7．2　ラトゥ川下流部における氾濫域と土砂堆積域の変化

7.1 節では，ラトゥ川上流部の衛星データから河道域を抽出するために有効なバンドを選定し，河道の面積とその経年的な変化について，解析をした。その結果，森林域と土砂堆積域の分光反射率パターンは明確に分離することができることが判明し，土砂堆積域の分類作業をおこなった。図 7.1 から図 7.4 における sedi-2 の分光反射率パターンは，流域内の氾濫域に堆積した土砂の輝度特性である。この sedi-2 の特徴である相対的に高い分光反射率は，上流部と比較して粒子が細かくかつ乾燥した堆積物の性質に起因している。

本節では，勾配が緩やかで距離の長い東西ハイウェイからの土砂氾濫域の経年的な推移と河道の変動状況について検討した。

図 7.9 に，1993 年の Landsat TM data を用いて，ラトゥ川全流域より土砂堆積域を分類した結果を示す。また，4 時期の TM データと LISS データを用いて氾濫域の土砂堆積域を算出した結果を表 7.4 に示す。

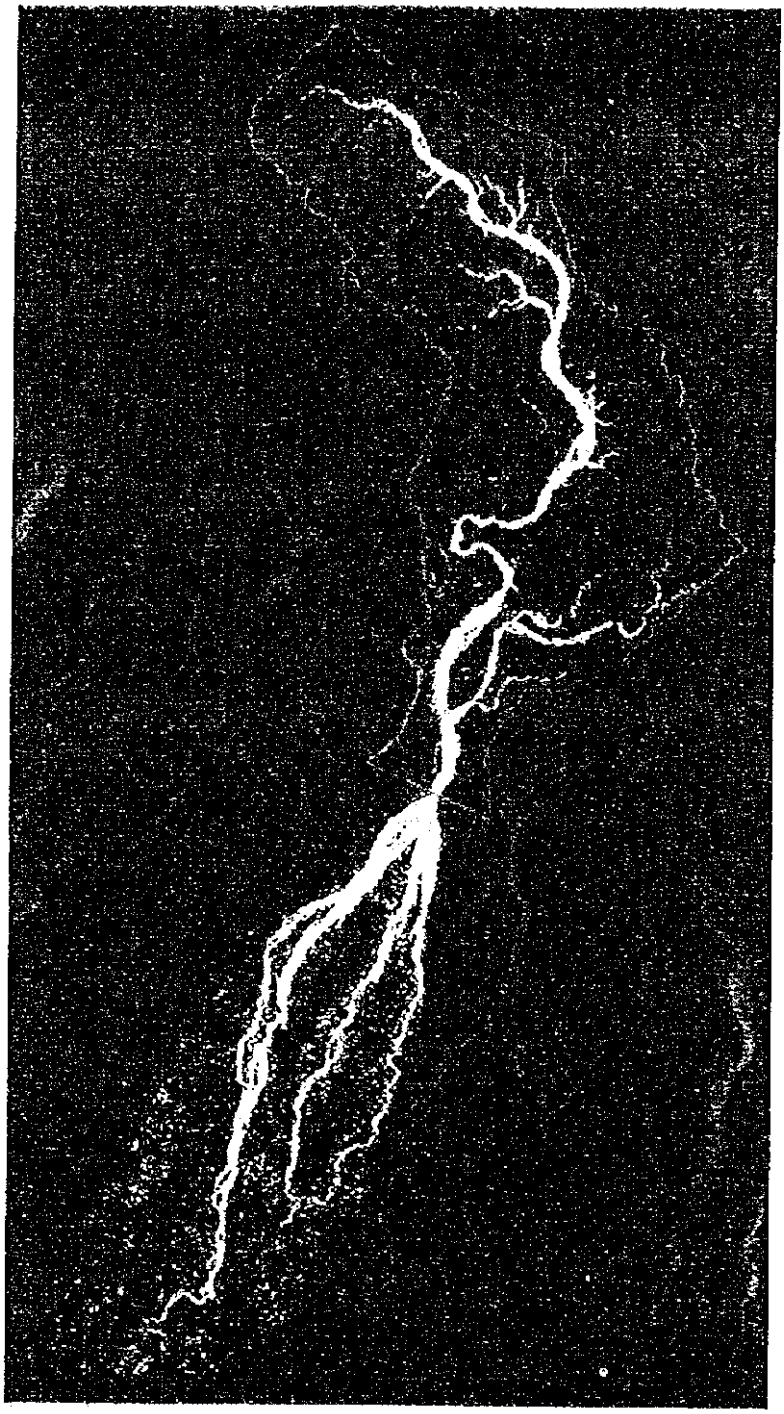
Table 7.4 Floodplain deposition of sediment and its change

73-MSS sq. km	77-MSS sq. km	93-TM sq. km	95-TM sq. km	95-LISS sq. km
9.1656	11.5956	9.1512	9.6012	10.0685

算出結果は，東西ハイウェイより下流の地域における全土砂堆積域を表示している。

古い堆積土砂の分光反射率パターンは，図 7.1 から 7.4 に示すように，最近の堆積土砂と比較していずれのバンドにおいても輝度値が低下しており，はっきり区別することができる。このような反射率の低下は，堆積土砂が時間的に経過したことによる色調の変化か，堆積土砂上に生育した低草類が原因であると考えられる。

表 7.4 の算出結果は，衛星データが上空を通過する時点における堆積域の範囲を観測したものである。堆積域の範囲は，1973 年から 1977 年の間に劇的に増加したことを除けば，徐々に増えているということがわかる。また，同時期に観測された 1995 年の Landsat と LISS の分類結果は，ほぼ同じ結果となった。このことは，インドの LISS が LandsatTM の代替衛星として利用できることを示している。



LEGEND

Deposited area

Watershed

0 3.5 7.0 km

1 : 175,000

RESEARCH REPORT ON THE INVESTIGATION OF LANDSLIDE AND SOIL EROSION IN NEPAL USING REMOTE SENSING TECHNOLOGY	Figure 7.9 Deposited area estimated for Ratu river using 1993 March TM data
	JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY

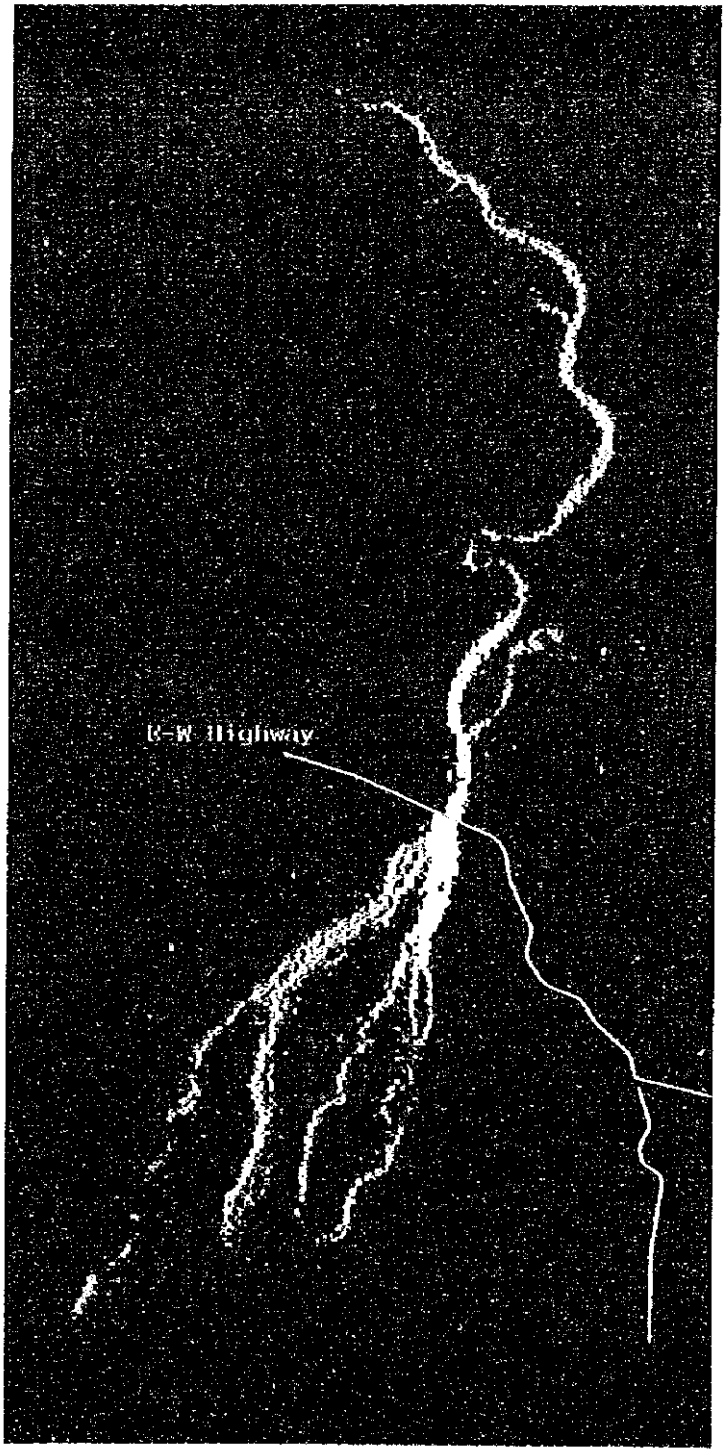
過去において，画像統合技術は複数の土地被覆項目の空間的な変化やパターンを強調するために使われた経緯がある。そこで，本検討では，2時期の画像を重ね合わせ，2時期の堆積域の変化を”新規に堆積域が拡大した地域”，”変化がない地域”，”堆積域が消滅した地域”の3つの変化パターンに区分し，土砂堆積の変化を抽出した。図7.10～ 図7.12に，1973年～1977年， 1977年～1993年，1993年～1995年における変化パターンの分布結果を示す。なお，これらは2時期を比較して，ライトブルーは”新規に堆積域が拡大した地域”，ホワイトは”変化がない地域”オレンジは”堆積域が消滅した地域”を示している。

図 7.10より，1973年～1977年の間にかなりの堆積域の増加が明確に判読でき，とくにラトゥ川下流西部の流路で著しい増加が生じている。この流路は 1973 年の画像でも堆積域が確認できることから，1973年以前から堆積は若干活動的だったと考えられる。しかし，1973年～1977年にかなりの量の土砂流出があり，他の地域よりはるかに大きな変化が発生した。この劇的な変化は，河床の急激な変化が原因と考えることができる。つまりこの変化の前からラトゥ川の氾濫域東側流路にかなりの土砂が堆積し，自然堤防が形成され，1973年～1977年のある時期にかなりの土砂流出があり，増水した流水は東部の自然堤防に妨げられ，西部に集中したことが考えられる。ラトゥ川氾濫域東部の流路における堆積土砂の減少は，このことが原因している。

図 7.11は，1977年～1993年までの16年間の氾濫域の河道変化を示している。

この間における特徴的な変化は，1973 年～1979 年にかけて新規に出現した西側の幾つかの流路の土砂流出が少なくなり，代わりに 1979 年の西側の流路から中央部に分岐した流路が新規に出現したことである。また，東西ハイウェイの直下での河床幅は，橋梁の上流部の東側河岸に建設した堤防により減少している。

さらに，x地点より下流ではx地点で建設された堤防のために，その後の氾濫がなくなっていることが判読できる。また，かなりの量の土砂氾濫物が，図7.11のY地点周辺で判読することができる。Y地点は土砂の堆積により流路が分かれる地域であり，新たな流路が形成され土砂が氾濫している地点である。これは，1977年の画像で認められる流路の河床に多量の土砂が堆積し，これによって河床の地形が変化し，以前までの流路とは違った流路に土砂流出が始まったことが原因と考えられる。さらに，全体として，1973年～1977年の4年間は，1977年～1993年までの16年間と比較して氾濫の変化が活発であったということができる。



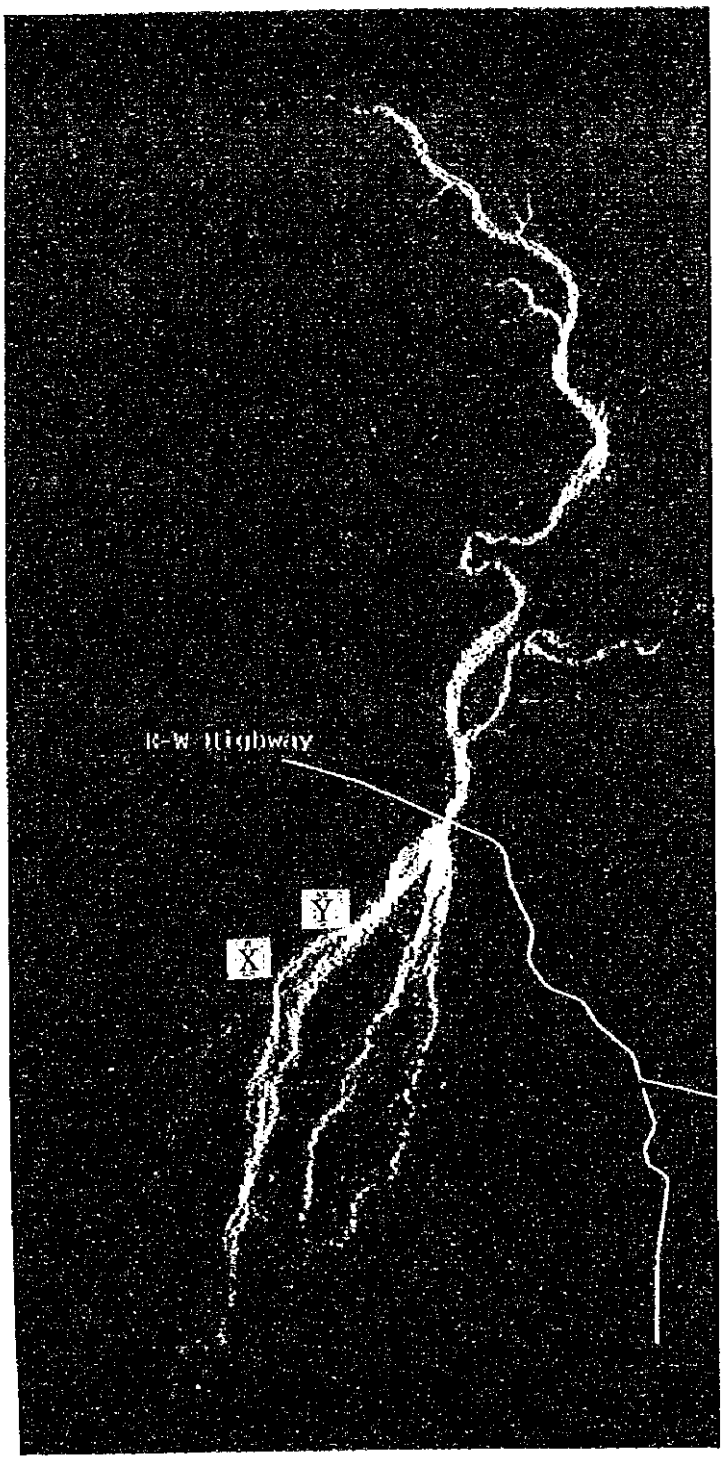
LEGEND

- Newly deposited area
- Unaffected area
- Re-deposited or unchanged area
- E-W Highway

0 3.3 6.6 km

1 : 165,000

RESEARCH REPORT ON THE INVESTIGATION OF LANDSLIDE AND SOIL EROSION IN NEPAL USING REMOTE SENSING TECHNOLOGY	Figure 7.10 Change of deposition in the floodplain for the period 1973-77
	JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY



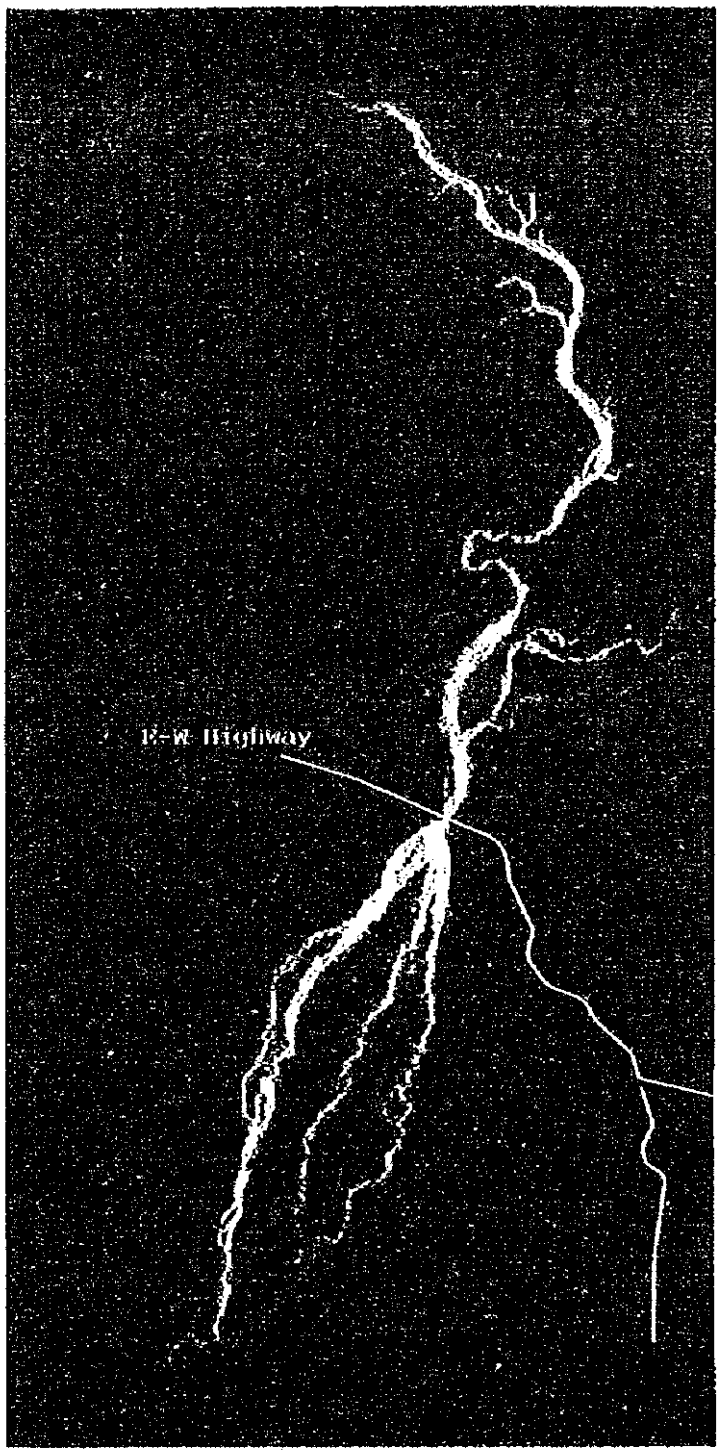
LEGEND

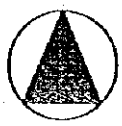
- Newly deposited area
- Unaffected area
- Re-deposited or unchanged area
- E-W Highway

0 3.3 6.6 km

1 : 165,000

RESEARCH REPORT ON THE INVESTIGATION OF LANDSLIDE AND SOIL EROSION IN NEPAL USING REMOTE SENSING TECHNOLOGY	Figure 7.11 Change of deposition in the floodplain for the period 1977-93
	JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY





LEGEND

- Newly deposited area
- Unaffected area
- Re-deposited or unchanged area
- E-W Highway

0 3.3 6.6 km

1 : 165,000

RESEARCH REPORT ON THE INVESTIGATION OF LANDSLIDE AND SOIL EROSION IN NEPAL USING REMOTE SENSING TECHNOLOGY	Figure 7.12 Change of deposition in the floodplain for the period 1993-95
	JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY

1993年～1995年では，氾濫域に大きな変化は認められない。最も東部の流路の下流部で，わずかに堆積したが，西側の流路では逆に減少している。

しかし，これだけの衛星データの時系列解析では，この流路の変化に一般性をもたせるには不十分である。したがって，調査流域の河床変化を現地でより詳細に調査をすることが特に重要である。また，東西ハイウェイより下流での河床変動の把握は，下流部での土砂氾濫を予見するうえで必要である。

7．3 シワリク地方の他の河川との比較

シワリクの土砂堆積や河床変動の評価をする際その現象がラトゥ川における独特な現象なのか，シワリク地域共通の現象なのか検討する必要がある。そこで，ラトゥ川流域における土砂堆積状況とシワリク地域の別の流域で発生した土砂堆積状況とを比較することが重要である。本節ではラトゥ川流域の数キロメートル西に位置するマラハ川流域を比較検討流域として選定し，ラトゥ川流域とマラハ川流域における土砂の流出現象の違いについて検討を行った。

マラハ川は シワリク丘陵を源流とし，地質的な特徴はラトゥ川流域と類似している。ラトゥ川流域と比較して流域が比較的小さく，勾配が急であるために，斜面崩壊か表面侵食を受けやすく，上流部には比較的大量の土砂が生成され，雨期の期間に下流部へと運搬されている。よって，マラハ川は，地形的にみて”土砂生産運搬域”と”堆積域”の２地域に分類することができる。

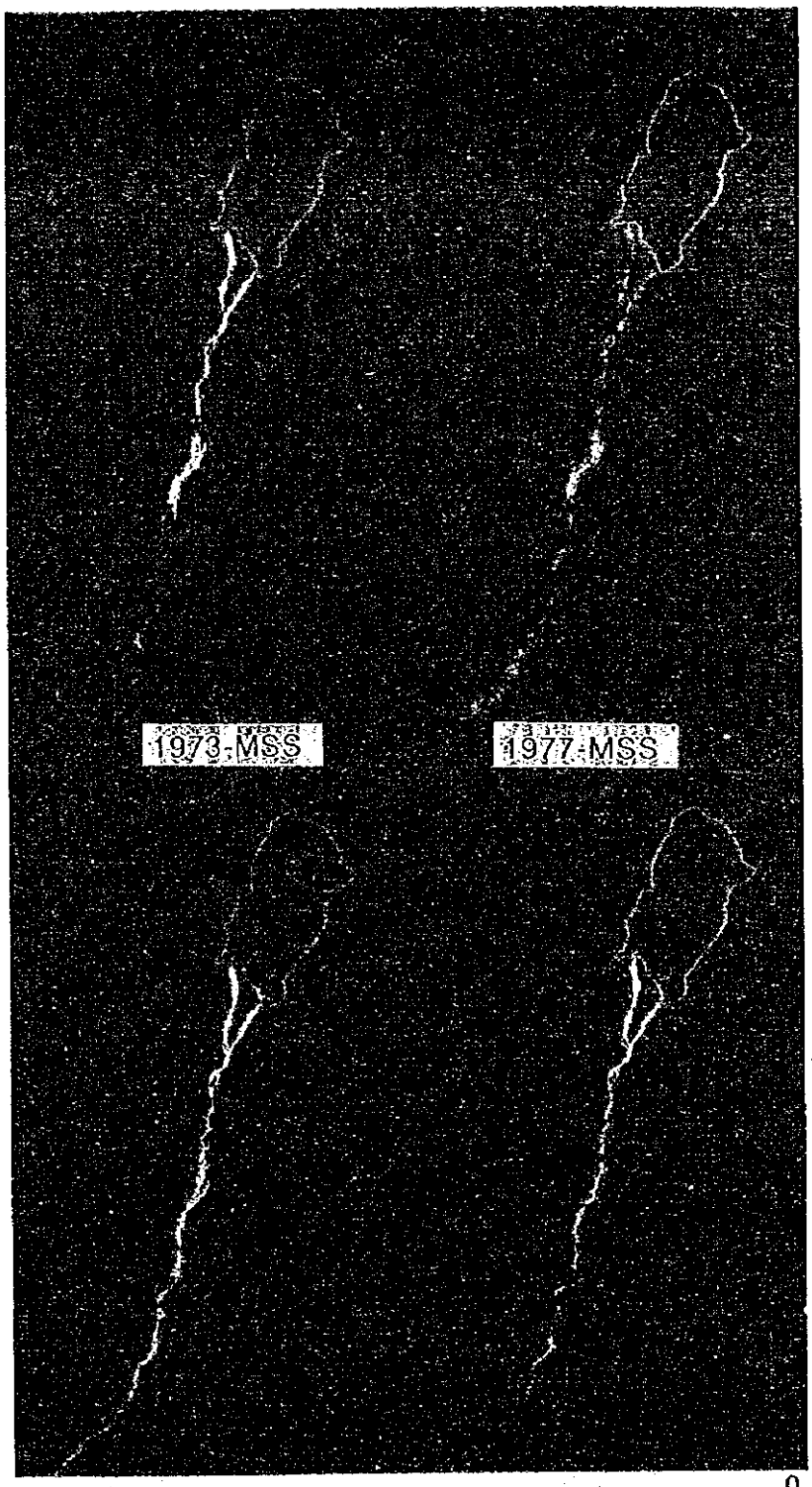
４時期の衛星データ画像分類して， マラハ川の土砂堆積域を抽出した結果を図 7.13 に示す。

図 7.13 より，東西ハイウェイより下流の氾濫域に堆積した土砂は，ラトゥ川流域と同様に広い範囲にわたって分布しているが，土砂の分布は河床に限定している。表 7.5 に，マラハ川流域における上流域と氾濫域の土砂堆積域の面積の変化を示す。この図から，上流部における河道面積は年々減少し，東西ハイウェイより下流の氾濫域での土砂氾濫は 1977 年の画像で劇的に増加したことを除けば，減少傾向を示している。なお，1977 年画像での氾濫域の変化はラトゥ川流域と傾向は似ている。

図 7.14 に，ラトゥ川流域とマラハ川流域における土砂堆積域の経年的な比較を示す。両方の流域とも，1995 年以外の時期で同様な傾向を示している。

また，流路は本流域ではわずか１つの流路のみが判読でき，土砂堆積域は河床とその周辺部に限定している。これに対し，ラトゥ川は東西ハイウェイより下流においては経年的に変動し，流路も一定しておらず，変化に富んでいる。

これによりシワリク地方での土砂堆積パターンは，ラトゥ川流域と同様な傾向を呈してい



LEGEND

Deposition

Watershed

0 4.0 8.0 km

1 : 200,000

RESEARCH REPORT ON THE INVESTIGATION OF LANDSLIDE AND SOIL EROSION IN NEPAL USING REMOTE SENSING TECHNOLOGY	Figure 7.13 Sediment deposition change in the Maraha watershed
	JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY

る。したがって，リモートセンシングによる解析はラトゥ川のみでなく，シワリク地方における流路の変化や堆積域の評価に適用できることが判明した。

Table 7.5 Sediment deposit and change in the Maraha watershed

	1973 sq. km	1977 sq. km	1993 sq. km	1995 sq. km
Upper	0.1179	0.0945	0.6813	0.5427
Floodplain	6.5349	10.1916	8.8290	6.8679

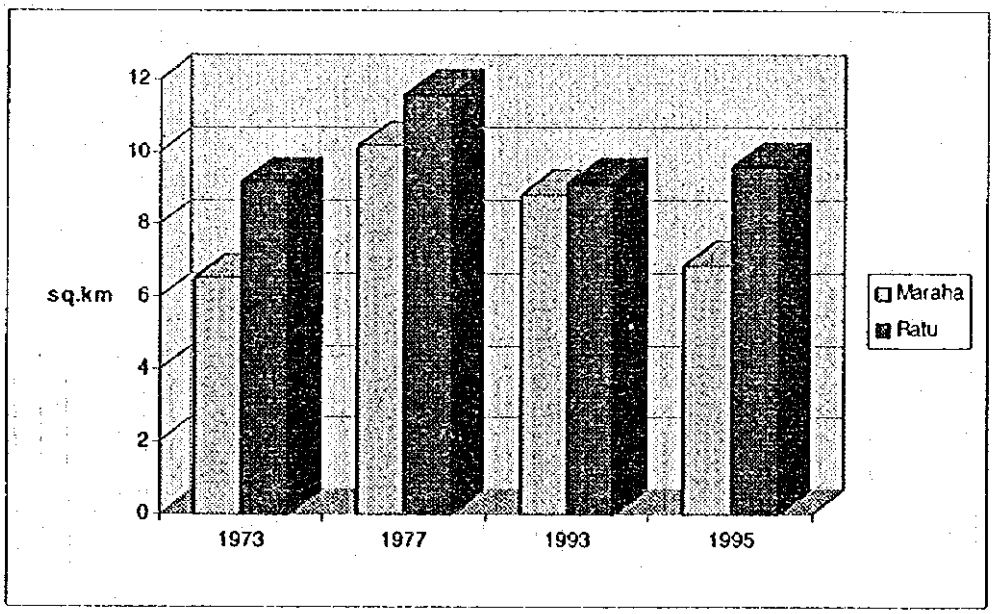


Figure 7.14 Graphical interpretation of sediment deposition changes in Maraha watershed

7．4　ラトゥ川流域と氾濫域において支配的な土地被覆

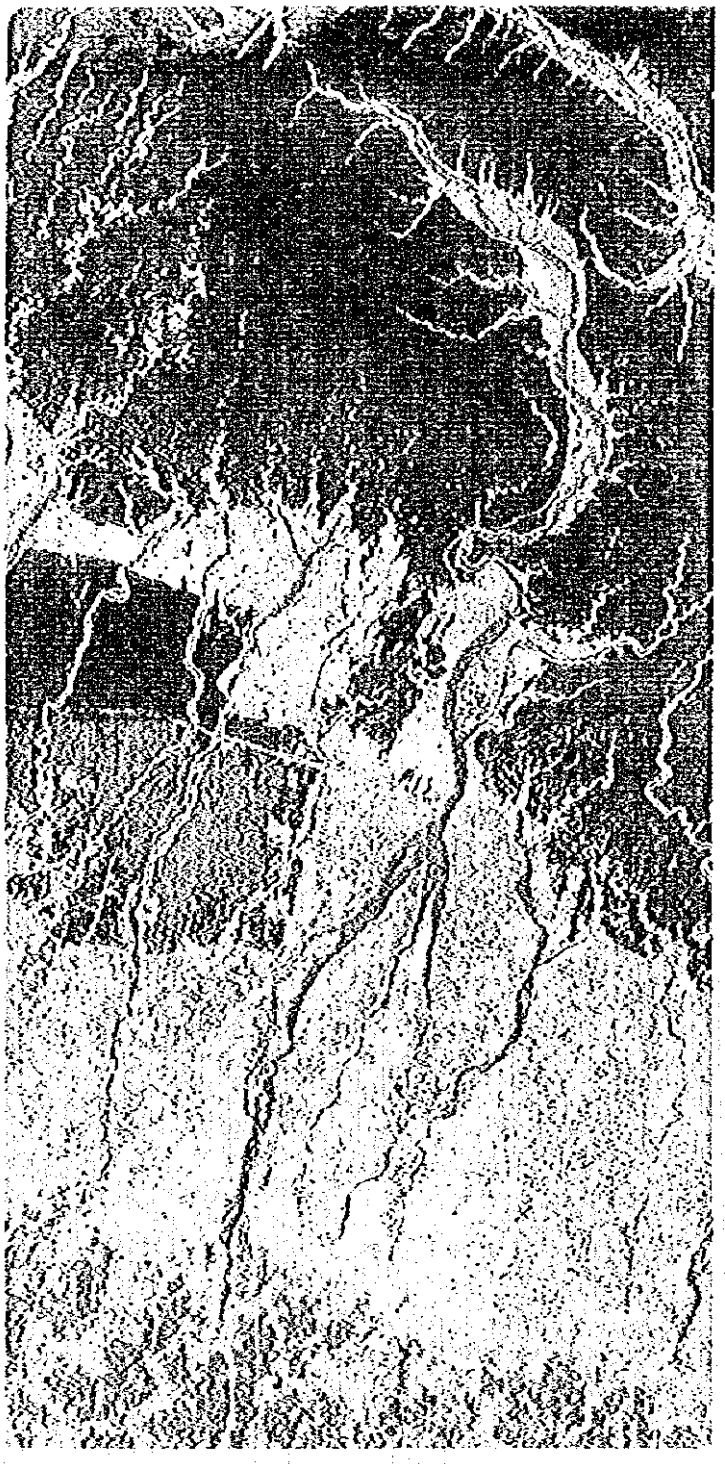
一般に，土地被覆図の作成をおこなう目的での衛星データの利用は，過去においてかなり研究されており，広範囲な地域の土地被覆作成にはかなりの成果が挙がっている。しかし，現在ではすでに発表された手法を検討することは多くない。しかし，解析対象域における分類結果の精度やその応用性を評価することは重要である。

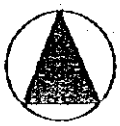
土地被覆図を作成する際，一時期のデータのみを用いて分類作業をおこなう場合，誤分類が増加する。ラトゥ川における氾濫域周辺の耕作地のほとんどは，乾期の間には野菜などの成長が不十分で裸地状となっている。耕作地の乾期の Landsat TM 分光反射率パターンは，土砂堆積物の分光反射率パターンと類似しており，土砂堆積域との明確な区分は困難である。

また，新旧の堆積域の分類をおこなう際，7.2 節に示したように新旧の土砂堆積物の分光反射率が異なることから，分類することは可能である。しかし，土砂堆積物と稲作圃場を分類する場合，乾期には圃場地で米作を行っていないため，稲作圃場と土砂堆積域の分光反射パターンが比較的似ている。よって，乾期のみの画像ではこれらを区別することは困難で，雨期では明確に分光反射率パターンが異なるため分類が可能である。これらは，複数時期の衛星データを利用することで，地上の被覆の状況を精度よく抽出することができる。

本調査では，インドの IRS-LISS データセットの 1994 年 11 月と 1995 年 3 月の 2 つの衛星データを使用して，上記のような季節による反射輝度変化抽出をおこなった。また，解析補助データとして 1992 年撮影の空中写真と 1996 年 2 月に実施されたヘリコプターを用いた現地調査結果を用い，衛星データより土地被覆分類を作成する際の参考資料とした。土地被覆分類結果を図 7.15 に示す。

その結果，新しい堆積域，古い河床，森林域，水田は明確に区分することができた。さらに，氾濫域の土砂堆積域より下流に分布している水田域も明確に区分することが可能となった。衛星データより家屋を区分することは，家屋が散発的に分布しているため不十分であった。しかし，ある程度の広がりを持って分布する場合には，判読可能であった。2 時期の衛星データを使用して土地被覆分類を行う場合，水田のように反射輝度が季節的に大きく変化する分類項目は，明確に区分することができることが判明した。





LEGEND

- Forest (Hi-Density)
- Forest (Low-Density)
- Paddy
- Grass land
- Crop 1
- Crop 2
- New Deposit
- Old Deposit
- Houses

0 3.3 6.6 km

1 : 165,000

RESEARCH REPORT ON THE INVESTIGATION OF LANDSLIDE AND SOIL EROSION IN NEPAL USING REMOTE SENSING TECHNOLOGY	Figure 7.15 Satellite data derived land cover map of the Ratu watershed
	JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY

第8章　リモートセンシングによる土砂生産量の推定

第８章　リモートセンシングによる土砂生産量の推定

第７章では，ラトゥ川の土砂氾濫域の活動は，河床における状況と同じように活発であることを示した。衛星データによる検討時期は，1973年から1995年までと短いが，1995年の土砂堆積域の面積は，1973年と比較して22年間に5.1368km²から5.4468 km²と約5%増加してきていることが判明した。しかし，この変化は，衛星データより算出された面的な変化率であって，３次元の土砂量ではなく，活動状況が明確に表現されていない。よって，本章では，ラトゥ川流域から流出する生産土砂量を衛星データから算出するモデルを構築し，洪水による生産土砂量を評価した。

８．１　土砂侵食モデルの概要

Sharma（1983年）は，ガンジス平原では沖積層が最大約5000m厚さに及んでいると報告し，Summerfield（1991年）は250年間にKosi川の流路の移動が100km以上に及ぶと推定している。また，Evans（1989年）は，ヒマラヤ地域で過去１００万年かそれ以上の過去において大規模な侵食と土砂堆積があったことを示している。これらは，シワリク地方の土砂侵食が“地質構造的な活動”と“表面流出水による侵食”であることを示している。

地質構造的な活動は，この地域の地形と非常に関連があり，その機構が複雑なために土壌侵食モデルに定式化することは難しい。また，この現象はむしろ大陸レベルでのプロセスであって，ミクロレベルな流域界で評価することはできない。

一方，表面流出水による侵食は主として降雨によって発生することが多い。表面流出水に起因する侵食は，より地域的で，ミクロなスケールで検討することができる。しかし，降水量データが得られない場合には，ほとんどの土壌侵食モデルの経験式に適用することができない。

また，多くの研究者によって開発されたアメリカのUniversal Soil Loss Equation (USLE)は，広域な現地調査によって経験的に算出された土砂侵食モデルで，このモデルをはじめとしていくつかの経験式も提案されている。これらのモデルを利用して土壌侵食量を評価する場合，そのほとんどが耕作地のために開発されたものであるため，観測流域によって結果が左右されやすいという特徴がある。また，このモデルのほとんどは，長期間の雨量記録を必要としており，日雨量などのデータが必要である。

しかし，ラトゥ 川流域内での土壌侵食を評価するモデルを検討する場合，雨量データの整備が遅れているために，雨量データを考慮することは現実的ではない。また，本流域において土砂生産モデルの量的な侵食量を検討する際，過去からの地すべり，崩壊，地震記録がほとんど無いために正確に定義することができない。そこで，侵食や土壌堆積量が斜面勾配と関係が深いことは事実であることから，この流域における土壌侵食の速度を決定する要因として，表面地形（特に斜面勾配）をパラメータとしたモデルを検討する必要がある。

Honda(1993 年)は，山岳地における土壌侵食モデルに，表面勾配を取り入れることを提案し，日本の観測網のゆきとどいた流域に応用し，その適用性を検証した。

表面勾配を取り入れたモデルでは，年間侵食量 E を次式によって与えている。

$$E = E_{30}\left(\frac{S}{S_{30}}\right)^{0.9} \qquad (8.1)$$

E30：斜面勾配 30°における土壌侵食量

S：斜面勾配

S30：Tan(30°)

このモデルは，荒廃した山岳斜面が多い流域でモデルを構築し，十分な精度で検討されている。このため，土地被覆が森林地に覆われているが斜面上部では崩壊が多発しているラトゥ川 流域と Honda がモデル構築の際検討した流域は比較的類似していることから，ラトゥ川 流域においてこのモデルを利用して，土砂侵食量やトータルな土砂流出量を予測することが可能である。

この場合，このモデルに適用するにあたってパラメータの１つである土壌の侵食量は，流域内の各々の地点において実際に測定しなければならない。しかし，これは十分に管理された流域では可能であるが，ラトゥ川 流域では過去からの現地情報がほとんど無く適用する上で現実的でない。それゆえに，間接的に土壌侵食量を測定する手法として，衛星データをから得られる NDVI を利用する手法をとった。

8．2　NDVIによる土地活力状況調査

NDVIは，人工衛星のリモートセンサのスペクトルバンドを組み合わせることで算出される指標であり，あるメッシュ内の植生の総量と関係が強い。NDVIのほとんどは経験的な調査に基づいて開発された指標であり，モデルより導出したものではないが，物理学，化学，生物学の基本原理によって説明できる。

NDVIとして定義されているものは，電磁波スペクトルの赤と近赤外域である。分光反射特性で検討した場合，裸地は赤と近赤外域でほぼ直線形を呈しており，等植生活力(isovegetation) ラインは裸地の反射率特性ラインとは異なっている。

このため，赤と近赤外のバンドの分光反射率パターンを利用した植生指標が，多くの学会等で提案されている。主なものとして，正規化植生指標（NDVI），直交植生指標（PVI），広域植生指標（GVI）が挙げられる。本調査では，NDVIの演算式を適用し，負の算出結果を避け，画像処理を簡易にしたNDVIの算定式を示す。

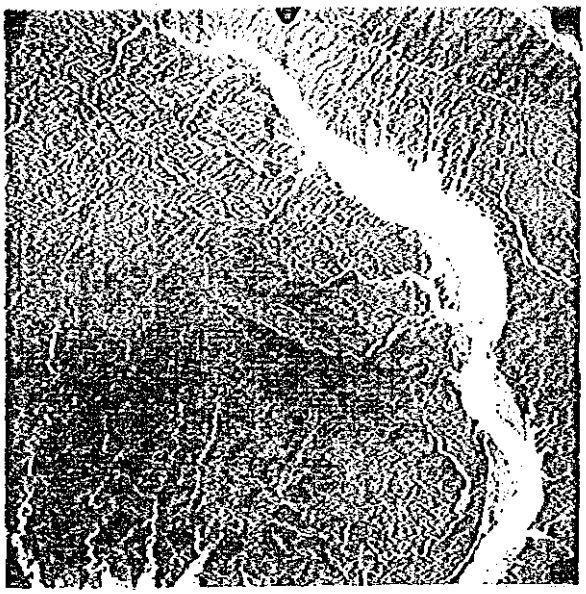
$$NDVI = \left[\left(\frac{TMBand4 - TMBand3}{TMBand4 + TMBand3}\right) + 1\right] * 100 \qquad (8.2)$$

森林密度の違いによってNDVIに差が現れるかを，1992年11月の空中写真と1993 3月のLandsat TMデータのNDVI画像を用いて検討した。

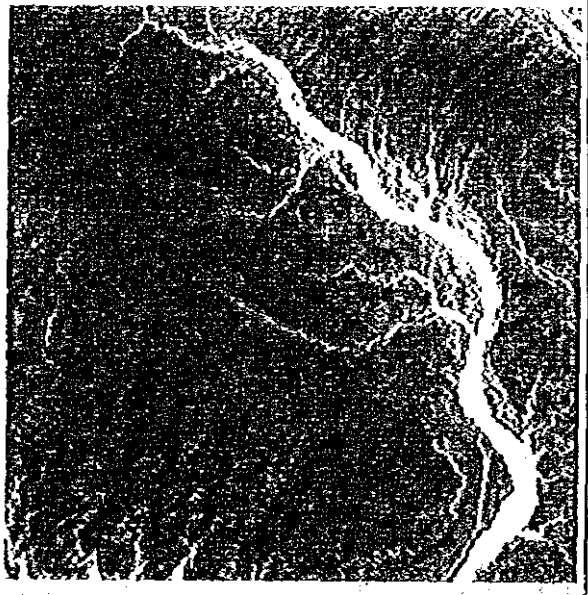
ラトゥ川流域の1:40,000スケールの空中写真をデジタル化してUTM座標系に画像変換したものと1993年3月の衛星データの対象域を，図8.1に示す。

衛星画像のフォールスカラー画像はTMバンドの2（青），3(緑)，4(赤)で構成されている。フォールスカラー画像中で赤色に表示されている地域は高い植物密度か活力が活発な状態にある森林であることを示し，活力が弱まっている森林，密度の低い森林は，画像の下のように緑色をした地域として確認できる。よって，活力が弱まるか森林密度が減少した地域は，バンド3の反射率が増加し，バンド4の反射率が低下した状態である。また，河床は非常に明るく，河川周辺の耕作地はライトグレーで表示されている。しかし，フォールスカラー上で，森林被覆程度の違いは明確に判読できなかった。

崩壊が多く分布する尾根と河道は，空中写真上で顕著に目立っている。耕作地と河床の輝度の違いは，衛星データと比較して空中写真での輝度は低く，明確には分離できない。



Aerial photographs (a)



Landsat TM false color image (b)

Landsat TM NDVI image (c)

0 2.5 5.0 km

1: 125,000

RESEARCH REPORT ON THE INVESTIGATION OF LANDSLIDE AND SOIL EROSION IN NEPAL USING REMOTE SENSING TECHNOLOGY	Figure 8.1 Aerial photographs, false color, and NDVI image of the Ratu watershed
	JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY

NDVI 画像を目視判読すると，対象域内で植生の密度が比較的高い地域は赤色で示され，植生の密度が低い地域は青色で示されている。画像中の明青色から緑色，黄色，最後に赤色へと色調が変化するにつれて，森林の被覆が段階的に増加している状況が判読できる。また，NDVI は植生密度と関連があるが，グランドトゥルースなしに植生密度を予測することはできない。

次に，Landsat NDVI より森林密度の変化が識別できるかどうかを判別する目的で，NDVI と裸地面積率の関係を検討した。

手順として，地上分解能 3.3 メートルにデジタル化した空中写真を利用して，100mメッシュ内の森林密度を予測した。空中写真を 100mメッシュに変換する際，メッシュ内のオリジナル画素を平均化する手法で変換作業をおこない，100mメッシュ内に植生の全くない裸地を 100，100mメッシュ内の全てが森林で覆われている状態を 0 と設定し，新規に作成されたデジタル値より裸地面積率を推定した。また，同様に 1993 年の Landsat TM NDVI 画像も，100mメッシュに平均化する作業をおこなった。

表 8.1 に 5%間隔の裸地面積率と 1993 年 3 月の NDVI との関係を，図 8.2 に表 8.1 を視覚的に表現した図を示す。

Table 8.1 Distribution of photograph derived bareland percentage and NDVI values of 1993 Landsat TM

Bareland%	1 to 5	5 to 10	10 to 15	15 to 20	20 to 25	25 to 30	30 to 35	35 to 40	40 to 45	45 to 50
NDVI	114.1	113.1	112.3	111.0	109.9	108.9	107.6	107.7	104.8	103.3
Bareland%	50 to 55	55 to 60	60 to 65	65 to 70	70 to 75	75 to 80	80 to 85	85 to 90	90 to 95	95 to 100
NDVI	101.1	99.7	98.9	97.3	97.7	93.0	94.9	94.9	92.1	88.8

裸地面積率が増加すると NDVI は減少する傾向があり，その関係は裸地面積率 75%から 80%までを除くと，NDVI と裸地面積率とはほぼ負の線形相関があることがわかる。今回調査した範囲で最も高い NDVI 値は 114 で，最も低い NDVI 値は裸地面積率 100%の 88 であった。裸地面積率が 75 から 80%の間で生じる誤差は，TM データの分解能である 30mメッシュから 100mメッシュに変換するときの誤差に起因するものと考えられる。しかし，衛星データより算出した NDVI はラトゥ流域における土地の荒廃状況をよく表現できることを示している。

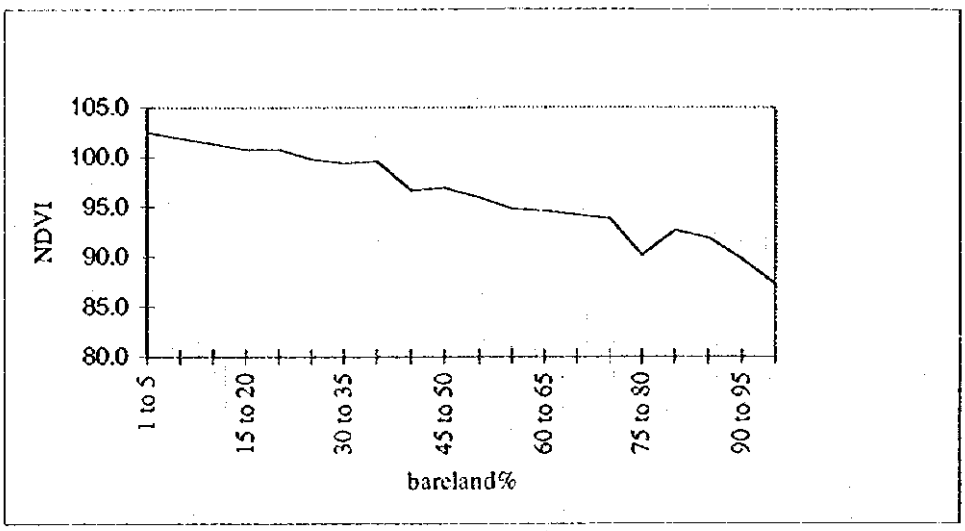


Figure 8.2 Distribution of bareland% and the NDVI values of Ratu watershed

次に，ラトゥ川流域では崩壊とガリー地形が支配的で，土砂はそこから生産されている。衛星データより流域の土砂収支を検討する場合，衛星データの輝度特性にこの地形的特徴が反映されていなければならない。

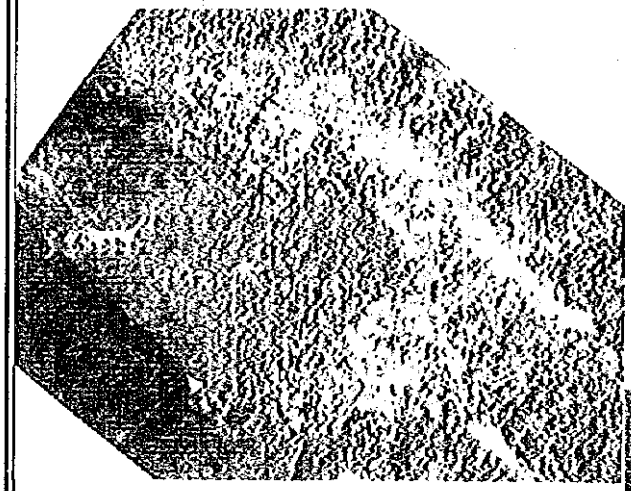
そこで，山腹斜面の荒廃状況が明瞭に判読することができるヘリコプター写真を用いて，ラトゥ川流域特有の地形的特徴が，衛星データより算出したNDVI画像に反映されているか，さらに，それを量的に表現することできるかどうかを検討した。

1996年2月の現地調査で撮影された森林や山腹斜面の荒廃状況が確認できるヘリコプター写真をスキャナーでデジタル化し，1993年の衛星画像の座標系に変換した。図8.3と図8.4に，ラトゥ川流域での衛星画像と同一の座標系に変換したヘリコプター写真を示す。

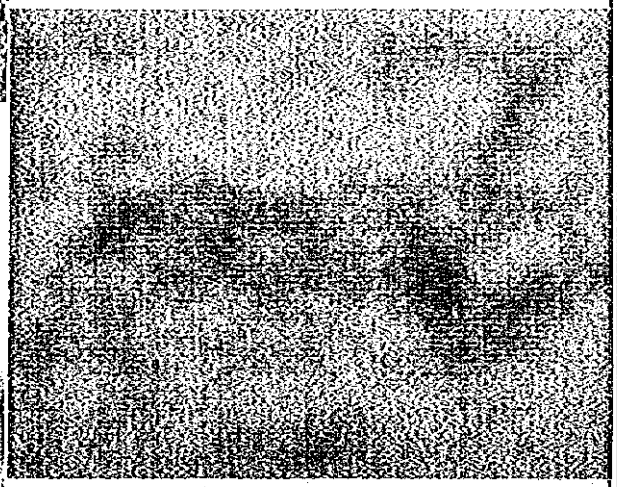
画像（a）は，ヘリコプターにより撮影された写真を，画像（b）に1993年3月のTMナチュラルカラーを，画像（c）にNDVI画像，画像（d）にヘリコプター写真とNDVI画像を重ねあわせた結果を示す。

青色から緑，黄色，赤色へと変化するにつれて，森林密度が連続的に高くなる状況を示しており，最も密度の高い森林被覆は，画像中赤色で表現され，裸地のような密度が低い森林は青色で示されている。

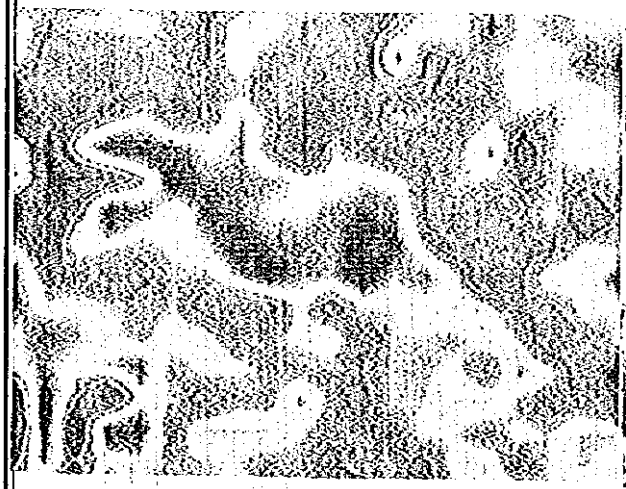
図8.3において，図中の①は荒廃した尾根を示している。　荒廃した尾根のほとんどが，NDVI画像上で明確に青色の地域として表現されている。また，③のまばらに分布している森林域では，他の地域と比較して明確にNDVI値が低くなっている。逆に，④の森林密度の高



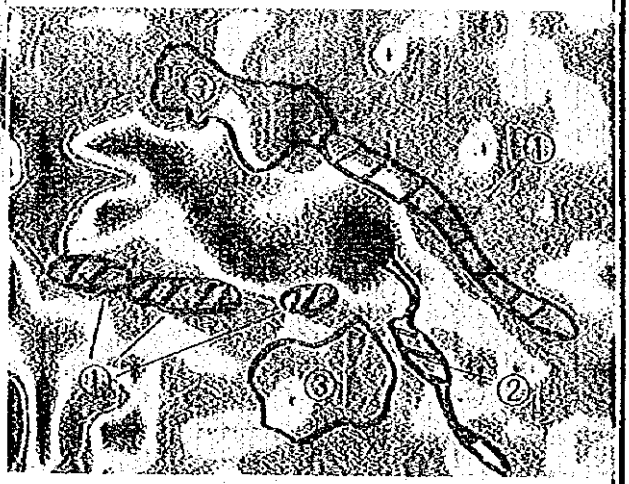
Photograph acquired helicopter flight (a)



Landsat TM natural color image (b)



Landsat TM NDVI image (c)

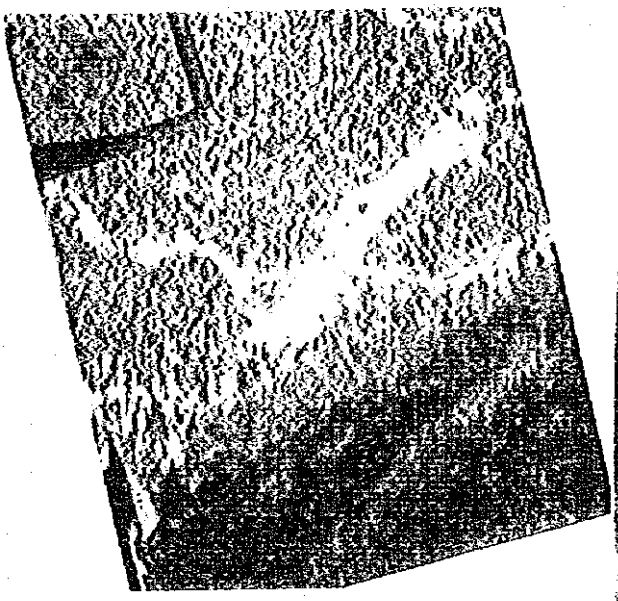


Integration of NDVI and helicopter photograph interpretation (d)

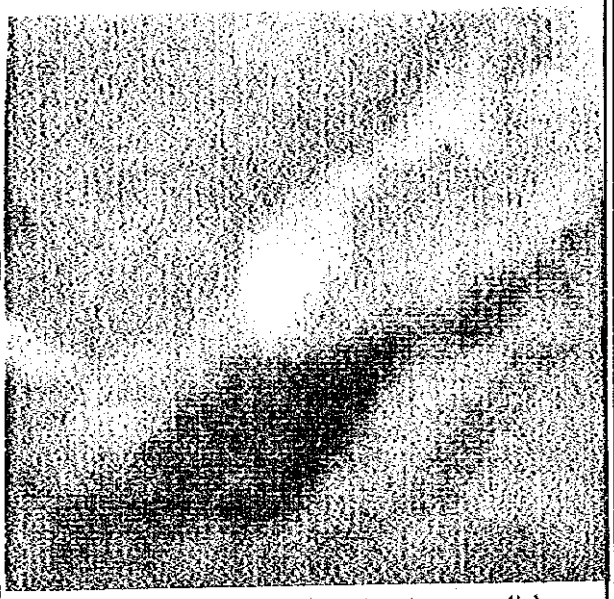
0 110 220 m

1 : 5,500

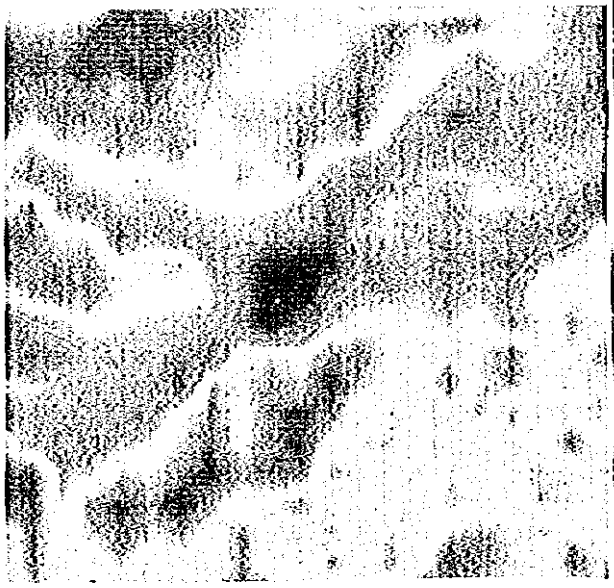
RESEARCH REPORT ON THE INVESTIGATION OF LANDSLIDE AND SOIL EROSION IN NEPAL USING REMOTE SENSING TECHNOLOGY	Figure 8.3 Comparsion of helicopter observation with 1993 NDVI image
	JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY



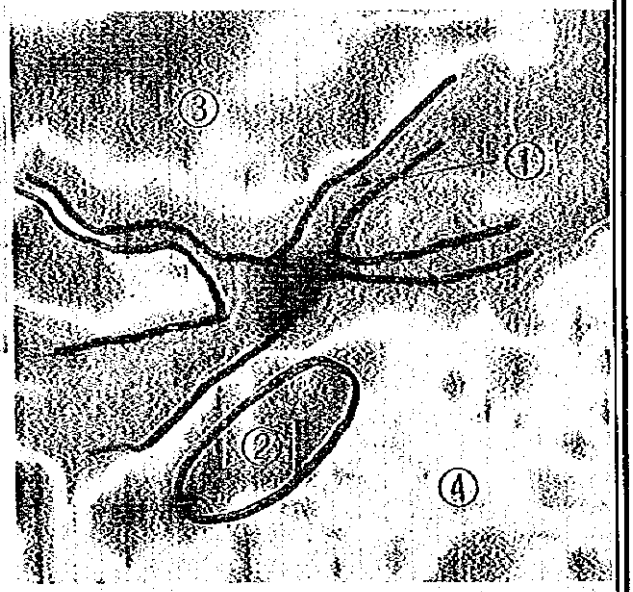
Photograph acquired helicopter flight (a)



Landsat TM natural color image (b)



Landsat TM NDVI image (c)



Integration of NDVI and helicopter photograph interpretation (d)

0 150 300 m

1 : 7,500

RESEARCH REPORT ON THE INVESTIGATION OF LANDSLIDE AND SOIL EROSION IN NEPAL USING REMOTE SENSING TECHNOLOGY	Figure 8.4 Comparsion of helicopter observation with 1993 NDVI imgae
	JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY

い地域は赤色で表現され，NDVI が高い状態を表現している。

流路幅が比較的広い支流は，周辺地域と比較して明確に NDVI 値が低下しているが，とくに密度の高い森林域内の支流や流路幅が狭い支流は，周辺 NDVI との差がほとんどなく，明確に判読することができなかった。

図 8.4 に位置する支流は流路幅が比較的広く，NDVI 画像及びナチュラルカラー画像でも明確に判読できる。また，②で示される森林密度の高い地域は，NDVI 画像で赤色と明確に判読できる。③はまばらな植生であると解釈できるが，NDVI 画像を判読すると，表面の被覆は④よりも高いことが考えられる。これらの差はナチュラル画像やヘリコプター写真上では明確に判読することができなかった。

以上から，衛星データ・空中写真・ヘリコプター写真を比較検討した結果，衛星データは荒廃した森林，荒廃した山腹斜面，砂で覆われた支流や河道を明確に分離することが可能であることが示された。また，NDVI の連続的な性質は森林密度の区分を容易にし，森林被覆を森林密度から分類できる。衛星データによる森林密度を推定する場合，センサの分解能に影響を受けるが，荒廃した山腹尾根が，仮に衛星データの分解能より小さくても，明確に NDVI の差となって算出されていることが判明した。

8．3　ラトゥ川流域の土砂生産量の評価

前節では，Landsat TM データより算出した NDVI を利用して荒廃地の抽出の信頼性の検討をおこない，NDVI は土地の荒廃状況の程度および森林密度を評価することができることを示した。

本節では，前節のモデル式を適用して，NDVI をパラメータとしたラトゥ川流域での土砂生産量の算定を検討した。8.1 節で検討したモデルにはパラメータとして表面侵食量が必要である。しかし，ラトゥ川流域において土壌侵食量を調査した事例がないため，過去のネパール国での調査報告事例を引用する必要がある。

表 8.2 に，Honda が 1993 年に開発したモデル式で引用した足尾地区での土壌侵食量と，文献からヒマラヤ地域での土壌侵食量との比較図を示す。

Table 8.2 Land denudation for some areas in Nepal and Japan

Description of the site	Rate tons/km^2/year	Reference
Siwalik: East Nepal, S-aspect, sandstone foothills, landuse from forest to grazing lands	780-3,680	Chatra, 1976
Siwalik: Far West Nepal, S-aspect, sandstone foothills		
Degraded Forest	2,000	Laban, 1978
Degraded forest, gullied land	4,000	Laban, 1978
Severely degraded, heavily grazed	20,000	Sakya
Middle Mountains: Katmandu valley, steep slopes	800	Laban, 1978
Japan: Isio region in Tochigi Prefecture for 30° slope		
Crop lands	20 mm/year	Honda, 1993
Grasslands	1 mm/year	Honda, 1993
Forest	0.1 mm/year	Honda, 1993

東ネパールで測定された森林地と荒地での土壌侵食量は 780t/km2/ year と 3680t/km2/year で，土砂堆積物の密度を 2 g/cm3 と仮定した場合，約 0.4 mm/year と 18.5 mm/year の年間侵食量に相当する。

衛星データから広域的な土砂生産量を評価するには，衛星データの 1メッシュごとの平均侵食

量を考慮する必要がある。そこで，本調査では，表8.2に記載された土地の分類項目に相当する地域をラトゥ川流域およびその周辺から抽出し，その輝度特性と侵食量との関連性を調査することで，ラトゥ流域における土砂生産量の算出を試みた。

(1) 土壌侵食量の設定

1)ラトゥ川流域で最も状態の良い森林域（裸地面積率0%）

表 8.1より，裸地面積率が0の場合のNDVI値114は，ラトゥ川流域内の最も状態のいい森林である。しかし，この地域には崩壊地が卓越している。そこで，表 8.1において裸地面積率が0の地域を，Degraded Forest ,Gullied Land と設定し，当該地域における年間平均侵食量を2 mm/year（4000t/km2/year ）と設定した。

2)裸地（裸地面積率100%）

裸地面積率が100のNDVI値88は裸地と設定し，年間平均侵食量を20 mm/year と設定した。

3)土砂生産のほとんどない健全な森林域

ラトゥ 川流域における森林被覆の状況を評価するために，フォールスカラーおよび空中写真の目視判読より崩壊地形のない健全な森林地域として，マハバラット山脈内の密度の濃い森林地域を抽出した。抽出した地域の森林の平均NDVIは135で，ラトゥ 流域と比較して高い森林密度である。抽出した範囲の侵食量は，とても小さく，表 8.2に示した森林域の土壌侵食量である0.4 mm/year（800 t/km2/yr.)を与えることとする。

(2) ラトゥ流域における土砂生産量の推定

ここでは，Honda(1993年)が提案した土壌侵食モデルを応用して，ラトゥ川流域における年間の平均土砂生産量を算出した。

Honda （1994年）は全域の土砂生産量を予測する目的で，土壌侵食量とNDVIの関連を調査すると，NDVI と土壌侵食量との間に対数的な関連があることを報告している。図 8.5 にNDVIと土壌侵食量の関係を示す。

この関係を用いて，1993年の土地被覆に応じてNDVIを与え，土砂侵食量を算出することができる。

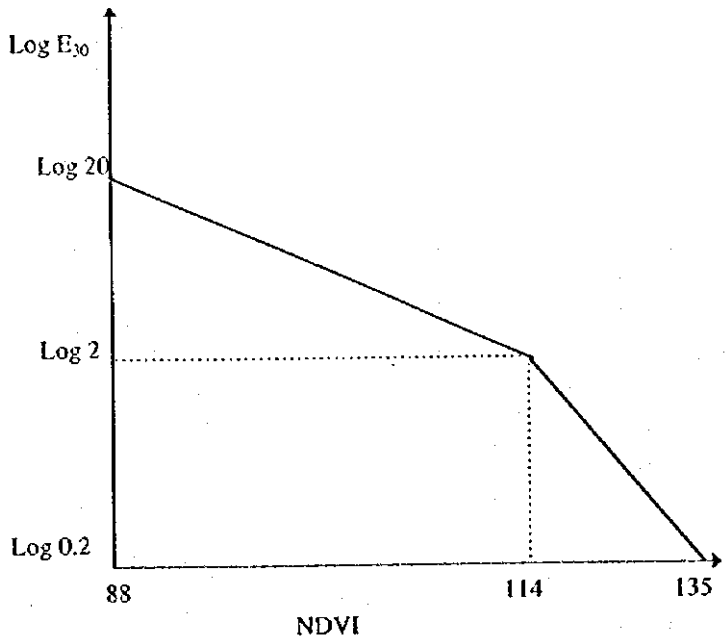
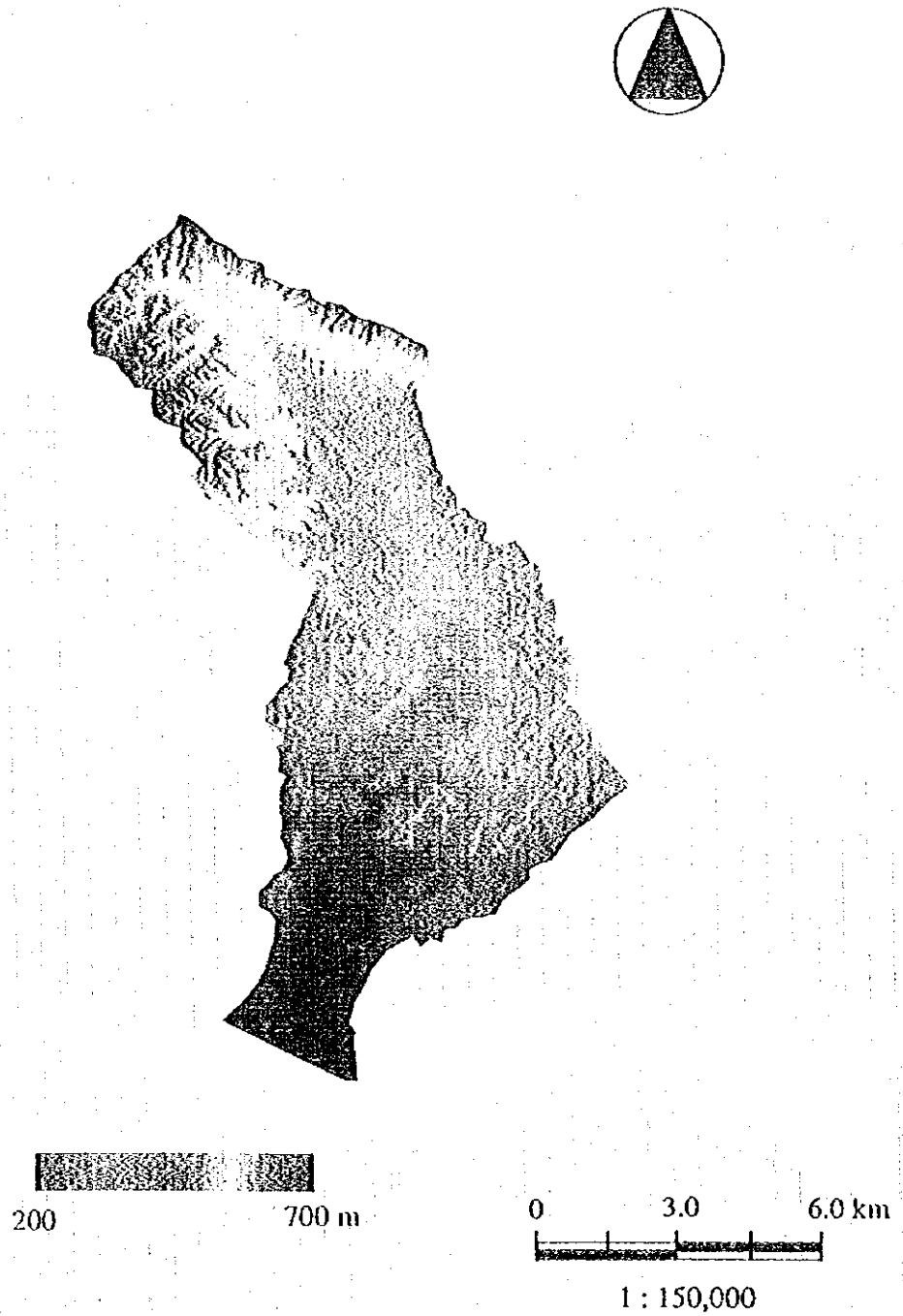


Figure 8.5 Calculation of rate of denudation using NDVI

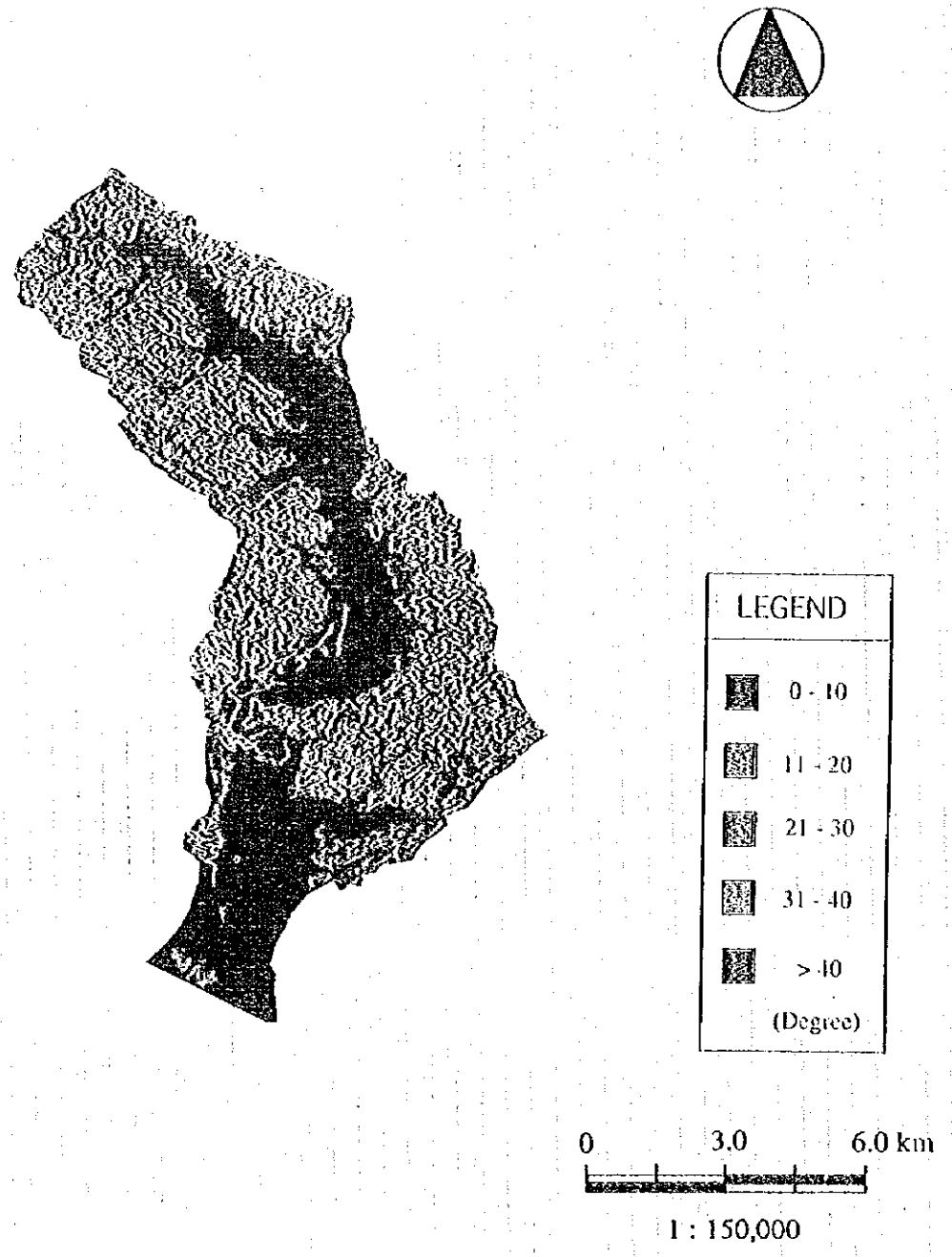
なお，算出にあたっては斜面勾配を計算したデジタル標高データを使用した。図 8.6 と図 8.7 に，流域内での標高データと斜面勾配分布図を示す。

その結果，1993 年の土地被覆から得た土砂生産量は，年間 321,156 m^3 と算出された。また，この値はラトゥ 川流域での年平均侵食量， 3.89 mm/year に相当する。この計算により作成されたラトゥ 川流域の土砂生産ポテンシャルを，図 8.8 に示す。

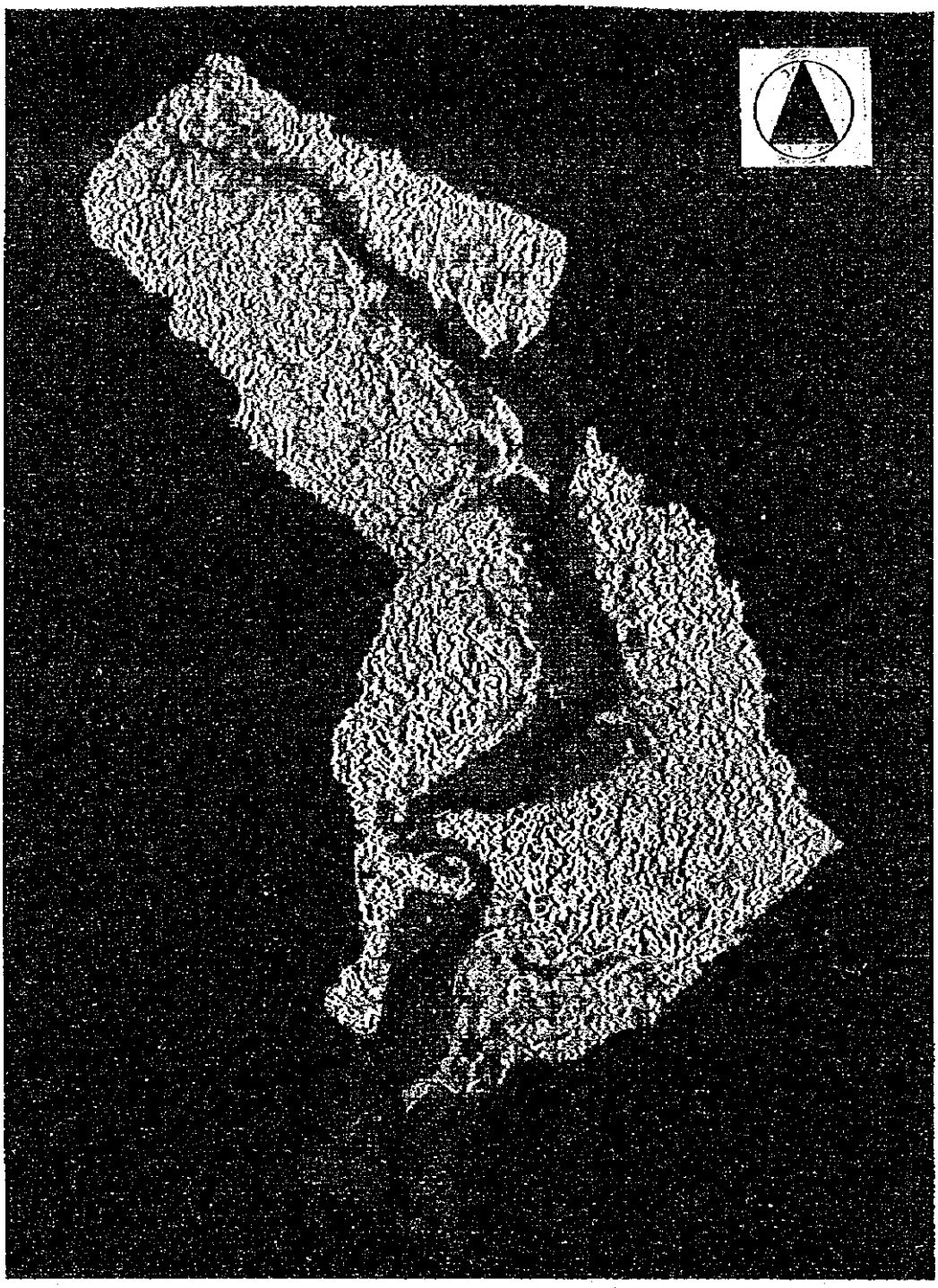
この図では，高い土砂生産ポテンシャル域は赤色で，低い土砂生産ポテンシャルを青色で示した。



RESEARCH REPORT ON THE INVESTIGATION OF LANDSLIDE AND SOIL EROSION IN NEPAL USING REMOTE SENSING TECHNOLOGY	Figure 8.6 Elevation distribution of the Ratu watershed
	JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY



RESEARCH REPORT ON THE INVESTIGATION OF LANDSLIDE AND SOIL EROSION IN NEPAL USING REMOTE SENSING TECHNOLOGY	Figure 8.7 Slope data created by GIS using topographical JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY



0 80 m³

0 2.0 4.0 km

1 : 100,000

RESEARCH REPORT ON THE INVESTIGATION OF LANDSLIDE AND SOIL EROSION IN NEPAL USING REMOTE SENSING TECHNOLOGY	Figure 8.8 Potential of annual soil yield in the Ratu watershed reference to 93 land cover
	JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY

8．4　衛星データを利用した土砂生産量モニタリング

本節では，1973 年，1977 年，1995 年の衛星データを用いて，土砂生産ポテンシャルの算出をおこなった。土砂生産量の算出にあたっては，過去 20 年間斜面勾配に変化がなく，それに応じた侵食量を仮定し，それぞれの時期の衛星データの NDVI をから土砂生産量を算出した。

なお，1973 年と 1977 年の裸地面積率を算定するにあたっては，1973 年と 1977 年の詳細なグランドトゥルースデータが存在しないため，1992 年の空中写真判読結果をそのまま適用した。

1993 年の NDVI を基準として，1973 年，1977 年，1995 年の森林被覆の変化を調査した。NDVI 分布と裸地面積率の関係を図 8.9 に示す。

Table 8.3 Bareland ratio and the NDVI values for four dates satellite data

Bareland%	73	77	93	95
	Mean	Mean	Mean	Mean
1 to 5	124.3	121.3	114.1	102.6
5 to 10	123.7	121.2	113.1	101.9
10 to 15	123.0	120.5	112.3	101.4
15 to 20	122.3	119.7	111.0	100.7
20 to 25	121.1	117.8	109.9	100.8
25 to 30	120.7	117.4	108.9	99.8
30 to 35	119.0	115.8	107.6	99.5
35 to 40	119.8	116.8	107.7	99.5
40 to 45	118.7	115.7	104.8	96.8
45 to 50	114.8	113.8	103.3	96.8
50 to 55	115.1	113.9	101.1	95.9
55 to 60	114.9	113.9	99.7	94.9
60 to 65	111.9	111.1	98.9	94.6
65 to 70	113.9	111.5	97.3	94.3
70 to 75	113.6	112.1	97.7	93.8
75 to 80	109.4	110.1	93.0	90.2
80 to 85	114.1	110.8	94.9	92.7
85 to 90	110.2	110.8	94.9	91.9
90 to 95	107.3	107.9	92.1	89.8
95 to 100	104.0	106.2	88.8	87.4

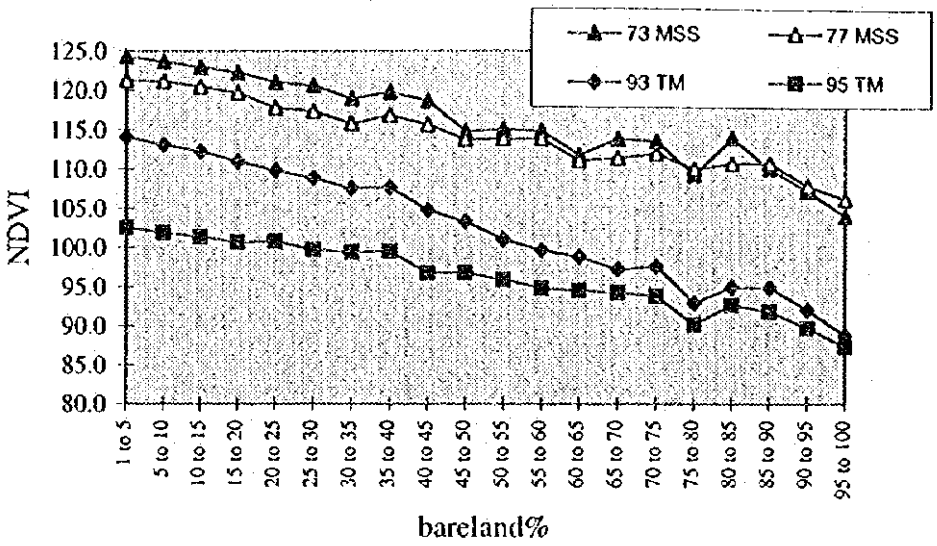


Figure 8.9 Distribution of bareland% and 4 dates

図 8.9 から，裸地面積率が増加すると NDVI 値が低下する傾向は，全ての衛星データとも共通であった。そして，4 時期で比較した場合，1973 年の MSS データは最も高い NDVI 値を示し，年々NDVI 値が低下している傾向がわかる。しかし，裸地面積率の高い地域での 1977 年から 1993 年への急激な NDVI の低下傾向は，センサに起因する影響か実際の森林活力の低下は判別できない。

これら 2 種の異なるセンサーと 4 時期における輝度分布の変化は，次に示す要因が原因であると考えられる。

・森林被覆の内部の変化

・森林密度の変化

・衛星観測時の大気状況のような外的要因

・2 種の異なったセンサの能力の違い

そこで，異なったセンサで観測された NDVI 値と 1992 年のグランドトゥルースデータを比較するために，センサによる違いを除去する目的で 3 時期の衛星データを 1992 年の NDVI のヒストグラムに変換した。この方法では，多くの画素の平均的な表面反射は 3 時期の観測期間で無視できるほど小さいかあるいはほとんど変化がないと仮定している。

さらに，1992 年の Landsat TM の NDVI データを基準として，1973 年，1977 年，1995 年の NDVI 画像を 1992 年の NDVI の輝度特性と合致するように輝度も変換した。

図 8.10 と図 8.11 にオリジナルの NDVI 画像と 1993 年の輝度特性に変換した NDVI 画像を示す。

1977 年の NDVI 画像は，変換前後において輝度が不均質になっている。これは人工衛星通過時の大気の状況に起因するものと考えられる。

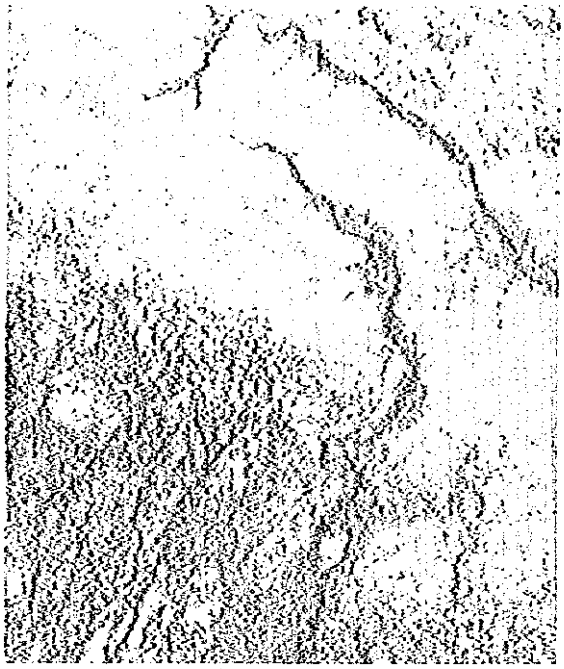
また，1977 年のフォールスカラー画像で，北部山岳地のほとんどに薄い雲がかかっている。したがって，地表面からの反射輝度に多大な影響を与える大気の異質性が，多時期衛星データ間の比較を困難なものにしていると判断される。よって，1977 年のデータは，使用データより除外した。

1977 年以外の時期の輝度補正を施した NDVI 画像を使用して，1993 年の土地被覆より算出した平均侵食量を適用して，他の時期の生産土砂量を算出した。表 8.4 に算出結果を示す。

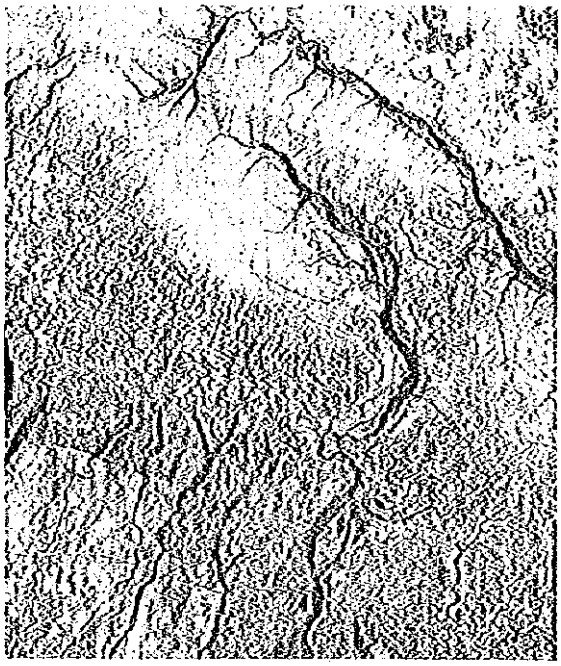
Table 8.4 Soil yield and denudation estimate for Ratu watershed

	1973	1993	1995
Soil Yield m^3	271,110	321,156	293,096
Rate of denudation mm/year	3.29	3.89	3.55

1973-MSS



1977-MSS



1993-TM

1995-TM

60 160

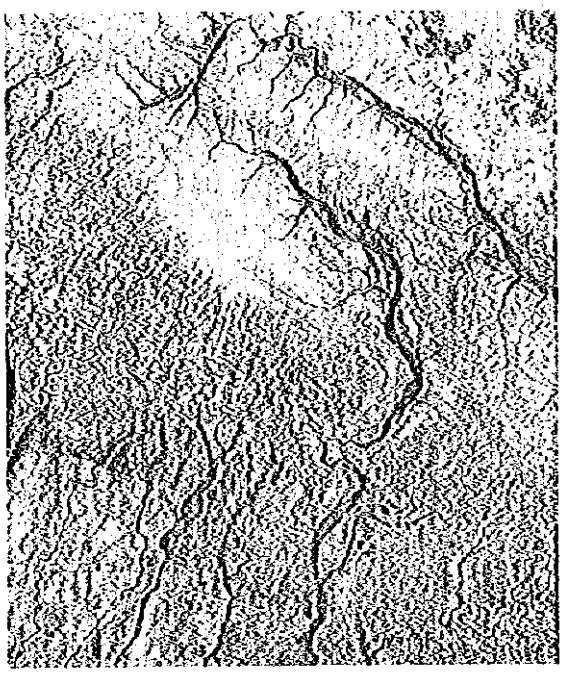
0 4.0 8.0 km

1 : 200,000

RESEARCH REPORT ON THE INVESTIGATION OF LANDSLIDE AND SOIL EROSION IN NEPAL USING REMOTE SENSING TECHNOLOGY	Figure 8.10 NDVI images of four dates JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY

1973-MSS

1977-MSS



1993-TM

1995-TM

60 160

0 4.0 8.0 km

1 : 200,000

RESEARCH REPORT ON THE INVESTIGATION OF LANDSLIDE AND SOIL EROSION IN NEPAL USING REMOTE SENSING TECHNOLOGY	Figure 8.11 NDVI images after histogram matching reference to 1993 NDVI data
	JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY

8．5　1993年の洪水における生産土砂量の推定

8.4 節では，土地利用や表層地形から年平均生産土砂量を推定した。土砂生産量に使用したモデルは，8.1 式に示すように，雨量データを含んでいない。図 8.12 にはラトゥ川周辺の年平均雨量が 1500mm-2000mm で，そのほとんどが雨期に集中していることを示している。8.4 節で検討した土砂生産量の評価方法は，通常時における年間土砂生産量の合理的な算出手法である。しかし，短時間の間に 500mm もの集中豪雨が発生した 1993 年の災害に，上記の土砂生産予測式を適用することはできない。これは強度の大きい降雨が表面侵食を加速させ，崩壊によって膨大な量の土砂が生産されることなどが考慮されていないからである。

図 6.4 に支流の状況を示したが，流路の裾部の侵食や攻撃斜面に沿って発生した崩壊により，土砂は支流内で生産され続け，下流部に運搬される。つまり，洪水時などでは他の地域に比べ，支流部で土砂生産が著しいこと示している。

そこで，式 8.1 の土砂生産モデルを年平均土砂生産量の算式から，洪水イベント時での土砂生産量の算出式に修正した。なお，モデルの修正にあたっては，支流が豪雨時に生産土砂量を増加させることは明白であるため，支流の地形状況が反映できるようなパラメータを土砂生産モデルに含めることを検討した。

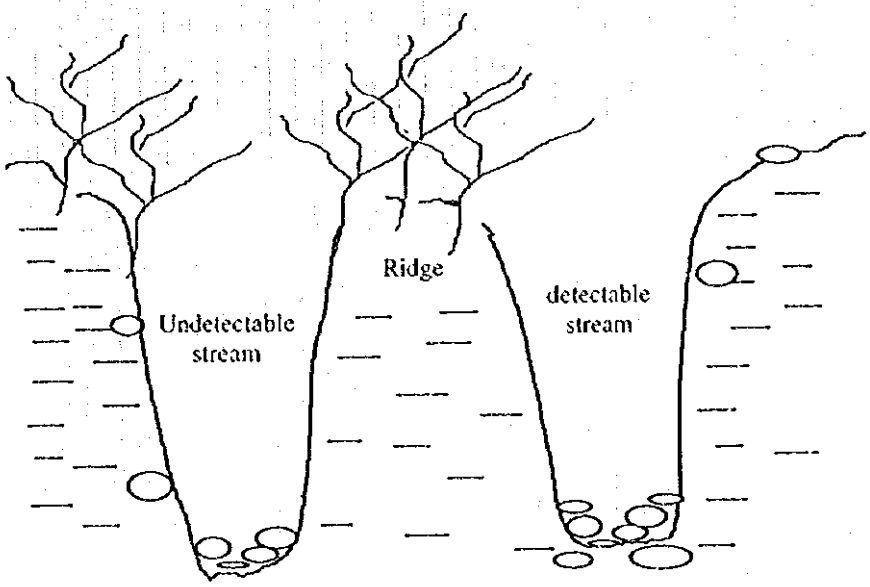
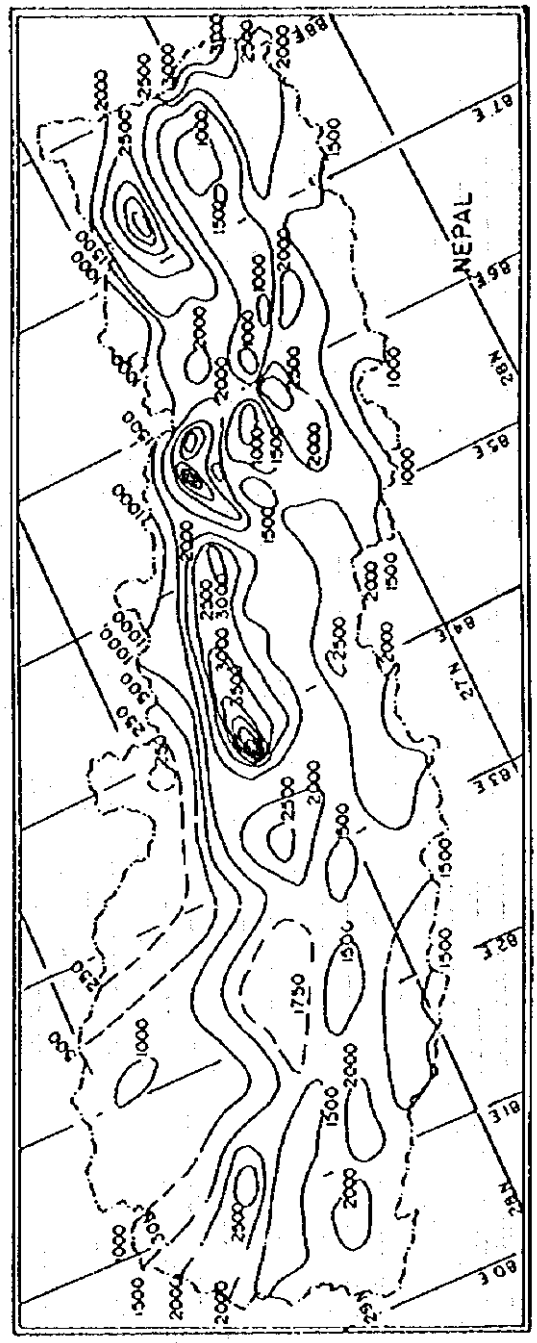
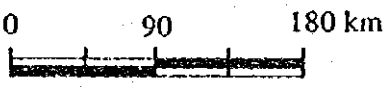


Figure 8.13 Sectional view of sub-streams in the watershed



(After Sharma,1995)



1 : 4,500,000

RESEARCH REPORT ON THE INVESTIGATION OF LANDSLIDE AND SOIL EROSION IN NEPAL USING REMOTE SENSING TECHNOLOGY	Figure 8.12 Mean annual precipitaion (mm. 1971-85)
	JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY

図 8.13 は尾根によって分けられている 2 つの支流の状況を示している。尾根が植物で覆われているとき，勾配の急な河岸はリモートセンシングでは識別することができない。しかし，仮に植生がない荒廃した尾根でも，センサの分解能が向上すれば識別は可能である。6.1.2 項で述べたように，土砂は支流の両岸から生産されたであろうことが指摘されている。リモートセンシングデータはこのような隠れた流路のデータを取得することができないため，地形図の情報から，見えない支流の抽出をおこなった。

そこで，式 8.1 に地形状況を反映させるため，流域面積に対する支流の流路長の比である支流密度の概念を加え，支流の分布と洪水による土砂生産量とを関係づけた。このためには式 8.1 に洪水時における崩壊や地すべりに関係する支流壁や河岸の土地被覆の 2 つのパラメーターを追加する必要がある。これにより，流域内の支流の分布を考慮した式 8.3 は，豪雨における土壌侵食の多発現象を表現することができる。この支流の分布は，GIS データベースを使用して計算した。

$$(V_{Total})_i = \sum^{allpixels} E_{30}\left(\frac{S}{S_{30}}\right)^{0.9} \times S_i \times \alpha_i \qquad (8.3)$$

Here $(V_{Total})_i$ is the estimated production of watershed i by field investigation

α_i Topographical factor for watershed i

Si $(L_i \times L_i)/A_i$

Li Length of streams in the watershed i

Ai Surface area of the watershed i

$\sum^{allpixel}$ Estimation of soil production for watershed i using all the pixels that fell in the watershed i

8.3 式では，第 6 章の土砂生産量算出式により得られた生産土砂量をもとに，各支流の洪水時土砂生産係数を求め，その係数を用いて NDVI 画像から 1993 年洪水時の土砂生産量を計算した。その結果，土砂生産量 1.98 百万 m^3 と算出された。この結果は，第 6 章の算出方法による結果と約 1 割の違いしかない。この洪水時土砂生産係数は，流域面積に対する支流長の比から構成されている。したがって，ある流域の洪水時土砂生産係数が把握されていると，リモートセンシングの NDVI から洪水時の土砂生産量を把握することができる。

第９章　結論と今後の提案

第９章　結論と今後の提案

９．１　結論と問題点

この研究報告書では，衛星リモートセンシングで土砂の生産，運搬，堆積の現象を２次元的に把握し，地理情報システムと統合することにより３次元的に求める手法を述べた。ラトゥ川の土砂の生産，運搬，堆積については，その機構を詳細に第６章で述べた(図 9.1)。

この研究の目的は，衛星リモーセンシング技術と GIS 技術をつかって，ラトゥ川流域に代表されるシワリク地域の土砂生産とその収支の仕組みを把握することである。図９．２は，シワリク地域の土砂生産とその土砂収支の仕組みを把握するために、衛星画像から得られる面的な情報とそれ以外の情報を統合するための方法について示した。また，この報告書では衛星画像により得られる土砂生産の面的な把握手法を，土砂の生産量という３次元的な認識に高めるためのモデルを作成した。年平均生産土砂量は，地形データと衛星画像から得られるパラメータから算出した。さらに，洪水時の土砂生産量は，そのパラメータに流域面積と流路長の比からなる洪水時土砂生産係数のパラメータを追加し，算出した。

この研究により得られた結論を以下に示す。

まず，土砂現象の面的な解析で以下の結論が得られた。

1)衛星リモートセンシング技術により流域の河道の変化は十分に把握することができる。河道は４年以上の長いスパンでみると，0.14 km2/year.程度の変化が認められた。

2）衛星リモートセンシングの正規化植生指標（NDVI）は，流域の荒廃状況を現す指標となりうる。さらに，２２年間の長いスパンでみると，流域の森林は悪化の一途を辿っている。

3）衛星画像で氾濫域の新旧堆積物と流路の変化を判別することができる。このことは，現地踏査の結果とあわせて，今後発生する氾濫による被害の軽減に衛星リモートセンシング技術を活用できる可能性があることを示している。

4) シワリク地域でも乾期と雨期の２時期の画像解析により正確な土地被覆分離が可能である。

5)シワリク地域の他の流域の河道変化の状況を把握するために上記の手法を他の流域でも実施した。その結果，ほぼ同じような結果が得られた。このため，土砂現象の面的

な解析手法は，シワリク地方の他の流域で適用可能である。

これらはシワリク地方の土砂管理に衛星リモートセンシング技術を適用すると，土砂生産にかかわる河道の変化や森林状態の悪化を把握できることを示している。

次に，土砂生産量の把握については，以下の結論が得られた。

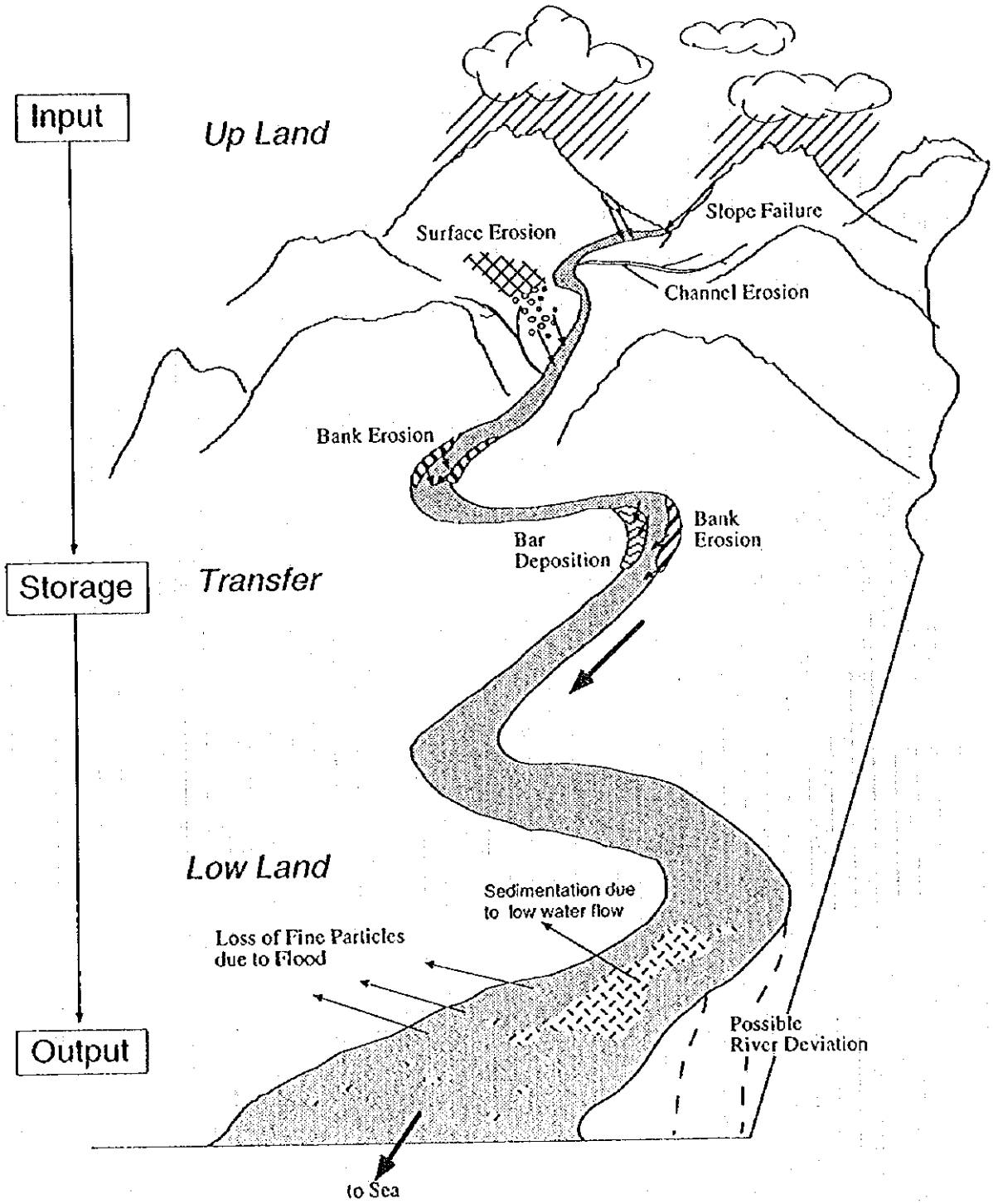
1）現地調査によりラトゥ川流域での洪水期の土砂生産様式を明らかにした。その結果，洪水期の土砂生産は支流域で生じ，地形と地質に大きく関連していることが判明した。

2）年間平均生産土砂量は正規化植生指標（NDVI）と斜面勾配をパラメータとしたモデルで算出した。モデルのキャリブレーションは，東ネパールの土壌侵食量の過去の研究結果によった。そのモデルによる解析の結果，ラトゥ川流域の年平均土砂生産量は，3.9 mm / year.に相当するという結果が得られた。

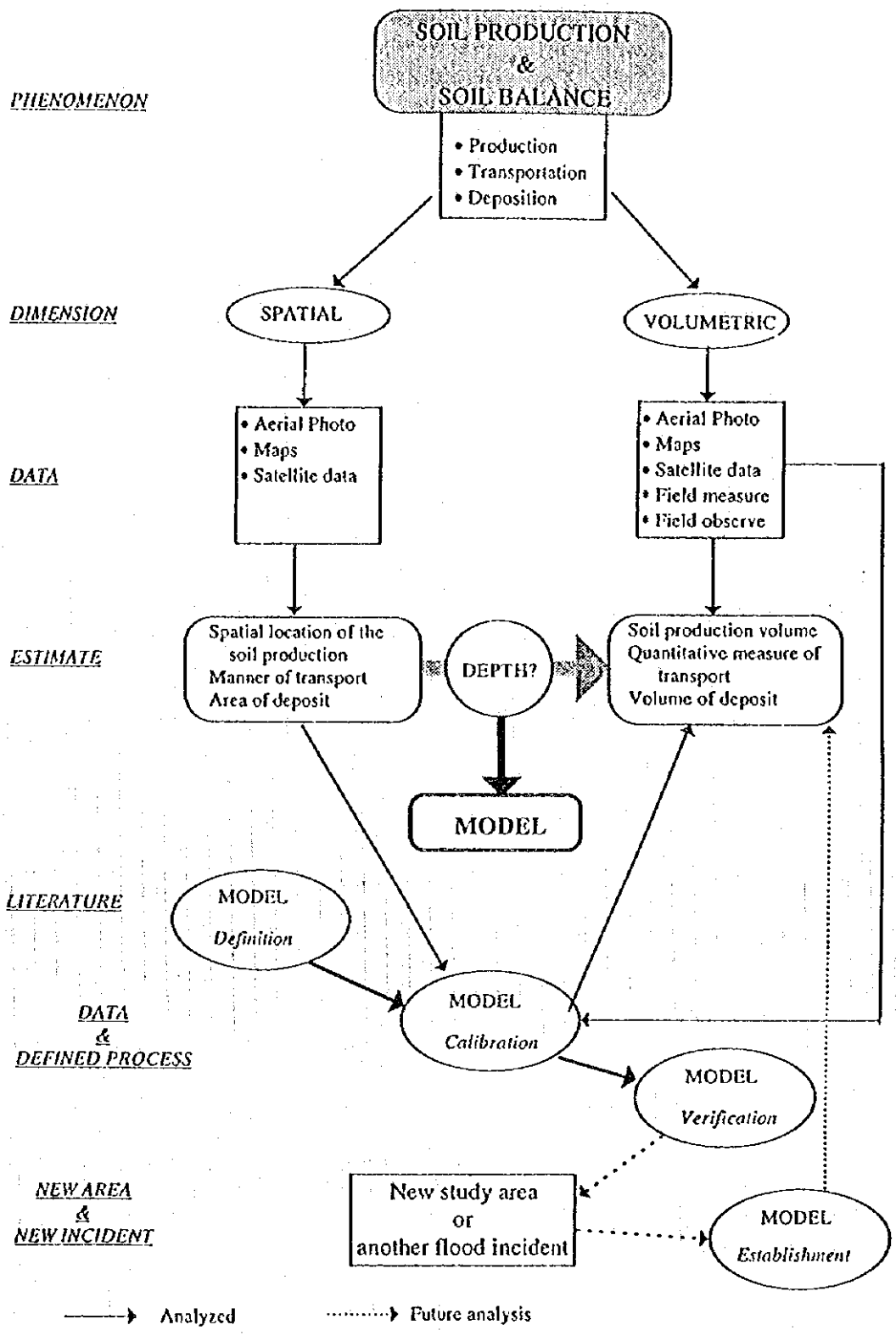
3）1993 年の洪水によるラトゥ川流域の土砂生産量は，上記モデルに洪水時土砂生産係数を付加し，算出した。その結果，ラトゥ川流域で約 2 百万m 3 程度の土砂が 1 洪水で生産されたと推定できる。

4）シワリク地域では，地理情報システムに入力された地形情報とリモートセンシングデータで，1993 年相当規模の災害による土砂生産量は推定可能である。

衛星リモートセンシング技術により土砂生産量の把握を行なう場合には，地理情報システムとの統合が不可欠になる。年平均生産土砂量は，既知の土砂の表面流出量にもとづいて解が得られる。そのモデル自体は，日本の足尾地区で検証されているが，ネパールでも土砂流出量が計測された流域に適用し，解析することが望まれる。さらに，地理情報システムとリモートセンシング技術の統合による洪水期の土砂生産量は，現地で得られた土砂生産様式が 93 年のレリックと仮定して，結果が得られたものである。したがって，この手法については，他の流域あるいは次の洪水で確認することが必要である。



RESEARCH REPORT ON THE INVESTIGATION OF LANDSLIDE AND SOIL EROSION IN NEPAL USING REMOTE SENSING TECHNOLOGY	Figure 9.1 Geomorphological process of soil production and transport
	JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY



RESEARCH REPORT ON THE INVESTIGATION OF LANDSLIDE AND SOIL EROSION IN NEPAL USING REMOTE SENSING TECHNOLOGY	Figure 9.2 Overview of the completed and future analysis requirement
	JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY

9．2　ネパールにおける本手法適用のためのシステム構成

地理情報システム（GIS）と衛星リモートセンシング技術を利用して解析を進めていく場合，地理情報や衛星データを解析するハードウェアとソフトウェアの整備，GISとリモートセンシングの知識習得などを行うことによりはじめて有効な技術となる。本節では，ネパールにおいてGISとリモートセンシング技術を導入するにあたって，どのようなシステム構成と要員教育をおこなうべきかについて報告する。

プロジェクトに，リモートセンシングと GIS 技術を適用する場合，次の3点の要素が必要である。

(1)　適切なハードウェア・ソフトウェア

(2)　解析をおこなう要員の確保

(3)　メンテナンスシステム

近年のハードウェアの進歩は，個人用のパソコンでもワークステーションに匹敵するような処理速度の向上をもたらした。よって，以前ではワークステーションでしかおこなうことができなかった画像処理等の解析作業が，パソコンレベルでも行えるようになってきた。よって，実際にある程度作業用にパソコンを設置しているシステムが既に存在する場合，新規にシステムの導入をおこなうよりも，既存のシステムの拡張（ソフトウェアの整備）をおこなうことがより効果的である。

GISとリモートセンシングを有効に活用するためには，次の解析スタッフが必要である。

(1)コーディネーター

GISとリモートセンシングを実プロジェクトに導入していくうえでの，導入分析，利益解析，解析手法決定，モニタリングなどをおこなう人物。

(2)オペレーター

コーディネーターの支持を受けて，データ入力から出力図作成までをおこなう人物。

システムのメンテナンスは，ハードウェア・ソフトウェアの安全性を考慮する上でとても重要な問題である。

本調査をおこなう上で必要となるシステムの整備手順について報告する。

フェーズⅠ：

このステップは，GISの基礎知識の修得とともに，GIS処理できるような簡単なシステム整備をおこなう。衛星リモートセンシング技術は，地理情報システムと組み合わせることによって，より現実に即したものとなる。よって，技術の習得の容易さとコスト低減の観点から，はじめはGISを基本としたシステムの整備を行う。

GISのデータ入力は，通常既存システムからのデータコンバート，図面からの新規入力による方法がある。GISの最も利用頻度の高いソフトウェアは，アメリカ ESRI 社の ARC/INFO である。よって，他のシステムとの互換性を考慮して，DAT か 4mm テープカートリッジを設置し，必要に応じて変換作業を行う。デジタイザは，GIS解析の効率性を考慮して，解析本体のコンピュータとは，別のコンピュータに設置する。設置するコンピュータは，デジタイザソフトが解析コンピュータの処理速度にあまり依存しないことから，パソコンレベルが適している。

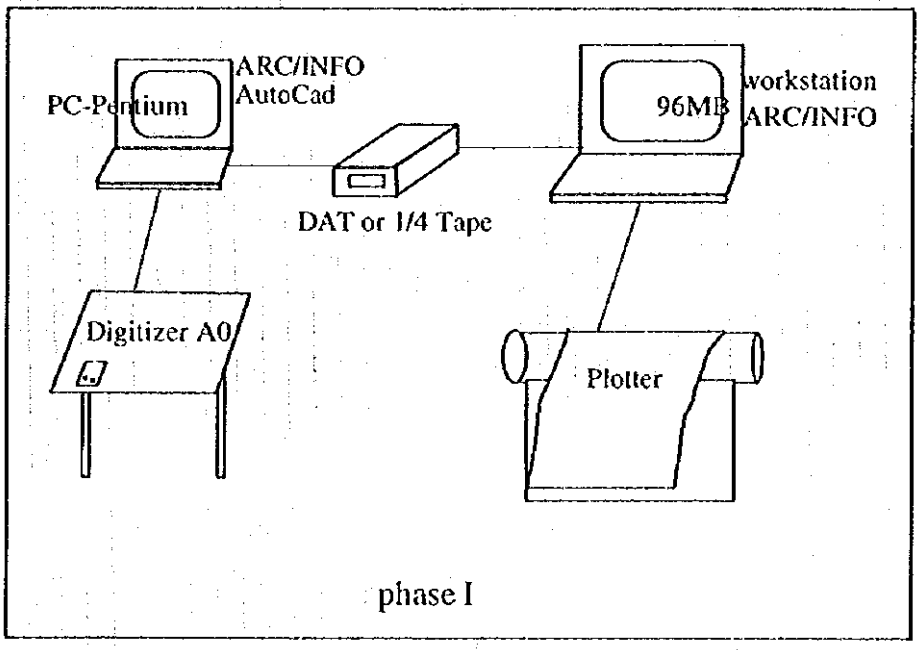


Figure 9.3 System configuration for phase I

このフェーズにおける要員は最低でも，デジタイザ入力要員 1 名，解析及びシステム評価要員 2 名の計 3 名は必要である。

このレベルでの要員教育は，主としてソフトウェアの操作修得であるため特別な知識を

必要としない。よって，トリブヴァーン大学や ICIMOD では，基本的な GIS ソフトウェアである Arc/Ionfo や Terra-Soft の操作法の研修をおこなっているので，本研修を利用する。このフェーズは 1 年程度を要す。

フェーズ II：

フェーズ I が経過した時，GIS とリモートセンシングの基礎的な知識は既に修得し，簡単なデータ入力や地形図重ね合わせ出力が可能なレベルになる。，

よって，このステージでは，地理情報の GIS 化の促進と適用事例の拡大，さらにリモートセンシング技術を導入し，GIS と組み合わせた解析をおこなうことのできるシステムの整備をおこなう。

解析システムは，基本的に GIS システムを拡張しておこなわれる。GIS システムに加えて，リモートセンシングは画像を取り扱うため，フルカラーボード，大規模メモリ（最低でも 64M バイト），及び大規模外部記憶装置（2G バイト程度）が必要となる。

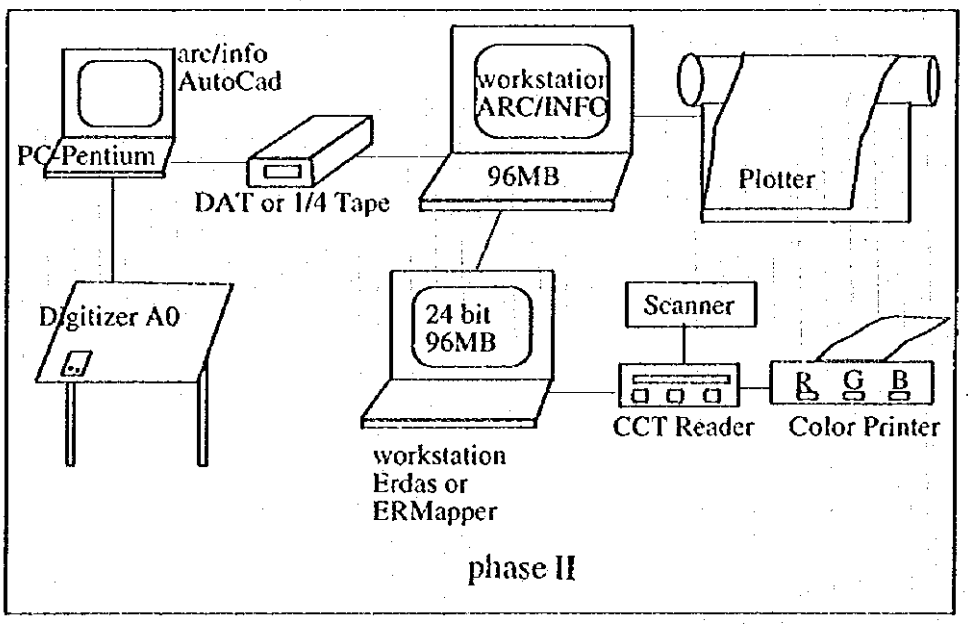


Figure 9.4 System configuration for phase II

リモートセンシングは，GIS 技術と比較して以下の点で専門的な知識を必要とする技術である。

・異なるセンサ・異なるデータ受信局よりデータ供給されたデータのフォーマットの統合化

・各種画像内歪み補正法

・分類法

・GIS・シミュレーション技術との統合化

よって，本解析をおこなう技術者は，リモートセンシング関連の各種解析作業を行う前に，リモートセンシング関連の短期間のトレーニングをおこなう必要がある。さらに，解析作業をより精度よく，効率よく進行させるためには，リモートセンシングを解析している分野の専門家とともに解析を進めることが重要である。

GISとリモートセンシングを統合した適用分野には，現在，水文現象の把握，災害情報の抽出及び予測などが行われている。本フェーズは，GISとリモートセンシングの統合化が確立されるまでおこなう。フェーズIIは2～3年を要す

フェーズIII：

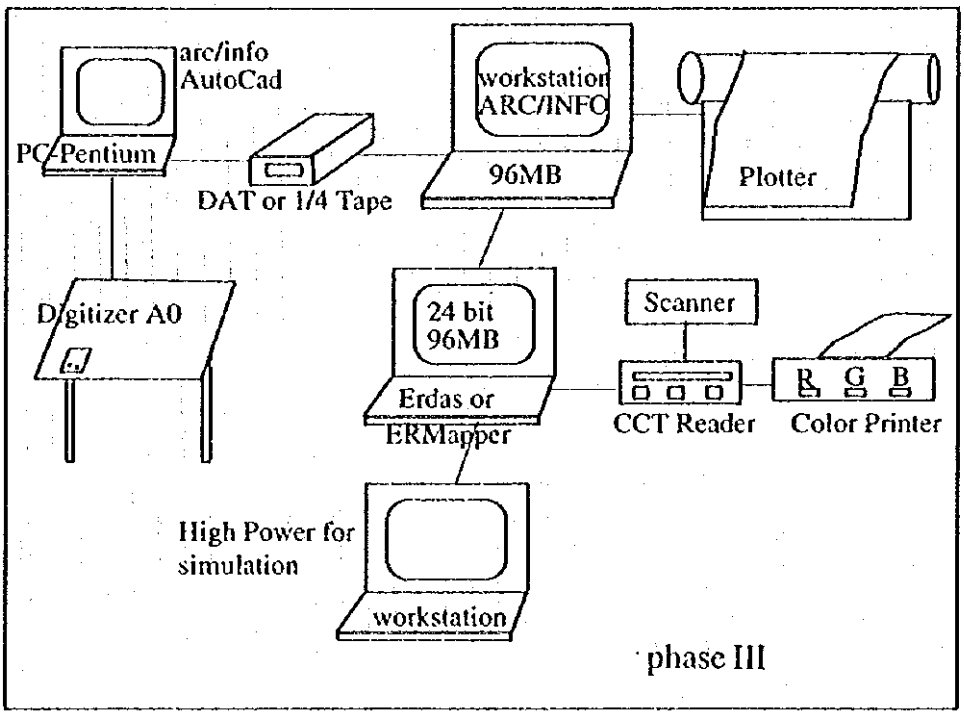


Figure 9.5 System configuration for phase III

このフェーズはフェーズ II をさらに発展させたもので，基本的にネパールにおける水文・土砂災害における砂防計画，モニタリング，予測をおこなうことを主な目的とする。本フェーズにおける上記砂防計画システムは一般社会の避難計画を念頭に入れたもので，土砂災害が発生した場合の被害地域の予測，住民の最適避難地や避難経路の選定まで行うことができる。よって，本フェーズを有効に解析する場合，システム構成は，ハイスペックな CPU を搭載したワークステーションの設置（例えば HP レベル）が不可欠である。

システムは，自然災害被害地の予測，土壌の弱い地域の抽出などの既存 GIS データベースの結果をシミュレーション技術へ統合させることができなければならない。

本フェーズの実行体制は，水文学やシステムダイナミクス，物理・数学，土砂災害等の多岐の研究部門間の連携が必要である。よって，本フェーズには，研究機関との連携をはじめとして莫大な投資と人的資源が必要であるため，国家機関相互の協力が必要である。

REFERENCES

Burrough, P.A.: *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*, 1986, Clarendon Press Oxford

Honada, K, Murai, S., and Shibasaki, R.: *Prediction of vegetation restoration by erosion control works in Asio copper mine Japan*, 13th IGRSS, 1993

ICIMOD: *The Role of Extreme Weather Events, Mass movements, and Land Use Changes in Increasing Natural Hazards*, 1993

Ives, J. D. and Messerli, B.; *The Himalayan Dilemma*, Routledge London and New York, 1989

Ives, J.D.: *The theory of Himalayan environmental degradation: Its validity and application challenged by recent research*, Mountain Research and Development, Vol. 7, No. 3, 1987

Iwata, N.: *Rising Himalaya*, Chikuji Shokan, Tokyo, 1988 (In Japanese)

Matsuda, T.: *Magnitude of tectonics movement and its frequency*, Geography, 4, 151-165, 1983 (In Japanese)

Sharma, K. C.: *Natural Resources in Nepal*, 1978

Sharma, K. C.: *Natural Hazards and Man made Impact in Nepal Himalaya*, 1988

Sharma, K.C.: *Some Symptoms of Environmental Degradation in Nepal (1950-1994)*, 1995, Printing Support Pvt. Ltd. Katmandu

Summerfield, M. A.: *Global Geomorphology, Longman Scientific & Technical*, 1991

Yamamoto, K.: *Theory of Channel Form*, Public Works Research Institute Papers, Vol. 2662, 37-50, 1988