

解析地形の作成には, 航空測量によって得られた地盤高データベースを利用した. また, 構造物情報や地形情報を自動的に VOS (Volume Of Solid) モデルに変換して地形条件を構築する手法を發明し, 解析に適用した.

解析の結果, 地上と地下の浸水状況を同時に再現できることを確認した. 実験結果との比較においても, 水位および流速の対応はよく, 本解析法の精度を確認できた. また, 浸水状況の解析結果を CG によって人の視点で可視化することもでき, 危険度の理解を容易とした. さらにデジタル地図データと土地利用状況情報を用いることにより, 現地地形での高精度な浸水解析を可能とした.

キーワード: MARS 法, 浸水解析, 界面形状, 航空測量, VOS モデル

*海洋・水工部波浪研究室特別研究員

**海洋・水工部波浪研究室長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所
電話: 046-844-5042 Fax: 046-841-3888 e-mail: hiraishi@pari.go.jp

Highly Accurate Inundation Simulation by MARS Method on Compound Coastal Urban Area

Tomohiro YASUDA*

Tetsuya HIRAISHI**

Synopsis

The MARS (Multi-interface Advection and Reconstruction Solver) is the direct simulation modeling for the multi-phase flow which has developed by Kunugi(1997). It is capable to compute the interface shape with consideration of the interface gradient and the continuousness of the volume of fluid at the grid boundary. In this research, the MARS method is applied to the inundation simulation on the compound coastal urban area, and its applicability is examined.

The aerial survey database is applied to build the topographic condition of the model. The technique for the automatic conversion of the information of buildings and geographical features into the VOS (Volume Of Solid) model is invented, and it is applied to the simulation.

It is confirmed that the proposed simulation model is applicable to reproduce the inundation situation on the surface and in the underground at the same time. In the comparison with the experimental results, the correspondence of inundation depth and flood velocity is good and the accuracy of simulation method is demonstrated. Moreover, the results of simulation is employed for the computational flow visualization from persons' viewpoint, and it makes people easy to understand the risk. A highly accurate flood simulation in local areas is established by using the digital map data and the land use information.

Key Words: MARS method, inundation simulation, interface shape, aerial survey, VOS model

*Special Researcher , Wave Division, Marine Environment and Engineering Department

** Head, Wave Division, Marine Environment and Engineering Department

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan, Port and Airport Research Institute, Independent Administrative Institution

Phone: +81-46-8445042 Fax: +81-46-8413888 e-mail: hiraishi@pari.go.jp

目 次

要 旨	3
1. まえがき	7
2. 3次元流体直接解析モデル	7
2.1 MARS法	7
2.2 基礎式	7
2.3 表面張力モデル	9
2.4 界面勾配を考慮した界面輸送	9
2.5 解析モデルの精度検証	11
3. 複層都市モデルの構築	11
3.1 VOSモデル	11
3.2 地形情報の構築方法	12
3.3 構造物データの構築方法	15
3.4 複層都市モデルの構築	15
4. 基本的なモデル地形における解析	17
4.1 解析条件	17
4.2 高層ビル	17
4.3 複層地下駐車場	20
5. 臨海部複層都市空間における浸水解析	24
5.1 解析条件	24
5.2 解析結果	25
5.3 模型実験結果との比較による精度検証	27
5.4 Post処理による解析結果の効果的な出力	30
5.5 解析モデルの現地適用性	30
6. 結論	32
7. あとがき	33
謝辞	33
参考文献	33
記号表	33

1. まえがき

高潮・津波災害は地域によって決定される再現期間を有するものであり、近年その発生確率が高まっている沿岸域が増えてきている。従来の高潮による浸水解析には、越流高さと地盤高から簡易的に浸水域を求めるレベル堪水法や、2次元浅水長波モデルによる平面計算が用いられているが、構造物による影響は背後地の土地利用や建物の被覆率を考慮して底面粗度を変化させるにとどまっている。津波による陸上への遡上解析においても、相田(1977)によるManning粗度を一律に与える計算法や、津波に対する家屋の抵抗をモデル化して土地利用毎に粗度を設定する方法(小谷ら, 1998)が一般的である。都市臨海部は高度に開発されており地下施設への浸水を再現するには、構造物による影響を粗度として取り扱うだけでは不十分であり、3次元的な浸水解析が必要と考えられる。

地上の氾濫解析手法を地下空間に適用し、複層化した市街地の問題を解くことが試みられている。よく適用されている手法としては、貯留槽を元にしたモデルで、貯留槽間の連結は管路を用いる方法である(例えば、戸田ら(2003))。このモデルでは、時間雨量などの流量を入力条件として与える方法であるため、外力が波浪である場合にはその設定が難しい。また、浸水予測モデルとして世界的に普及率が高いものにMOUSEモデル(DHI(2003), 村岡ら(2003))がある。これは、道路網、下水道網および地下街網をモデル化して接続し、流入流出解析を行うものである。非常に簡便で解析結果の情報化に優れているが、1次元モデルであるため、ある程度の精度しか期待できない。

自由表面を有する流体解析または多相流の直接解析には、流体体積率を用いたVOF (Volume Of Fluid) 法(Hirt et al., 1981)が広く用いられてきた。VOF法は、格子内のVOF値の輸送を力の釣り合い式を用いて計算し、計算時間ステップ毎に流体の運動を求める手法である。しかしながら、この解析手法は界面勾配を考慮していないため、界面形状を正しく捉えることができない。一方で、功刀(1997)が開発した自由表面を含む多相流の直接解析法(MARS法: Multi-interface Advection and Reconstruction Solver)は、界面勾配を考慮したVOF値の輸送と格子境界でのVOF値の連続性を保持することで、精度よく界面形状を捉えることができる手法である。永瀬ら(2000)はMARS法を海岸工学の分野に適用し、その有用性を確認している。本研究では、このMARS法を組み込んだ汎用流体解析法を応用し、臨海都市部を対象に高

精度な浸水リスク解析を行い、その有用性を検討した。

2. 3次元流体直接解析モデル

2.1 MARS法

本研究では、MARS法(Multi interface Advection and Reconstruction Solver)を組み込んだ、3次元熱流体解析システムSTREAM(2003)を浸水解析に用いる。

自由表面を含んだ流体の解析または多相流の直接解析には、流体体積率を用いたVOF (Volume Of Fluid) 法が広く利用されている。この方法は、流体運動を解析するための解析領域内流体要素に、その要素内に流体が占める流体体積率をVOF関数として定義し、VOF関数の移流計算を行うことによって、時々刻々変化する自由表面を求める方法である。通常の上流差分では数値拡散によって表面形状の再現が不鮮明になるため、ドナー・アクセプタ法を用いて陽的に解くことにより、隣接格子間のVOF値の輸送を正確に計算することができる。しかしながら、VOF法は、図-2.1(b)に示すように、格子内の界面形状が格子面のいずれかに平行であることを前提としているため、図-2.2(b)のように、丸い気泡や液滴を四角い形状で近似的に認識してしまう。さらに、隣接する格子間を横切る界面勾配を考慮せず、流体体積率の輸送のみを行うため、図-2.3(b)に示すように、解析格子の対角方向に物体を輸送すると、元形状が大きく崩れてしまう。

一方、MARS法では、VOF値の正確な輸送だけでなく、表面張力を体積力に置き換えるモデル(CSFモデル)により界面形状を正確に捕獲、輸送し、さらには格子境界の再構築を行うことにより格子間の連続性を保つことができる。界面形状の再現には、図-2.1(c)に示すような一次関数による近似を用いている。その結果、図-2.2(c)に示すような、より元の形状に近い形での再現が可能になる。図-2.3(c)からも明らかなように、VOF法に比べて、元の形状をより正確に再現することができる。

2.2 基礎式

計算に用いる基礎式は、非圧縮性流体とすれば以下のようである。

連続式

$$\frac{\partial \langle VOF \rangle}{\partial t} + \sum_{n=1}^2 \frac{\partial (VOF_n u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

運動方程式

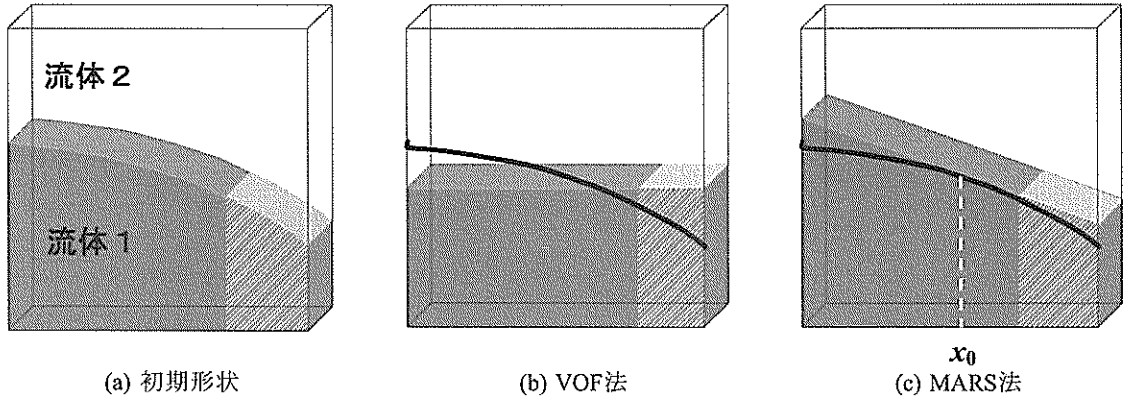


図-2.1 流体界面の近似方法

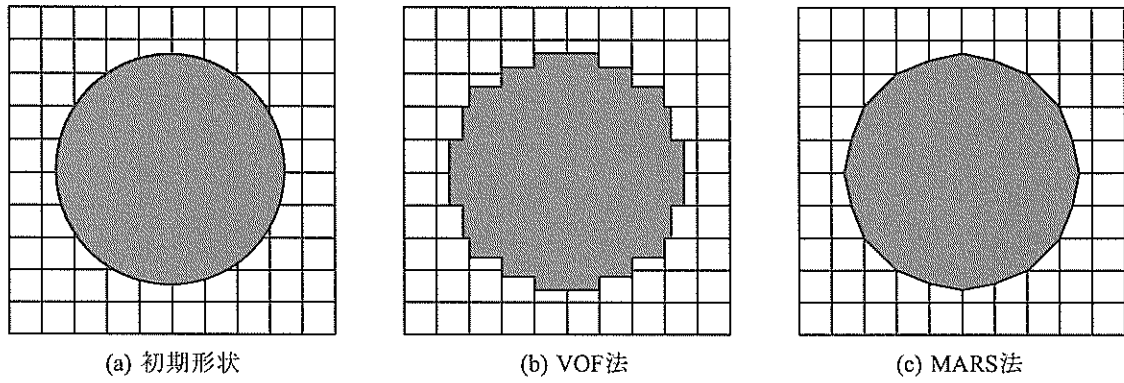


図-2.2 流体形状の認識

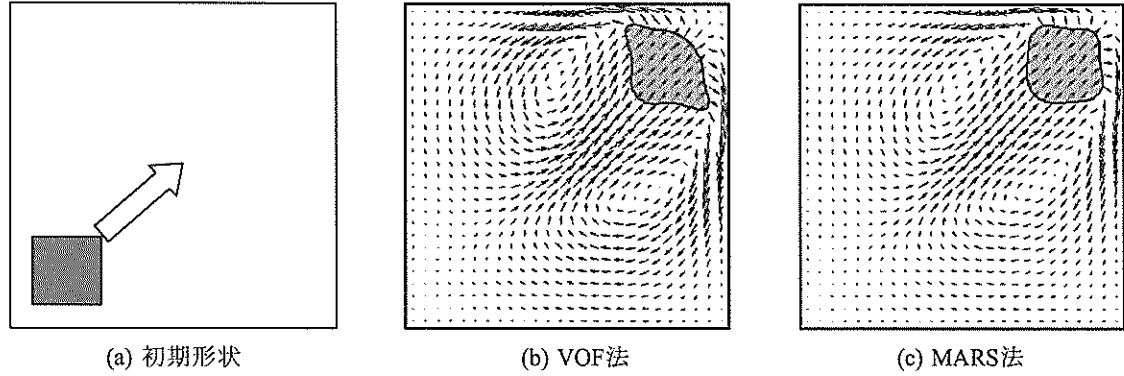


図-2.3 対角方向への体積率輸送の計算結果

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\langle \rho \rangle} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + g_i + \frac{1}{\langle \rho \rangle} F_V \quad (2)$$

$$\langle \rho \rangle = VOF_1 \rho_1 + VOF_2 \rho_2, \quad \tau_{ij} = \frac{\langle \mu \rangle}{\langle \rho \rangle} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$\langle \langle \phi \rangle \rangle = [\phi_1 \{ \text{sign}(VOF_1 - VOF_2) + 1 \} + \phi_2 \{ 1 - \text{sign}(VOF_1 - VOF_2) \}] / 2$$

流体体積率の保存式

$$\frac{\partial VOF_{(n)}}{\partial t} + u_j \frac{\partial VOF_{(n)}}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

乱流エネルギー・乱流消失率(k - ε 方程式)

$$\frac{\partial \langle \rho \rangle k}{\partial t} + \frac{\partial u_i \langle \rho \rangle k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\langle \mu_e \rangle + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_s - \langle \rho \rangle \varepsilon$$

$$\frac{\partial \langle \rho \rangle \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial u_i \langle \rho \rangle \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\langle \mu_e \rangle + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right]$$

(4)

これらの変数は以下のとおりである。また、式中の添字にはEinsteinの総和規約が適用される。

F_V : 流体界面に作用する体積力

g_i : x_i 方向の重力加速度

- k : 乱流エネルギー
- P : 流体の圧力
- t : 時間
- u_i : x_i 方向の流体速度
- $VOF_{(n)}$: n 番流体の体積率
- x_i : 位置座標
- ε : 乱流消失率
- $\langle \mu \rangle$: 相平均粘性係数 ($= \langle \mu \rangle + \mu$: 分子粘性係数 + 渦粘性係数)
- $\langle \rho \rangle$: 相平均密度

2.3 表面張力モデル

複数の流体を同時に扱う場合に問題となるのは、流体界面で生じる力の釣り合いをどのように表現するかということで、たとえば2種類の流体に対しそれぞれの運動方程式を考えたとき、流体界面ではそれぞれの流体に作用する応力の釣り合いを考えなければならない。したがって、運動方程式に次の境界条件が必要となる。

$$(P_1 - P_2 + \sigma \kappa) \hat{n}_i = (\tau_{1ik} - \tau_{2ik}) \hat{n}_k + \frac{\partial \sigma}{\partial x_i} \quad (5)$$

$$\hat{n}_i = \frac{n_i}{|n|} = \frac{\partial VOF / \partial x_i}{|n|}$$

ここで、

- P_α : 流体 α ($\alpha=1, 2$) の圧力
- σ : 表面張力係数
- τ : 粘性応力

添字1および2: 流体番号

- n_i : 流体1から2に向かう単位法線ベクトル
- $\tau_{\alpha ik}$: 粘性応力テンソル

また、 κ は流体界面の曲率を意味し、

$$\kappa = -\frac{\partial \hat{n}_i}{\partial x_i} = \frac{1}{|n|} \left(\frac{n_i}{|n|} \frac{\partial |n|}{\partial x_i} - \frac{\partial n_i}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

いま、簡単のために非粘性流体を仮定して表面張力係数が界面に沿って変化しないとすれば、界面での圧力差は $P_1 - P_2 = \sigma \kappa$ となる。界面上の点 x_s で作用する単位面積あたりの表面張力 $F_s(x_s)$ は、

$$F_s(x_s) = \sigma \kappa(x_s) \hat{n}(x_s) \quad (7)$$

となる。

Brackbillら(1992)が提唱したCSF (Continuum Surface Force) モデルを用い、流体界面に作用する表面力を体

積力に置き換えている。界面を囲む単位体積を考えて、単位体積に作用する体積力の界面厚さ方向の極限 ($h \rightarrow 0$) を考えると、その体積力は界面上の単位体積に作用する表面力に一致する。

$$\lim_{h \rightarrow 0} \int_{\Delta V} F_V(x) dV = \int_{\Delta S} F_S(x_S) dS \quad (8)$$

上式に(7)式を代入し整理すると、CSFモデルによる表面力は次式で体積力により表される。

$$F_V(x) = \sigma \kappa(x) \hat{n}(x) \frac{\rho(x)}{\bar{\rho}}, \quad \bar{\rho} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} \quad (9)$$

なお、粘性応力の影響についても同様の手続きで体積力として与えることができる。

2.4 界面勾配を考慮した界面輸送

VOF法では流体体積率 (VOF値) を導入し、各格子上でVOF値と流体速度に応じてVOF値を隣接格子に輸送して、界面形状を捉えた。しかし、輸送される流体の体積を厳密に保存するものの、曲率を持ったVOF値は階段状に認識されてしまうという欠点がある。VOF法で扱われる界面は常に格子面の何れかに平行であることを前提にしており、隣接する格子間を横切る界面勾配を全く無視しているためである。

MARS法では、図-2.4に示すような格子内の界面形状を考えて、単位時間 δt に隣接格子に輸送される δVOF を求める場合を考える。隣接格子に接する格子境界で流体1が占める面積を $S(x)$ とし、同格子境界上での流速を u と置くと δVOF は、

$$\delta VOF = \int_{x-u\delta t}^x S(x) dx \quad (10)$$

となる。VOF値の輸送に界面勾配を考慮するという事は、いかに $S(x)$ を正確に求めるかということの意味する。あるいは、界面勾配に関する問題は、 $S(x)$ をどのように表現するかという問題に置き換えることができる。上式の $S(x)$ を求めるにあたり連続的な一次関数 (line-segment 関数) $C(x)$ を導入する。単純化した界面形状に対して、図-2.5のような格子内での界面曲率が無視できる程度の格子を考えた時、 $S(x)$ の分布を近似する関数として定義できる。したがって、何らかの方法で連続的な一次関数 $C(x)$ を与えれば、 δVOF は解析的に求めることができる。

図-2.5に示すように格子間隔を Δx , Δy で規格化し、一次関数 $C(x)$ を求める。界面勾配を求める x 座標を x_0 と置く。 $C(x)$ の勾配は、 x_0 における界面勾配 n_x で表すことが

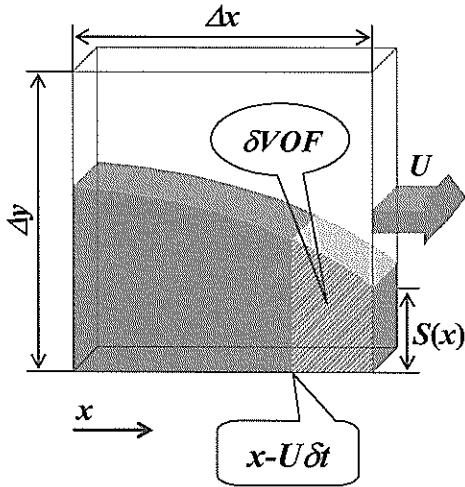


図-2.4 界面の取り扱い

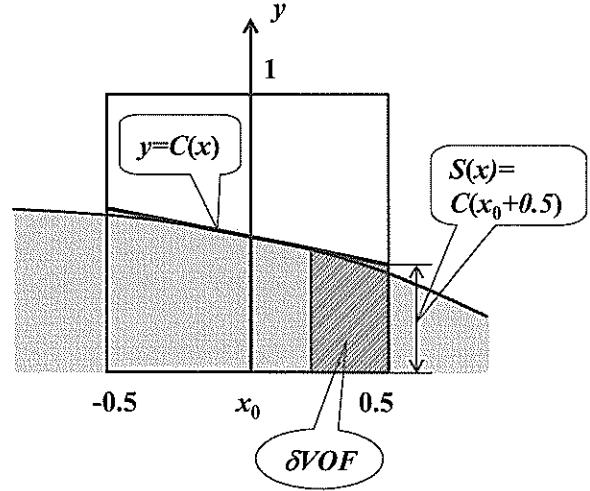


図-2.5 無次元化した計算格子とline-segment関数

でき、

$$C(x) = n_x x + \frac{1}{2}, \quad n_x = \left. \frac{\partial VOF}{\partial x} \right|_{x_0} \quad (11)$$

となる。なお、 $C(x)$ は $x=x_0=0$ の時、 $C(x)=0.5$ となるように決定する。 $C(x)$ は $S(x)$ を十分な精度で近似できる関数として定義しているの、

$$S(x) \approx n_x(x_0 + x) + \frac{1}{2} \quad (12)$$

となり、最終的に求める必要があるものは界面勾配を定義することができる座標 x_0 だけとなる。また、単位時間内に輸送される体積率 δVOF は、 $C(x)$ と格子によって囲まれる台形面積として解析的に表すことができる。

すなわち δVOF は、次式で表現できる。

$$\begin{aligned} \delta VOF &= \frac{1}{2}(U_x^{n+1} \Delta t) [S(x) + S(x - U_x^{n+1} \Delta t)] \\ &= \frac{1}{2}(U_x^{n+1} \Delta t) [C(x_0 + 0.5) + C(x_0 + 0.5 - U_x^{n+1} \Delta t / \Delta x)] \end{aligned} \quad (13)$$

x_0 は次式で求めることができる。

$$\begin{aligned} x_0 &= x_2 - \sqrt{\frac{2}{f'}} \left[F_{given} - \frac{1}{2} \{1 + \text{sign}(f')\} \right], \quad \text{for } x_1 < \bar{x}_0 \\ x_0 &= \text{sign}(f') (F_{given} - 0.5) / f', \quad \text{for } -x_1 \leq \bar{x}_0 \leq x_1 \\ x_0 &= x_2 + \sqrt{\frac{2}{f'}} \left[F_{given} - \frac{1}{2} \{1 + \text{sign}(f')\} \right], \quad \text{for } \bar{x}_0 < -x_1 \\ x_1 &= \frac{1}{2} \left| \text{sign}(f') \times \frac{1}{f'} - 1 \right|, \quad x_2 = \frac{1}{2} \left| \text{sign}(f') \times \frac{1}{f'} + 1 \right| \\ F' &= \min[1, \text{sign}(f') \times f'], \quad \bar{x}_0 = \text{sign}(f') \times (F_{given} - 0.5) / F \end{aligned} \quad (14)$$

これらをまとめると、MARS法は界面法線ベクトルを用いた界面形状の一次関数化とその関数を用いることで解析的に格子境界面積 $S(x)$ を決定できるので、VOF法と比べてはるかに精度の高い体積率輸送を実現することができる手法である。

界面の輸送は、流体体積率の移流方程式を解くことで計算する。

$$\frac{\partial VOF}{\partial t} + \frac{\partial VOF \cdot u_i}{\partial x_i} - VOF \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (15)$$

上式の解法には、高次差分を導入したり、CIP法 (Cubic Interpolated Pseudoparticle Method) と呼ばれる補間関数を導入したりすることで、数値拡散の影響を排除し界面捕獲精度を高める工夫をするのが一般的であるが、本モデルでは次式のように離散化する。

$$\begin{aligned} \frac{VOF^{n+1} - VOF^n}{\Delta t} + \frac{\delta VOF_{i+1}^{n+1} - \delta VOF_i^{n+1}}{\Delta x} + \frac{\delta VOF_{j+1}^{n+1} - \delta VOF_j^{n+1}}{\Delta y} \\ - VOF^n \left(\frac{u_{i+1}^{n+1} - u_i^{n+1}}{\Delta x} + \frac{v_{j+1}^{n+1} - v_j^{n+1}}{\Delta y} \right) = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

ここで、上付き添字 n は時間、 Δx および Δy はそれぞれ x 、 y 方向の格子間隔を表す。

一方、line-segment関数による近似だけでは、図-2.6に示すように格子端で不連続になる。そこで、図-2.7に示したフラクショナルステップ法を用いて Δt を n 分割して界面輸送を行う。この方法を用いることによって、VOF値に関する様々な情報を補正しつつ計算を行うことが可能になる。

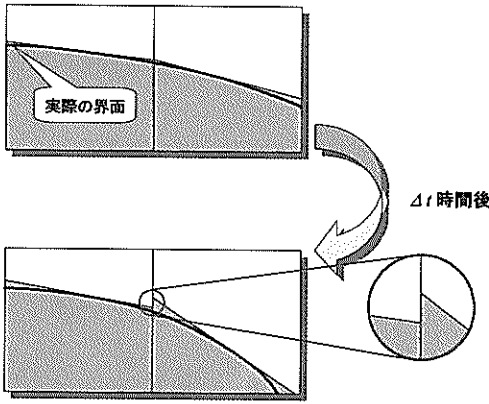


図-2.6 格子端における不連続性

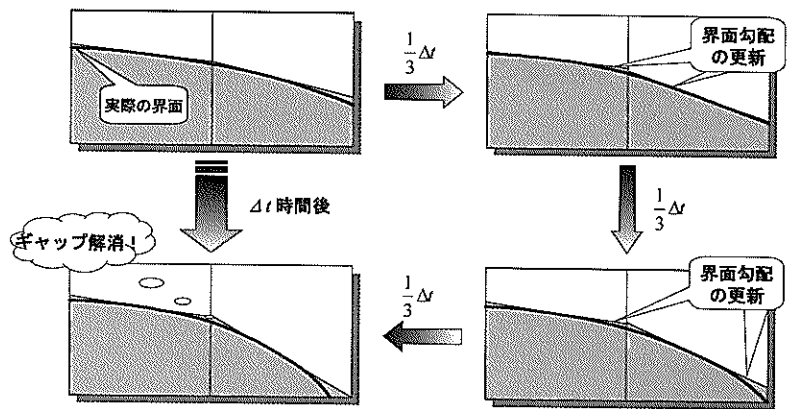


図-2.7 フラクショナルステップ法

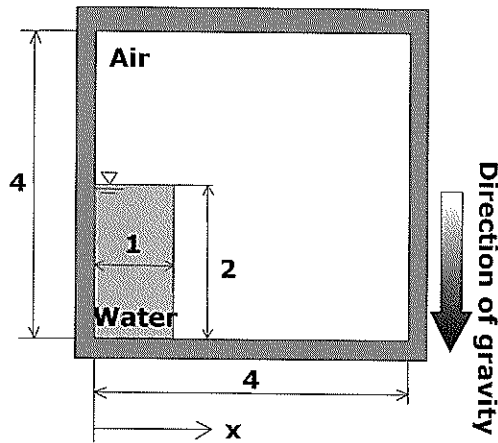


図-2.8 ダムブレイク解析初期条件

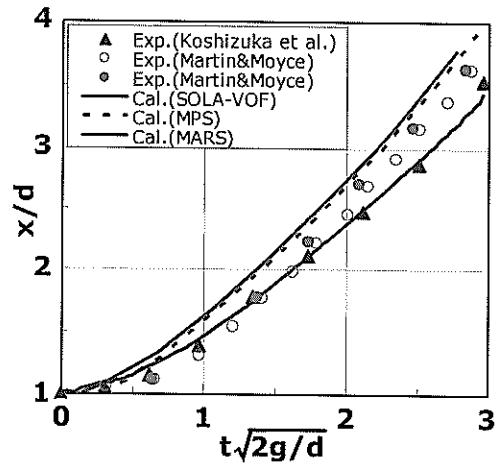


図-2.9 従来モデルおよび既存の実験結果との比較

2.5 解析モデルの精度検証

自由表面解析のベンチマーク問題としてよく知られているダム崩壊問題について解析を行い、従来モデルとの精度比較を行う。ダムブレイク解析を図-2.8に示すような条件で行った。図-2.9は水柱崩壊後の下底の自由表面先端位置 x を、時間を追って示した図である。ここで、横軸は重力加速度 g と水柱幅 d で無次元化した時間を、縦軸は自由表面先端位置をそれぞれ表す。MARS法の結果は、SOLA-VOF法に比べて既存の実験結果（Koshizuka et al., 1996）と良く一致しており、解析精度の高さを確認することができた。

3. 都市モデルの構築

3.1 VOSモデル

直交格子を用いた従来の流体計算法では、解析格子を短時間で簡単に作成できる利点をもつ。しかし、物体形状を表現する点については、計算格子を横断するように

構造物を設置することができず、図-3.1のように格子面に沿う形状（ハッチングした領域）にデフォルメされてしまう。さらに、プリプロセッサ等で格子作成を行う場合、デフォルメ形状を作成するための手間が発生し、配置する格子形状・格子間隔によって、解析精度も左右される。そこで、このような解析者等のノウハウに依存せず、簡単かつ誰でも扱える方法が必要となる。そこで、これらの問題を解消するために固相体積率：VOS（Volume Of Solid）モデルを利用する。

VOSモデルによる形状表現は、格子内部に存在するVOS値と格子境界上の面積率を用いて行われる。これにより、地形データと構造物データをそのまま解析領域内に配置でき、形状を忠実に再現できる。具体的には、地形データと構造物データをそのまま解析領域内に配置するが、その際生じる構造物表面と解析領域との関係は、図-3.2に示すように、格子内部に存在する固体の占有率（VOS）と格子境界面上の面積率を用いることで明確に区別することができ、形状を忠実に再現することができ

る。また、計算領域と計算格子を一切変更せずに、地形および構造物データを入れ替えるだけで、精度の低下を招くことなく、様々なケースを解析することができる。

図-3.3に示すように、格子に依存して表現された形状とVOSモデルによる形状では、流体の流れ方が全く異なることが予想される。そこで、簡単なモデル計算を実施し、VOSモデルによる精度向上を検証した。計算結果の一例を図-3.4に示す。図(a)の従来の方法では、構造物が直交格子に合わせてデフォルメされたことにより、流況に乱れが生じてしまっている。一方、図(b)のVOSモデルによる結果では、構造物間およびその周りの流れはスムーズに再現されており、精度の向上がみられる。

構造物情報や地形情報をVOSモデルとして扱えるように、自動的に変換する手法を開発することによって、従来の人手に頼った入力方法では、煩雑なため困難であった形状の入力が可能になるとともに、解析精度の大幅な向上が期待できる。複層都市モデルを構築する際には非常に有効と考えられる。

3.2 地形情報の構築方法

(1) 航空測量データベース

複雑な都市の地形を解析プログラム上に再現するために、航空測量によって得られた地形データベースを利用する。このデータは、航空機よりレーザー波を地上に照射して、その反射波を解析するレーザースキャナによって得られるものである。図-3.5に航空機によるレーザー測量のイメージを示す。

航空機にはGPSと慣性計測装置：IMU (Inertial Measurement Unit) が搭載されている。地上GPS基地局で観測したGPSデータと、航空機上で観測したGPSデータの位相差を計算し、航空機の3次元位置座標を算出する。GPSデータは1秒間に1回観測される。また、IMUデータを用いて、センサーヘッドのロール、ピッチ、ヨーのそれぞれの角度及び加速度をもとに航空機の傾きを算出する。こうして得られた各時間のレーザーセンサー部の3次元位置および計測姿勢と、レーザーセンサーにより地上部を照射したデータから、レーザー反射点（地上点）の3次元座標を解析し、ランダム形式の標高データが作成される。取得データ間隔は約2mで、精度は水平方向±30cm、鉛直方向±15cmである。

(2) 従来のデータ作成方法

従来、解析に用いる地形データは、図-3.6(a)に示すような等高線図あるいは等深線図から作成するのが一般的である。図(b)に示すようなデジタルなどの読み取り装置を用いて、図(c)のような電子データを作成し、

このデータを用いて解析格子の座標に合わせた位置の高さを内挿する。または、等高線図や等深線図に解析格子を重ねて、その地点のデータを読取るなどの方法が採られる。これらの方法では、

- ・データの読取りに膨大な作業量が発生する
- ・限られた測点のデータから多くの座標点を内挿するため精度が悪い。
- ・等高線、等深線の以上の精度が期待できない。
- ・解析格子を変更する場合には、読取りや内挿などの作業が改めて必要になる。

などの問題点が存在し、解析精度の低下だけではなく、作業量の多さなどからデータ作成自体が困難になってしまうことも考えられる。

今回発明した手法では、以上のような方法で取得したデータも同様に利用することができるが、航空測量や超音波測深システムなどによって、広範囲で大量に取得されたデータを利用することができるため、

- ・多くの測量データを用いた解析モデルが簡単に構築できる。
- ・モデル形状の再現精度が格段に向上する
- ・解析格子を変更する場合にも、データの修正・再読み取りが不必要になる。

などの効果を期待できる。

(3) データ処理方法

航空測量で得られたデータは、図-3.7に示すような表層データ：DSM (Digital Surface Model) とよばれるものである。これには、建物の形状や樹木等からの反射データも含まれている。本研究においては、地形の形状とビルなどの詳細な形状を含んだ都市モデルを構築して氾濫計算を行うことを目的としており、構造物などのデータは次節で説明する手法によって構築するため、地表面以外のデータを除去することによって図-3.8のような等間隔な地形だけの標高データ：DEM (Digital Elevation Model) を得る。DSMデータとDEMデータの概念図を図-3.9に示す。

さらに、都市計画図などから護岸の形状データを用いた修正が必要である。なぜならば上空からのレーザー計測においては、水面からのレーザーの反射が地表面に比べて弱いため、その境界線が明瞭に表現できないという問題点がある。浸水解析には、この水際線の形状が最も重要であり、データの精度を確保するために追加処理が必須となる。

従来の解析モデルにおいては、図-3.10のように各格子の座標に合わせたデータを、図-3.11に示す角柱の集合体のように地形モデルを扱っている。しかし、VOSモ

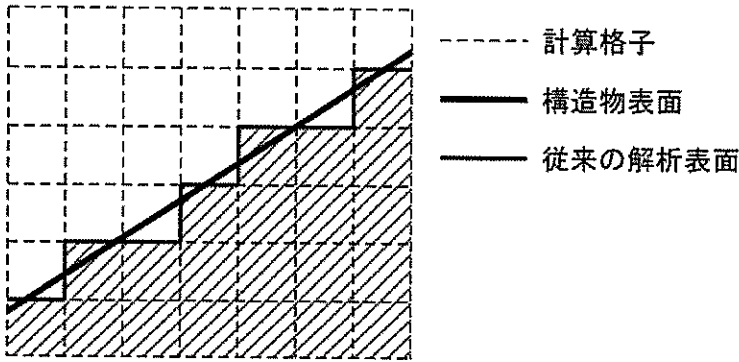


図-3.1 解析格子と表面の表現方法

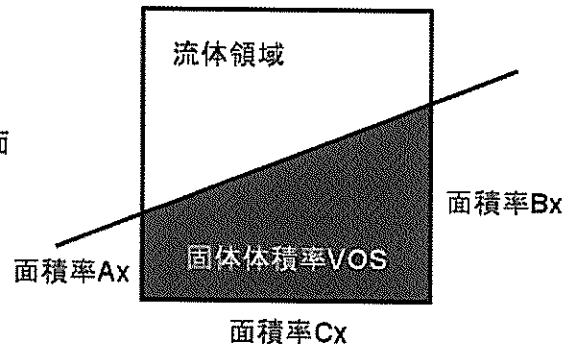
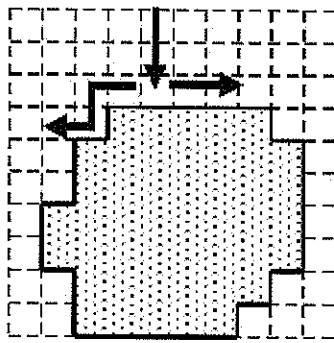
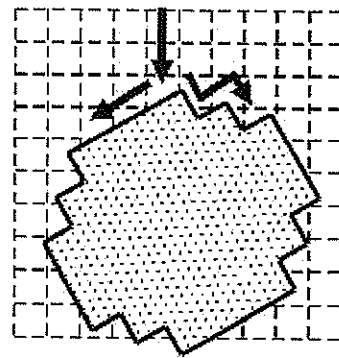


図-3.2 解析格子内での流体・固体領域の関係

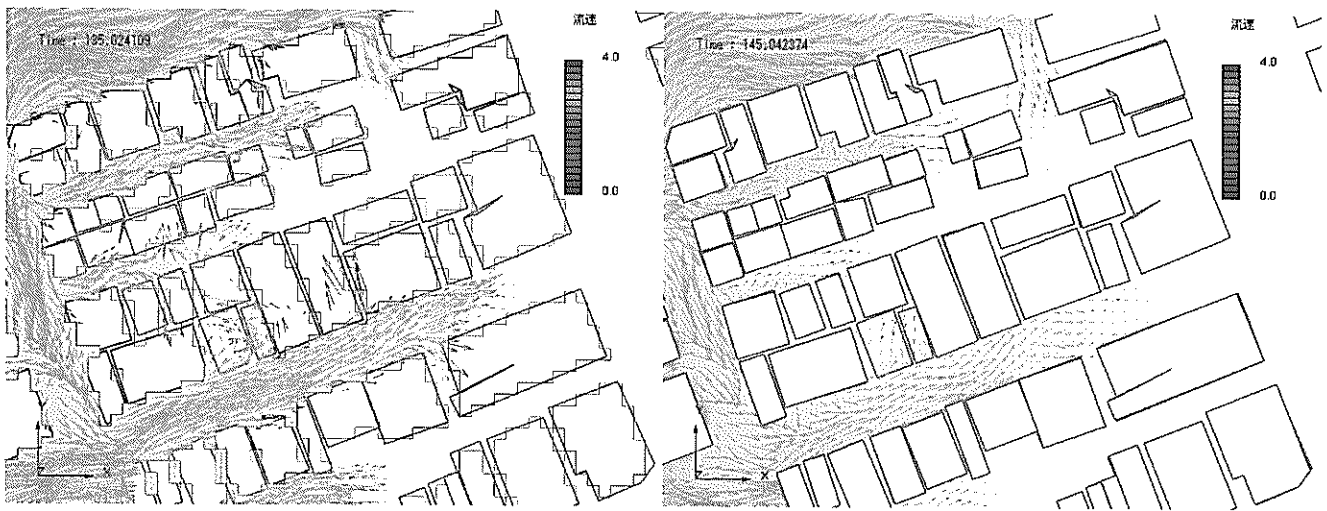


(a) 従来モデル



(b) VOSモデル

図-3.3 固相表面の表現方法の違いによる流れの変化



(a) 従来モデル

(b) VOSモデル

図-3.4 VOSモデルによる解析精度の向上

モデルでは、立体形状を解析プログラム上で格子の方向性とは無関係に高精度で再現できるために、図-3.12に示すようなモデルを構築することができる。このモデルは、解析範囲の下端を底面、隣り合う4つの標高データを上面とした立体形状の集合体であり、隣接するモデルとの

連続性を保つことができるため、解析も高精度に行うことが可能となる。

このように、航空測量による標高データを解析プログラム上に入力するためのデータの変換プログラムを作成し、3次元地形データを作成する。

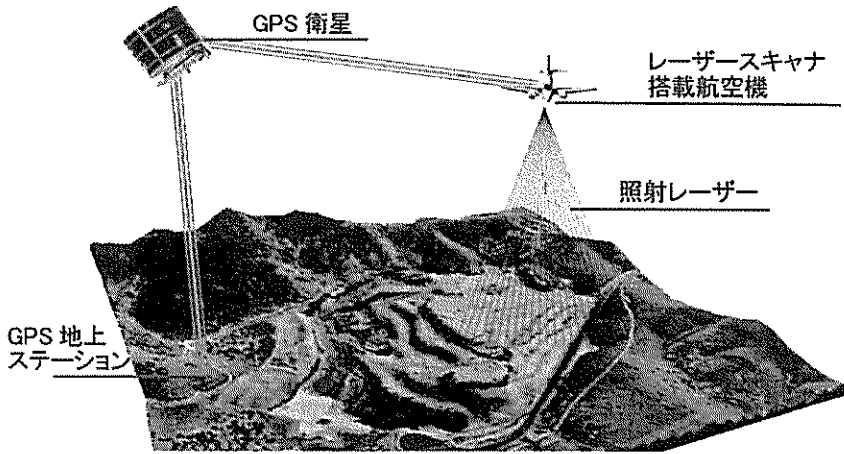


図-3.5 航空機レーザー測量

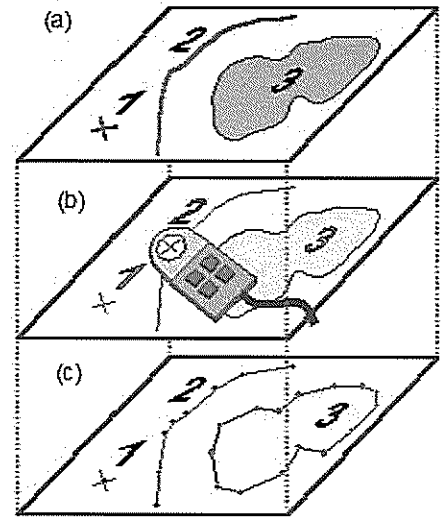


図-3.6 従来の地形データ作成方法

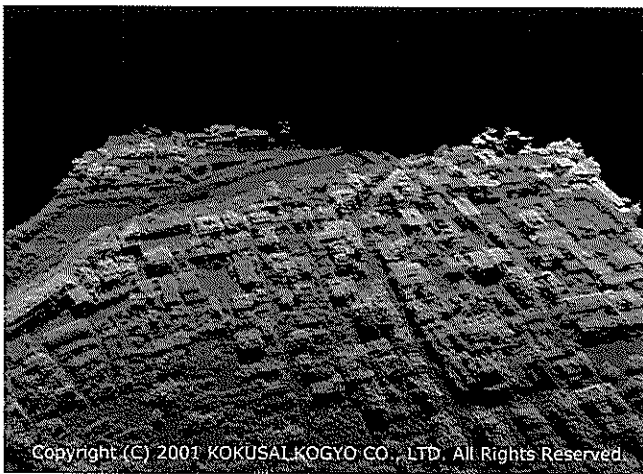


図-3.7 DSMデータ

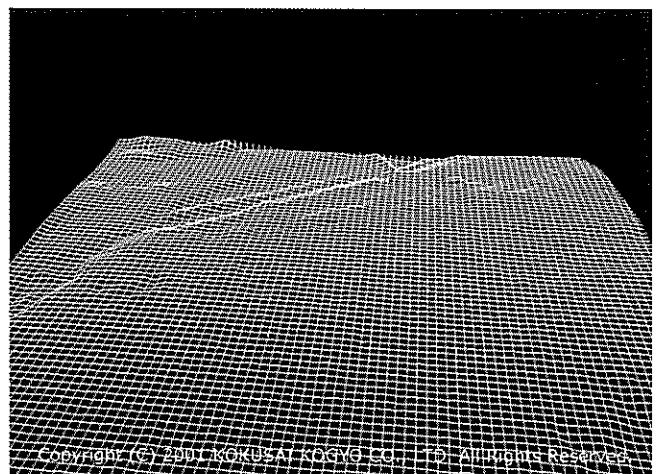


図-3.8 DEMデータ

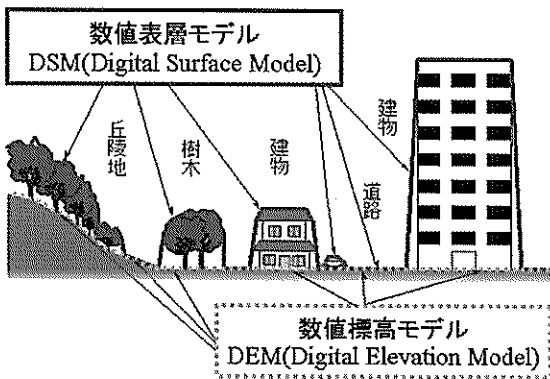


図-3.9 DSMデータとDEMデータ

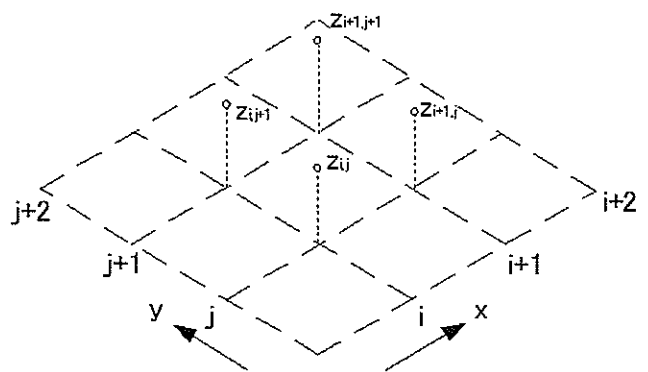


図-3.10 各格子の高さ情報

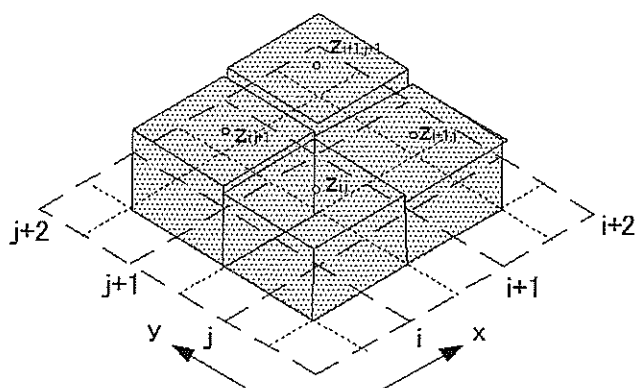


図-3.11 従来の地形表現

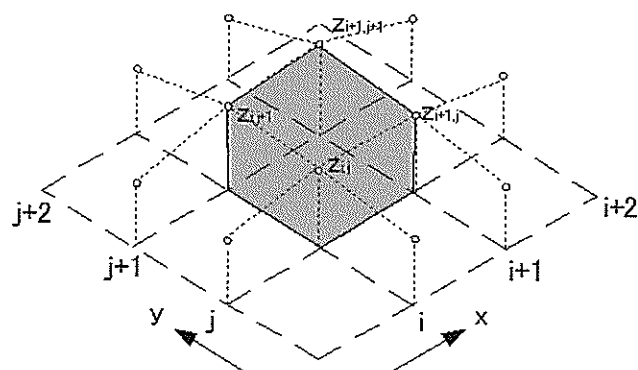


図-3.12 地形立体モデル

3.3 構造物データの構築方法

(1) 構造物の輪郭データの作成方法

ビルなどの構造物のデータは、都市計画図や設計図書などを参考にして作成する。DSMモデルを利用することも可能ではあるが、航空機からのレーザープロファイラーで取得したデータでは、構造物の隅角部を始めとする構造物の輪郭部分が不明瞭であるため、解析の精度を低下させると考えられる。

近年、構造物の設計にはほとんどの場合でCADが用いられており、都市計画図なども電子化されている。これらのデータから、まず図-3.13に示すような構造物の輪郭を抽出する。電子情報がない場合には、都市計画図をデジタイザなどで読み込み、輪郭を抽出する。

(2) 変換プログラムによる3次元化

地形データと同様にVOSモデルへの変換プログラムを用いて、図-3.14のように3次元化する。この場合には、構造物底面の高さは地形データのものとし、構造物上面はDSMデータ等で得られた構造物の高さとする。以上のような、地表面データと構造物のデータを解析プログラム上に入力して重ね合わせると、図-3.15に示すような都市モデルを構築することができる。この都市モデルは、詳細な地形と構造物の形状を有しており、これまで用いられていた浸水解析手法と比較して、詳細な地形モデルを容易に構築することができる。

3.4 都市モデルの構築

(1) 地形データ

地形データは、航空機からレーザープロファイラーによって得られたものから、ビルや高架橋、歩道橋などの

構造物や樹木を除去したものを利用した。さらに、護岸部分に関しては、データの取得後に護岸の改修工事が行われているため修正を行った。また、これらの地形の座標系と解析領域の座標系が異なるため、右廻りに約23°回転させることによって両者の座標系を同じにするような処理を行った。

(2) 構造物データ

構造物データは、都市計画図から作成したCADデータに高さを与えることによって図-3.16に示すように作成した。

(3) 護岸の形状

津波や高潮などの予測では、最初に越流する護岸部分の形状や高さに結果が大きく左右される。図-3.17に解析対象地域の護岸部分のモデルを示す。修景上の理由などから、盛土による構築物やボードウォークなどが設置されており、このような細かい地形はレーザー測量データには含まれないので、それらをCADデータから取得して入力した。

(4) 地下駐車場データ

地下駐車場は、解析対象地区の最も大きな交差点部分に位置し、まず地表からは斜路で地下1F部分に降下したのち、更にエレベーターによって地下2F部分に運搬されて格納される形状となっている。CADデータから、地下空間の形状を解析プログラムに入力できるように構築した。地上の構造物のモデルを作成する場合には、構造物が存在する部分を表現すればよいが、地下構造物は必要な地下空間以外の部分を作成するという方法をとらなければならないので注意を要する。図-3.18に示すように、各階毎の形状を作成して組み合わせることとした。

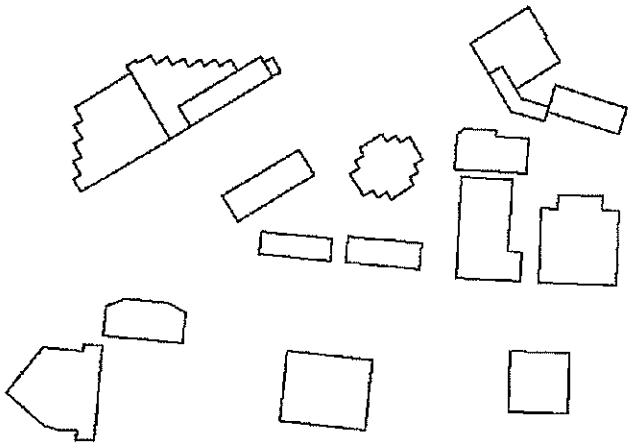


図-3.13 構造物の輪郭データ

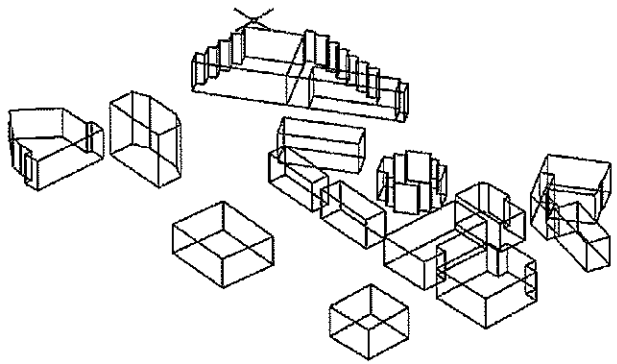


図-3.14 構造物データの3次元化

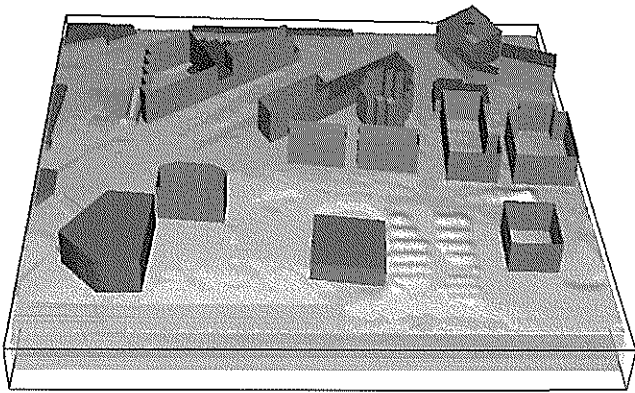


図-3.15 都市モデル

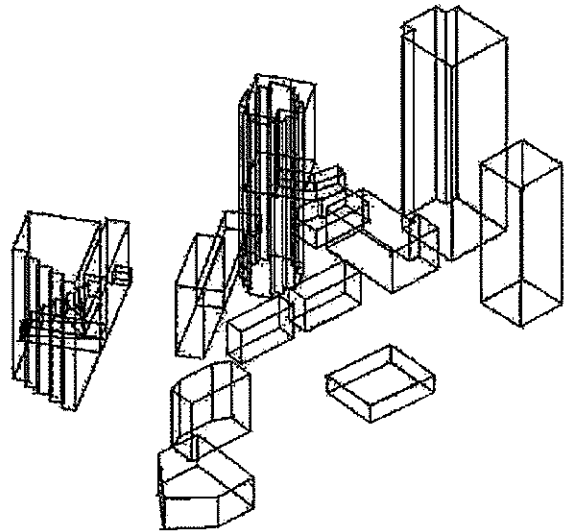


図-3.16 構造物データ

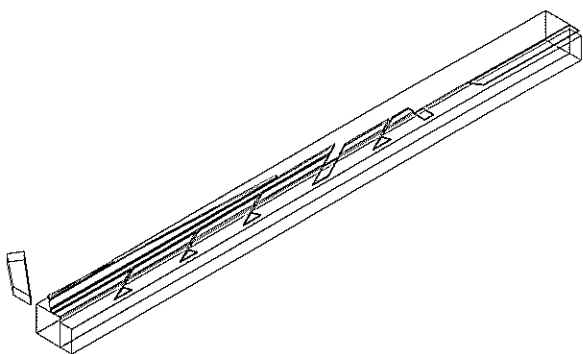


図-3.17 護岸の形状

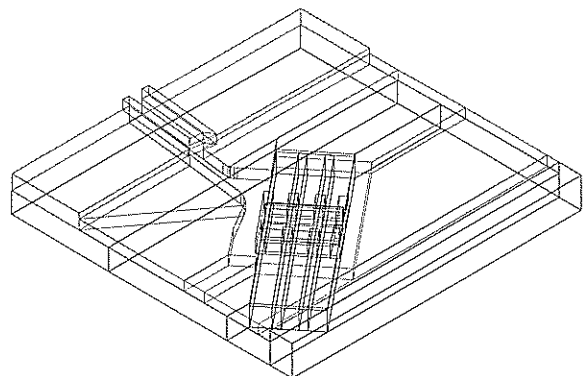


図-3.18 地下部の形状

4. 基本的なモデル地形における解析

4.1 解析条件

(1) 入射波条件

入射波条件は以下に示すとおりである。

- ・波形：微小振幅波理論
- ・波高：2.0mおよび4.0m
- ・周期：30秒、60秒

(2) 計算地形ならびに構造物条件

座標系は、岸沖方向をx軸として、解析領域の最も陸側を $x=0$ とした。また、沿岸方向をy軸、鉛直方向をz軸として海底面を $z=0$ とした。計算地形は、図-4.1および2に示す高層ビルと地下複層駐車場の2ケースとした。

①高層ビル

岸壁 ($x=120\text{m}$) から30m離れた岸側の位置に、30m四方の高層ビルを2列配置する。ビル間の距離は20.0mとした。また、地盤高を $z=12.0\text{m}$ として、一様水深を11.0mとした。

②地下複層駐車場

岸壁 ($x=80\text{m}$) から20m控えた地点より岸側へ、幅40m、奥行き60m、2層の地下駐車場を配置した。中央に幅5.0mの進入路を、地上から上層（地下1階）、上層から下層（地下2階）へ直線に配置して、下層へ流入しやすくするように設けた。上層、下層の階高とスラブ厚はそれぞれ5.0m、1.0mとした。地盤高ならびに水深は、高層ビルの場合と同様に、それぞれ12.0m、11.0mとした。

4.2 高層ビル

(1) $T=30\text{s}$, $H=2.0\text{m}$ の場合

図-4.1に示した地形に対して、 $x=600\text{m}$ を入射境界として、微小振幅波理論で計算した水平流速を2周期分与え、その後は閉境界として波浪を入射させた。他の鉛直壁は、閉境界として完全反射条件とした。また、解析領域の上端は気相として自由流出境界に、底面ならびに構造物表面はスリップとした。時間間隔はクーラン数が0.2になるように設定し、 $t=200\text{s}$ まで計算した。格子間隔は、岸沖方向を $\Delta x=2.0\text{m}$ 、沿岸方向を $\Delta y=1.0\text{m}$ として全て等間隔とした。鉛直方向については、底面から陸上部へ波峰が進行した場合の最高位になると考えられる $z=14.0\text{m}$ までを $\Delta z=0.5\text{m}$ として、計算精度をあまり必要としない気相部分では $\Delta z=1.0\sim 5.0\text{m}$ と段階的に大きくした。

図-4.3に水面形を示す。図(a)の $t=50\text{s}$ に護岸に波が到達する。 $t=60\text{s}$ の図(b)からわかるように、波高が小さい

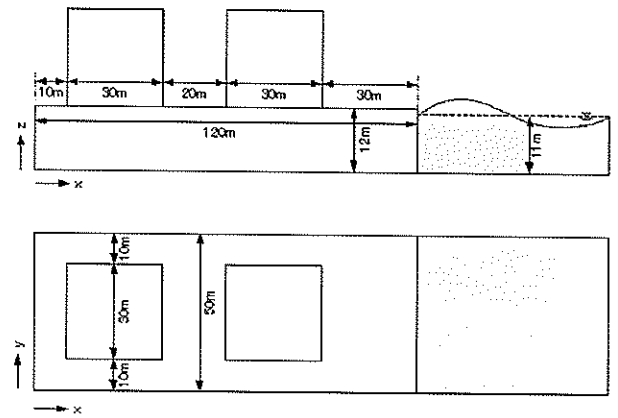


図-4.1 高層ビル

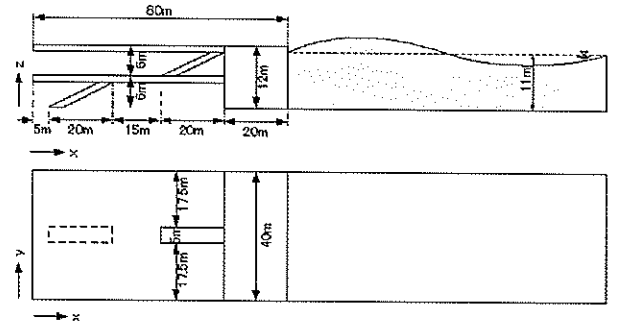


図-4.2 複層地下駐車場

ため越波量は少ない。図(c)に示した $t=80\text{s}$ における第2波の到達時の画像をみても、地表にはほとんど水塊が残っていないことがわかる。第2波が引いた後、図(d)のように徐々に海水は浸水するが、図(e)の $t=110\text{s}$ に2列目のビル周辺まで到達した後、動きはほとんどみられなくなる。

陸上部における氾濫水の伝播速度を、(a) $t=50\text{s}$ と(b) $t=60\text{s}$ の画像から推算すると、岸壁から1列目のビル前面までの30m間を10秒で通過しており、3m/s程度であることがわかる。その後、地上部での水深が小さくなるにつれ、速度も低下している。本モデル地形では、底面境界をスリップとしており底面摩擦の影響を含んでいない。実地形での適用性を考えると、流入域の算定や水位の再現性確保が重要と考えられるので、粗度の取扱いに対する検討が必要になる。

図-4.4に、 $x=10, 50, 100\text{m}$ における水位の時間変化を示す。それぞれ2列目のビル背面、2つのビルの中間地点、岸壁と1列目のビルの中間地点にあたる。沿岸方向の位置は $y=5\text{m}$ で、岸沖方向にビルが存在しない道路上である。水位は、海底面を $h=0$ としたため、地上面では $h=12.0\text{m}$ となる。

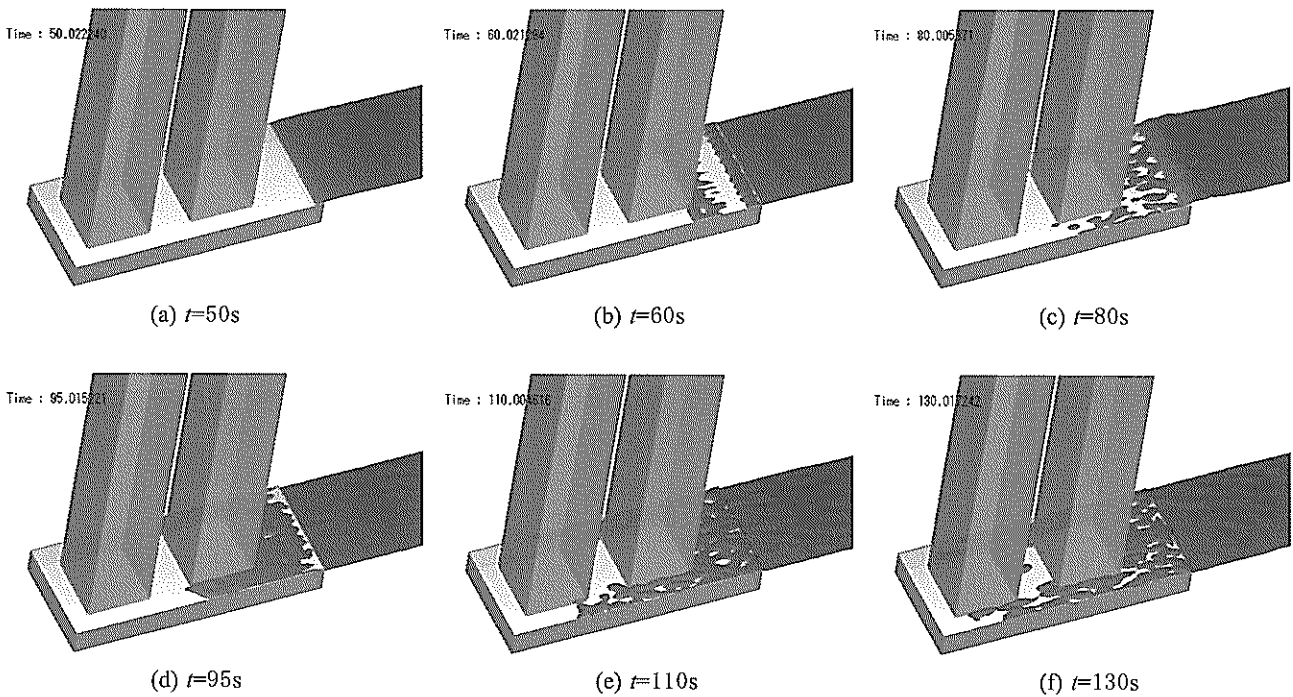


図-4.3 高層ビル周りの浸水状況 ($T=30s$, $H=2.0m$)

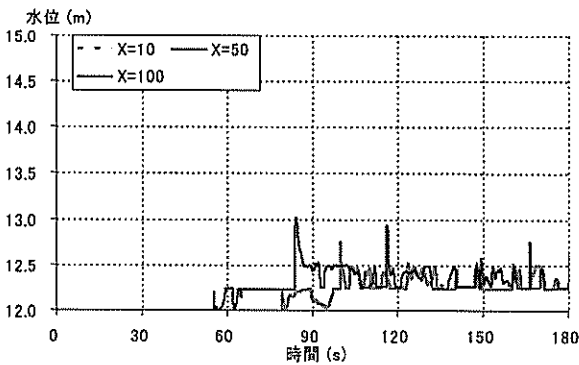


図-4.4 水位の時間変化 ($T=30s$, $H=2.0m$)

地上における水位は非常に低く、越波した直後の1.0 mが最大である。地上を進む海水の水位は、 $x=50m$ の変化から0.5m程度であることがわかる。なお、 $x=10m$ には水が到達していないため、出力されていない。

12.25ならび12.5mの高さでデータが途切れる離散的な傾向がみられるのは、 $z=12.5m$ の高さに地上部の最下段の格子境界があるためと考えられる。地上部での流入量が少なく、鉛直方向の1格子のみで水が伝播するような場合には、流れが平面的に広がらず、離散的な水塊のような形状に表現され、表面張力が過大に評価されてしまう。そのため、このような水位の時間分布になると考えられ、より詳細な結果を得るためには、鉛直方向の格子間隔を小さく設定する必要がある。

(2) $T=30s$, $H=4.0m$ の場合

図-4.5に水面形を示す。(1)の $H=2.0m$ の場合と同様に、 $t=50s$ に1波目の越流が開始する。図(a)の水面形が乱れず一様であることから、水位と流量は $H=2.0m$ の時よりも大きいことが推察される。 $t=60s$ には2つのビル間に到達して、側方からビル間に回り込んでいる。図(b)の $t=55s$ に1列目のビル前面で反射されており、図(c)の $t=60s$ で反射波が岸壁部において戻り流れとなっている様子がわかる。 $t=65s$ 以降は水位が浅くなり、水塊が途切れ途切れになるが、そのまま浸水し図(d)の $t=75s$ には $x=0$ まで到達する。図(e)のように $t=80s$ に第2波が到達すると水位が上昇し、途切れていた水面が、図(f)に示すように $t=100s$ 以降ほぼ全域で連続するようになる。 $t=50s$ と $t=60s$ の画像より、波浪の伝播速度を推測すると、 $x=90m$ 付近から $x=50m$ まで進行しており、約4m/sと $H=2.0m$ の場合よりも速いことがわかる。

図-4.6の水位の時間変化をみると、徐々に陸上部全体の水位が上昇していることがわかる。 $t=50\sim 80s$ の間は図-4.4と同様に、鉛直方向の1格子のみで海水が伝播しているために、水位変動の乱れがみられる。 $t=80s$ に第2波が到達して海水が大量に越波して流入すると、水位は一気に2.0mまで上昇する。入射波は境界から2波だけ作用させているが、計算を終了する $t=200s$ まで増加が続いていることから、岸壁で反射した波浪が入射境界で反射して、何度も越波していることがわかる。また、 $t=120s$

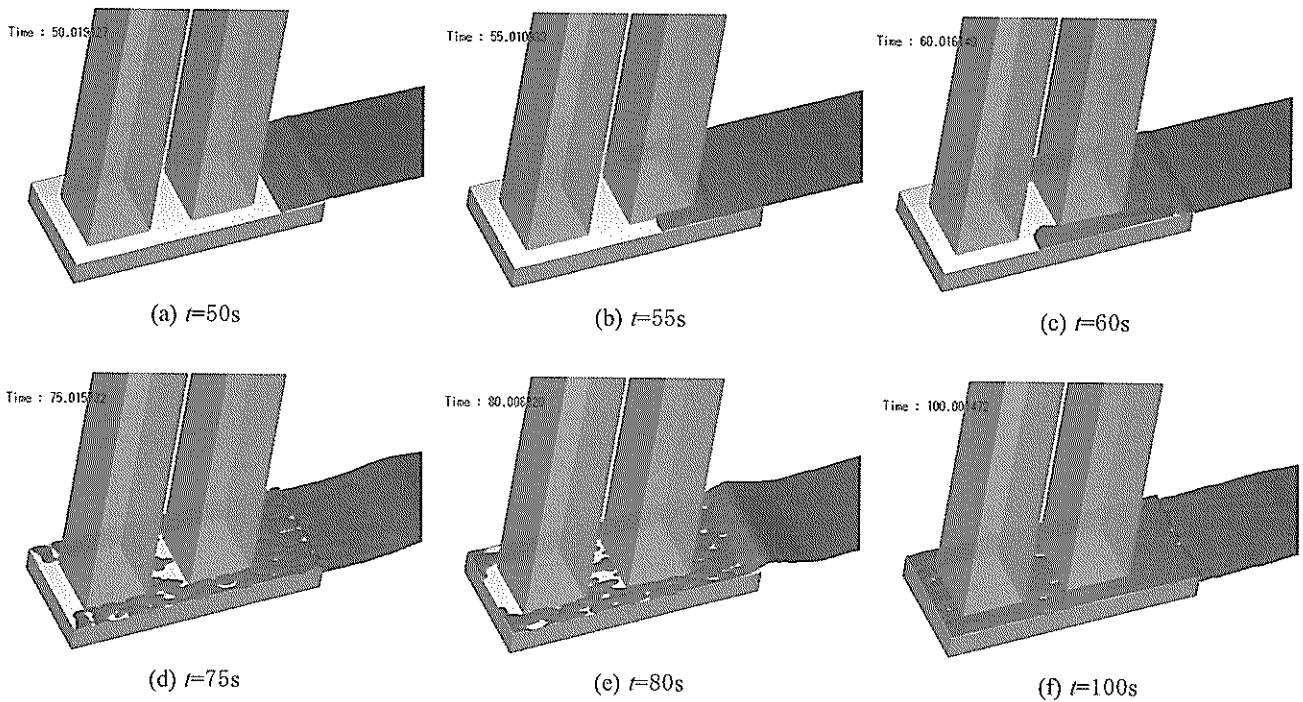


図-4.5 高層ビル周りの浸水状況 ($T=30s$, $H=4.0m$)

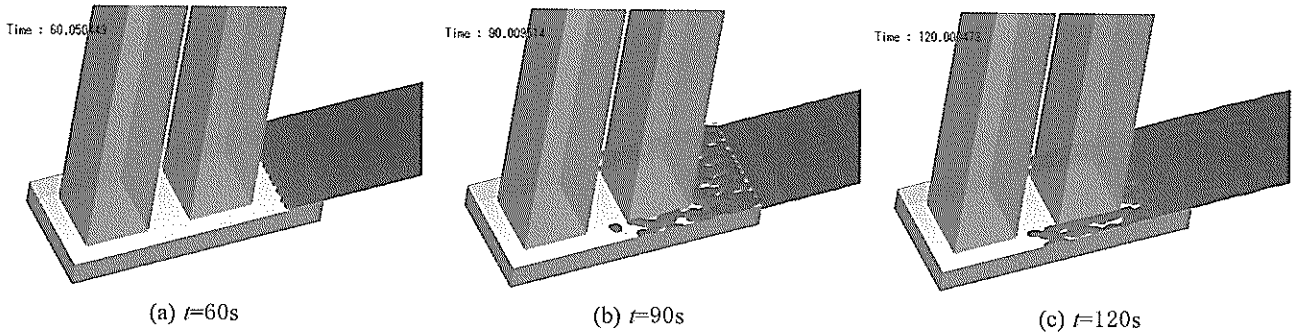


図-4.7 高層ビル周りの浸水状況 ($T=60s$, $H=2.0m$)

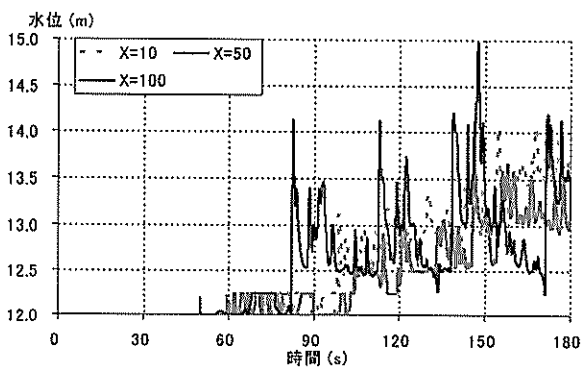


図-4.6 水位の時間変化 ($T=30s$, $H=4.0m$)

以降は、水位が上昇して2格子以上で海水伝播している
ので、水位の変動が離散的ではなくなる。

(3) $T=60s$, $H=2.0m$ の場合

図-4.7に $t=60, 120s$ における水面形を、図-4.8に水位
の経時変化を示す。水面形について、 $T=30s$ の場合と比
較すると、周期が違うため進行速度に違いがあるものの、
氾濫水の到達位置や陸上部における浸水状況などの傾向
は類似している。水位の時間変化も、ほとんど越波しな
いため水深が浅く、鉛直方向に1格子のみで波浪が伝播
しており、離散的な変動をしていて大きな特徴はみられ
ない。

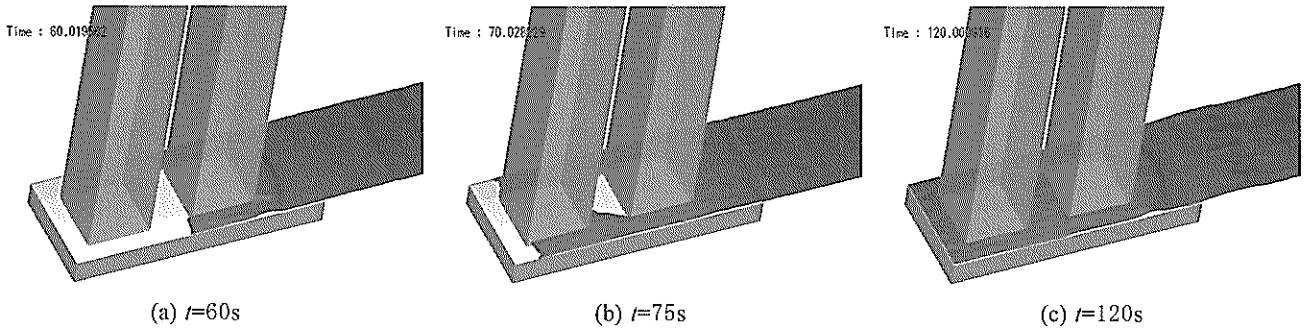


図-4.9 高層ビル周りの浸水状況 ($T=60s$, $H=4.0m$)

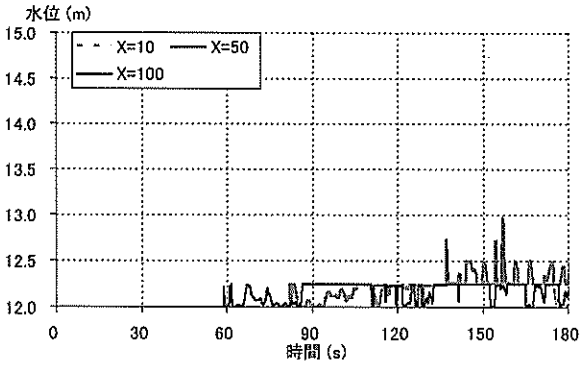


図-4.8 水位の時間変化 ($T=60s$, $H=2.0m$) の場合

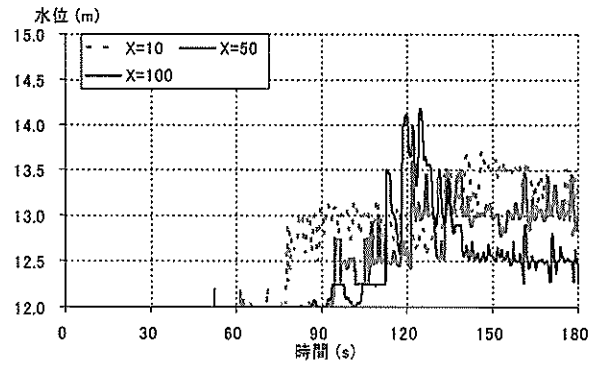


図-4.10 水位の時間変化 ($T=60s$, $H=4.0m$)

(4) $T=60s$, $H=4.0m$ の場合

周期 $T=60s$ 、波高 $H=4.0m$ の場合の水面形を図-4.9に、水位の経時変化を図-4.10に示す。(3)と同様に、周期の違いからゆっくりとした越流になるため、水位が低く、進行速度も遅くなる。周期 $T=30s$ 、波高 $H=4.0m$ の場合と同様に、時間経過とともに全体的に水位が上昇する。

4.3 複層地下駐車場

(1) $T=30s$, $H=2.0m$ の場合

解析条件や格子間隔は、高層ビル群の場合と同じとしたが、流下中の海水の挙動を精度良く表現するために、斜路部分には三角形メッシュを用いた。また、水面形の表示は、図-4.11に示すような高層ビル群の場合と同じ斜め上方からの視点のものと、図-4.12に示すような直上部に視点をおいて、地上部の画像と(以下、地上)、 $z=5.8\sim 11.8m$ 間をスライスした画像(以下、上層)と、 $z=5.8m$ 以下のみを表示した画像(以下、下層)を並べたものの2通りとした。また、水位の時間変化を抽出する位置を、 $x=10, 40, 60, 80m$ とした。それぞれ下層への斜路の途中、地上から上層への斜路の下端および上端、岸壁の前面である。

図-4.11および図-4.12に水面形を示す。 $t=55s$ に岸壁から越波を始め、図(a)の $t=60s$ には開口部に到達して斜路を流下し始める。図(b)の $t=65s$ には上層の画像にも水塊が表示されている。図(c)の $t=75s$ の画像では下層にも水塊が到達しているが、第1波目の越波量が少ないので下層部への流入はほとんどみられない。図-4.12(d)に示すように $t=90s$ に第2波が越波すると、比較的大量に越波して開口部から流入し、図(e)の $t=105s$ には下層へも到達している。図(f)の $t=120s$ には、上層のほとんどの部分に海水が流入するが、下層部は半分程度が水没しているに過ぎない。

図-4.13に水位の時間変化を示した。 $x=80m$ の水位変動から、波浪の到達時刻がよくわかる。入射させた2波の変動だけでなく、 $t=120s$ 以降も波浪がみられ、入射境界で多重反射していることがわかる。一方、 $x=40, 60m$ の水位は離散的に変動していて特徴を良く読み取れない。これは、水位の抽出点をプログラム上で $x-y$ 平面上の座標として指定しているためである。今回のように地下空間のある地形を対象とした場合には、地下部と海域部で同一の $x-y$ 座標上に複数の自由水面が存在する可能性があるが、最も自由水面が高い地点での水面として抽出す

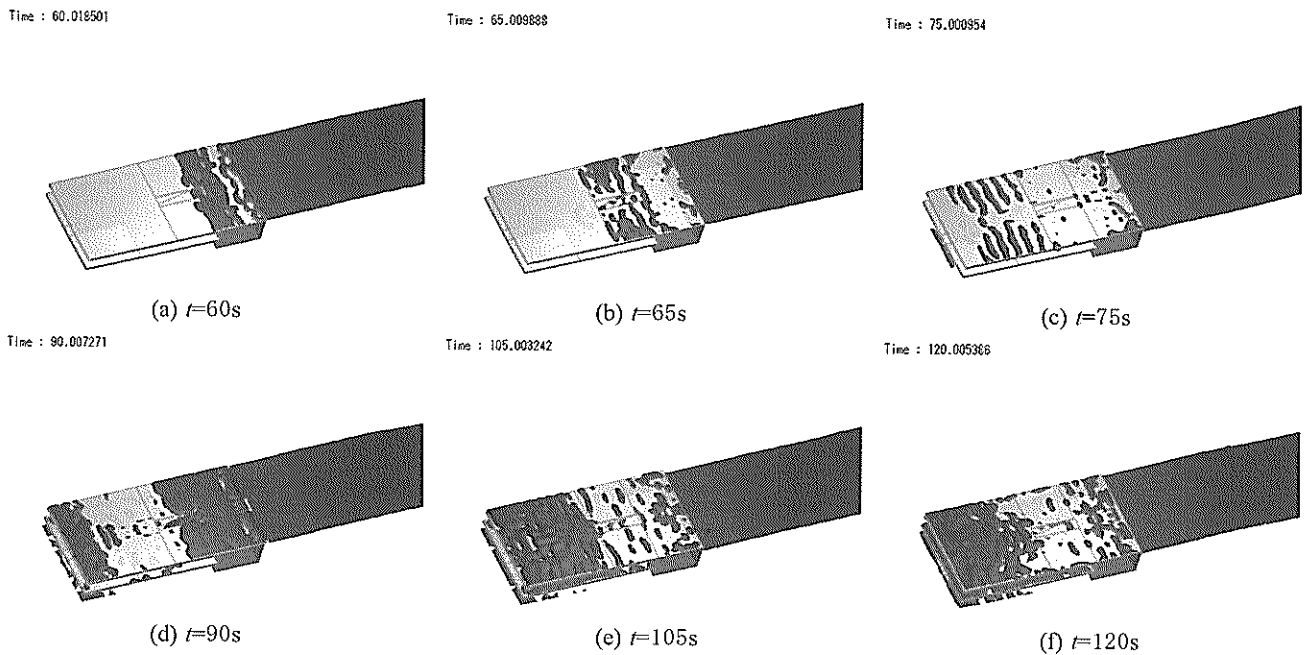


図-4.11 地下駐車場における浸水状況 ($T=30s$, $H=2.0m$)

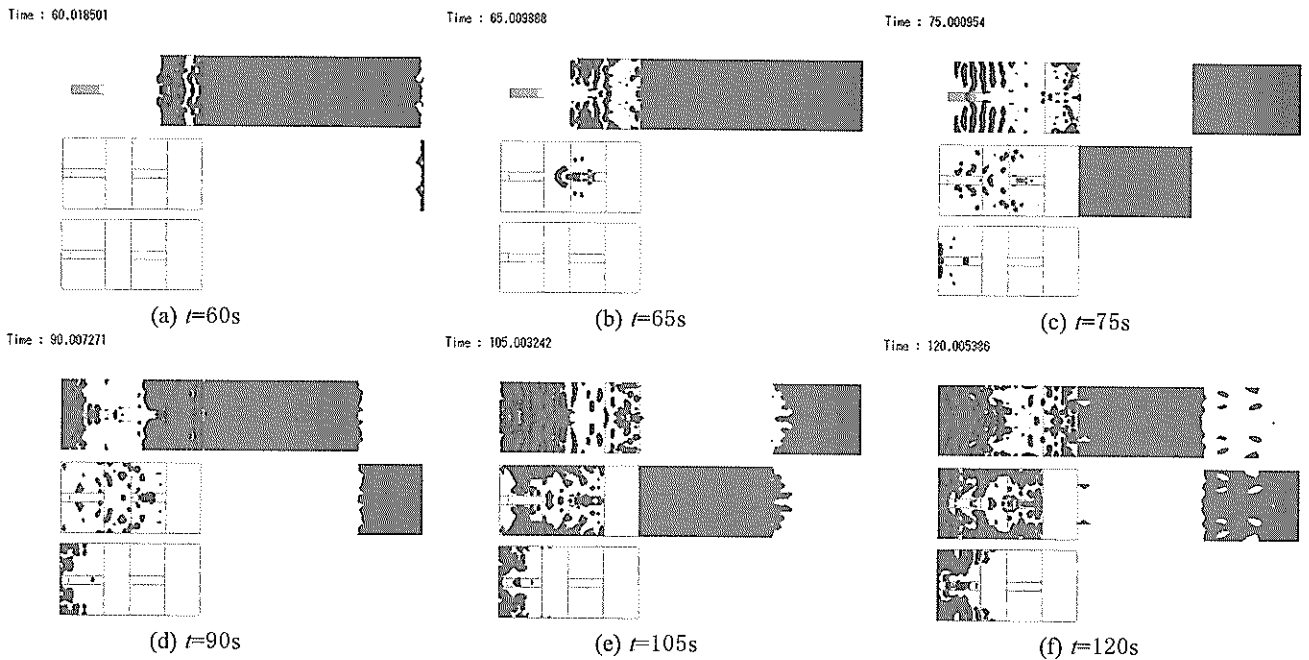


図-4.12 地下駐車場における浸水状況の断面図 ($T=30s$, $H=2.0m$)

るようにプログラミングされているためである。今後、都市複合空間の浸水解析ツールとして利用する際の大きな問題点であり、改良の余地がある。

(2) $T=30s$, $H=4.0m$ の場合

図-4.14および図-4.15に水面形を示す。前ケースよりも越波量が多く、図(b)の $t=60s$ には地上部の2/3に一気に海水が浸水している。この時点で既に開口部からも勢い良く上層に流入し、 $t=65s$ には下層にも流入している。

さらに、 $t=85s$ に第2波目が到達すると $t=90s$ には地上部が完全に水没し、斜路だけでなく開口部全体から海水が落下して上層のほぼ全域に海水が分布している。 $t=115s$ には下層部もほぼ全面が海水で満たされている。このように、入射波高と共に越波量が増大して地上部全域が水没すると、地下部への流入量が大幅に増加して、短期間で下層まで流入することが確認できる。

図-4.16に水位の時間変化を示す。図-4.13と比較して

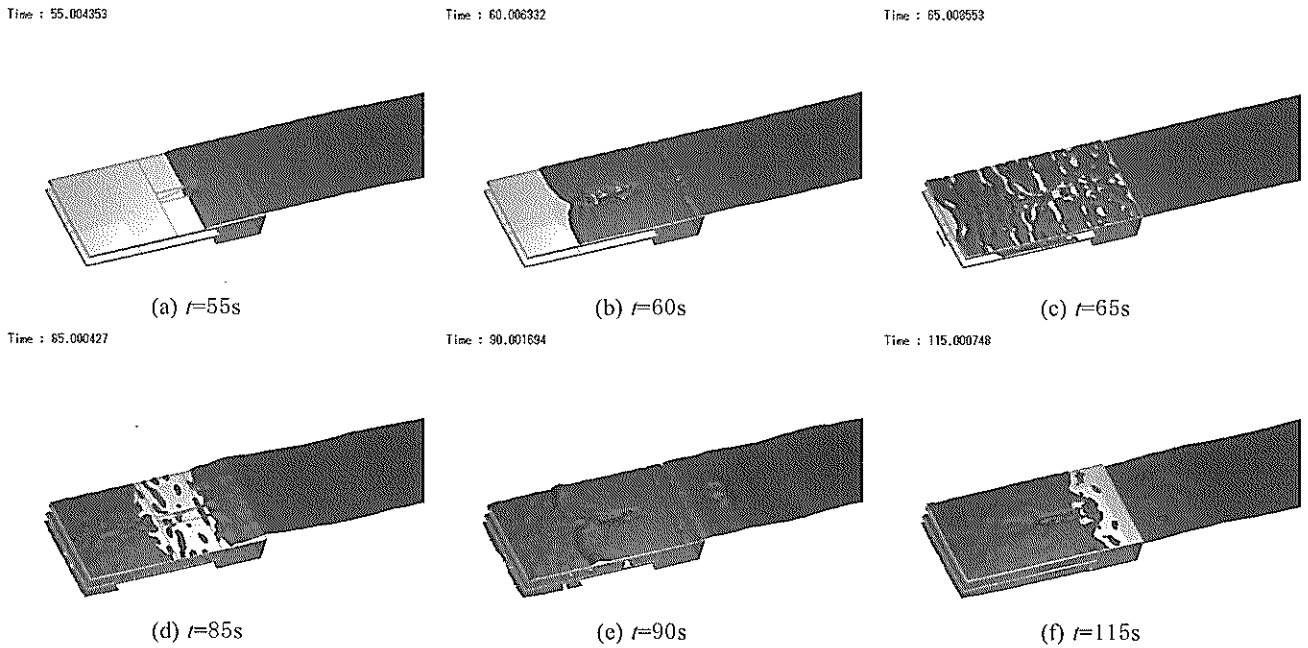


図-4.14 地下駐車場における浸水状況 ($T=30s$, $H=4.0m$)

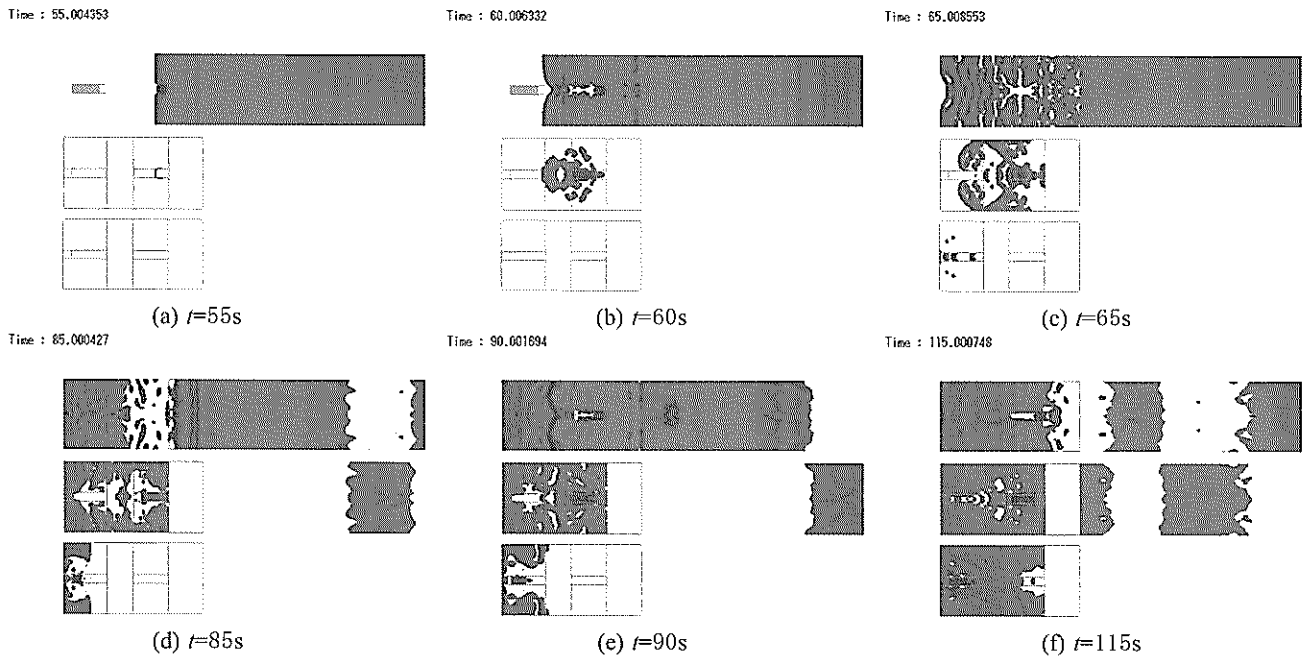


図-4.15 地下駐車場における浸水状況の断面図 ($T=30s$, $H=4.0m$)

越流水位が大きく、上層、下層への流入がかなり早いことがわかる。

(3) $T=60s$, $H=2.0m$ の場合

図-4.17および図-4.18に水面形を示す。 $t=55s$ に波浪が岸壁に到達している。その越波量は少ない。地上部の海水は、 $t=85s$ には $x=0$ に到達しているが、岸壁部から開口部付近の海水は少なく地面が露出している。地下部でも、 $t=70s$ で上層へ、 $t=75s$ で下層へ若干の海水の流入が

確認できるが、その後の流入はほとんどみられない。 $t=120s$ に第2波目が来襲すると、地上に比較的多くの海水が越波して地下部へ浸水するが、上層で約半分、下層には1/4程度の海水が流入する程度である。

図-4.19に水位の経時変化を示すが、これまでと同様に離散的に増減しているのに加え、地下層での水位変化が複雑である。

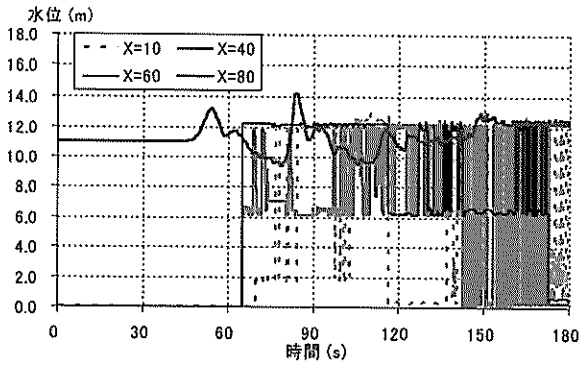


図-4.13 水位の時間変化 ($T=30s$, $H=2.0m$)

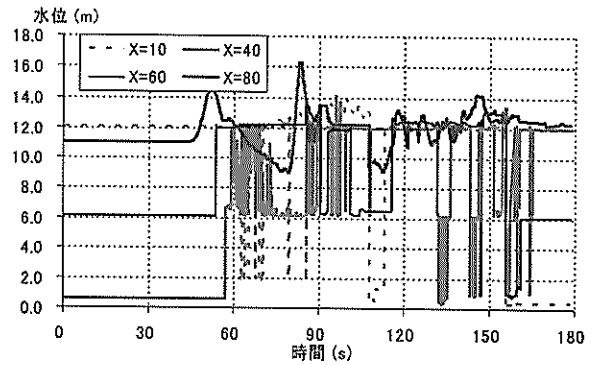


図-4.16 水位の時間変化 ($T=30s$, $H=4.0m$)

Time : 60.016995

Time : 65.000854

Time : 120.000168

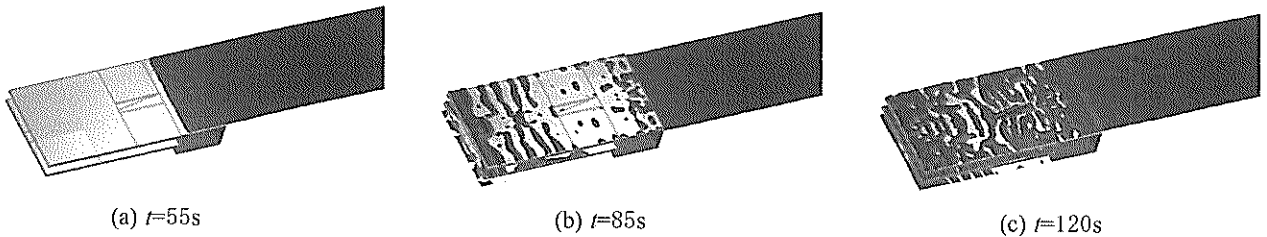


図-4.17 地下駐車場における浸水状況 ($T=60s$, $H=2.0m$)

Time : 70.011139

Time : 75.001190

Time : 120.000168

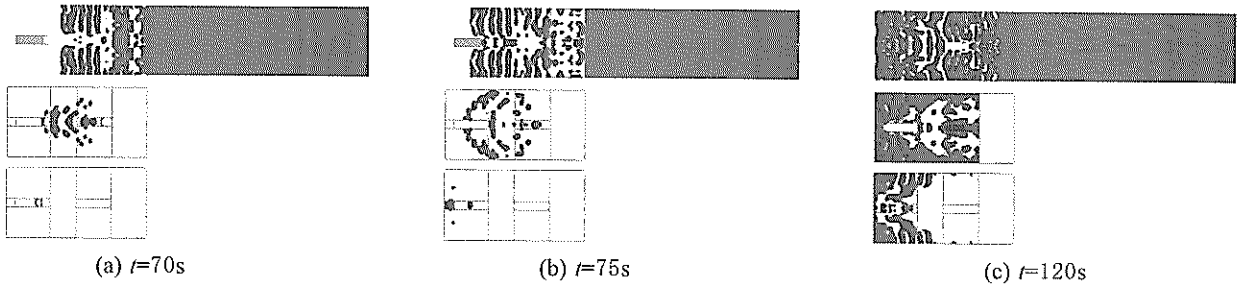


図-4.18 地下駐車場における浸水状況の断面図 ($T=60s$, $H=2.0m$)

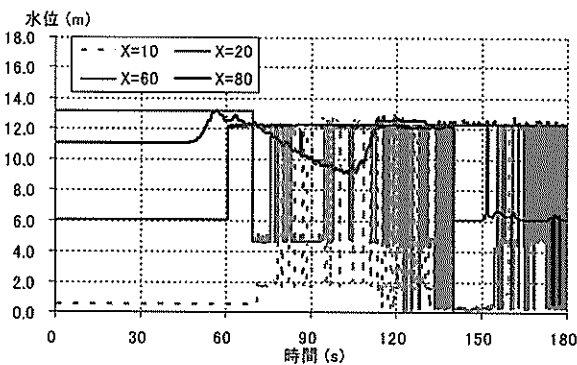


図-4.19 水位の時間変化 ($T=60s$, $H=2.0m$)

(4) $T=60s$, $H=4.0m$ の場合

図-4.20および図-4.21に水面形を示す。越波量が多いため、地下部への流入が早く、越流開始後すぐの図(a)の $t=60s$ において、斜路から勢い良く地下部上層に流入している。図(b)の $t=70s$ には、地上の全域が水没しているばかりか、一気に上層のほぼ全域に海水が広がっていて、下層へも到達している。 $t=80s$ 以降、第2波が到達する直前の $t=110s$ まで、地下への流入は継続し、下層の全域が水没する。波高と周期の長いケースでは、地下への浸水は非常に早くなる様子が再現できた。

図-4.22に水位の時間変化を示す。 $x=80m$ から護岸前面の水位変動および越波量の大きさをみることができる。 $x=60m$ より地下への流入がすぐ始まっている状況がわかる。

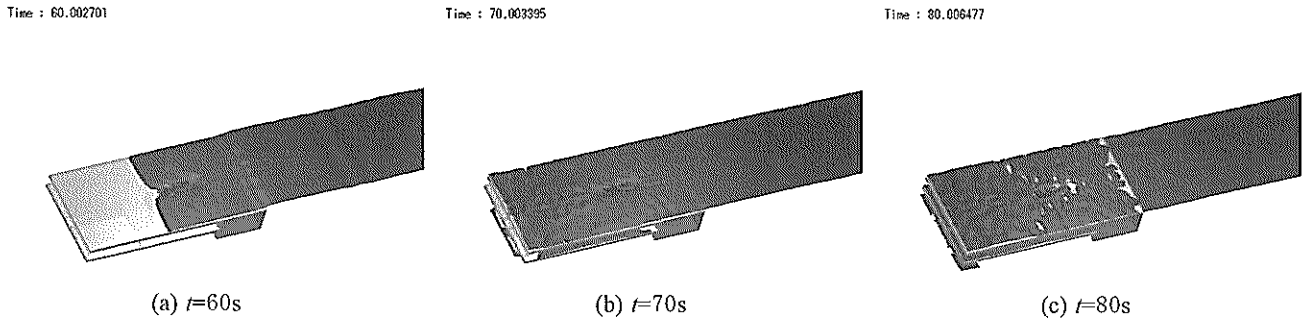


図-4.20 地下駐車場における浸水状況 ($T=60s, H=2.0m$)

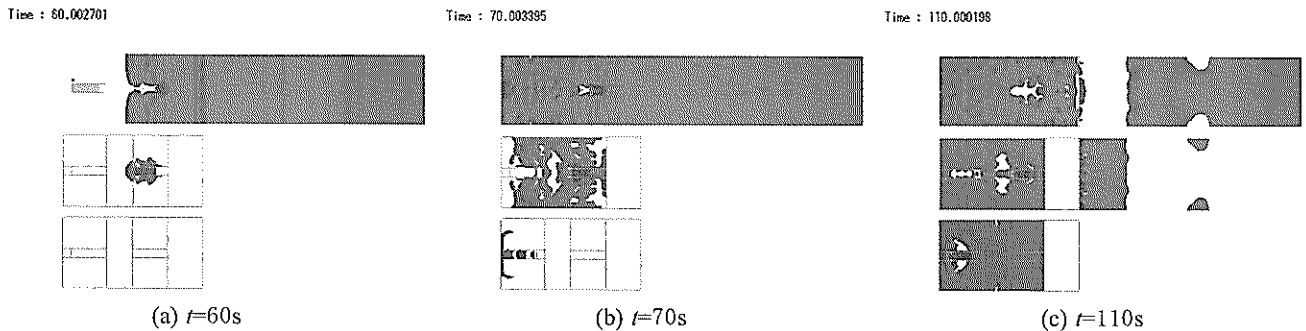


図-4.21 地下駐車場における浸水状況の断面図 ($T=60s, H=4.0m$)

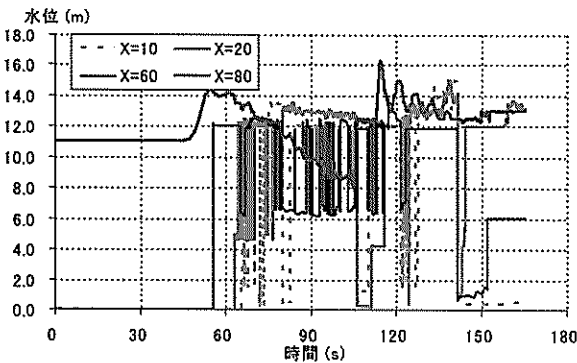


図-4.22 水位の時間変化 ($T=60s, H=4.0m$)

画像表示のみである。

解析格子の間隔については、VOSモデルを用いており、構造物の周辺で格子を細分化する必要性が低いため、 $\Delta x = \Delta y = 2.0m$ とした。鉛直方向については、護岸の越流部や駐車場入口部分での形状の再現性が精度を左右するため、T. P. +2.0~+4.0mの間で $\Delta z = 0.25m$ とし、地下部分で構造物のスラブ高などに配慮して間隔を決定した。それ以外の箇所については $\Delta z = 0.5 \sim 2.0m$ と段階的に変化させた。以上のような条件で格子分割を行った結果、要素数は $175 \times 136 \times 40 = 952,000$ となった。

解析条件は、次の通りである。

- ・周期 $T=3600s$ 、波高 $H=3.3m$ 、潮位T. P. +0.9m

要素数が952,000と非常に多く、周期も3600sと非常に長いので、解析時間は非常に長くなる。平均的な護岸の標高 (T. P. +2.6m) よりも入力境界の水位が0.5m以上低いT. P. +0.9~+1.9m間には、越流は発生しないと考えられるので、計算を省略して解析時間の短縮を図った。

津波を流入させる境界条件は、次のような手法で設定した。

- 1) 入力波形の水位 η を計算
- 2) 流入境界部分の水位 η を抽出
- 3) 流入線流量 Q_m を計算； $Q_m = (\eta - \eta_0) \Delta x / \Delta t + Q_{m-1}$
- 4) 流入境界にあたる流速 U を計算； $U = Q_m / D$

ここに、 D は底面から水面までの高さ、 Q は底面から水

5. 臨海部複層都市空間における浸水解析

5.1 解析条件

解析領域を図-5.1に示す。外力としては津波を用いた。護岸に平行な方向をx軸とし、津波が流入する方向をy軸とした。解析領域の大きさは、x方向に350m、y方向は、境界から流入する流れを安定させるために海上部20mを加えた270mとした。鉛直方向は、地下駐車場の地下2Fの底面であるT. P. -14.7m~+9.0mまでの23.7mとした。図-5.1では、ビル全体を表示しているが、津波が進入する部分のみを解析領域とし、T. P. +9.0m以上については

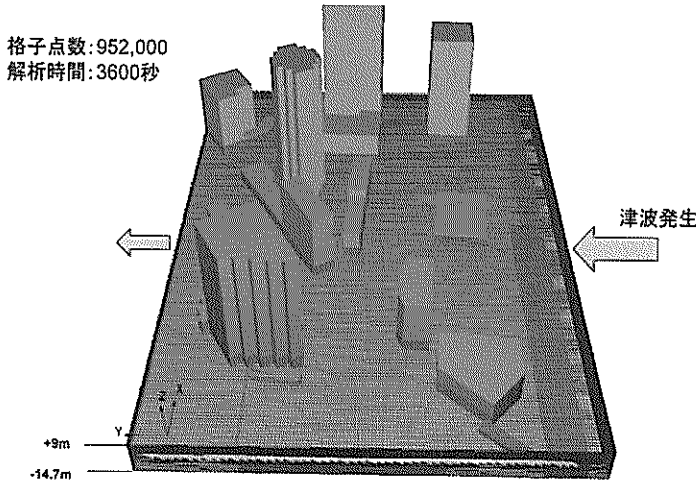


図-5.1 解析モデル

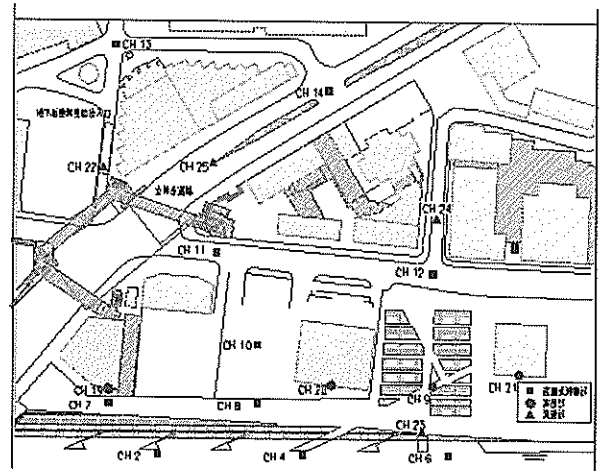


図-5.2 解析結果の抽出位置

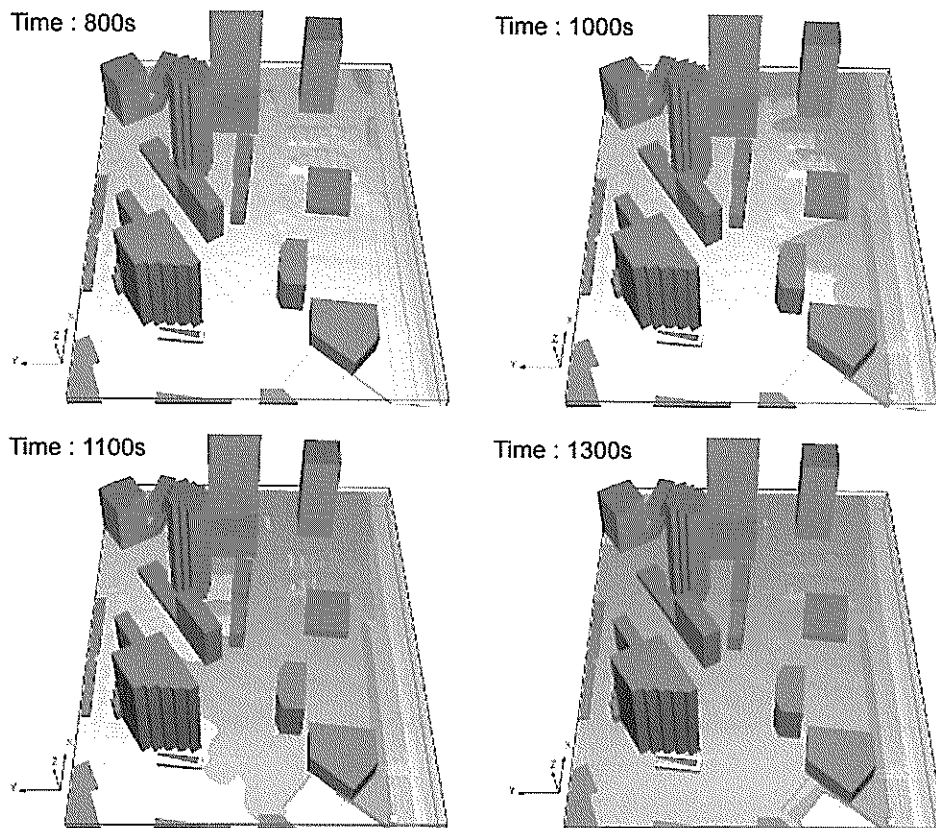


図-5.3 地上における浸水範囲の経時変化

面までの流速の積分値である。

計算結果は、水面形や流速の動画作成が可能のように、5秒毎の流体体積率、流速、圧力のデータを抽出する。データの抽出点は、実験の結果との比較検討を行うため、図-5.2に示す津波氾濫模型実験（安田ら、2003）の計測点と対応する地点とし、水位 η 、流速 (u, v, w) および圧力 P_a の時系列データを出力した。

5.2 解析結果

(1) 地上における浸水状況

図-5.3に $t=800\sim 1300$ sにおける浸水範囲を、図-5.4に入力境界に投下された質量のない仮想粒子の運動軌跡を示す。浸水範囲は、格子の流体が占める体積が0.2となる等値面を示すことによって表現している。図-5.4では、 $t=0$ sにおいて護岸前面海域に粒子を発生させた後に、そ

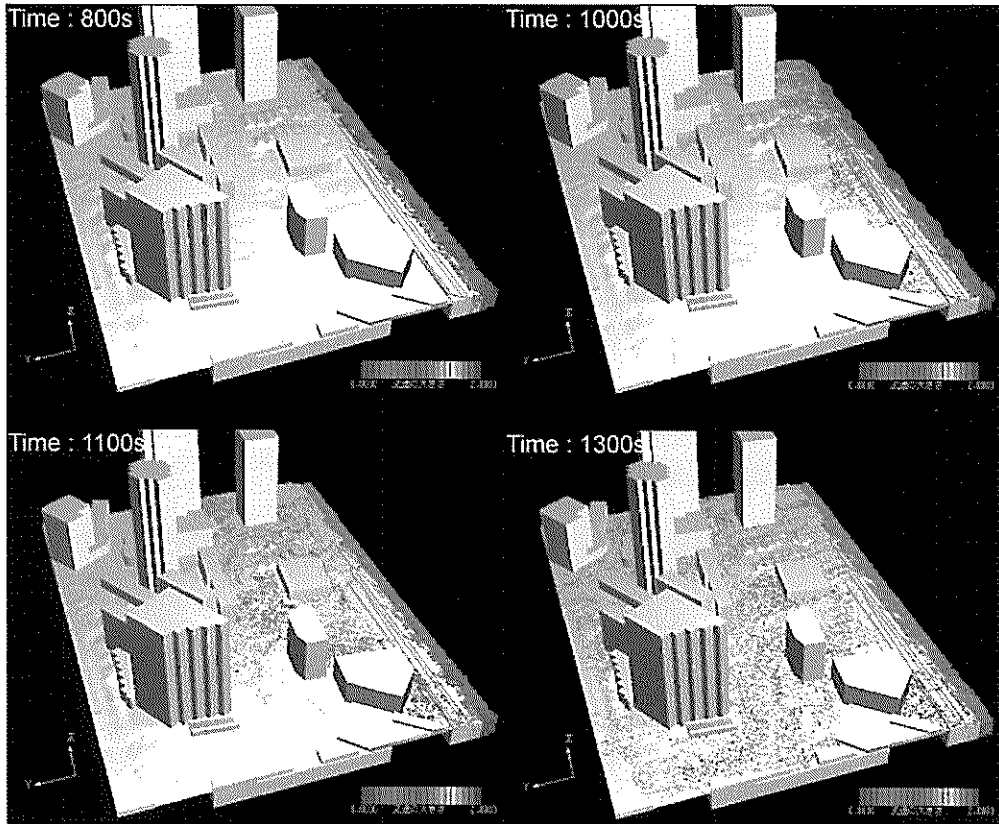


図-5.4 粒子法による流況の可視化

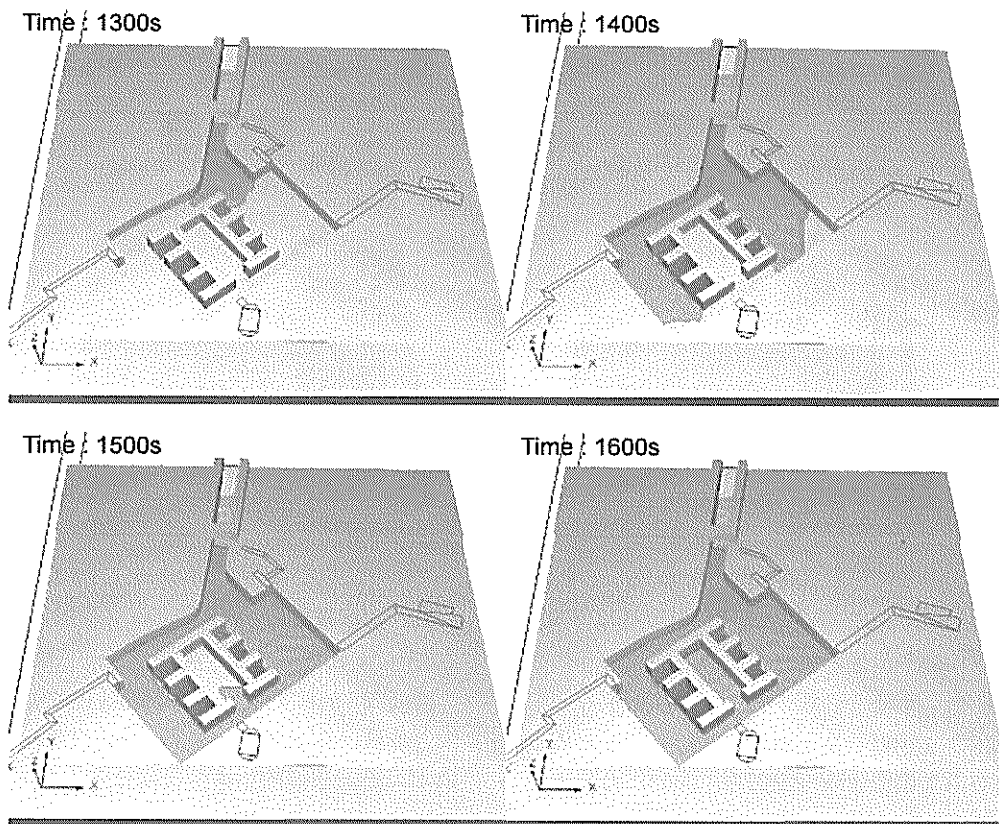


図-5.5 地下部分への浸水状況

それぞれの粒子が存在している場所での流速から移動量を算出し、順に次の地点へ移動させたもので、護岸部から越流を開始した後にどのように浸水が生じるかを判断できる。これらの図から、護岸部に越流が生じてから解析領域の全域が水没するまでの浸水状況や流れの経路を確認できる。

$t=700s$ では、護岸前面で水位はかなり上昇するものの、越流および浸水は生じていない。 $t=800s$ に護岸上方の水際公園から越流しはじめ、そのまま直進してビル間の狭い道路を通過する。 $t=920s$ には護岸の大部分から越流し、護岸中央付近から背後の低地に落下している。この流れは、 $t=1100s$ に道路部分に侵入した後、中央下方の地下駐車場がある交差点で、幹線道路に沿う左上方向と地下駐車場入口の斜路のある左下方向へ分岐する。前者は、護岸からビル間の狭い道路をまっすぐ通ってきた流れと合流し、 $t=1200s$ に左上の自由流出境界から流出する。後者は $t=1230s$ に地下駐車場の斜路付近に到達して、地下へ流入しはじめる。以上の3つの主な流れが浸水経路である。また、図-5.4の流況図によると、護岸から低地へ落水する流れ、ビル間の狭い道路の流れ、中央下方の交差点から左下の地下駐車場入口へ向かう流れの流速が速く、卓越していることがわかった。

(2) 地下における浸水状況

次に、地下駐車場への流入状況 ($t=1300\sim 1600s$) を表したのが図-5.5である。地上部の浸水状況と同様に地下部への浸水が始まってから冠水するまでの経時変化を示した。 $t=1250s$ に斜路からの流入が始まり、 $t=1300s$ になると斜路を通過して地下1階に到達し、地下2階への流入が始まっている。 $t=1400s$ には反対側の開口部からの浸水も始まり、 $t=1600s$ には地下2階がほぼ冠水してしまう。地下駐車場の柱および壁を回り込む流れも、うまく再現できていることがわかる。

(3) 浸水深

図-5.6に、地上における水位の時間変化を示す。抽出点は護岸前面、護岸上、護岸背後の低地、ビル間の狭い道路、幹線道路および駐車場入口付近である。

水位が護岸盛土より高くなると、護岸上での水位も急激に上昇している。その後、護岸背後の低地に浸水が始まり、 $t=900s$ に護岸と水位差がなくなり、浸水深が地表上約1.0mになる。T.P.表示では+3.7~4.0mである。道路上の水位は、場所によって0.2mの差が生じており、ビル間の狭い道路の方が高い。地下入口は、護岸から約200m離れており、 $t=1200s$ に水位上昇がはじまる。この部分の標高は約T.P.+1.4mで、+2.7mまで1.3m水位が上昇している。

$t=500s$ に護岸前面での水位が3.2m程度まで上昇して護岸部分の盛土より高くなると、護岸上での水位も急激に上昇しており、相関的な運動がみられる。その後、護岸背後の低地に浸水が始まり、 $t=900s$ に護岸との水位差がほとんどなくなる。この低地のT.P.は+1.2mであり、浸水深は3.0m以上でかなりの深さといえる。道路上の水位を比較すると、ピークにおいて0.4m程の差がみられる。道路の広さは約2倍異なるため、その影響が表れている。地下入口は護岸から約200m離れており、 $t=900s$ に水位の上昇が始まる。この部分の標高は約T.P.+1.4mで、+3.3mまで約2.0m水位が上昇している。

このように、計算では各地点の最大浸水深を予測できるだけでなく、どの時刻に急激に水位が上昇し避難が困難になるかを評価できる。

(4) 浸水流速

図-5.7に、浸水流速の時間変化を示す。抽出点は、幹線道路とビル間の狭い道路、地下駐車場入口の斜路である。幹線道路上は流れの主な経路にあたるため、2.0m/sと速い流速が発生する。ビル間の狭い道路上では、流速はそれよりも大きく、最大で2.4m/sになる。斜路付近では、 $t=1250s$ に流速が急激に上昇している。斜路の上部では、 $t=1500s$ において最大3.0m/sの流速が現れ、危険な状況になる。 $t=2000s$ 以降は、地下部が満水になるので、地下入口斜路における流速は小さくなる。

流体直接解析法による氾濫水の予測モデルは、浸水流速の時系列を求められるため、最大流速が現れる時刻を予測し判断するものとして非常に有用といえる。

(5) 浸水流の流体圧

図-5.8に、圧力分布の時間変化を示す。抽出点は、護岸付近のビル壁面と地下駐車場の壁面である。護岸背後のビルでは浸水とともに流圧力も上昇し、25kPaの最大値を示す。地下駐車場内は最大で4.5kPaとなり、地下駐車場が水没するまで流入が継続するため、圧力は長時間低下しない。

5.3 模型実験結果との比較による精度検証

(1) 浸水深

図-5.9に、浸水深の実験結果を示す。護岸全面の入射波をみると、解析結果に比べて最大水位が約0.5m低い。これは、解析の入力条件として用いた、予備検定実験結果の影響によるものと考えられる。予備実験で入射波検定を実施した際に、越流しない条件下で水位を上昇させ、入力波形を設定した。本実験においては、市街地模型に氾濫水が流入するため、護岸全面における水位は目標値まで上昇しない。しかしながら、解析においてはその影

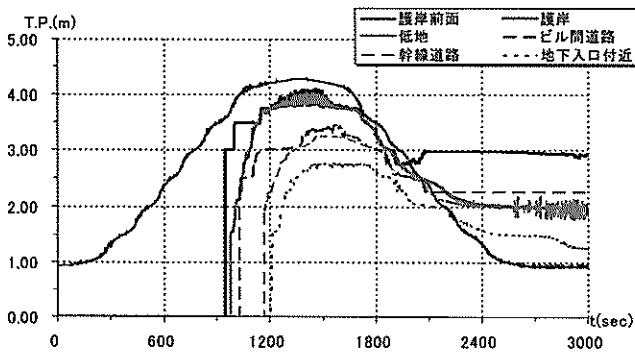


図-5.6 浸水深 (解析結果)

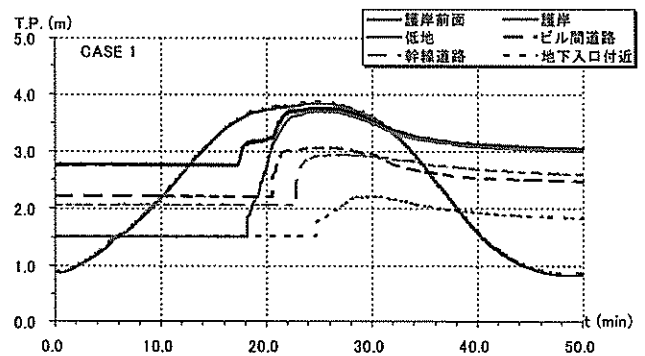


図-5.9 浸水深 (実験結果)

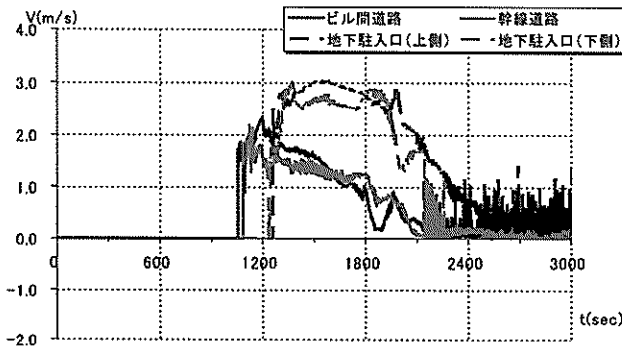


図-5.7 浸水流速 (解析結果)

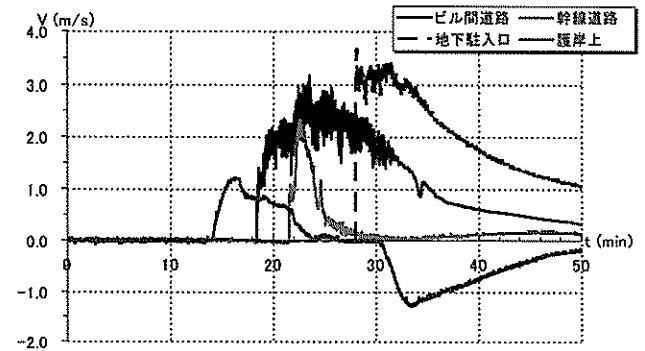


図-5.10 浸水流速 (実験結果)

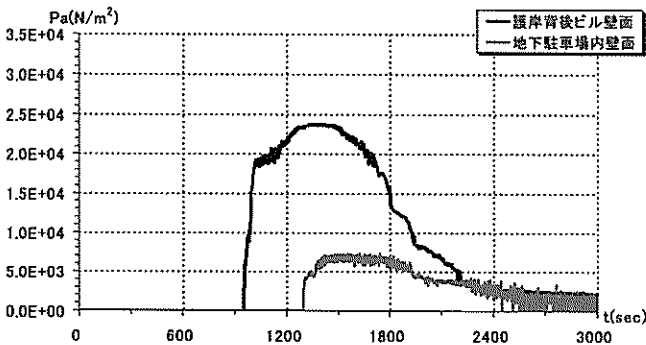


図-5.8 浸水流の流体圧 (解析結果)

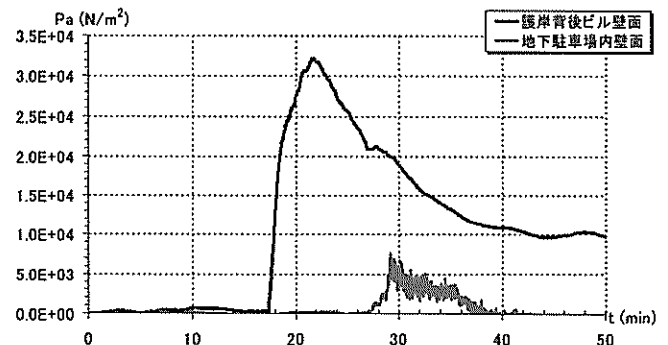


図-5.11 浸水流の流体圧 (実験結果)

響を考慮せず、入射波形を検定実験結果の目標水位まで機械的に上げてしまったため、このような誤差が生じた。結果の比較においては、この入力水位の誤差0.5mを考慮して、その精度を評価する必要がある。

越流開始直後の護岸上の浸水深は0.5mで、その後数分すると1.0mまで上昇する。これは、越流直後は越流量が少ないため水位が上昇しないが、護岸全面の水位が上がるにつれて一気に浸水量が増え、水位が上昇するためである。この数分のタイムラグもうまく再現できている。

その他の地点における波形についても、実験値より若干大きいのが、護岸と護岸背後の低地における水位がほぼ等しくT.P.+4.0m弱で、継続時間も10数分でよく対応している。道路上の水位についても、ビル間の狭い道路の方が、片側3車線の幹線道路よりも約0.2m高くなるという実験結果によく一致している。

地下入口付近については、水位上昇に約5分の誤差がある。これは、解析において入力水位が高いために、越流水深が深くなり、その結果、氾濫水の地下入口への到達が早くなったためである。

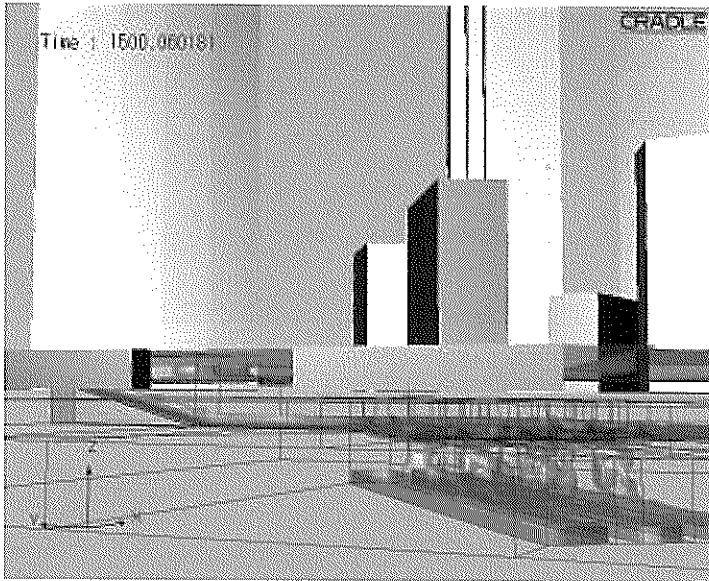


図-5.12 地上と地下の同時解析

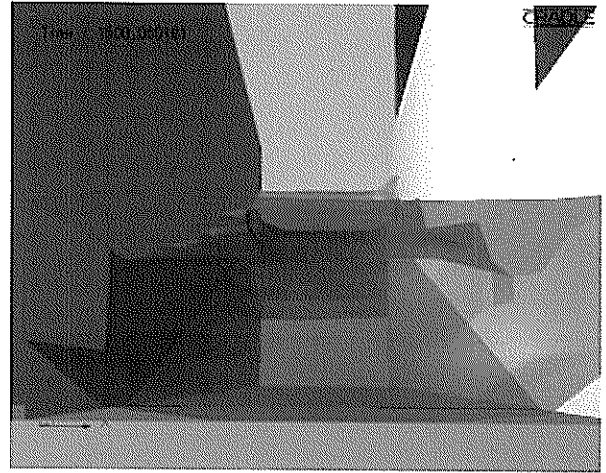


図-5.13 地下入口斜路での流況

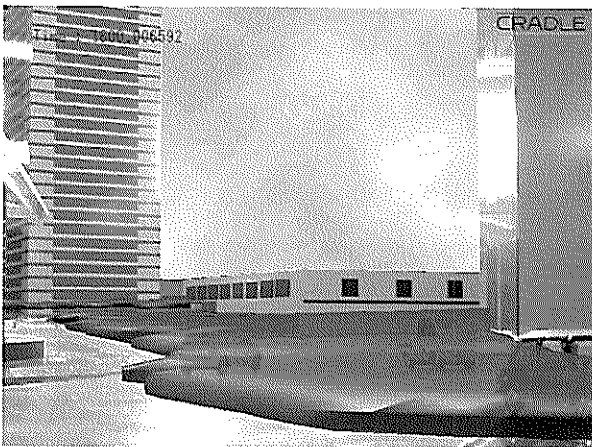


図-5.14 CCDカメラ視点での出力

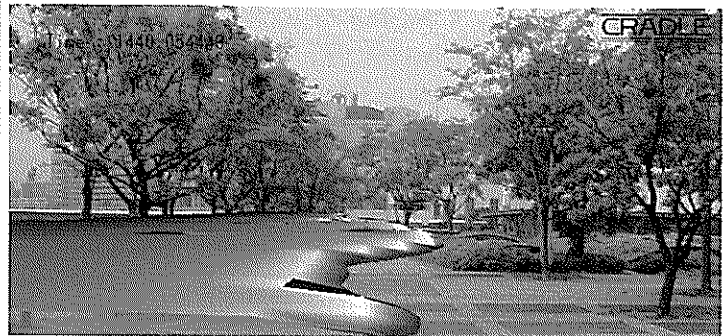


図-5.15 現地で撮影した写真との結合

(2) 浸水流速

図-5.10に、浸水流速の実験結果を示す。幹線道路上での最大流速は2.0m/sで実験結果と一致している。ビル間の道路については、実験結果の方がやや大きい傾向がみられる。実験結果で測定値に振動があらわれているが、これは計測機器の問題によるものと考えられる。

地下駐車場入口斜路における最大流速は、解析結果、実験結果共に約3.0m/sで、整合性は概ねよい。しかしながら、実験結果において、一気に最大値に達するのに対して、解析結果は緩やかに現れている点が異なっている。これは、解析において地下入口に氾濫水が達する時間が早くなったために、20分過ぎに一旦最大値があらわれ、さらにビル間を回り込んで流れてきた流れの最大値が30分頃あらわれているためである。実験においてはこの回り込んできた流れが主となって地下へ流入するために、

28分に一気に最大値があらわれる。

波形および継続時間に若干の差違がみられるが、最大値は概ね一致しており、危険度を評価する際には、本解析手法による結果を用いることが有効である。

(3) 浸水流の流体圧

図-5.11に、浸水流の流体圧についての実験結果を示す。護岸背後のビル壁面と地下駐車場の進入斜路を下ったところの壁面で計測している。

実験結果では波形が尖り、最大値がはっきりとあらわれているのに対し、解析結果は滑らかな波形になっている。護岸背後ビル壁面では、実験値の最大値が30kN/m²を越えているのに対して、解析値は24kN/m²とやや小さい。実験結果と異なる傾向がみられた大きな要因は、計測器の受圧面に対して水深が浅すぎたためであり、その結果、実験値が尖った波形になったものと考えられる。

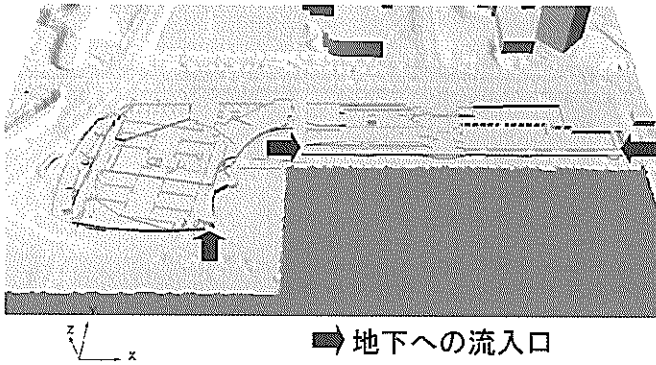


図-5.16 解析モデル



図-5.17 解析格子

地下駐車場内壁面では流体圧が大きい状態の継続時間は異なるが、 $7\sim 8\text{kN/m}^2$ でほぼ等しい。継続時間については、既に述べたように、地下への流入が実験より先に始まるためである。

5.4 Post処理による解析結果の効果的な出力

3次元的な解析を行った結果をPost処理することにより、視点を任意に置くことができ、様々な形での出力および表示が可能である。本解析は地上と地下を同時に解いているため、図-5.12に示すような視点からの地上と地下の同時表示も可能である。地下空間に対する危険度の認識はまだ低く、このような表示をすることによって、地下空間に氾濫水が流入していく速さをよりわかりやすく示すことができる。さらに、図-5.13のように地下への入口に視点を置き、避難経路における氾濫水の流況を可視化することにより、地下空間からの避難の困難さの理解も容易になる。

また、図-5.14のように、実験でCCDカメラで撮影した画像を背景に設定し、その上に解析結果を重ねて出力することもできる。縮尺を合わせた模型自動車と対比することによって、浸水深の深さをイメージしやすくなる。さらに、図-5.15には現地で撮影した写真を背景として浸水状況を出力したものを示した。CGの技術としては別段先進的なものではなく、特別なソフトを使っているわけではない。作成の簡易さに比して効果が大きいところは評価できる点である。

5.5 解析モデルの現地適用性

(1) 解析条件

前節において、実験モデル地区と同じ領域を対象に浸水解析を実施し、実験結果と比較することにより、その妥当性を検証した。その結果、入力条件の設定概念の違いにより若干の誤差が生じたが、本解析モデルは実用に

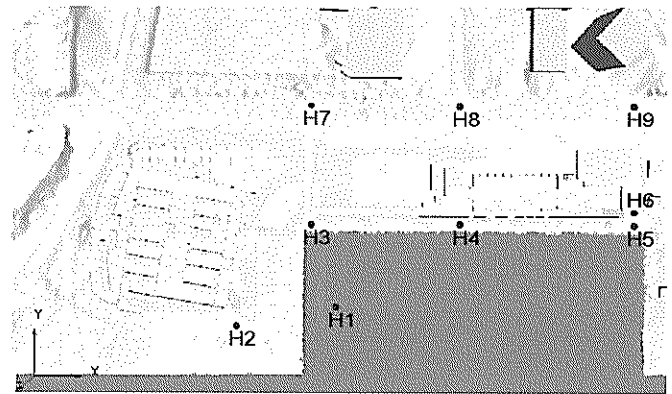


図-5.18 計測値の出力点

耐える精度を十分に保持していることを確認することができた。

そこで本節では、より複雑で広い地下施設が存在する現地地形を対象に解析を実施し、解析モデルの現地適用性を検討する。解析対象臨海部をモデル化し、入射境界の護岸周辺を抽出したものを図-5.16に示す。解析範囲は図-5.1の4倍の広さの $x=500\text{m}$ 、 $y=700\text{m}$ に設定し、広領域への適用性についても検討を試みた。解析モデルを格子分割したものを図-5.17に、計測値の出力点を図-5.18にそれぞれ示す。分割した総格子数は、 $(x)243 \times (y)238 \times (z)21=1,214,514$ メッシュである。

入力する津波条件は、対象海域における推定最大津波高 $H=2.27\text{m}$ 、周期 $T=2400\text{s}$ で、潮位はH. W. L. +1.64mとした。また、護岸および地盤が沈下した場合を考慮し、0.5m沈下したと仮定して、入力水位条件に加味した。

地下階がある岸壁沿いの建物は、図-5.19と図-5.20の2つの部分に分けることができる。左側のA棟は出入口が3箇所あるが、右下のスロープ1箇所の地盤高が少し低く、そこからのみ浸水する。右側のB棟については、左右両方に入口があり、両方から浸水する。

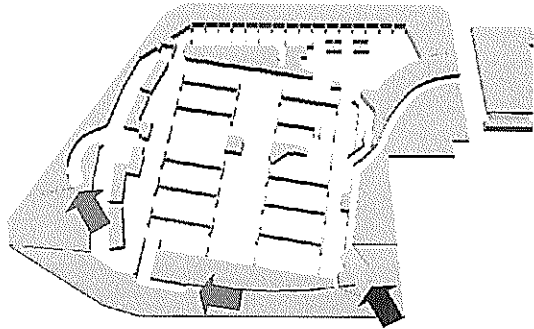


図-5.19 A棟

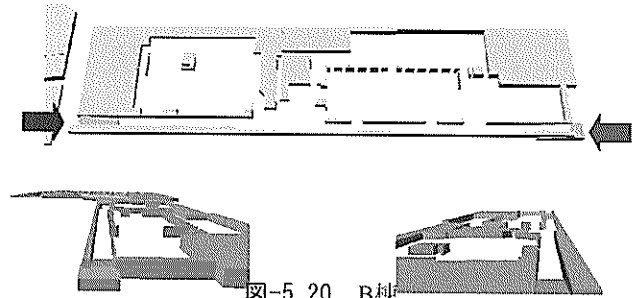


図-5.20 B棟

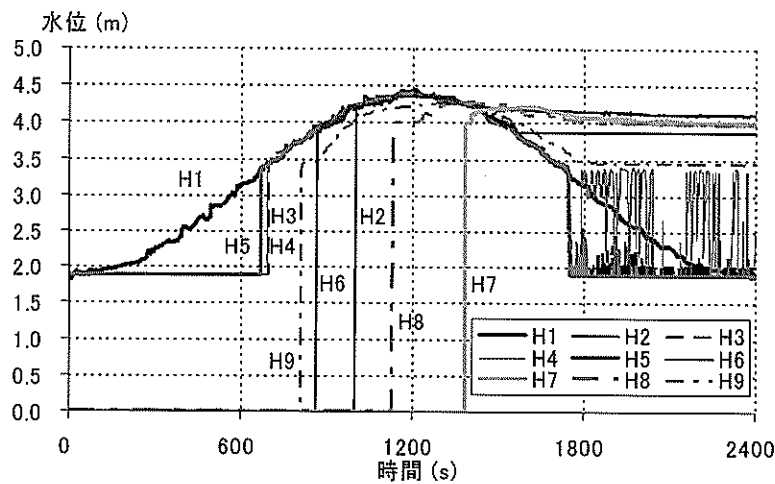


図-5.22 浸水深の時間変化

(2) 浸水状況

浸水状況の時間変化を $t=600$ s から 300 s 毎に、図-5.21 に示した。(a) $t=600$ s 頃に越流し始め、陸上部をゆっくりと浸水する。(b) $t=900$ s には、岸壁から建物までの護岸上は冠水し、地下への浸水が始まる。また、建物右側の道路を通った氾濫水は、建物背後の幹線道路に拡がり始める。(c) $t=1200$ s には、氾濫水が幹線道路を左に向かって進み、建物間の通路からも浸水している様子がみてとれる。地下浸水は左側のA棟が始まっており、予想された右下の車進入路から浸水している。壁や柱の細かい構造物周りの流れも、VOSモデルの効果によってうまく再現できている。(d) $t=1500$ s には浸水範囲はさらに拡がり、幹線道路の氾濫水先端は左側に伸び、奥のビル周辺にも浸水している。また、右側のB棟地下にも浸水し始めている。(e) $t=1800$ s になると、幹線道路における浸水は若干進むが、ほぼ停滞している。入射波の水位が護岸天端より低くなり、戻り流れが発生し始め、護岸上の地盤が露出している。(f) $t=2100$ s には、岸壁がすべて露出し、

浸水および戻り流れのいずれも停滞している。

(3) 浸水深

図-5.18の各点で出力した浸水深の時間変化を、図-5.22に示す。図-5.21に示した浸水域の時間変化からもわかるように、H5の辺りから越流が始まっており、水位のグラフでもH5の波形が最初に変化している。次に護岸上のH3およびH4に浸水し、H5の奥の幹線道路上のH9に浸水範囲が拡がっていることがわかる。H6はH9の手前に位置するが、地下駐車場への入口で、その地盤高が若干高いために、水位変動の開始時間が遅くなっている。H2の辺りからの越流はかなり後で、水位変動開始から約1000s後で、津波水位が十分に高くなってからである。幹線道路上の計測点H8およびH7には、徐々に氾濫水が到達しており、道路の地盤高に対応した、護岸部とは異なった波形を示している。H3およびH4については、 $t=1700$ s以降、波形に乱れが生じているが、戻り流れが始まって地面が露出するためである。

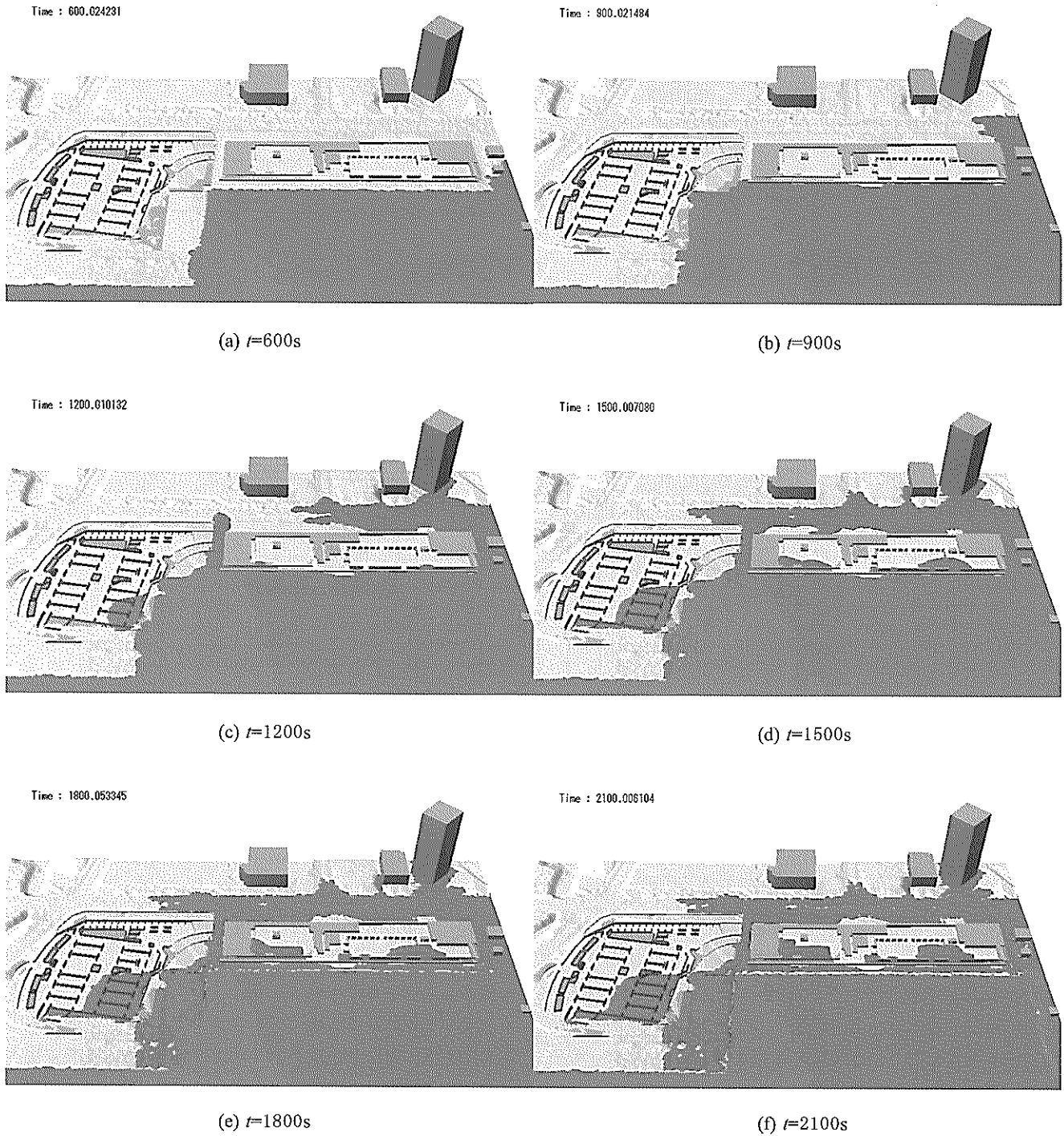


図-5.21 浸水状況の時間変化

6. 結論

臨海部の複層都市空間を対象に、MARS法を用いた高精度な浸水解析を行った。主な結論を以下にまとめる。

1) 航空測量データ、都市計画図や設計CADデータの利用により、解析モデルの条件設定の省力化かつ高精度化が可能になった。

2) VOSモデルの活用により、解析精度が大幅に向上した。

3) 氾濫実験の結果と比較することによって精度を検証し、モデルの有用性を確認した。

4) Postによる効果的な可視化によって、危険度の理解が容易になることを示した。

5) 複雑な地下空間および広領域への適用を試み、解析手法の現地適用性を確認した。

6) 高精度なデジタル地図データと土地利用状況情報があれば、現地地形での高精度な浸水解析が可能になる。

現在、高潮・津波ハザードマップの整備が押し進められているが、複層化した空間など、より詳細な解析結果が求められる箇所に、本解析法を適用することが可能である。本研究のように、臨海都市街地の浸水計算に3次元解析モデルを適用した例はなく、新奇性がある。また、航空測量や深淺測量によるデジタル化されたデータを解析地形条件に変換する手法の発明は、他の解析手法にも適用できる。

7. あとがき

本研究の成果の一部については、特願2003-350043「地形と構造物の電子データを用いた数値解析条件の設定方法」として、2003/10/8付けで共同出願中である。
(2004年2月10日受付)

謝辞

本研究は、科学技術振興調整費による「都市複合空間水害の総合減災システムの開発に関する研究」の一環として実施した。また、本研究を遂行するにあたり、(株)フジタ技術センターの永瀬恭一氏には解析の実施およびデータ整理に関して多大なご尽力をいただいた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 相田 勇(1977)：陸上に溢れる津波の数値実験－高知県須崎および宇佐の場合－，地震研究所彙報，52，pp. 441-460.
- 磯部雅彦・余 賜平・梅村幸一郎・高橋重雄(1999)：数値波動水路の開発に関する研究，海岸工学論文集，第46巻，pp. 36-40.
- 功刀資彰(1997)：自由界面を含む多相流の直接数値解析法，日本機械学会論文集(B編)，63巻609号，pp. 1576-1584.
- 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.
- ソフトウェアクレイドル(2003)：STREAM for Windows Version5 ユーザーズガイド リファレンス (ソルバー：一般) 編.
- 戸田圭一・栗山健作・大八木亮・井上和也(2003)：複雑な地下空間における浸水解析，水工学論文集，第47巻，pp. 877-882.

永瀬恭一・島田昌也(2000)：MARS法を用いた数値波動水槽に関する研究，海岸工学論文集，第47巻，pp. 46-50.

村岡治道・森川 浩(2003)：MOUSEによる実務解析事例，都市水害モデルの総合比較に関するワークショップ，京都大学防災研究所，pp. 59-64.

安田誠宏・平石哲也(2003)：模型実験による臨海都市部の津波氾濫のリスク評価，港湾空港技術研究所報告，第42巻，第3号，pp. 111-156.

Brackbill, J. U., D. B. Kotche and C. Zemach(1992): "A continuum method for modeling surface tension", *Jour. Comput. Phys.*, **100**, pp.335-354.

DHI(The Danish Hydraulic Institute)：デンマーク水理学研究所，URL ; <http://www.dhi.dk/>

Hirt, C.W. and B.D. Nichols(1981): "Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries", *J. Comp. Phys.*, **39**, pp.201-225.

Koshizuka, S. and Y. Oka(1996): "Moving Particle Semi-implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid", *Nucl. Sci. Eng.*, **123**, pp.421-434.

記号表

d	水柱幅 (m)
D	水面までの高さ (m)
F_v	流体界面に作用する体積力 (Pa)
g_x	x 方向の重力加速度 (m/s^2)
k	乱流エネルギー (m^2/s^2)
n	流体1から2に向かう単位法線ベクトル
添字 n	単位時間
P	流体圧 (Pa)
P_α	流体 α ($\alpha=1, 2$)の圧力 (Pa)
Q	線流量 (m^3/s)
t	時間 (s)
T	周期 (s)
U	流速 (m/s)
u_x	x 方向の流体速度 (m/s)
VOF_m	n 番流体の体積率
x_i	位置座標
Δx	x 方向の格子間隔 (m)
Δy	y 方向の格子間隔 (m)
ε	乱流消失率 (m^2/s^3)
η	水位 (m)
$\langle \mu \rangle$	相平均粘性係数($=\langle \mu \rangle + \mu$) ($Pa \cdot s$)
$\langle \mu \rangle$	分子粘性係数 ($Pa \cdot s$)
μ	渦粘性係数 ($Pa \cdot s$)

- $\langle \rho \rangle$: 相平均密度 (kg/m^3)
 σ : 表面張力係数 (N/m)
 τ : 粘性応力 (Pa)
 $\tau_{\alpha ik}$: 粘性応力テンソル