

GISを用いた流域分類と流出現象のモデル化に関する研究

—多摩川流域丘陵地への適用—

2 0 0 3 年

小 口 高

東京大学・空間情報科学研究センター

目 次

はじめに	1
I 多摩地域の環境基礎情報としてのデジタル標高モデル(DEM)	
1. 多摩丘陵に関する高解像度 DEM の作成過程 杉盛啓明・佐野滋樹・小口 高・高橋昭子・鈴木康弘	5
2. 多摩地域における DEM の解像度と標高・傾斜・縦断曲率との関係 小口 高・高橋昭子・杉盛啓明・宮崎千尋	10
3. 流域単位における DEM の地形表現力と人工地形改変の評価 杉盛啓明・小口 高	21
4. 高解像度 DEM の解析に基づく多摩地域の人工地形改変の数量的特徴 高橋昭子・小口 高	32
5. 多様な補間法を用いた多摩地域における擬似高解像度 DEM の作成 高橋昭子・小口 高・杉盛啓明	48
II 多摩地域の水文環境・土地利用の変化と流出解析	
6. 既存データの編集と現地観測に基づく水文データの整備 杉盛啓明・木村圭司・勝部圭一・谷川晋一	61
7. 多摩地域における土地利用変化の空間分布と変化量 伊藤史子	67
8. 流域単位での土地利用変化の把握 杉盛啓明	83
9. 多摩地域の気候とリモートセンシングによる土地被覆解析 木村圭司	94
10. 分布型流出モデルによる多摩丘陵の流出解析—地形改変と都市化の影響について— 杉盛啓明・小口 高	100

III 広域における多摩地域の位置づけ

- | | |
|--|-----|
| 11. 愛知県瀬戸地域と多摩丘陵の疑似高解像度 DEM 作成時における補間法の適合度
小口 高・勝部圭一・宮崎千尋・高橋昭子・南里明子・鈴木康弘 | 127 |
| 12. 多摩丘陵と愛知県の丘陵地における流出特性の比較
杉盛啓明・恩田裕一・糸数 哲・Dhakal, A.S.・Sidle, R.C.・鈴木康弘 | 135 |
| 13. 関東～中部日本の 8 流域における河川懸濁物質濃度の空間分布とその規定要因
小口 高・Siakeu, J.・畠屋みず穂・高木哲也・早川裕一 | 144 |
| 14. 関東～中部日本の河川における懸濁物質濃度の経年変化と人間活動との関係
—とくに多摩川流域の独自性について—
Siakeu, J.・小口 高・青木賢人・江崎雄治・Jarvie, H.P. | 163 |

はじめに

本書は、平成12～14年度に財団法人とうきゅう環境浄化財団からの助成金を受けて行われた研究プロジェクト「GISを用いた流域分類と流出現象のモデル化に関する研究－多摩川流域丘陵地への適用」の成果報告書である。

本研究では、流域の環境条件が水と土砂の流出に与える影響を定量的に評価するために、GIS（地理情報システム）、DEM（デジタル標高モデル）、流域環境と土砂流出に関するデジタル・データ、および流出モデルを用いた検討を行った。この際には多摩川流域の丘陵地において詳細な解析を行い、同時に多摩川流域を含む関東～中部日本に関する広域的な解析を行った。

複雑できめの細かい地形を持つ多摩川流域の丘陵地において研究を行うためには、空間解像度が高いデータが必要と思われる。しかし、基本データであるDEMは、一般には国土地理院発行の水平解像度約50mのものしか流通していない。そこで、GISによるベクター・データの処理と解析空中写真測量を新たに行い、多摩丘陵に関する10m解像度のDEMを作成した。この際には多摩丘陵の多くの範囲が大規模地形改変の影響を受けたことを考慮し、1980年代中期以降に活発な地形改変が行われた地域については地形改変前後のデータを取得した。また、土地利用に関しても入手可能な最も解像度が高いデータ（細密数値情報）を使用した解析を行った。さらに、いくつかの地点で新たに流量観測を行って解析に利用した。その結果、地形改変と土地利用変化の実態が明らかにされ、その結果生じた水の流出の変化を、GISによるモデリングを用いて定量化することができた。

一方、関東～中部日本に関する広域的な解析においては、50m解像度のDEM、環境省の浮流土砂濃度と土地利用に関するデータ、国土交通省の河川流量データといった既存のデジタル・データを活用し、広域的な傾向の把握を試みた。特に、1970年代後半以降の時系列データを用いて、この時期に生じた都市化や過疎化に伴う河川流出と土砂流出の変化を解析した。その結果に基づいて多摩川流域を他の流域と比較し、その特徴を明らかにした。

さらに、DEMの地形表現力とDEMの補間にに関する技術的検討や、愛知県瀬戸地域の丘陵地と多摩丘陵との比較も行った。

本報告書は上記の一連の研究成果をまとめたものであり、「多摩地域の環境基礎情報としてのデジタル標高モデル(DEM)」「多摩地域の水文環境・土地利用の変化と流出解析」「広域における多摩地域の位置づけ」の3部で構成されている。各部はさらに複数の章に細分されており、章の総数は14である。

本研究では地形、水流出、土砂流出、土地利用、都市化といった自然・人文環境に関する多様な要素を検討対象としたため、研究代表者1名、共同研究者3名の他に、18名の研究者に協力を要請した。上記の各章は、これらの研究者が単名もしくは連名で執筆したものである。参加した研究者とその所属は以下のとおりである。

研究代表者

小口 高（東京大学空間情報科学研究センター）

共同研究者

木村圭司（東京都立大学理学部）

杉盛啓明（東京大学空間情報科学研究センター 現（株）創建）

鈴木康弘（愛知県立大学情報科学部）

研究協力者

青木賢人（金沢大学文学部）

伊藤史子（東京大学空間情報科学研究センター 現 新潟大学経済学部）

糸数 哲（名古屋大学農学系研究科博士課程）

江崎雄治（専修大学文学部）

恩田裕一（筑波大学地球科学系）

勝部圭一（東京大学大学院理学系研究科博士課程 現（株）北海道地図）

佐野滋樹（（株）玉野総合コンサルタント）

高木哲也（東京大学大学院理学系研究科修士課程）

高橋昭子（東京大学空間情報科学研究センター）

谷川晋一（東京大学大学院理学系研究科博士課程）

南里明子（東京大学空間情報科学研究センター）

畠屋みづ穂（東京大学大学院理学系研究科修士課程）

早川裕一（東京大学大学院理学系研究科修士課程）

宮崎千尋（東京大学空間情報科学研究センター）

Dhakal, A.S.（カナダ、ブリティッシュコロンビア大学）

Jarvie, H.P.（英国、生態学・水文学研究所）

Siakeu, J.（東京大学大学院理学系研究科博士課程 現 在カメルーン）

Sidle, R.C.（京都大学防災研究所）

末筆ながら、本研究の意義を理解して下さり、助成金を交付して下さった財団法人とうきゅう環境浄化財團に厚く御礼申し上げる。

2003年9月

東京大学空間情報科学研究センター

小口 高

第Ⅰ部

多摩地域の環境基礎情報としての
デジタル標高モデル(DEM)

第1章

多摩丘陵に関する高解像度DEMの作成過程

杉盛啓明・佐野滋樹・小口 高・高橋昭子・鈴木康弘

1. 背景と目的

丘陵地における降雨流出や土砂流出を考える上で、地表面の形状を表現するDEM (Digital Elevation Model) は基礎的な情報として重要である。日本の丘陵地は一般に、なだらかな尾根とそれを刻む細かい谷がモザイク状に分布するという特徴を持ち、0次谷や1次谷と呼ばれる源流域では斜面長が数十mのオーダーになる。このような空間スケールの斜面の傾斜を、現在国内で一般的に入手可能なDEMである国土地理院の「数値地図50 mメッシュ（標高）」（以下50-m DEMと呼ぶ）で精度良く表現することは、困難と考えられている（小口・勝部、1999, 2000）。したがって、丘陵地の研究では高解像度のDEMが必要である。

また、本研究では、多摩川流域の丘陵地における人工地形改変や都市化が、降雨一流出過程に及ぼす影響を調べることを目的の1つとしている。このため、地形改変の前後という2時期のDEMが必要となる。

上記のような要件を満たすために、本研究では多摩丘陵に関する水平解像度10 mのDEM（以下、10-m DEMと呼ぶ）を1984年と1990年代末期の2時期について作成し、一連の解析の基礎情報とすることにした。

2. DEMの作成過程

本研究では、デジタル等高線・基準点データと空中写真測量を用いて10-m DEMを作成した。DEMの作成範囲は、多摩丘陵とそれに隣接する関東山地の東縁部であり、図1-1のうち地形の陰影を示した範囲である。行政区的には東京都の西部に位置する。DEMの作成範囲の面積は約316 km²であり、標高の最大値、最小値、平均値はそれぞれ862 m, 24 m, 179 mである。

1990年代末期のDEMを作成する際には、東京都発行の「デジタルマッピング地形図多摩版CD-ROM」に収録されているデジタル等高線・基準点データを基礎データとして用いた。このデータは東京都内の多摩地域全域をカバーしており、1996～1999年度の測量によって得られた間隔2 mの等高線をベクター形式で保存したファイルと、測量基準点の位置と標高の情報を記述したファイルとで構成されている。最初に、等高線データ上に水平距離5 m間隔の点を発生させ、その点に等高線の高度を属性地として与えた。次に、発生させた点と測量基準点を合わせた点群のデータに、クリギング補間（Cressie, 1990；Oliver and Webster, 1990）を適用してDEMを発生させた。この際には対象点の周囲にある24個の点を参照点として利用し、直線のバリオグラムとゼロのナゲット効果を仮定した。したがって、元のデータ中の点と対象点が一致した場合には、元のデータの値が完全に再現される。使用した点群データの密度が非常に高いため、補間は近傍のデータのみを用いて行われることになる。したがって、ここでのクリギングの使用には積極的な意味はなく、通常使用される他の補間の方法を用いても、同等の結果が得られたと考えられる。上記の作業で得られた10-m DEMを「現在のDEM」と呼ぶ。DEMの投影法は平面直角座標系（第9系）である。

次に、1984年時点のDEMを作成するため、1984年以降に大規模造成が行われた範囲について空中写真を用いた解析写真測量を行った。まず、国土地理院の首都圏細密数値情報の土地利用データを用いて、1984年には山林や荒地であったが、1994年には造成中もしくは造成済の地点を抽出し、それらの地点がまとまって分布する範囲を1984年以降の大規模造成地とみなした。これらの範囲に若干の周辺部を加えた範囲を対象に、1984年に国土地理院が撮影した1：10,000カラー空中写真（CKT-84-1）30枚と解析図化機（ZEISS社製 Planicomp P3）を用いて写真測量を行い、10-m DEMを作成した。この際には個々のステレオ・ペアについて40個前後のコントロール・ポイント（GCP）を設置して空中三角測量を行った。

測量の平均誤差は平面（x,y）が0.553 m、高さ（z）が-0.001 mであり、誤差の標準偏差は平面が0.359 m、高さが0.228 mであった。公共測量作業規定では誤差の許容標準偏差を対地高度の0.4 %としており、これは今回の事例では約0.6 mとなるが、上記の標準偏差はこの値を下回っている。したがって、DEMの精度は十分に高いといえる。次に、前記した現在のDEMのうち、人工地形改変前のDEMが作成された範囲については、標高値を改変前の値で置き換えた。大規模な改変がなかった場所では、1984年以降に地形変化がほとんどなかつたといえるので、置き換え後のDEMを多摩地域における1984年時点のDEMとみなした。なお、1984年のDEMにおいて写真測量で作成された部分とその周辺の部分はほとんどの場所でスムースに連結されており、接合部を平滑化するような処理は不要であった。図1-2は、作成



図1-1 DEMの作成範囲（地形陰影部分）

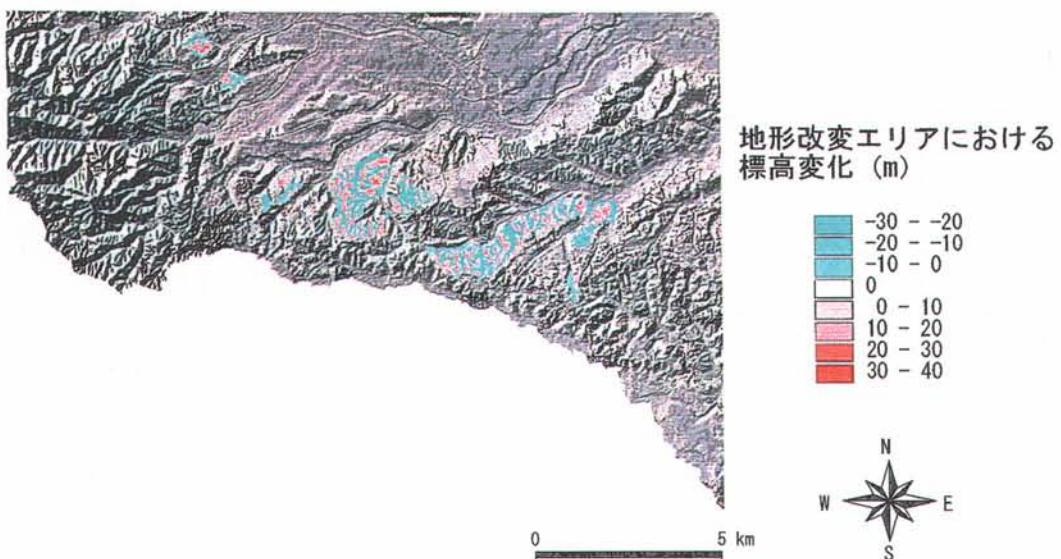


図1-2 人工地形改変が生じた範囲と改変にともなう標高変化

された1984年と現在のDEMを用いて調べた、地形変化にともなう標高変化量の分布を示している。

3. おわりに

ベクター標高データと解析写真測量を用いて、多摩丘陵に関する2時期の10-m DEMを整備した。現在、日本で広く入手できるDEMは、最も詳細なものでも解像度は50 m程度であるため、今回作成されたDEMにより、地形や流出の解析に新たな展開が期待される。また、日本では複数の時期のDEMが整備されている例もほとんどない。この点でも今回作成されたDEMは貴重である。

文献

- 小口 高、勝部圭一, 1999. 5 mメッシュDEMによる丘陵地の地形解析の新展開. 愛知県企画部:近未来社会対応型情報通信産業振興事業 近未来型社会に対応する地域環境システムの構築, 平成10年度成果報告書, 2-2, 1-33.
- 小口 高、勝部圭一, 2000. 細密DEMを用いた地形解析. 杉盛啓明, 青木賢人, 鈴木康弘,
小口 高編「デジタル観測手法を統合した里山のGIS解析」中日新聞社, 19-26.
- Cressie, N., 1990. The origins of kriging. Mathematical Geology, 22, 239-252.
- Oliver, M.A., Webster, R., 1990. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. International Journal of Geographical Information Systems, 4, 313-332.

第2章

多摩地域におけるDEMの解像度と標高・傾斜・縦断曲率との関係

小口 高・高橋昭子・杉盛啓明・宮崎千尋

1. はじめに

地形計測法は地形解析の古典的手法である（多田, 1940 ; Horton, 1945）。かつては紙地図の上で地形の特徴を計測し、手作業でデータの集計を行っていたが（たとえば、Strahler, 1957 ; 鈴木, 1969），1970年代にはコンピュータによるデータ処理が普及した（Chorley, 1972 ; 平野・横田, 1976）。近年では、官公庁などが作成した既存のデジタル標高モデルをGIS上で処理することにより、複雑な地形計測を効率的に実行でき（Pike and Dikau, 1995 ; Wilson and Gallant, 2000），その技法はハザードマップの作成などの社会的応用にも活用されている（周ほか, 2000 ; Amod et al., 2000）。

日本ではラスター型のDEM（以下、単にDEMと記す）が国土地理院から刊行されており、全国を覆うDEMの中で最も解像度が高い「数値地図50 mメッシュ（標高）」は、地形のテクスチャが細かい日本においても意味のある勾配を計算可能とされている（野上, 1995）。これは平坦な低地や大起伏の山地については適切な見解であろうが、急斜面と緩傾斜地が狭い範囲に隣接している台地や丘陵地にも当てはまるかは検討の余地がある。

日本の都市近郊の丘陵地は「里山」と呼ばれ、古くから人間による自然の利用と改変が活発であった。日本の丘陵地の地形は「多短谷小起伏」と称され（三野, 1942），全体の比高は小さいが小規模な急斜面と緩斜面がモザイク状に分布している。小口・勝部（1999, 2000）は、愛知県瀬戸地域の丘陵地を対象に、解像度が異なるDEMから算出された傾斜の値を比較した。その結果によると、丘陵地の谷沿いの急斜面を再現する際には50 mメッシュのDEMでは解像度が不足しており、より高解像度のDEMの取得が望ましい。しかし、日本の他の丘陵地ではDEMの地形表現力に関する検討はほとんど行われておらず、上記の指摘の一般性は不明である。また、傾斜以外の地形量に関する検討や、丘陵地に隣接する中～低山に関する検討も必要と思われる。さらに、日本の大都市近郊の丘陵地では地形の人工改変が活発であり（田村ほか, 1983 ; 山田, 2001），改変による地形の平滑化がDEMを用いた地形解析

に与える影響も調べる必要もある。

そこで本章では、多摩丘陵と隣接する低山に関する水平解像度10 mのDEM (10-m DEM) を用いて、DEMの解像度とDEMから計算される地形量（傾斜・曲率）との関係を検討した。

2. 解析範囲の設定と地形量の算出

デジタル等高線データと空中写真測量を用いて整備した多摩地域の10-m DEM (第1章) の作成範囲から、1 km四方の領域を5つ選択して解析対象とした。このうち2領域 (A, B) は山地に位置し、3領域 (C, D, E) は丘陵地に位置する (図2-1)。A, B領域は八王子市の最西部に位置し、標高は380～720 mである。A領域では尾根型斜面が卓越し、B領域では谷型斜面が卓越する (図2-2)。C, D, E領域は八王子市と町田市の境界付近に位置し、標高は120～220 mである。E領域ではほぼ全域で人工改変による地形の平坦化が顕著である (図2-2)。C領域の北部でも人工地形改変の影響が明瞭であるが、D領域は南東部を除いて改変の影響

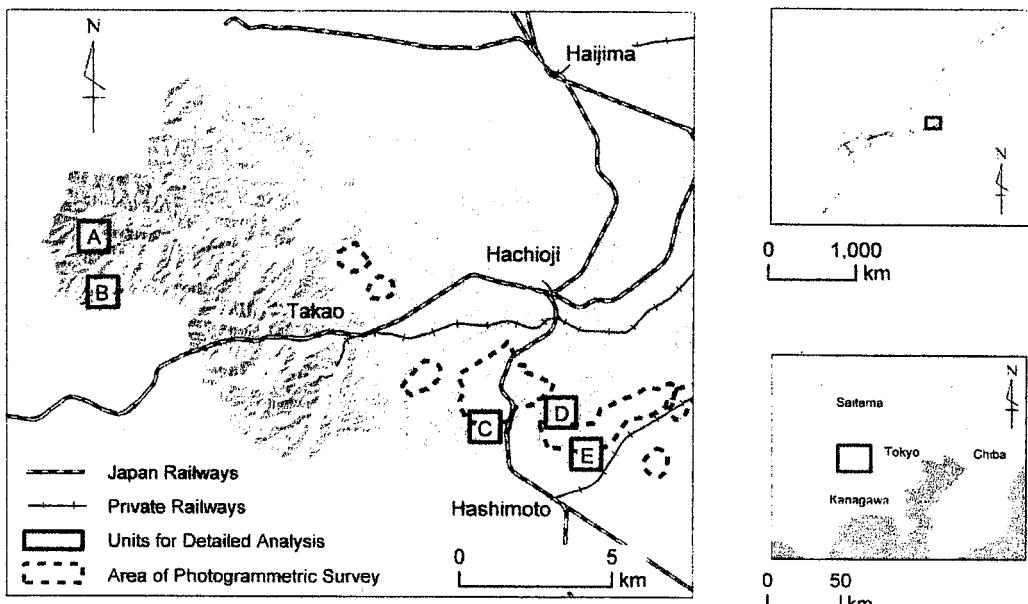


図2-1 DEM取得地域

東京都のデジタルマッピング地形図からデータを取得した範囲を陰影図で示し、写真測量でデータを取得した範囲を破線で示した。A～Eは1 km四方の解析対象領域である。

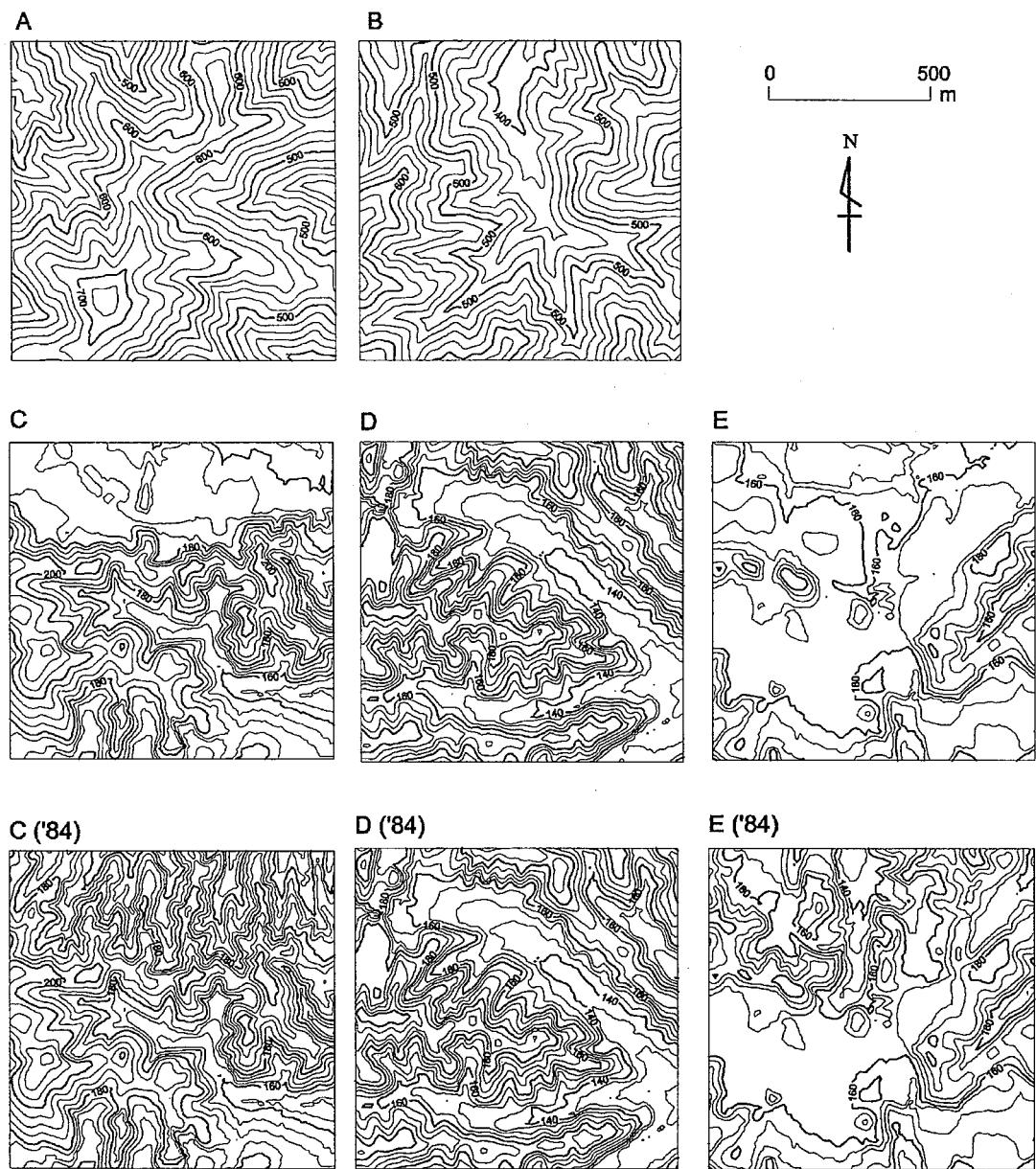


図2-2 解析対象領域（A～E）の等高線図

A, B領域の図（第1段）は1996～1999年度の状況を示し、等高線間隔は20 mである。C～E領域の図は、1996～1999年度（第2段）および1984年（第3段）の状況を示し、等高線間隔は5 mである。

を受けていない。また、1984年の時点ではC領域の北部は改変をほとんど受けていなかったが、E領域の南西部は既にかなりの改変を受けていた。国土地理院の首都圏細密数値情報の土地利用データに基づき、1984年以降に大規模地形改変を受けた範囲の面積比率を求めたところ、C、E領域では約40%となり、D領域では約2%となった。

上記の5領域について10-m DEMを用いた基本的な地形解析を行った。第1章で述べたように、今回作成したDEMの対象年次は1984年と「現在」であり、人工地形改変の影響がみられるC、D、E領域については、両時期のDEMを共に取り上げた。以下に述べるDEMの処理の際には、GISソフトウェア(ESRI社のArcViewとArcGISおよびGolden Software社のSurfer)を利用した。最初に、各領域のDEMの標高値を集計し、領域内の標高の平均値、最高値、最低値、標準偏差を求めた(表2-1)。山地に位置するA、B領域では、丘陵地に位置する他の領域に比べて標高の平均値と標準偏差が大きい。1984年以降に大規模な人工地形改変を受けたC、E領域では、改変の前後で標高の平均値と標準偏差が変化しており、尾根を削って谷を埋める改変によって標準偏差が減少する傾向が明瞭である。

次に、下記のHorn(1981)の方法を用いてDEMから傾斜を算出し、その値を集計した。下記の3×3の移動窓をDEM上に設定する。

$$\begin{matrix} Z_1 & Z_2 & Z_3 \\ Z_4 & Z_5 & Z_6 \\ Z_7 & Z_8 & Z_9 \end{matrix}$$

中央点(Z_5)における東西方向の傾斜と南北方向の傾斜はそれぞれ次式で表される。

$$[\partial z / \partial x] = [(Z_3 + 2Z_6 + Z_9) - (Z_1 + 2Z_4 + Z_7)] / 8\partial x$$

$$[\partial z / \partial y] = [(Z_3 + 2Z_2 + Z_1) - (Z_9 + 2Z_8 + Z_7)] / 8\partial y$$

中央点の傾斜Sは次式によって計算できる。

$$\tan S = [(\partial z / \partial x)^2 + (\partial z / \partial y)^2]^{0.5}$$

計算された傾斜の平均値は、山地に位置するA、B領域では大きく、丘陵地に位置するC～E領域では小さい(表2-1)。しかし、山地と丘陵地の傾斜の標準偏差には大差がない。ま

た, 人工地形改変の影響が強いC, E領域では, 改変による傾斜の減少が顕著である(表2-1).

また, Zevenbergen and Thorne (1987) が提案した以下の手法を用いて, 縦断方向と横断方向の曲率を計算した. 前記の3×3の移動窓内における地表面の形態は, 次式で近似できる.

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I$$

$$A = [(Z_1 + Z_3 + Z_7 + Z_9)/4 - (Z_2 + Z_4 + Z_6 + Z_8)/2 + Z_5]/L^4$$

$$B = [(Z_1 + Z_3 - Z_7 - Z_9)/4 - (Z_2 - Z_8)/2]/L^3$$

$$C = [(-Z_1 + Z_3 - Z_7 + Z_9)/4 + (Z_4 - Z_6)]/2]/L^3$$

$$D = [(Z_4 + Z_6)/2 - Z_5]/L^2$$

$$E = [(Z_2 + Z_8)/2 - Z_5]/L^2$$

$$F = (-Z_1 + Z_3 + Z_7 - Z_9)/4L^2$$

$$G = (-Z_4 + Z_6)/2L$$

$$H = (Z_2 - Z_8)/2L$$

$$I = Z_5$$

ただし, L はDEMの格子点間隔である.

このとき, 縦断曲率 (Profile Curvature: PR) と横断曲率 (Plan Curvature: PL) は次式で計算できる.

$$PR = 2(DG^2 + EH^2 + FGH)/(G^2 + H^2)$$

$$PL = -2(DH^2 + EG^2 - FGH)/(G^2 + H^2)$$

縦断曲率は上に凸の地形では負になり, 上に凹の地形では正になる. また, 横断曲率は谷型の地形では負になり, 尾根型の地形では正になる. 上記の式で計算される曲率の値は非常に小さい場合が多いので, 今回は計算された値に100を乗じた値を曲率として採用した. 一般に谷は上に凹の形状を持ち, 尾根は上に凸の形状を持つため, 縦断曲率と横断曲率は負の相関を示す場合が多い. これは今回の事例でも明白であり(図2-3), 負の相関は全事例において99%以上の信頼度で有意であった. そこで, 以下の検討では縦断曲率のみを曲率の指標

表2-1 各解析領域における基本的な地形量

領域	標高 (m)				傾斜 (°)				縦断曲率 (1/100 m)			
	最小	最大	平均	標準偏差	最小	最大	平均	標準偏差	最小	最大	平均	標準偏差
A	379.5	728.5	565.1	72.5	1.4	54.0	35.4	8.2	-15.128	14.397	-0.122	2.176
B	376.6	654.1	513.6	58.5	1.0	53.1	34.4	8.8	-13.137	12.133	0.077	2.309
C	148.0	217.0	178.2 (179.1)	13.5 (13.7)	0.0	38.4	11.8 (15.2)	7.9 (7.4)	-13.128	12.112	0.039 (0.016)	1.706 (2.044)
D	124.0	206.4	162.0	17.4	0.0	40.1	14.5	8.2	-21.790	15.330	0.040	1.926 (1.922)
E	132.0	184.2	160.7 (160.4)	8.8 (10.2)	0.0	30.5 (35.2)	6.8 (9.5)	6.6 (7.3)	-8.504 (-8.535)	12.788	0.037 (0.027)	1.385 (1.531)

括弧内は1984年の値を示し、他の値は1996～1999年度の地形データに基づく値を示す。

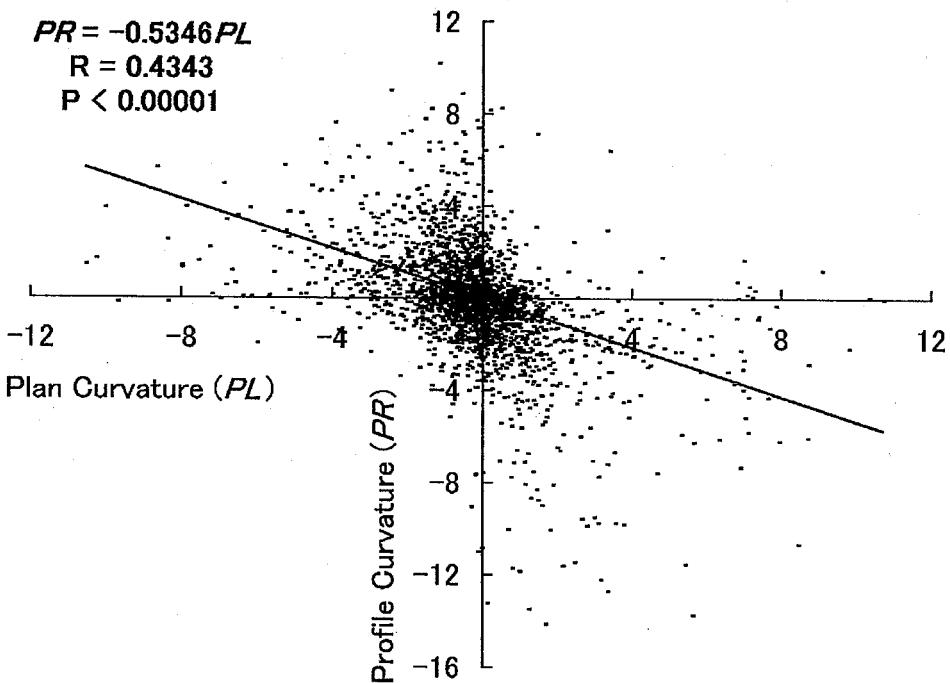


図2-3 A領域の南西部 (0.5 × 0.5 km) における10-m DEMから算出された
横断曲率 (PL) と縦断曲率 (PR) との関係

点の総数は2,500。原点を通る直線による回帰線と、その相関係数 (R) およびp値を示した。

として用いることとする。表2-1によると、縦断曲率の平均値の絶対値は山地で大きく、丘陵地で小さい傾向がある。また、尾根型の地形が卓越するA領域では縦断曲率の平均値が負であるが、他の領域では正になっている。さらに、人工地形改変によって曲率の平均値がやや増加し、標準偏差が小さくなる傾向が認められる。

3. DEMの解像度と地形量との関係

次に、DEMの解像度に応じて地形量がどのように変化するかを検討した。各領域の10-m DEMのデータを一定の間隔（10 mの倍数）で間引くと、空間解像度が20 m～200 mのDEMを19組得ることができる。このようにして作成された多様な解像度のDEMを用いて、傾斜と縦断曲率を上記の方法で計算し、その平均値を求めた。図2-4は、各領域と年次について、標高、傾斜、縦断曲率の平均値とDEMの解像度（10～200 m）との関係を示したものである。ただしD領域では1984年と現在のDEMが酷似しているので（図2-2、表2-1）、1984年のDEMのみを取り上げた。図2-4によると、標高の平均値はDEMの解像度に関わらずほぼ一定であるが、傾斜の平均値は全ての地域・時期において解像度が低くなると小さくなる。また、縦断曲率の平均値は、解像度が高い場合にはA領域では負の値を示し、他の領域では正の値を示す傾向が明瞭であるが、解像度が低くなると値がゼロに近づく。

DEMの解像度が低下すると算出される傾斜が減少することは多くの研究で指摘されている（Guth, 1995；Gao, 1997；小口・勝部, 1999, 2000など）。これは、解像度が低いDEMでは谷や尾根を飛び越して標高がサンプリングされる可能性が高く、局所的な急斜面を抽出できないことを反映する。ただし、DEMの解像度と算出される傾斜との関係には地域性も存在する。合衆国バージニア州のホースシュー山では、DEMの解像度が10 mから60 mに変化すると傾斜が2～4度程度低下する（Gao, 1997）。一方、今回の例では、人工地形改変の影響が強いために10-m DEMに基づく平均傾斜が10度未満のE領域を除くと、DEMの解像度が10 mから60 mに変わる際の傾斜の低下量は5度を超え、最大で約12度（B領域）低下する。また、Guth (1995) によると、DEMの解像度が30 mから90 mに変化すると合衆国ワシントン州のセント・ヘレンズ火山では傾斜が約2～3度低下し、ニューヨーク州のウェスト・ポイント丘陵では傾斜が約1～2度低下する。一方、今回の例においてDEMの解像度が30 mから90 mに変化した際の傾斜の低下量は相対的に大きく、最大で約11度（B領域）である。愛知県瀬戸地域の丘陵地（海上の森）では、DEMの解像度が25 mから50 mに変わると傾斜が約5.5度低

下する（小口・勝部, 1999）。今回の例でも、地形の人工地形改変の影響が顕著な現在のC, E領域と1984年のE領域を除くと、同等の傾斜の変化が認められる。以上の事実は、小規模な谷と尾根が入り組んだ日本の丘陵地が、世界的にみて非常な複雑な地形を持ち、その表現の際には高解像度の地形データを要することを示している。また、丘陵地に隣接する低山の

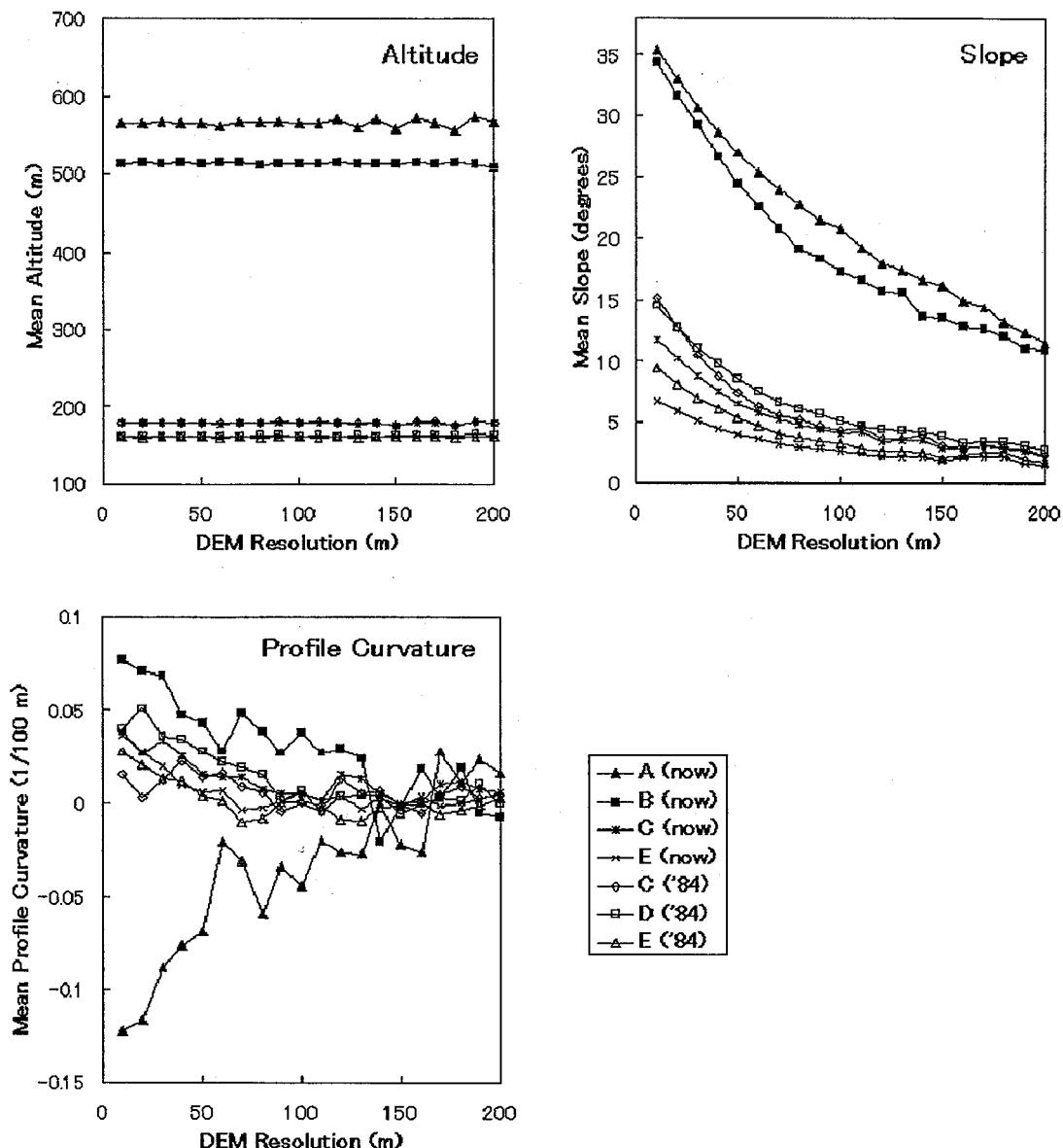


図2-4 標高 (Altitude), 傾斜 (Slope), 縦断曲率 (Profile curvature) の平均値と
DEMの解像度との関係

地形を表現する際にも、やはり高解像度のDEMを用いることが望ましいと判断される。

ただし、人工地形改変の影響が少ない丘陵地と山地とを比較すると、山地の方が傾斜の絶対値が大きいにも関わらず、DEMの解像度が10 mから50 mに変化した際の傾斜の減少量はほぼ同等である（図2-4）。したがって、解像度の低下に伴う傾斜の減少率は山地よりも丘陵地の方が大きいと判断され、山地では50-m DEMも比較的良好な地形表現力を持つといえる。

DEMの解像度とDEMから計算される曲率との関係を検討した既存研究は少ないが、DEMの解像度が低下すると縦断曲率がゼロに近づくという今回の結果は、傾斜の減少に関連した普遍的現象と思われる。平均傾斜が小さければ、全体の地形が平面的に把握されており、その際には曲率もゼロに近づくと予想されるためである。ただし、DEMの解像度が低下した際に傾斜は単調に減少するが、曲率のゼロへの収束は単調には進行しない（図2-4）。したがって、傾斜の減少以外の要素も、DEMの解像度と曲率との関係を規定すると考えられる。

4. おわりに

本章では、多摩丘陵とそれに隣接する低山におけるDEMの地形表現力を検討した。1990年代後半の測量データから作成した10-m DEMと、解析空中写真測量に基づく1984年時点の10-m DEMを利用し、DEMの解像度と平均標高、傾斜、および縦断曲率との関係を検討した。その結果、DEMの解像度が低下すると算出される傾斜が小さくなり、本来よりも緩やかな地形が再現されることが確認された。また、DEMの解像度の低下にともなう傾斜の減少は、既存研究での例よりも概して顕著であり、多摩丘陵とその周辺の低山が複雑な地形を持つことを示している。したがって、地形解析の際には高解像度のDEMを用いることが望ましい。また、DEMの解像度が低下すると縦断曲率がゼロに収束する傾向がみられた。これは、解像度が低下すると地形がより緩傾斜で平面的に表現されることを反映している。

日本には複雑できめの細かい地形が存在するにも関わらず、50-m DEMのみが広く入手可能という現状を考慮すると、DEMの解像度と地形表現力に関する研究を今後も各地で行うべきである。その際には、今回は検討が不十分であった課題を取り上げる必要がある。たとえば、DEMの解像度が低下した際に縦断曲率の絶対値が必ずしも単調に減少しない理由を解明するべきである。また、今回は領域全体の地形量の統計値を用いて地形表現力を評価したが、領域内の個別の部分に関する分析も必要である。また、戎ほか（2002）が山地について行ったような、水系網の再現に最適なDEMの解像度に関する検討も重要である。

文献

- 戎 信宏, 古川智広, 丸谷知己, 2002. GISによる再配列した数値標高データを用いた河道
次数解析に関する検討. GIS－理論と応用, 10-2, 1-8.
- 小口 高, 勝部圭一, 1999. 5 mメッシュDEMによる丘陵地の地形解析の新展開. 愛知県企画
部:近未来社会対応型情報通信産業振興事業 近未来型社会に対応する地域環境シミュレー
ーションシステムの構築, 平成10年度成果報告書, 2-2, 1-33.
- 小口 高, 勝部圭一, 2000. 細密DEMを用いた地形解析. 杉盛啓明, 青木賢人, 鈴木康弘, 小
口 高編「デジタル観測手法を統合した里山のGIS解析」中日新聞社, 19-26.
- 周 国云, 森 二郎, 江崎哲郎, 2000. GISを用いた広域地盤沈下の浸水発生危険性および
洪水氾濫への影響評価. 土と基礎, 48, 18-20.
- 鈴木隆介, 1969. 日本における成層火山体の侵食速度. 火山(第2集), 14, 133-147.
- 多田文夫, 1940. 地形計測法. 井上修次, 岡山俊雄, 多田文男, 花井重次, 渡辺 光編「自
然地理学下巻 地形編」地人書館, 270-301.
- 田村俊和, 山本 博, 吉岡慎一, 1983. 大規模地形改変の全国的把握. 地理学評論, 56, 223-242.
- 野上道男, 1995. 細密DEMの紹介と流域地形計測. 地理学評論, 68A, 465-474.
- 平野昌繁, 横田修一郎, 1976. 西南日本に例をとった電子計算機による地形数値解析. 地理
学評論, 49, 440-454.
- 三野与吉, 1942. 「地形原論—岩石床より觀たる準平原論—」古今書院.
- 山田周二, 2001. 人工的に改変された山地・丘陵地の地形自然度評価. 地理学評論, 74A,
643-657.
- Amod, S.D., Amada, T., Aniya, M., 2000. Application of aerial photographs and GIS to slope
instability analysis and reliability of hazard maps. Journal of Remote Sensing Society of Japan, 20,
113-126.
- Chorley, R.J., ed. 1972. Spatial analysis in geomorphology. Methuen, London.
- Gao, J., 1997. Resolution and accuracy of terrain representation by grid DEMs at a micro-scale.
International Journal of Geographical Information Science, 11, 199-212.
- Guth, P.L., 1995. Slope and aspect calculations on gridded digital elevation models: Examples from
a geomorphometric toolbox for personal computers. Zeitschrift für Geomorphologie N.F.
Supplement Band, 101, 31-52.
- Horn, B.K.P., 1981. Hill shading and the reflectance map. Proceedings of the IEEE, 69, 14.

- Horton, R.E., 1945. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. Bulletin of the Geological Society of America, 50, 275-370.
- Pike, R.J., Dikau, R., eds. 1995. Advances in geomorphometry: Proceedings of the Walter F. Wood Memorial Symposium. Zeitschrift für Geomorphologie N.F. Supplement Band, 101, 1-238.
- Strahler, A.N., 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. Transactions of the American Geophysical Union, 38, 913-920.
- Wilson, J.P., Gallant, J.C., eds. 2000. Terrain analysis: principles and applications. John Wiley and Sons, New York.
- Zevenbergen L.W., Thorne C.R., 1987. Quantitative analysis of land surface topography. Earth Surface Processes and Landforms, 12, 47-56.

第3章

流域単位におけるDEMの地形表現力と人工地形改変の評価

杉盛啓明・小口 高

1. 目的

第2章では1 km四方の領域を設定し、10-m DEMの地形表現力を粗いDEMの表現力と比較した。この際には地形の指標として標高、傾斜、および縦断曲率を用いた。その結果、特に傾斜の表現力がDEMの解像度と対応して変わることが示された。一方、水や土砂の移動に関する検討では、流域単位でみたDEMの地形表現力が重要である（Garbrecht and Martz, 1994；Brasington and Richards, 1998など）。特に、物質が地表を移動する経路である落水線に沿った地形特性を、いかに的確に把握できるかが問題となる。そこで本章では、流域単位で抽出した10-m DEMの地形表現力を、落水線に沿う地形特性と流域の傾斜に注目して調査し、50-m DEMを用いた場合の結果と比較する。また、1984年と「現在」の10-m DEMを活用し、人工改変による地形変化の量的特徴を流域単位で評価する。

2. 方法

本章の検討で用いた50-m DEMは、国土地理院の「数値地図（標高）50 mメッシュ」を平面直角座標系（第9系）に投影変換したものである。変換の際にはクリギングによる補間を行った。一方、使用した10-m DEMは今回整備したもの（第1章）である。

GISソフトウェアArcViewに多摩丘陵の10-m DEMおよび50-m DEMを読み込み、Hydrologic Modelingモジュールを用いて城山川、兵衛川、乞田川の流域界を抽出した（図3-1）。また、流域に含まれるDEMの各セルにおける流下方向の分析に基づき、落水線を抽出した。同時に、各セルについて、流域の出口から落水線に沿って計測した距離を求め、さらに各セルにおける傾斜を第2章と同様の方法で算出した。続いて、これらのデータの頻度分布とデータ間の相互関係を調べた。特に、流域の出口からの距離に応じて地形がどう変化するかに注目

した。また、地形改変が活発であった兵衛川流域を対象に、改変の特徴を量的に把握した。

3. 結果と考察

1) 落水線の縦断面形

各セルの標高をY軸、落水線に沿って計測した流域末端からの距離をX軸に沿ってプロットすると、落水線の縦断面形の集合が得られる。図3-2は城山川流域における集合の例である。10-m DEMから得られた縦断面形は、50-m DEMから得られたものに比べて数が多く表現も詳細であり、特に多数の支流の合流が明瞭に再現されている。

城山川流域における流域末端からの距離と傾斜との関係（図3-3）をみると、50-m DEMのデータでは中・下流域で 20° 以上の傾斜がほとんどなく、最上流部の傾斜も 40° 程度であるが、10-m DEMのデータではほぼ全ての区間で 50° 近くの急傾斜面が表現されている。また、50-m DEMのデータでは、流域末端から離れた場所では傾斜が 3° 以下のセルが急減するが、10-m DEMのデータでは緩傾斜のセルがかなり表現されている。上記のようなDEMの解像度に応じた地形表現の相違は、他の2流域でも認められる。したがって、流域地形の表現においても、10-m DEMは50-m DEMよりも優れていると判断され、特に局所的な地形表現力に大きな差があるといえる。

2) 流域の傾斜頻度分布

10-m DEMを用いて計算した各流域の傾斜ヒストグラムを図3-4～3-6に示した。兵衛川流域では人工地形改変により傾斜の頻度分布が大きく変化したが、他の流域では変化が顕著でなかったため、兵衛川流域についてのみ2時期のデータを示した。

城山川と乞田川の流域では、傾斜が大きくなるとセルの出現頻度が単調に減少する。しかし、1984年の兵衛川流域では、傾斜が15度以下の場合には傾斜と出現頻度との負の相関が不明瞭である。一方、人工改変の後には兵衛川流域においても緩傾斜のセルが増加し、セルの出現頻度が傾斜とともに単調減少するようになった。このことは、兵衛川流域では居住に適した緩傾斜の土地が相対的に少なかったために、人工地形改変の規模が必然的に大きくなつたことを示唆する。

3) 地形改変量の把握

人工地形改変が大規模であった兵衛川流域について、2時期のDEMの値を差し引きし、地形改変にともなう標高の変化量を求めた。標高を減じたセルと増したセルの総数は概ね等しく（図3-7）、標高変化量のヒストグラムも0 mを境にほぼ左右対称になっている（図3-8）。これは、尾根を削って得られた土を近くの谷に埋めるという地形改変の手法を反映している。ただし、標高変化量に基づいて流域全体における切土と盛土の体積を推定すると、前者が約 $1.14 \times 10^7 \text{ m}^3$ 、後者が約 $1.01 \times 10^7 \text{ m}^3$ となり、やや切土の量が多くなった。地形改変量に関するより詳しい検討は、次章で行う。

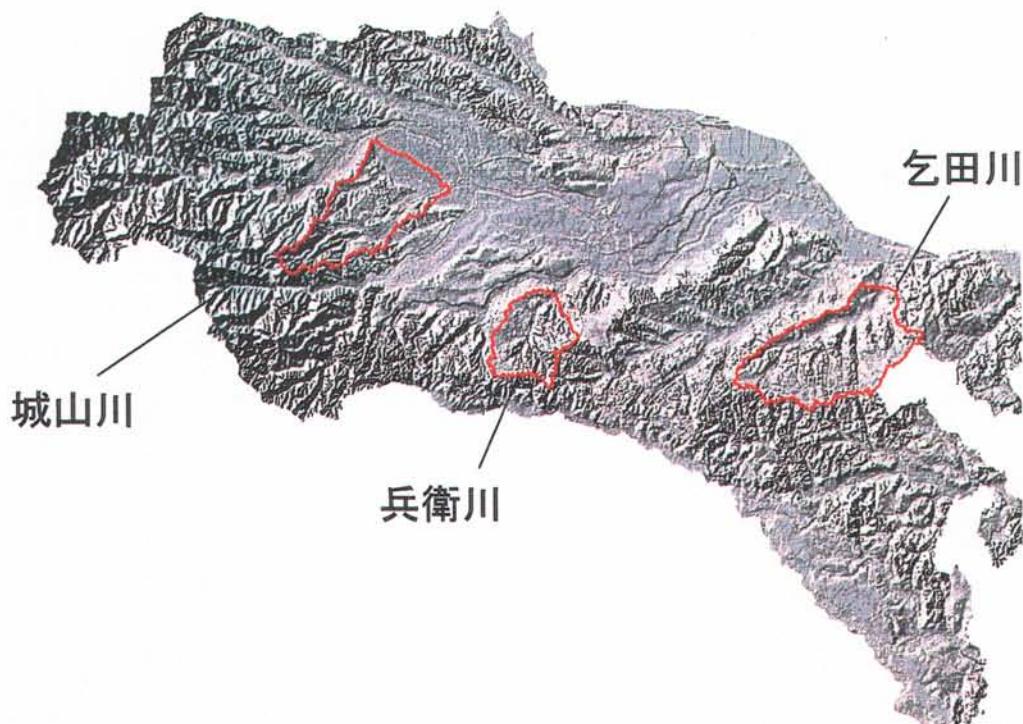


図3-1 対象とした3流域

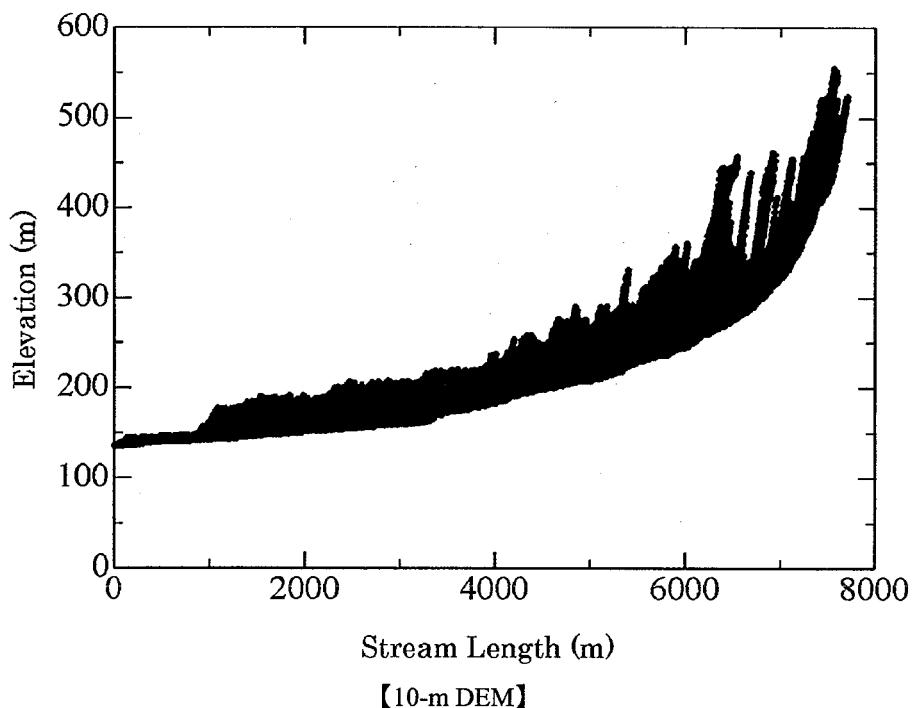
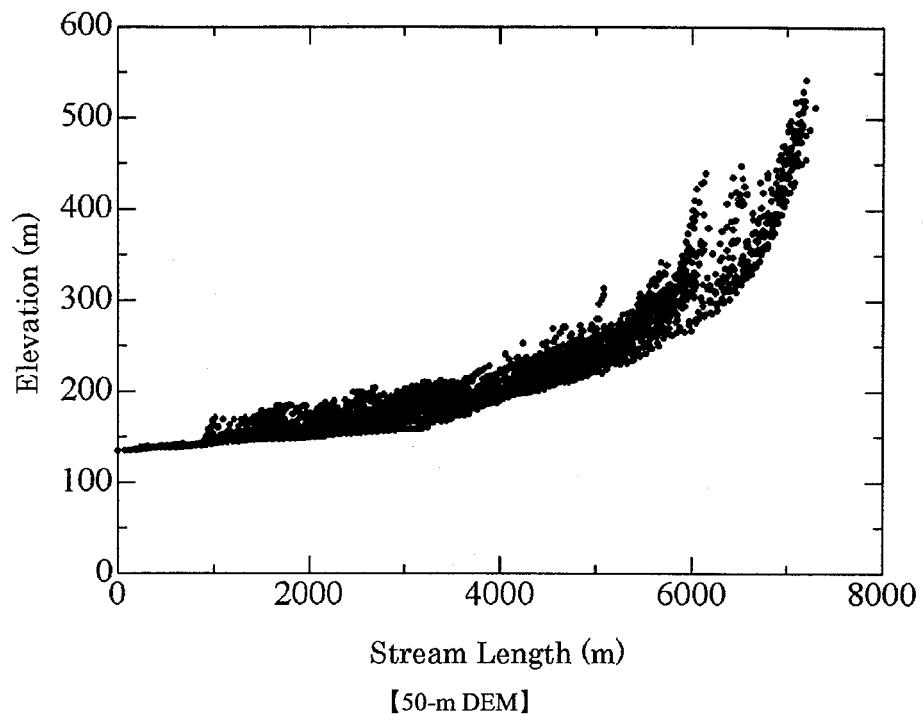


図3-2 城山川流域における落水線の縦断面形（解像度の異なるDEMによる比較）

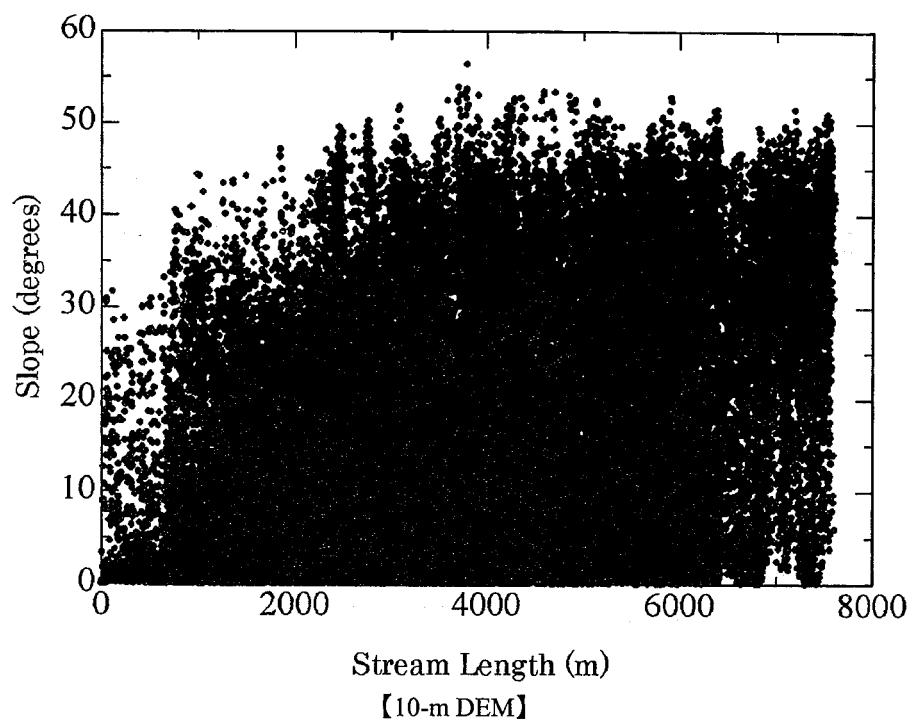
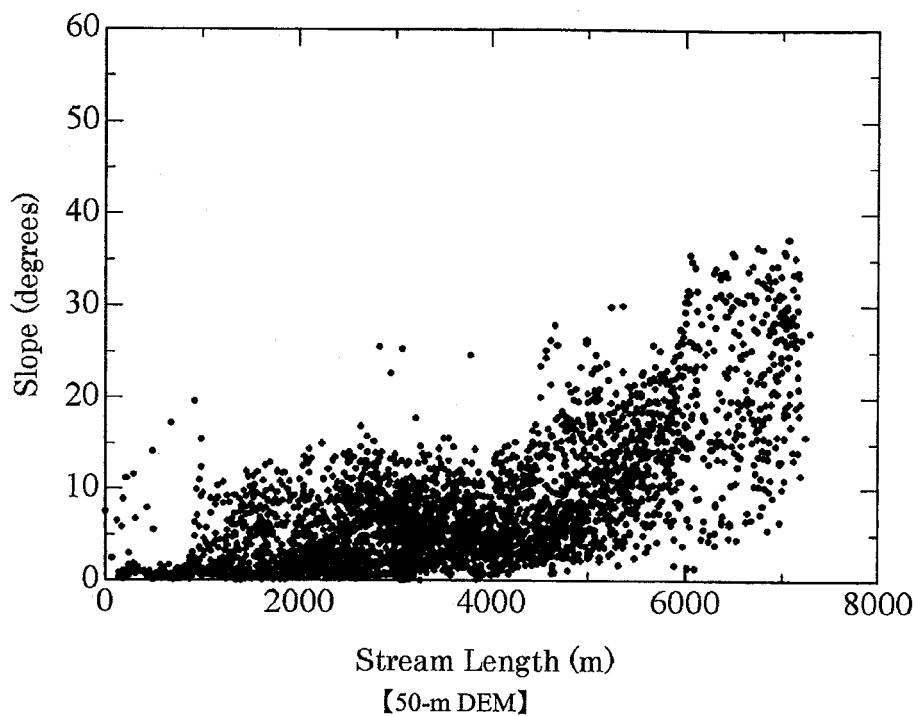


図3-3 城山川流域における落水線の延長距離と傾斜との関係
(解像度の異なるDEMによる比較)

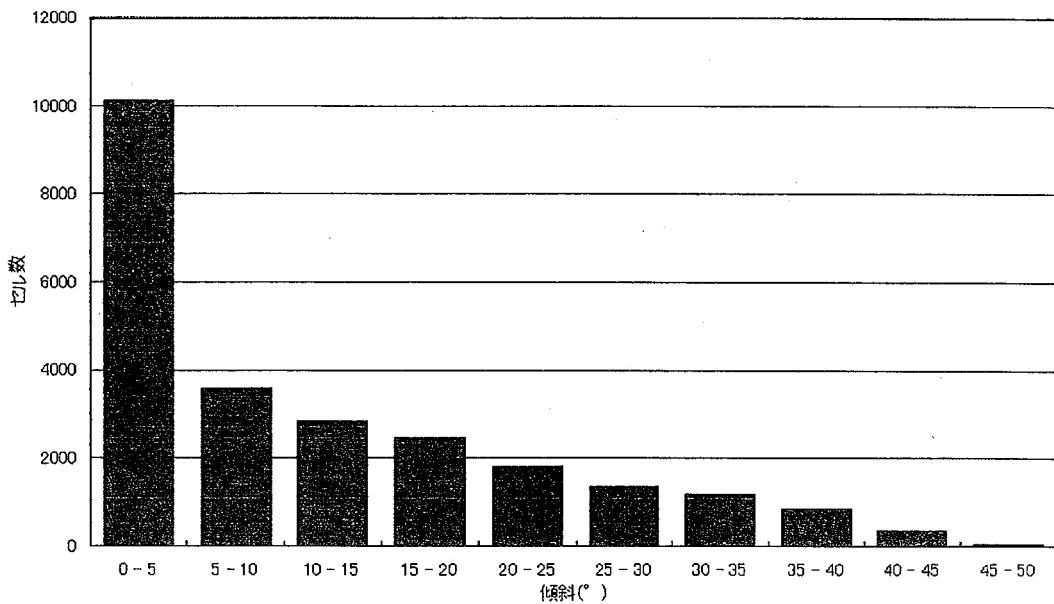


図3-4 城山川流域の傾斜ヒストグラム（1984年）

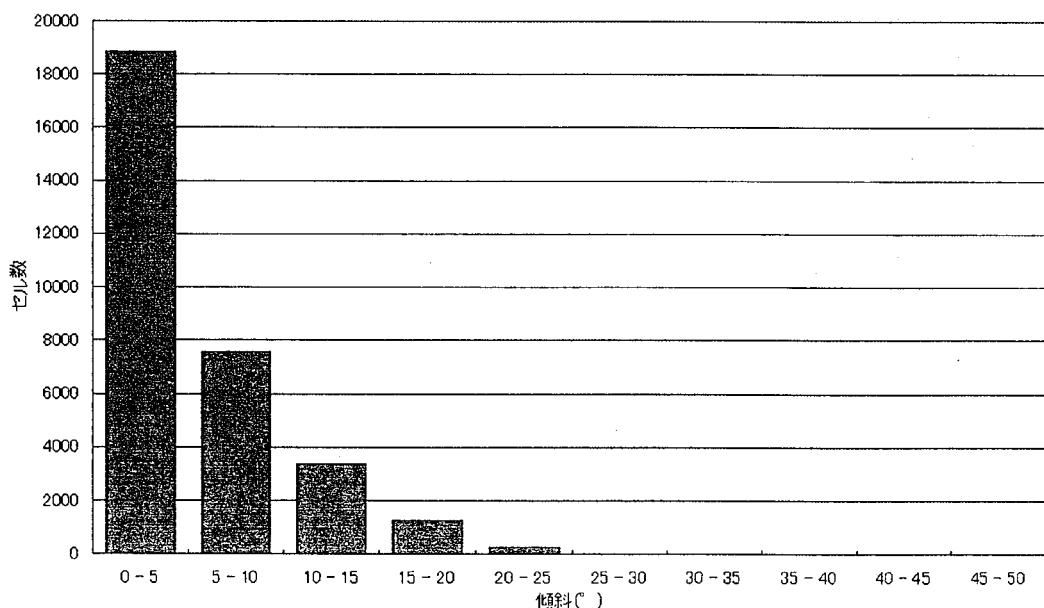


図3-5 乞田川流域の傾斜ヒストグラム（1984年）

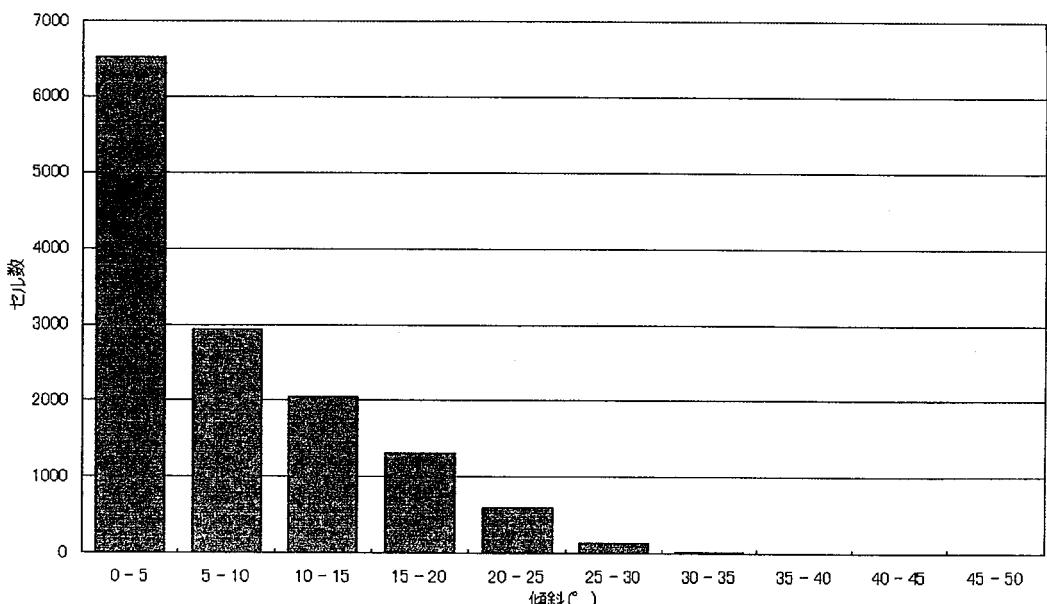
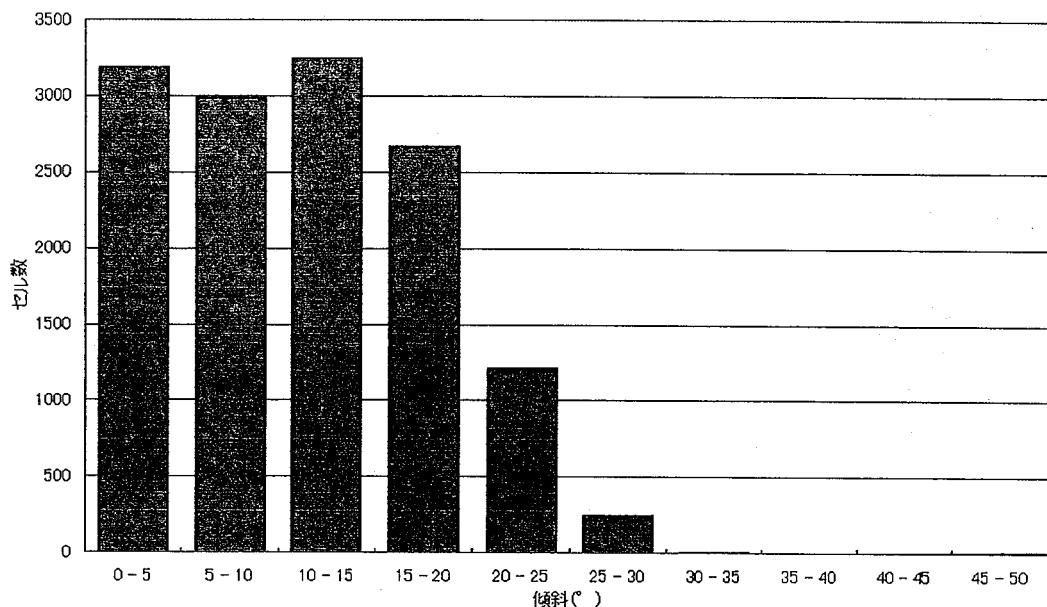


図3-6 兵衛川流域の傾斜ヒストグラム（上：1984年、下：1990年代末期）

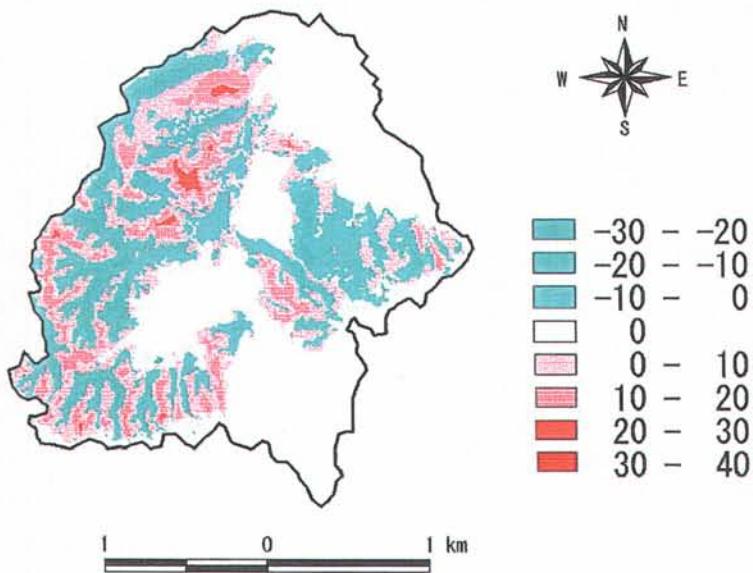


図3-7 兵衛川流域における地形改変による標高変化量（m）の分布

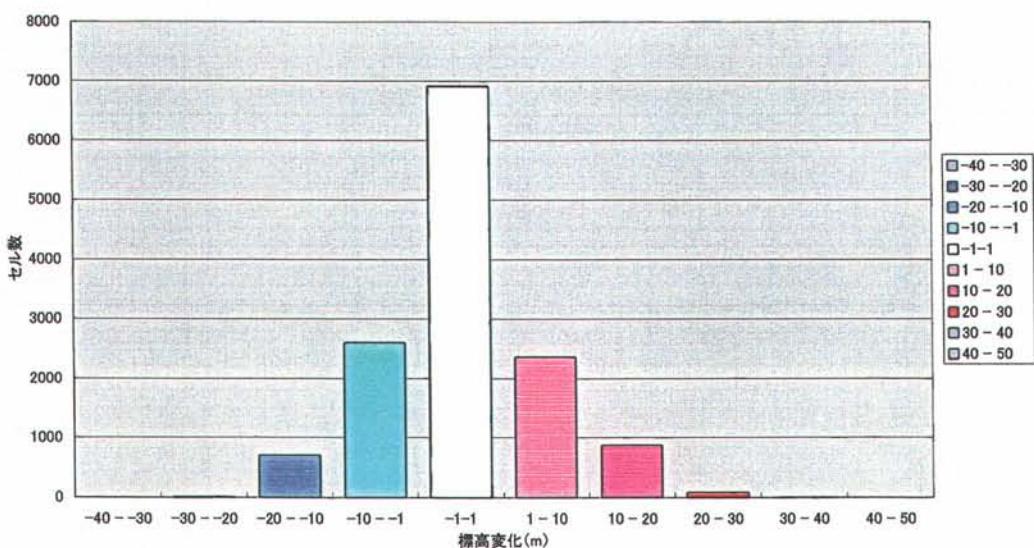


図3-8 兵衛川流域における地形改変にともなう標高変化量のヒストグラム

4. おわりに

今回作成された10-m DEMは、流域単位や落水線に沿った地形の表現が、通常入手可能な50-m DEMよりもはるかに優れており、流域における水や土砂の流出に関する検討に有用と判断される。また、2時期のDEMの利用は人工地形改変の量的な把握に有効なことが示された。

文献

- Brasington, J., Richards, K., 1998. Interactions between model predictions, parameters and DTM scales for Topmodel. *Computers & Geosciences*, 24, 299-314.
- Garbrecht, J., Martz, L., 1994. Grid size dependency of parameters extracted from digital elevation models. *Computers & Geosciences*, 20, 85-87.

第4章

高解像度DEMの解析に基づく多摩地域の人工地形改変の数量的特徴

高橋昭子・小口 高

1. はじめに

日本の大都市近郊の丘陵地では地形の人工改変が活発である。特に1960年代以降の高度成長期には、都市に急激に集中する人口を収容するためのニュータウンの建設にともない、地形が広範囲にわたって改変された場所が多い。多摩丘陵における地形改変は、日本の大都市近郊地域の中でも最も大規模であった。このような地形改変の特徴を地形学的に論じた研究が行われており、それらは改変のタイプの分類を主とする定性的研究（田村ほか、1983など）と、改変にともなう地形変化の定量的研究（山田、2001など）に大別される。後者の研究は客観的な情報を提供している点でより重要と考えられるが、既存の研究では、手動の地形計測もしくは解像度の低いDEMが使用されており、高解像DEMを用いた詳細な検討はほとんど行われていない。

そこで本章では、今回作成された多摩丘陵の高解像度DEM（第1章）を用いて、1984年以降の人工地形改変の特徴を詳細に把握する。

2. 解析範囲の設定と地形変化量の把握

筆者らがデジタル等高線データと空中写真測量を用いて整備した多摩地域の10-m DEM（第1章）の作成範囲から、1984年～1990年代末期に人工改変により地形が変化した場所を抽出した（図4-1）。これらの場所はパッチ状に分布しているので、位置と総面積とを考慮してA、B、Cの3地域に統合し、各地域に属するデータを解析した（図4-1）。DEMのセルの数はA地域が12,331、B地域が35,908、C地域が41,516であり、説得力が高い分析を行うために十分なサンプル数といえる。

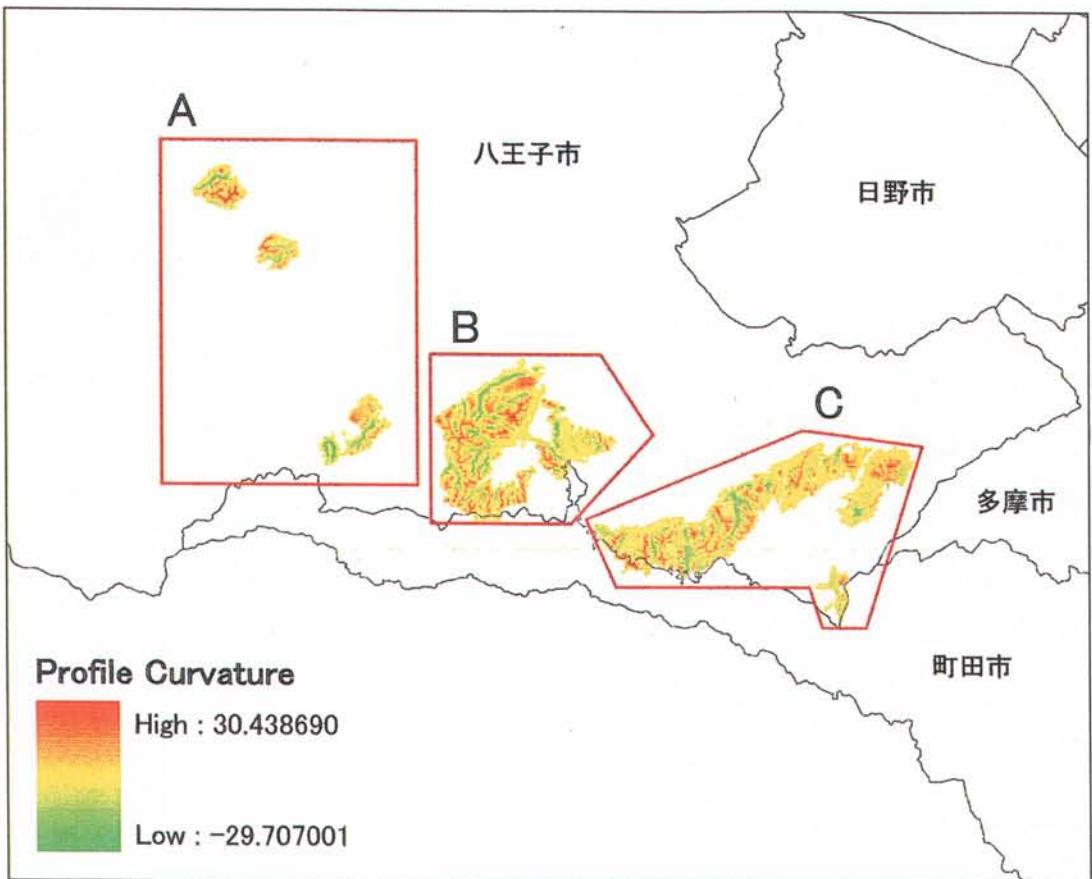


図4-1 調査地域

着色部分が1984年～1990年代末期に人工地形改変が行われた地域。

1984年の縦断曲率の値に応じて色を変えてある（赤が谷部、緑が尾根部）。

A, B, Cの地域ごとに解析を行った。

各地域における人工改変に起因する地形変化量を、DEMの各セルにおける1984年と1990年代末期の標高値の差を用いて評価した。表4-1は標高差の統計値を示しており、図4-2～4-4は標高差のヒストグラムを示している。標高差のレンジと標準偏差は比較的大きく、人工改変により数～十数 mの標高の変化が頻繁に生じたことを示す。標高差の平均値がゼロに近く、ヒストグラムの形状がほぼ左右対称であることは、尾根の掘削により生じた土砂を、すぐ近くの谷の埋積に使うという改変手法を反映すると思われる。ただしB地域とC地域では、標高差の平均値が約+0.5 mであり、歪度も正の値をとるので、最終的な埋積量は掘削量よりもやや小さいと判断される。これは、第3章に示した兵衛川流域における埋積量と掘削量との大小関係と調和的である。埋積量と掘削量が一致しない理由として、改変時に広域に露出した裸地で発生した侵食により、一部の土砂が下流に流失したことがあげられる。実際、多摩丘陵の地形改変時には多量の土砂が河川に流出したと指摘されており（Kinoshita and Yamazaki, 1974），その影響は河川の懸濁物質濃度の時系列変化からも推定できる（第14章）。

表4-1 各地域の人工地形改変を受けたセルにおける1984年と1990年代末期との
標高差の統計値

標高差(m)の統計値	地域		
	A	B	C
セルの数	12331	35908	41516
平均	-0.0293	0.5981	0.4436
標準誤差	0.0822	0.0416	0.0336
中央値（メジアン）	-0.0390	0.0098	0.0293
最頻値（モード）	-0.0878	0.0195	-0.0878
標準偏差	9.1333	7.8909	6.8439
分散	83.4178	62.2667577	46.8384
尖度	0.5289	0.3671	0.9836
歪度	0.0014	0.2607	0.1557
範囲(レンジ)	59.4140	53.1604	55.6579
最小値	-29.7070	-22.7217	-26.2143
最大値	29.7070	30.4387	29.4436

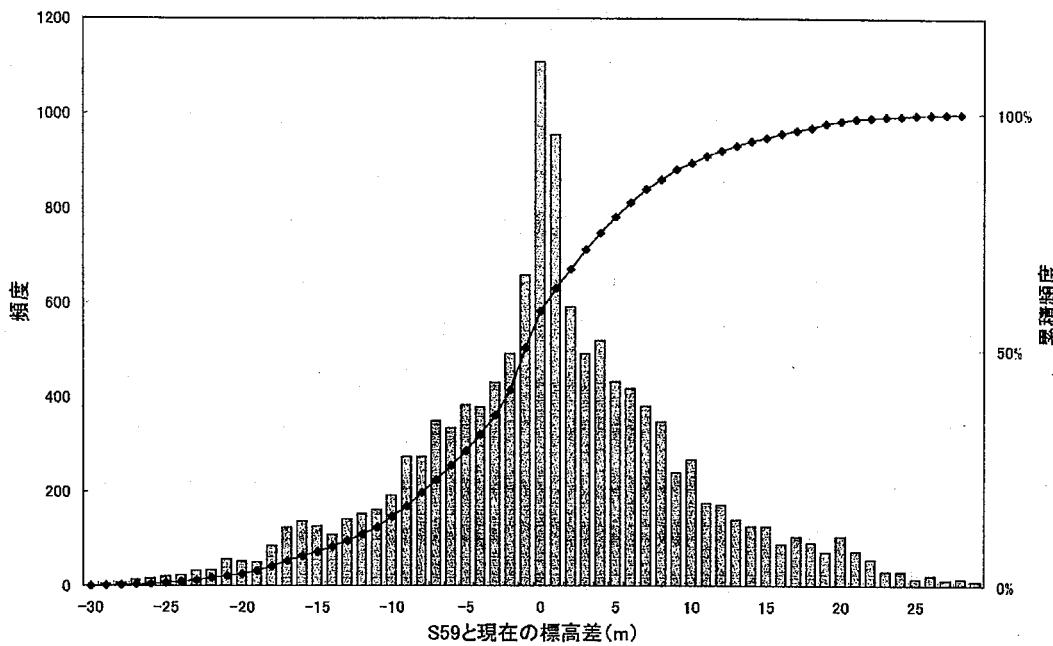


図4-2 地域AにおけるS59と現在の標高差のヒストグラムと累積頻度曲線

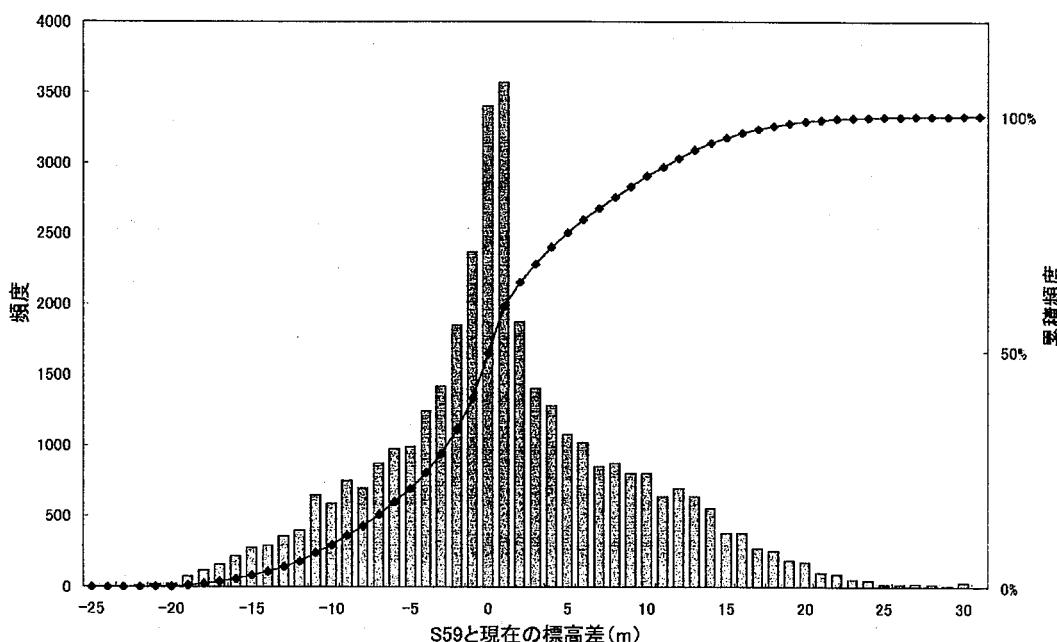


図4-3 地域BにおけるS59と現在の標高差のヒストグラムと累積頻度曲線

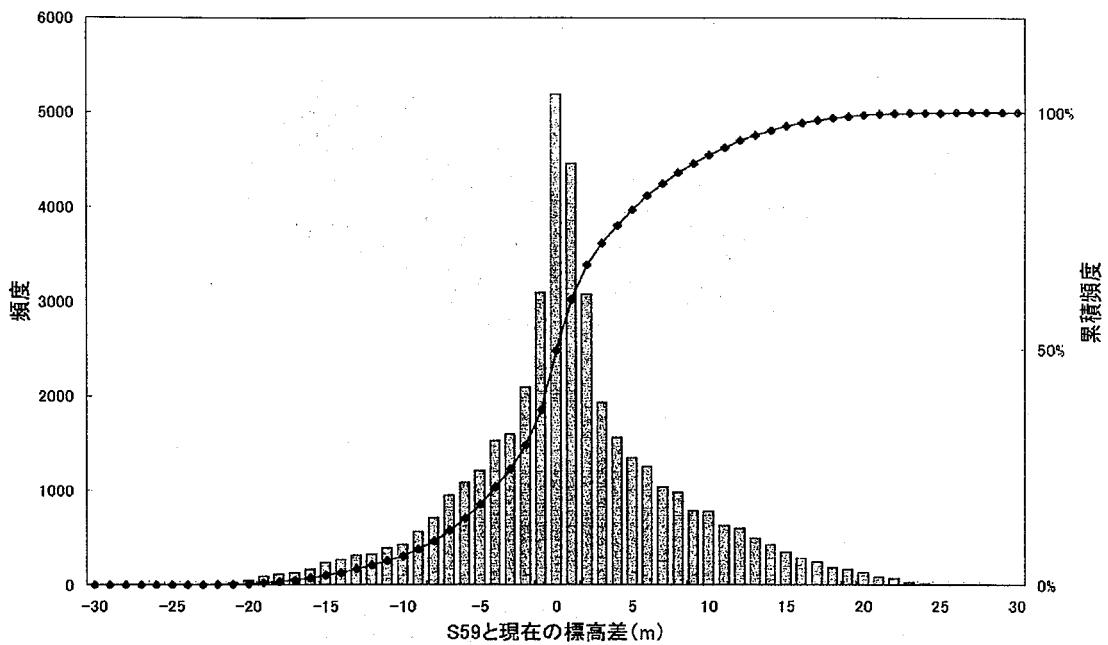


図4-4 地域CにおけるS59と現在の標高差のヒストグラムと累積頻度曲線

3. 標高・傾斜・縦断曲率と地形変化量との関係

次に、人工地形改変の特徴と改変前の地形との関係を数量的に検討するために、DEMから求めた1984年の標高・傾斜・縦断曲率と地形変化量との関係を調べた。図4-5は、3地域における標高と地形変化量との関係を示している。いずれの地域においても、左下がりの直線群が多数認められ、直線の傾きは約1である。これは、高所を削って得られた土砂で低所を埋めて平坦地を作る際に、土砂の移動が隣接した狭い範囲内で行われた場合が多く、その範囲ごとに図4-5の各直線が現れたと解釈できる。また、ほぼ $Y=0$ の軸に沿ってデータが集まる傾向も認められる。この理由は、写真測量によって1984年のDEMを取得した範囲の中に、実際には地形改変がほとんど行われていない地点がモザイク状に含まれており、そこでは1984年のDEMと現在のDEMとの間に、誤差に相当する微少な差があるためと考えられる。

傾斜と地形変化量との関係(図4-6)をみると、傾斜 $0\sim 15^\circ$ の範囲では、地形変化量が $\pm 30\text{ m}$ の範囲に広く散在しており、傾斜が 15° 以下の場所では、比較的自由に改変ができたことを示している。ただし、傾斜が非常に小さい領域では、地形変化量の絶対値がやや小さくなる傾向もみられる(特にC地域)。これは、既に平坦な場所では、大規模な地形改変を避ける傾向があ

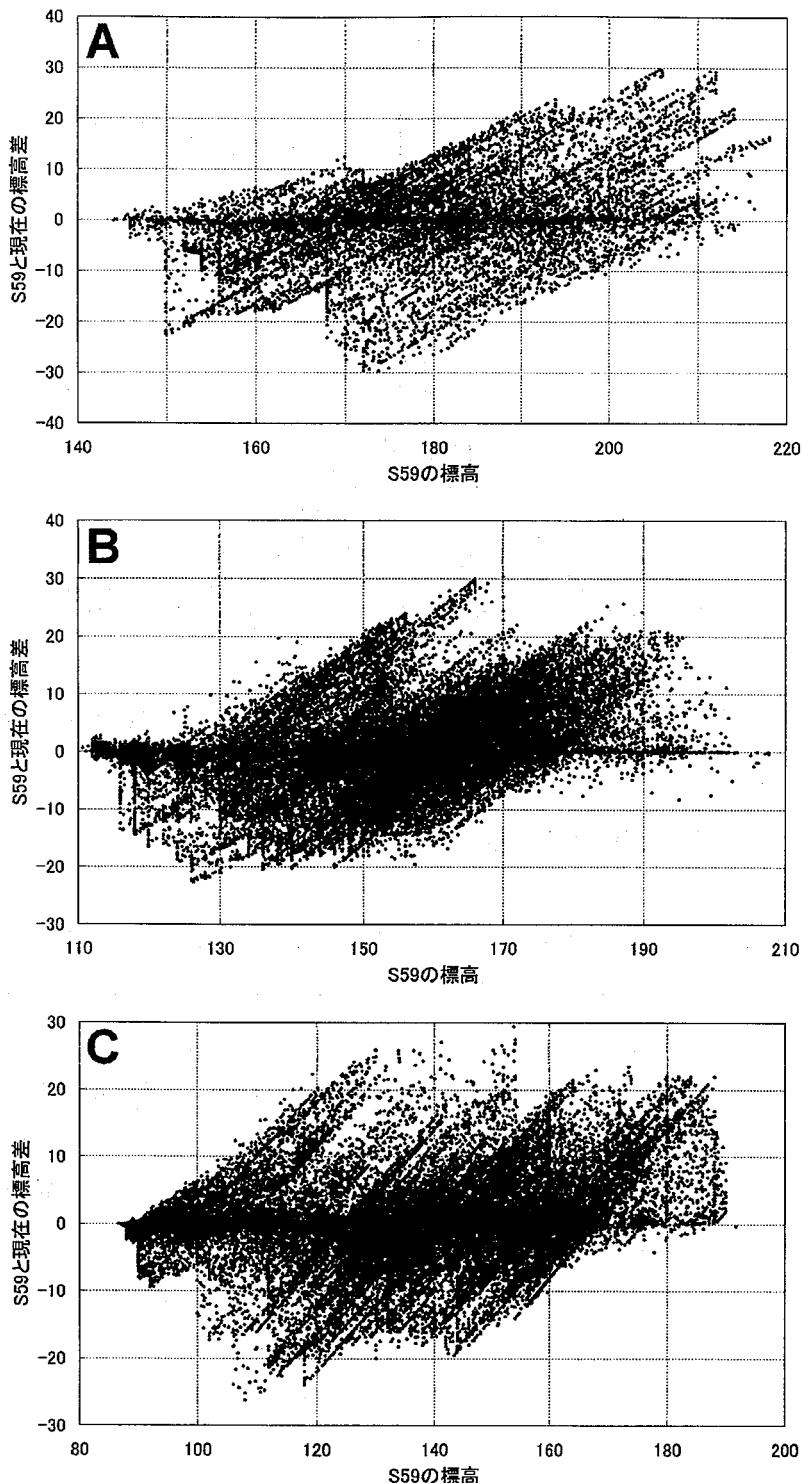


図4-5 S59の標高（m）とS59～現在の標高差（m）との関係

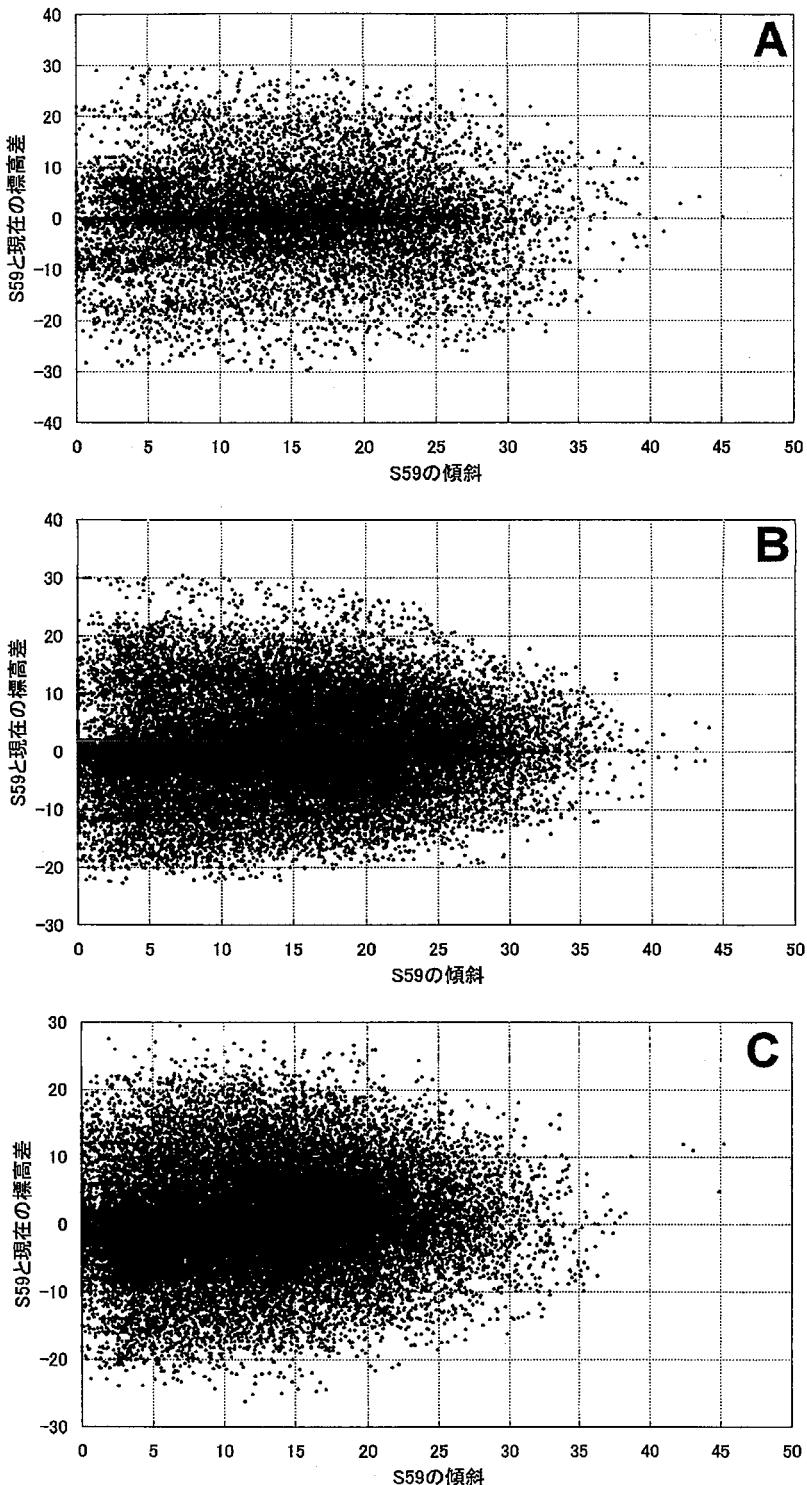


図4-6 S59の傾斜（°）とS59～現在の標高差（m）との関係

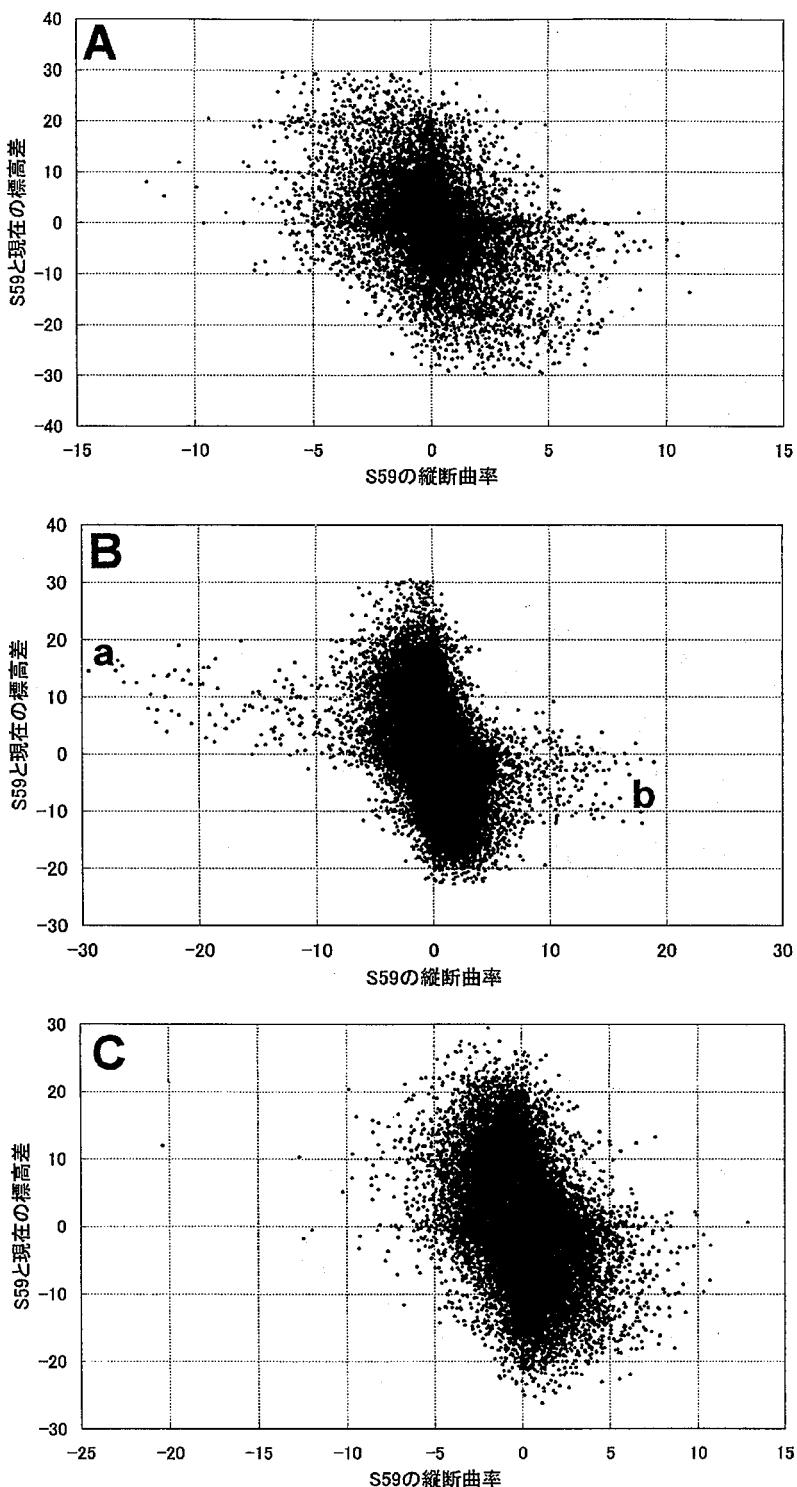


図4-7 S59の縦断曲率 (1/100 m) とS59～現在の標高差 (m) との関係



図4-8 地形断面の位置（図4-9～4-11）

黄緑色とピンク色のセルは、それぞれが図4-7Bのa, bのデータ群に対応し、縦断曲率の絶対値が例外的に大きい。断面1と2は、そのようなセルを含むが、断面3は例外的なセルを含まない。

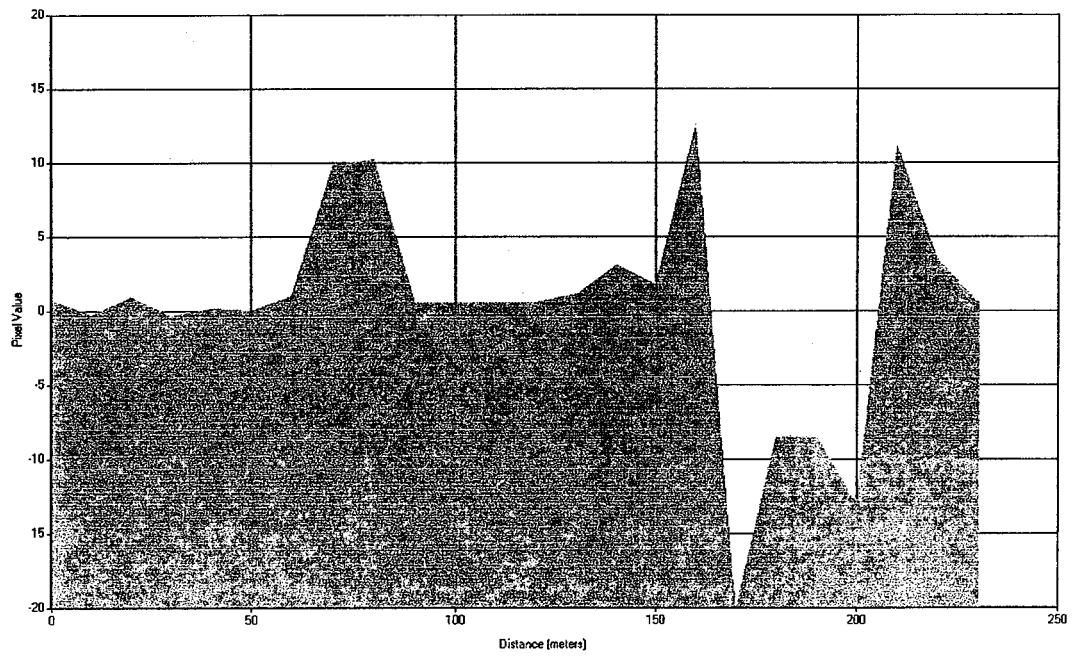
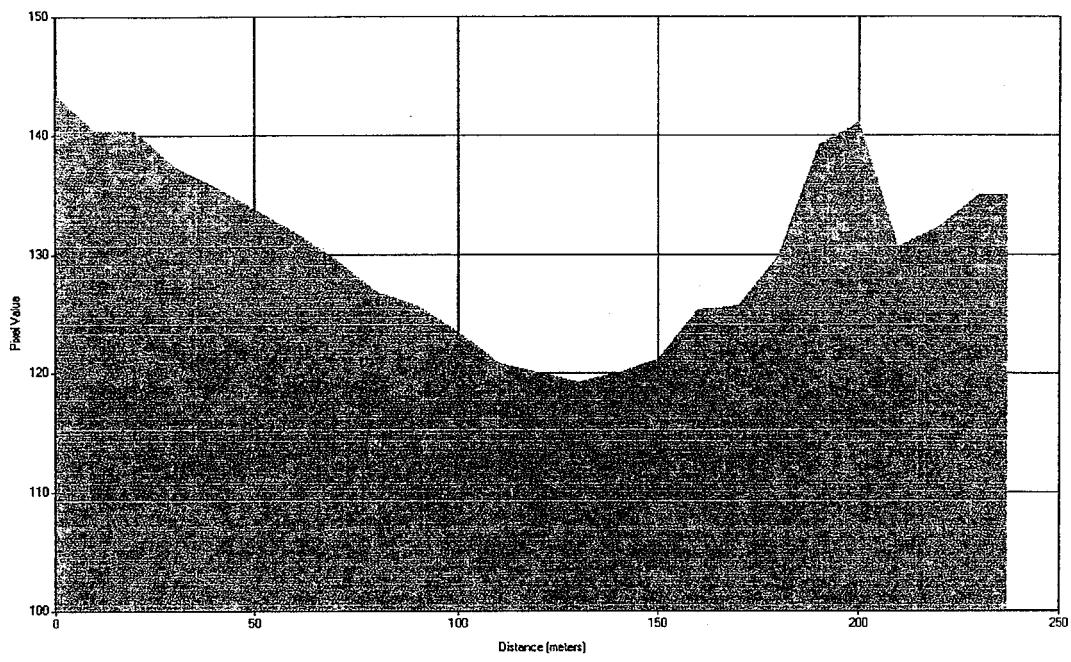


図4-9 断面1に沿う地形（上）と縦断曲率（下）
地形が急変するために曲率の絶対値が大きい場所がみられる。

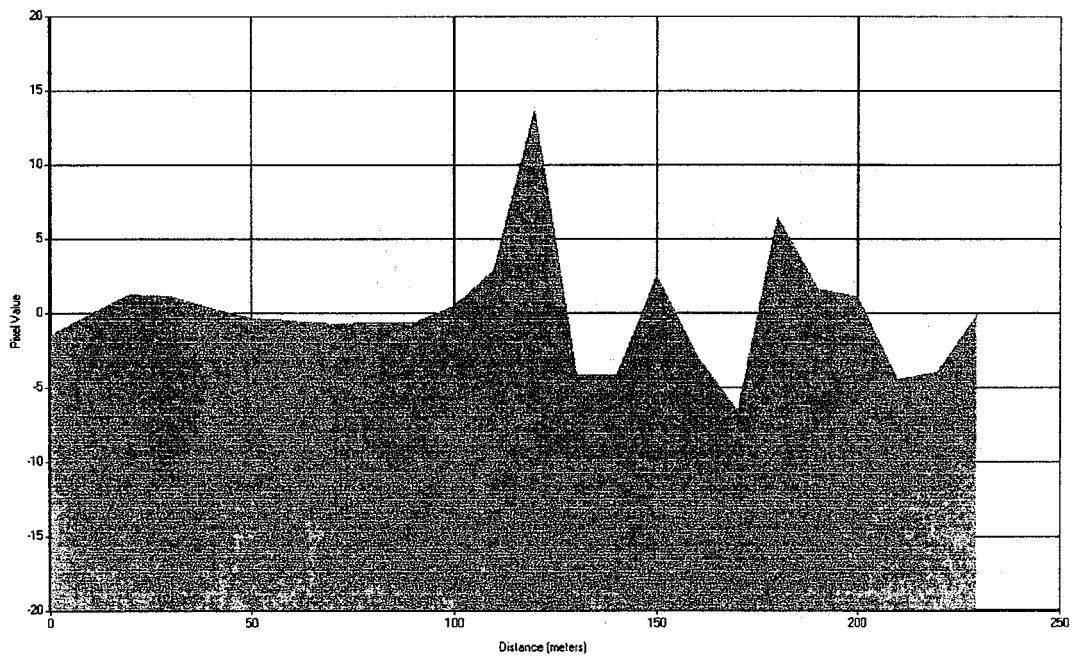
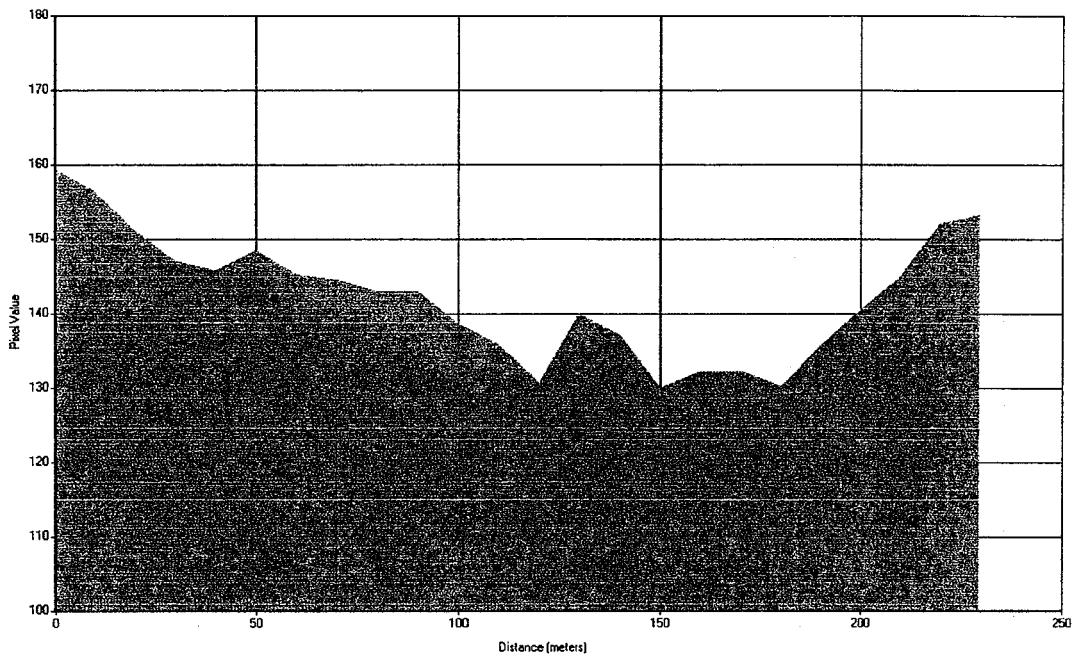


図4-10 断面2に沿う地形（上）と縦断曲率（下）

地形が急変するため曲率の絶対値が大きい場所がみられる。

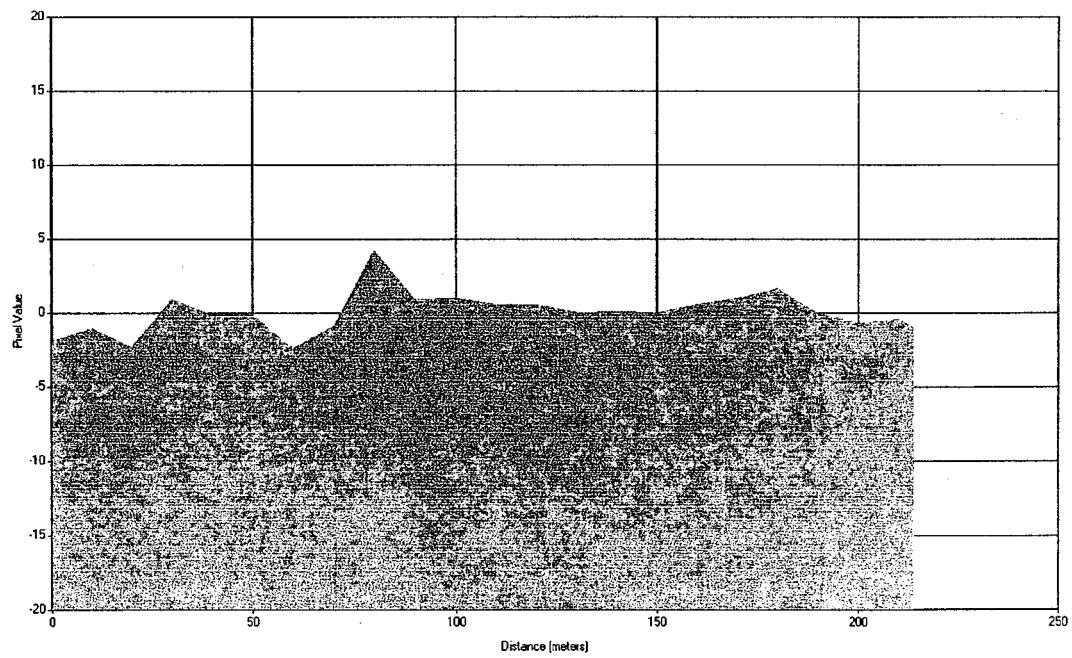
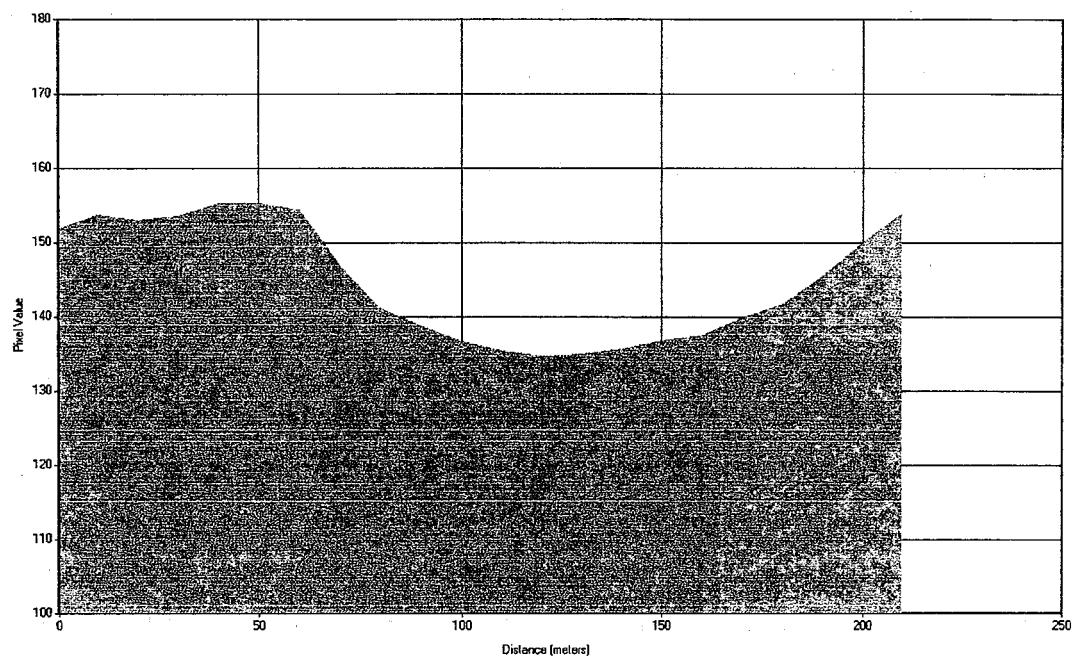


図4-11 断面3に沿う地形（上）と縦断曲率（下）

地形が滑らかに変化するため、いずれの場所でも曲率がゼロに近い。

ったことを示す。一方、傾斜が 15° を超えると、傾斜の増加とともに地形変化量の絶対値が小さくなる傾向がみられる。これは、急傾斜地では地形改変の自由度が低下し、改変が小規模になったことを示す。

縦断曲率と地形変化量との間には負の相関が認められる（図4-7）。これは、縦断曲率が負で凸型の縦断形を持つ場所の多くが尾根に相当し、地形改変時に削られる傾向にあるのに対し、縦断曲率が正で凹型の縦断形を持つ場所の多くが谷に相当し、改変時に埋められる傾向にあることに対応する。

縦断曲率の値はほとんどが $\pm 5/100\text{ m}$ の範囲にあるが、領域Bではこの範囲を大きく逸脱するデータがみられる。これらのデータは、縦断曲率と地形変化量との関係においても異なった傾向を示し、負の相関を示すデータ群の右下への傾きが、他のデータよりも顕著に小さい（図4-7Bのa-b）。図4-8～4-11に示されるように、これらのデータが発生している場所（断面1および2の一部）では、比高は小さいが波長が非常に短い尾根と谷が分布しており、縦断曲率の絶対値が大きくなっている。このような場所を人工的に平坦化しても、地形の比高が小さいために標高の変化量は小さい。以上から、B地域の一部には元の地形の特徴が他とは大きく異なる場所が存在したために、縦断曲率と地形変化量との関係が例外的になったと判断される。

4. おわりに

本章では、多摩丘陵における人工地形改変にともなう標高の変化量と地形特性との関係を、10-m DEMから得た多量のデータを用いて検討した。その結果、人工地形改変の一般的な特性を定量化できた。今回は、改変が行われた場所を大きく3地域に区分した検討を行ったが、今後は、データ量が豊富な利点を活用し、より地域を細分した検討を行うことが望まれる。実際、図4-5にみられる多数の直線的な関係は、詳細な検討を行えば、地形改変時の局所的な土砂の移動過程を高い解像度で復元できることを示唆している。

文献

- 田村俊和, 山本 博, 吉岡慎一, 1983. 大規模地形改変の全国的把握. 地理学評論, 56, 223-242.
- 山田周二, 2001. 人工的に改変された山地・丘陵地の地形自然度評価. 地理学評論, 74A, 643-657.
- Kinoshita, T., Yamazaki, Y., 1974. Increase of sediment transport due to large-scale urbanization. In: Effects of Man on the Interface of the Hydrological Cycle with the Physical Environment, Proceedings of the Paris Symposium. IAHS Publ., 113, 127-129.

第5章

多様な補間法を用いた多摩地域における擬似高解像度DEMの作成

高橋昭子・小口 高・杉盛啓明

1. はじめに

第2章と第3章での検討により、多摩地域の地形解析には水平解像度が高いDEMの利用が望ましく、これは日本の他の丘陵地や低山にも当てはまる可能性が高いことが指摘された。しかし、現在の日本で入手が容易なDEMの中で最も解像度が高いものは、国土地理院の数値地図50 mメッシュ（標高）である。より高解像度のDEMを得るために空中写真やリモートセンシングのデータを用いたステレオ測量の実施や、高価な特別のデータセットの購入を要する。そこで本章では、解像度50 mのDEMから擬似的な10-m DEMを作成する手法の検討を行う。

離散的な空間データに数学的な仮定を適用し、より連続的なデータを作成する作業は補間(interpolation)と呼ばれており(Lam, 1983; Myers, 1994など)、その機能は市販のGISソフトウェアにもしばしば搭載されている。したがって、50-m DEMの解像度を補間によって高めることは困難ではない。また、補間によってDEMの解像度を高めると、元のDEMよりも現実の地形との対応が向上する場合がある(小口・勝部, 1999, 2000; 戎ほか, 2002)。しかし、補間は仮定に基づく作業であるため、作成されたDEMが実際の地形をどの程度正確に再現しているかを確認する必要がある。また、既に多様な補間の手法(補間法)が提案されているが(Isaaks and Srivastava, 1989; Keckler, 1995; 飯倉, 2001など)、通常のGISソフトウェアで利用可能な手法は限られているため、手法の妥当性を吟味せずに補間を行っている事例も多い。そこで今回は、前記の5領域の50-m DEMに多様な補間法を適用して擬似的な10-m DEMを作成し、得られたDEMを本来の10-m DEMと比較した。その結果に基づき、DEMの補間に適する手法を判定した。

2. 適用した補間法

各領域の10-m DEMを間引いて作成した50-m DEMに、10タイプの補間法を適用して10-m

DEMを作成した。適用対象としたDEMは、第2章における解像度と地形量との関係の検討と同様に、A, B, C, E領域の現在のDEMと、C, D, E領域の1984年のDEMである。10タイプの補間法の特徴をKeckler (1995)などを参考に簡単に記述する。

- 1) 三次畳み込み内挿法 (cubic convolution) : 内挿点周囲の16点の値に三次の畳み込み積分関数を適用し、近似値を算出する (Richards, 1993 ; 日本リモートセンシング研究会, 1997).
- 2) 逆距離加重法 (inverse distance to a power / inverse distance weighting) : 近傍の点データの値に距離の累乗に反比例した重み付けを行って近似値を算出する (Davis, 1986).
- 3) クリギング (kriging) : 多様な対象に利用されてきた補間法であり、距離の差に応じて生じる属性値の変化の平均的程度を表すバリオグラム (variogram) を利用して近似値を算出する (Cressie, 1990 ; 貞広, 2001).
- 4) 最小曲率法 (minimum curvature) : 張力を持つ多重調和関数を用いた補間によって、小さな曲面を滑らかに連ねた面を生成して値を近似する (Smith and Wessel, 1990).
- 5) 自然近隣内挿法 (natural neighbor) : 元のデータを用いてティーセン・ポリゴンを作成し、各ポリゴンの面積に応じた重みを元のデータに与えて近似値を算出する (Sibson, 1981).
- 6) 最近隣法 (nearest neighbor) : 最も近い位置にあるデータの値をそのまま用いる.
- 7) 多項式回帰法 (polynomial regression) : 多項式で表される曲面（傾向面）をデータ全体に適合して近似値を算出する (Draper and Smith, 1998).
- 8) 動径基底関数法 (radial basis functions) : 薄板スプライン関数や二次関数などの基底関数を用いて近傍の点に対して重みづけを行い、近似値を算出する (Carlson and Foley, 1992).
- 9) 修正シェパード法 (modified Shepard's method) : 逆距離加重法の重み付けを決める際に、単純距離ではなく最小二乗法に基づく統計的な距離を適用して近似値を算出する (Franke and Nielson, 1980).
- 10) 三角形網法 (triangulation with linear interpolation) : 元の点を頂点とする三角形網を作成し、各三角形を平面とみなして近似値を算出する (Lee and Schachter, 1980).

上記の10タイプの一部については、小口・勝部 (1999, 2000) に準じ、利用する関数や定数が異なる複数のモデルを用いることにした。その結果、今回適用した補間法の種類は表5-1に示した27種類となった。用いた補間法には、元データの中の点と補間の目標となる点の位置が一致した場合に元の値が保持される厳密補間法 (exact interpolator) と、保持されない近似補間法 (smoothing interpolator) がある (表5-1)。前者はより厳密な補間法とみなせるが、後者がより自然なデータ分布を作り出す場合もある。

表5-1 適用した補間法の種類と特徴

コード	補間方法	オプション	近似の有無
c	三次畳み込み内挿法		近似
i1	逆距離加重法	べき数 = 1	厳密
i2		べき数 = 2	厳密
i3		べき数 = 3	厳密
k1	クリギング	バリオグラム = exponential, no nugget effect	厳密
k2		バリオグラム = Gaussian, no nugget effect	厳密
k3		バリオグラム = hole effect, no nugget effect	厳密
k4		バリオグラム = linear, no nugget effect	厳密
k5		バリオグラム = quadratic, no nugget effect	厳密
k6		バリオグラム = rational quadratic, no nugget effect	厳密
k7		バリオグラム = spherical, no nugget effect	厳密
m	最小曲率法		近似
na	自然近隣内挿法		厳密
ne	最近隣法		厳密
p1	多項式回帰法	関数 = simple planar	近似
p2		関数 = bi-linear saddle	近似
p3		関数 = quadratic	近似
r1a	動径基底関数法	関数 = multilog; R^2 = original grid interval	近似
r1b		関数 = multilog; R^2 = half of original grid interval	近似
r2a		関数 = multiquadric; R^2 = original grid interval	近似
r2b		関数 = multiquadric; R^2 = half of original grid interval	近似
r3a		関数 = thin plate spline; R^2 = original grid interval	近似
r3b		関数 = thin plate spline; R^2 = half of original grid interval	近似
s1	修正シェパード法	平滑化パラメータ = 0	厳密
s2		平滑化パラメータ = 1	近似
s3		平滑化パラメータ = 2	近似
t	三角形網法		厳密

R^2 は平滑化のパラメータ (Keckler, 1995) である。

3. 補間法の適合度

50-m DEMに表5-1の補間法を適用して得られた10-m DEMに対し、前記の移動窓を用いた方法を適用して傾斜と縦断曲率を計算した。次に、補間で得られた10-m DEMに基づく標高、傾斜、縦断曲率の値と、元の10-m DEMに基づく値とを比較し、補間による推定の二乗平均誤差（RMSE）と平均誤差（バイアス）を求めた。推定の良さを判定する基本的な指標は二乗平均誤差であるが、平均誤差も小さいことが望ましいため、両者を算出した。次に、各領域・各年次について、27種類の補間法の中から二乗平均誤差もしくは平均誤差の絶対値が小さい上位5位の補間法を特定した。表5-2と表5-3は、特定された1位～5位の補間法の順位と、二乗平均誤差と平均誤差の値（括弧内）を示している。

表5-2によると、A、B領域の縦断曲率を除き、薄板スプライン関数を用いた動径基底関数法（r3a, r3b）の二乗平均誤差が最も小さく、最小曲率法（m）がこれに続く。次に誤差が小さい手法は、標高に関しては平滑化を行わない修正シェパード法（s1）であり、一次関数を用いたクリギング（k4）がそれに続く場合が多い。傾斜に関して最小曲率法（m）の次に誤差が小さい手法は、三次たたみ込み内挿法（c）と平滑化を行わない修正シェパード法（s1）の場合が多いが、A、B領域では三次たたみ込み内挿法（c）の適合度が劣り、一次関数を用いたクリギング（k4）の適合度が相対的に高い。

縦断曲率については、二次曲面を用いる動径基底関数法（r2a, r2b）の適合度が最小曲率法（m）に次いで高い場合が多い。ただし、A、B領域ではr2aの適合度が全補間法の中で最良になっており、多項式回帰法のうち平面による回帰（p1）も4～5番目の適合度を持っている。しかし、平面による回帰を行えば曲率はどこでもゼロになるはずであり、10-m DEMから求めた縦断曲率の平均値が、A、B領域では他の領域に比べてゼロから離れていることとは矛盾する（第2章、図2-4）。このことは、補間によって作成されたDEMの曲率の表現力が概して低いことを示唆する。すなわち、補間で作成されたDEMから計算した曲率が現実からかけ離れた値になるケースが頻発したために、全ての曲率をゼロと仮定する平面による回帰が、相対的に高い適合度を持つようになったと判断される。

平均誤差の絶対値が小さい補間法は、二乗平均誤差が小さい補間法よりも多様性に富むが、三次たたみ込み内挿法（c）、薄板スプライン関数を用いた動径基底関数法（r3a, r3b）、平滑化を行わない修正シェパード法（s1）、および最小曲率法（m）が概して良い結果を示した（表5-3）。また、標高については平滑化を伴う修正シェパード法（s2, s3）も平均誤差が小さい場合が多く、丘陵地（C～E領域）の傾斜については最近隣法（ne）の平均誤差が小さい。また、縦断曲率で

表5-2 二乗平均誤差に基づいて判定した各領域・各時期における
適合度が高い補間法の上位5位

コード	標高 (m)						傾斜 (°)						絶断曲率 (1/100 m)								
	A	B	C	C (84)	D (84)	E	E (84)	A	B	C	C (84)	D (84)	E	E (84)	A	B	C	C (84)	D (84)	E	E (84)
c								4	3	4			4								
								(5.703)	(6.893)	(6.210)			(5.211)								
i1																					
i2																					
i3																					
k1			5					5													
			(2.996)					(7.892)													
k2																					
k3																					
k4	5	5	5					5		4	5										
	(4.466)	(4.831)	(2.394)					(1.631)		(7.892)	(8.836)										
k5				5					5												
				(2.706)					(2.052)												
k6																					
k7																					
m	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	(4.064)	(4.244)	(2.219)	(2.819)	(2.531)	(1.544)	(1.923)	(7.350)	(8.011)	(5.662)	(6.954)	(6.018)	(4.279)	(5.082)							
na																5					
																(4.476)					
ne																					
p1															5	4					
															(1.972)	(2.179)					
p2															2						
															(2.176)						
p3																					
r1a																					
r1b																					
r2a															1	1	4	4	4	4	4
															(1.942)	(2.166)	(1.613)	(1.916)	(1.813)	(1.315)	(1.459)
r2b															4	5	5	5	5	5	
															(1.970)		(1.618)	(1.922)	(1.818)	(1.316)	(1.462)
r3a	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	5	1	1	1	1
	(3.607)	(3.889)	(2.168)	(2.771)	(2.432)	(1.506)	(1.875)	(6.912)	(7.661)	(5.429)	(6.638)	(5.770)	(4.155)	(4.914)	(1.963)	(2.185)	(1.593)	(1.882)	(1.791)	(1.303)	(1.444)
r3b	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2
	(3.640)	(3.919)	(2.170)	(2.767)	(2.438)	(1.508)	(1.879)	(6.961)	(7.717)	(5.482)	(6.715)	(5.833)	(4.197)	(4.964)	(1.953)	(2.177)	(1.593)	(1.883)	(1.792)	(1.305)	(1.445)
s1	4	4	4	4	4	4	4	4						5	5	5	4	5			
	(4.279)	(4.607)	(2.346)	(2.925)	(2.604)	(1.590)	(2.005)							(6.125)	(7.468)	(6.416)	(4.432)	(5.407)			
s2														4							
														(8.763)							
s3																					
T																					

括弧内の値は二乗平均誤差。

表5-3 平均誤差に基づいて判定した各領域・各時期における適合度が高い補間法の上位5位

コード	標高 (mm)								傾斜 (°)								縦断曲率 (1/100,000 m)									
	A	B	C	C (84)	D (84)	E	E (84)	A	B	C	C (84)	D (84)	E	E (84)	A	B	C	C (84)	D (84)	E	E (84)					
c	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2						
	(-33.44)	(-31.27)	(-20.81)	(-33.68)	(-1.65)	(-2.22)	(-1.15)	(-1.92)	(-0.89)	(-0.37)	(-0.71)	(17.47)	(10.53)													
i1	5		3																	3	1					
	(-11.65)		(51.70)																	(-54.12)	(4.16)					
i2			4																		1		3			
			(-52.50)																	(-2.86)		(-1.07)				
i3																					4	2				
																				(-8.18)	(0.76)					
k1																										
k2																										
k3																										
k4	1		4																							
	(-24.32)	(11.48)																								
k5																										
k6																				1		1	1			
																				(-0.14)		(-2.39)	(0.03)			
k7																										
m	2					4	4	5	5	5	5	5	5	4	4	4	2									
	(-39.52)					(-2.88)	(-3.70)	(-2.21)	(-3.34)	(-2.16)	(-1.07)	(-3.34)	(69.58)	(-103.95)	(-0.42)											
na																				2						
																				(1.12)						
ne								2	2	2	2	2	2	2	2	3										
								(-1.40)	(-2.20)	(-1.14)	(-0.59)	(-2.20)	(29.52)	(-67.73)												
p1																				2						
																				(3.30)						
p2																				5						
																				(4.53)						
p3			1																							
			(7.86)																							
r1a			5																	5						
			(-58.70)																	(-4.87)						
r1b																				1						
																				(-0.73)						
r2a																										
r2b	2																									
	(27.30)																									
r3a	5	5	1							5	4	2	2	3	3	3	3	5	4	4	3	4				
	(-20.06)	(-75.84)	(-3.57)						(-48.24)	(-51.20)	(-2.45)	(-3.17)	(-1.72)	(-2.56)	(-1.65)	(-0.79)	(-2.56)	(81.91)	(-118.82)	(-1.18)	(4.36)	(-5.32)	(-2.30)			
r3b	4	4	2							5	3	3	4	4	4	4	4			3						
	(-19.66)	(-73.11)	(-3.66)						(-51.69)	(-2.67)	(-3.39)	(-1.91)	(-2.85)	(-1.88)	(-0.92)	(-2.85)				(-0.66)			(-5.11)	(-3.02)		
s1	3		3	5					3	2	5	5							5	3						
	(-10.86)		(5.04)	(-43.40)					(-42.66)	(-44.81)	(-3.19)	(-4.09)							(-1.21)	(3.80)						
s2	1			4						2	3									4						
	(0.21)			(-39.70)					(-42.50)	(-50.78)										(3.70)						
s3	2			3						4										3						
	(-3.85)			(-38.46)					(-45.60)										(3.19)							
T																				5						
																				(-8.62)						

括弧内の値は平均誤差、標高と縦断曲率の値の単位は、それぞれmmと1/100,000 mであり、

表5-2とは異なる点に注意。

は逆距離加重法 (i1, i2, i3) と二次の項を持つ有理関数を用いたクリギング (k6) が比較的良い結果を示す。ただし、三次畳み込み内挿法 (c), 平滑化を伴う修正シェパード法 (s2, s3), 最近隣法 (ne), および逆距離加重法 (i1, i2, i3) は、二乗平均誤差からみた適合度が低い場合が多いので（表5-2），適切な補間法とは言い難い。

以上の結果から、多摩地域において50-m DEMから10-m DEMを作成する際に最適な手法は、薄板スプライン関数を用いた動径基底関数法 (r3a, r3b) であり、次に適する手法は最小曲率法 (m) と平滑化を行わない修正シェパード法 (s1) と判断される。これらの手法のうち、厳密補間法はs1のみである。したがって、厳密補間法が必要な場合には、s1を用いるのが良いといえる。

従来のGIS関係の文献では、優れた補間法としてクリギングが頻繁に取り上げられている（Oliver and Webster, 1990；Burrough and McDonnell, 1998；間瀬・武田, 2001など）。しかし、今回の事例ではクリギングが特に優位という結果は得られなかった。とりわけ、一次関数もしくは指數関数以外のバリオグラムを仮定した場合には良い結果が得られなかった。図5-1は、A領域の10-m DEMと、その標高値を間引いて作成した50-m DEMについて、実際のデータに基づくバリオグラムを描いたものである。バリオグラムは直線的であり、クリギングの中では一次関数を用いた際に適合度が良くなることと調和的である。また、10-m DEMと50-m DEMのバリオグラムはほとんど同一であるので、50-m DEMを用いてバリオグラムを推定しても妥当な結果が得られるといえる。したがって、クリギングを用いてDEMの解像度を高める際には、補間を適用するDEMのバリオグラムを最初に作成し、それに即した関数を用いるべきである。なお、逆距離加重法と三角形網法は、原理が単純なこともありGISでしばしば利用されているが、今回のDEMの補間における有効性は低かった。

C領域とE領域については人工地形改変の前後のDEMを用いて解析を行ったが、二乗平均誤差に基づいて判定した有効な補間法の順位はほぼ不变であった（表5-2）。平均誤差についても、傾斜を評価に用いた際には順位は同一であった（表5-3）。一方、標高と曲率を評価に用いると、人工地形改変の有無に応じて平均誤差の順位がかなり変わるが、平均誤差の値自体が非常に小さいので（表5-3、数値の単位に注意）、順位の変化が有意かは不明である。以上から、人工地形改変によって傾斜が顕著に減少したものの、DEMの補間法の優劣には大きな影響を与えたと判断される。

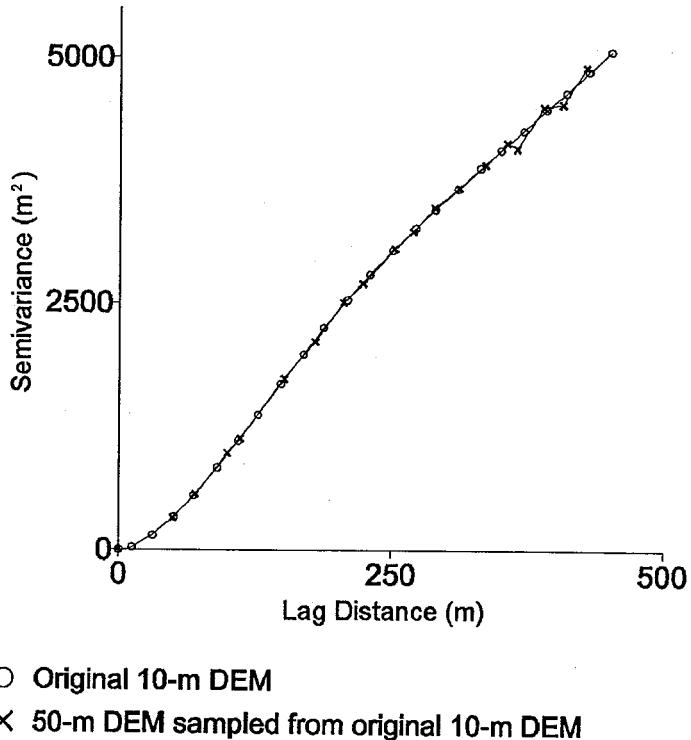


図5-1 A領域における元の10-m DEMとそれを間引いて作成した50-m DEMのバリオグラム

4. 補間法の有効性

表5-2と表5-3に示した誤差の値は、補間法の有効性の指標とみなされる。最良の補間法と判断されたr3aとr3bを用いた際の標高の二乗平均誤差（表5-2）は、丘陵地（C～E領域）では1.5～2.8 m、山地（A、B領域）では3.6～4.0 mである。各領域の平均標高（第2章、表2-1）からみて、これらの誤差は通常の地形表現の際には無視可能であり、補間で作成されたDEMが有効といえる。また、r3aとr3bを適用した際の傾斜の二乗平均誤差は、丘陵地では4.1～6.7度、山地では6.9～7.7度である。丘陵地の平均傾斜は10度前後であるので、上記の誤差はかなり大きいといえる。一方、山地の平均傾斜は約35度であるので、誤差は相対的に小さいといえる。

傾斜の平均誤差は全ての場合で負であり（表5-3）、補間で作成されたDEMでは実際よりも地形が緩く表現されている。これは、DEMを間引いた際に失われた急斜面の分布に関する情報を、補間法では十分には復元できないことを示す。ただし、表5-3に示された傾斜の平均誤差の値は、元の10-m DEMから計算した傾斜の平均値と50-m DEMから計算した傾斜の平均値の差よりも

小さい。たとえば、山地（A, B領域）では後者は10度前後にも達するが（第2章、図2-4）、最良の補間法の平均誤差は2.5～3.2度である。また、丘陵地では後者は約3～7度であるが（第2章、図2-4）、最良の補間法の平均誤差はその半分程度である。このことは、小口・勝部（1999, 2000）が指摘したように、適切な補間法を利用することにより、50-m DEMの傾斜の表現力がある程度は改善できることを示す。したがって、丘陵地の傾斜解析に際して高解像度DEMを入手できなかった場合には、補間法を適用してDEMの解像度を擬似的に高めることが望ましい。ただし、前記のように真に有効な補間法の種類は限られるため、使用する補間法の選択を慎重に行うべきである。これを行わないと、データを二次化するデメリットの方が強くなる可能性がある。

上記のように、補間で得られたDEMでは傾斜が緩く表現される傾向が普遍的に認められるため、傾斜の微分である曲率の表現力はかなり低いと予想される。これは、平面回帰の適合度が相対的に高い事例の存在に基づく前記の判断と一致する。したがって、曲率が重視される研究を行う際には、最初から解像度が高いDEMを入手すべきであろう。ただし、DEMから算出される曲率に関する既存研究は、標高値や傾斜に関する研究に比べると少ないため、今回の縦断曲率に関する検討結果を他の事例と比較して評価することはできなかった。この点は今後の検討課題としたい。

5. 結論

多摩地域の10-m DEMを間引いて作成した50-m DEMに多様な補間法を適用して10-m DEMを再現し、その誤差に基づいて各補間法の妥当性を評価した。結果は以下のとおりである。

- 1) 擬似的な高解像度DEMを作成するための補間法の妥当性を、標高、傾斜、縦断曲率の二乗平均誤差と平均誤差に基づいて評価した。その結果、薄板スプライン関数を用いた動径基底関数法、最小曲率法、平滑化を行わない修正シェパード法が最良と判定された。また、実際のバリオグラムに対応した適切な関数を用いた場合には、クリギング法も比較的良好な結果を与えた。
- 2) 補間にによって得られたDEMから算出した傾斜の平均誤差は、適合度が高い手法を用いた場合でも常に負であり、地形表現が本来のDEMよりも緩やかなことを示す。しかし、補間を行う前の50-m DEMの地形表現はさらに緩やかであるため、補間によって傾斜の表現が改善されたといえる。

- 3) 補間で得られたDEMが持つ縦断曲率の表現力はかなり限定されている。したがって、曲率を重視した研究を行う際には、補間によってDEMの解像度を高めるのではなく、最初から高解像度のDEMを取得するべきである。
- 4) 丘陵地の一部は大規模な人工地形改変を受けているが、有効な補間法は改変の有無によらずほぼ同一であった。

文献

- 飯倉善和, 2001. 数値標高モデルの投影変換に用いる内挿法の評価. 日本リモートセンシング学会誌, 21, 150-157.
- 戎 信宏, 古川智広, 丸谷知己, 2002. GISによる再配列した数値標高データを用いた河道次数解析に関する検討. GIS—理論と応用, 10-2, 1-8.
- 小口 高, 勝部圭一, 1999. 5 mメッシュDEMによる丘陵地の地形解析の新展開. 愛知県企画部：近未来社会対応型情報通信産業振興事業 近未来型社会に対応する地域環境システムの構築, 平成10年度成果報告書, 2-2, 1-33.
- 小口 高, 勝部圭一, 2000. 細密DEMを用いた地形解析. 杉盛啓明, 青木賢人, 鈴木康弘, 小口 高編「デジタル観測手法を統合した里山のGIS解析」中日新聞社, 19-26.
- 貞広幸雄, 2001. 空間統計. 野上道男, 岡部篤行, 貞広幸雄, 隈本 崇, 西川 治「地理情報学入門」東京大学出版会, 73-80.
- 日本リモートセンシング研究会, 1997. 「リモートセンシングハンドブック」宇宙開発事業団.
- 間瀬 茂, 武田 純, 2001. 「空間データモデリング—空間統計学の応用—」共立出版.
- Burrough, P., McDonnell, R.A., 1998. Principles of geographical information systems. Oxford University Press, New York.
- Carlson, R.E., Foley, T.A., 1992. Interpolation of track data with radial basis methods. Computers & Mathematics with Applications, 24, 27-34.
- Cressie, N., 1990. The origins of kriging. Mathematical Geology, 22, 239-252.
- Davis, J.C., 1986. Statistics and data analysis in geology. John Wiley and Sons, New York.
- Draper, N., Smith, H., 1998. Applied regression analysis, 3rd ed. John Wiley and Sons, New York.
- Franke, R., Nielson, G., 1980. Smooth interpolation of large sets of scattered data. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 15, 1691-1704.

- Isaaks, E.H., Srivastava, R.M., 1989. An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press, New York.
- Keckler, D., 1995. SURFER for Windows user's guide. Golden Software Inc., Golden.
- Lam N.S., 1983. Spatial interpolation methods: a review. *The American Cartographer*, 10, 129-149.
- Lee, D.T., Schachter, B.J., 1980. Two algorithms for constructing a Delunay triangulation. *International Journal of Computer and Information Sciences*, 9, 219-242.
- Myers, D.E., 1994. Spatial interpolation: an overview. *Geoderma*, 62, 17-28.
- Oliver, M.A., Webster, R., 1990. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Systems*, 4, 313-332.
- Richards, J.A., 1993. Remote sensing digital image analysis (2nd ed.): an introduction. Springer-Verlag, Berlin.
- Sibson, R., 1981. A brief description of natural neighbor interpolation. V. Barnett ed. *Interpreting multivariate data*. John Wiley and Sons, New York, 21-36.
- Smith, W.H.F., Wessel, P., 1990. Gridding with continuous curvature splines in tension. *Geophysics*, 55, 293-305.

第Ⅱ部

多摩地域の水文環境・土地利用の 変化と流出解析

第6章

既存データの編集と現地観測に基づく水文データの整備

杉盛啓明・木村圭司・勝部圭一・谷川晋一

1. 目的

本研究の一つの目的は、多摩川流域の丘陵地における地形変化を伴う都市化が、降雨時の河川水の流出に与える影響を明らかにすることである。そのためには、対象地域における地形（DEM）、土地利用、降水量、流量（あるいは水位）が基本データとして必要である。このうち、DEMについては1984年と1990年代末期の高解像度データを新たに整備した（第1章）。また、土地利用に関しては、細密数値情報の10 mメッシュデータが1974年以降、5年おきに整備されている。一方、流量（水位）については、東京都がテレメータによる雨量・水位観測網の整備に着手したのが1978年度であり、現在のような広域的な観測システムが本格的に整備されたのが1984年であった。そこで、1980年代前半および1990年代の2時期を選定し、それぞれの時期について水文観測データ（降水量、流量）を整備することにした。

2. 方法

東京都から入手した水位データのうち、1990年代のデータはデジタル化されていたが、1980年代前半のデータは紙媒体のみであったため、デジタル化のための再入力を行った。

水位データを流出のモデリングに用いる際には、水位流量曲線（H-Q）により水位を流量に換算する必要がある。そのため、現地で水位・流量観測を行うとともに、東京都からも洪水時の水位・流量観測データを入手し（表6-1）、両者を用いて水位流量曲線を求めた。

現地での水位・流量観測は2000年11月15日、11月20日、11月23日、11月27日の4日間に実施した。流量の算出の際には新井（1994）による簡易法を採用した。流下方向に直交する測線上で、50 cmごとに測点を設けて水深を計測し（図6-1）、台形近似を用いて流水の断面積を算出するとともに、測深点1つおきに水深約60%の位置で流速を計測し、流水断面積と流

速の積から流量を求めた。流速は（株）ケネック製のプロペラ式流速計（本体部：VR-101，検出部：VRT-200-20；図6-2）を用いて1つの測点で5回計測し（図6-3），最大値と最小値を除いた3つの値の平均値をその地点の流速とした。

表 6-1 東京都より入手した洪水時の水位流量観測データ

河川	観測日	最大水位(m)	最大流量(m^3/s)
乞田川	S57.8.22	0.87	20.2
乞田川	S57.10.1	0.33	3.7
乞田川	S57.10.22	1.95	97.6
兵衛川	S58.8.16	0.51	7.9
城山川	S58.8.17	0.68	*
城山川	S58.9.28	0.40	*

* 城山川の2回の観測については、オリジナルの流量観測値が入手できなかったため、水位変動区間（最低水位～最大水位）の0.1 mごとの流量を、各観測でのH-Q式から推定した。

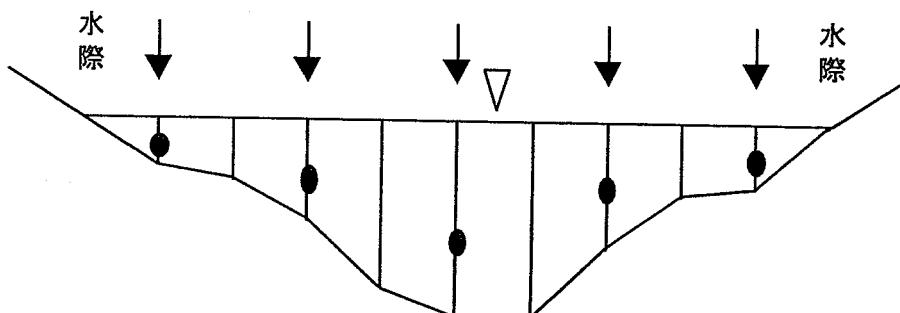


図6-1 現地における水位・流量観測の方法

測線に沿って50 cm毎に水深を計測し、測深点1つおき（↓）に流速を計測した。

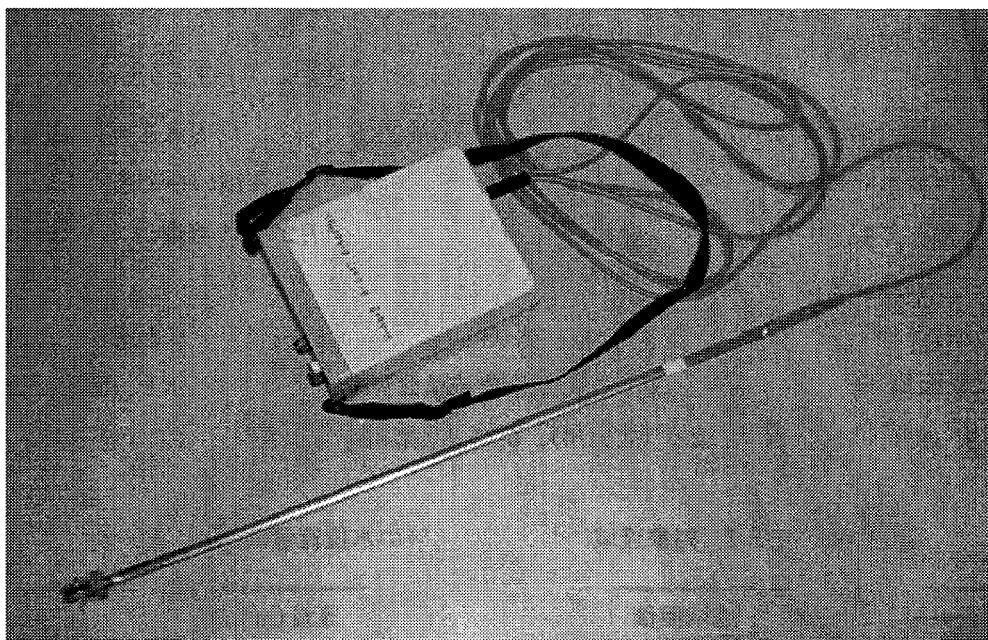


図6-2 流量観測に用いたプロペラ式流速計 ((株) ケネック製)

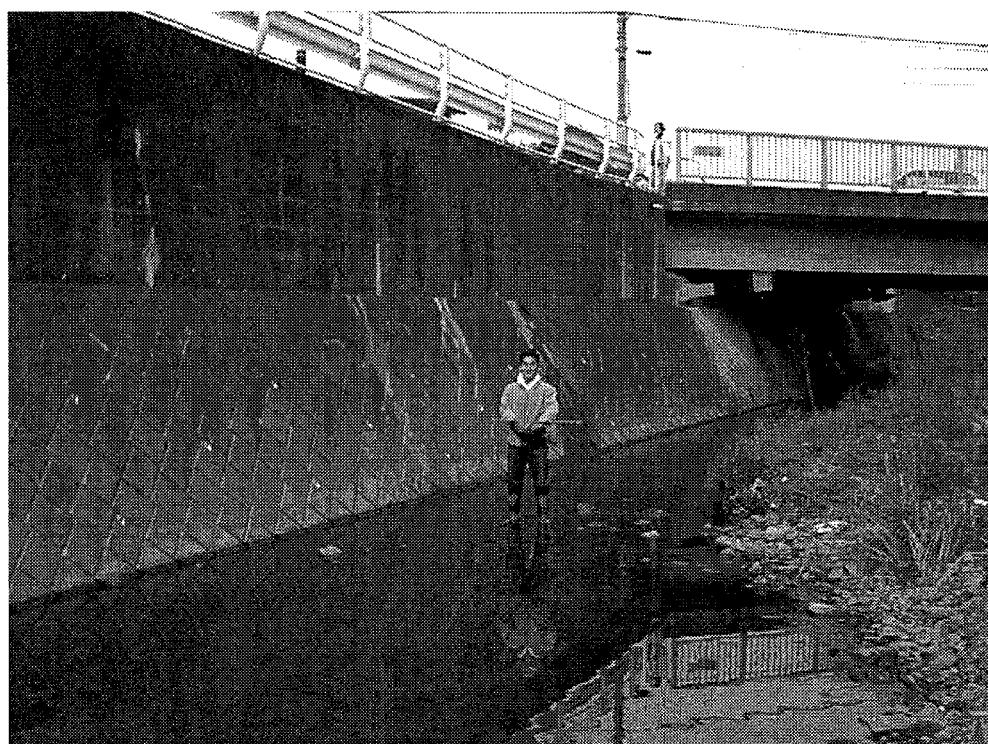


図6-3 現地観測状況

3. 結果

現地観測の結果を表6-2に示す。研究対象流域の中で流域面積が最も大きい乞田川は、流域面積が最も小さい兵衛川と低水流量がほぼ等しく、比流量が3流域の中で最小という傾向を示した。また、兵衛川と城山川では、雨天時に実施した11月20日の流量が、晴天時に実施した11月23日の流量の約3~4倍となった。

これらのデータと東京都から入手した洪水時の水位・流量観測データを用いて、原点を通る2次曲線 ($Y = CX^2$) で回帰して求めた水位流量曲線を図6-4~6-6に示す。回帰曲線の決定係数 (R^2) はそれぞれ、0.99 (乞田川), 0.83 (兵衛川), 0.97 (城山川) であった。

表 6-2 対象流域における低水時の水位流量観測結果

河川	観測地点	流域面積 (km ²)	流量(m ³ /s)			
			[11/15 晴]	[11/20 雨]	[11/23 晴]	[11/27 晴]
乞田川	車橋	12.5	0.110			0.180
兵衛川	兵衛橋	5.4		0.667	0.158	
城山川	三村橋	9.8		1.517	0.550	

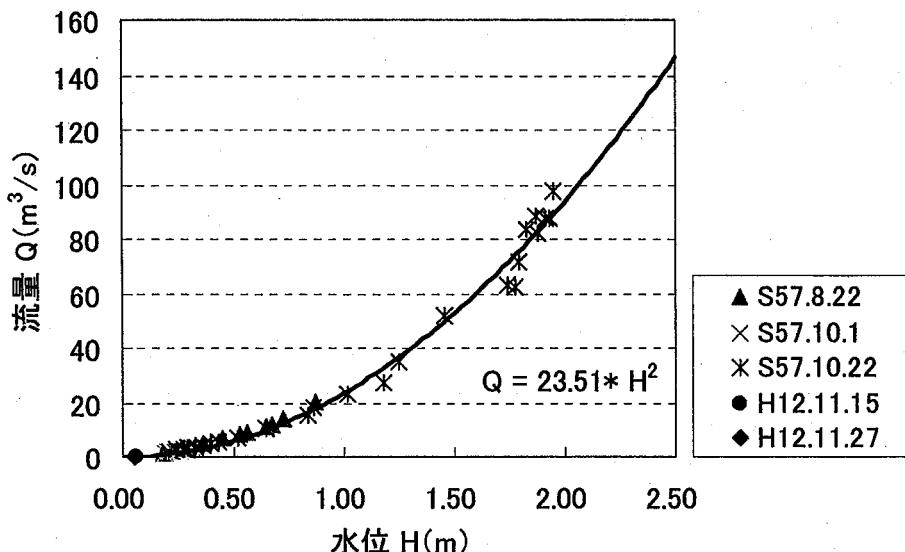


図 6-4 乞田川における水位流量曲線

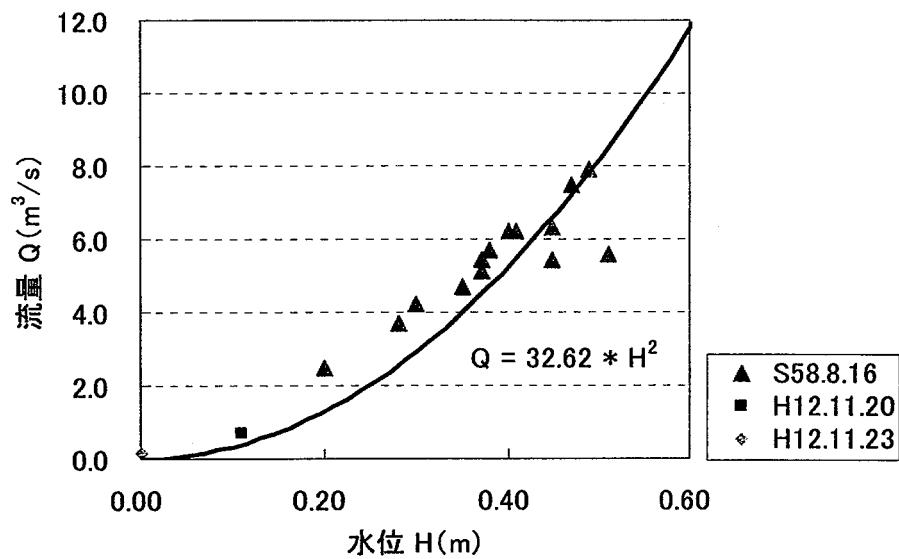


図 6-5 兵衛川における水位流量曲線

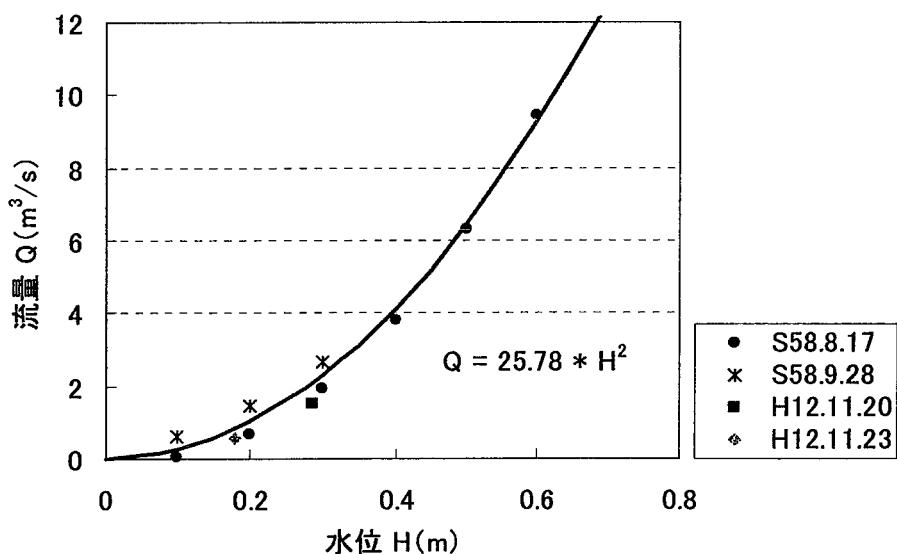


図 6-6 城山川における水位流量曲線

文献

新井 正, 1994. 「水環境調査の基礎」 古今書院.

第7章

多摩地域における土地利用変化の空間分布と変化量

伊藤史子

1. はじめに

本章では、多摩地域における複数年次の土地利用データをGISに入力し、土地利用変化の位置と量について検討することにより土地利用変化の構造を検討する。土地利用に関してはこれまでにも数多くの研究例があり、特定の時点における土地利用と要因との関係を論じたものには、用地地域指定を要因として取り上げたものが多い（吉川ほか、1990など）。また、近年の電子的データ整備の進行とともに、土地利用予測モデルの構築例も増えており、マルコフ連鎖型モデル（大佛・倍田、1995）、遺伝子アルゴリズム（滝澤ほか、1997）、ニューラルネットワークモデル（伊藤・村田、2000）などの新しいモデルが適用されている。これらの例では各種要因と土地利用の種類・変化との関係を、距離などの数値を基に集計的に分析したものが多く、変化点の位置分布を詳細に分析したものは少ない。

土地利用変化においては、変化点の位置分布そのものが重要な構造要因となっていると考えられ、分布の特徴を空間統計的手法により分析することが望まれる。本章ではその第一歩として、多摩地域の細密数値情報データをGISに入力し、10-mメッシュ単位で土地利用の年次毎変化を抽出して位置データを作成することにより、その変化点の量と位置分布を詳細に定性分析して特徴を抽出する。

2. 分析対象地域とデータの概要

本章で土地利用変移の分析対象とした地域は、東京都西部の多摩地域に位置する八王子市、日野市、多摩市、稲城市、町田市の5市である。

分析に使用する土地利用データは、国土地理院の「細密数値情報」10-mメッシュ基準土地利用データ（1984, 89, 94年）であり、市町村界データ及び鉄道路線データは、GISMAP

(北海道地図株式会社) のラインデータである。「細密数値情報」は、国土交通省の土地利用小分類16種(表7-1左欄)に基づき、当該年度の土地利用を分類表現したものである。国土交通省の土地利用分類法には、その他にも中分類(13種;表7-1中欄)と大分類(7種)がある。本研究では土地利用の用途別変化傾向をつかむことを目的とするため、小分類ではいささか分類が細かすぎる。そこで中分類を基本とし、そのうち「道路用地」「公園緑地等」「その他の公共公益施設」を一つにまとめ、「河川湖沼」と「海」も一つにまとめた。また、「造成中地」と「空地」については年度ごとに相互変化が多く、データ作成時に両者の分別が正確にできていない恐れがあるため、やはり一つにまとめた。従って本章では、「山林荒地」「農地」「造成中・空地」「工業用地」「住宅地」「商業業務地」「道路公共施設等」「河川湖沼海」「その他」の全9つの土地利用(表7-1右欄)に分類して分析を行っている。

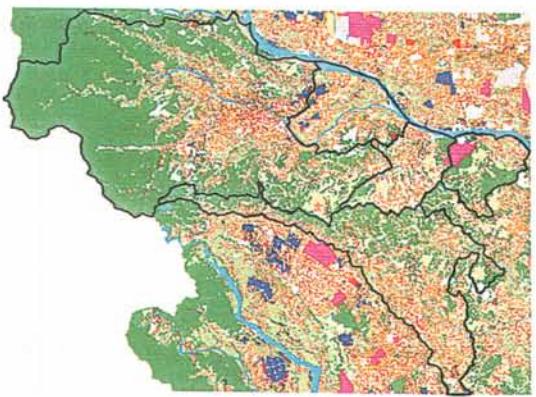
3. 土地利用変化の分析と考察

1) 3時点の土地利用分布

1984, 89, 94年の3時点における土地利用を、前節で述べた9分類に従って図7-1に示した。3時点を比較すると、「山林荒地」の減少、「造成中・空地」の位置的な拡大、および「住宅地」の若干の増加が読みとれる。それぞれの土地利用間での変化について、次節で量と位置を詳細に分析していくこととする。

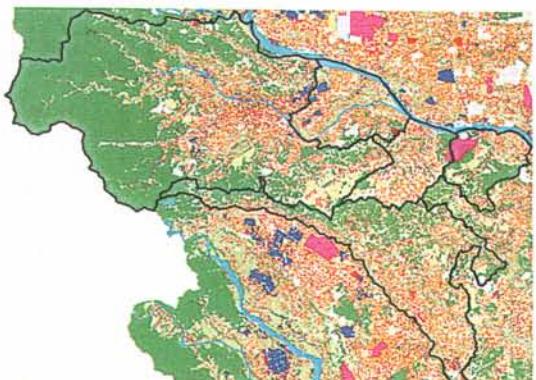
表7-1 本研究における土地利用分類

細密数値情報(国土交通省土地利用小分類)(16)	国土交通省土地利用中分類(13)	本研究における分類(9)
山林荒地	山林荒地	山林荒地
田	農地	農地
畑その他農地	農地	農地
造成中地	造成中地	造成中地
空地	空地	造成中空地
工業用地	工業用地	工業用地
一般低層住宅		
密集低層住宅		
中高層住宅	住宅地	住宅地
商業・業務地	商業・業務地	商業・業務地
道路用地	道路用地	
公園緑地等	公園緑地等	
その他公共公益施設	その他公共公益施設	道路公共施設等
河川湖沼等	河川湖沼等	
海	海	河川湖沼海
その他	その他	その他



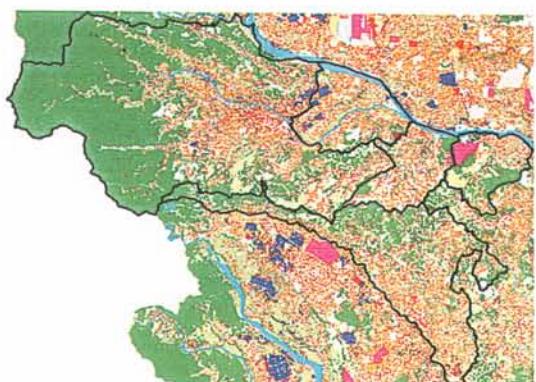
五市域.shp
1984年土地利用

- 山林荒地
- 農地
- 造成中・空地
- 工業用地
- 住宅用地
- 商業業務用地
- 公共公益施設用地
- 河川湖沼海
- その他



五市域.shp
1989年土地利用

- 山林荒地
- 農地
- 造成中・空地
- 工業用地
- 住宅用地
- 商業業務用地
- 公共公益施設用地
- 河川湖沼海
- その他



五市域.shp
1994年土地利用

- 山林荒地
- 農地
- 造成中・空地
- 工業用地
- 住宅用地
- 商業業務用地
- 公共公益施設用地
- 河川湖沼海
- その他



図7-1 1984, 89, 94年の土地利用現況

2) 土地利用変化の量

土地利用の変化量を調べるため、84年から89年（前期）、89年から94年（後期）について、各土地利用の保持・変化の面積を始期9用途＊末期9用途毎に計測した（表7-2）。2つの期間で共通にみられる特徴としては、「山林荒地→造成中・空地」の変化量が大きく（前期7.2 km²、後期4.9 km²；以下同様）、「農地→造成中・空地」の変化がその半量程度（3.2, 2.5）である。また「造成中・空地→住宅地」の変化量も大きく（3.8, 4.2）、「造成中・空地→道路公共施設等」の変化量も次いで大きい（3.7, 4.0）。

2つの期間における代表的な変化（変化量2 km²以上）を抽出して描いたのが図7-2である。両期間を通じて、「山林荒地／農地→造成中・空地→住宅地／道路公共施設等」という都市的土地区域への変化傾向が強いことが読みとれる。次に2期間の違いに注目する。「山林荒地／農地→造成地・空地」の変化は、後期に前期よりも約3割減少している。逆に、「造成中・空地→住宅地／道路公共施設等」の変化は、後期に前期よりも約1割増加している。「山林荒地／農地→住宅地」の変化量は両期間ともほぼ一定であるが、「道路公共施設」への変化量は前期に比べて後期に減少している。以上から、大規模開発による宅地造成が前期の84～89年にかけて多く行われ、それにともない造成用道路用地の開発が行われたことと、後期89年以降はさらに住宅地化およびその居住用インフラとして道路整備が進められたことがうかがわれる。

表7-2 2時点間の土地利用変化または保持の面積 (m²)

84年＼89年	山林・荒地	農地	造成中・空地	工業用地	住宅地	商業業務地	道路	公共	河川	湖沼	海	その他
山林・荒地	204361500	132600	7197000	71800	854800	159300	1787700	57700	18800			
農地	88600	78602300	3203900	188200	2031000	616300	1128900	62700			0	
造成中・空地	292900	521300	37191800	251500	3807800	928100	3741300	117300			0	
工業用地	5000	3200	484000	18177300	128400	182800	98400	3000			0	
住宅地	14300	28400	1195400	68800	119206800	281000	301500	20300			0	
商業業務地	5900	9600	289400	50100	183900	19322600	72400	4500			0	
道路公共公益	14600	34500	787000	35600	559900	240800	104909400	16000			1900	
河川湖沼海	800	3500	98600	3500	12400	3900	156000	22158500			3100	
その他	212100	0	229700	600	53500	34900	457700	0			10283300	

89年＼94年	山林・荒地	農地	造成中・空地	工業用地	住宅地	商業業務地	道路	公共	河川	湖沼	海	その他
山林・荒地	197638600	119200	4911700	65400	692100	160500	1326300	80300			1600	
農地	89900	72837900	2504400	199800	1975800	731900	940600	54900			200	
造成中・空地	609500	382800	39486400	317100	4196100	1554700	3988800	127900			3500	
工業用地	5400	10400	215800	18127200	115400	277300	94200	1700			0	
住宅地	13000	26400	809500	63700	125016500	443700	449800	15600			300	
商業業務地	19700	68700	249700	50100	159700	21105800	113700	2300			0	
道路公共公益	29100	55600	887100	55200	623700	416100	110566700	19500			300	
河川湖沼海	28500	1300	55300	11400	11700	3500	249200	22079100			0	
その他	0	0	412500	0	56200	527200	765200	200			8545800	

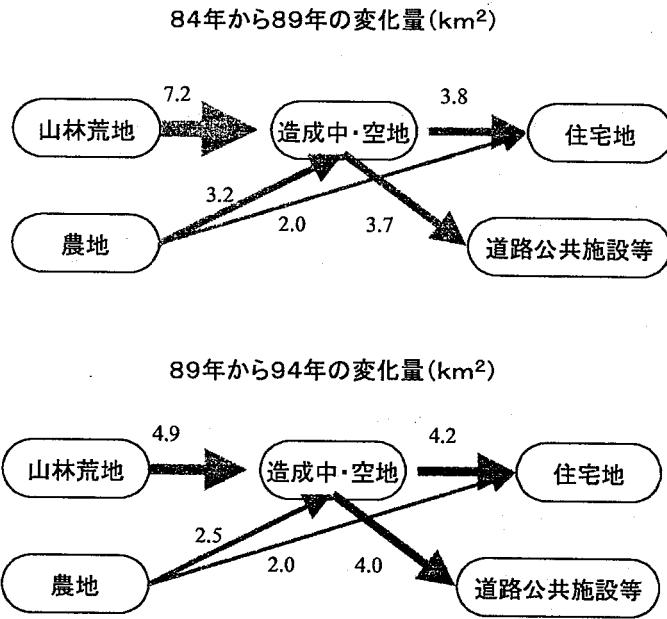


図7-2 2期間の代表的な土地利用変化の量（面積；km²）

3) 土地利用変化の位置分布

前節では土地利用の変化量を調べたが、当節では変化の位置分布を見ていく。84年から89年（前期）、89年から94年（後期）について、各土地利用の保持・変化のグリッド位置を始期9用途*末期9用途毎に地図上で抽出し、マトリックス表示した（84年～89年：図7-3、89年～94年：図7-4）。左端列が始期の9用途別グリッド分布、上端行が末期の9用途別グリッド分布を示し、間の9*9マスが始期の用途から末期の用途へと変化（もしくは保持）したグリッドの分布を示している。

「工業用地」「河川湖沼海」「その他」の3用途は、前期・後期ともに用途保持の分布以外はほとんど見られず、両期間を通じて変化が無いといえよう。大局的には、図7-3、7-4のマトリックスにおいて用途保持のセルを連ねた対角線よりも右上側のセルは都市化方向の変化を表し、左下側のセルは非都市化方向の変化を表している。一部には「住宅地→造成地」「道路公共施設等→住宅地」といった変化も見られ、これらは非都市化の変化に該当するが、実際にこの地域が非都市化傾向の用途変化を有しているとは考えにくい。上記の変化が見られることは、土地利用現況データ作成時の分類基準が一定していなかった可能性を示唆している。

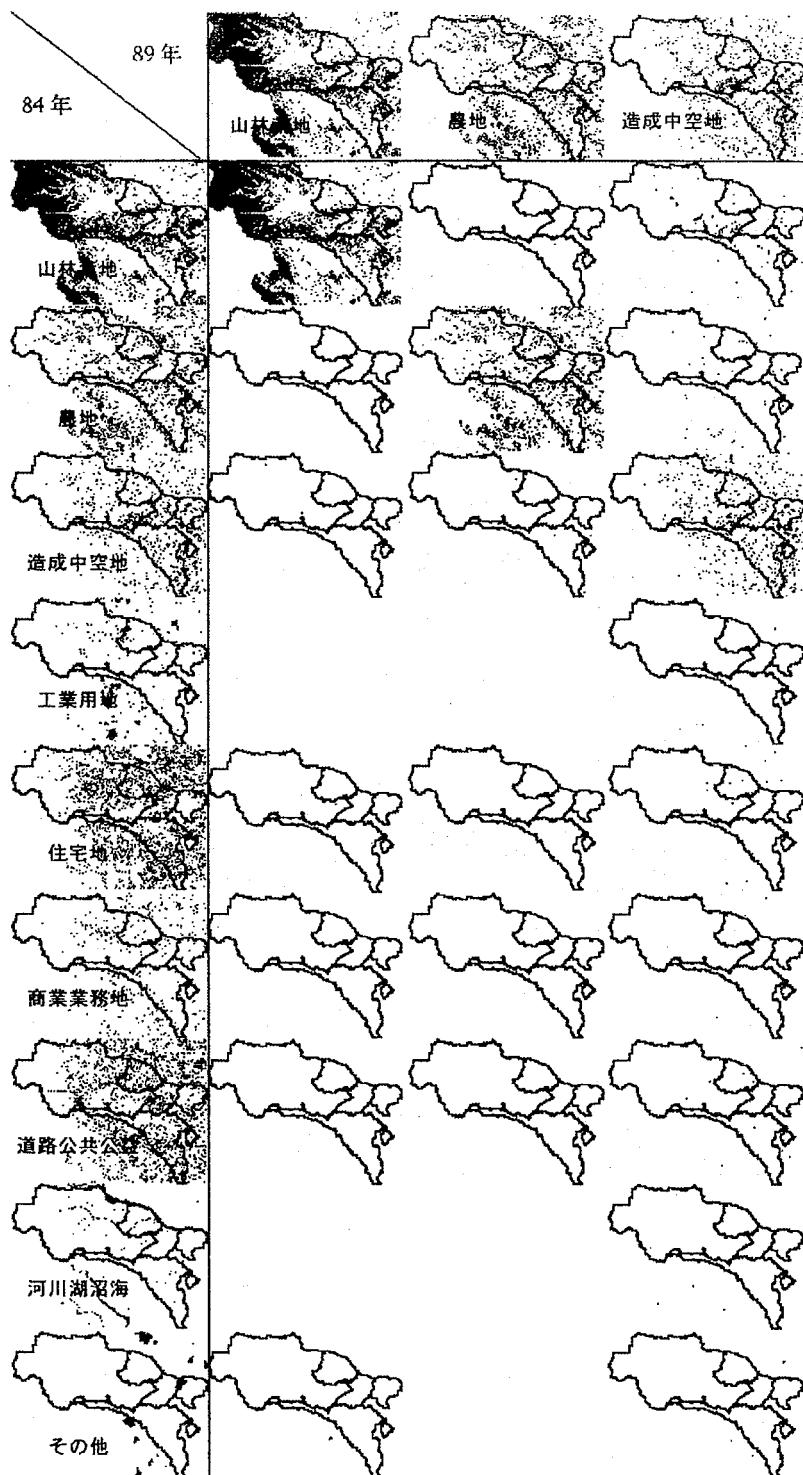
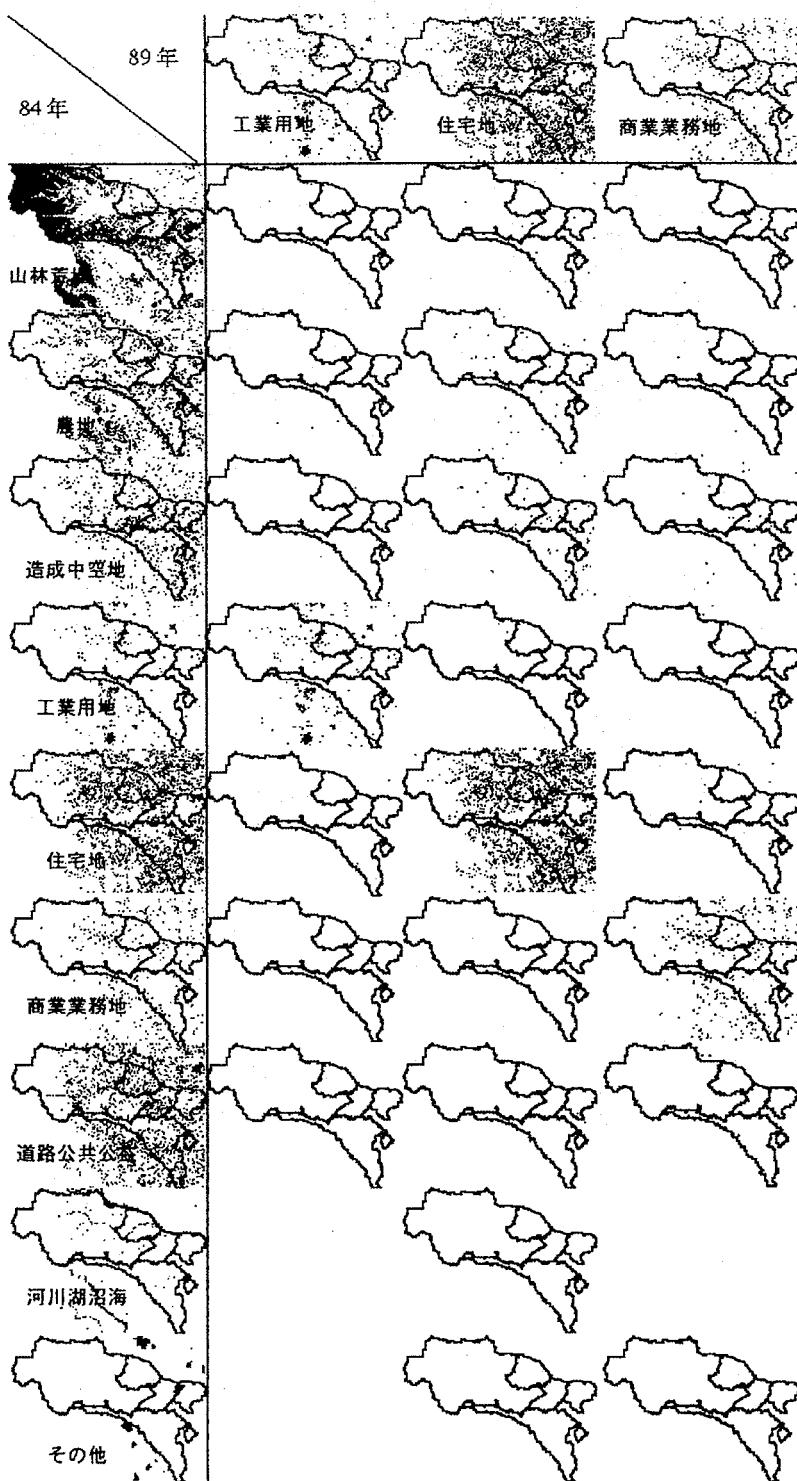
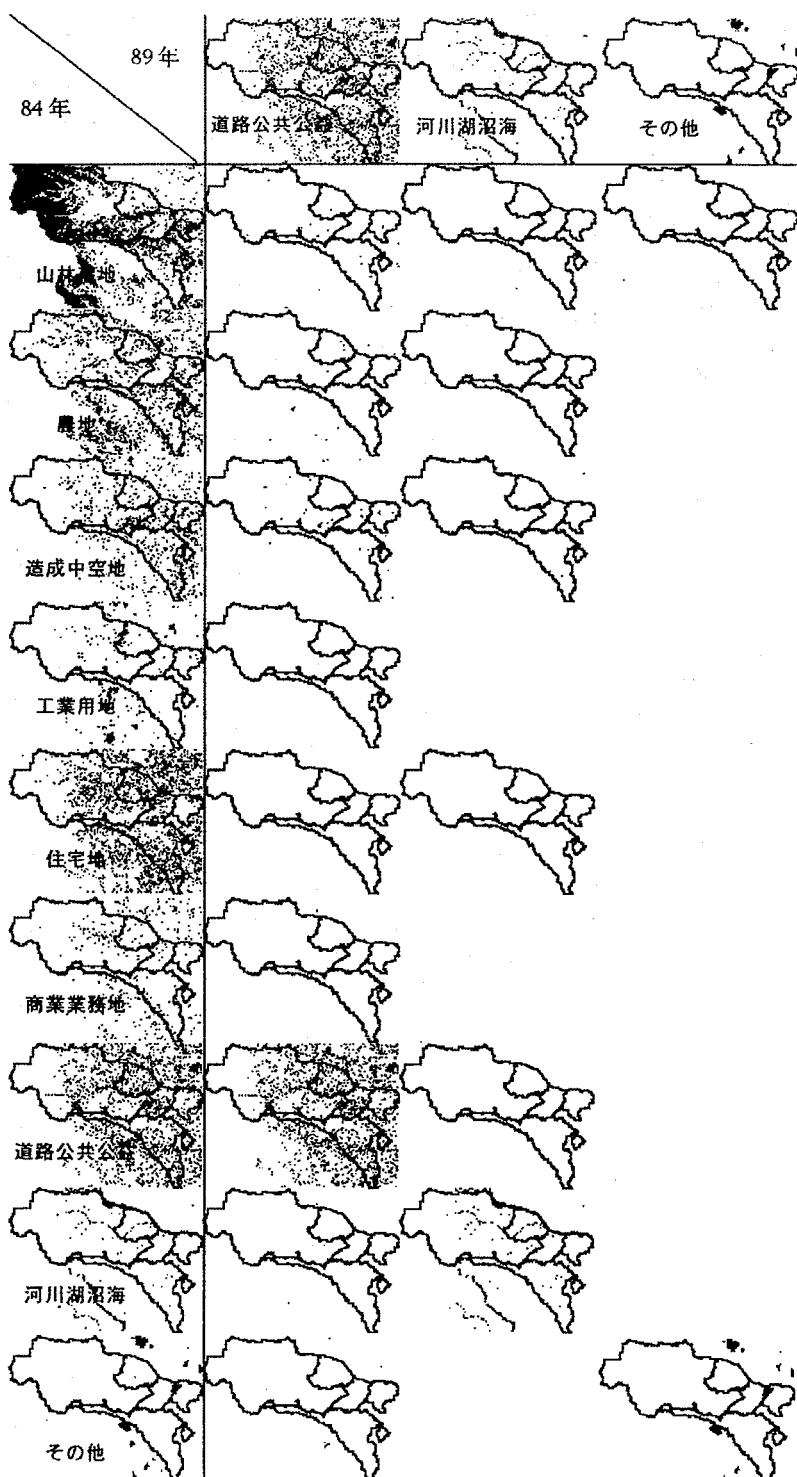


図7-3 84年から89年の土地利用変化一覧



(図7-3 続き)



(図7-3 続き)

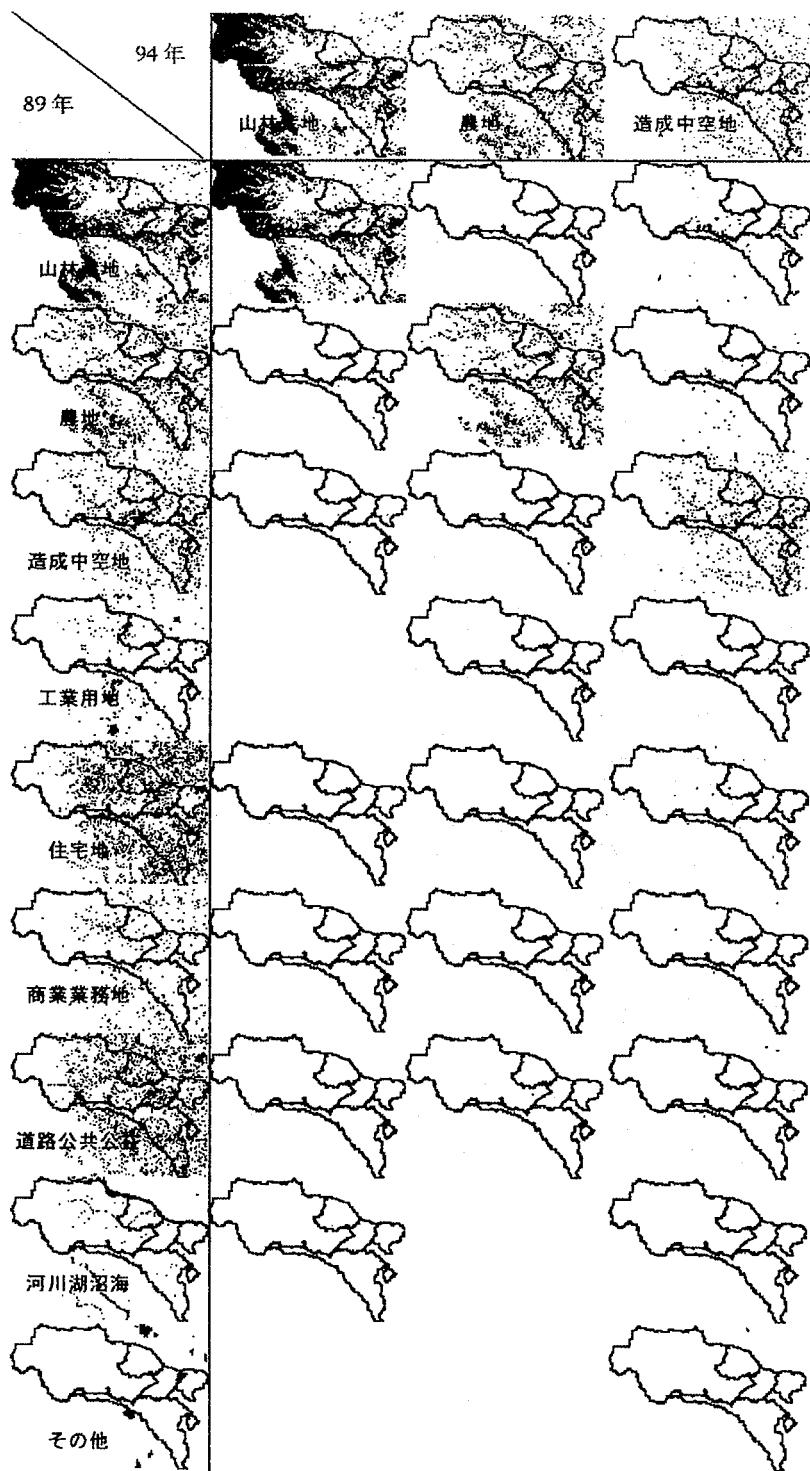
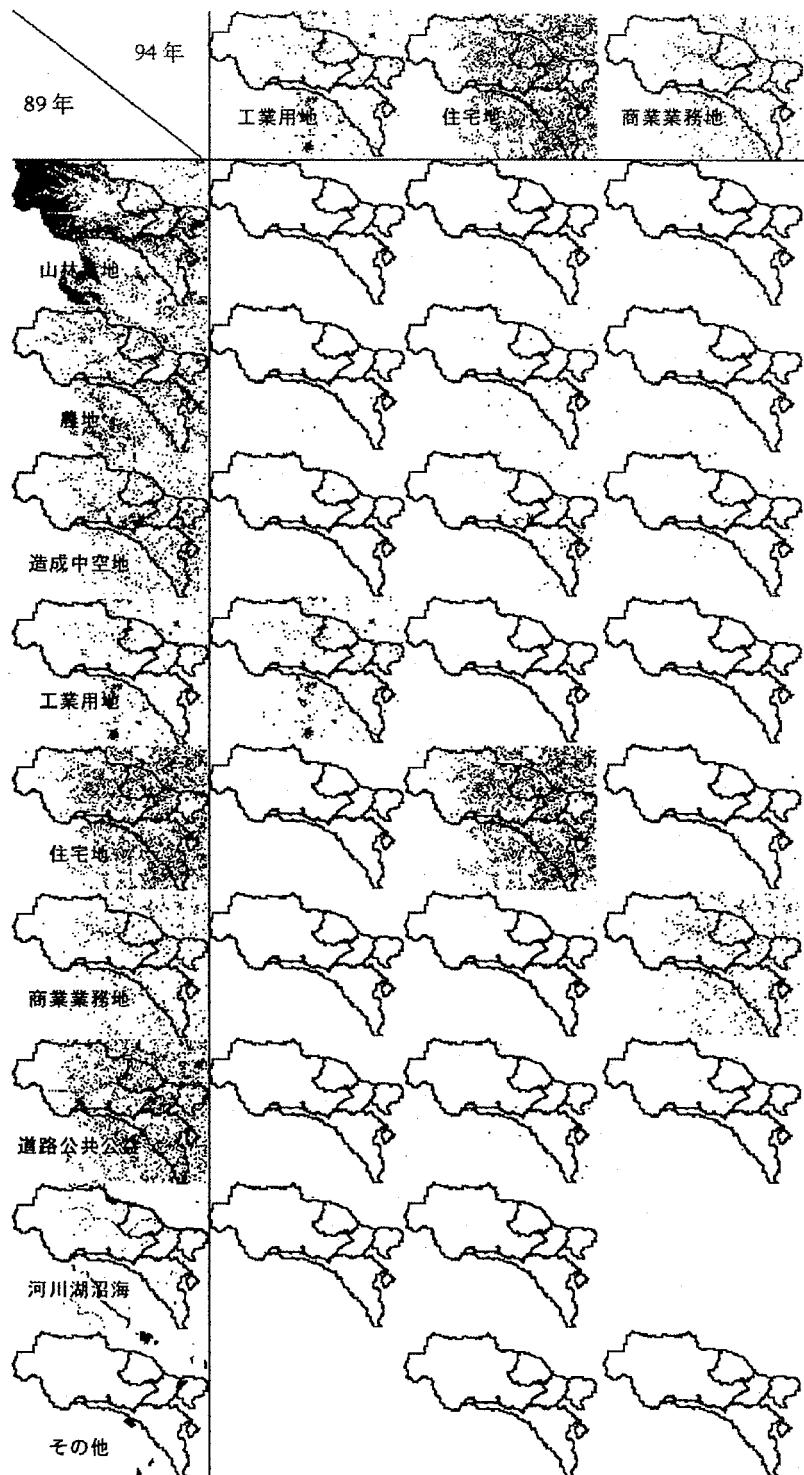
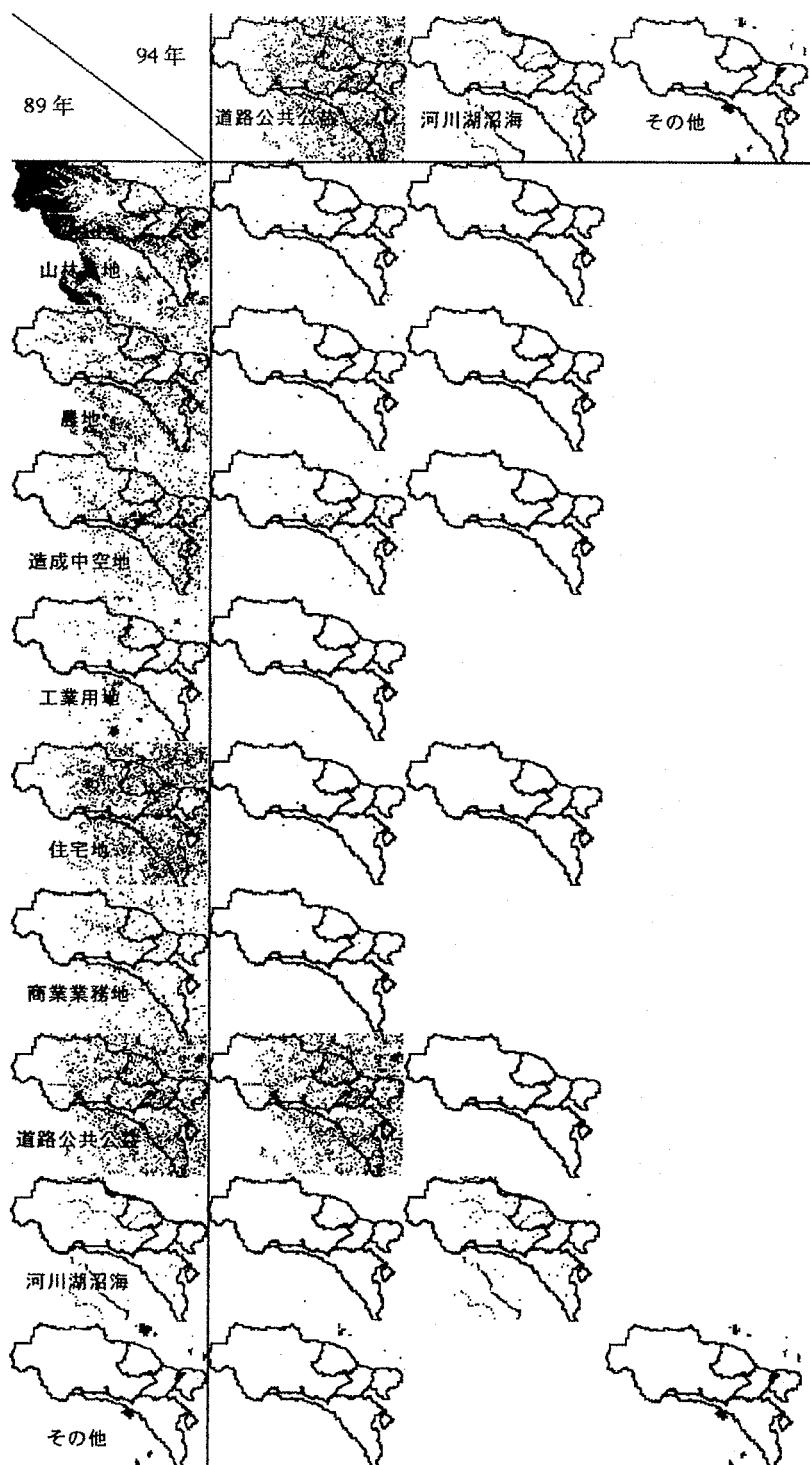


図7-4 89年から94年の土地利用変化一覧



(図7-4 続き)

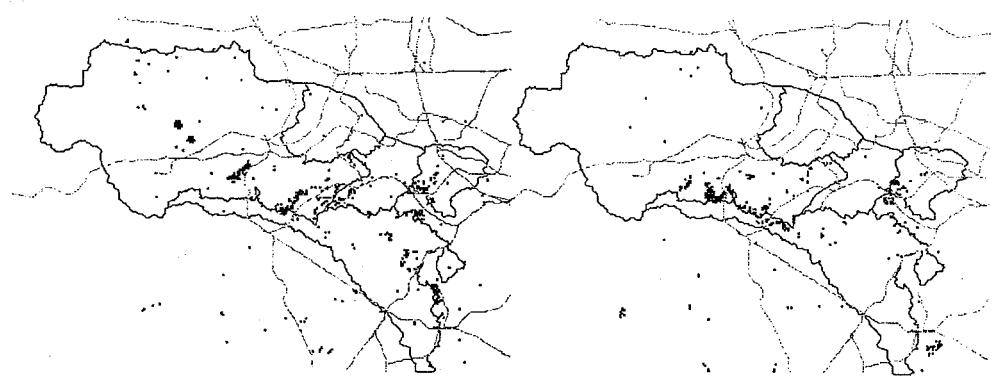


(図7-4 続き)

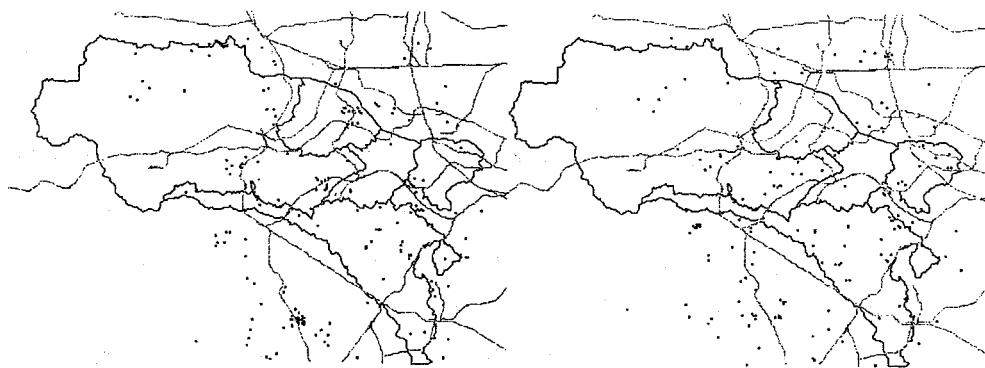
両期間を通じて変化グリッドが多く見られる用途の代表的な組み合わせは、以下の通りである。①「山林荒地／農地→造成中・空地」、②「農地→住宅地」、③「造成中・空地→住宅地／道路公共用地等」。中でも、グリッドが一定個所にまとまり、位置分布に偏りが読みとれる組み合わせは、「山林荒地→造成中・空地」（前期後期とも）、「造成中・空地→道路公共施設等」（特に前期）、および「造成中・空地→住宅地」（特に後期）である。

上に記した分布位置の特徴をより詳しく抽出するため、図7-2でとりあげた代表的な土地利用変化について、その変化が起こっているグリッド位置を図7-5に示した。通常これらの都市的土地区域への変化は、鉄道や道路等の交通基盤ネットワークの近傍で起こりやすいと考えられる。対象地域では道路ネットワークの構造変化はまだ大きく、それ自身が変化分析対象になるため、今回は鉄道との関連に着目し、市毎の特徴と変化位置の分布の特徴を明らかにする。

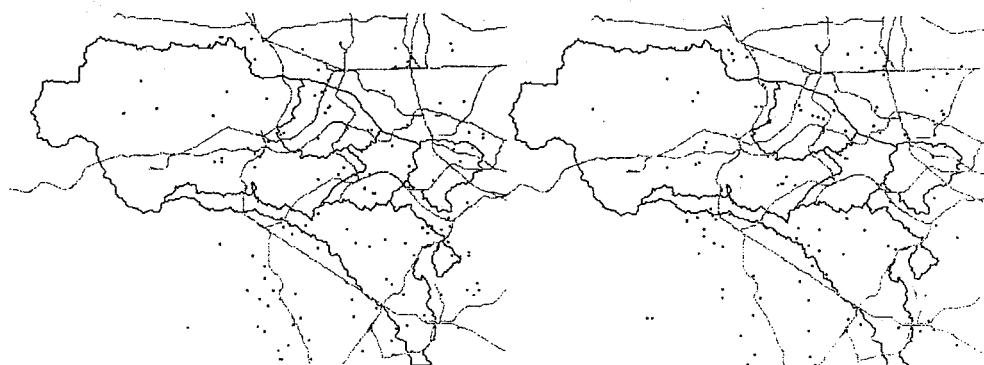
図7-5によると、「山林荒地→造成中・空地」の変化は、前期は八王子市中心部の中央線北側、同市南部横浜線の西側、同市南東部の京王線近傍の3カ所に多く分布しているが、後期は3カ所ともに減少し、横浜線と京王線の近傍ではあるが八王子市と町田市との市境付近に分布集中地域が移っている。両時期を通じて分布が多く見られるのは稻城市西部のみである。「農地→造成中・空地」と「農地→住宅地」の変化は、両時期を通じて広範囲に分布しており、行政界や鉄道との関連は見られない。「造成中・空地→住宅地」の変化は、前期・後期ともに広範囲に散在しているが、八王子市南東部の京王線近傍の1カ所に集中的な分布が見られる。この集中分布域は、前期に「山林荒地→造成中・空地」であった範囲と重なるが、分布量は若干少ないため、前期に宅地造成された地域の一部で後期に住宅地開発が進んだものと見られる。「造成中・空地→道路公共施設等」の変化については、前期・後期ともに八王子市南東部の京王線近傍に分布の集中が見られるが、後期には範囲がやや大きい。これは後期に住宅地へと変化した部分と範囲がほぼ一致する。稻城市内の京王線沿線では、「山林荒地→造成中・空地」の変化が、前期から後期にかけて北側から南側へと分布を移している。同様に、「造成中・空地→道路公共施設」への変化も北側から南側に分布を広げている。この地域では対象期間中の住宅地への変化はまだ少ない。これらの2地域では、八王子市南東部および稻城市内と同様に、まず住宅地化に先行して道路整備が進められ、その後の住宅地開発にともなって再度道路整備が進められることを示しており、変化量分析から推察した内容が変化位置の分布によって裏付けられた。稻城市内の京王線沿線では、対象期間中の住宅地化が未然の状態にあると読みとることができる。



山林荒地→造成中・空地（左：84-89年、右：89-94年の変化）

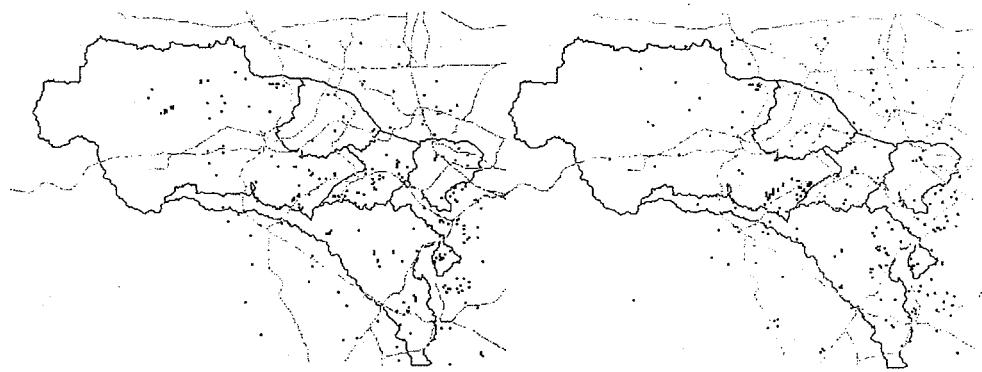


農地→造成中・空地（左：84-89年、右：89-94年の変化）

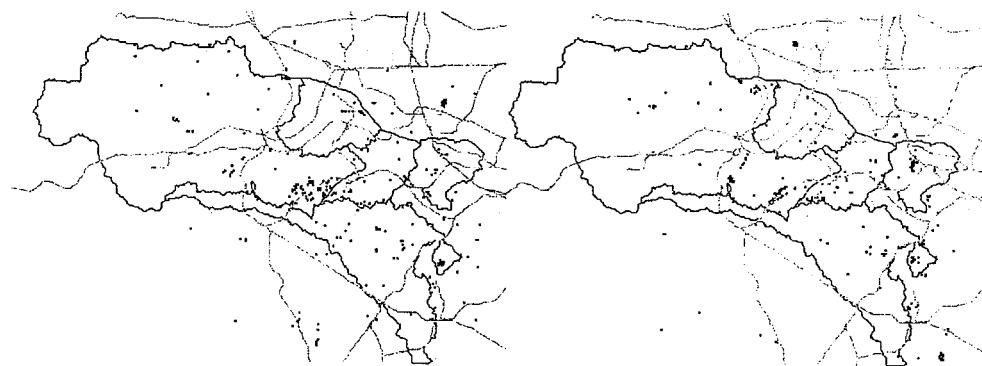


農地→住宅地（左：84-89年、右：89-94年の変化）

図7-5 代表的な土地利用変化の位置分布



造成中・空地→住宅地（左：84－89年，右：89－94年の変化）



造成中・空地→道路公共公益施設（左：84－89年，右：89－94年の変化）

（図7-5 続き）

4. おわりに

本研究では土地利用細密数値情報データをGISに入力し，1984年から89年および89年から94年の2期間について，土地利用の変化を10 mメッシュ単位で抽出し，その変化点の量と位置分布の特徴を抽出した。変化量の分析により，以下の特徴が示された。

- 1) 分析期間を通じて，「山林荒地／農地」から「造成中・空地」を経て「住宅地／道路公共施設等」へと向かう都市的土地利用への変化傾向が強い。

2) 「山林荒地／農地→造成地・空地」の変化は、後期には前期よりも減少するが、「造成中・空地→住宅地／道路公共施設等」の変化は後期に増加している。宅地造成が前期に多く行われ、後期以降はさらに住宅地化および道路整備が進められたことを示している。

また、変化位置分布の分析により、以下の特徴が示された。

3) 鉄道路線近傍でまず「造成中・空地」の分布が増加し、それと前後して「道路公共施設等」の分布の増加が見られる。「造成中・空地」は隣接地域へと分布を移していく、先に「造成中・空地」が分布していた地域では「住宅地」への変化が展開され、併せて「道路公共施設等」の分布増加も継続する。これは、対象地域において宅地開発が連続した地域で時系列的に進められていることと、宅地開発においてはまず宅地造成の進行とともに道路が整備され、その後に住宅地開発が進行し、その居住用インフラとして再度道路整備が進められていることを示している。

以上の特徴は定性的な分析を通じて抽出されたものが主である。詳細な空間統計分析による検証は、今後の課題としたい。

文献

伊藤史子、村田亜紀子、2000. 千葉県流山市南西部における土地利用変化NNモデルの構築－細密数値情報を用いた変化要因分析－. 日本都市計画学会学術研究論文集, 35, 1129-1134.

大佛俊泰、倍田賢一、1995. マルコフ連鎖型土地医療予測モデルの改良. 地理情報システム学会公園論文集, 4, 71-74.

滝澤重志、河村 廣、谷明 熊、1997. 遺伝的アルゴリズムを用いた年の土地利用パターンの形成. 日本建築学会計画系論文報告集, 495, 281-287.

吉川 徹、岡部篤行、浅見泰司、金子忠明、1990. 用途地域指定の趣旨からみた土地利用遷移の分析－神奈川県川崎市を対象とした実証分析－. 日本都市計画学会学術研究論文集, 25, 373-378.

第8章

流域単位での土地利用変化の把握

杉盛啓明

1. 目的

流域の中における土地利用の分布とその変化は、降雨一流出特性と人間活動との関係を考察するための基礎情報となる。特に、都市化により舗装された敷地や道路等の不透水面が増加すると、雨水の地下浸透が妨げられ、人工排水路から河川への速やかな流出が生じて洪水時の流出量が増大すると考えられている（虫明、1990）。

田村ほか（1983）は、東京・大阪・仙台等の大都市近郊における大規模住宅地開発面積を低地・台地・丘陵地・山地という中地形別に集計し、丘陵地への都市化が1960年頃以降に急速に進展したことを示した。実際、本研究の対象地域では、第7章でも指摘されているように、丘陵地における都市化の進行が顕著である。しかし、流域単位の土地利用変化に関する詳細な分析や、自然環境との関係の把握は、これまであまり行われていない。そこで、対象地域の流域について、国土地理院の細密数値情報とDEMを用いた分析を行った。

2. 方法

国土地理院の細密数値情報の10 mメッシュ土地利用データをGISソフトArcViewに取り込み、城山川、兵衛川、乞田川の3流域における土地利用の分布を図化するとともに、DEMから求めた標高・傾斜の階級ごとに、1984年と1994年の土地利用構成比を算出した。1984年の土地利用データには同年のDEMを対応させ、1994年の土地利用データには1990年代後半のDEMを対応させた。

3. 結果

以下、分析の結果を図示する。図8-1は各流域・各年次の土地利用分布図、図8-2～8-7は標高別の土地利用構成比、図8-8～8-13は傾斜別の土地利用構成比を示す。

4. 考察

標高別の土地利用構成を見ると、城山川流域においては、標高240 m以上の上流域で山林の残存率が9割以上と高い。また、1984年から1994年の間に、標高180～200 mの区域における一般低層住宅地及び空地の割合が増加しており、都市化が標高の高い上流域へと進行していることがうかがえる。しかし、1994年時点の山林の割合は3流域の中で最も高い。

兵衛川流域においては、1984年時点で標高150 m以上の区域で山林の割合が8割以上あつたが、1994年では標高130～170 mの区域で造成中地・空地化が大規模に進行し、山林の割合が5割以下となった。3流域の中では、1984年～1994年に最も大規模な造成が行われたといえる。

乞田川流域においては、1984年時点ですでに標高130 m区域までの都市化が進行していたが、1994年ではさらに標高140 m区域まで一般低層住宅地化が進み、160 m区域では公共公益施設の立地が進んだ。また、都市的土地利用の中でも中・高層住宅地の割合が高く、標高110 m区域を中心に分布している。

傾斜別の土地利用を見ると、城山川流域においては1984年～1994年の10年間で大きな変化は見られず、傾斜30度区域が都市的土地利用の立地限界にほぼ相当し、それ以下の傾斜では、傾斜が小さくなるにつれて都市的土地利用の割合が増加する。

兵衛川流域では、1984年以降に大規模な土地造成が傾斜30度以下の斜面で進行し、その中でも緩傾斜の場所ほど開発される割合が高かった。

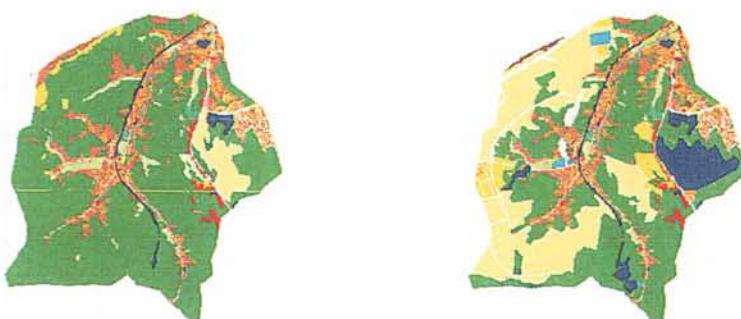
乞田川流域は、3流域の中でも急傾斜地への都市化が最も進行しており、傾斜30度の階級においても約5割強が都市的土地利用となっている。なお、傾斜30度以上の区域では公共公益施設や商業・業務用地としての利用も見られるが、面積的には0.07 ha（流域面積の0.006%）と微小なため、一般的傾向とはいえないと思われる。

1984

1994



城山川



兵衛川



乞田川

図8-1 研究対象流域における土地利用の空間分布の変化（凡例は図8-2参照）

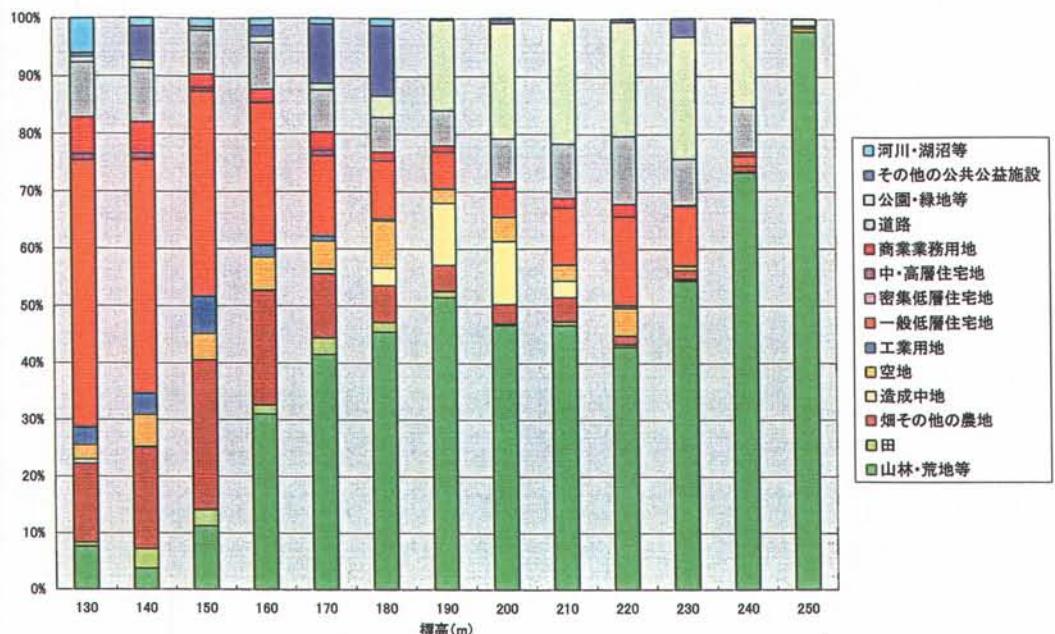


図8-2 城山川流域における標高別の土地利用構成比（1984年）

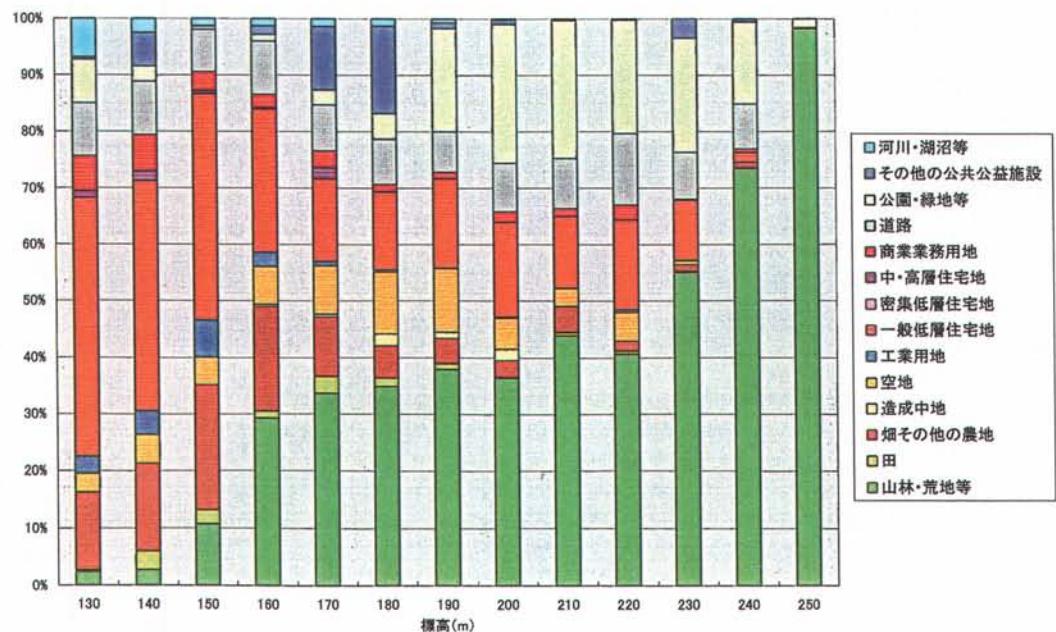


図8-3 城山川流域における標高別の土地利用構成比（1994年）

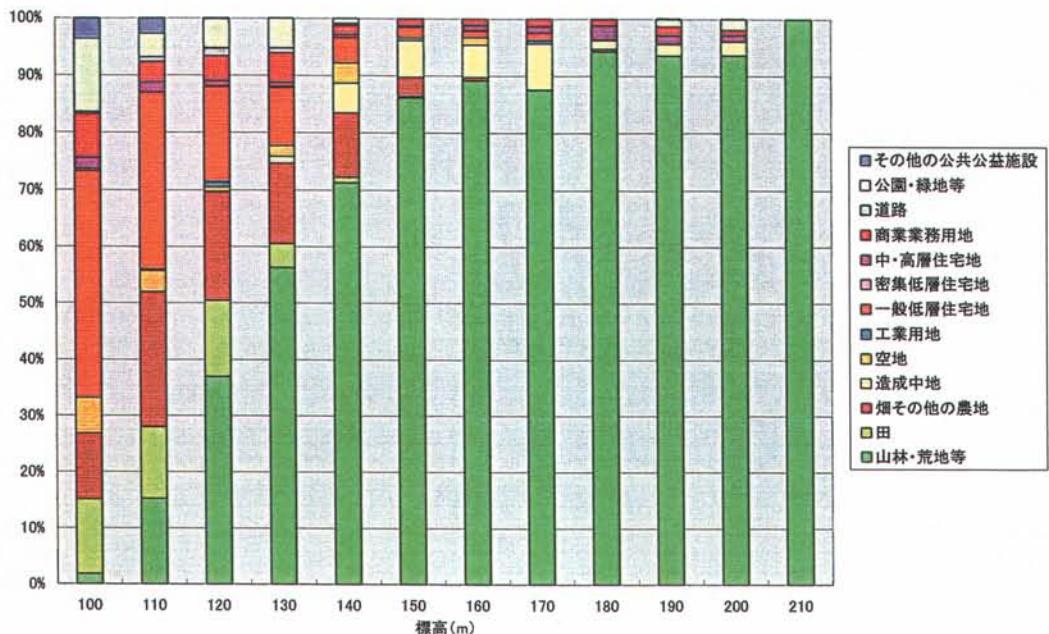


図8-4 兵衛川流域における標高別の土地利用構成比（1984年）

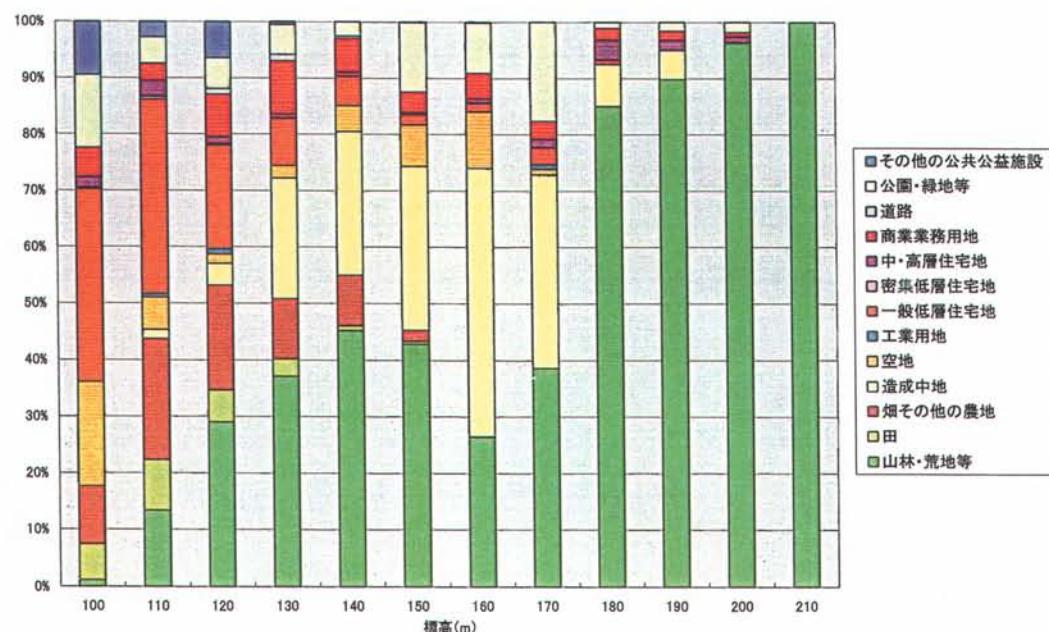


図8-5 兵衛川流域における標高別の土地利用構成比（1994年）

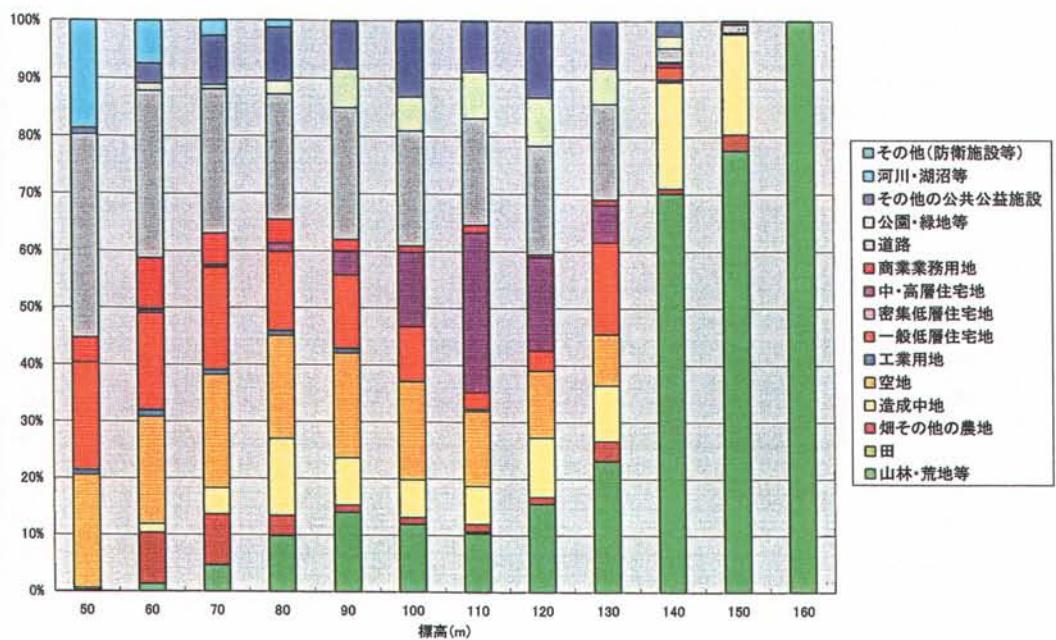


図8-6 乞田川流域における標高別の土地利用構成比（1984年）

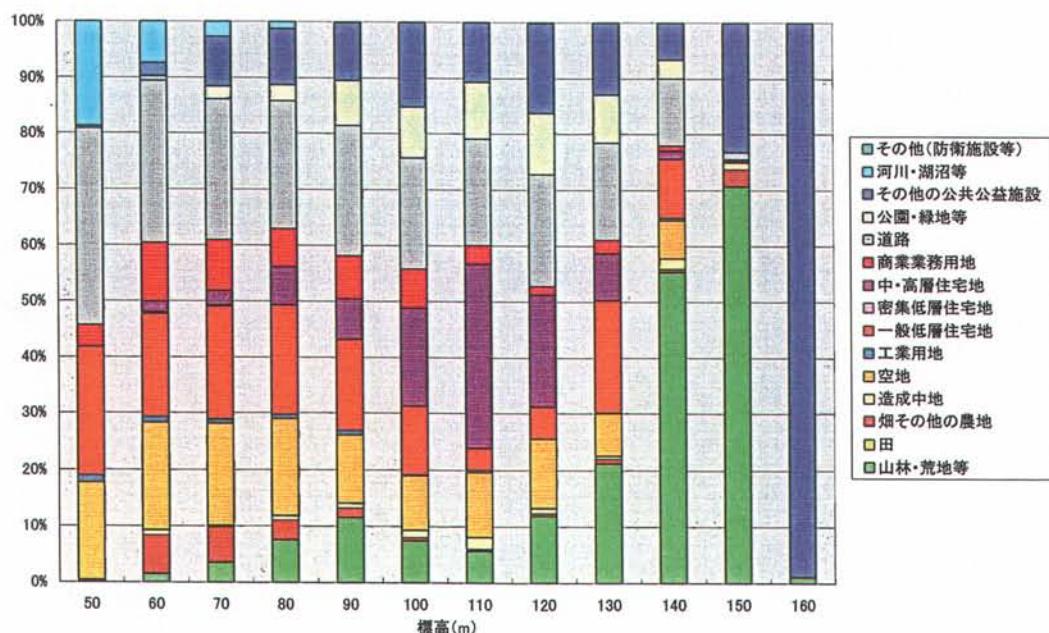


図8-7 乞田川流域における標高別の土地利用構成比（1994年）

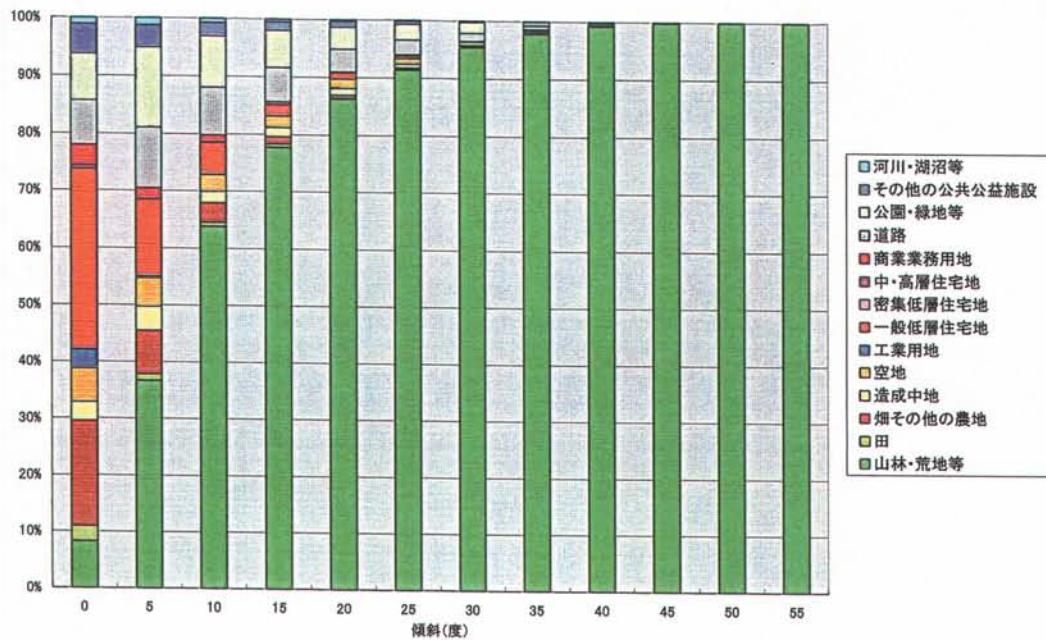


図8-8 城山川における傾斜別の土地利用構成比（1984年）

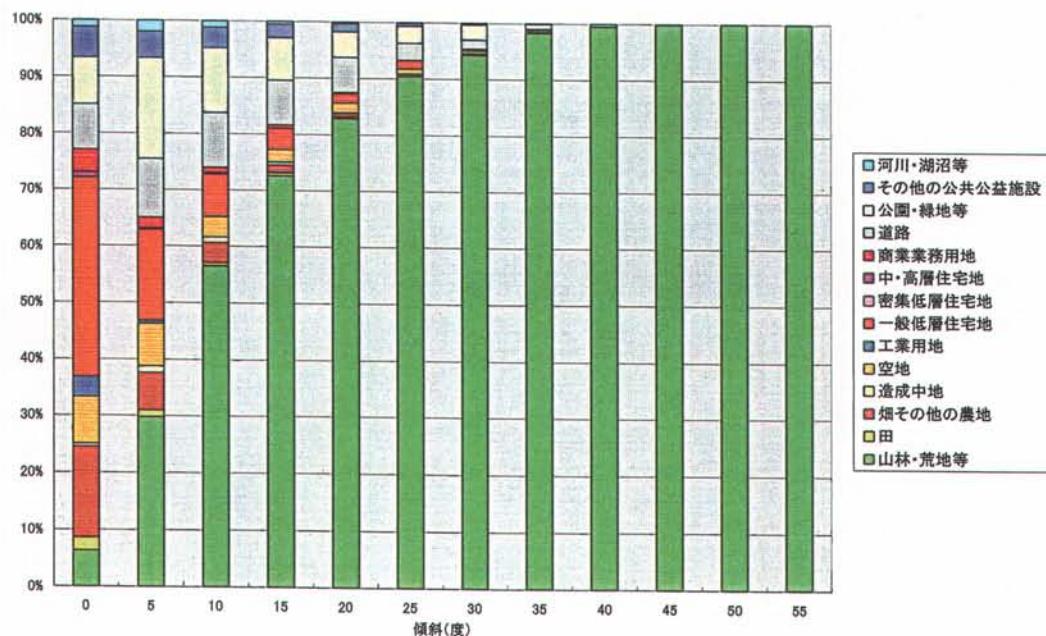


図8-9 城山川における傾斜別の土地利用構成比（1994年）

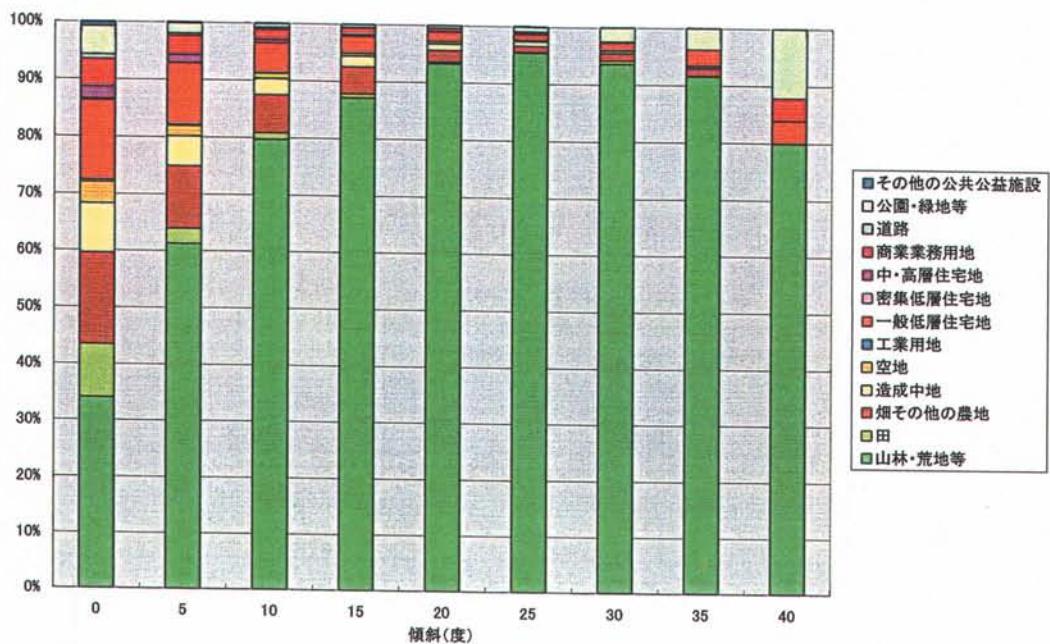


図8-10 兵衛川における傾斜別の土地利用構成比（1984年）

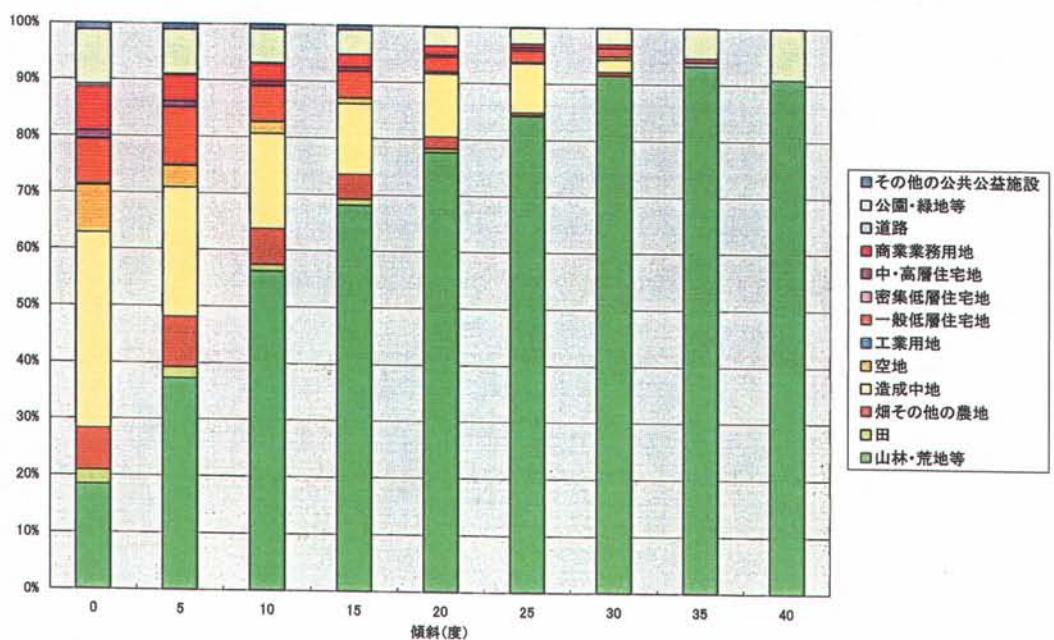


図8-11 兵衛川における傾斜別の土地利用構成比（1994年）

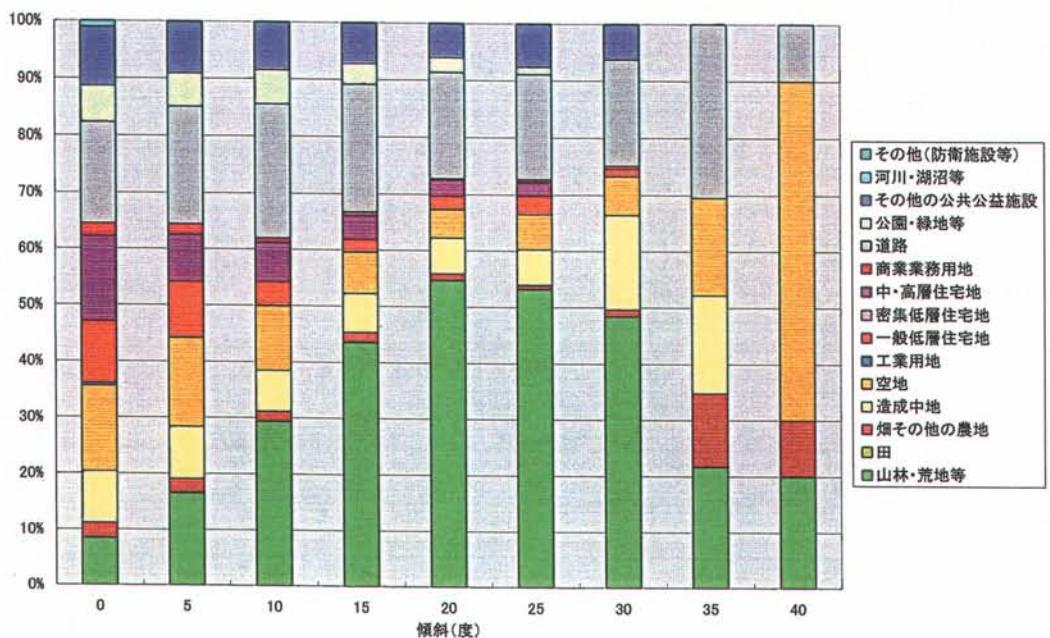


図8-12 乞田川における傾斜別の土地利用構成比（1984年）

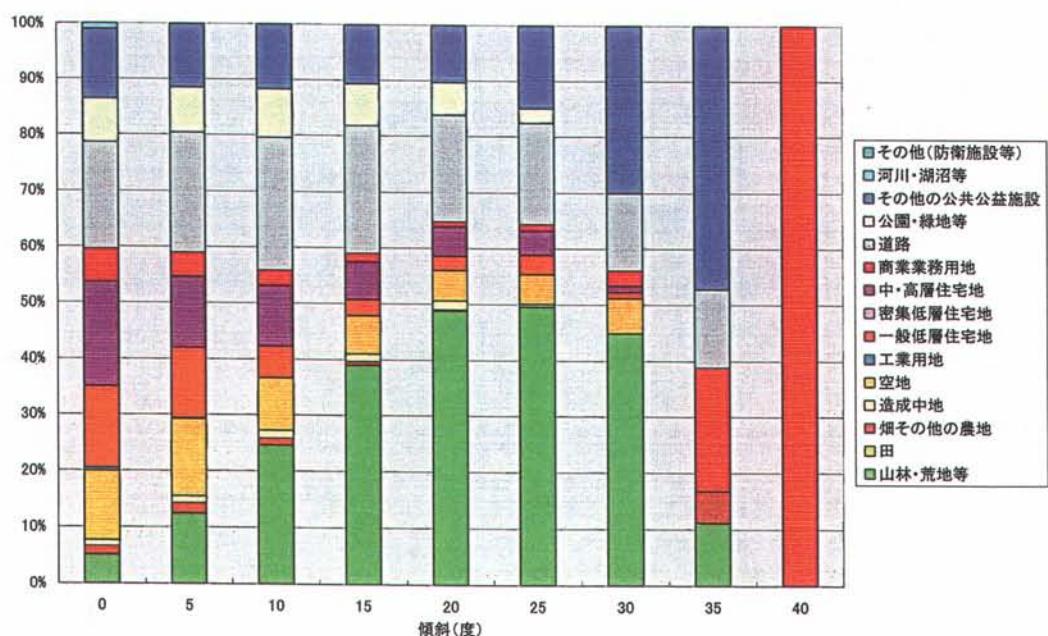


図8-13 乞田川における傾斜別の土地利用構成比（1994年）

5. まとめ

城山川, 兵衛川, 乞田川における1984～1994年の土地利用変化の特徴を, 流域地形条件との関係でまとめると次のようになる.

- ① 城山川流域は, 都市化が標高の高い上流域へと進行しているものの, 3流域の中では最も山林が残存している.
- ② 兵衛川流域は, 標高130～170 m, 傾斜30度以下の斜面において大規模な土地造成が進行し, 山林の割合が大幅に減少した.
- ③ 乞田川流域では, 上流域及び急傾斜地への都市化が3流域の中で最も進行しており, 傾斜30度区域においても約5割強が都市的土地利用となっている. これは, 城山川流域と兵衛川流域において, 傾斜30度区域が都市的土地利用の立地限界にほぼ相当していること異なる傾向である.

文献

虫明功臣, 1990. 都市と水環境. 環境情報科学, 19-2, 28-34.

田村俊和, 山本 博, 吉岡慎一, 1983. 大規模土地改変の全国的把握. 地理学評論, 56, 223-242.

第9章

多摩地域の気候とリモートセンシングによる土地被覆解析

木村圭司

1. はじめに

多摩地域において流出解析を行うに際し、必要な基本的情報の一つとして気候を知ることは重要である。特に、降水量の平年値だけでなく、降水量の日最大値や1時間最大値などの極値を知ることは、本研究のように中～小流域の流出解析を行う際に必要不可欠と考えられる。

また、リモートセンシングの技術を用いると、衛星画像が得られた日の土地被覆を、ある程度推定することができる。本解析では、土地被覆のうち、流出解析に主として関係すると思われる森林による被覆について、一般的な指標である NDVI を用いて 1987 年から 1997 年までの 10 年間の推移を算出し、考察を行う。

2. 多摩地域の気候(平年値と極値)

多摩地域では、気象庁による AMeDAS だけではなく、東京都や八王子市などによっても降水量の観測が行われている。このうち、多摩地域で中心的な気候観測地点と認められるものは、気象庁による八王子 AMeDAS（八王子市役所裏にある。北緯 35 度 40.0 分、東経 139 度 19.0 分）である。本節では、この八王子 AMeDAS から得られたデータを用いて解析を行う。

まず、1983 年から 2000 年までの 18 年間の準平年値は、年平均気温 14.3°C、年合計降水量 1536.5 mm である。月別の気温と降水量の平年値は図 9-1 に示すとおりであり、梅雨期ではなく 10 月に降水量の極大 (259.8 mm) が認められる。また、冬季は降水量が少ないことも特徴的である。

また、流出解析を行う際には、気候の平均値だけでなく、降水に関する極値が重要である。日合計降水量の極値を表 9-1 に、最大 1 時間降水量の極値を表 9-2 に示す。日最大降水

量の極値は台風によりもたらされるものが多いが、最大1時間降水量の極値は台風だけではなく、前線活動や局地的雷雨によるものも多い。

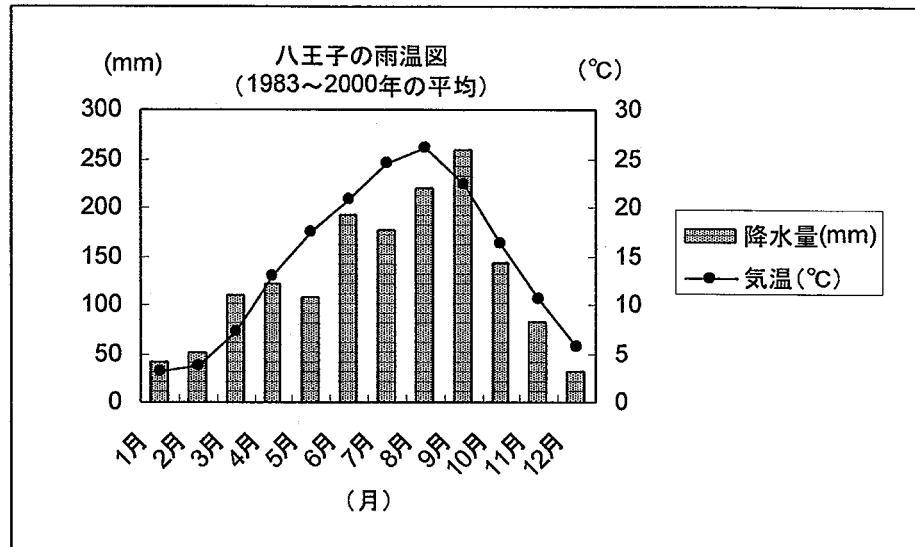


図 9-1 八王子の雨温図 (1983~2000 年の平均)

表 9-1 日合計降水量の極値
(統計期間：1983 年 10 月～2003 年 8 月)

日降水量の極値	(mm)	年月日
1 位	345	1999 年 8 月 14 日
2 位	206	1990 年 9 月 30 日
3 位	195	2002 年 10 月 1 日
4 位	192	1991 年 9 月 19 日
5 位	180	1998 年 8 月 28 日
6 位	179	1998 年 9 月 16 日
7 位	165	1990 年 11 月 30 日
8 位	162	1986 年 8 月 4 日
9 位	160	1990 年 8 月 10 日
10 位	152	2002 年 8 月 19 日

表 9-2 最大 1 時間降水量の極値
(統計期間：1983 年 10 月～2003 年 8 月)

最大 1 時間降水量の極値	(mm)	年月日
1 位	62	1998 年 7 月 30 日
2 位	61	2003 年 7 月 12 日
3 位	50	2002 年 9 月 9 日
4 位	48	2003 年 8 月 8 日
5 位	47	1988 年 8 月 24 日
6 位	45	2001 年 7 月 26 日
7 位	45	1994 年 9 月 17 日
8 位	44	2002 年 10 月 1 日
9 位	44	1999 年 8 月 14 日
10 位	43	1998 年 9 月 16 日

3. リモートセンシングによる土地被覆解析

本節では、1987 年 7 月 24 日と 1997 年 7 月 3 日に撮影された LANDSAT5 号の TM3 バンドおよび TM4 バンドの画像データから、植生指標である NDVI を算出し、この 10 年間にみられた植生変化を明らかにする。

調査地域は表 9-3 に示す 4 つの流域である。このうち 3 流域では第 10 章で流出解析を行う。これらの 4 流域における NDVI の変化を図 9-2～図 9-5 に示した。

表 9-3 研究対象地域とした河川と流量観測地点

	河川名	流量観測地点	流域面積(ha)	特徴
No.1	城山川	三村橋	953.9	森林が多く未開発
No.2	山田川	竹屋橋	212.4	古くからの都市河川
No.3	兵衛川	兵衛橋	522.0	ここ 10 年で開発が進んだ
No.4	乞田川	車橋	1226.7	多摩ニュータウン縁辺

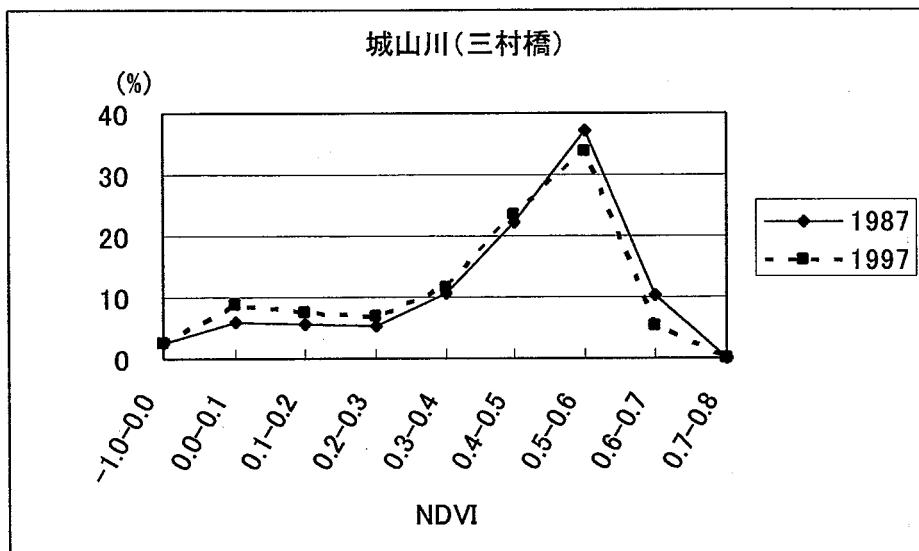


図 9-2 城山川流域（三村橋より上流）の 1987 年と 1997 年の NDVI 変化

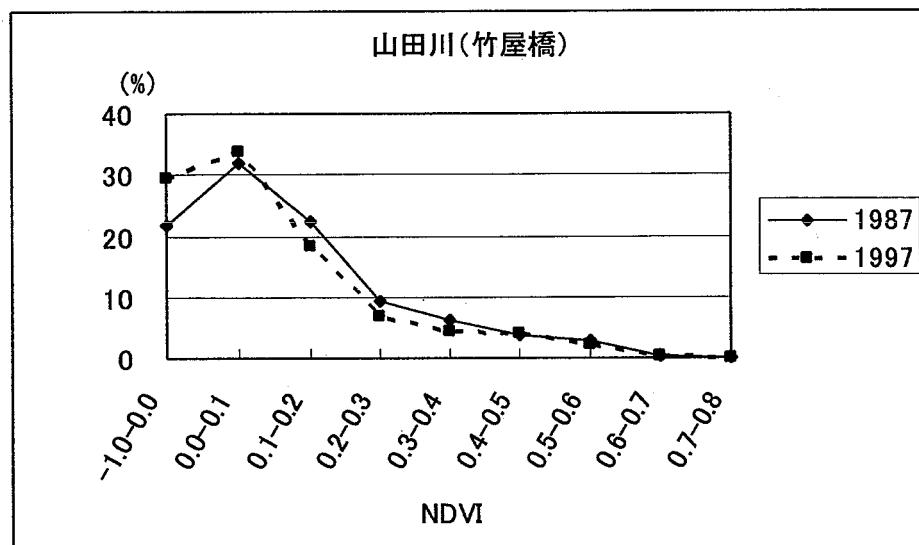


図 9-3 山田川流域（竹屋橋より上流）の 1987 年と 1997 年の NDVI 変化

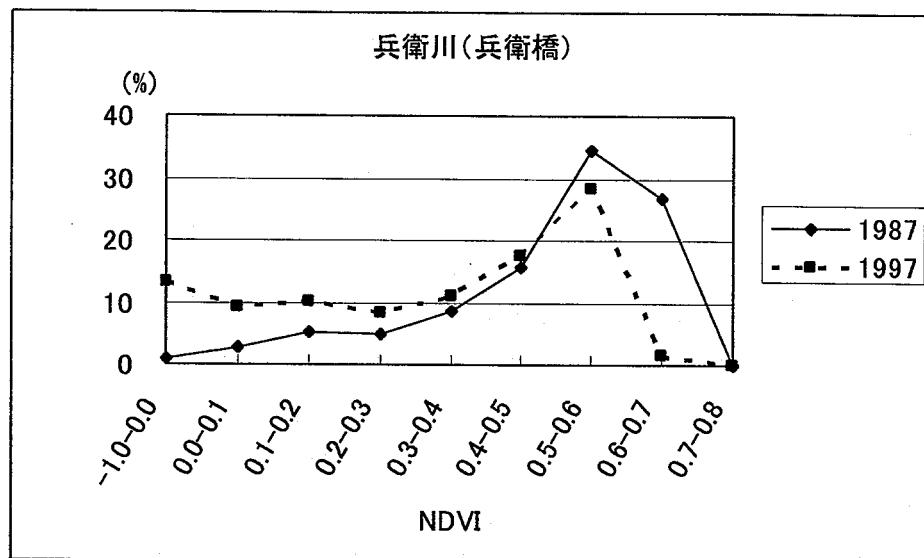


図 9-4 兵衛川流域（兵衛橋より上流）の 1987 年と 1997 年の NDVI 変化

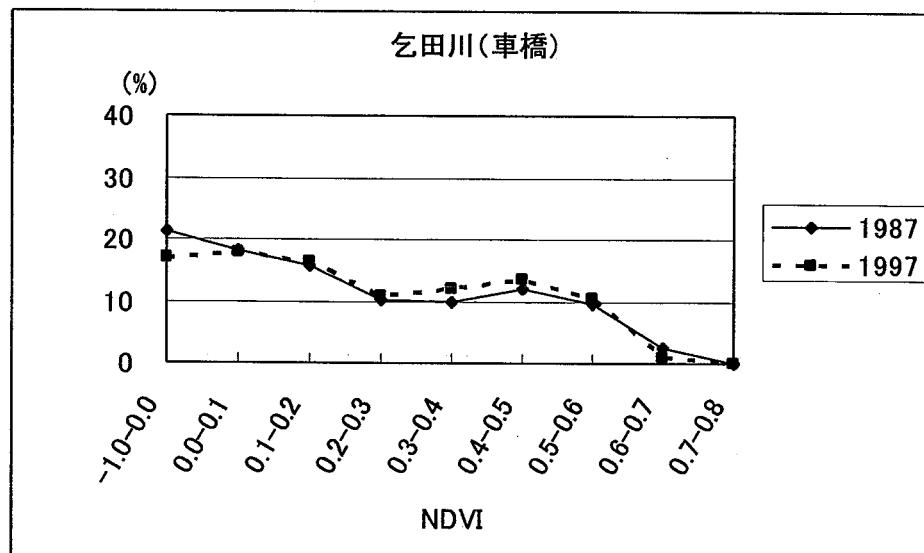


図 9-5 乞田川流域（乞田橋より上流）の 1987 年と 1997 年の NDVI 変化

これらの流域のうち、城山川流域の三村橋より上流側は森林が多く未開発な地域であるが、10年間に NDVI 値がやや下がる傾向にあった。山田川流域の竹屋橋より上流側は都市域であり、NDVI 値はこの 10 年間低いままで維持されている。これは、都市化がすでに進んでいる地域であるために、ほとんど土地被覆が変化していないことを示すと考えられる。兵衛川流域の兵衛橋より上流側は、今回の対象地域の中で、最も土地被覆の変化が激しかった地域である。1987 年には NDVI 値の高い森林が大部分を占めていたのに対して、1997 年には NDVI 値が急激に下がっていることから、森林の開発が進み、造成地ないしは住宅地に変貌したものと考えられる。乞田川流域の車橋より上流側は、この 10 年間で NDVI 値にほとんど変化が見られない。これは多摩ニュータウンの縁辺部であるが、初期にニュータウン開発が行われたためと考えられる。

4. まとめ

本章では、多摩地域における小流域の流出解析に資するために、最初に気候の解析を行った。流量解析の手助けとするために、平年値としての降水量の季節変化だけではなく、降水量に関する極値も検討対象とした。

次に、リモートセンシングにより得られる植生指標 NDVI を用いて、10 年間（1987 年～1997 年）の土地被覆（緑被）データを解析した。その結果、緑被率の減少は兵衛川流域（兵衛橋より上流部）で顕著であり、この間の都市開発による影響を示していると考えられた。一方、これ以外の 3 流域では、それほど緑被率の変化は大きくないことが示された。この結果は、第 7～8 章に示された土地利用変化の傾向と調和的である。

第10章

分布型流出モデルによる多摩丘陵の流出解析 —地形改変と都市化の影響について—

杉盛啓明・小口 高

1. はじめに

流域の環境条件が流出特性に与える影響を定量的に評価する方法として, GISと流出モデルを連携させた流出解析が, 欧米を中心に積極的に行われている (Drayton et al., 1992; Carpenter et al., 1999; De Roo, 1998など). このような動向を踏まえつつ, 本章では多摩川流域における既存の水文観測データと高空間解像度のGISデータセットを活用した流出解析を行い, 丘陵地における地形改変や都市化が降雨流出特性に与える影響を明らかにする.

多摩川流域の丘陵地における水循環に関しては, これまでに塚本(1962), 田中ほか(1984), 太田(1988), 新藤(1992)をはじめとする多くの研究がある. これらは詳細な現地観測に基づいて地表および地中における流出過程を論じ, 今日の斜面水文学における理論的基礎を築いたという点で非常に優れた研究であるが, いずれも数haの源流部小流域を対象とした, 空間的にはミクросケールのものであった. 本研究では, 対象とする流域規模を数km²から数10 km²とし, 地形や土地利用等が異なる複数の流域について降雨流出特性を比較検討することにより, 従来よりも一般性の高いモデルの構築を目指す.

2. 調査地域の概要

本研究では, 多摩川の支流である城山川, 兵衛川, 乞田川の3流域を対象とする(図10-1). これらはいずれも多摩川本流右岸の多摩丘陵に位置し, 高度経済成長期以前には丘陵地の小地形に対応した土地利用パターンが見られた. すなわち, 丘頂緩斜面の一部に畠, 谷頭部に草地・畠または溜池, 谷底面に水田, 丘麓緩斜面や小段丘面上に集落が分布し, その他はほとんど二次林に覆われていた(図10-2; 松井ほか, 1990). しかし, 高度経済成長期以降,

地形改変を伴う大規模な都市開発が進行し、多摩丘陵では以前の伝統的土地利用パターンが崩壊し、中高層の住宅地や商業地、社会基盤としての道路や鉄道等で構成される「ニュータウン景観」が出現した（杉盛・大森、1996）。本研究の対象である3流域を都市化の程度によって比較すると、1984年段階で都心に最も近い乞田川ではすでに都市的土地利用が大半を占めていた（52.2%）が、兵衛川では18.0%、城山川は28.6%であった（表10-1）。その後1994年までの10年間で、兵衛川流域では地形改変を伴う都市開発が大規模に進行し、都市的土地利用の割合は51.2%に上昇した。一方、城山川においては、一部都市化が進行したもの（32.8%）、依然として3流域の中では最も自然的土地利用が残っている（第8章）。

3流域における標高分布と傾斜分布を比較すると、城山川は標高分布、傾斜分布とともに他の2流域と異なる特徴をもち、傾斜30度以上の急斜面が多く分布している。兵衛川における1984年～1990年代末における地形改変量は、盛土が約 $1.01 \times 10^7 \text{ m}^3$ 、切土が約 $1.14 \times 10^7 \text{ m}^3$ であり（第3章）、尾根の土を削って谷に埋めている。これにより、兵衛川の傾斜分布は大きく変化し（第3章）、流域の西部に大規模な平坦面が発生した。

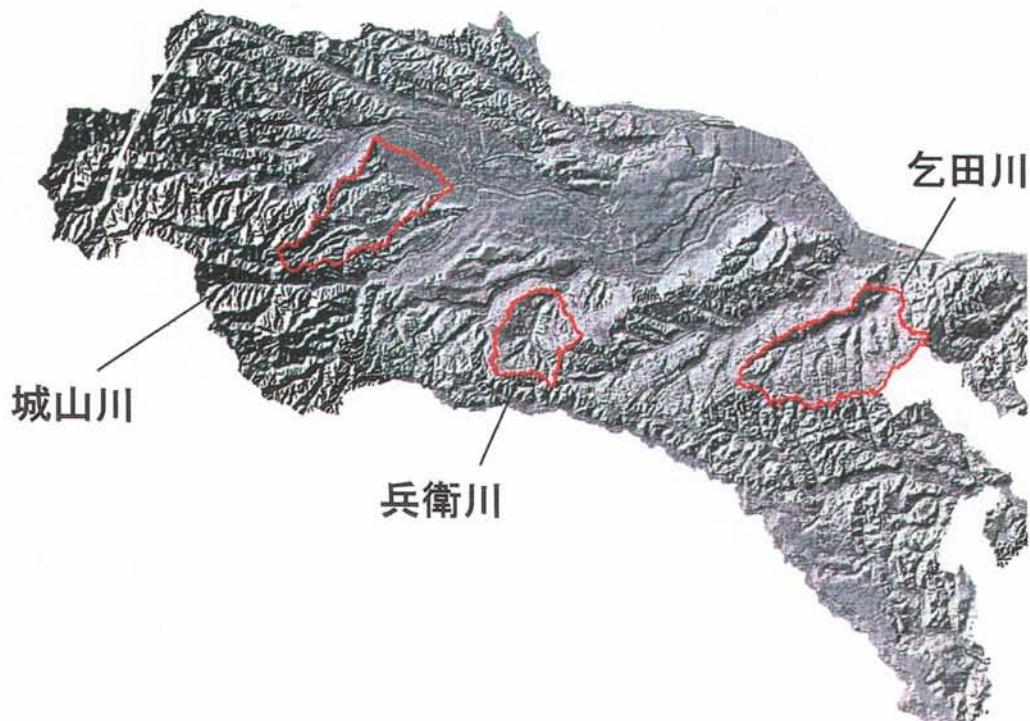
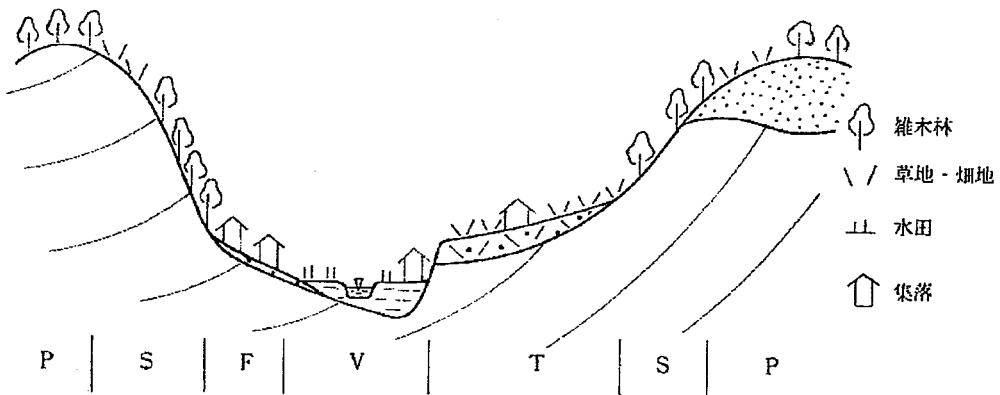


図10-1 研究対象地域（城山川、兵衛川、乞田川の各流域）



P : 丘頂緩斜面, T : 小段丘面, S : 丘腹斜面, V : 谷底低地, F : 丘麓緩斜面。
 丘陵地の小地形単位と伝統的土地利用 (模式断面図) (Tamura and Takeuchi, 1980,
 一部改変)

図10-2 丘陵地の小地形単位と伝統的土地利用
 (松井ほか編, 1990より)

表10-1 対象流域における流域面積及び都市的土地区画割合

	城山川	兵衛川	乞田川
流域面積(km^2)	9.8	5.4	12.5
都市的土地区画割合 1984年	28.6	18.0	52.2
都市的土地区画割合 1994年	32.8	51.2	65.1

3. 分布型流出モデルによる流出解析

1) 流出モデルの概要

流域における降雨流出について、数値計算に基づくモデルが数多く開発されている。これらのモデルは、流域内部の状態量の取扱い方によって集中型モデル (lumped model) と分布型モデル (distributed model) に大別され、GISが普及するまでは集中型モデルが主流であつ

た。しかし、流域の地形、土壤、土地利用などに関する空間データの蓄積により、流域内の局所的な環境変化（例えば、土地利用変化）による流出特性の変化をシミュレーションできる分布型モデルが適用される例が増えている。分布型モデルで必要となる多くの空間データは、GISによって管理するのが有効であるため、分布型モデルとGISの統合が進んだ。

分布型モデルでは、流域地形を表現するデジタル地形データが最も基礎的な情報と位置づけられている。流域地形の表現には、主に以下の3つのモデルが用いられる（図10-3）。

- ①GRIDモデル：地表面を規則的なグリッドに分割し、グリッドの各セルに標高値を与える方法である。構造が単純でコンピュータによる演算が比較的容易であることから、最も普及している。
- ②TINモデル：地表面を不規則な三角形に分割し、その頂点の標高値によって地形を表現する方法である。斜面および流路をそれぞれ三角形のポリゴン、ラインとして表現できるので実地形に対する再現性が高い。
- ③等高線モデル：等高線およびそれと直交する最急勾配線によって囲まれる領域を地表面の単位要素とする方法で、TINモデル同様、実地形に対する再現性（特に斜面における流水方向の再現性）が高い。

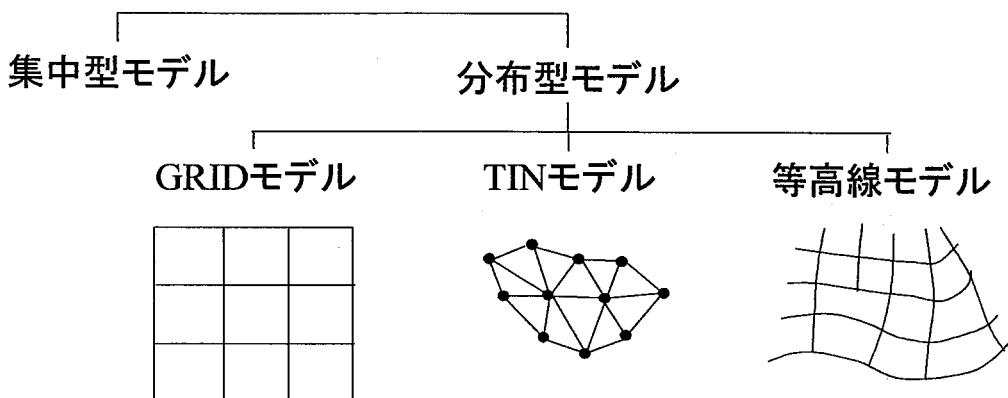


図10-3 DEMによる流域地形の表現方法

このうち、GRIDモデルを用いて水系網や流域界を抽出する方法は、O'Callaghan and Mark (1984), Band (1986) らによってアルゴリズムが提案され、Jenson and Domingue (1988) が開発したFORTRANプログラムによってGISへの導入が進んだ。その概要は以下の通りである（図10-4）。

- ①窪地処理（fill depressions）：各グリッドセルについて、隣接する8方向のセルとの標高差を求める。周囲のどのセルよりも標高が低いと判定されたセル（窪地）は、そのままでは流水の方向を算出できないので、隣接するセルの中の最低標高値まで、便宜的に標高値を嵩上げする。
- ②流水方向（flow direction）の算出：各セルについて、隣接する8方向のセルとの勾配を計算し、当該セルより標高が低く、かつ最も急勾配のセルへ水が流下するとみなす。
- ③流域面積の算出（flow accumulation）：②の情報をもとに上流から下流までの流水経路を決定し、各セルについて、上流側の累積セル数（流域面積）を算出する。
- ④水系網および流域界の抽出：③の情報をもとに、閾値以上の流域面積を持つセルを水系網（グリッド）として抽出し、ラスター・ベクター変換によって水系網（ライン）を生成させる。同時に、ある閾値以上の流域面積を持つセルを末端とする流域の抽出も可能である。

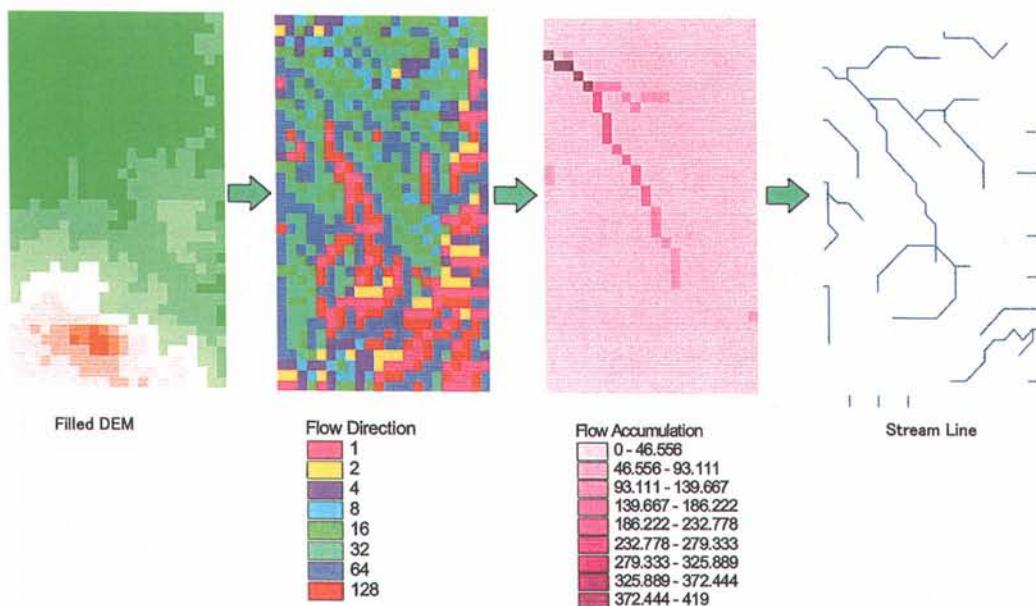


図10-4 GRIDモデルによる水系網の抽出

GRIDモデルを適用した分布型流出モデルの代表例として、デンマーク水理研究所 (Danish Hydraulic Institute) とイギリス水文研究所 (British Institute of Hydrology), フランスのSOGREAHによって共同開発されたSHE (Systeme Hydrologique European) モデルがある (図10-5 ; Abbot et al., 1986). このモデルでは、地表面がグリッドに分割されるとともに、各グリッドセルが鉛直方向に土層カラムを持つ構造になっている。各セルにおける樹冠遮断、蒸発散、地表流および河道流、不飽和浸透流、飽和浸透流、融雪の各コンポーネントが並列して計算され、必要に応じてコンポーネント同士でデータ交換が行われる。地下水の流れの計算は、鉛直方向1次元の不飽和浸透流と斜面方向2次元の飽和浸透流の2成分に単純化されている。各セルにおけるモデル定数（飽和透水係数など）を土地利用や土壤などの属性情報をもとに決めることにより、流域内における水文現象の不均一性 (heterogeneity) が表現される。本研究では、SHEモデルをGISと統合し、ユーザインターフェースを整備して商用アプリケーション化されたMIKESHE (DHI社製) を用いて流出解析を行った。

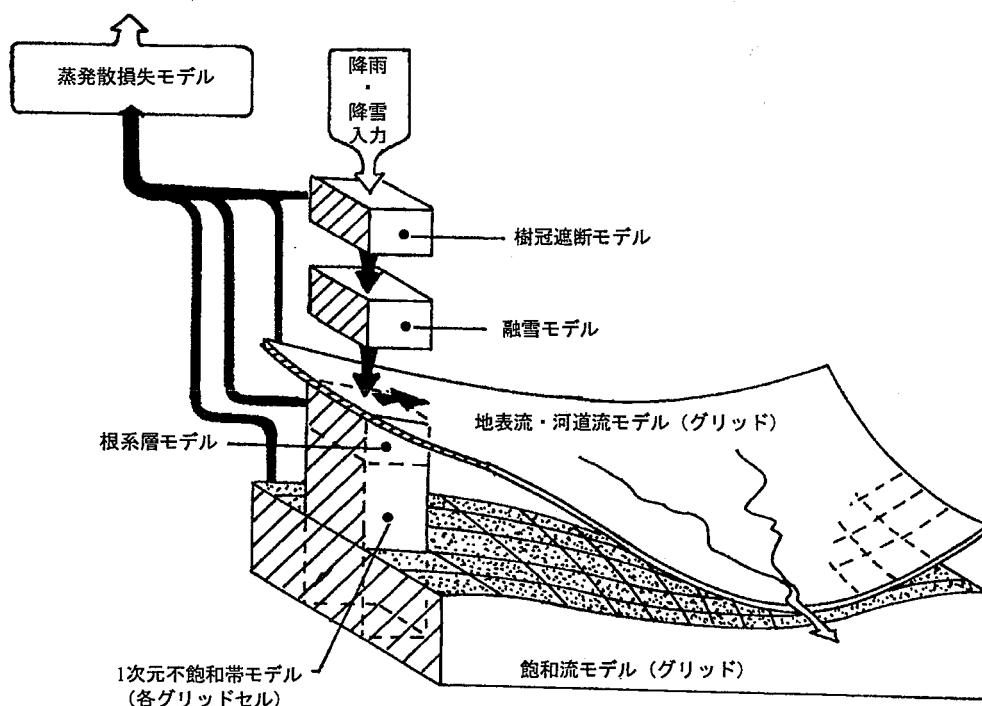


図10-5 SHEモデルの構造 (Abbot et al., 1986を改変)

2) モデル構築とデータ整備

MIKESHEは、モデル構築のための基本データとして、流域界、地形、降水量領域分布、降水量時系列の4つのデータを必要とする。これらのデータのうち、空間データである流域界と地形については、ESRI社のGISソフトArcViewにDEMを読み込ませてデータを作成した(図10-6)。なお、地形データは当初水平解像度10 mのDEM(第1章)をそのまま使用する予定であったが、MIKESHEの実行の際にデータが過多となり、不具合を生じたため、データの間引きによって水平解像度を20 mにしたDEMを使用した。また、地形改変の影響を検討するために、1984年と1990年代後半の2時期のDEMを共に用いた。降水量の領域分布については、観測点の分布が限られていたため、1流域につき流域内または近隣の1箇所の雨量観測地点におけるデータを用いることにした。降水量の時系列については、東京都から入手したオリジナルデータから時間単位データ(平均降雨強度: mm/h)を作成した。また、第6章で述べたように、東京都の水位観測データに水位流量曲線(H-Q式)を適用して流量データを作成し、検証用に用いた(以後、流量実測値と記す)。なお、蒸発散量については全降水量の約4割に相当するとみなし、有効降雨を全降水量の約6割とした。

次に、地表／河道、不飽和帯、飽和帯のコンポーネントを組み合わせてモデルを構築し、各コンポーネントに必要なデータ整備を行った。地表／河道コンポーネント(Overland/ChannelFlow)では、河道網データが必要となるため、Arcviewで生成した水系網データをポイントデータに変換し、MIKESHE上で河道網データに再編集した(図10-7, 10-8)。また、細密数値情報の土地利用データから都市的土地利用を抽出し、その範囲を不透水面とともに(図10-9)、土地利用ごとに地表面におけるマニングの粗度係数を定義した(図10-10)。

不飽和帯コンポーネント(Unsaturated Zone)では、土壤図(図10-11)及び各土壤類型の鉛直方向の空間刻み間隔、透水係数、水分特性曲線等を定義した。土壤図の作成の際には東京都の土地分類図(国土庁土地局国土調査課、1976)を参考にした。透水係数を定義する際には、土中のパイプといった土壤の不均質性を考慮した値を用いることが重要である。多摩丘陵では $10^{-3} \sim 10^{-5}$ m/sオーダーの値が実測されている(塚本、1992)ので、土壤表層(~2 m)においては 10^{-3} m/s、下層(2~10 m)においては 10^{-5} m/sを基準にキャリブレーションを行った。

飽和帯コンポーネント(Saturated Zone)では地層、透水係数、地下水位等を定義した。地層(レイヤー)の定義の際に、松井ほか(1990)の断面図等を参考に、不透水層までの厚さを10 m、透水係数を $10^{-5} \sim 10^{-6}$ m/s、地下水位を-5~-2 mとし、流域ごとにキャリブレーションを行った。

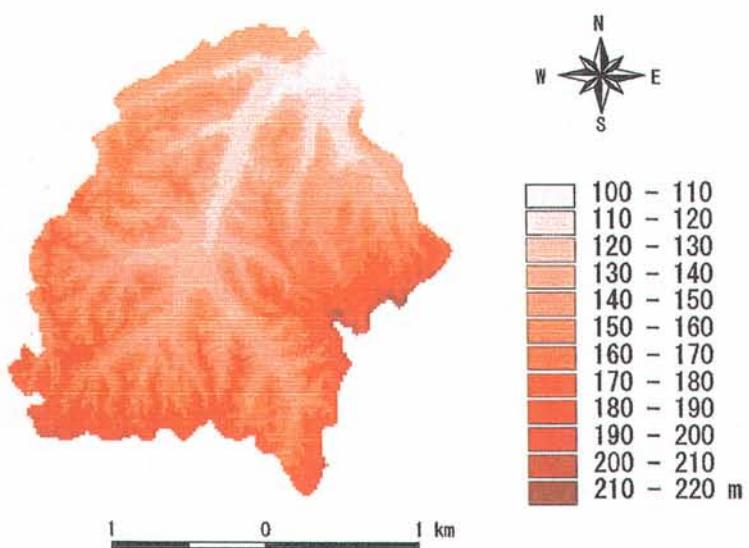


図10-6 MIKESHEの基本データの1つとしてのDEM
(兵衛川, 1984年の例)

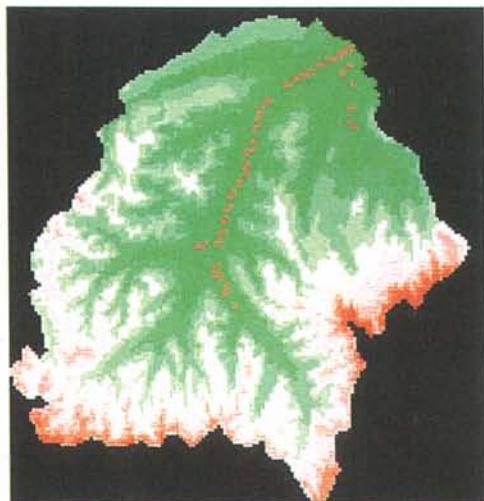


図10-7 Arcview上での河道ポイントデータ

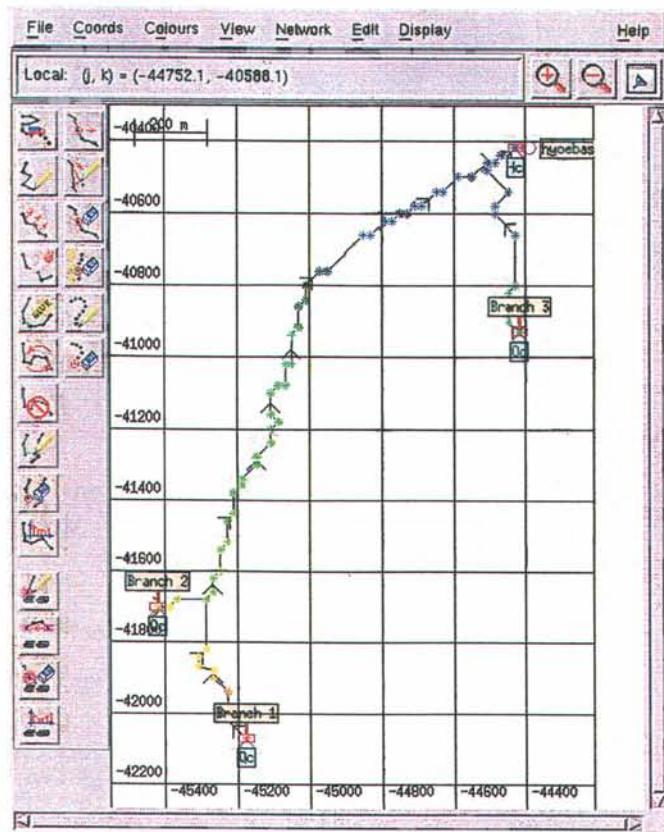


図10-8 MIKESHE上で作成した河道網データ

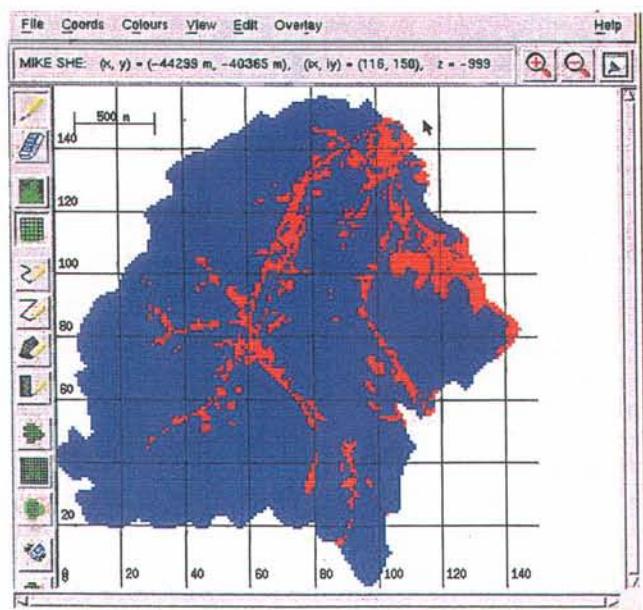


図10-9 都市的手地利用を不透水面（赤）として定義した図（兵衛川流域、1984年）

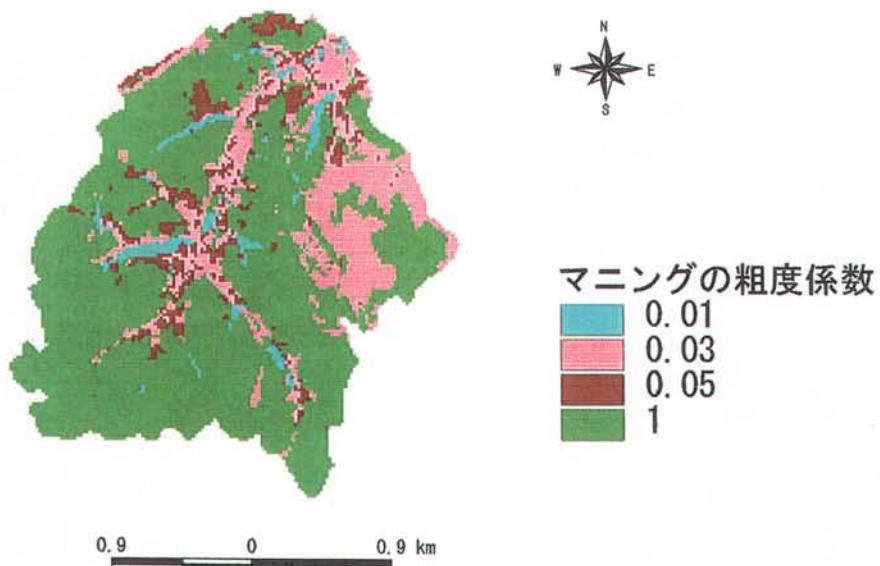


図10-10 土地利用ごとに定義したマニングの粗度係数（兵衛川流域、1984年）

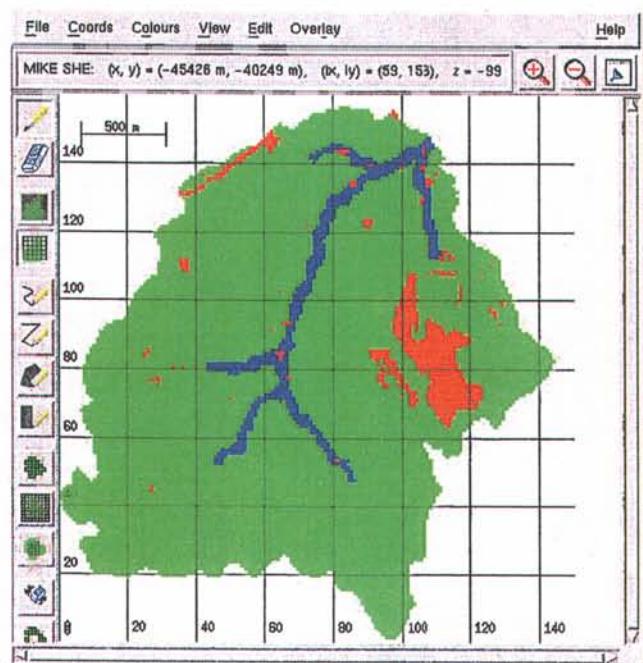


図10-11 土壤図（兵衛川流域、1984年）

青：黒ボクグライ土壌、緑：黒ボク土壌、赤：造成地

3) 計算結果

城山川, 兵衛川, 乞田川の流域において, 1984年及び1990年代後半のDEMと土地利用データ, および5~6月の降水量を入力データとして計算を行った結果を, 流量実測値とともに図10-12~10-17に示す。なお, MIKESHEでは計算の時間刻みが日単位で出力される。また, 地表流の発生地点を地図上で表示した結果を図10-18~10-23に示す。

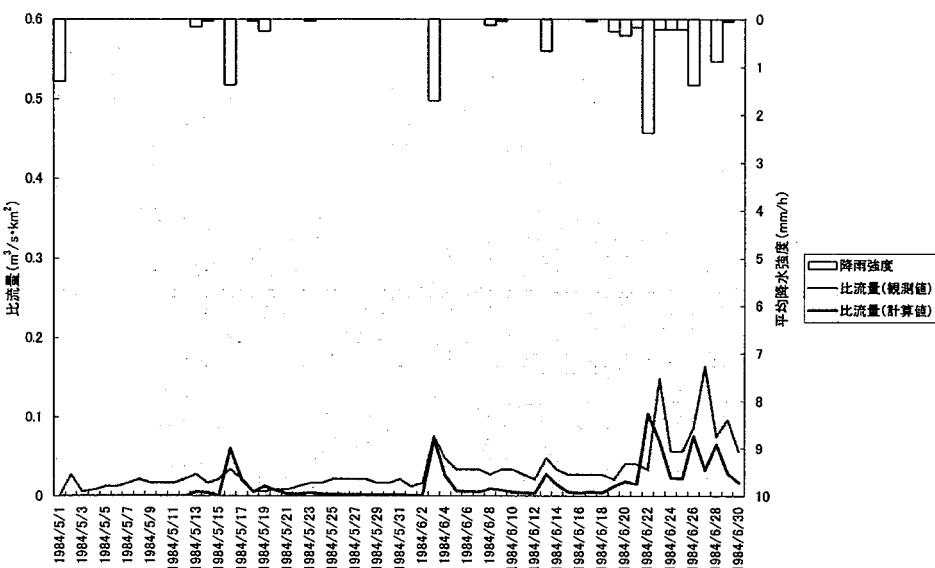


図10-12 城山川, 1984年5~6月

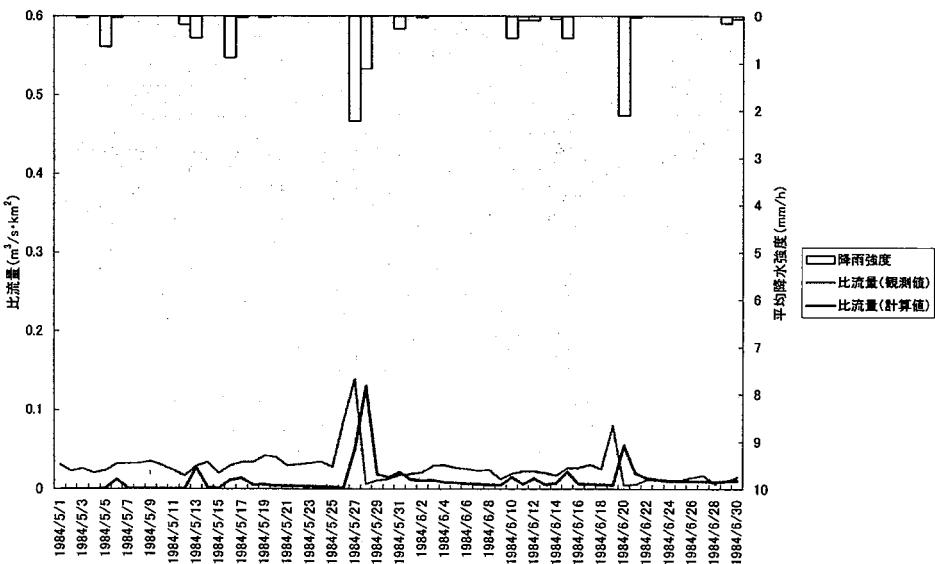


図10-13 城山川, 1994年5~6月

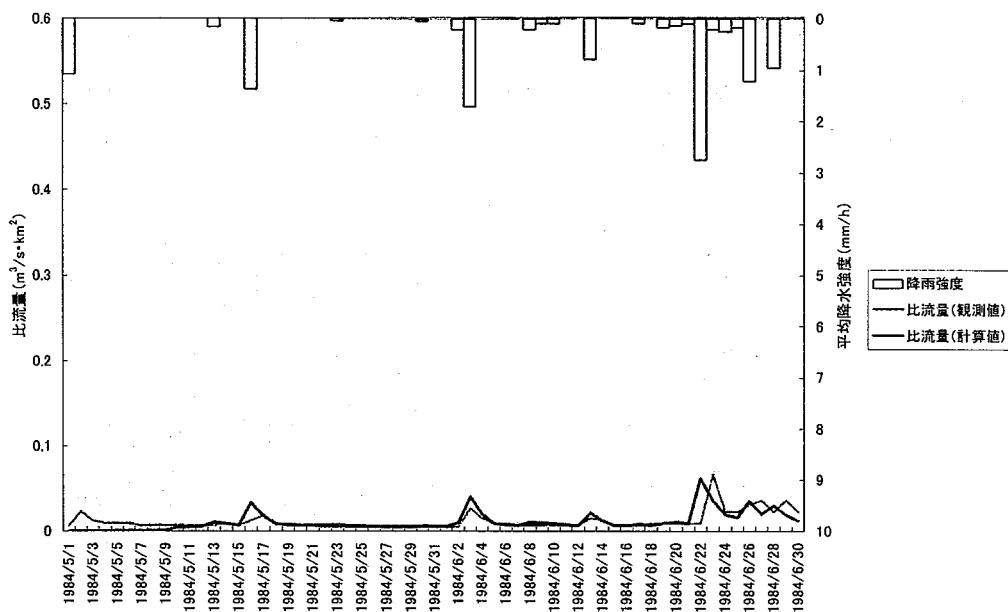


図10-14 兵衛川, 1984年5~6月

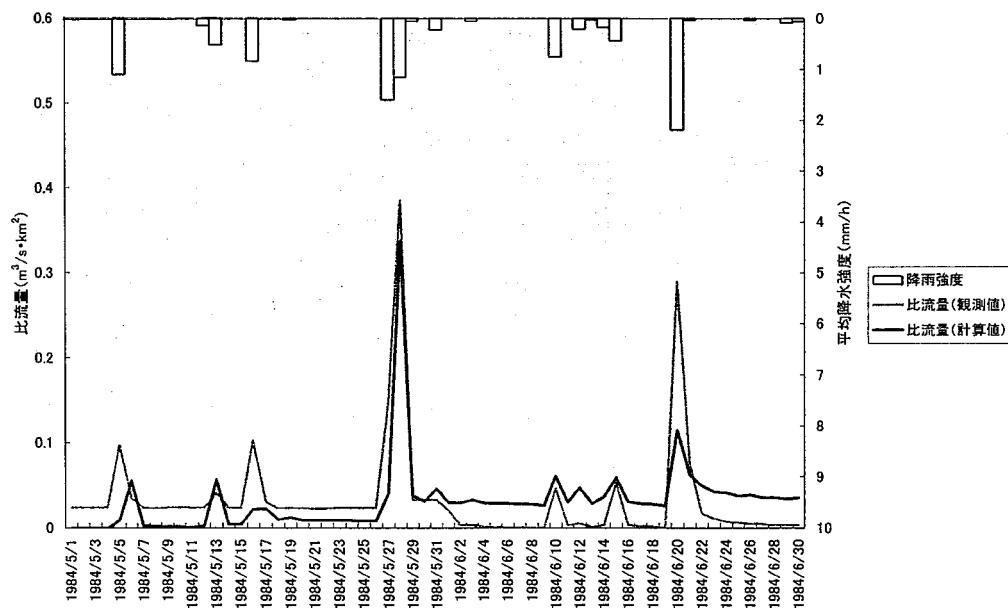


図10-15 兵衛川, 1994年5~6月

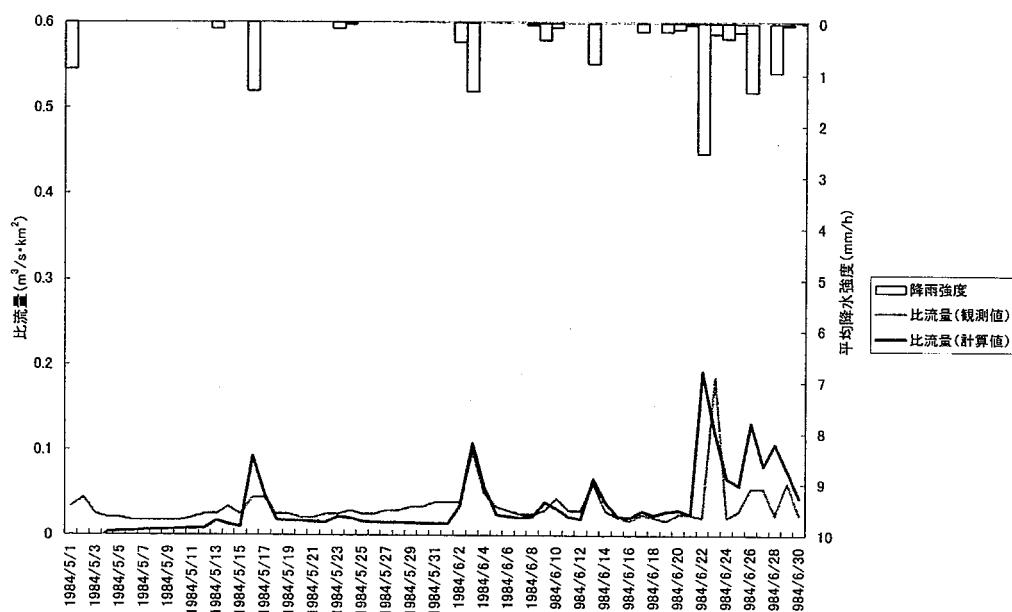


図10-16 乞田川, 1984年5~6月

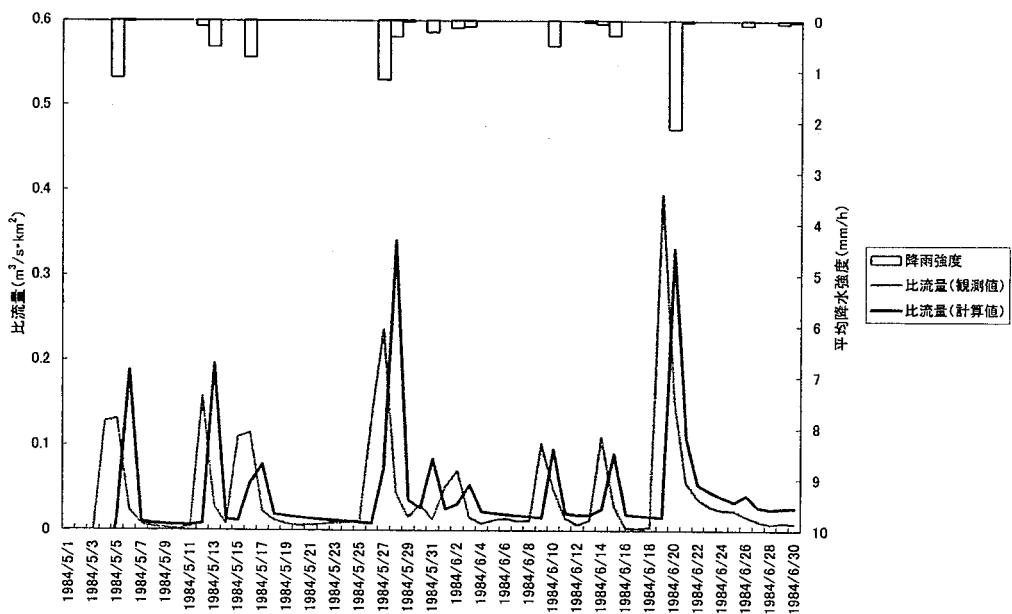


図10-17 乞田川, 1994年5~6月

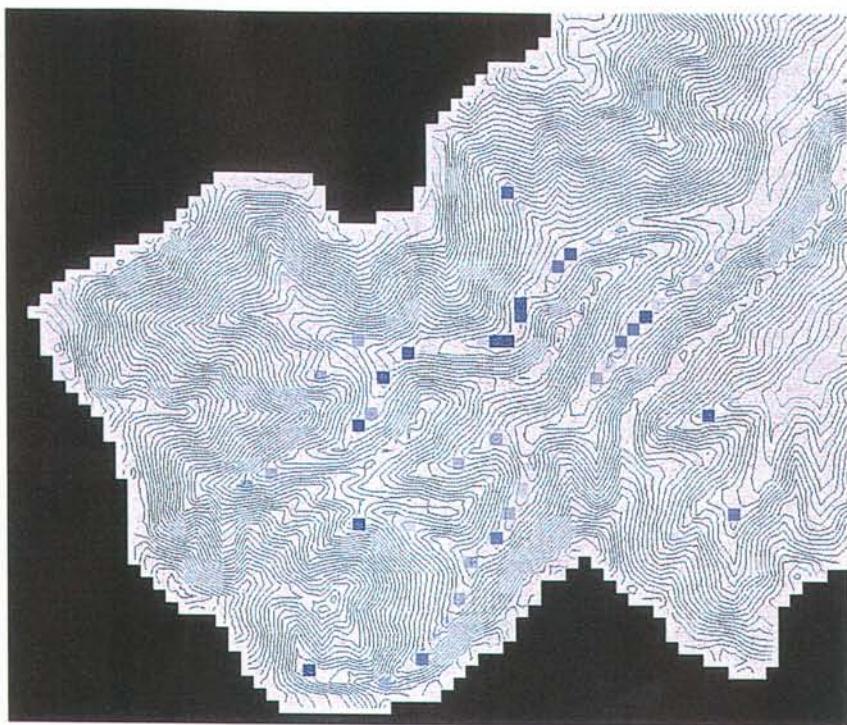


図10-18 城山川, 1984年6月22日

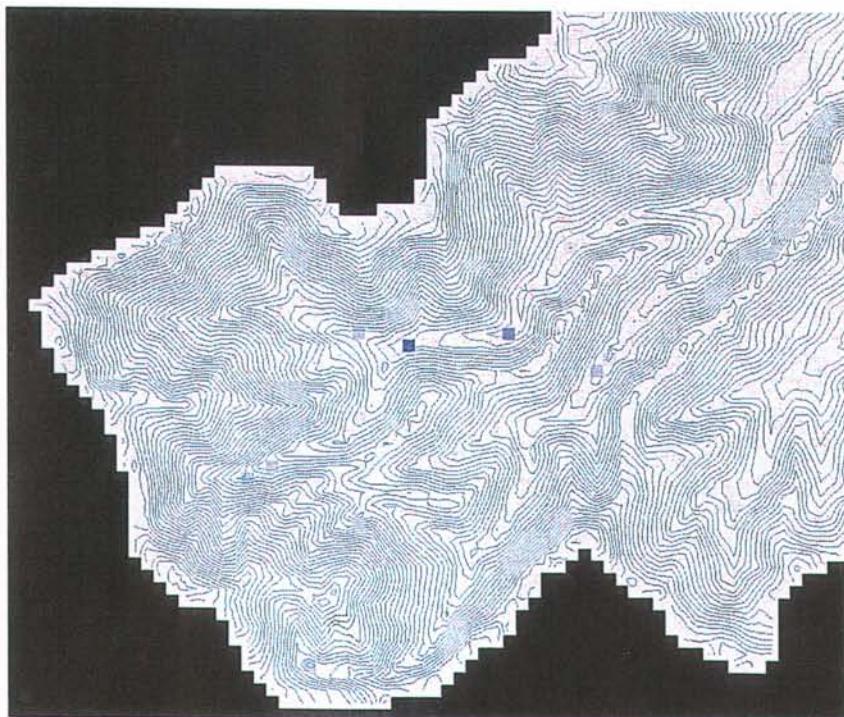


図10-19 城山川, 1994年5月28日

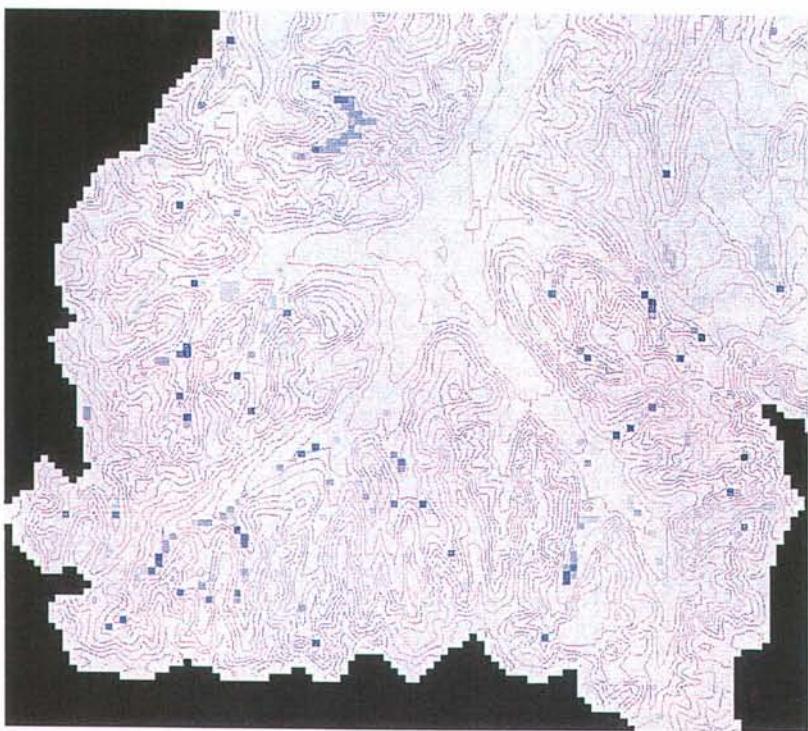


図10-20 兵衛川, 1984年6月22日

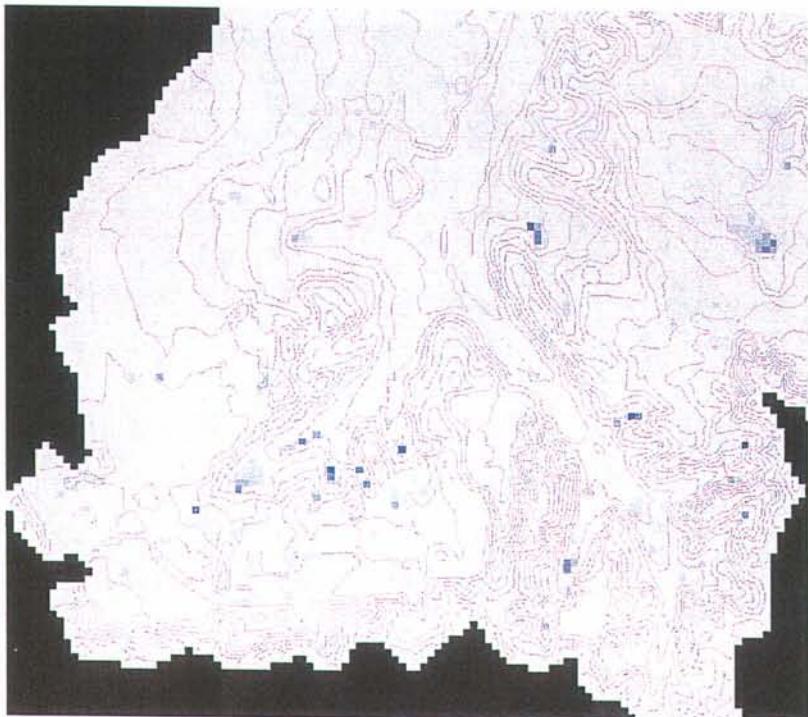


図10-21 兵衛川, 1994年5月28日

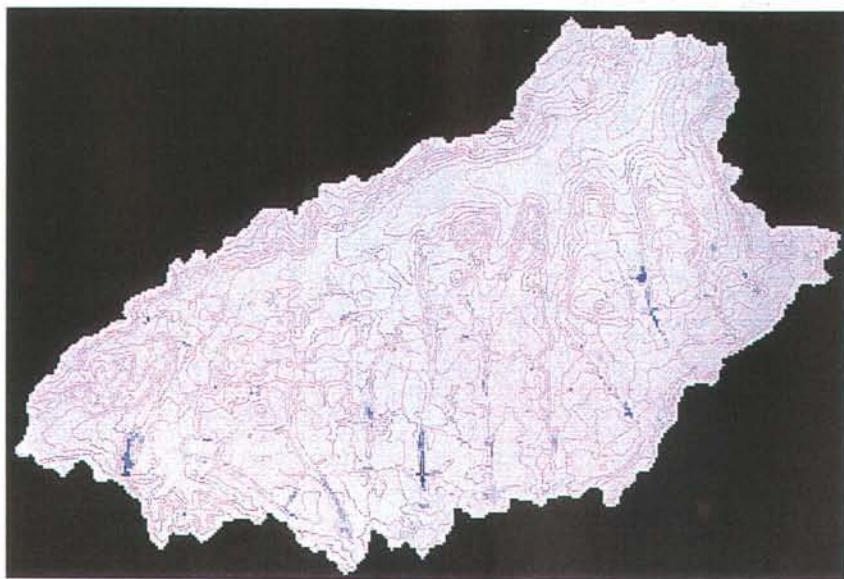


図10-22 乞田川, 1984年6月22日

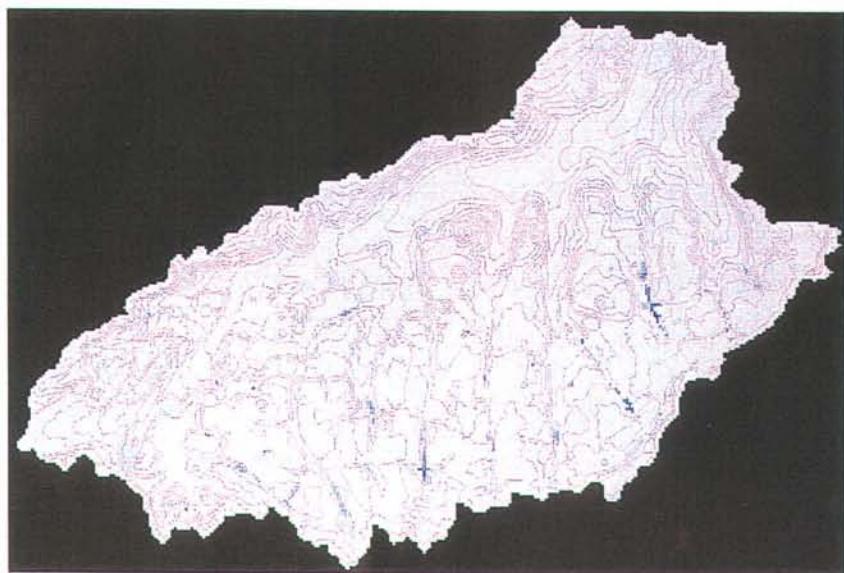


図10-23 乞田川, 1994年5月28日

4) 地形改変および都市化の影響

地形改変と都市化による土地利用変化が流出に与える影響を調べるために、兵衛川流域において、以下の4種類のデータセットによる計算結果を比較した（図10-25）。

- ① DEM、土地利用ともに1984年
- ② DEMが1990年代後半、土地利用は1984年
- ③ DEMが1984年、土地利用は1994年
- ④ DEMが1990年代後半、土地利用ともに1994年

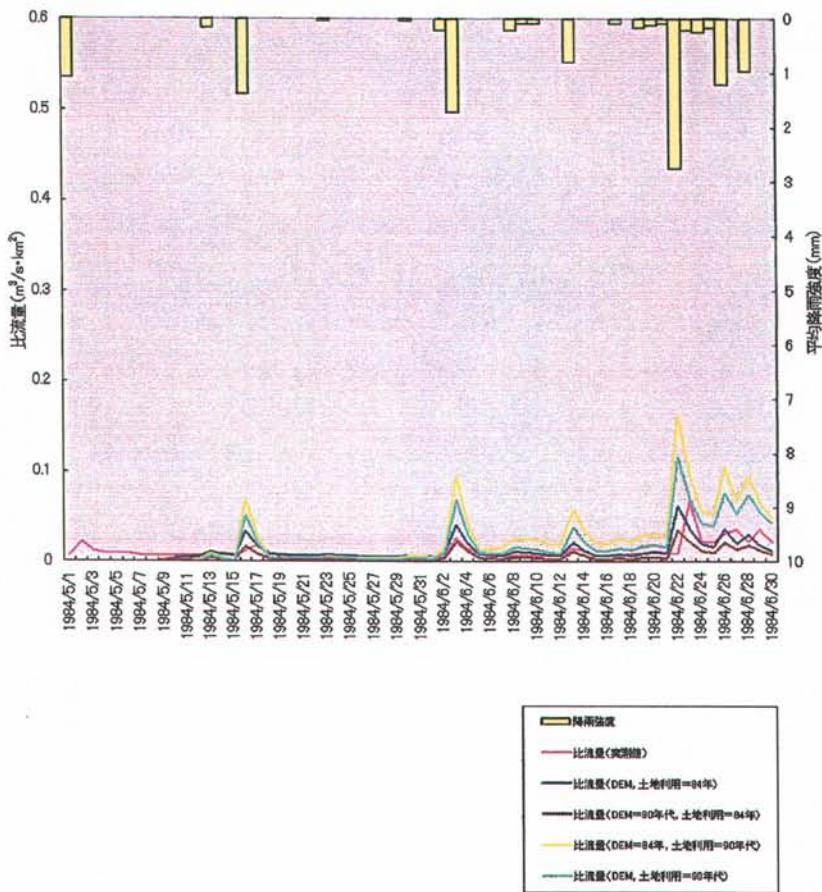


図10-24 地形改変と都市化が流出に与える影響のシミュレーション

4. 考察

1) 対象流域の流出特性比較

城山川、兵衛川、乞田川の3流域の流出特性を比較すると、1984年の比流量は兵衛川が最も小さく、城山川、乞田川の順に大きくなる。1984年における流域内の都市的土地利用の割合は、兵衛川18.0%，城山川28.6%，乞田川52.2%であったことから、比流量と都市的土地利用比率との間に正の相関が認められる。兵衛川流域では、1994年になると都市的土地利用比率が51.2%と上昇し、乞田川流域（65.1%）に近い値になったために、比流量も乞田川流域とほぼ等しい値を示すようになったと考えられる。

2) 地形改変と降雨流出特性との関係

流出モデルから推定される地表流の発生地点は、いずれの流域でも谷頭凹地といわれるような0次谷・1次谷の谷頭部分から谷筋に沿って分布する傾向がある。これらは実際の丘陵地における湧水の発生状況をある程度再現していると思われる。兵衛川流域では、地形改変後の1990年代後半には、流域西部が平滑化された斜面となり、それまで存在していた谷頭凹地が消滅したために、地表流の発生がほとんど見られなくなっている。

また、図10-24の結果から、土地利用は変わらず地形のみが改変された場合には、流量が減少するといえる。実際の人工地形改変は都市化を伴うため、この結果は現実的な意味をあまり持たないが、丘陵地の急斜面が平滑化されること自体は、流出を抑制する（地中での貯留を増大させる）方向に働くものと思われる。

3) 都市化と降雨流出特性との関係

図10-24の結果から、都市化による土地利用変化は流量を約2～3倍増大させることができると見える。しかし、1994年5～6月の兵衛川における流出の実態を見ると、5月28日のピーク比流量が $0.38 \text{ (m}^3/\text{s} \cdot \text{km}^2\text{)}$ と、1984年時点における同規模の降雨イベント（6月22日）での比流量 $0.066 \text{ (m}^3/\text{s} \cdot \text{km}^2\text{)}$ の約6倍となっていることから、実際の都市化の影響力はさらに大きい可能性もある。

5. まとめ

多摩川流域の丘陵地における人工地形改変および都市化が流出特性に与える影響を評価するために、多摩川支流の城山川・兵衛川・乞田川の3流域を対象として、GISと分布型流出モデル（MIKESHE）を統合的に利用した流出解析を行った。その結果、流域の都市的土地区画整理事業率が増すと比流量が増大する傾向にあり、都市化は流量を約2～3倍増大させることができた。一方、人工地形改変により谷頭凹地が消滅し斜面が平滑化されるために、地表流（湧水）の発生が減少し流出が抑制される（地中に貯留される）傾向も示された。

文献

- 太田猛彦, 1988. 森林山腹斜面における雨水の流出について. 水文水資源学会誌, 1-1, 75-82.
- 国土庁土地局国土調査課, 1976. 「土地分類図13（東京都）」.
- 新藤静夫, 1992. 集中流による斜面地下水の排出機構. 平成3年度科学研究費補助金（一般研究B）研究成果報告書（課題番号 01460266）「小起伏山地源流域の水文地形区分とその水循環制御機能の定量化に関する研究」（研究代表者：新藤静夫）, 5-17.
- 杉盛啓明, 大森博雄, 1996. 土地利用データによる多摩川中下流域の景観動態の把握. GIS－理論と応用, 4-2, 51-62.
- 田中 正, 安原正也, 丸井敦尚, 1984. 多摩丘陵源流域における流出機構. 地理学評論, 57-1, 1-19.
- 塚本良則, 1962. 山地流域内に起こる水文現象の解析. 東京農工大学演習林報告, 6, 1-79.
- 塚本良則編, 1992. 「森林水文学」文営堂出版.
- 松井 健, 武内和彦, 田村俊和編, 1990. 「丘陵地の自然環境」古今書院.
- Abbot, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E., Rasmussen, J., 1986. An introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system. Journal of Hydrology, 87, 61-77.
- Band, L.E., 1986. Topographic partition of watersheds with digital elevation models. Water Resources Research, 22, 15-24.
- Carpenter T.M., Sperflage J.A., Georgakakos K.P., 1999. National threshold runoff estimating utilizing GIS in support of operational flash flood warning systems. Journal of Hydrology, 224, 21-44.

- De Roo A.P.J., 1998. Modelling runoff and sediment transport in catchment using GIS. *Hydrological Processes*, 12, 905-922.
- Drayton R.S., Wilde B.M., Harris J.H.K., 1992. Geographical information system approach to distributed modelling. *Hydrological Processes*, 6, 361-368.
- Jenson, S.K., Domingue, J.O., 1988. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54, 1593-1600
- O'Callaghan, J.F., Mark, D.M., 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 28, 323-344.

第Ⅲ部

広域における多摩地域の位置づけ

第11章

愛知県瀬戸地域と多摩丘陵の疑似高解像度DEM作成時における 補間法の適合度

小口 高・勝部圭一・宮崎千尋・高橋昭子・南里明子・鈴木康弘

1. はじめに

第5章では、多摩丘陵の10-m DEMを用いて、50-m DEMから擬似的な10-m DEMを作成する際に有効な補間法について検討した。一方、小口・勝部（1999, 2000）は、愛知県瀬戸地域の丘陵地と山地を対象に、空中写真測量で作成された5-m DEMを用いて、25-m DEMもしくは50-m DEMから擬似的な5-m DEMを作成する手法を検討している。両者の結果を比較することは、行われた検討の普遍性と地域性を考える際に重要である。そこで本章では、多摩丘陵と瀬戸地域に関する疑似高解像度DEMの精度を、使用した補間法に注目して比較する。

2. 瀬戸地域における研究の概要

小口・勝部（1999, 2000）が取り上げた瀬戸地域の研究対象地域は、「海上の森」と呼ばれる瀬戸市近郊の丘陵地と、隣接する東京大学愛知演習林の一部であり（図11-1），後者は中～低山に位置する。海上の森については約 2.7×2.8 km，愛知演習林については約 1.1×1.8 kmの長方形の地域を対象とし、1/14,000白黒空中写真にデジタル写真測量を適用して作成した5-m DEM（杉盛ほか, 2000）から地域内のデータを切り出した。次に、切り出したDEMを間引いて25-m DEMと50-m DEMを作成し、そこに多様な補間法を適用して擬似的な5-m DEMを作成した。適用した補間法は第5章の多摩地域の事例と共通のものが多いが、一部は異なる（表11-1）。すなわち、三次畳み込み内挿法（c）、自然近隣内挿法（na）、修正シェパード法（s）は多摩地域のみに適用され、多項式回帰法（p）のcubicと10次、動径基底関数法（r）の一部、および非修正のシェパード法（so）は瀬戸地域のみに適用されている。

続いて、補間にによって得られたDEMの各セルの標高値を、元の5-m DEMの値と比較した。

比較の際には、多摩地域と同様に標高値の差の二乗平均誤差（RMSE）と平均誤差（ME）を算出し（表11-2），それらが小さい場合に補間法の適合度が高いとみなした。表11-3は，適合度が高い10種類の補間法とその適合の順位を示している。

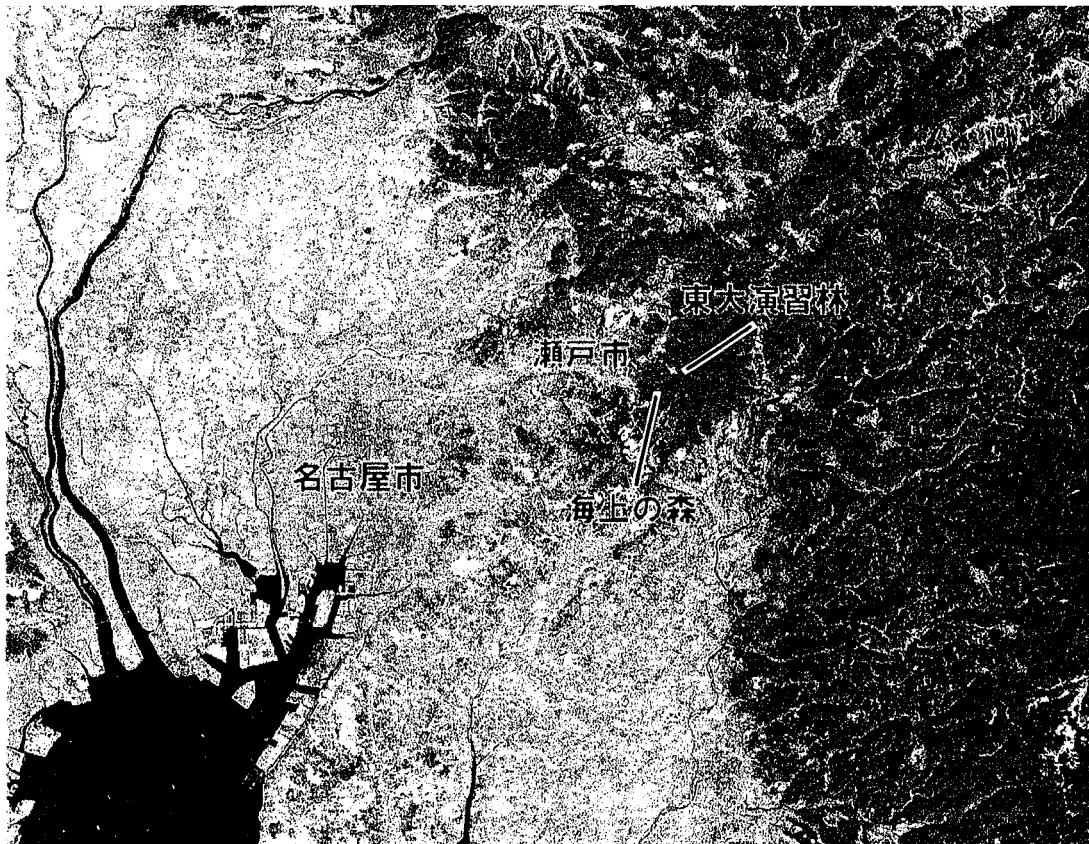


図11-1 調査地域の位置

各補間法の適合度については以下の傾向が認められる。適合度の最良の指標と考えられる二乗平均誤差の値をみると、全ての場合において、薄版スプライン関数を用いた動径基底関数法（r3a, r3b）が最小の値を示した。次に値が小さいのは二次曲面もしくは三次スプライン関数を用いる動径基底関数法（r2a, r2b, r5a, r5b）であり、次いでクリギング（k）の一部と最小曲率法（m）の値が小さい。

平均誤差については、二乗平均誤差の場合のような共通の傾向は不明瞭であるが、最近隣

法 (ne), 動径基底関数法 (r) の一部およびクリギング (k) の一部で誤差が小さい場合が多い。他の誤差が小さい手法は、海上の森では平滑化を行わないシェパード法 (sol) と多項式回帰法 (p) であり、東大演習林では逆距離加重法 (i) である。

元のデータが25-m DEMの場合と50-m DEMの場合とを比較すると、二乗平均誤差に基づいて判定した適合度の高い手法はほぼ一致するが、平均誤差に基づく適合度の順位は同じ地域であってもかなり変動する。

表11-1 多摩地域と瀬戸地域に適用した補間法

コード	補間方法	オプション	近似	多摩	瀬戸
c	三次畳み込み法		近似	○	
i1	逆距離加重法	べき数 = 1	厳密	○	○
i2		べき数 = 2	厳密	○	○
i3		べき数 = 3	厳密	○	○
k1	クリギング	バリオグラム = exponential, no nugget effect	厳密	○	○
k2		バリオグラム = Gaussian, no nugget effect	厳密	○	○
k3		バリオグラム = hole effect, no nugget effect	厳密	○	○
k4		バリオグラム = linear, no nugget effect	厳密	○	○
k5		バリオグラム = quadratic, no nugget effect	厳密	○	○
k6		バリオグラム = rational quadratic, no nugget effect	厳密	○	○
k7		バリオグラム = spherical, no nugget effect	厳密	○	○
m	最小曲率法		近似	○	○
na	自然近隣内挿法		厳密	○	
ne	最近隣法		厳密	○	○
p1	多项式回帰法	関数 = simple planar	近似	○	○
p2		関数 = bi-linear saddle	近似	○	○
p3		関数 = quadratic	近似	○	○
p4		関数 = cubic	近似		○
p10		関数 = 10 dimensions	近似		○
r1a	動径基底関数法	関数 = multilog; R^2 = original grid interval (OGI)	近似	○	○
r1b		関数 = multilog; R^2 = half of OGI	近似	○	○
r2a		関数 = multiquadric; R^2 = OGI	近似	○	○
r2b		関数 = multiquadric; R^2 = half of OGI	近似	○	○
r3a		関数 = thin plate spline; R^2 = OGI	近似	○	○
r3b		関数 = thin plate spline; R^2 = half of OGI	近似	○	○
r4a		関数 = inverse multiquadric; R^2 = OGI	近似		○
r4b		関数 = inverse multiquadric; R^2 = half of OGI	近似		○
r5a		関数 = natural cubic spline; R^2 = OGI	近似		○
r5b		関数 = natural cubic spline; R^2 = half of OGI	近似		○
so1	シェバード法	平滑化パラメータ = 0	厳密		○
so2		平滑化パラメータ = 1	近似		○
so3		平滑化パラメータ = 2	近似		○
s1	修正シェバード法	平滑化パラメータ = 0	厳密	○	
s2		平滑化パラメータ = 1	近似	○	
s3		平滑化パラメータ = 2	近似	○	
t	三角形網法		厳密	○	○

 R^2 は平滑化のパラメータ (Keckler 1995) である。

表11-2 瀬戸地域に適用した補間法の平均誤差 (ME, mm) と二乗平均誤差 (RMSE, m)

補間法 コード	海上の森				東大演習林			
	25-m DEM使用		50-m DEM使用		25-m DEM使用		50-m DEM使用	
	ME	RMSE	ME	RMSE	ME	RMSE	ME	RMSE
i1	-30.69	16.59	-38.86	40.54	-26.11	11.08	119.77	149.10
i2	-10.00	7.30	-19.36	21.34	-3.65	21.56	131.21	71.44
i3	-3.69	4.73	-14.38	16.27	-18.11	15.11	147.72	51.08
k1	-2.89	2.79	-15.24	13.15	-13.13	9.34	210.49	35.45
k2	-11.31	8.52	-8.19	19.71	-26.15	13.13	251.19	39.41
k3	-3.41	10.58	-13.29	29.35	-60.19	23.10	236.46	81.44
k4	-2.91	2.79	-15.31	13.15	-12.86	9.34	212.59	35.44
k5	-2.88	2.79	-15.24	13.15	-13.15	9.34	210.34	35.44
k6	-7.21	4.26	-12.87	17.33	-24.12	10.63	249.27	53.05
k7	-2.91	2.79	-15.30	13.15	-12.89	9.33	212.38	35.42
m	-4.08	2.55	-16.22	12.86	0.43	8.94	319.82	341.65
ne	-2.42	8.79	-6.84	27.31	0.89	30.75	227.50	93.34
p1	69.26	405.62	141.51	389.61	-203.38	2236.56	-220.70	2238.56
p2	69.24	317.50	141.50	309.70	-203.40	1353.77	-220.72	1358.54
p3	14.60	310.00	9.48	301.77	-262.56	908.96	-311.17	914.47
p4	14.56	180.14	8.94	190.09	-261.83	1412.22	-310.75	757.20
p10	42.63	200.15	72.01	185.15	447.16	926.88	-28376.33	#
r1a	-2.39	3.22	-11.59	15.01	-19.43	10.81	134.05	44.97
r1b	-1.68	3.82	-9.42	16.48	-25.79	12.35	100.31	50.71
r2a	-3.79	2.42	-15.37	12.47	-11.49	8.77	221.59	33.23
r2b	-3.60	2.49	-15.40	12.60	-11.68	8.86	219.40	33.69
r3a	-4.40	2.31	-14.21	12.36	-13.11	8.74	243.59	32.09
r3b	-4.38	2.31	-14.31	12.35	-12.80	8.72	243.76	32.08
r4a	-10.35	7.13	-23.20	27.36	-2.11	23.48	83.87	103.32
r4b	-16.93	10.26	-29.45	34.08	12.47	32.78	71.82	131.27
r5a	-4.77	2.32	-12.41	12.58	-17.35	8.91	243.21	32.40
r5b	-4.76	2.32	-12.44	12.57	-17.27	8.89	243.22	32.38
so1	-0.43	15.48	-9.00	33.09	-28.47	52.54	-425.71	135.43
so2	-96.97	64.63	-38.47	115.12	241.92	252.55	-1271.36	574.57
so3	-97.20	64.72	-38.14	115.74	245.93	254.29	-1295.47	588.49
t	-3.69	3.46	-18.91	14.35	-26.11	11.08	137.96	40.35

#は値がきわめて大きく集計しなかったことを示す

表11-3 瀬戸地域に適用した補間法の適合度の上位10位とその順位

補間法 コード	海上の森				東大演習林			
	25-m DEM使用		50-m DEM使用		25-m DEM使用		50-m DEM使用	
	ME	RMSE	ME	RMSE	ME	RMSE	ME	RMSE
i1							4	
i2					4		5	
i3							8	
k1	6						10	10
k2			2					
k3	9							
k4	8	10			9		9	
k5	5	9			10		10	9
k6			10					8
k7	7	8			8	9	8	
m		7			7	1	7	
ne	4		1			2		
p1								
p2								
p3			6					
p4			3					
p10								
r1a	3		7				6	
r1b	2		5				3	
r2a		5			3	5	3	
r2b	10	6			6	6	4	
r3a		1			2	10	2	
r3b		2			1	8	1	
r4a						3		2
r4b						7		1
r5a		4	8	5			6	
r5b		3	9	4			5	
so1	1		4					
so2								
so3								
t							7	

3. 瀬戸地域と多摩地域との比較

瀬戸地域における小口・勝部（1999, 2000）の研究では、標高値のみを用いて補間法の適合度を判定しており、第5章の多摩地域における研究で行われた、傾斜や縦断曲率の再現性に関する検討は行われていない。しかし一般に、標高値が正確であれば、標高値から計算される傾斜や縦断曲率の正確さも増すと考えられるので、標高値のみを取り上げた検討にも十分に意義があるといえる。そこで、瀬戸地域の標高値に関する検討結果を、多摩地域での標高値に関する結果（表5-2, 5-3の左側の列）と比較する。

二乗平均誤差については、多摩地域と瀬戸地域の全ての事例で、薄版スプライン関数を用いた動径基底関数法（r3a, r3b）が最小の値を示した。また、最小曲率法（m）とクリギング（k）の一部で誤差が小さいのも両地域で共通の傾向である。一方、二次曲面を用いる動径基底関数法（r2a, r2b）は瀬戸地域のみで適合度が高い。

平均誤差が小さい補間法は、両地域ともに場所やDEMの解像度に応じて異なっている。ただし多摩地域では、薄版スプライン関数を用いた動径基底関数法（r3a, r3b）、平滑化を行わない修正シェパード法（s1）、直線のバリオグラムを用いたクリギング（k4）といった、二乗平均誤差の小さな手法で平均誤差も小さくなる傾向がある。一方、瀬戸地域ではそのような傾向が不明瞭で、二乗平均誤差と平均誤差に基づく補間法の適合順位が大きく異なることが多い。

以上のように、二乗平均誤差を適合度の指標として用いると、薄版スプライン関数を用いた動径基底関数法（r3a, r3b）が疑似高解像度DEMの作成に最も有効と判断される。最小曲率法（m）とクリギング（k）も有用といえるが、第5章でも指摘したように、クリギングを用いる際には現実のバリオグラムに近い関数を使用することが重要である。また、平均誤差が小さい補間法は事例ごとに異なる傾向が強いため、二乗平均誤差と平均誤差を同時に小さくするような補間法の選択は困難といえる。

4. おわりに

本章では多摩地域と瀬戸地域におけるDEMの補間法の有用性を比較検討した。その結果、薄版スプライン関数を用いた動径基底関数法の有用性が明らかとなった。今後、結果の普遍性を確認するためには、より多くの事例研究が必要である。また、平均誤差が小さい補間法

は多様なことが判明したが、今後事例を増やしていくれば、多様性の中に潜む何らかの傾向を見いだせるかもしれない。さらに、地域間の比較のためには、適用する補間法の完全な統一も必要である。今回は瀬戸地域については小口・勝部（1999, 2000）が整備したデータを用いたため、多摩地域での検討と一部の補間法が異なっていた。今後、これらの課題に関連した検討を行っていく必要がある。

文献

- 小口 高, 勝部圭一, 1999. 5 mメッシュDEMによる丘陵地の地形解析の新展開. 愛知県企画部:近未来社会対応型情報通信産業振興事業 近未来型社会に対応する地域環境シミュレーションシステムの構築, 平成10年度成果報告書, 2-2, 1-33.
- 小口 高, 勝部圭一, 2000. 細密DEMを用いた地形解析. 杉盛啓明, 青木賢人, 鈴木康弘,
- 小口 高編「デジタル観測手法を統合した里山のGIS解析」中日新聞社, 19-26.
- 杉盛啓明・青木賢人・鈴木康弘・小口 高編, 2000. 「デジタル観測手法を統合した里山のGIS解析」中日新聞社.

第12章

多摩丘陵と愛知県の丘陵地における流出特性の比較

杉盛啓明・恩田裕一・糸数 哲・Dhakal, A.S.・Sidle, R.C.・鈴木康弘

1. はじめに

多摩丘陵の基盤岩は上総層群であり、その上位に御殿崎礫層、関東ローム層、黒ボク土が堆積している。一方、愛知県瀬戸市周辺には花崗岩を基盤岩とする丘陵地が分布しており、ここでは最近、GIS、リモートセンシング、詳細な現地調査などに基づく自然環境の総合的な研究が行われた（杉盛ほか、2000；半田、2002）。瀬戸市周辺の丘陵地では、1950年頃までは陶器製造用燃料を得るための薪炭林としての土地利用が卓越し、場所によっては過度の伐採や陶土採掘による裸地の拡大が見られた。しかし1950年代の燃料革命以降、薪炭林としての需要はほとんどなくなり、裸地化した斜面では治山事業や自然の遷移による植生回復が進んでいる。本章では、瀬戸市周辺の花崗岩丘陵地における植生回復に伴う流出変化と、多摩丘陵における都市化に伴う流出変化との比較考察を行う。

2. 地域の概要

瀬戸市周辺で取り上げた流域は、東京大学愛知演習林内の小流域(4.8 ha)である（図12-1）。空中写真によると、1964年には複数の0次谷に裸地が分布していたが、その後は植生回復が進み、1998年には小規模な裸地が一部の尾根上のみに残存していた（図12-2）。



図12-1 研究対象地域

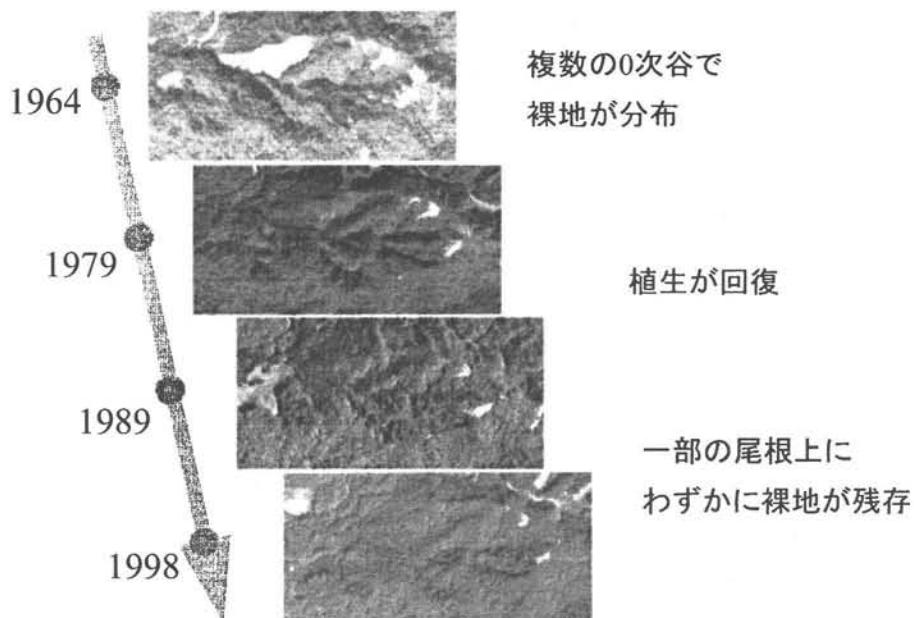


図12-2 対象流域における過去50年間の裸地分布状況の変化

3. 分布型流出モデルによる流出解析

1) 流域の要素分割

対象流域は丘陵地源流に位置し、4.8 haと空間スケールが小さい。この流域の微細な斜面地形を正確に表現するために、等高線モデル（dSLAM II; Wu and Sidle, 1995）を適用し、対象流域を等高線とそれに直交する流線を境界とする地形要素ポリゴンに分割した（図12-3）。

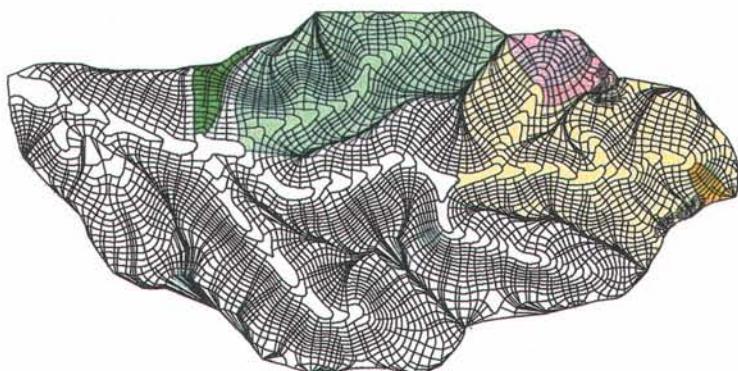
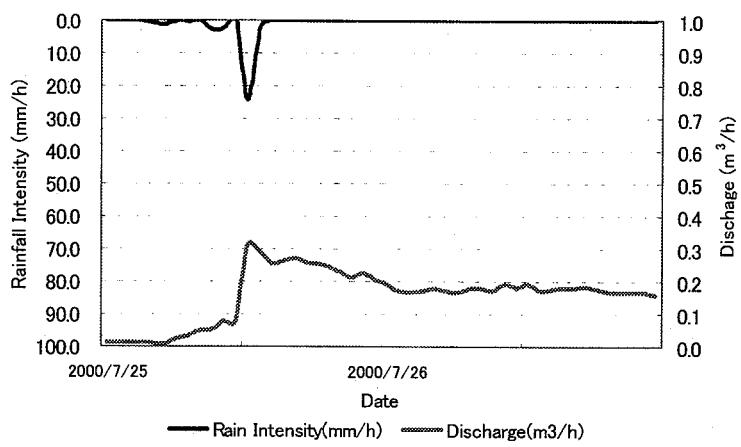


図12-3 dSLAM IIによる流域地形の要素分割
色分けされた領域は現地で水文観測を行った小流域

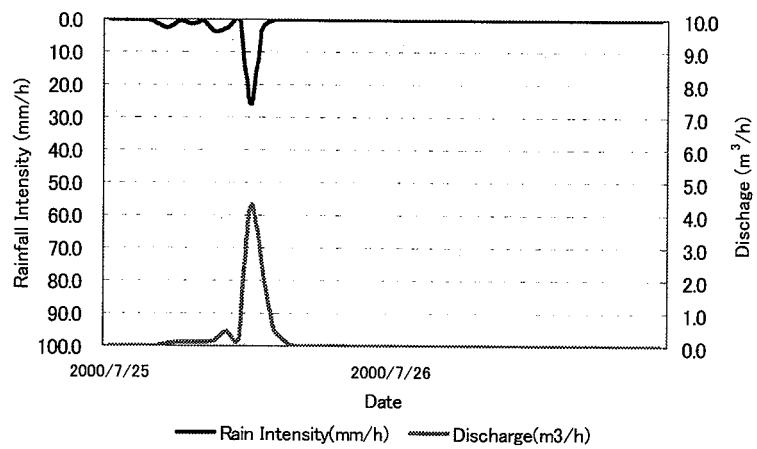
2) 植生状態の異なる流域の流出特性

森林に覆われた小流域（以下、A流域）と裸地が残存する小流域（以下、D流域）における水文観測の結果、植生状態の違いによる流出特性の違いが確認できた。すなわち、A流域では、ピーク流量が小さく降雨後緩やかに流量が減少するが（図12-4）、D流域では、ピーク流量が大きく降雨後速やかに流量が減少する（図12-5）。これは、D流域では地表流が発生していることを示している。



Observed hyetograph and observed runoff hydrograph
at the outlet of the basin A for the rain event: 25–26July, 2000.

図12-4 A流域（森林に覆われた流域）における水文観測データ



Observed hyetograph and observed runoff hydrograph
at the outlet of the basin D for the rain event: 25–26July, 2000.

図12-5 D流域（裸地が残存する流域）における水文観測データ

3) 流出モデルによる解析

dSLAM IIを適用し、植生状態の違いによる流出特性の違いをモデルで再現した。すなわち、キネマティックウェーブ法により流れを表現し、流域斜面を地中流が流下する場合にはDarcyの法則を適用し、地中流に加えて地表流が発生する場合に、Manningの法則の項を追加するという場合分けを行うとともに（図12-6）、A流域およびD流域の地形要素ポリゴン毎に、土地条件（植生の有無）によりパラメータを設定した（表12-1、図12-7）。

流出モデルのキャリブレーションの際には、2000年7月25～26日の降雨イベントにおける現地観測データを用いた。このパラメータを用いて2000年9月11～12日の降雨イベント（東海豪雨）の現地観測データとの検証を行ったところ、適合性を高めるにはマニングの粗度係数を小さくする必要があった。これは、東海豪雨時の地表流が通常の降雨イベントとは異なる現象であったためと解釈する。粗度係数の調整により、A流域、D流域ともに複数のピーク流量が再現され、良好な結果が得られた（図12-8）。

$$\frac{\delta A}{\delta t} + \frac{\delta Q}{\delta x} = \frac{i A_e}{x_e}$$

A: 流水断面積 i: 降雨強度
Q: 流量 A_e: 単位要素の面積
x_e: 単位要素の斜面長

(1) 地中流のみの場合 (Darcyの法則)

$$Q = \omega h K \sin \beta \quad (0 \leq A \leq \omega \varepsilon D)$$

(2) 地中流+地表流の場合 (Manningの法則の項を追加)

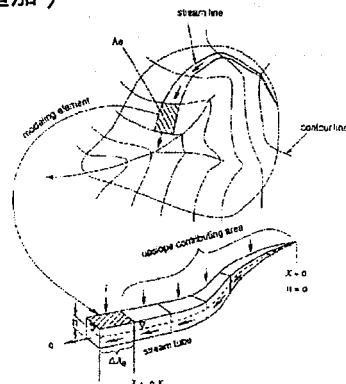
$$Q = \omega D K \sin \beta + \alpha A_c^m \quad (A > \omega \varepsilon D)$$

ω : 単位要素の幅; h : 水位; K : 飽和透水係数; β : 斜面傾斜

D : 土層厚; ε : 有効間隙率; $A_c = \omega(h-D)$

$\alpha = n^{-1} \omega^{2/3} \tan^{1/2} \beta$, $m = 5/3$ (斜面)

$\alpha = n^{-1} \zeta^{2/3} \tan^{1/2} \beta$, $m = 4/3$ (流路)



(Wu and Sidle, 1995)

図12-6 dSLAM IIの流出解析モジュールによる流出解析

表12-1 土地条件別のパラメータ設定

流域名	土地条件	n		D	K	ε
		2001/7/25	2001/9/11			
A流域	植生に覆われた斜面	0.15	0.02	0.8	5	0.1
	流路	0.15	0.02	0.005	5	0.1
D流域	植生に覆われた斜面	0.03	0.003	0.4	5	0.1
	裸地斜面	0.003	0.003	0.0001	5	0.1

n : マニングの粗度係数

D : 土層厚 (m)

K : 飽和透水係数 (m/h)

ε : 有効間隙率

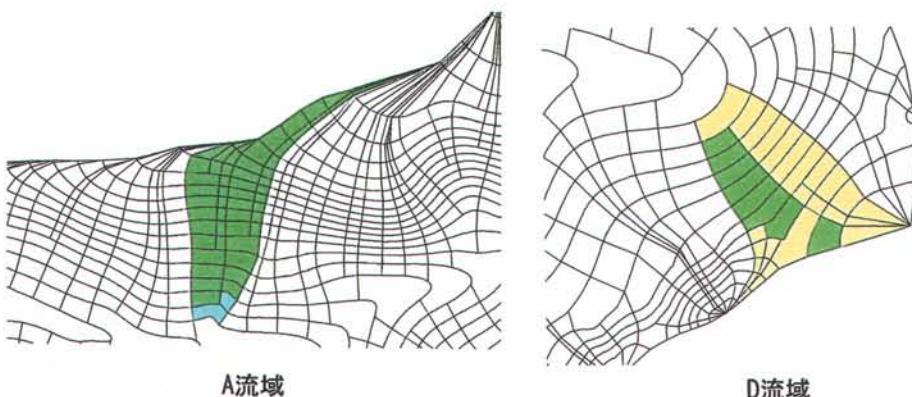


図12-7 A流域及びD流域における地形要素ポリゴン毎のパラメータ設定

色分けは表12-1に対応

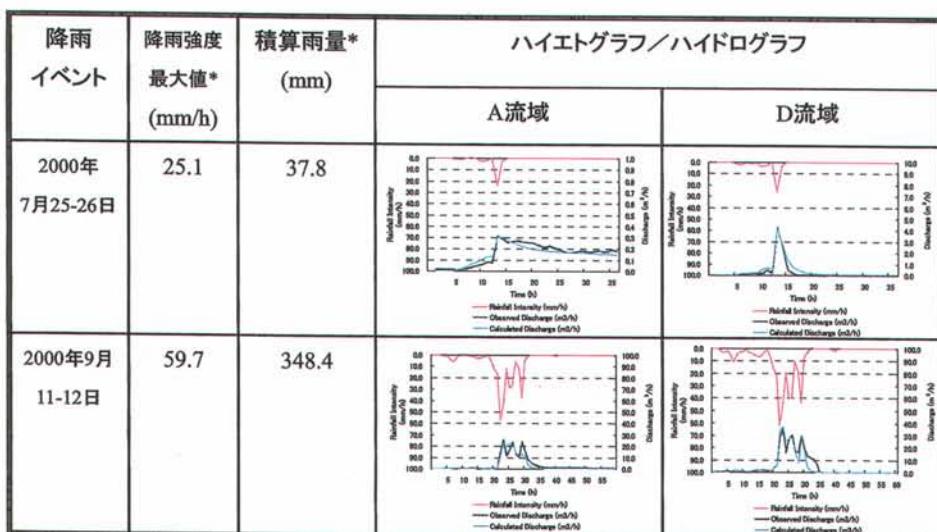


図12-8 現地観測データによる流出モデルのキャリブレーションと検証

4) 植生回復に伴う流出特性変化のシミュレーション

現地での観測試験及び空中写真判読により植生回復経過年数と土層厚との関係式を求め(図12-9), 現在森林状態にあるA流域において、裸地から植生が回復した場合の流出特性変化を流出モデルにより推定した。

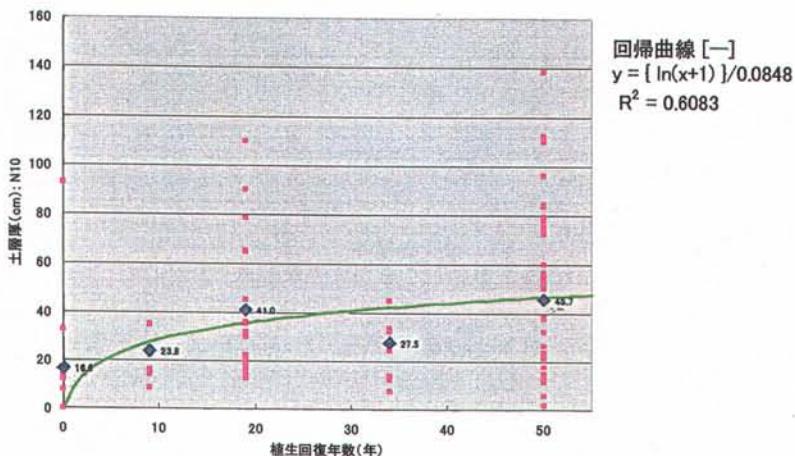


図12-9 裸地からの植生への回復経過年数と土層厚との関係

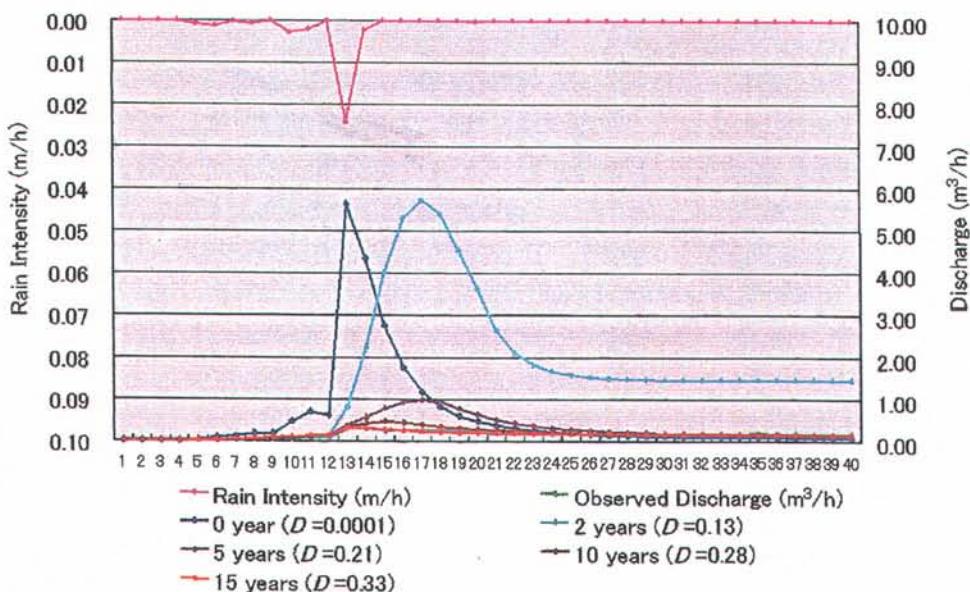


図12-10 植生回復に伴う流出特性変化の流出モデルによる再現

2000年7月25～26日の降雨イベントのデータを用いたところ、裸地状態（土層厚 $D = 0.0001$ ）ではピーク流量が現在の約20倍になり、降雨後速やかに流量が減少するハイドログラフを示すが、植生回復が開始して2年後には、土層厚が増加し（ $D = 0.13$ ）、ピーク到達時間が遅くなる。さらに土壤の発達が進む5年後（ $D = 0.21$ ）には、ピーク流量が約5分の1（現在の約4倍）に減少する。そして10年後（ $D = 0.28$ ）にはさらにピーク流量が減少し、15年後（ $D = 0.33$ ）には現在とほぼ等しいハイドログラフを示す（図12-10）。

4. 考察

瀬戸市郊外の花崗岩丘陵地に位置する小流域では、裸地からの植生回復に伴い流出特性が10数年のオーダーで変化し、ピーク流量が顕著に減少（約20分の1）することが流出解析によって示された。これは、土層厚の増加により地表流が発生しなくなり、地中流として流下するようになるためと考えられる。

一方、第10章で論じた多摩川流域の丘陵地における1980年代以降の流出変化は、これとは逆の現象とみなされる。すなわち都市化により不透水面が増加した結果、雨水の多くが人工排水路を速やかに流下する“地表流”的な成分となり、一方で地下に浸透した後に地中流として流出する成分が減少するために、ピーク流量が増加したと考えられる。

また、多摩丘陵と瀬戸の丘陵のいずれにおいても、流出特性の土地利用・土地被覆の変化に対する反応が、きわめて敏感であることが示された。

文献

- 杉盛啓明、青木賢人、鈴木康弘、小口 高編、2000. 「デジタル観測手法を統合した里山のGIS解析」 中日新聞社。
- 半田暢彦編、2002. 「20世紀後半の自然環境変遷と地理的特性評価に基づく将来予測技術の開発—「GISによる里山の緑」のシミュレーション—」 平成11-13年度文部科学省科学研究費補助金・地域連携推進研究費・成果報告書、愛知県立大学。
- Wu, W., Sidle, R.C., 1995. A distributed slope stability model for steep forested basins. Water Resources Research, 31, 2097-2110.

第13章

関東～中部日本の8流域における河川懸濁物質濃度の空間分布とその規定要因

小口 高・Siakeu, J.・畠屋みづ穂・高木哲也・早川裕一

1. はじめに

河川の懸濁物質 (suspended sediment) は、浮流によって運搬される細粒物質であり、流域における侵食・堆積過程と水質形成の重要な指標である。このため、地形学者や水文学者が懸濁物質に関する研究を行ってきた。懸濁物質の供給源は、山地斜面や河道沿いの侵食、農地での表面流出、家庭・工業排水、建設活動など多様である (Collins et al., 1997 ; Walling et al., 1999 ; Rondeau et al., 2000)。このため、地形、地質、気候、人口、土地利用といった流域の特徴と、河川の懸濁物質の量と質との関係が検討されてきた (Wang and Yin, 1997 ; Wass and Leeks, 1999 ; Jarvie et al., 2002)。これらの研究により、懸濁物質の供給源が推定可能となり、その成果は懸濁物質を減らすための方策の立案にも活かされている (Mossa, 1996 ; Neal et al. 1999 ; Russell et al., 2001)。

本章では、多摩川流域を含む関東～中部日本の主要河川における1970年代末期以降の懸濁物質濃度 (SSC) のデータを、その空間分布と流域特性との関係に注目して分析する。前章までの検討では、流域内の水の移動に着目してきたが、水に伴って移動する土砂も、流域の環境特性や環境保全を考える際に非常に重要であるため、本章と次章では土砂流出に関する課題を取り上げる。土砂移動と流域特性に関する空間データが、日本の多様な行政組織によって収集されたが、本研究以前には、これらのデータを総合的に解析する試みはほとんどなかった。本研究では、懸濁物質濃度、地形、人口、および土地利用のデータをGISに入力し、懸濁物質濃度の空間分布とその規定要因を検討する。

2. 調査地域の概要とデータの収集

本研究の対象は、関東～中部日本の8つの主要河川である (図13-1)。これらは、起伏が相

対的に小さく下流部の人口密度が高い東京周辺の流域（荒川，多摩川，利根川），日本アルプスの高山から発し人口密度が相対的に低い流域（信濃川，天竜川，富士川），および起伏が中程度で人口密度が相対的に低い流域（阿賀野川，那珂川）で構成される。

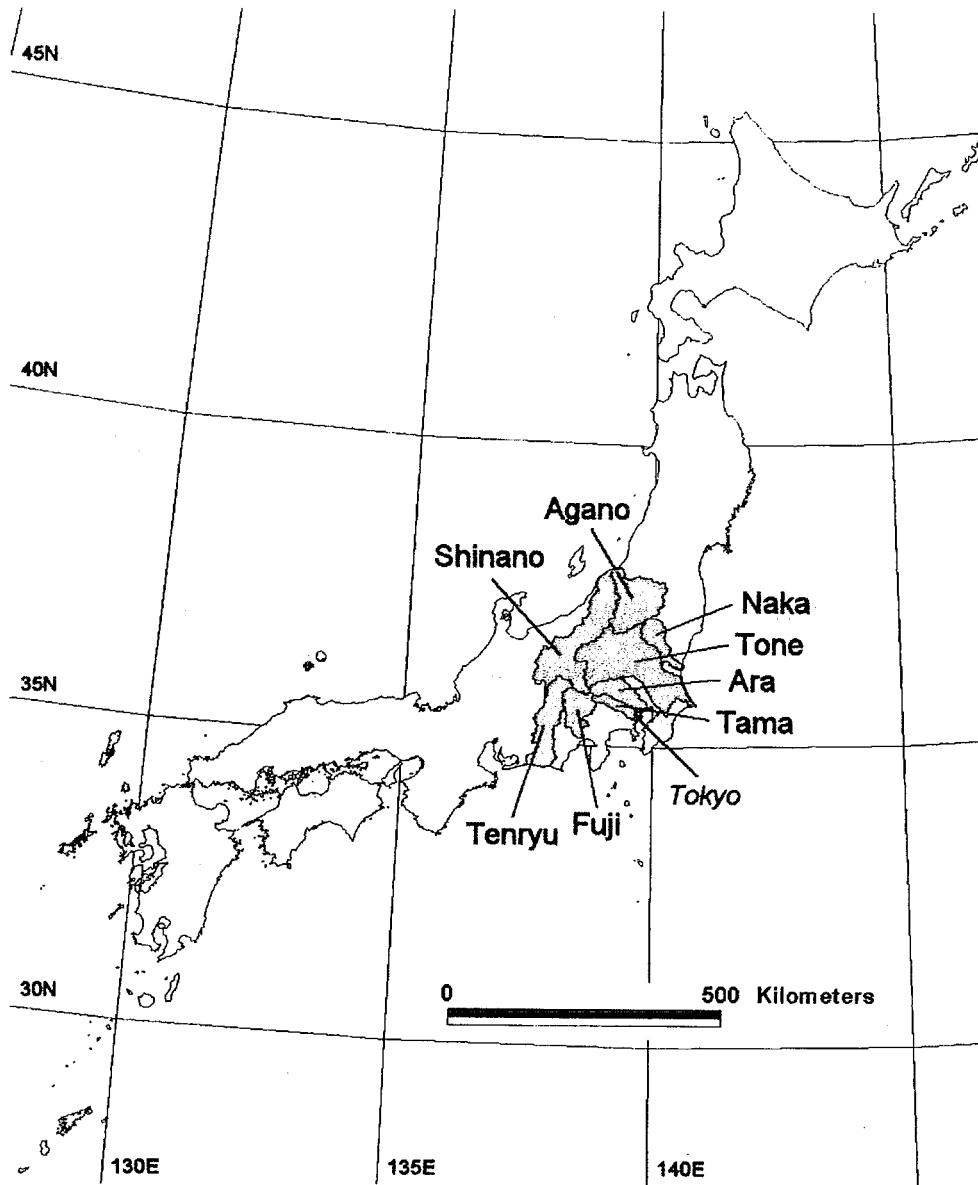


図13-1 調査対象とした8流域

日本では、定期的な河川水の採取に基づく懸濁物質濃度のデータが、公共水質データファイルとして環境省より提供されており、上記の8流域では761地点のデータが公開されている。データの計測開始時期は大半の地点では1978年4月であるが、1980年代初頭の場合もある。また、今回利用したデータの最終計測時期は1998年3月である。データの計測頻度は地点によって異なるが、典型的には一ヶ月に一回である。上記の761地点から、懸濁物質濃度の観測回数が150回以上の460地点を検討対象とした。

調査地域のラスター型デジタル標高データ（DEM）を、国土地理院の数値地図50 mメッシュ（標高）から編集した。この国土地理院のデータは、緯度・経度の座標で投影されているため、実際の格子点間隔は正確に50 mではなく、2.25秒×1.5秒である。このままでは距離や面積の計測には適さないため、元のDEMに代表的な補間法であるKrigingを適用し、UTM座標系において50 mの格子点間隔を持つDEMを作成した。次に、得られたDEMをESRI社のGISソフトウェアArcViewに入力し、Hydrologic Modeling ツールを用いて460観測地点の上流域を表すポリゴンを抽出した。このポリゴン・データを利用して流域の諸特性を求めた。

河川の懸濁物質濃度と人間活動との関係を検討する際に、土地利用のデータがしばしば利用されている（Collins et al., 1997；Russell et al., 2001；Jarvie et al., 2002）。本研究でも、環境省が公開している1986年時点の土地利用を表すベクター・データを利用し、各観測地点の上流域における5つの主要な土地利用（農地、裸地、森林、草地、市街地）の比率を算出した。ただし、裸地と草地の比率は一般に数パーセント未満であり、これらと懸濁物質濃度との対応も不明瞭であったため、この後の議論では取り上げないことにする。なお、森林のカテゴリーには斜面崩壊や谷沿いの侵食によって生じた小規模な裸地が含まれている。

また、総務庁統計局は45秒×30秒メッシュ（約1 km四方）の人口センサスデータを作成しており、全国について1970年、1975年、1980年、1985年、1990年、1995年のデータが公開されている。青木ほか（2001）は、上記の人口データに補間法を適用し、UTM座標系で実距離1 kmの格子点間隔を持つ人口密度データを導出した。このうち、観測期間を代表するデータとして1985年のデータを用いて、各観測地点の上流域の人口密度を求めた。

また、旧通産省地質調査所が発行したデジタル地質図を地質のデータとして使用した。元の地質区分の数は165であるが、これは複雑すぎるため、次の8種類の概略的な区分を利用した。1) 第四紀堆積岩、2) 第三紀堆積岩、3) 中古生代堆積岩、4) 主に堆積岩からなる付加帶岩、5) 主に苦鉄質岩からなる付加帶岩、6) 火成岩、7) 貫入岩、8) 変成岩。

3. 懸濁物質濃度分布図の特徴

前記の460地点について、観測期間を通じての懸濁物質濃度の平均値を計算し、その分布を表す地図を流域ごとに作成した。この手法は、Oguchi et al. (2000) が英國ハンバー流域の水質分布を可視化する際に用いたものと同等である。懸濁物質濃度は土砂生産や河川の流量に応じた季節変化を持つと考えられるが、150回以上の計測値の平均値を求める場合には、そのような季節変化の影響は最小化できると予想される。以下、流域ごとに懸濁物質濃度の空間分布の特徴を記述する。

・阿賀野川

図13-2は阿賀野川流域における28地点の平均懸濁物質濃度の分布を示している。濃度の最大値と最小値は35 mg/lと4 mg/lである。主要な支流である阿賀川と只見川の上流部では濃度が5 mg/l以下と低いが、会津盆地や新潟平野では10 mg/l以上と高い。会津盆地と新潟平野の間の区間と只見川の下流部における濃度は中間的である(5~10 mg/l)。

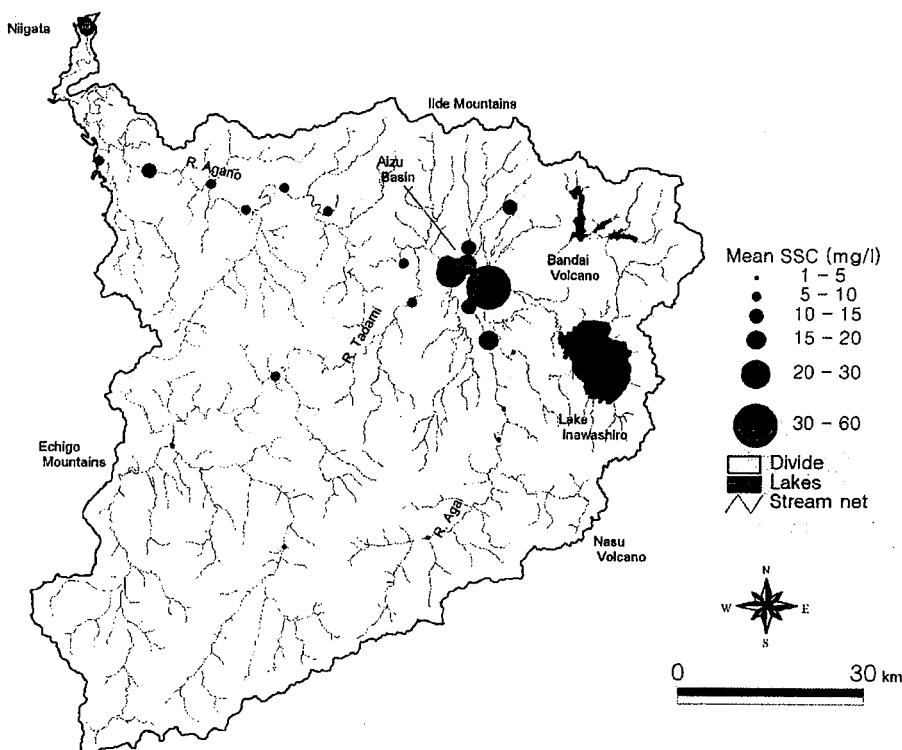


図13-2 阿賀野川流域の平均懸濁物質濃度分布

・荒川

荒川流域の78地点における平均懸濁物質濃度は3~48 mg/lである(図13-3)。濃度が高い地点の大半は熊谷~東京中央部の下流域に存在し、関東山地や狭山丘陵周辺の上流部では濃度が5 mg/l以下と低い。ただし、東京の武蔵野台地を流れる小支流沿いには、関東山地内部に匹敵するような低濃度の地点が存在する。

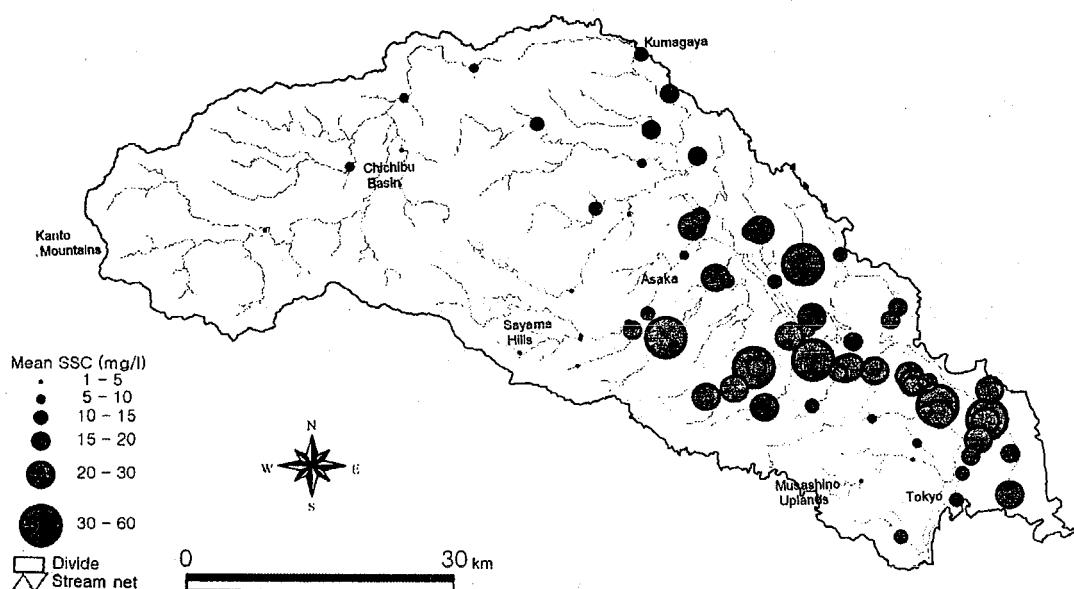


図13-3 荒川流域の平均懸濁物質濃度分布

・信濃川

図13-4は信濃川流域の52地点における平均懸濁物質濃度の分布を示している。濃度の範囲は3~59 mg/lである。5 mg/lより低い濃度は1地点のみで観測された。上流部の北アルプス内と八ヶ岳の山麓部における濃度は5~10 mg/lである。山間盆地である松本盆地と上田盆地における濃度は相対的に高く、それより下流側の本流と支流でも、15 mg/lを超える高い濃度が広く観察される。

・多摩川

多摩川流域の32地点における平均懸濁物質濃度は2~26 mg/lである(図13-5)。昭島より上流側の関東山地の内部では、全地点が5 mg/l以下の濃度を示す。一方、下流側の立川・八王子周辺では濃度が顕著に増加する。しかし、武蔵野台地の縁に相当する府中~東京湾にかけての下流域では濃度が低下し、5~10 mg/l程度になる。

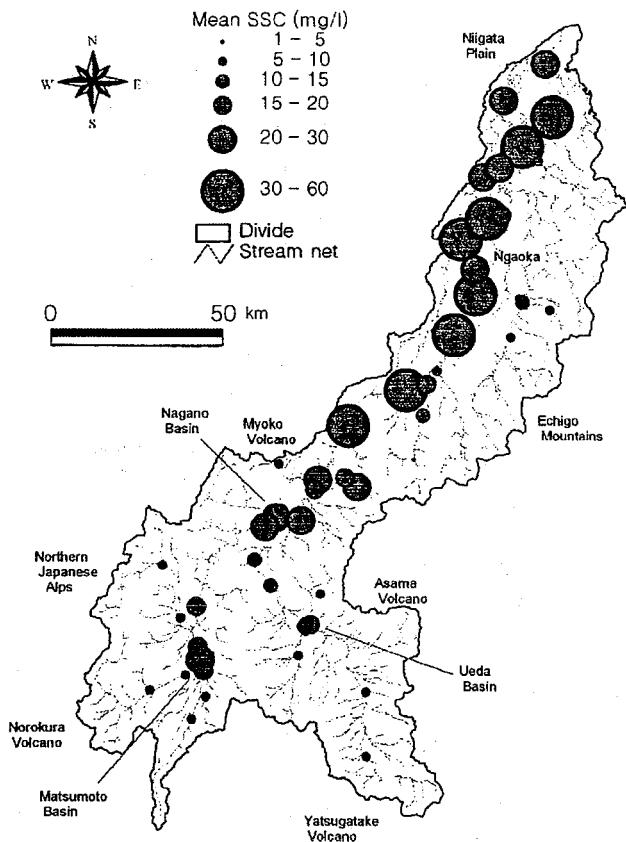


図13-4 信濃川流域の平均懸濁物質濃度分布

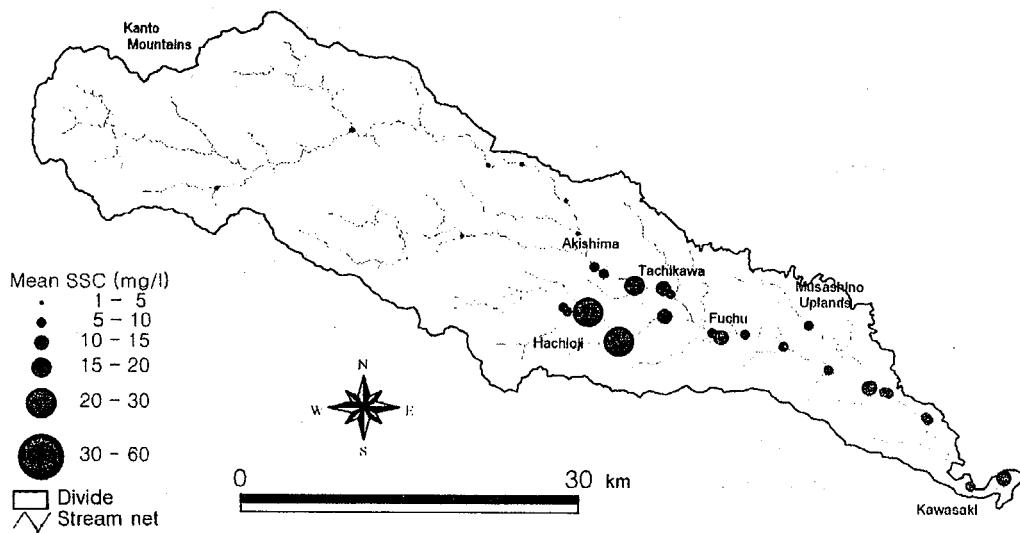


図13-5 多摩川流域の平均懸濁物質濃度分布

・天竜川

天竜川流域の24地点における平均懸濁物質濃度は5~23 mg/lであり、地域による濃度の差は不明瞭である(図13-6)。昭島より上流の関東山地では、全地点が5 mg/l以下の濃度を示す。天竜川の本流は、諏訪盆地や伊那谷といった山間盆地に沿って流下する部分が多い。また、データは少ないが、中央アルプスの支流は濃度が低く、南アルプスの支流は濃度が高い傾向がみられる。

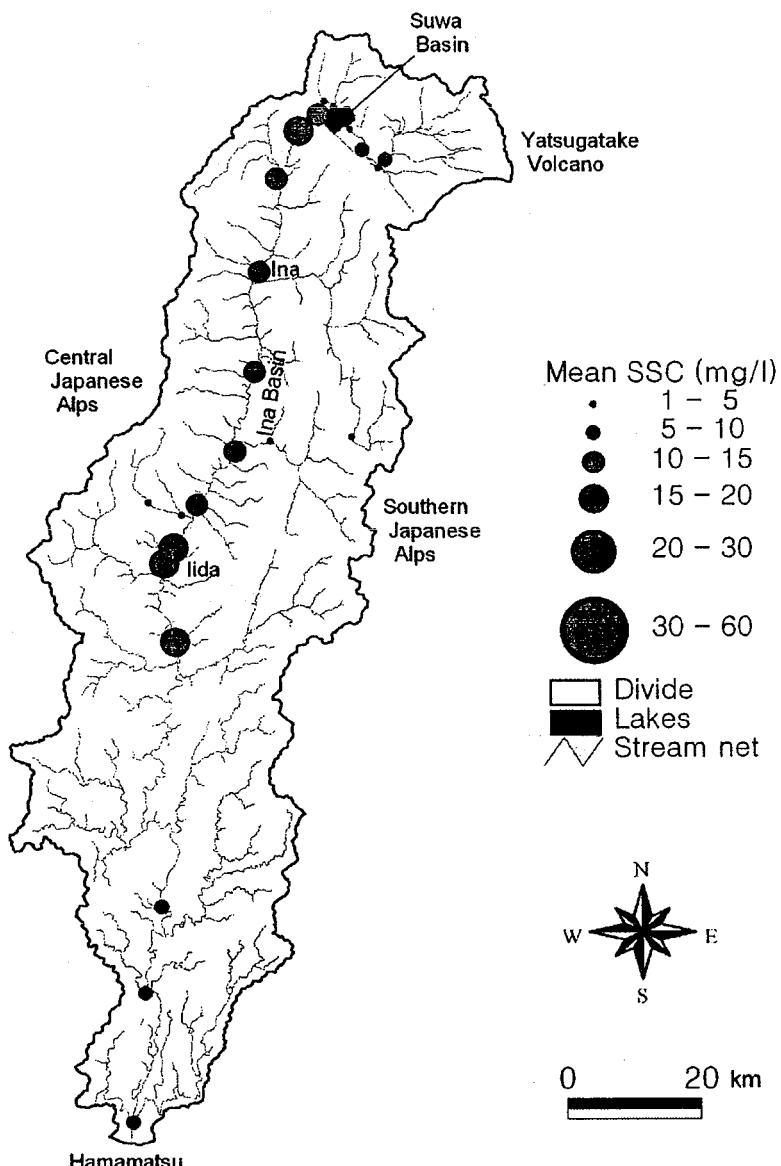


図13-6 天竜川流域の平均懸濁物質濃度分布

・利根川

利根川流域の179地点における平均懸濁物質濃度は3~35 mg/lである(図13-7)。越後山地、赤城山、男体山の周辺では濃度が3~10 mg/lと低いが、高崎、前橋、足利、宇都宮などの都市域よりも下流では濃度が増加し、関東平野では10 mg/l以上の濃度が広くみられる。しかし、下流部の佐倉周辺の支流では、都市域にもかかわらず相対的に濃度が下がる傾向がある。

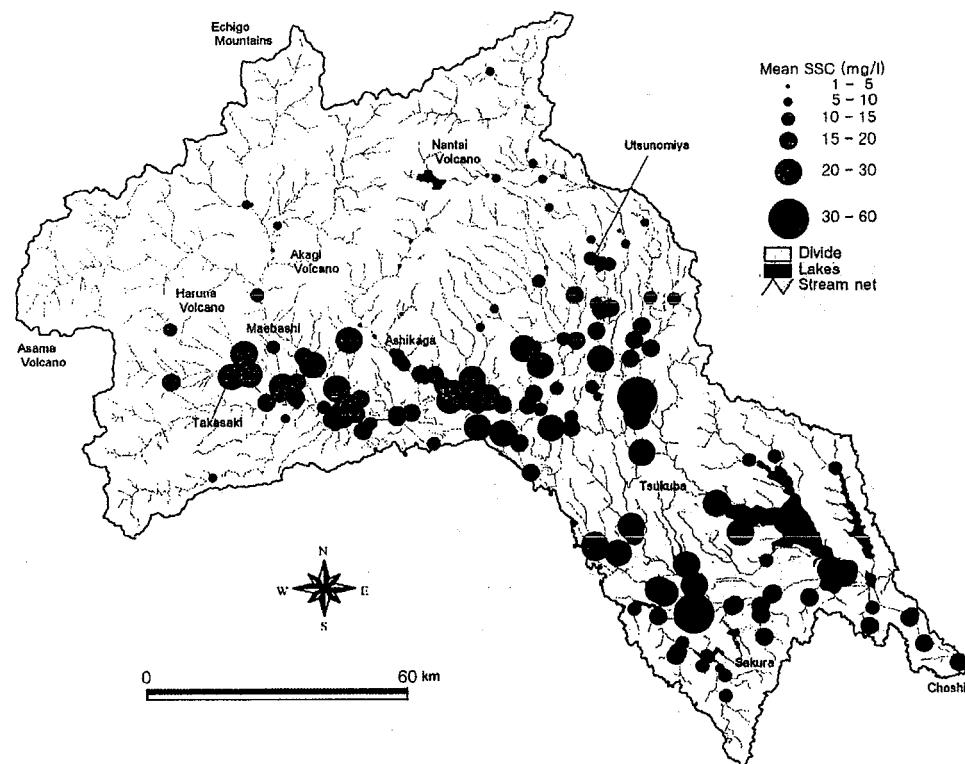


図13-7 利根川流域の平均懸濁物質濃度分布

・那珂川

那珂川流域の44地点における平均懸濁物質濃度は3~35 mg/lである(図13-8)。第四紀火山に隣接する上流部では濃度は3~10 mg/l程度であり、その下流に位置する黒磯、大田原、矢板付近では濃度がやや増加する。しかし、那須野ヶ原よりも下流側の那珂川本流では再び濃度がやや低下し、10 mg/l以下となる。一方、水戸、ひたちなか、茂木といった最下流部の都市周辺の支流では、15 mg/l以上の高い濃度が観測される。

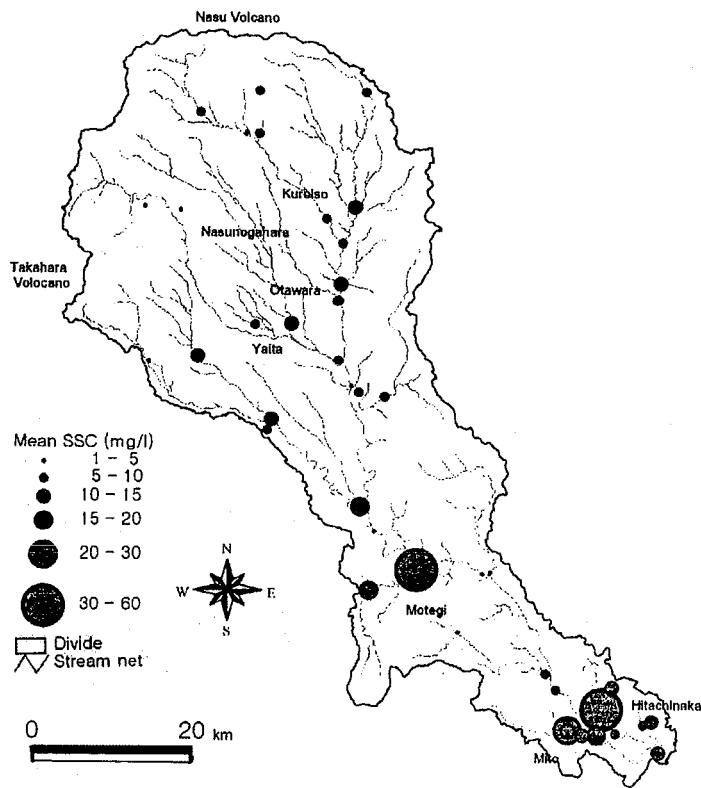


図13-8 那珂川流域の平均懸濁物質濃度分布

・富士川

富士川流域の23地点における平均懸濁物質濃度は3~32 mg/lである（図13-9）。濃度が5 mg/l以下の地点は関東山地の内部に限られ、濃度が10 mg/l以上の地点は中流部の甲府盆地周辺と下流域に分布する。八ヶ岳火山に発する河川の濃度は中間的（5~10 mg/lである）。

以上のように、全般的にみると、懸濁物質濃度は山間盆地や沖積平野といった人口が多い低地で高くなり、山地では低くなる傾向がある。ただし、上記の全般的傾向とは異なる特徴を示す場所も存在する。たとえば、東京および近郊の台地から流出する河川は、人口密集域にもかかわらず懸濁物質濃度が相対的に低い。また、火山や南アルプスから流下する河川は、上流域であってもやや懸濁物質濃度が高くなる傾向がある。

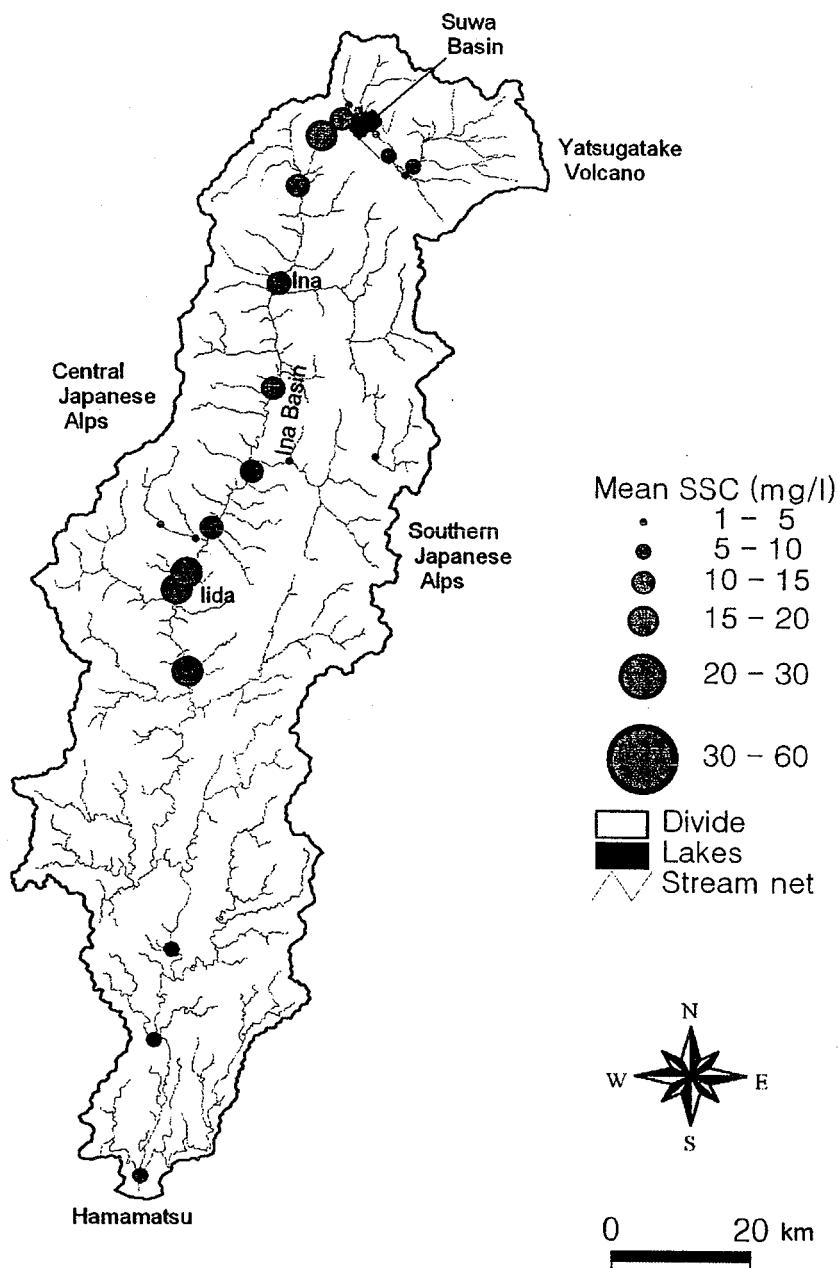


図13-9 富士川流域の平均懸濁物質濃度分布

4. 懸濁物質濃度と流域特性との関係

前節では分布図の判読により懸濁物質の給源を推定したが、本節ではより直接的な給源の推定を行うために、各観測地点の上流域の特性と懸濁物質濃度との関係を分析する。取り上げた説明変数は、流域面積、平均標高、平均傾斜、農地比率、森林比率、市街地比率、平均人口密度、地質であり、これらの変数と平均懸濁物質濃度との関係を流域ごとに調べた。結果の例を図13-10～13-16に示す。明瞭な正の相関（図13-12、13-14）もしくは負の相関（図13-11、13-13、13-16）がみられる場合と、相関が不明瞭な場合（図13-10、13-15）が認められる。なお、地質のデータは非数量であるため、傾斜と平均懸濁物質濃度との関係を、地質別に凡例を変えてプロットする方法で地質の影響を調べたが、地質に応じて濃度が大きく変わるとという結果は得られなかった（図13-16）。

表13-1は全流域に関する上流域の特性と懸濁物質濃度との関係の相関係数を示しており、表13-2はその有意度を示している。富士川と天竜川を除く6流域では、平均懸濁物質濃度は農地比率、居住地比率、人口密度と正の相関を示し、標高、傾斜、森林比率とは負の相関を示す。これは、人口が多い低地で懸濁物質濃度が高く山地では低いという、懸濁物質濃度の分布図（図13-2～13-9）から読みとれる傾向と調和する。

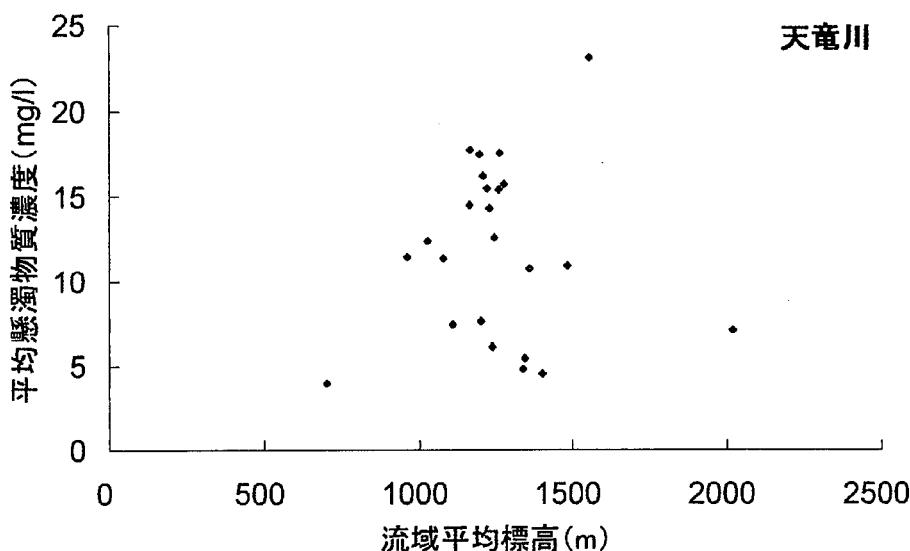


図13-10 流域平均標高と平均懸濁物質濃度との関係（天竜川）

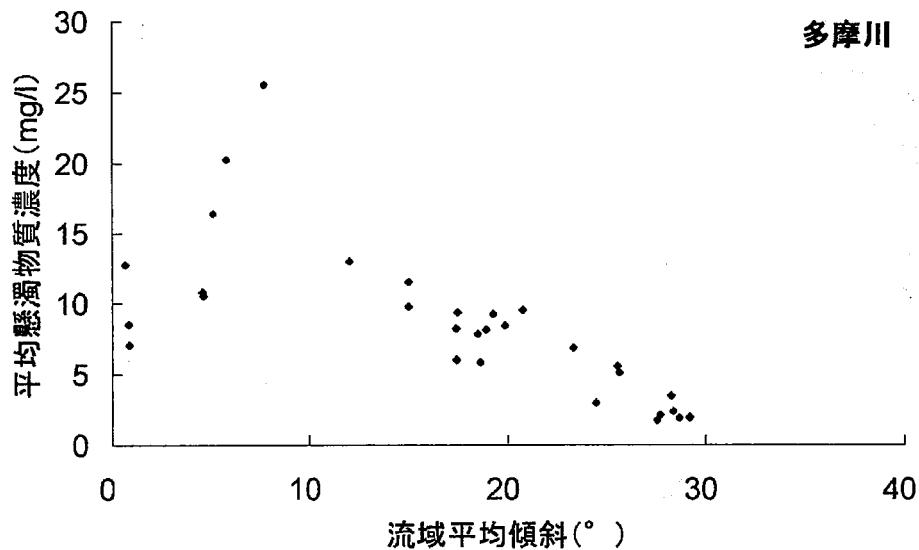


図13-11 流域平均傾斜と平均懸濁物質濃度との関係（多摩川）

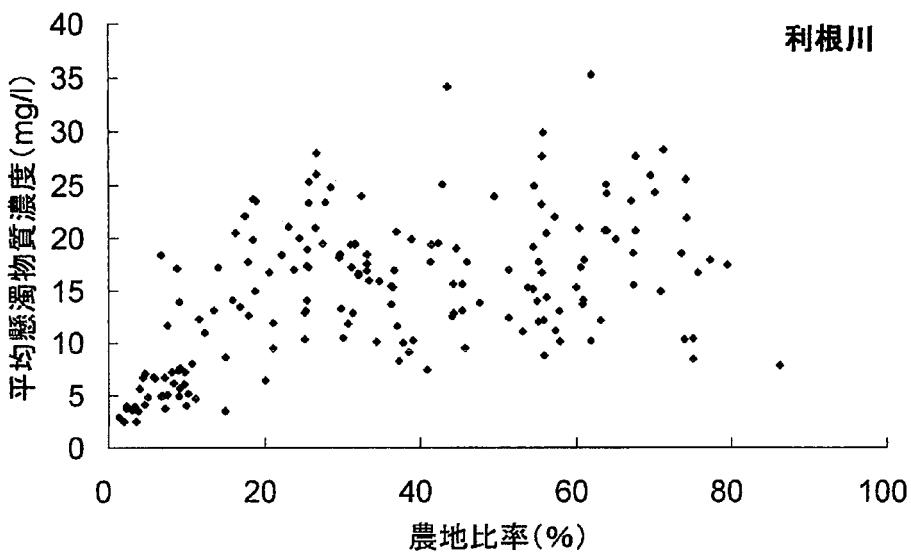


図13-12 農地比率と平均懸濁物質濃度との関係（利根川）

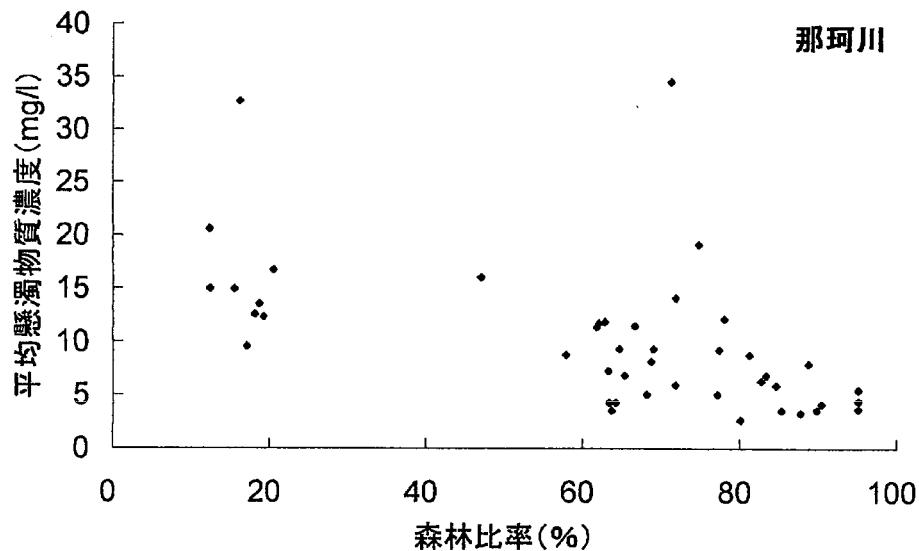
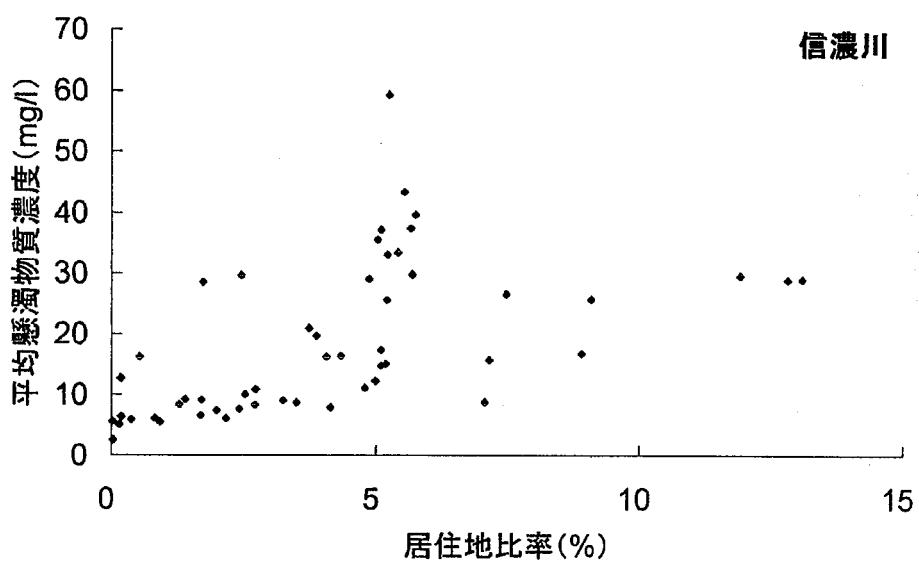


図13-13 森林比率と平均懸濁物質濃度との関係（那珂川）



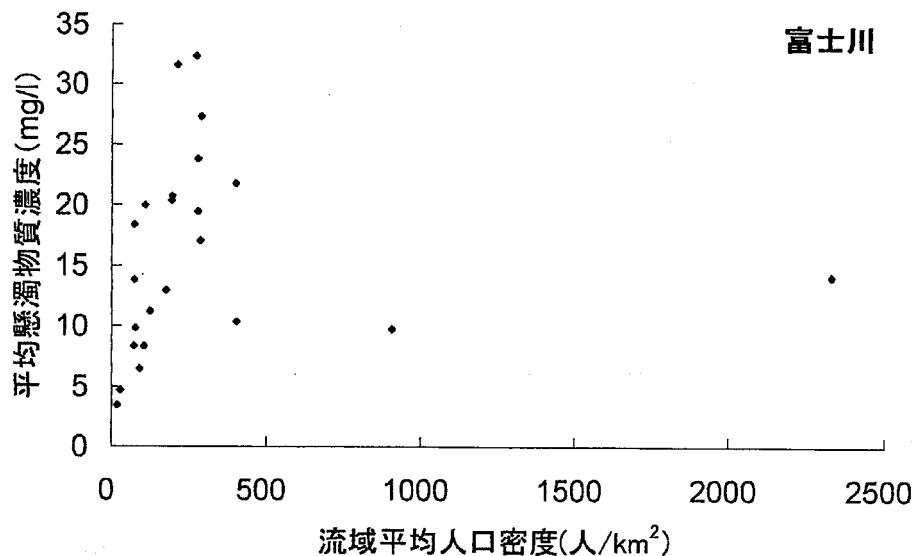


図13-15 流域平均人口密度と平均懸濁物質濃度との関係（富士川）

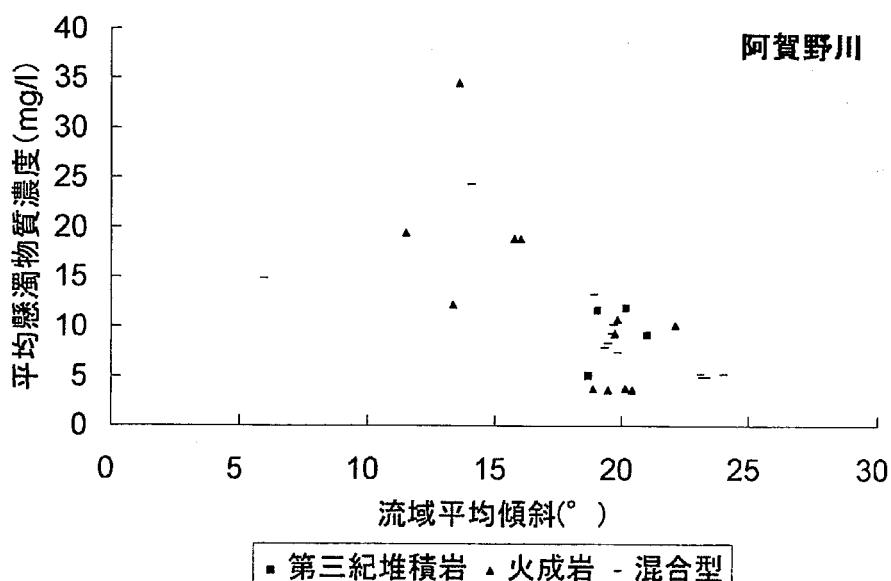


図13-16 地質別の流域平均傾斜と平均懸濁物質濃度との関係（阿賀野川）

表13-1 各流域における説明変数と懸濁物質濃度との相関係数

	阿賀野川	荒川	信濃川	多摩川	天竜川	利根川	那珂川	富士川
流域面積	-0.106	+0.187	+0.622	-0.122	+0.324	+0.191	-0.236	+0.651
平均標高	-0.357	-0.339	-0.366	-0.706	+0.045	-0.465	-0.551	-0.218
平均傾斜	-0.656	-0.414	-0.386	-0.724	-0.094	-0.468	-0.564	-0.111
農地比率	+0.550	+0.416	+0.484	+0.806	+0.080	+0.490	+0.481	+0.247
森林比率	-0.528	-0.376	-0.477	-0.605	-0.084	-0.477	-0.546	-0.361
居住地比率	+0.484	+0.165	+0.541	+0.492	+0.086	+0.324	+0.497	+0.252
平均人口密度	+0.361	+0.065	+0.367	+0.394	+0.085	+0.170	+0.449	+0.033

表13-2 各流域における説明変数と懸濁物質濃度との相関の有意度

	阿賀野川	荒川	信濃川	多摩川	天竜川	利根川	那珂川	富士川
流域面積			+++			++		+++
平均標高	-	--	--	--		--	--	
平均傾斜	--	--	--	--		--	--	
農地比率	+++	+++	+++	+++		+++	+++	
森林比率	--	--	--	--		--	--	
居住地比率	+++		+++	+++		+++	+++	
平均人口密度	+		+++	++		++	+++	

+++: 有意度99 %以上の正の相関, ++: 有意度が95%以上で99%未満の正の相関,

+: 有意度が90 %以上で95%未満の正の相関, --: 有意度99 %以上の負の相関,

--: 有意度が95%以上で99%未満の負の相関, -: 有意度が90 %以上で95%未満の負の相関

5. 考察

既存研究によると、日本の河川が運搬している土砂は、豪雨によって生じた斜面崩壊や谷の掘削にともなって斜面から供給された多量の掃流物質を含むことが多く、この量は山地で顕著に増加する (Yoshikawa, 1974 ; Oguchi et al., 2001)。しかし、懸濁物質濃度の空間分布は逆の傾向を示し、一般に山地で低く、低地で高いことが判明した。また、懸濁物質濃度は人為に関連した流域特性(農地比率、居住地比率、人口密度)と正の相関を持つ場合が多い。このことは、懸濁物質の主な給源が自然の侵食ではなく、低地での人間活動であることを示す。実際、日本の都市化された低地を流れる河川では、家庭・産業廃水の影響が強いため、河川水中に金属成分や汚染有機物質が多量に含まれる (Teraoka and Kobayashi, 1980 ; Miyai et al., 1985 ; 西田ほか, 1985)。また、宅地造成などにともなう土木工事も河川に多量の細粒物質を供給する (Kadomura, 1980)。さらに、農地比率と懸濁物質濃度との間の高い相関は、水田耕作や畑作にともなう土地の攪乱や表土の露出が、懸濁物質の供給に寄与していることを示唆する。

ただし、懸濁物質濃度の空間分布を詳しく見ると、自然の影響の関与も認められる。前記のように、懸濁物質濃度は上流域において概して低く、特に越後山地、関東山地、中央アルプスでは非常に低いが、南アルプスや第四紀火山の地域では濃度がやや高くなる(第3節)。南アルプスは相対的に若い堆積岩で形成された山地であり、火山も地層の固結度が低く火山灰の堆積もみられるため、自然の侵食による細粒物質の供給がある程度活発と考えられる。実際、南アルプスと富士火山に沿って流下する富士川と天竜川の流域では、山地における自然の侵食の影響が人為の作用の影響と相殺するために、農地比率、居住地比率、人口密度と懸濁物質濃度との相関が不明瞭になったと考えられる。

また、第3節で述べたように、多摩川の中～下流部、那須野ヶ原、佐倉市周辺といった更新世に形成された台地の縁辺部では、都市域であっても懸濁物質濃度が相対的に低下する傾向がある。関東平野の更新世台地の縁辺部や開析谷では、清浄な地下水が地表に湧き出す場所が多い(貝塚, 1979)。特に武蔵野台地と那須野ヶ原の浅層地下水は多量であり(新藤, 1968 ; 榎山・鈴木, 1991)，土砂の含有が少ない清浄な水を豊富に供給する。このために河水が希釀され、懸濁物質濃度が低下したと推定される。

一方、信濃川流域では、人口が少ない中流部において下流部に匹敵する高い懸濁物質濃度が観測されている。たとえば、全460地点で最高の濃度(60 mg/l)は信濃川中流部で観測されている。この地域には第三紀層が広く分布し、広大な地滑り地帯を形成している(Mizuno,

1989など). 地滑り地帯では風化によって生じた多量の粘土が地表付近に存在することが多い。このために細粒物質の河川への供給が多く、懸濁物質濃度が上昇したと考えられる。

6. おわりに

本章ではGISを用いて関東～中部の8流域における河川水の平均懸濁物質濃度の分布図を作成し、さらに濃度と上流域の特性との相関を検討した。その結果、懸濁物質が主に人為作用によって河川に供給されたことが明らかとなった。一方、副次的には侵食の地域性や地下水の湧出による河川水の希釈といった、自然の影響も認められた。

従来の日本における河川の懸濁物質の研究は、主に小流域を対象としていたが、GISによる多量のデータ処理やDEMによる流域抽出の機能などを用いることにより、従来とは異なる視点に立つ検討を行うことが出来た。今後、全国的な傾向の把握や、各地点における濃度の変動などに注目した詳しい検討が必要である。

文献

- 青木賢人、シアク＝ジャン、小口 高、2001. 補間法による国勢調査人口メッシュデータの座標変換. 厚生省科学研究費（課題番号H12-政策-014）報告書「地理情報システムを用いた地域人口動態の規定要因に関する研究」, 25-44.
- 貝塚爽平、1979. 「東京の自然史（第2版）」紀伊国屋書店.
- 新藤静夫、1968. 武蔵野台地の水文地質. 地学雑誌, 77, 223-246.
- 西田英郎、多田 史、鈴木静夫、1985. 全国主要河川底質のAl, Fe, Mnの分布. 陸水学雑誌, 46, 107-114.
- 檜山哲哉、鈴木裕一、1991. 那須野原における地下水—特に水質の空間的変化と季節的変化について—. ハイドロロジー, 21-3, 143-154.
- Collins, A.D., Walling, D.E., Leeks, G.J.L., 1997. Fingerprinting the origin of fluvial suspended sediment in large river basins: combining assessment of spatial provenance and source type. Geografiska Annaler, 79A, 239-254.
- Jarvie, H. P., Oguchi, T., Neal, C., 2002. Exploring the linkages between river water chemistry and

- watershed characteristics using GIS-based catchment and locality analyses. *Regional Environmental Change*, 3, 36-50.
- Kadomura, H., 1980. Erosion by human activities in Japan. *GeoJournal*, 4, 133-144.
- Mizuno, K., 1989. Landsliding of clayey slopes with a wavy slip surface: Model and its application. *Science Reports of the Institute of Geoscience, University of Tsukuba*, A10, 87-151.
- Miyai, M., Tada, F., Nishida, H., 1985. Analysis of the composition of heavy metal pollution in Japanese river sediments by principal component analysis. *Japanese Journal of Limnology*, 46, 169-173.
- Mossa, J., 1996. Sediment dynamics in the lowermost Mississippi River. *Engineering Geology*, 45, 457-479.
- Neal, C., Jarvie, H. P., Oguchi, T., 1999. Acid-available particulate trace metals associated with suspended sediment in the Humber rivers: a regional assessment. *Hydrological Processes*, 13, 1117-1136.
- Oguchi, T., Jarvie, H.P., Neal, C., 2000. River water quality in the Humber Catchment: An introduction using GIS-based mapping and analysis. *The Science of the Total Environment*, 251/252, 9-28.
- Oguchi, T., Saito, K., Kadomura, H., Grossman, M., 2001. Fluvial geomorphology and paleohydrology in Japan. *Geomorphology*, 39, 3-19.
- Rondeau, B., Cossa, D., Gagnon, P., Bilodeau, L., 2000. Budget and sources of suspended sediment transported in the St. Lawrence River, Canada. *Hydrological Processes*, 14, 21-36.
- Russell, M.A., Walling, D.E., Hodgkinson, R.A., 2001. Suspended sediment sources in two small lowland agricultural catchments in the UK. *Journal of Hydrology*, 252, 1-24.
- Teraoka, H., Kobayashi, J., 1980. Concentrations of 21 metals in the suspended solids collected from the principal 166 rivers and 3 lakes in Japan. *Geochemical Journal*, 14, 203-226.
- Walling, D. E., Owens, P. N., Leeks, G. J. L., 1999. Fingerprinting suspended sediment sources in the catchment of the River Ouse, Yorkshire, UK. *Hydrological Processes*, 13, 955-975.
- Wang, X., Yin, Z.-Y., 1997. Using GIS to assess the relationship between land use and water quality at a watershed level. *Environment International*, 23, 103-114.
- Wass, P., Leeks, G.J.L., 1999. Suspended sediment fluxes in the Humber catchment, UK. *Hydrological Processes*, 13, 935-953.

Yoshikawa, T., 1974. Denudation and tectonic movement in contemporary Japan. Bulletin of
Department of Geography, University of Tokyo, 6, 1-14.

第14章

関東～中部日本の河川における懸濁物質濃度の経年変化と人間活動との関係 —とくに多摩川流域の独自性について—

Siakeu, J.・小口 高・青木賢人・江崎雄治・Jarvie, H.P.

1. はじめに

河川の懸濁物質 (suspended sediment) は、浮流によって運搬される細粒物質であり、流域における侵食・堆積過程と水質形成に関する重要な指標である。このため、地形学者や水文学者が懸濁物質に関する研究を行ってきたが、特に近年の人為作用の増大が懸濁物質の特徴に与えた影響が注目されている (Wolman, 1967 ; Walling, 1997 ; Neal et al., 1998)。人間の活動は河川への細粒物質の供給を増大させることがある。たとえば、完新世の人間の定住とともに、森林伐採や農牧業が活発になり、細粒物質の供給が増加したと指摘されている (Milliman et al., 1987 ; Poulos et al., 1996 ; De Boer, 1997)。同様に、近代以降の急速な人口の増加と産業の発展とともに、家庭、工場、土木工事などに由来する細粒物質も増加した (Wolman, 1967 ; Peart, 1997)。一方、人間の活動が河川の懸濁物質濃度を減少させる場合もある。たとえば、ダムが建設されると土砂が背後に貯留されるため、下流への土砂供給が減少する (Mossa, 1996 ; Walling, 1997)。持続的農業の実施や汚水処理施設の整備も、河川への物質供給を減少させる (Keown et al., 1986 ; O'Hara et al., 1993 ; Tiffen et al., 1994)。人為作用が河川の懸濁物質の特徴に与える影響は世界各地で検討されており、アフリカ (Sutherland and Bryan, 1991 ; Tiffen et al., 1994), 中国 (Milliman et al., 1987 ; Peart, 1997 ; Chen et al., 2001), ヨーロッパ (Walling, 1990 ; Poulos et al., 1996), 北米 (Wolman, 1967 ; Kuhnle et al., 1996 ; De Boer, 1997) などの事例が報告されている。人口密度が高く産業活動が盛んな日本においても、人為作用が河川の懸濁物質の特徴を規定している可能性が高いが、この問題に関する検討はほとんど行われていない。

本章では、関東～中部日本の主要河川における1970年代末期以降の懸濁物質濃度 (SSC) の時系列データを、人間活動の影響に注目して分析した。懸濁物質濃度、地形、人口、水文、および土地利用のデータをGISに入力し、懸濁物質濃度の時空間変化とその規定要因を検討

する。とくに、多摩川流域と他の流域との相違に注目した検討を行う。

2. 調査地域の概要とデータの収集

本研究では、第13章で取り上げた関東～中部日本の8つの主要河川（阿賀野川、荒川、信濃川、多摩川、天竜川、利根川、那珂川、富士川）の流域を対象とする。いずれの流域も都市域や農地を含むため、懸濁物質濃度に対する人為の影響を検討することが可能である。使用したデータは第13章と共通のものが多い。すなわち、環境省の公共水質データファイルに収録された懸濁物質濃度のデータ、国土地理院の数値地図50 mメッシュ（標高）から変換した50 mの格子点間隔を持つDEM、環境省の土地利用ベクター・データ、青木ほか（2001）が総務庁統計局のデータから変換した人口密度データを用いた。

また、水の流出の状況が河川の土砂輸送の様式と速度を規定することを考慮し、懸濁物質濃度を河川流量と関連づけて検討した。実際、既存研究でも流量と懸濁物質濃度との関係が検討されている（Wood, 1977；Richards, 1984；Williams, 1989；Lenzi and Marchi, 2000）。前記の8流域には、流域面積が 200 km^2 を超える流量観測所が57ヶ所ある（図14-1）。観測された流量の値は、日本河川協会が発行している流量年表に掲載されている。そこで、各流量観測所に最も近い懸濁物質濃度の観測地点を選び、両者のデータを用いて流量と懸濁物質濃度との関係を検討した。

第13章と同様に、DEMをESRI社のGISソフトウェアArcViewに入力し、Hydrologic Modelingツールを用いて57の観測地点の上流域を表すポリゴンを抽出した。このポリゴン・データを利用して流域の諸特性を求めた。懸濁物質は流域内の多様な場所から供給されるが、観測地点に隣接した給源ほど観測値に与える影響が強い可能性がある。このため、Jarvie et al. (2002) による東部イングランドにおける研究では、上流域全体の特性とともに「近隣域（locality）」と呼ばれる部分流域の特性を求め、水質と懸濁物質濃度との関係を求めている。近隣域は、観測地点を中心に描いた半径10 kmの円と上流域とが重なり合った範囲として定義されている。本研究でも同様の手法を適用することにしたが、取り扱った流域がJarvie et al. (2002) で検討した流域よりも概して大きいため、観測地点を中心に描く円の半径を20 kmとした（図14-2）。近隣域の範囲を表すポリゴンの作成にはArcViewを利用した。

懸濁物質濃度の観測期間に生じた人為作用の変化を理解するためには、人為作用に関する時系列データを必要とする。しかし、調査した8河川流域の全域に関する複数時期の土地利用のデジタルデータは入手できなかった。一方、第13章で述べたように、青木ほか（2001）

は総務庁統計局の1970年, 1975年, 1980年, 1985年, 1990年, 1995年の人口データを編集している。調査地域における懸濁物質濃度の計測開始年は1978~1983年であり, 入手できたデータは1998年初頭までのものであったため, 1980年と1995年の人口密度データを観測時期の最初と最後における状況を表すデータとみなした。各観測地点について, 1980年~1995年ににおける上流域と近隣域の人口増加率 (RP) を次式を用いて求めた。

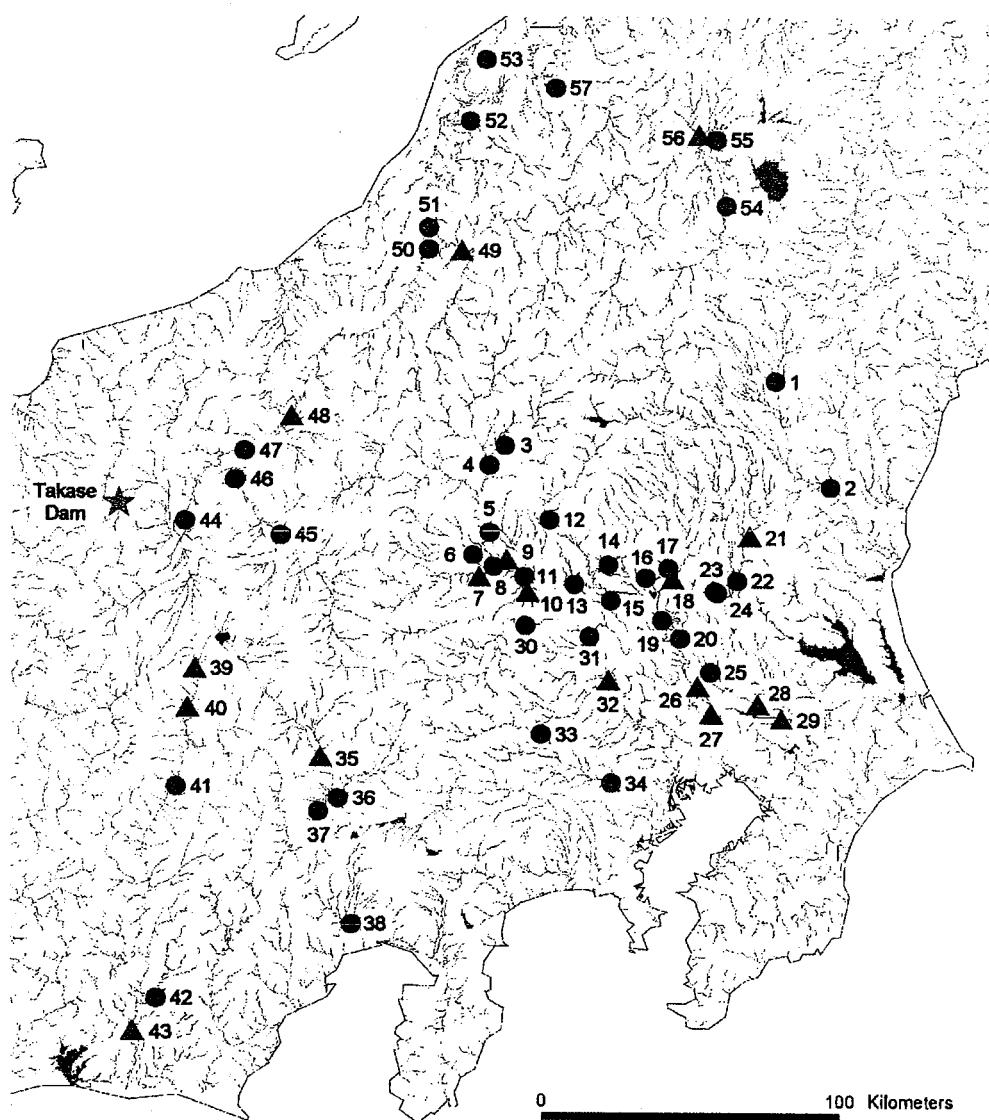


図14-1 調査対象とした57地点と高瀬ダムの位置

円 : Type Aの地点, 三角 : Type Bの地点 (定義は本文参照)

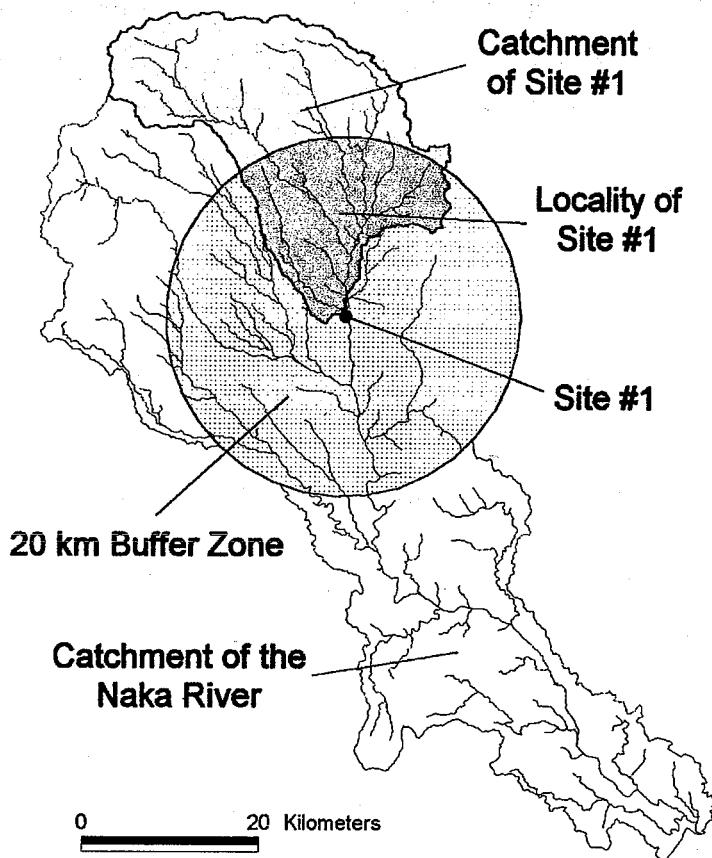


図14-2 近隣域の定義（那珂川流域、地点No.1の例）

$$RP = (P_{95} - P_{80}) / P_{80}$$

ただし、 P_{80} は1980年の人口密度（人/km²）、 P_{95} は1995年の人口密度（人/km²）である。

得られた RP の値は正の場合が多く、上記の15年間に人口が増大した流域が多いことを示す。また、 RP が0.2を超えるような急速な都市化があった流域も存在する。

さらに、上流域と近隣域の面積、平均標高、平均傾斜をDEMから算出した。表14-1は57地点の上流域と近隣域の諸特性を示している。

表14-1 57の上流域と近隣域の特徴

Basin	No	SSC	A	H	S	Agr	For	Set	Pop	Lagr	LFor	LSet	LPop	RPc	RPI	CT	DT	Type
Naka	1	8	672	558	10.5	25.1	68.7	2.7	126.7	40.2	52.3	5.2	255.6	0.125	0.151	IIa1	I	A
Naka	2	4	2249	429	10.2	28.1	64.2	4.2	145.5	22.9	69.9	4.4	131.4	0.093	-0.068	IIa3	I	A
Tone	3	8	659	1249	21.3	9.1	89.6	1.1	34.6	16.8	81.0	2.1	66.9	-0.047	-0.059	I	IId	A
Tone	4	4	1697	1103	21.6	9.9	86.9	1.3	60.4	23.3	72.7	3.4	158.9	-0.028	-0.001	IIa1	I	A
Tone	5	13	3285	1026	18.3	13.4	82.0	2.2	113.2	38.2	46.1	13.6	592.4	0.018	0.085	IIa1	I	A
Tone	6	21	560	612	13.5	23.0	66.9	7.2	270.2	51.0	30.7	15.6	480.0	0.053	0.069	IIa3	IIc	A
Tone	7	17	552	539	18.8	31.1	64.1	4.0	187.5	76.4	9.9	12.4	436.0	-0.006	0.051	I	I	B
Tone	8	18	1232	532	15.9	29.6	61.7	7.1	250.9	59.5	16.3	20.7	661.8	0.032	0.075	IIa1	I	A
Tone	9	17	3324	1014	18.1	14.0	81.1	2.6	121.7	61.7	5.0	30.8	1373.0	0.035	0.169	IIc	I	B
Tone	10	15	5169	847	17.5	18.7	74.8	4.4	198.8	53.5	17.0	25.9	1158.1	0.083	0.166	IIa1	I	A
Tone	11	20	772	83	2.2	65.0	20.5	12.9	424.1	74.1	7.3	16.6	489.0	0.135	0.060	I	I	B
Tone	12	5	472	915	23.1	6.6	85.6	1.2	77.9	10.4	88.1	1.5	79.0	-0.010	-0.119	IIa1	IIc	A
Tone	13	20	5940	760	15.7	24.4	67.1	6.4	290.5	69.1	3.6	24.3	1066.9	0.104	0.166	IIa3	I	A
Tone	14	13	831	510	17.6	17.9	69.5	9.4	462.4	38.9	34.6	23.2	1197.3	0.039	0.056	IIa1	I	A
Tone	15	13	6013	747	15.5	25.0	66.1	6.7	304.3	67.3	2.1	26.5	1215.5	0.112	0.183	IIa1	I	A
Tone	16	17	1307	469	16.4	20.5	65.6	10.3	487.0	45.9	32.2	19.7	866.7	0.052	0.071	IIa3	I	A
Tone	17	18	297	141	8.6	45.8	39.6	13.7	501.4	60.2	21.2	17.7	685.2	0.085	0.047	IIa1	I	A
Tone	18	12	873	304	11.2	30.7	56.9	10.2	438.3	60.8	13.6	22.5	906.0	0.157	0.225	I	I	B
Tone	19	20	8279	622	14.5	27.4	62.4	8.2	347.3	72.1	1.0	17.7	573.5	0.117	0.203	IIa1	I	A
Tone	20	21	8283	694	15.8	26.4	62.9	8.1	381.4	67.2	1.8	17.2	730.7	0.020	0.171	IIa2	I	A
Tone	21	15	377	125	3.5	59.9	29.6	8.8	294.7	55.5	34.5	8.5	284.8	0.168	0.169	IIc	I	B
Tone	22	21	605	100	2.6	63.6	22.9	12.2	408.5	72.2	12.2	14.8	524.3	0.145	0.061	IIa1	I	A
Tone	23	9	1640	783	15.9	21.0	67.7	6.3	288.8	73.3	7.2	16.0	544.5	0.092	0.102	IIa3	IIc	A
Tone	24	25	1682	764	15.5	25.6	62.3	7.5	286.4	71.0	7.3	17.4	566.3	0.123	0.108	IIa2	I	A
Tone	25	23	8976	606	14.2	27.7	61.1	8.5	384.0	61.2	7.8	26.6	619.5	0.126	0.289	IIa1	I	A
Tone	26	26	10597	582	14.2	26.6	62.3	8.2	388.0	59.1	10.1	24.3	535.7	0.130	0.206	IIa2	IIc	B
Tone	27	28	10595	582	14.2	26.6	62.3	8.2	388.1	58.8	11.2	20.5	507.7	0.130	0.256	IIc	IIc	B
Tone	28	25	11164	604	13.8	28.4	59.6	8.9	389.2	50.3	14.2	24.2	1303.6	0.142	0.435	I	I	B
Tone	29	19	12217	557	12.7	31.6	56.0	9.5	401.8	58.8	12.8	22.9	1259.4	0.153	0.436	I	I	B
Ara	30	7	913	772	24.8	10.5	81.3	3.1	140.7	30.3	60.4	7.0	388.6	-0.006	0.015	IIa1	IIc	A
Ara	31	11	1029	716	23.0	14.4	76.2	4.3	190.1	68.3	15.6	13.4	551.6	0.067	0.238	IIa3	IIc	A
Ara	32	13	1679	479	16.7	25.3	62.1	8.5	394.5	59.3	18.3	19.6	1060.4	0.258	0.361	IIb	IIc	B
Tama	33	2	470	1016	28.3	1.6	93.6	2.3	74.5	1.7	92.6	5.4	224.5	0.037	0.076	IIa1	IIc	A
Tama	34	9	1064	611	19.3	6.3	69.5	20.6	1429.8	15.4	14.7	62.0	4807.8	0.270	0.263	IIa1	I	A
Fuji	35	18	482	1241	20.2	16.9	76.9	2.4	72.1	18.4	76.2	2.0	71.3	0.076	0.052	IIc	IIa3	B
Fuji	36	19	917	1032	17.4	71.7	72.9	5.5	276.8	29.0	50.4	14.9	858.4	0.121	0.201	IIa1	I	A
Fuji	37	24	2173	1002	17.8	16.7	72.7	5.9	278.0	26.3	53.8	14.1	725.3	0.035	0.036	IIa1	I	A
Fuji	38	20	3531	995	20.9	13.7	74.8	5.0	191.7	11.8	76.1	3.3	94.5	0.100	-0.001	IIa3	IIc	A
Tenyu	39	15	735	1219	15.6	20.4	70.3	6.8	292.9	17.2	72.9	8.6	456.4	0.039	0.007	I	I	B
Tenyu	40	15	945	1162	15.2	23.0	67.7	7.0	302.8	22.8	68.7	6.3	249.3	0.067	0.141	IIb	I	B
Tenyu	41	15	2240	1257	20.3	16.6	76.0	4.2	172.3	13.9	79.6	2.3	97.1	0.060	0.060	IIa3	I	A
Tenyu	42	4	303	701	27.3	15.7	81.1	2.4	23.6	4.1	93.1	0.4	29.8	-0.177	-0.178	IIa1	I	A
Tenyu	43	12	4958	1026	22.4	11.8	83.1	2.6	125.5	5.7	91.3	0.7	63.7	0.021	-0.077	I	I	B
Shinano	44	20	2225	1299	22.5	16.2	76.9	3.9	191.9	26.8	64.5	6.0	355.8	0.091	0.069	IIa1	I	A
Shinano	45	11	2038	1174	15.3	21.2	70.7	4.8	134.3	33.2	58.8	6.9	247.5	0.058	0.040	IIa1	I	A
Shinano	46	15	2555	1109	15.6	21.1	70.8	5.1	171.6	17.3	74.5	7.1	388.8	0.067	0.033	IIa3	IIc	A
Shinano	47	21	2767	1191	21.9	17.1	76.6	3.7	170.9	27.6	66.5	5.6	115.9	0.060	-0.213	IIa3	I	A
Shinano	48	30	6537	1100	18.4	18.4	72.9	5.7	216.6	16.8	66.1	14.0	523.5	0.070	0.087	I	I	B
Shinano	49	9	1358	631	21.9	12.7	80.1	3.2	81.4	15.6	78.2	3.8	105.3	0.010	0.021	I	I	B
Shinano	50	37	8221	1048	18.2	18.2	73.5	5.1	191.7	32.3	59.2	7.7	238.3	0.055	-0.092	IIa3	I	A
Shinano	51	29	9768	973	18.6	17.6	74.3	4.9	175.7	29.2	62.8	7.2	208.6	0.049	-0.063	IIa3	I	A
Shinano	52	29	792	816	16.9	13.1	27.5	13.1	446.7	78.9	5.5	15.4	589.0	0.058	0.123	IIa1	I	A
Shinano	53	26	336	18	1.6	37.1	53.4	9.1	274.1	45.9	41.4	12.6	398.8	0.007	0.020	IIa3	I	A
Agano	54	4	894	850	20.4	11.4	83.0	1.1	30.8	7.8	88.1	1.5	30.8	-0.133	-0.206	IIa1	I	A
Agano	55	12	1049	772	13.3	22.7	69.5	2.5	57.1	28.4	62.9	3.9	97.6	0.014	0.071	IId	A	A
Agano	56	19	2721	716	15.7	21.4	71.2	3.5	109.1	42.6	45.3	9.7	320.8	0.000	0.026	IIb	I	B
Agano	57	10	7001	741	19.7	14.3	77.5	1.9	52.2	4.3	92.2	1.8	36.6	-0.034	-0.144	IIa1	I	A

SSC: 平均懸濁物質濃度 (mg/l), A: 上流域の面積 (km²), H: 上流域の平均標高 (m), S: 上流域の平均勾配 (度), Agr: 上流域の農地の比率 (%), For: 上流域の森林の比率 (%), Set: 上流域の居住地の比率 (%), Pop: 1985年における上流域の人口密度 (人/km²), LAGR: 近隣域の農地の比率 (%), LFOR: 近隣域の森林の比率 (%), LSET: 近隣域の居住地の比率 (%), LPop: 1985年における近隣域の人口密度 (人/km²), RPc: 上流域における人口増加率, RPf: 近隣域における人口増加率, CT: 懸濁物質濃度の時系列変化のタイプ, DT: 流量の時系列変化のタイプ, Type: 懸濁物質濃度の流量に対する相対変化のタイプ (詳細は本文参照)

3. データ解析

1) 懸濁物質濃度と上流域・近隣域の特性との関係

57地点における懸濁物質濃度に流域の土地条件が与える影響を調べるために、観測期間中の懸濁物質濃度の平均値と上流域・近隣域の特性との関係を調べた。その結果によると、懸濁物質濃度は流域面積、人口密度、農地の比率、居住地の比率と正の相関を持ち、流域の傾斜と森林の比率とは負の相関を持つ（図14-3、図14-4、表14-2）。したがって、第13章と同様に、調査地域における平水時の懸濁物質の主要な供給源は、自然の侵食ではなく農地や居住

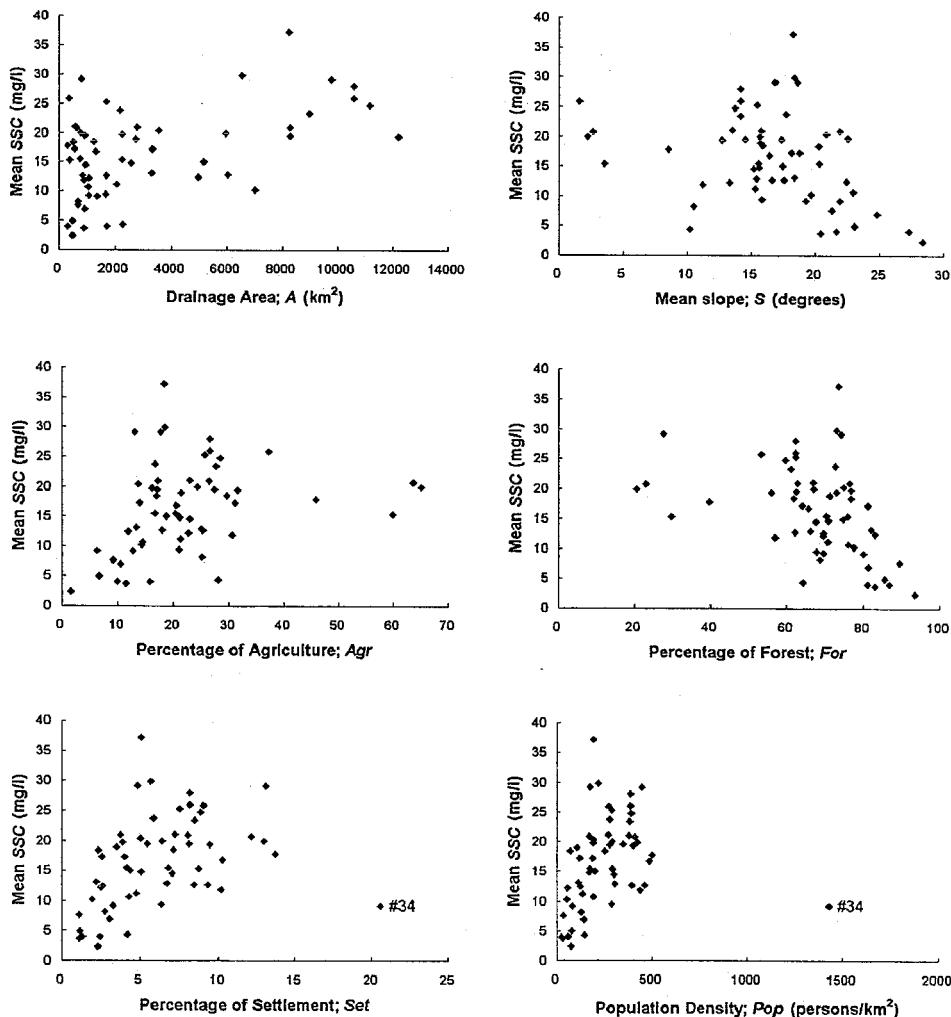


図14-3 懸濁物質濃度の平均値と上流域の特性との関係

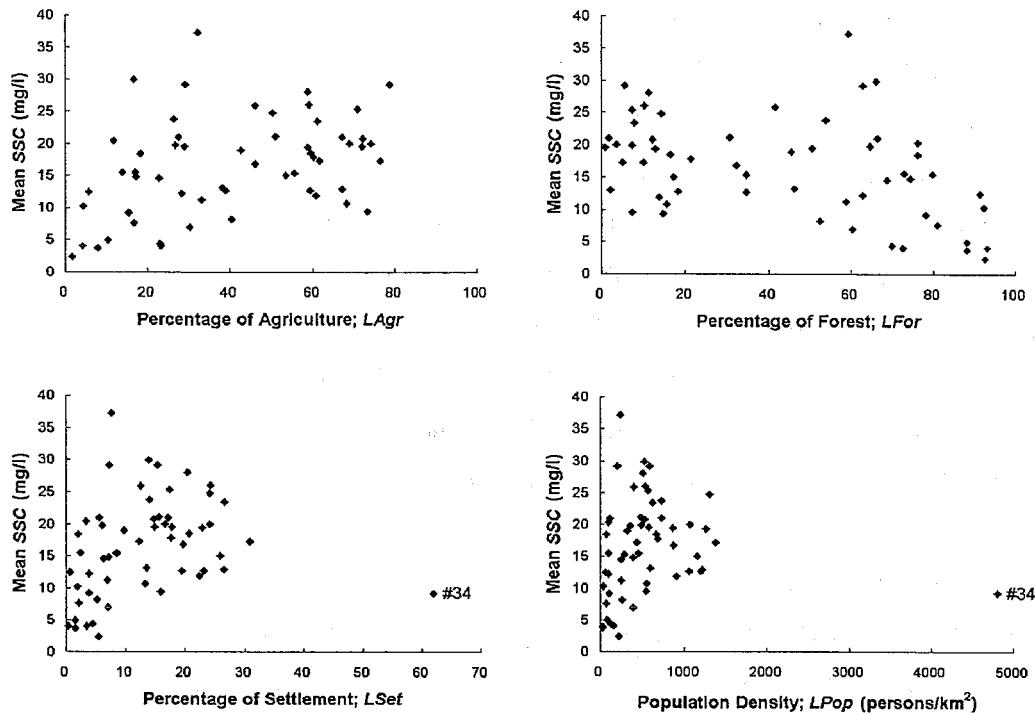


図14-4 懸濁物質濃度の平均値と近隣域の特性との関係

表14-2 懸濁物質濃度の平均値と上流域・近隣域の特性との間の相関係数および有意度

Unit	Property	57 sites		56 sites (bar #34)	
		R	Significance	R	Significance
Catchment	Area	0.505	+++	0.500	+++
	Height	-0.057		-0.066	
	Slope	-0.335	--	-0.330	--
	Agriculture	0.303	++	0.287	++
	Forest	-0.412	---	-0.414	---
	Settlement	0.364	+++	0.506	+++
Locality	Population	0.218		0.492	+++
	Agriculture	0.402	+++	0.391	+++
	Forest	-0.405	---	-0.428	---
	Settlement	0.239	++	0.410	+++
	Population	0.037		0.267	++

+++: 99%以上の有意度を持つ正の相関, ++: 95~99%の有意度を持つ正の相関

---: 99%以上の有意度を持つ負の相関, --: 95~99%の有意度を持つ負の相関

域における人間活動と判断される。また、大きな流域は人口が密集した広い低地を含むことが多いため、流域面積と懸濁物質濃度には正の相関があると推定される。

平均懸濁物質濃度と居住地比率の関係および濃度と人口密度との関係では、多摩川の下流域（No. 34）が例外的な傾向を示しており、居住地比率と人口密度が非常に高いにも関わらず、懸濁物質濃度が相対的に低い。この地点のデータを除外すると、居住地比率もしくは人口密度と懸濁物質濃度との正の相関が顕著に向かう（表14-2）。

表14-2によると、農地の比率と懸濁物質濃度との相関は、近隣域の場合が上流域の場合よりも高いが、居住地の比率もしくは人口密度と懸濁物質濃度との相関については、逆の関係がみられる。このことは、農地からの懸濁物質が主に近隣域から供給されるのに対し、都市域からの懸濁物質は遠方からも供給されることを示唆する。

2) 流量と懸濁物質濃度との関係

既存研究によると、個別の洪水イベントの期間内における流量と懸濁物質濃度との関係は複雑で、いわゆる「ヒステリシス」も認められる（Wood, 1977 ; Williams, 1989 ; Park, 1991 ; Kronvang et al., 1997）。しかし、長期の観測によって得られたデータを用いて流量と懸濁物質濃度との関係を求めるとき、正の相関が認められることが多い（Richards, 1984 ; Al-Ansari et al., 1988 ; Hodson et al., 1998 ; Asselman, 1999）。前記の57地点でも、懸濁物質濃度と流量には正の相関が認められ、相関の強さは地点によって異なる（図14-5）、54地点では相関が99%以上の有意度を持つ。したがって、懸濁物質濃度の時系列変化を検討する際には、流量の変化を同時に検討し、流量には依存しない懸濁物質濃度の変化を抽出する必要がある。

3) 懸濁物質濃度の時系列変化

57地点で観測された懸濁物質濃度は大半が30 mg/l以下であり、100 mg/l以上の高い値は稀である（図14-5）。つまり、計測された濃度の頻度分布は小さな値に偏っている。この点を考慮し、以下の議論では懸濁物質濃度の対数値を利用し、個別の洪水イベントではなく通常の河川の状況を重視することにする。各地点における懸濁物質濃度の対数値を時間軸に沿ってプロットし、懸濁物質濃度の時系列変化を検討したところ、年周期を反映すると思われるピークとトラフが認められた（図14-6）。これらは、流量と細粒土砂生産の季節変化（倉茂, 1985 ; Kurashige, 1993）を反映すると考えられる。一方、今回は懸濁物質濃度の長期的な変化傾向に注目するために、データに二次式の回帰線を適合し、調査全期間における一般的な傾向を近似した（図14-6）。得られた回帰線は細かいピークやトラフとは基本的に無関係であ

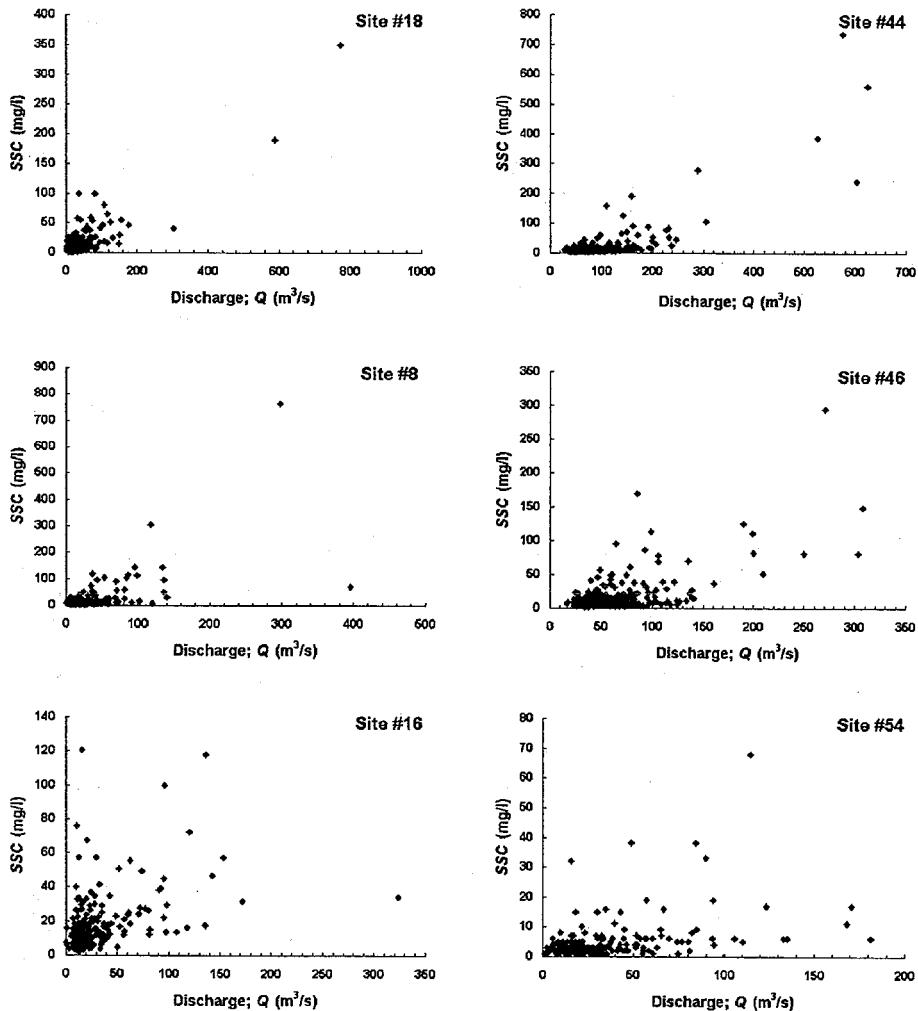


図14-5 各地点における流量と懸濁物質濃度との関係の例

高い正の相関（地点No.18とNo.44, $r = \text{ca. } 0.8$ ），中程度の正の相関（地点No.8とNo.46, $r = \text{ca. } 0.6$ ），
低い正の相関（地点No.16とNo.54, $r = \text{ca. } 0.4$ ）。

り，回帰線は平水時の状況に関する長期的傾向を示すといえる。回帰線の判読から，懸濁物質濃度が時間とともに減少した地点が多いことが判明した。

回帰線で表される懸濁物質濃度の時系列変化を分類するために，次の基準を適用した。最初に，回帰線で示される懸濁物質濃度の対数値の最大値と最小値を計測した。もし両者の差が0.20より小さければ，懸濁物質濃度の時間的な変化が少なかった「タイプI」と認定した。

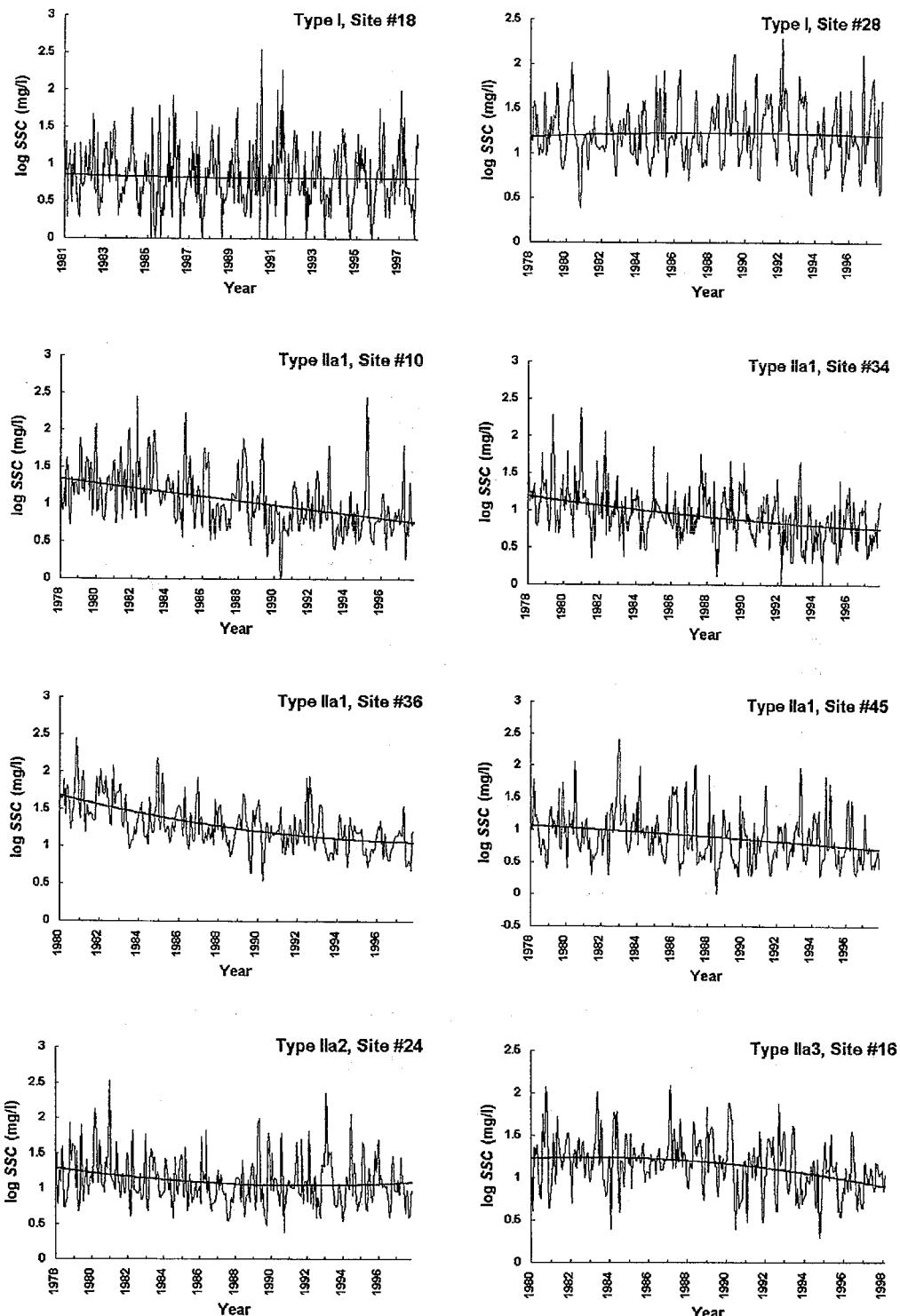
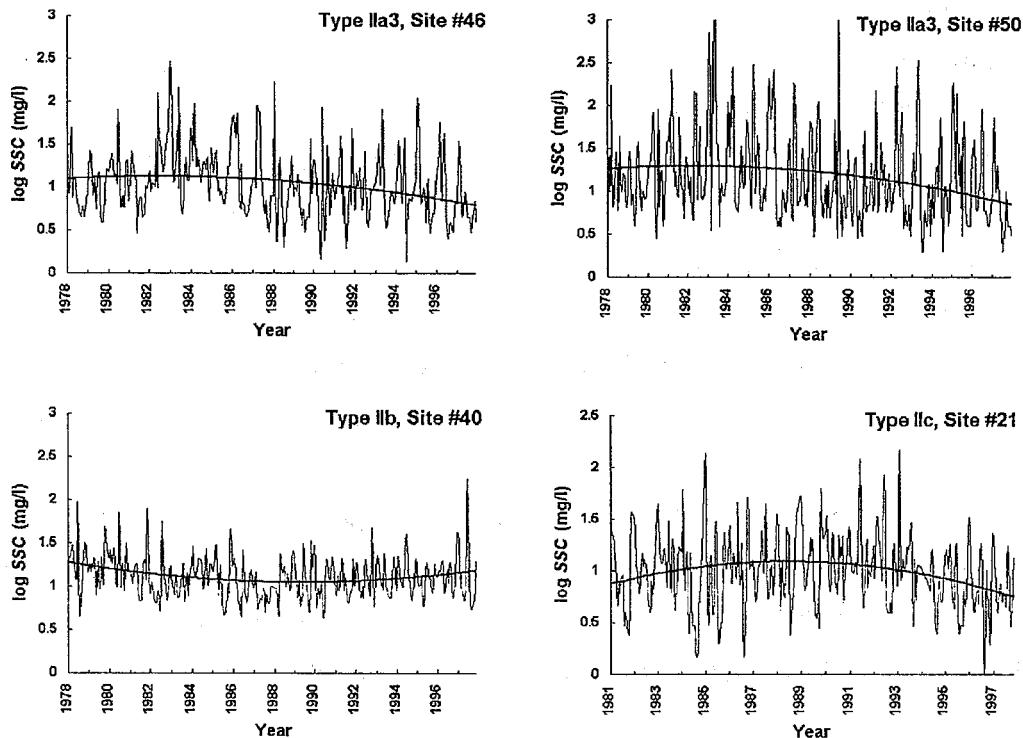


図14-6 懸濁物質濃度の時系列変化の例



(図14-6 つづき)

一方、両者の差が0.20以上の場合には、懸濁物質濃度が時間とともに変化した「タイプII」と認定した。前記のように、タイプIIの多くは懸濁物質濃度が時間とともに減少する傾向を示す。これをタイプIIaと呼ぶ。また、タイプIIaをさらに細分し、懸濁物質濃度が時間とともに恒常に減少したタイプIIa1、観測時期の前半は濃度が減少したが後半は変化が少なかったタイプIIa2、観測時期の前半は変化が少なかったが後半は濃度が減少したタイプIIa3の三つに分類した。一方、タイプIIの中には懸濁物質濃度が時間とともに増加した時期を含むものがある。その一部は凹型の回帰線を持ち、観測時期の前半では懸濁物質濃度が減少したが後半では増加した。これをタイプIIbと呼ぶ。また、凸型の回帰線を持ち、観測時期の前半では懸濁物質濃度が増加したが後半では減少した地点もある。これをタイプIIcと呼ぶ。図14-6はこれらのタイプの例を示している。また、表14-1には全57地点における懸濁物質濃度の変化のタイプを示した。各タイプの数は、タイプIが11、タイプIIa1が23、タイプIIa2が3、タイプIIa3が13、タイプIIbが3、タイプIIcが4である。減少傾向を示すタイプIIaが全体の約2/3に相当する39地点で見られる。

4) 流量の時系列変化

懸濁物質濃度の場合と同様の手法を用いて、河川流量の時系列変化を分類した。流量は豪雨の際に急増するので、流量の対数値を用いて平水時に注目した解析を行った。流量の時間変化の傾向を二次関数の回帰線で近似したところ、懸濁物質濃度の場合と同様に、回帰線はピークやトラフに対応した極端な値とは基本的に無関係なことが判明した（図14-7）。回帰線の形状を、懸濁物質濃度の場合と同一の基準で分類した。その結果によると、流量が大きく変化しないタイプIが43地点（全体の約3/4）を占め、次に多いタイプは11地点で見られるタイプIIcである。2地点では観測期間を通じて流量の回帰線が増加傾向を示す。これをタイプIIDと呼ぶ。残りの1地点はタイプIIa3に分類される。図14-7はこれらのタイプの例を示している。

タイプIIcがやや多くみられることは、降水量の変化と関連づけられる。国土交通省（2002）によると、5年移動平均に基づく日本の年降水量は、1970年代末～1980年前半に増加したが1980年代後半～1990年代前半には減少した。ただし、流量に明確な変化がないタイプIがより卓越することは、降水量変化が流量の時系列変化に与えた影響が小さいことを示している。

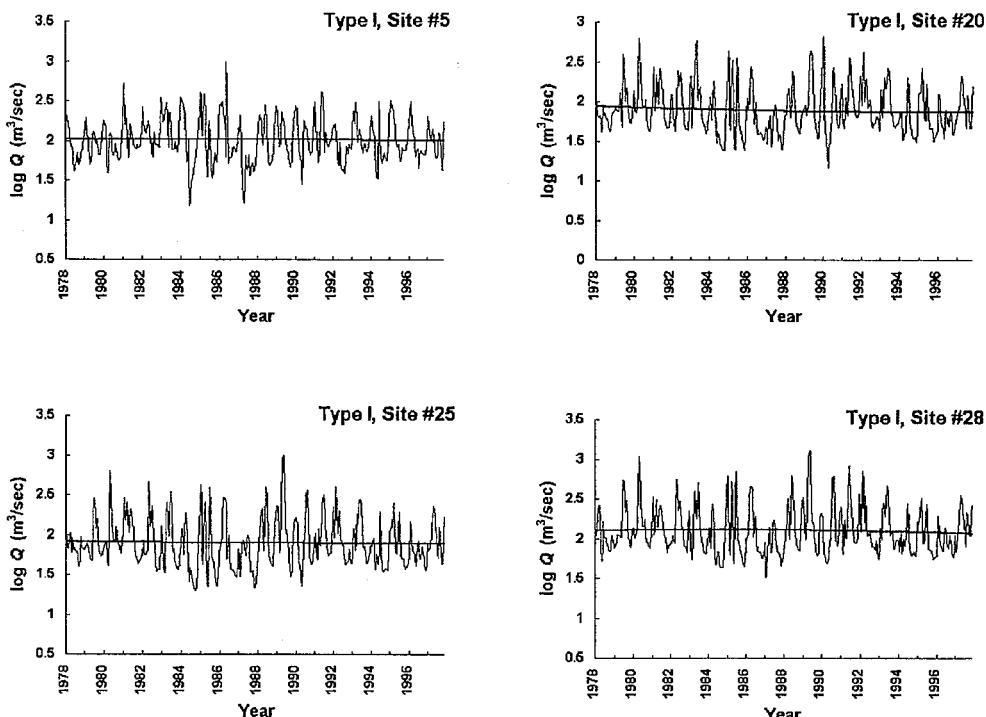
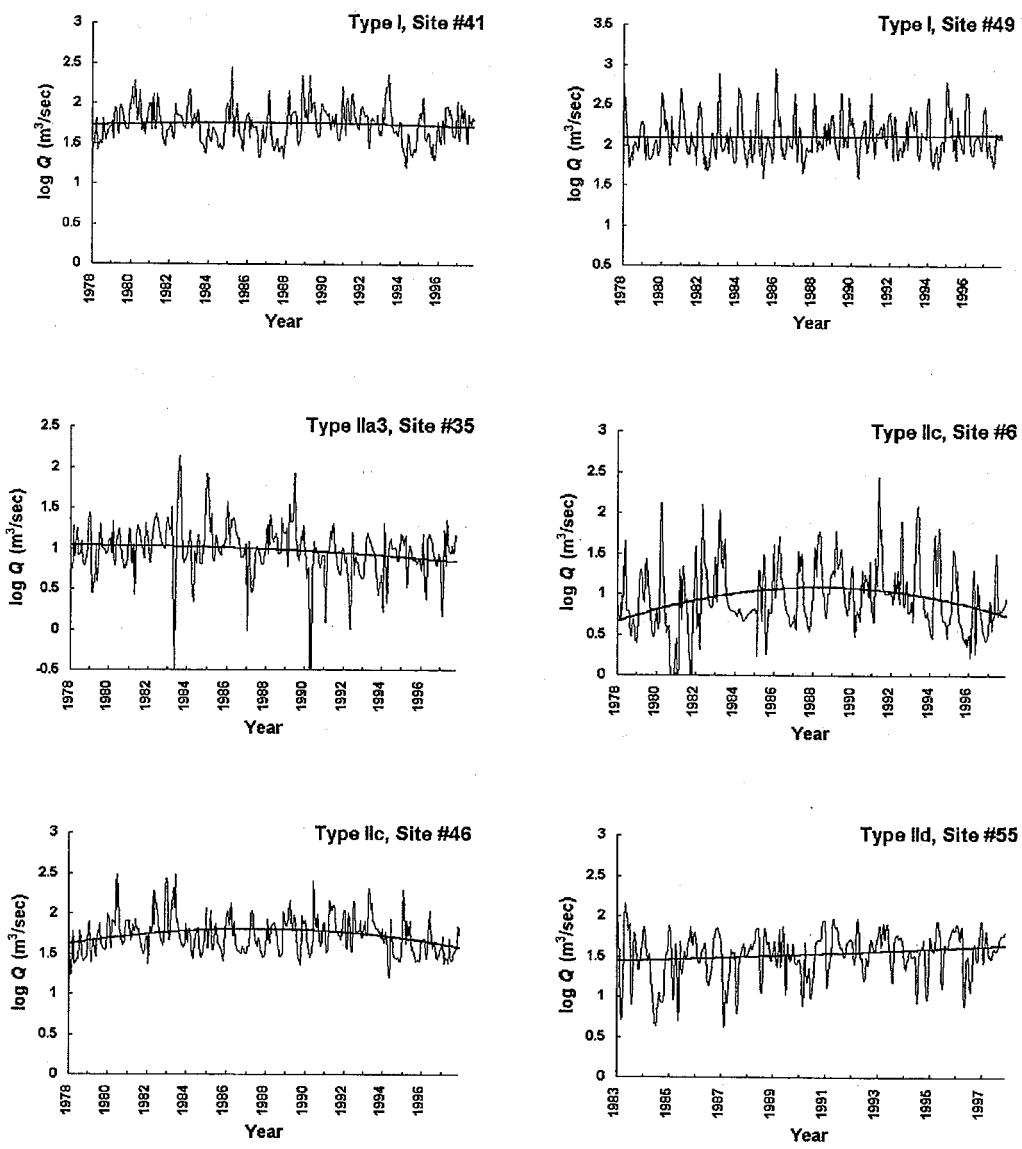


図14-7 流量の時系列変化の例



(図14-7 つづき)

5) 懸濁物質濃度と流量の時系列変化の組み合わせ

懸濁物質濃度が時間とともに減少し、流量は一定という傾向が卓越することは、河川への細流物質の供給が時間とともに減少したことを示唆する。しかし、懸濁物質濃度と流量の時系列変化の傾向が上記とは異なる場合もある。そこで、各地点の懸濁物質濃度と流量の変化が、上記の卓越的な傾向に一致するか否かを判定した。

計測期間の前半と後半について、懸濁物質濃度の流量に対する相対変化を回帰線の傾向を踏まえて次の3種類に分類した。

- a) 平行型：懸濁物質濃度と流量が同時に増加するか、同時に減少するか、両者がともに変化しない
- b) 相対減少型：流量が変化しないか増加する状況において懸濁物質濃度が減少する、もしくは流量が増加する状況において懸濁物質濃度が変化しない
- c) 相対増加型：流量が変化しないか減少する状況において懸濁物質濃度が増加する、もしくは流量が減少する状況において懸濁物質濃度が変化しない

いくつかの地点では、観測期間の前半と後半が共に相対減少型となる。また、前半か後半のいずれかが相対減少型となり、残りの半期は平行型となる場合もある。これらの場合には、対象地点では流量の減少なしに懸濁物質濃度が減少したとみなし、上記の一般的な傾向に一致すると判断した。この例をタイプAと呼ぶ。一方、観測期間の前半か後半が相対増加型となるか、前半と後半がともに並行型の場合には、上記の一般的な傾向とは一致しないと判断した。この例をタイプBと呼ぶ。表14-1と図14-1に示したように、タイプAは全体の約3/4に相当する42地点でみられ、タイプBは約1/4に相当する17地点でみられる。

6) 人口増加率と懸濁物質濃度の相対変化

図14-8は、上流域と近隣域の人口増加率を、タイプAとタイプBを区別してプロットしたものである。2タイプの分布は分散しているが、2つの傾向を指摘できる。まず、人口増加率が負の場合にはタイプAが多く、上流域の人口増加率が負となる8地点のうち7地点がタイプAであり、近隣域の人口増加率が負となる12地点のうち11地点がタイプAである。一方、人口増加が急速な場合にはタイプBが多く、上流域の人口増加率が0.13より大きい10地点のうち8地点がタイプBであり、近隣域の人口増加率が0.3より大きい3地点は全てタイプBである。

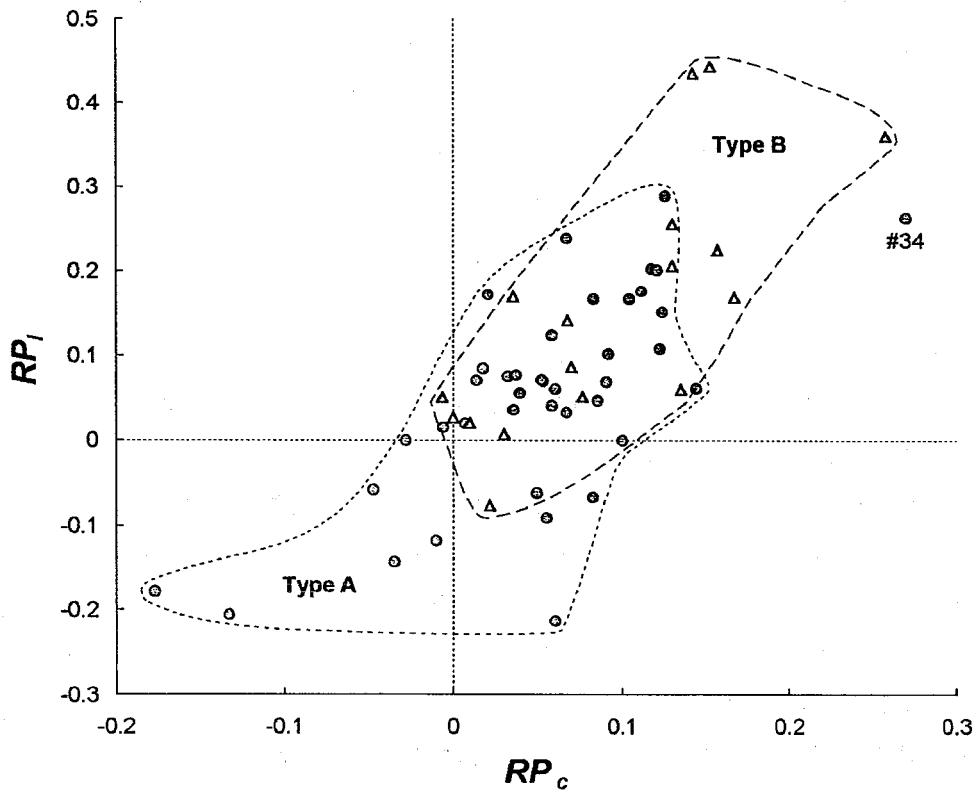


図14-8 上流域における人口増加率 (RP_c) と近隣域における人口増加率 (RP_l) のプロット
円 : Type Aの地点、三角 : Type Bの地点（定義は本文参照）

4. 考察

1) 細粒物質の供給が減少した原因

3-1) で述べたように、平水時における懸濁物質の最も主要な給源は農地と居住地である。日本では、1970年代中期以降に居住地が増大して農地が減少した。国土交通省（2001）によると、1975年～1997年に日本列島全体に占める居住地の比率（工業用地を含む）は2.1%から2.8%に増加し、特に三大都市圏（東京・名古屋・大阪とその周辺）では居住地が8.1%から10.8%に増加した。一方、同じ時期に日本列島全体に占める農地の比率は15.3%から13.3%に減少し、三大都市圏では15.2%から12.1%に減少した。したがって、1970年代以降の農地の相対的な減少が、河川への細粒物質の供給を減少させた一因と推定される。また、耕作方法の改善や、農地からの土砂流出を防ぐための工夫も、その一因であろう。

宅地や工業用地からの細粒物質の供給も、1970年代以降に減少したと考えられる。1950～60年代の日本では、他の先進国の例（Carson, 1962；Wiese et al., 1997；Petts, 2001など）と同様に、多くの都市河川で水質が非常に悪化した。このため、日本政府は1971年に「水質汚濁防止法」を施行し、都市域からの污水排出を制限した。その結果、工場に污水処理施設が導入され、行政も下水道と終末処理場を建設し（Kubo, 1991；Matsuo, 2000），河川の水質が改善された。たとえば、CODおよびBODが基準値を超える河川の比率は1974年には48.7%であったが、1999年には18.5%となった。カドミウムと亜鉛の濃度が基準値を超えていた河川の比率は1971年には0.7%であったが、1999年には0.05%未満となった（環境省, 2000）。污水処理の過程では、細粒の粒子も一般的に減少するので、上記の水質構成要素の減少とともに、廃水中の懸濁物質の量も減少したと判断される。

護岸・治山工事による流域の改変も、侵食に起因する細粒土砂の供給を減少させたと思われるが、ダムの建設の影響は限定的であろう。調査地域では1975年以降に24の大型ダムが建設されている。資源エネルギー庁公益事業部電力技術課（1998）は、これらのダムの貯水池における堆砂速度を記録している。その結果によると、24のダムのほとんどでは堆砂速度が小さく、年間 $50,000\text{ m}^3$ 未満であった。したがって、これらのダムは1970年代以降の懸濁物質濃度の減少にはほとんど関与していないと判断される。堆砂速度が小さい理由として、1975年以降に建設されたダムの大半が既存のダムの下流に位置するために、上流側の貯水池で事前に土砂が堆積することがあげられる。上流側の貯水池における堆砂は1975年以前から生じていたので、今回調査した懸濁物質濃度の変化とは無関係といえる。しかし、1978年に建設された信濃川流域上流部の高瀬ダム（図14-1）は、新しいダムとしては例外的に大きな堆砂速度（ $720,000\text{ m}^3/\text{yr}$ ）を持つ（資源エネルギー庁公益事業部電力技術課, 1998）。このダムの下流側における最初の観測地点（No. 44, 図14-1, 表14-1）はタイプAに属するので、ダムの建設の結果生じた堆砂が懸濁物質濃度の減少に寄与した可能性がある。しかし、ダム建設の影響が流域の土地利用の変化にともなう細粒物質供給の減少よりも顕著かは不明である。

以上から、流量の減少を伴わない懸濁物質濃度の減少という調査地域において一般的な傾向は、農地の減少、污水処理技術の導入、侵食防止工事などにともなう河川への細粒物質供給の減少に起因すると考えられる。次に、上記の一般的な傾向とは異なる傾向を持つ地点が存在する理由を検討する。

2) 人口の変動と懸濁物質濃度の変化：一般的傾向と多摩川流域の独自性

人口増加率が負の場合にタイプAが多いこと（図14-8）は、人口が減少した流域では細粒物質の供給が顕著に減少したことを示す。これは、細粒物質の供給が主に入為作用によるという前記の判断と調和する。人口が減少した地域では農業活動、汚水の廃水および建設工事が不活発となったのだろう。一方、人口増加率が高い場合にタイプBが多いことは、人間活動の増加に伴う汚水の排出の増加と、都市化の際の建設工事に起因した土砂生産の増加を反映すると思われる。前記のように、都市化は農地の減少をもたらすため、農地からの細粒物質供給は減少した可能性が高い。これは調査地域全体では正しいと思われるが、都市化が極めて早く進行した場合には、汚水の増加や建設工事の影響が農地の減少の効果を凌ぐと判断される。

ただし、上流域の人口増加率が最も高い多摩川下流のNo. 34地点はタイプAに属する。この地点は図14-3および図14-4においても例外的であり、居住地の比率に対する農地の比率が非常に低い。したがって、急速な都市化に伴う農地の減少がきわめて顕著であったために、河川への細粒物質の供給が減少した可能性がある。さらに、この地点の上流域では、1960年代から多摩ニュータウンの建設に伴う大規模な宅地造成が行われた。この際には非固結の第四紀層からなる丘陵地の尾根を削って谷を埋め、大規模な平坦地を整備した（Kadomura, 1980および第4章）。Kinoshita and Yamazaki (1974) は、多摩丘陵の造成後の裸地は侵食を受けやすく、多少の細粒土砂を下流に供給していると指摘した。宅地造成のための地形改変は他の東京近郊の地域でも1960年代以降に行われたが、多摩丘陵における改変の規模は他の例よりもはるかに大きい。多摩丘陵における地形改変は1990年代まで継続したが、その規模は1960年代末期と1970年代初期に大きく、その後徐々に減少した。また、改変によって生じた地形が舗装、建築物、緑地などによって覆われると、土壤侵食量は激減したと考えられる。以上から、大規模地形改変とともに多摩丘陵からの土砂流出は1970年代には多かったが、その後は徐々に減少したと判断される。このことも、No. 34地点がタイプAに属する一因と推定される。

前記のように、上流域の人口が減少した場合にはタイプAが多く、人口が急増した場合にはタイプBが多いが、人口が微増もしくは中程度に増加した場合には、タイプの違いと人口変化率との関係は不明確である（図14-8）。このような同程度の都市化の下で、2タイプが混在する理由を説明するためには、農地の減少、土木工事の増加、家庭・産業廃水の変化といった要因の影響を個別に詳しく評価する必要がある。しかし、土木工事の強度や家庭・産業廃水の量・質に関する信頼できるデータの入手は困難と思われる。今後、上記の問題を解決するための方法について、詳しい検討が必要である。

5. おわりに

本研究では、官庁が整備したデータとGISを活用し、関東～中部日本の主要8流域における河川の懸濁物質濃度、流量および人間活動の関係を検討した。懸濁物質濃度は流量と細粒物質の供給量に強く規定され、後者は農地や宅地の比率、人口密度といった人為活動に関連した要素に影響を受ける。約3/4の観測地点では、河川への細粒物質の供給が時間とともに減少する傾向がみられた。これは、都市化にともなう農地の縮小、1971年の水質汚濁防止法の施行、および護岸・治山工事に起因すると考えられる。細粒物質の供給の減少は、とりわけ上流域の人口が減少した場合に明瞭である。しかし、上流域の人口が急増している場合には、人為的な活動によって細粒物質の供給が増加する傾向も認められた。また、多摩川流域の中～下流部では、多摩丘陵における大規模な地形改変も懸濁物質濃度の時系列変化を規定する要因となっている。

本研究の結果は、近年における河川の懸濁物質濃度の変化とその規定要因は複雑であり、その特徴や地域差を解明するためには、流量や土地利用などに関するデータを注意深く解析する必要があることを示している。今後は、今回は検討を行わなかった高水時の懸濁物質濃度の特徴も考慮に入れた、より詳細な検討を行う予定である。

文献

- 青木賢人、シアク＝ジャン、小口 高、2001. 補間法による国勢調査人口メッシュデータの座標変換. 厚生省科学研究費（課題番号H12-政策-014）報告書「地理情報システムを用いた地域人口動態の規定要因に関する研究」, 25-44.
- 環境省、2000. 環境白書.
- 国土交通省、2001. 土地白書.
- 国土交通省、2002. 日本の水資源.
- 倉茂好匡、1985. 北海道盤渓川流域の土砂供給機構. 地形, 6, 45-64.
- 資源エネルギー庁公益事業部電力技術課、1998. 平成9年度発電用貯水池・調整池堆砂状況. 電力土木, 227, 161-167.

- Al-Ansari, N.A., Asaad, N.M., Walling, D.E., Hussan, S.A., 1988. The suspended sediment discharge of the River Euphrates at Haditha, Iraq. *Geografiska Annaler*, 70A, 203-213.
- Asselman, N.E.M., 1999. Suspended sediment dynamics in a large drainage basin: the river Rhine. *Hydrological Processes*, 13, 1437-1450.
- Carson, R, 1962. *Silent Spring*. Fawcett, Greenwich.
- Chen, Z., Li, J., Shen, H., Wang, Z., 2001. Yangtze River of China: historical analysis of discharge variability and sediment flux. *Geomorphology*, 41, 77-91.
- De Boer, D.H., 1997. Changing contribution of suspended sediment sources in small basins resulting from European settlement on the Canadian prairies. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22, 623-639.
- Hodson, A., Gurnell, A., Tranter, M., Bogen, J., Hagen, O. J., Clark, M., 1998. Suspended sediment yield and transfer processes in a small High-Artic glacier basin, Svalbard. *Hydrological Processes*, 12, 73-86.
- Jarvie, H. P., Oguchi, T., Neal, C., 2002. Exploring the linkages between river water chemistry and watershed characteristics using GIS-based catchment and locality analyses. *Regional Environmental Change*, 3, 36-50.
- Kadomura, H., 1980. Erosion by human activities in Japan. *GeoJournal*, 4, 133-144.
- Keown, M.P., Dardeau, E.A. Jr., Causey, E.T., 1986. Historic trends in the sediment flow regime of the Mississippi River. *Water Resources Research*, 22, 1555-1564.
- Kinoshita, T., Yamazaki, Y., 1974. Increase of sediment transport due to large-scale urbanization. In: *Effects of Man on the Interface of the Hydrological Cycle with the Physical Environment*, Proceedings of the Paris Symposium, IAHS Publ., 113, 127-129.
- Kronvang, B., Laubel, A., Grant, R., 1997. Suspended sediment and particulate phosphorus transport and delivery pathways in an arable catchment, Gelbaek Stream, Denmark. *Hydrological Processes*, 11, 627-642.
- Kubo, T., 1991. Historical factors and recent developments in waste-water treatment management in Japan. *Journal of the Institution of Water and Environmental Management*, 5, 553-561.
- Kuhnle, R.A., Bingner, R.L., Foster, G.R., Grissinger, E.H., 1996. Effect of land use on sediment transport in Goodwin Creek. *Water Resources Research*, 32, 3189-3196.
- Kurashige, Y., 1993. Mechanism of suspended sediment supply to headwater rivers and its seasonal variation in west central Hokkaido, Japan. *Japanese Journal of Limnology*, 54, 305-315.

- Lenzi, M., Marchi, L., 2000. Suspended sediment load during floods in a small stream of the dolomites (Northeastern Italy). *Catena*, 39, 267-282.
- Matsuo, T., 2000. Japanese experiences in water pollution control and wastewater treatment technologies. *Water Science and Technology*, 42-12, 163-172.
- Milliman, J. D., Qin, Y. S., Ren, M. E., Saito, Y., 1987. Man's influence on the erosion and transport of sediment by Asian rivers: the Yellow River (Huanghe) example. *Journal of Geology*, 95, 751-762.
- Mossa, J., 1996. Sediment dynamics in the lowermost Mississippi River. *Engineering Geology*, 45, 457-479.
- Neal, C., Robson, A.J., Wass, P., Wade, A.J., Ryland, G.P., Leach, D.V., Leeks, G.J.L., 1998. Major, minor, trace element and suspended sediment variations in the River Derwent. *The Science of the Total Environment*, 210/211, 163-172.
- O'Hara, S.L., Street-Perrott, F.A., Burt, T.P., 1993. Accelerated soil erosion around a Mexican highland lake caused by prehistoric agriculture. *Nature*, 362, 48-51.
- Park, J.-K., 1991. Characteristics of sediment discharge in a mountain stream viewed from the variation pattern of suspended sediment concentration. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, 12, 51-67.
- Peart, M. R., 1997. Human impact upon sediment in rivers: some examples from Hong Kong. In: Walling, D.E., Probst, J.L., eds., *Human impact on erosion and sedimentation*. IAHS Publ. 245, 111-118.
- Petts, G., 2001. Sustaining our rivers in crisis: setting the international agenda for action. *Water Science and Technology*, 43-9, 3-16.
- Poulos, S.E., Collins, M., Evans, G., 1996. Water-sediment fluxes of Greek rivers, southeastern Alpine Europe: annual yields, seasonal variability, delta formation and human impact. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 40, 243-261.
- Richards, K., 1984. Some observations on suspended sediment dynamics in Storbregrova, Jotunheimen. *Earth Surface Processes and Landforms*, 9, 101-112.
- Sutherland, R.A., Bryan, R.B., 1991. Sediment budgeting: a case study in the Katiorin Drainage Basin, Kenya. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16, 383-398.
- Tiffen, M., Mortimore, M., Gichuki, F., 1994. More people, less erosion: environmental recovery in Kenya. John Wiley & Sons, New York.

- Walling, D.E., 1990. Linking the field to the river: sediment delivery from agricultural land. In: Boardman J, Foster I.D.L., Dearing, J.A. eds. Soil erosion on agricultural land. John Wiley & Sons Ltd, New York, 129-151.
- Walling, D.E., 1997. The response of sediment yield to environmental change. In: Walling, D. E., Probst, J. L. eds. Human Impact on Erosion and Sedimentation. IAHS. Publ., 245, 77-89.
- Wiese, S.B.O., MacLeod, C.L., Lester, J.N., 1997. A recent history of metal accumulation in the sediments of the Thames Estuary, United Kingdom. *Estuaries*, 20, 483-493.
- Williams, G.P., 1989. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. *Journal of Hydrology*, 111, 89-106.
- Wolman, M.G., 1967. A cycle of sedimentation and erosion in urban river channels. *Geografiska Annaler*, 49A, 385-395.
- Wood, P.A., 1977. Control of variation in suspended sediment concentration in the River Rother, West Sussex, England. *Sedimentology*, 24, 437-445.

「G I Sを用いた流域分類と流出現象のモデル化に関する研究」
— 多摩川流域丘陵地への適用 —

(研究助成・学術研究VOL. 32-No.239)

編著者 小口 高

発行日 2004年3月31日

発行 財団法人 とうきゅう環境浄化財団

〒150-0002

渋谷区渋谷1-16-14(渋谷地下鉄ビル内)

TEL (03)3400-9142

FAX (03)3400-9141
