

1. はじめに

近年、治水事業の進展により常襲的な洪水氾濫は非常に少なくなってきている。しかしながら、都市においては人口や資産の集中によりひとたび河川が氾濫すると壊滅的な被害が予測される。これに対して現在の都市における街路、建築物、公園、街路樹、地下鉄・地下街への出入口、避難地等の配置は必ずしも洪水氾濫流を考慮したものとはなっていない。洪水氾濫時には避難地として指定されている場所が逆に氾濫流の集中する場所になっていることも有り得る。したがって、街路や建物等が複雑に配置されている都市における氾濫流の挙動を的確に予測するモデルの確立が必要となっている。本報告は洪水氾濫流モデルにおける基礎方程式を示し、さらに数値計算手法を提示するとともに、氾濫想定地域へ適用するための数値シミュレーション開発の第一歩について述べるものである。

2. 基礎方程式

洪水氾濫流を二次元平面流れとして扱いその流体運動を表現する基礎方程式は次の各式で表される。連続の式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

x 方向の運動方程式

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial (uM)}{\partial x} + \frac{\partial (vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial M}{\partial y} \right) \tag{2}$$

y 方向の運動方程式

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial (uN)}{\partial x} + \frac{\partial (vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial N}{\partial y} \right) \tag{3}$$

ここに、 x, y ; 平面の直交軸、 u, v ; x, y 方向の流速、 h ; 水深、 H ; 水位、 ρ ; 流体の密度、 ε ; 渦動粘性係数、 g ; 重力加速度、 τ_x, τ_y ; x, y 方向底面せん断力、 t ; 時間、 M, N ; x, y 方向の流量フラックス（単位幅流量）であり $M = uh, N = vh$ である。

3. 数値計算の方法

基礎方程式である連続の式及び x, y 方向の運動方程式を実際に数値計算するために差分法を用いて計算することとする。計算上の格子点及び計算点を清水¹⁾と同様に配置することとし、これを図-1に示す。また $dx, dy, \Delta x, \Delta y$ を計算の便宜上図-2に示すように定義する。

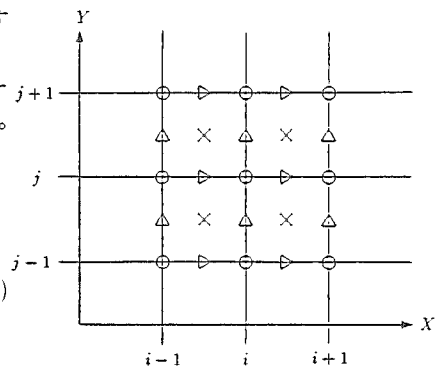
連続の式を差分する。

$$h(i, j, t + \Delta t) = -(A1 + A2)\Delta t + h(i, j, t) \tag{4}$$

ここに

$$A1 = \frac{M(i+1, j) - M(i, j)}{\Delta x} \tag{5}$$

$$A2 = \frac{N(i, j+1) - N(i, j)}{\Delta y} \tag{6}$$



▷ : M の計算点
Δ : N の計算点
○ : h, H, 係数 ε の計算点
× : 係数 ε の計算点
図-1 計算格子と計算点

Flood Flow Analysis in Urban Areas
by Atsuyosi MIURA, Yasuyuki SHIMIZU

x 方向の運動方程式を差分する。

$$M_t(i, j) = -\frac{B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5 - B_6 - B_7}{A_1 + A_5} \quad (7)$$

ここに、 M_t とは Δt 時間後の M である。また A, B とは(2)式における各項の差分式をまとめたものであり、下付き数字は(2)式における各項の左からの順序を示したものである。以下に(2)式の各項の差分を示すこととする。

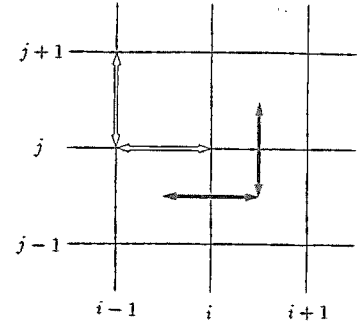
第1項目の差分

$$\frac{\partial M}{\partial t} = A_1 + B_1 \quad (8)$$

ここに

$$A_1 = \frac{1}{\Delta t} M_t(i, j) \quad (9)$$

$$B_1 = -\frac{1}{\Delta t} M(i, j) \quad (10)$$



第2項目の差分

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{h} \right) = B_2 \quad (11)$$

ここに

$$B_2 = \left\{ \frac{M_p(i, j)^2}{h(i, j)} - \frac{M_p(i-1, j)^2}{h(i-1, j)} \right\} / dx \quad (12)$$

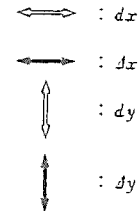


図-2 $dx, dy, \Delta x, \Delta y$ の定義図

なお $u = M/h$ を用いた。また M_p とは図-1に示した添え字 p の計算点における M である。

第3項目の差分

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{NM}{h} \right) = B_3 \quad (13)$$

ここに

$$B_3 = \left\{ \frac{N_x(i, j+1)M_x(i, j+1)}{h_x(i, j+1)} - \frac{N_x(i, j)M_x(i, j)}{h_x(i, j)} \right\} / \Delta y \quad (14)$$

なお $v = N/h$ を用いた。また M_x, N_x, h_x とは図-1に示した添え字 x の計算点における各値である。

第4項目の差分

$$gh \frac{\partial H}{\partial x} = B_4 \quad (15)$$

ここに

$$B_4 = g \frac{h(i, j) + h(i-1, j)}{2} \frac{H(i, j) - H(i-1, j)}{dx} \quad (16)$$

第5項目の差分

$$\frac{\tau_x}{\rho} = -A_5 M(i, j) - B_5 \quad (17)$$

ここに

$$A_5 = \frac{gn^2}{2} \sqrt{M(i, j)^2 + Nu(i, j)^2} / \left\{ \frac{h(i, j) - h(i-1, j)}{2} \right\}^{\frac{2}{3}} \quad (18)$$

$$B_5 = -A_5 M(i, j) \quad (19)$$

なお A_5 において n ; マニングの粗度係数であり、

$$n = \frac{n_p(i-1, j) + n_p(i, j)}{2} \quad (20)$$

ここに n_p とは図-1 に示す添え字 p の計算点における n の値とする。また、

$$N_u = \frac{N(i, j) + N(i, j+1) + N(i-1, j) + N(i-1, j-1)}{4} \quad (21)$$

である。

ただし

$$\frac{\tau_x}{\rho} = \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{3}{2}}} \quad (22)$$

を用いた。

第6項目の差分

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial M}{\partial x} \right) = B_6 \quad (23)$$

ここに

$$B_6 = \frac{1}{\Delta x^2} [\varepsilon_p(i, j) \{M(i+1, j) - M(i, j)\} - \varepsilon_p(i-1, j) \{M(i, j) - M(i-1, j)\}] \quad (24)$$

ただし

$$\varepsilon_p(i, j) = \frac{\kappa}{6} \sqrt{\tau_p} h(i, j) \quad (25)$$

ここで ε_p とは図-1 に示す添え字 p の計算点における ε である。また、

κ ; カルマン定数 ($\kappa = 0.4$)

$$\tau_p = (gn_p(i, j)^2 (u(i, j)^2 + v(i, j)^2)) / h(i, j)^{\frac{3}{2}} \quad (26)$$

なお

$$u(i, j) = M_p(i, j) / h(i, j) \quad (27)$$

$$v(i, j) = N_p(i, j) / h(i, j) \quad (28)$$

また $\varepsilon_p(i-1, j)$ も同様に求めることとする。

第7項目の差分

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial M}{\partial y} \right) = B_7 \quad (29)$$

ここに

$$B_7 = \frac{1}{\Delta y^2} [\varepsilon_x(i, j+1) \{M(i, j+1) - M(i, j)\} - \varepsilon_x(i, j) \{M(i, j) - M(i, j-1)\}] \quad (30)$$

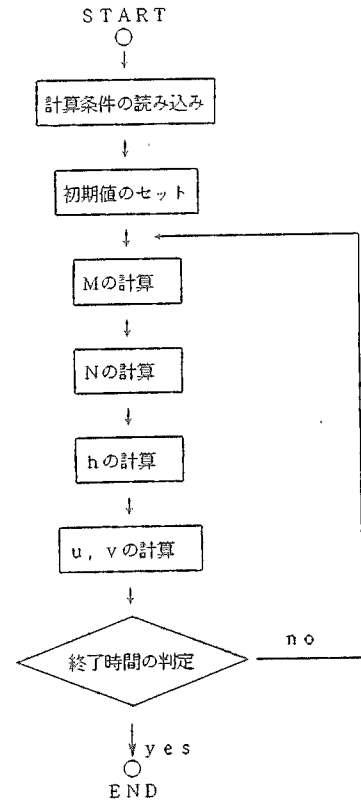


図-3 計算フロー図

ただし

$$\varepsilon_x(i, j) = \frac{\kappa}{6} \sqrt{r_x} h_x(i, j) \quad (31)$$

ここで ε_x とは図-1に示す添え字 x の計算点における ε である。また、

$$\tau_x = (gn_x(i, j)^2(u_x(i, j)^2 + v_x(i, j)^2))/h_x(i, j)^3 \quad (32)$$

なお

$$u_x(i, j) = M_x(i, j)/h_x(i, j) \quad (33)$$

$$v_x(i, j) = N_x(i, j)/h_x(i, j) \quad (34)$$

また、 $\varepsilon_x(i, j+1)$ も同様に求めることとする。さらに y 方向の運動方程式も同様にして差分することとする。なお以上の計算式の計算手順を図-3に示す。

4. 氾濫流先端部における境界条件

氾濫流が広がるための境界条件として、水深の計算格子点において隣合う2点より判断することとし、ここに x 方向への広がりについて水深 $h(i-1, j)$ 、 $h(i, j)$ をもとに述べることにする。

先端部における境界条件として基準水深 $0.001m$ を用いると以下の3通りとなる。1.) 2点の水深がともに基準水深に達していない。2.) 2点の水深の一方が基準水深に達している。3.) 2点の水深が共に基準水深に達している。

ここで、氾濫流の先端が広がるために必要な条件は上記2.)の場合である。そこで以下2.)の条件について述べることにする。2.)の条件を判断するために図-4に示すように水位 $H(i-1, j)$ 、 $H(i, j)$ を条件に加え、さらに代替水深 $0.02m$ を用いることとする。まず水深 $h(i, j)$ が基準水深に達していない場合において、水位が $H(i, j) < H(i-1, j)$ の場合には、代替水深を与え $h(i, j) = 0.02m$ とする。なおこの代替水深は流量フラックス M_t の計算終了後に水深 $0m$ とする。また、水位が $H(i, j) = H(i-1, j)$ および $H(i, j) > H(i-1, j)$ の場合には流量フラックス $M_t = 0m^2/s$ とすることとする。

次に水深 $h(i-1, j)$ が基準水深に達していない場合において、水深が $H(i-1, j) < H(i, j)$ の場合には代替水深 $h(i-1, j) = 0.02m$ を与えた後上記と同様に計算することとする。また、水位が $H(i-1, j) = H(i, j)$ および $H(i-1, j) > H(i, j)$ の場合には流量フラックス $M_t = 0m^2/s$ とすることとする。

なお、 y 方向に関しても水深 $h(i, j-1)$ 、 $h(i, j)$ を基に x 方向と同様とすることとする。

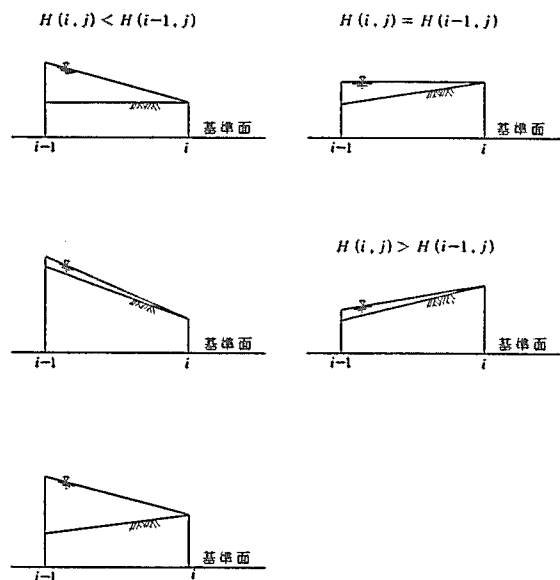


図-4 氾濫流先端の概念図

5. 計算条件および計算結果

想定氾濫地域および対象河川として札幌市および豊平川を例とした洪水氾濫流数値シミュレーションを行った。

仮想破堤地点として豊平橋付近左岸を仮定した。なぜならば、この地点は河道が狭くなり高水数も少なく、さらにこの地点が破堤したならば都市域への影響も多大なものと想定されるためである。また、図-5に仮想破堤地点を示し破堤距離を $150m$ とした。この様に仮定した想定氾濫地域における建築物等の分布は福岡ら²⁾と同様に建築物等の密集度を粗度係数として表現することとした。また、粗度係数は $2万5千分の1$ 地形図を基に作成した。ここに図-5は粗度係数の分布を示すものであり、表-1に個々の密集度による粗度係数を示した。なお、図-5において色の濃い部分が道路網を示し、色が白色に近くなるほど建築物密集度が高い箇所を示している。

表-1 密集度と粗度係数

| 密集度 | 粗度係数 |
|------------|------|
| 空き地 | 0.02 |
| 道路 | 0.01 |
| 建物密集度20% | 0.03 |
| 建物密集度50% | 0.05 |
| 建物密集度80% | 0.10 |
| 建物密集度80%以上 | 0.80 |
| 川・池 | 0.01 |
| 境界条件 | 1.00 |

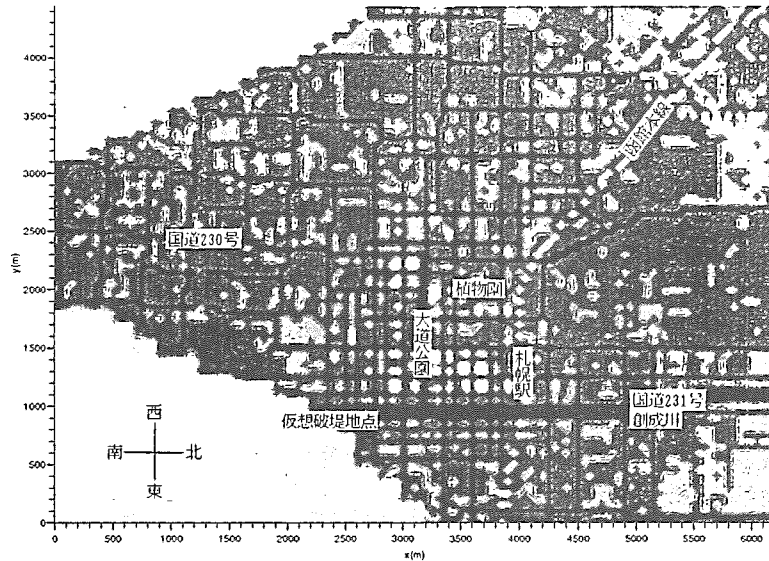


図-5 粗度係数の分布図

さらに豊平川の左岸堤防および、円山より西の丘陵地帯には境界条件として、ここより流れが進入しない条件を与えた。また、地形条件は平坦とした。

想定氾濫地域への流入条件として計画高水流量を越えた流量が氾濫流となることとした。豊平川雁来地点の計画高水流量は $2000\text{m}^3/\text{s}$ である。現在、豊平川上流においてダム整備が整いつつあるが依然 $2300\text{m}^3/\text{s}$ 程度の洪水は想定される。よって計画高水流量との差 $300\text{m}^3/\text{s}$ が都市域に氾濫すると仮定した。また、図-6 にハイドログラフを示した。なお、計算上において氾濫流入時間は 200 分間とすることとした。このように仮定した氾濫流量を仮定破堤地点において流量フラックス M, N を用いて表すとともに、また水理公式集³⁾より越流氾濫流量を $Q = CBH^{3/2}$ (Q ; 越流量, B ; 仮想破堤距離, C ; 流量係数 ($C = 2$ とした), H ; 越流水深) を基に水深として与えた。

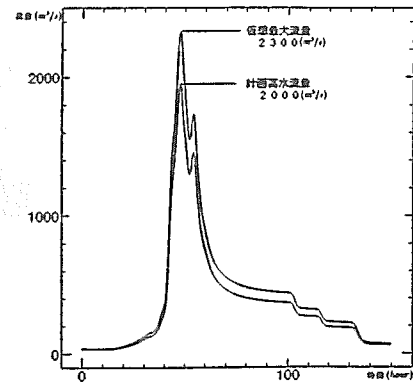


図-6 ハイドログラフ

数値シミュレーションの結果を図-7 に示す。この図は計算開始後 200 分であり氾濫流入終了時である。この図より氾濫流が道路網に沿って流れる様子がシミュレーションされたことが確認される。また、図-7 の主な地点における水深と流速をまとめる。大通西 8 丁目において水深 0.24m 流速西へ $0.22\text{m}/\text{s}$ 、札幌駅前において水深 0.24m 流速西へ $0.17\text{m}/\text{s}$ 、時計台前において水深 0.25m 流速西へ $0.14\text{m}/\text{s}$ 、国道 213 号北 14 条において水深 0.14m 流速北へ $0.38\text{m}/\text{s}$ 、以上の計算結果が得られた。

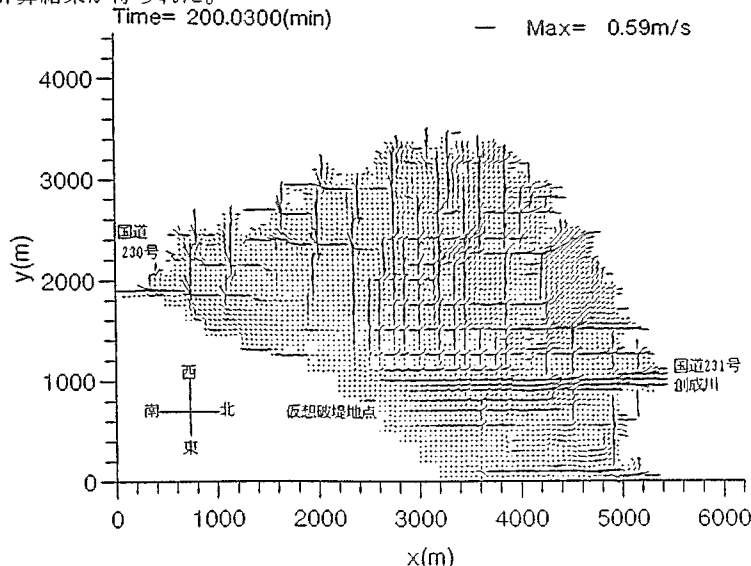


図-7 ベクトル図

6. 地形データ作成上の問題点

洪水氾濫モデルにおいて氾濫流計算と並行して、この計算に用いるための地形データの検討を行っている。現在検討している地形データは国土数値情報(KS-124-1)である。この地形情報はメッシュデータとして磁気テープに収録されている。国土数値情報⁹⁾とは縮尺2万5千分の1地形図とほぼ等しい範囲で日本全国を約4430図葉でカバーした数値化された地図である。洪水氾濫流計算の地形データとして、このようなメッシュデータを用いることができれば地形データの読み込み作業を迅速に行うことができる。ここに、図-8が国土数値情報(KS-124-1)を基に作成したコンターマップの一例である(ただし、地盤高100mを越える地域は簡素化のために地盤高100mに置き換えた)。

しかしながらこの国土数値情報(KS-124-1)には洪水氾濫流計算を行う際に制約となる問題点があり以下にまとめる。1.) 地形メッシュデータが250mメッシュである。2.) 堤防等の河川関連の地形データが含まれていない。3.) 地形データの最小単位がm単位である。これらの問題点は各々関連している。1.) の問題点としては氾濫流計算メッシュがそのまま250mメッシュへと制約されることとなる。また2.) の問題点と関連するが、この250mメッシュに河川に関するデータを入力しても河幅、堤防等が非現実的なものとなってしまう、さらにこれは都市域における道路幅にも同様に言えることである。

そこで250mメッシュを50mメッシュへの変換を行った。ところが50mメッシュとなってもデータの精度は同様であり、データの最小単位がm単位であるという3.) の問題点もそのままである。洪水氾濫流数値計算において洪水氾濫流は水深が浅く水理量の深さ方向の変化が小さいとして深さ方向に平均化した水理量を対象としているため、計算メッシュにおいて隣合う地形データの間で最低1m以上の差が生じていることは望ましいことではない。的確な洪水氾濫流数値シミュレーションを行うためには地形データのもつ意味は重要な位置を占め今後の早急な検討が必要である。

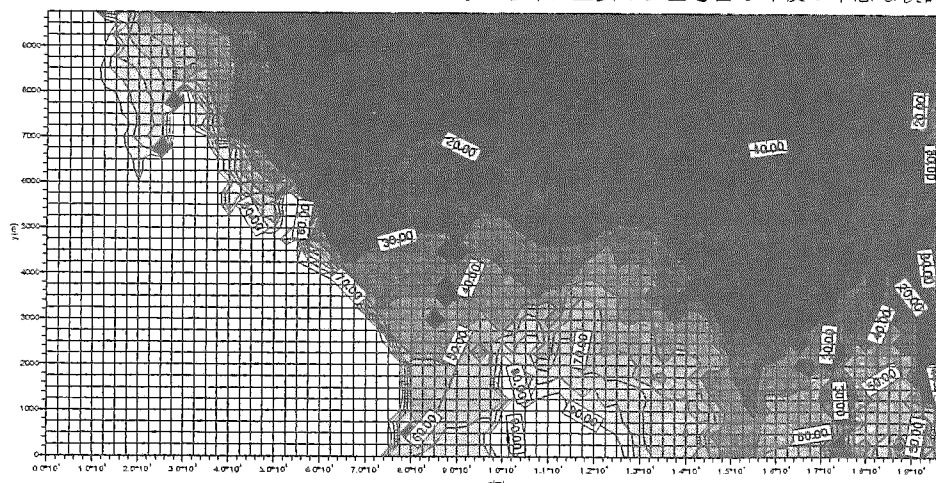


図-8 札幌および札幌東部

7. おわりに

初期水深が存在しない洪水氾濫流の挙動は不安定であり、的確なシミュレーションが困難である。例えば、地面に水を撒くとする。水は高い所から低い所へと流れる。ところが、この高い所から低い所へと流れる水がどのような挙動をもちながら流れて行くのかを、あらかじめ的確に把握することは困難である。

本研究では、都市域における洪水氾濫流数値シミュレーションを行った。ここでの的確な洪水氾濫流予測モデルを確立するために、現段階の主要な結果と課題点についてまとめる。基礎式の差分を示すとともに、都市域における洪水氾濫流を道路網に沿った氾濫流として数値シミュレーションすることができた。また、氾濫流計算を行うにあたり地形データ、建築物密集度データが不足している。今後リモートセンシング等によるきめ細かなデータの検討を必要とする。さらに、精度の高いデータに対応するよりの的確な数値シミュレーションとするために模型実験を行うとともに、氾濫流先端部を中心とした境界条件等を考慮、検討しよりの的確な洪水氾濫流モデルへと発展させなければならない。

8. 参考文献

- 1) 清水康行：沖積河川における流れと河床変動の予測手法に関する研究、北海道大学審査学位論文、1991年2月、pp.48-73
- 2) 福岡捷二・松永宣夫：密集市街地における洪水氾濫流解析と氾濫流制御の試み、土木学会水理委員会、水工学論文集第36巻、1992年2月、pp.311-316
- 3) 土木学会：水理公式集、昭和60年、pp.217-219, pp.291
- 4) 建設省国土地理院、国土庁計画・調整局：国土数値情報、1987年、pp.1-130