京都大学防災研究所年報 第 54 号 B 平成 23 年 6 月
Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No. 54 B, 2011

分布型流出モデルと統合化可能な内・外水氾濫マクロモデルの開発

浜口 俊雄・小尻 利治・Mukta SAPKOTA*

*京都大学大学院工学研究科

要 旨

本研究は，流出モデルと同じ計算格子で同時に検討できる内・外水氾濫の水深伝播モデルを提案した。家屋の隙間や道路を解析領域として抽出することはせずに平面氾濫モデルに対して流量等価となるよう集約化しており，家屋の占有率のみ考慮すればよい点に特徴がある。家屋の隙間や道路をミクロスケールの最小要素に考え，運動式の単純化を図ると浸透のダルシー則や熱伝導のフーリエ則と相似な水深の伝播則を得る。この要素モデルを流出モデルと同じマクロサイズまでアップスケーリングすると，パラメータが集約化された伝播則となり，これと連続式を合わせれば水深伝播の基礎式が導き出せる。最後に実流域で数値実験を行った結果，湛水域の水深伝播拡大は表現出来ており，その有用性が確認できた。

キーワード：氾濫モデル，氾濫水深，集約化モデル，アップスケーリング，マクロスケール

1．序論

周知の内･外水による氾濫現象モデルは多数存在する。その中でも実用的なのは平面氾濫解析モデルであり，その代表的なものに岩佐･井上モデル (岩佐ら，1980) や同発展型の高橋・中川モデル (高橋・中川，1893；高橋ら，1986) がある。同モデルは鉛直方向に積分平均された式 (1) の連続式と式 (2),(3) の運動式で表される平面不定流モデルとなる。ここに，u,v：x,y 方向の実流速成分 (m/s)，h：水深 (m) である。

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial (uh)}{\partial x}+\frac{\partial (vh)}{\partial y}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial (uh)}{\partial t}+\frac{\partial (u^2 h)}{\partial x}+\frac{\partial (uvh)}{\partial y}+gh\frac{\partial h}{\partial x}=-\frac{gnu\sqrt{u^2+v^2}}{h^{1/3}} \tag{2}$$

$$\frac{\partial (vh)}{\partial t}+\frac{\partial (uvh)}{\partial x}+\frac{\partial (v^2 h)}{\partial y}+gh\frac{\partial h}{\partial y}=-\frac{gnv\sqrt{u^2+v^2}}{h^{1/3}} \tag{3}$$

これらをベースに都市域への適用という面で発展し，氾濫時の道路や家屋周辺の高精度で詳細な浸水状況が解析できるように非構造格子メッシュに対応したもの (川池ら，2002) や，排水施設・地下施設への流入挙動も組み込んだ都市域氾濫モデル (川池ら，2008) も開発されてきた。ただし，高精度の解析を目的とするために都市域の道路や建物の詳細な地図が必要であり，0.05m から 1m 程度の細かさで解析要素が構成された非構造メッシュを解析領域として用意する必要がある。また，計算負荷も氾濫原が程ほどの大きさであっても大きなものとなる。

一方，土研モデル (建設省土木研究所，1986) と呼ばれるものもあり，DEM の３次メッシュ(約 1km×1km) をベースにしてある程度の大きさに再分割して解析に利用する。流域面積，河川の規模，氾濫原の規模などでその適切な大きさは変化するが，先のモデルとは異なり，ある程度の大きさで解析が進められる。都道府県が管理する河川では，計算負荷と精度のバランスから，例えば氾濫計算に 250m メッシュ程度，地表高データには 50m メッシュ程度のものを利用した事例が重用される。場合によっては解析精度を上げる目的で氾濫計算に 100m メッシュを使う等，氾濫計算のメッシュをやや小さくすることで対応している事例も見られる。その氾濫原では建物も存在するため，建物を考慮したかたちで平面不定流モデルを適用することになる。そこで，それぞれのメッシュの等価粗度 n を定めるため，まず農地・道路・その他 (荒れ地や芝地や湿地など) の土地利用別面積の割合を重み係数とした等価粗度平方の加重平均値 ${n_0}^2$ を式 (4) で出している。

$${n_0}^2=\frac{A_1\cdot {n_1}^2+A_2\cdot {n_2}^2+A_3\cdot {n_3}^2}{A_1+A_2+A_3} \tag{4}$$

ここに，A_1：農地面積 (m^2)，A_2：道路面積 (m^2)，A_3：その他の面積 (m^2)，n_1=0.060，n_2=0.047，n_3=0.050 である。ここから式 (5) によって，求めたい値の平方値を得て，そこから n を求める。

$$n^2 = {n_0}^2 + 0.020 \times \frac{\lambda}{1-\lambda} \cdot h^{\frac{4}{3}} \tag{5}$$

ここに，λ：建物建坪率，h：水深 (m) である。場合によっては，過去の実績で n を定めることもあり得るが，不明な場合は，式 (4),(5) を用いる。しかしながら，こうした土研モデルは，あくまで建坪率が低い地域での氾濫を意識したモデル構成であり，氾濫原への湛水域の拡がり方は，氾濫流底面の等価粗度で調整された平面不定流でしかない。

流出解析との結合に関する検討項目は，外水氾濫状況を溢水モデルとして両者への組み込むことに集約される。その際に重要な情報となる河川から氾濫域への溢水位置・溢水量を算定するには，流出解析で算出した河川流量を利用するが，集中斜面型流出モデルで解析しても分布型流出モデルで解析しても計算格子サイズに見合う精度で算出された流量を判断基準にして，堤防からの溢水状況をモデルで数値的に表現することになる。すなわち，採用した氾濫モデルが高精度で詳細な挙動を再現できても，定まった溢水位置・溢水量が氾濫モデルの精度と釣り合わず，氾濫解析では溢水評価精度に伴って精度が下がることになる。また，氾濫水深拡大・縮小挙動を高精度で得て，それを基に避難問題の検討やハザードマップ作成を行う際も，最終的には建物の隙間や道路・公園などの通水領域を単位として時空間的に連続変化する水深を図化していくのではなく，土研モデルのように建物を含めた分割ブロック単位で水深の拡がり具合を色分けしていく事の方が多い。しかし，土研モデルは建物が多い地域での適用性に疑問が残る。

近年は，氾濫域と溢水付近の河川部分を取り出し，河道両端の流入出量を既知の境界条件として同一の詳細サイズ (0.05m 程度) で河道流と氾濫流を一体化させた解析モデルも提案 (秋山ら，2010) されている。この手法は溢水周辺を水理学的に水量・挙動ともに再現するという点で大変有用だが，河道領域において境界条件として与える河川の既知流量を高精度で与えなければならないが，それは難しく，また流域全体で分水嶺から雨水追跡をする流出解析と併せた利用を考えようとしても，高負荷計算を処理できる環境がない限り，流出解析部分の計算格子を通例のサイズ (50m〜20km 程度) で用意せねば計算できない。このサイズは一体化モデル格子に比べて桁違いの大きさとなるので，このままでは一体化手法を流域全体に適用させられない。

そこで本研究では，解析メッシュサイズに依存せず成立し，氾濫原の建坪率も考慮した氾濫モデルの構築を目指す。完成すれば流出解析との流量整合性やモデル結合性を高められると期待できる。そこでは，氾濫モデルでは流量が等価になるように集約化したものを用意して流出モデルとの水量のやり取りが流出解析で用意されたマクロスケールで同一精度で行えるようにすることを目的とする。そこでは氾濫現象にも流域の流出解析の延長として対応可能にするものを理想像のモデルと考え，最終的には氾濫域湛水深の時空間変動が流出解析の格子上で適切に評価しうるモデルの提案を目指す。

2．微小モデルと積分集約化

2.1 微小モデル

一辺が 50m〜20km 程度の計算格子内で起きる氾濫流動を表す最小単位の微小要素は，溢水直下の場所を除けば，Fig.1の様な短い矩形流路 (以降，最小流路と呼ぶ) で近似され，様々な方向を向いた最小流路が組み合わさって氾濫流動になり，流動可能な下流方向へ平面不定流で流れていると仮定する。そのとき，最小流路内では全解析域に対して微小のため，進行方向 ξ に垂直方向 η の流速 ψ は進行方向の流速 χ に比べて十分小さく無視できると仮定すると，Navier-Stokes の式から ξ 方向と鉛直方向 ζ に式 (6),(7) が成り立つ。

$$\frac{D\chi}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial \xi} + \frac{\mu}{\rho}\nabla^2\chi \tag{6}$$

$$\frac{D\omega}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial \zeta} - g + \frac{\mu}{\rho}\nabla^2\omega \tag{7}$$

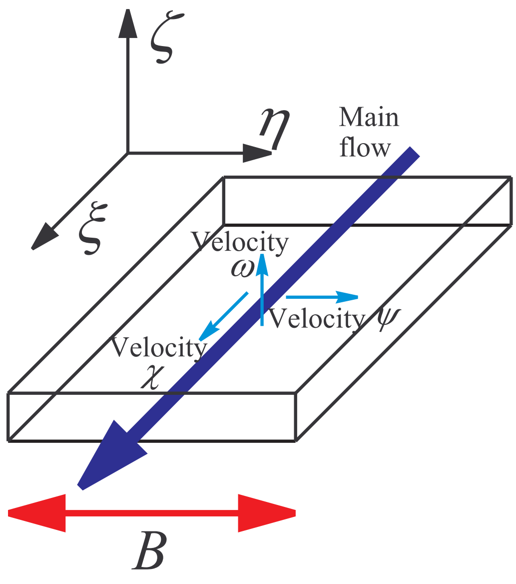

Fig.1　Flow element in inundation channel

ここに，p：水圧であり，実質微分演算子とナブラは

$$\frac{D}{Dt}=\frac{\partial}{\partial t}+\chi\frac{\partial}{\partial\xi}+\psi\frac{\partial}{\partial\eta}+\omega\frac{\partial}{\partial\zeta} \tag{8}$$

$$\Delta=\nabla^2=\frac{\partial^2}{\partial\xi^2}+\frac{\partial^2}{\partial\eta^2}+\frac{\partial^2}{\partial\zeta^2} \tag{9}$$

である。その他の微小項や高次微分項も無視すると，$\partial\chi/\partial\xi$ や $\partial\psi/\partial\zeta$ は，$\partial\chi/\partial\eta$ や $\partial\psi/\partial\eta$ に比べて極めて小さいので無視し，ξ,ζ に関する 2 次の微分項 (慣性項) も微小と見なして無視すると，簡便に式 (10),(11) まで近似できる。

$$\frac{\partial\chi}{\partial t}=-\frac{1}{\rho}\cdot\frac{\partial p}{\partial\xi}+\frac{\mu}{\rho}\cdot\frac{\partial^2\chi}{\partial\eta^2} \tag{10}$$

$$\frac{\partial\omega}{\partial t}=-\frac{1}{\rho}\cdot\frac{\partial p}{\partial\zeta}-g+\frac{\mu}{\rho}\cdot\frac{\partial^2\omega}{\partial\eta^2} \tag{11}$$

さらに，氾濫が或る時間中に氾濫流の不定性がそれほど大きくない場合や，氾濫域が拡がったり縮んだりする水際線周辺でない場合，左辺もゼロ近似できる。いま，η 方向の座標原点を流路中央にとり，その流路幅を B とし，η 方向に流路幅で 2 回積分すると，式 (12),(13) となる。

$$\chi=-\frac{\partial p}{\partial\xi}\cdot\frac{1}{2\mu}\left(\frac{B^2}{4}-\eta^2\right) \tag{12}$$

$$\omega=-\left(\frac{\partial p}{\partial\zeta}+\rho g\right)\cdot\frac{1}{2\mu}\left(\frac{B^2}{4}-\eta^2\right) \tag{13}$$

このとき，各方向の平均流速 χ_m,ω_m は積分平均すると，式 (14),(15) になる。

$$\chi_m=\frac{1}{B}\int_{-B/2}^{B/2}\chi d\eta=-\frac{B^2}{12\mu}\cdot\frac{\partial p}{\partial\xi} \tag{14}$$

$$\omega_m=\frac{1}{B}\int_{-B/2}^{B/2}\omega d\eta=-\frac{B^2}{12\mu}\cdot\left(\frac{\partial p}{\partial\zeta}+\rho g\right) \tag{15}$$

ここで，

$$h=\zeta+\frac{p}{\rho g} \tag{16}$$

とおいて，式 (14),(15) をまとめると，式 (17),(18) の様に書ける。

$$\chi_m=-\frac{\rho g B^2}{12\mu}\cdot\frac{\partial h}{\partial\xi} \tag{17}$$

$$\omega_m=-\frac{\rho g B^2}{12\mu}\cdot\frac{\partial h}{\partial z} \tag{18}$$

これより最小流路における湛水流動は，伝熱の Fourier 則や浸透の Darcy 則と相似な運動則が成り立つことが分かる。

2.2 積分による集約化

実際の状態では，マクロスケールで湛水域 (氾濫原) の 1 要素を見た場合，建物の配置や形状などから様々な流路幅，様々な方向の最小流路が多数交わりながら集まって構成されているように見えている。ここでは議論を簡便化するため，Fig.2のように規則的な間隔で平行に並んだ最小流路群が 2 つ，互いに直交して構成されたものがマクロスケールの湛水域の 1 要素であるとして考察を進める。流出解析のメッシュサイズであるマクロスケール (50m〜20km) では，Fig.3のように最小流路が 1 つ以上入った微小スケールの要素が集まって一辺 50m〜20km 程度の計算格子を構成 (左図) していると考え，単位要素 (右図) を格子単位で積分する。連続体の保存則は Gauss 発散定理を用いればマクロスケールの格子メッシュ外周のみの流入量 $q_x^{\mathrm{in}}, q_y^{\mathrm{in}}$ と流出量 $q_x^{\mathrm{out}}, q_y^{\mathrm{out}}$，つまり x,y それぞれの方向で水収支を表すものに集約化される。運動則の領域積分は各方向成分で考える際，Fig.4のようにアップスケーリングによる均質化理論 (浜口ら，2007) から流量が等価になるような運動則のパラメータの合成により，マクロレベルでも同じ運動則が使える。規則格子の例で言えば，上記参考文献での合成透水係数と算出方法となり，

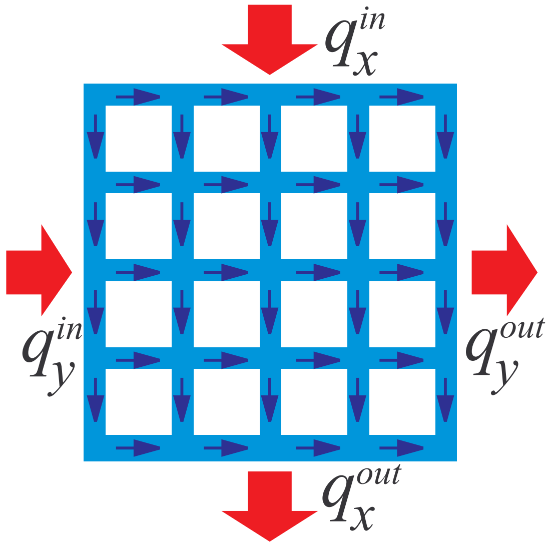

Fig.2 Macro-scaled model with micro-scaled models

$$\kappa_x^*=\frac{\Delta x}{\displaystyle\sum_{i=1}^{M}\frac{\Delta x_i}{\kappa_{xi}}} \tag{19}$$

$$\kappa_y^*=\frac{\Delta y}{\displaystyle\sum_{j=1}^{N}\frac{\Delta y_i}{\kappa_{yj}}} \tag{20}$$

ここに，κ_x^*,κ_y^*：x,y 方向の κ 合成値，κ_{xi},κ_{yj}：x が i 番目・y が j 番目の格子の κ 値，M,N：x,y 方向の格子数である。

運動則は式 (21),(22) で与えられ，保存則は建物建坪率 λ を用いて，式 (23) を得る。

$$u=-\kappa_x\frac{\partial h}{\partial x} \tag{21}$$

$$v=-\kappa_y\frac{\partial h}{\partial y} \tag{22}$$

$$\begin{aligned}(1-\lambda)\frac{\partial h}{\partial t}&=-\frac{\partial q_x}{\partial x}-\frac{\partial q_y}{\partial x}+r_e\\&=-\frac{\partial(uh)}{\partial x}-\frac{\partial(vh)}{\partial y}+r_e\end{aligned} \tag{23}$$

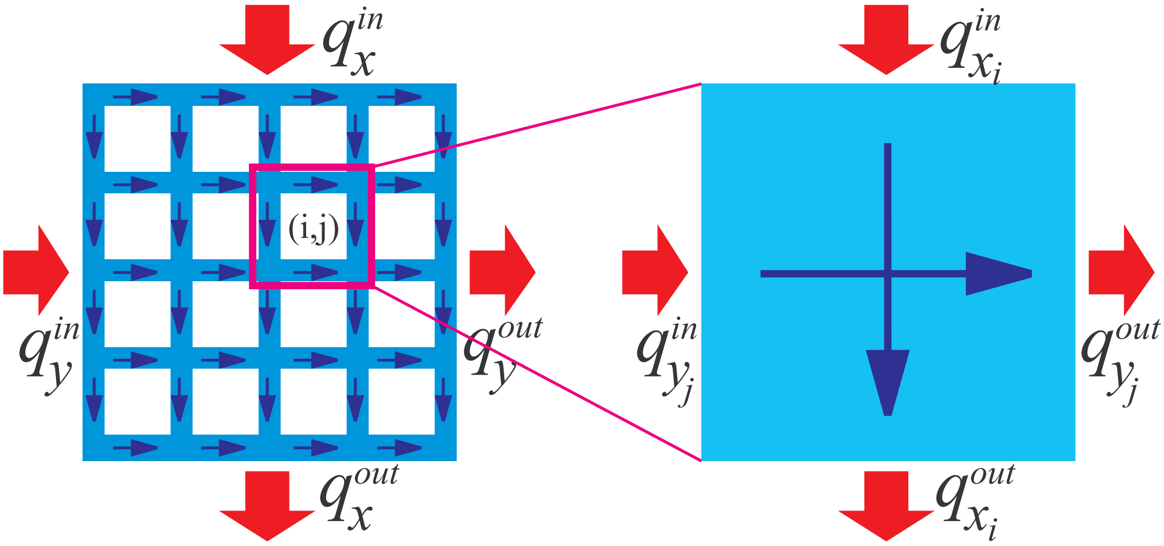

Fig.3 Lumping an inundating model in the first stage

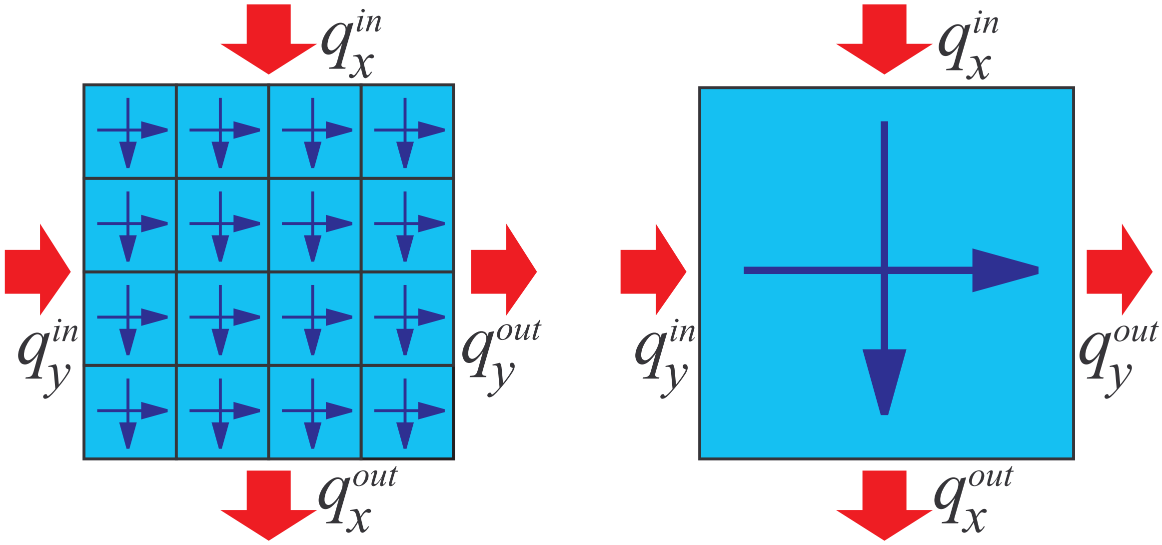

Fig.4 Lumping an inundating model in the second stage

ここに，u,v：x,y 方向の見かけ流速成分，κ_x,κ_y：x, y 方向の氾濫伝導係数，r_e：有効降雨などの流入強度，となる。最終的なかたちとして，基礎式は式(24)になる。

$$(1-\lambda)\frac{\partial h}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\kappa_x h\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\kappa_y h\frac{\partial h}{\partial y}\right)+r_e \tag{24}$$

これは熱伝導型偏微分方程式であり，マクロスケールで湛水流動を見れば，熱伝導と同じように氾濫水が伝播するということがわかる。κ_x, κ_y を決めるには，道路や建物周りの正確なデータで $\rho g B^2/12\mu$ を計算し，先述の通りアップスケールの均質化理論で合成できるが，理論式から最小流路の κ の算出やそれらのパラメータ合成が多大な労力になることは自明であるので，それを避けて現地計測流量から κ_x,κ_y を同定することが得策と思われる。

3．河川からの越流溢水の取り扱い

河川からの越流溢水量に関して，本研究では本間の越流式(本間1，1940a；本間2，1940b) を用いて定める。

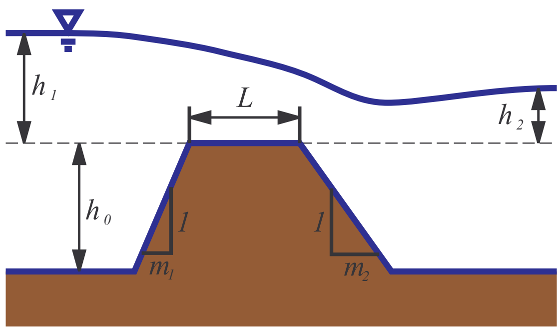

Fig.5 Schematic view of overflow beyond trapeziform-section levee

Table 1 Mathematical conditions in overflow

Slope in channel m_1	Slope in floodplain m_2	h_2/h_1		
		Complete overflow	Incomplete overflow	Submerged overflow
0 – 4/3	≥5/3	≤0.6	0.6 – 0.7	≥0.7
0 – 2/3	around 1	≤0.45	0.45 – 0.8	≥0.8
0 – 1/3	around 2/3	≤0.25	0.25 – 0.8	≥0.8
m_1=m_2=0, h_1/L<1/2		≤2/3	None	≥2/3

Table 2 Parameter determination of overflow rate folumas

m_1	m_2	μ	α	β	γ
0 – 4/3	≥5/3	1.37+1.02(h_1/h_0)	−0.030	1.018	2.6
0 – 2/3	around 1	1.28+1.42(h_1/h_0)	−0.200	1.090	2.6
0 – 1/3	around 2/3	1.24+1.64(h_1/h_0)	−0.124	1.032	2.6
m_1=m_2=0, h_1/L<1/2		1.55	None		2.6

本間は実験で下流水位を変化させながら，堰頂を基準に取った上流水深h_1(m)，下流水深h_2(m)で床止め周辺の越流状態を，完全越流(越流量が下流水位の影響を受けない越流)，潜り越流(堰上に射流部分のない越流)，不完全越流(両者の中間状態となる越流)に分類し，それぞれの越流量算定式(25)〜(27)を示した。

【完全越流(Complete overflow)の場合】

$$Q = \mu B h_1 \sqrt{2gh_1} \tag{25}$$

【不完全越流(Imcomplete overflow)の場合】

$$Q = \mu \left(\alpha \frac{h_2}{h_1} + \beta \right) B h_1 \sqrt{2gh_1} \tag{26}$$

【もぐり越流(Submerged overflow)の場合】

$$Q = \gamma \mu B h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \tag{27}$$

ここに，Q：流量($\mathrm{m^3/sec}$)，μ：完全越流係数(m)，B：越流幅(m)，γ：潜り越流比(無次元)，α, β：不完全越流比定数(無次元)，h_0(m)：堤高となる。ただし，Table 1に記載の条件からどの越流パターンとなるかを見極めるものとし，その後に各パラメータはTable 2から与えるものとする。本間の越流式に限らず，越流量を与えるどの提案式であっても堤防に対して垂直に越流することを仮定しなければならない。河道流から生じる越流を考えた場合に，エネルギー保存則から越流量は河道の垂直成分だけでなく水平成分のエネルギーを有していると推測される。それ故，流出解析では，負の流入，つまり流出(越流した溢水)に対する流入角(流出角)に90度より小さな角度を据えて河道流を扱わねばならない。氾濫解析でも同じく斜め流入する越流量を境界条件に据える必要がある。さらに実際には，溢水時に越流発生場の両端に死水域が発生する(秋山ら，2010)。これにより，越流に寄与する幅は死水域発生分だけ実際の越流幅Bより小さくなるといえる。越流時には流入角があるためにその角度に応じて河道垂直方向の流れのエネルギーは減少するため，越流量も減少すると思われる。したがって流入角(流出角)を90度として定義されている越流式はその実際の境界条件を当てはめて利用すると過大評価になることが予想される。

上記の死水域発生と越流の流入角による越流量減少は相関関係があることも想像に難くなく，これを鑑みて，実際の利用時にはその越流幅を$\delta(0 < \delta \leq 1)$倍することで越流式を用いることを提案する。従って，式(25)〜(27)のそれぞれ右辺にδを乗じて利用することとする。

4．氾濫流の水際モデリング

4.1 移動境界

氾濫が起きたときにはFig.6のように湛水域が発生し，自由水面の上昇に従って水際線は溢水量が排水量や浸透量の和よりも小さくならない限り，広がっていく挙動を示す。そこでの湛水深の伝播は基礎式(24)に従うが，水際外の非湛水域では湛水していないため，当然のようにこの式自身が成り立たない。また水際線は，いわゆる移動境界S_tになっていて時空間的変動のある境界となっている。そこで本研究においては，0-拡張論による拡張水頭変数(浜口ら，1997)を用いることで，非湛水深域でも解析が可能となるようにモデル拡張を行い，湛水域水際で

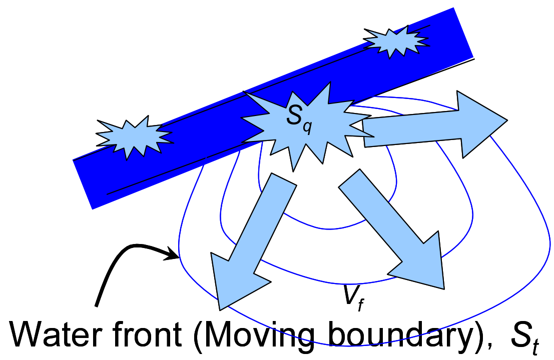

Fig.6 Schematic of flooding water in expanding area

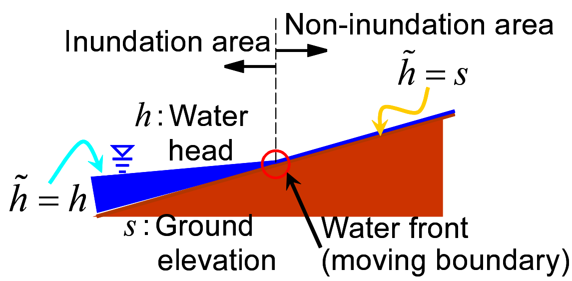

Fig.7 Schematic of zero-extension variable

の湛水域拡大縮小も算定できるように考える。式(28)のように定義した拡張変数$\tilde{h}$を用いると，水際ではFig.7のようになっている。

$$\tilde{h} = s + (h - s) \cdot u\{h - s\} \tag{28}$$

ここに，h：水頭，s：地盤高，$u\{\bullet\}$：単位階段関数を表す。すなわち，拡張変数は湛水域において通常の水頭に等しく，非湛水域においては地盤高に等しくなるように定義されたものである。水深の面で見れば，湛水域において通常の水深に等しく，非湛水域においてはゼロ水深に等しくなっている。基礎式(24)においてはhが水深であったことに留意して，この変数を同式に展開すると，

$$(1-\lambda)\frac{\partial \tilde{h}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left\{\kappa_x(\tilde{h}-s)\frac{\partial(\tilde{h}-s)}{\partial x}\right\} + \frac{\partial}{\partial y}\left\{\kappa_y(\tilde{h}-s)\frac{\partial(\tilde{h}-s)}{\partial y}\right\} + r_e \tag{29}$$

となる。境界条件である水頭境界S_h，流量境界S_qは

$$h = \hat{h} \qquad \text{on} \quad S_h \tag{30}$$

$$\kappa(h-s)\frac{\partial(h-s)}{\partial n} = -\hat{q} \qquad \text{on} \quad S_q \tag{31}$$

で表される。ここに，$\hat{h}$：既知水頭値，$\hat{q}$：既知流入量値，$\partial(\tilde{h}-s)/\partial n$：$\tilde{h}-s$の境界に対する法線方向微分を表す。さらに移動境界条件は

$$h = s \qquad \text{on} \quad S_t \tag{32}$$

で与えられる。これらは拡張水頭変数で表すことも可能であるが，非湛水域での境界条件が判りにくくなるため，湛水域で与えられる境界条件を重視して，上記のように記述している。

4.2 固定格子上の移動境界

自由水面端部である移動境界S_tが地盤高に応じた自由な平面分布を成し得るものの，計算において固定格子を利用するのであれば，その格子位置で移動境界位置を扱わなければならない。本研究では固定格子に対して，境界S_tの位置を格子各辺によって近似したモデルとする。その位置は，湛水域V_F^tおよび非湛水域V_E^tの混在する格子セルの辺上で近似配置されるものと定める。これにより，当モデルではS_t上の節点における水深は0以上の扱いであることが分かる。先述の通り，S_tは時間に依存して移動する境界である。すなわち，本モデルにおけるS_t上の水頭は，基盤高より高い(水深が0以上の)状態で経時的に変化することを意味する。よって当モデルに関するS_tの境界条件は，水頭でなく流量の条件で考えることが適している。つまり，

$$k(h-s)\frac{\partial h}{\partial n} = -\hat{q} \ (>0) \qquad \text{on} \quad S_t \tag{33}$$

といえる。

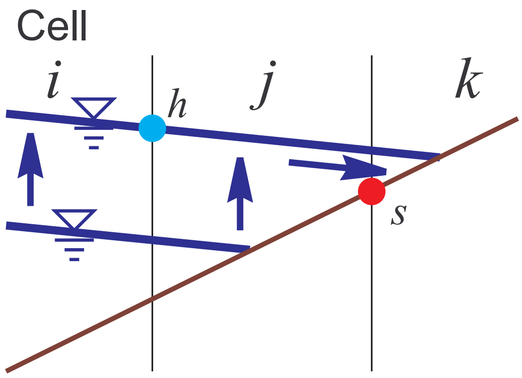

Fig.8 Schematic of going-up water at fixed cells

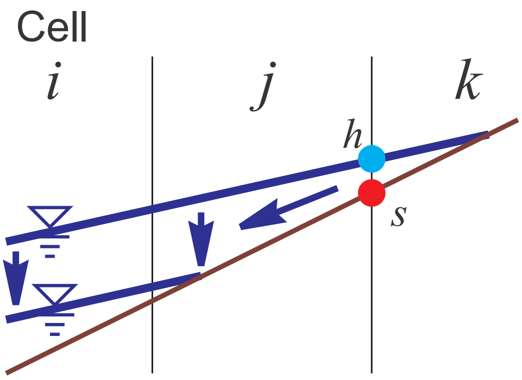

Fig.9 Schematic of going-down water at fixed cells

また，S_tは離散的に移動するため，移動基準を設けねばならない。本研究におけるS_tの離散的移動条件に十分条件として，

- 上昇移動条件：S_t上の節点の$\tilde{h}$値がその上流節点のsを上回ること
- 下降移動条件：S_t上の節点の$\tilde{h}$値がその位置のsよりも下回ること

を与えた。これらを図化したものがそれぞれFig.8とFig.9である。上昇時はセルiとjの間にあった移動境界S_tが上述の条件でセルjとkの間に移動する。同様に，下降時はセルjとkの間にあった移動境界S_tが上述の条件でセルの間iとjに移動する。

S_t移動時の処理負荷を軽減するために，地盤高分布を基に作成されている落水線データをできるだけ活用し，セルの上下流関係を与えて水深のみで計算していく方法もあるが，本研究では地盤高をそのまま計算に用いて得られた結果から，隣接するセルとの水頭・地盤高の高低関係で定めていく方法を取った。

5．シナリオによる数値実験

試験流域をベトナムRed River流域とし，ハノイにおいて2003年6月1日のRed Riverの年最大流量時に堤防

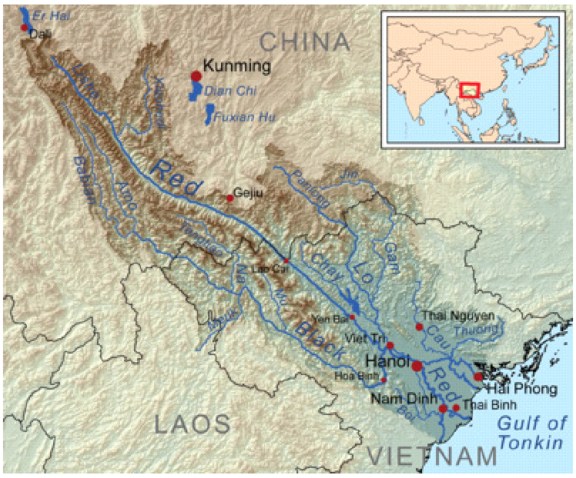

Fig.10　Red River bain

天端の一番低いところで決壊したと想定した氾濫シナリオを試した。Red River 流域 (Fig.10) はベトナム北部に位置し，流域面積 156,452km 2，全長約 1,200km の流域で，その上流域は中国に含まれている。ハノイは漢字で「河内」と表せるように，昔から Red River の影響を受けてきた街であり，洪水のたびに街の形状が変わるほどの被害に見舞われてきている。堤防がだいたいの高水時は越流にならない設計のため，近年，内水氾濫は高頻度で起きているものの外水氾濫はまれになってきた。しかしながら，堤防は徐々に傷んできている事実や河川名に象徴されるように土砂移動・堆積量が多い事実もあって外水氾濫を警戒する必要があり，外水氾濫のリスクを検討する時期が近づいている。そこで本研究では，越流溢水でなく，まず

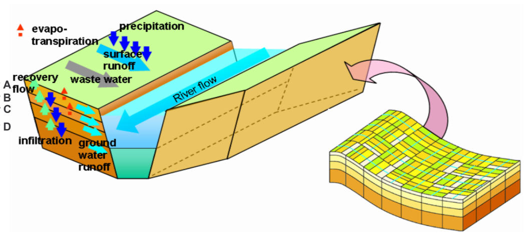

Fig.11　Schematic view of Hydro-BEAM

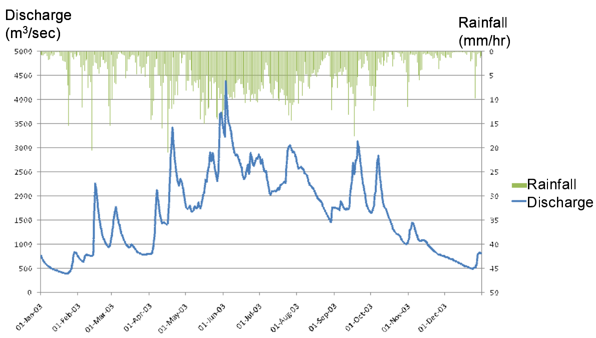

Fig.12　Hydrograph at Hanoi station in 2003

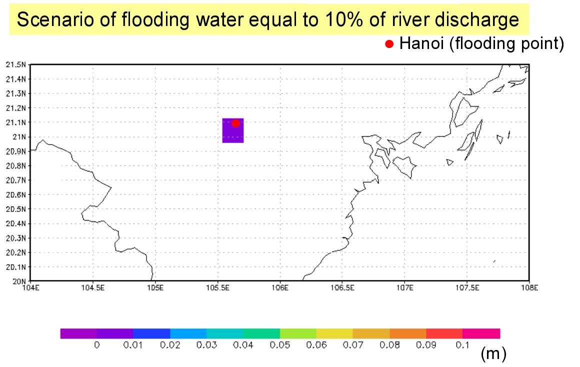

Fig.13　Spatial water conduction in inundation depths

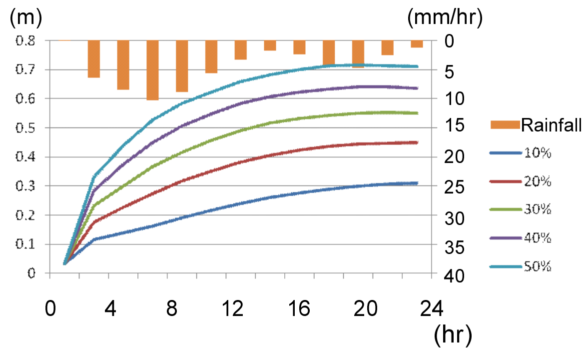

Fig.14　Changes in inundation depths at flooding point

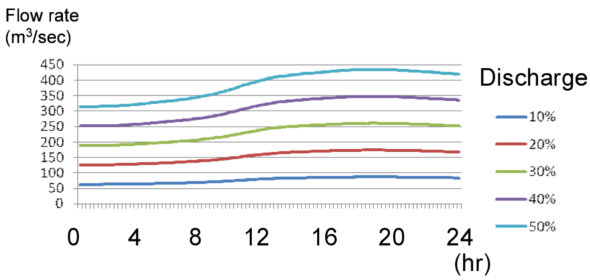

Fig.15　Changes in inundating rate at flooding point

は破堤溢水のケースを検討する。先述の越流溢水モデルにおける補正越流幅を定めるには実測値が必要であるので現在定められない事と，ハノイで高水時に破堤被害が生じた場合に，どのような湛水深が伝播していくのかを事前に検討し，知識として持ち合わせておくのが重要である事から，破堤シナリオで解析を行っている。本解析に先立ち，平野部に対応できる河道流出モデルの Diffusive wave model を組み込んだ Hydro-BEAM(小尻ら，1997)(Fig.11) を用いて，予め流域の流出モデルを同定しておいた。その際の 2003 年ハノイ観測点でのハイドログラフは Fig.12 のようになった。

堤防の破堤程度は部分的に完全崩壊したと仮定したが，その溢水量は破堤幅が日本の堤防土質と異なるために，日本の破堤幅算定経験式が当てはまる保障はなく定めにくい。そこで代わりに過去頻繁に生じている内水氾濫に

相当する外水氾濫の溢水量がどの程度になるのかを調べることにした。この年の最高水位になった際にハノイで堤防の最も低い位置で破堤したと仮定し，その時の河川からの流入量を10～50%まで10% 刻みで変化させたシナリオを用意し，その結果から各シナリオでの湛水深変化を調べた。その結果の一例として，10%流入のシナリオでの湛水深域の時空間変化をスナップショットで示した図がFig.13である。また各シナリオの湛水深変動を図化した結果がFig.14になる。ハノイの洪水湛水深が通常35～40cm程度であることから，Fig.14でその定常的な水深になった時間帯を見て，頻繁に起きる内水氾濫時の湛水深と等価な河川流入率(河川からの溢水量)を推定したところ，15%程度の場合であることがわかった。よって，Fig.15からは約125(m^3/sec)程度の流入量強度と等価な状態が実際に起きている平均的な内水氾濫流量であると判った。従って，ハノイには堤防周辺域で上記流入量強度以上の能力を発揮する排水施設の設置と整備が必要であると言える。

今後の課題として平面不定流解析結果と比較し，本近似の有効性を示す必要がある。さらには越流溢水量を検討するために，その越流幅とその補正係数の決定方法を提案する必要がある。

6．結論

内・外水に対する平面氾濫流をミクロスケールでモデル化して，建物建坪率を考慮しながらマクロスケールにアップスケーリングして集約化すると，熱伝導や浸透に類した挙動となるモデルが導出できた。さらに得られた基礎式で検討する氾濫水深は数値実験から湛水域を拡大しながら，水深も空間的に伝播していく様子が見て取れた。今後は，これまでの平面氾濫解析との比較による本モデルの有効性を示すとともに，越流モデルでの具体的適用方法や内水氾濫解析時の有効性も示していく予定である。

参考文献

秋山壽一郎・重枝未玲・梅木雄大・伊藤雄亮(2010)：破堤氾濫流の横越流特性と河道・氾濫域包括解析の適用性の検討，水工学論文集第54巻，土木学会水理委員会，pp.853–858.

岩佐義朗・井上和也・水鳥雅文(1980)：氾濫水の水理の数値解析法，京都大学防災研究所年報，第23号B–2，pp.310–318.

川池健司・井上和也・林　秀樹・戸田圭一(2002)：都市域の氾濫解析モデルの開発，土木学会論文集，第698号/II–58，pp.1–10.

川池健司・中川 一・今井洋兵・山田裕三(2008)：都市域の内・外水氾濫解析における下水道システムのモデル化，京都大学防災研究所年報，第51号B，pp.591–601.

建設省土木研究所(1996)：氾濫シミュレーション・マニュアル(案)－シミュレーションの手引き及び新モデルの検証－, 土木研究所資料，第3400号.

小尻利治・黒田良人・東海明宏(1997)：GISベースでの水環境シミュレーションと環境評価モデルの開発，第5回地球環境シンポジウム公演集，pp.209–214.

高橋　保・中川　一(1983)：市街地における洪水氾濫水の挙動に関する研究，京都大学防災研究所年報，第26号B–2，pp.245–259.

高橋　保・中川　一・西崎丈能(1986)：堤防決壊による洪水危険道の評価に関する研究，京都大学防災研究所年報，第29号B–2，pp.431–450.

浜口俊雄・小尻利治・Mohamed Saber(2007)：均質化理論に基づくアップスケーリングの水文学的適用法，京都大学防災研究所年報，第50号B，pp.759–764.

浜口俊雄・村上　章・長谷川高士(1997)：平面解析で移動境界を考慮した地下水モデルと逆解析への応用，土木学会論文集，第568号/III–39，pp.133–145.

本間 仁：低越流堰堤の流量係数(1940a)，土木学会誌，第26巻，6号，pp.635–645.

本間 仁：低越流堰堤の流量係数(1940b)，土木学会誌，第26巻，9号，pp.894–862.

Development of Macro-Scaled Overland Flow Model Applicable to Incorporation with Distributed Runoff Model

Toshio HAMAGUCHI, Toshiharu KOJIRI and Mukta SAPKOTA*

*Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

This study aims to propose the lumped model of two-dimensional inundation flow in macro scale. This model ensures numerical compatibility with a basin-widely distributed runoff one in modeling accuracy and simplification. An inundating domain is divided into many infinitesimal elements constitutied of one straight and short channelin micro scale. Based on the Navier Stokes equations, the mass conservation and motion equations of inundating flow in this channel are successfully simplified. The resulting motion equation is in conformity with the Fourier's and the Darcy's Laws. It is lumped in macro scale with the other elements. It can be shown that the basic equation of inundating flow in macro scale is finally categorized in the group conformable to water-depth transfer phenomenon.

Keywords : Flooding model, Inundating water depth, Lumped model, Upscaling, Macro scale