

<報文>

## 網走湖流域における土地利用と栄養塩や 主要イオン等の河川水質との関係\*

三上英敏\*\*・五十嵐聖貴\*\*

キーワード ①網走湖流域 ②農用地面積率 ③硝酸態窒素 ④リン酸態リン ⑤主要イオン

### 要 旨

富栄養化している網走湖の流域河川において、出水の影響が少ない環境下で39地点の調査を行い、土地利用と各水質との関連について考察を行った。農用地面積率と硝酸態窒素濃度の他、農用地面積率と各主要イオン濃度との間に強い関係が見られた。特に主要イオンの中では、硫酸イオンとの関係が強く、網走湖流域では、家畜排せつ物に加えて化学肥料の影響を強く受けて硝酸態窒素濃度が上昇すると推察された。一方、リン酸態リンは、農用地面積率にあまり関係なく流出してくる傾向が見られた。リン酸態リンは、懸濁態リンや亜硝酸態窒素等との関連が深く、土壌粒子等の懸濁物が流出しやすい地点や流域に還元環境が出現しやすい地点で濃度が高くなる傾向が推察された。

### 1. はじめに

網走湖は、北海道東部のオホーツク海に面しており、一級河川網走川の下流部に形成された湖面積 33 km<sup>2</sup>の汽水湖である(図1)<sup>1)</sup>。網走湖の主な流入河川は、網走川、女満別川、トマップ川、サラカオーマキン川である。このうち、網走川が最大流入河川である。網走湖は北海道内で最大の流域をもつ湖沼であるために、栄養塩が長期にわたり流入蓄積してきたと考えられている。そして、網走湖は、その最深部が流出部より深いことから、満潮時に逆流してきた海水が湖内下部に侵入することにより、慢性的な密度成層を形成した部分循環湖である。そのため、湖内下層部は、嫌氣的であり大量の硫化物や無機栄養塩(アンモニア態窒素、リン酸態リン)が溶存状態で蓄積している。以下、嫌氣的な網走湖の下層部を嫌気層、好氣的な上層部を好気層と記述する。

流域からの栄養塩類の流入と嫌気層からの供給により、網走湖は比較的以前から、好気層の栄養塩レベルが高く典型的な富栄養湖であった。従って、夏期になると藍藻類の増殖が激しい。

一方、網走湖では古くから水産業も盛んで、独特の汽水の環境により魚種も豊富でかつ水産資源に富んでいる。特に網走湖のシジミは高価で取り引きされ、さらにワカサギは豊富な漁獲量だけでなく、全国の他湖沼への卵の供給基地としての役割も担っており、網走湖がもたらす水産面での経済効果は大きい<sup>2)</sup>。

このように網走湖は、部分循環湖として特異的な性状をもっていること、広大な流域を有していること、重要な産業資源を有していること等から、古くから環境保全や水産業に対する調査や研究が実施されてきた<sup>2), 3), 4), 5)</sup>。

しかしながら、網走湖では湖沼の環境基準(A-IV)が類型指定されているにも関わらず、その基準の達成には至っていないのが現状である。また、夏季の藍藻類の増殖が漁業に与える影響も懸念されている。

そこで我々は、北海道内で最大の流域面積を有する網走湖に対して、その流域の窒素やリンの供給源についての検討を深めるために、出水の影響の少ない時に、多地点調査を実施して、流域の土地利用と栄養塩や主要イオン等の水質との関係について調査し考察を行った。

\* Relationship between land use and river water qualities such as nutrients and major ions in the basin of Lake Abashiri

\*\* Hidetoshi Mikami, Seiki Igarashi (地方独立行政法人 北海道立総合研究機構 環境・地質研究本部 環境科学研究センター) Hokkaido Research Organization, Environmental and Geological Research Department, Institute of Environmental Sciences

## 2. 方法

図2に調査地点の位置、表1に調査地点の一覧表を示した。網走湖に流入する、網走川、女満別川、トマップ川、サラカオーマキキン川の4河川に計39の調査地点を設けた。それぞれの流入河川の網走湖に最も近い地点は、網走川治水橋 (A-0)、女満別川女満別橋 (M-1)、トマップ川トマップ橋 (T-1)、サラカオーマキキン川住吉1号橋 (S-1) である。

資料<sup>6)</sup>によると、これらのおおよその流量比は、流量の最も小さいトマップ川トマップ橋 (T-1) を1とすると、網走川治水橋 (A-0) : 女満別川女満別橋 (M-1) : トマップ川トマップ橋 (T-1) : サラカオーマキキン川住吉1号橋 (S-1) は、155 : 17 : 1 : 4 であり、網走川本流からの流入量は全体の88%に及ぶ。ただし、全窒素 (TN) の負荷量の比となると、おおよそ、28.3 : 14.2 : 1 : 0.7 となり、女満別川の負荷量も網走川の約半量程度と大きくなり、栄養塩負荷の影響力が大きいと考えられる。

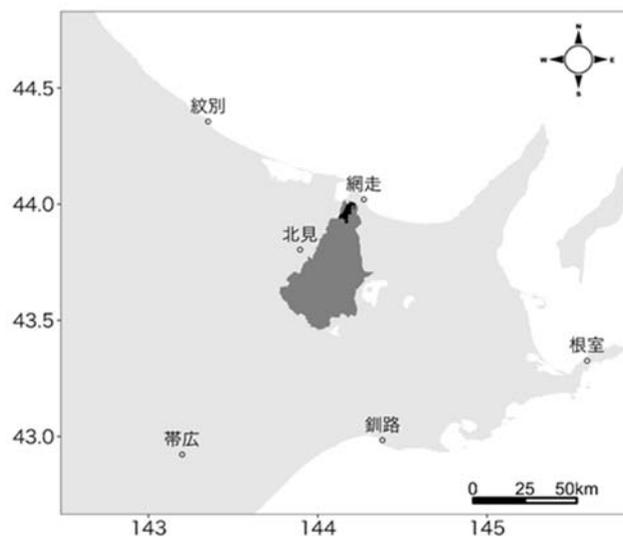


図1 網走湖とその流域 (濃い黒の塗りつぶしは網走湖を示し、そのまわりの薄い黒の塗りつぶしは網走湖の流域を示す)

また、トマップ川トマップ橋 (T-1) は、流量がこの4河川では最も小さいが、TN濃度が高いこともあって、TN負荷量となると、サラカオーマキキン川よりは大きな値となる。そのような事情もあり、網走川治水橋 (A-0) より上流側には29地点、女満別川女満別橋 (M-1) より上流側には5地点、トマップ川トマップ橋 (T-1) より上流側には1地点の調査地点を設けて、計39地点で調査を実施した。

調査は2018年7月において、透視度が 30 cm以上の濁りの無い状況を確認してから実施した。試料の採取は、ス

テンレス製採水缶を使用して橋上から行った。試料水は、よく共洗いを行った専用のポリ瓶に注ぎ、直ちに冷蔵暗条件で保管した。そして、採水と同時に、あらかじめ 420 °Cで焼いたワットマンGF/Fフィルターを使用して濾過作業を行い、原水試料の他、濾液試料を得て直ちに冷蔵暗条件で保管した。

河川水の採水時、溶存酸素計 (YSI model85) と pH計 (TDA IM-22P) を使用して、水温、溶存酸素濃度、電気伝導度及びpHの測定を行った。採水及び濾過作業等を終了後、流量測定を行った。河川流量は主な河川断面での水深と流速を測定し、断面流量を計算した。

冷蔵暗条件で当センターに持ち帰った試料の内、濾液試料を用いてただちにアルカリ度と 260 nm紫外外部吸光度 (UV260nm) を測定した。アルカリ度は、N/100 硫酸の滴定によるpH4.8を終点として定量した。また、全39地点のpHは6.89から8.10の範囲 (平均7.43) にあり、全ての試料はほぼ中性であったので、アルカリ度の値を重炭酸イオン ( $\text{HCO}_3^-$ ) 濃度とした<sup>7)</sup>。UV260nmについては、濾液試料をそのまま用いて 260 nmの吸光度を測定した。

それ以外の濾液試料と原水試料は、センターに持ち帰った後、ただちに凍結し分析に使用するまで保存した。

TN及び全リン (TP) の濃度は原水試料を使用し、溶存態窒素 (DN) 及び溶存態リン (DP) の濃度、硝酸態窒素 ( $\text{NO}_3\text{-N}$ )、亜硝酸態窒素 ( $\text{NO}_2\text{-N}$ )、アンモニア態窒素 ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) 及びリン酸態リン ( $\text{PO}_4\text{-P}$ ) の濃度は濾液試料を使用し、BL-TEC製QuAAtro-2HRを用いたフロー分析システムにて定量した。

TN濃度の測定結果とDN濃度の測定結果の差を、懸濁態窒素 (PN) 濃度とし、同様にTP濃度とDP濃度の差を懸濁態リン (PP) 濃度として解析に使用した。また、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の各濃度の総和は溶存無機態窒素 (DIN) 濃度であるが、DN濃度とDIN濃度の差を溶存有機態窒素 (DON) 濃度として解析に使用した。同様に、DP濃度と $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度の差を、溶存有機態リン (DOP) 濃度として解析に使用した。

主要陰イオンである塩化物イオン ( $\text{Cl}^-$ ) と硫酸イオン ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) の濃度、及び主要陽イオンであるナトリウムイオン ( $\text{Na}^+$ )、カリウムイオン ( $\text{K}^+$ )、カルシウムイオン ( $\text{Ca}^{2+}$ )、マグネシウムイオン ( $\text{Mg}^{2+}$ ) の濃度は、原水試料を0.2  $\mu\text{m}$ のフィルターでろ過して懸濁物を取り除いた後、イオンクロマトグラフ法にて定量を行った。

網走湖の全流域と各調査地点の流域界や土地利用解析については、北海道立総合研究機構環境・地質研究本部が2014年度に整備したデータ<sup>8)</sup>を活用し、一部データの更新を行った。100 mメッシュごとに、どの河川の流域界に属するかについての情報が整備された流域メッシュ<sup>9)</sup>により、網走湖や各河川地点の流域界を決めた。

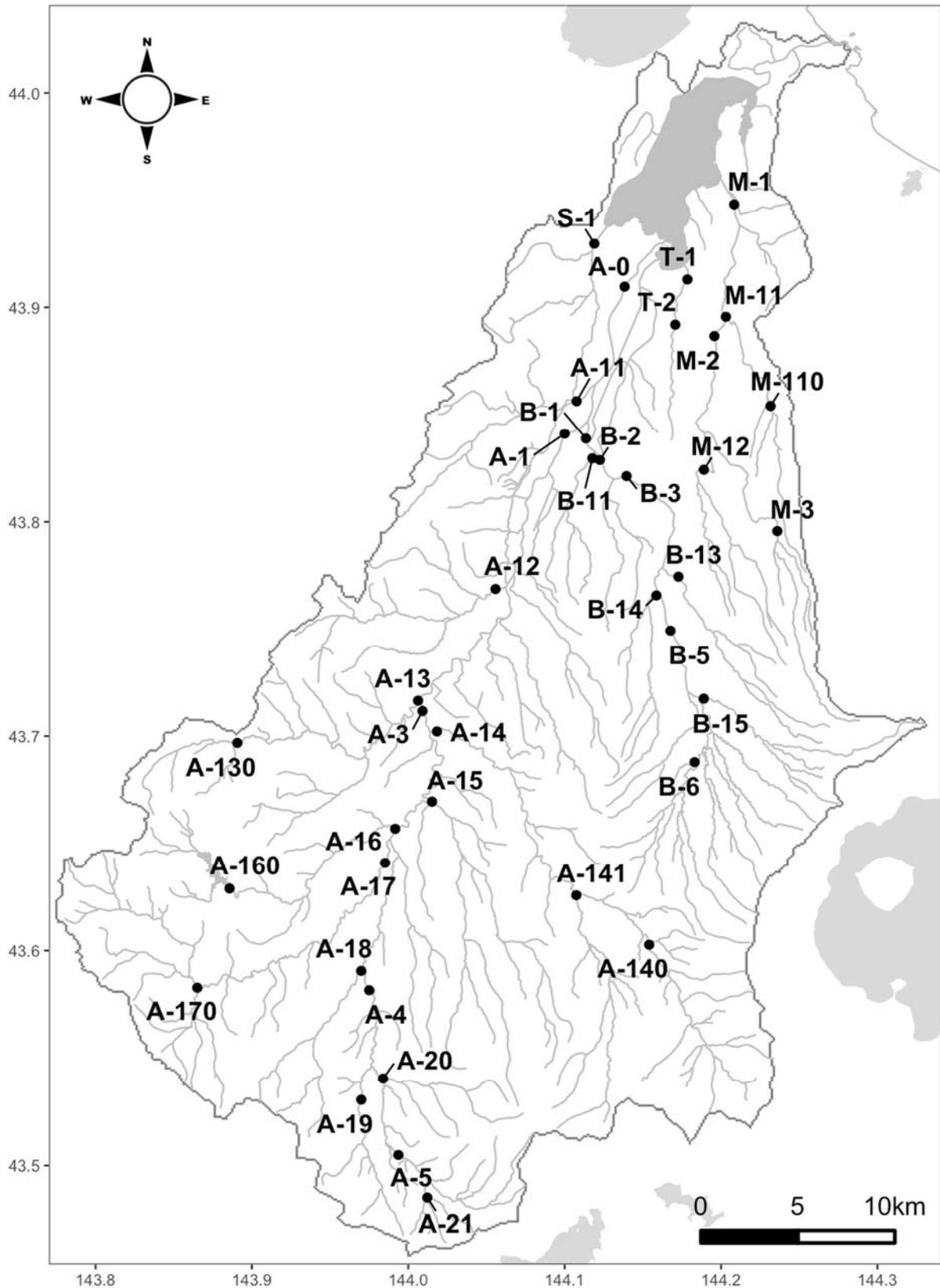


図2 調査地点

表1 調査地点一覧表

地点記号	河川名	橋名等	橋名のカナ	緯度 (度)	経度 (度)
A - 0	網走川	治水橋	ジスイ	43.90960	144.13833
A - 1	網走川	美禽橋	ミドリ	43.84117	144.10000
A - 3	網走川	達姫橋	タッコブ	43.71165	144.00910
A - 4	網走川	相生橋	アイオイ	43.58151	143.97501
A - 5	網走川	北釧橋	ホクセン	43.50472	143.99365
A - 11	木禽川	木禽橋	キキン	43.85638	144.10762
A - 12	栄森川	三宝橋	サンポウ	43.76868	144.05576
A - 13	達姫川	永代橋	エイダイ	43.71648	144.00626
A - 130	達姫川	三陽橋	サンヨウ	43.69684	143.89067
A - 14	津別川	緑栄橋	リョクエイ	43.70215	144.01834
A - 140	津別川	層雲橋	ソウウン	43.60271	144.15402
A - 141	センウンツベツ川	天神橋	テンジン	43.62583	144.10742
A - 15	オンネキキン川	恩根木禽橋	オンネキキン	43.66956	144.01518
A - 16	チミケップ川	展開橋	テンカイ	43.65693	143.99164
A - 160	チミケップ川	鹿鳴橋	ロクメイ	43.62898	143.88571
A - 17	ケミチャップ川	櫻橋	サクラ	43.64100	143.98516
A - 170	ケミチャップ川	二又橋	フタマタ	43.58269	143.86507
A - 18	ドードロマップ川	真布橋	マップ	43.59056	143.96989
A - 19	ユウ谷の沢川	楓橋	カエデ	43.53031	143.96994
A - 20	ホロカアバシリ川	古丹橋	コタン	43.54025	143.98389
A - 21	網走川上流支流			43.48509	144.01215
B - 1	美幌川	花見橋	ハナミ	43.83892	144.11360
B - 2	美幌川	美幌橋	ビホロ	43.82885	144.12250
B - 3	美幌川	稲美橋	イナミ	43.82132	144.13956
B - 5	美幌川	豊富橋	トヨトミ	43.74918	144.16765
B - 6	美幌川	(美幌川上流)		43.68790	144.18308
B - 11	魚無川	平和橋	ヘイワ	43.82963	144.11772
B - 13	福豊川			43.77441	144.17275
B - 14	登栄川	福栄橋	フクエイ	43.76567	144.15864
B - 15	古梅川	東橋	アズマ	43.71740	144.18896
M - 1	女満別川	女満別橋	メマンベツ	43.94803	144.20838
M - 2	女満別川	三好橋	ミヨシ	43.88663	144.19572
M - 3	女満別川	美女橋	ビジョ	43.79566	144.23595
M - 11	パナクシュベツ川	巴橋	トモエ	43.89562	144.20308
M - 110	パナクシュベツ川	日進橋	ニッシン	43.85414	144.23163
M - 12	田中川	第38号橋	ダイ38ゴウ	43.82427	144.18900
S - 1	サラカオーマキキン川	住吉1号橋	スミヨシ1ゴウ	43.92961	144.11895
T - 1	トマップ川	トマップ橋	トマップ	43.91296	144.17846
T - 2	トマップ川	空港橋	クウコウ	43.89194	144.17073

土地利用データについては、各利用区分（田，農用地，森林，荒地，建物用地等）で分けられた平成26年度版の100 mメッシュデータ<sup>10)</sup>を利用した。また，人口については国勢調査のデータ<sup>11)</sup>，家畜頭数については農環研の1995年の農業統計データ<sup>12), 13), 14)</sup>を使用した。

### 3. 結果

表2に網走湖全体と各地点における流域面積と土地利用面積を，表3に網走湖全体と各河川地点における人口と飼育家畜頭数についての結果を示した。

網走湖の流域面積は，国土数値情報等の解析から，網走湖とその他の湖沼及び河川エリアも含めて，1373.9 km<sup>2</sup>と計算された。その内，森林の割合が最も高く約71%にも及んでいた。田と畑等の農用地を合わせた農業に利用されている土地の割合は約22%でありそのほとんどは田以外の農用地であった。森林と農用地を合わせた割合は，全流域の93%を占めていた。

網走川本流に合流する支流の流域面積について，網走湖内に直接流入する河川を除き，美幌川，津別川，ケミチャップ川，達媚川等が大きい。それらの網走川合流前の調査地点の流域面積は，それぞれ美幌川花見橋（B-1）が218.3 km<sup>2</sup>，津別川緑栄橋（A-14）が151.1 km<sup>2</sup>，ケミチャップ川櫻橋（A-17）が106.4 km<sup>2</sup>，達媚川永代橋（A-13）が88.0 km<sup>2</sup>であった。

網走湖に直接流入する主たる流入河川は，網走川（本流），女満別川，サラカオーマキキン川，トマップ川であるが，それぞれの網走湖流入前の調査地点の流域面積は，網走川治水橋（A-0）で1120.0 km<sup>2</sup>，女満別川女満別橋（M-1）で118.8 km<sup>2</sup>，サラカオーマキキン川住吉1号橋（S-1）で38.3 km<sup>2</sup>，トマップ川トマップ橋（T-1）で16.6 km<sup>2</sup>であった。

各河川地点の中で，田以外の農用地面積の割合が特に大きいのは，トマップ川上流の空港橋（T-2）の81.5%，その下流のトマップ橋（T-1）の78.9%，女満別川支流のパナクシュベツ川巴橋（M-11）や日進橋（M-110）の70.4%や67.7%であった。

網走湖全流域における人口は31811人，飼育されている家畜は，乳用牛6517頭，肉用牛6892頭，ブタ11926頭，鶏44047羽と計算された。各河川地点の中で，最も人口密度が大きいのは，美幌川支流魚無川平和橋（B-11）の543.6人/km<sup>2</sup>であった。また，各飼育家畜の密度が最も大きいのは，乳用牛で網走川支流木禽川木禽橋（A-11）の29.6頭/km<sup>2</sup>，肉用牛でトマップ川トマップ橋（T-1）の18.3頭/km<sup>2</sup>，ブタでトマップ川空港橋（T-2）の153.5頭/km<sup>2</sup>，鶏でサラカオーマキキン川住吉1号橋（S-1）の

563.0羽/km<sup>2</sup>であった。

富栄養化している網走湖の環境を検討する際，窒素やリンの栄養塩について検討することが重要である。また，特に，NO<sub>3</sub>-NやNH<sub>4</sub>-N等の溶存無機態窒素やPO<sub>4</sub>-Pの溶存無機態リンは，湖内では直接植物プランクトンに利用される形態の窒素やリンであり，湖内の内部生産に与える流域の影響を考慮する際，特に重要となる。

図3に，全39の調査地点におけるTN濃度とNO<sub>3</sub>-N濃度との関係について原点を通過する回帰直線とともに示した。その結果，両者には高い相関が見られた。そしてその傾きは0.943と，TNのうち全体的に94%がNO<sub>3</sub>-Nであるという結果になった。

図4に，同様にTN濃度とNH<sub>4</sub>-N濃度との関係について示した。全体的にTNのほとんどがNO<sub>3</sub>-NであるためNH<sub>4</sub>-Nは多くの地点で低濃度であった。しかし，美幌川花見橋（B-1）のみ0.18 mgN/Lと突出して濃度が高く，TNの内9%程度を占めていた。

図5に，同様にTP濃度とPO<sub>4</sub>-P濃度との関係について原点を通過する回帰直線とともに示した。その結果，両者にはそれほど高い相関が見られなかったが，その傾きは0.593と概略的にTPのうち約59%がPO<sub>4</sub>-Pであるという結果になった。

図6に，全調査地点におけるNO<sub>3</sub>-N濃度とPO<sub>4</sub>-P濃度の分布図を示した。NO<sub>3</sub>-N濃度に関して，トマップ川，女満別川，美幌川で，高濃度の地点が存在していた。トマップ川ではトマップ橋（T-1）で7.2 mgN/L，空港橋（T-2）で7.9 mgN/Lと，特に高濃度であった。

PO<sub>4</sub>-P濃度に関しては，木禽川木禽橋（A-11）で0.90 mgP/Lと最も高濃度で観測された。そのほか，魚無川平和橋（B-11）も比較的濃度は高かったが，その他については同様な丸の大きさとなっていた。NO<sub>3</sub>-N濃度と異なり，網走川美禽橋（A-1）より上流の網走川本流や支流でも，一定程度の濃度を有していることがわかった。

各地点のヘキサダイアグラムについて図7及び図8に分けて示した。どのような水溶液中でも陰イオンと陽イオンの価数は等しくなくてはならず電気的中性の条件が満たされている<sup>15)</sup>。また，一般の陸水環境中，主要な陰イオンに，Cl<sup>-</sup>，SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>，HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>があり，主要な陽イオンに，Na<sup>+</sup>，K<sup>+</sup>，Ca<sup>2+</sup>，Mg<sup>2+</sup>があり，計7種のイオンが主要であることが知られている。これら7種のイオンで，通常は陰イオンと陽イオンのそれぞれの当量濃度の和はつりあいがとれている。しかし，人為的な影響が加わると，陰イオンの中でもNO<sub>3</sub>-Nである硝酸イオン（NO<sub>3</sub><sup>-</sup>）の陰イオンの寄与も大きくなっていく。

表2 各地点と網走湖全体の流域面積と土地利用面積

湖沼河川名	地点名		流域面積	森林	ゴルフ場	田	農用地 (田以外)	荒地	建物用地	道路・ 鉄道	河川・ 湖沼・ 海浜	その他 の用地
			km <sup>2</sup>	km <sup>2</sup>								
網走川	治水橋	A - 0	1120.0	881.3	0.0	6.9	179.7	24.1	12.5	0.9	8.6	6.1
網走川	美禽橋	A - 1	823.9	696.2	0.0	1.0	99.0	15.1	5.6	0.0	4.8	2.2
網走川	達媚橋	A - 3	570.5	510.7	0.0	0.2	44.4	10.4	2.2	0.0	1.6	1.1
網走川	相生橋	A - 4	95.6	88.2	0.0	0.0	4.0	3.0	0.4	0.0	0.0	0.1
網走川	北釧橋	A - 5	31.9	29.8	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0
木禽川	木禽橋	A - 11	41.0	22.3	0.0	0.3	15.4	1.6	0.7	0.2	0.0	0.4
栄森川	三宝橋	A - 12	54.5	49.1	0.0	0.0	3.7	1.6	0.0	0.0	0.1	0.0
達媚川	永代橋	A - 13	88.0	83.2	0.0	0.1	4.4	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
達媚川	三陽橋	A - 130	22.0	20.9	0.0	0.0	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
津別川	緑栄橋	A - 14	151.1	135.7	0.0	0.0	10.9	2.9	0.8	0.0	0.0	0.7
津別川	層雲橋	A - 140	51.8	49.4	0.0	0.0	0.7	1.3	0.0	0.0	0.0	0.4
センウンツベツ川	天神橋	A - 141	45.3	42.0	0.0	0.0	1.9	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0
オンネキキン川	思根木禽橋	A - 15	76.0	66.8	0.0	0.0	8.8	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
チミケツ川	展開橋	A - 16	52.4	48.7	0.0	0.0	2.3	0.2	0.1	0.0	1.1	0.0
チミケツ川	鹿鳴橋	A - 160	20.4	19.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0
ケミチャップ川	櫻橋	A - 17	106.4	98.7	0.0	0.0	5.2	2.3	0.0	0.0	0.0	0.1
ケミチャップ川	二又橋	A - 170	44.1	42.0	0.0	0.0	1.6	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0
ドードロマップ川	真布橋	A - 18	30.1	30.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ユウ谷の沢川	楓橋	A - 19	18.8	18.7	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
ホロカアバシリ川	古丹橋	A - 20	19.4	17.1	0.0	0.0	1.4	0.9	0.1	0.0	0.0	0.0
網走川支流		A - 21	4.0	3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
美幌川	花見橋	B - 1	218.3	157.9	0.0	0.3	45.4	7.1	5.0	0.2	1.0	1.4
美幌川	美幌橋	B - 2	202.7	154.6	0.0	0.3	37.5	7.0	1.8	0.0	0.8	0.7
美幌川	稲美橋	B - 3	179.6	141.6	0.0	0.2	30.0	6.6	0.6	0.0	0.6	0.1
美幌川	豊富橋	B - 5	112.4	95.8	0.0	0.0	9.9	6.2	0.1	0.0	0.3	0.0
美幌川	(美幌川上流)	B - 6	3.7	3.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
魚無川	平和橋	B - 11	13.9	3.2	0.0	0.0	7.8	0.1	2.4	0.1	0.0	0.3
福豊川		B - 13	28.7	23.2	0.0	0.0	5.2	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0
登栄川	福栄橋	B - 14	18.3	17.4	0.0	0.0	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
古梅川	東橋	B - 15	19.8	16.2	0.0	0.0	1.0	2.3	0.0	0.0	0.3	0.0
女満別川	女満別橋	M - 1	118.8	46.3	0.4	0.1	69.4	0.9	1.3	0.0	0.1	0.3
女満別川	三好橋	M - 2	66.2	31.1	0.0	0.0	34.1	0.3	0.6	0.0	0.0	0.1
女満別川	美女橋	M - 3	18.4	15.1	0.0	0.0	3.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
パナクシュベツ川	巴橋	M - 11	29.1	7.8	0.1	0.0	20.5	0.1	0.5	0.0	0.0	0.1
パナクシュベツ川	日進橋	M - 110	13.3	4.0	0.0	0.0	9.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0
田中川	第38号橋	M - 12	23.5	11.3	0.0	0.0	11.7	0.2	0.2	0.0	0.0	0.1
サラカオーマキキン川	住吉1号橋	S - 1	38.3	25.3	0.0	0.9	10.6	1.1	0.2	0.0	0.0	0.2
トマップ川	トマップ橋	T - 1	16.6	0.7	0.0	0.0	13.1	0.1	0.9	0.0	0.0	1.8
トマップ川	空港橋	T - 2	10.8	0.4	0.0	0.0	8.8	0.1	0.3	0.0	0.0	1.3
網走湖全体			1373.9	969.1	0.4	9.6	295.1	28.5	17.6	1.4	42.5	9.7

表3 各地点と網走湖全体の人口と家畜飼育頭数

湖沼河川名	地点名			人口	乳用牛	肉用牛	豚	鶏
				人	頭	頭	頭	羽
網走川	治水橋	A	— 0	25812	5157	4995	6482	15713
網走川	美禽橋	A	— 1	9772	2764	3531	1084	0
網走川	達媚橋	A	— 3	2844	1244	1555	211	0
網走川	相生橋	A	— 4	127	105	32	0	0
網走川	北釧橋	A	— 5	0	0	0	0	0
木禽川	木禽橋	A	— 11	448	1212	391	173	332
栄森川	三宝橋	A	— 12	51	26	125	0	0
達媚川	永代橋	A	— 13	38	73	44	7	0
達媚川	三陽橋	A	— 130	1	13	8	7	0
津別川	緑栄橋	A	— 14	1440	322	757	0	0
津別川	層雲橋	A	— 140	5	8	0	0	0
センウンツベツ川	天神橋	A	— 141	15	21	0	0	0
オネネキキン川	恩根木禽橋	A	— 15	58	65	63	203	0
チミケップ川	展開橋	A	— 16	18	175	91	0	0
チミケップ川	鹿鳴橋	A	— 160	2	0	0	0	0
ケミチャップ川	櫻橋	A	— 17	44	78	67	0	0
ケミチャップ川	二又橋	A	— 170	3	7	7	0	0
ドードロマップ川	真布橋	A	— 18	5	4	0	0	0
ユウ谷の沢川	楓橋	A	— 19	0	0	0	0	0
ホロカアバシリ川	古丹橋	A	— 20	23	21	21	0	0
網走川支流		A	— 21	0	0	0	0	0
美幌川	花見橋	B	— 1	13875	1000	461	4396	0
美幌川	美幌橋	B	— 2	3451	894	403	3165	0
美幌川	稲美橋	B	— 3	580	830	326	904	0
美幌川	豊富橋	B	— 5	95	470	81	0	0
美幌川	(美幌川上流)	B	— 6	0	4	0	0	0
魚無川	平和橋	B	— 11	7556	106	49	1056	0
福豊川		B	— 13	59	104	74	0	0
登栄川	福栄橋	B	— 14	13	28	7	75	0
古梅川	東橋	B	— 15	18	122	18	0	0
女満別川	女満別橋	M	— 1	871	687	914	2859	0
女満別川	三好橋	M	— 2	352	228	396	1907	0
女満別川	美女橋	M	— 3	15	114	134	0	0
パナクシュベツ川	巴橋	M	— 11	235	105	252	470	0
パナクシュベツ川	日進橋	M	— 110	99	23	127	15	0
田中川	第38号橋	M	— 12	78	59	93	290	0
サラカオーマキキン川	住吉1号橋	S	— 1	320	106	231	102	21564
トマップ川	トマップ橋	T	— 1	1236	236	304	2211	0
トマップ川	空港橋	T	— 2	177	76	154	1658	0
網走湖全体				31811	6517	6892	11926	44047

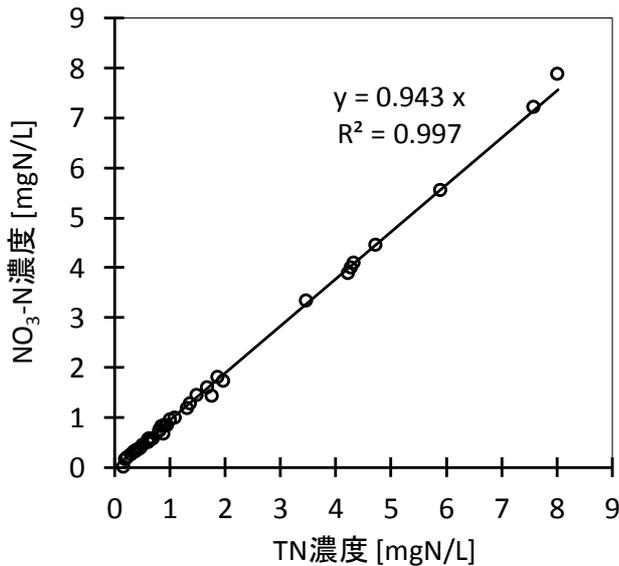


図3 TN濃度とNO<sub>3</sub>-N濃度との関係

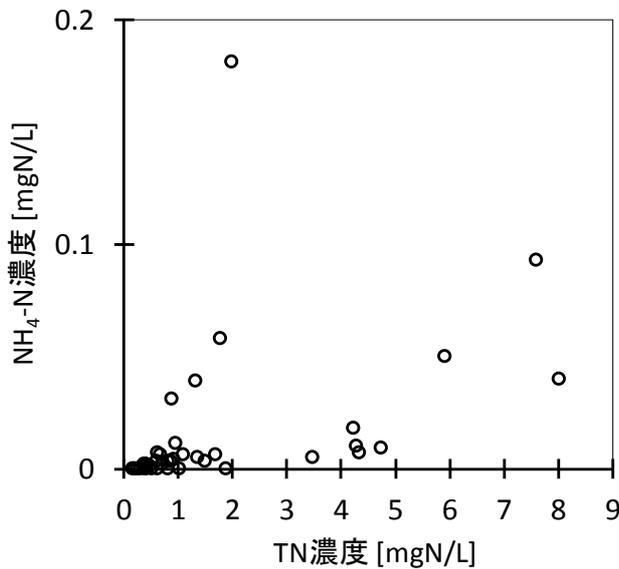


図4 TN濃度とNH<sub>4</sub>-N濃度との関係

ヘキサダイアグラムとは、主要なイオン成分を、陰イオンと陽イオンそれぞれ3つのグループに分けて各成分の濃度(当量)を求めて、六角形で表示する図形のことであり<sup>16)</sup>、地点的な水質変化を視覚的に読み取ることが容易である。どこにどのイオンを並べるかはいろいろなケースがあるが、NO<sub>3</sub>-Nの影響を評価する図形は、図7や図8のようなパターンが一般的である<sup>17)</sup>。

人為的な影響が少ない陸水の場合、通常はHCO<sub>3</sub><sup>-</sup>とCa<sup>2+</sup>が主となる構成をしており、図は細いひし形に近くなる。また、海水や海塩の影響を受けてくると塩化ナトリウムの寄与が増え、上側が少し広がった形になってくる。

人為的な影響があって主要イオン7種に匹敵するよう

な当量を持つようになるNO<sub>3</sub>-N (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)については、黒の部分で示され、その濃度の大きさが一目でわかるようになる。また、NO<sub>3</sub>-N (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)濃度がSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度とともに上昇している場合は、施肥の影響を大きく受けており、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の割合がそれほど大きくなくNO<sub>3</sub>-Nの(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)の黒色が大部分で右下が大きくなる場合は、動物の排泄物の影響を大きく受けていることを示唆する。

網走川本流の最上流部の支流(A-21)から網走川北釧橋(A-5)そして治水橋(A-0)にかけて網走川を流下して見てみると、上流から下流にかけて図の黒い部分であるNO<sub>3</sub>-N (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)濃度が上昇してきていることがわかる。しかしながら、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>イオンの当量に比べるとかなり小さかった。

NO<sub>3</sub>-N (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)濃度が検出されなかったのは、チミケツブ湖流出すぐのチミケツブ川鹿鳴橋(A-19)であり、黒い部分は描かれない。

網走川本流へ流入する支流の本流合流前の地点の中で、木禽川木禽橋(A-11)や美幌川花見橋(B-1)では比較的NO<sub>3</sub>-N (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)濃度が高かった。特に木禽橋(A-11)では、図形も大きく描かれ肥料成分と思われるSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>や石灰や苦土に由来するHCO<sub>3</sub><sup>-</sup>やCa<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>の濃度も大きかった。

美幌川に関して、豊富橋(B-5)から徐々にNO<sub>3</sub>-N (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)の濃度が高くなる傾向が見られた。女満別川に関して、網走湖に近い女満別橋(M-1)のNO<sub>3</sub>-N (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)濃度は高く、流量もそれなりにあることから網走湖への寄与は大きいのは上述済みであるが、そのダイアグラムを見ると、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の濃度も高かった。

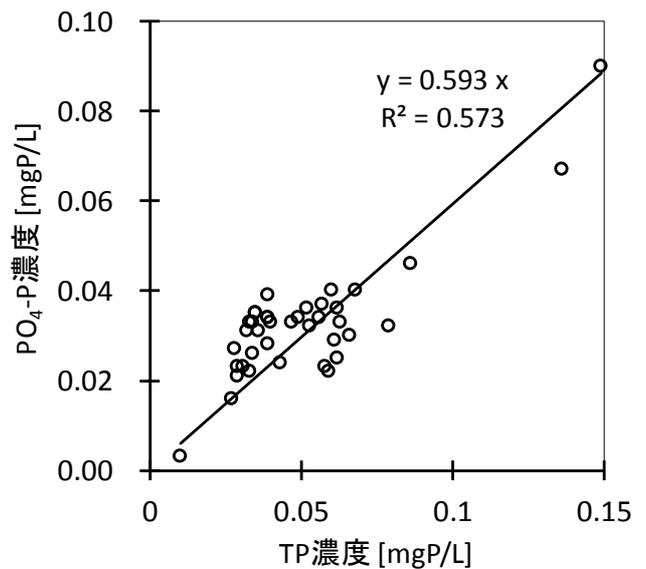


図5 TP濃度とPO<sub>4</sub>-P濃度との関係。

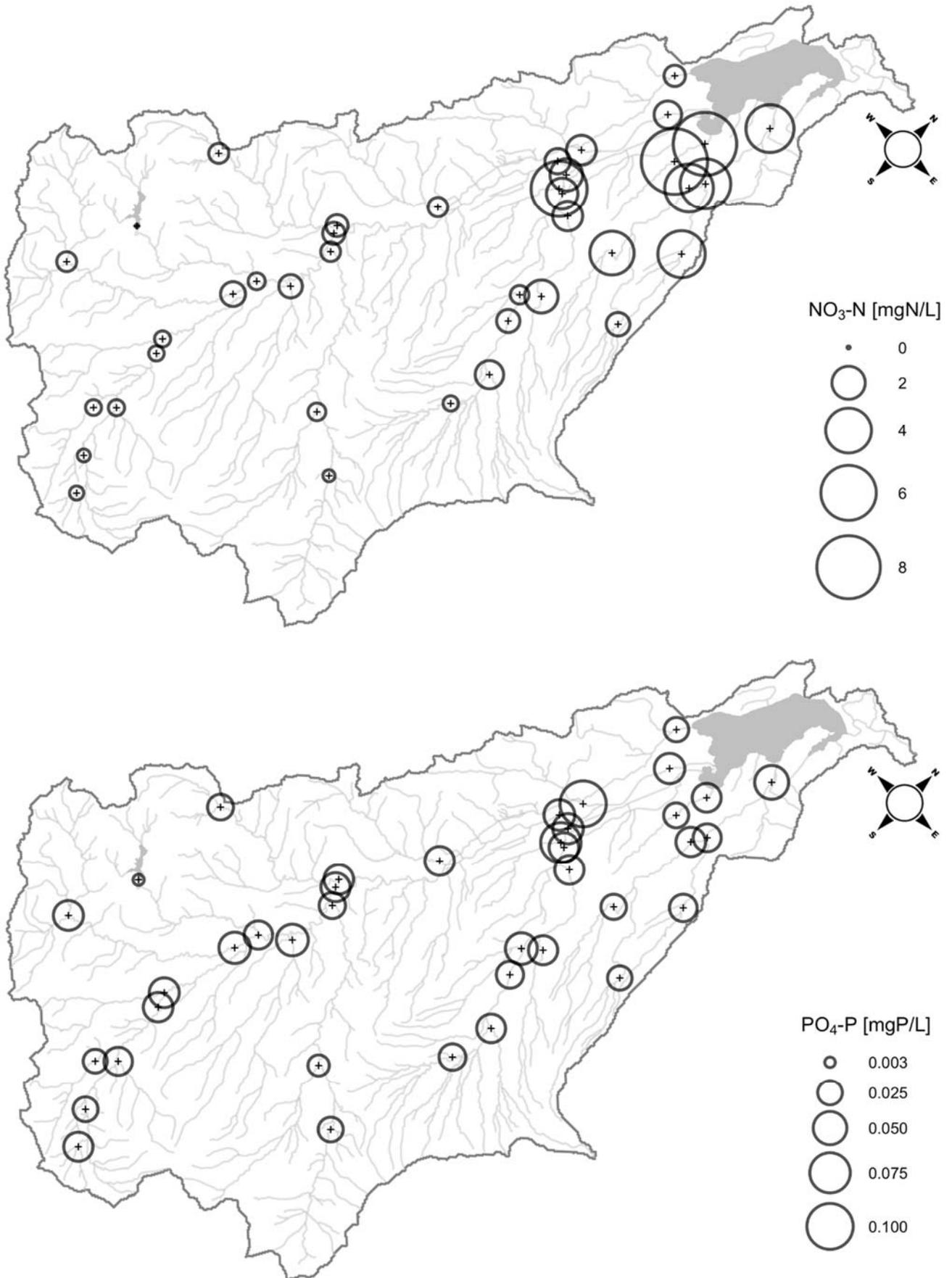
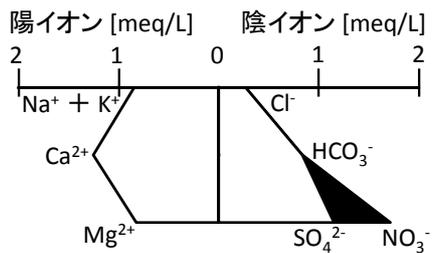


図6  $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度と $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度の分布

凡例



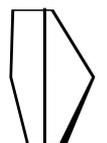
網走川 治水橋 (A-0)



網走川 美禽橋 (A-1)



網走川 達媚橋 (A-3)



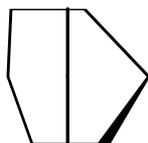
網走川 相生橋 (A-4)



網走川 北釧橋 (A-5)



木禽川 木禽橋 (A-11)



栄森川 三宝橋 (A-12)



達媚川 永代橋 (A-13)



達媚川 三陽橋 (A-130)



津別川 緑栄橋 (A-14)



津別川 層雲橋 (A-140)



センウンツバツ川 天神橋 (A-141)



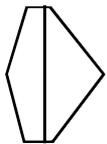
オンネキン川 恩根木禽橋 (A-15)



チミケツ川 展開橋 (A-16)



チミケツ川 鹿鳴橋 (A-160)



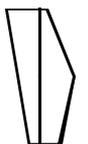
ケミチャップ川 櫻橋 (A-17)



ケミチャップ川 二又橋 (A-170)



ドートロマップ川 真布橋 (A-18)



ユウ谷の沢川 楓橋 (A-19)

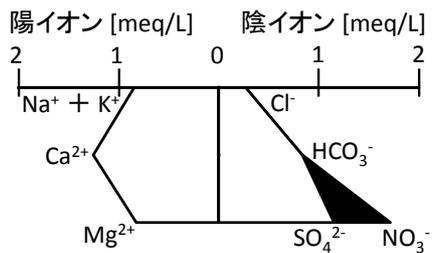


ホカアハシリ川 古丹橋 (A-20)



図7 各河川地点のヘキサダイアグラム (1)

凡例



網走川上流支流(A-21)



美幌川 花見橋(B-1)



美幌川 美幌橋(B-2)



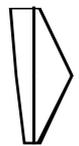
美幌川 稲美橋(B-3)



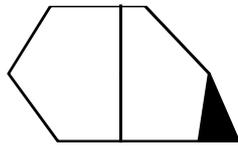
美幌川 豊富橋(B-5)



美幌川 上流(B-6)



魚無川 平和橋(B-11)



福豊川 (B-13)



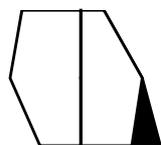
登栄川 福栄橋(B-14)



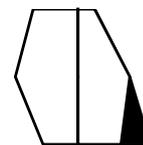
古梅川 東橋(B-15)



女満別川 女満別橋(M-1)



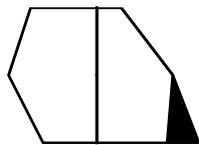
女満別川 三好橋(M-2)



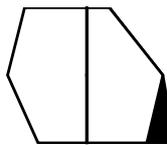
女満別川 美女橋(M-3)



ハナクシュベツ川 巴橋(M-11)



ハナクシュベツ川 日進橋(M-110)



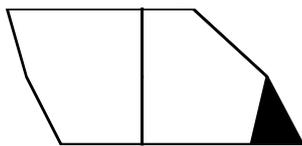
田中川 第38号橋(M-12)



サラカオーマキン川 住吉1橋(S-1)



トマップ川 トマップ橋(T-1)



トマップ川 空港橋(T-2)

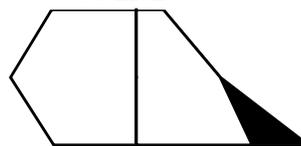


図8 各河川地点のヘキサダイアグラム (2)

またトマップ川では、下流のトマップ橋 (T-1) , 上流の空港橋 (T-2) とともに、図形が各地点の中で最も大きく、 $SO_4^{2-}$ 濃度とともに、 $NO_3-N$  ( $NO_3^-$ ) 濃度を示す黒の部分も大きかった。なお、両者を比べて見ると、下流のトマップ川トマップ橋 (T-1) の方が、 $Cl^-$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Na^+K^+$ の割合が明らかに増加している傾向も見られた。

表4に、全39地点間における、農用地面積率、 $NO_3-N$ 濃度及び $PO_4-P$ 濃度と他の水質濃度との相関係数について示した。

農用地面積率と各水質濃度との相関係数について、 $PO_4-P$ 濃度以外の全てで、有意水準5%で関連性がみられた。相関係数が0.9以上の特に関連性が高いものは、 $NO_3-N$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ 濃度であった。また、 $NO_3-N$ 濃度については、PN及び $PO_4-P$ 以外の全てで、5%の有意水準で関連がみられた。

一方、農用地面積率との相関が悪かった $PO_4-P$ 濃度について、5%の有意水準で関連がみられたものは、 $NO_2-N$ , DON, PN, PP,  $K^+$ の各濃度やUV260nmであり、特に、 $NO_2-N$ やPP濃度との関連が深かった。

**表4 農用地面積率、 $NO_3-N$ 濃度及び $PO_4-P$ 濃度と他の水質濃度との相関係数 (アスタリスクが付いているのは有意水準5%で関係があるもの)**

	農用地面積率	$NO_3-N$	$PO_4-P$
$NO_3-N$	0.944*		0.191
$NO_2-N$	0.688*	0.707*	0.594*
$NH_4-N$	0.392*	0.398*	0.298
DON	0.729*	0.640*	0.348*
PN	0.406*	0.211	0.360*
$PO_4-P$	0.237	0.191	
DOP	0.584*	0.661*	0.183
PP	0.603*	0.478*	0.611*
$Cl^-$	0.883*	0.874*	0.225
$SO_4^{2-}$	0.926*	0.973*	0.214
$HCO_3^-$	0.772*	0.781*	0.309
$Na^+$	0.862*	0.891*	0.281
$K^+$	0.874*	0.856*	0.432*
$Ca^{2+}$	0.914*	0.950*	0.268
$Mg^{2+}$	0.922*	0.960*	0.234
UV260nm	0.630*	0.453*	0.345*

図9に、農用地面積率と $NO_3-N$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ 濃度との関係について示した。河川水の流域農用地面積率と $NO_3-N$ 濃度との関係が良いのはよく知られている<sup>18), 19), 20)</sup>が、網走湖流域では、 $NO_3-N$ だけでなく主要イオン各種とも相関が良いこともわかった。特に $SO_4^{2-}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ との相関係数が高く、 $SO_4^{2-}$ は化学肥料の硫酸に含まれること、 $Ca^{2+}$ や $Mg^{2+}$ はアンモニア肥料が硝化する際の中和に施用される石灰や苦土に含まれている成分である。また、 $Ca^{2+}$ は $NO_3-N$ や $SO_4^{2-}$ と異なり、原点を通過しない直線で近似される傾向が見られた。

図10に農用地面積率と $PO_4-P$ 濃度との関係について示した。チミケップ湖流出口の近くチミケップ川鹿鳴橋 (A-160) は、他の地点に比べて $PO_4-P$ 濃度が 0.003 mgP/Lと極端に低かった。それ以外の地点においては、農用地面積率が低い地点でも、0.016 mgP/L以上の濃度であった。 $PO_4-P$ 濃度は、いくつか高濃度を有する地点もあったが、農用地面積率が高くなると濃度が高くなるはっきりとした傾向は見られなかった。

#### 4. 考察

網走湖は北海道で最も広い流域を有する湖沼である。また、部分循環湖という大量の栄養塩を蓄積した嫌気層を有するため、富栄養化が進行している。網走湖はまた、内水面漁業で北海道のなかで最も重要な水域の一つであり、その持続的な環境保全と水産業への活用が求められている。そのためには、流域からの栄養塩負荷量を適正に制御する必要があるが、流域の窒素やリンの動態についてはまだ未解明な部分も多い。

網走湖の植物プランクトンの栄養塩利用という観点では、特に流域における $NO_3-N$ ,  $NH_4-N$ 及び $PO_4-P$ 等の溶存無機態栄養塩の特性の解明が特に重要である<sup>21), 22)</sup>。

網走湖流域河川のTN濃度のうち、ほとんどが、植物プランクトンが直接利用できる形態である $NO_3-N$ であった。その回帰直線の傾きは0.943ときわめて高かった。

ただ、本研究では出水の影響が少ない透視度30cm以上の場合に限定したものである。網走湖への負荷量という観点では、出水の影響を考慮しないと、負荷量を大きく過小評価する可能性があるが、本研究では流域の濃度分布や土地利用との関連の考察を重要視したので、出水の影響の無い環境での評価を行うこととした。

岡澤他の2005年に実施された平水時の調査<sup>19)</sup>でも、TN濃度と $NO_3-N$ 濃度の間には明瞭な相関関係が見られていた。しかし、その傾きは0.70とTNの内70%程度が $NO_3-N$ であることが示されており、2005年当時より本研究の結果の方が、さらに $NO_3-N$ の割合が増加している可能性も見られた。

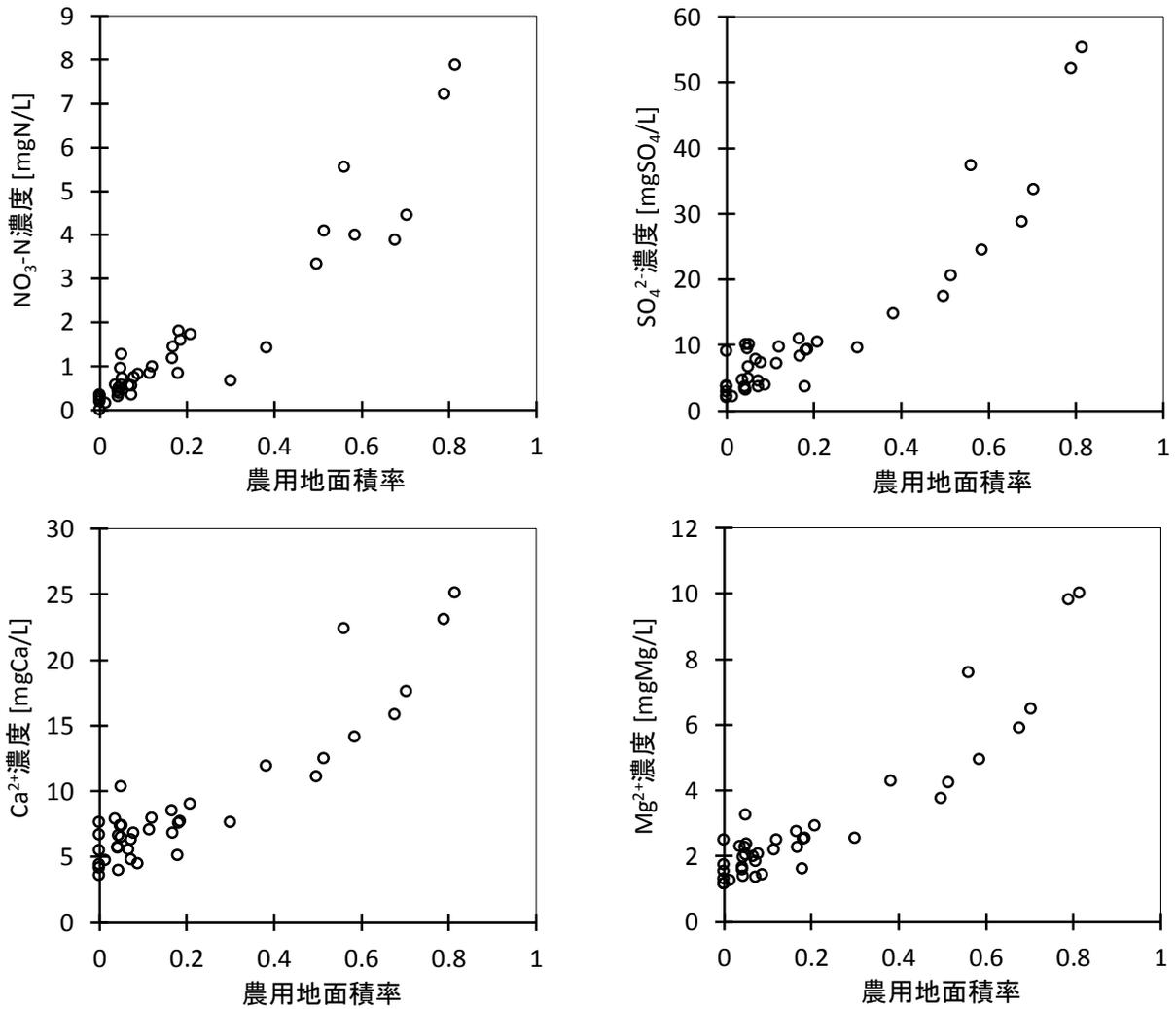


図9 農用地面積率と $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 濃度との関係

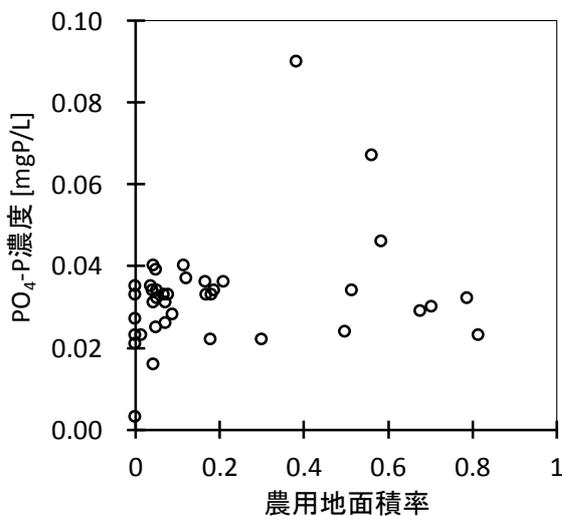


図10 農用地面積率と $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度との関係

$\text{NO}_3\text{-N}$ は、流域から発生するDONや $\text{NH}_4\text{-N}$ の酸化作用や硝化作用が継続すればするほどその割合が増加する。硝化作用は、好気的な環境でかつ暗条件が必要であり、下水処理場や浄化槽による好気的な水処理システムや、自然環境下では暗渠や湖沼の好気的な深部、土壌間隙水中等で進行しやすいと考えられる。

網走湖流域では生活系の排水の処理は進行しており、2017年度現在、流域人口の81%の生活系排水は下水処理されており、内67%は下水処理場の処理水を通して網走湖へ流入している。また、流域人口の12%は合併処理浄化槽や単独処理浄化槽により生活系排水が処理され流域に流入していると思われる。残りは汲み取りによるし尿の回収が行われており、し尿処理場は流域外にあるためそれらの負荷は流域には入らない<sup>6)</sup>。

網走川下流の治水橋 (A-0) の $\text{NO}_3\text{-N}$ の濃度は1980年代に比べてやや増加傾向が見られており、その理由について、生活系排水の処理の発達による硝化された $\text{NO}_3\text{-N}$ の負荷量増加と近年の家畜飼育頭数の増加の影響が懸念されている<sup>22)</sup>。

網走湖流域河川のTNのほとんどが、 $\text{NO}_3\text{-N}$ であることがわかったが、美幌川花見橋 (B-1) は、他の地点に比べて $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が高い傾向にあった。その理由は、美幌川美幌橋 (B-2) との間に流入してくる下水処理場の影響を受けていると思われる<sup>22)</sup>。

本研究における網走湖に流入する4河川の最下流地点、網走川治水橋 (A-0)、女満別川女満別橋 (M-1)、トマップ川トマップ橋 (T-1)、サラカオーマキキン川 (S-1) の合計のTN負荷量とTP負荷量はそれぞれ、43.7 gN/sと1.75 gP/sと計算された。資料<sup>6)</sup>から網走湖流域の下水処理水を含む生活系排水処理水と流域事業場からの排水処理水を合わせたTNとTPの負荷量は、それぞれ 3.5 gN/sと0.21 gP/sであり、その負荷量は網走湖へ流入する4河川負荷量のそれぞれ、8%と12%と計算された。また西浜他<sup>22)</sup>によれば、美幌川美幌橋 (B-2) と花見橋 (B-1) の間の下水処理場処理水等によるDIN負荷量の増加分は、網走湖へのDIN負荷量の22%と見積もっている。以上のことから、生活系排水の処理水の寄与も、それなりの負荷影響があると言える。

網走湖の流域の土地利用については、森林の割合が最も高く約71%にも及んでおり、続いて田と畑等の農用地を合わせた農業に利用されている土地の割合は約22%でありそのほとんどは田以外の農用地であった。

ヘキサダイアグラム (図7, 図8) を見てみると、トマップ川空港橋 (T-2) を除いて全ての地点において陰イオンで最も濃度が高かったのは $\text{HCO}_3^-$ であった。 $\text{HCO}_3^-$ は、農用地で施用される石灰の主成分でもあるが、農用地の影響を受けない環境 (森林地) においても、流出してくる陰イオンの中では最も主要な陰イオンである。森林地で $\text{HCO}_3^-$ が流出してくる理由は、呼吸や脱窒による有機物の分解によって生じる $\text{CO}_2$ が、水に溶けて中和した $\text{Ca}^{2+}$ に代表される陽イオンとともに溶存するためである<sup>23)</sup>。網走湖流域全体的に、陰イオンで $\text{HCO}_3^-$ の割合が最も高い傾向にあるのは、森林地の土地利用割合が大きいことによると考えられる。

先にも記述したが、網走湖の水質環境や漁場環境に大きな影響を及ぼすのは、流域からの窒素やリンの負荷であり、特に湖内の基礎生産に直接作用するのは $\text{NO}_3\text{-N}$ に代表されるDINと $\text{PO}_4\text{-P}$ である。網走湖流域河川のTNのほとんどは $\text{NO}_3\text{-N}$ であり、その濃度は農用地面積率と強い関係が認められ、この関係は他の流域でもよく知られていることである<sup>18), 19), 20)</sup>。

本研究ではさらに主要イオンも含めた調査を実施したが、網走湖流域では、全ての主要イオンが農用地面積率と直線的な関係が見られていた。下流側の調査地点の流域には、上流側の調査地点の流域も含まれるため、相関係数が良くなりやすい傾向はあると思うが、網走湖流域では農用地面積率が高くなると $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度も含めて主要イオン全体の濃度が高くなる傾向があると考えられることができる。

特に、農用地面積率と $\text{SO}_4^{2-}$ 濃度との間には強い関係が見られた。一般に農用地の地下水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 汚染の問題において、主要イオンを利用した汚染源判定の方法もあるが、 $\text{SO}_4^{2-}$ は家畜排せつ物の影響ではなく、化学肥料の影響を大きく受ける指標として利用される<sup>17), 24)</sup>。このことから考えると、網走湖流域河川の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度上昇の主要因は、硫酸や硫酸塩を多く含んだ化学肥料の影響を大きく受けていると推察される。畑作では硫酸等の窒素肥料の他、アンモニアが硝化される際に放出されるプロトンを中和するために石灰や苦土も施用される。そのことが、農用地面積率と $\text{Ca}^{2+}$ や $\text{Mg}^{2+}$ の濃度とも強い関係が見られたと考えられた。

一方、その他の主要イオンも農用地面積率と強い関係が見られた。その内、 $\text{K}^+$ や $\text{HCO}_3^-$ は、畑作で使用される肥料や石灰等に含まれる成分であると同時に、家畜の排せつ物に由来して流出してくる成分でもある<sup>25), 26)</sup>。 $\text{Cl}^-$ や $\text{Na}^+$ は、家畜の尿に多く含まれる成分である<sup>25)</sup>。

網走湖流域では、乳牛と肉牛合わせて13409頭、豚11926頭、鶏44047羽が飼育されている。この中で、体重の大きな牛と豚による網走湖流域内での窒素とリンの発生量と、農用地の施肥量を計算して比較してみる。牛や豚の排せつ物等による発生負荷量の原単位は、資料<sup>27)</sup>によると、牛で窒素が290 gN/頭/d、リンが50 gP/頭/d、豚で窒素が40 gN/頭/d、リンが25 gP/頭である。また、農耕地による施肥量は、作物の種類や土壌の性状、地域等によって細かく整理されている<sup>28)</sup>が、大まかに1 km<sup>2</sup>あたり14 tN/y、5 tP/yと考えてオーダーレベルでは大方合っていると考えられる。それらの値を使用して、体重の小さな鶏を除いて家畜飼育によるTNとTPの発生量と、農用地面積全てで施肥が行われていると仮定して施肥によるTNとTPの量を計算すると、おおまかであるが表5の様になる。

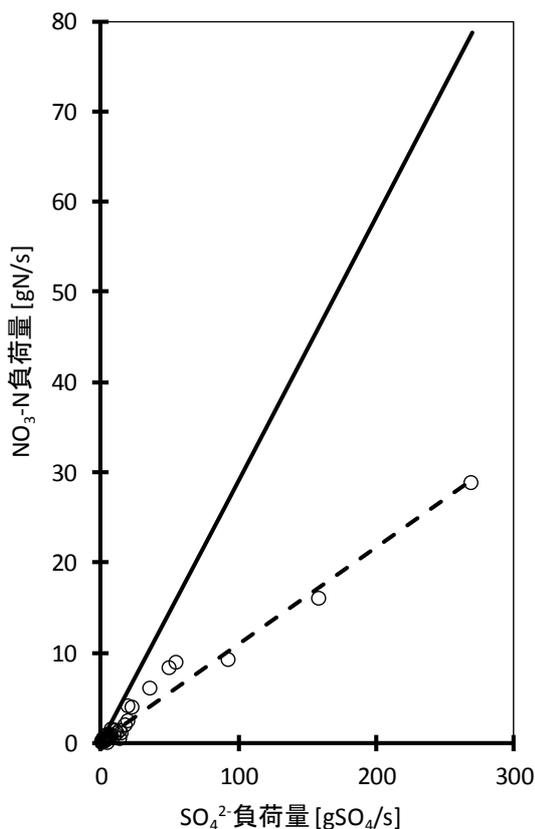
ただし、計算した農用地には畜舎も含まれるため、その農用地全体で施肥が行われていないこと、また流域で発生した家畜排せつ物が、どのくらいの割合かは不明であるが施肥に回る部分もあるため、施肥量の全てが化学肥料の施肥量を示しているわけではないことに留意する必要がある。表5を大まかに見て、網走湖流域では、化学肥料と家畜排せつ物の双方の影響を大きく受けて、 $\text{NO}_3\text{-N}$

濃度が上昇していると考えられる。そして、 $\text{SO}_4^{2-}$ との関連性が特に強いことから化学肥料の影響がより大きいとも考えられる。また、このことは網走湖流域では、農用地面積率が高い地域では畑作と畜産の双方が点在して行われているとも考えられた。

図11に、39の調査地点における $\text{SO}_4^{2-}$ 負荷量と $\text{NO}_3\text{-N}$ 負荷量との関係について、硫酸の $\text{SO}_4$ 量と窒素量との比の線とともに示した。

**表5 網走湖流域全体における家畜排せつ物による窒素とリンの発生量と農用地への施肥量との比較**

	窒素 tN/y	リン tP/y
家畜排せつ物発生量 (牛と豚)	1600	350
施肥量	4100	1500



**図11  $\text{SO}_4^{2-}$ 負荷量と $\text{NO}_3\text{-N}$ 負荷量の関係**（点線の直線は河川負荷量との関係の近似直線を示し、実線の直線は硫酸の $\text{SO}_4^{2-}$ とNの比を示す）

化学肥料の成分が全て硫酸では無いが、流域に施肥された硫酸の窒素が全て硝化され、そのまま $\text{SO}_4^{2-}$ と同じ比率で河川に流出してくると仮定すると、図11に示した実線のようになる。実際には、流域には硫酸塩でない窒素も施肥され、家畜排せつ物等の発生や堆肥の施肥、生活系排水の処理水の影響もあるから、流域で発生する窒素が全て硝化され $\text{SO}_4^{2-}$ と同じ比率で河川に流出してくると仮定すると、その傾きは実線よりさらに大きくなるはずである。しかしながら、実際の $\text{SO}_4^{2-}$ 負荷量に対する $\text{NO}_3\text{-N}$ の負荷量の傾きは、硫酸の傾きよりも大幅に小さくなっている。この傾きの減少分は、流域における作物による生産と流域外への搬出窒素量や、流域内での窒素浄化量の影響と考えることができる。このことを考慮すると、施肥量の中の一定の窒素量は流域から除去されていることが水質の調査結果からも見られた。

ところで、網走湖内の基礎生産に影響を及ぼす流域河川の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度については、農用地割合との関係があまり見られなかった。図6を見てみると、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の分布図とは異なり、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が低い農用地面積率が小さい網走川本流側（美禽橋（A-1）より上流側）でも、チミケツ川鹿鳴橋（A-160）を除いて、農用地面積率が高い地点と同様に $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度を有していたことが見える。しかしながら、表5を見ると、農用地でのリンの発生量は決して少ないとは言えない。ちなみに、チミケツ川鹿鳴橋（A-160）において、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が検出されなかったことに加えて $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度が低かった理由は、そのすぐ上流にあるチミケツ湖にて、それらが基礎生産に利用されたためと推察される。

一般に、リンは土壌に吸着しやすい特徴がある<sup>29), 30)</sup>。そして、水中では土壌中に吸着したリンは、水中の $\text{PO}_4\text{-P}$ との吸脱着平衡の影響を受けて流出してくると推察される。特に、還元環境があるとリンを吸着する土壌に含まれる水酸化鉄が溶解するため、 $\text{PO}_4\text{-P}$ が水中に流出しやすくなる。また、腐植物質があると一度溶解した鉄は腐植物質のキレート作用によって好気的な環境になっても再不溶化しにくくなるため、 $\text{PO}_4\text{-P}$ を水中に溶出する方向に環境がシフトすることがわかっている<sup>31), 32)</sup>。

表4を見てみると、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度と関連の深いのは、相関係数が大きな順で、PP,  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{K}^+$ , PN, DON, UV260nmであった。つまり、河川構造に土壌粒子が流出しやすい状況があり水中にPPを中心とした懸濁物が多く含まれる地点、流域のどこかで還元環境が生じやすく $\text{NO}_2\text{-N}$ 濃度が高くなりやすい地点、腐植物質の溶存量が大きく水酸化鉄が生じにくい地点で、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度が高くなる傾向が見られ、上述した理由を説明する結果が見られた。

本研究では、出水の影響を受けていない状況下での調査であった。 $\text{PO}_4\text{-P}$ は、懸濁物の挙動の影響を大きく受け

る。それゆえ、湖への $PO_4$ -P負荷量を検討する際には、流量増加時において懸濁物濃度が高くなればなるほど、 $PO_4$ -P濃度も大きくなると推察されることを考慮することが重要である<sup>30)</sup>。

本研究では、網走湖流域における網走湖内の基礎生産に大きな影響を及ぼす、無機態の窒素やリンの流域特性について、各主要イオンや土地利用との関連から考察を行った。その結果、網走湖流域河川では、生活系排水の処理水の他、家畜排せつ物に加えて化学肥料の影響を強く受けて $NO_3$ -N濃度が上昇していると推察された。一方、 $PO_4$ -Pは、農用地面積率にあまり関係なく流出してくる傾向が見られ、土壌粒子等の懸濁物が流出しやすい地点、流域に還元環境が出現しやすい地点、溶存の腐植物質の流出が大きくなる地点で濃度が高くなる傾向が推察された。

## 5. 引用文献

- 1) 北海道環境科学研究センター:北海道の湖沼改訂版, 2005
- 2) 三上英敏, 五十嵐聖貴:網走湖嫌気層の長期的環境変化,北海道立総合研究機構 環境科学研究センター所報, 9, 2019 (投稿中)
- 3) 三上英敏:網走湖の陸水学的特徴と長期的環境変化,湖沼環境の変遷と保全に向けた展望,高村典子編.国立環境研究所研究報告, 153, 5-33, 2000
- 4) 浅見大樹:網走湖産ワカサギの初期生活に関する生態学的研究.北海道立水産試験場報告, 67別冊, 2004
- 5) 渡辺智治, 田村亮一, 馬場勝寿, 多田匡秀, 川尻敏文, 末澤海一, 真野修一, 隼野寛史:1989~2009年の網走湖におけるヤマトシジミ *Corbicula japonica* 浮遊幼生の発生時期と発生量の推移,北海道立総合研究機構 さけます・内水面水産試験場報告, 1, 55-63, 2011
- 6) 北海道立総合研究機構 環境科学研究センター:平成30年度網走湖環境基準未達成原因究明調査報告書, 2019
- 7) 日本分析化学会北海道支部編:水の分析第3版, 1981
- 8) 北海道立総合研究機構 環境科学研究センター及び地質研究所:水資源,水域生態系保全に向けた,流域特性の検討と流域圏データベースの構築, 2015
- 9) 国土交通省:国土数値情報流域メッシュデータ, <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-W07.html> (2013.5.13アクセス)
- 10) 国土交通省:国土数値情報土地利用細分メッシュデータ, <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-b.html> (2017.3.5アクセス)
- 11) 国勢調査(2015),政府統計の総合窓口(e-Stat) <https://www.e-stat.go.jp> (2018.1.25アクセス)
- 12) 独立行政法人農業環境技術研究所:農業環境情報統合データセンター, [http://agrienv.dc.affrc.go.jp/integrated\\_db/web/index.html](http://agrienv.dc.affrc.go.jp/integrated_db/web/index.html) (2014.4.6アクセス)
- 13) 独立行政法人農業環境技術研究所:農業統計情報メッシュデータ閲覧システム, <http://agrimesh.dc.affrc.go.jp> (2014.4.6アクセス)
- 14) 神山和則, 寶示戸雅之, 佐々木寛幸, 宮路広武:国土数値情報を利用した農業統計データのメッシュ化,日本土壤肥料学雑誌, 74, 415-424, 2003
- 15) R. A. デイ, A. L. アンダーウッド 共著, 鳥居泰男, 康智三共訳:定量分析化学,培風館, 1982
- 16) 日本陸水学会編:陸水の辞典,講談社, 2006
- 17) 公害研究対策センター:硝酸性窒素による地下水汚染対策の手引き, 2002
- 18) Ekholm, P., Kallio, K., Salo, S. Pietilainen, O.-P., Rekolainen, S., Laine, Y. and Joukola, M.: Relationship between catchment characteristics and nutrient concentrations in an agricultural river system, *Water. Research.* 34, 3709-3716, 2000
- 19) 岡澤宏, 豊田裕道, 島田沢彦, 鈴木伸治, 竹内康:網走川水系における農業的土地利用と河川の窒素・リン濃度の関係,農業農村工学会論文集, 258, 523-527, 2008
- 20) 西浜雄二, 青井透:網走川水系における栄養塩濃度の分布,用水と廃水, 52, 255-261, 2010
- 21) 西條八東, 三田村諸佐武:新編湖沼調査法,講談社サイエンティフィック, 1995
- 22) 西浜雄二, 青井透:網走湖の富栄養化と流域における栄養塩発生源,用水と廃水, 52, 7-13, 2010
- 23) Trudell, M. R., Gillham, R. W. and Cherry, J. A.: An in-situ study of the occurrence and rate of denitrification in a shallow unconfined sand aquifer. *Journal of Hydrology*, 83, 251-268, 1986
- 24) 三上英敏, 高田雅之:地下水硝酸汚染に係わる汚染源簡易判定の手順,北海道環境科学研究センター所報, 35, 27-34, 2009
- 25) 大村邦男:北海道の畑作・酪農地帯における物質循環と水質保全,北海道立農業試験場報告, 86, 1995
- 26) 三上英敏, 藤田隆男, 坂田康一:酪農地帯,風蓮湖流域河川の水質特性,北海道環境科学研究センター所報, 34, 19-40, 2008
- 27) 日本下水道協会:流域別下水道整備総合計画調査指針と解説, 1999.
- 28) 北海道農政部:北海道施肥ガイド, <http://www.pref.hokkaido.lg.jp/ns/shs/clean/>

- sehiguide2015.htm (2019.11.11アクセス)
- 29) 駒井幸雄: 森林集水域におけるリンの収支と流出特性, 水環境学会誌, 27, 591-594, 2004
- 30) 西浜雄二, 青井透: 網走川河川水における栄養塩濃度の周年・経年変化, 用水と廃水, 54, 489-497, 2012
- 31) Peddy, K. R., O. A. Diaz, L. J. Scinto and M. Agami: Phosphorus dynamics in selected wetlands and streams of the lake Okeechobee Basin, Ecological Engineering, 5, 183-207, 1995
- 32) 三上英敏, 石川靖, 上野洋一: 達古武川上流部湿地帯における水質環境特性, 陸水学雑誌, 68, 65-80, 2007