

19. 東北地方の貯水池における 地域特徴と化学流出成分の比較検討

幡谷 有翼¹・藪崎 志穂²・川越 清樹³

¹ 非会員 福島大学共生システム理工学類 (〒960-1296 福島県福島市金谷川 1)

² 非会員 総合地球環境学研究所 (〒603-8047 京都府京都市北区上賀茂本山 457-4)

³ 正会員 福島大学共生システム理工学類 (〒960-1296 福島県福島市金谷川 1)

E-mail:kawagoe@sss.fukushima-u.ac.jp

本研究では、現況、および気候変動の水環境影響評価にも利用できる外部負荷量推計データベースを整備する目的の一環として、東北地方に分布するダム貯水池を対象地域に設定し、数値地理情報に基づく貯水池上流域の地域特徴とサンプリング、分析された貯水池流入口の化学的な物質流出成分の関係を比較検討することを試みた。地域特徴では、物質負荷・流出に関与する気候、土地被覆、地形、地質の数値地理情報を用いてクラスター分析を行い流域を分類した。この流域分類の結果と貯水池流入口の化学的な物質(イオン、多元素)と比較をして関係を検討した。検討結果として、単位面積当たり元素による化学的負荷量の大きな流域の共通の地域特徴が明らかにされた。

Key Words: External load, numerical geographical information, cluster analysis and trace elemnt

1. はじめに

気候変動に伴う気温上昇や降水の極端化にตอบสนองした貯水池の環境動態の変化が見込まれ、特に危惧される富栄養化の進行¹⁾等の影響評価に対する研究が展開されている。貯水池の将来像を予測することに関しては、貯水池の形状規模に応じた内部生産性と貯水池上流域の地域特徴に応じた外部負荷性の両面の情報を踏まえた解析を進めることが望ましく、これまで外部負荷の状況を緻密に予測できるデータを整備するため、流況、気候、地形、地質、土地被覆特徴に応じて貯水池上流域の特徴を分類し、外部負荷の生産性を求めることのできる地域特徴の情報整備を進めてきた²⁾。しかしながら、貯水池管理より取得された、例えば流量、浮遊物質濃度の濃度、濁度のデータは一般的な情報として公表されているものの、貯水池上流域から直接流出される成分の把握に関しては情報が過不足している側面もあり、ある程度の緻密な直接流出する成分のデータも取得して貯水池上流域の外部負荷の特徴を捉える必要がある。トレーサーとして有効的に活用できる化学的な成分の流出情報に各貯水池の上流域の地域的な情報を関連付けさせて統合化することで、より精緻な外部負荷の予測が展開が期待できる。

以上の背景をふまえて、本研究では、現況、および気候変動の水環境影響評価にも利用できる外部負荷量推計



図1 研究対象領域調査位置図

データベースを整備する目的の一環として、東北地方に分布するダム貯水池を対象地域に設定し、数値地理情報に基づく貯水池上流域の地域特徴とサンプリング、分析された貯水池流入口の化学的な物質流出成分の関係を比較検討することを試みた。

2. 研究方法、およびデータセット

研究手法は、貯水池上流の地域特徴解析と貯水池流入口の化学分析に大別される。各々の結果を統合させる比較検討を進めて地域特徴とサンプリング、分析された

貯水池流入口の化学的な物質流出成分の関係を求める。
 なお、研究対象は東北地方に存在する国土交通省管轄のダム貯水池 20 ヶ所である(図 1 参照)。東北地方は気候的に冷帯、温帯域の境界付近に位置するため、気候変動に対するインパクトが見込まれる地域に属している。以下(1)、(2)に各研究方法の詳細とデータセットについて記載する。

(1) 地域特徴分析

地域特徴の情報を整備するため、数値地理情報を利用して貯水池上流の気候、土地被覆、地形、地質の条件を整理した。なお、これらの詳細条件を子細の状態に応じて総合的に評価することは困難であるため、クラスター分析を行い各条件内の子細状態をグループ分類することとした。グループ分類に対する条件の背景を分析することで貯水池上流域の地域特徴を求めた。こうした分析を進める上で気候変動の影響を考慮した展開を見据えた場合、気候帯の異なる領域を広範で分析することが望ましい。しかし、後に比較する化学分析結果を全域で用意することが困難になる問題を含む。そのため、本解析では、東北地方に限定して地域特徴を求めることとした。したがって、この解析での地域特徴は東北地方の相対評価となることに留意しなければならない。

データセット、および子細条件は表 1 に示すとおりである。地形条件(空間解像度 10m×10m)以外は空間解像度 1km×1km の情報を利用している。

クラスター分析は、異なる性質のものが複雑に混在する集団から、互いに類似する性質のクラスターを抽出させる統計的な分析手法であり、自然科学の分野でも多くの解析事例をもつものである³⁴⁾。予め分類の基準が設定されていないことから、分類のための外的基準や評価が与えられていない教師無しの分類法となり、本解析で試みる相対的な地域特徴を決定するためには適した解析法といえる。この解析では、階層的方法より、ウォーフード法によるクラスター間の距離測定法から各条件のグループ化を試みた。

表 1 地域特徴分析

条件	利用データ	子細条件	備考欄
気候条件	メッシュ気候値 20101 (発行：国土地理院、監修：気象庁)	・暖候期降水量 ・寒候期降水量 ・月平均最高気温・最低気温の平年値 ・最大積雪深平年値 ・年日射時間平年値	
土地被覆	自然環境保全基礎調査植生図(発行：環境省)	・高山・亜高山帯樹林 ・落葉広葉樹樹林帯自然・代償 ・常緑樹林帯自然・代償 ・植林・耕作地・人為改変地	第 7 回自然環境保全基礎調査までの統合結果図
地形	基盤地図情報 10m (発行：国土地理院)	・流域面積 ・最高・最低標高 ・最大河川流路延長 ・河床勾配	
地質	20 万分の 1 表層地質図(発行：国土交通省国土情報課)	20 万分の 1 表層地質図に記載の地質を岩種毎に分類	

(2) 化学分析

直接的な化学要素成分を求めるため、研究対象領域のダム貯水池の主流入河川(流入口 500m 以内)より試料サンプリングを実施した(2018 年 5 月～8 月)。これらサンプリング試料についてイオン濃度、多元素濃度を導出した。イオン濃度については、日本ダイオネクス社の DIONEX ICS-1100、ICS-2000 のイオンクロマトグラフィーを用いて、F、Cl、NO₂⁻、Br、NO₃⁻、PO₄³⁻、SO₄²⁻、Li⁺、Na⁺、NH₄⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺の濃度情報を取得した。多元素濃度については、ICP-MS 7500Series を用いて誘導結合プラズマ質量分析法(ICP-MS)より濃度情報を取得した。各ダム貯水池上流域のイオン濃度、微量元素の濃度を化学的特徴の代表値として設定し、各ダム貯水池における流況データを用いることで化学成分の総量を試算して、直接流出される化学成分の負荷量を求めた。なお、流況データとして、過去 10 年間の貯水池への流入量平均値(竣工 10 年内のダムに関しては過去 10 年内の平均値)を用いている。また、流入口から求められる化学物質流入量の他に、流域面積情報を用いて単位面積当たり(1km²)の流入量を求めた。

3. 地域特徴分析結果

各々の要素に応じた地域特徴分析の結果は以下の(1)～(4)に示すとおりである。また、この(1)～(4)の分析結果を統合した結果を(5)に示した。

(1) 気候特徴解析

貯水池上流域の気候条件による数値地理情報に基き、クラスター分析して特徴分類を区分したデンドログラムを図 2 に示す。また、特徴分類と各貯水池上流域の気候条件区分を対比した結果を図 3 に示す。

図 2 のデンドログラムの階層より、東北地方の貯水池上流域は 5 つの Group に分類することができる。図 3 の気候情報区分と比較すると、Group1 は年降水量 1,000～1,500mm で相対的少雨の暖候期過多の積雪深 100cm 弱、年日射時間 1,600 時間弱の流域、Group2 は年降水量 1,000～1,500mm で相対的少雨かつ暖候期過多の積雪深 50cm 弱、年日射時間 1,600 時間以上を示す東北地方で相対的に日射の多い流域、Group3 は年降水量 2,000～2,500mm で相対的に多雨の積雪深 100～200cm、年日射時間 1,400～1,600 時間を示す流域、Group4 は年降水量 1,500～2,000mm で積雪深 150～300cm、年日射時間 1,400～1,600 時間の日射時間の短い流域、Group5 は年降水量 2,500mm 以上の多降水となる積雪深 250cm 以上の典型的な豪雪地帯の流域と特徴付けることができる。

なお、図 2 のデンドログラムに示すとおり、大きな階層として I、II が区分され、I は太平洋型気候の流域、およびこれに類似する流域、II は日本海型気候の流域、

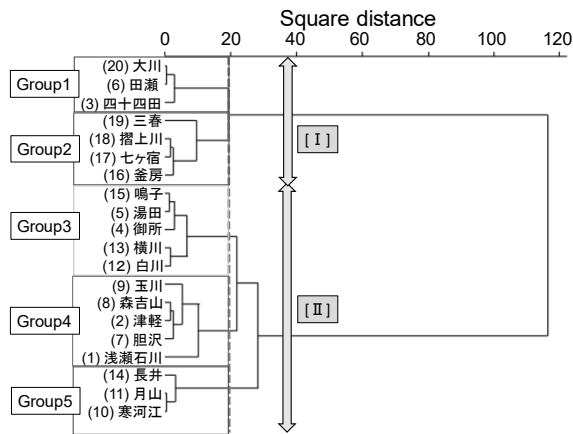


図2 気候地域解析デンドログラム

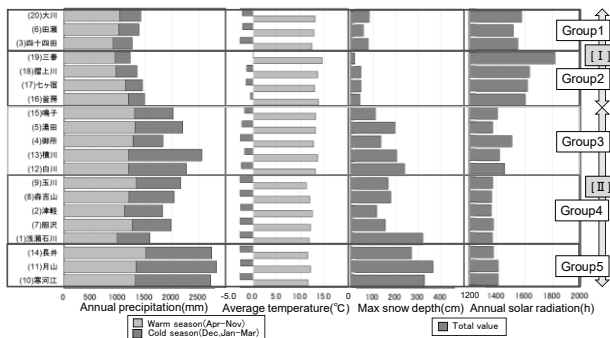


図3 特徴分類と各貯水池上流域の気候条件区対比

およびこれに類似する流域となる。

基本的に、気候特徴は、土地被覆と並んで、地形、地質よりも短い時間スケールで変化するものであり、気候変動による影響に依存して将来の変化が見込まれるものである。この結果は例えば 50 年、および 100 年等の時間スケールで変化する動的な特徴となる。特に降水量増大、融雪量増大、積雪の被覆時間に応じて貯水池の物質寄与の大きな変化も見込まれる。

(2) 土地被覆特徴解析

貯水池上流域の土地被覆による数値地理情報に基き、クラスター分析して特徴分類を区分したデンドログラムを図4に示す。また、特徴分類と各貯水池上流域の土地被覆区分を対比した結果を図5に示す。

図4のデンドログラムの階層より、東北地方の貯水池上流域は6つのGroupに分類することができる。図5の土地被覆区分と比較すると、Group1はブナクラス域の自然植生、および代償植生による落葉広葉樹林帯の占拠割合の流域、Group2は基本的に落葉広葉樹を優先するもののヤブツバキクラス代償植生による常緑樹林も混在する流域、Group3はヤブツバキクラス代償植生による常緑樹林を優先にするものの落葉広葉樹、湿地帯も混在する流域、Group4は植林地、耕作地の占拠割合の大きな流域、Group5はブナクラス域の自然植生、および代償植生による落葉広葉樹林帯の占拠割合の多い高山・亜高山帯

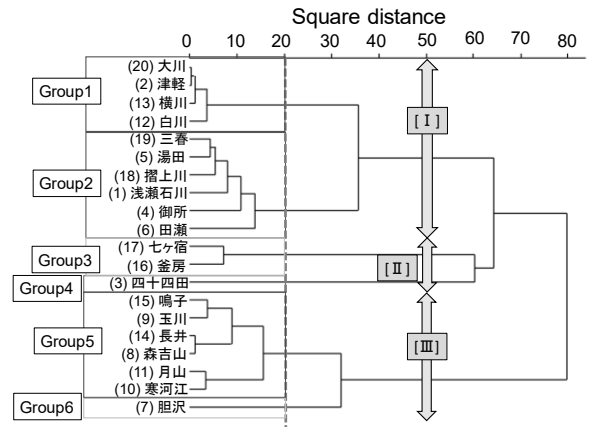


図4 土地被覆地域解析デンドログラム

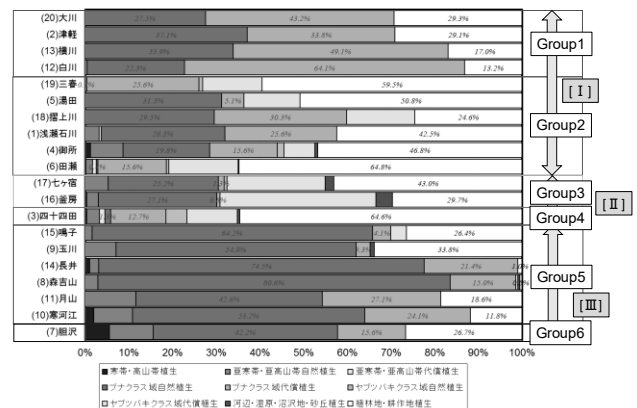


図5 特徴分類と各貯水池上流域の被覆条件区対比

高山帯も含む流域、Group6は相対的に高山・亜高山帯樹林と植林地、耕作地の占拠割合の大きな流域と特徴付けることができる。間伐等の樹間管理などに依存するが、基本的に東北地方であるため落葉広葉樹林を含む流域が多く、森林土壌の発達を見込むことができる。そのため、土砂浸食の抑制効果は相応に発揮できると考えられる。ただ、耕作管理状況や排水管理にもよるが、耕作地などの低木低草になりやすい人為改変地域を多く含むGroup2, 3, 4, 6の貯水池上流域になる流域は土砂浸食の影響は相応大きいものと推測される。そのため、貯水池の物質寄与の大きな流域になる土地被覆条件を含んでいるものと推測できる。また、気候条件と同様に相対的に短い時間スケールで改変の見込まれる条件であり、動的な特徴として位置づけられ、貯水池の物質寄与の大きな変化も見込まれる。

なお、図4のデンドログラムに示すとおり、大きな階層としてI, II, IIIが区分され、Iは落葉広葉樹の占拠率の多い流域、IIは常緑樹林の占拠率が相対的に大きい流域、IIIはIと類似するものの高山・亜高山帯樹林を含む流域として特徴を分類することができる。

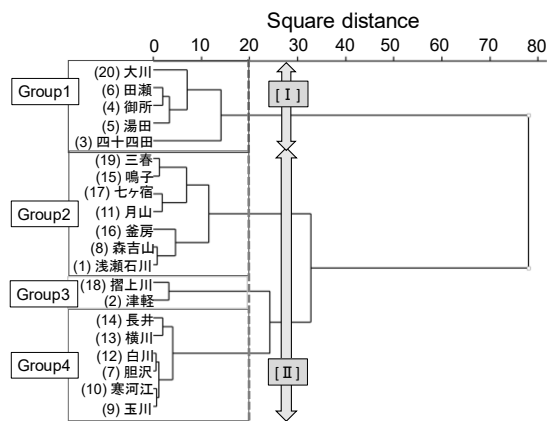


図6 地形地域解析デンドログラム

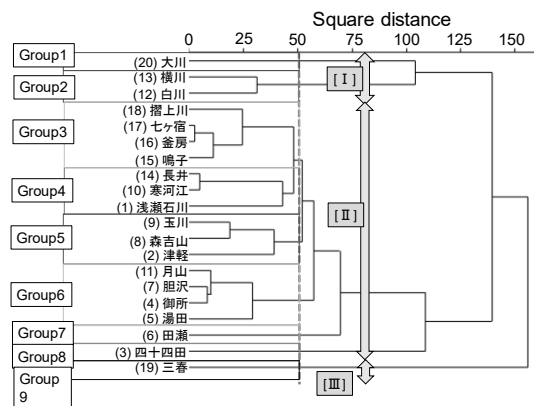


図8 地質地域解析デンドログラム

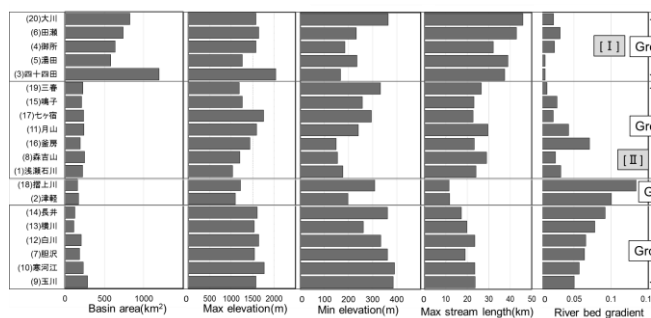


図7 特徴分類と各貯水池上流域の地形条件区分別比

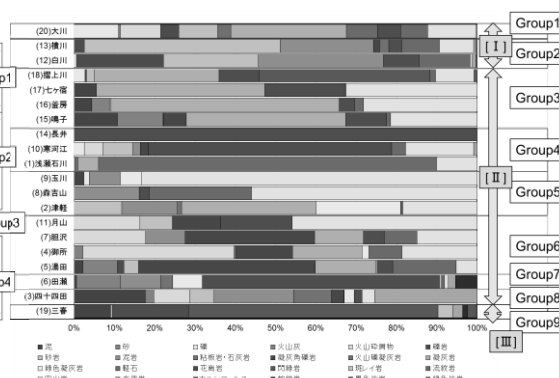


図9 特徴分類と各貯水池上流域の地質条件区分別比

(3) 地形特徴解析

貯水池上流域の地形による数値地理情報に基き、クラスター分析して特徴分類を区分したデンドログラムを図6に示す。また、特徴分類と各貯水池上流域の地質区分を対比した結果を図7に示す。

図6のデンドログラムの階層より、東北地方の貯水池上流域は4つのGroupに分類することができる。図7の地形区分と比較すると、Group1は大きな流域面積(約500km²以上)を呈する緩やかな河床勾配(約0.03以下)の流域、Group2は相対的に流域面積規模の割には流路延長の長い(約22.5~30.0km)緩やかな河床勾配(約0.02~0.07)の流域、Group3は急な河床勾配(約0.1以上)の流域、Group4は流路延長が約20km前後の中位、かつ河床勾配も中位な流域と特徴付けることができる。相対的に急勾配の河床を呈する流域は降雨等の外的営力により土砂生産が活発化しやすい流域と位置づけられる一方で、緩やかな河床勾配の流域は安息勾配に近似しているものの多量の土砂堆積がなされている可能性もある。緩やかな河床勾配流域では、多量の未固結土砂の堆積が流量増加に伴い浸食流出されるプロセスもあるため、一概に土砂生産が活発化しにくいとは断定しにくい。そのため、地質状況との関連性もあわせた評価が必要になる。ただ、貯水池河口まで到達する移動プロセスを考慮すれば、流域規模に関する外的要因による感度は貯水池影響に大きく寄与しうる。そのため、地形特徴の中で流域の大小は着

目しなければならないものと推測される。なお、図6のデンドログラムに示すとおり、大きな階層としてI、IIが区分され、この境界条件は、流域面積の大小(基準約500km²以上)で規定されている。Iは流域面積大に属しており外的要因の感度の弱いもの、IIは流域面積小に属しており外的要因の感度の強いものと特徴を分類することができる。

(4) 地質特徴解析

貯水池上流域の地質による数値地理情報に基き、クラスター分析して特徴分類を区分したデンドログラムを図8に示す。また、特徴分類と各貯水池上流域の地質区分を対比した結果を図9に示す。

図8のデンドログラムの階層より、東北地方の貯水池上流域は9つのGroupに分類することができる。図9の地質区分と比較すると、Group1は均等な割合で地質分布がなされている流域、Group2は堆積岩に属する礫岩、砂岩、泥岩の占拠割合の大きな流域、Group3は凝灰岩の占拠割合の大きな流域、Group4は花崗岩や軽石等の特定の地質の占拠割合の大きな流域、Group5は泥岩、安山岩の占拠割合の大きな流域、Group6は泥、砂や火山灰等の未固結層と凝灰岩、凝灰角礫岩の占拠割合の大きな流域、Group7は泥、砂等の未固結層と花崗岩の占拠割合の大きな流域、Group8は圧倒的に泥含有の割合

の大きな流域、Group9 は泥含有と花崗岩、および花崗閃緑岩の深成岩類の占拠割合が大きな流域と特徴付けることができる。基本的に未固結層の分布の多い流域は土砂生産活発化しやすく、流出する物質が多くなると予測される。特に細粒であり浮遊しやすい火山灰、泥分布割合の高い Group6, 7, 8, 9 に分類される貯水池上流の流域は、浮遊性も高まりやすくなり貯水池への物質寄与率も高くなりやすいと推測される。また、地質の特徴を統計的計算に依存して分類したことにより、火山灰、泥の多くなる Group に属することがなかったものの、火山灰、泥の割合の多かった七ヶ宿ダム、釜房ダム、鳴子ダムの貯水池上流域(いずれも Group3), 寒河江ダムの上流域(Group4)も総じて貯水池の物質寄与の大きな流域になる地質的条件を含んでいるものと推測できる。

なお、図8のデンドログラムに示すとおり、大きな階層としてⅠ、Ⅱ、Ⅲが区分される。占拠率の大きなⅡが典型的な東北地方の貯水池上流に存在しうる地質分布として位置付けられ、Ⅰ、Ⅲが地質的な特徴付けられる大区分となる。Ⅰは堆積岩が多く分布する区分となり、大川ダム、横川ダム、白川ダムの貯水池上流域がこれに属する。Ⅲは Group9 と一致した泥含有と花崗岩、および花崗閃緑岩の深成岩類の占拠割合が大きな流域の区分となり、三春ダムの貯水池上流域がこれに属する。なお、特徴付けられるⅠ、Ⅲはいずれも東北地方南部の貯水池上流域となることが示されている。

(5) 地域条件の統合結果

(1)~(4)までの各々の地域特徴分析結果の分類を便宜的に統合化したものが表2となる。統合化された結果は統合番号として示される。統合番号は相対的に近隣した位置関係で同値として示され、計4つのグループが示された。なお、この番号と元素やイオンの比較より、化学物質の流出寄与が示されることとなりえる。

表2 東北地方貯水池上流域の統合分類結果

貯水池	気候	土地被覆	地形	地質	統合番号
(1) 浅瀬石川	4	2	2	4	4224
(2) 津軽	4	1	3	5	4135
(3) 四十四田	1	4	1	8	1418
(4) 御所	3	2	1	6	3216
(5) 湯田	3	2	1	6	3216
(6) 田瀬	1	2	1	7	1217
(7) 胆沢	4	6	4	6	4646
(8) 森吉山	4	5	2	5	4525
(9) 玉川	4	5	4	5	4545
(10) 寒河江	5	5	4	4	5544
(11) 月山	5	5	2	6	5526
(12) 白川	3	1	4	2	3142
(13) 横川	3	1	4	2	3142
(14) 長井	5	5	4	4	5544
(15) 鳴子	3	5	2	3	3523
(16) 釜房	2	3	2	3	2323
(17) 七ヶ宿	2	3	2	3	2323
(18) 覆上川	2	2	3	3	2233
(19) 三春	2	2	2	9	2229
(20) 大川	1	1	1	1	1111

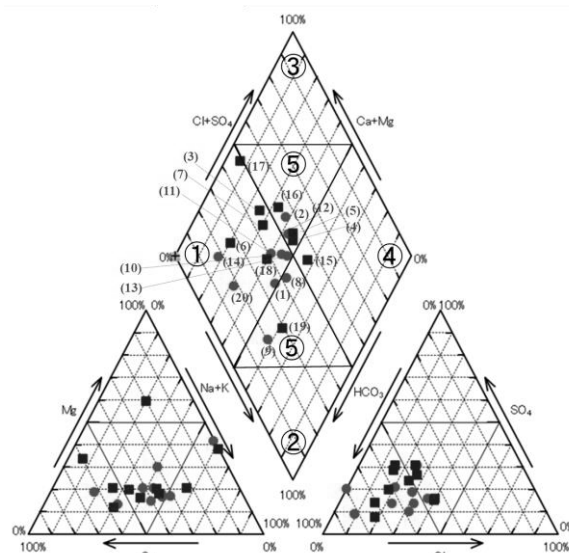


図10 貯水池上流域のトリリニアダイアグラム

表3 東北地方貯水池上流域のイオン分類と地域特徴

貯水池	地域特徴 統合番号	イオン分類区分
(1) 浅瀬石川	4224	①炭酸カルシウム型(一般地下型)
(2) 津軽	4135	⑤中間型(河川型)・温泉水型より
(3) 四十四田	1418	①炭酸カルシウム型(一般地下型)
(4) 御所	3216	⑤中間型(河川型)・温泉水型より
(5) 湯田	3216	⑤中間型(河川型)・温泉水型より
(6) 田瀬	1217	①炭酸カルシウム型(一般地下型)
(7) 胆沢	4646	①炭酸カルシウム型(一般地下型)
(8) 森吉山	4525	⑤中間型(河川型)・停滞型より
(9) 玉川	4545	⑤中間型(河川型)・停滞型より
(10) 寒河江	5544	①炭酸カルシウム型(一般地下型)
(11) 月山	5526	①炭酸カルシウム型(一般地下型)
(12) 白川	3142	⑤中間型(河川型)・温泉水型より
(13) 横川	3142	①炭酸カルシウム型(一般地下型)
(14) 長井	5544	①炭酸カルシウム型(一般地下型)
(15) 鳴子	3523	④非炭酸ナトリウム型(海水型)
(16) 釜房	2323	⑤中間型(河川型)・温泉水型より
(17) 七ヶ宿	2323	①炭酸カルシウム型(一般地下型)
(18) 覆上川	2233	①炭酸カルシウム型(一般地下型)
(19) 三春	2229	⑤中間型(河川型)・停滞型より
(20) 大川	1111	①炭酸カルシウム型(一般地下型)

4. 貯水池の流入化学成分との比較結果

3章にて分類された統合結果と元素やイオンの比較より、化学物質の流出寄与の影響を検討した。以下の(1), (2)にイオン組成、濃度と元素濃度からもとめた元素の負荷量との関係を示す。

(1) イオン組成濃度との比較検討

各貯水池上流域の流入口よりサンプリングされた試料のイオン組成、濃度の結果を図10のトリリニアダイアグラムに示す。トリリニアダイアグラムによりイオン組成と濃度を便宜的に①炭酸カルシウム型(一般地下型)、②炭酸ナトリウム型(停滞型)、③非炭酸カルシウム型(温泉水型)、④非炭酸ナトリウム型(海水型)、⑤中間型(河川型)に分類することができる。表3が比較検討結果である。鳴子ダム貯水池(④非炭酸ナトリウム型(海水型))のような例外も存在するが、東北地方の貯

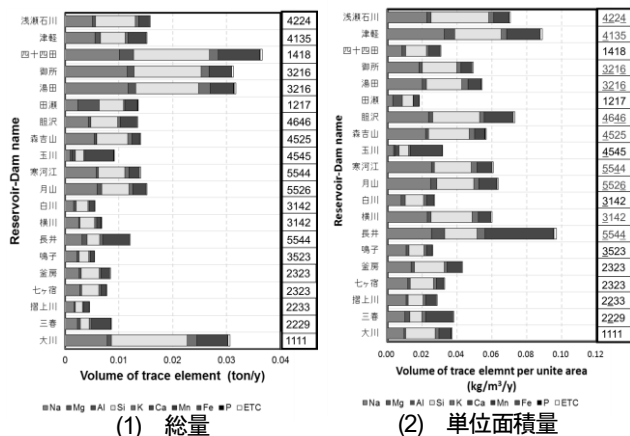


図 11 元素負荷量と地域特徴の関係図

水池は基本的に炭酸カルシウム型 (一般地下水型) と中間型 (河川型) の 2 グループに分けられる。ただし、明瞭な上流域の地域特徴と関係性は不規則である。この結果は、ある程度の時系列変化も含むイオン化した状態と上流の地域特徴をダイレクトに結びつけるには不足する部分があることを示唆しており、この関連性をより明確にするためには流域内の水の運動過程の特徴を反映する必要があるものと推測される。

(1) 元素負荷量との比較検討

各貯水池上流域の流入口よりサンプリングされた試料の元素負荷量と地域特徴の結果を図 11 の (1), (2) に示す。(1) の総量に関しては、地形条件の流域面積が大きく影響することが求められた。流域面積が大きくなれば物質による負荷総量も大きくなることは自明であり、むしろ総量のみ傾向を把握するためには更に空間スケールのことなる流域のサンプルを増やさなければならない。(2) の単位面積当たりの負荷総量に関しては、相応のパターンが示されている。気候に関しては Group3~5 の積雪の多い流域、土地被覆に関しては Group1 (ブナクラス域の自然植生、および代償植生による落葉広葉樹林帯の占拠割合の流域)、Group2 (落葉広葉樹を優先するもののヤブツバキクラス代償植生による常緑葉林も混在する流域)、Group5 (ブナクラス域の自然植生、および代償植生による落葉広葉樹林帯の占拠割合の多い高山・亜高山帯も含む流域)、Group6 (高山・亜高山帯樹林と植林地、耕作地の占拠割合の大きな流域) の高山・亜高山帯樹林や落葉広葉樹を含む流域、地形に関しては大きな流域面積 (約 500km² 以上) を呈する緩やかな河床勾配 (約 0.03 以下) の流域、地質に関しては Group5 (泥岩、安山岩の占拠割合の大きな流域)、Group6 (泥、砂や火山灰等の未固結層と凝灰岩、凝灰角礫岩の占拠割合の大きな流域) に示される細粒である泥分を含む流域が負荷量が大きくなる傾向を示した。落葉広葉樹の被覆、泥による細粒分分布、もしくは地形的に緩いキーワードより、細粒分が緩慢に移動しやすい流域は負荷量が大きくなるプロセスが想定

される。

5. まとめと考察

単位面積当たり元素による化学的負荷量の大きな流域の共通の地域特徴が明らかにされた。落葉広葉樹の被覆、泥による細粒分分布、もしくは地形的に緩いキーワードの流域が単位面積当たりの負荷量増大傾向にあることが求められ、細粒分が緩慢に移動しやすい流域は負荷量が大きくなるプロセスも想定される。この場合、河床、溪岸にどの程度、細粒の土砂堆積物が堆積しているのかが負荷量の増大に左右していることも考えられる。そのため、緻密に河道のデータを緻密に調べることが必要である。

謝辞：本研究の一部は、文部科学省気候変動適応技術社会実装プログラム(SI-CAT)、東北地域づくり協会研究助成によって実施された。ここに謝意を示す次第である。

参考文献

- 1) 梅田信, 桑原亮: 将来の環境変化が国内のダム湖水質に与える影響の予測, 土木学会論文集 G (環境), Vol.71, pp. I_127-I_134, 2015.
- 2) 新垣和, 鈴木健, 川越清樹: 気候に応じた外部負荷流入特性と貯水池の富栄養化指標・濁度の関係についての検討, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.73, pp.I_751-I_756, 2017.
- 3) 天野弘基, 中川啓, 河村明: 多変量解析による地下水水質の分類特性—島原市における事例—, 土木学会論文集 G (環境), Vol.72, pp.I_127-I_135, 2016.
- 4) 中條壮大, 森信人, 安田誠宏, 間瀬肇: クラスタ分析を用いた時系列相関型の全球確率台風モデル, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, pp.I_1226-I_1230, 2012.