1. 北海道の渇水比流量の現在と将来予測 －支配因子の定量化と気候変動に伴う影響評価

阪田　義隆[1]*・知北　和久[2]・中津川　誠[3]・山田　朋人[1]・工藤　啓介[4]・
濱原　能成[5]・木村　峰樹[6]・定塚　徹[7]・臼谷　友秀[8]・上原　弘之[9]

[1]北海道大学大学院工学研究院（〒060-0014北海道札幌市北区北13西8）

[2]北海道大学大学院理学研究院（〒060-0810北海道札幌市北区北10西8）

[3]室蘭工業大学工学研究科（〒050-8585 北海道室蘭市水元町27-1）

[4]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）

[5]株式会社福田水文センター（〒001-0024 北海道札幌市北区北24西15）

[6]株式会社北開水工コンサルタント（〒080-0314北海道河東郡音更町共栄台西111）

[7]環境コンサルタント（〒088-0606 北海道釧路郡釧路町中央6）

[8]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）

[9]北海道大学理学院（〒060-0810北海道札幌市北区北10西8）

＊ E-mail: *y-sakata@eng.hokudai.ac.jp*

近年，気候変動に対する渇水リスクや流域保全の重要性が指摘されている．本研究では，河川の渇水指標となる渇水比流量について，北海道を対象領域として，現状の渇水比流量とそのトレンドをまとめるとともに，GISにより抽出した降水量，気温，地質，地形等の説明変数により構成される回帰モデルを部分最小二乗法で最適化する．これにより，非観測流域を含む広範囲な渇水比流量のマッピングに加え，気象等のトレンドを入力することで，渇水比流量の将来予測も可能となる．

Key Words : *river management, drought discharge, GIS, regression analysis, climate change*

1. はじめに

渇水比流量は，流域の水資源・水環境を管理する指標となる重要な水文量である．とくに近年，気候変動に伴う渇水リスク[1)]や水循環基本法施行などの流域保全の観点から，その分布や将来予測の情報は不可欠である．一方，渇水比流量は，気象・気候条件だけでなく，様々な流域条件に依存し，特に地山の保水性を示す地質条件に大きく依存する[2~4)]．我が国のように，狭い国土に多様な地質が分布する場合，流域毎に固有の値となるため，多くの流域を含む広範囲のマッピングはしばしば定性的となり，特に観測値の乏しい流域の推定は困難である．

本研究では，北海道を対象に，これまでの流量観測データから得られる渇水比流量の分布について，気象，地質，地形などの諸条件を線形モデルで近似することで，非観測流域を含む，北海道全体の広域的なマッピングを行うとともに，気象トレンドを与えることで，その将来予測を行うことを目的とする．

研究対象とする北海道は，面積83千km^{2}と日本全体の約2割を占め，アイルランドに次ぐ世界第21位の島で．あり，大小計1561の流域で構成される．日本海側から太平洋側に，山地から平地が分布し，多様な地形・地質・気象条件を有する．例えば，年降水量は，中央の山脈を境に東西で明瞭に分かれ，道央・道南の山地や海岸沿いで1700～2300mmと多く，道北オホーツク海沿岸で750mm以下と少ない．年平均気温も道央・道南の7.5～10.0℃に対し，石狩・日高の山地で2.0℃以下，それ以外の海岸沿いおよび内陸部で4.5～7.5℃と低い．

現在，日本応用地質学会北海道支部にて統一的な地質解釈に基づくGISデータ「北海道応用地質土木地質図」[5)]が整備されている（図1）．これによれば，北海道全体

は，第四紀から古生層まで幅広い地質が分布することが分かる．このため，北海道を代表地域とすることで，渇水比流量を広域的に推定，予測する手法が得られれば，他地域への適用についても期待できる．

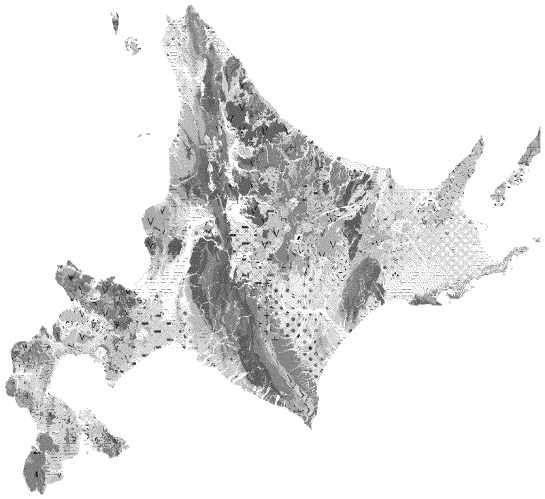

図-1　北海道土木地質図（凡例省略）

なお本研究は，平成25年5月に，学識者と調査実務者の横断領域的体制と，河川管理者の協力の元，実務・研究両面で活用できる成果を目指し活動を行っており，本稿はその中間成果をまとめるものである．

2. 北海道の渇水比流量の分布とトレンド

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して定義される．本研究では，現況流量として，観測データが比較的揃う2001～2010年の渇水流量の平均値Q_{dm} (m^3/s)を用いる．これを流域面積で除した100km^2当たりの比流量Y_{dm} (m^3/s per 100km^2)を渇水比流量とする．

図-2に，北海道の渇水比流量分布を示す．図-2では，既存の1級・2級河川の流量観測地点の内，1)ダムがない流域，あるいは2) ダムがあっても全体に占めるその集水面積が25%以下，もしくはダムが渇水時に貯水しない流域，3)観測地点間で同一渇水時期に流量差分して有意な差がある差分流域と，更に，4)ダム流入量データの内，上流に他にダムがないデータ，5) 2014年12月に，非量観測地点48地点にて，低水流量観測を追加実施し，他の同一流域を参考に渇水流量を推定した値をまとめている．

図-2によれば，北海道の平均渇水比流量Y_{dm}は，0.1～3 m^3/s per 100 km^2と幅広い値で分布し，平均は 1.3 m^3/s per 100 km^2で，日本の平均約1m^3/s per 100 km^2よりやや多い．特に火山噴出物が分布する地域（屈斜路湖・羊蹄山麓・樽前・洞爺）や湿原（釧路・サロベツ）で大きな値を示す一方，降水量の少ないオホーツク海側・十勝で小さい傾向がある．

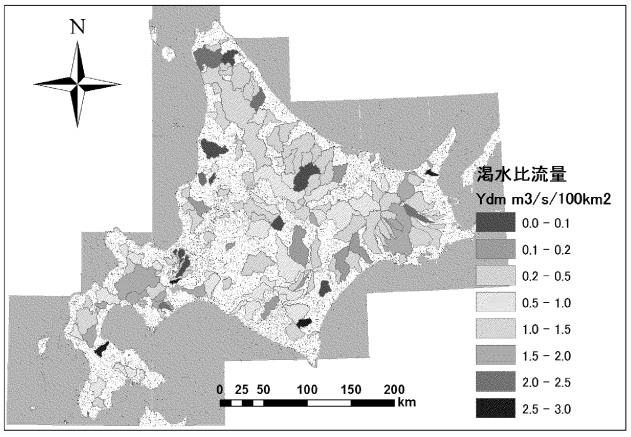

図-2　北海道の2001～2010年平均相当の渇水比流量分布

図-3に，直近10年平均の渇水流量Q_{dm}の時系列からMann-kendal法で解析したトレンド分布である．トレンドは図-2に示す流域の内，有意水準95%（トレンドのない帰無仮説5%以下）を満たした値のみを示した．図-3によれば，北海道の場合，その増加率は年間0.1m^3/s程度以下で大きな値ではないものの，全体に渇水流量は増加傾向にある．この傾向は既往の解析結果[6]とも調和的である．近年の気象トレンド[7]との関係に着目して考察すると，北海道では近年，年降水量は有意な増減は認められないが，気温については，北海道代表3地点平均で約0.9℃／100年，全体22地点でも上昇傾向にあり，月別でも夏期を除き全体に上昇している．特に積雪期の気温上昇は，降雪でなく降雨，あるいは部分融雪を促すため，冬期に渇水を観測しやすい北海道において渇水流量を増加させたと推測する．しかしながら，積雪深の減少は長期的に山体への貯留効果の減少に繋がるため，渇水流量の増加傾向も減少に転じる可能性もあり，今後の観測での注視が必要である．

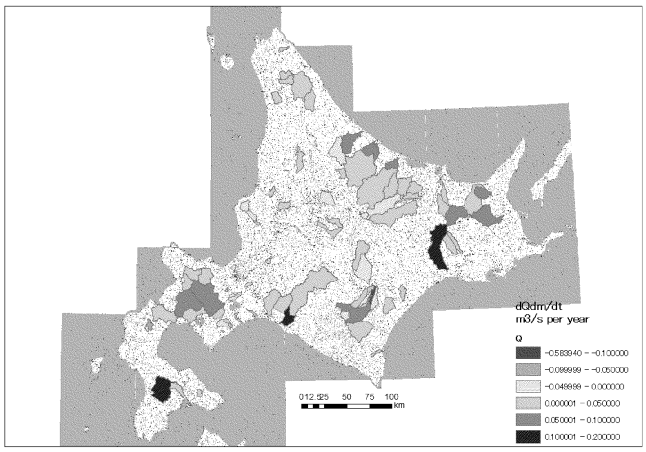

図-3　北海道における渇水流量Q_{dm}のトレンド

3. 渇水比流量の多変量モデル

河川流量の再現計算は，タンクモデルから差分法等による水循環シミュレーションまで様々にあるが，特に渇水流量の場合，地山の水理地質が重要であり，実測データが無い場合には容易ではない．ここでは，一旦モデル化ができれば非観測流域でも容易に適用でき，かつ各成分のトレンドの入力により将来予測も可能な線形回帰モデル（Regional regression model）を採用する．すなわち，

$$Y_i = b_0 + \sum_{j=1}^{n} b_j X_{ij} + e(\boldsymbol{x}) \qquad (1)$$

ここで，Y_iは流域iの渇水比流量，X_{ij}は渇水流量の独立変数であり，降水量，気温，地形，地質，土壌，植生，土地利用から計45因子をarcGIS(ESRI社)を用いて，流域毎に抽出して用いた．なおオリジナルでは多様な区分のある地質，土壌，植生，土地利用は水文地質の観点から，グループ分けを行っている（例えば，図1の地質図は121区分を6区分，植生図は全732種類を7種類に統合した）．

表-1　渇水比流量 Y_iの説明因子 X_{ij}

項目	参照元	解析用区分		区分数
降水量	解析雨量 気象庁	・年降水量P_{yr}，・4旬毎降水量（P_{win}_12-2月，P_{spr}_3-5月，P_{sum}_6-8月，P_{aut}_9-11月）	2001-2010年平均 2001-2010年最小	10
気 温	気象官署・アメダス（ｸﾘｷﾝｸﾞ推定）	・年平均T_{yr}，・季別平均気温（T_{win}_12-2月，T_{spr}_3-5月，T_{sum}_6-8月，T_{aut}_9-11月）	2001-2010年平均	5
地 形	国土地理院10mメッシュ	・最大標高ME，・標高差DE，・標高変動Slope ・平均勾配AS，・最大流路長ML，・流路長の総和SL		6
地 質	北海道 土木地質図	・G1第四紀層，・G2火山噴出物，・G3火山岩，・G4新第三紀層， ・G5古第三紀層以前，G6付加帯		6
土 壌	土壌図 国土交通省	・S1褐色森林土，S2黒ボク土，S3赤黄色土，S4ポドゾル，S5褐色低地土，S6火山灰未熟土等，S7岩屑土		7
植 生	2.5万植生図 環境省	・V1乾～適湿性の広葉樹林，V2湿性の広葉樹林，V3乾～適湿性の針葉樹林，V4湿性の針葉樹林，V5乾～適湿性の草原，V6湿性の草原，V7乾～適湿性の無植生地・非植生地，V8湿性の無植生地・非植生地		7
土地利用	土地利用細分メッシュ 国土交通省	L1畑，L2森林，L3荒地，L4都市		4

b_jは因子X_{ij}に対する比例定数である．先行研究[8]のように，個別流域で比例定数をそれぞれ調整すれば，再現性の高い結果が得られるが，ここでは，汎用性を得るため，同一の値を再現するため，北海道全体で一定値と仮定する．これらの値は，図-2の実測の渇水比流量を再現できるよう部分最小二乗法(PLS)により同定する．PLSでは，主成分分析と多変量最小二乗法を組み合わせることで，パラメータの重相関性を考慮しつつ，最小誤差の推定を行うことが可能である．

独立変数の数を変化させながら，渇水比流量の計算値と観測地の残差の標準偏差を比較した（図-4）．独立変数の数を47から20に減らしても残差はさほど変わらず，それ以降，独立変数の数を減らすと残差が急激に増大する．このため，独立変数の数を20とした場合のPLSにて同定した最適解を採用することとした．

図-5に，各説明因子の相対的重要度VIPを比較する．相対的には降水量が効いており，年降水量は正の相関だが，春(3-5月)の降水量は負の相関となっている．次いで，地質的には流域に火山噴出物の分布範囲が多い場合に，渇水流量は増加する傾向にある．また湿性の広葉樹林や土地利用で森林がある場合にも渇水比流量は増加する．

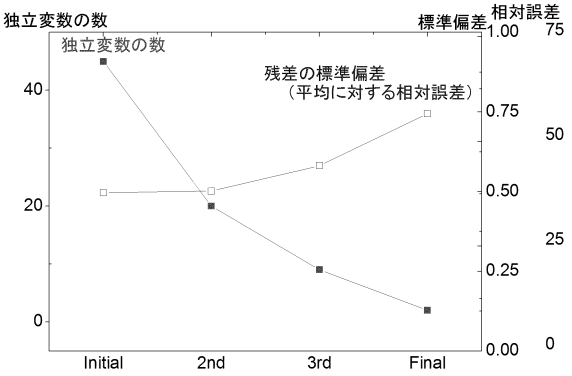

図-4　PLS法によるパラメータ数と再現誤差の関係

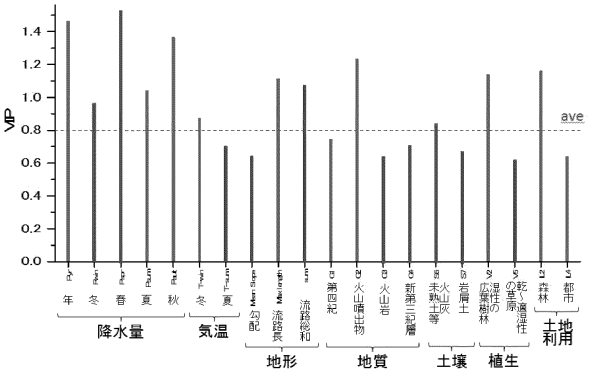

図-5　最適パラメータによる各因子の相対重要度VIP
（赤：負の相関，青：正の相関）

最後に，誤差項eは，式(1)の推定値と実測値の差であり，空間分布の偏りや正規分布の補正を施した後，クリギングにより北海道全体の分布を推定した．

図-6に，最適パラメータによる渇水比流量の分布を示す．図-2と比較する場合，有珠・洞爺周辺や屈斜路周辺など，火山地域で大きく，降水量の少ないオホーツク海側で少ないなど全体の傾向をよく再現できている．

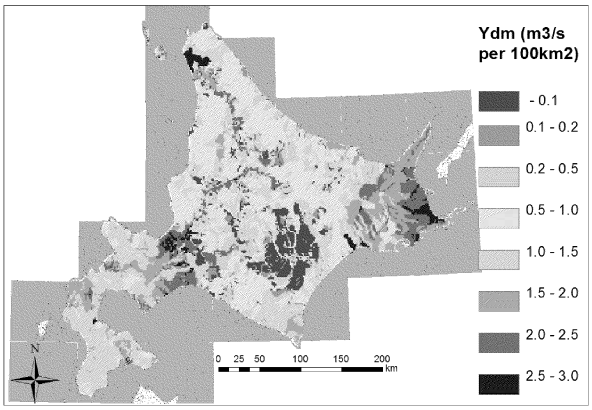

図-6　多変量回帰モデルで再現した渇水比流量分布

4. 渇水比流量の将来予測

最適パラメータの各要因のトレンドを入力することで，将来予測の推計が容易にできる．一例として，総合地球環境学研究所のAphroditeデータ[9]から降水量，気温のトレンドをグリッドデータ毎に単回帰勾配を求め，50年後の渇水比流量の推定を行った．なおトレンド分布はここで省略するが，既報[10]では年降水量はオホーツク海側から十勝地方にかけ減少，日本海側から日高にかけ帯状に増加傾向となり，夏の気温は道北からオホーツク海側にかけて気温増加がみられ，冬の気温は道北および日高・十勝で低下，内陸部と知床方面で上昇する傾向となった．

式(1)に最適パラメータを用いたモデルに，気象トレンドを入力し，得られた渇水比流量の50年後の全道マップを図-7に示す．図-6と比べ，渇水比流量は，道東で若干の増加を示すが，全体には減少する傾向にある．特に道北および道東の上川・宗谷・網走あたりで0.1m^3/s per 100km^2以下となる流域が現れている．この解析結果によれば，特に渇水リスクが懸念されるのは道北・日高・十勝地域で，特に十勝地域はもともと渇水流量が少なく，より大きな影響が懸念される．しかしながら，図-3で示したとおり，現状において渇水比流量は上昇傾向にあり，明らかに矛盾している．特に図-6では，0.1m^3/s per 100km^2を下回る地域が広範囲にあるが，この値は小さすぎる．この要因として，Aphroditeデータと気象庁の実測データでのトレンドを比較すると同一地点でも差が大きく，このため，トレンドの適当な補正が必要と考えられる．

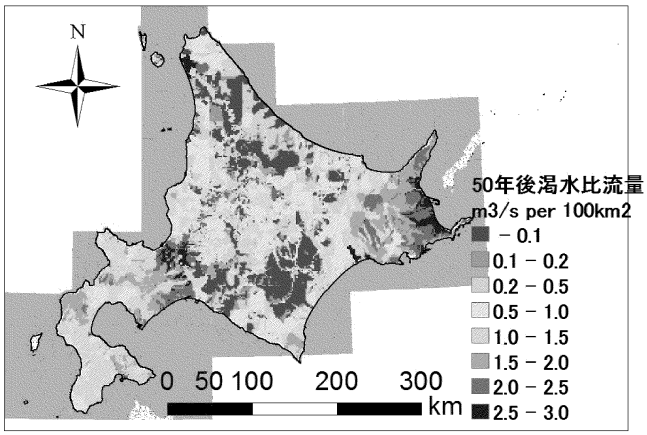

図-7 Aphroditeデータのトレンドによる50年度後のr_{dn}予測

5. まとめ

今回，北海道を代表地域に，まず現状の渇水比流量のマッピングを行い，次いで各流域の気象，地形，地質等の説明変数による回帰モデルを求め，北海道全体の渇水比流量分布およびその将来予測を示した．その結果，回帰モデルは現状をおおむね再現できた一方，将来予測については，観測データでは増加傾向があるものの，既存データからのトレンドを入力すると減少傾向となり，相反する結果となる．このため，モデルの精度向上に加え，トレンドについても妥当性の考察が必要である．今後はデータの収集や現地調査を進めて，モデル精度を向上させるとともに，将来予測に用いるトレンドも最新の研究成果[11]から用いることを考えている．

謝辞：本研究にあたっては，北海道開発局建設部河川管理課および北海道建設部より，貴重なデータの提供を賜るとともに，現地調査の実施に際し様々な便宜を図っていただいた．本研究活動は平成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の下，実施されている．ここに記して謝辞とします．

参考文献

1) 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」，85pp，2012

2) Farvolden, Geologic controls on groundwater storage and base flow, *Journal of hydrology*, vol. 1, pp. 219-249, 1963

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，林研誌報，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. 388, pp. 51-62, 1981

5) 日本応用地質学会北海道支部編，北海道土木地質図及び同解説，2015（予定）

6) 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（水工学）,Vol. 67, No. 1, pp. 1-15, 2011

7) 気象庁，北海道の気候変化，http://www.jma-net.go.jp/sapporo/tenki/kikou/kikohenka/kikohenka.html, 2010

8) Risley J.., Stonewall A. and Haluska T.: Estimating flow-duration and low-flow frequency satistics for unregulated streams in Oregon, *USGS Scientific Investigations Report* 2008–5126, pp. 3193-3207, 2009

9)Yasutomi N, Hamada A, Yatagai A, Development of a long-term daily gridded tmperature dataset and its application to rain/snow discrimination of daily precipitation, *Global Environmental Research*, 15, 165-172, 2011

10) 上原弘之，阪田義隆，知北和久，中津川誠，山田朋人，工藤啓介，小池明夫，濱原能成，木村峰樹，定塚徹，臼谷友秀，気象トレンドを考慮した北海道の渇水比流量，陸水物理研究会第 36 回研究発表会講演要旨，2014

11) Inatsu M, Sato T, Yamada 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, *Atomospheric Science Letters*, Online published, 2015