

積雪寒冷地の流域条件と水文・水質との関係

RELATIONSHIP BETWEEN A RIVER BASIN CONDITIONS AND THE HYDRAULIC PARAMETERS AND WATER QUALITY COMPONENTS OF THE RIVER IN A SNOWY, COLD REGION

高田 賢一¹・中津川 誠²・村上 泰啓³

Ken-ichi TAKADA, Makoto NAKATSUGAWA and Yasuhiro MURAKAMI

¹正会員 北海道開発土木研究所 環境研究室 研究員 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

²正会員 工博 北海道開発土木研究所 環境研究室 室長 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

³正会員 北海道開発土木研究所 環境研究室 主任研究員 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

Basin-wide hydraulic and material behaviors of a river are important factors reflected in basic indicators that are used to form consensus among residents for a river project in both environmental aspects and flood control and water utilization aspects. These indices are used for preserving ecosystem and maintaining river channels, banks and structures. We studied how runoff characteristics and water components of a river relate to the geology, climate and land use in some river basins in Hokkaido using multiple regression analysis. We found that hydraulic parameters tend to vary according to geology, which confirms past studies. We also found that water quality components were greatly affected by geology, such as the distribution of plutonic rock, metamorphic rock and unconsolidated sediment, although the data covers normal time only. This could prove to be an important consideration in river management.

Key Words : water quality, geology, land use, climate, runoff characteristics

1. はじめに

流域スケールの水文・水質成分を初めとする水と物質動態は、河道や海岸、構造物の維持さらには水域の生態系を保全する上で考慮すべき重要な要素である。ところで、森林には流況を平滑化する水源涵養機能や、洪水時の流量を軽減する洪水緩和機能が備わっているという説がある。それを背景に、ダム機能に代替する森林整備による「緑のダム」論が一部で主張されてきた¹⁾。一方で、森林機能には限界があり、「ダム」の代替機能を森林整備に期待することには無理があるとも主張されている²⁾。水収支的には森林があると蒸発散が増え、水資源上不利であることが指摘されている³⁾が、流況や水質流出特性については何が影響要因であるか?の数値的評価が必要である。

北海道の河川流域はほとんどが森林で覆われているものの水文・水質特性はそれぞれで異なっている。このような流域要因と水文特性との関係は虫明ら⁴⁾が流況と気候要因及び地質との関係を日本の太平洋岸域を中心に明らかにしていた例がある。それによると、低水流出は主に地質により影響を受けており、第四期火山性岩石、花崗岩、第三期火山性岩石、中生層、古生層の順で渇水比流量が高いことを明らかにしている。また、志水^{5),6)}は全国のダム流域を対象に、低水流出には植生よりも地質が影響していることを指摘しており、さらに近藤⁷⁾が渇水比流量には流域の地質の他に山体容量が影響していることを示唆している。

表-1 対象流域一覧

水系名	河川名	観測所名	水系名	河川名	観測所名
天塩川	似峠川	似峠	後志利別川	後志利別川	上利別
天塩川	天塩川	茂志利	後志利別川	後志利別川	美利河別川上流
石狩川	美瑛川	美瑛緑橋	沙流川	沙流川	幌毛志
石狩川	忠別川	東神楽橋	沙流川	額平川	貴気別
石狩川	石狩川	石狩平	十勝川	猿別川	止若橋
石狩川	空知川	大平橋	十勝川	塗別川	千住橋
石狩川	空知川	基線橋	十勝川	音更川	音更橋
石狩川	豊平川	奥桂	十勝川	札内川	宮林1号(札内川ダム)
石狩川	豊平川	小樽内	十勝川	十勝川	流入口(十勝ダム)
石狩川	豊平川	滝の沢	常呂川	無加川	常盤橋
石狩川	豊平川	薄別ダム	常呂川	常呂川	峰映
石狩川	豊平川	本流(豊平峡ダム)	常呂川	上ホロカトコロ川	鹿の湯
石狩川	漁川	光竜	網走川	美幌川	美幌橋
留萌川	留萌川	16線橋	留萌川	留萌川	橋橋

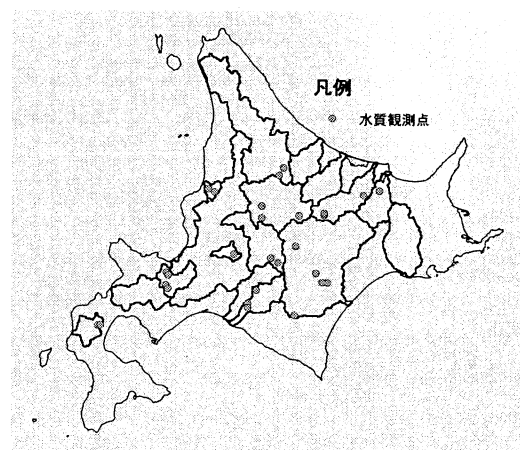


図-1 対象流域の位置

このように、流域の低水時における流出は、植生よりも地質や地形が影響しているとの見解が多く出されている。

しかし、これらの研究では降積雪など積雪寒冷地の条件を踏まえた水文・水質の特徴は把握されておらず、その解明が本研究の目的の一つである。

次に水質動態と流域要因との関係については、橋ら⁸⁾が流量により水質負荷量が支配されると指摘しており、水質負荷量－流量関係式($L-Q$ 式)の定数から水質負荷流出が特徴付けられると述べている。また、太田ら⁹⁾は石狩川流域において高水時と低水時それぞれの $L-Q$ 式を立て、それらによって求められる水質負荷量と流域の土地利用との関係に着目し、土地利用別の水質負荷原単位を提案している。その後村上ら¹⁰⁾により太田らの研究をもとに、人為的な影響の少ないダム上流域を対象とし、土地利用の他に地質の影響を考慮した水質負荷原単位を提案している。

以上をもとに、本研究では、流域条件(植生及び地質)が流出特性にどのように起因しているかを積雪域の気候要因を勘案しながら検討した。また、このような流域要因が水質負荷の流出形態にどのように影響を与えているかを見出すことを試み、河川計画における基礎的な指標とすることを目指した。

2. 対象河川流域の特徴

(1) 対象流域の植生

本研究で対象とした観測所は、上流にダムがあるなど人為的な流量コントロールがない、もしくは小さいと考えられた28観測所(表-1、図-1)を対象とし、地質及び土地利用特性を把握した。まず、河川流域の植生については、環境省ホームページ¹¹⁾よりダウンロードした植生調査3次メッシュデータを用い、河川流域界で分離して植生分類毎に集計して図示した結果を図-2に示す。河川毎に様々な植生区分が混合する状況といえ、平野部では土地利用が進んで農用地や市街地が広がる一方、山地部については、森林域がほとんどを占めていることが分かる。山地流域の植生は針葉樹林や広葉樹林などの各森林種が細分している状況となっているが、それを森林としてひとくくりで分類した。この場合多くの流域で森林が優占するが、美利河別川上流(後志利別川)や千住橋(十勝川)のようにほぼ全域が木本・草本混合域や農用地で優占している流域もある。

(2) 対象流域の地質

次に、北海道の地質を、国土地理院ホームページ¹²⁾よりダウンロードした地質データ(G01-56M)を用い、河川の対象流域で地質毎の面積を求め、図-3に流域毎の地質を図示した。この図をみると、火山岩が多くを占めている流域や、深成岩、変成岩類が分布している地域など、特徴的な岩石が広く分布している地域がある。しかし、ほとんどの流域で複数の種類の地質が

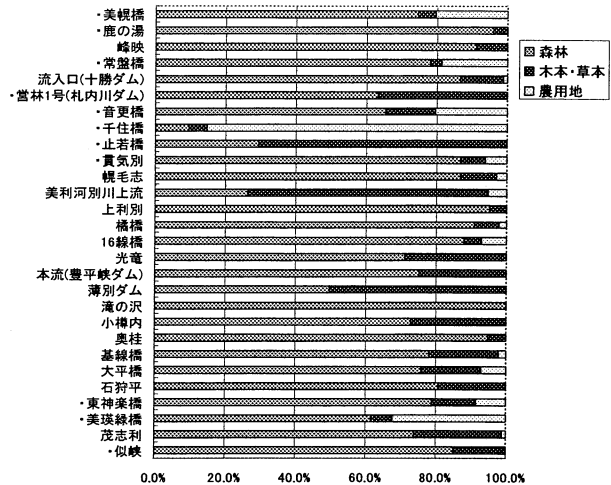


図-2 対象流域の土地利用(植生)

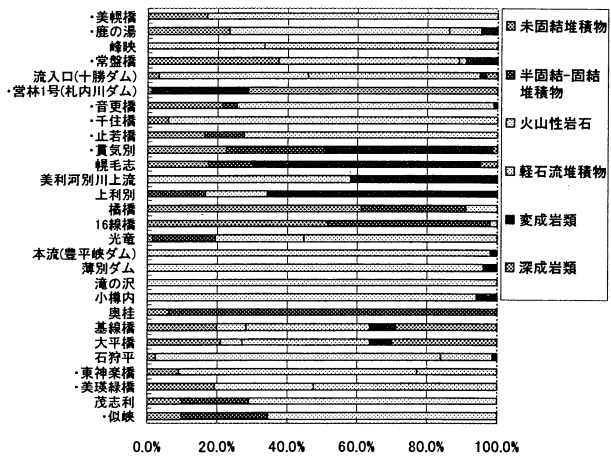


図-3 対象流域の地質

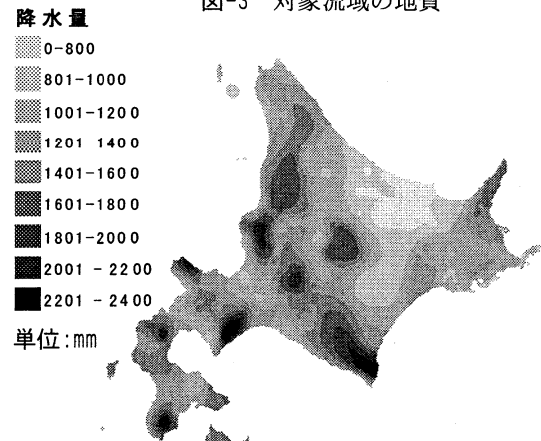


図-4 北海道の降水量分布

流域に混在している状況となっている様子が分かる。

(3) 渇水比流量と降水量の分布

まず、北海道内における低水流出の安定度を示す指標として渇水比流量を用いた。渇水比流量とは、1年間の日流量を豊水流量(上位から95番目の流量)、平水流量(同185番目)、低水流量(同275番目)、渇水流量(同355番目)の4区分に整理し、これら流況をそれぞれの流域面積で割り、100km²当りの流量(単

位: $\text{m}^3/\text{s}/100\text{km}^2$)にしたものである。この渇水比流量が高い河川ほど低水流出が安定傾向にあることを示している。流況の分布状況を見るため、北海道内の水文観測所321箇所を対象に、1996年から2000年における年間降水量及び日流量を整理し、日流量については流域面積で割って各比流量に換算して整理を行った。それらを用いて作成した降水量の分布を図-4に、渇水比流量の分布を図-5に示し、豊水比流量を渇水比流量で除した豊水渇水流量比の分布を図-6に示す。各流量は全て1996～2000年の5カ年の平均値である。この3つの図を比較すると、図-4の降水量分布と図-5の渇水比流量分布が必ずしも一致していないことがわかる。また、図-5と図-6の傾向は大きく異なり、豊水と渇水の比が大きい地域は渇水量が少なく、流況が不安定であることが示唆される。このように降水量の大小と渇水比流量の大小の地域とは必ずしも一致していないことを示している。なお、図-5の渇水比流量分布図と図-7の地質図とを比較すると、火山性軽石流堆積物と渇水比流量の高い地域が比較的一致していることが視覚的にわかる。

このように、渇水比流量に一番強い影響を及ぼすと考えられる要因は地質だと推察できるが、そのようなことを以下で定量的に分析してみる。

3. 数量化理論Ⅰ類による分析

(1) 流出特性及び水質の解析手法

ここでは虫明ら⁴⁾の手法に基づき、数量化理論Ⅰ類を用いてどのような流域のアイテムが流出・水質に影響を与えるのかを総合的に把握しようと試みる。分析の対象とする各種流出量及び水質は数値で与えられており、これを目的変数とした重回帰分析に基づき流域要因と関連づける。流域要因というのは、たとえば地質であればその流域で卓越していると思なされるアイテムを1、それ以外を0として分類した変数で特徴づけられる。各要因（土地利用、地質、気候区分）と各々のアイテムを表-2に一覧で示す。

なお、土地利用や地質において、卓越しているアイテムが何か？という判断は、要因全体のうち閉める面積率が5割以上、もしくは5割以下であっても他との比較のもと抜きんでているかどうかで行った。また、気候要因は図-8に示すように冬期降水率（12月から3月の降水量が年間の全降水量に占める比率）が2割以上か否かで判定した。図をみると、地域性ははっきりと現れ、2割以上を便宜上「日本海側」、2割以下を（オホーツク海側も入るが）「太平洋側」と称し、判別した。

なお、数量化理論Ⅰ類では、手順上要因中1つのア

表-2 各要因とアイテム一覧

流域特性	アイテム数	区分
土地利用	3	森林、木本草本、農用地
地質	6	未固結堆積物、半固結-固結堆積物、火山性岩石、火山性軽石流堆積物、深成岩類、変成岩類
気候	2	日本海側気候、太平洋側気候

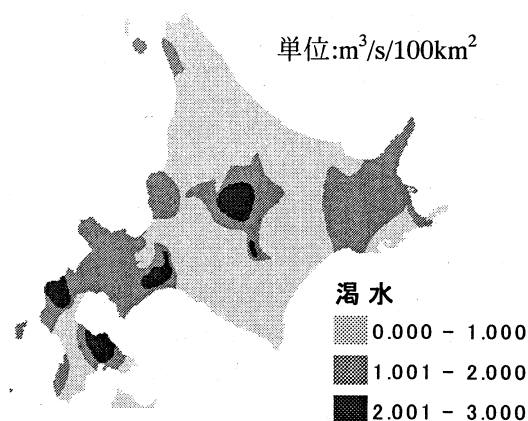


図-5 北海道の渇水比流量分布

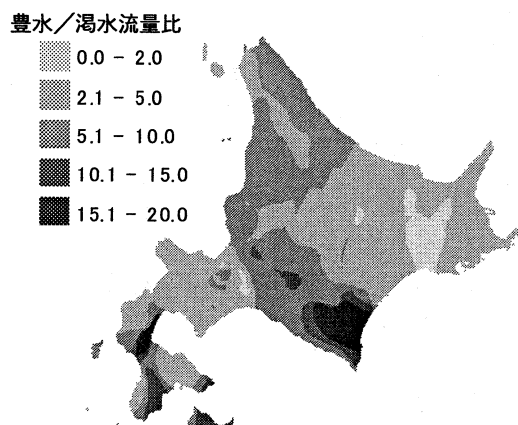


図-6 北海道の豊水/渇水流量比分布

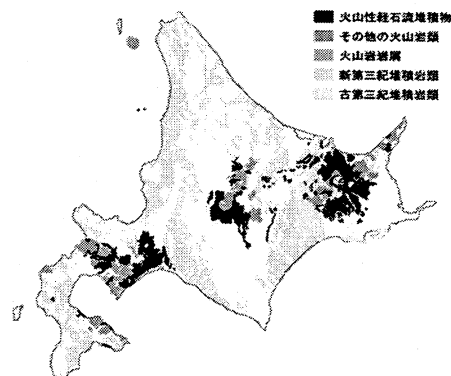


図-7 北海道の地質図¹³⁾

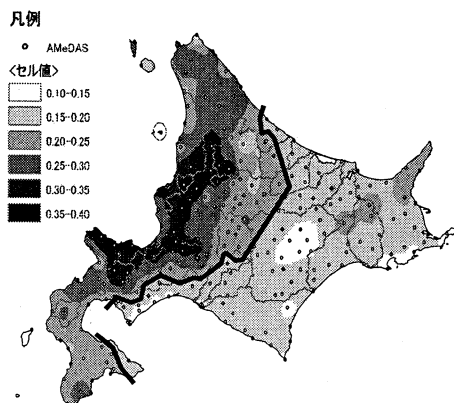


図-8 北海道の冬季降水率分布図
(太線は冬期降水率0.2の境界)

アイテムを除いた変数群（ダミー変数）で重相関解析を行うが、最終的にはすべてのアイテムにどのような重み（カテゴリーウエイト）がつくかが算出でき、結果を評価することができる。

(2) 流出特性と流域条件についての分析

まず、流出量（渇水比流量、豊水・渇水流量比）と流域要因との関係について解析を行う。渇水比流量（ $\text{m}^3/\text{s}/100\text{km}^2$ ）が大きければ流況が安定し、いわゆる渇水期でも豊富な流出があることを意味する。また豊水・渇水流量比が大きければ流況の変動が大きく、小さければ全般的に安定していることを表す指標と考えた。なお、ここで用いたデータは1996～2000年の5カ年にとられたものを平均化して用いている。

渇水比流量についてカテゴリーウエイトを一覧図に示したものを図-9、豊水・渇水流量比については図-10に示す。このなかで後者の豊水・渇水流量比は流況の安定性を示す指標であるが全体により相関が得られている。また、図-9と図-10はほぼ裏表の関係にあることが読み取れる。例えば図-9の軽石流堆積物では影響度はプラスになっているが、図-10ではマイナスの影響度となっている。また、深成岩類をみると、ちょうど軽石流堆積物と逆の傾向になっていることが分かる。これは未固結堆積物の傾向についても同じである。しかし、一方で森林、木本・草本、農用地といった土地利用区分からははっきりとした傾向を認めることは出来ない。気候区分についても、雪の占める割合が多い日本海側で流況が安定する傾向はみられるが、地質要因ほどウエイトは大きくない。以上より、流況には土地利用要因や気候要因よりも地質要因から大きく影響を受けていることが強く示されている。このことは虫明ら、志水、近藤らの提示した知見と概ね一致したことが積雪寒冷地である北海道を対象とした検討からも実証された。

なお、気候要因については先述したように降雪量の多い日本海側に流況の安定を促すような傾向が出ており、その影響が多少は認められる。近藤⁷⁾は渇水比流量の大きな流域は落葉広葉樹と対応しているが、それは日本海側の多雪地帯のブナ林帯に相当しており、植生と気候が独立ではない可能性を指摘している。ただし、今回の結果からは植生・気候要因が渇水比流量及び豊水・渇水流量比に及ぼす影響は地質に比べて小さく、地質が流況の安定に関わる主要因であるという虫明らの見解を支持する形となった。

(3) 水質と流域特性との関係

次に水質について前節と同様の数量化理論Ⅰ類の手法を用いて解析を行った。水質は各観測所で平水時を中心におこなわれている定期調査の濃度を平均したものである。したがって平常時の流域の水質特性を反映した結果となっている。データは全て1996～2000年にとられたものの平均である。項目としてはSS、COD、T-N、T-Pについて解析し、結果を図-11

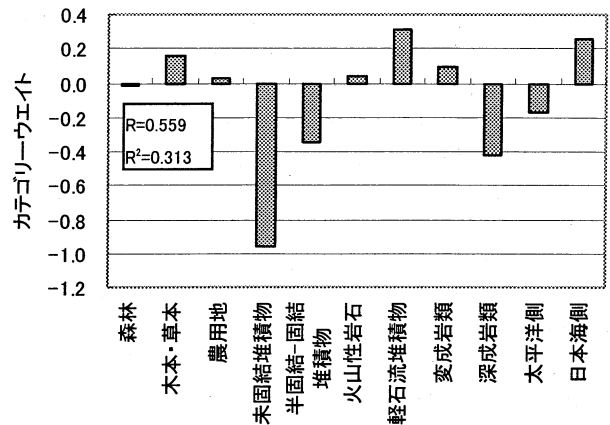


図-9 渇水比流量に対するカテゴリーウエイト

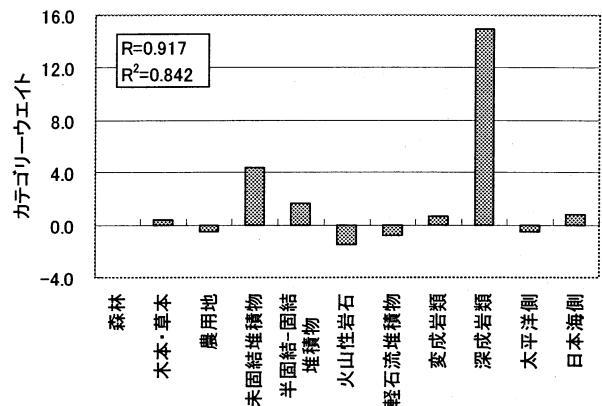


図-10 豊水・渇水流量比に対するカテゴリーウエイト

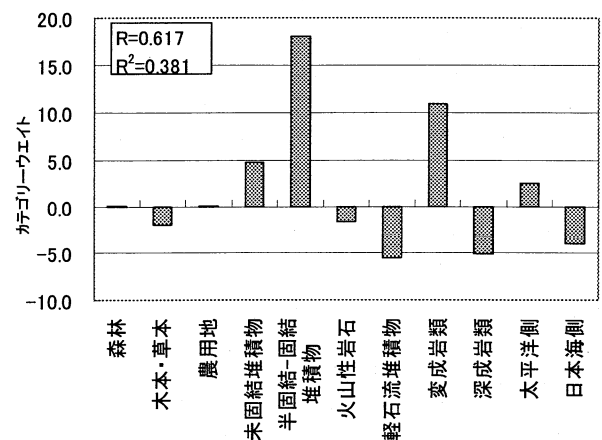


図-11 SSに対するカテゴリーウエイト

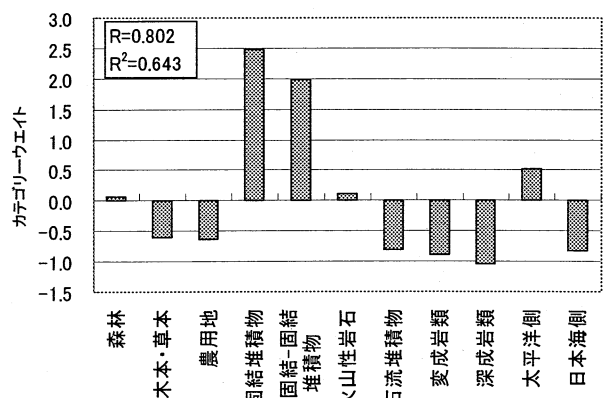


図-12 CODに対するカテゴリーウエイト

～図-14に示す。この中で、SS、COD、T-Pのカテゴリーウエイトはほぼ同じような傾向を示す。すなわち、未固結堆積物(レキ、砂、粘土、碎屑物など)、半固結-固結堆積物(礫岩、砂岩、泥岩、粘板岩など)といった地質要因が懸濁物の流出を促す要因となっていることがわかる。また、SSについては変成岩類でも大きな正のカテゴリーウエイト値が得られている。気候区分でも太平洋側で正となっている。事実、北海道の日高地方など太平洋側で土砂流出の大きい流域は、多雨地帯であり未固結堆積物や変成岩類が広く分布しており、そのような特徴と合致するものとして注目できる。

以上のように、SSといった懸濁物およびそれに連動したCOD、T-Pが未固結堆積物のような脆い地質と関係していることを示唆するような結果が得られた。このことを裏付ける資料として表-3と図-15を示す。これは北海道の主なダムの堆砂量とこれらのダム流域に占める地質面積率を表したものである。表-3によれば二風谷ダム、札内川ダム、桂沢ダムの順に単位面積当たりの比堆砂量が多くなっている。これら比堆砂量の多いダムは図-15に見られるように半固結-固結堆積物及び変成岩が一定の割合を占めている。

ただし、T-Nはこれらと違う特徴を示しており、地質というよりは土地利用のアイテムにウエイトがついているように見える。アイテム別にみると、森林で弱いながら流出抑制、草本・木本および農地で流出促進という結果に作用していることがわかる。このようなことを定量的に明らかにするには森林・土壌の窒素固定もしくは物理化学変化を考慮していく必要がある。なお、問題としては土地利用のアイテムにおいて今回扱った流域の多くが森林域であるというようなデータの偏りが統計処理に影響しているかもしれない懸念がある。ただし、決定係数、相関係数は図示したようにいずれも高い結果が得られている。

4. 各流域特性(土地利用、地質)と水文・水質

(1) 流出特性と地質との関係

ここでは、地質・土地利用それぞれの特性について水文・水質との関係を見出すことを試みた。まず前章の数量化理論Ⅰ類を用いて強い関係性が見出された渇水比流量及び豊水・渇水流量比の流出特性と地質との関係を重回帰分析を用いて解析を行った。

ここでいう地質とは2章の(2)で述べた国土地理院の国土数値情報から求めた各流域に占める表層地質別の面積率である。この表層地質データから入手した地質区分は多くの種類があり、北海道に存在しない区分や卓越した区分が少ないため、前章と同様に未固結堆積物、半固結-未固結堆積物、火山性岩石、軽石流堆積物、変成岩類、深成岩類に整理して面積率を求めた。この渇水比流量に対する地質区分別重回帰係数を図-16に、豊水・渇水流量比に対する地質区分別重回帰係数を図-17に示す。両者ともに前章で解

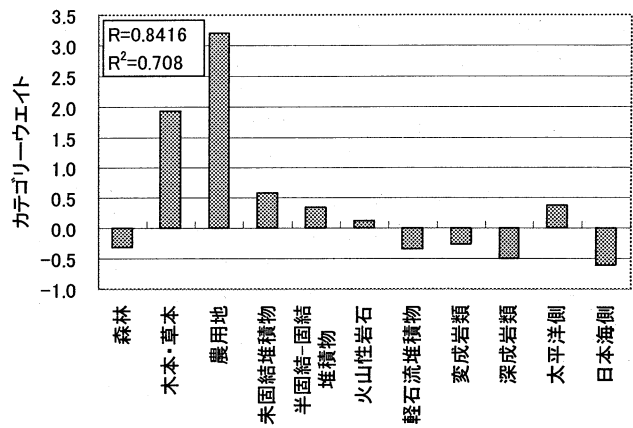


図-13 T-Nに対するカテゴリーウエイト

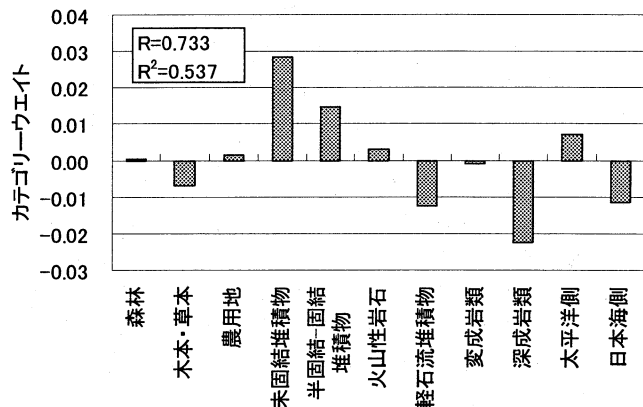


図-14 T-Pに対するカテゴリーウエイト

表-3 北海道のダムの堆砂量¹⁰⁾

ダム名称	完成 西暦	流域面積		経過 年	堆砂量 千m³	比堆砂量 千m³/km²/年
		a km²	b			c/a/b
二風谷ダム	1997	1,215.0	4	4	4,730.0	973
札内川ダム	1997	117.7	5.6	5	563.0	854
桂沢ダム	1956	151.2	45	45	2,630.6	387
漁川ダム	1980	113.3	21	21	912.9	384
十勝ダム	1984	592.0	17	17	3,669.0	365
滝里ダム	1998	1,661.9	4	4	2,085.6	314
美利河	1989	115.0	12	12	420.2	304
豊平峡ダム	1972	134.0	30	30	1,042.2	259
芦別ダム	1956	126.0	45	45	1,288.9	227
大雪ダム	1974	291.6	28	28	1,846.0	226
定山溪ダム	1989	104.0	13	13	260.7	193
岩尾内ダム	1970	331.4	32	32	1,869.0	176
鹿の子ダム	1983	124.0	18	18	262.0	117
金山ダム	1967	470.0	35	35	1,124.0	68

堆砂量等のデータは参考値(北海道開発局より提供)

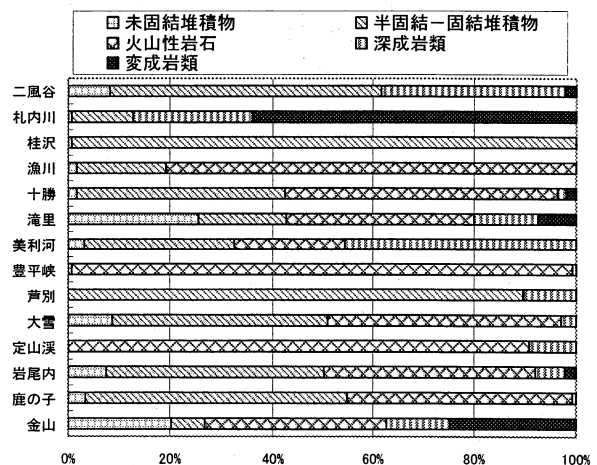


図-15 北海道のダム流域の地質面積率¹⁰⁾

析した結果以上に高い相関が得られ、流出特性と地質には密接な関係性があることが裏付けられた。

(2)水質と土地利用、地質との関係

次に水質について前節と同様の手法を用い、ここでは相関のよいものとしてCODについては地質面積率、T-Nについては土地利用面積率の重回帰係数を求め、図-18と図-19に示す。このことは数量化理論Ⅰ類により解析した図-13よりも高い相関が得られ、CODが地質、T-Nが土地利用それぞれの流域要因から強く影響を受けていることが裏付けられた。

5. 結論

得られた結果を以下に示す。

- 1) 数量化理論Ⅰ類を用いて流出特性と流域要因との関係を見出し、中でも土地利用よりも地質に強く影響されることが明らかとなった。
- 2) 次に、水質との関係においても1)と同様の手法を用いて解析を行った結果、地質との関係が強く示唆される結果となった。とくにダム流域の半固結-固結堆積物が一定程度を占めている流域にあつてはSSが大きくてダムでの堆砂量も多く、土砂を始めとする物質生産が盛んであることもこの結果を裏付けている。ただし、T-Nについては地質よりも土地利用からの影響が強い結果となった。
- 3) 地質面積率、土地利用面積率と流出特性及び水質成分との重回帰分析を行い、数量化Ⅰ類と同様の傾向が確認された。

以上は流域条件と水文・水質が一定程度関連性があることを裏付けたものと言え、他流域においても同様の解析が可能であることを示唆している。

謝辞：本研究は国土交通省北海道開発局の受託業務による補助を受けて行ったものである。また、北海道開発局各開発建設部、各ダム管理所からは貴重な水文・水質データの提供を頂いた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 公共事業を国民の手に取り戻す委員会：緑のダム構想，<http://kjc.ktload.ne.jp/md.html>, 2000
- 2) 中村太士：森林の公益的機能の限界と可能性，土木学会誌 vol. 87(9月号), pp39-42, 2002. 9.
- 3) 太田猛彦，服部重昭：地球環境時代の水と森，pp79-84，日本林業調査会，2002.
- 4) 虫明功臣，高橋裕，安藤義久：日本の山地河川に及ぼす流域の地質の効果，土木学会論文報告集 No. 309, 1981. 5
- 5) 志水俊夫：山地流域における渇水量と表層地質・傾斜・植生との関係，林試研報 No. 310, 1980.
- 6) 志水俊夫：山地流域の水源涵養機能の評価，森林総合研究所東北支所より，1999. 7
- 7) 近藤昭彦，西崎貴子：流域の気候・植生・地質・地形が流況に与える影響，水文水資源学会 2004 年研究発表会要旨集，2004. 8.
- 8) 橘治国，山田俊郎：生命環境を守る緑 第 7 回森が水

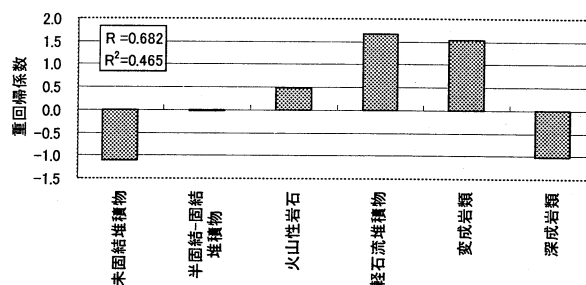


図-16 渇水比流量の地質区分別重回帰係数

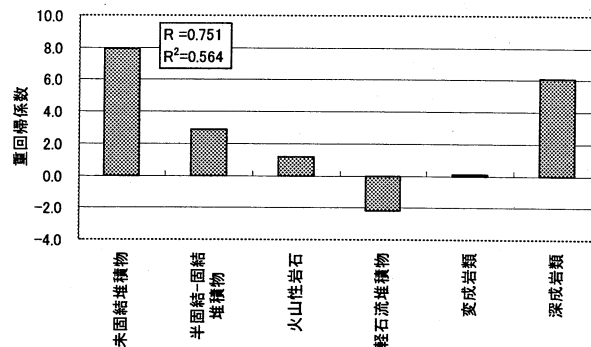


図-17 豊水渇水流量比の地質区分別重回帰係数

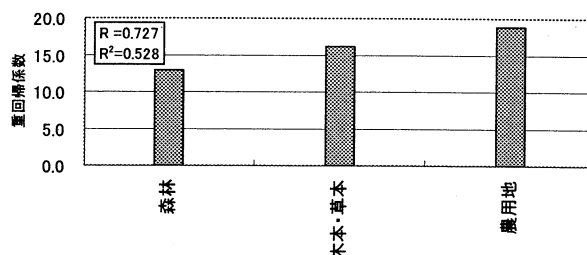


図-18 T-Nの土地利用区分別重回帰係数

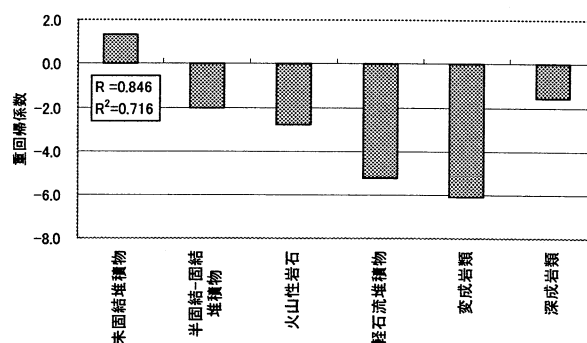


図-19 CODの地質区分別重回帰係数

- を富ます，pp119-132，土木学会，2003. 11.
- 9) 太田陽子，中津川誠：流域土地利用と負荷発生源に着目した水質成分負荷量の流出特性，河川技術論文集第 8 巻，2002. 6.
- 10) 村上泰啓，中津川誠，高田賢一：流域条件と土砂・水質成分の流出特性について，水工学論文集第 48 巻，2004. 2.
- 11) 環境省ホームページ：http://www.biodic.go.jp/dload/mesh_vg.html
- 12) 国土地理院ホームページ：<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>
- 13) 北海道地質ガイド，北海道地質調査連携研究体，2001.

(2004. 9. 30 受付)