

積雪寒冷地における領域モデルを用いた 渇水比流量の分布推定—現在と将来—

阪田 義隆^{1*}・上原 弘之²・知北 和久³・中津川 誠⁴・
山田 朋人⁵・工藤 啓介⁶・臼谷 友秀⁷

¹正会員 北海道大学大学院特任助教 工学研究院 (〒060-8628北海道札幌市北区北13西8)
E-mail: y-sakata@eng.hokudai.ac.jp

²非会員 清水建設株式会社 元北海道大学大学院修士課程 (〒810-8607福岡県福岡市中央区渡辺通3-6)
E-mail: hiroyuki-uehara@shimz.co.jp

³非会員 北海道大学大学院特任准教授 理学研究院 (〒060-0810北海道札幌市北区北10西8)
E-mail: chikita@sci.hokudai.ac.jp

⁴正会員 室蘭工業大学教授 工学研究科 (〒050-8585 北海道室蘭市水元町27-1)
E-mail: mnakatsu@mmm.muroran-it.ac.jp

⁵正会員 北海道大学大学院准教授 工学研究院 (〒060-8628北海道札幌市北区北13西8)
E-mail: tomohito@eng.hokudai.ac.jp

⁶正会員 株式会社ドーコン (〒004-8585北海道札幌市厚別区厚別中央1-5)
E-mail: kk1256@docon.jp

⁷正会員 日本気象協会北海道支社 (〒064-8555北海道札幌市中央区北4西23)
E-mail: usu@jwa.or.jp

本研究では、多様な流域からなる北海道の渇水比流量を説明する領域モデルを構築し、現在および将来の渇水比流量分布を推定する。代表115流域の渇水比流量を再現する線形回帰モデルを、降水量、気温、地形、地質、植生、土壌、土地利用の44説明因子を用いた部分最小二乗法により決定する。その際、冬の降水中的雪・雨割合は月平均気温による指数近似式を用いて推定する。その結果、冬の降雨量と降雪量、秋の降水量、冬と夏の平均気温、標高の標準偏差と平均勾配および、集水域中の火山噴出物、第四紀火山岩、森林、湿原の面積割合の11因子からなるモデルを推定誤差と因子数の点から最良と判断する。領域モデルを北海道全1122流域に適用し、非観測流域を含む渇水比流量の現在分布を推定するとともに、気候変動シミュレーション結果と併せて将来分布を予測する。

Key Words : *drought discharge, regional modeling, GIS, partial regression analysis, climate change*

1. はじめに

渇水比流量(単位集水面積当たりの渇水流量)は、流域の低水管理や水環境保全を行う指標として重要な水文量である。特に水循環基本法の施行(2014年)を受け、流域の総合的管理の視点から、渇水比流量の分布と要因の分析の必要性は益々高まると予想される。また進行する気候変動による河川へのインパクトとして、出水リスクとともに、渇水リスクも指摘される¹⁾。例えば、立川ら²⁾の数値シミュレーションでは、西日本で渇水流量の減少、北海道や東北地方北部では増加の可能性が示され

ている。一方、渇水比流量は気候以外にも様々な因子に依存し、特に流域を構成する地質から影響を受ける^{3)~6)}。火山活動や地殻変動の活発なわが国では、地質の分布は複雑かつ多様であり、個々流域の水理地質構造を地山深部まで正確に数値モデル化することはほとんど不可能である。そもそも渇水流量の把握には年間を通じた水文観測が必要であるほか、わが国には治水・利水ダムの立地も多く自然流況としての渇水流量の把握自体が容易でない。このため、渇水比流量の分析はしばしば定性的であり、その分布は全体傾向を示すに留まっている⁷⁾。効率的な流域管理・保全を進めるには、例えば都道府県単位

などの領域スケールに分布する多様な流域に対し、どの流域が現在渇水傾向にあり、将来渇水になりうるかを比較評価できる手法が求められる。

本研究の目的は、北海道に分布する多様な流域群の渇水比流量を気候、地質などの説明因子を用いて統一的に説明する「領域モデル」を構築し、非観測流域を含む北海道全体の渇水比流量の現在および将来の分布を推定することである。現在、全国各地の流量観測所の流況データや気象や地質などが公開され⁸⁾⁹⁾など、それらを解析・マッピングするGISなどのツールも普及している。特に北海道では近年、渇水比流量の解釈に重要な地質情報が統合的に整備され¹⁰⁾、また将来予測に必要な気候変動シミュレーションも実施されている¹¹⁾¹²⁾。本研究では、これら蓄積されたデータ、技術に最新の研究成果を組み合わせることで、北海道の渇水比流量のモデル化を試みる。

北海道は、日本の最北に位置する積雪寒冷地であり、冬はほぼ全域が雪で覆われる（図-1）。このため、冬の降水は積雪として地表に留まり、減水期間が長くなる結果、河川の渇水はしばしば冬季に生じる。一方、北海道の地上気温は気候変動などの影響で、全体で約0.9℃/100年のペースで上昇し、特に冬から春に上昇が顕著となっている¹³⁾。今後、冬季の気温上昇が続き、降雪が降雨に代わる場合、冬季の渇水流量は大きく変化することが予想される。このため本研究では、月時間スケールでの冬季降水中の雪の割合を地上気温から推定する近似式を新たに提案する。

本論文では、まず解析に用いるための渇水比流量のデータを示し、次に部分最小二乗法による説明因子の特定と領域モデルの決定の方法を解説する。研究結果として、北海道における各説明因子の渇水比流量への寄与を考察した後、得られた領域モデルを用いて、北海道全体の渇水比流量の現在および将来変動量の分布を推定する。

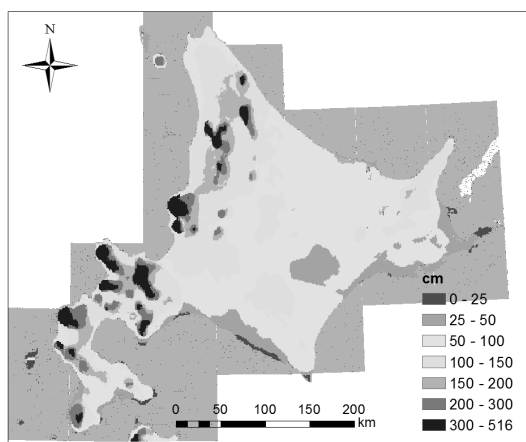


図-1 北海道の年最深積雪深（1981～2010年平年値）⁹⁾

2. 研究方法

(1) 渇水比流量の定義

わが国では、河川の維持管理等に用いられる渇水流量は、1年を通じて355日はこれを下回らない日平均流量と定めている。渇水流量は年毎に変動する値であるが、本研究では、ある時間スケール（10年）では定常と仮定し、2001～2010年の各年の値の中央値 Q_{dm} (m³/s)を現況の渇水流量と定義する。渇水比流量は、 Q_{dm} を集水面積 A (km²)で除して得られる。その単位は、既往文献³⁾⁷⁾と同様、流量単位(m³/s)を用いつつ、値の小さい指数表記を避け、100km²当たりの値 Y_{dm} (m³/s per 100km²)を用いる。

$$Y_{dm} = \frac{Q_{dm}}{A} \times 100 \quad (1)$$

(2) 解析に用いる渇水比流量データ

図-2に、流量データが入手可能な北海道の河川流量観測所の分布を示す。1級河川（Class 1）が196箇所⁸⁾、2級河川（Class 2）が61箇所¹⁴⁾がほぼ全道を網羅して分布するが、多くは流域内にダムを有している。本研究では、集水域内にダムがない（A）もしくは、ダムの集水域が全集水域に占める割合が20%以下（B）の観測所のデー

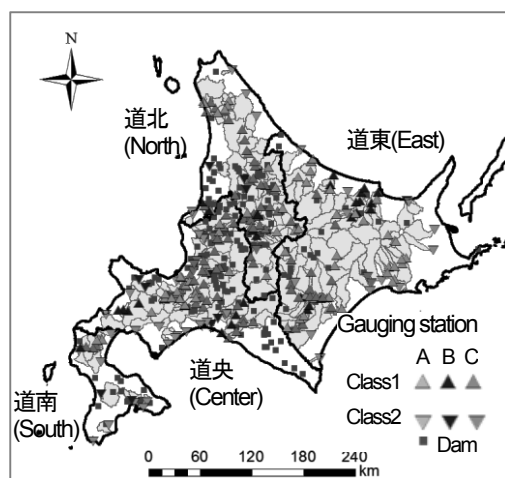


図-2 北海道の流量観測箇所と既設ダムの分布

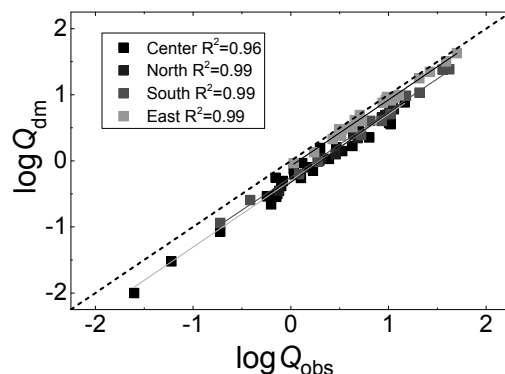


図-3 定期流量観測結果（2015年12月）と Q_{dm} との関係

タのみを用い、それ以外 (C) は除外した。

同一河川に複数の流量観測所がある場合、支川の観測データは全て用い、本川の観測データは最上流と最下流のみを基本に、縦断方向で渇水比流量に変化がある場合、変化点に相当する観測データも追加した。直轄ダムの中には貯水池への流入量を公開している場合もあり⁸⁾、年毎の渇水流量を計算し、データに加えた。なお、これらデータの内、 $Q_{dm} < 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ もしくは $A < 10 \text{ km}^2$ の場合は流量の有効桁が1桁で他と精度が同一でないとし、除外した。

本研究では、既往流量観測所の分布の不足を補うべく、普通河川を中心に非流量観測地点において結氷直前の2014年12月に流量観測を実施した。同時期における1級河川の定期流量観測結果 Q_{obs} と渇水流量の10年中央値 Q_{dm} との比較を行った結果、両対数にて道央・道北・道東・

道南各地域で決定係数0.9以上の高い相関を得た(図-3)。

この関係を地域毎に適用し、22箇所の補間観測結果を補

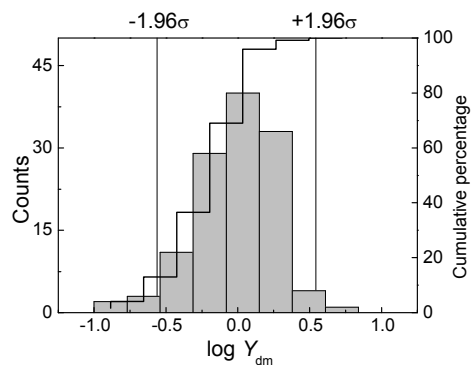


図-4 渇水比流量 Y_{dm} ヒストグラム (表-1の全123データ)

表-1 収集した北海道の渇水比流量データ一覧

ID	River	Station	Data	Lat	Lon	A	Q _{dm}	Y _{dm}	
1	天塩川	似狭川	似狭	1	44.089	142.747	74	0.71	0.96
2		剣淵川	士別	2	44.166	142.377	617	3.63	0.59
3		名寄川	下川	1	44.301	142.649	321	1.26	0.39
4			真鯉別	1	44.333	142.485	688	4.86	0.71
5		ペンケニウブ川	仁宇布	1	44.463	142.365	232	2.21	0.95
6	天塩川	新間寒別橋		2	44.898	142.008	4185	43.54	1.04
7		天塩大橋		2	44.994	141.814	4839	65.05	1.34
8		間寒別川	上間寒別	1	45.011	142.078	93	0.35	0.38
9			下間寒別	1	44.918	142.018	260	1.36	0.52
10			音類橋	1	45.004	141.706	592	17.04	2.88
11		安平志内川	安平志内川	4	44.696	142.038	292	3.83	1.31
12	渚滑川	渚滑川	滝ノ上	1	44.192	143.076	252	1.45	0.57
13			渚滑橋	1	44.379	143.301	1215	6.10	0.50
14	湧別川	生田原川	対違橋	1	44.053	143.544	283	0.92	0.32
15	常呂川	無加川	留辺森	1	43.788	143.621	422	2.14	0.51
16	網走川	網走川	美幌	1	43.836	144.098	822	4.93	0.60
17		美幌川	美幌橋	2	43.829	144.122	202	3.21	1.59
18	石狩川	旧美唄川	大豊橋	1	43.288	141.714	124	0.56	0.45
19		大鳳川	大鳳橋	1	43.709	141.926	90	0.51	0.56
20		峻淵川	峻淵	1	42.910	141.723	64	0.42	0.65
21		輪厚川	輪厚	1	42.988	141.564	26	0.22	0.85
22		白水川	白水橋	1	42.931	141.120	17	0.26	1.51
23		白井川	白井	1	42.977	141.138	91	0.97	1.07
24		島松川	下島松	1	42.941	141.569	53	0.71	1.33
25		真駒内川	真駒内常磐	1	42.934	141.341	30	0.36	1.21
26	石狩川	石狩平		1	43.633	143.010	116	2.25	1.95
27	ルベシナイ川	ルベシナイ		1	43.646	143.066	44	0.26	0.58
28	留辺志別川	ルベシベ		1	43.863	142.843	208	2.51	1.21
29	美瑛川	西一区		2	43.586	142.456	144	2.79	1.94
30		西神楽		1	43.680	142.378	639	7.66	1.20
31	オサラッペ川	鷹栖橋		1	43.824	142.329	165	1.00	0.61
32	徳富川	南幌加橋		1	43.562	141.680	86	1.27	1.48
33	富良野川	中富良野		2	43.439	142.441	131	1.57	1.19
34	辺別川	幸橋		1	43.629	142.574	94	1.21	1.29
35	空知川	金山ダム		3	43.127	142.442	463	6.05	1.30
36	幾春別川	桂沢ダム		3	43.239	142.002	150	1.92	1.28
37	石狩川	大雪ダム		3	43.674	143.044	287	4.46	1.55
38	漁川	漁川ダム		3	42.844	141.448	112	2.64	2.35
39	豊平川	豊平峡ダム		3	42.914	141.154	134	2.00	1.50
40	パンケ幌内川	パンケ幌内川		4	43.545	142.159	108	0.77	0.71
41	尻別川		喜茂別下流	1	42.789	140.934	242	4.01	1.65
42			名駒	2	42.811	140.461	1388	24.22	1.74
43	後志利別川	後志利別川	大富	2	42.417	139.921	615	9.69	1.57
44			美利河ダム	3	42.473	140.202	114	2.04	1.78
45		ピリカベツ川	美利河別	1	42.499	140.231	18	0.28	1.59
46	鶴川		福山	2	42.890	142.255	607	2.67	0.44
47			鶴川	2	42.573	141.937	1218	6.78	0.56
48			占冠	4	43.007	142.414	189	1.25	0.66
49	釧路川	新釧路川	広里	1	43.056	144.398	2166	42.61	1.97
50		鏡別川	鏡別	1	43.483	144.463	140	2.09	1.49
51		オソベツ川	下オソベツ	1	43.289	144.537	139	2.41	1.73
52		久著呂川	下久著呂	1	43.220	144.431	98	1.35	1.37
53		雪裡川	雪裡	1	43.216	144.343	171	3.01	1.76
54		幌呂川	幌呂	1	43.158	144.326	127	2.13	1.67
55		別保川	別保川	1	42.993	144.469	81	0.82	1.01
56	十勝川	帯広川	東3条	1	42.933	143.209	184	1.02	0.55
57		土幌川	旭橋2	1	42.947	143.270	306	1.60	0.52
58		猿別川	止若	2	42.910	143.356	451	3.34	0.74
59		利別川	上利別2	1	43.359	143.607	730	4.61	0.63
60			利別	2	42.931	143.443	2728	29.76	1.09
61		足寄川	下足寄	1	43.247	143.568	535	2.80	0.52
62		十勝川	東台1号橋	1	42.920	143.643	115	0.55	0.48
63	十勝川	下頃辺川	大平橋	1	42.774	143.597	84	0.32	0.38
64		浦幌川	万年橋	1	42.796	143.650	411	1.40	0.34
65		売買川	売買川	1	42.894	143.197	67	0.29	0.43
66		音更川	音更川	4	43.494	143.147	167	2.82	1.69
67	新川	天狗橋		1	43.113	141.291	110	1.97	1.79
68	余市川	余市川然別		2	43.126	140.740	405	5.25	1.30
69		堀株川共和		1	42.984	140.614	143	0.90	0.63
70	朱太川	朱太川実橋		1	42.760	140.279	357	5.13	1.44
71		知内川	知内川	1	41.601	140.329	123	2.10	1.71
72		松倉川		1	41.786	140.809	61	0.63	1.02
73		久根別川	久根別川	1	41.836	140.689	126	1.48	1.17
74		厚沢部川	厚沢部川	2	41.926	140.212	441	5.08	1.15
75		大野川	大野川	2	41.855	140.651	110	0.98	0.89
76		太櫓川	太櫓川	1	42.378	139.899	137	1.44	1.05
77		安平川	静川	2	42.661	141.777	296	2.40	0.81
78		勇払川	沼の端	1	42.677	141.716	202	3.89	1.92
79			敷生	1	42.520	141.267	80	2.17	2.70
80			優徳	1	42.634	141.034	103	2.25	2.17
81			豊浦	1	42.593	140.703	235	4.03	1.71
82			登別橋	1	42.449	141.169	53	1.06	1.99
83		白老川	ウヨロ橋	1	42.543	141.291	38	0.88	2.32
84			暑寒別川	1	43.844	141.518	98	0.94	0.96
85			北見幌別川	1	44.840	142.476	213	1.40	0.65
86			歌登	4	44.863	142.528	344	3.95	1.15
87			頓別川常盤	1	45.073	142.323	509	2.64	0.52
88			鬼志別川	1	45.330	142.118	35	0.25	0.72
89			斜里	2	43.904	144.643	568	8.96	1.58
90			斜里川	1	43.885	144.661	175	2.24	1.28
91			猿間	1	44.019	143.785	247	1.12	0.45
92			興部	1	44.477	143.118	294	2.20	0.75
93			歴舟川尾田	1	42.524	143.197	415	4.63	1.12
94			西広尾川	1	42.281	143.314	35	0.62	1.76
95			標津川依橋	1	43.585	145.022	425	7.86	1.85
96			阿寒川山花	1	43.074	144.233	637	11.00	1.73
97			茶路川	1	42.973	144.059	352	1.55	0.44
98			鹿ノ子ダム	3	43.607	143.387	119	0.87	0.73
99			浜益川	4	43.583	141.416	118	1.31	1.11
100			古平川	4	43.224	140.613	108	1.52	1.40
101			天野川	4	41.776	140.143	256	3.81	1.49
102			日高門別川	4	42.486	142.084	99	0.68	0.69
103			日高幌別川	4	42.228	142.904	279	3.93	1.41
104			遠別川	4	44.679	141.909	314	3.60	1.14
105			風連別川	4	44.569	141.788	67	0.58	0.87
106			声間川	4	45.274	141.814	107	1.20	1.12
107			幌内川	4	44.534	142.755	166	2.20	1.32
108			藻琴川	4	43.905	144.289	141	1.40	1.00
109			豊似川	4	42.409	143.211	128	2.50	1.95
110			春別川	4	43.477	145.064	69	0.83	1.20
111			音別川	4	42.882	143.929	289	3.81	1.32
112			厚別川	4	42.429	142.245	268	1.93	0.72
113			湯の沢川	4	43.007	142.407	73	0.52	0.71
114			下記念別沢川	4	44.045	141.854	68	0.64	0.94
115			風連川	4	43.240	145.080	397	4.66	1.17
116			立牛川	5	44.137	143.201	163	0.38	0.23
117			十勝川	5	47.301	142.866	164	0.25	0.15
118			札内川	5	42.926	143.229	701	1.14	0.16
119			牛首別川	5	42.799	143.472	167	0.29	0.17
120			羽幌川	5	44.313	141.774	203	0.35	0.17
121			別々川	5	42.580	141.423	24	0.93	3.82
122			後志利別川	5	42.493	140.160	16	0.63	3.94
123			後志利別川	5	42.507	140.191	49	2.06	4.21

※ River: 河川名, Station: 観測所名, Data 1: 流量観測地点 (流域内にダム無), 2: 流量観測地点 (ダムの集水域が20%以下), 3: ダム上流,

4: 補間観測 (2014年12月観測・補正), 5: 1.96σ区間から外れる流域 (解析対象外),

Lat: 緯度(degree), Lon: 経度(degree), A: 集水面積(km²), Q_{dm} : 2001~2010年中央値相当の渇水流量(m³/s), Y_{dm} : 渇水比流量 (m³/s per 100km²),

正した値を Q_{dm} とし、解析データに加えた。

図-4に、 Y_{dm} の対数ヒストグラムを示す。部分最小二乗法では、値が特に大きい、あるいは小さいデータがある場合、誤差二乗和がそれらに大きく影響を受け、その他多数の再現性を損なう可能性がある。 Y_{dm} はKolmogorov・Smirnovの正規性検定¹⁵⁾で有意水準95%で対数正規分布の仮説が棄却されないため、同分布を仮定した場合の95%データ(1.96 σ)範囲 $0.28 < Y_{dm} < 3.57 \text{ m}^3/\text{s per } 100 \text{ km}^2$ か

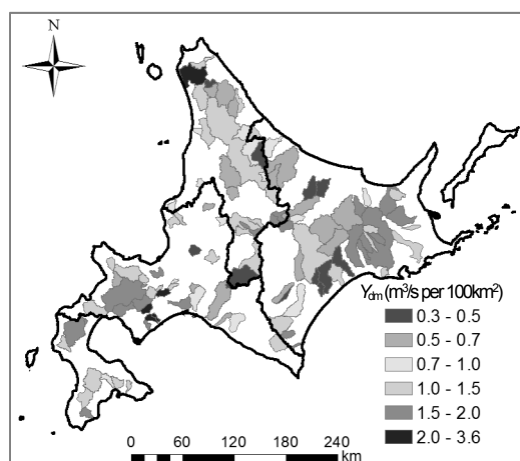


図-5 代表115流域 (ID:1~115) の渇水比流量 Y_{dm} の分布

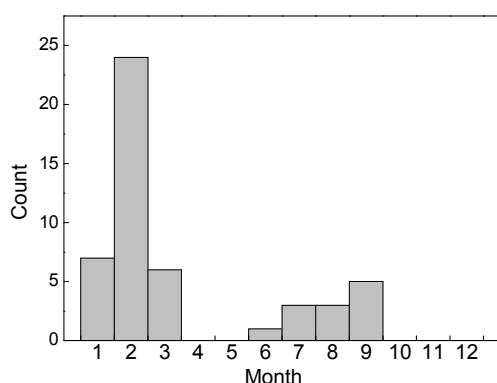


図-6 代表流域 (1級河川) の最低流量生起月の10年最頻値

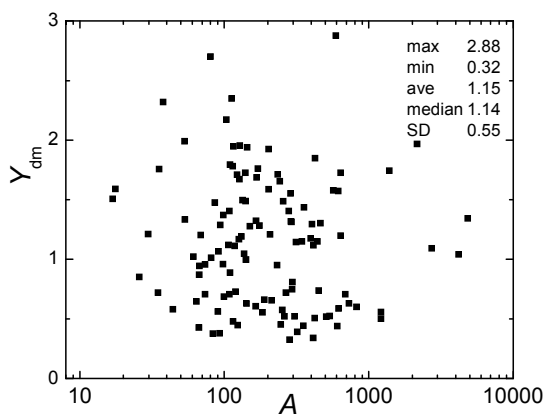


図-7 集水面積と渇水比流量の関係 (代表115流域)

ら外れるデータを、解析対象から除外することとした。

表-1に、領域モデル推定に用いる代表115流域(ID:1~115)の諸元と渇水比流量 Y_{dm} の一覧を、図-5に分布図を示す。 Y_{dm} は115データの平均で $1.15 \text{ m}^3/\text{s per } 100 \text{ km}^2$ と、日本の平均 $1.1 \text{ m}^3/\text{s per } 100 \text{ km}^2$ にほぼ一致する。地域別では、道央の洞爺・有珠や道東の釧路で $1.5 \text{ m}^3/\text{s per } 100 \text{ km}^2$ 以上と高く、道北のオホーツク海側や十勝地方で $0.7 \text{ m}^3/\text{s per } 100 \text{ km}^2$ 以下と低い。表-1には、代表115流域に含めない95%データ範囲外の Y_{dm} も参考に示す(ID:116~123)。本論文では、これら除外したデータに領域モデルを適用した場合の再現性についても後述する。

代表115流域の内、流況表に年最小流量の観測月が記録された箇所過去の10年間の最頻値を集計し、ヒストグラムにまとめた(図-6)。約3/4の流域の最小流量は冬季(1~3月の融雪前)に、残りの流域では夏季に観測される。なお最小流量の生起月と緯度・経度との相関は本データからは確認できなかった(本論文では省略)。

一般に、渇水比流量は基底流出を主成分とし、流域面積と減水期間に依存する¹⁶⁾。渇水期間や流域スケールが大きいほど、渇水流量は広域水循環を反映するため、流域内の単位面積当たりの気象や地質などの説明因子が均質でも、渇水比流量は異なる可能性がある(スケール効果)。しかしながら、本研究での代表115流域では、集水面積 A と渇水比流量 Y_{dm} に明瞭な相関は認められなかった(図-7)。わが国のような気候が湿潤な地域は、減水期間はせいぜい数カ月、 A も 10^3 km^2 オーダーに留まり、スケール効果は現れにくいと考えられる。このため、本研究では、 Y_{dm} は A に依存せず、集水域内の説明因子の値が同一なら同じ Y_{dm} を推定する領域モデルを用いる。

(3) 渇水比流量の領域モデル

a) 領域モデルの定義

本研究では、広範囲(領域スケール)に含まれる多様な流域群の渇水比流量を気候や地形、地質を説明因子とした線形回帰モデル(Regional regression model)で再現することを試みる。線形回帰モデルは、物理法則から直接導かれるものでないが、多くの説明因子を同時に扱うことができ、渇水比流量への寄与の度合いを比較し、適切な組み合わせに段階的に絞りこむことが可能である。またGIS上で説明因子を抽出すれば、広域マッピング^{17), 18)}も容易に行うことができる。米国オレゴン州での先行研究¹⁹⁾では、モデル係数を流域毎に最適化することで、各流域の渇水流量を観測データの統計範囲(信頼区間90%範囲)で再現することに成功している。本研究では、個々の流域で係数を個別設定せず、北海道全体で代表115流域(表-1)の渇水比流量 Y_{dm} を最適な説明因子による単一モデルで再現し、非観測流域を含む北海道全域の

湧水比流量の現在および将来の分布を推定する。本研究にて用いる湧水比流量の領域モデルを以下に示す。

$$\bar{Y}_{dm(i)} = b_0 + \sum_{j=1}^n b_j X_{ij} + e_i \quad (2)$$

ここで、 $\bar{Y}_{dm(i)}$ は流域*i*の湧水比流量の推定値、 X_{ij} は流域*i*での説明因子*j*の値、 b_j は因子 X_{ij} に対する比例定数、 b_0 は共通する定数項、 e_i は各流域の個別推定誤差である。

b) 湧水比流量の説明因子

本研究では領域モデルの説明因子を降水量、気温、地形、地質、土壌、植生、土地利用の7種類計44因子を選定した。表-2に説明因子の一覧を、図-8に抜粋した説明因子の分布をそれぞれ示す。なお分布図の作成や流域毎のデータ抽出には、ArcGIS 10.1 (ESRI社)を用いた。

降水量は、気象庁レーダー解析雨量から年および季別（冬：12～2月，春：3～5月，夏：6～8月，秋：9～11月）の合計値の2001～2010年平均を流域毎に計算した。更に冬季の降水量は、降水中の雪割合の推定式（次節）を用いて降雨量と降雪量に分離した。平均気温は臼谷ら²⁰⁾と同様、気象官署およびアメダスの月平均から一定高度勾配（0.65℃/100m）を仮定し、一旦標高ゼロの分布をクリギング補間で推定してから再び標高補正を行ったマップを作成し、流域毎に年および季別平均を抽出する。

地形は、10mメッシュDEMから流域毎の最高標高、高度差、標準偏差、平均勾配を計算した。地質は、北海道土木地質図⁹⁾の計121分類を水理地質的観点から、第四紀層、火山噴出物、火山岩、第三紀層、深成岩・貫入岩、古生層、付加体の7種類に統合した。特に透水性が比較的高い火山岩は、発生した時代毎に第四紀、第三紀漸新世、第三紀中新世以前に分けることとした。植生は、植生図²¹⁾の732分類を生育環境に水が関与する度合いから7分類に統合した。土壌は、50万分の1土地分類基本調査の土壌図⁹⁾の分類をそのまま用いた。土地利用は、国土数値情報の土地利用細分メッシュデータ⁹⁾を用い、湿原

の保水性に着目し、5万分の1地形図から釧路、サロベツなど湿原と識別できる地域のポリゴンを作成し付け加えた。これら地質、植生、土壌、土地利用の因子は、横尾ら²²⁾と同様、集水域内の面積比として数量化した。

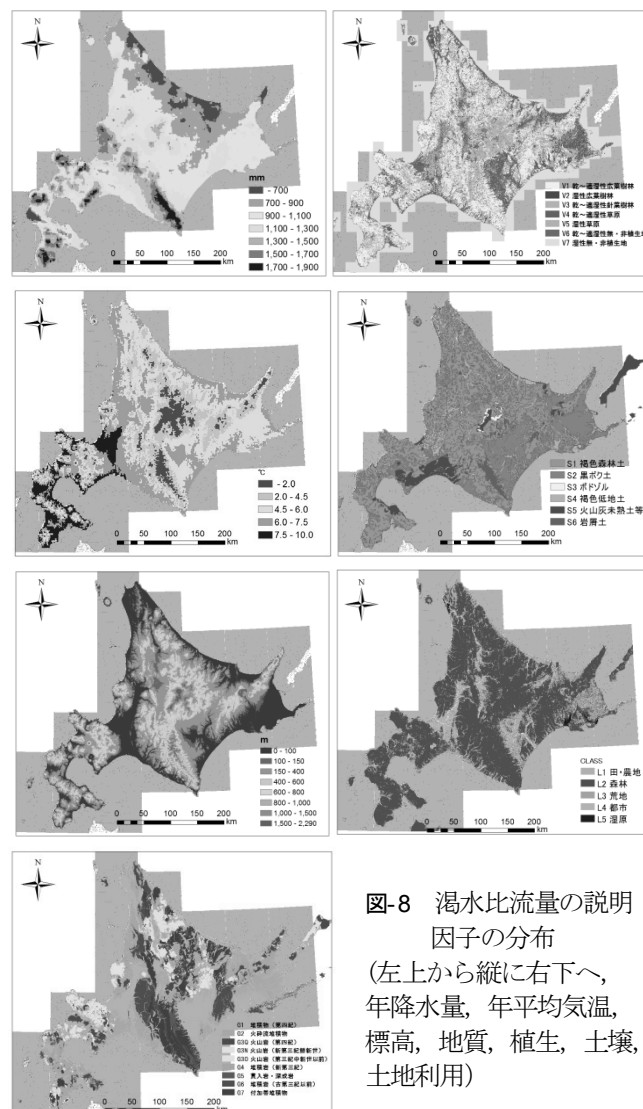


図-8 湧水比流量の説明因子の分布
(左上から縦に右下へ、年降水量、年平均気温、標高、地質、植生、土壌、土地利用)

表-2 本研究で用いた湧水比流量に対する説明因子

参照元	解像度・スケール	説明因子	単位	区分数
レーダー解析雨量 (気象庁)	0.25°	P_y : 年総降水量, 季別総降水量(P_{ws} : 12-2月(降雪, 図-6より), P_{wr} : 12-2月(降雨), P_{sp} : 3-5月, P_{su} : 6-8月, P_a : 9-11月) 2001-2010年平均	100 mm	6
気象官署・アメダス (気象庁)	0.25° (クリギング推定)	T_y : 年平均気温, 季別平均気温(T_w : 12-2月, T_{sp} : 3-5月, T_{su} : 6-8月, T_a : 9-12月) 2001-2010年平均	℃	5
数値地図 (国土地理院)	10 m	最大標高: $ELMAX$, 標高差: $ELRANGE$, 標高標準偏差: $ELSDV$, 平均勾配: $SLOPE$, 最大流路長: $FLMAX$, 流路長総和: $FLSUM$	m, m/km	6
北海道土木地質図 (日本応用地質学会 北海道支部)	1:200,000	G1: 第四紀層, G2: 火砕流堆積物, G3Q: 火山岩(第四紀), G3O: 火山岩(第三紀漸新世), G3N: 火山岩(第三紀中新世以前), G4: 堆積岩(新第三紀), G5: 貫入岩・深成岩, G6: 堆積岩(古第三紀以前), G7: 付加体堆積物	km ² /km ²	9
土壌図 (国土交通省)	1:500,000	S1: 褐色森林土, S2: 黒ボク土, S3: ポドゾル, S4: 褐色低地土, S5: 火山灰未熟土, S6: 岩屑土	km ² /km ²	6
植生図 (環境省)	1:25,000	V1: 乾～適湿性の広葉樹林, V2: 適湿性の広葉樹林, V3: 乾～適湿性の針葉樹林, V4: 乾～適湿性の草原, V5: 湿性の草原, V6: 乾～適湿性の非植生地, V7: 湿性の非植生地	km ² /km ²	7
土地利用細分メッシュ (国土交通省)	1 km	L1: 田・農地, L2: 森林, L3: 荒地, L4: 都市, L5: 湿原	km ² /km ²	5

c) 冬季降水量中の雪の割合の推定

積雪寒冷地では、冬季の降雪・降水の違いが河水流量に大きな影響を与えると推測される。本研究では、月時間スケールで、冬季降水量中の雪の割合 R を月平均気温 T から推定する近似式を提案する。

一般に、降水中の雪の割合 R は、地上気温 T と湿度 W と関係する²³⁾。ここで北海道の冬季（11～4月）の日平均湿度は平均 $74.5\% \pm 10\%$ の範囲に留まる（図-9）。このため、月時間単位では、北海道の冬季の湿度は一樣と仮定する。既往研究²⁴⁾では、雪・雨割合が等しくなる $R=0.5$ の地上気温 T と湿度 W とのダイアグラムを示しており、例えば $W=75\%$ の場合に $R=0.5$ となるのは、 $T=2^\circ\text{C}$ と読める。

図-10に、降雪量を記録する北海道の気象観測所での月平均気温 T に対する雪・雨割合 R をプロットした。図-10から -5°C 付近より T が低いとほぼ全地点で $R=1$ であり、 T が上昇するにつれ R は減少し、 -3°C 付近から R の減少が大きくなり、 4°C 付近で $R=0$ に至る。この T に対する R の関係を2つの近似式（ $T=4^\circ\text{C}$ の場合に $R=0$ 、 $T=2^\circ\text{C}$ の場合に $R=0.5$ を通過する指数曲線1および、係数を最小二乗法で決めた指数曲線2）で示した。両者を比較すると、

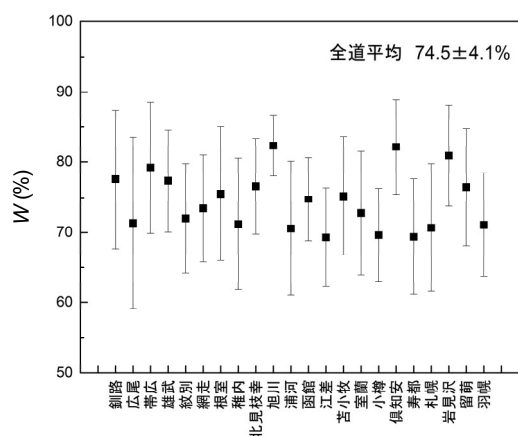


図-9 北海道の冬季の湿度分布（中央：平均、バー：標準偏差）

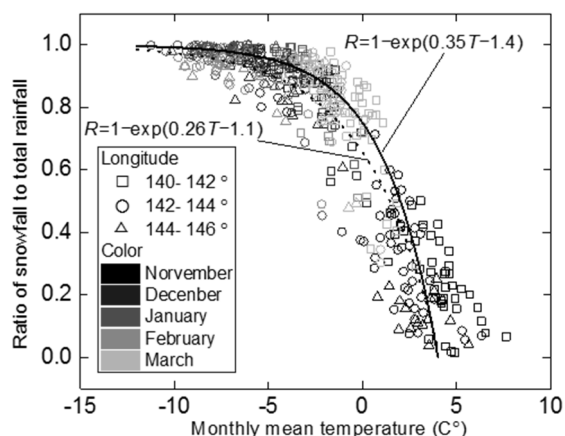


図-10 月平均気温 T に対する月降水量中の雪割合 R
（実線：採用する指数曲線1、点線：最小二乗法による曲線2）

0.5°C 幅中央値の二乗和平方根誤差は曲線1で0.098、曲線2で0.071と曲線2がやや小さいが、曲線2が $T=-3 \sim 1^\circ\text{C}$ 付近でプロット群の下側を通るのに対し、曲線1は全温度域でプロット群の中央を通過する。このため、本研究では曲線1を R の近似推定式として採用することにした。

図-10では、気象観測所の経度でプロットを色分けしており、経度が小さい（西側）ほど、同じ T に対し R が大きくなる傾向がある。これは降雪が大陸からの季節風でもたらさることを反映していると推測される。ただし位置（経度）ごとで推定するにはデータが限られるため、本研究では R の推定に曲線1を用いることとした。

d) 説明因子および係数の決定

本研究では、領域モデルの係数 b_j の決定に部分最小二乗法(Partial Least Square)を用いる。部分最小二乗法とは、主成分分析と重回帰分析の中間的な性質を持ち、説明因子の重相関性を考慮しながら、従属因子を説明する最小誤差の推定を行う。具体的には、①代表115流域の説明変数 X_{ij} の正規化、②説明変数の線形組み合わせとなる主成分を反復計算し交差検証により最適な主成分数を検出、③標準化した係数 b_j を評価し説明因子を選別、④選別した説明因子を用いて再び①～③を繰り返す。本研究では、各段階の領域モデルの評価として相対誤差(Averaged Relative Error: ARE)と、誤差の標準偏差(Standard Deviation of Error: SDE)を用いた。また、モデルに用いた因子がデータとの相関がないとする帰無仮説に対し、多変量解析で用いられる F 検定も併せて行った。なお一連の計算には、Origin Pro 2015 (OriginLab社)を用いた。

(4) 河水比流量の現在および将来のマッピング

本研究では、代表115流域の河水比流量を再現する領域モデルを北海道の全1121流域（国土交通省の流域図⁹⁾を一部修正）に適用することで、現在（2001～2010年中央値相当）の河水比流量のマッピングを行う。また領域モデルでは、河水比流量は各因子に対し線形応答するため、係数不変を仮定すれば、因子の変化量から直接、将来予測が可能である。河水比流量の将来予測の例として、本研究では北海道を対象とした気候変動シミュレーション結果を用いたマッピングを行う。

気候変動シミュレーション成果として用いるのは、気候変動適用研究推進プログラム (RECCA)²⁵⁾にて実施された北海道全域10kmダウンスケーリングモデルによる結果¹¹⁾ ¹²⁾である。既往研究では、全球年平均地上気温が2 K上昇した場合の10年間の気象シミュレーションを3つの全球気候モデルと3つの領域モデルの組み合わせ（計9ケース）で行っている。本研究では、わが国を代表する組み合わせとして、東京大学ほかの全球気候モデルMIROC3.2（以降、MIROC）と気象庁気象研究所の領域モデルJMA MRI-NHM（以降、JMA）とを組み合わせた

結果を用いた。具体的には、現在および将来の1121流域の季別の降水量と平均気温をGISで集計、抽出した後、各流域の現在推定値 \bar{Y}_{dm} および将来推定値 \bar{Y}_{dm}^* を計算する。2つの推定値から将来変化量 $\Delta \bar{Y}_{dm} = \bar{Y}_{dm}^* - \bar{Y}_{dm}$ および相対変化量 $\Delta \bar{Y}_d / \bar{Y}_{dm} (\%)$ をマッピングする。

3. 研究結果

(1) 渇水比流量の領域モデル

a) 説明因子の渇水比流量への寄与

図-11に、初期モデルとして44説明因子全てを用いて部分最小二乗法を行った場合に得られる第1, 第2主成分の標準化重み係数のダイアグラムを示す。渇水比流量(従属変数)に対する分散寄与は、第1主成分が約6割、第2主成分が約2割で、渇水比流量はこれら2成分で概ね説明できる。第1主成分は、降水量の正の係数が相対的に大きく、蒸発散と関係する気温が概ね負の係数となるため、涵養に直接係わる成分に相当する。一方、第2主成分は、降水量の係数が小さく、気温の正の係数が大きい。例えば、冬の気温が高いと降水中の雨の割合を大きくし、冬季の渇水流量を増加させるように、間接的に渇水比流量に寄与する成分に相当すると言える。

地形では、*ELMAX*、*ELRANGE*および*ELSDV*が第1主成分で正の値となる。これらは、標高が高いほど値が大き

くなる関係(重相関)があるため、次の部分最小二乗法の繰り返しでは、係数がやや高い*ELSDV*のみを選択する。*ELSDV*は流域内の地形の起伏度、すなわち谷部からの基底流出の生じやすさを示す因子である。また*SLOPE*は、第2主成分の負の係数が大きく、値が大きいほど動水勾配が大きくなり、渇水比流量を減少させる。

地質では、火山性地質の*G2*、*G3Q*の正の係数が特に大きく、これらの透水性や保水性が渇水比流量の増大に寄与する。本研究では、これら*G2*、*G3*を発生した時代や起源で分けた場合の推定誤差ARE, SDEを比較している(表-3)。*G2*は「統合」した場合にARE, SDEとも最小となり分類は必要ない。一方、*G3*は「統合」より「起源」や「時代」で分類した方がARE, SDEは低くなる。「起源」分類の方が誤差は低いが分類数も多くなるため、ここでは誤差がほぼ変わらず、分類数は少ない「時代」で分類することとした。地質のその他因子では、時代の古い地質である*G4*、*G6*、*G7*は透水性の低さを反映し、第1, 第2主成分とも負の係数となる。

土壌では、正の係数が大きい*S5*は同じ火山性の*G2*と重複し、その他の係数も相対的に地質に比べ係数は小さい。このため、部分最小二乗法の繰り返しでは、地質因子のみを残し、土壌因子は用いないこととした。

植生では、各因子の係数が相対的に小さく、部分最小二乗法を繰り返す過程で、土地利用の植生に関する*L2*や*L5*に含めることとする。土地利用での*L2*、*L5*はともに、第1主成分での正の係数が大きく、火山性地質と同様、森林や湿原の保水効果を示している。特に*L5*は第2主成分でも正の係数が突出し、寄与の大きさが示される。

b) 領域モデルの決定

全ての説明44因子を用いた初期モデルから、部分最小二乗法を繰り返し、説明因子の数*N*と再現誤差(AREとSDE)を比較しながら、重要な説明変数を選択していき、最良なモデルを決定した。

表-4に説明因子数が初期段階(因子数*N*=44)から段階5(*N*=4)までの係数を一覧にまとめる。なお段階5は、気象と地質のみの説明因子の場合(5th)と気象と地形のみの場合(5th_2)に分けている。各段階の計算F値と理論*F*_{0.05}値を比較すると、どの段階も*F*>*F*_{0.05}であり、因子が無相関とする帰無仮説は有意水準5%で棄却される。

図-12は、渇水比流量の推定値 \bar{Y}_{dm} と観測値 Y_{dm} の段階毎の関係である。いずれの段階でも \bar{Y}_{dm} と Y_{dm} に正の相関性があり、段階毎に相関が低下する。特に段階5_2の相関はかなり小さく、同じ*N*=4である段階5との比較からは、地形より地質の方が寄与が大きいことを示唆する。

各段階におけるAREとSDEの変化を図-13に示す。段階3までは*N*を約半分ずつ減らし続けてもARE, SDEともに変化は小さく、段階4以降で増加が顕著である。以上より、因子数と推定誤差の双方の点から、段階3の

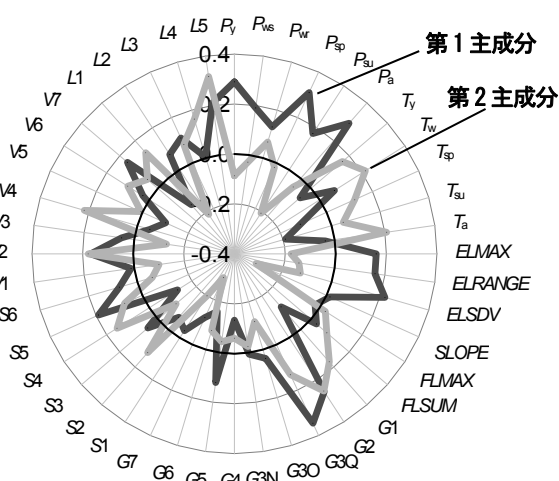


図-11 第1,第2主成分の標準化係数(記号:表-2参照)

表-3 地質因子の内、火山噴出物・火山岩(第四紀)の起源、時代別による渇水比流量モデルの感度評価

地質	分類	ARE	SDE
火山噴出物 <i>G2</i>	統合	25.9	0.29
	起源(5分類)	27.4	0.30
	時代(4分類)	26.8	0.30
火山岩 <i>G3</i>	統合	25.9	0.29
	起源(5分類)	23.7	0.26
	時代(3分類)	24.1	0.26

因子と係数を用いるのが最良と判断する。

図-14に、段階3の場合の各流域の個別誤差 e 分布を示す。個別誤差は、隣接流域で正負が共存し、偏在は見られない。部分最小二乗法は不偏推定（誤差合計ゼロ）のため、誤差の空間相関がない場合、(2)式で $e=0$ とするのが最良推定となる。以上から、北海道の渇水比流量の領域モデルは段階3での線形回帰モデルに決定した。

$$\begin{aligned} \bar{Y}_{dm} = & 2.87 - 0.131P_{ws} + 1.24P_{wr} + 0.318P_a + 0.0899T_w \\ & - 0.157T_{su} + 1.72 \times 10^{-3}ELSDV - 0.0149SLOPE \\ & + 0.659G2 + 0.811G3Q + 0.62L2 + 16.1L5 \end{aligned} \quad (3)$$

なお図-6で渇水生起が夏季に現れる11流域のみに対

表-4 各段階における説明因子とモデル係数

Parameter	b_i					
	1st	2nd	3rd	4th	5th	5th 2
N	44	18	11	6	3	3
ARE	24.1	22.6	23.4	29.1	31.8	41.3
SDE	0.26	0.25	0.27	0.31	0.33	0.46
$F(F_{0.05})$	5.4(1.6)	20.2(1.7)	30.1(1.9)	38.9(2.2)	63.1(2.7)	15.5(2.7)
b_0	1.38	2.44	2.87	0.54	-0.0480	1.11
P_y	0.0138	0.0080				
P_{ws}	0.0283	-0.255	-0.131			
P_{wr}	0.534	2.21	1.24			
P_{sp}	0.0995	0.0347				
P_{su}	-0.0453	-0.165				
P_a	0.0772	0.473	0.318	0.247	0.273	0.268
T_y	-0.00196					
T_w	0.0264	0.0412	0.0899			
T_{sp}	-0.0239					
T_{su}	-0.0547	-0.148	-0.157	-0.0396		-0.0687
T_a	0.0110					
$ELMAX$	2.74×10^{-5}					
$ELRANGE$	4.71×10^{-5}					
$ELSDV$	5.36×10^{-4}	2.18×10^{-3}	1.72×10^{-3}	8.49×10^{-4}		1.09×10^{-3}
$SLOPE$	-0.00287	-0.0135	-0.0149			
$FLMAX$	1.84×10^{-7}					
$FLSUM$	8.70×10^{-7}					
$G1$	-0.0846					
$G2$	0.518	0.690	0.659	0.893	0.882	
$G3Q$	1.03	0.465	0.811	1.45	1.76	
$G3O$	-0.323	-0.643				
$G3N$	0.0746					
$G4$	-0.165					
$G5$	0.669					
$G6$	-0.220					
$G7$	-0.474	-0.355				
$S1$	-0.0412					
$S2$	-0.0791					
$S3$	-0.0602					
$S4$	0.0229					
$S5$	0.150	0.200				
$S6$	0.338					
$V1$	0.0954					
$V2$	2.91	-1.24				
$V3$	-0.0602					
$V4$	0.00401					
$V5$	-0.618					
$V6$	0.414					
$V7$	6.23					
$L1$	-0.323					
$L2$	0.0748	0.559	0.623			
$L3$	1.08					
$L4$	0.393					
$L5$	14.2	15.9	16.1	18.3		

し(3)式を適用した場合のAREは21.7%で誤差の増大は認められなかった。このため、代表115流域では渇水流量

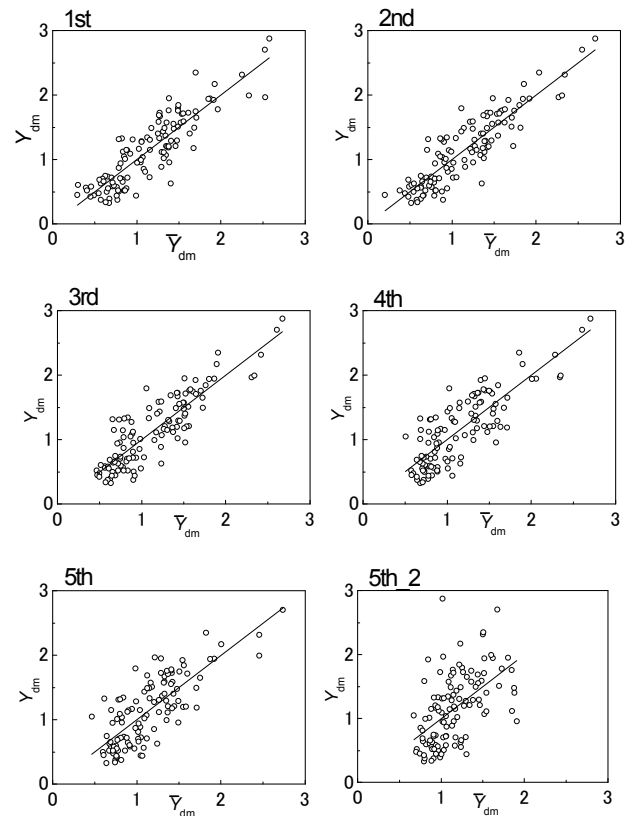


図-12 各段階での渇水比流量の推定値と観測値の関係

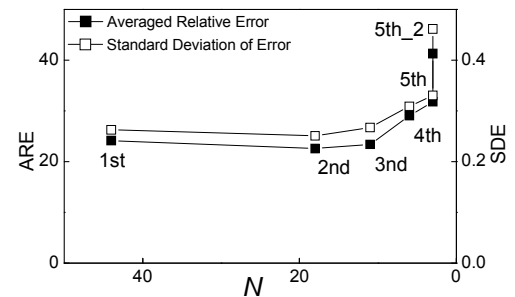


図-13 各段階における説明変数の数と誤差の変化

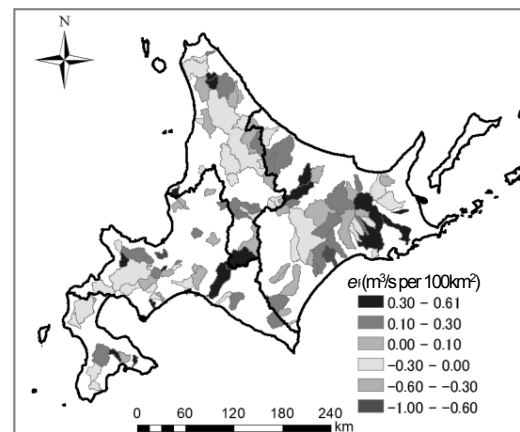


図-14 領域モデル（段階3）における残差 e の分布

が夏と冬に発生する流域が混在するものの、(3)式の単一モデルを北海道全域に適用することとした。

c) 渇水比流量の説明因子に関する考察

領域モデル(3式)に用いた 11 説明因子について、それぞれの渇水比流量への寄与について考察する。

降水量は、 P_a と P_w が正、 P_{ws} が負の係数となる。特に P_w は、(3)式の係数が比較的大きく、値が100mm増加すると \bar{Y}_{dm} は1.2 m³/s per 100km²も増加し、その寄与は大きい。

気温は、 T_w が値が高いほど、冬の融雪を促し、渇水流量は増加する一方、 T_{sa} は値が高いほど、夏の蒸発散を促し、 \bar{Y}_{dm} は減少する。気温1K上昇に対する \bar{Y}_{dm} の上昇量もしくは減少量は0.1~0.2 m³/s per 100km²程度である。ただし、 T_w の上昇は近似指数式を通じて P_w の増加と P_{ws} の減少をもたらす点で、 \bar{Y}_{dm} への寄与は係数以上に大きい。

地形は、 $ELSDVI$ は正の係数、 $SLOPE$ が負の係数であり、それぞれ地形の起伏度と動水勾配を反映する。 $ELSDVI$ は10² m、 $SLOPE$ は10¹ m/km (勾配数%)オーダーの場合、 \bar{Y}_{dm} の増加もしくは減少は10⁻¹ m³/s per 100km²オーダーである。地質もG2とG3Qがほぼ同等の係数で、集水域に占める面積割合が数10%の場合、 \bar{Y}_{dm} の増加は10⁻¹ m³/s per 100km²オーダーとなる。なお部分最小二乗法の5thと5th_2の比較では、 \bar{Y}_{dm} への寄与は地質が地形に比べてより大きい。

土地利用は、L2がG2やG3Qとほぼ同等の係数で、森林の保水効果²⁰⁾を反映する。またL5の係数は、L2の約26倍であり、湿原の表層を覆う間隙率の高い腐植土の保水効果と推測する。ただし、L5が0.05 (集水面積比5%)以上の流域は、サロベツ湿原(ID:10)と釧路湿原(ID:53)の2流域に留まり、係数を過大評価している可能性がある。今後、他湿原のデータを加えた上での精査が必要と考える。

(2) 渇水比流量の推定マップ

a) 現在マップ

図-15に、(3)式を北海道全 1121 流域に適用し、推定した渇水比流量 \bar{Y}_{dm} の現在(2001~2010年中央値相当)のマップを示す。 \bar{Y}_{dm} が高い地域は、標高の高い北海道中央(大雪山系および日高山系)、火山性地質のG2やG3Qが分布する有珠・洞爺や釧路・知床、降水量や冬の気温が高い道南、L5が分布する釧路湿原、サロベツ湿原である。一方、 \bar{Y}_{dm} が低い地域は、道北のほぼ全域と道東の十勝周辺であり、特にオホーツク海側は、 \bar{Y}_{dm} が0.5m³/s per 100km²以下の流域もある。これらの傾向は代表 115 流域の観測値 Y_{dm} の分布(図-5)と一致する。

図-16は、代表 115 流域の Y_{dm} と 1121 全流域の \bar{Y}_{dm} の北海道全域および地域毎のボックスプロットである。代表流域は、各地域の約 1/10 の数で抽出され、偏りがなことが分かる。図-16では、領域モデルで推定した Y_{dm} は、代表流域の \bar{Y}_{dm} に比べ、どの地域もやや小さい傾向がある。これは、海岸線付近の流域を含む全流域に

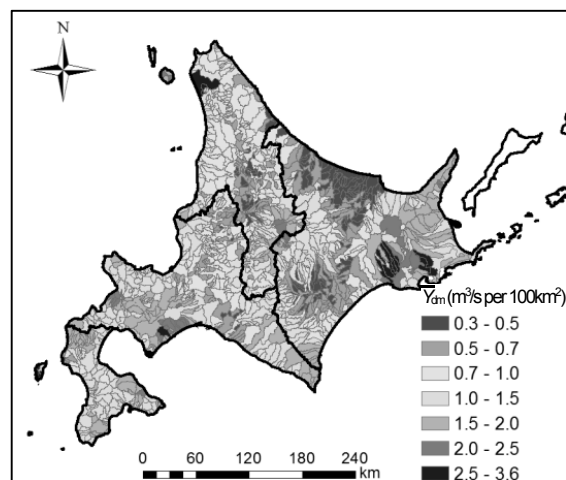


図-15 領域モデル (3式) で推定する渇水比流量マップ

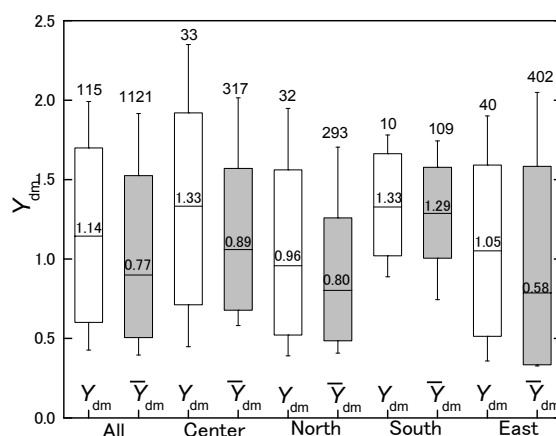


図-16 渇水比流量の観測値・推定値のボックスプロット

対し、代表流域はいずれも比較的上流に位置し、(3)式で正の係数となる $ELSDVI$ が高く、負の係数となる T_{sa} は低くなりがちなためである。地域別では、どの地域も変動幅が大きい、中央値で比較する場合、道北、道東で小さく、道南で多くなる傾向がある。

b) 将来マップ

図-17に、(3)式で説明因子となる降水量、気温の将来変動量(将来ー現在の値)の既往シミュレーション結果を示す。シミュレーション結果では、降水量は、ほぼ北海道全域で P_{ws} が気温上昇に従い減少し、代わって P_w が増加する。これに対し、 P_a は北海道の西半分では増加、東半分では減少すると予測される。特に道南では、 P_w 、 P_a とも100 mm前後増える結果となっている。一方、気温は T_w 、 T_{sa} とも3K前後、北海道全体で上昇し、特に道東では T_w が3.5~4 K以上も上昇する結果となった。

(3)式と図-17の変動量を組み合わせる計算される渇水比流量の変動量 $\Delta\bar{Y}_{dm}$ および相対変動量 $\Delta\bar{Y}_{dm}/\bar{Y}_{dm}(\%)$ を、図-18に示す。北海道の西半分は、領域モデル(3式)で正の係数を有する P_w 、 P_a の増加により $\Delta\bar{Y}_{dm}$ は正となり、 \bar{Y}_{dm} の増加が予想される。特に、 P_w の増大が顕著な道南では、 $\Delta\bar{Y}_{dm}$ は0.4~0.8 m³/s per 100km²以上増加し、 $\Delta\bar{Y}_{dm}/\bar{Y}_{dm}$

も50%以上に達する結果となった。

一方、北海道の東側、特にオホーツク海側では大半が、 \bar{Y}_{dm} は減少すると予測されている。これは、北海道の東

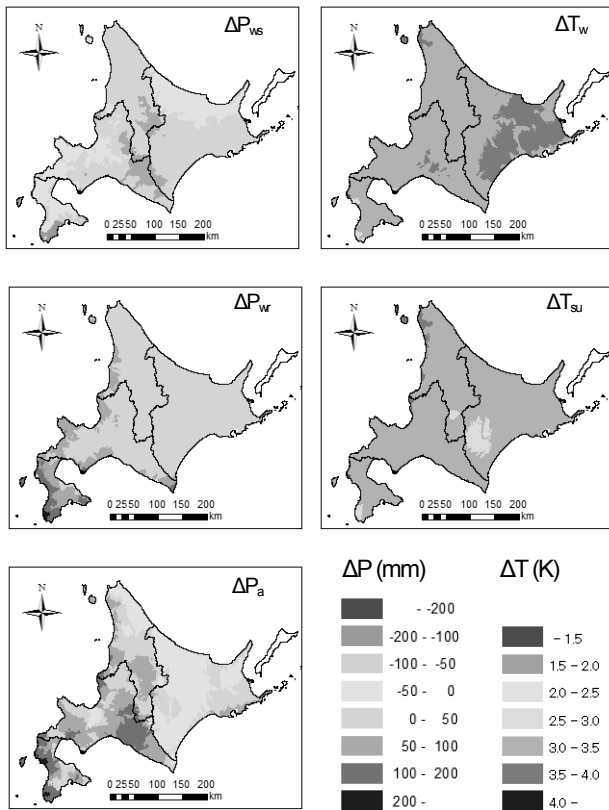


図-17 北海道の降水量・気温の予測変動量

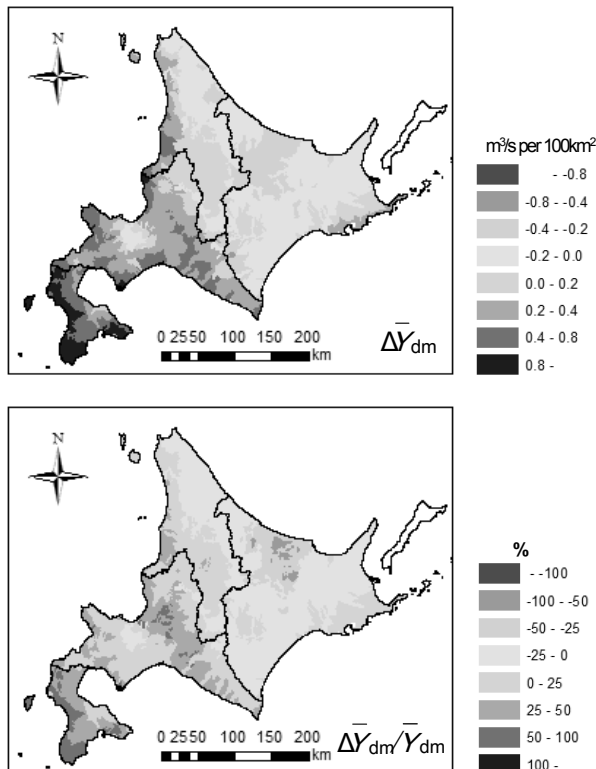


図-18 渇水比流量の将来予測：変動量(上)と相対変動量(下)

側では正の係数が大きい P_{wr} の増加が少なく、 P_a の減少や T_{su} の上昇がより影響を与えるためである。道東では、 T_w が4 K程度上昇しても、元々冬季の T_w が低いいため、降水中の雪割合 $R \approx 1$ の気温上限($T_w = -5^\circ C$)を上回らず、その結果、 P_{wr} の増加が抑えられる。 \bar{Y}_{dm} の減少量は概ね $0.5 m^3/s$ per $100km^2$ 以下だが、元々 \bar{Y}_{dm} が少ないオホーツク海側では相対変動量 $\Delta \bar{Y}_{dm} / \bar{Y}_{dm}$ は -50% に達し、気候変動の進行に伴って渇水が一段と進行する可能性が指摘される。

(3) 考 察

本研究では、気候や地形、地質などを説明因子とする線形モデル（領域モデル）を用いて、北海道全域の多様な流域群の渇水比流量を統一的に推定するモデルを導いた。代表 115 流域の渇水比流量（2001～2010 年中央値相当）に対する再現精度は $ARE=23\%$ 、 $SDE=0.27$ であり、地域での誤差の偏在もなく、夏季に最小流量となる流域だけに適用した場合も誤差の増大はなかった。

観測値を再現するモデルの精度は、データそのものの精度（不確実性）を超えることはできない。一般に、低水流量観測の精度は10%前後であり^{27,28)}、冬季の結氷時には更に低下する。また10年中央値 Q_{dm} の推定も10年全ての渇水流量が揃う流域から、1回限りの現地補間観測箇所まで精度にばらつきがある。また集水面積 A も5万分の1地形図などでは下流の地形（分水界）は不明瞭で、読み取り誤差が生じる。代表115流域の Y_{dm} に含まれる不確実性は、これら様々な不確実性の和として数10%程度あると推測すると、今回の領域モデルの相対誤差 $ARE=23\%$ はそれと大きく変わらず、観測データの再現性はほぼ限界に達したと考えられる。一般最小二乗法などを用い、より複雑なモデルを導入したとしても、データそのものの不確実性から、更に大きな再現性の向上は期待しがたい。むしろ採用した線形モデルは、労力、簡便さ、解釈の容易さの点でメリットは大きく、非観測流域を含む広範囲の渇水比流量の現在および将来のマッピングも容易に行うことができる。多様な流域群の渇水比流量を互いに比較することで、領域スケールでの水資源の開発管理や流域保全の推進に寄与すると期待される。

一方、領域モデルを適用する際には、その限界や前提条件を十分理解する必要がある。例えば、領域モデルの解析から除外した Y_{dm} が小さい箇所（表-1のID:116～120）に本モデルを適用した場合、相対誤差は $ARE=637$ 、 Y_{dm} が大きい箇所（ID:121～123）では $ARE=34$ となり、特に Y_{dm} の小さい流域に対して領域モデルの適用に限界がある。これら特異なデータは個別にモデル化することも可能と考えるが、これらを統合的に再現する領域モデルの提案が今後の課題である。また本研究手法を、北海道以外の地域、特に積雪寒冷地以外の地域にも適用し、その有効性を議論していく必要がある。

最後に、今回の気候変動における渇水比流量の将来予測に対する不確実性について議論する。1 つは、将来予測における係数一定の仮定である。本研究での将来予測では、降水量や気温の変化に対して係数は変わらないと仮定したが、これらの上昇量が大きい場合、渇水流量の発生シナリオも変化すると予想される。例えば、地上気温が大幅に上昇する場合、単に降水中の雪・雨割合の変化に留まらず、地表を覆う積雪の融雪が早期化、もしくは積雪しないことで、積雪寒冷地における冬季に渇水流量が生じるシナリオが成立しなくなると予想される。特に元々、 T_w が高い道南にて図-17より3K以上 T_w が上昇すれば、冬の積雪がほとんどなくなる可能性がある。また降水量や気温の変化によって、森林や湿原など土地利用（被覆条件）の変化が生じることも予想される。

もう一つの不確実性は、予測に用いた気候変動シナリオにもある。本研究では、MIROCとJMAの組み合わせたシミュレーション結果を用いたが、更に8ケースのシミュレーション結果が残されている。異なるケースによる渇水比流量予測の比較は、既に著者らが一報告しており、北海道の西に向かって渇水比流量は増加し、東に向かって減少する傾向は共通だが、ケースにより、その範囲や変動量は異なる結果が得られている。より詳細な考察や検証を進めた上で、改めて報告したい。

4. まとめ

本研究では、北海道内の多様な気候・地質条件を有する流域群の渇水比流量を統一的に推定可能な、気候や地質などの説明因子からなる領域モデルを決定し、その現在および将来の分布を示した。以下に、成果をまとめる。

- 1) 解析に用いたデータは、流量観測所の渇水流量の2001～2010年中央値に、現地補間観測結果なども含めた代表115流域のデータ（平均 $1.15 \text{ m}^3/\text{s per } 100\text{km}^2$ ）とした。
- 2) 領域モデルは線形回帰モデルとし、説明因子として降水量、気温、地形、地質、植生、土壌、土地利用の計7種44因子を用い、部分最小二乗法を繰り返し、渇水比流量への寄与が高い因子を選択した。その際、冬季の降水量は月平均気温を変数とする近似式を用い、降雨と降雪に分離推定して変数に用いた。
- 3) 領域モデルは、冬の降雨量と降雪量、秋の降水量、冬と夏の平均気温、標高標準偏差と平均勾配、集水域内の火山噴出物、火山岩（第四紀）、森林、湿原の面積割合の11因子の線形モデル（相対誤差23%）とした。
- 4) 北海道を構成する全1121流域に領域モデルを適用し、渇水比流量の現在マップを推定した。渇水比流量は、火山地域である道南や釧路、知床、降水量の多い道南、標高が高い北海道中央、釧路やサロベツの湿原などで

高い一方、十勝や道北全般で低く、特にオホーツク海側では、 $0.5 \text{ m}^3/\text{s per } 100\text{km}^2$ を下回る流域も推定された。

5) 既往の気候変動シミュレーションによる降水量と気温の予測変動量を領域モデルに入力し、渇水比流量の将来予測を行った。渇水比流量は、冬や秋の降水量が増加する北海道の西半分で増加する一方、秋の降水量が減少し夏の気温が上昇するオホーツク海側では減少し、その相対変動量は50%に達すると予測された。

謝辞：本研究にあたり、北海道開発局建設部および北海道建設部からデータ収集および現地調査に際し、多くの便宜を頂いた。株式会社ドーコンの小池明夫氏からはGIS解析にあたり懇切な指導を頂いた。木崎健二博士および株式会社ドーコンの内山秀樹氏には北海道の地質および植生を分類する際、貴重な意見を賜った。補間観測の実施は、北海道河川開発株式会社の岩坂航氏とともにを行うとともに、株式会社福田水文センター、株式会社北開水工コンサルタント、環境コンサルタント株式会社にも北海道の各地の観測にご協力を頂いた。3名の査読者の有益なご意見に基づき、本論文の修正がなされた。本研究は、平成25年度水文・水資源学会研究グループ助成および平成26年度河川整備基金の助成により実施された。

参考文献

- 1) 文部科学省、気象庁、環境省：気候変動の観測・予測及び影響評価統合レポート「日本の気候変動とその影響」（2012年度版）、pp.37-38, 2013.
- 2) 立川康人、滝野晶平、藤岡優子、萬和明、キム スンミン、椎葉充晴：気候変化が日本の河川流量に及ぼす影響の予測、土木学会論文集 B1, Vol.67, No.1, pp.1-15, 2011.
- 3) 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、林業試験場研究報告, Vol.310, pp.109-128, 1980.
- 4) 虫明功臣、高橋裕、安藤義久：日本の山地河川の流況に及ぼす流域の地質の効果、土木学会論文報告集, Vol. 1981, No. 309, pp.51-62, 1981.
- 5) 高田賢一、中津川誠、村上泰啓：積雪寒冷地の流域条件と水文・水質との関係、水工学論文集, Vol.49, pp.1603-1608, 2005.
- 6) 横尾善之、沖大幹：流域の気候・地形・土壌・地質・土地利用が河川の流況に与える影響、水工学論文集, Vol.54, pp.469-474, 2010.
- 7) 建設産業調査会：地下水ハンドブック, pp.22-25, 1979.
- 8) 国土交通省：水文水質データベース, <http://www1.river.go.jp/>. (2014/10/12 閲覧).
- 9) 国土交通省国土政策局：国土数値情報ダウンロードサービス, <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>. (2014/6/15 閲覧).
- 10) 日本応用地質学会北海道支部：北海道地方土木地質図及び同解説, 2016(発行予定).
- 11) 佐藤友徳、山田朋人、稲津将、中村一樹、杉本志織、宮崎真；久野龍介：北海道を対象とした地域気候予測研究の動向、北海道の農業気象, 65, 12-22, 2013.

- 12) Inatsu, M., Sato, T., Yamada J., T., Kuno, R., Sugimoto, S., Farukh, M.A., Pokhrel, Y.A. and Kure, S.: Multi-GCM by multi-RAM experiments for dynamical downscaling on summertime climate change in Hokkaido, *Atmospheric Science Letters*, Vol.16, No.3, pp.297-304, 2015.
- 13) 気象庁：(地方版)気候変動に関するレポート 北海道の気候変化, pp.1.1-1.14, 2010.
- 14) 北海道建設部：雨量・水位・流量年表, <http://www.pref.hokkaido.lg.jp/kn/sbs/ksn/kasenkahome/>. (2014/10/10 閲覧).
- 15) Ang, A.H.S. and Tang, W.H.(伊藤學, 亀田弘行訳)：土木・建築のための確率・統計の基礎, pp.274-275, 丸善, 1977.
- 16) Brutsaert, W.: *Hydrology*, pp. 416-431, Cambridge University Press, 2005.
- 17) 西崎貴子, 近藤明彦：流域の気候・植生が河川流況に与える影響, 2004 年度水文・水資源学会学術大会, 2004.
- 18) 小松和, 木村龍, 横尾善之：流域の気候・地理条件に基づく山地河川の流況推定に向けた予備的検討, 土木学会論文集 G, Vol.68, No.5, pp. I_261-I_266, 2012.
- 19) Risley, J., Stonewall, A. and Haluska, T.: Estimating flow-duration and low-flow frequency statistics for unregulated streams in Oregon, *USGS Scientific Investigations Report* 2008-5126, pp.3193-3207, 2009.
- 20) 臼谷友秀, 中津川誠, 星清：積雪浸透を考慮した実用的融雪流出モデルの開発, 水文・水資源学会誌, Vol. 20, No. 2, pp.93-105, 2007.
- 21) 環境省自然環境局生物多様性センター：自然環境調査 Web-GIS, <http://gis.biodic.go.jp/webgis/>. (2014/6/15 閲覧).
- 22) 横尾善之, 沖大幹, 川崎雅俊, 坂田加奈子：渇水比流量の増加要因に着目した全日本地下水涵養ポテンシャルマップの作成, 土木学会論文集 B1, Vol.67, No. 4, pp.I_385-I_390, 2011.
- 23) 近藤純正：水環境の気象学, pp. 48-50, 朝倉書店, 1994.
- 24) Matsuo, T., Sato, Y. and Sasao, Y: Relationship between types of precipitation on the ground and surface meteorological elements, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, No.59, No.4, pp.462-476, 1981.
- 25) 文部科学省：気候変動適応研究推進プログラム, <https://www.restec.or.jp/recca/>. (2016/3/25 閲覧).
- 26) 林野庁：平成 26 年度森林・林業白書, pp.47-49, 2015.
- 27) Weight, W.D.: *Hydrogeology field manual 2nd edition*, pp.242-249, McGraw-Hill, 2008.
- 28) 阪田義隆, 池田隆司：可搬式 ADV を用いた同時流量観測による扇状地河川の流量変化と伏没量の定量化, 水文・水資源学会誌, Vol.25, No.2, pp.89-102, 2012.
- 29) 上原弘之, 阪田義隆, 知北和久, 山田朋人, 中津川誠, 工藤啓介, 濱原能成, 木村峰樹, 定塚徹, 臼谷友秀：北海道の渇水比流量の現在及び気候変動下における将来予測, 2015 年度日本水文科学学会学術大会, 2015.

(2016.4.7 受付)

REGIONAL REGRESSION ANALYSIS OF DROUGHT RIVER DISCHARGES IN SNOWY COLD AREAS UNDER CLIMATE CHANGE

Yoshitaka SAKATA¹, Hiroyuki UEHARA², Kazuhisa A. CHIKITA³,
Makoto NAKATSUGAWA⁴, Tomohito J. YAMADA¹, Keisuke KUDO⁵
and Tomohide USUTANI⁶

¹Faculty of Engineering, Hokkaido University

²Shimizu Corporation

³ Faculty of Science, Hokkaido University

⁴ Dept. of Civil Engineering and Architecture, Muroran Institute of Technology

⁵ Docon Corporation

⁶ Japan Weather Association

This study evaluates the regional modeling of drought river discharges in a unit area for a variety of watersheds, Hokkaido Island, Japan, and illustrates its present and future maps under the climate change condition. An initial linear model for drought discharge data in 115 watersheds consists of 44 parameters covering the areas of precipitation, temperature, geomorphology, geology, vegetation, soil, and land use. The parameters are extracted step by step in terms of parameter numbers and residuals in partially least squares. As a result, the regional model is obtained with 11 parameters; total snowfall in winter, total rainfalls in winter and autumn, temperatures in winter and summer, standard deviation of elevation, averaged surface slope, areal ratios of Quaternary volcanic deposits and rocks, and of forests and wetlands. The coefficients in the regional model contribute to interpret the factors controlling drought discharges in the snowy cold island. The present drought discharges at 1152 watersheds are calculated by the regional model, and are mapped in the GIS procedure. The prediction map of drought discharge when the global mean temperature would increase by 2K is also illustrated by inputting previous simulation results of precipitation and temperature into the regional model.