

気象変動の河川水質に及ぼす影響に関する統計的研究

尾崎則篤¹・小野美由紀²・福島武彦³・原沢英夫⁴

¹正会員 工博 広島大学工学部助手 第四類(建設系) (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

²大分県庁

³正会員 工博 広島大学工学部教授 第四類(建設系)

⁴正会員 工博 国立環境研究所

1987年1月～1995年12月の9年間の全国の気象データ及び河川水質データを用いて、気温及び降水量の変動が水温、BOD、DO、pH、SSといった河川水質に及ぼす影響を単回帰及び重回帰分析を用いて調べた。特に年平均気温の上昇に伴う、水温、BOD、SSの増加量、DOの減少量を定量的に予測した。また、季節及び気候区毎に異なる相関性を持つ項目があることを示した。これらの結果に基づき、地球温暖化により河川の汚濁が進行することが予測された。

Key Words : river water quality, air temperature, precipitation, global warming, statistical analysis

1. はじめに

近年人間活動が活発化し、二酸化炭素などの排出量が急激に増加しているため、地球の温室効果が強まってきており、将来的には地球環境に大きな影響を及ぼすことが懸念されている。現在その影響に関する研究が各方面で活発に進んでおり、自然、社会環境に対して及ぼす様々な影響が明らかにされつつある。水環境に関しても、河川水量の不安定化、河川水質の悪化、湖沼・沿岸海域の富栄養化、水生生態系の破壊などが生じることが心配されている¹⁾。

河川水質に関しても、気象変動から受ける影響は大きく、またその影響が河川生態系、人間活動に与える影響も大きいものと考えられ、その検討は重要なものになってくる。

これまでに、それぞれの特定の流域に関しては、気候変化が河川流量に与える影響について主にモデルに基づく数値シミュレーションによる検討がなされている²⁾³⁾。そしてこれらから得られた結果を横断的に見ることで、ある程度共通の傾向を見て取ることも出来る。それらから、例えば、3度の気温上昇の直接的影響よりも、10%程度の降水量の変動の方が流況に与える影響が大きい、等の一般的な知見も得られている⁴⁾。気温の変動は降水量の変動を伴って生じると考えられ⁵⁾、気温、降水量、両者の影響を等しく見ていくことが重要であると考えられる。

しかしこれらの結果は主に一つの河川、流域を対

象に詳細に調べられたものであり、全国レベルで長期間の実測データを元に河川水質の変動特性を調べている研究は少ない⁶⁾⁷⁾。気候変動という規模の大きな現象に対して、河川が一般的にどのような応答性を持っているのか、また、個々の河川に関する結果がどの程度一般性を持つものか、逆に個性を持つものかを知るには、もう一方で全国規模の解析が必要となってくる。また、モデルを用いた解析は、モデルがどの程度適切に実際の機構を反映しているかの検証が困難であり、結果の適切性の検討のためにも実測データに基づいた統計的解析が重要になってくる。

そこで本研究では、気候変動が河川水質に与える影響を全国レベルで定量的に解明することを目的とし、気象に関してはAMeDASデータ、河川水質に関しては公共用水域測定結果という2つの実測データを用いた解析を行った。

まず選択された各河川の水質について、気温、降水量各々がどの程度影響を与えているのかを総括的に把握することを目的として、各年の気温、降水量代表値と水質の代表値の変動の相関を取り、気温、降水量が各水質に対してどの程度影響を与えているのかを調べた。次に、気温および降水量の影響を独立に見ることを目的とし、気温、降水量各々を独立変数とした重回帰分析を、気候区毎に行い、気温のみが変化した場合、また降水量のみが変化した場合の河川水質に及ぼす影響を調べた。そして、これらの結果に基づき将来における気候変動が河川水質に

表-1 選択した河川

石狩川, 天塩川, 十勝川, 北上川, 最上川, 阿武隈川, 利根川, 荒川, 那珂川, 木曾川, 天竜川, 富士川, 信濃川, 阿賀野川, 九頭竜川, 淀川, 由良川, 新宮川, 江の川, 斐伊川, 高梁川, 吉野川, 四万十川, 新淀川, 筑後川, 大淀川, 球磨川

及ぼす影響について、どの様に予測されるか、また、その予測の方法論について考察を行った。

2. 解析方法

使用したデータは、1987年1月～1995年12月の9年間の気象データ(AMeDAS)と同期間の河川水質データ(公共用水域測定結果)である。

河川の選択に際しては流域面積や地域ごとの均一性を考慮し、以下のように行った。まず全国を北海道、東北、関東、東海、北陸、近畿、中国、四国、九州の9つの地域にわけ、各地域の一級河川から流域面積の最も大きな河川を3つずつ、計27の河川を選択した。選択した河川を表-1に示す。

各河川は原則的に上流、中流、下流に3分割し(利根川のみ4分割)各々の流域を定め、流域内最下端の測定点をその流域の河川水質の代表点とした。気象データとしては、流域内の全気象観測ポイントのデータを選んだ。各河川水質測定点における河川水質はそれより上流の流域の気象の影響を受けるとし、各河川水質測定点に対して測定点上流の流域界の全気象データを対応させた。選択されたその河川水質測定点は総計82箇所、気象観測ポイントは501地点である。

気象観測測定ポイントと水質測定点との地理的な関連性を概説すると以下のようなものである。気象観測ポイントは全国に1300地点あまり存在し、地理的に概ね均一に配されている。平均的には日本全国に約700km²に一つ存在することになる。一つの測定点によって代表されるエリアを円形であると仮定すると近接する2測定地点間の距離は30km程度、すなわち水質測定点から最近傍の気象観測測定ポイントまでの距離は概ね15km以内と見込まれる。また上流の流域内には平均で5点、下流では平均で15点の気象観測測定ポイントが含まれていた。

解析対象とした気象項目は気温と降水量である。水質項目は水温、pH、DO、DO飽和度、BOD、SSである。なお、TN、TP、水量に関しても検討を試みたが、欠測が多いため今回の解析対象からは外した。

気象データは全地点毎日データである。一方、河川水質データに関してはデータ採取の頻度が地点に

よって異なる。データの質を揃えることを目的として、データは月1回、年12回のデータを基本的な解析対象とした。月1回以上の頻度でデータを採取している地点に関してはその月の一番初めのデータをその月の値とした。また、月1回よりも少ない頻度で採取している地点に関しては、その近傍の地点であり、月1回以上の頻度でデータを採取している地点を以て代用した。結果として大部分が月1回測定している地点であった。

各気象項目と水質項目との相関の取り方について述べる。まず流域ごとに気象データ及び水質データの年代表値を求めた。気象データに関しては流域内の全データの平均値を年代表値とした。水質データとしては各年の平均値、非超過確率25%・50%・75%値という4種類の年代表値を計算した。値0が汚濁0を意味する指標であるSS、BODについては対数値を用いて計算した。それらに基づき、気象項目の経年変化と水質項目の経年変化との相関をとった。また、特定の季節のみを抽出した場合にその変動特性が異なるかどうかを調べることを目的として、1年を1～3月、4～6月、7～9月、10～12月の4つの時期に分割し、気象データ、水質データ共にその時期の平均値を年代表値として同様に相関をとった。相関は、気温または降水量を独立変数とし各水質項目を従属変数とした場合の単相関、及び気温、降水量両者を独立変数とし各水質項目を従属変数とした場合の重相関の両方について計算した。

相関の強度の評価方法について述べる。通常は得られた相関係数の値を、相関係数0を帰無仮説として検定することによって相関の有無を判断する。本研究では、流域の数だけ相関が存在する。そこで個々について仮説検定を行うことをせず、かわりに、単相関の場合は、全流域に対して得られた相関係数の分布を、相関係数の期待値を0と仮定した場合に得られる相関係数の分布と比較して χ^2 検定を行い、相関の有無を判定した。また重相関の場合は、各独立変数に対する係数の、全流域の集計値に対して、帰無仮説を0とした検定を行い、気温、降水量の各因子に対する相関の有無を判定した。有意と判定されたものについては、そのデータの示す範囲において比較的強い一定の傾向が見出されたことを意味する。また、ふたつの統計値の差の有無の検定も、同様に検定によって行った。有意水準はいずれも10%とした。以上のような、数年間の気象の変動による水質の応答性に基づき気象が水質に及ぼす影響を調べるという方法論は、福島ら⁹⁾が霞ヶ浦を対象として行っており、本研究の方法はその方法を、河川に適用し全国を対象を拡げたものである。

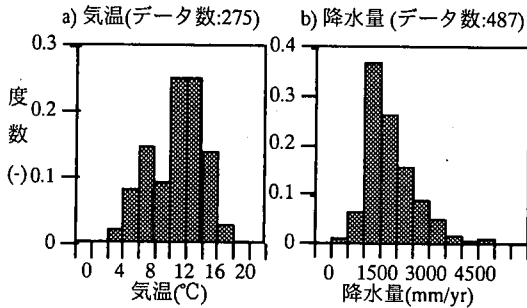


図-1 アメダス各地点における9年平均気温と9年平均降水量のヒストグラム

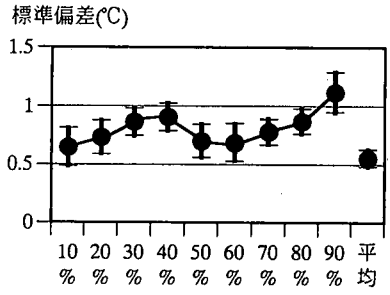


図-3各流域、各年代表値の9年標準偏差の全地点にわたる平均値(棒の長さは全地点の標準偏差)

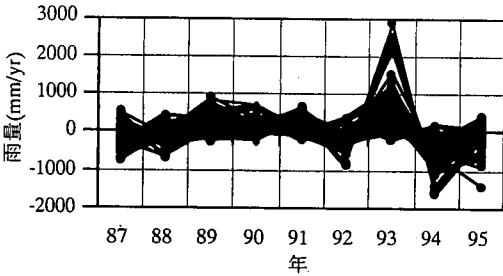
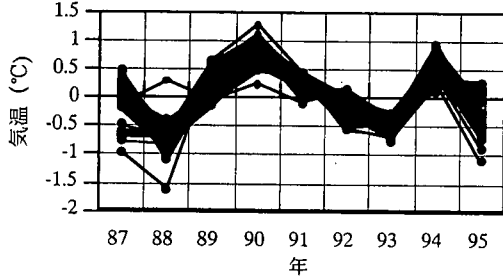


図-2 年平均気温および年平均降水量の経年変化

本研究においては気象が河川水質に及ぼす影響を総合的に検討することを目的とした解析を行っている。すなわち、モデルを用いた解析で取りこぼす可能性のある気象変動→社会的な変動→水質といった影響経路なども評価しうる方法として、本方法を提案している。ところで本方法では流域の状況が気象と関わりなく変化した場合にもその影響が解析に現れる可能性がある。この問題を回避する方法として、隣接年同士の差を変数として比較する隣接年変化法⁹⁾が提案されているが、データの自由度の減少を避けることを優先して本解析では採用していない。実際には流域の状況の変化は、河川によってまちまちであると考えられ、それが本解析のばらつきになることはあっても偏りを与える可能性は少ないと考えられる。

しかしながら本研究の方法は本質的には流域フレームの変化の影響を排除しうる方法とはいえず、本研究の方法を他の、より小さな河川や、より長い年限などに適用する場合などは、方法について再検討する

必要があろう。

なお、本論文において、「9年平均値」とは各年の代表値(平均値、非超過確率値)の9年間の平均値を、「9年標準偏差」とは各年の代表値の9年間の標準偏差を意味する。

3. 結果と考察

(1) 気象及び水質項目の基本的な特性

9年平均気温の全測定地点の平均は10.8°C、9年平均降水量は 1.79×10^3 mm/yrであった。9年平均値がどの程度地点毎に値がばらついているかを見るために全測定地点にわたり標準偏差をとると、気温は3.2°C、降水量は 7.0×10^2 mm/yrであった。気温、降水量の9年平均値の全地点のヒストグラムを図-1に示す。

次に気温及び降水量の時間的な変動特性を見ていく。経年的な変動特性を見るために、(各年平均値-9年平均値)の全地点の経年変化を図-2に示す。特に気温に関しては地点によらない共通の傾向を持っていることが分かる。

一般に気温に関しては、平均気温の変動と極値的な値(暑い季節や寒い季節の値)の変動の幅は必ずしも一致しないと考えられる。そこで各年、各流域の非超過確率値の9年標準偏差を調べた。その結果を図-3に示す。横軸が各非超過確率値、縦軸がその全流域にわたる平均値である(上下幅は標準偏差)。平均値を年代表値とした場合、各非超過確率値よりも値が小さい。これは平均値が統計的に非超過確率値よりもばらつきが小さいためであると考えられる。また10%と90%非超過確率値という極値同士で比較してみると90%非超過確率値の値の方が大きい。これは夏の変動幅が冬よりも大きいことを意味していると考えられる。

降水量の変動特性に関しては、9年平均降水量と年

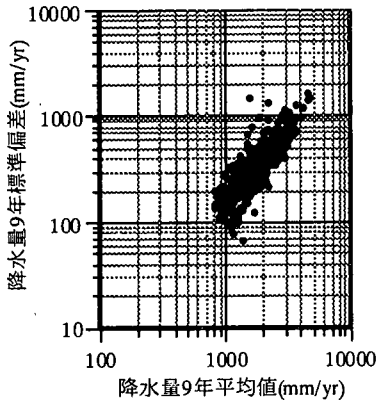


図-4 降水量の変動

表-2 各水質項目の各年代表値の統計量
(9年平均値及び9年標準偏差, またはCV値)

	T(°C)	BOD (mg/l)	DO (mg/l)	SS (mg/l)	pH
平均値	14.3	1.49	9.91	11.6	7.41
90%値	18.0	2.73	11.0	25.5	7.88
50%値	14.7	1.22	10.1	8.72	7.40
10%値	9.37	0.73	8.87	1.65	6.99
標準偏差 (またはCV 値)	0.93	0.18 (CV値)	0.32	0.36 (CV値)	0.12
データ数	82	82	82	82	80

平均降水量の9年標準偏差との関係を調べた。各地点の結果を図-4に示す。降水量の大きい地域ほど変動幅が大きいことを示している。

次に河川水質項目の基本的な特性を見る。

表-2に各水質項目の年平均値, 年中央値, 年90%非超過確率値, 年10%非超過確率値, 及び年平均値の9年標準偏差(または変動係数; CV値)の, 全地点の平均を示す。また, 図-5に各水質項目の9年平均値を全地点で集計したヒストグラムを示す。また水温及びBODを例として水質項目の経年変化を図-6に示す。図-2と比較すると水温は気温と同様な傾向が見取れる。

(2) 各水質項目の, 気温及び降水量に対する依存性
年平均気温と年平均水温との単回帰相関を例に, その計算方法を示す(図-7)。まず, 求める流域において年平均気温及び年平均水温を9年分計算する。そしてその9個のデータセットから気温と水温との相関係数を求めた。全河川流域の, 相関係数のヒストグ

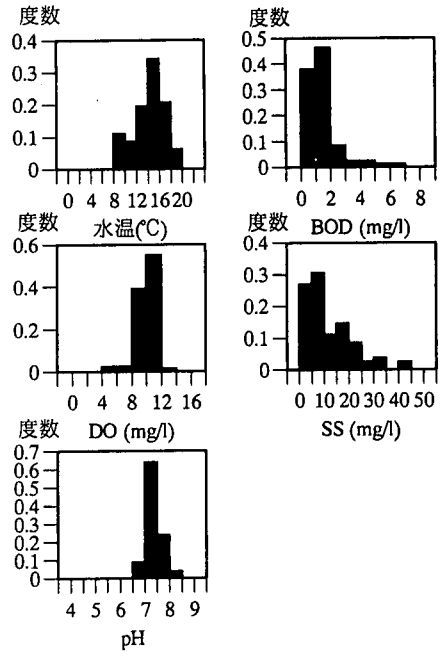


図-5 各水質項目の頻度分布

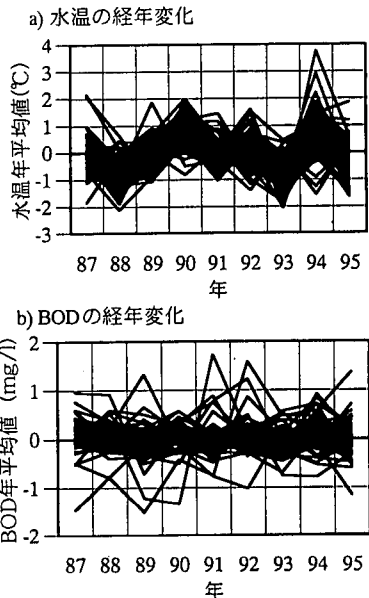


図-6 水温及びBODの経年変化

ラムを図-8に示す。また次にこのヒストグラムに基づき相関の有無を判定する。帰無仮説を相関0とした分布適合度に関する χ^2 検定を行う。その結果, 仮説が棄却され, 相関ありと判定された(危険率10%)。相関の傾きのヒストグラムを図-9に示す。0.4~2.4の間に分布している。全地点の平均値は1.1(°C/°C)であった。

ここで気温と降水量という, 本研究で水質に影響

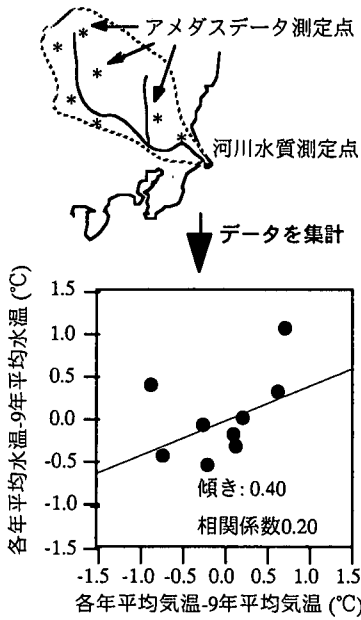


図-7 気象-水質の相関の計算例

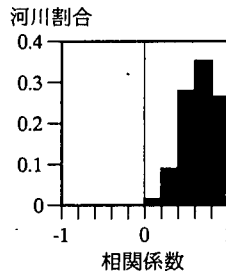


図-8 気温と水温の相関係数のヒストグラム

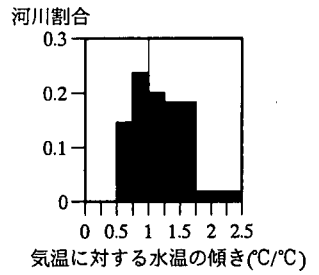


図-9 気温と水温の傾きのヒストグラム

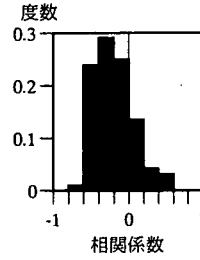


図-10 雨量と水温の相関係数のヒストグラム

を与えると考えている2つの気象に関する変量同士に関して、同様の方法で相関の程度を計算した。相関係数のヒストグラムを図-10に示す。気温と降水量にも χ^2 検定を適用し、負の相関があることが分かった。

同様な方法で重相関及び各非超過確率値を水質代表値とした重相関について計算した。その計算結果を表-3に示す。気温との相関については1°C変化した場合の変化率を、降水量については、降水量が10%変化した場合の変化率を示す。BOD、SSに関しては、得られたlogスケールの値を真数に戻して示す。これにより数値は気温または降水量の変化によって何倍変動するかということを意味することになる。陰で覆った部分は相関が見出されなかった関係である。また非超過確率値の欄において太枠で囲った部分は25%値と75%値とで値に差が見出された関係である。また単相関に関しては各流域で相関の有無を判定し(危険率10%)、正負各々に関して相関ありとされた地点割合を示す。

まず単相関と、平均値に対する重相関の結果とを比較していく。いずれの場合にも相関が見出されたのは12項目中8項目あり、多くの項目で有意な、同符号の傾向が見出されたことが分かる。

単相関と重相関とで相関の有無が異なっている項目について考察する。まず気温-BOD、及び気温-pHについては単相関では相関が見出されたのに重相関では相関が見出されない。これは気温と降水量とに

負の相関があるため、単相関においては、降水量の変動が原因で見かけ上の相関が見出されたものと考えられる。逆に気温-SSの関係をみると単相関では相関が見出されず、重相関で相関が見出されている。重相関の項目をみるとSSは気温に対しても降水量に対しても同符号である正の相関をもっている。気温-SSの単相関においては2つの独立変数、気温及び降水量が負の相関を持っているため、実際には存在する相関が覆い隠されたものと考えられる。

このように、気温と降水量とに相関があるため、単相関と重相関とでは異なる傾向が生じうる。一方将来起こりうる温暖化などの気候変動は、降水量、気温ともに増加するシナリオも考えられ、従来と同様の変動特性を持つとは限らない。このことから考えると将来予測を念頭に置いた場合、気温と降水量との依存性を独立に調べることの出来る重相関を用いるやり方が、より優れていると考えられる。以降では重相関を用いて相関関係を調べることとする。

重相関において相関の見られた各項目に関して、その関係を考察する。水温は気温の上昇に伴ってほぼ等しい1.1°C/°Cの上昇をしている。降水量-水温は負の相関を持っているが、これは冷却効果と考えられる。降水量-BODも負の相関を持っている。これは希釈効果と考えられる。

気温-DOの関係では、DO濃度では負の、飽和度では正の相関を持っている。これは温度上昇による飽

表-3 単相関、重相関及び各非超過確率値における各水質項目の気温及び降水量に対する傾き
(欄内上段の数値は全地点の平均値。下段の括弧内の数値は非超過確率10%値及び90%値。影を付した部分は相関が見出されなかった関係。また太枠で囲った部分は、非超過確率25%値と75%値とで差が見出された関係。※の欄は正及び負の相関が見出された地点割合。上段:正, 下段:負, 単位は%。)

	単相関		重相関			
	平均値	※	平均値	25%値	50%値	75%値
気温-水温 (°C/°C)	1.1 (0.43~1.7)	79 0	1.1 (0.43~1.7)	0.73 (-0.15~1.8)	0.81 (-0.12~2.0)	1.4 (0.22~2.5)
降水量-水温 (°C/(10%))	-0.18 (-0.36~0.031)	0 34	-0.13 (-0.29~0.063)	0.094 (-0.15~0.43)	-0.062 (-0.51~0.27)	-0.28 (-0.75~0.11)
気温-BOD (倍/°C)	1.030 (0.90~1.18)	12 2	1.014 (0.86~1.18)	1.010 (0.85~1.17)	1.0093 (0.85~1.19)	1.015 (0.83~1.22)
降水量-BOD (倍/(10%))	0.97 (0.92~1.017)	0 30	0.97 (0.92~1.026)	0.97 (0.92~1.028)	0.98 (0.92~1.038)	0.97 (0.91~1.030)
気温-DO濃度 (mg/l/°C)	-0.15 (-0.40~0.16)	2 38	-0.15 (-0.41~0.18)	-0.13 (-0.47~0.30)	-0.087 (-0.50~0.29)	-0.21 (-0.61~0.20)
降水量-DO濃度 (mg/l)/(10%)	0.025 (-0.070~0.12)	20 7	0.019 (-0.070~0.12)	0.050 (-0.10~0.21)	0.018 (-0.087~0.14)	-0.24 (-0.16~0.099)
気温-DO飽和度 (%/°C)	0.61 (-1.5~3.6)	10 10	0.66 (-1.5~3.8)	0.20 (-2.2~2.7)	0.29 (-1.6~2.8)	0.66 (-1.9~3.2)
降水量-DO飽和度 (%)/(10%)	-0.00089 (-0.85~0.99)	13 13	0.041 (-0.84~1.0)	0.19 (-0.80~0.97)	0.12 (-0.53~0.84)	-0.27 (-1.3~0.63)
気温-SS (倍/°C)	1.018 (0.78~1.26)	4 2	1.054 (0.83~1.29)	1.13 (0.94~1.38)	1.094 (0.89~1.35)	1.054 (0.84~1.26)
降水量-SS (倍/(10%))	1.035 (0.95~1.16)	24 6	1.035 (0.95~1.15)	1.017 (0.93~1.12)	1.022 (0.93~1.14)	1.042 (0.91~1.20)
気温-pH (l/°C)	0.023 (-0.080~0.13)	12 6	0.014 (-0.079~0.13)	0.012 (-0.13~0.13)	0.0098 (-0.092~0.099)	0.0091 (-0.12~0.14)
降水量-pH (l/(10%))	-0.018 (-0.039~0.0076)	1 29	-0.017 (-0.044~0.011)	-0.0099 (-0.044~0.024)	-0.014 (-0.043~0.013)	-0.024 (-0.065~0.010)

和DO濃度の減少に伴いDO濃度は下降するものの、気温の変化に完全には追従せずそのため飽和度では正の相関が生じている可能性が考えられる。一方降水量との相関に関しては、DO濃度は上昇しているものの飽和度では相関が見出されていない。降水量の増加に伴い、DOは上昇するものの(曝気の効果ではないかと考えられる)、同時に水温が下降し(降水量-水温は負の相関、表-3参照)、その結果として飽和DOも増加する。これらが同時に生じることでDO飽和度は影響が相殺され、降水量による相関が生じなかったと考えられる。

SSに関しては、気温に関しても降水量に関しても正の相関を持っている。降水量による相関は、流量の増加に伴う懸濁物の流入と考えられるが、気温と

の相関については、理由は不明である。

降水量-pHは、負の相関を持っている。これは河川水よりも雨水の方が酸性であるため、降水量の増加に伴って河川水が酸性側によるためと考えられる。

次に各非超過確率値の重相関の関係を調べた。太枠で囲った、非超過確率値毎に有意に異なる値を示したものについてみていく。まず水温に関してであるが、これは季節毎の変動特性と関わりがあると考えられる。季節毎の変動特性は次節で述べるのでそこで併せて考察する。

気温-DOとの関係であるが、これもDO濃度の大きさは、季節に係していると考えられるので(25%値はより暑い季節、75%値はより寒い季節に生じる)、季節との関連は次節で考察する。

表一4 各季節における各水質項目の気温及び降水量に対する傾き
 (各セル内の上段が気温, 下段が降水量. 数値は全地点の平均値. 括弧内は非超過確率10%
 値及び90%値. 影を付した部分は相関が見出されなかった関係. また太枠で囲った部分は
 1-3月平均値と7-9月平均値とで差が見出された関係.)

	重相関			
	1-3月	4-6月	7-9月	10-12月
気温-水温 (°C/°C)	0.63 (0.012~1.4)	0.67 (-0.12~1.5)	1.37 (0.35~2.3)	0.85 (0.19~1.4)
降水量-水温 (°C/(10%))	0.020 (-0.23~0.34)	-0.55 (-0.26~0.25)	-0.13 (-0.33~0.075)	-0.0035 (-0.16~0.26)
気温-BOD (倍/°C)	1.024 (0.75~1.32)	0.98 (0.79~1.24)	1.10 (0.90~1.31)	1.0038 (0.84~1.19)
降水量-BOD(倍 (10%))	0.99 (0.91~1.066)	0.99 (0.93~1.062)	0.98 (0.94~1.032)	0.98 (0.94~1.026)
気温-DO濃度 (mg/l/°C)	-0.24 (-1.0~0.22)	-0.12 (-0.40~0.29)	-0.055 (-0.48~0.33)	-0.22 (-0.50~0.11)
降水量-DO濃度 (mg/l)/(10%)	-0.013 (-0.21~0.20)	0.00049 (-0.090~0.093)	0.026 (-0.057~0.13)	-0.0067 (-0.083~0.063)
気温-DO飽和度 (%/°C)	-0.67 (-8.1~3.2)	0.21 (-3.6~3.7)	2.1 (-1.5~7.3)	-0.32 (-3.0~2.0)
降水量-DO飽和度 (%)/(10%)	0.026 (-1.4~1.7)	-0.010 (-0.85~1.1)	0.11 (-0.84~1.3)	0.011 (-1.3~0.63)
気温-SS (倍/°C)	1.14 (0.76~1.69)	1.054 (0.77~1.55)	0.92 (0.62~1.30)	1.12 (0.83~1.50)
降水量-SS (倍/(10%))	1.022 (0.89~1.16)	1.011 (0.90~1.13)	1.034 (0.93~1.14)	1.036 (0.95~1.16)
気温-pH (l/°C)	0.012 (-0.21~0.11)	-0.012 (-0.18~0.13)	0.082 (-0.040~0.24)	0.00030 (-0.095~0.099)
降水量-pH (l/(10%))	-0.022 (-0.056~0.025)	-0.019 (-0.039~0.024)	-0.013 (-0.040~0.016)	0.0028 (-0.032~0.034)

降水量-DO飽和度の関係は, 非超過確率25%と75%
 で傾きの値の正負の符号が逆転している. 75%値で下
 降傾向を見せているのは, もともと過飽和の傾向に
 なっており, そのため降雨によって飽和度が下降し
 たためではないかと考えられた. そこで, そのこと
 を調べるために25%値, 75%値について, 各河川の9
 年平均値をとり, それを全流域で集計した値を得
 た. 結果は, 25%値における分布は87±17%, 75%値
 における値は98±18%であった. 25%値においてはほ
 ぼ全ての地点の値が100%より小さかったが, 75%値
 においては約半数の地点が100%より大きな値を示
 した. これら過飽和の値を持つ状況下においては, 降
 雨の増加によってDO濃度が小さくなると考えられ
 る.

降水量-pHとの関係を考える. pHは, 降雨に関し
 てのみ, 相関が見られる. 負の相関であるのは河川

水が降雨によって酸性側に寄ることを意味する. そ
 して75%の値がもっともその係数が大きい. 河川の
 pHが高い時とは, 相対的に河川のpHと降雨のpHとの
 差が大きいような状況であると考えられ, 同程度の
 降雨量の増加に対しても, より大きな影響を受け,
 そのために75%の係数が大きくなったものと考えられ
 る.

(3) 季節毎の影響の違い

季節毎に気象変動の影響の違いを調べることを目
 的として, 季節を1~3月, 4~6月, 7~9月, 10~12
 月の4つの時期に分類し, 各々の時期において前節と
 同様の解析を行った. 各々の時期の気象項目, 水質
 項目の平均値をその年の年代代表値とし, 各々重相関
 を調べた. 表一4にその結果を示す. 1~3月と7~9月
 の傾きを比較したのは, 各々年間で最も寒い時期と

暑い時期であり、季節毎に関係に違いがあるとすればその両者にもっとも顕著に差が現れると考えたためである。

全体の傾向を見る。気温との相関に関しては、いずれの水質項目においても季節差が見出された。降水量との相関については、降水量-水温の関係以外では季節差が見出されなかった。これは、日本においては、年間の気温変化の傾向は全国的に共通であるが、降水の季節毎のパターンは地域毎に異なっており、それが混じりあってしまっていることが降水量に関する季節差が見出されなかった原因の一つにあるのではないかと推察された。そのため、降水量-水質に関して季節毎の違いが見出されないからといって、直ちに、降水量-水質の相関に大きな季節差がないと結論すべきではない。

また、各季節で比較すると、7~9月において相関の見出されている項目が最も多い(7~9月は10/12項目、他の時期は3/12~6/12項目)。これは、夏に生物活動が活発になるため、生物活動を通しての影響がより大きな割合で加算されているためではないかと推察された。年平均値を代表値とした場合には相関が見出されなかったにも関わらず、7~9月の平均値を代表値とした場合にのみ、依存性が見出された項目もあり(気温-BOD, 気温-pH)、温暖化などの気象変動という、季節毎に変動特性が異なる可能性のある変動の影響を予測する場合、特に季節毎の影響に注目していく必要があることが分かる。

季節毎に回帰式の傾きが異なる項目について考察する。まず、気温-水温について見ると、7~9月のみが $1.4^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$ と他の倍程度の傾きを持っている。この値は、75%非超過確率値を水温の代表値とした値と比較的近い。冬に関しても、25%非超過確率値を、1~3月の値と対応させると、同傾向を持っていることが分かる。すなわち、表-3における非超過確率値ごとの違いは、主に、季節毎の変動特性の違いに起因していることを示している。何故暑い時期に限りこのように大きな傾きが生じるのかは不明である。7~9月は他の時期と比較して短波輻射の影響がより強く、その影響が加算されるため、このように大きな傾きが生じたのではなかろうか。もし短波輻射の影響であるとすれば、長波輻射の変化によりもたらされる温室効果による温度変化に対しては、水温の変動特性も異なってくる可能性もある。

降水量-水温について見ると、4~6月、7~9月については負の相関、他の時期は相関が見出されなかった。負の相関は、降水が河川水を冷却する効果があるということを意味しているが、その効果は寒い季節には生じないと考えられる。

気温-BODについて見ると、7~9月のみ正の相関が生じている。この時期のみ相関が見出されたのは、生物活動の消長がBODの変動に関与しているからではなかろうか。そうだとしたら、BODの変動は気温そのものよりも水温の変動が直接的な原因になると考えられる。水温の変動は、7~9月においては他の時期よりも大きく、水温変動が大きいことが、BODの変動幅を大きくしている可能性がある。気温-BODの変動は、年平均値を代表値とした場合は相関が見出されなかった。しかし、このように7~9月と暑い時期に限ってみれば、気温が 1°C 上昇した場合、BODは1割(1.10倍/ $^{\circ}\text{C}$)悪化するということことが、表-4より推測される。

気温-DO濃度及び気温-DO飽和度について見る。7~9月のみが、気温-DO濃度に相関がなく、DO飽和度に関しては正の相関がある。一般に、水温が上昇すると飽和DO濃度が下がりそれに伴いDO濃度が下がると考えられ、他の時期はそういう変動の構造を持っていると考えられる。7~9月のみが異なる傾向を持っているのは、気温の上昇により水中植物の活動が活発になりDO濃度を増加させるために効果を相殺しているのではないかと考えられる。

気温-SSは夏のみが負の相関であり $8\%/^{\circ}\text{C}$ 減少する。1~3月、10~12月は $12\sim 14\%/^{\circ}\text{C}$ と大きく値が上昇している。気温によってSSが変動する理由は不明である。

気温-pHは夏のみ正の相関を見出した。気温が直接的に水のpHをあげるよりは、植物活動、或いは流域の土壤に何らかの影響を与え、それがpHに影響を及ぼしているのかも知れない。

(4) 流域特性による影響の違い

前節までの解析においては流域の特性を考慮せず、全て共通の母集団に属するものとして解析を行ったが、水質の変動特性は地域毎に異なる可能性がある。そこで本節では上流、中流、下流毎に変動特性が異なるか、という点と、気候区毎に変動特性が異なるか、という2点について調べた。

a) 上流、中流、下流による影響の違い

年平均値を代表値とした重相関の傾きに対し、上流のデータセット及び下流のデータセットとの差の有無に関してt検定を行うことによって差の有無を判定した。その結果、上流と下流とで有意に差が見出されたのは降水量-水温のみであった。(なお、他の項目については気温-SSが危険率 $p=15\%$ 、降水量-SSが $p=11\%$ と比較的差のありそうな傾向を見出した。他の項目については $p=50\sim 90\%$ 程度と、殆ど差が見出されなかった。)

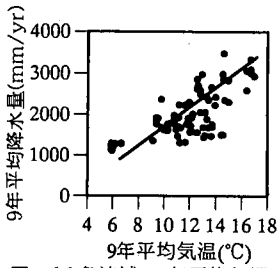
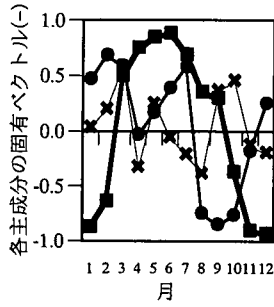


図-11 各流域の9年平均気温と9年平均降水量



- 第一主成分(49%)
- 第二主成分(30%)
- ✕ 第三主成分(10%)

図-12 全流域の各月平均降水量の主成分分析に基づく第一～第三主成分の固有ベクトル

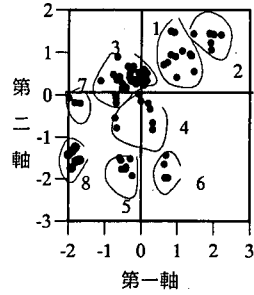


図-13 ふたつの主成分分析スコアに基づくクラスター分析結果

降水量-水温に関しては上流:-0.18°C/10%, 中流:-0.14°C/10%, 下流:-0.056°C/10%と上流が最も大きな変化を示した。下流の変化がもっとも小さいのは、流域が大きくなりなんらかの平均化のようなものが生じている可能性と、人間の水利用という人為的なバイパスによる影響の低減の可能性とが考えられる。しかしいずれの可能性とも、降水量-水温のみに影響が生じた理由を十分説明しているとはいえない。また、人為的な水利用の影響に関しては、本研究においては地域毎の大河川を選択しており、そのため全体的に人為的な影響は少ないと考えられ、人為的影響について考察するには必ずしも適しているとはいえない。これについては、都市中小河川などを対象として更に考察する必要がある。

b) 気候区による影響の違い

気候区毎の影響について見る。気候区の種類は本研究で用いた雨量及び降水量のデータに基づいて行った。まずその分類法について述べる。

気候区は①9年平均気温の高低、及び降水量の大小による分類、②各月降水量パターンによる分類、というふたつの分類法をあわせ、最終的に8気候区に分類した。まず①によって暑いか寒い、雨が多いか少ないか、というもっとも基本的な分類を提示し、②によって季節毎の降水パターンによる分類を提示した。気温について季節変化のパターンによる分類を試みなかったのは、気温は夏暑く冬寒いという基本的な特徴が強く、それ以上の微妙な特徴の差異の抽出が困難であると考えたためである。

まず①について述べる。図-11に各流域の9年平均気温と降水量との関係をグラフにした。図を見る

と気温と降水量には正の相関があるように見える。そこで主成分分析を行い、その第一主成分スコア(第一主成分の方向は図-11に示した)による順位によってこの関係を総括することとした。第一主成分の寄与率は81%であり、この第一主成分を用いてまとめることは適切であると考えられる。そこでこのスコアを「第一軸」とする。

次に②について述べる。各流域においてまず各月の9年平均降水量を計算した。そして各月の降水量を{各月9年平均降水量(mm/month)/9年平均降水量(mm/month)-1}として規格化した。次にその規格化された各月の平均降水量を変数として、主成分分析を行った。その結果を第一～第三主成分までのパターンについて、図-12に示す。第一主成分は明らかに夏多雨型かそうでないかを意味している。そこでこの第一主成分によるスコアによって総括することとした。この主成分を「第二軸」とする。

このようにして得られたふたつのスコアを図-13に示す。第一象限は明らかに温暖、夏多雨型の気候区であり、両スコアに関して強い正の相関が見られる。しかしそれ以外の象限に関してはそういった形での相関は見られない。しかし、データを詳細に見ると、いくつかのクラスターに分類可能なようである。そこで類似度としてスコアを変数としたユークリッド距離を用いた、グループ間平均連結法によるクラスター分析によって8つのクラスターに分類した(図-13の囲み線)。また各クラスターがどの流域に属するかを地図上にプロットしたのが図-14である。各クラスターは従来の気候区分¹⁰⁾とも概ね対応しており、本分類方法は適切なものであるといえる。

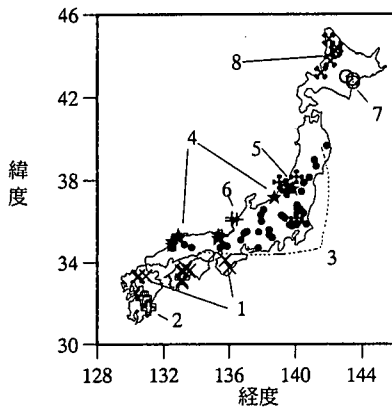


図-14 気候区の分類

表-5 地域差が見出された関係の第一軸、第二軸依存性 (+は軸の数値に対する相関の正負、数値は各偏相関係数の有意水準%)

	第一軸	第二軸
気温-DO	+	+
	9.9	9.1
気温-DO飽和度	+	+
	15	24
気温-pH	+	+
	32	70
降水量-BOD	+	+
	3.1	57

本分類方法を用いて気候区毎に傾向に違いがあるかの判定を行った。年平均値を代表値とした重相関の傾きに対し、気候区1,2を合算したデータセット及び気候区8のデータセットとの差の有無に関して検定を行うことによって差の有無を判定した。全気候区に対して判定を行うことは煩雑であり、またあまり意味のないことと考え、最も気候特性が異なる気候区間で差の有無を判定することによって、各々の気候-水質項目の相関が本質的に気候区特性に対する依存性を持つかを判断した。

検定した結果、差がありと判定されたのは表-5に示す4つの関係についてであった。更にこれらの関係について上記①,②によって得られた第一軸、第二軸を独立変数、各地点の相関の傾きの値を従属変数として重回帰分析を行った。表-5には第一軸、第二軸の値に対して相関の傾きの値が増加傾向を示しているか減少傾向を示しているかを+として表す。ま

た第一軸、第二軸の偏相関係数の有意水準を示す。有意水準を見ると気温-DO濃度に関しては両者に対して強い依存性を持っている。その他に関しては第一軸に対する依存性の方が強い傾向にある。全体としては降雨パターンの違い(第二軸)よりも気温、降水量の全体としての高低、大小(第一軸)が大きな影響を与えているといえそうである。

図-15に地域毎に傾きの値を示す。まず気温-pHは南の地方が正の相関を持っているようである。気候区6のみが値が突出しているが、理由は不明である。降水量-BODは南の地方では相関がない。これは南の地域では降水による希釈効果がないことを意味している。前節の、全国的な解析では負の相関が見出されたが、これは北の気候区(気候区5~8)における相関によって生じたものと考えられる。南の地域で相関がないのは単に寒暖そのものが直接的な原因である可能性もある。そうであるとすれば全国的にも暑い時期には相関が弱くなるという傾向を持つはずであるが、表-4を見ると降水量-BODの相関が7~9月に弱くなるということは特に観察されていない。単なる寒暖が原因ではなく、温暖な地域ゆえの、何らかの地理的特性が影響を与えていると考えられる。

気温-DO濃度及び気温-DO飽和度は暖かい地域で高く、寒い地域で低い傾向がある。気温-DO飽和度は、温かい地域が正の相関、寒い地域が負の相関という明確な傾向の違いが見られる。表-4の季節毎の差を見ても気温-DO飽和度は7~9月のみ強い正の相関が見出されており、寒暖そのものが変動特性に影響を与えていると考えられる。図-16に、表-4に分割した季節毎に、流域毎の9年平均気温を横軸、気温-DO飽和度を縦軸として関係を示す。グラフ中の線分は各々の季節毎の回帰直線である。線分は全体として一つのカーブを形成しており、5°C程度を境に共通の上昇傾向を示している。これは図-15の傾向とも一致しており、地域毎の差については、寒暖が基本的な影響因子になっていると考えられる。5°C以下は逆の傾向を持っているが、その原因は不明である。冬の北の地域では、主に降雪が生じていると考えられるが、雪解け水の影響が、このような傾向を与えているのかも知れない。

4. 温暖化が水質に与える影響に関する考察

本節では、前節までに見出された解析結果が、将来起こりうる地球温暖化といった気候変化に対しどのような予測、適用が可能か、その予測手法としての問題点と併せて論じる。

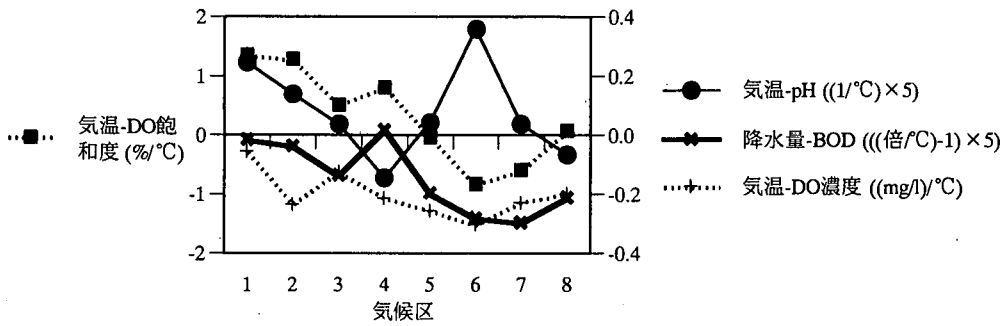


図-15 各相関の傾きの気候区別の平均値

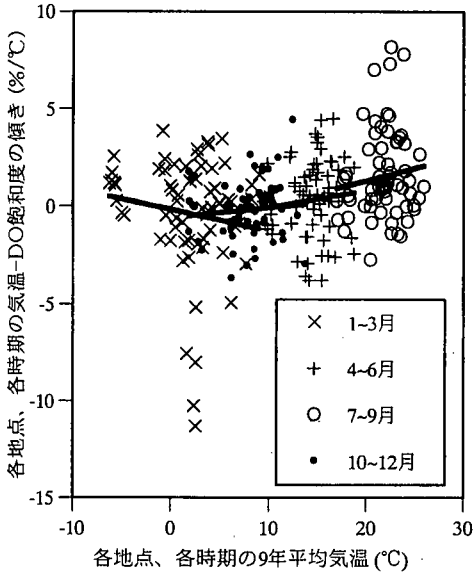


図-16 各地点、各時期の気温-DO飽和度の傾き

温暖化によって気温が上昇すると河川の水温が上昇する。河川の水温の上昇は河川の生態系に大きな影響を与えると考えられる。BODやDO、その他の水質指標に関しても、気温の上昇による直接的な影響だけでなく、それにともなう生じた水温の上昇が、原因の大きな部分を占めていると考えられる。また、本研究で取り上げられた水質指標への影響のみならず、水温の急激な上昇は、それに追従しきれない河川生態系に対して大きな悪影響を与えることが懸念される。BOD、SSといった汚濁指標を見てみると、SSに関しては気温 1°C の上昇に対して5%程度の上昇、BODに関しては平均値では相関が見出されなかったものの、夏に限れば1割程度の上昇と、いずれも悪化傾向が見られ、有機汚濁という点で河川水質の悪化が懸念される。

水系生物への影響という観点から見るとDOの役割が重要であるが、気温が上昇すると全体としてDO濃度は低下する傾向があり、それによる悪影響が懸念

される。

DO濃度に影響を与える因子に関してはDO飽和度という物理化学的な因子と、光合成という生物学的な因子という、複数の因子が絡み合っていると考えられ、今後更に機構的な解釈をより明らかにし、予測精度を上げていくことが重要であると考えられる。

本研究ではその予測される影響の強さや、データ入手、他の研究との比較検討の容易さなどを考慮し気象項目の中でも特に気温と降水量とを取り出してそれらに対する影響を検討している。他の気象項目はこの2因子を原因として変動する、あるいは連動して変動すると考えそれらの影響を包括的に記述することを目的としている。しかし例えばここに示したDOなどのように日照の影響を直接受けると考えられる指標を考える際、或いは他の社会的な活動が明らかかな影響を及ぼすと考えられる場合などは、より詳細な検討のためには、それらの影響を取り除く、或いはそれらの指標も変数として織り込んで解析する、など、解析方法の更なる検討も必要となつてこよう。

季節毎の変動に関して考察する。特に気温-各水質の相関に関しては、季節毎にその影響程度が異なり、季節毎の影響を見ていくことが重要であることが分かった。特に夏において多くの水質項目で大きく変化する傾向が見られ、夏における河川水質の影響を重点的に調べることは重要であると考えられる。夏が他の季節と異なる傾向を持つのは、生物活動が活発な季節であるため、生物的な活動を経由した影響が加算されること及び、日照強度の影響とが、その原因として考えられた。温暖化による気温上昇とは、例えば日照強度の強化を伴わないのではないかという点をはじめ、従来の変動とは異なる相をもった変化である可能性もあり、そういった現象に対してより確度の高い予測をするには、本研究のような統計的手法と、モデルなどを用いた機構解明

的な手法と、両方を用いることが重要であると考えられる。また季節的な変動特性の違いを機構解明と併せてより高い確度で議論したければ、時間遅れに対する考察や、適切な季節の分割に対する考察なども必要となつてこよう。これらはモデル的、機構解明的なアプローチと併せて行っていくべき今後の課題となろう。

気候区毎に分割した解析によって、地域毎に異なる影響を持つ項目があることも分かった。DOには寒暖の違いが影響を与えていた。しかし降水量-BODは、単に寒暖の差、或いは降水量の差による直接的な影響というよりは地理的な特性(例えば植生、土壌の違いなど)が影響を与えているのではないかと考えられた。温暖化による気候変化そのものも、気候区によって異なるのではないかと考えられ、気候区毎の違いを明らかにし、その因子を解明することが重要であろう。

最後に降水量の影響について述べる。温暖化は、気温のみならず降水量の変動を伴って生じ、しかもその変化幅も非常に大きいと考えられる。その影響程度に関しても、気温以上に水質に影響を与えるものもあると考えられる。しかし温暖化によって全体として日本の降水量は増加するのか減少するのか、その点に関しても未だに十分には明らかになっておらず、その点で温暖化による河川水質の影響も明らかではない。しかし増加、減少いずれの傾向であっても、河川水質に大きなインパクトを与えることは明らかであり、様々なシナリオに基づいてその影響を検討していくことが重要になっていくであろう。そのために、その基礎データとして降水量が水質に与えるインパクトを調べるのが重要である。

また、降水量の影響を考察するには、流量に与える影響と共に解析し、流量、負荷量をベースとした解析も重要になってくると考えられる。本研究では流量に関するデータが不足していたためそれらの解析が行えなかった。今後の課題としたい。

5. まとめ

気候変動が河川水質に与える影響を全国レベルで定量的に解明することを目的として、気象に関してはAMeDASデータ、河川水質に関しては公共用水域測定結果という2つの実測データを用いた統計的解析を行った。気温及び降水量を独立変数、各水質項目(水温、BOD、DO、SS、pH)を従属変数とし、単回帰及び重回帰分析を行った。得られた主要な結果をまとめると以下のようである。

(1) 水質の年平均値及び非超過確率値を代表値とした分析によって、気温及び降水量の変動から受ける影響の強さを明らかにした。結果は表-3にまとめた通りである。

(2) 1年を季節毎に4分割し、各季節内の平均値をその年の代表値とした分析によって、季節毎に気温及び降水量の変動から受ける影響の強さを明らかにした。特に気温から受ける影響に関しては、今回対象とした全ての水質項目において季節毎に異なる相関が見出され、季節毎に相関を調べることが重要であることが明らかになった。

(3) 全国を、気候区に分割する方法を提案し、その分割された気候区毎に気象と水質との相関を調べた。気候区毎に異なる相関を持つ関係があることを見出し、また、その影響因子について考察した。

(4) これらの結果に基づいて、将来地球温暖化が生じた場合河川水質にどのような影響を及ぼすのかについて考察した。気温の上昇による影響、降水量の変化による影響、いずれも河川水質に大きな影響を与えることが予想された。

今後の課題としては、予測の確度をあげるために、モデル的な方法論による機構解明を併せて行い、統計的解析結果との比較検討を進めていくことが重要であると考えられる。

参考文献

- 1) 地球温暖化影響研究会編：地球温暖化による社会影響、技報堂出版、1990。
 - 2) 宝馨、小尻利治：地球温暖化による流域水文応答の変化に関する数値実験、土木学会論文集、No.479/II-25, pp.1~10, 1993。
 - 3) 田中丸治哉、門屋睦：気温上昇が流域水文循環に与える影響、京都大学防災研年報、34B-2, pp. 189-207, 1991。
 - 3) 田中丸治哉、門屋睦：気温上昇が流域水文循環に与える影響(2)、京都大学防災研年報、35B-2, pp. 183-195, 1992。
 - 4) 安藤義久：地球温暖化シナリオによる河川流出への影響評価に関する一考察、水利科学、38(4), pp. 34-44, 1994。
 - 5) 山崎誠、小山俊、長谷川和義、平山健一：寒地河川における冬季渇水後期の流量変動予測、土木学会論文集、No. 565/II-39, pp. 11-20, 1997。
 - 6) 環境庁地球温暖化問題検討委員会 影響評価ワーキンググループ：地球温暖化の日本への影響、pp. 99-121, 1997。
- 盛谷明弘、丹羽薫：長期観測資料に基づいた温暖化の水資源の影響評価について、水工学論文集、Vol.35, pp. 647-658, 1991。

- 7) 福島武彦, 村岡浩爾, 天野耕二: 全国河川を対象とした水質変動特性の解析, 衛生工学研究論文集, Vol. 24, pp. 283-293, 1988.
- 8) 福島武彦, 上西弘晃, 松重一夫, 原沢英夫: 浅い富栄養湖の水質に及ぼす気象の影響, 水環境学会誌 Vol. 21, No. 3, pp. 180-187, 1998.
- 9) Fukushima, T., Ozaki, N., Kaminishi, H., Harasawa, H. and Matsushige K.: Forecasting the changes in the lake water quality in response to climate change, using past relationships between meteorological conditions and water quality, Hydrological Processes, 1999. (in press)
- 10) 帝国書院編集部編: 新詳高等社会科地図 四訂版, 帝国書院, p. 90, 1990.

(1998. 12. 17受付)

A STATISTICAL STUDY ON INFLUENCE OF METEOROLOGICAL VARIATIONS ON RIVER WATER QUALITY

Noriatsu OZAKI, Miyuki ONO, Takehiko FUKUSHIMA and Hideo HARASAWA

Statistical analyses (e. g., simple and multiple regression analysis) were applied to the relationships between the meteorological data (air temperature, precipitation) and the river water quality (water temperature, BOD, DO, pH and SS) obtained in 27 rivers in Japan for the period of 1987 to 1995. It was found in almost all rivers that an increase in yearly-averaged air temperature resulted in rises of yearly-averaged water temperature, BOD, SS, and a drop of DO. However, the relationships differed significantly with respect to season and climatic zone. Based on the results, we can predict the effects of global warming on the river water quality deterioration.