

面源流域からの窒素流亡とその対策

鵜木 啓二*

Nitrogen Runoff from Non-point Source and its Control

Keiji UNOKI*

* Civil Engineering Research Institute of Hokkaido, Hiragishi 1-3-1-34,
Toyohira-ku, Sapporo 062-8602, Japan

1. はじめに

近年、北海道の畑作、畜産、酪農地帯では、農業に起因した水質環境汚染が問題となっている。農業流域における汚濁物質の発生源（汚濁源）には、点源としてパドックや堆肥盤など畜舎周辺が、面源として家畜糞尿や化学肥料が施用された圃場が挙げられる。流域の水質環境保全には、汚濁物質を農業系内から流出させない汚濁源対策が最も重要であることは言うまでもない。畜舎周辺からの汚濁物質流出は、1999年施行の「家畜排せつ物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律」によって規制されていることから、よりいっそう圃場からの流出抑制が課題となる。

圃場からの汚濁物質流出を抑制するためには、栄養塩の流出を抑制するような施肥方法や土壌保全的な圃場管理など、営農管理による対応が第一に挙げられる。しかし、降雨流出などの水移動に伴って圃場表面や土壌中の肥料成分など汚濁物質の一部が農業系内から流出することは避けられない。そこで、系内から流出した汚濁物質に対して適切な対策を講じる必要がある。しかし、圃場すなわち面源は広範囲に広がり、汚濁物質は河川等の水系に入ってしまうと大量の水とともに移動し、一般に点源より低濃度であることから、従来地下水システムのような処理方法は費用効率が悪い。そこで、農業系と水系の間に緩衝帯を設け、自然の水質浄化機能を利用して圃場からの汚濁物質を含んだ流出水を浄化する方法が提案されている。

実際に緩衝帯を整備するにあたって必要な情報として、①緩衝帯に流入する汚濁負荷の状況、②緩衝帯の規模・構造・植生、③緩衝帯の水質浄化機能などがある。欧米では1970年代から研究が進み数多くの研究報告が

出されているが（Correll, 2003）、国内での研究例は少ない（例えば、中村ら、2002）。緩衝帯による水質浄化は、自然の機能を利用した方法であることから、その効果は気候や地形、土壌、植生等の条件により大きく異なると予想される。今後、国内において緩衝帯による水質浄化を広く適用させるには先に挙げたデータの蓄積が急務となる。

本稿では、面源からの汚濁負荷流出対策工としての緩衝帯の構造と機能について紹介する。さらに、窒素流出事例として北海道東部草地酪農流域の水質環境と、河畔緩衝帯の水質浄化機能の調査事例として草地に隣接した林地の水質浄化効果について報告する。

2. 河畔緩衝帯の機能と構造

Correll (1997) は、緩衝帯による水質保全に関する多数の文献を整理したレビューのなかで、緩衝帯の水質保全機能を知るためには流域の水文学的性質を知ることが重要と述べ、水質浄化が機能するために必要な土壌条件について触れ、窒素除去のメカニズムについて解説した。さらに、植生の果たす役割についても言及した。

河畔緩衝帯は水質浄化機能以外に生物の生息域となるなど様々な機能を有するため（Karssies and Prosser, 1999）、その構造に関する考え方は多様であるが、水質保全の観点から見た場合、その浄化機能や植生の違いから図-1のような「Zone」に区分して表す考え方がある（Fishenich *et al.*, 2001）。ここでは、北海道東部の草地酪農地域に河畔緩衝帯を適用させることを想定し、降雨時に草地で発生した表面水が河畔緩衝帯を通過するとき作用する水質浄化機能について、「Zone」の特性と共に水移動に従って説明する。

① 圃場（草地）

* (独)北海道開発土木研究所 〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34

キーワード：窒素流出、河畔緩衝帯、水質浄化

草地は大型機械の踏圧により浸入能が低く、斜面に降った雨の一部は表面流となり草地表面にある土壌や肥料成分を混濁させて草地上を流下する。

② Zone 1: 草生フィルター帯

草地で発生した表面水は、大きな浸入能を持った緩衝帯に到達すると地中に入る。その時、表面水に含まれる土壌や懸濁態の汚濁物質が濾過される。また、集中した流出水を分散させる機能を持たせることが可能である。

③ Zone 2: 自然の河畔林と同様な植生となるように管理された林帯

Zone 1で地中に浸入した流入水は緩衝帯斜面を浸透する過程で土壌と接触し、流入水に含まれる溶存態の汚濁物質が除去される。浄化のメカニズムとして植物吸収や脱窒、吸着等がある。窒素の場合、植生による吸収は相対的に小さいとされ (Jacobs and Gilliam, 1985)、系外に除去するためには脱窒が重要である。植生は、幾つかの水質浄化プロセスに必要な有機物の供給源となる。

④ Zone 3: 河岸を安定させられる在来種による林帯
水質浄化に関する機能は Zone 2 と同様である。

3. 草地酪農流域の窒素流出事例

3.1 調査方法

3.1.1 調査流域概要

調査は、釧路管内浜中町に位置する MA 流域で行った

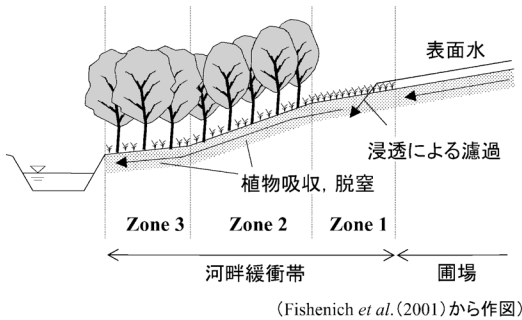


図-1 緩衝帯の構造と主な窒素浄化機能

(図-2)。調査流域では、酪農家が多数存在する「点源流域」、酪農家が存在せず草地と林地のみの「面源流域」、そして流域全体の「最下流域」を設定した。いずれも流域内に市街地は存在しない。各流域の諸元を表-1 に示す。

各流域とも土地利用の大部分が草地となっている。面源流域、点源流域にある林地の大部分は上部部の鉄道保安林であり、両流域とも河畔には林地は少なく、湿地や荒地が多い。また、流域全体が標高 10~60 m の緩やかな丘陵地形となっている。

3.1.2 水質観測

3 流域の最下端で採水を行い、水質分析に供した。平水時の採水は 2003 年と 2004 年の非積雪期に月 1・2 回行った。降雨出水時は、2 時間雨量が 5 mm 以上になった場合に自動採水器を用いて連続採水を行った。水質分析項目は全窒素 (T-N)、硝酸態窒素 (NO₃-N)、アンモニア態窒素 (NH₄-N) であり、分析方法は JIS に準じた。平水時の有機態窒素 (TON) は T-N から NO₃-N、NH₄-N を減じた値とした。また、降雨出水時は T-N、NO₃-N のみ分析を行い、T-N から NO₃-N を減じて TON+NH₄-N

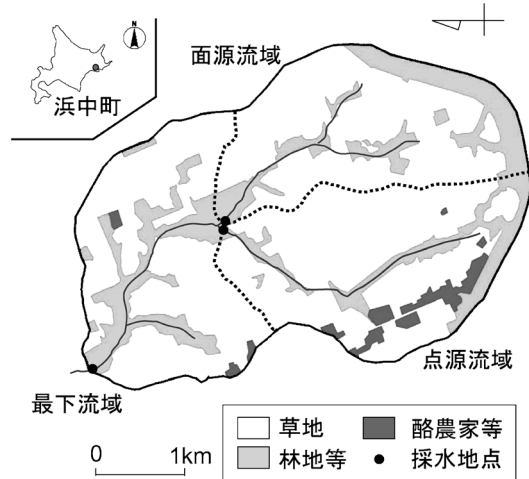


図-2 調査流域図

表-1 調査流域諸元

	面積 (km ²)	土地利用 (%)			飼養牛頭数 (頭)	
		草地	林地等	酪農家等	成牛	育成牛
最下流域	7.30	72	25	3	652	354
面源流域	2.44	71	29	0	0	0
点源流域	2.55	74	20	6	532	330

飼養牛頭数: 2003 年浜中町調べ

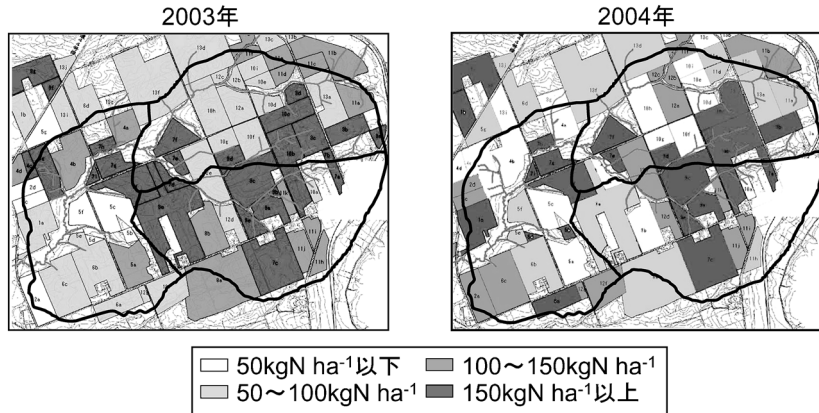


図-3 肥料散布状況（全窒素）

表-2 平水時の水質（流量加重平均値）

	流量 m^3s^{-1}	T-N mg L^{-1}	TON mg L^{-1}	$\text{NH}_4\text{-N}$ mg L^{-1}	$\text{NO}_3\text{-N}$ mg L^{-1}
最下流域	0.062	1.93	0.87	0.30	0.76
面源流域	0.031	0.63	0.17	0.01	0.45
点源流域	0.027	2.93	1.12	0.52	1.29

表-3 降雨出水時の水質（流量加重平均値）

	流量 m^3s^{-1}	T-N mg L^{-1}	$\text{TON}+\text{NH}_4\text{-N}$ mg L^{-1}	$\text{NO}_3\text{-N}$ mg L^{-1}
最下流域	0.191	2.63	1.68	0.95
面源流域	0.073	1.89	1.23	0.66
点源流域	0.079	7.09	5.65	1.44

とした。

3.1.3 水観測

流量は、随時流量観測を実施して水位と流量の関係（H-Q式）を求め、自記水位計の水位データから連続データに変換した。雨量は厚床アメダスのデータを用いた。

3.1.4 施肥量調査

本流域内に草地を所有する農家に対して、圃場ごとの化学肥料や堆肥・スラリー・尿の施用量や施用時期を聞き取りにより調査した。また、散布状況に合わせて堆肥、スラリー、尿の採取を行い、全窒素の分析を行った。試料は硫酸-過酸化水素分解法で分解し、分解液をFlow Injection Analysis (FIA) で測定した。

3.2 肥料散布状況

図-3に各圃場ごとの窒素施用状況を示す。酪農施設近傍の圃場に堆肥等の散布が集中する傾向がみられ、点源流域への施用量が多かった。草地への平均施用量は面源流域で 110 kgN ha^{-1} 、点源流域で 208 kgN ha^{-1} となっていた。施用時期は、化学肥料は融雪後の5月と一番草刈り取り後の7月、堆肥は二番草刈り取り後の9月末から11月末まで、尿およびスラリーは化学肥料や堆肥と同時期に施用する農家が多かった。また、一部の農家では、11月に入ってから堆肥や尿、スラリーを散布して

おり、この時期には植物による吸収が期待できないことから、融雪融凍期に融雪水と共に流出することが懸念される。

3.3 土地利用と窒素流出状況

各流域の平水時の水質（流量加重平均値）を比較すると、[点源流域]>[最下流域]>[面源流域]の関係がみられる（表-2）。酪農家のある点源流域で家畜ふん尿に起因した成分濃度のTON、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の数値が高いことは、ふん尿成分の流路への直接的な流入を示している。また、点源流域で地下流出成分である $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度も高いことは、施肥量の差に起因すると考えられる。

つぎに、降雨出水時の水質を比較すると（表-3）、点源流域が高濃度を示す傾向は平水時と同様であった。各流域とも平水時に比べてT-N濃度は増加しているが、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の濃度は微増であり、降雨出水時における窒素成分増加の大部分がTONと $\text{NH}_4\text{-N}$ であった。いずれも、家畜ふん尿や土壌に多く含まれる成分であり、表面流出として直接河川に流出している状況が示唆された。

3.4 窒素流出フローと面源からの流出率

3.4.1 汚濁負荷流量の推定

面源流域の流量とT-N負荷量の関係（L-Q式）を求め、2003年と2004年の流下負荷量を算出した（表-4）。

負荷算出期間は兩年のデータが揃っている5月14日から11月24日とした。観測期間の降水量は、2003年が厚床のアメダスデータのある過去27年間で上から4番の多雨年であったのに対し、2004年は最も少雨年であった。流域内の汚濁物質は水の移動に伴って河川に流出することから、兩年の負荷量を算出したことで、この流域の流下負荷量の下限値と上限値を把握できたものと考えられる。

3.4.2 窒素流出フローと面源からの流出率

ここでは、上で算出した流下負荷量と肥料(ふん尿・化学肥料)投入負荷量、降水負荷量からT-Nに関する簡単なフロー図を作成する。流域へのインプットは、林地では降水のみ、草地では降水と肥料である。降水の負荷は、2004年の実測濃度 0.3 mg L^{-1} に降水量を乗じた。肥料負荷量は2003年と2004年の平均施用量に草地面積を乗じた。林地からの流出率は文献(田淵・高村, 1985)より30%とした。流下負荷量から林地からの流出量を減じて草地からの流出量を算出した。その結果、草地からの肥料成分の流出率は降水量が多かった2003年で33%、降水量の少なかった2004年で2.4%となった(図-4)。兩年の降水量の違いは2倍程度であったが、草地からの窒素流出量は10倍以上の差となった。なお、少雨の2004年は林地からの流出率も低くなっていると予想されるが、草地に比べてインプットが少ないため、林地の流出率を低くしても草地の流出率はほとんど変わらない。

表-4 面源流域の流下負荷量

	降水量 mm	流出量 mm	T-N 負荷量 kg
2003年	987	673	6,428
2004年	470	249	497

期間は5/14から11/24

4. 河畔緩衝帯の水質浄化機能調査事例

4.1 調査方法

4.1.1 調査地概要

調査は、MA流域の中流部左岸斜面で、2004年8月～11月に実施した。斜面の傾斜は5%程度で、上部は採草地として利用され、下部には林地・湿地(以下、緩衝帯と記す)が残されている。草地は黒色火山性土壌、緩衝帯は泥炭土壌から成る。草地のベーシックインテークレート(Ib)は 1 mm h^{-1} 未満と非常に小さく、降雨時に表面流出が発生しやすい状況にある。一方、緩衝帯のIbは近隣林地で $200\sim 600\text{ mm h}^{-1}$ となっていた。

4.1.2 調査方法

この斜面において、草地からの汚濁物質を含む流出水に対する緩衝帯の水質浄化機能を測定するために、草地表面水(以下、表面水と記す)と緩衝帯地下水(以下、地下水と記す)の採取および緩衝帯地下水位の測定を図-5に示す観測線Cで行った。地下水の採取はハンドポンプを用い、地下水位が大きく変動する降雨後2～5日経過時にC-1～C-13.5で4回行った。採取した試料は室内で水質分析に供した。水質分析項目はT-N、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、塩化物イオン(Cl^-)で、分析方法はJISに準じた。また、T-Nから $\text{NO}_3\text{-N}$ を減じてTON+ $\text{NH}_4\text{-N}$ とした。

4.2 緩衝帯の水質浄化機能

図-6に降雨時の表面水と地下水濃度を示す。T-Nは表面水が 7.8 mg L^{-1} と高く、地下水もC-1からC-3地点までは比較的高く推移し、C-4地点(30m地点)より下部では 2 mg L^{-1} 以下と低く安定した。窒素成分のうち、TON+ $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は緩衝帯で速やかに低下するのに対して、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度はC-1地点では低いがC-2、C-3地点では比較的高く推移してC-4地点以降で低下した。これは、表面水に含まれる窒素成分はTONと $\text{NH}_4\text{-N}$ が大部分であり、これらは地中に浸透する過程において吸着・

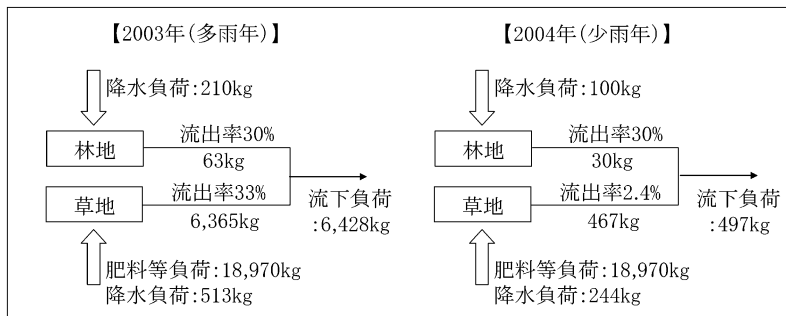


図-4 面源流域の窒素フロー

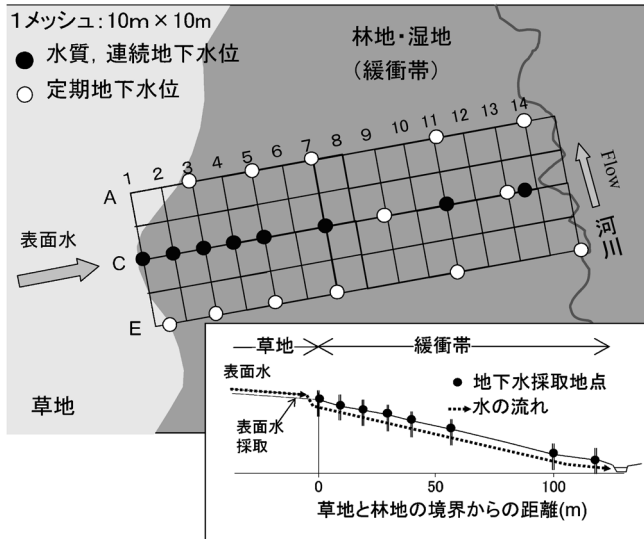


図-5 緩衝帯の水質・水文調査

濾過され、さらに酸化されて $\text{NO}_3\text{-N}$ に変化することで減少する(すなわち、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は一旦増加する)と考えられる。生じた $\text{NO}_3\text{-N}$ は地中を浸透するに従い脱窒、希釈、植物吸収等によって濃度低下すると推定される。

ここで、 $\text{NO}_3\text{-N}$ と Cl^- 濃度を比較する。 Cl^- は土壤から溶出せず、 $\text{NO}_3\text{-N}$ と同様に土壤に吸着されにくく、さらに作物吸収が少ないため、 Cl^- 濃度の低下は希釈によるものと考えられる。よって、 $\text{NO}_3\text{-N}$ と Cl^- の濃度低下割合の差は生物的作用による浄化と判断することができる(Lowrance, 1992)。図-6のC-3とC-4の間で Cl^- は1割程度しか低下しないが、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は7割低下していた。これは、この間で希釈以外の水質浄化が作用していることを示すものである。

5. おわりに

緩衝帯による水質浄化効果は、気候や地形、植生、土壌、対象とする汚濁物質の流出状況等の条件により大きく異なる。そのため、実際に緩衝帯を整備する前に、これらの条件を調査し、自然の水質浄化機能について十分把握しておく必要がある。今回は、緩衝帯の機能について紹介し、草地酪農流域の窒素流出状況と河畔緩衝帯の水質浄化機能について調査事例を示した。

草地酪農流域からの窒素流出事例では、流域内に点源がある場合と無い場合では近接した流域でも水質状況が異なること、同じ流域でも降水量によって窒素流出量が大きく変動することを示した。

また、河畔緩衝帯の水質浄化機能調査事例では、単年

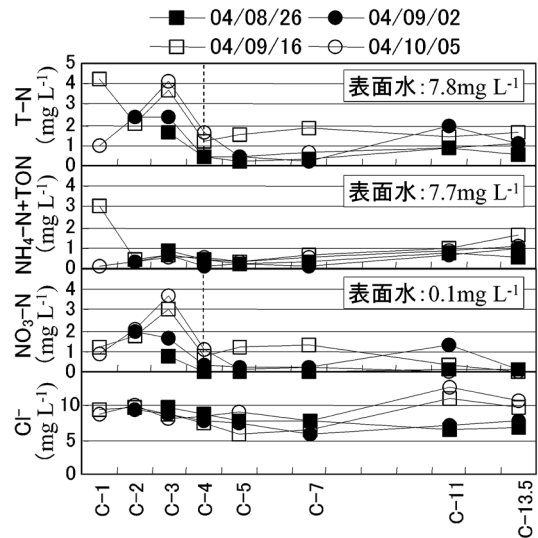


図-6 草地表面水と緩衝帯地下水水質濃度

度の調査結果であるが、水質浄化に必要な緩衝帯幅の概略を把握することができた。また、当該調査地区においても、窒素の水質浄化機能として希釈以外の生物的作用があることを示した。しかし、緩衝帯地下水の水質濃度は必ずしも〔斜面上部〕>〔斜面下部〕ではなく、複雑な様相を呈していた。今後、緩衝帯の水質浄化機能の定量化に向けて、調査を継続する予定である。

引用文献

- Correll, D.L. (1997) : Buffer zones and water quality protection : general principles, In Buffer Zones : Their Processes and Potential in Water Protection, The Proceedings of the International Conference on Buffer Zones September 1996, pp. 7-20, Quest Environmental.
- Correll, D. (2003) : Vegetated Stream Riparian Zones : Their Effects on Stream Nutrients, Sediments, and Toxic Substances : An Annotated and Indexed Bibliography of the world literature, including buffer strips and interactions with hyporheic zones and floodplains (13th ed.) (<http://www.unl.edu/nac/ripzone03.htm>).
- Fishenich, J.C., McComas, D.N. and Allen, H.H. (2001) : Plant Material Acquisition, Layout, and Handing for Flood Control Projects, p. 11, US Army Corps of Engineers.
- Jacobs, T.C. and Gilliam, J.W. (1985) : Riparian losses of nitrate from agricultural drainage waters, *Journal of Environmental Quality*, **14** (4) : 472-478.
- Karssies L.E. and Prosser I.P. (1999) : Guidelines for Riparian Filter Strips for Queensland Irrigators, p. 4, CSIRO LAND and WATER.
- Lowrance, R. (1992) : Groundwater nitrate and denitrification in a Coastal Plain Riparian Forest, *Journal of Environmental Quality*, **21** (3) : 401-405.
- 中村和正, 石田哲也, 佐藤修児 (2002) : 酪農地帯における緩衝帯の水質浄化機能, 第6回水資源に関するシンポジウム論文集, pp. 153-158, 水資源シンポジウム委員会.
- 田淵俊雄, 高村義親 (1985) : 集水域からの窒素・リンの流出, p. 41, 東京大学出版会.

要 旨

近年, 北海道の畑作, 畜産, 酪農地帯では, 家畜糞尿や化学肥料が施用された圃場(面源)からの汚濁物質流出が問題となっている。本稿では, 面源からの窒素流亡の事例として北海道東部の草地酪農流域において水質環境調査を実施し, 降雨の多い年は草地への窒素投入量の33%が非積雪期に流出していることを明らかにした。また, 面源からの汚濁負荷流出の対策工である河畔緩衝帯の構造と機能について紹介した。さらに, 河畔緩衝帯の水質浄化機能を定量化するために, 草地酪農流域において草地に隣接した林地地下水の水質・水文調査を実施し, 草地からの表面水(全窒素平均濃度 7.8 mg L^{-1})が林地土壌を約30m浸透・流下する過程で, 濃度をほぼ一定値 (2 mg L^{-1})まで低下させることを示した。

受稿年月日 : 2005年10月25日
受理年月日 : 2005年12月21日

鶴木啓二氏講演に関する質疑**谷山一郎（農業環境技術研究所）：**

河畔林の浄化機能の効果は樹木の生育時期に期待できるのか。植被がおおってある程度成長がゆるやかになってきたとしても、その効果は期待できるのか。

鶴木：

一般的に緩衝帯の浄化機能のうち、植物の吸収による効果というのは少ないといわれている。必ずしも木である必要もなく、荒地化したような草地でも大丈夫だと思う。植物がはたす役割は、緩衝帯の土壌を安定させることと、脱窒のときに必要な有機物を供給することの二つが大きいと思っている。

加藤邦彦（北海道農業研究センター）：

講演で流出量がそれぞれ何%でたというのを計算をしていたが、それをさらに演繹すれば地下に浸透した量も推定できないか。

鶴木：

考えたことはなかったが、可能かもしれない。

加藤：

穴を掘って地下に浸透させているのを現地をよくみかけたので、地下に浸透している割合が多いと思うが。

鶴木：

浅い層の地下水をはかったら、全窒素はあまり高くなかった。しかし、文献では、酪農地帯にある井戸の硝酸態窒素濃度が、10 ppm を超えている場合もあるので、やはり地下に抜ける量は相当多いと思う。

田淵俊夫：

点源と面源の区別があったときに、点源である畜舎からでてくるパーセントが非常に少ないとのことだが、これはその畜舎にいる何百頭かの牛の全部の糞尿に対してのパーセントで、その糞尿を面源の草地に使用した時の流出はどう考慮しているのか。

鶴木：

発生した糞尿は基本的には全部面源に還元しているが、いくらかは降雨等で畜舎から直接でていると仮定して計算した。畜舎から排出される糞尿は、点源としては少なくとも、面源として出てくる可能性はある。