

油ヶ淵及び周辺河川水質データに対する多変量解析の適用

成瀬 憲政

油ヶ淵及び近隣河川の水質データに対して主成分分析(PCA)を適用し、COD及び全窒素(TN)、全りん(TP)と主成分との関係について解析した。PCAにより水質データは気温及び水温の因子、総合的な汚濁因子等を表す主成分が抽出された。CODは総合的な汚濁因子と強い相関があり、上流から流入すると考えられる。TNは温度との相関が強いと推察され、流入の強い影響は確認されなかった。TPは総合的な汚濁因子の他、長田川からの流入の影響が大きいと考えられる。

キーワード 油ヶ淵, 水質データ, COD, 全窒素, 全りん, 主成分分析

1 はじめに

油ヶ淵は碧南市と安城市の境に位置する本県唯一の天然湖沼である。流域の都市化や閉鎖性水域であることなどが原因でかつては水質汚濁が進んでいた。水質改善を目的とした油ヶ淵水環境改善緊急行動計画等の取組により現在の水質は過去に比べ改善している。しかし、油ヶ淵におけるCODの75%水質値は、環境基準値である5mg/L(湖沼B類型)を上回っている。そのため、現在も油ヶ淵水質浄化促進行動計画2021-2030(油ヶ淵ルネッサンス計画)¹⁾による改善対策が推進されている。

河川や湖沼の水質に関わるデータは気温や水温、水質汚濁指標等の多様な測定項目によって表される。それらは時間的要因や天気及び季節、改善対策を含めた環境の変化等の多種多様な変動要因の影響を受けており、その解釈は容易でない。そこで本報では水質データをPCAにより解析することでデータの特徴や傾向を抽出した。さらに環境基準項目であるCODと、その内部生産に寄与する全窒素(TN)と全りん(TP)に関して²⁾、主成分との相関から得られた知見について報告する。

2 解析方法

2.1 解析対象データ

解析には2000年1月から2022年3月にかけて油ヶ淵(下池中央)及び周辺河川(長田川、朝鮮川、半場川、稗田川、高浜川、新川)(図1)にて調査した気温、水温、透視度、pH、溶存酸素量(DO)、COD、BOD、浮遊物質量(SS)、全窒素(TN)、全りん(TP)、電気伝導率(EC)のデータを用いた。なお、量的データを取り扱う多変量解析を行う際、報告下限未満の値や報告上限を越えた値など、具体的な数値が得られていないデータに対し

て何らかの値を代入する必要がある。そこで本報では報告下限未満の値は報告下限の2分の1、報告上限を超える値は報告上限の2倍の値と置き換えた。また、各項目データの尖度および歪度、ヒストグラムを確認したところDO、SS、COD、BOD、TN、TPは非対象性及び非正規性が強かった。それらのデータに対しては底を10とした対数化を施し解析に用いた。

2.2 主成分分析(PCA)

主成分の因子負荷量及び各主成分の寄与率は、解析データから相関行列の固有ベクトル及び固有値として得られる³⁾。本報ではその代表的な導出法の一つであるヤコビ法によりPCAを行った。また、寄与率の高い主成分について解釈を容易にするためバリマックス回転を行った。

2.3 主成分による水質項目の再構成

PCAには寄与率の大きい成分だけで元データに逆変換することで元データからのノイズ除去を行う手法がある⁴⁾。本報ではその手法を応用し、少数の主成分で任意の水質データを再構成できる主成分の組み合わせを探

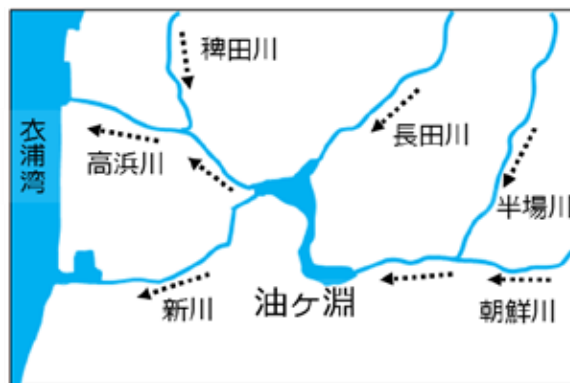


図1 油ヶ淵及び周辺河川

索し、そこで選択された主成分が元データの主な構成要素であると考えた。さらに当該主成分の分布や地点間の相関を比較することで水質項目の由来に関して考察した。

3 結果及び考察

3.1 主成分分析

各データ間の相関行列を表1に示す。気温と水温が0.959、CODとBODが0.780と強い正の相関を示している。

また、気温とTNが-0.660、水温とTNが-0.685、透視度とSSが-0.766と強い負の相関を示している。他の組み合わせに関してもやや強い相関があるものが多い。この相関行列を用いてPCAを行った。

得られた因子負荷量及び寄与率、累積寄与率を表2に示す。累積寄与率は主成分1（以後PC1と表記する。他の主成分も同様）からPC3までで合計70%を越えており、元データは概ね3つの主成分で表現できている。地点毎のPC1からPC3までの分布を箱ひげ図として図2に示す。

表1 水質データ間の相関

	気温	水温	透視度	pH	DO	BOD	COD	S S	TN	TP	EC
気温	1.000										
水温	0.959	1.000									
透視度	-0.057	-0.066	1.000								
pH	-0.196	-0.180	-0.084	1.000							
DO	-0.462	-0.476	-0.109	0.563	1.000						
BOD	-0.246	-0.250	-0.387	0.297	0.207	1.000					
COD	-0.137	-0.136	-0.552	0.222	0.128	0.780	1.000				
S S	0.133	0.116	-0.766	-0.001	-0.022	0.371	0.559	1.000			
TN	-0.660	-0.685	0.019	-0.025	0.188	0.444	0.352	-0.042	1.000		
TP	-0.193	-0.203	-0.299	-0.071	-0.062	0.395	0.499	0.340	0.454	1.000	
EC	-0.265	-0.252	0.149	0.573	0.088	0.154	0.094	-0.155	0.071	-0.070	1.000

表2 主成分ベクトル

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10	PC11
気温	0.511	0.020	0.173	-0.149	-0.274	0.116	-0.014	0.290	-0.020	0.242	-0.674
水温	0.512	0.015	0.187	-0.160	-0.260	0.110	-0.098	0.200	-0.009	0.123	0.730
透視度	-0.130	-0.467	-0.126	-0.320	-0.325	0.068	0.711	0.016	0.163	-0.050	0.038
pH	-0.252	0.036	0.625	-0.051	-0.105	0.296	-0.001	0.206	-0.237	-0.586	-0.039
DO	-0.338	0.009	0.300	0.576	-0.305	0.226	0.088	0.044	0.179	0.525	0.057
BOD	-0.162	0.404	0.084	-0.229	-0.452	-0.379	0.110	-0.346	-0.492	0.171	0.004
COD	-0.068	0.494	0.068	-0.177	-0.216	-0.153	-0.029	-0.022	0.774	-0.210	-0.026
S S	0.181	0.473	0.076	0.189	0.423	-0.072	0.659	0.261	-0.103	0.031	0.057
TN	-0.382	0.130	-0.390	-0.131	-0.144	-0.080	-0.156	0.769	-0.130	0.072	0.052
TP	-0.067	0.354	-0.315	-0.235	0.017	0.807	0.018	-0.224	-0.075	0.091	0.001
EC	-0.262	-0.076	0.411	-0.569	0.444	-0.035	-0.067	0.032	0.101	0.467	0.024
寄与率	29.0%	27.6%	15.2%	9.4%	5.9%	4.8%	2.4%	2.1%	1.8%	1.5%	0.4%
累積寄与率	29.0%	56.6%	71.8%	81.2%	87.0%	91.9%	94.2%	96.3%	98.2%	99.6%	100.0%

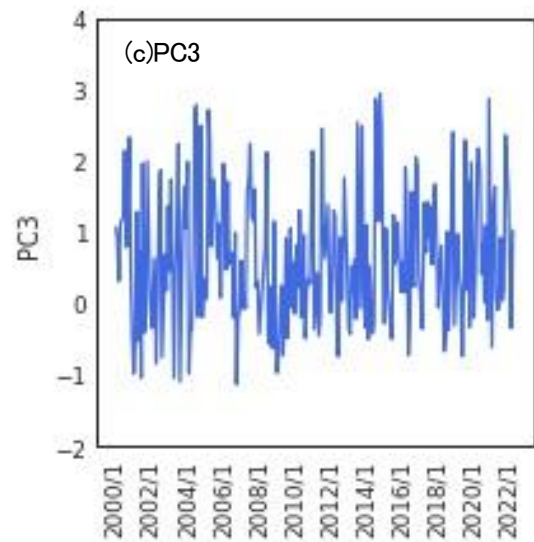
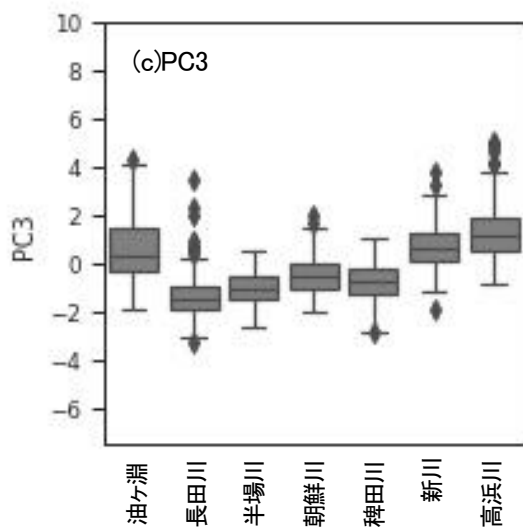
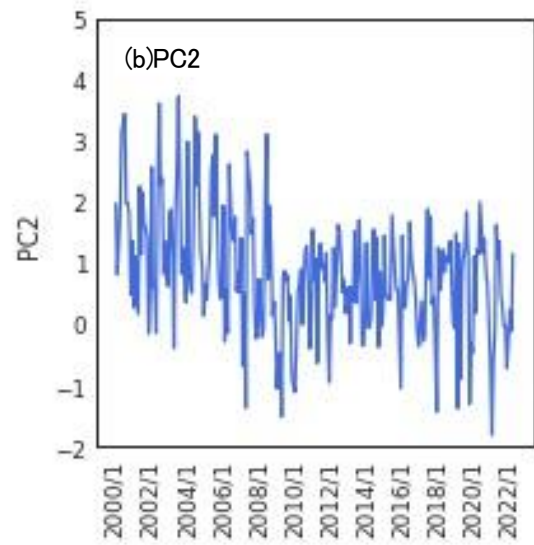
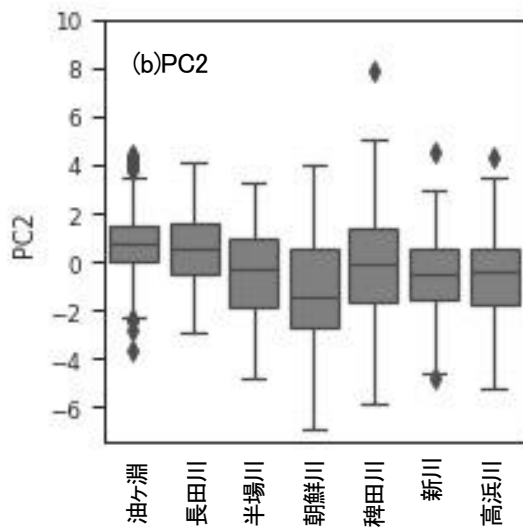
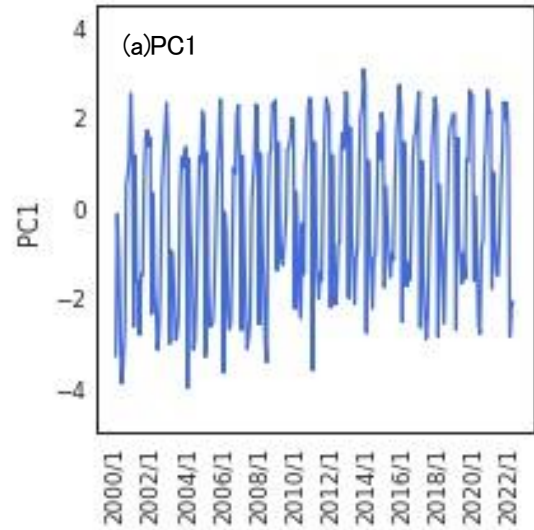
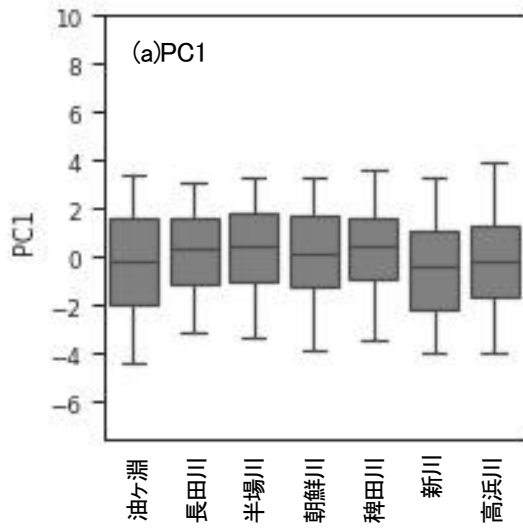


図2 場所ごとのPCの分布

図3 PCの経時変化

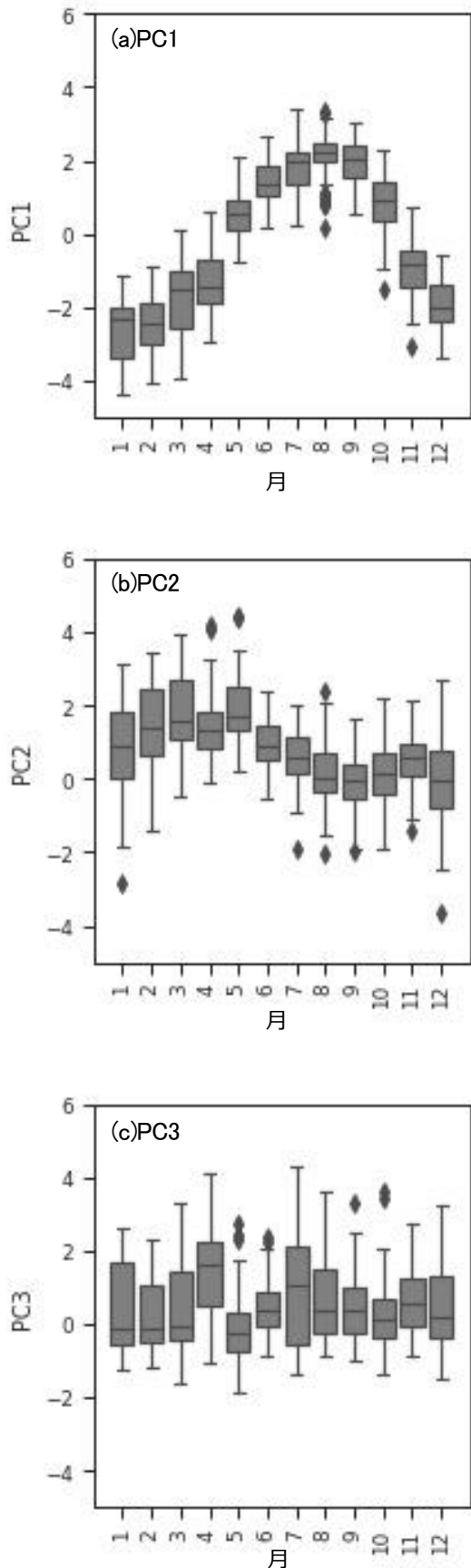


図4 油ヶ淵におけるPC1, PC2, PC3の月別変化

また、油ヶ淵におけるPC1からPC3までの揭示変化を図3に、月別の傾向を図4に示す。

3.1.1 PC1

PC1は気温と水温の負荷量が正に大きいことから温度を表す主成分と考えられる。また、D0が負の大きな負荷量を有している。これは水温の変化に伴う溶解度の変化や、水中生物の活発化による酸素消費の影響等の可能性がある。TNの負荷量も負に大きい、この原因が温度に由来するのか、それ以外の季節的な要因に由来するかは不明である。TNと水温の関係については水温の低下に伴い底質からのTNやTP溶出量が減少する報告⁶⁾がある。しかし本報の結果はそれらと異なる傾向を示していることから、油ヶ淵における温度とTNの関係には油ヶ淵固有の要因があると推察される。

油ヶ淵におけるPC1の経時変化と月別変化は図3(a)と図4(a)に示すように周期的な変動が目立っており、冬は低く夏は高いといった気温と同様の傾向が見られる。また、月毎に集約したPC1に関する油ヶ淵と各河川の相関を図5に示す。いずれの河川でも決定係数は0.8以上と高く、油ヶ淵と似た傾向を有することがわかる。季節によって油ヶ淵一帯の気温や水温が同様の傾向を示すことは明らかであり、この関係性は妥当なものと考えられる。

なお、本相関におけるサンプル数は267ヵ月分と大きく、このサンプル数では検出力が高すぎるため、相関係数の検定では決定係数が0.015以上でも有意水準5%で相関が有意と判定されてしまう。従って、無相関検定にて相関の有無を判定する意味は乏しいと判断し、決定係数の大小関係のみで相関係数の比較を行うこととした。

3.1.2 PC2

PC2はBOD, COD, SS, TPの負荷量が大きな正の値であり、透視度の負荷量は大きな負の値となっている。これよりPC2は水質の総合的な汚濁度を表すと考えられる。また、気温、水温ともに負荷量が0に近く、PC2は温度とは独立した成分であると言える。

油ヶ淵におけるPC2の経時変化については図3(b)に示すように、2008年から2009年の間で顕著に低下している。これは油ヶ淵や周辺における汚濁対策により、総合的な汚濁がこの時期に減少したことを示すと考えられる。また、月別変化については図4(b)に示すように2月から5月にかけてやや高くなる周期変動が見られる。PC2は温度と独立しているため、この傾向は温度以外の季節変動や代掻き等の季節に関わる人間の

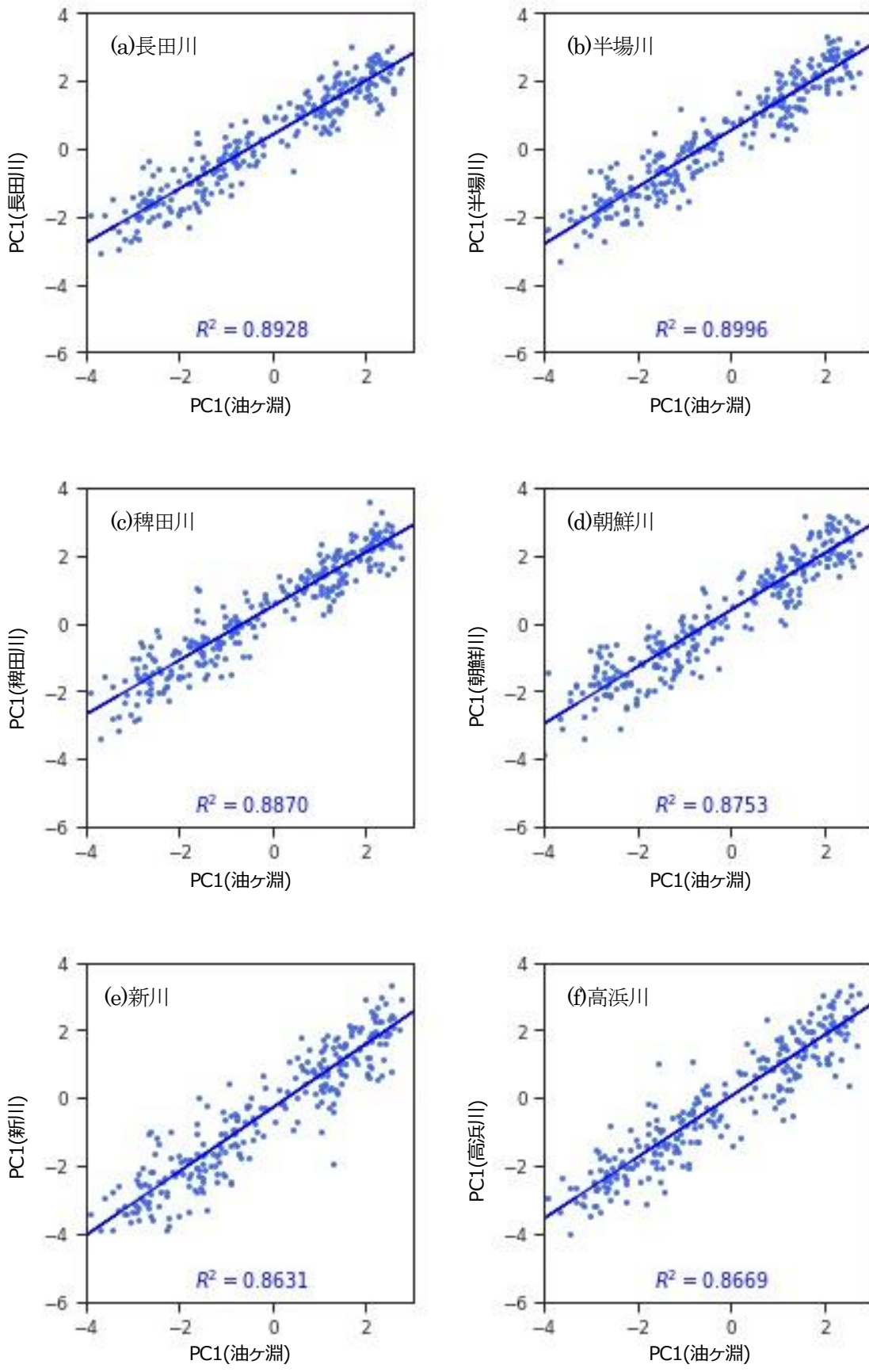


図5 油ヶ淵と各河川のPC1の相関

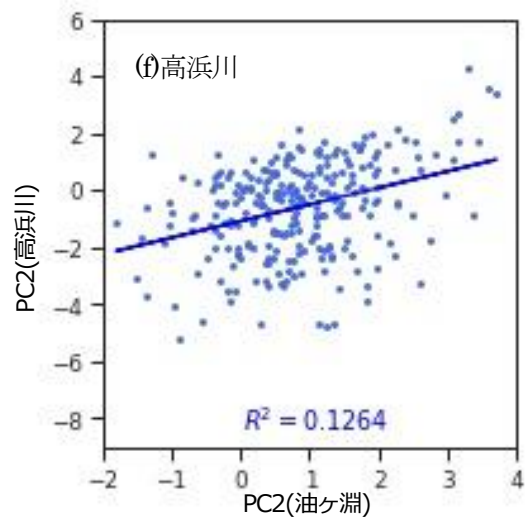
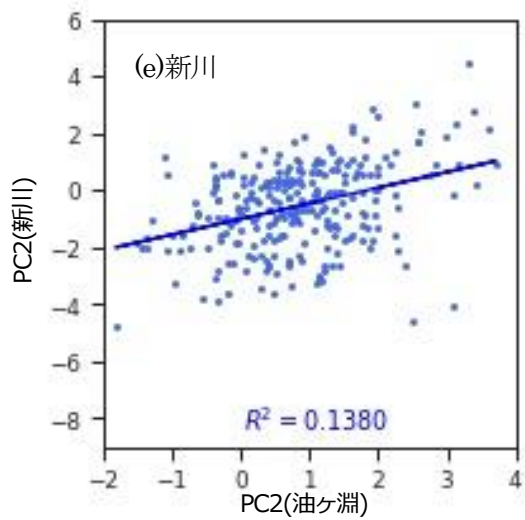
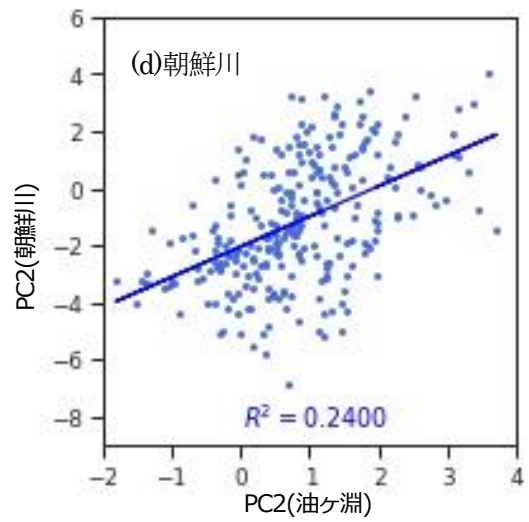
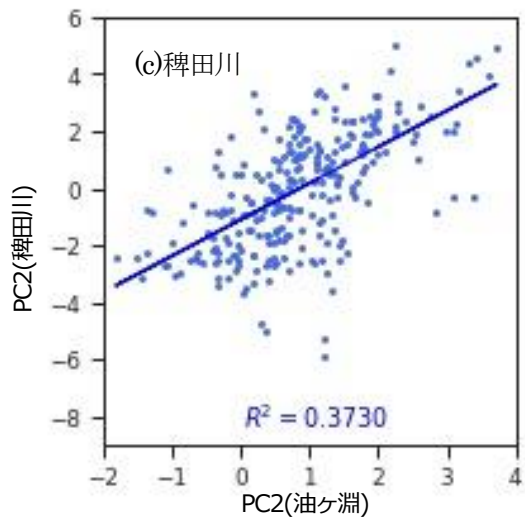
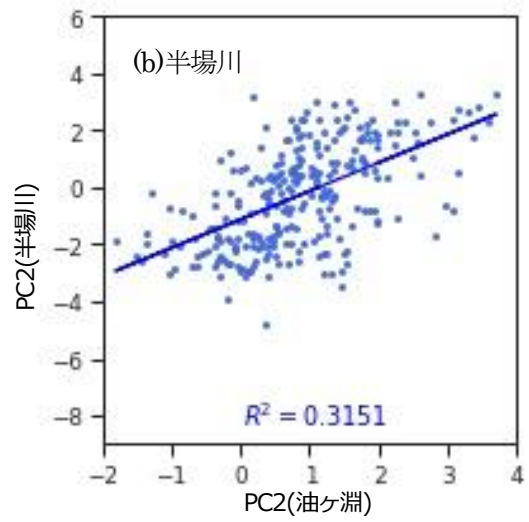
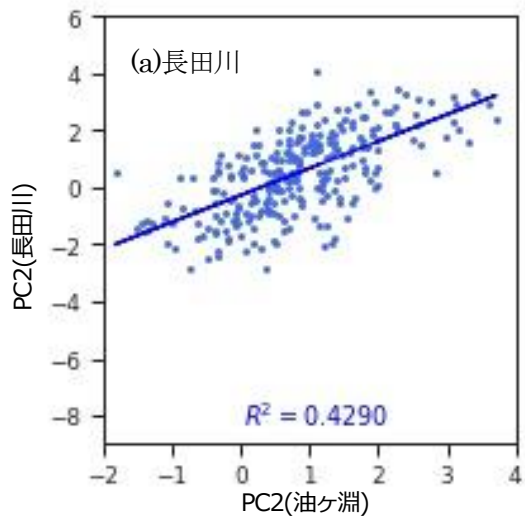


図6 油ヶ淵と各河川のPC2の相関

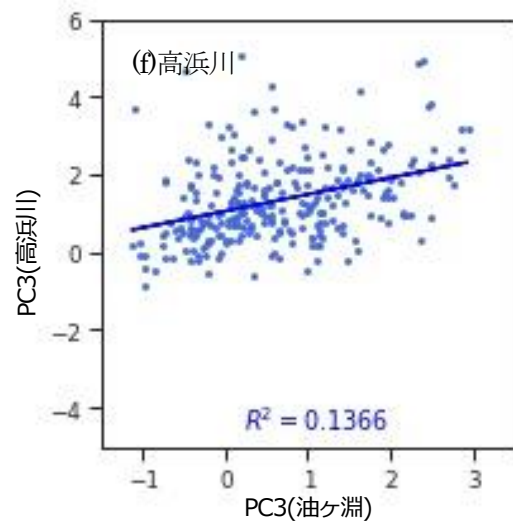
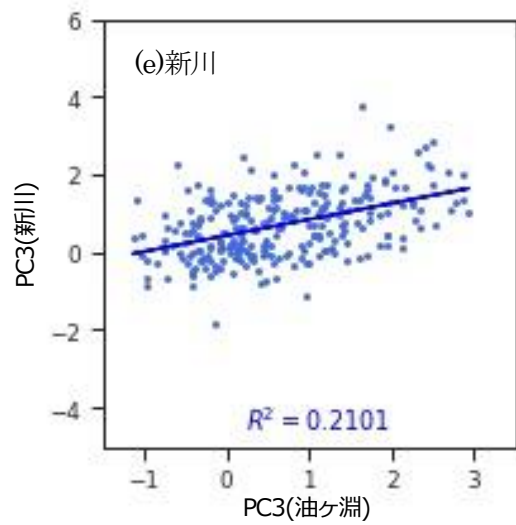
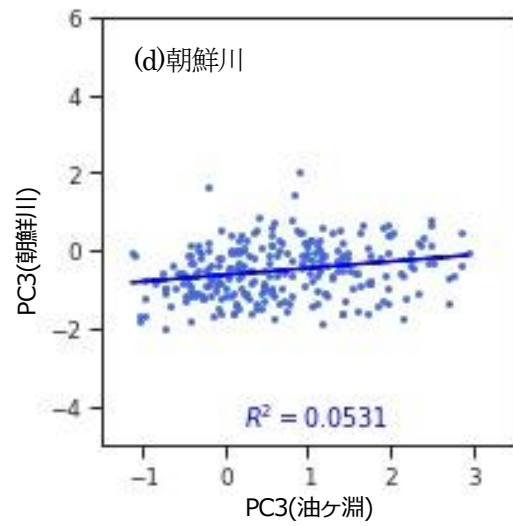
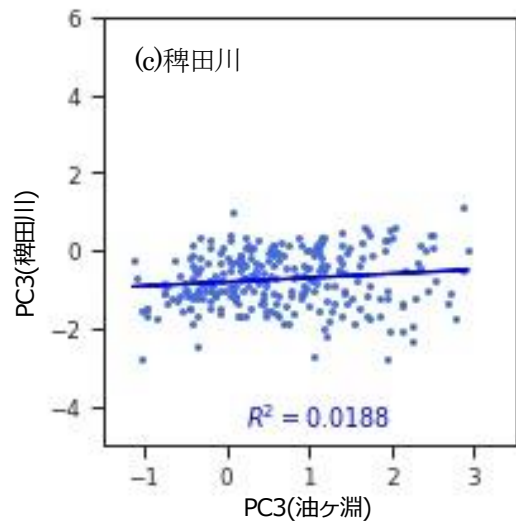
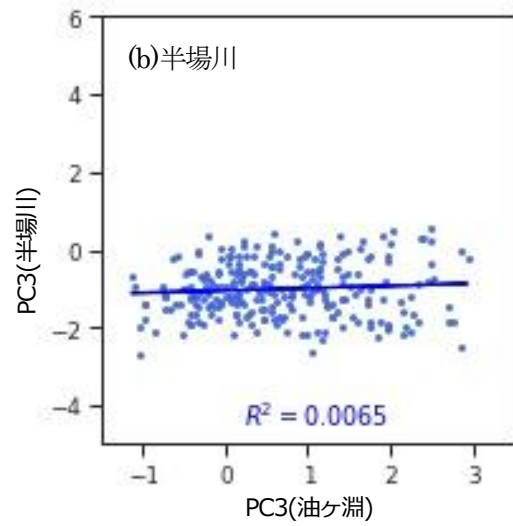
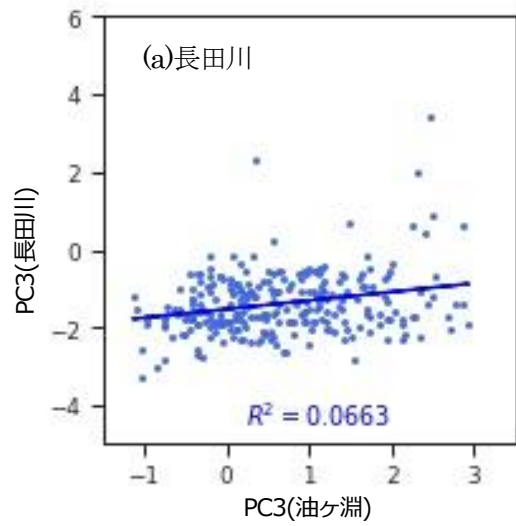


図7 油ヶ淵と各河川のPC3の相関

生活様式の変化に由来すると考えられる。油ヶ淵と各河川におけるPC2の相関図を図6に示す。いずれの河川とも油ヶ淵との相関が見られる。下流の新川や高浜川に比べて上流の河川との相関が比較的強く、特に長田川との相関が最も強い。これは他の河川に比べて長田川の流量が多いため、その影響が表れやすいと考えられる。このことから、油ヶ淵の総合的な汚濁は上流の各河川から流れ込みが多く、中でも比較的長田川の影響が大きいと推測される。

3.1.3 PC3

PC3はpH、DO、ECの負荷量が正に大きく、TNとTPが負の負荷量を有している。PC3の解釈には検討の余地があるが、pHとECが大きく関わることからPC3は海水の流入を表す可能性がある。経時変化や月次変化については図3(c)と図4(c)に示すように特徴的な傾向は見られない。また、油ヶ淵と各川とのPC3の相関を図7に示す。下流の河川(新川、高浜川)とは弱い相関が見られるが、上流河川は下流河川に比べてきわめて相関が弱い。このことから、PC3は上流河川でなく油ヶ淵と下流河川との関係性を示すと考えられる。

3.2 COD, TN, TPと主成分の関係

3.2.1 COD

CODと各主成分の相関係数を図8に示す。特に相関が強いのは総合汚濁指標のPC2である。次いでPC9との相関が強い。PC9の因子負荷量においてはCODが正の大きな値を、BODが負の大きな値を有している。CODとBODはともに水中の有機物に由来する汚濁因子だが、化合物種による生化学酸化と化学酸化の反応性に応じてそれぞれの値は異なると考えられる⁷⁾。PC9は

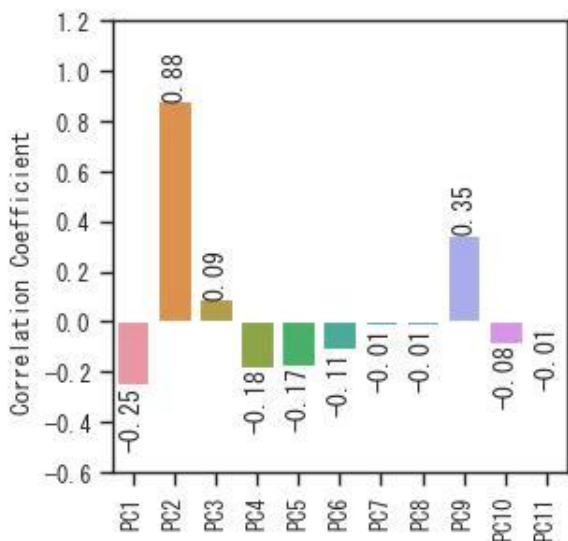


図8 CODと主成分の相関係数

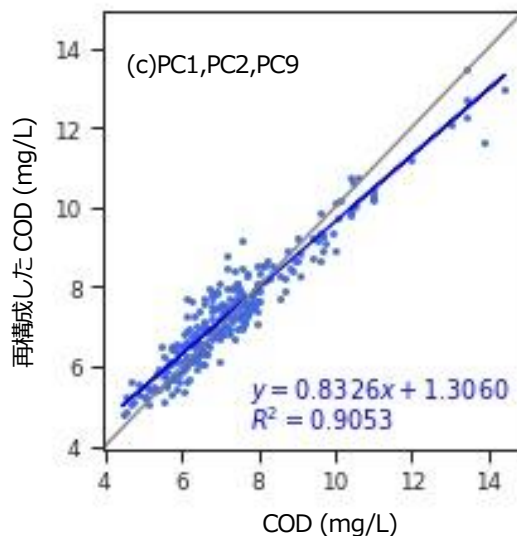
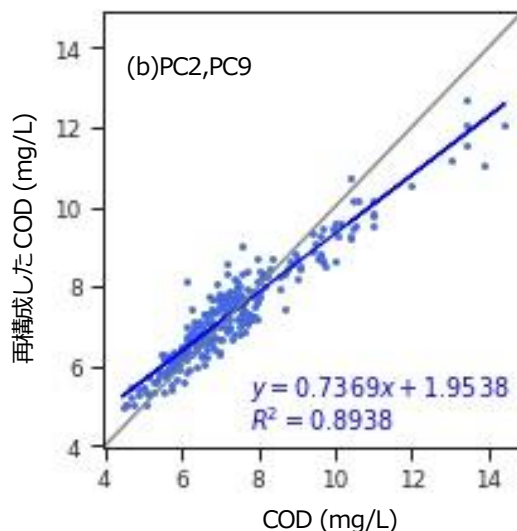
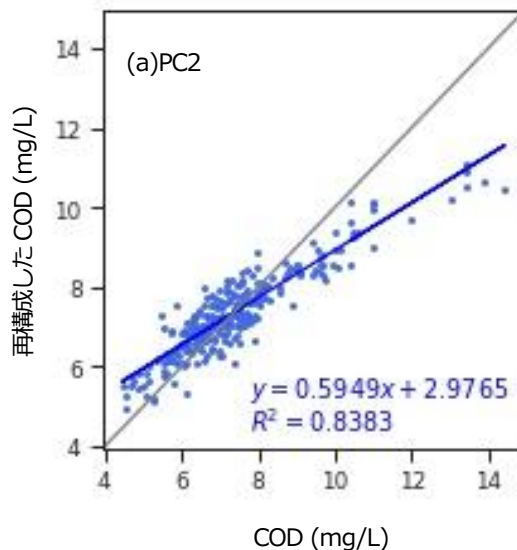


図9 CODと主成分で再構成したCODの相関

そのような要因から生じるCODとBODとの差を補正する因子と考えられる。

さらにCODと主成分の関係について考察するため、注目する主成分を選びCODへの再構成を行い、元のCODと比較した。そのうち、主成分を1個から3個選んだ場合に最も決定係数が高くなる組み合わせでのCODと再構成CODの相関を図9に示す。PC2のみで逆変換を行った場合の決定係数は0.8383である。さらにPC9とPC1を加えることで決定係数は0.9053まで上昇する。PC2の寄与が特に大きいことから、油ヶ淵におけるCODの大部分は総合的な汚濁に含まれると考えられる。また、3.1.2にて考察したようにPC2は上流河川からの流入の影響が大きく、CODに対しても同様と考えられる。PC2にはSSや透視度のような水の外観に関わるデータが寄与すること、季節変動も見られることから、油ヶ淵や周辺河川の外観を長期的に観察してごりの由来を検討することでPC2の由来を特定できると考えられる。また、現在も油ヶ淵のごり改善として高浜川水門の運用や代掻き対策が推進されているが、その施策がごりだけでなくCODに対しても改善効果をもたらすことが期待できる。

3.2.2 TN

TNと各主成分の相関係数を図10に示す。特に相関が強い主成分はPC1、PC3、PC8である。なお、PC8の因子負荷量はTNが特に大きいだけである。従って、PC8は他の主成分で説明できないTNの要素を表す因子と考えられる。

CODと同様に元のTNと再構成したTNの比較した結果を図11に示す。PC1のみで再構成した際の回帰直線の決定係数は、0.7379であり、さらにPC3とPC8を加えることで0.9195まで上

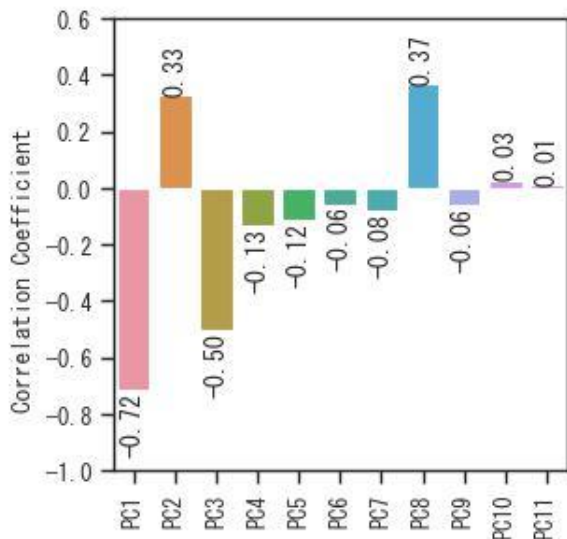
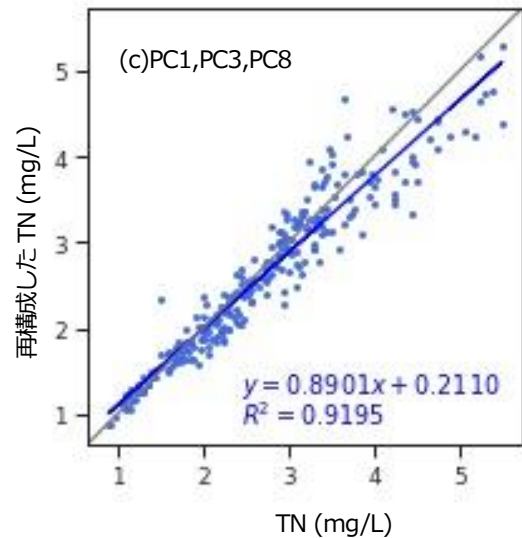
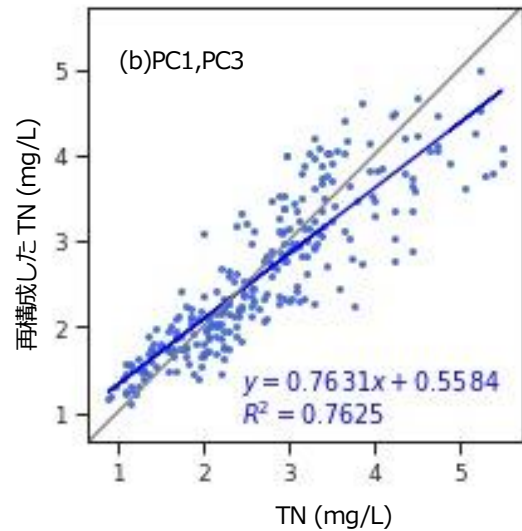
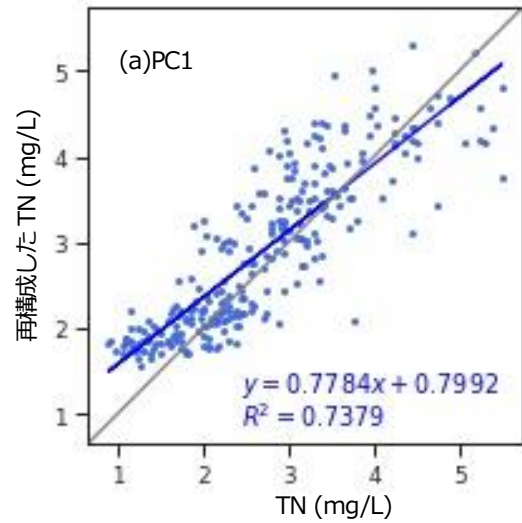


図10 TNと主成分の相関係数

図11 TNと主成分で再構成したTNの相関

昇する。総合的な汚濁指標であるPC2の影響が比較的小さく、温度に関わるPC1や上流河川との関係が小さいPC3の影響が見られることから、油ヶ淵のTNはCODとは異なり外部以外の寄与が大きい可能性がある。

3.2.3 TP

TPと各主成分の相関係数を図12に示す。この図よりTPに対してPC2とPC6が強い正の相関を、PC3がやや強い負の相関を示す。PC6はTPの負荷量が多い主成分であり、他の主成分で説明できない何らかのTPの要素を表す因子と考えられる。PC6の

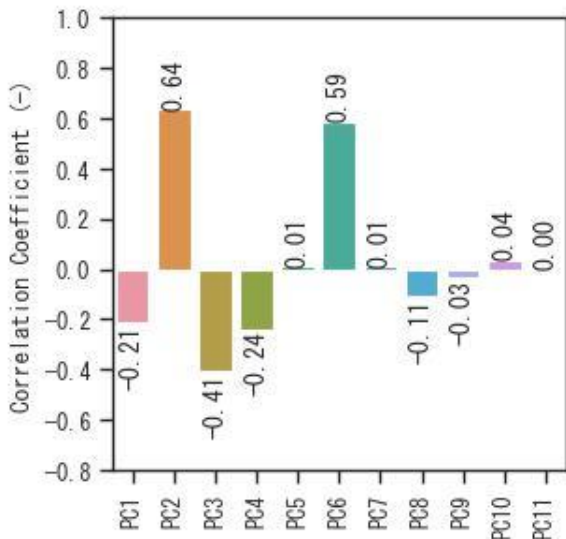


図 12 TP と主成分の相関係数

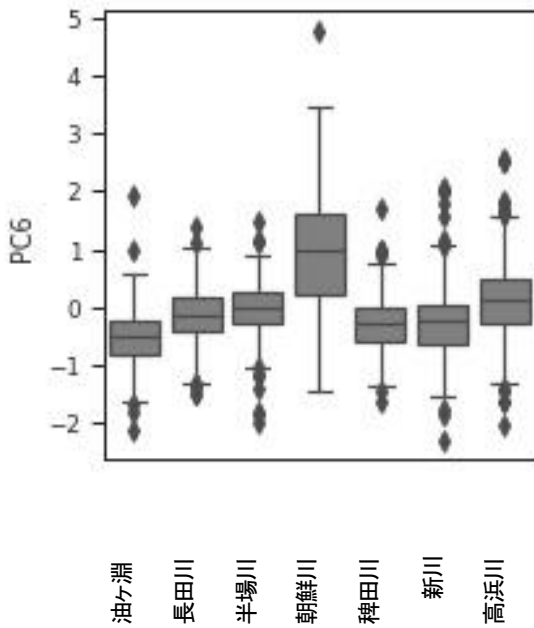


図 13 場所ごとの PC6 の分布

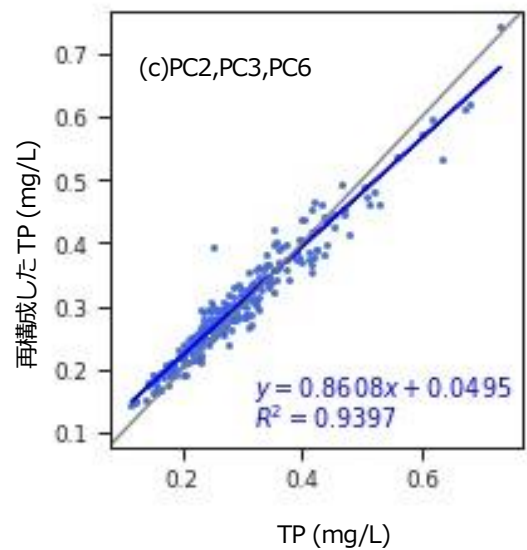
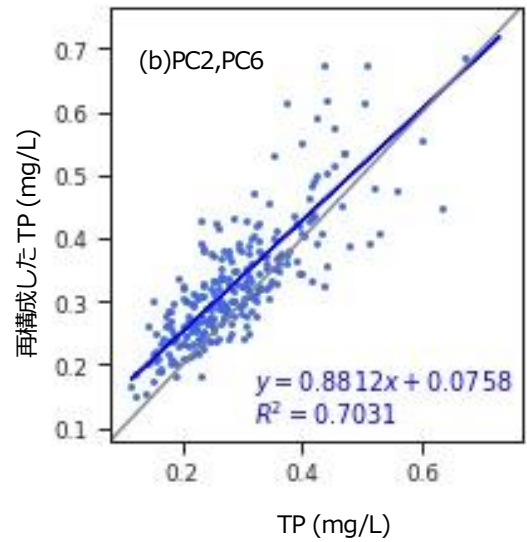
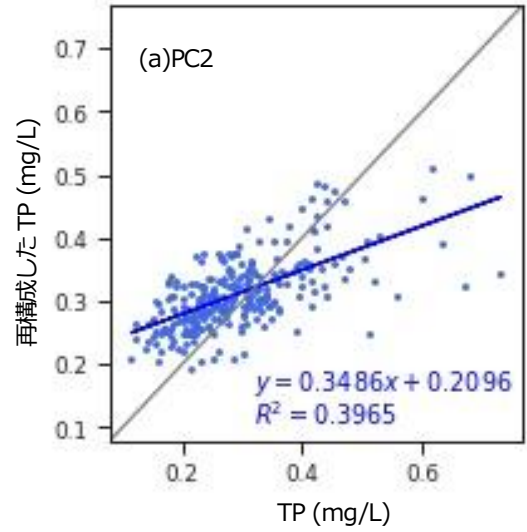


図 14 TP と主成分で再構成した TP の相関

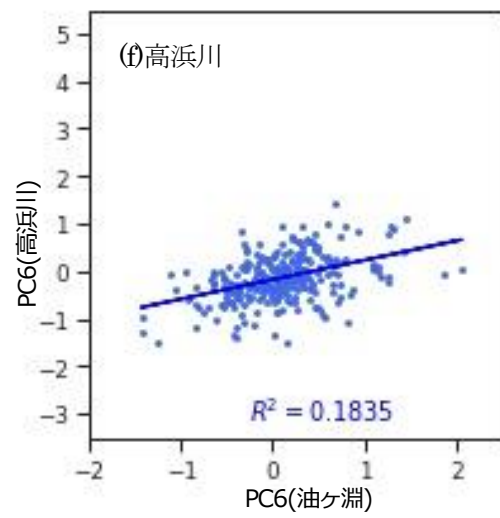
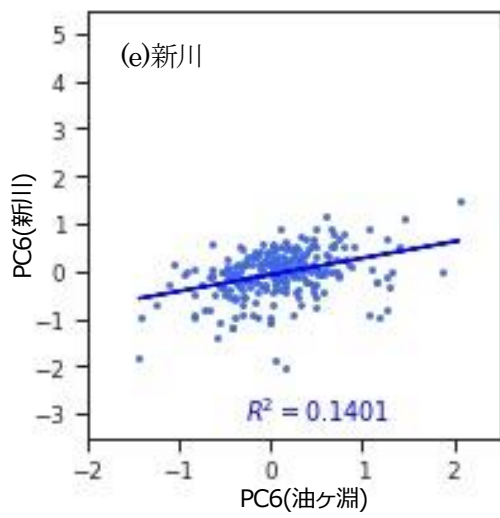
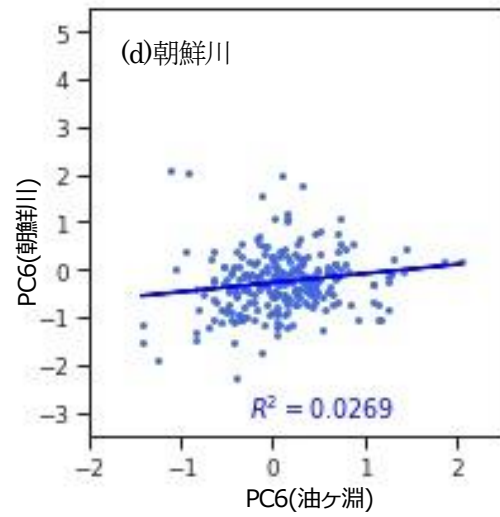
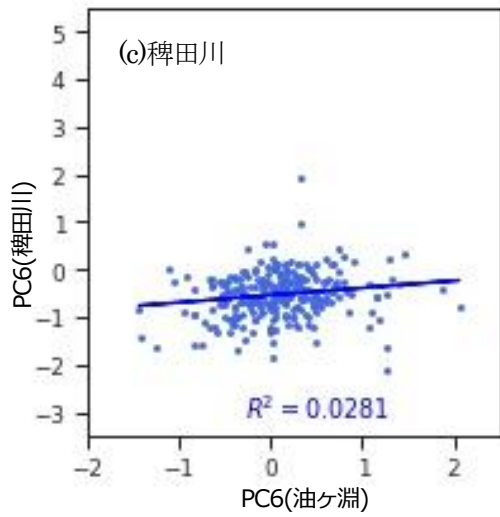
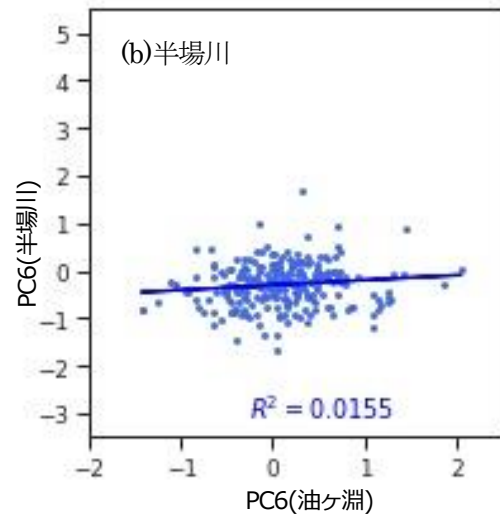
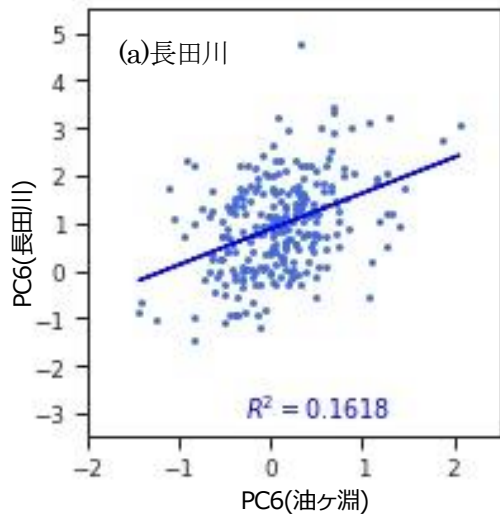


図 15 油ヶ淵と各河川の PC3 の相関

場所ごとの分布については図13に示す。

CODと同様に元のTPと再構成したTPを比較した結果を図14に示す。PC2, PC3, PC6の組み合わせでの回帰直線の決定係数は0.9397であり、TPはこの3つの主成分で概ね表現できている。

図13に示したように、PC6は長田川で特異的に高い傾向が見られることから、PC6の示すTPの影響は主に長田川に由来することが考えられる。さらに図15に油ヶ淵と各河川のPC6の相関を示した。油ヶ淵と長田川及び油ヶ淵と下流河川(新川及び高浜川)との間でPC6の相関が見られるが、それらに比べ長田川以外の上流の河川では相関がきわめて小さい。このことからPC6は主に長田川を由来とするTPの因子であり、TPが長田川から油ヶ淵を経て高浜川、新川に流れ込む過程を表していると考えられる。

5 結 論

油ヶ淵及び周辺河川の水質データに対し主成分分析による解析を行いCOD, TN, TPの由来について考察した。その結果、CODは浮遊物質を含む総合的な汚濁の一部として上流河川から流入すること、TNは流入以外の因子が多くを占めていること、TPはCODと同様に総合的な汚濁の一部として流入する他に、長田川から特異的に流入していることが示された。

今後、本解析をより生かすため、各主成分と河川に関わる事柄の関係を明らかにして汚濁対策の一助とすることを検討したい。

6 文 献

- 1) 愛知県建設局河川課 油ヶ淵水質浄化促進行動計画 2021-2030(油ヶ淵ルネッサンス計画), <https://www.pref.aichi.jp/soshiki/kasen/seiryu-renaisance.html> (2024. 2. 9)
- 2) 神谷 宏, 大城 等, 嵯峨友樹, 佐藤紗知子, 野尻由香里, 岸 真司, 藤原敦夫, 神門利之, 菅原庄吾, 井上徹教, 山室真澄 浅い湖沼における滞留時間と栄養塩濃度が湖内でのCOD生産に与える影響, 応用生態工学, 17(2), 79-88 (2015)
- 3) 奥野忠一, 久米 均, 芳賀敏郎, 吉澤 正 多変量解析法, 日科技連(1971)
- 4) 長谷川健 スペクトル定量分析, 講談社サイエンティフィック (2005)
- 5) 古本勝弘, 竹本陽一, 蒔田明弘, 立石ヒロ子 川原大地における水質変動特性と底泥からの栄養塩溶出について, 水工学論文集, 43, 1001-1006 (1999)
- 6) 松梨史郎, 井野場誠治, 下垣 久, 宮永洋一 手賀沼に

おける流動・水質・底質の時空間変動シミュレーションと底泥からの栄養塩溶出の水質への影響, 土木学会論文集, 712/II-60, 161-173 (2002)

- 7) 植松喜稔 産業排水中の有害物質とその試験法 安全工学, 7(3), 243-251(1968)