



Title	溪流環境の保全に関する砂防学的研究
Author(s)	高橋, 剛一郎; TAKAHASHI, Goichiro
Citation	北海道大學農學部 演習林研究報告, 45(2), 371-453
Issue Date	1988-02
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/21266
Type	departmental bulletin paper
File Information	45(2)_P371-453.pdf



溪流環境の保全に関する 砂防学的研究

高橋 剛一郎*

Sabological Study
on Conservation of Stream Environment

By

Goichiro TAKAHASHI*

要 旨

溪流砂防において、土砂災害防止と溪流の自然環境保全を両立する砂防技術について研究を行った。具体的には、荒廃の程度の比較的低い溪流を対象の場と想定し、魚類の保護を環境保全の内容とした。溪流環境の概念について検討を加え、生物的・非生物的諸要素が関係し合っているという溪流環境の特性を明らかにした。非荒廃溪流の堆積地帯を溪間の氾濫原とし、荒廃溪流の扇状地と区別し、その特性を探った。そして、土砂移動が不活発であると河道は著しい屈曲を呈すること、土砂移動の頻度が流路変動に大きく影響し、小規模な土砂移動でも大規模な流路変動のきっかけになりうることを明らかにした。砂防工事が魚類に影響を与えるのは、ダムが魚類の移動の障害となっていることと、河道の改修が溪床の微地形と水の流れ方を変え、その結果生息環境を大きく変化させることによる。低ダム群工法は、低落差のダムで河道形状を大きく変えることなく土砂移動と流路変動をコントロールすることが可能であること、および魚類に対して移動の保証と有利な環境をもたらすことを明らかにし、溪流環境の保全を重視した砂防工法を提示した。

キーワード： 溪流環境，溪間の氾濫原，流路変動，低ダム群工法，溪流魚。

目 次

諸 言	373
I 研究方法	375
1 問題提起	375

1987年8月31日受理 Received August 31, 1987.

* 富山県立技術短期大学 富山県
Toyama Prefectural College of Technology.

2 研究方法	378
II 環境としての溪流	380
1 溪流環境	380
2 魚類の生息場としての溪流	381
1) 溪流の魚類	381
2) 生息場としての溪流の特徴	383
3 溪流における土砂移動と流路変動の特性	384
1) 溪間の氾濫原	384
2) 調査方法	385
3) 流路変動の実態	386
4) 土砂の堆積と流路の変動	390
III 砂防工事による環境の変化	393
1 河川工事の問題点	393
2 ダムによる影響	395
3 河道の改修による影響	396
1) 調査地と調査方法	396
2) 改修による環境と魚類の生息状況の変化	397
3) 河道の改修による影響	403
IV 魚の遡上実験	405
V 砂防計画の理論と実際	409
1 砂防計画の理論	409
2 砂防河川の実態	412
1) 小早月川	414
2) 別荘川	419
3) 百瀬川	421
VI 溪流環境保全を重視した砂防工法の構築	426
1 溪流環境の基本理念	426
2 基本方針	427
3 低ダム群工法の有効性と適用の可能性	429
1) 低ダム群工法の概要と機能	429
2) 簡易魚道付設による魚類の遡上の確保	430
a 簡易魚道の構造	430
b 簡易魚道の効果	433
c 現地適用の可能性	435
4 溪流環境保全を重視した砂防工法による空間創造	438
結 言	441
要 約	443
参 考 文 献	446
Summary	448
写 真	451

諸 言

急峻な地形、多雨・多雪、狭い平地に集中する住宅等の諸条件のなかで、砂防学の対象はあくまでも災害を引き起こす土砂移動現象であり、またその対策であった。これは砂防学あるいは砂防事業の目的から、極めて当然なことであった。しかし、近年の環境保全・自然保護意識の高揚と共に、砂防工事に対しても批判の鋒先が向けられるようになった。災害に対する安全性の一層の増大を図ることは当然であるが、同時に生活における快適性を求める要求に応えることも今後は重要である。この意味から、砂防学においても溪流環境保全を的確に位置づける必要がある。

国土を保全する行為は一般に治山・治水と呼ばれており、行政的な裏付けとなっている基本的な法律は、河川法、砂防法、森林法である。これらは1896年から1897年にかけて公布され、以来治水三法と呼ばれている。河川法と森林法はそれぞれ1964年と1951年に抜本改正を受けて現在に至っている。これらのうち、河川（溪流）環境について明言しているのは河川法のみである。

1896年から1964年までの約70年間、河川管理の基本法となっていた旧河川法には、河川の水量と水質の管理に関する規定が定められていた。新河川法においても、旧法と同様の文言で、「河川の流水の方向、清潔、流量、幅員又は深淺等について、河川管理上支障を及ぼすおそれのある行為については、政令で、これを禁止し、若しくは制限し、又は河川管理者の許可を受けさせることができる(第24条)」とうたい、水量・水質管理が河川管理の一環として位置づけられている。しかし、水質や流量管理の具体的な内容や意味あいは、各時代の諸条件により異なっていたことはいうまでもない。1950年代以降についていえば、流量の管理は急激に増大する水需要に対しどのように維持流量（河川の流水の正常な機能を維持するために必要な流量）を確保するかが大きな課題であった。また急速なテンポで悪化した水質に対しては河川法のみによる対処では不十分となり、公害対策基本法(1967年制定)、水質汚濁防止法(1970年制定)等がきめ細かい水質管理を司どることになった。

一方、1960年代後半に入り、河川空間が公共のオープンスペースとして、地域社会の生活環境としての役割が強く認識され始め、河川敷（高水敷）は公園、緑地、運動場として開放されるようになった。

以上のように、河川行政における河川環境の保全とは、水量・水質の管理、オープンスペースとしての河川空間管理が基本的支柱であるといえる。このことは1976年に改訂された河川砂防技術基準(案)²¹⁾においても明言されている。

砂防事業については、事業の基となる砂防法には環境保全に関する条項は盛り込まれていない。これは荒廃溪流において災害防止が第一義的な目的であったことの反映であろう。しかし、近年の環境意識の高揚を受け、前掲の河川砂防技術基準(案)²¹⁾では、以下のように記され

ている。「砂防設備及びその周辺の景観の調和を図るとともに、親しみやすい水辺や緑地等自然空間を確保し、国民が親しめる砂防設備周辺環境の創造に資するものである」。要するに、砂防設備周辺を、オープンスペースとしてとらえ、公園、レクリエーション機能の高揚を図ろうとするものである。

治山事業に関しては、溪流で行われる諸工事の計画・実行にあたって周囲の自然環境保全に対する配慮を規定する条項は、森林法には盛り込まれていない。また国有林で行われる治山事業の技術的指針となる治山技術基準解説⁵⁾にもそのような項目は入れられていない。都道府県レベルでの技術基準等では環境保全がなんらかのかたちで位置づけられているものもあるかもしれないが、おそらくほとんどは国有林野のそれと大差ないであろう。

このように治山・治水全般においては河川環境の保全は河川を水量と水質という属性を持った水の流れる場、およびオープンスペースとして認識することに立脚しているといつてよい。筆者は、河川管理の目的の一つに「公共の福祉を増進する」(河川法第1条)ことをあげることは極めて妥当であると考え。河川は社会的存在であると共に自然的存在でもある。本質的な面で公共の福祉を増進していくためには河川を持つ2つの側面を共に正しく評価し対処することが必要である。しかし、現状ではこの目標を達成するためには、上述のような河川に対する認識では十分であるとはいえない。

快適な居住環境を形成するうえで、身近に良好に保たれた自然環境を持つことの意義は大きい。良好に保たれた自然環境とは最も基本的には、そこを本来生息場所としている生物が健全に生息できる状態を指す。砂防・治山の場合は、魚類を始めとして溪流に生息する生物が生息できるような状態を指す。魚のいる溪流は見る人に安らぎを与え、魚取りや釣りの対象となってレクリエーション面での効果は大きい。また、溪流魚は漁業的価値の高いものが多く、特に北海道や本州北部ではサケ・マス資源の保護・増殖の面から環境の保全が求められている。要するに、従来の河川に対する見方には、河川が生物の生活の場であるということ、そして良好に保たれた河川が公共の福祉を増進させるうえで多面的な効果があることに対する認識が欠落しているのである。

一般に環境という言葉は、ある主体に対してこれをとりまくものという意味を持つ。また、生態学では、特に主体を特定せず、たとえば河川環境と称して河川を中心とした生態系全般を示すこともある。本論文で溪流環境というのは、上述の認識に基づき、人間社会にとっての溪流の生物的・非生物的諸要素の有り様を指している。砂防学では土砂と水の挙動という非生物学的な要素が中心となっているが、本研究では生物的環境要素を正しく位置づけることを目標の一つにしている。砂防本来の目的(土砂災害の防止)を実現しつつ、溪流に生息する生物に対するダメージを最小限にとどめることにより、好ましい溪流環境がもたらされると考える。

そして、溪流に生息する生物としては具体的には溪流魚(一般的にはイワナ、ヤマメ、アマゴ、北日本ではこれらに加えてサケ・マス、そしてアユ)を指すものである。溪流魚を対象

とする理由は、まずそれらが溪流に生息する最も代表的な生物であり、その生物群集の中で生態的に最も代表的な生物であり、その生物群集の中で生態的に最も上位に位置する存在であるからである。すなわち、これが生息しているということは、多くの場合その場の環境が良好に保たれていると判断できるからである。また、溪流魚は古くから遊魚や職漁の対象となり、地元の住民に漁業資源として、またレクリエーションの対象として親しまれてきた。このような意味から、溪流魚が生息できる環境を保つことを砂防学の中で研究する意義は大きいと考える。

今日の治水技術が築かれてきた歴史の過程には、西帥意や尾高淳忠に代表される民間治水論⁶⁴⁾や、岡崎文吉の唱えた治水自然主義⁶⁹⁾との論争が行われてきた。これらはいずれも土地利用のありかたや森林の影響を考慮した治水を述べており、現在でいうところのソフトな対策ともいべきものである。結果としては、近代の合理主義的な思想に基づく治水の方式にはこれらの考えは取入れられることなく、現在の治水技術が形成されてきた。

しかし、近年においても治水の根本的な思想の面から、あるいは河川をあまりにも自然とかけ離れた姿にしてしまうありかたに対して、批判がだされている^{18, 64)}。本研究もこの流れに与しており、環境保全という観点から今一度砂防を批判的にとらえ直し、再構築を試みるものである。

本研究に際しては、終始懇切な御指導を賜った北海道大学農学部教授東三郎博士、貴重な御意見や資料をいただいた北海道大学農学部教授藤原滉一郎博士、同助教授新谷融博士、同石城謙吉博士、同大歯学部助教授大泰司紀之博士、同大農学部助手井上聡博士、同笹賀一郎博士、北海道さけますふ化場小林哲夫博士、林業試験場東北支場小野寺弘道博士の皆様方に深謝の意を表す。北海道大学農学部砂防工学研究室の院生・学生や卒業生には現地調査の助手や討論の相手となっていただいた。また、現地調査および資料収集に際しては、北海道大学中川および天塩地方演習林、網走支庁林務課治山係、斜里博物館、北海道さけますふ化場岩尾別事業場、ウトロ漁業共同組合、北海道さけます増殖事業協会網走支所、積丹町、富山県農地林務部治山課、同土木部砂防課の関係各位から御援助をいただいた。ここに記して深謝の意を表す。

なお、本論文は北海道大学審査学位論文である。

I 研究方法

1. 問題提起

砂防工事が溪流魚に多大な悪影響を与えていることは周知の事実とあってよいが、その具体的な因果関係については、正確に語られていない面が多い。魚類に対するダメージを最小限にする砂防工法を考えるには、現在行われている工事について、いかなる点がどのように作用しているかを個別のかつ具体的に明らかにする必要がある。そしてこの議論をふまえたうえでダメージを少なくする方策を考えなければならない。

しかし、砂防本来の目的である災害防止を十分に満足し、かつ溪流環境の保全をも果たし

得る砂防技術を考えるにはこれだけでは不十分である。なぜならば、従来砂防が対象としてきた場はいわゆる荒廃溪流であり、そこにおいては活発な土砂移動に対応することが第一義的な目的であって、環境保全を云々する余地はなかった。すなわち、緒言で述べたように歴史的にみて環境保全の概念が砂防に存在していなかったからである。

ただし、ごく少数ではあるが、魚類の保護を目的とした魚道が砂防ダムの付属として設けられてきた経緯がある。

日本における魚道の歴史において、太平洋戦争以前に二回の隆盛をみたが、その段階では機能を果しうる魚道は現れていない^{32,34)}。戦後は1950年代以降に再び魚道に関する調査・研究が進められ、近年では十分に機能的なものが開発されるようになってきた³⁴⁾。しかし我国の魚道は伝統的にアユを対象としており、また主体となるダムは頭首工や発電等のための利水用のダムが中心であり、砂防ダムと溪流魚を対象とした魚道への関心が集ってきたのは最近のことである³⁵⁾。たとえば、魚道の対象となる魚としてサケ・マスが中心となる北海道では、魚道の設置が増加してきたのはたかだか1970年代に入ってからである。しかもこれらの魚道のうち、砂防・治山ダムにつけられたものはごく一部にすぎない^{9,62)}。

溪流魚の魚道開発においては、対象となる魚種の生態（ジャンプ力、遊泳速度、好ましい流速等）を明らかにし、また砂防ダムの構造的条件や立地する場の自然条件を考慮することが重要である。しかし、魚類のこの方面に関する生態については乏しい知見しか得られていないのが現状である³⁵⁾。また、砂防や治山のマニュアル^{12,13)}にも魚道の項目がみられるが、基本的には従来の魚道に関する一般的な知見を越えるものではない。すなわち、魚類の生態および魚道の主体的構造物としての砂防ダムの特性が十分に認識されてはこなかったのである。このことは、魚類を積極的に保護するために魚道が設けられたのではなく、個別的な事例において魚道が必要とされる事由に対応して設置が検討されてきたという事情によるものどある。この意味では、砂防における魚道の位置は確固たる環境保全の概念に立脚するものではない。

田澤ら⁶⁵⁾が指摘するように、砂防ダムの魚道はその立地条件の厳しさにより、多目的ダムに付設する場合に比べて多くの困難を伴うことがしばしばである。理想的な魚道を目指すならば魚道およびその周辺の流速・流れの方向のコントロール^{33,35)}、ゴミや流木の除去をはじめとして、様々な点に留意を払わなければならない。これらのことを勧告すれば、砂防ダムの魚道には一定の限界が課せられていると考えなければならない。一方、利水を目的としたダムは堤高を高くして多量の水を貯めることが重要な機能であるが、砂防の目的は土砂流出のコントロールであり、多量の土砂を貯めること、すなわち大型のダムを設けることが必要とは限らないのである。この観点から、有効性の低い構造物で土砂の流出をコントロールし、かつ魚道の効果をあわせもつような砂防工法の開発が提唱されている⁹⁾。既設のダムに関しての魚道の付設という問題は別にして、今後のあり方としてこの考えは大変重要であると考えられる。要するに、従来の概念にとらわれず、砂防の目的・方法や魚類保護の視点を考え直すことによって新たな

展望が開けてくるのである。

土砂と水の運動に対してたてられてきた技術が現在の砂防技術、理論が砂防学であるが、そこに魚類等の生物の存在を組み入れていくには、もう一度根本に立ち返って砂防の技術、理論を検討する必要がある。現在の技術や理論自体が土砂災害を防ぐうえで最良であるとはいえず、多くの場面において様々な議論がなされている^{11,57)}。純粹に災害防止という点に関して、環境悪化を招いている工種や工法が最良とは限らない、このようなことがあるならば、それは本研究が目的としている砂防技術の開発にあたって非常に重要な意味があるのである。

ところで、上述のように砂防学が対象としてきたのは土砂移動の激しい溪流においてであり、その結果現在確立されている技術基準、あるいはこれに準ずるものは基本的にはこのような場を想定したものである。ここに次のような3つの問題点が浮かび上がってくる。まず第1に、土砂移動が激しいことは一般的に生物の生息環境として安定的ではない、第2に、砂防事業の進展に伴い、今後は従来ならば対象とされなかったような比較的安定した溪流もが事業の対象となってくると予想されることである。そして第3点として、荒廃溪流を対象としてきた技術が果たしてそのような荒廃していない場においても真に効果的なのか、ということである。

防災事業である砂防事業は歴史的にみて、その必要性の高いところ、また投資を行うことによって得られるメリットの大きなところから行われてきた。溪流砂防についていえば、六甲のように下流部に都市をかかえているような溪流や、あるいは常願寺川、安倍川、手取川等の荒廃状況が著しく、土砂移動の激しい溪流が高いプライオリティーを有していた。近代土木技術の発達は、以前はとてもしち向かうことが不可能であったような荒廃溪流に対しても工事を行うことを可能とし、試行錯誤を繰り返して現在の砂防技術の体系をなしてきたのである。近年に至り、山間地や山麓地の(再)開発、市民のより充実した土地保全対策の要求等の社会的情勢により、荒廃の著しくない溪流に対しても砂防事業がますます進んでいくことが予想される。

溪流を生物の生息の場として考えると、土砂移動の激しい溪流、すなわち荒廃溪流は安定的な場であるとはいえない。土砂移動の規模や頻度がそこに生息する生物にどのように影響するかという研究はほとんど行われていないので、完全に安定的な条件が生物生存にとって最適であるのか、あるいは多少の攪乱がある方が良いのかはわからない。しかし少なくとも数年に1回以上の割合で溪床全体が変化しているような場は、生息環境として不安定で、生産量も少ないということは自明の条件として良いであろう。

以上のことから、次のようなことが導きだされる。すなわち、従来砂防事業が主に対象としてきたのは荒廃溪流であり、そこは元来魚類等の生息には好ましい場所ではなかった。しかし近年は元々生息適地であった荒れていない溪流においても砂防事業が行われており、今後も続いていくであろう。

先に述べたように、溪流砂防の技術は荒廃溪流における経験から生み出されてきたものである。いかに土木技術・材料が発達した現在といえども、流域内に巨大崩壊³⁷⁾、あるいはこれ

に近い規模の崩壊地を持つ荒廃溪流では、土砂移動を計画的にコントロールすることは不可能である。しかし、荒廃の進んでいない流域や小面積の流域では、移動する土砂量が相対的、あるいは絶対的に少ないため、溪流内の土砂の移動を強引にコントロールし得る技術水準には達しているといつてよい。現在の砂防計画は、流域内の可動土砂を量的に把握し、量的収支に基づいた土砂調節を行う方法がとられている²¹⁾。この結果、一般に大型ダムを設けることによって土砂調節を行う傾向にある。そして荒廃していない溪流に対してもこの技術基準が適用され、大型貯砂ダムが設けられる傾向にある。一般的なイメージでいうならば、穏やかな溪相の溪流に威圧的な大型ダムが存在するため、景観的にも、そこに生息する生物にとっても与える影響は大きく、自然破壊の元凶として批判的となっているのである。砂防学レベルでいえば、土砂収支に基づく砂防計画立案や、大型ダムによる土砂調節はそれぞれ問題点があるとして議論されている^{11,57)}。また、荒廃溪流を中心に考えられてきた砂防技術が荒廃していない溪流について適用されることの妥当性についても、現在このことは広く問題にされていないが、検討されるべきであると考ええる。

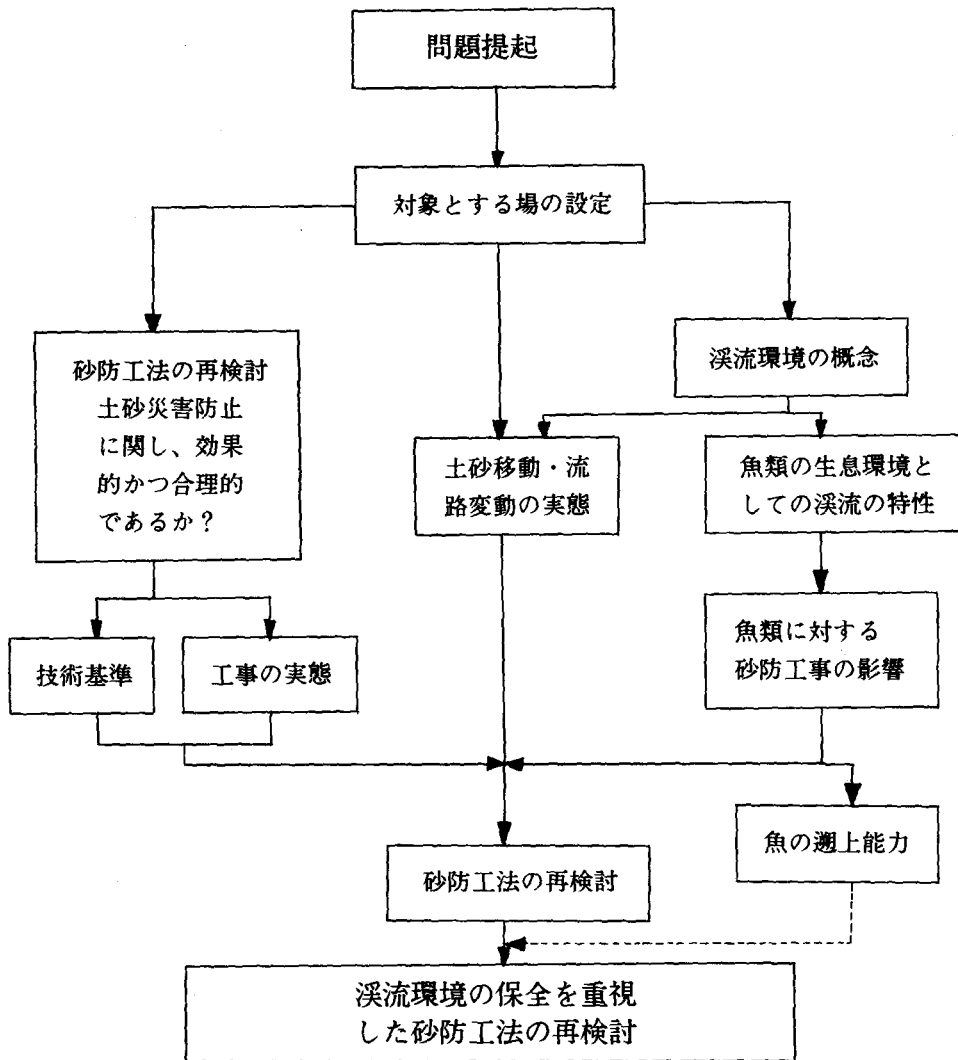
以上のように、溪流環境保全の見地から砂防工法を見直すにあたって、様々な問題が提起されてきた。今後の議論を明確にするため、本研究では対象とする場を土砂移動や流路変動の活発でない溪流とすることとした。従来は砂防学の対象としてあまり取り扱われてこなかった場である。しかし、災害を未然に防止する立場からはこのような場は今後重要視されてくることが予想される。そしてこのような場こそ荒廃溪流以上に自然環境の保全が強く認識されなければならないからである。また、土砂移動の激しい溪流においても、上流部で治山・砂防工事が行われ土砂流出が十分にコントロールされたならば、下流部ではやはりこれと同様の対策が必要とされるようになるからである。

2. 研究方法

先に溪流環境の概念を述べたが、従来はこの様な見方はほとんどなされてこなかった。そこで本研究では、その概念に基づいて溪流環境の特性を明らかにしようとした。溪流は魚類の生息場であるとともに水と土砂が運動する場でもあるので、この両面から溪流の特性を明らかにしようとした。

特に後者については、本研究が対象とする場が、従来砂防学があまり取り扱ってこなかった場、すなわち、土砂移動や流路変動の激しくない溪流であるので、荒廃溪流との相違に注意しつつ、土砂移動や流路変動の特性を探ろうとした。調査は上記の条件をそなえていて、しかも開発等による地形改変をほとんど受けていない北海道北部の野溪を対象とした。

次に砂防工事が河川に生息している魚類に対して、どのような部分がどのように影響しているかを具体的に明らかにした。従来からダムが魚類の移動の障害となっていることは周知の事実であり、魚道の研究などと共に調査・研究がなされてきた。しかし、流路の付け替えや護岸工等については、生息環境を大きく変化させていることは指摘されている⁴¹⁾が、我が国では



図一1 研究の流れ

Fig. 1. Flow of the study.

この種の研究はほとんどなされてこなかった。そこで、まず河川で行われる各種工事が魚類に与える影響を概観したうえで、溪流で行われる砂防工事の問題点を明確にした。

特に魚はどの程度の落差のダムならば越えることが可能かという問題は、ダムが魚に与える影響を考えるうえでも、また魚道の付設を検討する場合でも非常に大きな意味を持つてくる。そこでこの問題を明らかにするため、実験的にダムにおいて魚を遡上させて調査を行った。

次に土砂害防止という砂防本来の目的に関して、現在の砂防技術は十分に効果的かつ合理的であるかどうかを検討する。砂防技術の大筋を、各種の技術基準等^{21,51)}からまとめ、また古

くから砂防工事の行われてきた富山県内の流域を対象に、現場における砂防工法を調べる。そして、これらをふまえて砂防技術に関する従来からの議論などを参考に問題点を明らかにする。

これらの調査、検討を通じて、溪流環境の概念、溪流における土砂移動・流路変動の特性、砂防工事による魚類への影響、魚の遡上能力、現在の砂防技術の抱える問題点が明らかにされた。それぞれにおいて導き出された結論を照し合わせるにより、魚類の生息環境に与えるダメージを最小限にし、かつ砂防本来の目的を達成し得るような砂防技術を現実的に考えることが可能となる。従来のように、単に個別的にダムと魚道の問題を対象とするのではなく、広く砂防学全体のなかにおける魚類の保護、広義には溪流環境の保全を位置づけることができるのである。このような観点から、最後に溪流環境の保全を考慮した砂防工法の構築を試みた(図-1)。

II 環境としての溪流

1. 溪流環境

砂防学においては、溪流は土砂と水の運動の場としてとらえられ、その運動の法則性や処理方法が研究の対象となってきた。しかし現実の溪流では、流水中の水生動物、流路付近に生育する植生やそこを生息場とする鳥獣類など様々な要素が存在し、これらは互いに影響をおよぼしあっている。

豪雨や融雪によって溪流では土砂の洗掘、移動、堆積が生じ、流路が変動していく。これらの現象の歴史的結果として扇状地や谷底平野が形成され、ここに人間の社会生活が営まれることになる。また土砂移動や流路変動は裸地を出現させ、そこには植生が侵入し、溪畔林が形

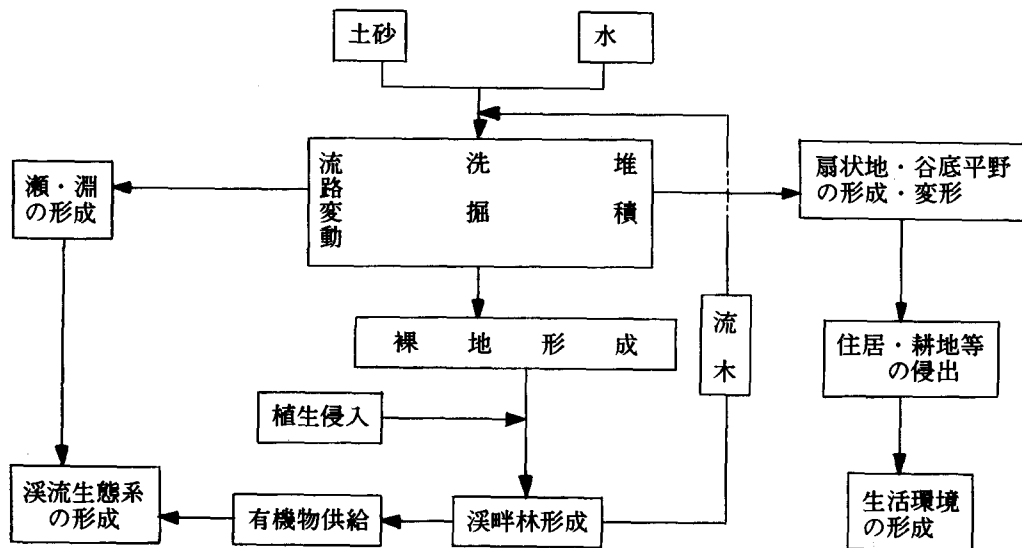


図-2 溪流環境の概念

Fig. 2. Concept of stream environment.

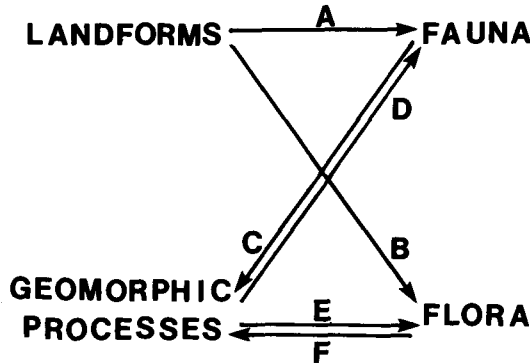


図-3 地形と生態系の関係 (Swanson⁶¹⁾による)

Fig. 3. Relationships among landforms, geomorphic processes, fauna, and flora. A. Define habitat, range. Effects though flora. B. Define habitat. Determine disturbance potential by fire, wind. C. Affect soil movement by surface and mass erosion. Affcet fluvial processes by damming, trampling. D. Sedimentation processes affect aquatic organisms. Effects through flora. E. Destoy vegetation. Disrupt growth by tipping, splitting, stoning. Create new sites for establishment and distinctive habitats. transfer nutrients. F. Regulate soil and sediment transfer and storage. (After Swanson⁶¹.)

成され、鳥獣が生息するようになる。一方、溪畔の樹木は流木の供給源となり、土砂移動に大きな影響を与えることになる⁵⁴⁾。また溪流では、溪床の勾配や構成材料等に制約されて、瀬と淵を伴いながら流路を形成している。ここに溪畔林から有機物が供給され、水生昆虫や魚類を育み、溪流の生態系を形成する(図-2)。そしてこれらの諸要素の有機的なつながりを持つ存在として、人間社会に対する環境としての溪流を認識する必要がある。

従来の学問体系のなかでは、砂防学は土砂と水の運動が対象の中心であり、生物的分野では溪流における植物の生態が、特に地表変動の指標として認識されてきた程度である。生物的要素については当然生物学がこれを対象としているが、研究の内容は生物の生理・生態が中心である。しかし現実には SWANSON⁶¹⁾が指摘するように、地形的要素と生態的要素は互いに影響をおよぼしあっているのである(図-3)。すなわち、土砂と水の運動の理論の延長線上の砂防学の枠組みの中では、生物的要素(特に魚類)の保護を考えることは限界がある。溪流という場を魚類の生息場として、また土砂と水の運動の場として、改めてとらえ直して認識を新たにする必要があるのである。

2. 魚類の生息場としての溪流

1) 溪流の魚類

一般に砂防学が対象とするのは、河川のうち溪床勾配が1%以上のところであると考えられている。ここに生息する魚類はその環境特性に応じて制限されてくる。ここでは本項の主題

に入る前に、溪流に生息する魚類について簡単な解説を加える。

淡水魚にはその生活環の違いにより、大きく3つのグループに分けられる³⁹⁾。それは生涯を淡水のなかで過ごす純淡水魚、生活環のある時期は必ず淡水で過ごす二次的な淡水魚、本当は完全な海産魚であるが、一時的に淡水域に入ってくる周辺的な淡水魚である。二次的な淡水魚はさらに2つに大別できる。ウナギ (*Anguilla japonica*) のように海で生まれ淡水中で成長し、産卵のために海へ下るもので、降河魚とよばれるものと、淡水で生まれ海で成長し、河川へ戻って産卵する生活環を持つ遡河魚がそれである。さらに後者は、シロザケ (*Oncorhynchus keta*) のように産卵直前に河川に戻ってきて、淡水中ではほとんど餌を食べないものや、産卵直後直ちに降海し、仔・稚魚期を海で過ごし、その後河川に戻って比較的長い期間を河川で過ごすアユ (*Plecoglossus altivelis*) のような魚の2種類に分けることがある。前者が遡河魚の典型的なものであり、後者のようなグループを特に両側回遊魚とよぶことがある。

砂防事業の現場は河川の上流部であるため、工事の関係で問題となってくる魚種が限定されてくる。それらは一般的に溪流魚といわれるイワナ (*Salvelinus leucomenis*) やヤマメ (*O. masou*)、アユ、ウグイ (*Tribolodon hakonensis*) およびエゾウグイ (*T. ezoe*)、アジメドジョウ (*Cobitis delicata*)、カジカ属 (*Cottus* sp.) やドンコ属 (*Odontobutis* sp.)、ヨシノボリ属 (*Rhinogobius* sp.) 等に属する一部の魚種などである。

イワナは一般的には河川上流部に生息するが、北海道では下流部にも生息する。また、東北以北では降海する個体もある。ヤマメは、これも一般的には河川上流部に生息する。この種に関しては分類上同一種内の多型や亜種とみられる個体群が複数存在しており、名称および分類が混乱している³⁹⁾。ヤマメとよばれているものは九州の一部、本州の日本海側全体および関東以北の太平洋側と北海道に分布しており、西南日本では個体群全部が河川内で一生を送る。北海道ではメスの全てとオスの一部が降海する^{49, 50)}。中部日本および東北地方では一部が降海するが、河川残留型と降海型の割合については不明な点が多い。なお、降海して成長した個体はサクラマスとよばれる。本州の中部地方以西の太平洋岸、四国および九州の瀬戸内海沿岸には形態および生態がヤマメと非常によく似たアマゴが分布している。また琵琶湖にはピワマスが、特定の限られた水域にはアマゴの突然変異型といわれるイワメが存在する。これらヤマメ、サクラマス、アマゴ、ピワマス、イワメ等は分類上多くの問題点があるが、同一種内の型あるいは亜種レベルの変異であるとされている。本論文では以後これらをまとめてサクラマスとしてとりあつかうことにする。

イワナ、サクラマスはともに、河川内で一生を送るものはほとんど河川の上流部を生息場とし、また遡河型の生活環を送るものも産卵場所は上流域である。いずれも砂防の現場と重なる。シロザケやカラフトマス (*O. gorbuscha*) は遡河型の生活環を送るが、イワナやサクラマスほどは上流へは向かわず、またその地理的な分布範囲もシロザケは概ね北陸・関東以北、カラフトマスは北海道の北・東部と限定されている。この意味では砂防工事との関係はイワナや

サクラマスほどの広範囲であるとはいえない。しかし、後に詳しく述べるが、分布地域では遡河魚であるが故に砂防施設が重大な影響を与える場面がしばしばみられる。

本研究においては「魚類」としてイワナ、サクラマス、カラフトマス、シロザケ等を念頭においている。溪流環境の保全という意味ではこれら以外のウグイやカジカ等についてもふれなければならないが、特に魚種を限定したのは以下のような3つの理由による。まずこれらの魚種が漁業資源として非常に高い価値を持っているからである。そして、詳しくは後述するが、河川内での生活期間の長いサクラマスやイワナは生息の場として多種多様な環境要素が必要とされる。従ってこれらにとって快適な環境であるならば、それら以外の魚種にとっても良好な場となっているであろうと考えたからである。また、イワナやサクラマス等は体の大きさがそれ以外のものより概ね大きく、生活様式も遊泳生活を主としているため、確認や採取等の調査を行ううえで有利であるからである。

2) 生息場としての溪流の特徴

砂防が対象とする場の特徴としてまず第一にあげられるのは、勾配が急であることである。河川下流部の緩勾配のところでは、流れは一様に見えるが、上流に向かうにしたがい、すなわち勾配が増すにつれ、流れは複雑になり、いわゆる瀬と淵が現れてくる。河川生態学では、瀬と淵の配置のパターンと流路の平面形状の関係をもとに河川形態を区分している^{20,41)}。この区分に従って中～上流部についてみれば、曲流部と曲流部の間を結ぶ区間に1つの瀬が形成されている状態をBb型、曲流部同士の間部分に瀬と淵が多数出現する状態をAa型と呼び、その中間の状態をAa—Bb移行型としている。Aa型、Bb型などを河川形態型というが、それぞれの河川形態型の有する特徴は生物にとって非常に大きな環境因子として作用しており、生物相や生態に影響を与えていることがよく知られている⁴¹⁾。

一般にAa型は河川の最上流、Bb型は中流部に現れている。砂防が対象とする場はこの区分でいえば、Aa—Bb移行型およびAa型の河川形態型に相当する。このことは下流部と比較すれば、勾配が急で流れが瀬と淵によって細かく分割されていることを意味している。またこのような特徴は、流水の流れ方に非常に複雑な乱れをもたらしている。溪流魚はこのような環境の中で生息しているのだが、このことは換言すれば、溪流魚の生物的歴史のなかでこの環境条件に適応してきたことを示し、瀬と淵や複雑な流れは重要な意味を持つということが出来る(この議論はⅢ章で詳しく述べる)。

土砂の移動は溪流の微地形の変化をもたらす。特に土石流のような激しい土砂移動は、溪床を一変させてしまう。また急激な流路変動は、それまでは流路であったところが流路でなくなり、全く別の箇所に新たな流れを形成する。これらの現象は水生生物にとっては生息場所そのものの激変であるが、環境の安定性と生物との関係に関する研究は進んでいない。安定した環境が生物の生活にとっては好ましいと考えられるが、魚類にとってある程度の環境の攪乱があった方がよいのか、もしそうであれば攪乱の規模や頻度などがどの程度であれば高い現存量

(資源量)を維持できるのか、これらの問題については全く調べられていない。しかし、高い頻度で河床状態が変化してしまうような場合は水生生物にとっては厳しい環境である。

溪流で起こる土砂移動により裸地が生じ、そこにはヤナギやハンノキなどがいち早く侵入し、溪畔林を形成する。溪畔林は落葉・落枝のかたちで溪流に有機物を供給する。これは水生昆虫の餌となり、水生昆虫は魚などのより高次の捕食者に利用される^{6,7)}。また溪畔林には様々な動物が生息するが、昆虫類は溪流魚の餌として重要である。たとえばサクラマスの夏の餌料は、陸生昆虫の比率が高くなる²⁷⁾ことが知られている。さらに流路付近の樹木の樹冠は日射を遮り、溪流の水温に影響を与える。いうまでもなく、水温は水生生物の生理・生態にかかわる重要な要素である。このように、溪畔林の溪流生態系への寄与が少なくないことが示唆される。

魚類の生息場としての溪流の特徴を、主に地形的特性、環境の空間的安定性、溪畔林の役割の観点から簡単に述べてきたが、現在の生物学ではこれらの問題は少数の例を除いてほとんど研究されていない。環境としての溪流を総合的に把握する段階に達しているとはいえない。しかし砂防学が対象とする土砂移動、地形の変化、溪畔林などが何らかの影響を魚類に与えていることは十分に理解することができる。

3. 溪流における土砂移動と流路変動の特性

1) 溪間の氾濫原

従来砂防学では流域を集水地域(砂礫生産地域)、流送地域、堆積地域に区分してきた⁴⁶⁾が、本研究で対象としている非荒廃溪流ではこのような区分では的確に流域をとらえることが不十分であると考えた。特に堆積地域については、扇状地、扇状堆積地や溪間の相対的な拡幅部^{3,45)}(堆積空間、堆積域)などに区分されているが、安定的な場では従来の概念では十分に説明されないような性状を呈している。そこで本研究ではこのような場を「溪間の氾濫原」として以下のように定義し、その特性を探った。

狭長な谷底平野のような空間は過去において流路が変動し、土砂が氾濫堆積して形成されたものである。上流からの土砂供給が激しいと拡幅を始める部分、すなわち谷底平野の上流部において、扇頂部でみられる首ふり現象のような流路変動が起る。その下流部においても流路の変動は起るが、上流部での首ふり的な変動が下流部に対して最も支配的に影響をおよぼす。上流からの土砂供給が少なければ、全体的にみて変動する頻度は小さくなる。このような安定した状態の場では規模の大きな土砂移動とそれに伴う流路変動よりも、流路付近で起るより小規模な土砂移動・流路変動が防災対策の対象となる。場の特性が異なっている以上、このような場は扇状地や扇状堆積地とは区別しなければならない。

馬場他³⁾や中村・新谷⁴⁵⁾らが砂防計画重視している溪間の相対的な拡幅部は上流からの1回の土砂移動(あるいは1洪水時の土砂移動)に対しての堆積空間としてとりあげられている。しかし上流からの土砂供給よりも、拡幅部の内部で生じる小規模な土砂移動・流路変動が問題

となるところは、相対的拡幅部とは異なった性質の場としなければならない。

門村¹⁷⁾は扇状地の基本的微地形とその配列に関して、砂礫からなる狭長な谷底平野(砂礫質谷底平野)にも同様な微地形とそのパターンがみられるとし、扇状地性平野という用語(概念)を提案した。これはその形成過程が扇状地の場合と同じで、異なるのは側面的な境界条件に制限された全体的な形状のみであるとしている。この概念は先に述べたような場の性情をよく説明しているが、以下のような理由により十分ではない。扇状地性平野では扇頂部のような流路変動の基になるような固定的な場を考えなければならない。しかし、より安定的な溪流の谷底平野では、位置的・時間的に不連続に平野全面で生じる土砂移動や流路変動が問題となる。これは後で詳しく述べるが、さらに土砂移動の頻度が小さくなると、本来扇状地性河川に特有の網状流路とは全く異なった著しい曲流河道を呈するようになる。すなわち、扇状地性平野は上流からの土砂供給の活発なところで形成され、土砂供給が少ないとそれとは異なった特性を持つ場となる。このように、砂防学・砂防事業が対象とする場で、従来の用語では簡潔に表わせない溪間内の平坦地を「溪間の氾濫原」ということにした。

ここで氾濫原というのは、主として過去において土砂が氾濫して形成されたことを意味するのであって、いわゆる河川下流部の自然堤防地帯のそれを示すものではない。すなわち溪間の氾濫原の特徴は、1. 溪間の拡幅部に生じた平坦地で、2. 現在の時間スケールでは、平坦地の中での部分的な変動はしばしばであっても、平坦地全体におよぶような大規模変動の頻度は非常に小さいという特性を持っていることになる。

2. 調査方法

流路の変動は、土石流のような急激な土砂移動・堆積に伴って起こる場合と、いわゆる砂洲や砂礫堆などの中規模河床形態と関連しておこる場合がある。前者に関しては扇状地や溪流内での流路変動の実態が調べられ^{48, 54, 55)}、後者については土砂水理学的なアプローチからの研究^{15, 43)}がなされている。氾濫原で生じる流路変動はこの2つのタイプのものが混在していることが多い。従って、そのような場では特定の変動機構との関連で論ずるよりも、いつどこでどのように流路変動が起きたかという視点から現象をとらえることが重要である。そこで本研究では、人間による地形の改変が行われていない野溪で流路変動の過程を探った。

具体的な調査としては、溪間の氾濫原の中から比較的流路変動の活発な区域を選び、現地測量により洗掘・堆積地形や旧流路等の河床地形を区分した^{1, 10)}。そして堆積地上に生育している木本群落の解析、経時的に撮影された空中写真の判読などにより、過去の流路変動・土砂移動過程の追跡を試みた。この方法によってきかのぼることができるのはせいぜい数10年の範囲である。砂防・河川計画で考慮する時間、すなわち計画降雨に関する超過確率年が一般的に数10年から100年であること、また対象とする現象の空間的スケールにつらう時間的スケールである¹⁰⁾ことから妥当な方法である。

調査対象流域は、北海道北部天塩川水系アユマナイ川(中川町)と、同水系間寒別川支流ヌ

ポロマッポロ川(幌延町)である。(図-4)。アユマナイ川は19.5 km², ヌポロマッポロ川は22.6 km²の集水面積を持つ小溪流で、いずれも人間による地形の改変はほとんど行われていない。地質は両流域ともに源頭部は蛇紋岩地帯で、その下部が堆積岩(アユマナイ川:白亜紀の砂岩・頁岩, ヌポロマッポロ川:洪積世段丘堆積物および新第三紀層)で構成されている(38, 44)。

3) 流路変動の実態

図-5にアユマナイ川流域の概要を示した。源頭部は蛇紋岩地帯という脆弱な地質で、溪岸崩壊や地すべりが多発している。土砂流出を調節するために上流部に民有林治山事業によって3基の治山ダムが設置されている。それらの諸元を簡単に説明すれば、下流のものはコンクリート製で有効高約7 m, 二番目のものはスチール製, 有効高約4 m, 上流のものはコンクリート製で有効高約7 mである。最下流のダム付近から谷はV字谷から次第に開けていき、流路は広がった谷壁の間を曲流する。谷壁の間隔は広いところでは200 mに達するが、常水路の幅はわずかに3~5 m程度である。最下流の支流(左支)の合流点より下流では平坦地が採草地として利用されており、流路痕跡などの微地形が不明瞭になっている。調査区域は流域の下流部で、平均河床勾配は1.2%である。

1981年8月の3日から5日にかけて北海道北部地方は大雨にみまわれ、この時のアユマナイ川では土砂移動と流路の変動が起こった。洪水の前後の現地調査をもとに、流路の変化、洗掘・堆積地点、旧河道の痕跡等を図-6に表わした。図中の数字はその場に生育している木本群落の年齢(1985年時点の年齢に換算したもの)である。1981年の洪水に伴う流路変動には、曲流部において河床・河岸が洗掘されて流路が2~3 mほど外側に移動しているものと、流路が不連続に全く別の方向に変化しているという2つの形態が認められた。後者のタイプの変動は流路変動の生じたところに土砂の堆積がみられる。

流路痕跡やかつて河岸であったことを示す段丘地形の分布、堆積地のおおよその形成年代(木本群落の年齢により推定)などにより流路は位置的・時間的に不連続に変動してきたことがわかる。流路の横方向への変動の規模は、30年程度の時間に対応して数10メートルから大きいところで100 m前後である。

次にヌポロマッポロ川についてみる。図-7に流域の概要を示した。蛇紋岩地帯では谷は

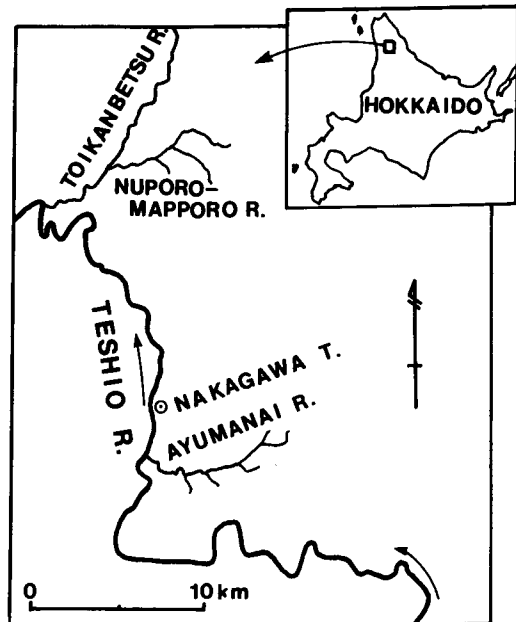


図-4 アユマナイ川・ヌポロマッポロ川位置図
Fig. 4. Location of the Ayumanai river and the Nuporomapporo river.

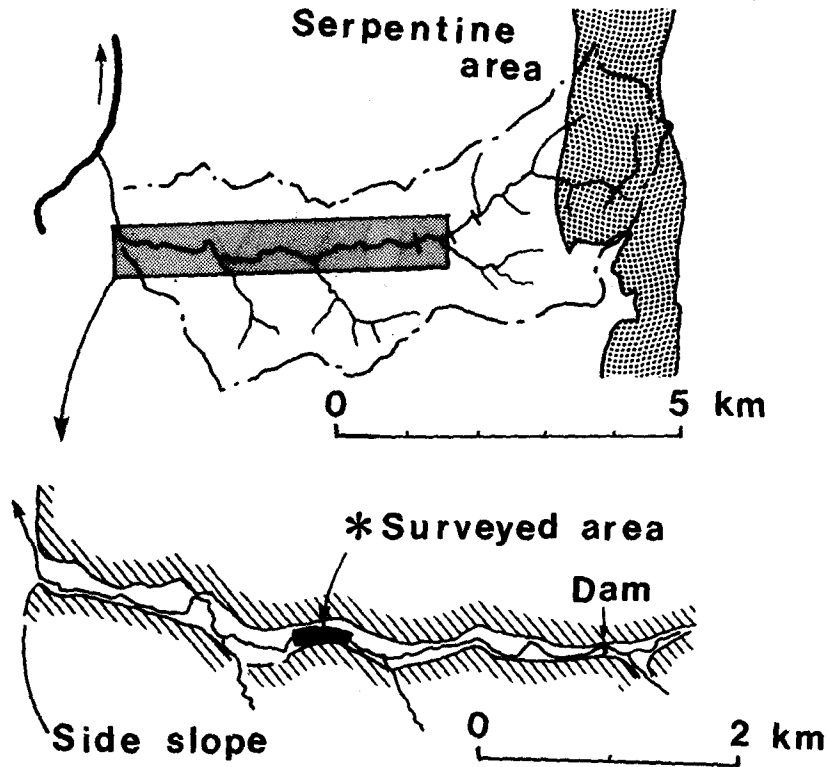


図-5. アユマナイ川流域の概況
Fig. 5. General situation of the Ayumanai river basin.

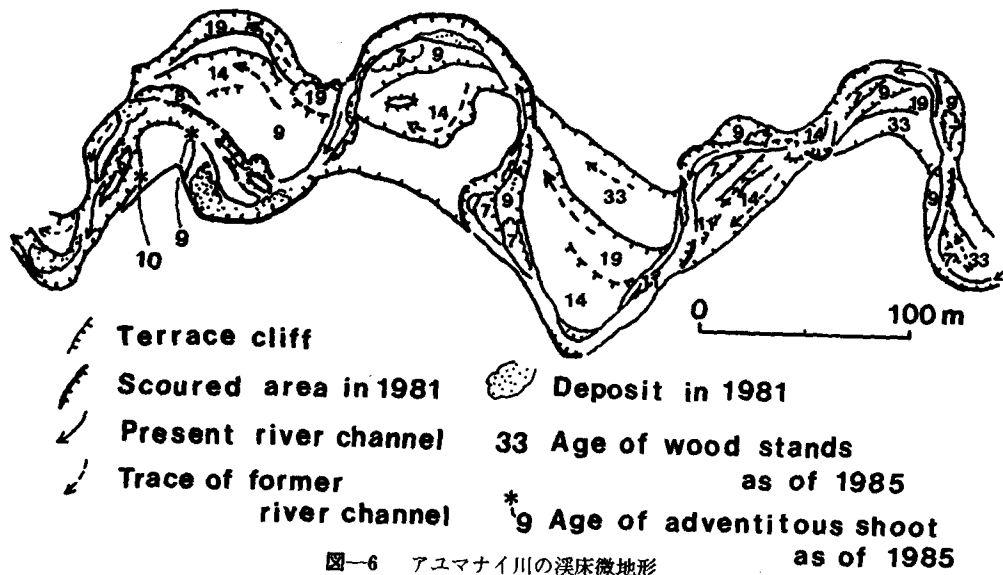


図-6 アユマナイ川の溪床微地形
Fig. 6. Floodplain microtopography in the Ayumanai river.

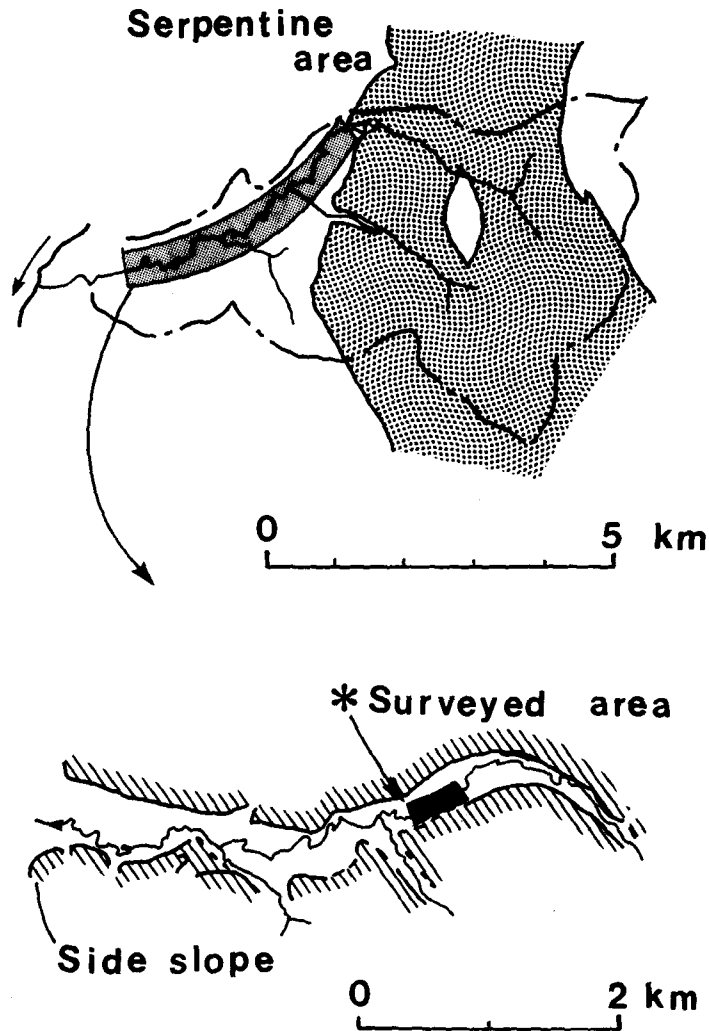


図-7 ヌポロマップポロ川の概況

Fig. 7 General situation of the Nuporomaporo river basin.

V字谷を形成しており、堆積岩地帯にはいつてからは谷壁が広がり、そのまま問寒別川沿いの沖積平野に続いている。兩岸の谷壁間の幅は200~400mで問寒別川の沖積平野との出合い付近では500m以上に広がっている。最も下流の支流が流入する付近までは開発が行われているが、それより上流ではほとんど自然状態である。空中写真の観察では200~300m幅の谷壁の間に古い流路の跡が全面にわたって認められる。

現地調査を行なったのは図-7で*印をした部分で、近年比較的活発に流路変動の起っているところを選んだ。この付近の谷壁間の幅は250~300mで、河床の縦断勾配は1.0%である。図-8に調査区域の平面図を示した。流路は激しく曲流しており、またかつて流路であったこ

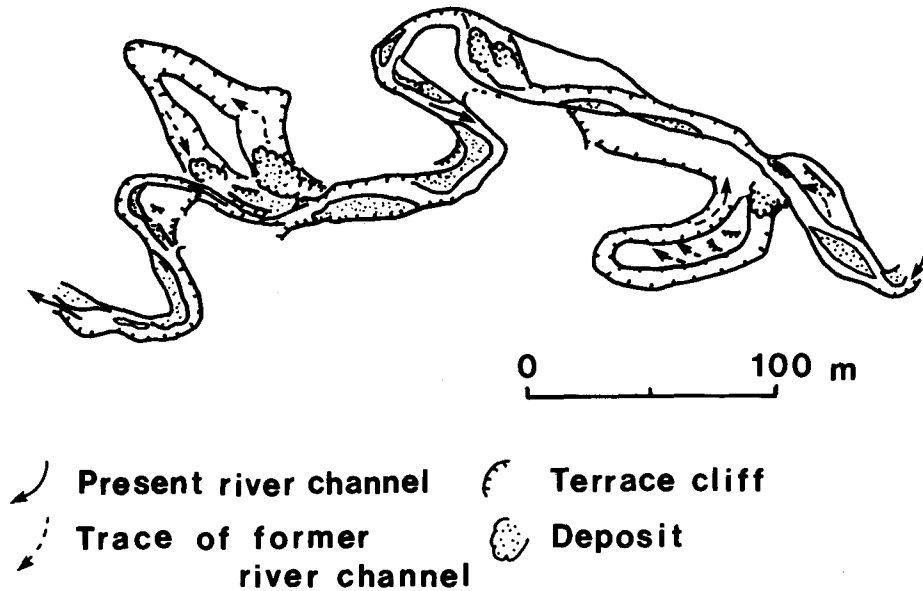


図-8 ヌポロマッポロ川の溪床微地形
Fig. 8. Floodplain microtopography in the Nuporomapporo river.

とを示す微地形(流路痕跡や河岸痕跡等)や小規模な土砂堆積地が多数認められる。ヌポロマッポロ川の氾濫原は高さ1m以下の草本とササ類が生育しており、調査区域内で木本類はわずか数本しか存在していない。木本群落を時間指標として用いることが不可能なので、経年的に撮影された空中写真を用いて流路の変動過程をしらべ、図-9にその結果を示した。空中写真は1947年、1960年、1969年と1977年に撮影されたものを用いたが、特に1977年の状況は現地測量を行なった1983

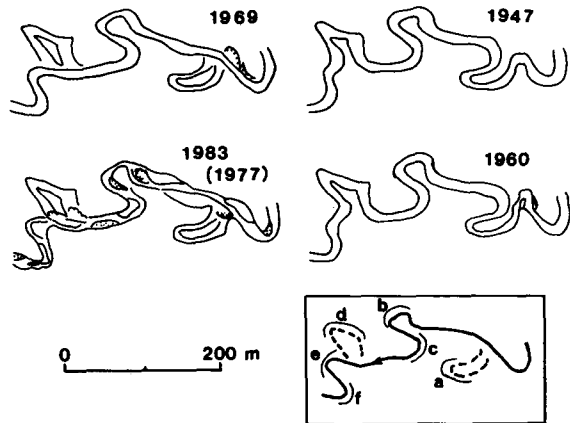


図-9 ヌポロマッポロ川の流路変動過程
Fig. 9. The process of the channel course change in the Nuporomapporo river.

年とほぼ同じなので、図には測量の結果を示しておいた。図-9の囲みの中のように曲流部につけた記号を用いて説明すれば以下のようなものである。1947年の河道はa, dであった。1960年にはaの曲流部の直上流部の河道の屈曲が著しくなってきたが、基本的には1947年の状態と同じである。1969年の時点ではaとdの曲流部は短絡されて旧河道となっている。2つの短絡が同時に起こったのかどうかは不明であるが、写真では特にaの切断部分は新鮮な状態である。この2つの河道跡は現在でもまだ土砂の堆積が進んでおらず、部分的に水がたまって挺水植物

が生育している。またこのような急激な流路変動の生じたところには、アユナイ川と同様に土砂の堆積がみられる。a, d 以外の曲流部についてみれば、a と d が短絡されてから後に屈曲の度合いを深めて現在のような形状に近づいてきたことがわかる。特に e, f においてはその傾向が著しい。

4) 土砂の堆積と流路の変動

前節でふれたように、急激で不連続な流路の変動には土砂移動が伴っている。ここではこの2つの現象の関係について述べる。

1981年のアユナイ川で観察された流路変動の状況を、洪水後の現地調査から以下のように推定した。洪水流は堆積地の広い範囲に氾濫しているが洪水前の流路部分（特に曲流部外側の河岸）で洗掘が生じ、この洗掘された土砂が堆積した地点で流路が変化した。

図-10に河床の横断形状を示したが、ここでB-B', C-C', D-D', E-E'は1981年洪水の際に最も大きな流路変動の起こった部分である。洪水以前流路はこれらの横断面上で左岸の崖の下の部分であった。この曲流部分の上流側で河岸洗掘が生じ、流送された土砂が下流側に堆積した。この時土砂は洪水時の流路を埋積し、流路の右岸側の河岸にかぶるように堆積した。その結果洪水流はこの地点から、より低い方の旧堆積地の側に流れを転じ、そして旧堆積地を連続的に洗掘していき、減水後はそこが新たな流路として固定された。洪水痕跡の追跡調査から、このような変化は洪水水面下で生じたものと判断した。写真1にその地点の状況を示した。

上述の一連の変化において、堆積した土砂が河岸を超えない場合には、流路は河岸を洗掘した分だけ外側に移動する。すなわち連続的なタイプの流路変動である。

堆積地を観察すると、堆積地は洪水流の中心部付近であり、堆積地の下流部末端で、しばしば段差を持ってまとまって堆積している。このことから、流送土砂は洪水流中の主流部の中を流送されていて、運動状態は掃流力の減少によって容易に集積的に堆積するような掃流状態であると考えた。従って、多量の土砂を含んだままこのような流動状態を維持しつつ曲流部を何ヶ所も超えて流下するとは考えられないことから、堆積地から上流の曲流部までの間にある洗掘地点を堆積土砂の生産源とみなすことが妥当である。アユナイ川の1981年洪水の場合、堆積土砂量はおよそ50~200 m³と推定でき、これは洗掘された場の大きさに照らしても妥当な数値である。

先に流路が位置的・時間的に不連続に変動してきたことを示したが、この変動はいま

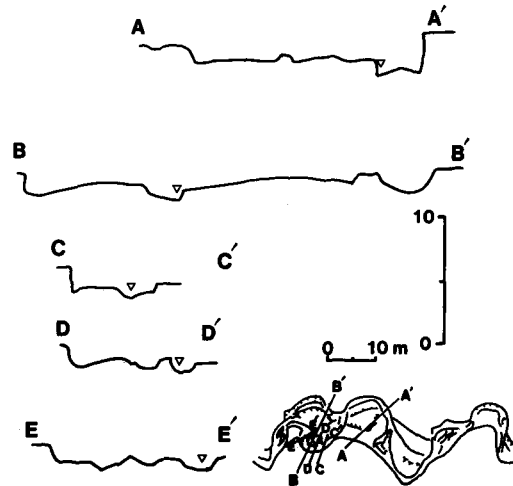


図-10 アユナイ川の溪床横断面図
Fig. 10. Cross-sections in the Ayumanai river.

述べたような土砂の堆積を伴った現象である。アユマナイ川の場合33年前や14年前(あるいはそれより若干古い時期)に大きな変動が起こった(図-6)。この時の土砂堆積は最大のもので1,000 m³程度であり、その移動距離は上述のような理由からせいぜい100 m程度と推定した。小規模な土砂移動現象ではあるが、流路は大きく横方向へ変動しているということがでいる。

ヌポロマッポロ川においても急激な流路変動(ループの短絡)には土砂の堆積が関係している。図-11に調査区域の河床横断面を示した。この横断面のうちB—B'とE—E'の左側は短絡部分の上流側で、いずれも土砂が流路を閉塞するように堆積している。特にE—E'の左側の土砂はループの奥に、すなわち短絡以前の流路に入り込みながら堆積したことが明瞭に読み取れる。これらのことより、土砂堆積はループの短絡の後に起ったのではなく、堆積が短絡の直接的なきっかけとなったと判断した。これらの堆積地はその後の流路形成のために堆積地の一部が消失しているが、堆積した時点での土砂量はおよそ100 m³前後と推定した。アユマナイ川の事例とくらべれば、堆積土砂が左右いずれの河岸にもかぶっていないこと、堆積の規模が小さいことが特徴的である。それにもかかわらず急激に流路を転じたのは、流路が自然短絡を起こす限界近くまで湾曲が進んでいたことが直接的な原因である。

a, dの曲流部(図-9の囲み参照)の短絡の後、最も活発な流路変動が起こっているのはbの部分である(写真-2)。図-11においてC—C', D—D'はこの部分の横断面である。この部分では以前流路は中央から右岸よりにあったが、土砂の堆積(約250m³)により現在のように左岸の方に移動した。先に述べたうちの土砂堆積を伴う連続的なタイプの流路変動である。

図-9でbはa, dが短絡を生ずる以前からそれらと同様曲流部であり、また土砂堆積の規模がa, dより大規模であるが短絡を生じていない。またa, dの短絡後に流路の変形が活発で、次第に曲線部dの形状に近づくつつある(曲流部の起点が接近しつつあることも含む)。以上のことから次のように結論を出した。すなわち、ヌポロマッポロ川の場合曲流部が次第に深いループに変形していき、それがかなり進ん

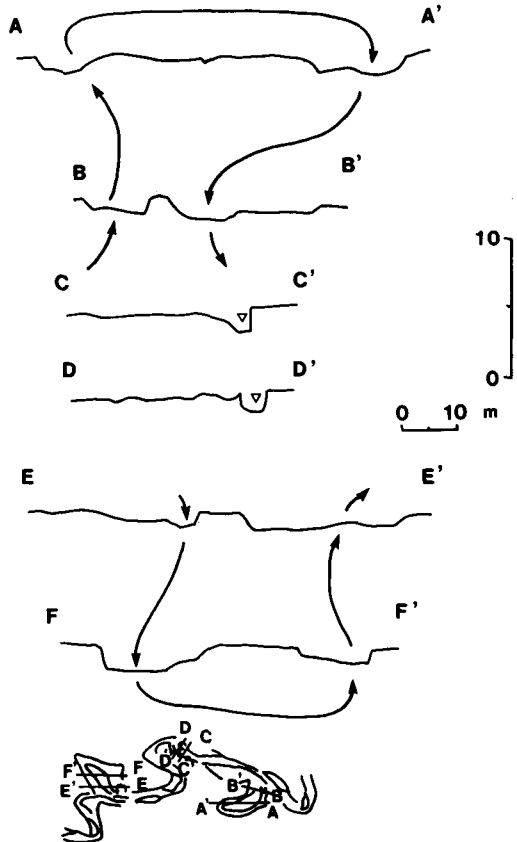


図-11 ヌポロマッポロ川の河床横断面図
Fig. 11. Cross-sections in the Nuporomapporo river.

だ段階に達して短絡という形の急激な流路変動が生じる。

アユマナイ川の流路形状が浅い正弦波または円弧に近いのに対し、ヌポロマッポロ川のそれは著しく深い屈曲を呈し、迂曲河道²⁴⁾のような流路形状に近い。このことはアユマナイ川の方が土砂移動および流路変動がより活発であることと強く関連している。

流路変動に関して砂礫堆²⁴⁾が密接に関与していることが知られている。この2溪流でも流路内に砂礫堆が形成されている部分が認められたが、これらは河岸侵食に伴う流路の移動に影響を与えているが、洪水時の現象に比較して影響力は小さい。ヌポロマッポロ川において流路が迂曲状に変形していく過程は不明な点が多いが、横断面 C—C', D—D' (図-9) でみられたように土砂堆積が曲流部の変形に大きく関係している。砂礫堆に伴う変形より洪水時におけるダイナミックな洗掘—移動—堆積という一連の現象が流路変動に関連しているのが大きな特

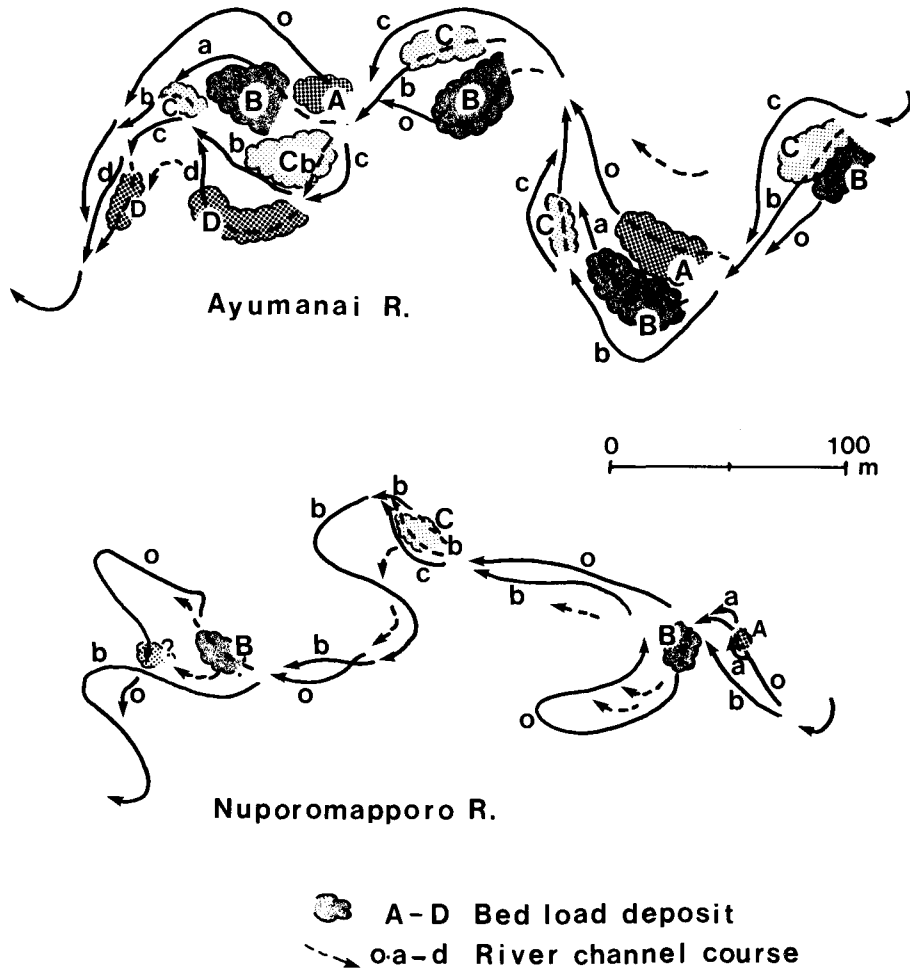


図-12 土砂堆積と流路変動過程

Fig. 12. Outline of relationship between the bed load deposition and channel course change.

徴である。

また流路の自然短絡に関しては石狩川で詳しく調べられている²⁴⁾。そこでは迂曲河道が短絡されて河道変遷を起してきたが、短絡の経過は侵食や流路の接触などであり、堆積を伴うことがない。他方ヌポロマップロ川では堆積が引き金となっていたことが大きく異なる点である。

アユマナイ川とヌポロマップロ川を比較すると、いずれも約1%の同じくらいの河床勾配でありながら、その平面形状は全く異なっている。この相違は土砂移動に関する両溪流の特性の違いによるものであると考えられる。図-12は両溪流における土砂堆積と流路変動の過程、関係を簡略化し模式的に表わしたものである。両溪流を比較すると、ヌポロマップロ川での土砂堆積、すなわち土砂移動が少ないことがよくわかる。この川が一般的な溪流とは異なった著しい曲流河道を呈しており、またより土砂移動性の高いアユマナイ川の河道の状態は荒廃溪流のそれに似ている。このようなことから、土砂移動の特性が河道の安定性、さらには場の特性を支配する大きな要因であると考えられる。上流から拡幅部への土砂供給が激しければ、拡幅を始める部分は土砂が堆積し易く、ちょうど扇頂部のように流路変動の中心的な場となる。この変動の影響を受け、下流部でも洗掘、堆積、流路変動が活発に繰り返される。要するにこれは扇状地や扇状堆積地、扇状地性平野と同じものである。

これらの調査の結論として土砂移動の激しくない氾濫原では、1.土砂移動の頻度が流路変動に大きく影響し、2.小規模な土砂移動でも大きな流路変動のきっかけになりうるということが明らかとなった。

Ⅲ 砂防工事による環境の変化

1. 河川工作物の問題点

本章では砂防工事のどのような点が魚類に対してどのように影響を与えるのかということをも具体的に明らかにしていく。各種のダムの築設、河道の付け替えや護岸等のいわゆる河川改修、汚染水の排出などの様々な行為を通じて人間は魚類に対して影響を与えている。ここでは、まず治山、治水に関わる河川工作物について、それらが魚類に与える影響を概観する。

河川工作物のうち、河川の状況を最も大きく変えるのはダムである。ダムには土砂移動をコントロールすることを目的とするものや、洪水調節を目的とするもの、様々な用途のための用水を貯水し取水するという利水のためのもの、また洪水調節や利水の目的を合せ持つものなど多くの種類がある。ここでは特に断らないかぎり土砂移動のコントロールを目的とした砂防・治山ダムを砂防ダムとし、洪水調節や利水の目的のダムを治水ダムということにする。ダムは言うならば河川に人工的な滝を造り出すことになり、魚にとっては移動の障害となり、個体群の分断の原因となっている。また、上流から下流への移動に対しては魚は滝を一気に落下することになり、大きな物理的衝撃を受けることになるが、その具体的な影響や程度についてはほとんど調べられていない。治水ダムは人造湖を造り出すことになる。流水の流れている部分が止水

となるため、環境は著しく異なってくる。奈良県十津川上流の猿田ダムでは、ダム湖の形成の後ではアユやウグイが減少し、オイカワやゼゼラが増加したことが報告されている⁴¹⁾。このようにダムは魚類相や現存量に大きな変化をもたらす。

また治水ダムは多くの場合取水が行われ、取水された水は各種の用水として消費され河川の流量が減少することになる。流量の減少によりアユの漁獲量は減少し、ウグイが激減しオイカワの分布が広がることが報告されている⁴¹⁾。小林²⁶⁾は、生物生産が十分保全される河川維持流量は不明としながらも、シロザケ稚魚の生産性の観点から望ましい維持流量を算定したが、その数値は河川管理者側の試算した数値の2倍程度であった。そして過度の取水の危険性を指摘した。特に発電ダムの場合、ダムから発電所の放水口までの区間は渇水状態となることがしばしばで、河川の生物生産機能を失わせている。

洪水流を安全に流下させるために河道断面の増大や護岸、あるいはショートカット等を行って流路の法線形状を変えることも一般的に行われている。これは河川事業だけでなく、砂防工事における流路工や農業水利事業の明渠排水工事などでも同様の工事が行われ、一般にはこれらを総称として河川改修と呼ばれている。なお、河川改修という言葉は行政的には河川事業の中の同名の事業を指し、一般的な呼称と混同するおそれがあるので、本論文ではこれらをまとめて指す場合には「河道の改修」ということにする。河道の改修は河床の微地形と水の流れ方に大きな変化を与える。このことは魚類にとっては生息環境の激変ともいうべき事態であり、その影響は大きい。小林²⁶⁾は河道の改修はサケ・マス類にとって大きなダメージを与えることを指摘し、また水野・御勢⁴¹⁾は「その生涯の生息場所として平瀬を利用しているオイカワにとっては、このような変化の悪影響は小さくてすむが、ほかの遊泳魚にとっては致命的な影響をもたらす」と述べている。また海外においても同様な研究結果^{8,56)}がだされている。このように、河道の改修は魚類にとって大きなダメージを与えているといわれている。

河川内で行われる土木工事は濁水・騒音などを生じさせ、水生生物に影響を与えるといわれている。なかでも、濁りによる影響が最も大きく、清水を好む魚類にとっては生息環境の悪化をもたらす²⁶⁾。河川で骨材の採取あるいは治水上の目的から河床を掘削することも、これと同様の影響が予想される。しかし、この種の障害は工事期間内における一時的なものが多い。むしろ濁水についていえば大型の貯水ダムに貯留された濁水が長期間にわたって流出することが問題である。また河床の掘削や砂利採取は地下水位の低下や伏流水の枯渇をもたらす可能性があることが指摘されている²⁶⁾。これらの減少は大量の取水などにも関係があると思われるが、ともかく、伏流水の枯渇はそこを産卵場としているシロザケのような魚類にとって環境の悪化をもたらすことになる。

治水に関連の深い河川工事の影響を概観してきたが、影響のおよぼし方はダムの落差、流量、地形、水の流れ方、濁水等々様々な経路を経ていることが理解できる。しかし砂防工事に限っていえば、その要素は限定されてくる。たとえば砂防ダムはほとんど貯水や取水の目的を持た

ず、またそのような目的を合せ持ったような多目的ダムとはならないから、流量の減少やダム湖からの長期間の濁水流出の問題は考慮する必要がない。工事の結果による伏流水の枯渇は、可能性としてはありうるが因果関係が複雑で、立証することが困難であり、またこのことが魚類に与える影響については報告が少なく、深刻な問題とはなっていない。まとめていえば、砂防工事が与える影響としては、ダムが移動の障害になっていることと、河道の改修によって河道の微地形と流れ方を変えることによる環境の変化の2点が重要な問題点である。

2. ダムによる影響

砂防ダムが魚類に影響を与えるのは、その落差が移動の障害となることが最大の原因であることは概に述べてきた。その具体的な例を北海道南西部、積丹半島の美国川 (図-13) の砂防ダムについて調査を行った。

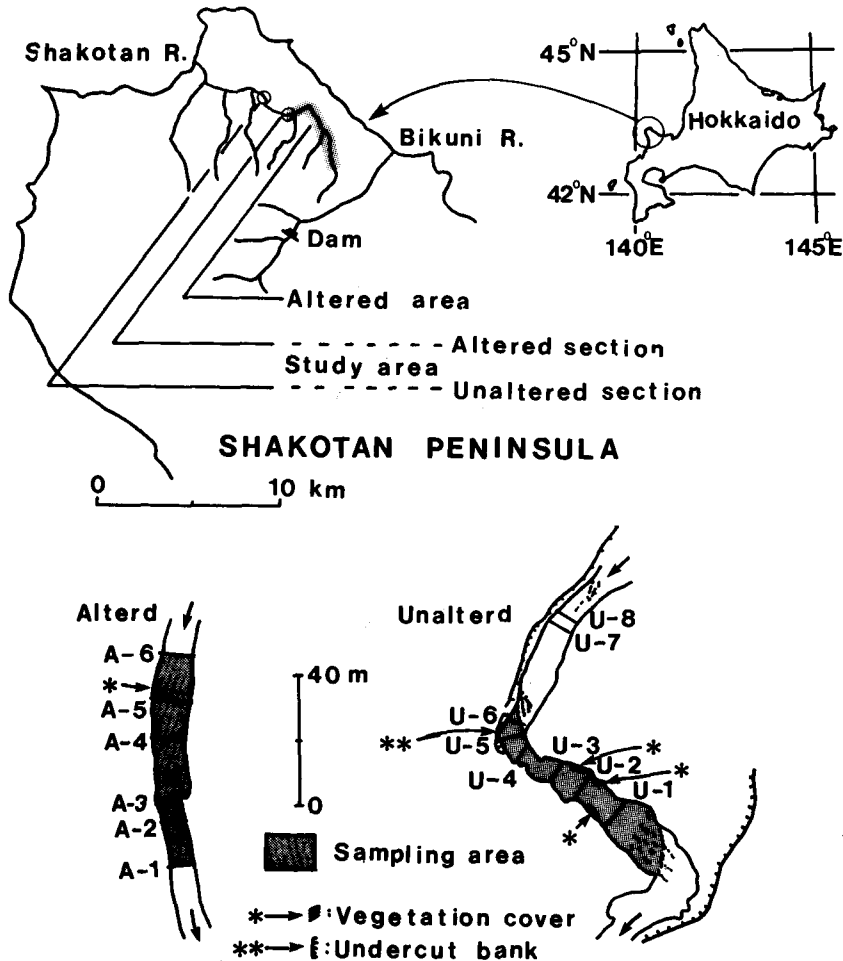


図-13 美国川・積丹川の概況

Fig. 13. Location of the dam of the Bikuni river and general situation of the study area in Shakotan river.

美国川本流の上流部、河口から約8kmの地点に、1968年から1971年の間に堤高14.0m、堤長76.0m、計画貯砂量22,100m³の砂防ダムが設置された(施工主体は北海道)。天端からダム直下のプールの水面までの落差はおよそ10m弱である。

調査は1978年8月に、ダムの上流および下流でサクラマス^{49,50)}の生存を釣り^{49,50)}と観察によって確認することとした。北海道ではサクラマスはメスのすべてとオスの一部が降海し、これらと河川残留型が再生産を行う^{49,50)}。そのため、遡上を阻む障害があればそれより上流へはメスは到達できず、そこではサクラマスは再生産を繰り返すことができない。この川は従来よりヤマベ(サクラマスの幼魚の北海道における呼称)の釣り場としても有名である。釣り人からの聞込みではダム建設以前はダムの上流域にもサクラマスは生息していたことは明らかであった。また調査の時点では河口からそのダムの間には魚類の遡上の妨げとなる障害は存在していない。

調査結果は、ダム上流ではイワナのみが確認されただけで、サクラマスは確認できなかった。下流ではサクラマス幼魚を2尾(尾叉長〔吻端から尾の切れ込みまでの長さ〕が12.0cmと11.0cmの個体)を捕獲することができた。サクラマスの生活環から必然的に幼魚の生存していたダム下流部では海からの親魚の遡上が可能であること、そしてダム上流には親魚が遡上していないことを示している。すなわちこのダムが遡上の障害となっているということがいえる。

山地溪流型の状態のまま海に注ぐような小河川で、河口付近にこのようなダムがあると遡河魚にとっては甚大な悪影響を受けることになる。また河川内だけで生涯を完結させる魚にとっても、ダムが多数設けられて分断が激しくなると、個体群の維持が困難となり、最悪の場合には絶滅を招くことになる。

3. 河道の改修による影響

1) 調査地と調査方法

改修が魚類に悪影響を与えていることはよく知られているが、改修の何がどのように影響しているかという、具体的で詳しいことはあまり調べられていない。溪流の特徴は溪床の微地形が複雑で水の流れが非常に複雑に入り乱れていることである。そして、このような環境に適応しているのが溪流魚である。筆者は、河道の改修は河道の微地形と水の流れ方を変え、その結果として魚類の生息環境に影響を与えると考えた。このような観点から、実際の溪流において、改修の行われた区間と自然状態の区間で調査を行い、改修の具体的な影響の与え方を明らかにしようとした。

調査は北海道西部の積丹半島の小溪流積丹川(流域面積75.6km²、流路長15.4km)の中流部で行った(図-13)。保護水面に指定されているため水産動植物の捕獲は厳しく制限されている。

農地の排水促進と洪水による被害の防止のため、1966年から1975年まで積丹川の中～上流部で河道の改修(農業水利事業の明渠排水事業による)が行われた。細かく蛇行していた河道

は滑らかな曲線形状にされ、断面は台形状に掘削され、両岸とそれに続く河床の一部がコンクリートブロックで張られた。これに対してその下流部では、一部を除いてほとんど自然の状態のままになっている。非改修地区ではヤナギ類、ハンノキやカエデなどの落葉広葉樹やササ類が河岸を覆っているが、改修地区では河岸の植生は取り除かれ、わずかにブロックのすきまにハンノキ・ヤナギ類の幼樹が侵入しているだけである(写真-3,4)。

図-13に示したように、改修部分と非改修部分にそれぞれ一ヶ所ずつ調査区間を設定した(以下、この2つの調査区間をそれぞれ改修区間と非改修区間ということにする)。改修区間の平均河床勾配は0.5%で河川形態型²⁰⁾はBb型、淵と瀬の区分は不明瞭でわずかに砂礫堆状の河床地形によって斜めに横切る浅い部分が形成されている程度である。非改修区間はそれぞれ1.2%、Aa—Bb移行型で、淵と瀬の区分は明瞭である。

まず流路形状を測量し、植生によるカバー(注:章末参照)やえぐれた河岸などの位置を把握した。流路横断面における流速分布を把握するため、断面に対して10cm×10cmのメッシュを想定し、その交点における流速を測定した(このほかに5cm(水平方向)×5cm(垂直方向)、10cm×7cm、20cm×10cm、15cm×20cmのメッシュを補助的に用いた)。このような観測断面を流路にそって複数設けることによって、縦断的な流れの状態をとらえるようにした。

2つの調査区間にいる魚は投網とすくい網を用いて捕獲し、一部はホルマリン溶液で固定し、魚体を計測した。残りは現地で尾叉長を計測した後に放流した。サンプリングを行ったのは図-13でハッチングした部分で、その面積は改修区間450m²で、非改修区間で560m²である。なお、本調査では生息密度の統計的な推定は行ってはいない。単純に水表面積あたりの生息数で表わしている。

2) 改修による環境と魚類の生息状況の変化

流路形状については以下のとおりである。改修によって流路の法線は緩やかな曲線にされた。河道断面は台形状に掘削され、河岸と河床の一部がコンクリートブロックで覆われた。その結果河床形状は縦断的にも横断的にも改修区間は平坦である(図-14,15)。縦断的に河床が平坦であることは、瀬と淵の区分が不明瞭なことと大いに関係がある。また、横断的な河床形状の相違は両区間における河床材料の大きさとそれらの堆積の状態の違いによる。すなわち、改修区間では河床の構成材料はほとんどが径5~7cmの礫からなり、わずかに少数の人頭大の礫

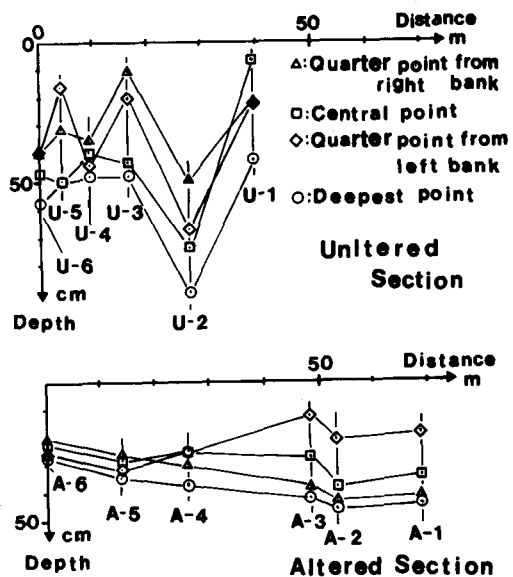


図-14 改修区間と非改修区間における溪床縦断面
Fig. 14. Longitudinal changes of depths in the altered and unaltered sections.

が混ざっているにすぎない。そしてこれらは全て沈み石²⁰⁾の状態が存在している。これに対して非改修区間では、礫径は不均一で、50cmを超えるほどのものもみられる。そしてこれらの礫の多くは浮き石²⁰⁾である。また非改修区間の一部は泥岩の岩盤が露出しており、非常に複雑な形に削られている。

また、植生によるカバーやえぐられた河岸は非改修区間では数ヶ所でみられるが、改修区間ではわずかに1ヶ所しかない(図-13)。

流れの状態の相違については以下のようにある。流れの状態を記載するにあたり、早瀬、平瀬および淵という河床型と流れの特徴を関連づけることは有効な方法である²⁰⁾。ここではまず全体的な流れの特徴を、河床型と流路の表面流速分布との関連でとらえ、次によりミクロな流れの状態について記す。

図-16に非改修区間の表面流速分布をしめした。ここで測線U-3は早瀬に、U-1, 4は平瀬に、他は淵の部分にあたる、この区間の上部の早瀬から水流が数本の流れの筋となって淵に流れ込んでいる。測線U-6において複数の流れの筋が観察されるが、その流れの筋は下流に下がるにつれ不明瞭になり、U-4に至ってはほとんど川幅全体にわたって一様な流れとなっている。この流れの一様性は次第に破られ、U-3では再び複雑な流れとなっている。U-2では水深が深くゆるい流れで、淀んだ状態となり、U-1で再び一様な流れとなる。このように河床型の違いとともに特有な流れの状態を呈し、全体として自然の状態の河川の複雑な流れの状態を示していることがわかる。

一方改修区間では、流速ベクトルの分散状態は、方向的にも大きさ的にも一様である(図-17)。この区間は全ての部分が平瀬に相当し、そのベクトルの分布パターンは非改修区間のU-4(平瀬)のそれによく似ている。

より小さなスケールで流れを観察すれば、流れの筋が岩や水没している植物、あるいはその他の障害物に衝突している部分で特徴的な流れの状態がみられる。図-18に、水中の大礫によって乱された流れを示した。速い流れ(最高110cm/sec.)が測線U-8の上流の早瀬から長径約60cmの水中の岩にぶつかっている。測線U-7はその岩の約1m下流にセットされている。U-8において主流部はその断面の中央部に位置しているが、U-7では流れは2つの筋に分かたれている。それらの流れは依然として90~100cm/sec.という高流速を維持しているが、岩の裏側

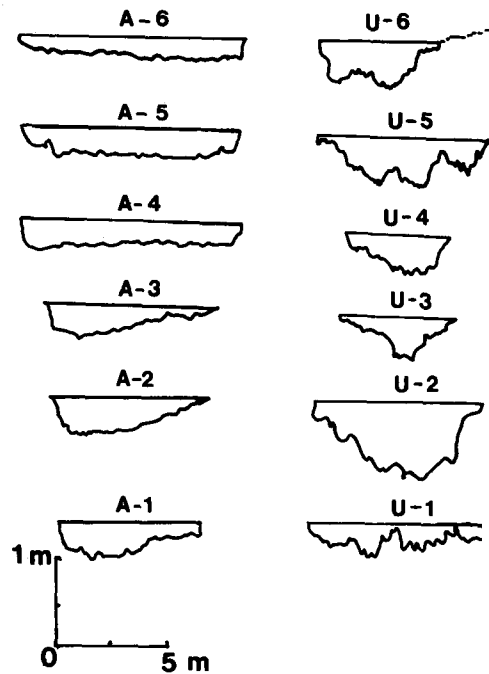


図-15 改修区間と非改修区間における溪床横断面
Fig. 15. Cross-sectional profiles of the transections in the altered and unaltered sections.

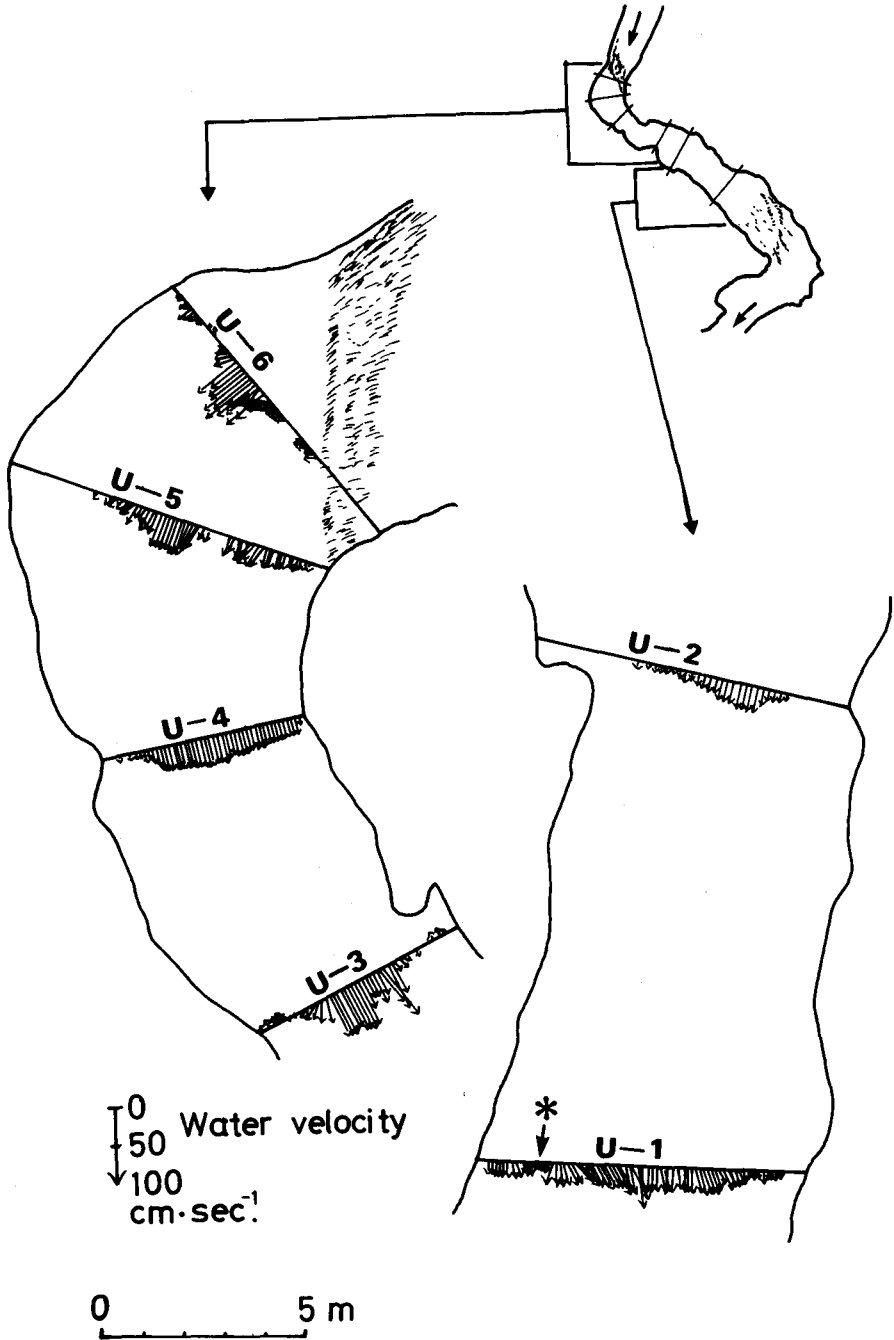


図-16 非改修区間の表面流速ベクトルの分布

Fig. 16. Surface water velocity distribution represented by velocity vectors in the unaltered section. The asterisk mark shows the place where obscure wake arises.

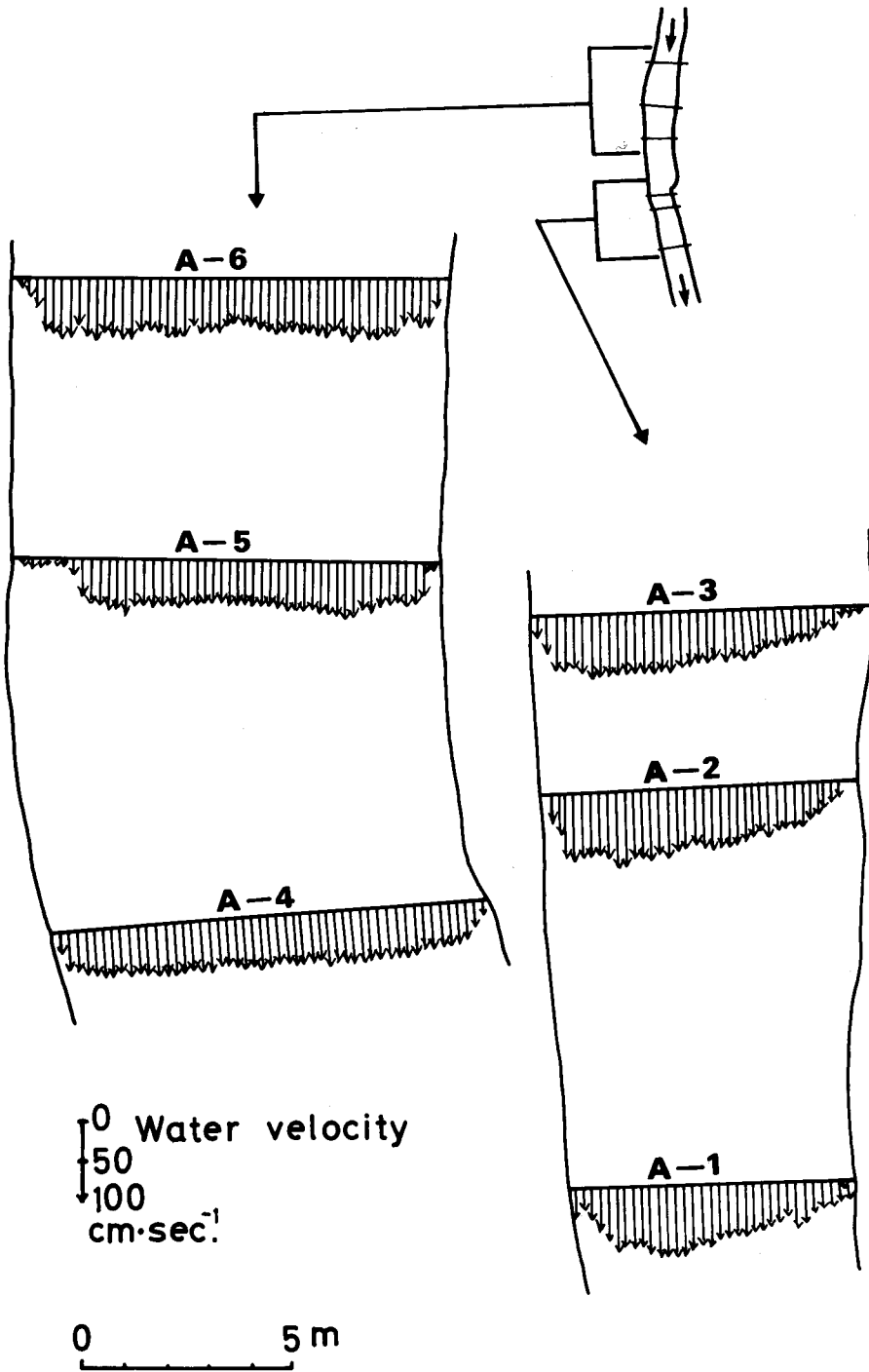


図-17 改修区間の表面流速ベクトルの分布
Fig. 17. Surface water velocity distribution represented by velocity vectors in the altered section.

(下流部)には非常に遅い流れが生じている。低流速部から高流速部への移りかわりは不連続でかつ急激である。そして高・低流速部の境の水面には、いくつかの渦がゆっくりと下流に、放物線形を描いて、移動しているのが観察される。流体力学では、これらの渦や低流速部はそれぞれ“カルマンの渦”, “後流部”と呼ばれている。このような流れの状態は、非改修区間ではしばしば観察された。

図で示せば、U-1の右岸側(図-16で*印をしたところ)において、測線の上流にある水中の石によって造られた後流部状の流れが認められる。図-19にこの部分の詳しい状況を示した。水中の石のほかにも、一部が水没している植生のカバーも流れの状態を変化させる。図-20にこの種の植生(ヤナギの幼樹)のカバーによって弱められた流れ(A-5)と、障害物に妨げられていない流れ(A-3)を示した。

非改修区間の上流の淵では、複数の流れの筋がぶつかりあい、そして減衰している。U-6における流速分布がその状態を表わしている(図-16, 21)。U-6の流速分布をみれば、急激な流速の変化が認められる(図-21中のAとBの部分)。Aの部分は、主流部とその隣の低流速部との流速の大きな差により、主流部の流れが減衰している部分である。Bの部分では、異なった方向を持った流れが衝突しているところである。Aのような拡散は、流路幅が広がるようなところでよくみられる(たとえばU-3の右岸側, 図-16参照)。

複雑な流れの状態を呈している自然河川では、上述のような小さなスケールで流れを乱す要因となるものは非常に多く存在する。河道の改修は、このような要因となるものを除去し、その結果流れは層流に近い状態となっている。

ところで、調査期間中に豪雨による洪水があった。そこで、両区間における洪水時と平水

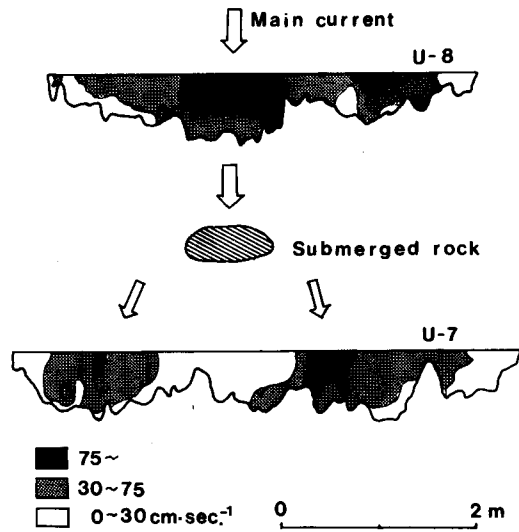


図-18 大礫によって分割された流れの状態
Fig. 18. Transcurrent distribution of water velocity. U-8 is set at 0.5m above a submerged rock, U-7 at 1m below the rock.

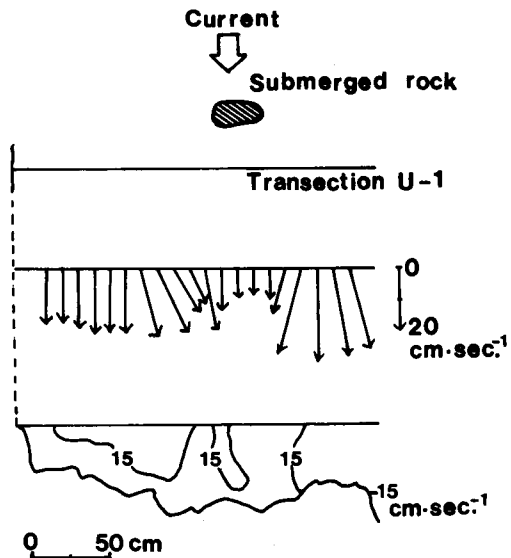


図-19 水中の石によって乱された流れの状態
Fig. 19. Condition of disturbed current by a submerged rock.

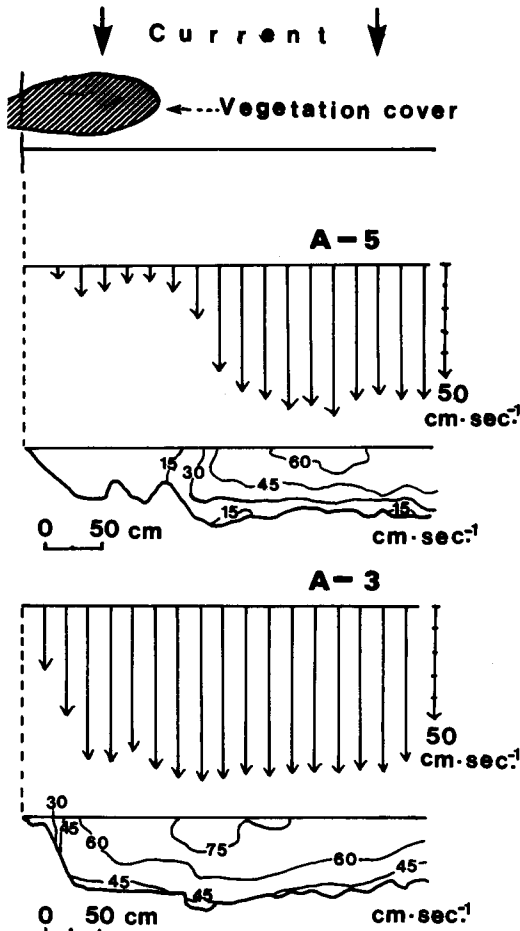


図-20 植生によるカバーによって乱された流れの状態(A-5)と、障害物のない流れ(A-3)
 Fig. 20. Weakened current condition by vegetation cover (A-5), and not weakened current (A-3).

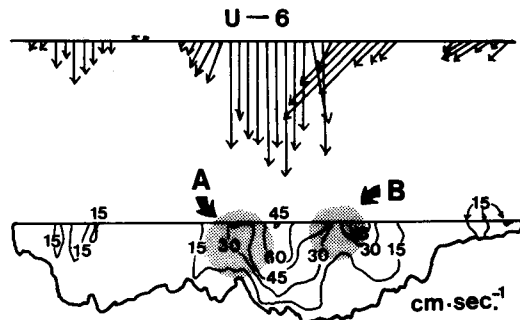


図-21 流れの筋の衝突による流れの乱れ
 Fig. 21. Water velocity distribution in the upper pool of the unaltered section. Several current bundles which have different directions and magnitudes bring on abrupt changing of velocity.

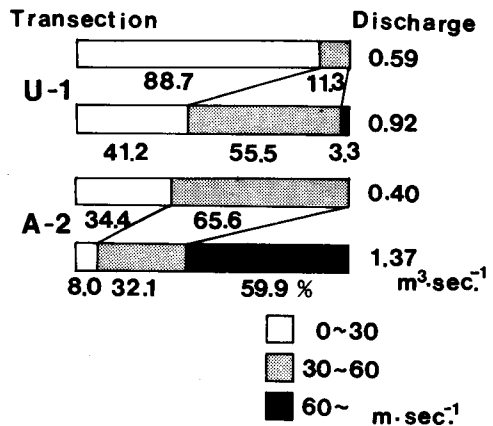


図-22 平水時と洪水時の流速分布の相違
 Fig. 22. Velocity fluctuation due to the increase of discharge.

表-1. 両区間における魚類の生息状況
 Table 1. Densities and standing crops of fishes in the two sections

		Fish species*	O.masou	B. toni	Tribolodon sp.
Density (N·m ⁻²)	Unaltered		0.31	0.08	0.04
	Altered		0.04	0.13	0.03
Standing crop (g·m ⁻²)	Unaltered		3.65	0.76	0.82
	Altered		0.48	0.80	0.30

* : Besides these, a sculpin (*Cottus nozawae*) was captured in the altered section.

時の流れの状態の相違を調べてみた。図-22に、それぞれの区間の同一の断面における、洪水時および平水時の高・中・低流速部の割合を示した。改修区間では洪水は高流速の部分が、非改修区間におけるよりも大きな割合で増加している。さらに、改修区間では低流速部が減少している。その結果、改修区間では流速が断面全体にわたって増加したことになる。流速を全く計れないようなより激しい洪水時の観察によれば、改修区間では速い流れが断面全体にわたって整然と流れているが、非改修区間では所々に止水の部分がみられた。

魚の生息状況は以下のものである。サクラマス、フクドジョウ (*Barbatula toni*)、ウグイ属の魚類(種のレベルまで同定していない)が両区間で捕獲された。その結果を表-1に表わした。これらのほかに非改修区間でハナカジカが一個体捕獲されたが、これは表には示していない。サクラマスは全て幼魚 (*parr*) で、最大の個体は尾叉長で21.2cmであった。非改修区間ではサクラマスが豊富で優占的であった。その現存量は、改修を受けず、そして厳しい漁獲禁止措置を取っている厚田川における現存量²⁸⁾とほぼ同じである。改修区間ではサクラマスは少なく、現存量は非改修区間と同程度のフクドジョウが優占的となっている。

3) 河道の改修による影響

改修区間でサクラマスが少ないのは、改修によってその種の生活様式に不利な流れとなったためであると考えた。ここでは、両区間における相違を流れの状態と生活様式との関連で、次いで環境の安定性との関連で論じる。

サクラマスの幼魚は肉食性で、水中や水表面を流下する水生・陸生の昆虫を捕食するのが基本的な摂食様式である。摂食のため流れの中に定位するとき、サクラマスはある特定の流速の場を選好し、小宮山³⁰⁾によれば、尾叉長10~12cmの個体についてはその流速域は30~50cm/secである。

流れが速ければ速いほど単位時間当たりに流れる流下物が多いのは当然である。ある程度の流速を持った流れの筋が障害物に衝突したり別の流れの筋とぶつかるころには、渦、後流部やその他の様々な乱された流れの状態が生じる。言い換えれば、そのような場は餌となるべき物体の流れる頻度の高い場であり、また同時に渦や後流部などにまきこまれて物体が滞留しやすい場であるといえる。したがってこのようなところはサクラマス幼魚のような流水性の魚類にとって、以下のような点から、非常に有利な場であると考えた。すなわち、低流速から高流速まで入り乱れているから、魚は自分自信を最も好ましい流速の位置に定位させ、それと同時に身近に流下してくる餌と接触する機会が大きいからである。非改修区間ではこのような有利な場が随所に存在するのに対して、改修区間ではこれを複雑にする要素が取り除かれている。このことが改修区間でサクラマスのキャリング・キャパシティ、すなわち環境の持つ最大収容力が低いことの原因である。

流れの状態の多様性は、おそらく、個体群密度の自己調整機能との関連で高いキャリング・キャパシティを保つのに有利に作用するのであろう。CHAPMAN⁵⁾は、空間と餌の結びつき(space-

food convention) が密度調節を行うものとして最も重要であろうと述べている(春から初秋にかけて)。流れの多様性は、言い換えれば、魚にとっては空間構造が多様であることであり、そして先に述べた摂食における有利さは空間と餌の結びつきにほかならない。MUNDIE⁴²⁾も、ギンザケ幼魚と餌の関係に関して乱れた流れの有利さを指摘して、“溪流の収容力は人工的に流れの縁に巻き返しの渦を造ってやることによって増加するであろう”と述べている。水中の石や水中に一部を没している植物体などのような流れを乱す要素はしばしば“カバー”として機能する。十分なカバーは河川のキャリング・キャパシティを増大させることが知られている^{4, 8, 36, 56)}。非改修区間には多くのカバーが存在しているが、改修区間ではわずかに1ヶ所、図-21で示した植生によるカバーがあるにすぎない。そしてこのカバーの下で改修区間で最大のサクラマス⁵⁾の個体が捕獲された。カバーの有利性が示された事例として興味深い。

次に、より大きなスケールで環境とキャパシティの問題について考察を加える。非改修区間では淵—平瀬—早瀬という一連のサイクルがあるが、改修区間では全ての部分が平瀬であった。今回の調査では早瀬は流速が速いためU-3を除いては流速分布を測定できなかったが、同じ理由からサクラマス幼魚にとっても早瀬は定位したり摂食をする場ではないだろう。しかし水生昆虫の生産性は早瀬のほうが高い⁶⁶⁾のである。すなわち、早瀬も魚類の餌の生産の場としての役割を担っているものと考えた。事実、淵に流れ込む餌の量は、直上流に早瀬を持つものの方がそうでないものより多いことが報告されている³⁶⁾。そして流下昆虫の流入が多ければその淵のサクラマスの現存量が高いことが明らかにされている¹⁶⁾。

淵については、魚類の生息環境として重要な要素であることを示す多数の報告がある。小島・杉若²⁹⁾はサクラマス幼魚の現存量は淵のほうが瀬よりも高いことを報告し、またELSER⁸⁾は河道の改修は水深のある低流速の水域を減少させ、同時にマスの現存量も減少させたと報告している。またSTEWART⁵⁸⁾は“水深のある部分は驚きや恐怖に対するカバー(fright cover)として機能し得る”としている。RUGGLES⁵²⁾はギンザケ幼魚の飼育実験を通して以下のような大変興味深い結論を出した。淵を模した環境は高密度を維持し、最大の個体群平均サイズは瀬を模した環境で記録され、そしてスモルトの生産のためには上流半分が瀬、残り半分が淵の環境が優れている。以上のように、淵、平瀬、早瀬といった形態的な環境構成要素はそれぞれに魚類の環境としての意味を持っているのである。改修区間における低い現存量は環境構造の単調さの不利が反映された結果である。

先にも述べたように、洪水時には改修区間は河道断面全体が速い流れで満たされる。このような空間は流水性の魚類にとって安定した環境であるとはいえない。なぜならば、魚はそのような高流速の中にとどまることが難しいからである。ところでフクドジョウが両区間において同程度の現存量であったが、このことはフクドジョウの生活様式に関係していると考えた。フクドジョウが河床にはりついて生活を行なうという底生的な生活様式であること、また河床付近には流体力学では境界層とよばれている低流速の層があることが予想される。そしてフク

ドジョウの形態は頭部が扁平で、底にはりつくと流されにくいようになっている。このように、改修の影響はフクドジョウはサクラマスほど大きく受けていないと考えた。

注、カバー：カバーが魚類に与える影響については多くの研究がなされているが、その厳密な定義はなされていない。ここではカバーを“魚がその下に身をおくことによって自身の安全性がより高められる場”と規定する。例をあげれば、LEWIS³⁵⁾はカバーとして、流木が水中でからみあっているもの、水面から30 cm以内に垂れ下がっている植物体、下のえぐられた河岸、水中の岩棚や樹木の根、流下して水中や水面に引っ掛かってたまった様々な物などをあげている。

IV 魚の遡上実験

落差が10m程度のダムであれば遡上不可能なことは明白である。最も問題となるのは、ダムの落差がどの程度ならば遡上の障害とならないのかということである。魚類の遡上能力はジャンプ力に関する調査・研究は、日本ではごく少数の例^{32,34)}を除いてほとんど行われていない。サケ・マスについてもジャンプ力の限界は1.5 m程度であるとか2 mであるとか一般にいわれているが、正確なことはよくわかっていないのが現状である。しかしこれは、河川工作物の影響を正確に把握するためにも、また魚類の保護に配慮した河川工作物を開発するためにも、把握しておかなければならない重要な点である。そこで落差が数10 cmから1.3 m程度の工作物を魚が越えるかどうかを実験的に調査し、魚の遡上能力を検討した。

調査は、北海道東部の知床半島の小河川ルシャ川(図-23)の床固工群をカラフトマス親魚が越えることが可能かどうかを知るために行われた。ルシャ川は流域面積約21km²、流路長約8.8 kmの規模を持っている。資源保護水面に指定されており、サケ・マスが大量に遡上している。資源の保護、増殖を目的に河口付近にサケ・マスの親魚の捕獲、採卵、ふ化のための施設があり、冬期を除いて管理人が常駐している。また、沿岸ではサケ・マスの定置網による漁業が行われている。この川の治山工事の概要については近藤ら³¹⁾の報告に詳しいが、要約すれば以下のようなものである。

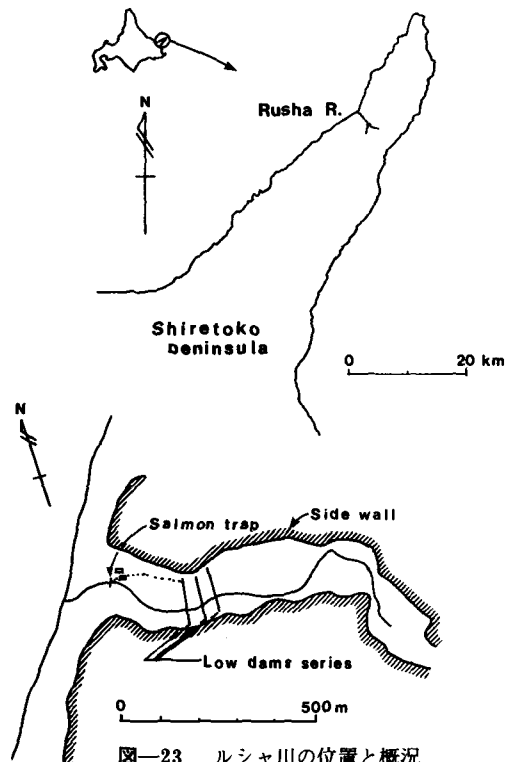


図-23 ルシャ川の位置と概況
Fig. 23. Location and outline of the Rusha river.

融雪・豪雨のたびにふ化施設の流出，定置網の破損等の被害が発生していたため，地元の強い要請を受け，ふ化施設を土砂害から守ること，および沿岸定置網の流木等による被害を防止することを目的に，1974年から民有林治山工事が行われた。計画にあたっては次の3点に留意されている。

- ◎ 保全対象に近い下流の不安定土砂堆積地の安定を図り，災害を防止する。
- ◎ サケ・マスの遡上を妨げないようにする。
- ◎ 国立公園内なので，自然景観を損ねないようにする。

そして検討の結果，床固工を複数設置することによって土砂移動の調節を図るという低ダム群工法¹⁾を適用することになった。

床固工群（ダム群）は河口から上流に向かっておよそ300～450mの区間に約50mの間隔で3基設置されている（図-23，写真-5,6，以後これらのダムを下流から順に第1，第2，第3ダムとする）。設置年度や各諸元は表-2に示したとおりである。いずれのダムも堤高は2.5mであるが，水通し部分に高さ1m，底幅6m（第3ダムは5m）の切り欠きを設け，切り込み式魚道とし，魚類が無理なく遡上できるように配慮した。すなわち切り欠きを設けた部分の堤高は1.5mである。

表-2 ルシャ川の低ダム群の諸元

Table 2. Inventory of the low dams in the Rusha river

工作物	年度	事業名	工種	規格・構造等	備考
第1ダム	1974	復旧治山	床固工	L=151.0, H=2.5, B=1.0, V=536.2	L: 堤長 (m) H: 堤高 (m) B: 天端幅 (m) V: 体積 (m ³)
第2ダム	1978	復旧治山	床固工	L=156.0, H=2.5, B=1.0, V=563.0	
第3ダム	1979	復旧治山	床固工	L=159.0, H=2.5, B=1.0, V=577.5	

調査時点における当面の目的は，魚の遡上の能力を知るためというよりは，遡上に対してこのダム群がどの程度影響をおよぼしているかを正確に評価し，魚道の設置やダムの改修の必要性を検討する基礎とすることであった。具体的な方法はダム群の下流にカラフトマス親魚を放流し，これらがダムを遡上できるかどうかを観察することとした。1980年10月1日にオス，メスそれぞれ30尾に標識を付けて，河口から約100m弱の地点にあるサケ・マス親魚捕獲用の施設（以後これをトメという）と第1ダムの間に放流した。また，放流時点でのトメの破損部分から遡上したと思われる多数のカラフトマスがトメとダムの間にいたので，これらもあわせて観察の対象とした。遡上したか否かの確認は，直接観察，16mmムービーカメラ，35mmカメラなどによった。また，産卵床や産卵行動を行っている個体の確認および捕獲によって確認しようとした。捕獲はダムの上流に刺網をかけてこれを行なった。また産卵床に対しては放流の時点で第1ダムより上流には1つもないことを確認している。

遡上行動や遡上の可否に大きく影響を与える落差やダム直下のプールの形状を測量した。

ここで、落差とはダム直下のプールの水面と天端との比高を指す。プールの測量は、ダムに平行の、すなわち流路に対して横断する方向と直角の縦断方向に1m間隔のメッシュをきり、その交点の水深を測ることにより行った。また、実験期間中は1日に1度、ダムの放水路で流速と水深を計測し、流量を求めた。

放流されたカラフトマスは放流当日は活発なジャンプを行ったが、ついに第1ダムを越えることはできなかった。翌日はほとんどジャンプが見られず、またダムの上流においても遡上を裏付ける証拠は得られず、第1ダムについては遡上は不可能であると判断した。第2ダムについて同様の実験を行うために、第1ダムの下流と隣接する河川からなるべく活力のある個体を捕獲し、第1ダムと第2ダムの間に放流した(34尾)。そして、第2ダムを越すことを確認した。第3ダムについても第2ダムと同様に9尾のカラフトマスを第2ダムと第3ダムの間に放流したが、ジャンプは全く観察されなかった。そればかりか、下流への移動が目立って行われた。すなわち、第3ダムに関しては遡上の可否は不明という結論に達した。

図-24に第1ダム、第2ダム、第3ダムにプールの形状を示した。ここにあるように、第1、2、3ダムの落差はそれぞれ1.3m、0.4m、0.65mである。数10cmの落差は遡上欲に駆られたサケマスにとってはほとんど問題になる落差ではなく、第2ダムでの観察からも、遡上に困難を伴っているようには見られなかった。第3ダムについても本来ならば遡上は容易であろうと思われるが、そのような結果が得られなかったのは、供試個体の体力の低下や遡上欲の減退によるものと考えた。1.3mの落差の第1ダムをカラフトマスは越すことができなかったが、そのジャンプの状態を詳しく観察すると典型的な2つのタイプがあった。プールの水面を破って空中へ躍り出る時のスピードが遅く、またその軌跡とプールの水面との角度が大きく(垂直に近い)、水面から最高でおよそ0.9m程度まで達するジャンプ(写真-7)と、初速は速いが水面との角度の小さいジャンプで、後者の方は決して前者のように高く飛上がることはなかった。このことは、第1ダムのプールの形状が、プール自体は十分に広いが中央部に流下方向に対して直角に浅い部分があるため、魚がジャンプのための十分な助走(泳)をすることが不可能であることが原因であると考えた。

サケ・マスは魚類のなかでも最も高い遡上能力を有しており、STUART⁵⁹⁾はサケ(おそらく *Salmo salar*)がおよそ2mの落差の滝を越えているのを確認している。また、ルシャ川に隣接するテッパンベツ川の支流コタキ川においても、遡上が困難であると思われた滝を、サクラマスがこれを越えた確証を得た⁶³⁾。この滝は2段に別れており、低水時における落差はおおよそ下段が2.6m、上段は1.7mである。この滝は下流側に緩やかな傾斜を持って流れ落ちており、砂防ダムのような切り立った下流法を持つ構造物と比較すれば遡上にとって有利な形状をしているとはいえ、低水時の落差では遡上は不可能である。おそらく流量が増加し、遡上に適した流量の条件の時に成功したのであろう。

このような例から判断して、第1ダムでカラフトマスが遡上できなかったのは、落差が大

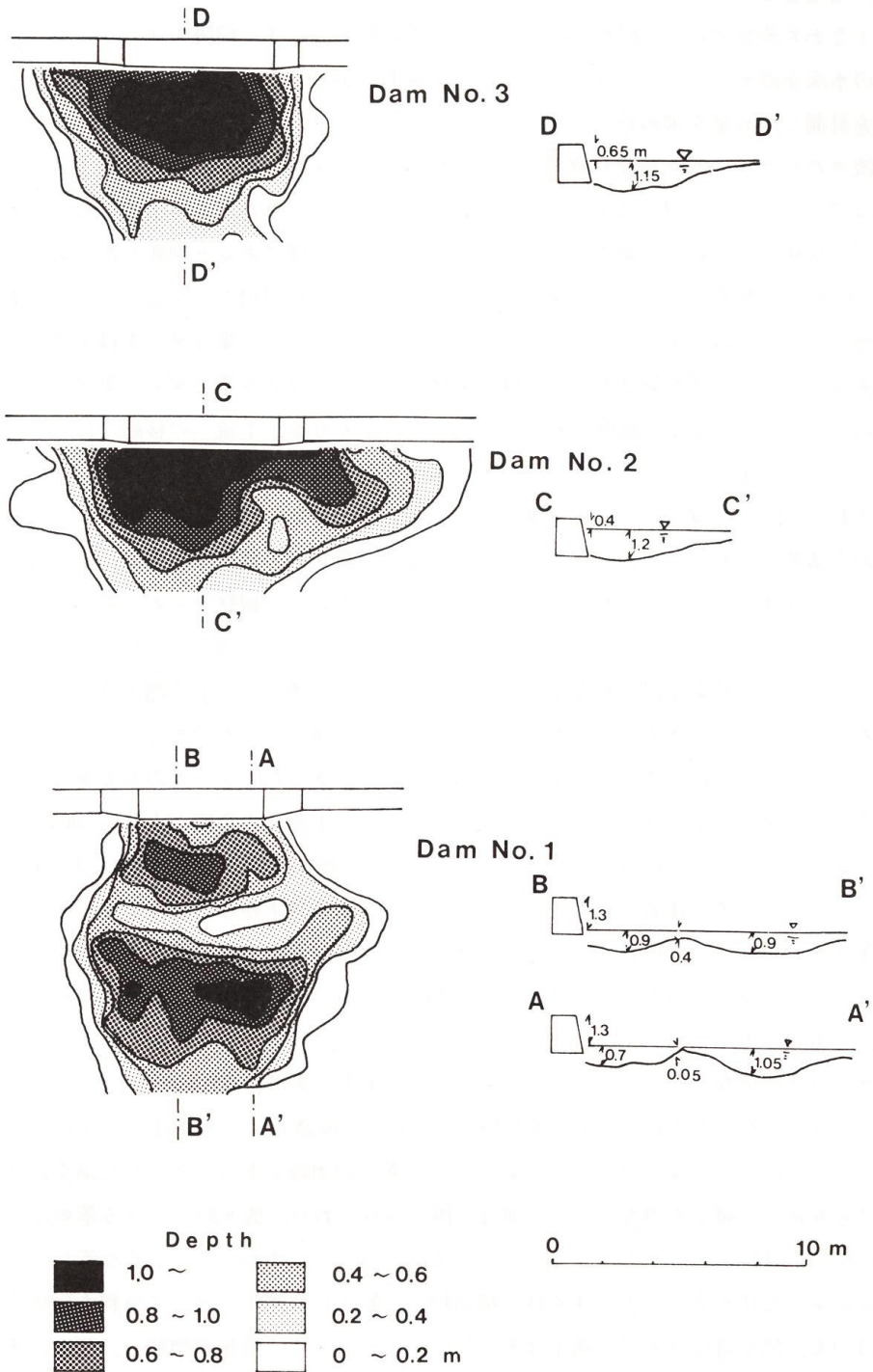


図-24 ルシャ川の低ダム群のプールの形状 (1980年10月)
 Fig. 24. Shapes of pools of the low dams in the Rusha river (1980, October).

きいこととプールの形状によると結論した。ルシャ川のように土砂移動がしばしば生じる溪流では、プールの形状は容易に変化することが予想できる。また、融雪や降雨等により流量が変動しやすく、プールの水面の水位(すなわち落差)も大きく変化する。従ってこの実験時のような条件が恒常的に続くことはなく、遡上に何ら困難を与えない状態をもたらすことは十分にありうる。しかし、わずか1.5m程度の構造物でも、遡上能力の高い魚類が遡上できない状態になることがあるということは強く認識しておかなければならない。

V 砂防計画の理論と実態

1. 砂防計画の理論

砂防は流域内に存在する不安定土砂(移動すると見込まれる土砂)を防災的にコントロールすることが根本課題である。これを達成するため、まず流域に対する全体的な計画がたてられる。河川砂防技術基準(案)²¹⁾では、これを「砂防基本計画は流域における土砂の生産及びその流出による土砂災害を防止することによって、望ましい環境の確保と河川の治水上、利水上の機能の保全を図ることを目的として策定するものとする」とし、策定にあたっての基本方針は「砂防基本計画は、有害な土砂を砂防計画区域内において、合理的かつ効果的に処理する」ものとしている。

砂防計画の基本的な考え方は、流域内の土砂を量的に把握し処理しようとする、いわゆる木村構想²²⁾に基づいている。河川のある特定の場所を計画基準点とし、ここより上流から流下してくる見込みの土砂量(計画生産土砂量)および計画基準点より下流に流出させてよい土砂量(計画許容流砂量)を算出し、この2つの量からコントロールしなければならない土砂量を算出するものである。

最も単純なモデルで説明すれば以下のようなものである。

$$E + P = A(1 - \alpha)$$

E : 計画許容流砂量

P : 計画超過流砂量

A : 計画生産土砂量

α : 河道の調節量を表す指数

これは砂防工事を全く行っていない状態について、上記諸量の関係を示したものである。

ここに、

B : 計画生産抑制土砂量

C : 計画流出抑制土砂量

D : 計画流出調節土砂量

なる計画量を見込むと、次のようになる。

$$E = (A - B)(1 - \alpha) - C - D$$

これは基準点が1つだけの場合であるが、複数の場合は、

Q: 当該計画基準点の直上流の計画基準点における洪水の計画流出土砂量を含めて

$$E = (Q + A - B)(1 - \alpha) - C - D$$

となる。

すなわち、流域の特性 (A, α) を知り、流域の自然的、社会的諸条件を考慮して許容流砂量 (E) を設定し、これに見合うようにコントロールすべき量 (B, C, D 等) を決定するのが砂防基本計画策定の流れである。

次に、砂防基本計画で見積られた計画生産抑制土砂量、計画流出抑制土砂量、計画流出調節土砂量に基づき、それぞれ土砂生産抑制計画、流出土砂抑制計画、流出土砂調節計画がたてられる。そしてこれらに基づいて砂防諸施設の設置場所、規模等に関する具体的な砂防施設計画が定められることになる。

土砂生産抑制計画は、土砂生産源地域の荒廃を復旧し、更に新規荒廃の発生を防止すると共に、有害な土砂の生産を抑制するための計画である。計画生産抑制土砂量が山腹工、砂防ダム、流路工等に配分される。

流出土砂抑制計画は、有害な流出土砂を砂防施設に貯留してその流出を抑制するための計画で、計画流出抑制土砂量が砂防ダム、砂溜工等に配分される。

流出土砂調節計画は、有害な流出土砂を砂防施設に一時的に貯留してその後の出水によって安全に流下させる量の調節および流出土砂の粒径を調節するための計画である。主に砂防ダムの安定勾配と洪水勾配との間の堆砂容量によって土砂が調節される。

上述のような計画に基づいて設置される砂防施設としては、ダム、床固工、護岸、流路工、山腹工等が代表的なものである。ここでは溪流に設置される施設であるダム、床固工、護岸、流路工について概観する。

ダムはその目的によって5種類：山脚固定ダム、縦侵食防止ダム、河床堆積物流出防止ダム、土石流対策ダム、流出土砂抑制・調節ダムに分類される。山脚固定ダム、縦侵食防止ダム、河床堆積物流出防止ダムは山腹や河床の土砂に対して生産および流出を抑制する目的を持ち、土石流対策ダムは土石流そのものを抑止、あるいは流出形態を土石流の形態より掃流状態に変化させる目的を有している。流出土砂抑制・調節ダムは流送される土砂を貯めることにより、土砂流出を抑制・調節する目的をもつ。特に流出土砂抑制・調節ダムは、「なるべく大容量であることが望ましい」、「ダムによる流出土砂の量の調節、粒径調整機能は堆砂面において発揮されるので、堆砂面積の増大を図るのが望ましい」とされ、ダムの大型化が勧められている。

床固工は、縦侵食を防止して溪岸を安定させ、溪床堆積物の再移動、溪岸の決壊・崩壊等の防止を図るとともに、護岸等の工作物の基礎保護を目的としている。この目的のため、床固工が一般に溪床低下のおそれのある箇所、支溪合流点の下流部、保護すべき工作物の下流部、

溪岸の決壊、崩壊および地すべり箇所の下流部等に設けられる。高さは通常 5 m 程度以下で、水叩きおよび垂直壁を設けるときの落差 3.5 m ~ 4 m が限度である。単独床固工の下流および階段状床固工群の間隔が大きく、なお縦侵食が行われ、あるいはそのおそれのある場合は、原則として落差を考えない（ほとんど落差を持たない）帯工が設けられる。床固工が設けられることによって新しく溪床勾配が形成されることが多い。従って床固工の計画にあたっては、このことを考慮して侵食と堆積の起こらない、その流路に適合したもので定めなければならないとされている。

護岸は次のような場合に計画される。溪流において、水流あるいは流路の湾曲によって、水衝部あるいは凹部溪岸、山腹の崩壊の増大または崩壊のおそれのある場合、溪流下流部の土砂堆積地、または耕地および住宅地などの区域において、溪岸が決壊し、もしくはそのおそれがある場合。また溪岸の決壊または崩壊防止のために、床固工あるいはダム工のほか、なお山脚の根固めに護岸が必要とされる場合が多い。高さは計画高水位に十分な余裕高を見込まなければならない。すなわち砂防が対象とする溪流では、立木や巨礫の混入による水位上昇、凹岸部の水位上昇などを十分に考慮しなければならないとされている。

流路工は、流路の是正による乱流防止および縦断勾配の規制による縦・横断食防止を目的として施工するものである。一般的に床固工と護岸工を併用して計画することを原則としている。流路工計画区域の上流端には原則としてダムもしくは床固工を施工する。通常底を張らない構造とするが、計画区間において、その溪床を構成する粒径に対する限界流速が計画勾配と計画水深によって生ずる流速より小さくなる場合には流路を三面張としてもよいとされる。流路工の法線は、流水のスムーズな流下を図るため、また将来における維持のため、直線に近いことが望ましく、できる限り滑らかに計画するものとされている。計画断面は現河道幅を十分考慮し、現状より河幅が狭小にならないようにする。現河道幅を狭めることは、河川の機能を破壊するだけでなく計画洪水流量に対する水深が大となるので、構造上危険サイドとなるためである。また、河幅が広く乱流、異常堆積のおそれのある場合は複断面が採用される。

基本的に流路工は溪流上流部の整備がある程度進んだ局面において実施されるものである。荒廃溪流ではもちろん、上流部の荒廃が比較的少ない場合でも、流路工完成後に上流からの土砂の流入が多いと人家集落等の中で土砂害を発生させる原因となるからである。そこで、上流部の砂防工事が計画流出土砂量に対し原則として 50% 以上（土砂生産抑制、流出土砂抑制・調節を含める）完了した後にこれを実施するものとされている。

砂防においては流域内の不安定土砂を量的にコントロールすることが基本的な方法である。治山においては砂防工事と同様の工事が行われるが、基本的な考え方に若干の相違がみられる。林野庁の治山技術基準⁵¹⁾によれば、山地治山計画の基本理念は次のようである。山地治山計画は、山地における荒廃地、荒廃移行地等を森林に復旧、整備するとともに、荒廃危険地等の崩壊およびその拡大を防止し、山地からの土砂の流出による被害の防止および軽減を図るため、

治山施設を適正に配置し、安全水準の向上、確保ができるように策定するものとしている。ここには砂防基本計画が土砂災害を防止することによって「望ましい環境の確保と河川の治水上、利水上の機能の保全を図ることを目的」²¹⁾としたよりも、より直接的に山地の保全そのものを対象としている姿勢がうかがわれる。

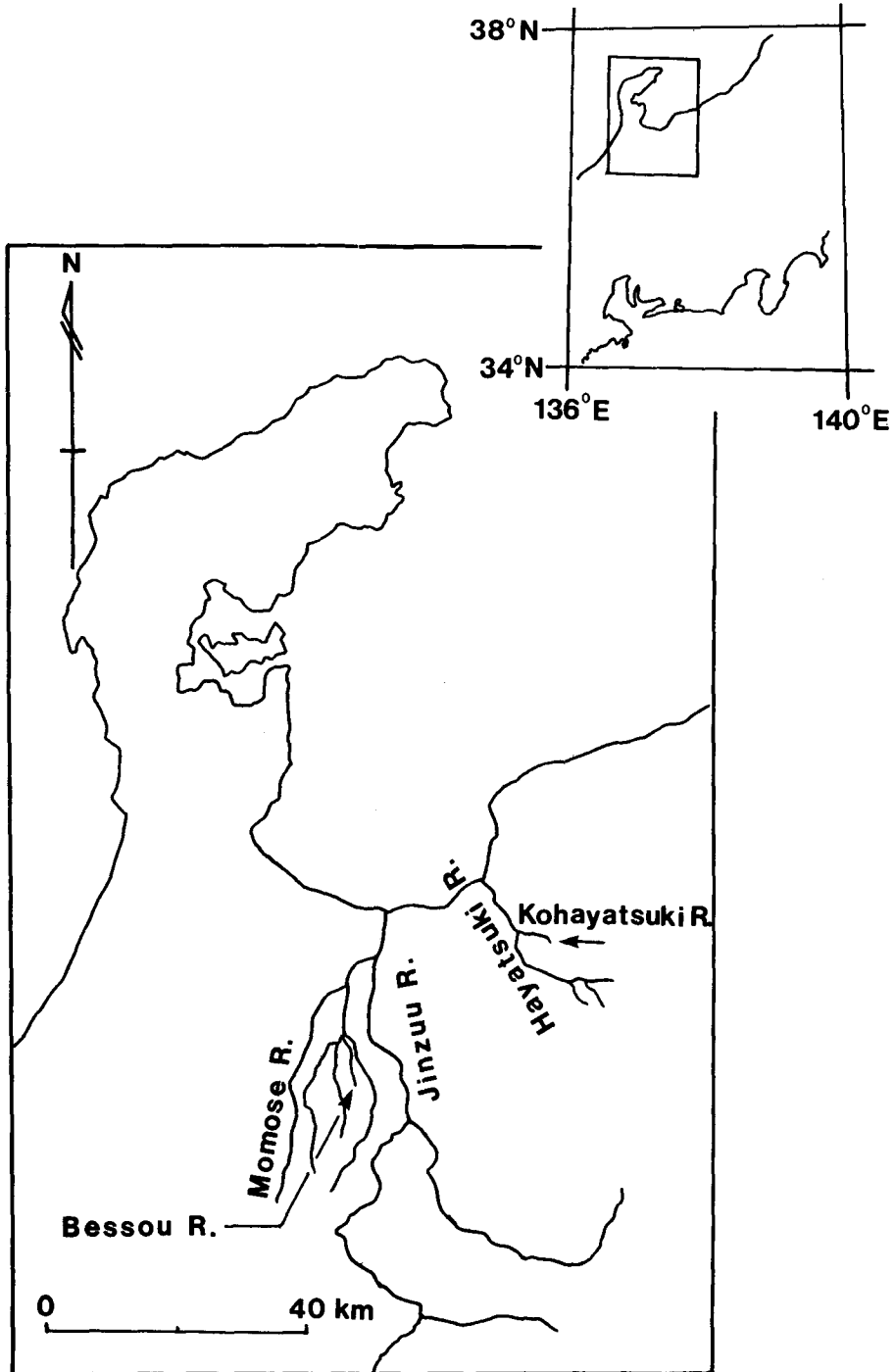
この技術基準において本論文のテーマと関係の深い溪流荒廃地の治山計画の内容は以下のようである。ここで溪流荒廃地とは、溪岸の崩壊地から崩落土砂や上流からの土砂の流出によって、溪流に土砂が堆積したり、またそれが侵食されて流出するなど不安定な形態を呈する溪流である。そしてこの溪流荒廃地の治山事業計画の基本的な考え方は、治山ダムによって堆積土砂、流路を安定化して山脚の侵食を防止し、崩壊の発生を防止することにあるとしている。また予防治山の計画の項でも荒廃地へ移行するおそれのある溪流に対し工事を行うものとしている。溪流における予防治山は、溪流が侵食されて山腹面が崩壊するおそれのある箇所に対し、侵食される前の溪床状態を想定して治山ダムを計画し、崩壊を防止するものとしている。

これ以外にも溪流での治山工事に言及している箇所はあるが、その内容は基本的に上述の内容で包括されていると見てよい。砂防計画にみられるような生産・流出土砂の抑制、流出土砂の調節等の対策は治山計画でも十分考えられているが、量的収支に基づくコントロールまでは考えられていない。これは砂防が下流域における望ましい状態を想定して計画を策定するのに対し、治山は「治山施設の適正な配置と森林の整備により、災害の防止と軽減を図るとともに水源のかん養に資すること」⁵¹⁾を目的としているという、根源的な考え方の相違からくる当然の帰結である。

しかしながら、このような相違があるとはいえ、ダム工、床固工、護岸、流路工等の具体的な工作物についての基準には大きな違いはみられない。ただし、砂防ダム（流出土砂抑制・調節ダム）では大容量あるいは堆砂面積の増大が求められる場面があるのに対し、治山ダムでは、場合に応じて「・・・堅固な地盤が存在する箇所に有効な高さのダムを設ける」などのような記述はあるが、特にダムの大型化を促進する内容ではない。これも上述と同様の、すなわち砂防が下流に対する影響を第一に考えて土砂を量的に処理するためにダムを設けるというありかたであるのに対し、治山は直接的に水源部の保全を目指す手段としてダムを設けるという相違によるものである。

2. 砂防河川の実態

前節では現在の砂防の計画の指針を、我が国で最も標準的な技術基準等^{21), 51)}をもとにまとめた。本節では実際の現場でどのように砂防工事が行われているかを述べる。技術基準は本来計画、設計等に関わる基本的な基準を定めたもので、個別的な計画等については様々な判断が必要とされている。また、計画や事業が古くから実施されているため、現在の技術水準に必ずしも沿わない場合もあることが予想される。従って砂防技術の問題点を探るにあたっては、統一的な基準を知るだけでなく、現場における実際的な計画や工種・工法を調べる必要がある。



図—25 砂防工事調査流域の位置

Fig. 25. Location of reserach area of sabo dams.

調査地は富山県内の小流域：神通川水系井田川支流百瀬川，同別荘川，早月川水系小早月川(図-25)である。これらは，流域面積が小さく，流域の中に砂防が保全対象とする集落，耕地を持つ狭長な谷底平野や盆地状の平坦地の存在する溪流である。

1) 小早月川

富山県東部の急流河川早月川の支流小早月川(図-26)は，流域面積約19.4 km²，早月川合流点から源頭部までの平均河床勾配14.4%，合流点付近の河勾配はおよそ4%である。地形は全体的に壮年期の急峻な形状を呈している。地質は流域下流部は古第三紀前期または白亜紀後期の流紋岩溶岩，中央部にいわゆるグリーンタフといわれる新第三紀の安山岩質の凝灰岩類，上部は中世代後期の花崗岩類である⁶⁰⁾。基岩の風化が進み流域内に数ヶ所の大規模な崩壊地があること，また多雨・多雪という北陸特有の気象条件のため，溪床に多量の不安定土砂が供給されている。

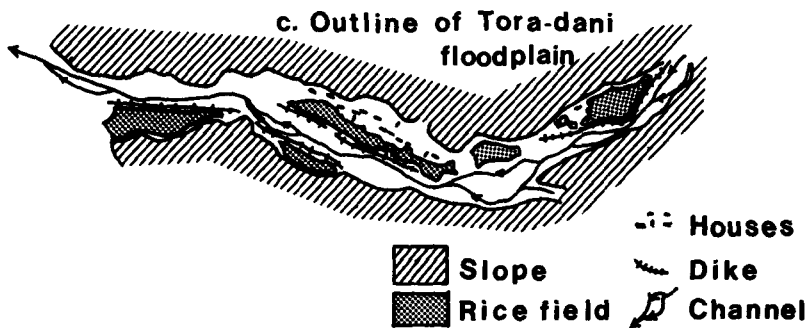
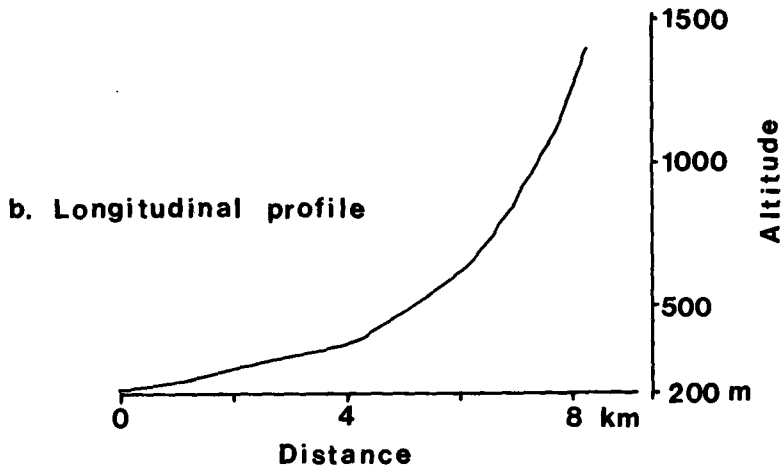
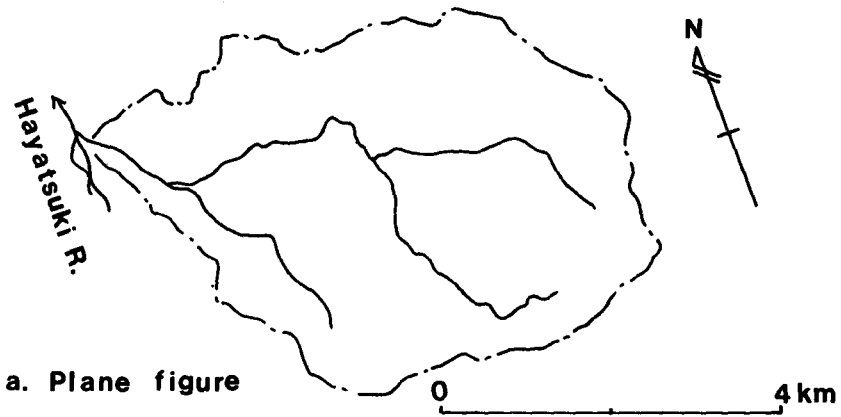
小早月川下流部には狭長な平坦地があり，集落(魚津市虎谷部落)と耕地が存在している。早月川下流部の扇状地には人家，耕地が広がっており，また国道8号線，国鉄北陸本線，私鉄等の施設が小早月川合流点から10 km足らずの近距離に位置している。これらの保全対象を守るため，1960年代後半から治山・砂防工事がなされてきた。特にこの流域は1968年より名古屋営林支局による民有林直轄治山事業が大々的に行われている。

図-27と表-3に小早月川流域の砂防・治山ダム(谷止工，床固工を含む)の配置状況，各施設の諸元等を示した。多数のダムが設置されていることが把握できる。大多数のダムは治山工事によるもので，その配置状況から縦侵食防止，土石流発生の抑止，山脚固定および山腹・溪岸崩壊の防止等を目的としていることは明白である。

直轄治山工事施工区域の下流部には7基の砂防ダムが設置されている。この配置状況から判断すれば，治山ダムが崩壊地の拡大を防ぎ，崩壊地復旧の基礎を目的とするのに対し，砂防ダムは流出土砂の抑制・調節を狙いとしている。特に虎谷4号堰堤(図-27のNo.5)は，堤高15 m，貯砂量137,000 m³と大型で，その機能に対して高い期待がかけられていると想像される。若干補足しておけば，このダムは完成後10年未満であるが満砂に近く，この流域の土砂流出の激しいことがわかる。

このような砂防工事が行われてはいるものの，技術基準²¹⁾にあるような，基本計画から中位の計画(土砂生産抑制計画等)を経て施設計画へと絞り込む方法ではない。計画生産土砂量などの基本計画に関する基本量は算出を試みられてはいるが，数値的にバラつきがあり，完全に確定されていない。すなわち，量収支に基づく砂防計画によって砂防工事が行われてはいるのである。

下流部の平坦地には集落と耕地が存在しており，これらは図-25のc)に示すように不連続な堤防で河川と隔てられている。この堤防の施工年度は不明であるが，集落や耕地を保護するように不連続かつ部分的に設置されている状況からは，古くから小規模な工事によって築かれて



図—26 小早月川流域の概況
Fig. 26. Outline of the Kohayatsuki river basin.

表—3 小早川の砂防ダムの諸元

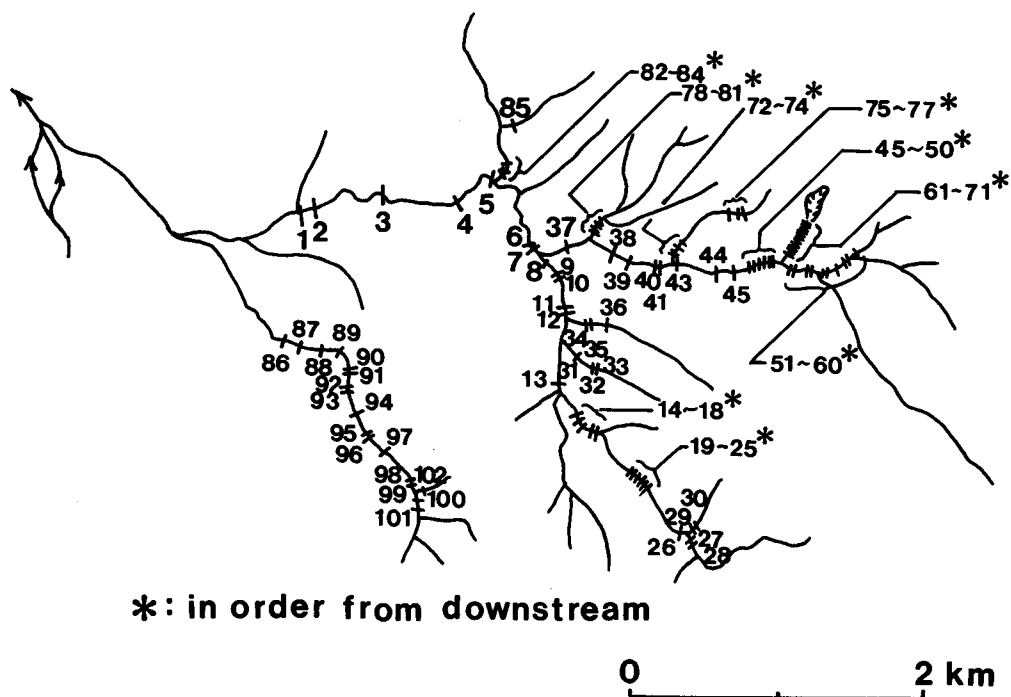
Table 3. Inventory of the dams
in the Kohayatsuki river.

No	施工主体・ 事業名	年度	工種	堤高 (m)	堤長 (m)	立積 (m ³)	貯砂量 (m ³)
1	県・砂防	1969	ダム工	7.0	44.5	1519.3	21,172
2	〃	1939	〃	5.0	39.0	1253.7	4,200
3	〃	1951	〃	6.0	55.0	1628.8	7,100
4	〃	1956	〃	7.5	52.0		15,650
5	〃	1979	〃	15.0	84.5	7784.4	137,000
6	国・治山	1972	谷止工	8.2	57.0	545.8	
7	国・砂防		ダム工	9.0	39.5	1481.0	
8	国・治山	1973	〃	7.0	29.0	595.9	
9	〃	1973	〃	4.0	45.0	497.8	
10	〃	1973	〃	10.0	50.0	1095.3	
11	〃	1975	〃	4.0	36.6	420.8	
12	〃	1975	〃	9.0	52.25	1718.0	
13	〃	1977	〃	8.0	46.4	1300.0	
14	〃	1976	〃	6.2	56.0	540.4	
15	〃	1980	〃	6.0	63.5	979.1	
16	〃	1976	〃	5.0	345.0	4545.2	
17	〃	1979	〃	6.0	66.0	883.4	
18	〃	1979	〃	10.0	72.5	2533.6	
19	〃	1978	〃	6.0	38.0	340.6	
20	〃	1982	床固工	4.0	38.0	380.7	
21	〃	1981	ダム工	4.0	37.5	349.2	
22	〃	1981	〃	8.0	52.0	1291.2	
23	〃	1984	床固工	4.0	49.0	548.6	
24	〃	1979	ダム工	5.0	36.0	436.0	
25	〃	1979	〃	9.0	48.0	1288.2	
26	〃	1984	〃	5.0	41.0	563.6	
27	〃	1983	床固工	4.0	37.5	436.6	
28	〃	1982	ダム工	8.0	34.0	767.9	
29	〃	1983	谷止工	6.0	25.5	289.0	
30	〃	1983	〃	6.0	30.0	375.7	
31	〃	1978	〃	7.0	25.0	368.4	
32	〃	1975	〃	4.5	20.9	169.4	
33	〃	1975	〃	7.2	27.4	271.0	
34	〃	1974	〃	4.5	29.0	247.8	
35	〃	1974	〃	7.2	34.0	326.4	
36	〃	1974	〃	7.0	23.0	344.6	
37	〃	1972	床固工	4.0	45.5	501.4	
38	県・砂防	1954	ダム工	7.0	34.5	1965.0	50,100
39	国・治山	1970	〃	7.0	54.6	1427.2	
40	〃	1971	〃	5.0	45.0	630.2	

No	施工主体・ 事業名	年度	工種	堤高 (m)	堤長 (m)	立積 (m ³)	貯砂量 (m ³)
41	国・治山	1969	ダム工	12.5	61.5	3091.1	
42	〃	1978	〃	12.0	30.0	1410.3	
43	〃	1971	〃	11.0	30.6	1409.2	
44	〃	1972	〃	11.0	44.0	2089.6	
45	〃	1971	〃	4.0	32.5	334.7	
46	〃	1971	〃	8.0	45.5	1005.0	
47	〃	1982	〃	6.0	37.0	592.5	
48	〃	1984	〃	7.0	33.0	567.3	
49	〃	1981	〃	7.0	47.0	748.0	
50	〃	1980	〃	13.0	69.3	3019.1	
51	〃	1974	〃	5.0	29.9	376.3	
52	〃	1974	〃	8.0	45.5	1005.7	
53	〃	1984	〃	4.5	23.0	234.6	
54	〃	1983	〃	10.0	30.0	922.5	
55	〃	1983	谷止工	4.5	24.5	209.3	
56	〃	1983	〃	8.0	29.5	597.9	
57	〃	1973	〃	11.0	30.0	1102.1	
58	〃	1973	〃	5.0	28.0	286.9	
59	〃	1973	〃	8.0	30.0	547.8	
60	〃	1984	〃	6.0	31.0	419.1	
61	〃	1974	床固工	6.0	29.5	373.2	
62	〃	1980	〃	5.5	34.0	311.2	
63	〃	1972	〃	4.0	29.0	245.7	
64	〃	1972	〃	4.0	29.0	245.7	
65	〃	1980	〃	5.0	34.0	279.5	
66	〃	1975	〃	6.0	42.0	458.0	
67	〃	1979	〃	4.5	51.0	420.6	
68	〃	1980	〃	5.0	55.0	542.1	
69	〃	1978	〃	5.0	74.0	573.8	
70	〃	1978	〃	6.0	132.5	1069.3	
71	〃	1979	〃	5.0	35.5	244.0	
72	〃	1979	谷止工	5.0	30.6	357.3	
73	〃	1970	〃	8.0	29.1	624.0	
74	〃	1971	〃	6.0	21.0	297.2	
75	〃	1974	〃	7.0	25.5	342.9	
76	〃	1974	〃	7.0	18.8	311.9	
77	〃	1979	〃	6.0	21.5	307.9	
78	〃	1970	〃	7.0	24.1	326.0	
79	〃	1969	〃	6.0	21.5	139.8	
80	〃	1969	〃	4.0	23.0	156.5	
81	〃	1970	〃	7.0	28.8	432.3	
82	〃	1972	〃	7.0	31.0	595.2	
83	〃	1972	〃	8.0	29.0	656.6	

No.	施工主体・事業名	年度	工種	堤高 (m)	堤長 (m)	立積 (m ³)	貯砂量 (m ³)
84	国・治山	1973	谷止工	8.0	27.0	506.7	
85	〃	1984	〃	5.0	21.0	183.8	
86	〃	1985	床固工	2.0*			
87	〃			2.0*			
88	県・治山	1971	床固工	5.0*			
89	国・治山	1972	ダム工	1.5	31.0	190.5	
90	〃	1973	〃	3.0	40.0	283.9	
91	〃	1973	〃	9.0	57.0	1299.3	
92	〃	1975	〃	5.0	24.4	279.9	
93	〃	1974	〃	8.0	41.0	841.9	
94	〃	1984	〃	5.0	32.5	403.0	
95	〃	1975	〃	3.0	34.0	295.4	
96	〃	1977	〃	10.0	50.5	1813.1	
97	〃	1979	〃	6.0	45.0	882.2	
98	〃	1980	〃	6.0	26.0	303.3	
99	〃	1978	〃	10.0	40.5	1282.5	
100	〃	1981	〃	8.0	42.4	839.0	
101	〃	1982	〃	8.0	42.5	1087.3	
102	〃	1983	谷止工	6.0	30.2	302.7	

* : 有効高の推定値



*: in order from downstream

図—27 小早川流域におけるダム配置図

Fig. 27. Arrangement of dams in the Kohayatsuki river basin.

きたものが基礎となっていることがうかがわれる。現在、大まかに河道は固定されているが流路はその中を乱流している。しかし、ここに流路工を整備することは当面計画されていない。

小早月川の防災工事をまとめれば、上流部では土砂流出の抑制・調節、下流部の平坦地では河道の固定が行われているといえる。しかし、土砂のコントロールは土砂量の収支に基づくものではない。

2) 別 荘 川

富山県東部を流れる神通川水系井田川に八尾付近で合流する、流路長 13.0 km の流域 12.1 km² の小渓流で、図-28 に示すように細長い流域形状を呈している。

地質は、流域の下部が新第三紀の水成堆積層、中央部は新第三紀の安山岩質溶岩および凝灰岩類(グリーンタフ)、上部は古期花崗岩類(中生代～古生代)である。グリーンタフと古期花崗岩類は断層 (ENE - WSW 方向) を境に不整合に接し、境界付近にグリーンタフが形成され

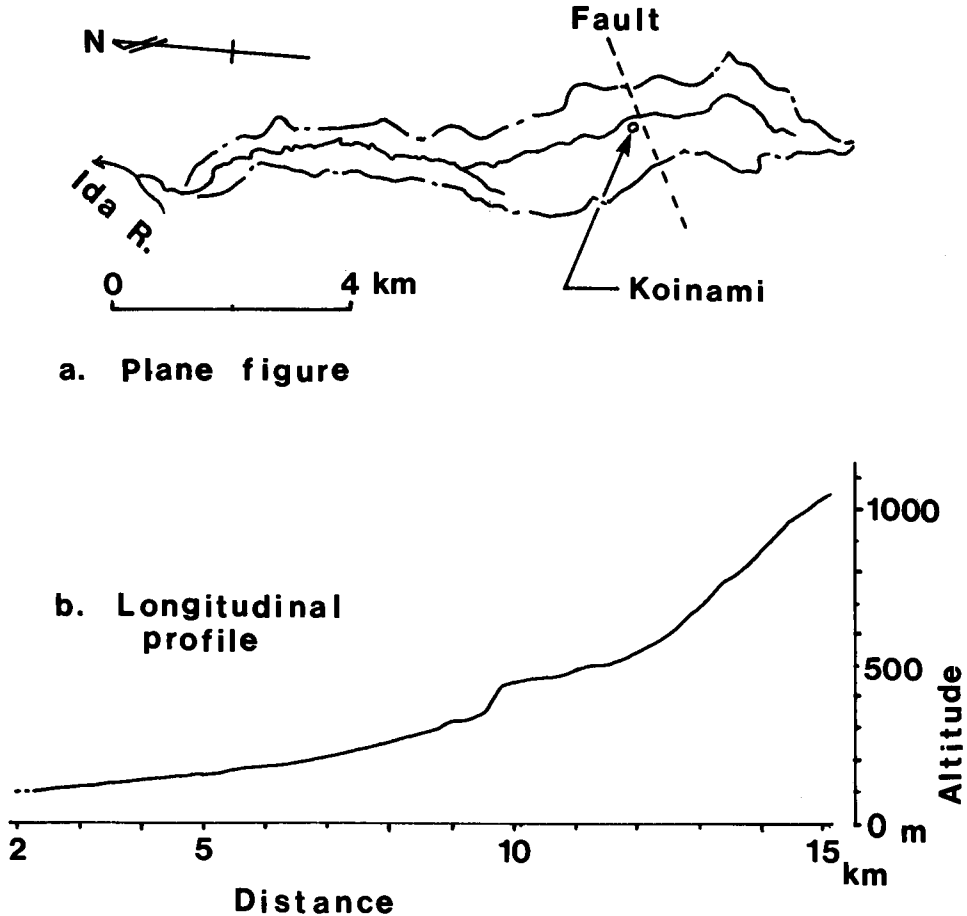


図-28 別荘川流域の概況

Fig. 28. Outline of the Bessou river basin.

る以前の非火山性堆積層（新第三紀層，グリーンタフに整合的に覆われている）が断層に沿って部分的にみられる⁵³。断層より北部の三紀層地帯は地すべりが多発しており，等高線の入り乱れた地すべり地特有の地形を呈している。花崗岩地帯は30°以上の直線的な斜面で構成された山地で，空中写真の判読では急斜面であるにもかかわらず，ほとんど植生で被覆されており，目立った崩壊地は存在していない。本流域の最も特徴的なことは，その上流部（上記断層が流路を横断する付近）に約0.25 km²の盆地状の平坦地があることである。この平坦地の下流には著しい急流部があり，その下流で再び穏やかな河況となっている（図-28，b）。この平坦地には集落（八尾町，小井波部落，現在は通年の居住者はいない）と耕地が広がっている。本項では主にこの平坦地を保全対象としてどのように防災工事がなされてきたかを中心に工事の経過を記す。

図-29と表-4に別荘川の砂防・治山等の工作物の設置状況および諸元を示した。昭和30年代以前に設置された工作物が多く，施工官庁が不明なものや，台張の整理状況が悪く工作物の諸元の不明な点が多い。平坦地のの上流部に合計8基のダムが設けられている。最下流の1基

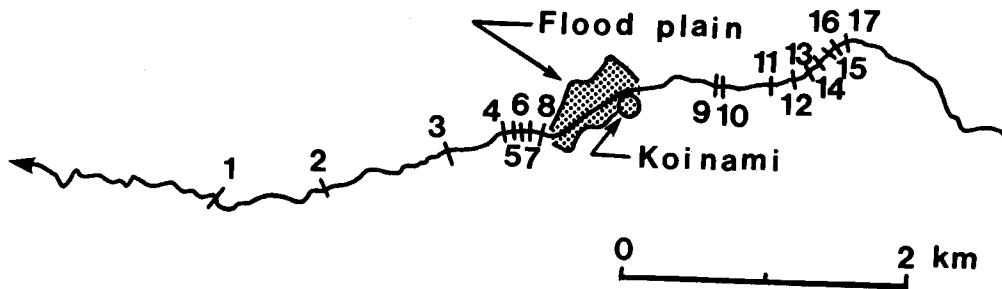


図-29 別荘川流域におけるダム配置図

Fig.29 . Arrangement of dams in the Bessou river basin.

（副堤を含む）を除いて施工主体，諸元等が不明であるが，石積の古い構造のものが多く，有効高はいずれも4 m前後のものである。空中写真の判読と踏査による観察では，ダムの施工区間内およびその上流域においても目立った土砂移動は生じていない。また8基のダムのうち最下流のものは有効高が10 m近くあるが，ダムはまだ満砂していない。流域の大きさに照して相対的に大型のダムであるが，30年以上を経て未満砂であるのは，土砂流出が少ないことを示している。

平坦地内では護岸によって流路の側方侵食防止と流路の固定が行われている。流路は屈曲をはさんで直線的に固定されている（図-29）。この工事の施工主体や年度は不明であるが，1975年撮影の空中写真ではほとんど現在と同様の河道状況となっている。また1970年代後半には河川事業によって一部が補修されているということである。平坦地は耕地整理が行き届き，以前の相様を示す微地形は残されていない。しかし，かつて流路はこの平坦地全面を変動してお

表一4 別荘川の砂防ダムの諸元

Table 4. Inventory of the dams in the Bessou river.

No	施工主体・事業名	年度	工種	堤高 (m)	堤長 (m)	立積 (m ³)	貯砂量 (m ³)
1	県・砂防		ダム工	4.0*			
2	〃	1950	〃	10.0			
3	〃	1961	〃	6.0		274.0	
4	県・治山		〃				
5	〃		〃				
6	〃		〃				
7	〃		〃				
8	〃		〃				
9	県・砂防	1952	〃	4.0	47.0	560.3	
10	〃	1952	〃	9.0	60.0	843.4	5,000
11	?		〃	4.5*			
12	〃		〃	4.5*			
13	〃		〃	4.5*			
14	〃		〃	4.5*			
15	〃		〃	4.5*			
16	〃		〃	4.5*			
17	〃		〃	4.5*			

*：有効高の推定値

り、人間による開発が始って以来次第に固定されて、現在のようになってきたと推測される。

平坦地の下流部では、平坦地直下の急流部付近に5基のダム（治山事業によるダムであるといわれているが、詳細は不明）であり、さらにその下流に数基の砂防ダムが所々に設置されている。この施設配置状況から判断すると、主に急流部の侵食防止を第一の目的としていることがうかがわれる。

この流域での諸工事は1950年代という古い時期に行われてきており、また流域の荒廃状況が隠やかであること、土地利用の密度が希薄であったことなどから、防災工事に關する一貫した全体計画がなかったと判断した。現在のような土砂の量収支に基づいてダムの配置を決めるのではなく、多くの場合は保全対象との位置関係からや、ダム建設に適する岩盤の存在等の理由により、個別的にダムの建設が決定されてきたのであろう。小井波部落周辺の平坦地では流路は直線的に固定されているが、これは土地利用における利便性とのかねあいから、また、土砂は上流のダム群で調節洪水流は速やかに下流に流下させるという一般的な考え方から決定されてきたものと思われる。

3) 百瀬川

別荘川と同様神通川水系井田川の支流で、富山県南西部を北方に流下する河川である。流路長42.6 km、流域面積85.2 km²で、狭長な流域形状を呈している(図-30)。

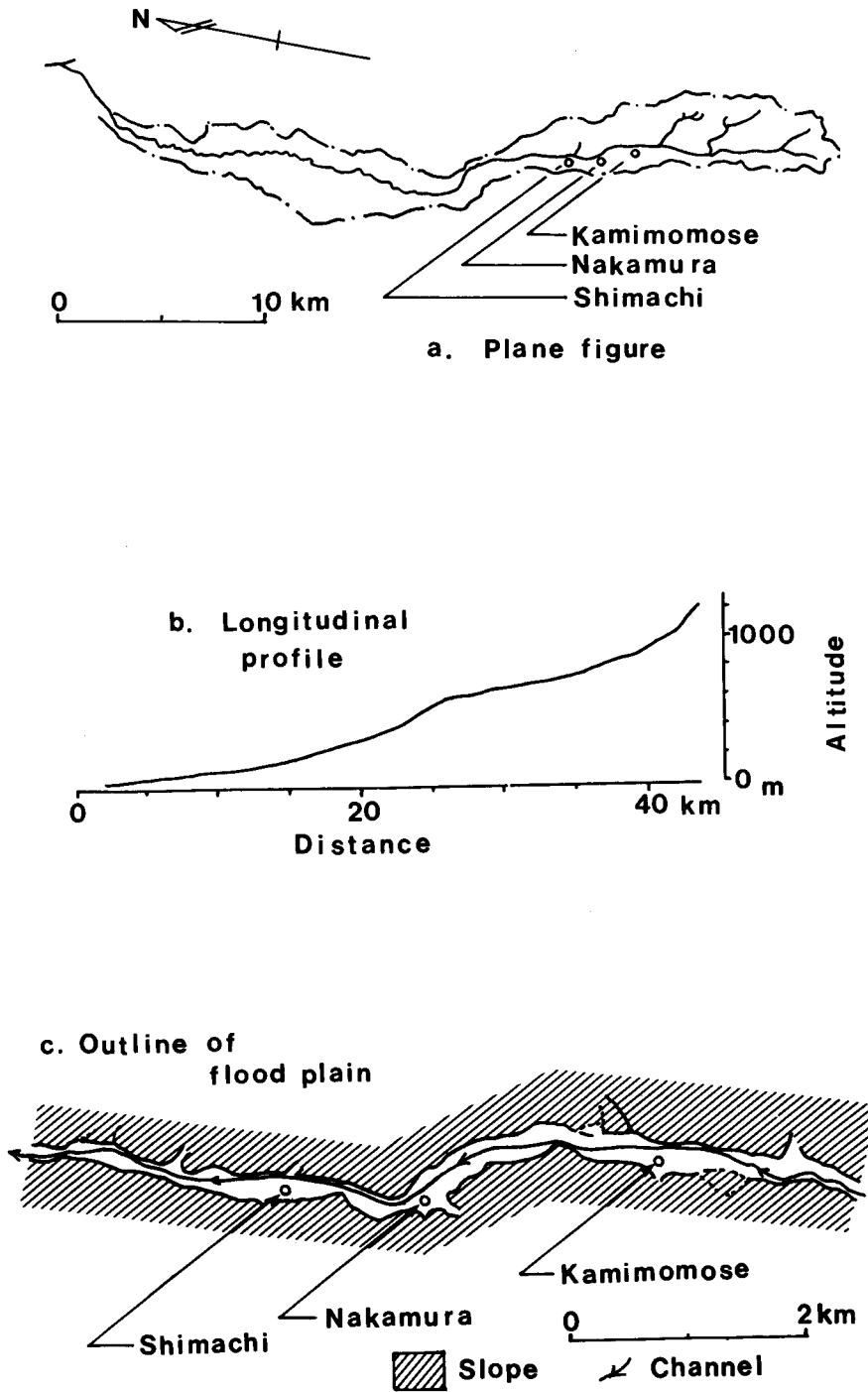


図-30 百瀬川流域の概況

Fig. 30. Outline of the Momose river basin.

流域のほぼ下流半分は新第三紀の砂岩・泥岩の堆積層および第四紀の段丘堆積物で、その上流は新第三紀の安山岩質溶岩および凝灰岩類（グリーンタフ）で構成されており、このグリーンタフ地帯の中央部を飛弾変成岩類（時代不詳）と古期花崗岩類（中生代～古生代）が横断している。流域の上流部は主として飛弾変成岩類からなっている^{47,53)}。流域の下流部の新第三紀層地帯では地すべりが多発しているが、グリーンタフ地帯より上流部では、ほとんどが30°以上の急な斜面からなる山地となっている。源頭部は1950年代後半からブナ林が伐採され、その後崩壊が発生した¹⁸⁾。冬期には4mを越える積雪となり、そのため積雪の挙動によって現在も崩壊地が拡大している。しかし崩壊の深さは30cm前後と浅い。源頭部および地すべり地帯以外のところでは部分的に小規模な崩壊地が少数ある程度である。

溪床の縦断形状は図-30に示すように、標高700～800m付近のところで緩勾配となり、その下部で急勾配となって次第に穏やかになる。中流部の急勾配部では川幅が狭まり険しい狭谷となっている。その上流の緩勾配地帯では、谷底に狭長な平坦地がひろがっており、集落(東砺波郡利賀村、島地、中村、上百瀬等の部落)や耕地が存在している。本項ではこの谷底平坦地を保全対象としてどのような砂防・治山工事が行われてきたかについて記す。

この流域の砂防・治山等の行政上の線引は、上百瀬部落の下流（標高約700m地点付近）より下流は河川事業、本流源頭部は治山事業、その中間の区域は砂防事業によって工事が行われている。図-31と表-5に砂防・治山等の施設の配置状況および諸元を示した。

最上流部に多数の谷止工、床固工が設置されているが、これは源頭部の崩壊を意識した治山工事で、崩壊土砂の流出を防止するとともに山腹斜面の復旧を図るための基礎として、近年集中的に工物物が設けられている（山腹工も同時に施工されている）。個々の構造物の規模は堤高が床固工で4m前後、谷止工で5mから最大でも8m程度である。このような比較的小規模のダムを多数連続的に設置し、元河床勾配の1/2の勾配になるように計画がたてられている。

砂防工事については一応砂防計画に関する基本量は算出されている。

それらを示せば、

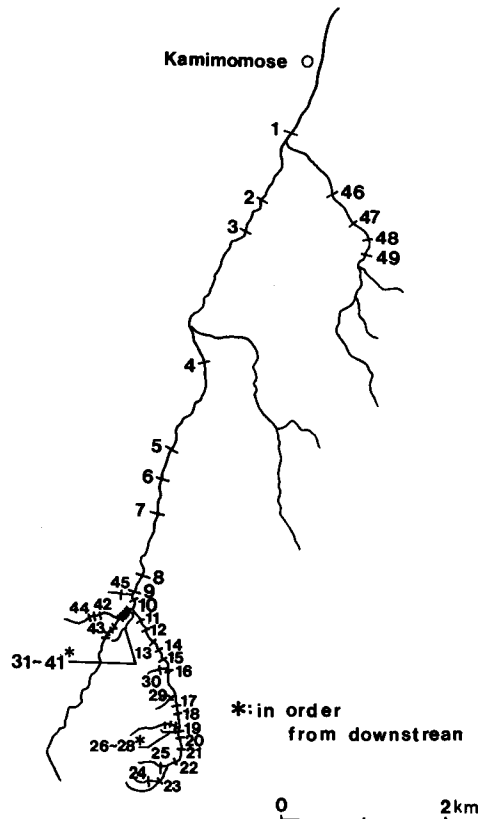


図-31 百瀬川流域におけるダム配置図
Fig. 31. Arrangement of dams in the Momose river basin.

表—5 百瀬川の砂防ダムの諸元

Table. 5. Inventory of the dams in the Momose river.

No.	施工主体・ 事業名	年度	工種	堤高 (m)	堤長 (m)	立積 (m ³)	貯砂量 (m ³)
1	県・砂防		床固工	1.0*			
2	〃		ダム工	8.5			
3	〃		〃	9.8			
4	〃	1976	〃	9.5		26300.0	
5	〃	1973	〃	11.5		4186.0	
6	〃	1983	〃	8.5		15200.0	
7	〃		〃	5.0			
8	〃	1956	〃	9.0			
9	〃	1979	〃	9.5		16375.0	
10	県・治山	1948	谷止工	**			
11	〃	1965	〃	**			
11	〃	1968	〃	**			
13	〃	1968	〃	**			
14	〃	1970	〃	**			
15	〃	1972	〃	**			
16	〃	1972	〃	**			
17	〃	1979	〃	**			
18	〃	1979	〃	**			
10	〃	1979	〃	**			
20	〃	1979	〃	**			
21	〃	1980	〃	**			
22	〃	1978	〃	**			
23	〃	1984	〃	**			
24	〃	1984	床固工	4.0*			
25	〃	1985	谷止工	**			
26	〃	1982	〃	**			
27	〃	1980	〃	**			
28	〃	1983	〃	**			
29	〃	1976	〃	**			
30	〃	1977	〃	**			
31	〃	1956	〃	**			
32	〃	1959	〃	**			
33	〃	1953	〃	**			
34	〃	1953	〃	**			
35	〃	1953	〃	**			
36	〃	1959	〃	**			
37	〃	1959	〃	**			
38	〃	1961	〃	**			
39	〃	1958	〃	**			
40	〃	1958	〃	**			
41	〃	1984	〃	**			
42	〃	1976	〃	**			
43	〃	1976	〃	**			
44	〃	1975	〃	**			
45	〃	1977	〃	10.5		14740.0	
46	県・砂防	1967	ダム工	11.5		20650.0	
47	〃	1970	〃	6.5			
48	〃	1960	〃				
49	〃		〃	12.0		13700.0	

* : 有効高の推定値

** : 4~5 m

$$\text{計画生産土砂量}(A) = 723,600 \text{ m}^3$$

$$\text{計画許容流砂量}(E) = 72,360 \text{ m}^3 \quad (A \text{ の } 1 \text{ 割})$$

$$\text{河道の調査量を表す指数}(\alpha) = 0.1$$

となっている。従って、

$$E + P = A(1 - \alpha)$$

より、計画超過土砂量(P)は586,980 m³となる。一方、現在の土砂整備状況は、

$$\text{生産抑制土砂量}(b) = 132,600 \text{ m}^3$$

$$\text{流出抑制土砂量}(c) = 13,700 \text{ m}^3$$

$$\text{流出調節土砂量}(d) = 24,470 \text{ m}^3$$

となっている(この中には、治山工事による抑制・調節量も見込まれている)。これらの値より、現況整備率(G : b, c, d の合計の P に対する割合)は、

$$G = 100 \times (b + c + d) / P = 29.5$$

より、約30%と算出される(1984年時点)。

今後は土砂整備率を上げる方向に砂防施設が設けられていくことになるが、この流域では砂防工事の推進に緊急性を持たされていない。これは、1910年代以降平坦地に本川沿いに土砂が流出し被害をだすことがほとんどなかったという穏やかな河況であることが反映されている。ちなみに百瀬川における災害は、堤防決壊や耕地水没が1910年代以降数回記録されている。上流部で崩壊が生じ、河川をダムアップし、一時的に下流に危険をおよぼすおそれのある状態になったことが2回(1956年, 1957年)あった。しかし、集落や耕地に土砂が流出する事は記録されていない。

狭長な平坦地の上には、大まかにいえば上百瀬、中村、島地の三つの集落があり、その付近に耕地が存在している。これらの集落はいずれも百瀬川の左岸に位置し、堤防で河川とせきられており、流路は概ね右岸側山腹斜面の下部に固定されている(図-30)。1960年から河川事業によって局部的に改修され、河道断面の規整、護岸や堤防の強化が行われてきたが、河道の平面形はそれ以前の形状をほとんど変えずに現在に至っている。古くから人間が入植していた地域なので、洪水による被害と修復の多年にわたる過程の中で現在のような河道形状に固定されてきたと推定した。

百瀬川の防災工事をまとめれば、以下のようなものである。上流部は崩壊地の復旧を最終目的として比較的小型のダムを多数に階段状に設置している。砂防工事については、計画策定に関する基本的な諸量は算出されているが、緊急性を持たされていないため、基本計画から中位の計画(土砂生産抑制計画等)を経て施設計画へと展開するという、技術基準にあるような流れに従っているとはいえない。平坦地内の河道のコントロールの河川事業によって行われているが、

河道平面形状（法線）は工事が行われる前と大差なく、主要な改修内容は河道断面の規整および護岸、堤防等による河道の固定および抵抗力の強化である。

上記3流域について防災工事の実態を記してきたが、最後に共通点や興味深い点を簡単にあげておく。まず、いずれの流域においても砂防工事・治山工事が行われており、治山は土砂生産の抑制、砂防は土砂流出の抑制・調節が主たる目的として行われている。また、砂防工事については技術基準²⁾にあるような土砂収支に基づく方法は基本的に採用されていない。これは砂防事業が古くから行われている、あるいはその流域の主要な防災工事を他の官庁が管轄している等の事情により、今後重点的に砂防事業が行われる予定がないことが大きな理由であろう。また、平坦地における流路の処理は、小早月川、百瀬川では、歴史的な過程において人間による土地開発とともに定められてきた河道が、概ねそのままの形状で固定され、堤防や護岸によって強化されている。別荘川では詳細は不明であるが、直線的に流路が固定されており、他の2溪流に比較して流路に強い人為的影響力を受けている。ここで興味深いのは、河道に対する拘束が最も強いのが土砂流出の穏やかな別荘川で、拘束の少ないのが土砂流出の激しい小早月川であることである。

VI 溪流環境保全を重視した砂防工法の構築

1. 溪流環境の基本理念

緒言に述べたように、砂防や治山においては溪流は生物の生息の場とはみなされてこなかった。しかし、好ましい溪流環境を維持しつつ溪流をコントロールしていくためには、技術論以前の段階において、生物的要素を正しく位置づけた溪流環境の理念が構築されなければならない。

1981年12月に、建設大臣の諮問に対し、河川審議会が「河川環境のあり方」について答申を行った。専門家からなる公的な組織の最新の発言であるので、今後の河川環境管理に対して非常に強い方向を示したものであるといえる。また、砂防事業が広い意味での河川事業のなかに組み込まれていることを考えれば、この答申が砂防における環境管理に強い影響を与えることは確実である。換言すれば、現在における溪流環境に関する基本理念とみることができる。

本答申のI：河川環境の理念において、「河川管理には、治水、利水及び河川環境の三つの面がある」とし、この三者は一体不可分のものであり一元的に管理されることが妥当とされた。そして、河川環境は人間の日常生活に恵沢を与え、その生活環境の形成に深くかかわっているとしている。従来の考え方に比べ、河川環境という要素を治水や利水と同じレベルで取り扱い、その重要性をより明確に言明したといえる。また、河川環境自体については、答申の前文において現在当面する課題として、1. 水量及び水質管理、2. オープンスペースとしての河川空間の管理、3. 河川環境管理の実施体制、財源措置の3点をあげている。

上記の内容から判断すれば、治水行政において河川環境管理はその重要性はより強く認識されるようになったが、具体的な内容については実施体制や財源の問題を除けば、水質と水量の管理およびオープンスペースとしての河川空間管理の2点にあるといえる。

さて、環境という言葉はある主体に対してそれをとりまくものという意味を持つ。これまでの議論のなかでは河川「環境」は人間社会をとりまくものとしての河川という意味であった。しかし、本質的な意味において河川を「人間の日常生活に恵沢を与え、その生活環境の形成に深くかかわる」ものとするためには、このような認識では十分であるとはいえない。河川は人間社会をとりまく環境であるとともに、そこを生活の場としている生物にとって生存自体を規定する環境であると考えなければならない。

快適な居住環境を形成するには、周囲に良い状態に保たれた自然環境が必要である。そして良好に保たれた自然環境とは、この場合本来そこを生活の場とする生物が健全にすめるような河川である。河川審議会の答申でも河川空間について「河川とその周囲に保存されている自然環境を適切に保全することが必要」（Ⅱ．河川環境管理に関する基本方針の確立）と述べているが、答申全体の流れでは災害遮断や避難空地としての防災空間および公園・レクリエーション空間としての機能が中心であり、あくまでも人間主体の河川環境のみの視点にしか立脚していない。河川を生物の生活の場として認識し、適切に管理することにより、より本質的な意味で人間の日常生活に恵沢を与え、豊かな生活環境を形成することになると考える。

治水行政においては、本質的な意味での環境保全の理念を確立するには至っていない。本来ならば行政を先取りするべき砂防学、河川工学においてもこれは同様である。治山は元々は山地を植生で覆うことによって保全するという思想から生じており、現在は林学の中の一分野として位置づけられている。その意味では生物とのつながりはより深い面があつてしかるべきであるが、現実には生物全体を含めた環境の保全という意識は薄い。さらには、森林という生物集団を対象とする林学においても、昨今のカモシカの保護と造林木の食害のトラブルにみられるように、野性生物を含めた環境の理念は希薄である。アメリカの林業のハンドブック⁶⁸⁾には野性動物や魚類の管理に関する項目があり、指針を与えているのとは大きな差がある。

アメリカとの比較では自然条件や社会条件の相違も考慮しなければならないので一概にはいえないが、ともかくも我が国においては社会全般に環境保全の理念が根付いているとはいえない。このことは砂防学のレベルをこえた問題であり、より広範な分野、場面における環境に対する理念の高揚が溪流環境保全の理念上のバックボーンとなる。

2. 基本方針

これまで砂防工事が魚類に与える影響や現在の砂防工法、野溪の特性などについて述べてきたが、ここではそれらをふまえて問題点を整理したうえで、溪流環境保全を重視した砂防工法の基本方針について述べる。

現在の砂防工法の1つの特徴に、基本的には流域内の不安定土砂の収支に基づく量的コン

トロールによって計画がたてられ、その結果多量の土砂を貯留または調節することを目的とした大型ダムが設けられる傾向にあることがあげられる。V章2節で述べたように現場では必ずしもこの方法に沿っていない。だがこれはそれらの溪流において今後積極的に砂防工事を展開させる予定がないなどの理由によるものである。従って将来的に砂防工事が行われる溪流ではこのような方法が中心になると考えなければいけない。

砂防工事が魚類に悪影響を与えているのは2つの点があげられる。そのひとつは、ダムや床固工の落差が魚類の移動の障害となることが大きな原因である。これを解決するために、一般的にはダムに魚道を付設することが考えられるが、ダムが大きければ魚道の付設は非常に困難になってくる。我が国の魚道の技術水準が低いうえに、砂防ダムに魚道を付設する事例が少ない。また大型ダムに付設することは技術的に難しい点があり経費も高くなるなどの多くの事情があるからである。要するに砂防ダムの大型化は魚類保護の面からは不利な点が多い。

防災レベルの面でも、土砂の量的収支やダムの大型化については幾つかの批判が提起されている。清水⁵⁷⁾は砂防計画の基本量である生産土砂量、最大洪水流量等の諸量の時間の考え方、すなわち確率的な意味が不明確であることを指摘し、「土砂収支は数字上は可能であっても、歴史的にみられる土石流出の過程で、土砂収支のつじつまあわせが可能か否かという根本的な問題を残している。現実的には・中略・砂防計画の基本であるはずの生産土砂量の推定も不完全であり、河道における調節量、ダムの効果も歴史的な試練を受けていない現状では、真の効果を判定するまでには至っていない」と述べている。また東¹¹⁾は、砂防・治山ダムの被災状況を検討した結果、狭窄部に設置されたダムは袖抜け、底抜けによりダム自体が破壊されやすいこと、また下流部の洗掘の活性化により堆積地の新たな破壊をもたらすことを指摘している。すなわち、量的収支に基づく方法やダムの大型化には理論的、実際的な問題点をはらんでいるのである。

この方法が非荒廃溪流や流域面積の小さい溪流で用いられるならば、当然計画生産土砂量の絶対値は少なく算出され、従って少数の大型ダムで容易に高い土砂整備率を達成することが可能となる。その結果、土砂流出が少ないため、別荘川でみられたようにダム築設後長期間にわたって満砂しないことになる。上流からの流出土砂を貯留する点では安全性は高くなるが、投資効果の面からは真に効果的かという疑問が生じてくる。また東¹¹⁾の指摘するように、下流部の新たな不安定化も懸念される。

このように土砂害防止の面からも、また環境保全の面からも問題の多い量収支・大型ダム方式は見直されなければならないと考える。すなわち、流域特性をよりきめ細かく把握し、必要最小限の規模（ダムの数、大きさについて）で計画をたてる必要があると考える。

砂防工事が魚類に与えている悪影響のもう1点は、河道の改修が溪床微地形と水の流れ方を変え、結果的に魚類の生息環境の質的悪化を招くことである。

流路工は、土砂の流入が穏やかになった段階において施工され、基本的には流水をスムー

ズに流下させるように、直線的な法線が望ましい²¹⁾とされているが、しかし直線的な法線が防災上有利であるという合理的な根拠は存在していない。流路を直線的に固定することは、流水のみを対象とするならば簡単であるが、土砂移動の活発な場では非常に困難である。事実、荒廃溪流の扇状地などでは、詳細な現地観測や空中写真の判読、水理模型実験などによって、偏流や局所洗掘の起こらないような法線形状が検討されている²⁵⁾。すなわち、土砂移動が不活発であればそれだけ直線的に流路を固定しやすいということになる。

法線の直線化は、土砂水理学的には十分な裏付けを持っておらず、それ以外の要因、たとえば土地利用面での利便性などから求められているという意味合いがあるといえる。別の観点からいえば、穏やかな河況の溪流ほど直線的に流路が固定されるという事態が予想されるのである。現実には前章で述べたように、富山県内の事例でもこのような傾向がみられた。

流路変動は土砂移動に大きく依存しており、また小規模な土砂移動でも大きな流路変動のきっかけになり得る。ここでいう小規模な土砂移動とは、移動する土砂量が少ないこと、また移動距離が短いことを指している。このことから、氾濫原における流路変動特性を調査することにより洗掘、堆積や流路変動を起こしやすい場を抽出し、そこに適切な働きかけをすることにより、徒らに流路を直線化することなく十分な防災効果を得ることが可能になると考える。

流路を曲線的に固定すれば、直線流路に比較して瀬と淵の分化が生じやすく、魚類の生息には有利となる。流路の直線化は流路長を短かくすることでもあり、溪床勾配を急にして流水による侵食力の増大をもたらす。これを防ぐため流路に床固工を設置することになり、魚類にとっては生息環境の質的悪化のみならず、移動の障害までもがもたらされることになる。曲線的に固定する方法はこの点においても有利に作用することになる。

池谷¹⁴⁾は、水理実験と現地調査から、砂防河川における河道断面の処理について、現河道をすべて掘削修正する従来の方法に対して、できるだけ現河道を利用した河道計画を提案している。この方法を併用することにより溪床微地形は複雑な状態に保たれることになり、魚類の生息環境を一層良好に保つことが可能となる。

以上をまとめれば溪流環境の保全を重視した砂防工法の基本方針として、土砂量の収支に基づいて大型ダムを設けるのではなく、流域特性に基づいてダムの規模（個数、大きさ）を必要最小限におさえる方向で計画を検討することとし、流路工については平面形状、横断形状ともに元の河道の状態を尊重するとして計画することを提案する。技術指針²¹⁾とは正反対の方向であるが、非荒廃溪流では、防災面でも十分実施可能であると考ええる。

3. 低ダム群工法の有効性と適用の可能性

1) 低ダム群工法の概要と機能

一般に砂防ダムは、効率よく大規模な堆積地を確保するということから、溪流の狭窄部に高ダムを設けることになっている。また、溪間部の下流に広がる扇状地においては、流路工が主な砂防工法である。しかし実際的には、扇状地における土地利用が高度化するにしたがい、

溪間に高ダム、扇状地に直線状の流路工という対策では土砂災害防止機能を果たすことは困難である。前節で述べたように、高ダムの破壊や下流部における新たな侵食の発生などの問題をもたらす。流路工は縦工と横工の組合せで流路を固定し、溪床・溪岸の洗掘を防ぐものであるが、技術基準²¹⁾で流路工は上流部の土砂整備がある程度進んだ段階で施工するものとされていることから理解できるように、流路工には上流からの土砂流入に効果的に対応する機能はない。すなわち、高ダムによってその下流部の土砂移動を押さえることは困難であり、また扇状地では上流からの土砂流入に対しては無効であるからである。

低ダム群工法¹¹⁾は元々は土砂移動の激しい火山性荒廃溪流における土砂コントロールに対応してあみだされてきた。有効高1～2mの低ダムを複数（最低3基）を40～50mの間隔で設置し、このダムによって造られた空間で土砂移動のコントロールを図ることが最大の特徴である。

複数のダムで固定された溪床は土砂堆積によって上昇することはあってもそれより下降することはない。いわば、人工的な岩盤、temporary base levelというべきものである。ここに土石・砂泥をまじえた洪水流、すなわち土石流が流入すると、土石がここに堆積し下流にはエネルギーの減少した流水のみが流下する。これは低ダム群による土石分散効果とよばれている。

扇状地や扇状堆積地⁵⁵⁾、氾濫原などでは扇頂部、およびそれに対応する部分は、谷幅が急激に広がるところで土石流の堆積しやすい場である。自然状態では堆積した土石を洪水流が迂回しながら、再び洗掘を始め下流に土砂を流送する。このように、土砂堆積—再移動というサイクルが扇面や氾濫原で繰り返されるのである。この扇頂部に低ダム群を設置することにより、上流からの土砂の堆積を促進し、かつ再移動を防ぎ流路を固定することが可能となる^{23,55)}。その結果、扇面の安定が図られる。

低ダム群工法の特徴の一つに、曲流部における処理機能があげられる。従来は曲流部はダムサイトとして不適であるとされてきた。しかしこの工法では曲流部にらせん階段状に低ダムを配置することにより、土砂が曲流部の外側に堆積し、水は内側を流下し、流路が固定されることが確かめられている。

これを適用することにより、流路を曲線的な状態に保ちながら固定することが可能となる。

2) 簡易漁道付設による魚類の遡上の確保

a) 簡易漁道の構造

低ダム群工法は落差の低い工作物を用いることから、魚類の遡上を妨げないのではないかと期待されていた。事実知床半島のルシャ川では治山計画策定にあたって、この機能を期待して低ダム群工法が採用されたのである。その結果はIV章で述べたように、魚類は低ダム群を越すことが不可能という結果が得られたが、これはこの年の遡上実験時に最下流の床固工の落差が1.3mあったことと直下のプールの形状が不適当であったことが理由であった。補足すれば表-6に示すように落差や水深は容易に変化しやすく、常に遡上が不可能とはいえない。しかし

魚類の遡上を確実にするという点では、床固工本体の改良や魚道の付設などの手段を講ずることにより常時遡上が可能な状態にしておかなければならない。

このような経緯を経て北海道(網走支庁)は1983年度に北海道単独の小規模治山事業として、魚道の効果を期待して第1ダムに前堤・側壁(簡易魚道)を追加施工した。

1980年の調査によれば、魚類(カラフトマス)が遡上不可能だったのは第1ダムにおいてであり、第2ダムでは可能であった。また第3ダムにおいては可能とも不可能とも確認されなかった。滝やダムなどに関して遡上の可否を左右する第一の要因は落差とダム(滝)直流部のプール水深等の水理条件であるといわれている。第3ダムにおける上記水理量は表-6に示すように第2ダムのそれとほぼ同程度であり、魚類の遡上に関しては十分可能であると考えた。従って、何らかの改良を行わなければならないのは第1ダムということになった。

ダムの改良に関しては既に高橋⁶³⁾が、折り返し階段式魚道とダム前庭部に前堤と側壁を設けて通水部全体を魚道のようにするという2つの試案を出している。一般にダムに付設する魚道は、ダムの上流と下流を水路で結び、そのなかに水制用の隔壁を設けてプールと越流を生じさせる構造の階段式魚道がほとんどである。しかし、平水時の流量が1 m³/sec.前後と少なく、またダムの落差が2 mにも満たないような状況の場では、一般的な階段式魚道よりも水通し部分全体を魚が通過できるように改良したほうがよいと考えた。

表-6 ルシャ川の低ダム群の水深と落差の推移

Table 6. Change of vortical distance of falling water and pool depth.

Date	1980. 5. 23		1980. 7. 14-7. 17		1980.10.1-10. 7		1980. 12. 4		1982. 7. 28	
Discharge	2.07		1.19		0.62-0.68		2.73		—	
H & D	H	D	H	D	H	D	H	D	H	D
No. 1 Dam	0.25	2.00*	1.30	0.80**	1.30	1.90	0.95	1.50**	0.55	1.70**
No. 2 Dam	0.25	2.00*	0.50	1.20**	0.40	1.50	0.20	1.60**	0.20	1.40
No. 3 Dam	0.15	2.00*	0.55	1.20**	0.65	1.20	0.50	1.40**	0.35	1.60
Date	1982. 8. 31		1983. 8. 15		1984. 9. 28		1985. 8. 23		1986. 7. 28	
Discharge	—		—		0.80		—		—	
H & D	H	D	H	D	H	D	H	D	H	D
Fishway	—	—	0.30	0.30	0.20	0.40	0.20	0.45	0.00	0.50
No. 1 Dam	0.53	1.80**	0.40	1.00	0.40	2.50	0.45	2.40	0.40	2.60
No. 2 Dam	0.23	1.60	0.30	1.40	0.30	1.40	0.30	1.45	0.30	1.40
No. 3 Dam	0.40	1.70	0.40	1.40	0.50	1.60	0.50	1.45	0.50	1.60

H: Height from water level of the pool to the dam crown. (m)

D: Depth of the pool at the point of just front of the dam. (m)

Discharge: m³/sec.

*: Estimated value

** : Showing the real value is more than or equal to the value.

その理由は、より簡単な構造で機能的にも優れていると予想されたからである。魚道を設けるにあたって最も重要なのは、魚が容易に魚道を見つけ得るか、またスムーズにそこに誘引されるかということである³²⁾。集魚および誘因効果をあげるために、多くの魚道では魚道出水口の位置を適切に配慮したり、出水口付近に呼び水を用いるなどの工夫をしているが、技術的には十分な効果をあげる段階に至っているとはいえない。ルシャ川のような小さな場において十分な効果をあげ得る階段式魚道を作るには不明な点がまだまだ多い。

また階段式魚道はその構造上複雑な形状をしており、ゴミや流木、土砂などが魚道の入り口付近や内部にたまりやすい。ルシャ川のような交通の不便な場所にあり、また土砂等の流出の活発な河川では、なるべくゴミなどのたまりにくい簡単な構造のものが好ましい。

さて、第1ダムの落差は夏期の平水時（すなわち低水時）には1.3 mあり、遡上の最大の障害となっている。1980年の遡上実験の時には、落差が1.3 mあったことに加えて、ダム直下の水深は深いもののプールの中央部に土砂が堆積し、浅い部分があったことがより一層遡上を困難にしていた。これらのことを勘案し、簡易魚道の設計にあたっては、落差を最大でも50cm以内におさえること、ダム下流部に十分な広さと深さを持ったプールを確保することを目標とした。さらに、直下流部の局所洗掘を防止し、ダムの安定を図るという要求にも対応させた。

図-32は簡易魚道の構造図を、写真-8は完成した簡易魚道の写真を示したものである。第

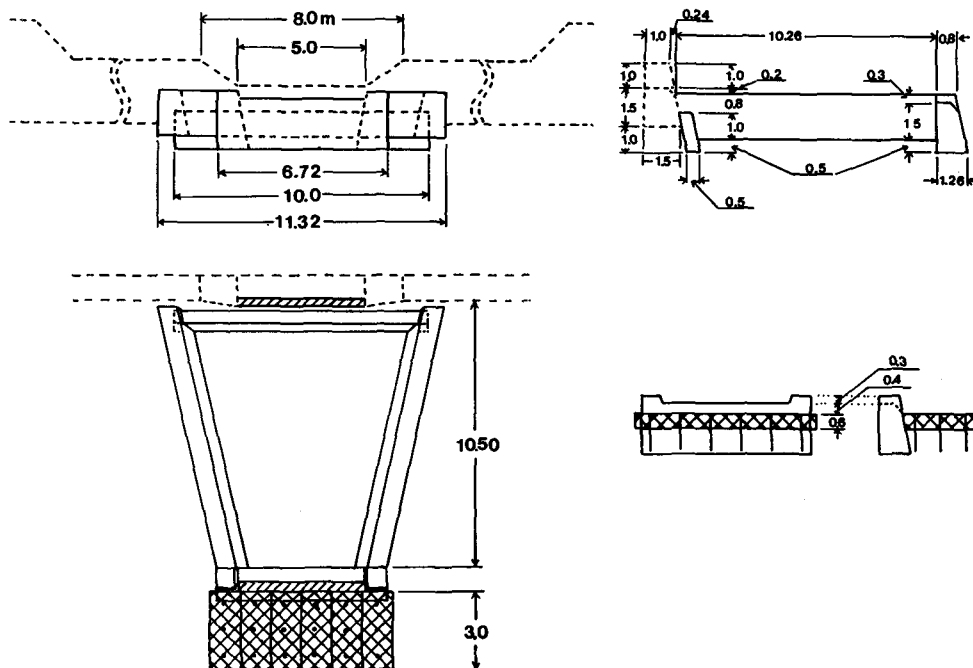


図-32 ルシャ川の第一ダムに設置された簡易魚道の構造

Fig. 32. Structure of the fishway constructed with the No.1 dam in the Rusha river.

1 ダムの下流約10 mの地点に前提を設け、本体と前提を側壁で結び、プールを造るとともに、落差を2段に分割して小さくするようにした。また、ダムの水の落口(天端の下流部分)を削って、水の流下が滑らかになるように配慮した。

b. 簡易魚道の効果

簡易魚道の完成後、その効果を検証するために、1984年秋に再び遡上実験を行った。実験方法は1980年の時と同じであるが、改めて記せば以下のものである。カラフトマスの親魚オス・メスをそれぞれに標識を付けて第1ダムの下流約50 mの地点に放流し、これらの遡上の状態を観察した。放流日および数は、9月27日に29尾(オス9, メス20), 28日に30尾(オス20, メス10), 30日に1尾(オス)で、供試個体の大きさ(尾叉長:吻端から尾の中央部の切れ込んだ部分までの長さ)はオス60.0 cm—42.0 cm, 平均51.2 cm, 標準偏差5.2 cm, メス54.0 cm—41.0 cm, 平均49.0 cm, 標準偏差3.0 cmである。これとは別に、9月21日より1日に10尾ずつのオスを放流していたとのことで(ルシャ川捕獲場, 田村英士氏談), あわせて観察の対象とした。

なお、カラフトマスは河口から100 m 足らずの地点に設置されているトメによってそれより上流への遡上が妨げられているため、遡上実験の対象となったのは上記の魚のみである。結局9月30日の段階で捕獲装置の上流に放流されたカラフトマスはオス130尾(標準魚30尾), メス30尾(同30尾)の計160尾である。

遡上の確認は、直接観察、35mmカメラ、ビデオカメラを用いて遡上を確認すること、および産卵行動を行っている親魚や産卵床の確認、ダム群の上流約10 mの地点に刺し網をかけて、遡上個体の捕獲などの方法によって行った。

さらに、遡上の可否に大きく関わるダム直下のプールの形状や落差(ダム天端とプールの水面との比高)を計測した。プールの測量は、ダムに平行の方向(横断方向)と垂直な方向(縦断方向)に1 m×1 m(部分的には2 m×2 m)のメッシュをあてがい、その交点の水深を計測することによって行った。また流量の測定も行った。

ダム群3基をすべて越えて遡上した個体を20数尾確認した。ダム群上流にかけた刺網にかかったものは、9月28日朝にオス3尾(標識魚2尾), 30日夕方にオス6尾(同2尾), メス2尾(同2尾)の計11尾であった。30日に8尾を捕獲した後、刺網を撤去し、その後は個体および産卵床の直接確認による観察にきりかえた。そして10月4日の巡回で、第3ダムの上流約50 mの地点で8尾(雌雄の別は確認できなかった), 同150 m地点で4尾を確認した。またダム群全部を越えたが、確認されなかった個体がいるのは確実であるが、その数は不明である。上記のほかにも、第1ダム～第2ダム, 第2ダム～第3ダムの間で多数のカラフトマス親魚や産卵床(造成中のものも含む)が認められた。

遡上実験の期間中、ダム直下のプール形状、落差、流量等を計測した。図-33にその結果を示した。各ダムの落差とダム直下部分の水深はそれぞれ第1ダム0.4 m(落差), 2 m以上(水

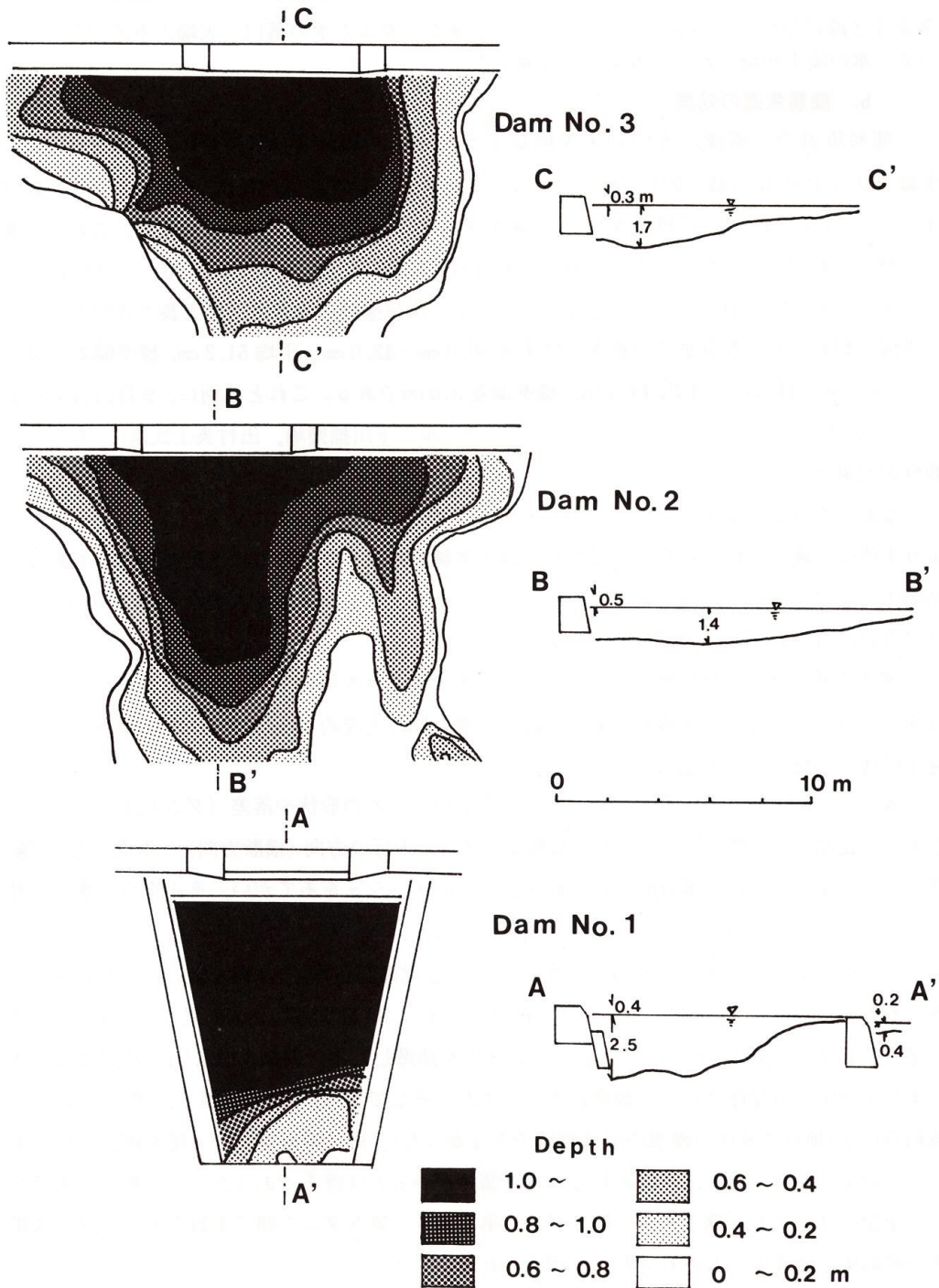


図-33 ルシャ川の低ダム群のプールの形状(1984年10月)

Fig. 33. Shapes of pools of the low dams in the Rusha river (1984, October).

深), 第2ダム0.3 m, 1.4 m, 第3ダム0.5 m, 1.8 mであった。また新たに設けた前堤では0.2 mと0.4 mであった。

一般的に魚が遡上できる落差は1 mとも1.5 mともいわれているが, このように直下に十分な深さのプールを持ち, かつ0.5 m以下という低落差の条件は, 遡上には全く障害とはならないといってよい。1984年の調査では遡上行動の観察を第1ダムと簡易魚道で重点的に行った。それによれば遡上に失敗する事例は少なく, 困難を伴っているとは見受けられなかった(写真-9)。

なお, 今回の実験時の流量は9月27日~10月1日はおよそ $0.8 \text{ m}^3/\text{sec}$. で一定であった。10月2日~3日に降雨があり一時増水したが, 4日から5日にかけてほぼもとの状態に戻った。 $0.8 \text{ m}^3/\text{sec}$. という流量は過去の記録からみて(表-6参照)この河川では最少流量に近い値である。

表-6に過去の調査の結果を含めて落差や水深等のデータをまとめた。第1ダムに着目すれば, 簡易魚道は, 落差を分割した個々の落差を50 cm以内におさえるという設計のねらいを満足させていることがわかる。要するに, 魚を遡上させるという点では一応可能な状態をつくりだしたといえる。

c) 現地適用への可能性

低ダム群工法と簡易魚道の組合せを他の溪流で適用するには, これが将来的にも魚類を遡上させる点に関して有効かどうか, また低ダム群工法が本論文が対象としている場において防災面で効果的であるかという2つの点を吟味しておかなければならない。

前者についてはさらに次にあげる2つの点が問題となる, 1つは, 今後プールの形状や水深, 落差がどのように変化していくかということである。もう1点は, 魚の遡上行動が常に正しく上流へ向って行われるとは限らないことである。

第2・第3ダムについていえば, 過去のデータ(表-6)では常に落差0.65 m以下, 水深1.2 m以上を保っており, 遡上の障害となるような状態ではない。そしてこの状態は今後とも維持されていくものと予想できる。というのは, 第3ダムは第2ダムによって, 第2ダムは第1ダムによって下流の溪床が固定されているため, このレベルより下には低下しないようになっているからである。

第1ダムに簡易魚道が設けられる以前は, 第2・第3ダムに比べて第1ダム直下の溪床のレベルは変化しやすく, また流量の多少との関連で落差やプールの形状や水深が大きく変動していた。容易に魚が遡上できる状態が今後とも続いていくかどうかは継続的な観察をして見極める必要がある。

具体的にいうならば次のような点に特に注目しなければならない。第1ダムの落差は前堤によりこれ以上大きくなることはないが, プール水深は土砂が流入した時非常に浅くなることが予想される。その場合, 再び前堤と隔壁で囲まれた部分が洗掘されて, 従来のように遡上のために十分な水深を保つように推移していくのか, さらに, 前堤より下流部において, 洗掘

等の河床の変動が起こり、再び遡上に障害が生じるような落差が生じてこないかという点である。

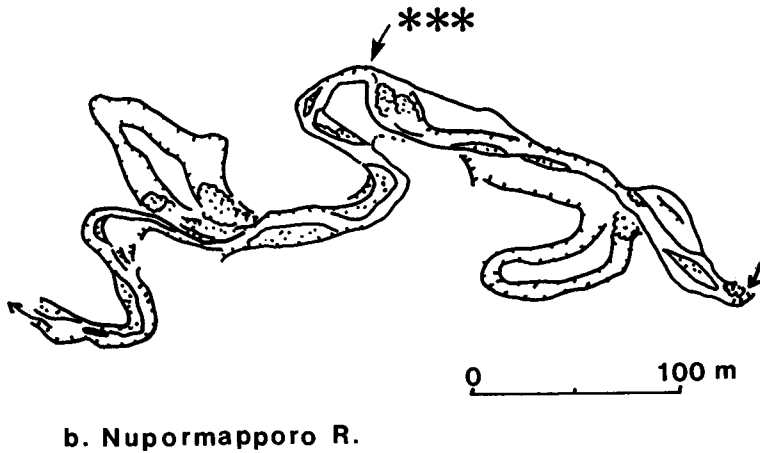
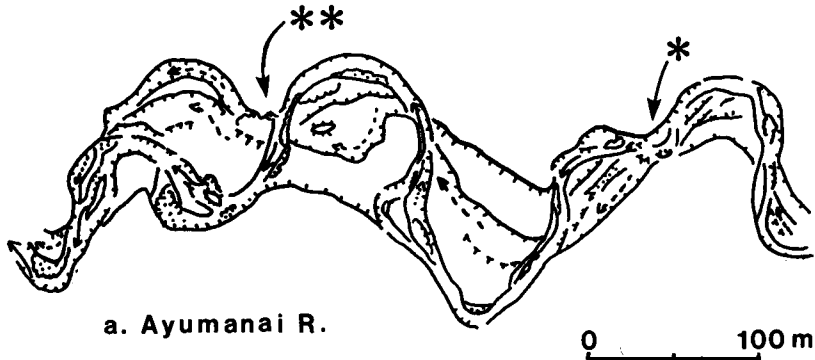
また、第2の問題点については以下のとおりである。当時ルシャ川捕獲場に常駐されていた田村英士氏によれば、1983年10月に上流に大量のカラフトマスを遡上させたところ、簡易魚道のところで多くの個体が上流に向かわず、全く別の方向にジャンプしたとのことである。つまり上流に向かって跳ぶのではなく、隔壁を越えて魚道の側方に跳んでしまったのである。今回の実験ではそのような事例は全く観察されなかったが、STUART⁵⁹⁾の研究によれば、ある条件の下ではジャンプの方向が定まらないことが報告されている。

このように遡上に関しては未知数の部分が存在する。しかし、これらの問題点はたとえ遡上が難しくなる事態になったとしても、現在の土木技術の水準では致命的な欠陥にはならないと考える。たとえば、前堤の直下流に遡上の障害となるような落差を生じたとしても、土木用重機械により容易に落差やプールの形状を変えることが可能である。側方へのジャンプについても、隔壁の側方を土砂で埋め戻してプールの水面より高くしてやることにより、側方へそれた魚が流れに戻りやすくすることができる。多くの現場で低ダム群工法と簡易魚道の組合せを施工することにより、むしろ問題点が明らかになり、これを改善して技術面での改良が進むことになるだろう。

本来この工法は火山性荒廃溪流で考えられてきたものであるが、土砂移動や流路変動のコントロールについては、火山山麓以外でも多くの溪流で適用されその効果が確かめられている。小型のダムを用いることはダムサイトに堅固な岩盤の存否にかかわらず施工することが可能であり、また曲流部における流路の固定や溪岸崩壊の拡大防止などという特定の個別的目的に対しても対応させることが可能になる。このようにきめの細かい対策を行うことができるという柔軟性を持っていることは、流域の特性に合わせた防災対策という面では従来の工法にくらべむしろ有利であると考えられる。

防災対策を効果的に行うためには、災害に結びつくおそれのある現象と保全対象との関係を正しく認識する必要がある。扇状地や溪間の氾濫原(以降これらをまとめて平坦地とする)の上の集落・耕地を直撃したり、あるいは流路変動を引き起こす原因となる土砂移動をコントロールすることが最大のポイントとなる。この土砂移動の直接的な生産源は山腹からの崩壊土砂ではなく、溪床に堆積していたものが再び洗堀されることによって生じる。

従来の砂防工法では、保全対象として最も重要な平坦地に対しては、上流部における土砂生産・流出がある程度コントロールされた段階でなければ流路工が施工されないという前提にたっている²⁾。砂防技術基準(案)²¹⁾ではこれを施工するのは上流での土砂整備率が50%以上の場合とされている。これに対し低ダム群工法では、まずは保全対象に近い平坦地に施工し、順次上流部に移っていくものとしている。これは、従来の工法では平坦地には上流からの土砂の流出を許さないという考えに基づくのに対し、低ダム群工法では、既存の堆積地を空間的な



図一34. 流路変動地点の予測

溪床微地形や流路変動の過程を調べるにより、相対的な狭窄部(*, **)や著しい屈曲部(***)を抽出することができる。ここは今後の流動変路の中心になることが予想される。

Fig. 34. Estimation of channel course change. By means of reseraches of microtopography and processes of channel course fluctuation, narrowed places (*, **) or remarkably meandering places (***) can be identified. These places are estimated to become the points of abrupt channel course change.

広がりを持たせて固定し、そこで流入土砂を捕捉して水と土砂を分離することをねらいとするという相違に起因している。

溪流における土砂害防止を図るうえで最も重要なのは、防災対象への土石流の直激を防ぐことである。防災対象の存在する平坦地の上流部、扇状地でいえば扇頂部、に低ダム群を設置

することにより、流下土石を捕捉し、穏やかな流出形態に変えることが可能となる。溪流における土砂移動は、上流で移動を始めた土砂がそのまま下流に到達するのではなく、移動—堆積—再移動—再堆積・・・という不連続な過程をたどる。そしてこの時、土砂の堆積および洗掘が生じるのは狭窄部ではなく拡幅部においてである。小流域には小流域にふさわしい大きさの拡幅部が存在するはずであるから、保全対象の平坦地の頂部に低ダム群を施工した後、必要に応じて上流の拡幅部へと施工を行うことにより、安全性が高められることになる。

土石流直撃の回避が可能となった次の段階として、平坦地における河道の固定、局所洗掘の防止等が重要な課題となる。流路の変動は土砂移動の頻度や規模と密接な関係があり、土砂移動の少ない非荒廃河川では流路変動も穏やかである。従って扇面や溪間の氾濫原全面におよぶような流路変動はまれで、現在の時間スケールではそのなかの一部の範囲内で変動を繰り返しているに過ぎない。さらには流路変動の過程を詳しく調べることにより、扇面や氾濫原内においても比較的流路の位置の固定的な場所や変動している場所、言い換えれば、規模の小さい扇状地的な状態の場ともいべき部分を見つけることができる。たとえば、アユマナイ川やヌポロマッポロ川の調査区間においては図-34に示したようである。ここに低ダム群を設置することにより、安全性をより拡大することが可能となる。

溪流環境の保全を重視した砂防工法の基本方針として、必要最小限の規模の構造物で土砂移動を防災的にコントロールすることをあげたが、低ダム群工法はまさにこの方針に合致する工法であるといえる。

4. 溪流環境の保全を重視した砂防工法による空間創造

これまでの議論をもとに、環境保全を重視した砂防工法を示せば次のようである(図-35)。

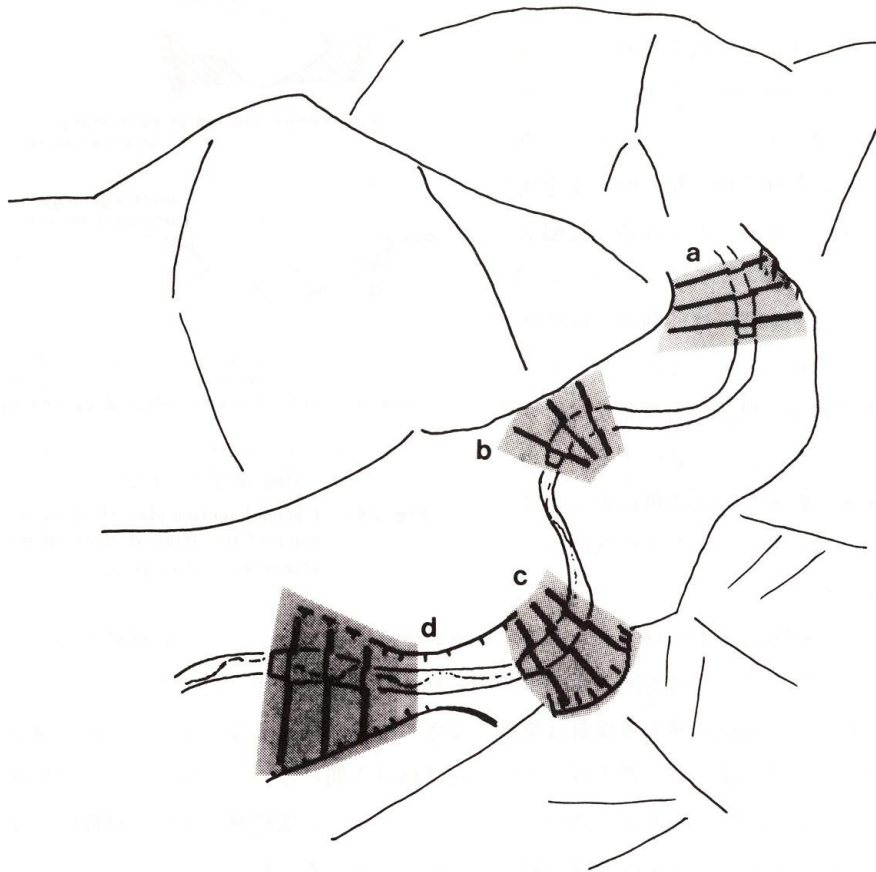
まず土砂移動に対する基本的な対策として、保全対象となる平坦地の頂部に低ダム群を設け、上流からの土砂流出による直撃を防ぐ。また、上流部の荒廃状況に応じて、上流の拡幅部に低ダム群を設け、下流に対する土砂流出を緩和する。これらの対策により、土石流の氾濫・堆積のような、保全対象の平坦地に対して重大な被害を与える土砂移動は防ぐことができる。

次に、平坦地内において、近い将来流路変動が生じる確率の高い場を抽出し、ここに流路の固定を目的とする低ダム群を設置するものとする。流路変動の生じやすい場は、平坦地における流路変動や土砂移動の過程、平坦地の微地形などを調べることによって判断することが可能である。この対策により、平坦地内の流路をその曲流した状態を尊重しながら、固定することが可能になる。さらに、曲流部の存在は瀬と淵の保持を容易にし、溪流環境の多様性を保たせることになる。

当然、これらの低ダム群には魚道を設けるものとし、魚類の移動を妨げないようにする。魚道はルシャ川の低ダム群のように、最下流のダムのみにつ設することで効果があると予想されるが、それ以外のダムについても落差や対象とする魚種の遡上能力に応じて上流のダムにつ

いても検討を加え、必要に応じて付設するものとする。

平坦地内においては土地利用が高度化されるため、これに加えてよりきめの細かい流路の固定、局所洗掘の防止が必要となる。ここでは従来の流路工のように河道をすべて掘削修正す



図—35 自然環境の保全を重視した砂防工事のモデル

氾濫原の頂部(a)、曲流部(b, c)、溪岸崩壊の脚部(c)、氾濫原内の狭窄部の下流(d)等に低ダム群を設置し、土砂移動の調節と河道の固定を図る。低ダムには必要に応じて簡易魚道を付設し魚類の遡上を確実にする。河道は元溪床地形を尊重しながら固定し、複雑な環境要素を保つようにする。ダム群施工地付近は防災空間として土地利用を規制し、溪畔林を定着させる。

Fig. 35. A model of sabo works considering of conservation of natural environment.

To control bed movement and channel fixation, the low dams series are set at head of flood-plan (a), curving place (b, c), a place below narrowed place (d), and foot of bank erosion. Fishways should be attached to the dams to guarantee fish migration. The channel fixation works make much of the original shape of stream bed to keep variety of the stream environment. Near the low dams series riparian forest should be taken roots.

るのではなく、河道に存在する石礫を利用し、人工的にアーマコートを作ることにより洗掘防止と流路の固定にあたるものとする¹⁴⁾(図-36)。この方法により、溪床微地形の複雑さが保たれ、流れの多様性が維持されるのである。

低ダム群工法はある広がりをもった場に土砂を堆積させて空間を保全する。その堆積地には植生が侵入することになるが、工事の進展に伴いダム群施工地が相対的に安定化し、樹木集団の成立をみることになる。拡幅部に施工されたダム群の常水路の周辺や、曲流部に設置されたダム群では外曲側の堆積地に溪畔林が形成されることになるのである。溪畔林は溪流生態系に対し、有機物を供給する、あるいは日斜を遮り水温を調節するという経路を経て大きく影響し、溪流魚にとってはプラスの方向に作用する。また小型鳥獣にとっての生息場となる。

流路付近の樹木は流木の材料となったり、流動物をダムアップして土砂移動を助長するおそれもあるが、他方では河川周囲の林が水害防備林として位置づけられ、機能してきた面もある^{18, 40)}のである。この点に関する検討は慎重になされなければならないが、安定的な場では土砂移動を助長することはないと考える。また、溪畔林は人間にとっても身近な自然的要素となり、景観的にも重要な構成要素と位置づけられる。このように溪畔林の成立を積極的に捉らえることにより、より質の高い溪流環境の創造が可能となると考える。

本来砂防は流域に人為的な働きかけを行い安全な土地を造り出すという、空間的な行為である。従来の砂防においては土砂量の収支や勾配の概念に捉らわれ、このことを見失いがちであったことを東¹⁰⁾は指摘し、空間論的視点の重要性を強調した。

従来の砂防では溪流は水と土砂の運動の場であると捉らえられてきた。ここに東¹¹⁾は、ある現象はその規模にみあった大きさの場で生じるという認識から、土砂移動のある広がりを持った場で処理するというように、意識的に防災空間を設定することにより安全な空間を造り出すことを強調した。前者が1次元的であるのに対し、より3次元的な認識、対応であるといえる。そしてこれに加えて、溪流が人間にとっての自然環境であると同時に、水生生物の生活環境であることを基本的な認識として考えたものが溪流環境の保全を重視した砂防工法である。

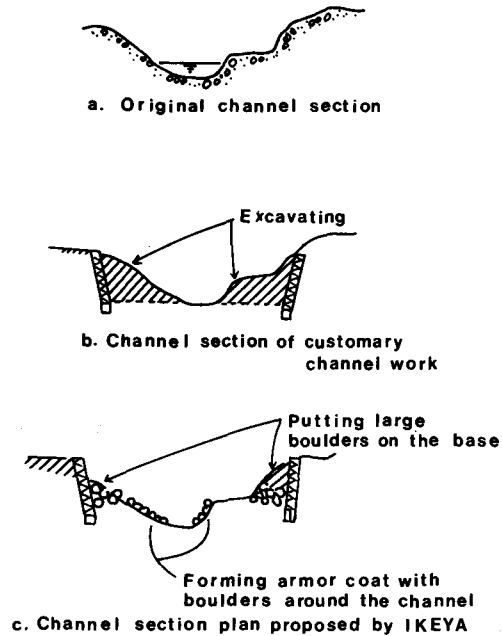


図-36 元溪床の地形を尊重した河道計画(池谷¹⁴⁾による)

Fig. 36. Channel section plan which makes much of the original shape of the stream bed (after Ikeya¹⁴⁾).

水と土砂の運動の場である溪流に生物の要素を取り入れ、これらを調和させることによって、防災空間であると同時に生物の生息空間であり、漁業資源生産の空間、そして人間にとって身近で親しみの持てる空間としての溪流環境を創造することが可能となる。

結 言

古来より治山・治水は国を治めるうえでの要の一つであり、現在においてもその重要性は変わっていない。土地利用が高度化し、社会開発が進展している現状では、果たす役割はますます増大している。溪流で行われる砂防工事および治山工事の主な目的は、保全対象への土石流の直撃の防止、流送土砂の量的・質的コントロールによる下流域の安全性増大への寄与、扇面等の平坦地での流路の固定などである。いうまでもなく砂防・治山工事は時代の変遷と共に、対象としてきた場や工事の内容、社会に与える影響が変化してきた。近年その変化は社会経済条件の急激な変動や技術の発展に伴って、小さからざるものがある。

かつて溪流内で流送土砂を直接対象にする工事は、技術レベルが低かったこともあり、砂溜、土や石を材料とした簡単な堰堤等の設置、部分的で小規模な土石の排除などが行われていたにすぎない。溪間にダム群を設けて貯砂を行ない、流出土砂の抑止を行うという方法（オーストリー砂防技術）が導入されたのは明治時代後半のことである。昭和に入りセメントが土木材料として一般化するにつれ、大型のダムを設置し、多量の土砂をためる傾向をもった。戦後は、流域内に存在する土砂を量的に評価し、ダムによって土砂量をコントロールする方向が示され、現在に至っている。そして土砂の量的なコントロールの考え方と、災害を未然に防ぐという予防砂防・治山の考えが結びつき、大型貯砂ダムが主流となっている。また扇面等における流路固定、洗掘防止などでは、土木技術・材料の進歩に伴って堤防や流路工そのものの強度は増しているが、河道の平面形状や流路工の法線形等の計画の基本的な部分については依然として不明な点が多く、設計者の経験やカンにおうところが大きい。

一方、近年における高度経済成長によって人口・産業の都市集中化が促進され、都市周辺の沖積扇状地や山麓地域は急速に開発された。そして地方においても、総合開発・地域開発の名のもとに、本来は災害を受けやすい場所でも土地利用の対象とされるようになった。その結果、かつては防災工事の必要性、緊急性の低かった流域においても砂防工事の必要性が高まってきた。また、荒廃の激しい流域が整備されるにつれ、相対的に安定度の高い流域においても防災工事が行われるようになってきている。

このような社会的情勢と、先に述べたように砂防工法が貯砂ダムを中心としていることとあいまって、溪流では、その流域の荒廃の程度が著しくなくても溪間部では大型の砂防ダムが設けられ、下流の扇状地等では直線的な流路工が設けられる傾向がある。その結果、溪流は貯砂ダムをはじめ大小のダムや護岸で覆われ、あたかもコンクリートで固められてしまったかのような状態になってしまう。

1970年代前半は、日本の高度経済成長が限界を示し、いわゆる公害問題や環境破壊に対する社会の関心は高まった。そして、これらを生み出す原因である生産第一主義に対する反動から、環境保全や自然保護が重視されるようになってきた。具体的には有害な化学物質の排出規制、水質・大気汚染の防止が図られた。林業との関連では、林野の地山を大々的に露出させる大面積皆伐および単一樹種の造林による森林の単純化が問題とされた。

砂防事業については、河道内および周辺をコンクリートや鋼材等のハードな構造物で覆ってしまい、無機質・非生物的な環境にしてしまうことが問題となった。特に、溪流を生活の場とする淡水魚の受けるダメージは大きく、自然保護論者、水産関係者等から批判を受けている。北海道や本州北部では、漁業的価値の高いサケ・マスの保護・増殖が進められており、この面から溪流の環境保全が必要とされている。いうまでもなく、砂防事業の目的は土砂災害の防止であり、重要性は高い。このような社会的情勢のなかで、今後は砂防本来の目的を達成できてかつ溪流の自然環境を良好に保てるような技術の開発が求められているのである。

土砂と水を対象としてきた砂防には、溪流が生物の生息場であるという概念が存在していなかった。多様化するニーズに応えるには、従来の経験や知見では対応しきれないような問題が現れてくるものである。小手先だけの技術の見直しではとても解決は不可能で、根本的な面からの問題の見直しが必要となってくる。すなわち、砂防の中に生物的環境概念を組み込むことが最も重要なのである。しかし、砂防学の中においてはこの考えは先端的というか、ごく一部の意見にしかかなり得ていないのが現状である。自然環境としての溪流の価値を認識し、いかにこれを砂防学の中かに位置づけさせていくかが課題となる。

砂防は荒廃溪流で行われるのが常識であるが、現実にはそれほど荒れていないと思われる溪流も事業の対象となり、荒廃溪流と同様の工種・工法で工事が行われる。しかし、荒れていない溪流こそ自然環境の保全が重要であり、また荒廃溪流に対処するために考えられてきた工法を荒れていない溪流に適用することが果たして妥当であるか検討すべきである、このような観点からこの研究が始められた。

魚類に対する配慮は重要であるが、著しい荒廃溪流では防災対策が優先されなければならない。このように、防災対策と自然環境の保全は相反する面もあり、なんらかの線引が必要であると考えられる。上で、“荒れている”、“荒れていない”という表現をしたが、荒れているとはどのような状態を指すのかが問題となる。これは砂防学の根幹にふれる問題で、軽々に結論を求めることは困難であるが、いずれ明らかにされなければならない課題であると考えられる。

溪流環境の保全を重視した砂防工法として、本研究では低ダム群工法を中心とした空間創造の手法を提案した。しかし現実には、多くの溪流では既に砂防工事が行われ、その結果として落差数mのダムが無数に設置されているのである。また今後の砂防工事においても高ダムが築設されるであろうということを認識しなければならない。高ダムは魚類の移動の障害となり、これを防ぐには魚道を付設することが唯一の手段であるが、砂防ダム用の魚道に関する技術水

準は極めて低い。低ダム群工法を用いた砂防工法を推進することとは別に、溪流環境を保全するための現実的な課題として、砂防ダムに適した魚道の開発が必要である。

最後に、最大の課題としてあげられるのが、今回提案した方法を実際の溪流で適用するということである。低ダム群工法の施工実績は多いが、魚類の保護を主な目的としたものはルシヤ川の事例しかない。環境理念の確立にしても、机上の議論によるよりも現実的な事例を体験することにより、理解を深めることが可能となる。また、技術の改良という面でも、現場で生じる様々な問題点を調べることにより進展をみるのである。

本来治水・治山は流域の荒廃を安定化させ、自然と人間との関係を調和させることを最終的な目標としている。この中には、荒廃溪流を安定させ、その結果として生物の生息環境を安定させるということも含まれていると考えることができる。すなわち、砂防と環境保全は対立するものであってはならず、むしろ根本的な部分では一致しているということができる。この意味において、本研究は砂防の本質に関わっており、その意義は大きいと確信している。

要 約

従来溪流砂防は荒廃溪流において土砂流出を防災的にコントロールすることが中心課題であり、溪流における自然環境の保全はほとんど省みられてこなかった。溪流は水と土砂が運動する場であり、また水生生物の生息の場でもあり、それ自体自然的環境であるが、同時に人間にとっての社会的環境でもある。従って溪流を良好な環境状態に保つことは人間社会に対して公共の福祉や利益の増進をもたらす。このような認識のもとに、溪流環境を保全しつつ、同時に土砂災害防止という砂防の本来的な目的を達成することができる砂防技術のあり方について検討を行った。

本研究では溪流環境を、人間社会にとっての環境ととらえ、溪流における生物的・非生物的諸要素の有り様としている。そして保全されるべきものとして、生物的要素、特に溪流に生息する魚類を対象とした。その理由は魚類が溪流において、生物的要素のなかで中心的存在であり、砂防工事の影響を受けやすく、そして人間にとっても関係の深い存在であるからである。

荒廃溪流における砂防事業の進展に伴い、また市民の災害に対する安全性の強い要求により、相対的に安定度の高い流域においても砂防工事が行われるようになってきている。何よりも安全性の確保は図られなければならないが、安定度の高い溪流においては特に環境保全との調和が重要であると考えた。この観点から本研究の対象とする場として、土砂移動や流路変動の活発でない溪流を想定した。

本研究では、まず溪流環境の概念を明確にし、魚類の生息場としての溪流の特性、土砂と水の運動の場としての溪流を土砂移動と流路変動の実態を探ることによりその特性を明らかにした。次に砂防工事が魚類に与える影響を具体的に明らかにした。特に魚類の遡上にダムが大

きな影響を与えているが、このことについては魚の遡上能力を知るという目的を合わせて、遡上実験を行い検討を加えた。また、現在の砂防技術の実態を、技術基準および砂防河川における実態を調査し、明らかにした。これらの結果を照し合わせるにより、砂防学のなかに溪流環境の保全を明確に位置づけ、環境保全を重視した砂防工法について考察を進めた。

結果は以下のとおりである。

1) 流路変動や土砂移動は溪床に裸地を出現させ、そこには溪畔林が形成される。溪畔の樹木は流木の材料となり地形変化に影響を与える。溪流は溪床勾配や構成材料に制約されて瀬と淵を伴いながら流路を形成し、ここに溪畔林から有機物が供給され、水生生物の生息環境となっている。このように生物学的および非生物学的諸要素が関係しあって溪流環境を形成する。

2) 砂防工事が直接的に関係する魚は、サケ科魚類の多く、アユ、ウグイ、カジカ、ドンコ・ヨシノボリ属等に属する一部の魚種などである。これらのうち本研究では特にイワナ、サクラマス、カラフトマス等のサケ科魚類を対象として検討を行った。これらの魚種に限定した理由は、それらが有用魚であること、生息のために多種多様な環境要素を必要とすること、および存在の確認や採取等が容易で調査の対象として有利であるからである。

3) 砂防工事が行われる場合は河川の上流部である。溪床は急勾配で、瀬と淵が多数形成され、複雑な溪床微地形と水の流れが生じている。土砂移動や流路変動は水生生物にとっては環境の激変であり、このような攪乱が高い頻度で生じる溪流は生物の生息場としては安定的ではない。

4) 人間が集中的に土地利用を行う場合は砂防学の流域区分では堆積地帯である。荒廃溪流では土砂移動が活発であるが、非荒廃溪流では現象の規模と頻度が相対的に低下しており、砂防学が対象としてきた堆積地帯とは異なった特性をもつ。本研究ではこのような場を溪間の氾濫原として一般の扇状地と区別し、その特性を探った。

5) 北海道北部の天塩川水系アユマナイ川およびヌポロマッポロ川の溪間の氾濫原において、現地測量、植生指標の解析などにより土砂移動と流路変動の過程を探った。その結果、土砂移動が不活発であると河道は著しい屈曲を呈すること、土砂移動の頻度が流路変動に大きく影響し、小規模な土砂移動でも大規模な流路変動のきっかけになりうることが明らかにされた。

6) 砂防工事が魚類に影響を与えるのは、ダムが魚類の移動の障害となっていることと、河道の改修が溪床の微地形と水の流れ方を変えることによる。

7) 生活環のなかで海と河川を往復しなければならぬサケ・マスにとって、ダムはその上流部での生息を不可能にする。山地溪流型のまま海に注ぐような小河川で河口付近に砂防ダムがあるとその影響は甚大である。河川内で一生を過ごす魚類にとっても、多数のダムによって個体群が分断されると個体群の維持が困難になる。

8) 北海道西部積丹半島の積丹川で河道の改修が魚類にどのように影響するかを調査した。河道の改修は溪床微地形を平坦にし、瀬と淵を消失させ、水の流れを単調にした。非改修区間

と比較して改修区間ではサクラマス幼魚が著しく少なかった。これは複雑に乱れた流れおよびそれをもたらす複雑な溪床地形が、サクラマス幼魚のような遊泳性魚類にとって生息環境としてそれぞれ意味を持っており、改修によってその要素が取り除かれたためであると考えた。

9) 北海道知床半島のルシャ川の床固工群でカラフトマスを用いて遡上実験を行った。落差1.3mのダムを越えることが不可能であることを確認した。これはダム直下のプールの形状が遡上に不適当な状態であったことが大きく影響している。砂防河川では床固工の落差やプールの形状は変化しやすく、この点に注意を払わなければならないことが示唆された。

10) 現在の砂防の基準では、流域内の可動土砂を量的にとらえ、その収支に基づいて砂防施設の規模や配置が計画される。実際の河川では必ずしもこの方法で行われていない場面もあるが、将来的には基本的にこの方法によるものと予想される。

11) 現在河川環境の概念には生物の生息の場所としての認識が欠けている。溪流環境の保全を重視した砂防技術確立の理念上のバックボーンとして生物を含めた溪流環境の概念を確立することが必要である。

12) 大型砂防ダムと直線状流路工の組み合わせは理論的・实际的な問題点を持っている。小規模なダムと元々の溪床微地形を尊重した河道の固定によっても土砂災害の防止は可能である。この方法は魚類にとって移動を確実にしやすく、多様な環境を破壊しない。

13) 低ダム群工法は高さ1~2mのダムを複数(最低3基)短い間隔で設置することにより、効果的に土砂移動のコントロールを図るものである。防災および環境保全の両面において有効な工法であると考え、検討を加えた。

14) 知床半島ルシャ川の低ダム群に簡易魚道が付設され、再び遡上実験を行った。前堤と隔壁からなる簡単な構造の魚道の付設により、魚類の遡上が確実になることが確認され、低ダム群工法の有利性が確かめられた。

15) 低ダム群工法には土砂調節機能のほかに、曲流部において河道を固定する機能があり、流路を直線化することなく固定することが可能となる。

16) 平坦地(溪間の氾濫原、扇状地等)の頂部に土砂調節機能を期待した低ダム群を設置する。平坦地内は、曲流部、および将来流路変動を生じる可能性の高い地点に低ダム群を設置し、河道の固定を図る。この地点は、平坦地における土砂移動・流路変動の過程と現在の地形等を調査し分析することにより抽出することができる。平坦地の中では、河道の元地形を尊重した断面計画を採用するものとする。

17) この方法により、防災機能を十分に発揮し、魚類に与える影響を最小限にできる砂防が可能となると考えた。さらに、低ダム群施工地周辺には溪畔林の成立が予想でき、より優れた溪流環境の形成が期待できる。

参考文献

- 1) 新谷 融 (1972): 溪床土石の移動過程調査の方法. 新砂防, 24 (4), 6-13.
- 2) 芦田和男・高橋 保・水山高久 (1975): 流路工計画に関する水理学的研究. 新砂防, 28 (2), 9-16.
- 3) 馬場仁志・中村太士・新谷 融 (1983): 富良野川上流域における堆積域の分布特性と土石移動規模. 新砂防, 36 (1), 8-16.
- 4) BOUSSU, M. F. (1954): Relationship between trout and cover on a small stream. *J. Wildl. Magmt.*, 18, 229-239.
- 5) CHAPMAN, D. W. (1966): Food and space as regulators of salmonid populations in streams. *Amer. Nat.*, 100, 345-357.
- 6) CUMMINS, K. W. (1977): From headwater streams to rivers. *American Biology Teacher*, 39, 305-312.
- 7) CUMMINS, K. W. (1980): The multipule linkages of forests to streams. In: WARING, R. W. (ed.), *Forests: Fresh perspectives from ecosystem analysis*, pp. 159-170. Proceedings 40 th annual biology colloquim 1979., Oregon State Univ.
- 8) ELSER, A. A. (1968): Fish populations of a trout stream in relation to major habitat zones and channel alterations. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 97 (4), 389-397.
- 9) 遠藤泰造 (1973): 北海道における砂防・治山ダムの魚道とその問題点. 農林水産省林業試験場北海道支場研究資料, No. 102, 35 pp.
- 10) 東 三郎 (1979): 地表変動論. 280pp., 北海道大学図書刊行会, 札幌
- 11) 東 三郎 (1982): 低ダム群工法. 387pp., 北海道大学図書刊行会, 札幌
- 12) 北海道林務部治山課(監) (1980): 北海道治山技術基準指針解説. 改訂版. (社)北海道治山協会, 札幌.
- 13) 北海道土木部砂防災害課 (1981): 砂防技術指針. 404pp., (社)北海道土木協会, 札幌.
- 14) 池谷 浩 (1978): 流路工計画における計画河幅の考え方. 新砂防, 31 (1), 7-13.
- 15) 泉 岩男・池谷 浩・伊巻幹雄 (1978): 急勾配水路における砂礫堆について. 新砂防, 31 (2), 9-19.
- 16) JIBP-PF Research Group of the Yurappu River (1975): Productivity of biotic communities in the Yurappu River. pp. 287-338. In: MORI, S. and G. YAMAMOTO (eds.), *Productivity of communities in Japanese inland waters*, Univ. of Tokyo Press.
- 17) 門村 浩 (1971): 扇状地の微地形とその形成. 「扇状地」(矢沢大二・戸谷 洋・貝塚爽平編) pp. 55-96, 古今書院, 東京.
- 18) 甲斐原一朗 (1962): 林業の政策と経営の論理. 下巻. 359pp., 農林出版, 東京.
- 19) 上林徳久 (1987): 豪雪造林地に発生した表層崩壊の分布傾向について. 日林中支講. 35, 217-220.
- 20) 可児藤吉 (1944): 溪流棲昆虫の生態. 270pp., 研究社, 東京.
- 21) 建設省河川局 (1977): 河川砂防技術基準(案). 計画編. 278 pp., 山海堂, 東京.
- 22) 木村弘太郎 (1951): 砂防計画樹立に対する構想. 河川, 昭和26年5月号, 10-15.
- 23) 木村正信 (1984): 沖積扇状地の砂防工法に関する基礎的研究. 岐阜大農演報. No. 1, 83-169.
- 24) 木下良作 (1961): 石狩川河道変遷調査. 科学技術庁資源局資料, 第36号, 138 pp.
- 25) 木下良作・三輪 弼 (1974): 砂レキ堆の位置が安定化する流路形状. 新砂防, 27 (3), 12-17.
- 26) 小林哲夫 (1975): サケ・マスを中心とする河川開発の問題. 北海道漁業団体公害対策本部, 48 pp.
- 27) 小林哲夫 (1985): サクラマスをめぐる. 淡水魚. 11, 33-38.
- 28) 小島 博・杉若圭一 (1979): 厚田川におけるサクラマス幼魚の成長と生息密度および現存量の季節変化. 北海道立水産孵化場研報, 34, 7-16.
- 29) 小島 博・杉若圭一 (1980): 厚田川におけるサクラマス幼魚の生産量と資源量. 北海道立水産孵化場研報, 35, 35-43.
- 30) 小宮山英重 (1980): 川の構造と魚の生活. 北海道自然保護協会誌, 19, 14-18.
- 31) 近藤 寛・鳥羽一幸・中野正人 (1978): 知床ルシャ川の治山工事と沿岸漁業. 日林北支講. 27, 108-111.
- 32) 小山長雄 (1967): 魚道をめぐる諸問題. II. 解説篇. 96pp., 木曾三川河口資源調査団 (KST).

- 33) 小山長雄 (1978): アユの生態. 176pp., 中央公論社, 東京.
- 34) 小山長雄 (1979): 魚ののぼらぬ魚道. 淡水魚, 5, 1-8.
- 35) 小山長雄 (1981): 溪流魚の魚道. 淡水魚, 7, 1-6.
- 36) LEWIS, S. L. (1988): Physical factors influencing fish populations in pools of a trout stream. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 98(1), 14-19.
- 37) 町田 洋 (1984): 巨大崩壊, 岩屑流と河床変動. 地形, 5(3), 155-178.
- 38) 松井 愈 (1971): 地質概論. 「北大天塩・中川地方演習林の森林植生」(館脇 操・五十嵐恒夫著) 北大演研報, 28(1), 5-13.
- 39) 宮地伝三郎・川那部浩哉・水野信彦 (1976): 原色日本淡水魚類図鑑. 462pp., 保育社, 東京.
- 40) 宮村 忠 (1985): 水害. 220pp., 中央公論社, 東京.
- 41) 水野信彦・御勢久右衛門 (1972): 河川の生態学. 246pp., 築地書館, 東京.
- 42) MUNDIE, J. H. (1968): Ecological implications of the diet of juvenile coho in streams. In: Northeote, T. G. (ed.), *Symposium on salmon and trout in streams*, pp. 135-152., H. R. MacMillan lectures in fisheries, Inst. of Fish., U. B. C. Vancouver.
- 43) 村本嘉雄・藤田裕一郎 (1976): 蛇行流路の形成過程に関する研究. 京大防災研年報, No. 19. B, 167-185.
- 44) 長尾捨一 (1962): 5万分の1地質図幅説明書「天塩中川」. 北海道立地下資源調査所.
- 45) 中村太士・新谷 融 (1983): 土砂堆積形状と堆積空間. 新砂防, 35, (3), 9-16.
- 46) 野口陽一ほか (1969): 砂防工学. 191 pp., 朝倉書店, 東京.
- 47) 野沢 保・坂本 享・加納 隆・稲月恒夫 (1981): 5万分の1図幅「白木峰地域と地質」, 地質調査所
- 48) 小野寺弘道・柳井清治・酒谷幸彦 (1981): 溪床変動と溪畔林の構造. 日林論, 92, 199-200.
- 49) 大野磯吉 (1933): 北海道産サクラマス在生活史. No. 1. 鮭鱒業報, 5 (1), 15-26.
- 50) 大野磯吉 (1933): 北海道産サクラマス在生活史. No. 2. 鮭鱒業報, 5 (2), 13-25.
- 51) 林 野 庁 (監) (1983): 治山技術基準解説. 365 pp., 日本治山治水協会, 東京.
- 52) RUGGLES, C. P. (1968): Depth and velocity as a factor in stream rearing and production of juvenile coho salmon. *The Canadian Fish Culturist*, 38, 37-53.
- 53) 坂本 享・野沢 保 (1960): 5万分の1地質図幅説明書「八尾」, 地質調査所.
- 54) 酒谷幸彦・小野寺弘道・柳井清治 (1980): クウワウンナイ沢における流路変動と河畔林の構造(I)-流路変動と流木の影響一. 日林北支講29, 188-190.
- 55) 笹賀一郎 (1978): 扇状地堆積物の再移動に関する研究-宝来沢扇状地・青木の沢扇状地を中心として一. 新砂防, 30 (4), 1-8.
- 56) SAUNDERS, J. W. and M. W. SMITH (1962): Physical alteration of stream habitat to improve brook trout productinn. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 91, 185-188.
- 57) 清水 宏 (1983): 溪流における砂防計画手法に関する研究. 北大演研報, 40, (1), 101-196.
- 58) STEWART, P. A. (1972): Physical factors influencfng trout density density in at small stream. *Colo. Div. Game, Parks and Fish Res. Rev.*, 7, p. 50.
- 59) STUART, T. A. (1962): The leaping behaviour of salmon and trout at falls and obstructions. *Freshwater and Salmon Fisheries*, 28, Dep. of Agr. and Fish. for Scotland, 46 pp.
- 60) 角 靖夫・野沢 保 (1973): 5万分の1図幅「魚津地域の地質」, 地質調査所.
- 61) SWANSON, F. J. (1980): Geomorphology and ecosystems. In: WARING, R. W. (ed.), *Forests: Fresh perspectives from ecosystem analysis*, pp. 159-170., *Proceedings 40 th annual biology colloquim 1979, Oregon State Univ.*
- 62) 高橋剛一郎・東 三郎 (1980): 遡河魚の生活史と魚道問題. 日林北支講, 29, 194-196.
- 63) 高橋剛一郎 (1981): 知床半島における河川工事・河川工作物と魚類の保護について. 知床半島自然生態系総合調査報告書動物篇, 28-42, 北海道.
- 64) 高橋 裕 (1971): 国土の変貌と水害. 216
- 65) 田澤武直・福田 寿・金子祐次郎 (1982): 治山ダムにおける魚道等に関する調査(要約). 調査試験報告.

- 13, 213-286, (財)林業土木コンサルタント付属研究所.
- 66) 津田松苗 (1962): 水生昆虫学. 269 pp., 北隆館, 東京.
- 67) ト部弘実・高村健二・細谷和海 (1978): 魚類. 「京都市内河川の生態学的研究 I」(京都野性動物研究会, 川那部浩哉(編)), 139 pp.
- 68) WENGER, K. F. (ed.) (1984): Forestry handbook. (2nd. ed.) 1335 pp., Jhon Weily & Sons, New York.
- 69) 山村悦夫 (1978): 定住圏構想と治水自然主義論. 土木学会北海道支部論文報告集, 昭和53年度, 255-260.

Summary

Usually a purpose of sabo (torrent control) is to control sediment discharge for prevention of disaster, conservation of stream environment has not been much considered. In stream water and bed load move, at the same time aquatic life lives there, and stream is natural environment by itself as well as social environment for human beings. So it is beneficial for us to conserve stream environment excellently. Based on this understanding, the desirable sabo technique is studied.

In this study the auther regard that stream environment consists of various biotic and nonbiotic elements, and is the environment for human society. As an object of environment conservation fish is taken up. Because fish is the most leading element in the biotic elements, and is easily endangered by sabo works, and it is useful for us.

Coordination of environment conservation and prevention of disaster is especially important in stable stream. So this study supposes the stream where bed load movement and channel course fluctuation are not so active as objective area.

In this study, first a concept of stream environment is stipulated, characteristics of stream environment are clarified through analyzing stream characteristics as habitat of fish, and real state of bed load movement and channel fluctuation. Secondary effects of sabo works on fish are made clear. Especially a matter of obstacle to fish migration by dam is considered through leaping experiment of fish. Then standard and circumstances of sabo works are clarified. By synthesizing results of the above estimation, conservation of stream environment is properly valued in sabo, and the sabo technique which does not endanger stream environment is studied.

The results are as followed:

- 1) Channel course fluctuation and bed load movement cause bare land where riparian forest is formed. The forest produces woody debris which affect geomorphic processes. Stream forms riffles and pools under effects of gradient of stream bed and bed load, flowing water becomes environment for fish being supplied organisms by riparian forest. Thus both biotic and non-biotic elements effect each other and form stream environment.
- 2) Fishes which are affected by sabo works directly are many of Salmonidae fishes, *Plecoglossus altivelis*, some species of *Cottus*, *Odontobutis*, *Rhinogobius* etc. In this study researches are done to Salmonidae fishes. For Salmonidae fishes are much useful, they need various environmental elements, and they are available for object of field researches.
- 3) Sabo works are performed in upper reaches in river. Stream bed has steep gradient, numerous riffles and pools are formed, there exist rugged bed shape and complexly disturbed flow condition. For aquatic life abrupt movement of bed load or channel course change is drastic change of their habitat, stream where these disturbances often

occur is not stable environment.

4) Concentratedly utilized place corresponds to depositional area. In torrential stream bed load movement and channel change often occur, however, in non-torrential stream magnitude and frequency of these phenomena relatively fall, showing different characteristics from torrent. In this study the characteristics of flood-plain valley which is formed around non-torrential stream are researched.

5) In flood-plain valley of the Ayumanai river and the Nuporomapporo river, tributaries of the Teshio river in north Hokkaido, processes of bed movement and channel fluctuation were estimated by means of field surveying and analyzing of the ages of wood stands etc. It is clarified that remarkable meander results from rare movement of bed load, abrupt channel change is affected by the frequency of bed load movement and even a deposition of small scale can cause an large-scale change of the channel.

6) Sabo works endanger fish habitat as follows: dam obstructs fish migration and channel alteration changes microtopography of cause an large-scale change of the into monotonous phase.

7) As for anadomous fish such as salmon, dam does not allow them to live on upstream area from the dam. In stream which flows into sea maintaining its shape of mountainous stream condition, the effect is extremely serious when a dam is constructed near the mouth. It is difficult for fish which inhabits in stream for whole life to maintain the population, if they are seriously cut off by numerous dams.

8) In the Shakotan river in west Hokkaido, effects of channel alteration on fish habitat is reserched. Channel alteration transforms stream bed into flat shape and water flow into monotonous phase, destroys series of riffle and pool. Standing crops of juvenile *Oncorhynchus masou* in the altered section is remarkably small compared with that in the unaltered section. Because rugged microtopography and complexly disturbed current have some significance as the environment of nectonic fish such as juvenile *O. masou*, alteration destroys the environmental variety of their habitat.

9) In the Rusha river in the Shiretoko peninsula in east Hokkaido, leaping experiment of *O. gorbuscha* is done. The fish is ascertained not to be able to pass a low dam which has vertical distance of 1.3 m (from the level of pool to the dam crown). This is due to the fact that the pool under the dam as disadvantageous profile for the leaping behavior. It is suggested that we must pay attention to the tendency that the vertical distance and the depth of pool often change.

10) In the standard of sabo technique, movable soils and gravels are estimated quantitatively. Based on the income and outgo of the quantities of the movable gravels, arrangement and magnitude of sabo works are planned. This method is predicted to be adopted also in future.

11) A concept of stream environment of today lacks the understanding of stream to be habitat of aquatic life. As the fundamentals of the desirable sabo technique the proper concept to stream environment must be established.

12) Control of erosion and deposition by the combination of large dam and channel works of linear formation have some problems theoretically and practically. Disaster can be prevented by the works of small dam and channel fixation not destroying the rugged microtopography. This plan can easily guarantee the migration and does not

destroy multiformity of environment for fish.

13) The method of low dams series aims at effective controlling of bed load movement. Low dams series consists of three or more dams which have height of 1-2 m, and the distance of each dam is short. Consideration is given on this method which is thought to be effective in disaster prevention and environment conservation.

14) Fishway was constructed to one of the low dams series on the Rurua river, the leaping experiment is done again. The fishway which has very simple structure composed of front dam and side walls enables fish to pass the dam, usefulness of the method of low dams series is confirmed.

15) Besides the function of control of bed load movement of the method of low dams series, the method has consolidating function in curving place of channel, so it can control the channel in flood-plain valley preventing the channel from being straightened.

16) The series of low dams should be set at the head of flood-plain valley or fan expecting the controlling function of bed load movement. In the central area of flood-plain or fan, the low dams series should be set to fix channel course on curved places or some places which have much potentiality of the abrupt channel change. The later places can be identified through understanding of the processes and the characteristics of bed load movement and channel fluctuation. In addition to those, channel section should be designed making much of the original shape of bed.

17) By means of the above procedures, the author thinks that desirable sabo technique can be actualized which are beneficial both for prevention of disaster and environment conservation. Furthermore vegetation which is expected to take roots around the low dams will improve the stream environment more and more.



写真一 アユマナイ川における流路変動。以前は正面の奥の岸の下が流路であったが、1981年の洪水時に正面に土砂が堆積し、流路は右側へ変動した。

Photo 1. Channel course change in the Ayumanai river. Water had flowed under the front inmost bank, by the deposition of bed load of the flood in 1981 the channel course was changed to the right side.

写真二 ヌポロマッポロ川における流路変動。土砂堆積により、流路は左岸側（写真では右側）に変化した。

Photo 2. Channel course change in the Nuporomapporo river. The channel course was changed to the left bank side (to the right side in this photograph) by the bed load deposition.



写真三 改修区間の溪相(積丹川)
Photo 3. View of the altered section in the Shakotan river.

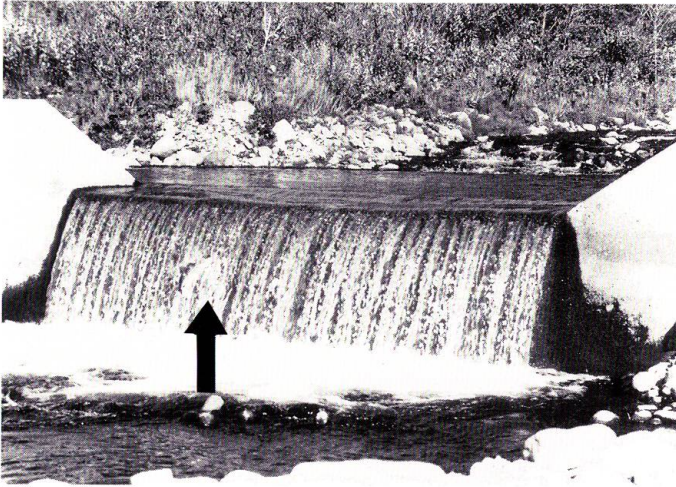


写真一四 非改修区間の溪相(積丹川)
 Photo 4. View of the unaltered section in the Shakotan river.

写真一五 ルシャ川の低ダム群全景
 (1983年撮影)
 Photo 5. View of the low dams series in the Rusha river (taken in 1983).



写真一六 ルシャ川の低ダム群全景
 (1979年, 大泰司紀之氏撮影)
 Photo 6. View of the low dams series in the Rusha river (taken by Dr. Y. Ohtaishi in 1979).

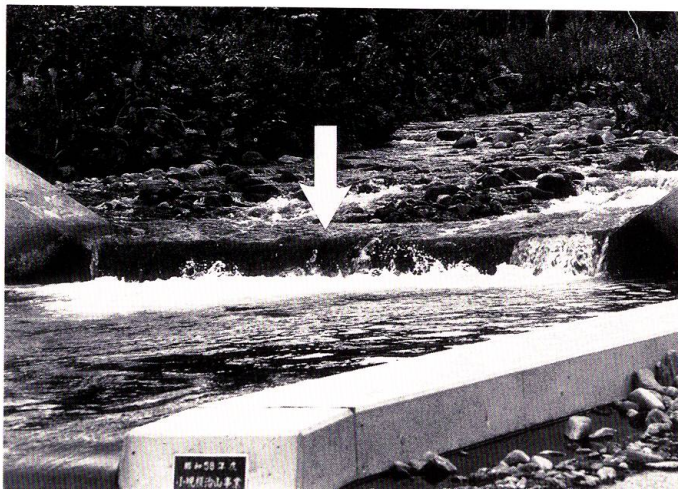
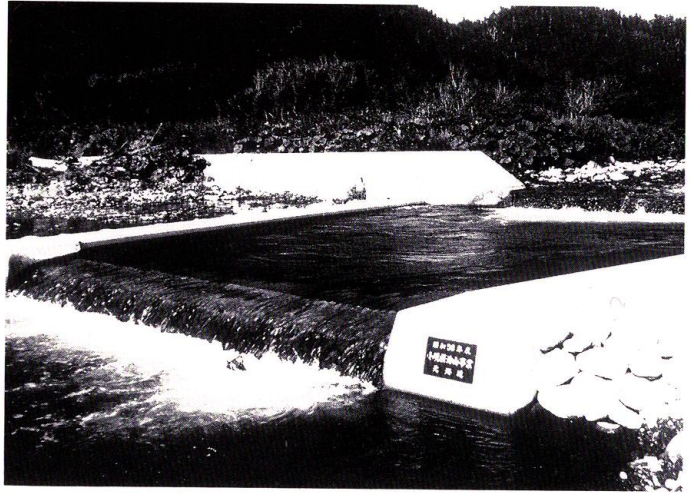


写真一七 1980年の遡上実験。1尾の魚（カラフトマス）が左側でジャンプしている。

Photo 7. Leaping experiment in 1980. A fish (*O. gorbuscha*) is leaping in the left side.

写真一八 ルシャ川の第1ダムに設置した簡易漁道。

Photo 8. Fishway attached to the No. 1 dam in the Rusha river.



写真一九 1984年の遡上実験。矢印は遡上している魚（カラフトマス）を示す。

Photo 9. Leaping experiment in 1984. The arrow shows a leaping fish (*O. gorbuscha*).