

国営環境保全型かんがい排水事業が行われた 酪農地帯における河川窒素流出削減の評価

竹田 美流¹⁾・永沢 圭吾¹⁾・嶋内 智久¹⁾・淀谷 優気¹⁾
小糸 健太郎²⁾・吉野 宣彦³⁾・中谷 暢丈¹⁾

Evaluation of the river nitrogen load reductions in dairy areas
by the environmentally sound irrigation and drainage project

Miru TAKEDA¹⁾, Keigo NAGASAWA¹⁾, Tomohisa SHIMAUCHI¹⁾, Yuki YODOYA¹⁾,
Kentarou KOITO²⁾, Yoshihiko YOSHINO³⁾ and Nobutake NAKATANI¹⁾
(Accepted 15 July 2021)

1. 諸 言

北海道の東部に位置する釧路地域拠点（釧路地域 8 市町村：釧路市、釧路町、厚岸町、浜中町、標茶町、弟子屈町、鶴居村、白糠町、根室地域 5 市町村：根室市、別海町、中標津町、標津町、羅臼町）は、北海道（北方領土を含む）総面積のうちわずか 17.4% を占めるのに対し（国土交通省, 2020）、北海道全体における牧草専用地作付面積の 40.8%、乳用牛飼養頭数の 35.7% を占めており（農林水産省, 2016）、酪農が同地域の重要な基幹産業となっている。しかしながら、その生産規模の拡大に伴い、農用地から流出する土砂及び家畜排泄物、肥料に由来する汚濁水が河川に流出することで、河川水質やその流出先水質への影響が懸念されてきた（長澤ほか, 1995；井上ほか, 1999；阪元, 2005；北海道開発局；門谷ほか, 2011）。このため、平成 9 年度より「水質浄化機能等多面的な機能を有する農業用排水

水施設の整備を行い、用水不足や排水不良等の農業被害を解消するとともに、家畜排泄物等の適正な農地還元及び農地等から発生する土砂や負荷物質等の流出を抑制し、環境保全型農業の推進を図る」ことを目的とした「国営環境保全型かんがい排水事業」（以下、かんがい排水事業）が創設され、平成 11 年度より実施されてきた。このかんがい排水事業における整備地区は 6 つに分けられ、令和 2 年現在の実施地区は別海西部地区、別海北部地区、根室地区であり、完了地区は別海地区、別海南部地区、はまなか地区となっている。整備内容は大きく 2 つに分けられ、主に用水施設（用水路、肥培灌漑施設）と排水施設（排水路、土砂緩止林、排水調整池、遊水地）の整備が行われている（阪元, 2005；福原ほか, 2012）。これらの整備により、流域から河川への汚濁物質の流出が抑制されていることが報告されている。例えば、はまなか地区の平水時における水質改善状況を検証した結果、施設整備の前後で全窒素は 12%、全

¹⁾ 酪農学園大学農食環境学群環境共生学類水質化学研究室
Water Chemistry, Department of Environmental Sciences, College of Agriculture, Food and Environmental Sciences, Rakuno Gakuen University

²⁾ 酪農学園大学農食環境学群循環農学類国際経済学研究室
International Economics, Department of Sustainable Agriculture, College of Agriculture, Food and Environmental Sciences, Rakuno Gakuen University

³⁾ 酪農学園大学農食環境学群循環農学類農村計画論研究室
Rural Planning Theory, Department of Sustainable Agriculture, College of Agriculture, Food and Environmental Sciences, Rakuno Gakuen University

〒069-8501 北海道江別市文京台緑町 582 番地
582, Bunkyo-dai-Midorimachi, Ebetsu, Hokkaido 069-8501, Japan

〈連絡先〉

氏名：中谷 暢丈

所属：酪農学園大学農食環境学群環境共生学類

住所：江別市文京台緑町 582 番地

電話：011-388-4714

Mail：nakatani@rakuno.ac.jp

所属学会：日本陸水学会

リンは5%改善していた(鈴木ほか, 2011)。別海地区や別海南部地区の浄化型排水施設(排水調整池, 遊水池, 排水路等)の効果検証では, 濃度の低かった全リンでは顕著な改善は見られなかったが, 全窒素は, 特に排水調整池で顕著な水質改善効果が認められた(内藤ほか, 2020; 内藤ほか, 2021)。一方で, 別海町を流れる西別川3地点(観山橋, 長栄橋, 新生橋)において, 令和元年までに全窒素濃度の有意な減少は見られなかったが, 全リン濃度は減少する傾向が見られ, 事業, 特に肥培灌漑施設整備の効果が認められた(内藤ほか, 2021)。全窒素濃度において, 有意な整備の効果が認められていないのは, かんがい排水事業の整備が終わった別海地区よりも上流域における窒素流出負荷が大きいことが影響していると予想されるが, その実態については明らかでない。

公共用水域である河川の富栄養化等の原因には, 生活排水や農業排水等の人為的なものが挙げられており, 中でも農業排水には, 家畜排泄物や農地に施肥された肥料および農薬に由来するものが水質汚濁物質として含まれている(石川ほか, 2004; 大村, 1995)。環境対策が未実施の酪農場や牧草地を流域に有する河川や排水路では, 家畜排泄物に多く含まれるアンモニア態窒素や懸濁態窒素, 懸濁態リン, カリウムイオン等の濃度上昇が確認されている(石川ほか, 2004; 三上ほか, 2008)。また, 単位草地面積当たりの家畜飼養頭数が多いほど河川水中硝酸態窒素濃度が増大するという報告がなされている(長澤ほか, 1995; 志村・田淵, 1997)。高濃度の硝酸態窒素や亜硝酸態窒素は, 酸素欠乏症の一つであるメトヘモグロビン血症を引き起こすため, 公共用水域及び地下水を対象に環境基準10 mgN/L以下が定められている(井上ほか, 2003; 藪崎, 2010)。さらに, 法的基準ではないものの水産用水基準として9 mgN/Lが示されている(日本水産資源保護協会, 2020)。また, 高濃度のアンモニア態窒素は, 魚等の水生生物に対して強い毒性を有し, 平衡感覚を失わせ, 呼吸量や酸素消費の増大を引き起こし, 最終的には痙攣や昏睡, 死へと向かわせる(菊地・若林, 1997)。これにより, 法的基準ではないものの水産用水基準として, 1.9 mgN/L (pH=7.0, 水温20℃のとき)が示されている(日本水産資源保護協会, 2020)。これらのことから, 環境中に排出された窒素化合物の動態を把握することは, 対象環境における利水や自然環境保全等を目的とした水質を維持する上で重要である。

そこで本研究では, 道東の酪農地帯が広がる別海

町の西別川を対象河川として, 河川窒素汚染の現状とその流出特性を調べるとともに, かんがい排水事業の整備が実施されたことで, 流域から河川への窒素流出の削減効果について検証を試みた。

2. 試料と方法

2.1. 調査地点と調査日

調査対象河川は, 別海町内の国営事業が実施されている区域内を流れる西別川とした。調査地点は, 別海町が独自に行っている水質調査地点と国の環境基準点を参考に, 本流10か所と支流7か所の計17か所において採水と水質観測を行った。調査地点を図1に, 各地点の名称とそれらの緯度経度を表1に示す。現地調査および採水は, 2020年6月28日, 8月19日, 9月26日, 10月31日, 11月21日の計5回行った。なお, 気象観測地点「別海」の公開データによると, 現地調査を行った5回のうち, 6月28日の前日に49.0 mm, 当日の16:00までに4.5 mmの降水, 9月26日の前日に7.0 mm, 当日の16:00までに34.5 mm, 11月21日の前日に0.5 mm, 当日は16:00までに2.0 mmの降水があったが, 他の調査日(8月19日と10月31日)とこれらの前日には降水はなかった(気象庁ホームページ)。そのため, 本研究の水質調査結果は, 一部降水の影響を含むものとして考えられた。

2.2. 採水方法と水試料の保存方法

現地での採水は, JIS K 0094「工業用水・工業排水の試料採取方法」(日本規格協会, 1994)に基づき, 虹彩橋, ポン虹別川, 虹別橋, シワンベツ下流, 高見橋ではプラスチック製柄杓を用いて行った。これら以外の地点では, 橋の上からロープ付きプラスチック製バケツ又はステンレス製バケツを用いて採水した。いずれの地点においても, 採水に使用した柄杓もしくはバケツは, 現地の水を用いて3回以上共洗いをを行い, 同じく共洗いをを行ったポリプロピレン製容器に水試料を入れた。また, 全調査地点において, プラスチック製シリンジと孔径0.45 μm のシリンジフィルター(Minisart 17598-K, Sartorius社製)を用いてろ過した水試料について, ろ液で3回共洗いをしたポリプロピレン製容器に移し入れた。容器に入れた全ての水試料は, 保冷剤を入れたクーラーボックスに入れて研究室に持ち帰り, たちちに4℃に設定した冷蔵庫内に入れ, 測定まで保存した。

2.3. 現地観測項目

現地では, 各種ポータブル測定器を用いて, 気温,

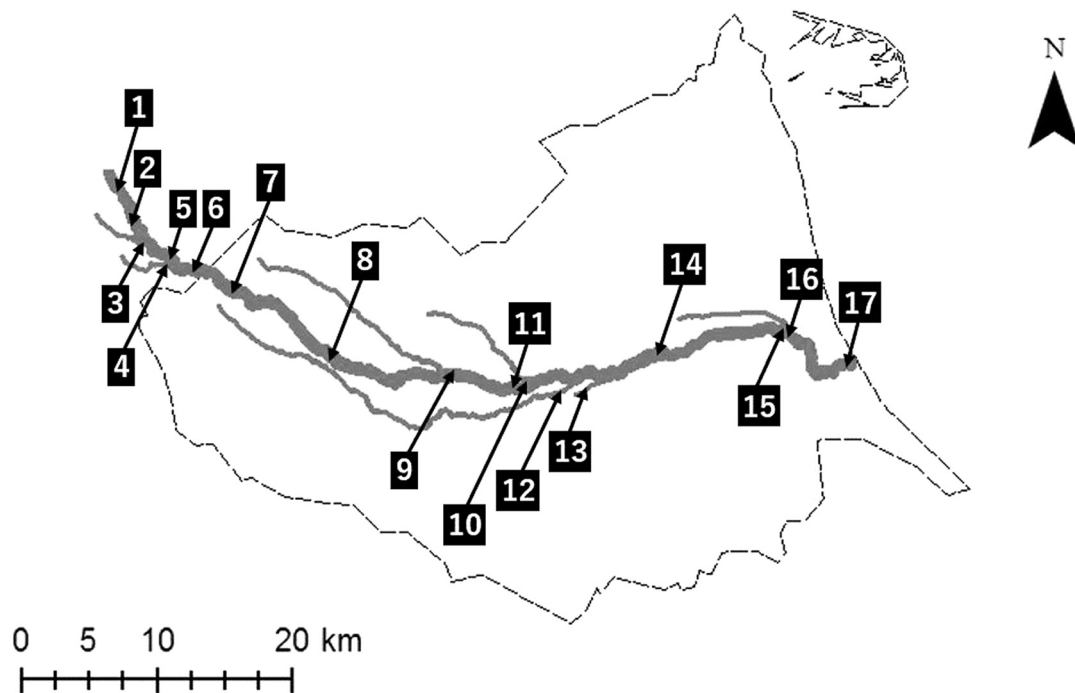


図1 西別川流域における水質調査地点.
番号毎の地点名と緯度経度は表1に示した.

表1 調査地点の地点名と緯度経度.

No.	調査地点名	緯度	経度
1	ふ化場	N43° 30'39.0"	E144° 37'28.7"
2	虹彩橋	N43° 29'18.0"	E144° 38'13.2"
3	上虹別川	N43° 28'32.1"	E144° 38'47.2"
4	ポン虹別川	N43° 27'41.4"	E144° 40'05.2"
5	虹別橋	N43° 27'54.4"	E144° 40'17.5"
6	観山橋	N43° 27'22.8"	E144° 41'32.3"
7	シワンベツ下流	N43° 26'28.7"	E144° 43'37.7"
8	高見橋	N43° 23'43.8"	E144° 48'48.7"
9	ポンオンネベツ川	N43° 23'04.9"	E144° 55'35.5"
10	不二岡橋	N43° 22'38.3"	E144° 59'20.0"
11	長栄橋	N43° 22'19.9"	E144° 58'56.6"
12	然内川然内橋	N43° 22'08.4"	E145° 01'20.6"
13	然内小橋	N43° 22'15.9"	E145° 02'46.9"
14	千歳橋	N43° 23'27.3"	E145° 06'43.9"
15	清丸別川	N43° 24'19.9"	E145° 13'39.1"
16	新生橋	N43° 24'03.6"	E145° 13'52.8"
17	別海橋	N43° 22'47.3"	E145° 17'05.1"

灰色部分の地点は支流を示す.

湿度、水温、流量、溶存酸素量（以下 DO）、電気伝導度（以下 EC）、水素イオン指数（以下 pH）、酸化還元電位（以下 ORP）を測定した。また、流量は JIS K 0094「工業用水・工業排水の試料採取方法」

（日本工業規格、1994）の 8.4「流速計による測定」に基づき、メジャーを用いて川幅および水深を測定し、各水深測点における流速を観測した。得られた川幅と水深から求めた河川断面積と流速の積から、

水試料採取時における河川流量を算出した。なお、西別川はサケマス増殖河川であることから、調査地点最上流のふ化場及び不二岡橋より下流の地点は保護水面として設定されており（北海道根室振興局）、河川水面に降りることが出来なかったため、流量観測を行わなかった。

2.4. 室内分析項目

冷蔵庫内に保存した水試料は、可能な限り速やかに全窒素（以下 T-N）濃度とアルカリ度、および各種主要陽イオンおよび陰イオンの測定を行った。T-N は、JIS K 0102「工場排水試験方法」（日本規格協会，2002）の 45.2「紫外線吸光度法」に従って測定を行った。また、ろ過した水試料についても同様に測定を行うことで、溶存態全窒素（以下 DT-N）濃度を求めた。さらに、T-N 濃度と DT-N 濃度の差から、懸濁態全窒素（以下 PT-N）濃度も算出した。また、アルカリ度は、JIS K 0102「工業排水試験方法」（日本規格協会，2002）の 15.1「酸消費量（pH4.8）」に基づいて測定を行った。陽イオン類（ Na^+ 、 K^+ 、 NH_4^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} ）の測定には、東ソー社製 IC-2010 Ion Chromatograph を用いた。分離カラムには東ソー社製 TSKgel Super IC-CR、溶離液には 2.2 mM メタンスルホン酸 + 1 mM 18-クラウン-6 混合溶液を用いた。陰イオン類（ Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} ）の測定には、ダイオネクス社製 IC20 Ion Chromatograph を用いた。分離カラムにはダイオネクス社製 Ion PacTM AS12A、溶離液には 2.7 mM NaCO_3 + 0.3 mM NaHCO_3 溶液を用いた。これらの測定から得られたアンモニウムイオン濃度および硝酸イオン濃度は、それぞれアンモニウム態窒素（以下 $\text{NH}_4\text{-N}$ ）濃度および硝酸態窒素（以下 $\text{NO}_3\text{-N}$ ）濃度に換算した。なお、本研究で示す $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度とは、非解離および解離の両方を含む全アンモニア態窒素である。

3. 結果と考察

3.1. 現地水質観測の結果

現地観測の結果をまとめたものを表 2 に示す。全調査日および全調査地点を含めた採水時における水温は平均 10.9℃であったが、8 月に最も高く、夏から秋にかけて徐々に低下した。DO は、全地点および全調査日を含めて平均 9.4 mg/L であったが、支流のボン虹別川において平均 6.4 mg/L と全地点の中で最も低値であった。河川の類型指定において、長栄橋よりも上流の西別川は類型 AA、それよりも下流は類型 A に指定されており、これらの類型で

は DO の環境基準は 7.5 mg/L 以上とされている。西別川本流では、9 月 26 日の別海橋 6.8 mg/L を除いて、DO は全て環境基準を満たしていた。EC は、全地点および全調査日を含めて平均 15.2 mS/m であったが、最上流地点の平均 11.5 mS/m から最下流地点の平均 15.5 mS/m へと、本流の EC 値は流下に伴い高くなる傾向が見られた。このことは、流域から溶存イオン成分が西別川へ流出していることを示している。また、上虹別川と然内小橋、清丸別川を除く支流の平均 EC 値は 17.1~24.1 mS/m の範囲内であり、本流に比べて比較的これらの数値が高かったことは、河川水量の少ない支流において汚濁物質の希釈効果が少ないことを反映していると考えられた。pH は、全地点および全調査日において平均 7.3 であった。類型 AA および類型 A における pH の環境基準 6.5~8.5 と比較すると、西別川本流の pH は全てこれを満たしていた。ORP は、全地点および全調査日において平均 324 mV であり、6 月 28 日、8 月 19 日の全調査地点の平均値はそれぞれ 193 mV、170 mV であったが、9 月 26 日、10 月 31 日、11 月 21 日の平均値はそれぞれ 434 mV、411 mV、414 mV と高値であった。

3.2. T-N 濃度分布

調査日ごとの西別川流域における T-N 濃度分布を図 2a~2e に示す。代表例として 8 月 19 日の測定結果（図 2b）を見ると、本流の調査地点における平均値は 0.8 mgN/L（最大値：千歳橋、新生橋、別海橋 1.4 mgN/L、最小値：ふ化場、虹彩橋 0.2 mgN/L）、支流の調査地点における平均値は 1.7 mgN/L（最大値：ボン虹別川、ボンオンネベツ川 2.5 mgN/L、最小値：然内小橋 0.7 mgN/L）となり、本流で低値、支流で高値であった。上流から下流への流下に伴い、本流の T-N 濃度は高くなる傾向が見られたが、下流域地点ではほぼ一定の濃度であった。また、全ての調査日を含めたとしても、西別川本流での濃度は最大 1.6 mgN/L であった。大村（1995）によると、流域の多くが牧草地で占められている道東の河川において、未整備な状態の家畜排泄物処理施設が多く点在中流域では顕著な T-N 濃度の上昇が見られ、中流域から下流域において 1.1~1.5 mgN/L であるといった報告がなされている。この濃度と比較すると、本調査によって得られた本流の平均 T-N 濃度は 0.5~0.7 倍と低値であり、下流域の最大値 1.4 mgN/L は 0.9~1.3 倍とやや高値であった。これらの結果より、西別川中流域に河川への窒素負荷源があると考えられた。また、

表2 現地観測の全データ

調査地点名	気温 (℃)	湿度 (%)	水温 (℃)	DO (mg/L)	EC (mS/m)	pH	ORP (mV)
本流 ふ化場	11.6±6.3	78.0±3.5	9.3±1.5	10.3±1.2	11.5±0.5	7.39±0.11	329±131
	3.9-22.0	74.4-83.5	7.9-12.2	8.6-11.7	11.1-12.4	7.27-7.54	150-453
虹彩橋	12.2±6.2	79.3±5.6	9.4±1.7	10.6±0.8	12.5±0.2	7.45±0.27	344±106
	5.0-23.1	73.1-86.7	7.5-12.3	9.4-11.7	12.2-12.8	7.06-7.76	190-444
虹別橋	12.5±6.9	79.4±10.3	9.4±1.9	10.1±0.7	12.8±0.3	7.44±0.09	319±130
	4.4-25.0	65.9-90.6	6.8-12.4	9.3-10.9	12.4-13.3	7.29-7.56	142-434
観山橋	13.3±7.5	76.2±13.5	10.0±2.4	9.7±0.8	12.9±0.3	7.36±0.13	325±131
	5.1-27.2	59.7-91.9	7.2-14.1	8.5-10.6	12.6-13.4	7.20-7.54	151-450
シワンベツ下流	13.5±7.3	75.5±13.5	9.8±2.4	10.3±0.8	12.6±0.4	7.42±0.09	324±117
	5.7-27.3	59.0-91.4	6.8-13.9	9.2-11.4	12.1-13.1	7.31-7.58	180-423
高見橋	13.8±6.8	74.9±13.2	10.5±2.9	10.1±0.7	13.6±0.5	7.41±0.04	343±105
	5.6-26.2	55.1-91.8	7.4-15.7	9.2-11.1	13.0-14.5	7.37-7.46	213-445
長栄橋	15.6±9.4	68.2±20.6	11.0±3.7	9.7±0.6	14.6±0.6	7.43±0.17	334±115
	5.0-33.3	41.4-92.2	7.1-17.9	8.9-10.4	13.7-15.3	7.16-7.66	194-455
千歳橋	14.7±8.4	69.2±19.1	11.8±4.5	9.2±0.7	16.0±0.9	7.39±0.19	314±113
	5.6-30.7	46.4-93.0	7.3-20.1	8.0-10.1	14.3-16.9	7.06-7.62	145-426
新生橋	14.0±8.7	71.0±18.6	11.3±4.7	9.7±1.0	15.9±1.1	7.42±0.16	346±106
	4.4-30.3	48.5-93.3	6.9-20.2	8.5-11.5	13.8-17.1	7.11-7.57	199-435
別海橋	12.8±6.9	76.8±14.3	11.9±4.6	8.5±1.0	15.5±1.3	7.43±0.16	340±121
	4.3-25.3	56.2-93.3	6.9-20.2	6.8-9.9	13.1-16.7	7.12-7.56	155-452
支流 上虹別川	12.3±7.0	76.3±7.8	10.3±4.3	9.9±0.6	12.7±0.7	7.22±0.11	278±121
	4.3-24.8	66.8-85.0	5.5-18.0	8.9-10.8	11.3-13.4	7.05-7.35	120-400
ボン虹別川	12.6±6.6	79.0±10.0	10.6±3.3	6.4±1.6	24.1±3.9	6.96±0.07	311±128
	5.2-24.6	63.4-89.8	6.4-14.4	3.8-8.4	19.1-28.1	6.91-7.09	130-428
ボンオンネベツ川	14.7±8.2	73.1±17.3	11.1±3.6	9.8±0.6	17.1±3.4	7.39±0.23	332±118
	5.5-30.1	51.6-91.7	6.9-17.7	8.7-10.4	10.5-19.8	7.09-7.80	182-445
不二岡橋	15.3±8.7	68.7±18.1	11.4±3.7	9.4±0.6	18.9±1.1	7.32±0.10	337±124
	5.6-31.6	46.0-89.1	6.9-18.0	8.7-10.1	17.3-19.8	7.20-7.48	180-461
然内川然内橋	14.7±8.4	70.8±18.8	12.1±4.4	8.8±0.9	21.2±2.5	7.51±0.22	329±117
	4.6-30.1	47.7-93.2	6.8-20.1	7.3-9.9	16.5-23.3	7.15-7.80	183-462
然内小橋	15.3±8.4	71.0±19.2	12.3±4.6	8.5±0.6	12.7±0.8	7.26±0.14	281±113
	5.4-30.8	46.9-93.2	7.3-20.7	7.4-9.3	11.6-13.8	7.04-7.48	93-376
清丸別川	14.0±8.4	74.4±14.0	12.4±5.5	8.0±0.5	13.0±1.9	7.04±0.12	326±116
	5.6-30	58.3-93.0	7.3-22.7	7.4-8.8	9.8-15.3	6.83-7.16	158-445

上段 平均値±標準偏差

下段 最小値-最大値

支流の調査地点における T-N 濃度は本流のものよりも高値であり、河川流量の少ない支流における汚濁物質の希釈効果が少ないことを反映していると考えられた。これら西別川流域における T-N 濃度の分布傾向は、値の大小があるものの、他の調査日においても同様であった（図 2a, 2c~2e）。

3.3. T-N 濃度に占める DT-N 濃度割合

図 3a~3e に、調査日別の DT-N および PT-N 濃度を示す。8 月 19 日を代表例として測定結果を見ると、T-N 濃度に対する DT-N 濃度の割合は、本流では平均 67%（最大：高見橋 99%，最小：ふ化場-15%），支流では平均 76%（最大：ボンオンネベツ川 95%，最小：然内小橋 38%）であり、西別川流

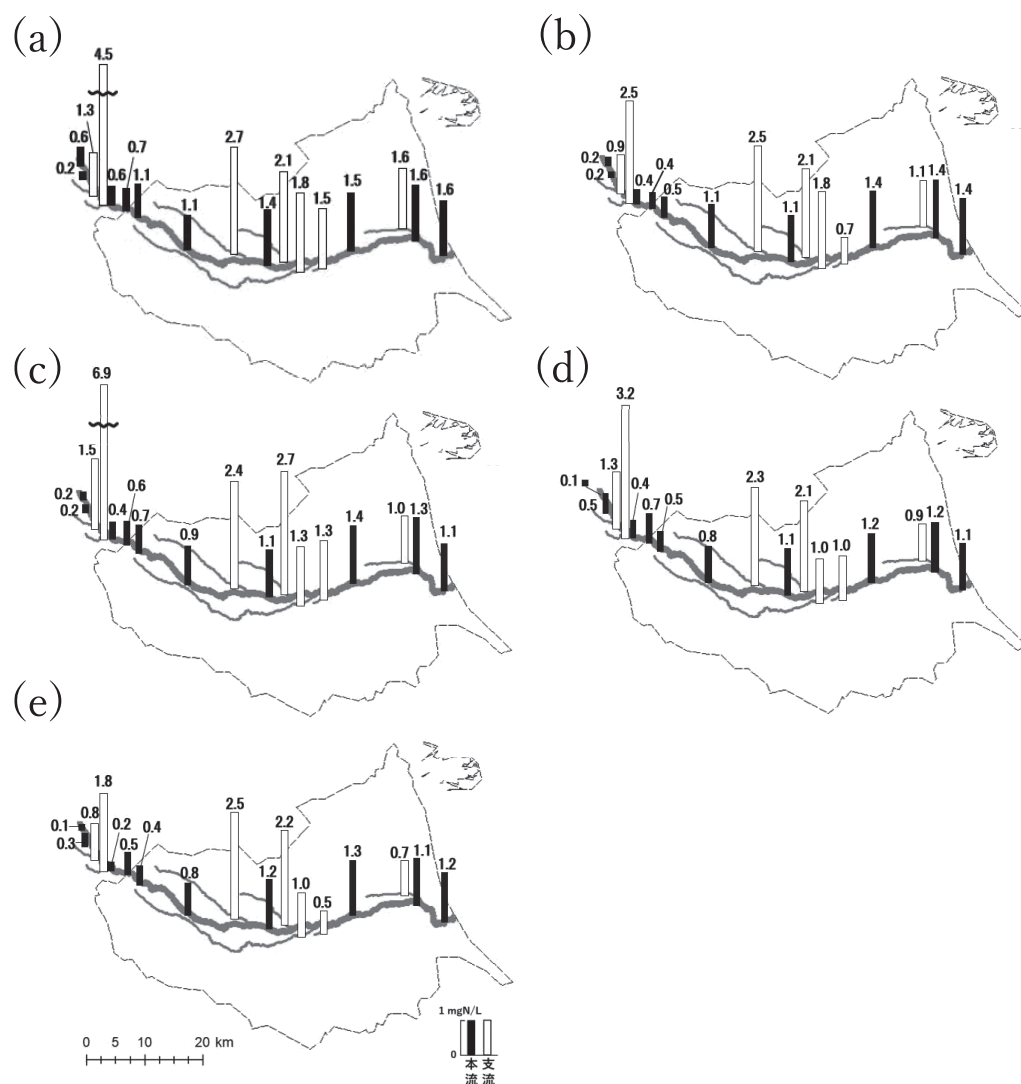


図2 西別川流域におけるT-N濃度分布.

調査日 (a) 6月28日, (b) 8月19日, (c) 10月31日, (e) 11月21日.

域における河川水中T-Nの大半はDT-Nで占められていた(図3b)。特に本流では、中流から下流の調査地点(観山橋～別海橋)では、平均約80%以上はDT-Nが占めており、他調査日においても50%以上はDT-Nであった。なお、マイナスとなったものは、流域の中で最上流部のふ化場で見られ、もともとT-Nが検出限界値に近い低濃度であることに伴う測定誤差の影響と考えられた。また、8月19日の結果によると、T-NにおいてDT-Nの一つであるNO₃-Nがその多くを占めており、全調査日を含めた本流における平均91%(最大値:虹彩橋155%,最小値:虹別橋61%),支流における平均74%(最大値:ポンオンネベツ川105%,最小値:清丸別川44%)であり、支流に比べ本流の調査地点においてNO₃-Nの割合が高かった(表3)。同様の傾向

は、他調査日においても見られた(図3a, 3c～3e)。

3.4. NH₄-N濃度およびNO₃-N濃度の分布

全調査日における各地点のNH₄-N濃度を表4に示す。この結果を見ると、本流の調査地点においてNH₄-N濃度はほとんどが検出限界値以下(<0.02 mg/L)、もしくは検出されたとしても非常に低値であった。これに対し、全ての調査日において支流の上虹別川、ポン虹別川、清丸別川ではNH₄-Nが検出された。特にポン虹別川では、調査日6月28日、9月26日および10月31日のNH₄-N濃度は、それぞれ3.6, 2.5, 1.0 mgN/Lと高い上、6月と9月の値は水産用水基準1.9 mgN/L (pH=7.0, 水温20℃のとき)(日本水産資源保護協会, 2020)を超える高値であった。一般的に、家畜排泄物にはNH₄-Nに

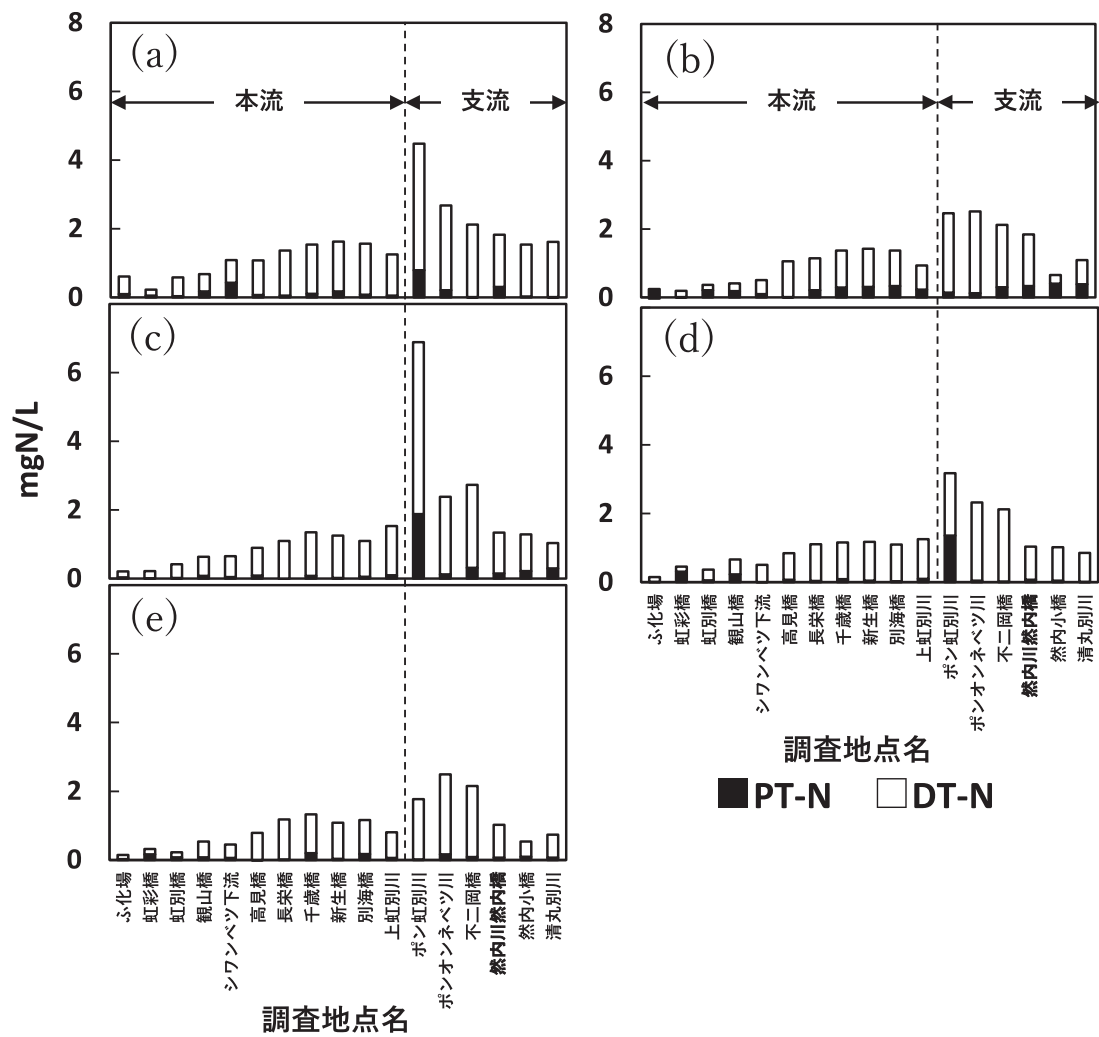


図3 西別川流域における形態別窒素濃度.

調査日 (a) 6月28日, (b) 8月19日, (d) 10月31日, (e) 11月21日.

加えて、カリウムイオン (K^+)、カルシウムイオン (Ca^{2+})、塩化物イオン (Cl^-) 等の成分が多く含まれていることが知られている (三上・五十嵐, 2014; 大村, 1995)。ポン虹別川で顕著に NH_4-N 濃度が高かった日の平均 K^+ 濃度, Ca^{2+} 濃度および Cl^- 濃度はそれぞれ 0.48, 0.58, 0.47 mg/L であり, 同日の西別川本流におけるそれぞれの濃度 0.05, 0.24~0.29, 0.18 mg/L に比べて 2~10 倍の高値であった。これらのことから, ポン虹別川には直接的に家畜排泄物に由来する汚濁物質が流入している可能性が示された。

NH_4-N 濃度と比較して NO_3-N 濃度は, 本流および支流ともに高濃度で検出されたが, 全て環境基準である 10 mgN/L および水産用水基準の 9 mgN/L (日本水産資源保護協会, 2020) を下回っていた (表5)。本流の調査地点において, 全地点の各調査日における NO_3-N 濃度は平均 0.62~0.72 mgN/L の

範囲内であった。また, 最上流部の調査地点から流下に伴い NO_3-N 濃度は増加する傾向が見られたが, 下流はほぼ一定の濃度であった。支流においては, 全地点の調査日別 NO_3-N 濃度は平均 0.97~1.40 mgN/L の範囲であった。支流の調査地点であるポンオンネベツ川と不二岡橋では, 全調査日における NO_3-N 濃度の平均値はそれぞれ 2.31, 2.00 mgN/L, ポン虹別川では, 8月19日と11月21日の調査日において, それぞれ 2.22, 1.68 mgN/L と著しく高値で検出された。田渕ほか (1995) は西別川や床丹川, 標津川流域からなる根室地区での1992年頃における土地利用別 NO_3-N 濃度範囲において, 畑草地率 0~10%, 10~20%, 20~40%, 40~60%, 60~80% でそれぞれ, <0.1, 0.1~0.4, 0.9~1.0, 0.9~1.1, 0.9~2.0 mgN/L であることを報告している。西別川の本川および主要支川の流域草地率は平均 65% (範囲 42~80%) である (田中ほか,

表 3 西別川流域における T-N 濃度に占める NO₃-N 濃度の割合 (%)

調査地点名		調査日				
		6 月 28 日	8 月 19 日	9 月 26 日	10 月 31 日	11 月 21 日
本流	ふ化場	22	83	98	145	140
	虹彩橋	56	155	92	48	68
	虹別橋	43	61	52	79	132
	観山橋	39	68	55	52	65
	シワンベツ下流	44	92	74	92	112
	高見橋	78	84	86	90	103
	長栄橋	79	102	94	91	90
	千歳橋	68	89	80	88	81
	新生橋	59	86	81	84	97
	別海橋	63	88	92	87	89
支流	上虹別川	53	79	32	48	91
	ポン虹別川	1	90	16	28	95
	ポンオンネベツ川	81	105	94	95	93
	不二岡橋	85	101	73	95	94
	然内川然内橋	48	78	69	83	89
	然内小橋	53	19	50	67	74
	清丸別川	27	44	36	62	67

表 4 西別川流域における NH₄-N 濃度 (mgN/L)

調査地点名		調査日				
		6 月 28 日	8 月 19 日	9 月 26 日	10 月 31 日	11 月 21 日
本流	ふ化場	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	虹彩橋	N.D.	0.04	N.D.	N.D.	N.D.
	虹別橋	N.D.	N.D.	0.04	N.D.	N.D.
	観山橋	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	シワンベツ下流	N.D.	N.D.	0.03	N.D.	N.D.
	高見橋	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	長栄橋	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	千歳橋	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	新生橋	0.03	N.D.	0.04	0.03	0.04
	別海橋	0.04	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
支流	上虹別川	0.17	0.03	0.46	0.34	0.03
	ポン虹別川	3.63	0.18	2.51	1.61	0.03
	ポンオンネベツ川	0.04	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	不二岡橋	0.04	N.D.	0.07	N.D.	N.D.
	然内川然内橋	0.05	0.05	N.D.	N.D.	N.D.
	然内小橋	0.18	N.D.	N.D.	0.07	N.D.
	清丸別川	0.14	0.03	0.04	0.03	0.03

N.D. : 検出限界値 (0.02 mgN/L) 未満

表5 西別川流域における NO₃-N 濃度 (mgN/L).

調査地点名		調査日				
		6月28日	8月19日	9月26日	10月31日	11月21日
本流	ふ化場	0.14	0.18	0.21	0.21	0.20
	虹彩橋	0.13	0.30	0.20	0.21	0.22
	虹別橋	0.25	0.22	0.22	0.29	0.30
	観山橋	0.27	0.28	0.35	0.34	0.35
	シワンベツ下流	0.48	0.47	0.49	0.47	0.50
	高見橋	0.84	0.88	0.77	0.76	0.80
	長栄橋	1.07	1.16	1.04	1.01	1.06
	千歳橋	1.05	1.22	1.08	1.01	1.08
	新生橋	0.95	1.23	1.01	0.99	1.05
	別海橋	0.99	1.21	1.01	0.95	1.03
支流	上虹別川	0.67	0.74	0.49	0.60	0.73
	ボン虹別川	0.03	2.22	1.12	0.87	1.68
	ボンオンネベツ川	2.18	2.63	2.25	2.21	2.30
	不二岡橋	1.81	2.15	2.00	2.02	2.02
	然内川然内橋	0.88	1.44	0.93	0.85	0.91
	然内小橋	0.81	0.12	0.65	0.68	0.40
	清丸別川	0.43	0.48	0.38	0.52	0.49

2019) ことを考慮すると、本研究で得られた結果は同等程度からやや低い NO₃-N 濃度といえる。

3.5. NH₄-N 負荷量および NO₃-N 負荷量

西別川上～中流域の本流及び支流の調査地点における形態別窒素負荷量と河川流量を図4に示した。この図中では、全窒素負荷量から NO₃-N 負荷量と NH₄-N 負荷量を差し引いたものをまとめて、その他の窒素負荷量として示した。NH₄-N 負荷量は、本流において8月19日の虹彩橋 8 kg/日、9月26日の虹別橋 10 kg/日とシワンベツ下流 12 kg/日を除くと、全ての調査地点において、1 kg/日以下であった。支流である上虹別川やボン虹別川の流量は 1 m³/s 未満と少ないものの、8月19日と11月21日の調査日を除くと、3～12 kg/日の範囲で NH₄-N が流出していた。これは、同調査日における NH₄-N 濃度が、本流および他調査日と比較して顕著に高値だったためである(表4)。西別川本流において、いずれの調査日においても NO₃-N 負荷量は流下に伴い増加していた。特に、観山橋に対して、下流に位置するシワンベツ下流および高見橋の河川流量は、それぞれ約1.4倍および約1.7倍程度だったにもかかわらず、NO₃-N 負荷量はそれぞれ約3倍および約6倍に増加していた。この地点間には目立った支流が認められなかったことから、流域周辺の酪農

施設や排水施設が未整備の原因があると予想された。以上の結果は、西別川流域で見られた T-N 濃度や NO₃-N 濃度の分布から推定した中流域に窒素負荷源があることを支持するものであった。また、支流の NO₃-N 濃度は本流に比べて高値であるものの(表5)、その河川流量は著しく少なかったため、支流の NO₃-N 負荷量は本流よりも低値となった。

3.6. 下流域における T-N 濃度の経年変化

西別川本流の下流域2地点(長栄橋、新生橋)における T-N 濃度経年変化を図5に示した。なお、平成10年度から令和1年度までの測定データは、釧路開発建設部より提供いただいたものを使用し、令和2年度には本研究で得られたデータを使用した。また、長栄橋は事業完了区域である別海地区(平成11年～19年)の上流側に位置し、新生橋は別海地区の下流側に位置する。平成14年から平成21年における両地点の T-N 濃度は 1～1.5 mg/L の間で大きく変動しており、その変動パターンもほぼ同じ傾向であった。特に、平成16年、17年および20年は 1 mg/L 程度の低濃度であった。先行研究(内藤ほか, 2021)ではこの T-N 濃度の年変動要因について言及されていないが、気象観測点「別海」における年降水量をみると、濃度が低かった平成16年、17年および20年における年降水量はそれぞれ 961

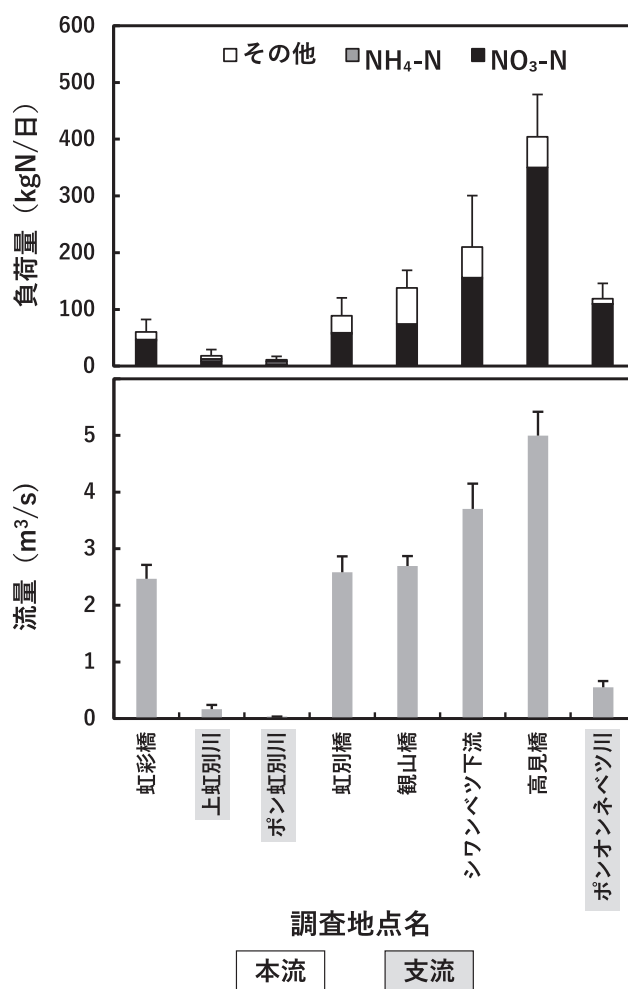


図4 西別川上～中流域における窒素負荷量（上）と流量（下）の平均値（ $n=5$ ）。
その他には $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ を除く全ての窒素（懸濁態も含む）が含まれる。また、図中バーは標準偏差を示す。

mm, 876 mm および 788 mm であり、過去 20 年間（平成 12 年から令和 2 年）の平均年降水量 1,145 mm に比べると少なかった。そのため、一要因として降水が西別川における T-N 濃度変動に影響している可能性が考えられた。また、平成 27 年以降を見ると、長栄橋では T-N 濃度は緩やかに減少していたが、新生橋では平成 30 年や令和元年にかけて一旦上昇し、再び減少する傾向が見られた。このように、年平均 T-N 濃度の変動が大きかったにもかかわらず、事業完了後の平成 20 年度以降は緩やかではあるが T-N 濃度は低下傾向にあった。これらの結果は、別海地区において水質汚濁物質の流出抑制・浄化を目的とした施設等の整備が完了したことによる流域からの窒素流出削減が反映されたものであると考えられた。また、長栄橋においても変動は大きいものの平成 20 年度以降の T-N 濃度は低下傾向にあった。西別川上～中流域には、現在事業実

施中区域である別海西部地区（平成 19 年～）、別海北部地区（平成 24 年～）があるため、今後の事業整備が進展することで、T-N 濃度はさらに低下することが予想された。

3.7. 畑草地面積割合と $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度との関係

畑草地の集水域から流出する $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度を解析した先行研究（田淵ほか、1995；若生、2007）を参考に、全調査日の本流における下流の 4 地点（高見橋、長栄橋、新生橋、別海橋）の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度と畑草地面積割合との関係について解析した。なお、調査地点の流域における畑草地面積は、別海町役場より提供された 2014 年排せつ物調査票を基にし、流域名称が示された個々の農家の位置とその農家が所有する草地面積から集計し、流域面積は Google earth 上から算出したものを使用した。結果を図 6 に示す。畑草地面積率が大きくなると $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が比

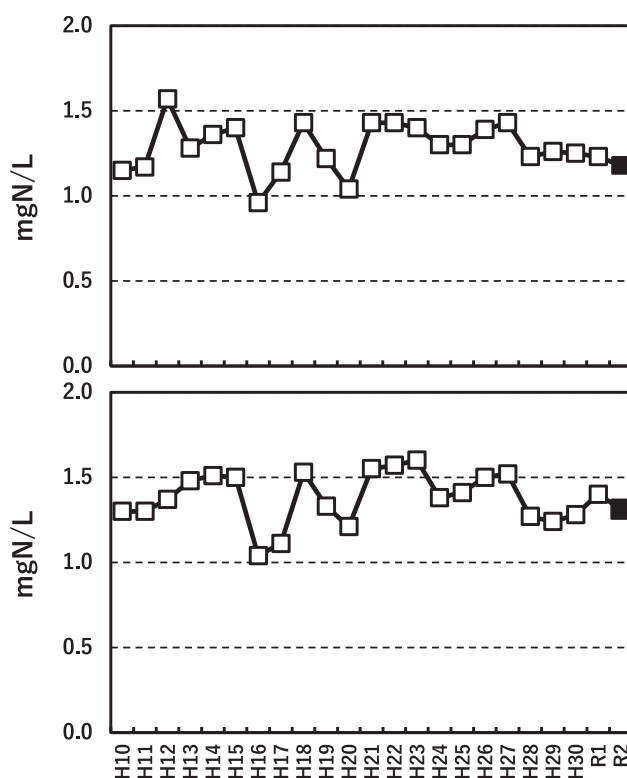


図5 西別川本流の長栄橋（上）と新生橋（下）における T-N 濃度の経年変化。
H10～R1 の T-N 濃度は釧路開発建設部からの提供データを使用。

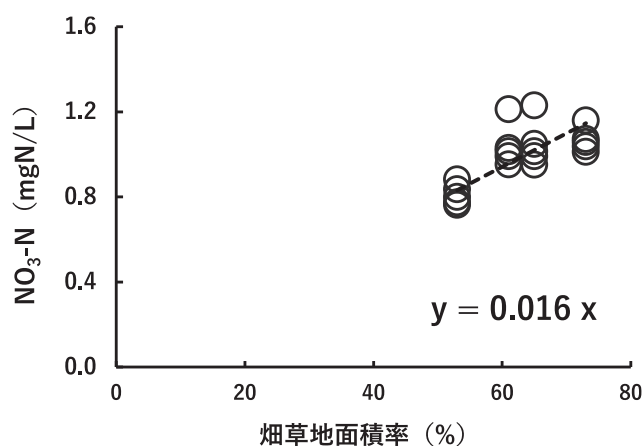


図6 西別川の高見橋，長栄橋，新生橋，別海橋における流域の畑草地面積割合と $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度との関係。

例的に上昇していた。このとき、畑草地面積率と $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の関係における回帰係数 a は、草地面積率における窒素流出量の違いを反映したものであり、全調査日のデータで求めた平均 0.016 に対し、日別で求めた値は 0.015～0.018 とほぼ同じような値であった。若生（2007）が西別川流域を含む釧路地域で求めた畑草地面積率と $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度との関係における回帰係数 a は、2006 年時点で 0.035 であ

り、本研究で得られた結果はこの値から 46% 低下していた（表 6）。この結果は、かんがい排水事業が整備されることで、畑草地からの窒素流出削減の効果を反映しているものと考えられた。また、十勝地域における回帰係数 a を参考にすると、調査年が 2006 年の結果において 0.054 であり（若生，2007），本研究で得られた回帰係数 a より約 3 倍の値であった。これは、釧路地域の流域における $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が

表 6 畑草地面積率と $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度との間における回帰係数 a 値.

年度	回帰係数 a 値	流域河川	文献
1992	0.023	標津川, 西別川, 床丹川	若生 (2007)
2003	0.025	同上	
2004	0.025	同上	
2005	0.028	同上	
2006	0.035	同上	
2020	0.016	西別川	本研究

0.0~2.0 mgN/L なのに対して、十勝地域の流域における $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が 0.6~3.9 mgN/L と高値であり、牧草地に比べ比較的施肥量の多い畑地の存在に起因するものとされている (田淵ほか, 1995; 若生, 2007)。これに対し西別川流域を含めた釧路地域拠点では、総耕作地面積 198,700 ha のうち、約 90% である 178,110 ha は牧草専用地面積 (北海道農政事務所) であるため、畑地への施肥による河川への窒素流出負荷量は少ないものと考えられる。しかしながら、調査対象地域における耕作地面積の大半を占める牧草地への施肥は、河川への窒素流出負荷に影響することが考えられるため、より精密なかんがい事業の有効性の評価においては、牧草地への施肥量やその質等をあわせて考慮することが重要である。

4. ま と め

本研究では、道東の酪農地帯を流れる西別川流域を調査対象地として、河川窒素汚染の現状、形態別濃度や負荷量を含めた流出特性を調査し、調査対象区域内で行われていたかんがい排水事業による流域からの窒素流出削減効果の検証を行った。

すでに事業が完了している別海地区に相当する西別川下流域では、T-N 濃度および $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は一定であった。さらに同じ地域における畑草地面積比率と河川水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度との間で得られた平均の傾き 0.016 は、2006 年時点での値 0.035 よりも低かったことから、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 流出量は以前の値に比べて低下していることが推定された。このことは、かんがい排水事業による窒素流出削減効果を反映しているものと考えられた。一方で、河川水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度と畑草地面積比率との間に見られる正の相関関係は、流域における畑草地からの窒素流出負荷の影響が大きいことを示している。これには、農地への施肥の量やその質、さらにはかんがい排水事業で導入された肥培かんがい施設において家畜排せつ物を処理して得られたスラリーの農地還元が影響してい

ることが予想される。そのため、畑草地におけるこれらの利用実態を含めた更なる調査により、かんがい排水事業のより精密な効果を評価できるとともに、今後の河川窒素負荷削減における効果的な対策を立案できると考えられる。

西別川上~中流域では、T-N 濃度と $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度に加えて、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 負荷量はいずれも本流の流下に伴い増加していた。特に、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 負荷量は、中流に位置する観山橋から高見橋までで急激な増加が見られた。これら中流域における主要な支流においては、T-N 濃度および $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が高値で検出された。しかしながら、支流の河川流量は非常に小さく、また支流からの $\text{NO}_3\text{-N}$ 負荷量は本流の負荷量と比較してほんのわずかであったことから、中流域にはこれら支流からの流れ込み以外の窒素負荷源があると推定された。支流の一つであるポン虹別川では、全ての調査地点の中で最も高い $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が検出された。このとき、家畜排泄物に多く含まれているとされる K^+ , Ca^{2+} , Cl^- が同じ水試料において高値で検出されたことから、ポン虹別川には直接的に家畜排泄物が流入している可能性が考えられた。以上の結果から、西別川の上~中流域では、周辺の酪農施設や排水施設が未整備の原因があると考えられたが、上~中流域では、別海西部地区 (平成 19 年~) と別海北部地区 (平成 24 年~) の事業実施中区域があるため、飼養頭数や規模階層の大幅な変動がないとするならば、今後事業が進み、窒素流出負荷が削減されることで、さらなる事業の効果が表れるものと予想された。

謝 辞

本研究を行うにあたり、別海町役場 産業振興部 皆川好太郎様には、国営事業に関するデータの提供にご協力をいただきました。北海道開発局 釧路開発建設部 内藤和樹様には、T-N 濃度に関するデータの提供にご協力をいただきました。酪農学園大学・水質化学研究室の皆様には、調査や分析等を行

うにあたって、ご協力をいただきました。これらの方々に、心より感謝申し上げます。

引用文献

- 福原道俊・前畑宏樹・伊東 耕 (2012)：国営環境保全型かんがい排水事業における窒素，リン収支フローによる水質浄化効果の算定手法．平成23年度北海道開発技術研究発表会．URL：<https://www.hkk.or.jp/oshirase/20120413kk21.pdf> (2021年6月1日時点)．
- 北海道開発局 釧路開発建設部：国営環境保全型かんがい排水事業の取り組みと効果．URL：https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/ki/kouhou/torikumi_4.pdf (2021年6月1日時点)．
- 北海道根室振興局：保護水面，資源保護水面．URL：<http://www.nemuro.pref.hokkaido.lg.jp/ss/sis/nemuronosuisan/H24/24nemuronosuisan13.pdf> (2021年6月1日時点)．
- 北海道農政事務所：釧路地域拠点．URL：<https://www.maff.go.jp/hokkaido/kushiro/attach/pdf/index-6.pdf> (2021年6月1日時点)．
- 井上一哉・小林 晃・青山威康 (2003)：地盤内の窒素化合物の形態変化を伴う物質移動解析．農業土木学会論文集，2003：319-328．
- 井上 京・山本忠男・長澤徹明 (1999)：北海道東部浜中地区における流域の土地利用と河川水質．農業土木学会論文集，1999：249-256．
- 石川 靖・斉藤 修・木内康之・茂原靖浩・小林正幸・奥山則男 (2004)：畜産活動に伴う汚水流出機構の解明．北海道環境科学研究センター所報，31：84-92．
- 菊地幹夫・若林明子 (1997) アンモニア汚染の環境リスク評価．東京都環境科学研究所年報，1997：143-148．
- 気象庁，過去の気象データ「別海」．URL：http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?prec_no=18&block_no=0088&year=&month=&day=&view= (2021年6月1日時点)．
- 国土交通省 (2020)：全国都道府県市町村別面積調．URL：<https://www.gsi.go.jp/KOKUJYOHO/MENCHO/backnumber/GSI-menseki20201001.pdf> (2021年6月1日時点)．
- 三上英敏・藤田隆男・坂田康一 (2008)：酪農地帯，風蓮湖流域河川の水質特性．北海道環境科学センター所報，34：19-40．
- 三上英敏・五十嵐聖貴 (2014)：家畜排せつ物法施行後における風蓮湖流域河川の水環境変化について．環境科学研究センター所報，4：37-43．
- 門谷 茂・真名垣友樹・柴沼成一郎 (2011)：酪農業の進展と風蓮湖の生物生産構造変化．沿岸海洋研究，49：59-67．
- 長澤徹明・井上 京・梅田安治・宗岡寿美 (1995)：北海道東部の大規模酪農地域における河川の水質環境．水文・水資源学会誌，8：267-274．
- 内藤和樹・吹田勝治・田中克和 (2021)：国営環境保全型かんがい排水事業で整備した浄化型排水路等での水質浄化の検証について—水質浄化の検証結果とりまとめ—．第64回 (2020年度)北海道開発技術研究発表会論文．URL：<https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/jg/gijyutu/splaat00000217z7-att/splaat0000021866.pdf> (2021年6月1日時点)．
- 内藤和樹・佐々木祐一・吹田勝治 (2020)：国営環境保全型かんがい排水事業で整備した浄化型排水路等での水質浄化の検証について—水質浄化の検証結果とりまとめ—．第63回 (2019年度)北海道開発技術研究発表会論文．URL：<https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/jg/gijyutu/splaat000001t3qf-att/splaat000001t3yv.pdf> (2021年6月1日時点)．
- 日本規格協会 (2002)：JIS K 0102「工業排水試験方法」．
- 日本規格協会 (1994)：JIS K 0094「工業用水・工業排水の試料採取方法」．
- 日本水産資源保護協会 (2020)：水産用水基準第8版 (アンモニア態窒素修正版)．
- 農林水産省 (2016)：農林業センサス．URL：<https://www.maff.go.jp/j/tokei/census/afc2015/280624.html> (2021年6月1日時点)．
- 大村邦男 (1995)：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，86：1-63．
- 阪元浩貴 (2005)：国営環境保全型かんがい排水事業別海地区について．ARIC 情報，77：93-101．
- 志村もと子・田淵俊雄 (1997)：養牛地域における畜産と河川水窒素濃度との関係—畜産主体の集水域における窒素流出に関する研究 (Ⅳ) —．農業土木学会論文集，1997：375-380．
- 鈴木信也・児玉正俊・鳥海昌彦 (2011)：環境保全型かんがい排水事業はまなか地区における水質改善状況の検証．平成22年度北海道開発技術研究発表会．URL：<https://thesis.ceri.go.jp/db/files/GR0002900190.pdf> (2021年6月1日時点)．

田渕俊雄・吉野邦彦・志村もと子・黒田清一郎・石川雅也・山路永司 (1995) : 農林地からの流出水の硝酸態窒素濃度と土地利用との関係. 農業土木学会論文集, 1995 : 529-535.

田中健二・鶴木啓二・川口清美 (2019) : 大規模酪農地帯における水質濃度と営農状況の関係. 水

文・水資源学会 2019 年度研究発表会, 216-217.

若生沙智代 (2007) : 農業環境三法施行後における農林地流域の河川水質と土地利用評価. 帯広畜産大学後援会報告, 35 : 21-24.

藪崎志穂 (2010) : 日本の地下水・湧水等の硝酸態窒素濃度とその特徴. 地球環境, 15 : 121-131.

Abstract

In this study, an investigation of the pollution and runoff characteristics of nitrogen in the Nishibetsu River flowing through the dairy farming area in the eastern part of Hokkaido was conducted to evaluate the effects of an environmentally sound irrigation and drainage project on river nitrogen load reductions. The concentration of total nitrogen in the main river tended to increase with flow from the upper to the middle river, but it was almost constant at the lower river. In the same way, the concentration and load of nitrate-nitrogen also increased. In particular, the load increased sharply from Kanzan Bridge to Takami Bridge, located in the middle stream. The river nitrogen load in this area was considered to be caused by the underdeveloped dairy facilities and/or the drainage facilities. In the lower basin, where implementation of the project had been completed, the regression coefficient in the relationship between nitrate-nitrogen concentration and the grassland area ratio obtained in this study was 46% lower than that in the previous study. This result showed that the river nitrogen load in this area was reduced by the environmentally sound irrigation and drainage project. As there are areas still under the progress of the project in the western and northern parts of Betsukai in the upper to middle basin of the Nishibetsu River, the river nitrogen load is expected to be diminished further in the future.