

### 3.5.3.3 流域の土地被覆の経年変化解析

本項では、複数時期の衛星リモートセンシングデータを用いて、土砂生産地と考えられる流域内の荒廃地などの裸地・少植生域および耕作地を抽出し、それらの分布域の経年的なデータを加えることで流域の土地被覆の経年変化解析を実施した。

作成した土地被覆図は、1975年、1984年、1995年の3時期である。

#### (1) ランドサット TM/MSS を用いた土地被覆分類

一般に、河川に流入する土砂量と地表面の土地被覆形態との間には密接な関連があると言われている。よって、流入する土砂の軽減検討する場合、地表面の土地被覆形態を広域に把握することが重要となる。

土砂流出に影響を与えている土地被覆項目のうち、耕作地の分類については栽培前後の季節の異なるデータを検討することで抽出が可能であり、少植生地域については草地よりも植生活力が低く、裸地より反射輝度が低いといった特性から抽出可能である。また、崩壊地などの裸地については輝度特性が他の土地被覆項目と比較して著しく高いことから比較抽出が可能である。

以上の特性を考慮し、複数時期のランドサット TM/MSS を用いて土地被覆図の作成を行った。

#### 分類手法の選定

分類手法は、大別して最尤法に代表されるグランドトゥルース（現地調査結果）を用いる手法（教師付き分類法）と、クラスター分析に代表されるグランドトゥルースを用いない手法（教師なし分類法）が標準的に使用されている。本項では、解析対象地の地形図や土地被覆図、航空写真といったグランドトゥルースデータを入手することができなかったこと、解析者の主観によるばらつきを抑えて各年一定の精度で分類し複数時期の比較解析が可能であるといった理由より教師なし分類法を採用した。

### 土地被覆図作成の手順

土地被覆図の作成手順を図 3.5.3.20 に示す。

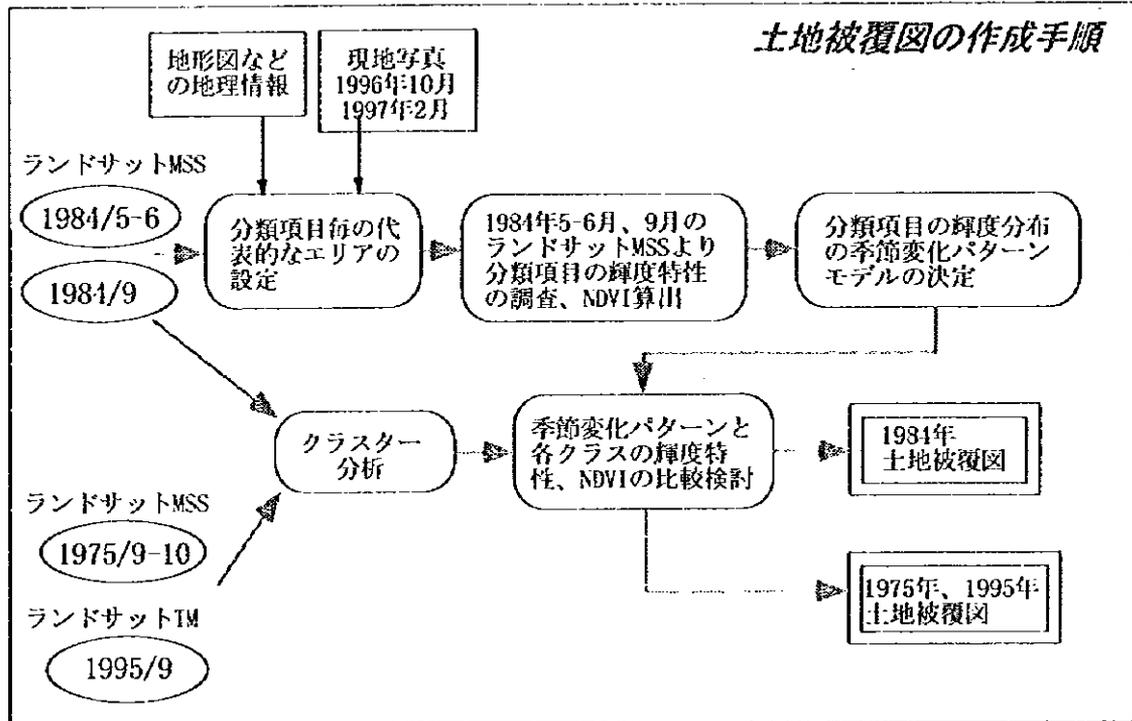


図 3.5.3.20 土地被覆図の作成手順

### 分類項目の選定

ランドサット TM/MSS および現地写真、地形図を使用して本解析地の土地被覆状況の判読を行い、得られた判読結果と本調査の目的を考慮して土地被覆の分類項目を選定した。選定した項目は以下のとおりである。

1	森林
2	草地
3	耕作地
4	少植生域
5	裸地
6	水域
7	市街地

図 3.5.3.21～図 3.5.3.30 に各土地被覆項目の代表的な現地写真を示し、それらに対応する各土地被覆項目別分光反射スペクトル特性を図 3.5.3.31～図 3.5.3.32 に示す。

また、各分類項目のランドサット TM/MSS のフォールスカラー上での判読状況と分光反射スペクトルパターン特性を次に整理する。

### 1. 森林域

1996 年 10 月踏査時の現地写真に示すように、各流域の河道沿いや上流側の山間部では森林の植栽状況が確認でき、当地域でのランドサット TM/MSS のフォールスカラーでは、南斜面では暗赤色、北斜面は暗赤色～黒色を呈している。同じ斜面内でもかつ植生状況が類似した地域での輝度分布は比較的一定状態にある。

分光反射スペクトルパターンの分布の形状は、可視域の緑と赤に相当するバンド 4・5 で反射輝度が低下し、近赤外のバンド 6 の反射輝度が高い特性をもっている。これは、各土地被覆項目別分光反射特性の有植生地の反射特性と類似した傾向があり、樹木の葉は近赤外域の光を特に反射している事実と合致している。

観測時期単位で比較した場合、可視域のバンド 4・5 は各時期とも反射輝度パターンに変化が見られなかったが、バンド 6・7 は 9 月に反射輝度が最も高く、5-6 月では低下する傾向を示した。これは、樹木の葉の活力状況は雨期では乾期と比較して活発に蒸散が行われ、蒸散が盛んに行われると近赤外光の反射率が上昇するためである。

### 2. 草地

山地斜面から平地にかけて広く分布する雑草地帯および牧草地を草地と設定した。ランドサット TM/MSS のフォールスカラーでは、やや濃い赤色を呈しており、森林域よりも明るい色調となる。

分光反射スペクトルパターン形状は、すべての波長帯で森林とほぼ同じ傾向を示しているが、全体的に反射輝度が高い位置に分布する傾向を示す。

観測時期単位で比較した場合でも傾向は森林の輝度分布とほぼ類似している。

### 3. 耕作地

大凌河流域では、以前より耕作が盛んに行われている。1990 年の農業統計によれば白石ダム上流域の耕作地面積は 4,502km<sup>2</sup>であり、そのうち 4,498km<sup>2</sup>が畑地、水田は僅か 4 km<sup>2</sup>である。ランドサット TM/MSS のフォールスカラー上で、耕作地は明赤色を呈しており、植生密度の高い場合は草地や森林などの他の植生と明確に区分できる。しかし、植生密度が低い場合は少植生

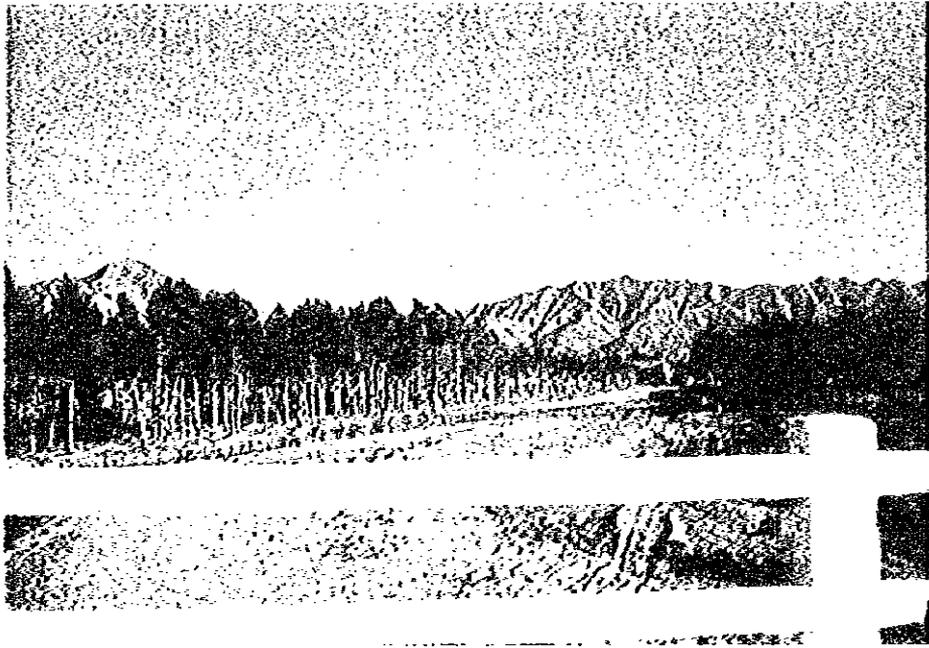


図 3.5.3.21 森林の現地状況 --1996.10.1 涼水河



図 3.5.3.22 草地の現地状況 --1996.9.30 閻王鼻子ダムサイト

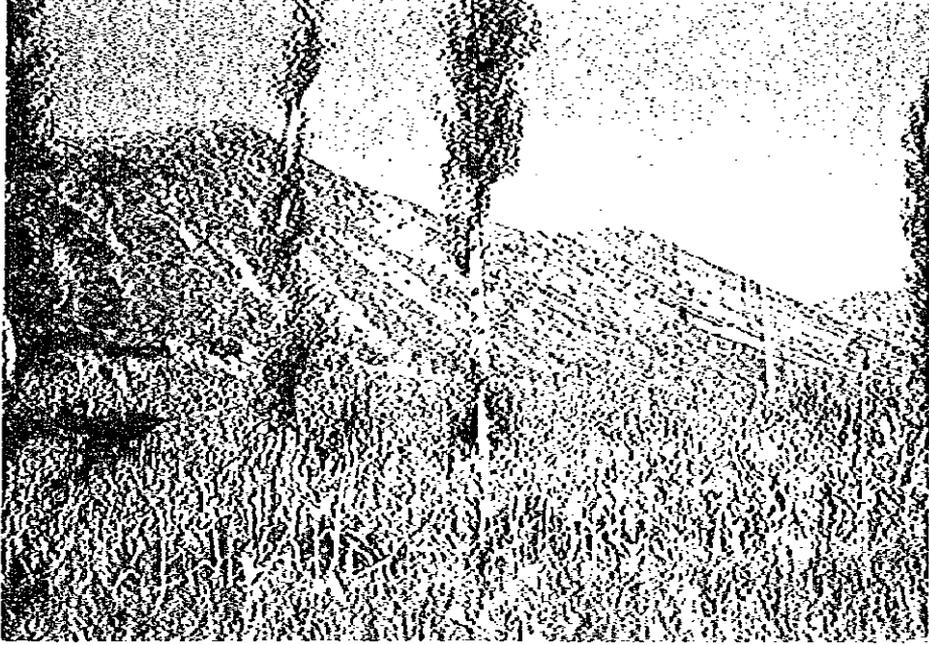


図 3. 5. 3. 23 耕作地の現地状況(1) -1996. 9. 30 えん王鼻子ダムサイト



図 3. 5. 3. 24 耕作地の現地状況(2) -1997. 2. 21 佐牛河→白石ダムサイト

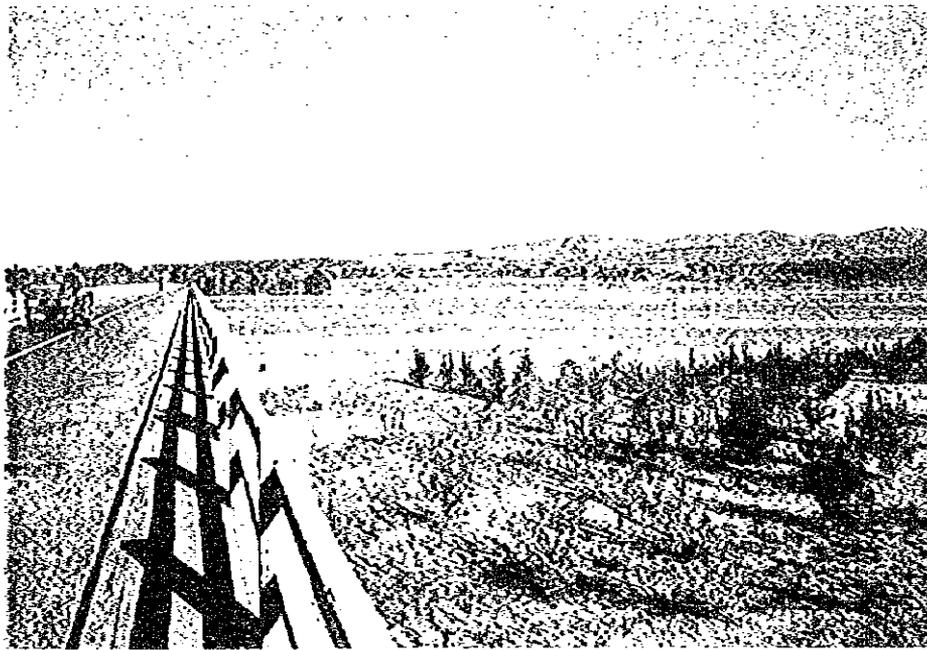


図 3. 5. 3. 25 少植生域の現地状況 -1996. 10. 1 忙牛河橋



図 3. 5. 3. 26 裸地の現地状況 -1997. 2. 21 白石ダムサイト→朝陽

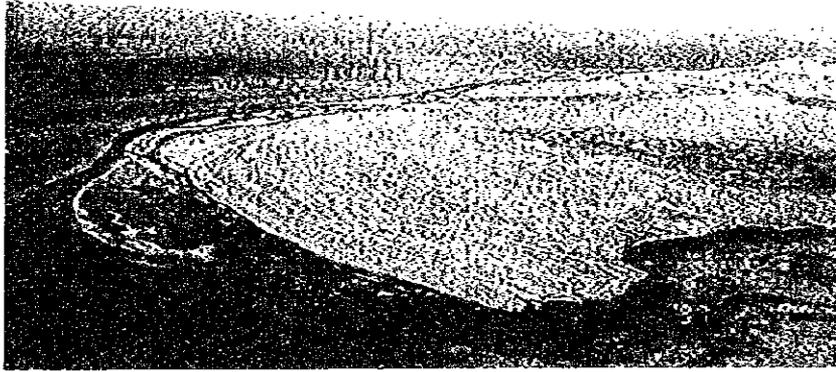


図 3. 5. 3. 27 裸地（土砂堆積域）の現地状況(1) -1997. 2. 20 白石ダムサイト上流

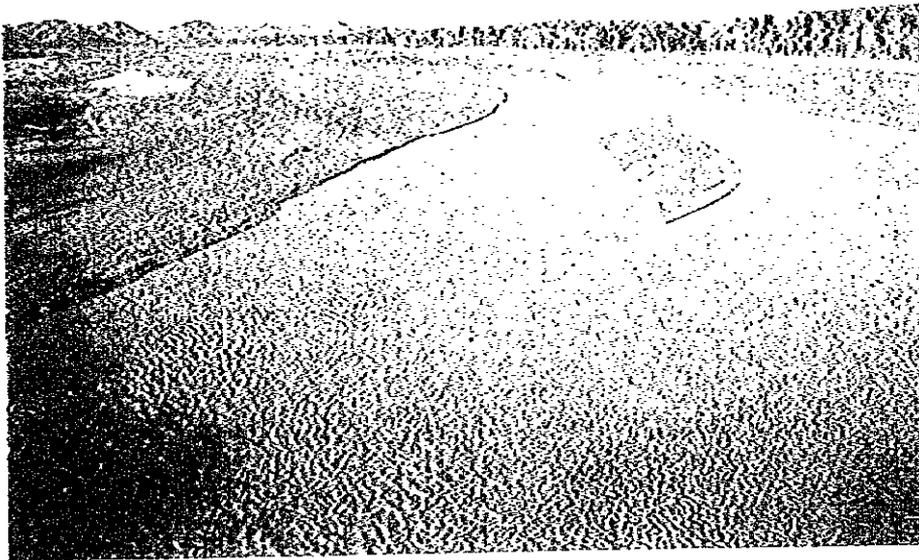


図 3. 5. 3. 28 裸地（土砂堆積域）の現地状況(2) -1996. 10. 1 忙牛河橋



図 3.5.3.29 水域の現地状況 -1996.9.30 白石ダムサイト



図 3.5.3.30 市街地の現地状況 -1997.2.21 朝陽

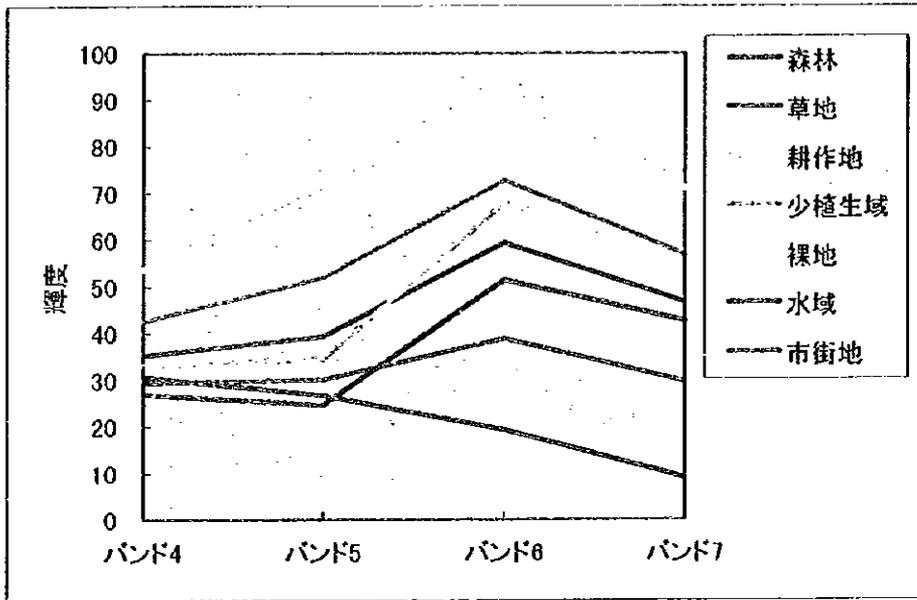


図 3. 5. 3. 31 1984 年 5-6 月のランドサット MSS の土地被覆毎の分光反射スペクトルパターン

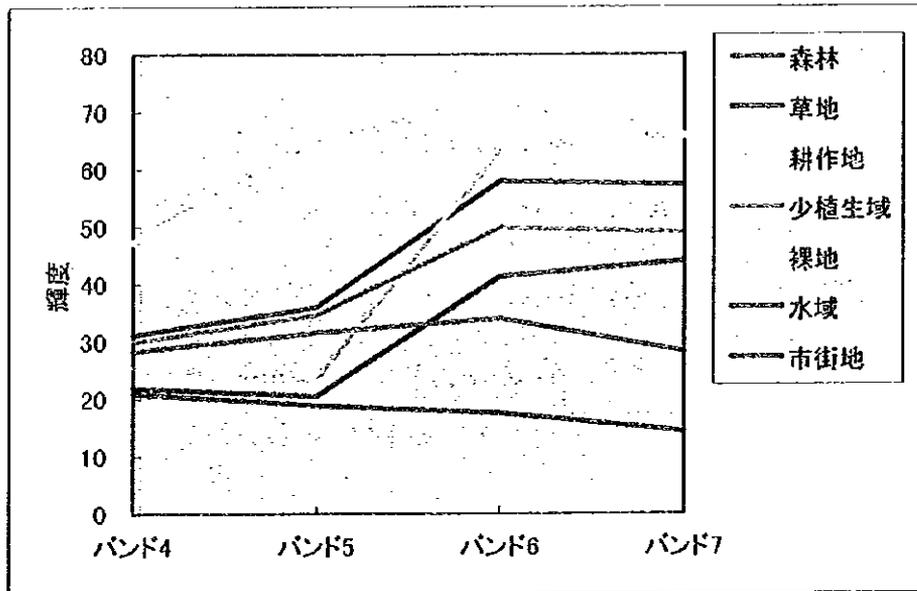


図 3. 5. 3. 32 1984 年 9 月のランドサット MSS の土地被覆毎の分光反射スペクトルパターン

域と、農作物の作付け前・後の非植栽時には裸地と同様の被覆となるため、項目間の区別が困難となる。

分光反射スペクトルパターンの分布形状は、近赤外のバンド6・7の反射輝度が特に高く、他は森林などの他の有植生項目とほぼ同じ傾向を有している。

5-6月と9月の2時期の画像を比較した場合、収穫時期の差により、9月は全面作物であるものが5月では作付け前あるいは直後の裸地情報も含まれてセンサに入射していると考えられる。そのため、精度良く耕作地を抽出するには、作付け前の5-6月と収穫期前の9月の植生密度が最も高い時期の差画像を用いて分類する必要がある。

#### 4. 少植生域

本調査の対象地域には、草が僅かに生える程度の雑草と裸地が混在する荒廃化が進んだ地域が存在する。このような地域を少植生域として設定した。

少植生域の分光反射スペクトルパターンは、バンド5とバンド6の差が他の植生域より少ない傾向を示す。

#### 5. 裸地

植生がなく荒廃化が著しい地域および砂地を裸地として設定した。裸地には河道の土砂堆積域（乾燥した荒れ地や砂地）も含まれる。

裸地は他の土地被覆項目と比較して、すべての波長帯で高い反射特性を有している。

季節単位では、輝度は太陽光の照射する角度によって変化しているため、9月のバンド5・7が5-6月のバンド5・7と比べて反射輝度が高い傾向を示している。

#### 6. 水域

河道の水域（濁水を含む）および湖沼や貯水池を水域と設定した。水域は、ランドサット TM/MSS フォールスカラー上で暗青色～黒色を呈しており、輝度は他の土地被覆項目中で最も低い。

水域は、他の土地被覆項目と比較して、赤外域のバンド6からバンド7までで反射輝度が極端に低い傾向を有している。これは、水塊の分光反射輝度特性が近赤外～遠赤外の光を特に吸収する特性によるものである。

また、水域の反射輝度特性は季節間でほとんど差が見られず、他の非植生項目と同様の反射傾向を有している。

## 7. 市街地

朝陽、義県、錦県などの比較的住宅が密集した地域を市街地と設定した。市街地はランドサット TM/HSS フォールスカラー上でやや暗い青色を呈しており、地表面からの反射輝度値がバンド間で変化が少ない傾向を有する。

### 1984 年の土地被覆図の作成

1984 年 5-6 月、9 月の画像データの分類は両時期ともにクラスター分析を行い、抽出された各クラスについてそれぞれの分光反射スペクトルパターン特性と NDVI 算出結果をもとにクラス間融合を行う方法で土地被覆分類図を作成した。

1984 年 5-6 月、9 月の各土地被覆分類結果は、衛星観測時点での地表面の土地被覆情報を表現したものである。よって、耕作地のように野菜などを栽培する土地被覆項目では、収穫前後で輝度が異なり、収穫前は耕作地であったものが収穫後は裸地であるといった、土地被覆上の異なった分類結果を招く。

そこで本検討では、誤分類を防ぐために耕作地の土地被覆状況が異なる 1984 年 5 月の土地被覆分類図と 1984 年 9 月の土地被覆図を用いて、2 時期の土地被覆の変化パターンを考慮した上で、1984 年の土地被覆図を作成した。

作成した 1984 年の土地被覆図を図 3.5.33 に示す。

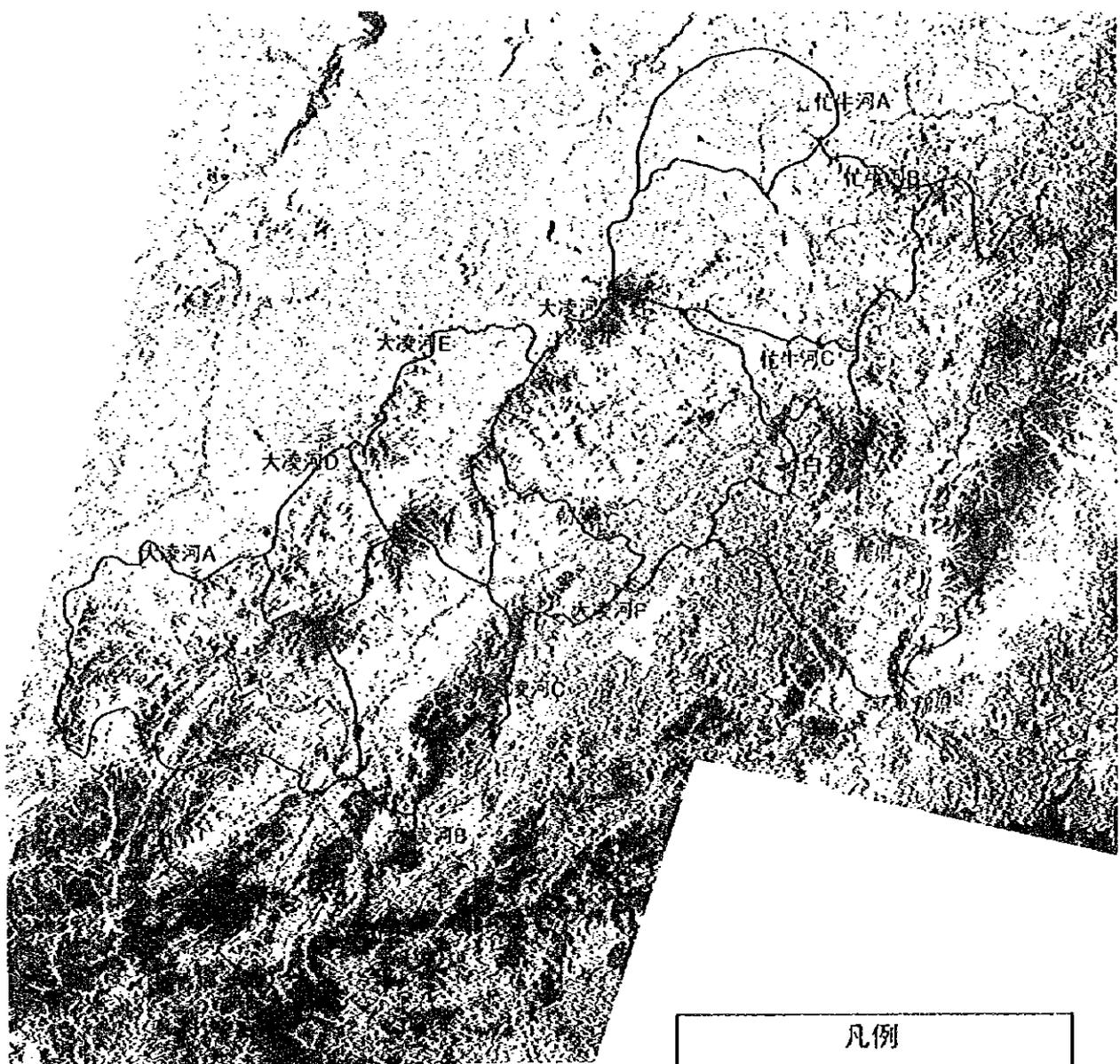
### 1975 年・1995 年の土地被覆図の作成

季節変化を考慮して作成した 1984 年の土地被覆図を基準とし、さらに、1975 年および 1995 年の土地被覆図の作成を行った。

図 3.5.3.34、図 3.5.3.35 に 1975 年および 1995 年の土地被覆分類結果を示す。全流域の土地被覆面積の経年変化を表 3.5.3.5、図 3.5.3.36 に示す。

全流域の土地被覆の経年変化をみると、森林は 1975 年では流域の 24%であり、農地開発などの伐採の影響と思われるが 1975 年から 1984 年までの 9 年間で 142km<sup>2</sup> 減少、1984 年から 1995 年までの 11 年間でさらに 458km<sup>2</sup> 減少して 1995 年では流域の 20%占める程度となった。

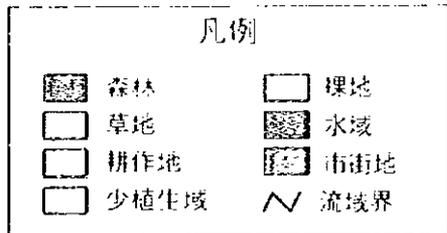
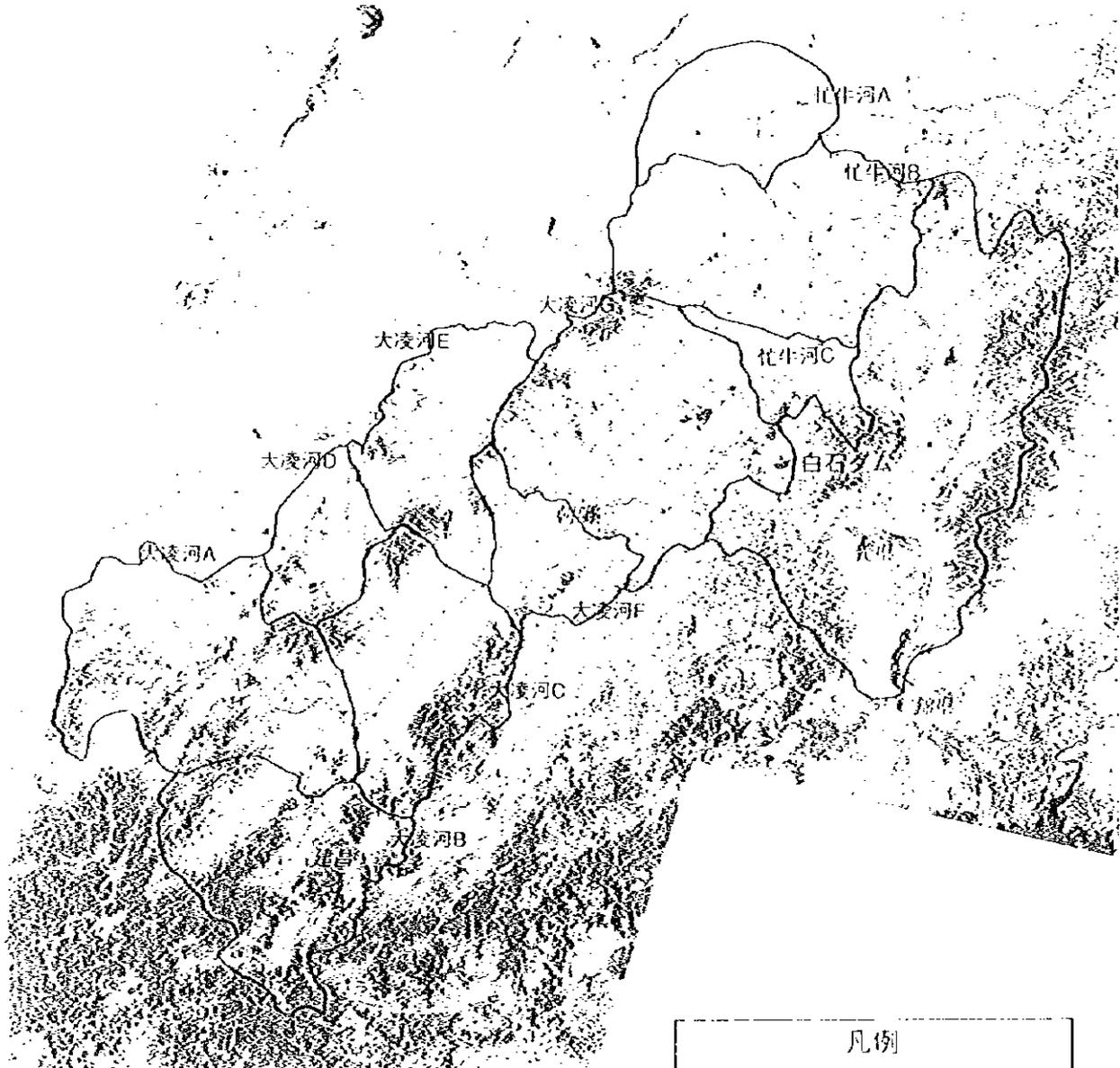
土地荒廃の進行した裸地や少植生域は減少傾向を示し、耕作地が 1975 年から 1995 年の長期的スパンでは増加傾向にある。



凡例			
	森林		裸地
	草地		水域
	耕作地		市街地
	少植生域		流域界

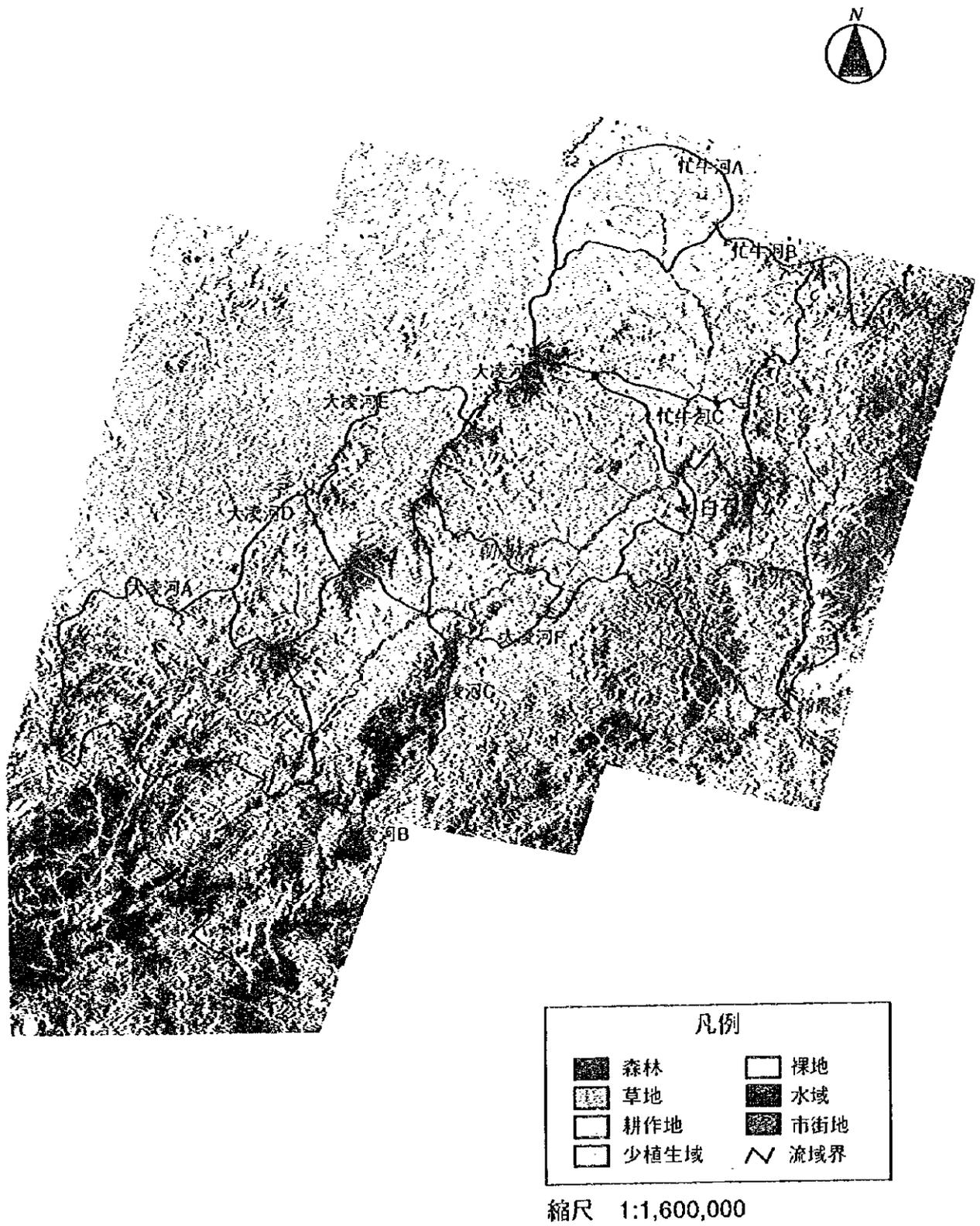
縮尺 1:1,600,000

図 3. 5. 3. 33 1984 年の土地被覆図



縮尺 1:1,600,000

图 3 5 3 33 1984 年の土地被覆图



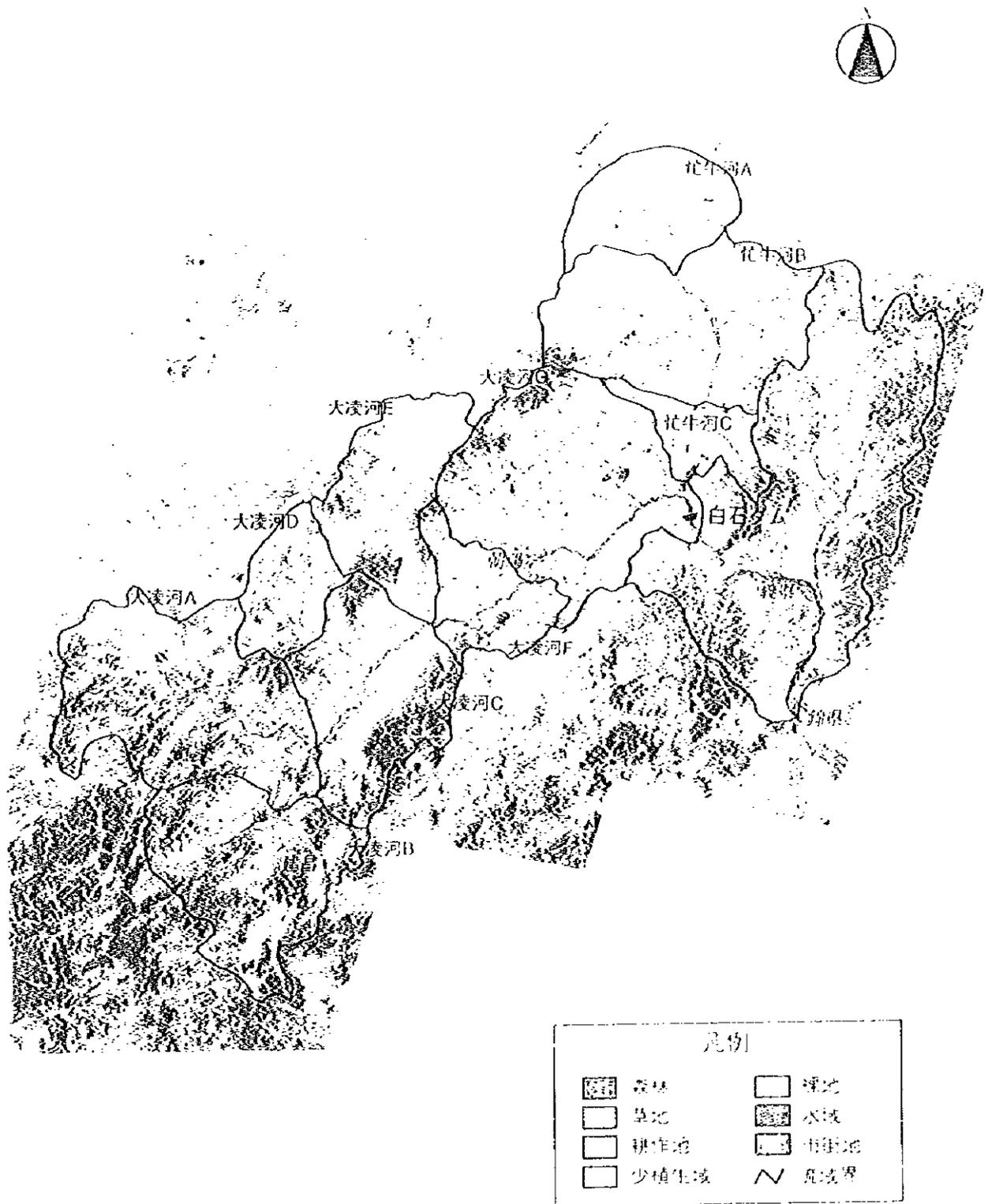
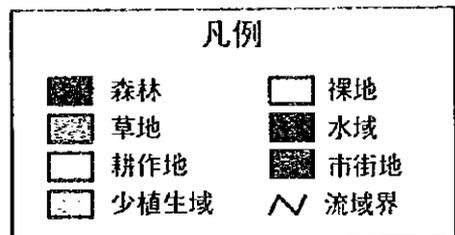
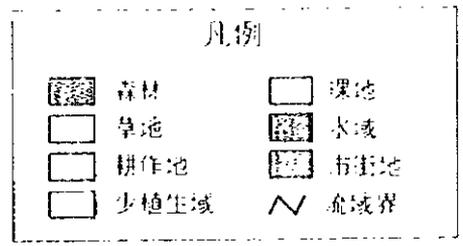


図3 5 3 34 1975年の土地被覆図



縮尺 1:1,600,000

图 3.5.3.35 1995 年の土地被覆図



縮尺 1:1,600,000

図 3.5.3.35 1995 年の土地被覆図

表 3.5.3.5 全流域の土地被覆面積の経年変化 (km<sup>2</sup>)

	森林	草地	耕作地	少植生域	裸地	水域	市街地	合計
1975年	4,334	541	2,061	10,461	556	263	56	18,272
1984年	4,192	1,638	4,554	6,958	609	251	71	18,272
1995年	3,734	2,600	4,131	7,140	369	224	74	18,272

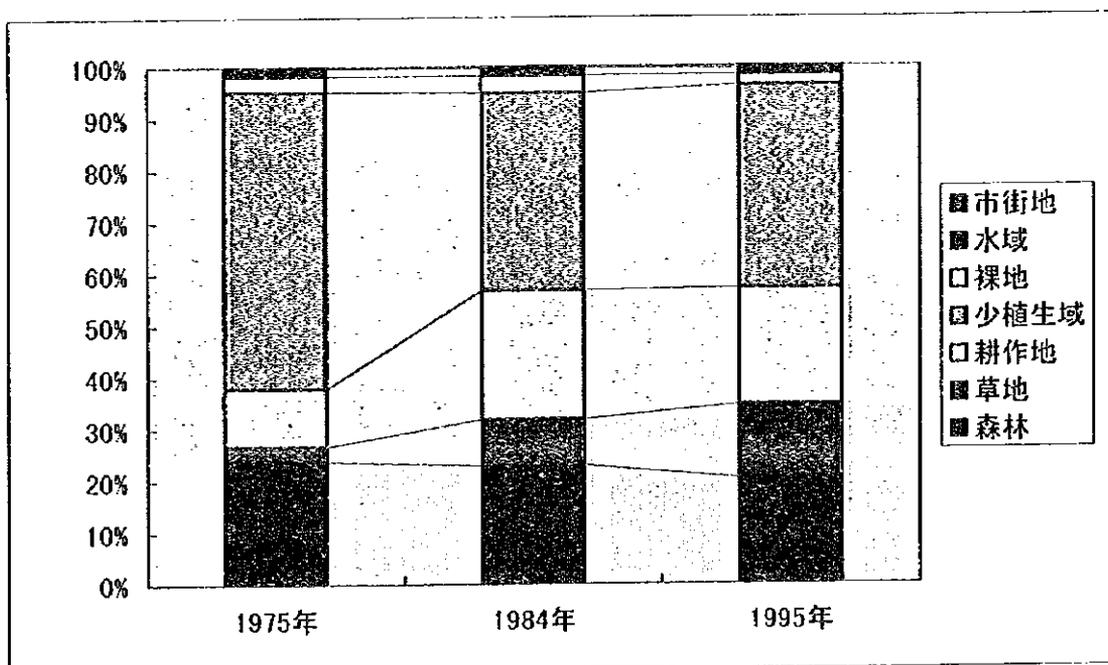


図 3.5.3.36 全流域の土地被覆面積の経年変化

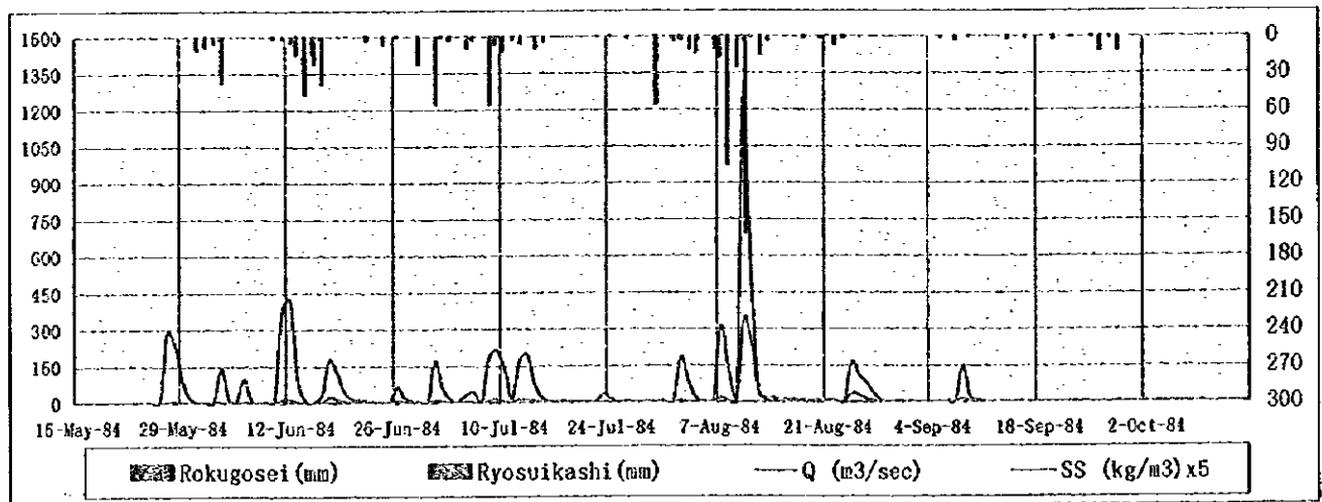
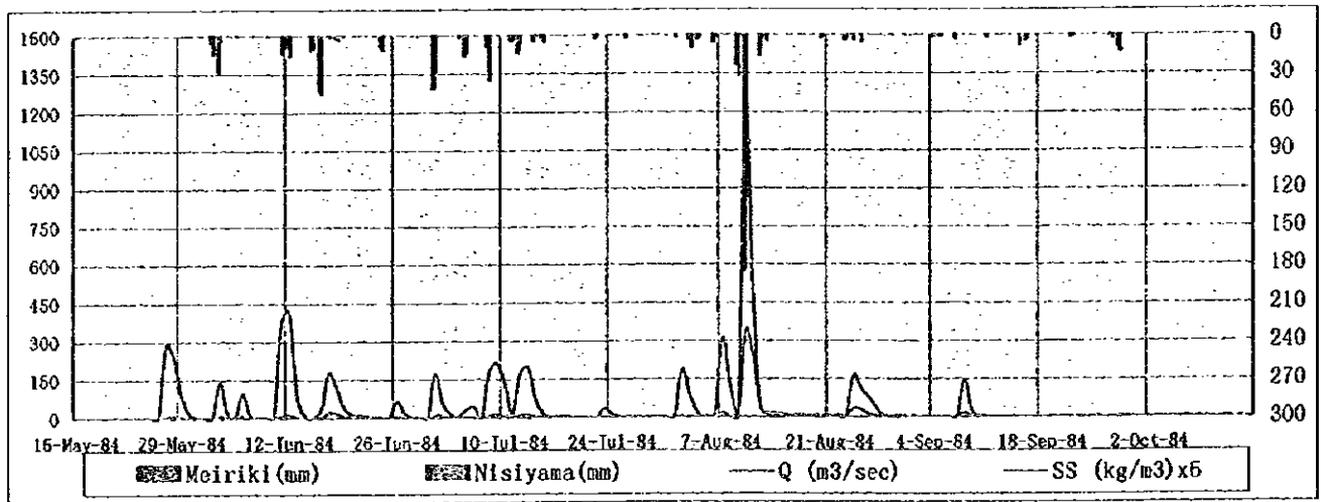
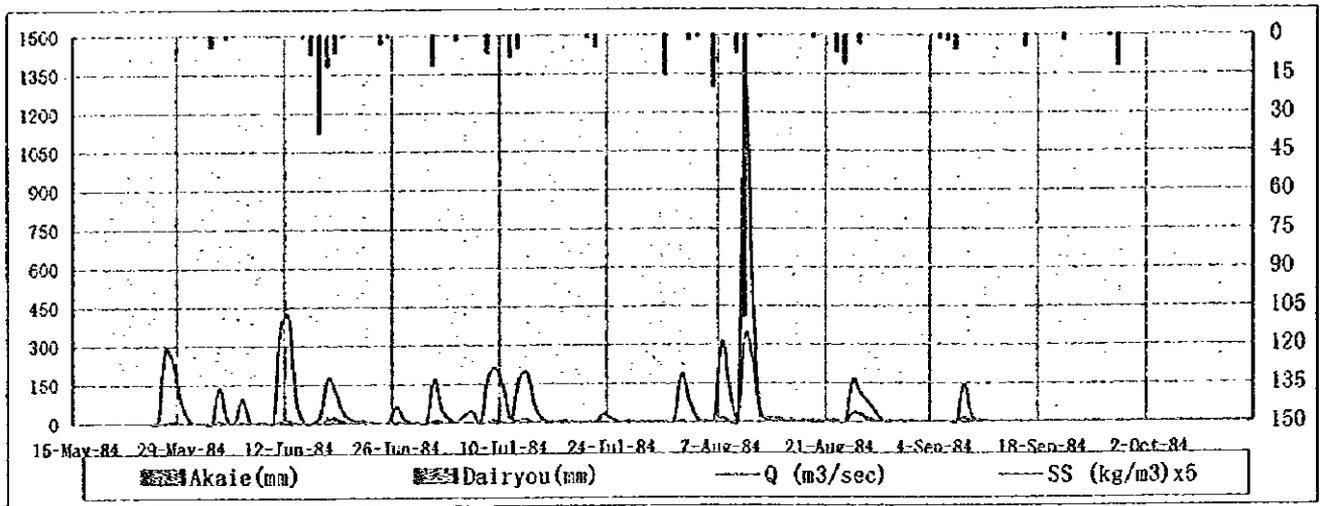


図 3.5.3.37 1984年5月1日～1984年10月15日忙牛川流域の雨量・流量・SS濃度

## (2) 流域別土地被覆の経年変化

本項では、土地被覆の経年変化状況を流域毎に算出し、その経年変化状況を調査した。

表 3.5.3.6(a)、表 3.5.3.6(b)に流域別土地被覆面積の経年変化を示す。

以下に、各流域の土地被覆の経年変化状況を整理する。

### 大凌河 A 流域 - 流域面積 2,995km<sup>2</sup>

本流域は大凌河の西側の最上流部に位置する。

流域の山間部には森林が分布しているが、1975年から1984年までに174km<sup>2</sup>減少、1984年から1995年までに44km<sup>2</sup>減少し、その変化量は少なくなっているものの1975年の森林の約20%が減少している。流域の上流部には大規模な少植生域が分布している。耕作地については1975年と1995年を比較すると247km<sup>2</sup>の面積増加が示されている。

### 大凌河 B 流域 - 流域面積 2,299km<sup>2</sup>

本流域は大凌河本流の南西側の最上流部に位置する。

山間部には森林が広く分布しており、その分布に大きな変化は見られない。1975年に流域の南側に分布していた大規模な少植生域は1984年ではそのほとんどが耕作地に変化している。

### 大凌河 C 流域 - 流域面積 2,028km<sup>2</sup>

本流域は大凌河本流の白石ダムサイトより上流約100kmに位置する。

山間部には森林が分布しているが、1975年から1984年に81km<sup>2</sup>、1984年から1995年に37km<sup>2</sup>の面積減少を示している。10年スパンでみた場合、80~90km<sup>2</sup>前後と一定量の面積減少が認められ、これは本流域での森林変化量と考えることができる。

大凌河本流の両岸では1975年から1984年、1995年にかけて少植生域から耕作地へ変化した地域が広範囲に認められる。

### 大凌河 D 流域 - 流域面積 848km<sup>2</sup>

本流域は大凌河 C 流域の上流部に位置する。

山頂部の森林は1975年から1995年まで大きな面積変化もなく、その分布域についても明確な変化は認められない。1975年の土地被覆図をみると流域の広範囲にわたり少植生域が分布しており、その大部分の地域が1984年、1995年には耕作地へと変化している。また、少植生域は1975年で550km<sup>2</sup>、1995年で412km<sup>2</sup>と長期的には減少傾向を示すが、1995年で流域の48%を

表 3.5.3.6(a) 流域別土地被覆面積の経年変化(km<sup>2</sup>)

流域		1975年	1984年	1995年
大凌河A	森林	1,061	887	843
	草地	130	366	393
	耕作地	403	846	650
	少植生域	1,316	825	1,047
	裸地	32	36	22
	水域	42	20	26
	市街地	12	15	15
大凌河B	森林	1,147	1,274	1,055
	草地	69	279	355
	耕作地	173	486	326
	少植生域	879	227	524
	裸地	7	5	12
	水域	19	22	22
	市街地	6	7	6
大凌河C	森林	720	639	552
	草地	72	197	272
	耕作地	339	630	505
	少植生域	863	515	656
	裸地	9	30	19
	水域	24	16	23
	市街地	1	1	1
大凌河D	森林	148	147	138
	草地	32	114	122
	耕作地	93	228	151
	少植生域	550	335	412
	裸地	10	19	10
	水域	11	2	10
	市街地	4	5	6
大凌河E	森林	262	245	230
	草地	32	111	190
	耕作地	200	410	294
	少植生域	1,003	740	803
	裸地	63	64	44
	水域	15	4	14
	市街地	0	0	0
大凌河F	森林	171	167	163
	草地	22	58	124
	耕作地	113	322	220
	少植生域	592	343	395
	裸地	7	19	12
	水域	21	17	13
	市街地	1	1	2
大凌河G	森林	475	498	467
	草地	65	224	509
	耕作地	307	849	697
	少植生域	2,106	1,298	1,277
	裸地	48	84	43
	水域	65	104	60
	市街地	31	39	42

表 3.5.3.6(b) 流域別土地被覆面積の経年変化 (km<sup>2</sup>)

流域		1975年	1984年	1995年
忙牛河A	森林	9	8	11
	草地	19	28	70
	耕作地	67	75	215
	少植生域	840	864	753
	裸地	226	186	119
	水域	15	17	8
	市街地	0	0	0
忙牛河B	森林	235	218	175
	草地	77	218	431
	耕作地	294	566	906
	少植生域	1,920	1,524	1,079
	裸地	137	142	75
	水域	39	34	36
	市街地	2	3	3
忙牛河C	森林	106	109	101
	草地	24	42	133
	耕作地	72	141	168
	少植生域	391	288	193
	裸地	16	24	13
	水域	11	16	13
	市街地	0	0	0

占めている。

#### 大凌河E流域 - 流域面積 1,574km<sup>2</sup>

本流域は大凌河支流の老虎山河流域である。

流域の西側および老虎山河下流部の兩岸の山頂部に森林が分布しており、1975年、1984年、1995年ともに大きな面積変化はなく、流域の約15%程度である。本流域では少植生域が流域面積に対して1975年で64%、1984年で47%、1995年で51%と広範囲を占め、荒廃化がかなり進行している流域と考えることができる。

#### 大凌河F流域 - 流域面積 927km<sup>2</sup>

本流域は大凌河本流の朝陽より上流側の流域である。

1975年から1984年まで流域の耕作地面積が約2.8倍と著しく増加している地域である。1984年から1995年にかけては僅かに耕作地面積が減少しているが、休耕地の草地や収穫後の少植生域がそれぞれ草地、少植生域に分類されたためである。

流域の東側には広範囲に少植生域の分布が判読でき、1995年では395km<sup>2</sup>と流域の43%を占めている。

#### 大凌河G流域 - 流域面積 3,095km<sup>2</sup>

本流域は白石ダムサイトから朝陽までの大凌河本流の流域である。

大凌河左岸側の山頂部には森林の分布が見られ、特に、1975年から1995年まで明確な分布域の変化は認められず、流域の15%前後を占める程度である。左岸側の支流では、1975年から1984年にかけて耕作地の増加が判読できる。

大凌河本流の兩岸には少植生域が広く分布しており、1975年から1995年までに僅かに草地、耕作地増加している程度で、荒廃化の進行している地域と判断できる。左岸側の支流では、1975年から1984年にかけて耕作地の増加が判読できる。

#### 忙牛河A流域 - 流域面積 1,176km<sup>2</sup>

本流域は忙牛河の上流部に位置する。

流域には裸地、少植生域が広範囲に分布し、1975年では流域の91%を占めている。経年的にみると、裸地、少植生域は1984年では89%、1995年で74%と減少傾向を示しているが、依然として流域の7割以上が強度の表面侵食を受ける荒廃地となっている。

忙牛河 B 流域 - 流域面積 2,704km<sup>2</sup>

本流域は忙牛河の下流部に位置する。

流域の西側上流部では、全ての時期について裸地、少植生域が広範囲分布し、1995 年では流域の 43%を占めている。その他の地域では河道沿いを中心に少植生域の耕作地化が顕著である。

忙牛河 C 流域 - 流域面積 620km<sup>2</sup>

本流域は忙牛河の下流部に位置する。

流域の少植生域は 1975 年から 1984 年までに 103km<sup>2</sup>、1984 年から 1995 年までに 95km<sup>2</sup>の面積減少を示している。1975 年から 1995 年までの長期スパンでみた場合には、草地が 5.5 倍、耕作地は 2.3 倍と増加傾向を示している。

### 3.5.3.4 1984年の洪水時における土砂堆積域の変化

1984年の洪水を対象として、洪水前の1984年5-6月と洪水後の1984年9月のランドサットHSSを用いて河道の土砂堆積域の変化を調査した。

#### (1) 対象洪水の水文特性

対象とした1984年洪水は20年確率洪水であり、図3.5.3.37に1984年の忙牛河流域の雨量・流量・SS濃度を示す。忙牛河下流部の迷力宮子の降雨状況を見ると、8月9日より降り始めた降雨は、翌日の10日にピークとなり、ピーク時の日雨量は186mmを記録している。これは平常時の3倍前後の降雨であり、義県での年平均545mmの約1/3に相当する。迷力宮子の日平均流量は8月10日に1,300m<sup>3</sup>/secと最大値を示し、同日のSS濃度は67.9kg/m<sup>3</sup>であった。

#### (2) 洪水前後の土砂堆積域の変化

洪水前の1984年5-6月と洪水後の1984年9月の河道の土砂堆積域分布図の差画像を作成し、その変化パターンをモデル化して洪水前後の河道の土砂堆積の変化を調査した。

洪水前後の差画像について土砂堆積分布図の各項目の変化パターンを以下のようにモデル化した。なお、1984年5-6月の土砂堆積域については、反射輝度に明確な差が認められたため砂地と土地(旧堆積域)に再分割した。

1984年5-6月の洪水前	1984年9月の洪水後	洪水前後の変化
土砂堆積域(砂地)	土砂堆積域	継続堆積域
土砂堆積域(土地)	土砂堆積域	再堆積域
土砂堆積域(砂地、土地)	水域	土砂侵食域(氾濫域を含む)
	植生域	植生域
植生域	土砂堆積域	新規土砂堆積域
	植生域	植生域
	水域	土砂侵食域(氾濫域を含む)
水域	土砂堆積域	新規土砂堆積域
	植生域	植生域
	水域	水域

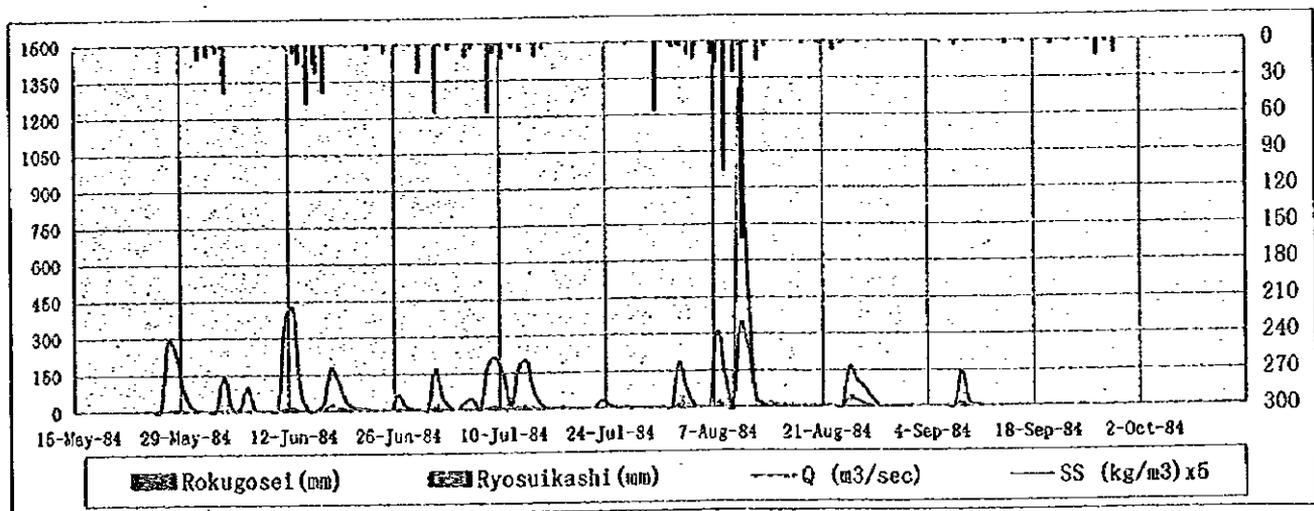
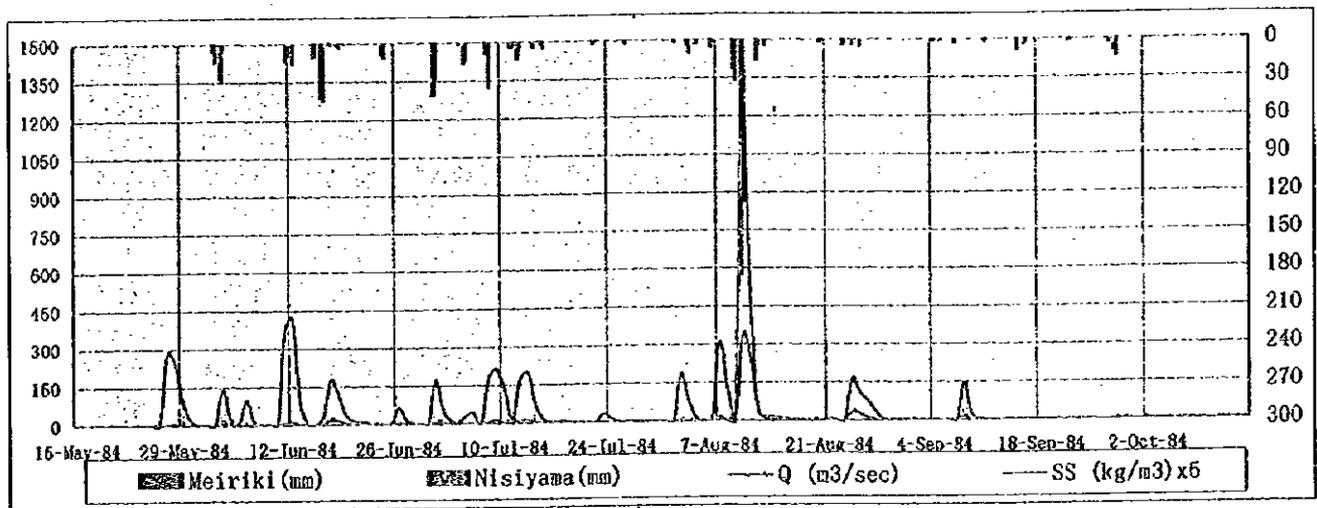
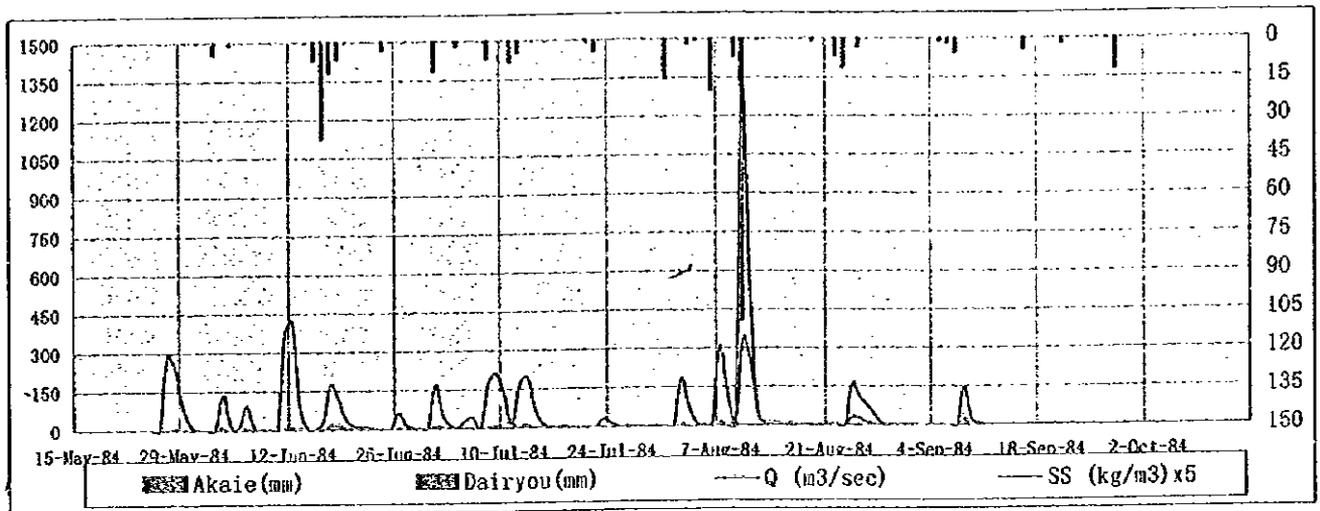


図 3.5.3.37 1984年5月1日~1984年10月15日忙牛川流域の雨量・流量・SS濃度

作成した洪水前後の河道の土砂堆積の変化について全流域の東側を図 3.5.3.38(a)に、西側を図 3.5.3.38(b)に示し、白石ダムサイト付近の洪水前後の河道の土砂堆積の変化を図 3.5.3.39 に示す。また、洪水前後の河道の土砂堆積域面積の変化を流域別に算出したものを表 3.5.3.7 に示し、その面積率変化を表 3.5.3.8 に示す。

洪水前後の前後の河道の土砂堆積域の変化について、その特徴を以下に整理する。

全流域でみると新規・再・継続を含めた土砂堆積域が 298.5km<sup>2</sup> と全河道面積の 55% を占め、土砂侵食域は 70.3km<sup>2</sup> と全河道面積の 13% であった。よって、対象とした 1984 年 8 月の洪水では、土砂堆積域と土砂侵食域を合わせた 368.8km<sup>2</sup> が洪水の影響を受けて土砂侵食、堆積を繰り返した地域であると判断できる。これらの地域は全流域の 68% を占めており、そのうち 23% が新規に土砂が堆積した地域となっている。

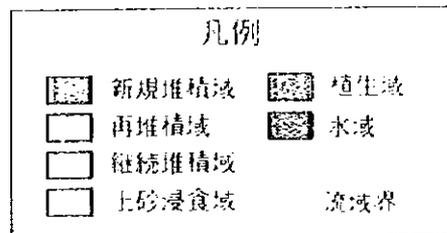
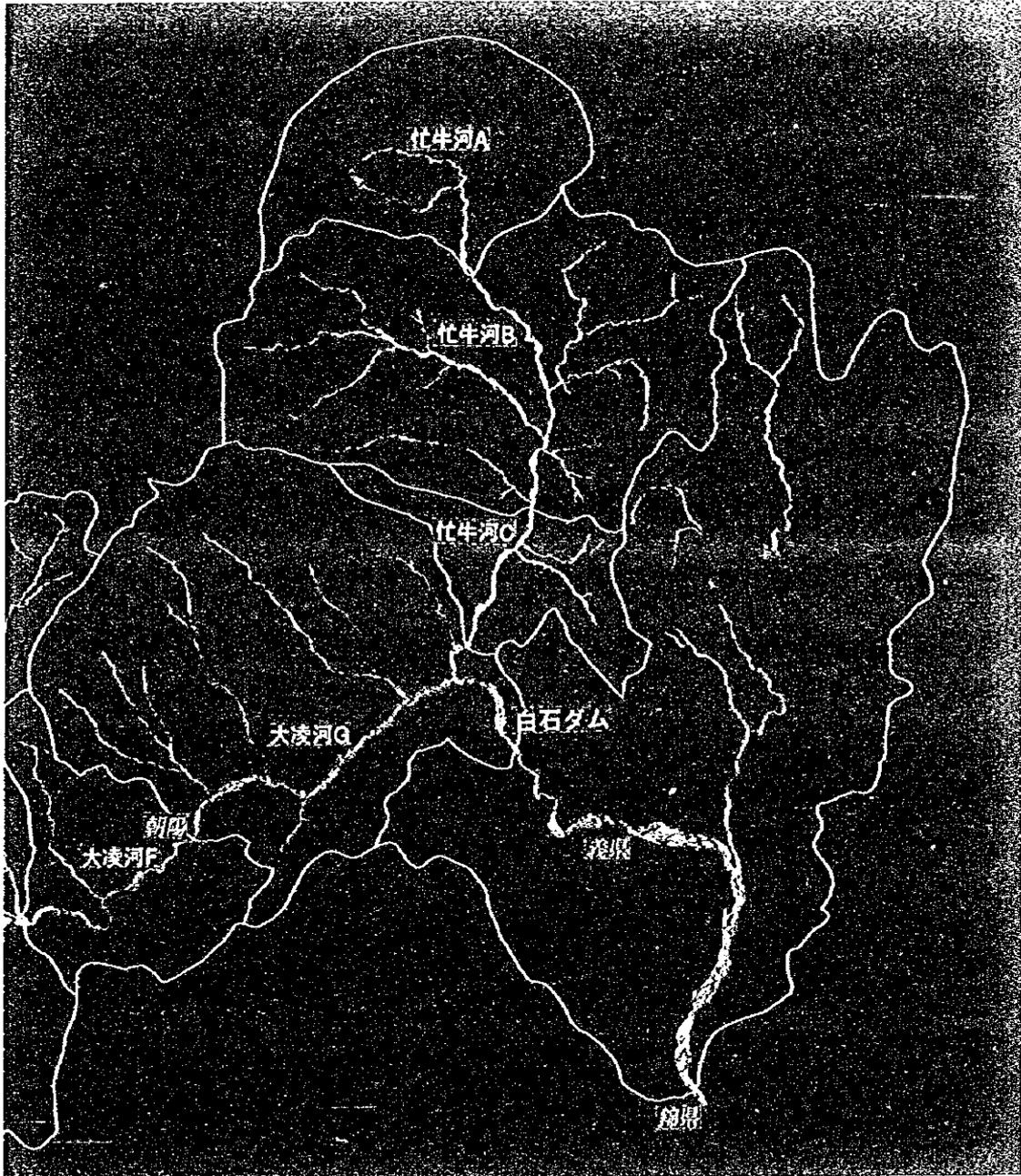
洪水前後の土砂堆積域の変化域についてその分布傾向を判読すると、大凌河 B 流域を除く本流および支流河道の上流部および河道の合流点では、再・継続の土砂堆積域が分布が多く認められる。また、各支流の中流部から下流部にかけて新規土砂堆積域が分布しており、これは河道の河床勾配が遷緩点を越えて緩やかになり、流速の減少とともに堆積作用が卓越したと考えられる。

新規・再・継続を含む土砂堆積域が河道の 7 割以上を占めている流域は、大凌河 E、大凌河 D、忙牛河 B、忙牛河 C の 4 流域であり、荒廃化が進行した流域あるいは土砂堆積の傾向が卓越する流域と判断できる。

大凌河 B 流域については土砂堆積域が 2.3km<sup>2</sup> と対象流域中で最も少ない。1984 年の土地被覆状況をみると森林が流域の 55% を占めており、他の流域と比較して土砂流出が少ない流域と判断できる。

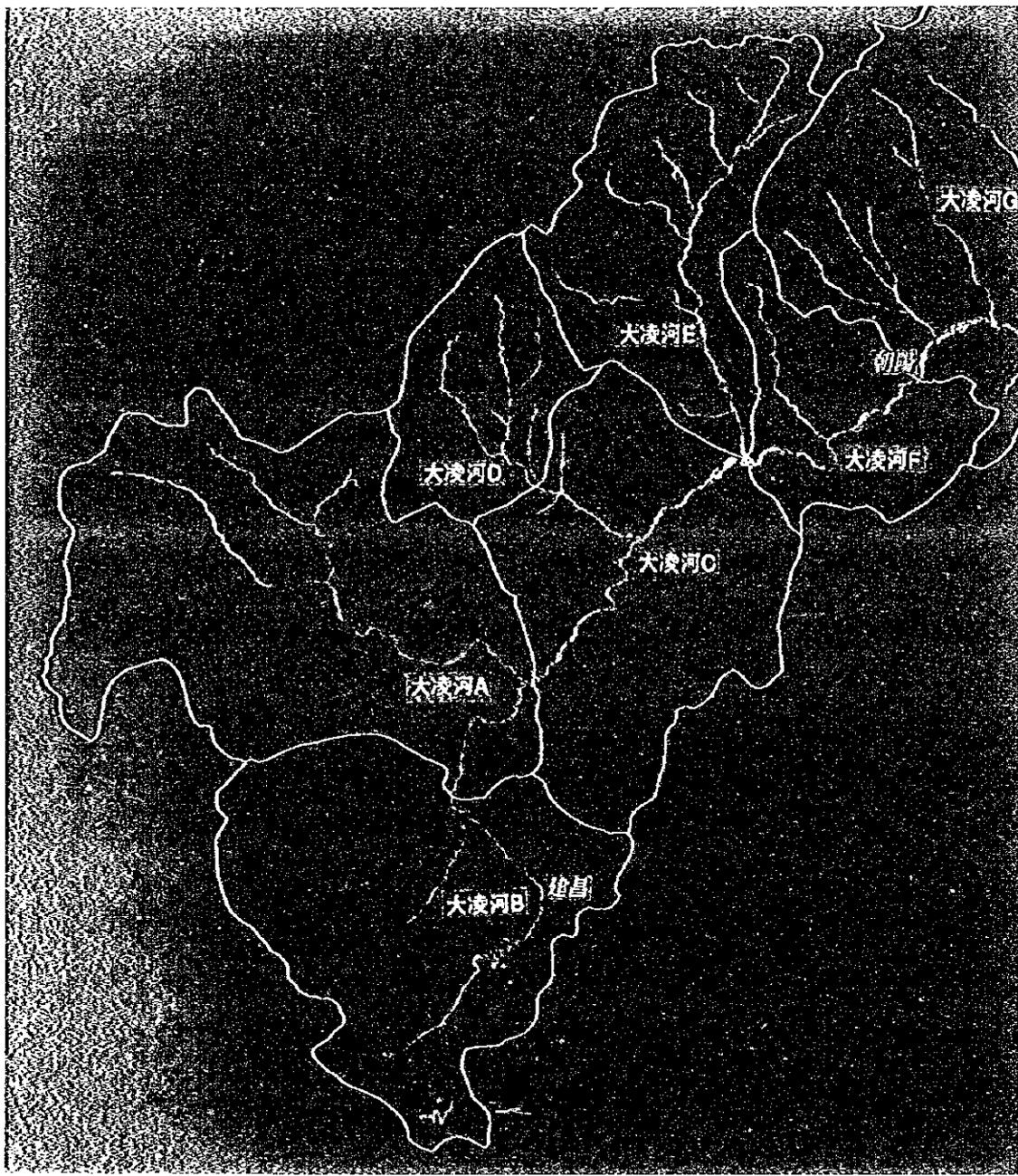
大凌河 G 流域では、新規土砂堆積域が最も多く 43.0km<sup>2</sup> を示している。1984 年の土地被覆をみると大凌河本流の両岸に少植生域が広く分布しているため、表面侵食により流出した土砂が直接河道へと流入し、堆積していると考えられる。また、洪水後に左岸側の各支流の中流域に新規の土砂堆積域が認められる。また、白石ダムサイト付近では図 3.5.3.39 に示すように、洪水による新規堆積域の分布が判読できる。

忙牛河 B 流域では、土砂堆積域が 77.1km<sup>2</sup> と対象流域中で最大を示し、新規堆積域については、忙牛河本流および右岸側支流の中流部から下流部にかけて分布していることが判読できる。



縮尺 1:1,000,000

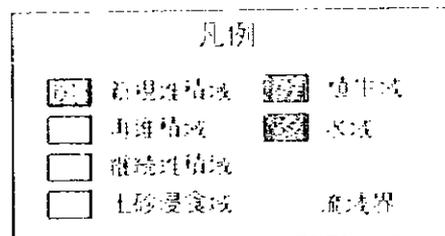
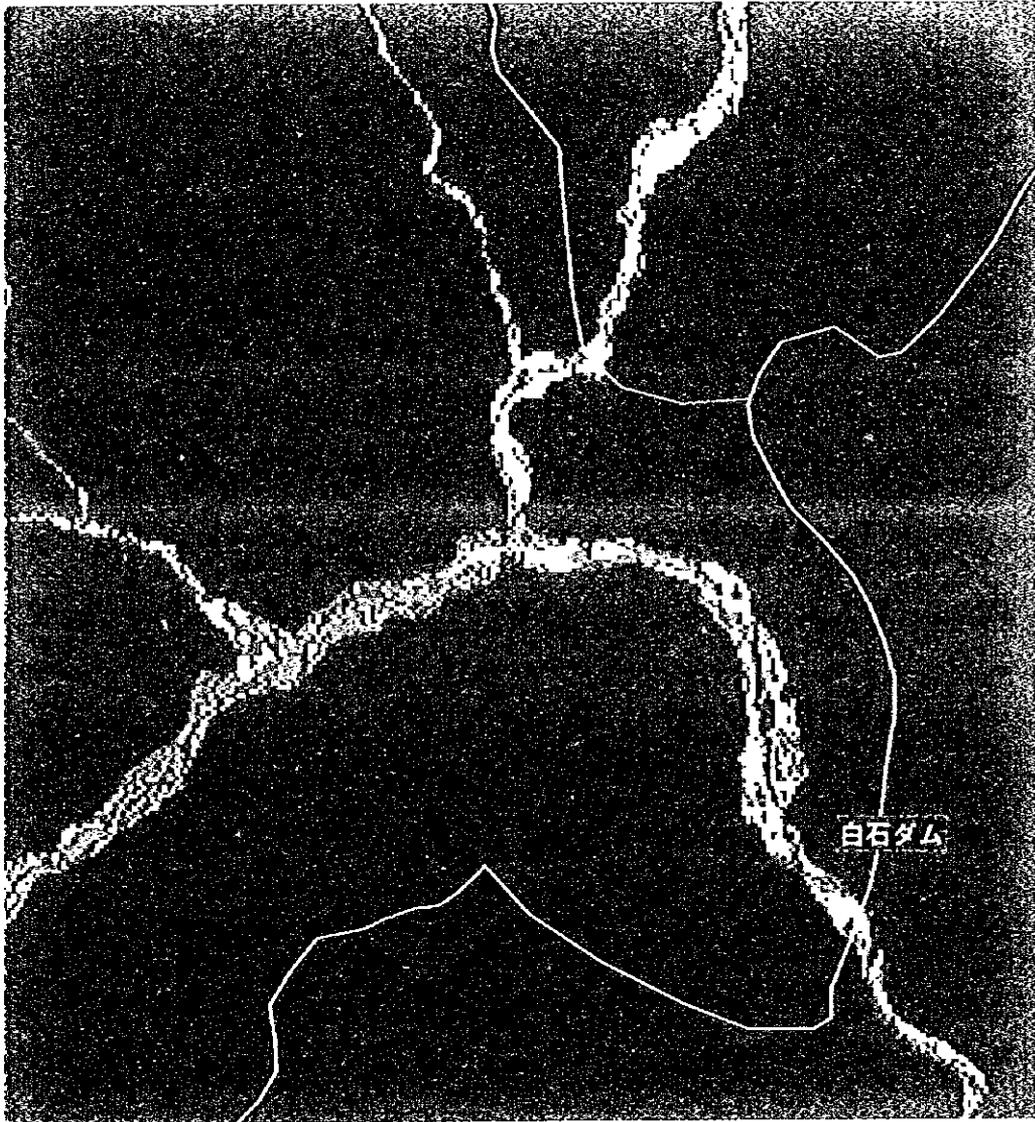
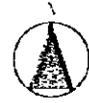
図3.5.3.38(a) 1984年の洪水前後の河道の上砂堆積域の変化（東側流域）



凡例	
	新規堆積域
	植生域
	再堆積域
	水域
	継続堆積域
	土砂浸食域
	流域界

縮尺 1:1,000,000

図 3.5.3 (3) 1984 年の洪水前後の河道の上砂堆積域の変化 — 西側流域



縮尺 1:200,000

図 3.5.3.39 1984 年の洪水前後の河道の土砂堆積域の変化 (白石ダムより)

表3.5.3.7 1984年8月洪水前後の土砂堆積域変化 (km<sup>2</sup>)

流域	土砂堆積域				土砂浸食域	植生域	水域
	新規堆積域	再堆積域	継続堆積域	合計			
大凌河A	6.3	0.8	11.3	18.4	5.7	35.9	4.4
大凌河B	2.0	0.0	0.2	2.3	9.7	13.6	6.0
大凌河C	10.4	1.2	9.4	21.0	7.3	16.7	2.5
大凌河D	5.5	1.5	7.7	14.7	0.4	5.4	0.1
大凌河E	15.9	10.2	17.0	43.1	0.7	13.5	0.3
大凌河F	8.4	1.7	6.7	16.8	4.8	11.9	2.7
大凌河G	43.0	9.5	21.5	74.1	15.2	23.6	17.3
忙牛河A	2.4	0.4	7.0	9.7	4.9	4.9	1.4
忙牛河B	25.0	16.1	36.1	77.1	16.2	11.6	3.3
忙牛河C	5.5	5.3	10.7	21.4	5.5	2.4	1.3

表3.5.3.8 1984年8月洪水前後の土砂堆積域面積率変化 (%)

流域	土砂堆積域				土砂浸食域	植生域	水域
	新規堆積域	再堆積域	継続堆積域	合計			
大凌河A	10%	1%	17%	29%	9%	56%	7%
大凌河B	6%	0%	1%	7%	31%	43%	19%
大凌河C	22%	2%	20%	44%	15%	35%	5%
大凌河D	27%	7%	37%	71%	2%	26%	1%
大凌河E	28%	18%	29%	75%	1%	23%	1%
大凌河F	23%	5%	19%	46%	13%	33%	8%
大凌河G	33%	7%	17%	57%	12%	18%	13%
忙牛河A	11%	2%	33%	46%	23%	23%	7%
忙牛河B	23%	15%	33%	71%	15%	11%	3%
忙牛河C	18%	17%	35%	70%	18%	8%	4%

### 3.5.3.5 土地被覆と浮遊砂量との関係

対象流域の土砂生産過程において、土地被覆状況はその支配的な素因となる。ここでは、中国側から資料の提供があった以下の水文観測所の浮遊砂量と、リモートセンシングから得られた各観測所上流域の土地被覆状況との関連を整理した。

- ・上窩堡（上流域は図3.5.1.1における大凌河A、B流域を含む）
- ・徳立吉（上流域は大凌河E流域）
- ・朝陽（上流域は大凌河A、B、C、D、E、F流域を含む）
- ・迷力営子（上流域は忙牛河A、B、C流域を含む）
- ・大凌河（上流域は大凌河A、B、C、D、E、F、G流域、忙牛河A、B、C流域を含む）

#### (1) 土地被覆とその経年変化

各水文観測所上流域の土地被覆面積の経年変化を表3.5.3.9に示す。

上窩堡上流域では森林が約40%占めており、これは大凌河流域全体の森林面積の約50%に相当する。強度の表面侵食を受ける土地被覆項目は裸地、少植生域、5~6月時点の耕作地が考えられ、徳立吉上流域および迷力営子上流域にそれらの分布が顕著である。

また、土地被覆の経年変化において際立った特徴は少植生域の耕作地化である。

#### (2) 土地被覆と浮遊砂量との関連

各水文観測所上流域における年雨量および年流量を整理し、年間の流出係数を算出した。これらを表3.5.3.10に示す。流出係数の経年変化をみると雨量によりばらつきがあるものの、各流域ともにやや減少する傾向が認められる。この理由として、次の2つが考えられる。

- ・各流域内の少植生域の耕作地化によって表面流出がある程度抑制され、流出係数が減少している。
- ・流量の成分の時系列解析によると1970年に最大となり、その後1985年頃にかけて減少し続けるとの傾向が得られており、長期的なスパンでみると渇水期にあたるため、流出係数が減少している。

次に、各水文観測所上流域における浮遊砂量・生産土砂係数を表3.5.3.11に示す。表に示している浮遊砂量と雨量の比は、各流域内での勾配因子、土壌因子を一定と考えた場合の土地被覆因子の影響度を示すものである。

流域別にみると、徳立吉上流域と迷力営子上流域の土砂生産係数が大きく、最も小さいのは上窩堡上流域である。また、いずれの流域も洪水発生年の生産土砂係数が高い傾向を示している。

徳立吉の1969年と1984年洪水時の浮遊砂量と雨量の比を比較した場合、1969年の洪水規模が大きいかかわらず、1984年のほうが1.16%と大きくなっている。これは、少植生域の耕作地化の影響、

あるいは、1984年の前4年間の降水量が少ないことから、通常降雨で河床などに堆積していた土砂が洪水により流出したことが考えられる。

### (3) 土地被覆と侵食深

中国側から得られた各水文観測所上流域における土砂生産係数、すなわち、1平方メートル当たりの土砂の生産量を用いて、流域ごとの侵食深を算出した。土砂生産係数・侵食深を表3.5.3.12に、土砂生産係数の変化状況を図3.5.3.40に示す。ここでの浮遊砂の乾燥密度は1.3g/cm<sup>3</sup>と設定した。

侵食深を流域間で比較すると、徳立吉が大きく、次いで迷力営子、朝陽、大凌河となり、最も小さいのは上窩堡であり、表面侵食を受ける裸地、少植生域、耕作地の分布の多い順となり各流域の土地荒廃状況（土地被覆の構成状況）とほぼ一致している。

また、図3.5.3.40に示すように、土砂生産係数の変化状況は洪水発生時にそのピークが現れる特徴を示している。土砂生産係数の経年的な変化に規則性は認められず、各年の雨量状況によって変動する傾向が判読できる。

各流域内の侵食深を算出したが、今後さらに土地被覆ごとの侵食深を明らかにすることで、緑化や荒廃化といった土地被覆変化状況に応じた土砂生産状況を把握することが可能となるであろう。

表 3.5.3.9 大凌河流域の土地被覆の経年変化 (km<sup>2</sup>)

		1975年		1984年	
		面積 (km <sup>2</sup> )	割合 (%)	面積 (km <sup>2</sup> )	割合 (%)
上窩堡	森林	2,208	42%	2,161	41%
	草地	199	4%	645	12%
	耕作地	576	11%	1,332	25%
	少植生域	2,195	41%	1,052	20%
	裸地	39	1%	41	1%
	水域	61	1%	42	1%
	市街地	18	0%	23	0%
徳立吉	森林	262	17%	245	16%
	草地	32	2%	111	7%
	耕作地	200	13%	410	26%
	少植生域	1,003	64%	740	47%
	裸地	63	4%	64	4%
	水域	15	1%	4	0%
	市街地	0	0%	0	0%
朝陽	森林	3,509	33%	3,359	31%
	草地	357	3%	1,125	11%
	耕作地	1,322	12%	2,922	27%
	少植生域	5,203	49%	2,984	28%
	裸地	129	1%	173	2%
	水域	132	1%	81	1%
	市街地	23	0%	29	0%
迷力營子	森林	350	8%	335	7%
	草地	119	3%	288	6%
	耕作地	433	10%	783	17%
	少植生域	3,151	70%	2,675	59%
	裸地	380	8%	352	8%
	水域	66	1%	66	1%
	市街地	2	0%	3	0%
大凌河	森林	4,334	24%	4,192	23%
	草地	541	3%	1,638	9%
	耕作地	2,061	11%	4,554	25%
	少植生域	10,461	57%	6,958	38%
	裸地	556	3%	609	3%
	水域	263	1%	251	1%
	市街地	56	0%	71	0%

表3.5.3.10 大凌河流域の雨量・流量

	雨量 (mil. m <sup>3</sup> /year)		流量 (mil. m <sup>3</sup> /year)		流出係数 (%)				備考							
	上高堡	徳立吉	朝陽	迷力營子	大凌河	上高堡	徳立吉	朝陽		迷力營子	大凌河					
1968	1,696	385	3,342	1,389	5,468	180	71	358	180	723	13%	13%				
1969	3,055	814	5,978	2,256	10,127	887	120	1,364	492	2,467	29%	23%	24%	Flood 1969		
1970	2,314	607	4,372	1,422	7,105	466	92	811	283	1,314	20%	15%	19%	20%	18%	
1971	1,756	386	3,210	1,124	5,112	299	69	529	230	930	17%	18%	16%	20%	18%	
1972	1,672	478	3,358	1,328	5,581	228	93	454	173	718	14%	19%	14%	13%	13%	
1973	2,166	600	4,017	1,840	7,137	256	96	475	239	794	12%	16%	12%	13%	11%	
1974	2,269	620	4,347	1,611	7,475	401	89	637	228	1,131	18%	14%	15%	14%	15%	
1975	2,474	568	4,322	1,296	6,677	486	94	668	176	1,117	20%	17%	15%	14%	17%	
1976	2,331	610	4,334	1,381	6,736	462	80	688	145	1,044	20%	13%	16%	11%	15%	
1977	2,914	778	5,441	1,628	8,471	1,111	103	1,411	254	2,136	38%	13%	26%	16%	25%	
1978	2,281	695	4,525	1,830	7,682	522	105	730	169	1,218	23%	15%	16%	9%	16%	
1979	2,434	692	4,431	1,963	7,887	520	116	795	337	1,619	21%	17%	18%	17%	21%	
1980	1,467	364	2,707	987	4,257	197	94	367	154	715	13%	26%	14%	16%	17%	
1981	1,175	286	2,472	959	4,060	70	66	178	75	314	6%	23%	7%	8%	8%	
1982	1,315	376	2,460	758	3,724	64	63	170	45	265	5%	17%	7%	6%	7%	
1983	1,528	514	3,025	1,073	4,911	96	70	229	76	392	6%	14%	8%	7%	8%	
1984	2,368	607	4,613	1,715	7,850	359	116	637	216	1,117	15%	19%	14%	13%	14%	Flood 1984
1985	1,703	662	3,611	1,766	6,579	213	74	433	188	810	13%	11%	12%	11%	12%	

mil. = 10<sup>6</sup>

表3.5.3.11 大凌河流域の浮遊砂量・土砂生産係数

	浮遊砂量 (mil. t/year)		土砂生産係数 (t/km <sup>2</sup> /year)		浮遊砂量/雨量(%)		備考									
	上窩堡	朝陽	上窩堡	朝陽	上窩堡	朝陽										
1968	0.46	1.17	3.41	5.96	12.85	86	745	319	1,324	703	0.03%	0.30%	0.10%	0.43%	0.24%	
1969	4.67	6.62	17.48	16.53	47.62	882	4,213	1,638	3,673	2,607	0.15%	0.81%	0.29%	0.73%	0.47%	Flood 1969
1970	2.70	2.06	6.31	6.22	16.75	509	1,309	591	1,382	917	0.12%	0.34%	0.14%	0.44%	0.24%	
1971	0.90	1.00	2.55	8.61	12.27	170	632	239	1,913	672	0.05%	0.26%	0.08%	0.77%	0.24%	
1972	2.03	4.94	9.29	5.63	5.62	383	3,140	871	1,251	308	0.12%	1.03%	0.28%	0.42%	0.10%	
1973	0.13	3.03	4.70	6.51	5.56	25	1,928	441	1,447	304	0.01%	0.51%	0.12%	0.35%	0.08%	
1974	0.48	2.05	3.71	3.97	12.59	90	1,305	348	882	689	0.02%	0.33%	0.09%	0.25%	0.17%	
1975	1.90	3.71	7.99	3.36	16.78	358	2,355	748	858	919	0.08%	0.65%	0.18%	0.30%	0.25%	
1976	1.15	1.16	3.78	2.23	7.39	217	738	354	496	405	0.05%	0.19%	0.09%	0.16%	0.11%	
1977	2.95	2.29	8.21	5.40	19.06	557	1,455	769	1,200	1,043	0.10%	0.29%	0.15%	0.33%	0.23%	
1978	0.73	2.03	2.63	2.00	6.12	137	1,289	246	444	335	0.03%	0.29%	0.06%	0.11%	0.08%	
1979	0.66	1.66	3.39	7.33	13.88	125	1,057	317	1,629	760	0.03%	0.24%	0.08%	0.37%	0.18%	
1980	0.28	1.37	2.08	6.39	6.57	53	871	195	1,420	360	0.02%	0.38%	0.08%	0.65%	0.15%	
1981	0.18	0.79	2.16	1.70	4.26	34	501	203	378	233	0.02%	0.28%	0.09%	0.18%	0.10%	
1982	0.65	1.45	3.51	0.85	4.28	123	919	329	189	234	0.05%	0.39%	0.14%	0.11%	0.11%	
1983	0.39	2.85	6.14	3.48	7.89	167	1,811	575	773	432	0.06%	0.55%	0.20%	0.32%	0.16%	
1984	4.36	7.07	16.41	10.45	24.03	823	4,490	1,538	2,322	1,316	0.18%	1.16%	0.36%	0.61%	0.31%	Flood 1984
1985	0.74	2.63	5.71	6.92	11.38	140	1,671	535	1,538	623	0.04%	0.40%	0.16%	0.39%	0.17%	

mil. = 10<sup>6</sup>

表3.5.3.12 大凌河流域の土砂生産係数と侵食深

	土砂生産係数 (t/km <sup>2</sup> /year)					侵食深 (mm/year)				
	上窩堡	徳立吉	朝陽	迷力營子	大凌河	上窩堡	徳立吉	朝陽	迷力營子	大凌河
1968	86	745	319	1,324	703	0.07	0.57	0.25	1.02	0.54
1969	882	4,213	1,638	3,673	2,607	0.68	3.24	1.26	2.83	2.01
1970	509	1,309	591	1,382	917	0.39	1.01	0.45	1.06	0.71
1971	170	632	239	1,913	672	0.13	0.49	0.18	1.47	0.52
1972	383	3,140	871	1,251	308	0.29	2.42	0.67	0.96	0.24
1973	25	1,928	441	1,447	304	0.02	1.48	0.34	1.11	0.23
1974	90	1,305	348	882	689	0.07	1.00	0.27	0.68	0.53
1975	358	2,355	748	858	919	0.28	1.81	0.58	0.66	0.71
1976	217	738	354	496	405	0.17	0.57	0.27	0.38	0.31
1977	557	1,455	769	1,200	1,043	0.43	1.12	0.59	0.92	0.80
1978	137	1,289	246	444	335	0.11	0.99	0.19	0.34	0.26
1979	125	1,057	317	1,629	760	0.10	0.81	0.24	1.25	0.58
1980	53	871	195	1,420	360	0.04	0.67	0.15	1.09	0.28
1981	34	501	203	378	233	0.03	0.39	0.16	0.29	0.18
1982	123	919	329	189	234	0.09	0.71	0.25	0.15	0.18
1983	167	1,811	575	773	432	0.13	1.39	0.44	0.59	0.33
1984	823	4,490	1,538	2,322	1,316	0.63	3.45	1.18	1.79	1.01
1985	140	1,671	535	1,538	623	0.11	1.29	0.41	1.18	0.48

注)浮遊砂の乾燥密度 1.3 g/cm<sup>3</sup>

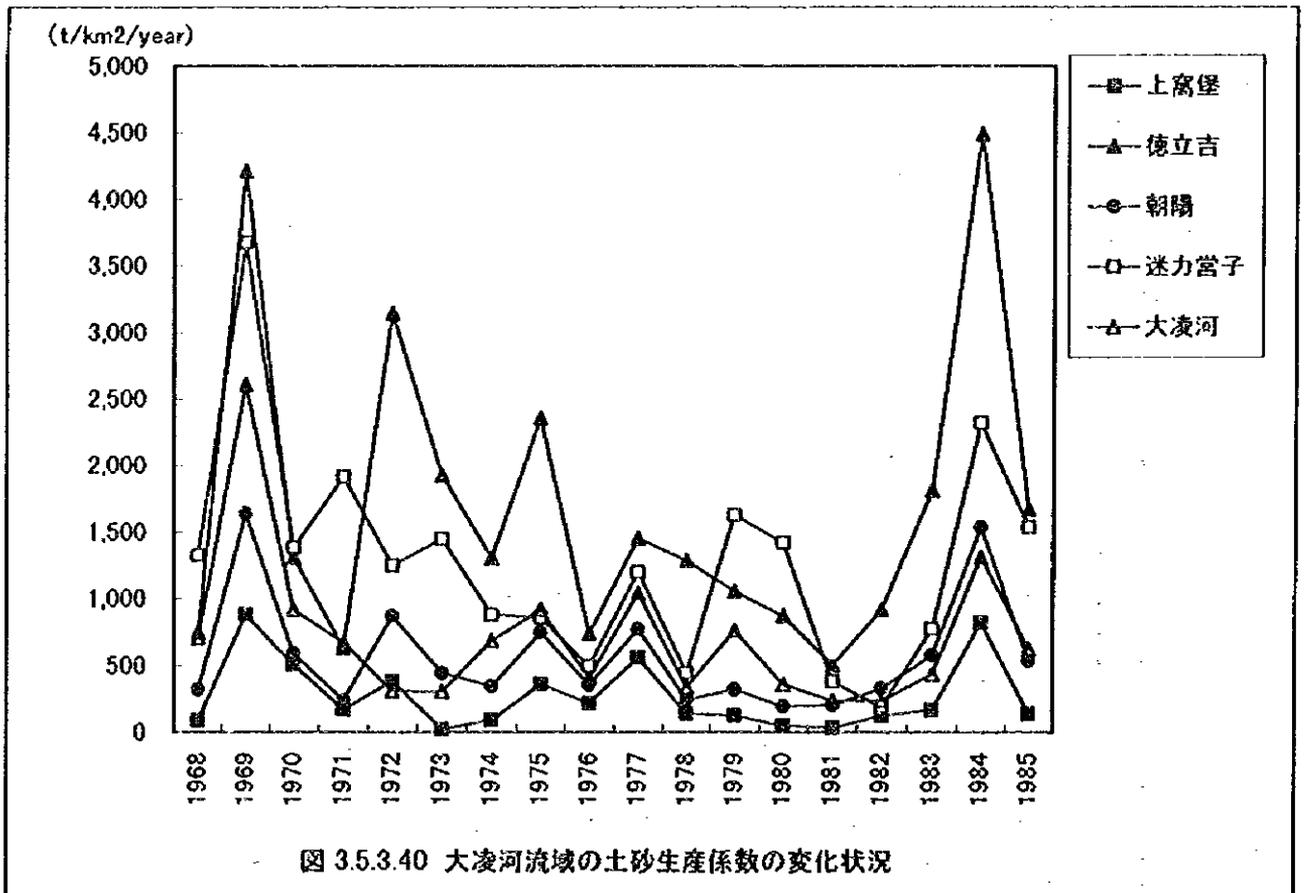


図 3.5.3.40 大凌河流域の土砂生産係数の変化状況

### 3.5.4 ゲートオペレーションによる排砂効果の評価

#### 3.5.4.1 目的

白石ダムでは堆砂対策として、次の方法が考えられている。

- A 貯水池の水位を維持したまま、ダム底部に設置した排砂施設（底孔）から密度流の原理を利用して土砂を通過させる。
- B 大規模の洪水が発生した時は、貯水位を死水位まで下げて、洪水の掃流力により堆積土砂を洗掘し、貯水池容量を回復させる。

従って、本解析は以下のことを目的とする。

- 1) Aについては、準3次元拡散モデル、Bについては二次元泥流モデルを用い、貯水池内での浮遊砂の挙動をシミュレートし、底孔からの排砂量を算定する。
- 2) Aについては、排砂効果の高い底孔のゲートオペレーションを検討する。

#### 3.5.4.2 底孔のゲートオペレーションによる排砂（貯水位を維持した場合）

貯水位を維持した場合のゲート操作による底孔からの浮遊砂排出量を算定するためには、貯水池内に流入した土砂が移流、拡散、沈降、あるいは流れの乱れにより底面から巻き上がり、ダム堤体に至るまでの挙動を解明し、土砂の濃度分布の時系列を求める必要がある。白石ダムに流入する土砂は中央粒径  $d_{50} = 0.02 \text{ mm}$  と微細であること、白石ダム貯水池は大凌河と忙牛河の合流地点にあり流れは地形の影響を受け易いことから、準3次元の拡散シミュレーションモデルを用いて解析する。

ダム貯水池に流入する土砂の約50%は、洪水時に集中する。したがって、洪水時にできるだけ多くの浮遊砂を排出することが必要である。ここでは中国側から提供された5洪水実測時間時系列データ(図3.5.4.1)のうち、1962年(1/50確率洪水)、1969年(1/20確率洪水)、1984年(1/10-1/20確率洪水)の解析結果を示す。

本解析では、まず、1)250m、125m 不等間隔格子モデルを用い、洪水時の浮遊砂の貯水池内の挙動をより詳細に再現し、考察した。次に、500m、250m 不等間隔格子のモデルを用い、排砂効果の高い放流ルールを検討した。

##### (1) 準3次元拡散シミュレーションモデル

準3次元拡散シミュレーションモデルは貯水池表面を通しての熱収支、水温及び濁度の密度変化、貯水池内の流動および土砂の拡散、沈降および底面からの巻き上げの解析機能を有するものである。また、このモデルはいわゆるマルチレベルモデルである。なお、底面からの土砂の巻き上げは芦田・道

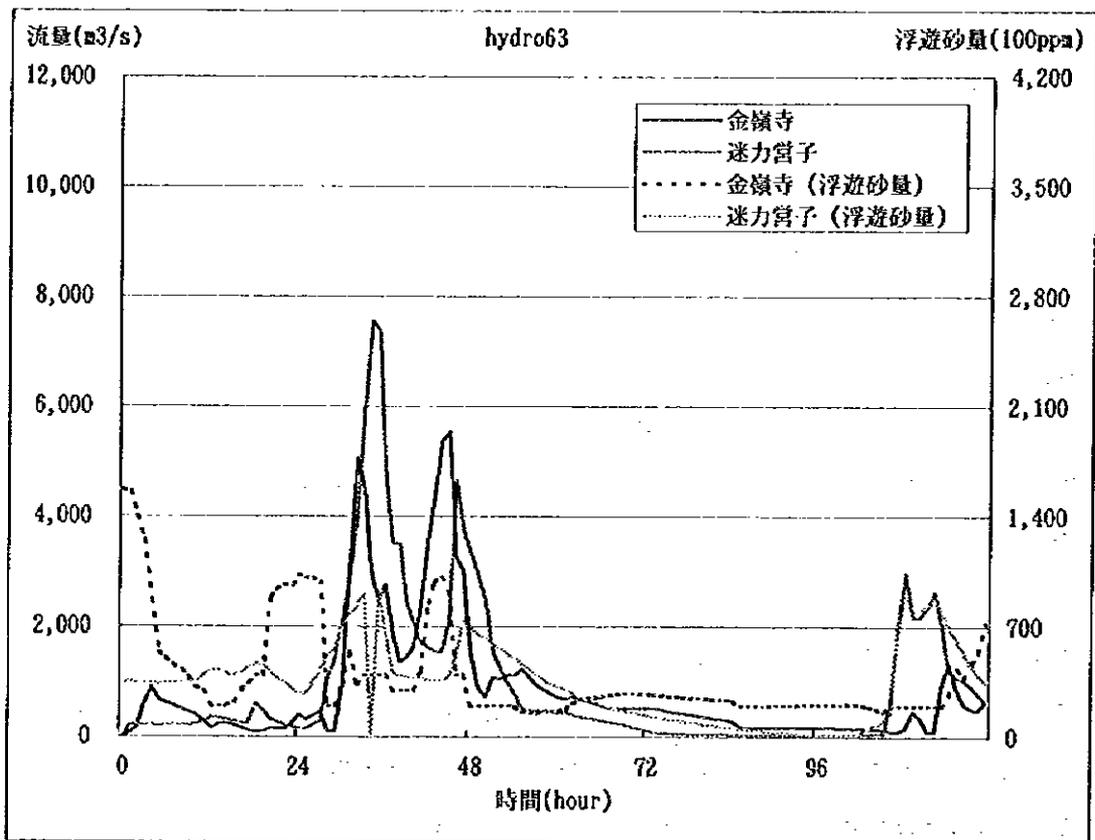
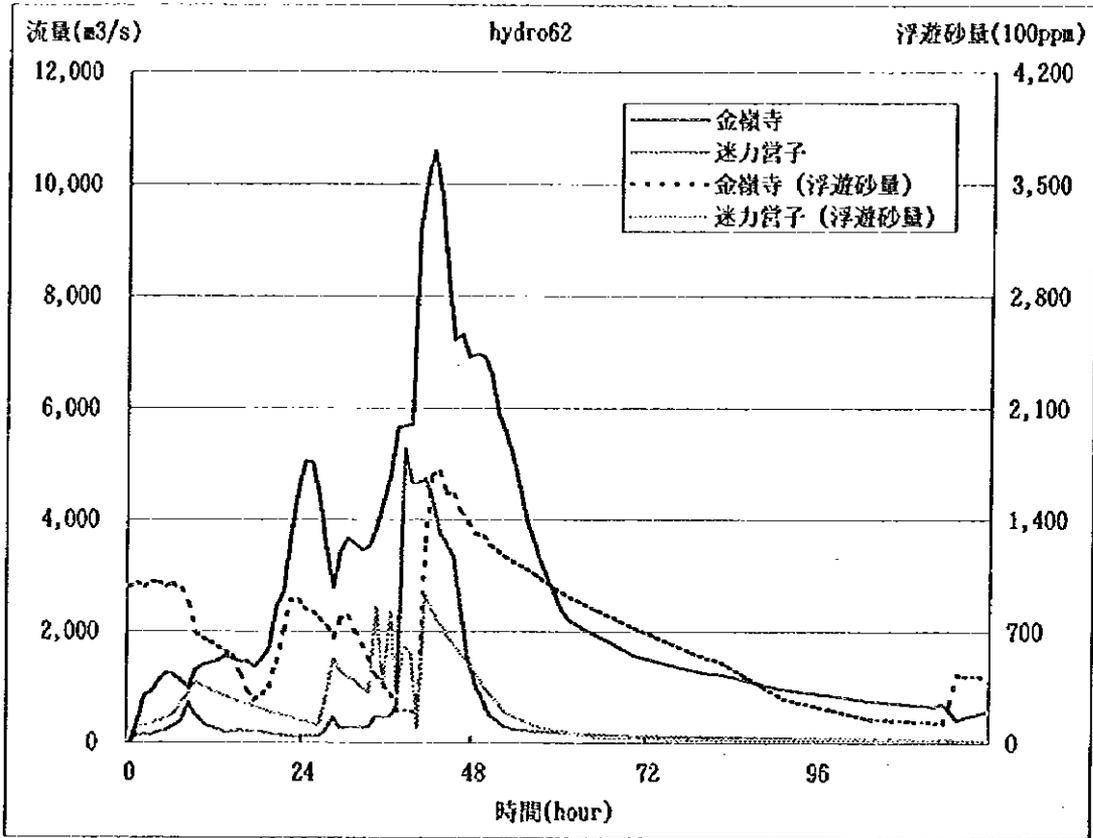


図 3.5.4.1 洪水時実測流量 浮遊砂濃度(1/3)

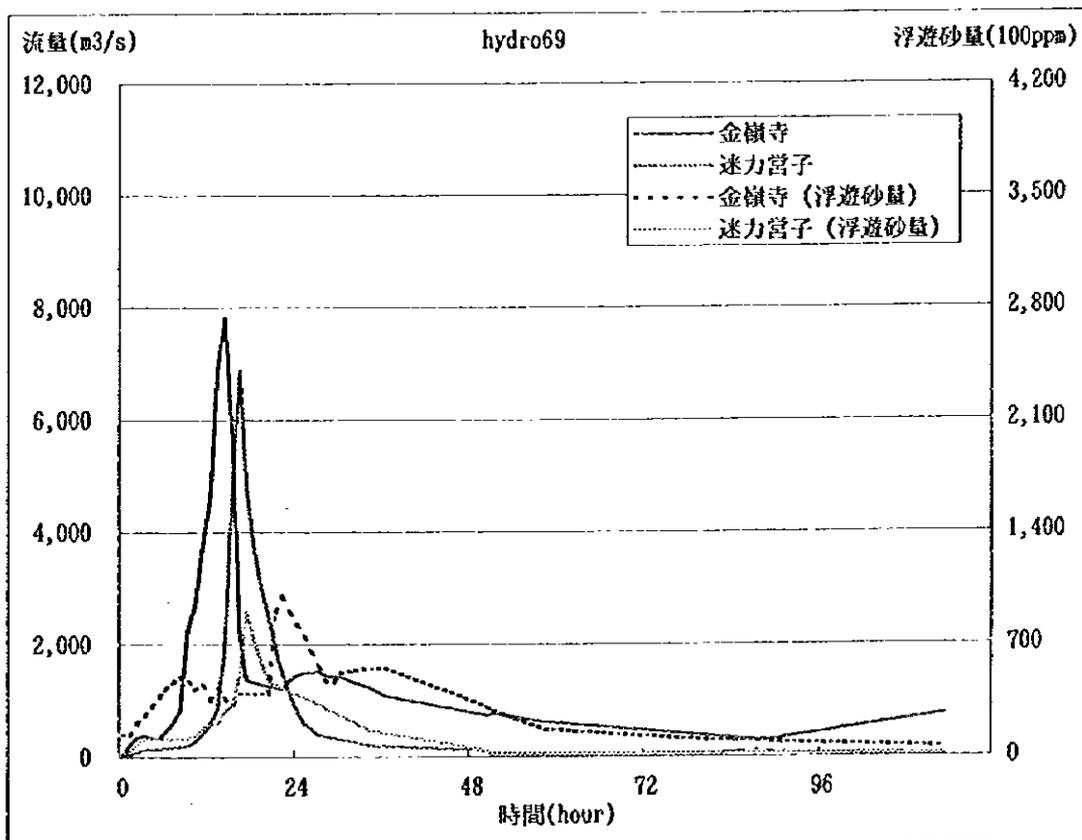
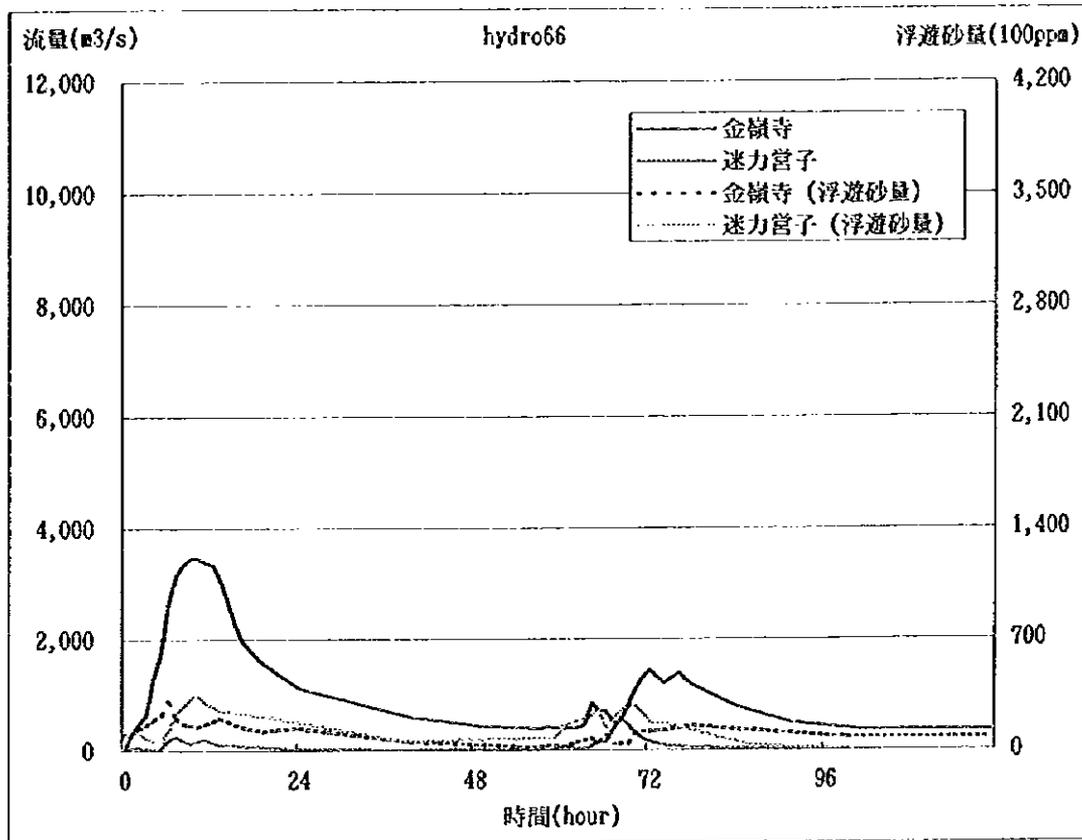


図 3.5.4.1 洪水時実測流量 浮遊砂濃度(2/3)

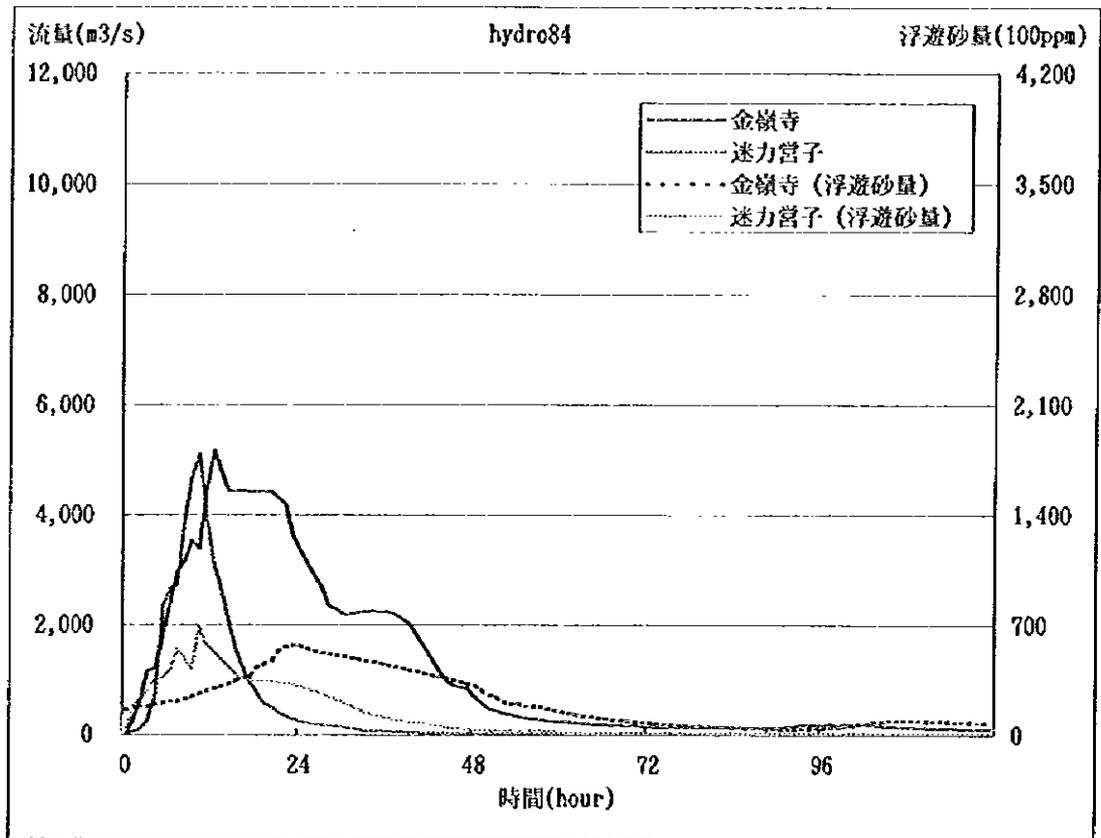


圖 3.5.4.1 洪水時實測流量 浮遊砂濃度(3/3)

上の式より求める。

### 流動及び拡散の基礎式

対象とする流れでは、水平方向の流れが卓越する。鉛直方向の加速度や粘性項に比べて、重力加速度および圧力項が卓越するとして、静水圧力分布の仮定を用いている。従って、流動の連続式、運動方程式は以下の各式で表される。

流れに対する基本式は、非圧縮性の連続式および水平方向の運動方程式をもちいる。

連続式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

運動方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} \\ & = fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} \\ & = -fu - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g$$

浮遊土砂の収支に対しては、以下の移流拡散方程式を用いる。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(Cu)}{\partial x} + \frac{\partial(Cv)}{\partial y} + \frac{\partial(Cw)}{\partial z} \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) - w_s \frac{\partial C}{\partial z} \end{aligned}$$

水温収支にたいしては、以下の移流拡散方程式を用いる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(Tu)}{\partial x} + \frac{\partial(Tv)}{\partial y} + \frac{\partial(Tw)}{\partial z}$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} (E_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (E_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (E_z \frac{\partial T}{\partial z})$$

ここに、 $x, y, z$ は直交座標系の座標、 $u, v, w$ は $x, y, z$ 方向の流速、 $P$ は圧力、 $f$ はコリオリ係数、 $g$ は重力加速度、 $C$ は濃度、 $D_x, D_y, D_z, E_x, E_y, E_z$ は $x, y, z$ 方向の拡散係数、 $\tau$ は摩擦応力、 $\rho$ は濁水の密度、 $w_s$ は土砂の沈降速度を示す。

### 濁水の密度変化

密度  $\rho$  に関しては、土砂濃度  $C$  と温度  $T$  との関数として、次のような状態方程式をもちいる。

$$\rho = \rho_w [1 + C \times 10^{-6} (\frac{1}{\rho_w} - \frac{1}{\rho_s})]$$

ここに、

$$\rho_w = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + a_4 T^4 + a_5 T^5$$

$$a_0 = 9.99842594 \quad a_1 = 6.793952 \times 10^{-4} \quad a_2 = -9.095290 \times 10^{-4}$$

$$a_3 = 1.001685 \times 10^{-4} \quad a_4 = -1.120083 \times 10^{-4} \quad a_5 = 6.536332 \times 10^{-11}$$

ここに、 $T$ : 水温

$\rho_w$ : 水の密度、 $g/cm^3$

$\rho_s$ : 土粒子の比重 =  $2.65 g/cm^3$

$C$ : 土砂濃度、ppm

### 日射による輻射熱

日射による輻射熱  $\phi_0$  は水面の反射によって  $\phi_r$  となって貯水池内に伝達されていくが、このうち半分程度が表面で吸収され、残りが指数関数的に減衰しながら深部に到達する。

$$\phi_r = (1 - \alpha_s) \phi_0$$

$$\phi_b = (1 - \beta) \phi_r \exp\{-\eta(y_s - y)\}$$

ここに、 $a_r$ : 水面反射率=0.06

$\phi_y$ : 標高  $y$  に到達する輻射熱、kcal/m<sup>2</sup>/day

$\beta$ : 水面吸収率=0.5

$\eta$ : 減衰係数=0.3

$\phi_s$ : 日射量、kcal/m<sup>2</sup>/day

$\phi_r$ : 水面反射を差し引いた日射量、kcal/m<sup>2</sup>/day

日射量は、以下の式を用いる。

Fritz and MacDonald の式

$$\phi_s = (0.35 + 0.61 \frac{n}{N}) \phi_{s_0}$$

ここに、 $n$ : 日照時間 (hours/day)

$N$ : 最大日照時間 (hours/day)

$\phi_s$ : 日射量 (kcal/m<sup>2</sup>/day)

$\phi_{s_0}$ : 晴天時の日射量 (kcal/m<sup>2</sup>/day)

表 3.5.4.1 6月、7月、8月の日射量

	単位	6月	7月	8月
可能最大日照時間 $N$	hours/day	15.1	14.8	13.8
実測月平均日照時間 /1	hours/day	254.4	231.7	246.7
実測日平均日照時間 $n$	hours/day	8.5	7.5	8.0
晴天時の日射量	kcal/m <sup>2</sup> /day	8,000	7,560	6,690
$n/N$		0.65	0.51	0.58
日射量 $\phi_s$	kcal/m <sup>2</sup> /day	5,227	4,998	4,708

/1 義県気象観測所の多年平均

#### 水面からの熱損失

大気と熱の授受の影響範囲は日射を除いては表層のごく薄い層に限られる。したがって、大気輻射、放射及び蒸発については表層のみについて考慮すれば良い。

水面からの熱損失は、次式で与えられる。

$$\phi_L = \phi_e + \phi_c + \phi_{ra}$$

ここに、 $\phi_{L_1}$ : 貯水池表面からの熱損失

$\phi_v$ : 蒸発による熱損失

$\phi_c$ : 伝導による熱損失

$\phi_{net} = \phi_{out} - \phi_{in}$ : 有効放射

$\phi_a$ : 大気放射

$\phi_{ra}$ : 逆放射

各熱損失には実験、実測に基づく種々の公式が提案されているが、ここでは次の式を使用する。

Roher の式

$$\phi_v + \phi_c = (0.000308 + 0.000185W)\rho(e_s - \varphi e_a) \times \left\{ L_v + CT_s + \frac{269.1(T_s - T_a)}{(e_s - \varphi e_a)} \right\}$$

ここに、W: 風速 (水面上 15cm) , m/sec =2.0m/s

$e_s$ : 表面水温に相当する飽和蒸気圧、mmHg

$e_a$ : 気温に相当する飽和蒸気圧、mmHg

$\varphi$ : 相対湿度 =75%

$L_v$ : 蒸発の潜熱, kcal/kg =583.2kcal/kg

$T_s$ : 表面水温, °C =25°C

$T_a$ : 水面の気温, °C =25°C

Swinbank の式

$$\phi_{ra} = 0.97k \{ T_w^4 - 0.937 \times 10^{-5} T_A^6 (1.0 + 0.17C^2) \}$$

ここに、k: Stefan Boltzman 常数=1.171x10<sup>-8</sup>kcal/m<sup>2</sup>day, day, °K

$T_w$ : 表面水温, °K (絶対温度)

$T_A$ : 表面水温, °K (絶対温度)

C: 雲量 =0.4

#### 差分計算式: マルチレベルモデル

マルチレベルモデルは、対象とする水域を水深方向にいくつかの層に分割し、各層を鉛直方向に積分して水の流れを取り扱うモデルである。分割された各層では2次元的な取り扱いをし、各層間において運動量および物質の交換を考慮することにより、全体としては水の流れを3次元的に表現する。ここではまず、水域を、水面を境界にもつ最上層、底面を境界に持つ最下層、最上層と最下層にはさまれた中間層に分けて考える。水面および底面の式をそれぞれ  $Z = z(x, y, z)$ 、 $Z = -h(x, y, z)$  として、各層ごとに上述の流動および拡散の基礎式を積分すると、次のようなマルチレベルモデルの基礎式が

得られる。図3.5.4.2に座標と流動および浮遊砂濃度に関する変数の位置を示す。ただし、ここでは、貯水池底面の変動 ( $d_b$ ) を考慮しない。また、 $x, y, z$  方向の拡散係数は渦粘性係数とほぼ等しいと仮定し、 $D_x=D_y=D_z=\kappa u_*'h/6$  で与えた。(ここに、 $\kappa$ :カルマン定数、 $h$ :水深、 $u_*'$ :摩擦速度)

(a) 最上層 ( $Z=-h_1 \sim z(x, y, z)$ )

連続の式

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(H_1 u) + \frac{\partial}{\partial y}(H_1 v) - w_{-h_1} = 0$$

運動方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(H_1 u) + \frac{\partial}{\partial x}(H_1 uu) + \frac{\partial}{\partial y}(H_1 uv) - (uw)_{-h_1} \\ &= fH_1 v - \frac{H_1}{\rho_0} \left\{ \frac{\partial P_0}{\partial x} + \rho_1 g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{2} H_1 g \frac{\partial \rho_1}{\partial x} \right\} \\ &+ \epsilon_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \epsilon_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - (\tau_{xx})_{-h_1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(H_1 v) + \frac{\partial}{\partial x}(H_1 vu) + \frac{\partial}{\partial y}(H_1 vv) - (vw)_{-h_1} \\ &= -fH_1 u - \frac{H_1}{\rho_0} \left\{ \frac{\partial P_0}{\partial y} + \rho_1 g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{2} H_1 g \frac{\partial \rho_1}{\partial y} \right\} \\ &+ \epsilon_x \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \epsilon_y \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} - (\tau_{yy})_{-h_1} \end{aligned}$$

拡散方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(H_1 C) + \frac{\partial}{\partial x}(H_1 Cu) + \frac{\partial}{\partial y}(H_1 Cv) - (Cw)_{-h_1} + (Cw_0)_{-h_0.5} \\ &= \frac{\partial}{\partial x}(H_1 D_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(H_1 D_y \frac{\partial C}{\partial y}) - (D_z \frac{\partial C}{\partial z})_{-h_1} \\ & \frac{\partial}{\partial t}(H_1 T) + \frac{\partial}{\partial x}(H_1 Tu) + \frac{\partial}{\partial y}(H_1 Tv) - (Tw)_{-h_1} \\ &= \frac{\partial}{\partial x}(H_1 E_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(H_1 E_y \frac{\partial T}{\partial y}) - (T_z \frac{\partial T}{\partial z})_{-h_1} \end{aligned}$$

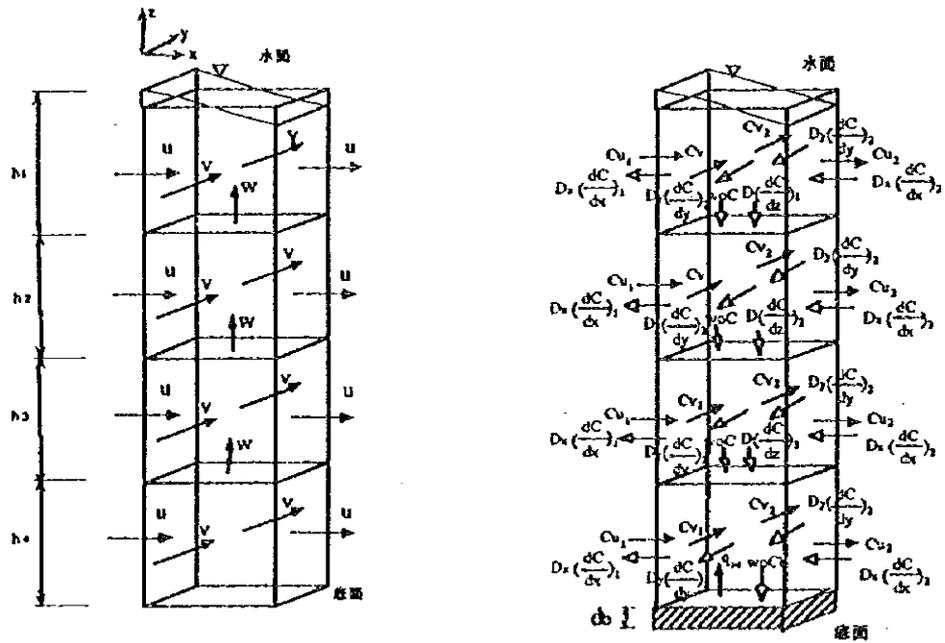


図 3.5.4.2 座標と流動および浮遊砂濃度に関する変数の位置

(b) 中間層 ( $z = -hk \sim -hk-1$ )

連続の式

$$\frac{\partial}{\partial x}(H_k u) + \frac{\partial}{\partial x}(H_k v) + w_{-hk-1} - w_{-hk} = 0$$

運動方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(H_k u) + \frac{\partial}{\partial x}(H_k uu) + \frac{\partial}{\partial y}(H_k uv) - (uw)_{-hk-1} - (uw)_{-hk} \\ & = \rho H_k v - \frac{H_k}{\rho_0} \left\{ \frac{\partial P_0}{\partial x} + \rho_1 g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + g \sum_{i=1}^{k-1} H_i \frac{\partial \rho_i}{\partial x} + \frac{1}{2} H_k g \frac{\partial \rho_k}{\partial x} \right\} \\ & + \epsilon_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \epsilon_y \frac{\partial u^2}{\partial y^2} + (\tau_{xx})_{-hk-1} - (\tau_{xx})_{-hk} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(H_k v) + \frac{\partial}{\partial x}(H_k vu) + \frac{\partial}{\partial y}(H_k vv) - (vw)_{-hk-1} - (vw)_{-hk} \\ & = -\rho H_k u - \frac{H_k}{\rho_0} \left\{ \frac{\partial P_0}{\partial x} + \rho_1 g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + g \sum_{i=1}^{k-1} H_i \frac{\partial \rho_i}{\partial y} + \frac{1}{2} H_k g \frac{\partial \rho_k}{\partial y} \right\} \\ & + \epsilon_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \epsilon_y \frac{\partial u^2}{\partial y^2} + (\tau_{zy})_{-hk-1} - (\tau_{zy})_{-hk} \end{aligned}$$

拡散方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(H_k C) + \frac{\partial}{\partial x}(H_k Cu) + \frac{\partial}{\partial y}(H_k Cv) + (Cw)_{-hk-1} - (Cw)_{-hk} - (Cw_0) \\ & = \frac{\partial}{\partial x}(H_k D_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(H_k D_y \frac{\partial C}{\partial y}) + (D_z \frac{\partial C}{\partial z})_{-hk-1} - (D_z \frac{\partial C}{\partial z})_{-hk} \\ & \frac{\partial}{\partial t}(H_k T) + \frac{\partial}{\partial x}(H_k Tu) + \frac{\partial}{\partial y}(H_k Tv) + (Tw)_{-hk-1} - (Tw)_{-hk} \\ & = \frac{\partial}{\partial x}(H_k E_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(H_k E_y \frac{\partial T}{\partial y}) + (E_z \frac{\partial T}{\partial z})_{-hk-1} - (E_z \frac{\partial T}{\partial z})_{-hk} \end{aligned}$$

(c) 最下層 ( $Z=-h(x,y,z) \sim -hb-1$ )

連続の式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(H_b u) + \frac{\partial}{\partial y}(H_b v) + w_{-hb-1} = 0 \\ & \frac{\partial}{\partial t}(H_b u) + \frac{\partial}{\partial x}(H_b uu) + \frac{\partial}{\partial y}(H_b uv) - (uw)_{-hb-1} \\ & = fH_b v - \frac{H_b}{\rho_0} \left\{ \frac{\partial P_0}{\partial x} + \rho_1 g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + g \sum_{i=1}^{b-1} H_i \frac{\partial \rho_i}{\partial x} + \frac{1}{2} H_b g \frac{\partial \rho_b}{\partial x} \right\} \\ & + \epsilon_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \epsilon_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + (\tau_{xx})_{-hb-1} - \tau_x^b \\ & \frac{\partial}{\partial t}(H_b v) + \frac{\partial}{\partial x}(H_b vu) + \frac{\partial}{\partial y}(H_b vv) + (vw)_{-hb-1} \\ & = -fH_b u - \frac{H_b}{\rho_0} \left\{ \frac{\partial P_0}{\partial x} + \rho_1 g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + g \sum_{i=1}^{b-1} H_i \frac{\partial \rho_i}{\partial y} + \frac{1}{2} H_b g \frac{\partial \rho_b}{\partial y} \right\} \\ & + \epsilon_x \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \epsilon_y \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + (\tau_{yy})_{-hb-1} - \tau_y^b \end{aligned}$$

拡散方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(H_b C) + \frac{\partial}{\partial x}(H_b Cu) + \frac{\partial}{\partial y}(H_b Cv) + (Cw)_{-hb-1} - (C_b w_0) + q_{up} \\ & = \frac{\partial}{\partial x}(H_b D_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(H_b D_y \frac{\partial C}{\partial y}) + (D_z \frac{\partial C}{\partial z})_{-hb-1} \\ & \frac{\partial}{\partial t}(H_b T) + \frac{\partial}{\partial x}(H_b Tu) + \frac{\partial}{\partial y}(H_b Tv) + (Tw)_{-hb-1} \\ & = \frac{\partial}{\partial x}(H_b E_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(H_b E_y \frac{\partial T}{\partial y}) + (E_z \frac{\partial T}{\partial z})_{-hb-1} \end{aligned}$$

ここに、 $\zeta + h_i = H_i$ 、 $h_i - h_{i-1} = h_i$ 、 $-\eta + h_{i-1} = H_b$ であり、流速および濃度は層平均値である。

コリオリ係数

コリオリ力は以下の式で表わされる。

$$f = 2\omega \sin \varphi$$

ここに、 $\omega$ : 地球自転の角速度 =  $7.2722 \times 10^{-5}$

$\varphi$ : 貯水池の緯度 =  $41.7^\circ$

### 底面でのせん断応力

底面でのせん断応力は、バルク公式により以下のように表わす。

$$\tau_x^s = \rho \gamma_b^2 u \sqrt{u^2 + v^2}$$

$$\tau_y^s = \rho \gamma_b^2 v \sqrt{u^2 + v^2}$$

ここに、 $\gamma_b = 0.051$

### 層間でのせん断応力

底面でのせん断応力は、バルク公式と層間の流速差により以下のように表わす。

$$(\tau_{xx})_{-hk-1} = \rho \gamma_i^2 (u_U - u) \sqrt{(u - u_U)^2 + (v - v_U)^2}$$

$$(\tau_{xx})_{-hk} = \rho \gamma_i^2 (u - u_L) \sqrt{(u - u_U)^2 + (v - v_U)^2}$$

$$(\tau_{xy})_{-hk-1} = \rho \gamma_i^2 (v_U - v) \sqrt{(u - u_U)^2 + (v - v_U)^2}$$

$$(\tau_{xy})_{-hk} = \rho \gamma_i^2 (v - v_L) \sqrt{(u - u_U)^2 + (v - v_U)^2}$$

ここに、 $\gamma_i = 0.01$

### 芦田・道上の式

$$q_{su} = 0.75 K_0 u_* \left\{ \phi(\xi_0) - \xi_0 \Phi(\xi_0) \right\}$$

$$\text{ここに、} \phi(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2}\right)$$

$$\Phi(\xi) = \int_{\xi}^{\infty} \phi(\xi) d\xi$$

$$\xi_0 = \frac{w_0}{0.75 u_*}$$

$$\tau_* = \rho u_*^2 = \frac{1}{8} \rho f u_b^2$$

$$\frac{1}{f} = 2.03 \log_{10} \frac{h}{k_s} + 2.12$$

ここに、 $w_0$ :土粒子の沈降速度 (cm/s)

$u_b$ :河床近傍速度 (cm/s)

$u_*$ :摩擦速度 (cm/s)

$k_s$ :河床材料の中央粒径、 $d_{50} = 0.02 \text{mm}$ を用いる。

$K_0$ は通常の場合の平均値 0.0042 をここでは用いる。

### 土粒子の沈降速度

土砂の拡散シミュレーションにおいては、沈降速度の取り扱いが予測精度に大きく影響をおよぼす。中国側は、大凌河流域水文観測各地点において年10回程度浮遊砂の粒径分布調査を実施しており、その平均値を表3.5.4.2に示す。また、図3.5.4.2'に白石ダム地点（表3.5.4.2における大凌河）洪水期の浮遊砂の粒径加積曲線、表3.5.4.3に粒径ごとの沈降速度を示す。

表3.5.4.2 大凌河、各水文観測所、浮遊砂の粒径加積分布（平均値）

（単位：％）

水文観測所		粒径(mm)									
		0.007	0.010	0.025	0.050	0.100	0.250	0.500	1.000	$D_{1,v}$	$D_{10}$
朝陽 (大凌河) ( '59-'60, '62-'92)	洪水期	20.12	29.53	60.05	88.91	98.41	99.80	100	100	0.0283	0.0200
	非洪水	24.02	33.43	58.70	83.08	95.17	99.08	100	100	0.0349	0.0198
	全年	20.22	29.69	59.90	88.74	98.33	99.79	100	100	0.0285	0.0201
大凌河 (大凌河) ( '59-'92)	洪水期	21.07	30.20	59.31	85.64	97.89	99.84	100	100	0.0263	0.0202
	非洪水	19.83	26.26	46.23	68.40	89.11	98.08	99.98	100	0.0519	0.0293
	全年	21.10	30.14	58.86	84.98	97.56	99.78	100	100	0.0273	0.0204
錦県 (大凌河) ( '60-'92)	洪水期	28.43	39.53	69.23	88.85	98.69	99.84	100	100	0.0249	0.0153
	非洪水	22.21	29.09	49.99	72.06	93.70	99.44	100	100	0.0420	0.0250
	全年	28.12	38.94	68.05	87.85	98.39	99.81	100	100	0.0259	0.0157
迷力營子 (忙牛河) ( '63-'66, '68-'92)	洪水期	19.36	27.00	56.11	84.04	98.02	99.76	100	100	0.0316	0.0219
	非洪水	19.90	25.89	54.07	76.70	95.87	99.64	100	100	0.0372	0.0228
	全年	19.18	26.71	56.05	83.82	97.97	99.78	100	100	0.0318	0.0219
復興保 (西河) ( '59-'88)	洪水期	28.36	39.17	66.63	87.51	97.78	99.44	99.99	100	0.0277	0.0159
	非洪水	28.41	38.86	64.73	83.78	96.53	99.16	99.93	100	0.0316	0.0165
	全年	28.09	38.86	66.08	87.01	97.69	99.44	99.99	100	0.0281	0.0161
徳力吉 (老虎山河) ( '63-'92)	洪水期	19.10	27.24	57.81	87.17	98.23	99.65	99.99	100	0.0301	0.0212
	非洪水	18.17	23.68	49.47	72.35	94.07	98.94	99.99	100	0.0433	0.0256
	全年	19.22	27.38	57.96	87.07	98.18	99.64	99.99	100	0.0302	0.0211
涼水河子 (老虎山河) ( '60-'65)	洪水期	30.39	44.51	75.02	91.07	98.53	99.88	100	100	0.0225	0.0127
	非洪水	25.34	30.41	60.88	82.79	95.58	98.51	99.95	100	0.0350	0.0176
	全年	30.31	44.47	74.82	90.97	98.52	99.88	100	100	0.0226	0.0127

$D_{1,v}$ =平均粒径(mm)

$D_{10}$ =中央粒径(mm)

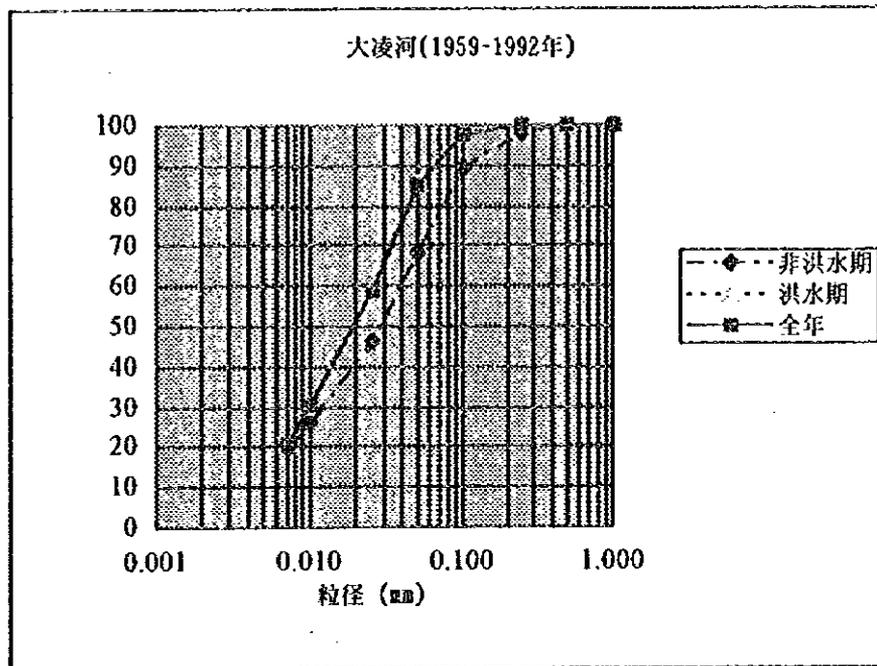


図5.3.4.2' 白石ダム地点における浮遊砂の粒径加積曲線

表3.5.4.3 白石ダム地点における浮遊砂の粒径別沈降速度

粒径の範囲 (mm)	組成 (%)	平均粒径 (mm)	沈降速度, $w_0$ (cm/s)	
$d \geq 1$	0	-		
1 > $d \geq 0.5$	0.00	0.707	0.0707	7.9157
0.5 > $d \geq 0.25$	0.16	0.354	0.0354	4.6931
0.25 > $d \geq 0.1$	1.95	0.158	0.0158	1.8006
0.1 > $d \geq 0.05$	12.25	0.071	0.0071	0.4337
0.05 > $d \geq 0.025$	26.33	0.035	0.0035	0.1108
0.025 > $d \geq 0.01$	29.11	0.016	0.0016	0.0222
0.01 > $d \geq 0.007$	9.13	0.008	0.0008	0.0062
0.007 > $d$	21.07	0.003	0.0003	0.0006

- 沈降速度は Rubey の式より算定した。

- 平均粒径は幾何平均

- 中央粒径  $d=0.0214\text{mm}$