

# 降雨，森林帯を含めた気候区分と 貯水池の富栄養化の関係の検討

新垣 和<sup>1</sup>・鈴木 健<sup>2</sup>・川越 清樹<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>福島大学大学院環境システム理工学研究科（〒960-1296福島県福島市金谷川1）

<sup>2</sup>福島大学共生システム理工学類環境システムマネジメント専攻（〒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、貯水池水源に対する気候システムの温暖化の影響予測、および気候変動の情報の可視化を踏まえ、本研究では、降雨、森林帯を含めた気候区分と貯水池の富栄養化の関係の検討を行った。今後、気候モデルによる貯水池の影響予測することと並行して、一般にも情報を可視化しやすくするための基礎データベースの構築を試みている。なお、一般にも情報を可視化しやすくするために気候区分の情報を利用した。結果として、現在気候において気候条件にかかわらず農用地を多く含む貯水池で富栄養化する確率が高いこと、亜寒帯の落葉広葉樹の多い夏季降雨型の気候帯、温帯の落葉広葉樹の多い夏季降雨型の気候帯、温帯の常緑広葉樹・針葉樹の多い夏季降雨型の気候帯で富栄養化する湖沼が多いことが明らかにされた。いずれも夏季降雨型(6月から8月)に該当し、気温上昇気であるほかに植生の活性している時期の長雨による影響が間接的に富栄養化へ関係している可能性が示唆された。

**Key Words :** Global warming, regional climate type, land cover, chlorophyll a

## 1. はじめに

我が国の主要の水源となる貯水池において持続的に水資源を運用、確保するため、気候システムの温暖化の影響を見積もること、影響を踏まえた水管理を計画していくことが必要とされる。こうした背景を踏まえて気候変動に対する貯水池の水質の影響予測が積極的になされており、閉鎖水域に生じ、気候変動に伴う水量の不安定化や、水温上昇により更に問題が拡大化しうる富栄養化に着目した研究が多く進められている。例えば崔らは浦山ダム貯水池<sup>1)</sup>、EugenioらはPareja Limno-reservoir<sup>2)</sup>の個別対象に気候モデルのアウトプットデータを入力して水質変化を見積もった研究を進めた。また、梅田らは気候変動に対する日本列島全域の貯水池の富栄養化を総合的に評価するモデルを開発し、気候モデルのアウトプットデータを基に近未来、将来の水質変化を見積もっている<sup>3)</sup>。個別対象の貯水池に対する影響評価については、持続的な水資源の運用、確保の計画を具体的に議論できる一方で、評価に利用された気候モデル自体が巨視的な気象事象を捉えていることに細心の注意を払わないといけない。細かな空間スケールに着目した場合、直接的な気候変動以外に生ずる局地の極端な気象事象も生じる例もあるため、

気象変化による影響に大きな差異を生じさせる可能性をもつ。また、この差異をうまく説明することが困難になる危険性をもつ。これに対して広域の貯水池の富栄養化の影響評価は、複数の貯水池間の相互関係を検証できるためトレンドとしての意義を強めたものである。そのため、巨視的、局所的な気象現象をうまく分離して可視化できる可能性を持つ評価方法といえる。また、影響評価より求められた結果は、水資源管理計画上で気候変動の包括的な対策や施策を立案する上で有用な成果になる。

これら貯水池の気候変動による将来影響を見積もる上で利用されるデータが気候モデルのアウトプットデータだが、いずれもアウトプットより導かれた値を評価モデルに直接入力し、結果を得ている。この定量的な値の利用は、影響の程度も数値化されるため対策の立案に汎用しやすい側面をもっている。その一方で、気候変動の状態変化が可視化しにくい問題も有している。例えば対象地域の数℃の気温上昇や降雨の変化の意味することも付加した情報を表示すれば、専門だけではなく一般にも理解できる可視化された情報になりうる。既に気候変動は、専門だけでなく一般社会でも関心度の高い問題である。また、緩和策は一般社会の協力が進めなければならない対策である。そのため、一般社会に説明しやすい透明な

情報を整備していくことにも努めなければならない。

ここで示した貯水池水源に対する気候システムの温暖化の影響予測、および気候変動の情報の可視化を踏まえ、本研究では、降雨、森林帯を含めた気候区分と貯水池の富栄養化の関係の検討を行った。今後、気候モデルによる貯水池の影響予測することと並行して、一般にも情報を可視化しやすくするための基礎データベースの構築を試みている。なお、一般にも情報を可視化しやすくするために気候区分の情報を利用している。

## 2. 研究対象領域、および研究方法とデータセット

研究の対象領域は、日本列島に分布する国土交通省、水資源機構の管理する貯水池(計114ヶ所)であり、現在までの水質と気象データ(データセット：水文水質データベース ダム諸量データベース 観測期間：平成5～26年 観測頻度：1回/月 <http://mudam.nilim.go.jp/home>)から気候帯に応じた富栄養化評価項目(クロロフィルa, 全リンTP, 全窒素TN)のデータを取得した。

気候帯については、水文水質データベースの他にメッシュ気候値2010(データセット：国土数値情報データダウンロード データ監修：気象庁 <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>)を基に区分した。気候について一般的に汎用されているものがkeppenによる気候区分であり、現在も気候変動予測においてPeel<sup>4)</sup>やRübel<sup>5)</sup>がkeppenの気候区分に基づいた気候帯遷移を評価している。しかし、日本を対象にした場合、図1に示すとおり巨視的な区分となり、地域の特徴を取得しにくい。そのため、keppenのベースとなる植生、気温を細分化することに加えて、降雨の変化も考慮することで気候区分を進めた。なお、植生の情報に関しては、植生3次メッシュデータ(データセット：環境省自然環境局生物多様性センター 第5回基礎調査 植生3次メッシュデータ [http://www.biodic.go.jp/dload/mesh\\_vg.html](http://www.biodic.go.jp/dload/mesh_vg.html))を利用した。

本研究では、日本列島を細分化した気候区分に分類し、気候帯毎に含まれる貯水池のクロロフィルa, 全リンTP, 全窒素TNを整理し、現在気候における気候に応じた特徴を求めている。

## 3. 気候区分の方法と評価

日本列島を細分化した気候区分に分類するため、keppenの気候区分のベースとなる植生、気温を細分化することに加えて、降雨の変化も考慮することで気候区分を進めた。気候区分で着目した項目を以下にまとめる(参考として表1に概要表を示す。)

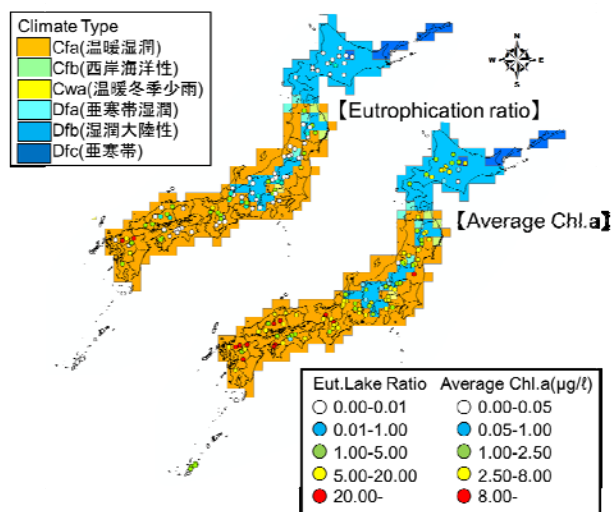


図1 日本列島における keppen の気候区分

表1 降雨、植生を含めた気候区分基準

| Vegetation type<br>(4case)                                     | Warm Index<br>group (3case) | Seasonal precipitation<br>type (2case) | Rain type<br>(4case) |
|----------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------|----------------------|
| A. 高山・亜高山帯<br>Alpine-subalpine                                 | Cool-temperate              | Warm season<br>(Apr-Nov)               | Spring<br>(Mar-May)  |
| B. 落葉広葉樹<br>Broad-leaved<br>deciduous forest                   |                             |                                        | Summer<br>(Jun-Aug)  |
| C. 常緑広葉樹・針葉樹<br>Evergreen broad-leaved,<br>Needle leaf         | Temperate                   | Cold season<br>(Dec-Mar)               | Autumn<br>(Sep-Nov)  |
| D. 人為改変領域・裸地<br>Planning(paddy and<br>crop field), bare ground | Tropical                    |                                        | Winter<br>(Dec-Feb)  |

※ Climate Class: 96class(4×3×2×4)→68class

- ① 植生タイプ
- ② 温量指数に基づいた気候区分
- ③ 降水の気候タイプ
- ④ 最大月降雨量の発生する季節タイプ

これら①～④についての詳細を3.1から3.4に説明する。また、①～④を統合した評価結果を3.5で説明する。

### 3.1 植生タイプ

植生タイプは高山・亜高山帯(樹種)、落葉広葉樹林帯、常緑広葉樹・針葉樹林帯、人為改変領域(農用地)・裸地の4つのケースに分類した(市街化領域は除く)。この4つのケースは植生3次メッシュデータに基づくが、樹種に関して、寒帯・高山帯植生、亜寒帯・亜高山帯自然植生、亜寒帯・亜高山帯代償植生の樹種を高山・亜高山帯(樹種)、ブナクラス域自然植生、ブナクラス域代償植生を落葉広葉樹、ヤブツバキクラス域自然植生、ヤブツバキクラス域代償植生を常緑広葉樹・針葉樹と分類している。植生3次メッシュであるため空間解像度1km×1kmの情報と

して整備される。図2は本研究で分類された植生被覆平面図である。中国地方、および近畿地方の日本海沿岸部に落葉広葉樹が分布するが、概ね関東地方、東海地方、近畿地方を境界として以南は常緑広葉樹・針葉樹林帯、以北は落葉広葉樹林帯となる。所々に高山・亜高山帯、人為改変領域(農用地)・裸地が含まれる。

### 3.2 温量指数に基づいた気候区分

温量指数は、植生の変化と気温との相関関係を表すための指標であり<sup>9)</sup>、1月から12月までの平均気温  $t$  から5°Cを引いた値を積算することで求めることができる。

$$WI = \sum_{i=1}^{12} (t_i - 5) \quad \text{但し, } t_i > 5 \text{ 以上}$$

なお、5°Cは経験的に定めた植物の正常な生活活動の閾値として設定したものである。この温量指数には概ねの気候帯の基準も設定されており、日本列島周辺の気候帯に着目すると温量指数が15~45の場合に寒帯、45~180の場合に温暖帯、180~240の場合に亜熱帯としている。この基準を基に3ケースの気候区分を行った。図3は温量指数による気候区分図である。日本列島南東の島嶼は亜熱帯、日本列島の北部および山岳地は寒帯に属し、概ねは温帯であることが示されている。

### 3.3 降水の気候タイプ

降水は、降雨、降雪の形態に大別される。降水形態の違いは、土砂の動態を把握する上で雨食進行の差異を生じさせる。そのため、多降水の時期を分類しておくことが必要である。本研究の最終的な結果は、貯水池の富栄養化の評価だが、富栄養化には栄養塩の負荷が大きく作用する。よって、貯水池上流部の土砂生産と深い関連を持つため、多降水の形態を把握することが望ましい。なお、日本列島において多降水の形態に関しては、冬季の西高東低の気圧配置よりシベリア、中国大陸から乾燥かつ寒冷な気団の流れ込みやすい地域では多降雪、台風や梅雨前線の影響を受けやすい地域では多降雨になりやすい傾向が明瞭であり、暖候期(4月~11月)、寒候期(12月、1月~3月)の季節的特徴を捉えることで便宜的に多降雪、多降雨を分類することができる。以上より、暖候期、寒候期の平均月降水量を比較して、降雨、降雪に基づいた降水形態タイプの2ケースの分類を試みた。暖候期は降雨影響の大きな地域、寒候期は降雪影響の大きな地域と解釈できる。図4は降水の気候タイプ区分図である。日

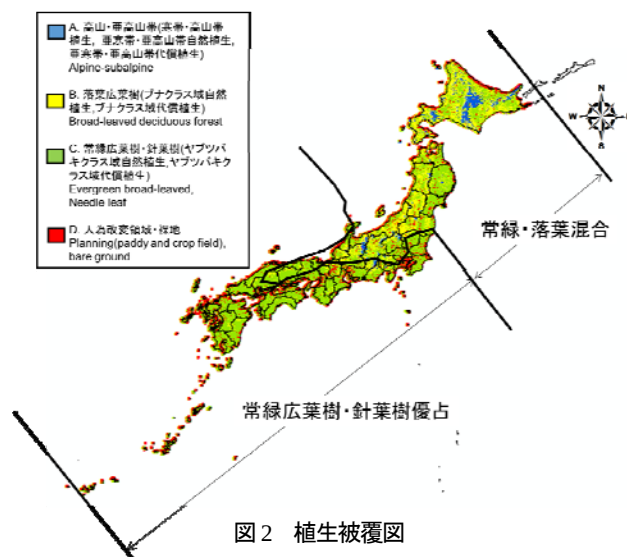


図2 植生被覆図

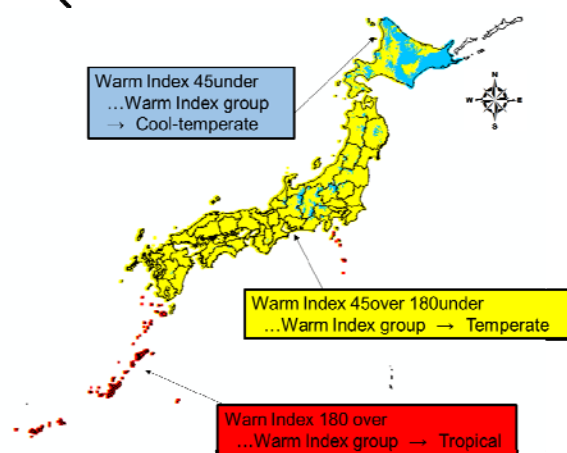


図3 温量区分による気候区分図

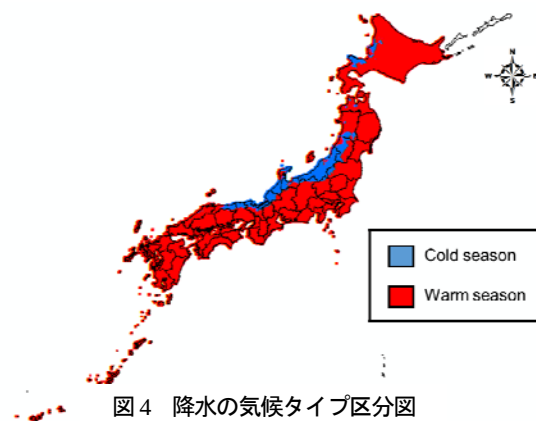


図4 降水の気候タイプ区分図

本列島日本海側沿岸部は寒候期の降水タイプ、それ以外の列島の概ねは暖候期の降水タイプに属した。列島の山岳地域も多積雪地域になることが一般的であり、寒候期の降水タイプに分類されることが推測されたが、標高依存に応じて多降雨になる影響<sup>9)</sup>等に示唆される降雨特性からデータの比較では暖候期の降水タイプになることが明らかにされた。

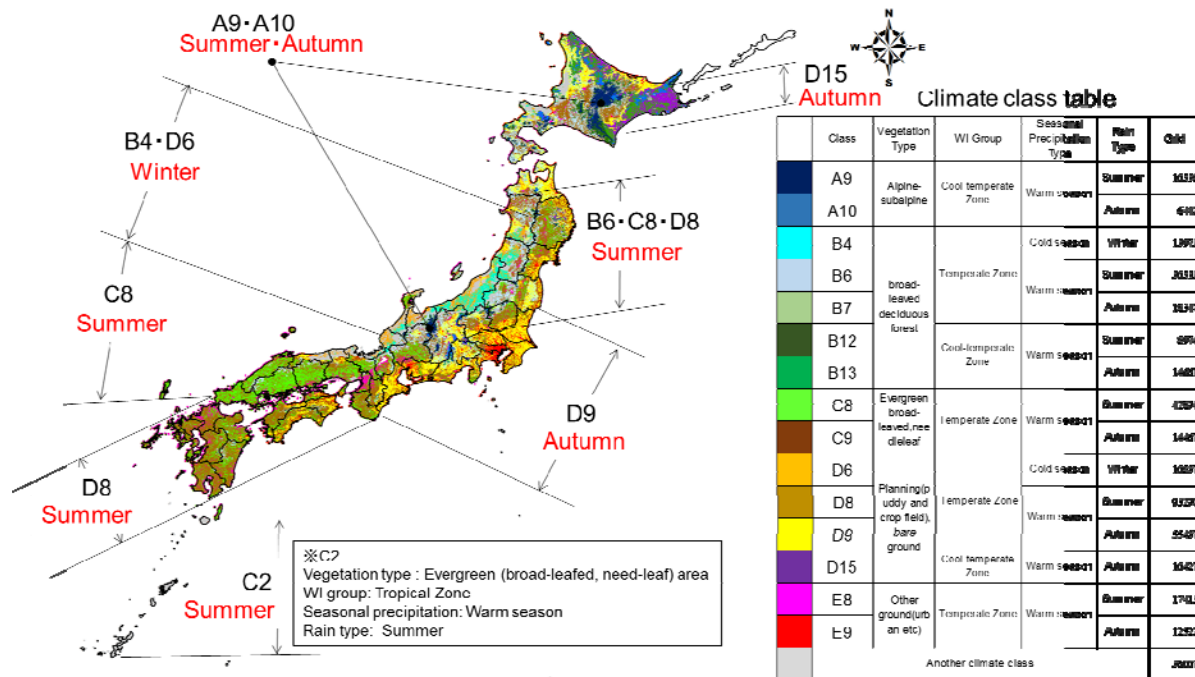


図5 降水の気候タイプ区分図

### 3.4 最大月降雨量の発生する季節タイプ

降雨、降雪の多降水形態が土砂動態に大きく作用することを前節に説明したが、雨食の活発になる時期的な要素にも注目しなければならない。時期的な要素を精査することで、植生活性度の差異により遮断効果や浸食緩和等の影響が土砂生産に作用するためである。そのため、降雨のみに着目し、春型(3月～5月)、夏型(6月～8月：梅雨前線の影響)、秋型(9月～11月：台風の影響)、冬型(12月、1月～2月)の4ケースで日本の多降雨発生季節を分類した(なお、冬型に関しては降雪の影響を除くため月平均気温2℃以上を降雨の閾値として設定して、2℃未満のものは考慮しない)。

### 3.5 気候区分の総括

本章の3.1から3.4に示された植生、温量指数、降水、最大降雨量に着目した区分の基準を当てはめると、96の気候帯に分類できる。ただし、実際には日本列島で該当しないものも存在するため、結果として68の気候帯が確認された。区分された気候帯と分布情報を図5に示す。地域によりおおそ大局的に分類できる気候帯が示されており、北海道は比較的に多くの気候帯が分類されている。また、東北地方太平洋側は植生タイプにバラツキが多いものの夏型多雨の認められやすいエリアが分布する。東北地方日本海側から北陸地方は落葉広葉樹林帯のエリアが多く、冬型多雨の認められやすい分布を示している。

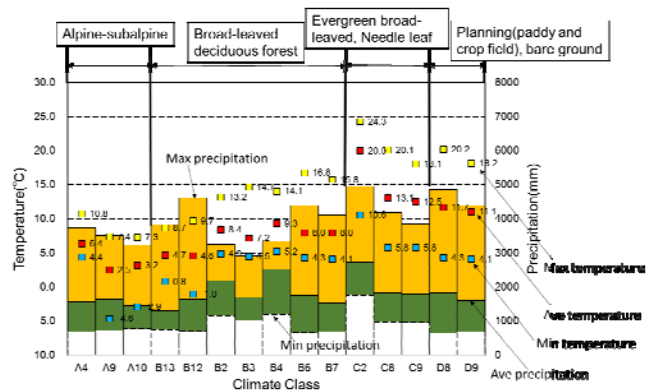


図6 主要な気候帯と降水量・気温の関係図

当該地域に関連して、閾値を2℃として設定し降雪の影響を除去した試みを行っているものの、冬型の降雨が現れている。冬季のすべて降水が降雨現象としているかは不確実であり、この地点の気候区分については更に検討が必要になる可能性を含んでいる。関東地方から東海地方は農用地で秋型の降雨が認められる地域となる。中国地方は常緑落葉樹・針葉樹林帯が多く分布し夏型の降雨が多く占拠する。沖縄等の島嶼は中国地方と似通った状態であるが、温量指数の分類が亜熱帯に属する。その他の近畿地方、四国地方、九州地方は広く農用地と夏型の降雨が多く占拠する。なお、主要な6気候帯の気温、降水量の傾向を図6に示す。気温と植生の関係は特に大きく関連付けられることが見てれる反面、降雨に着目したことで各々の気候帯の特徴が示されている。



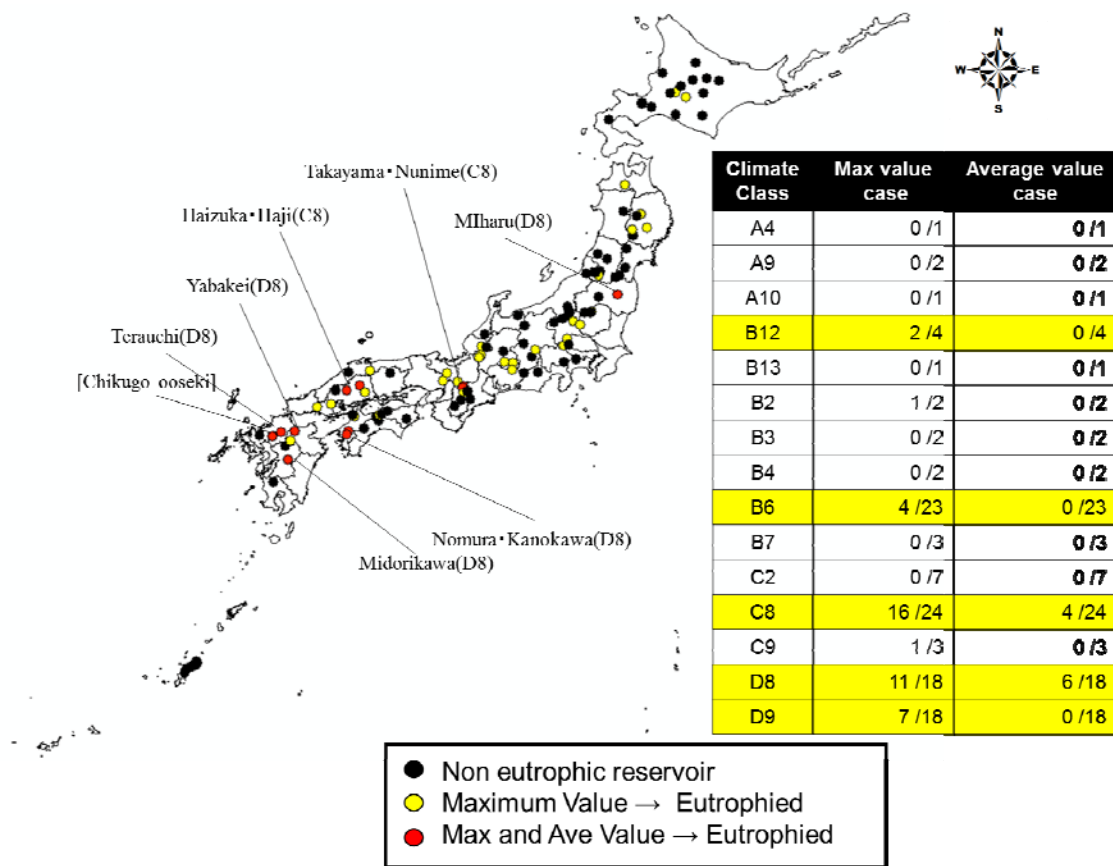


図 10 気候区分と富栄養化の関係マップ

#### 4. 貯水池と気候区分の関係

日本列島を細分化した気候区分に分類した結果に対して、気候帯に含まれる貯水池をまとめたものが図7である。なお、貯水池の気候区分は、貯水池上流域に含まれる解像度1km×1kmの気候帯の最も占拠率の大きな面積を代表させている。図7に示されるとおりダムの多く分布する気候帯は、落葉効用樹林帯、常緑落葉樹・針葉樹林帯の夏型の降雨量、農用地の夏型、および秋型の降雨量のエリアである。この落葉効用樹林帯の夏型の降雨量のエリアには東北地方の貯水池、常緑落葉樹・針葉樹林帯の夏型の降雨量のエリアには中国地方の貯水池の割合が多く、おおよそ北東日本列島側と南西日本列島側に大別できる。また、農用地の夏型、および秋型の降雨量のエリアでは、日本列島の貯水池が満遍なく分布するものの、やや南西日本列島側の貯水池を多く含んでいる。

なお、貯水池の富栄養化を対象とするため、実際に流入する水量との関係も把握に努めなければならない。そこで各気候帯の貯水池群の流域単位流入量を気候帯ごとに求めた。その結果を図8に示す。概ね貯水池の多く分布するエリアは、流入量の多いことが示されている。そのため貯水池の規模にもよるが、貯水池回転率は高まる

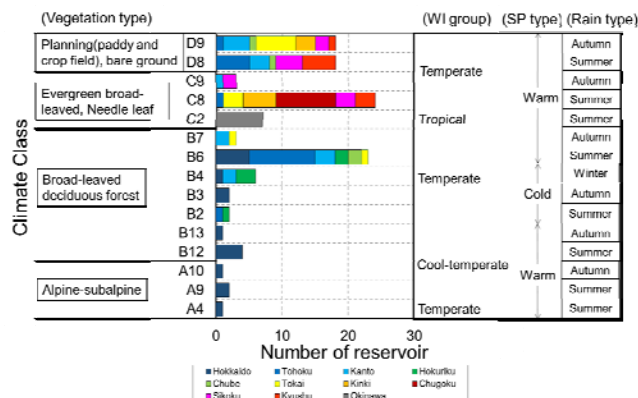


図 7 気候区分と富栄養化の関係マップ

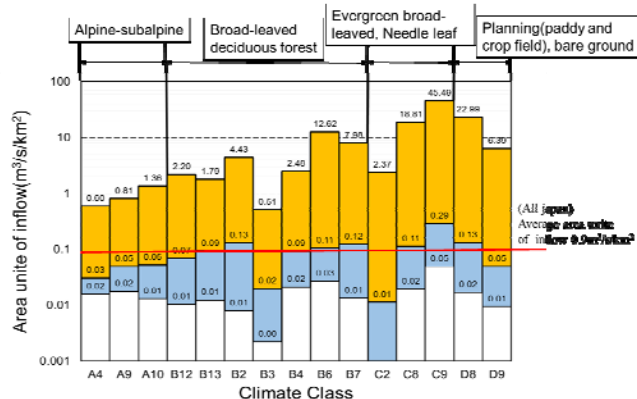


図 8 気候区分と貯水池流入量の関係

領域にダム施工されていることが明らかにされている。これらのデータも用いて貯水池回転率と富栄養化の指標になるクロロフィルa濃度との関係を図9に示した(貯水池の最大値, 平均値で検討, 図は平均値のみ)。図9より, 落葉効用樹林帯, 常緑落葉樹・針葉樹林帯の夏型の降雨量, 農用地の夏型のエリアに含まれる貯水池回転率の低い貯水池でOECD(Organization for Economic Cooperation and Development:経済協力開発機構)の富栄養化基準に達する結果が得られた。この結果をマップ情報として示した結果が図10である。おおよそ南西日本にクロロフィルa濃度の最大値, 平均値が富栄養化に達する貯水池が偏って認められることが示されている。また, 東北地方では唯一, 三春ダムの貯水池が南西日本にクロロフィルa濃度の最大値, 平均値が富栄養化に達していることが明らかにされた。なお, 三春ダムに関しては貯水池上流の農用地面積が広い特徴が示されていることが確認されている。

## 5. まとめ

本研究では, 貯水池水源に対する気候システムの温暖化の影響予測, および気候変動の情報の可視化を踏まえ, 本研究では, 降雨, 森林帯を含めた気候区分と貯水池の富栄養化の関係の検討を行った。今後, 気候モデルによる貯水池の影響予測することと並行して, 一般にも情報を可視化しやすくするための基礎データベースの構築を試みている。なお, 一般にも情報を可視化しやすくするために気候区分の情報を利用した。

結果として, 現在気候において気候条件にかかわらず農用地を多く含む貯水池で富栄養化する確率が高いこと, 亜寒帯の落葉広葉樹の多い夏季降雨型の気候帯, 温帯の落葉広葉樹の多い夏季降雨型の気候帯, 温帯の常緑広葉樹・針葉樹の多い夏季降雨型の気候帯で富栄養化する湖沼が多いことが明らかにされた。農用地を多く含む貯水池で富栄養化する確率が高いことに関しては, 肥料としての栄養分の影響や, 植生の被覆が比較的乏しいことから下流側に栄養分が流出することが安易に推測できる。しかしながら, 富栄養化しやすい貯水池として, いずれも夏季降雨型(6月から8月)に該当していることが明らかにされている。この考察としては, 気温上昇気であるほかに植生の活性している時期の長雨による影響が間接的に富栄養化へ関係している可能性も示唆される。また, 夏型降雨であるにもかかわらず, 気温の高い沖縄などの島嶼では富栄養化の影響が少ない結果がデータより得られている。この結果に関しては, そもそも富栄養化しやすいことが明らかであるため, 事前の対策が講じられている可能性も示唆される。そのため, 富栄養化対策状況

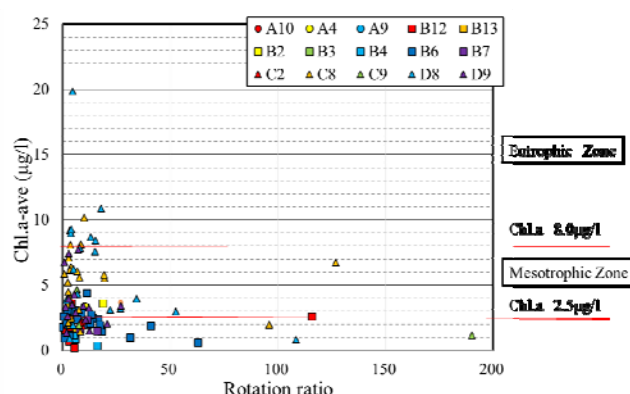


図9 貯水池回転率とクロロフィルa濃度との関係

もしくは富栄養化の対策の講じられていない貯水池のデータも収集しながら最終的な結論を求めていくことが必要といえる。

**謝辞:** 本研究の一部は, 河川環境財団研究助成と文部科学省気候変動適応技術社会実装プログラム(SI-CAT)によって実施された。ここに謝意を示す。

## 参考文献

- 1) 崔貞圭・矢島啓・谷口健司・馬籠 純: 浦山ダムにおける気候変動に伴う長期間の将来水質予測, 土木学会論文集B1(水工学), Vol. 70, I\_1633 ~ I\_1638, 2014.
- 2) Eugenio Molina-Navarro, Dennis Trolle, Silvia Martínez-Pérez, Antonio Sastre-Merlin, Erik Jeppesen: Hydrological and water quality impact assessment of a Mediterranean limno-reservoir under climate change and land use management scenarios, Journal of Hydrology, Vol.509, pp.354-366, 2014.
- 3) 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, I\_127 ~ I\_134, 2015.
- 4) Peel, M. C. and Finlayson, B. L. and McMahon, T. A.: Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, Hydrol. Earth Syst. Sci, Vol.11, pp.1633-1644, 2007.
- 5) Rubel, F., and M. Kottek: Observed and projected climate shifts 1901-2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification, Meteorologische Zeitschrift, Vol. 19, pp.135-141, 2010.
- 6) 吉良龍夫: 温量指数による垂直的な気候帯のわかちかたについて, 寒地農学, Vol.2, pp.143-173, 1948.
- 7) 例えば鈴木善晴・中北英一・池淵周一: 標高依存直線に基づいた降雨分布の地形依存特性の解明, 土木学会水工学論文集, Vol.45, 301-306, pp.2001.