

積雪期における北陸地方平野部の粘土質転換畑からの懸濁物質,リンおよび硝酸態窒素の流出

誌名	日本土壌肥料学雑誌 = Journal of the science of soil and manure, Japan
ISSN	00290610
著者名	鈴木,克拓 関口,哲生 足立,一日出
発行元	日本土壌肥料学会
巻/号	83巻1号
掲載ページ	p. 47-51
発行年月	2012年2月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



積雪期における北陸地方平野部の粘土質転換畑からの懸濁物質、リンおよび硝酸態窒素の流出

鈴木克拓^{1,3}・関口哲生²・足立一日出²

キーワード 北陸地方平野部, 積雪期, 粘土質転換畑, 栄養塩類, 暗きょ流出

1. はじめに

北陸地方は、世界有数の豪雪地帯である(菅谷, 1990)。新潟県上越市の高田特別地域気象観測所における1981年から2010年までの平年の12~3月の降水量は1298.4 mmと多く、平野部の海岸近くに位置しているにもかかわらず、平年の最深積雪量は122 cmに達する(気象庁, 2011a)。

積雪地域における水系への栄養塩類の流出では、融雪期が重要であるとの指摘がされている。Hayashi and Hatano (1999)は、北海道の粘土質土壌のタマネギ畑における暗きょ流出を調査し、9月から翌年4月までの休耕期間における硝酸態窒素の暗きょ流出量 95 kg-N ha^{-1} のうち、 21 kg-N ha^{-1} が融雪期の11日間に流出したと報告した。増村ら(2006)は、青森県の放牧草地からなる集水域において、融雪期には積雪期の9倍以上の懸濁物質、全リン、溶存態リンおよび溶存態窒素が流出すると報告した。北海道の農業地域の小河川では、懸濁物質、全窒素、全リン濃度および化学的酸素要求量(COD)のいずれも融雪期に当たる3~4月が1年の中で最も高いこと(大村・黒川, 1990)、融雪流出時における汚濁負荷流量が年間流量の半分を占めること(大村・黒川, 1991)が指摘されている。Hayakawa *et al.* (2003)は、北海道の畜産地帯において河川を調査し、融雪初期の表面流出が水系の富栄養化に影響を与えうると指摘した。また、融雪初期に河

川流量が低いにもかかわらず全窒素および懸濁物質濃度が一時的に高濃度になる現象が報告されている(岡澤ら, 2005)。Lapp *et al.* (1998)は、カナダケベック州の農業集水域を調査し、融雪期の3,4月に流出水量が多く、硝酸態窒素、リンおよび懸濁物質の流出量も多いと指摘した。

融雪期における水の流出経路については、主に流域スケールでの調査が行われている。小林(1979)は、河川水温および地温の測定結果から、融雪水の大部分が地盤に浸入してから河川に流出するとし、Jamieson *et al.* (2003)は、圃場スケールの調査において、融雪期の全流出水量のうち51.7%が下方流出であったと報告した。一方、鶴木ら(2003)は北海道東部における二酸化ケイ素を用いた酪農集水域から河川への流出経路の調査で、融雪・融凍期における流量増加分の9割が表面流出由来であると報告し、大村・黒川(1991)は、融雪期は土壌水分が過飽和であるため、土壌凍結がなくても表面流去の割合が高いことがあると考察した。

北陸地方平野部における12~3月の平年の月平均気温は0℃以上と高く、先述のように、12~3月の降水量は、岩見沢(Hayashi and Hatano (1999)の測定点に近い観測点、以下同じ)の375.6 mm、静内(Hayakawa *et al.*, 2003)の160.3 mm、厚床(鶴木ら, 2003)の197.5 mm、菅平(小林, 1979)の306.4 mm(以上は平年値)、千歳(大村・黒川, 1990)の約180 mm、青森野辺地(増村ら, 2006)の500~600 mm(気象庁, 2011a)、カナダケベック州(Lapp *et al.*, 1998; Jamieson *et al.*, 2003)の約300 mm(国立天文台, 2009)などに比べてはるかに多いなど、報告例のある地域とは気象条件が大きく異なる。また、土壌凍結が発達する条件であるとされる日平均気温0℃以下かつ積雪深20 cm以下(広田, 2008)になることは稀である。土壌の点では、北陸地方では水田の3分の1が重粘土土壌であり、強グライ土壌水田の分布は、我が国の平均が17%であるのに対し、北陸地方では48%に達する(野田, 1979)。このような水田を畑転換すると、乾燥に伴う収縮亀裂が発達する。著者らは、粘土質土壌転換畑において、7~11月の流出水の6割が暗きょを通じており、下層の亀裂を通じた暗きょへの流出が懸濁物質およびリンの主要な流出経路であることを明らかにした(鈴木ら, 2005)。また、積雪期における水の流出については、伊藤(1987)による北陸農業試験場の粘土質転換畑での調査で、11~4月の10 aあたり1276 Mgの降水のうち1036 Mgが暗きょから流出したと報告した。このような特徴がある北陸地方平野部の積雪期における農耕地からの栄養塩類の流出実態は、著者らの知る限り、ほとんど明らかにされていない。そこで、北陸地方平野部にある下層に亀裂が発達した粘土質転換畑において暗きょ流出および表面流出を調査し、積雪期における窒素およびリンの流出実態を明らかにしようとした。

Katsuhiro SUZUKI, Tetsuo SEKIGUCHI and Kazuhide ADACHI: Discharge of suspended substance, phosphorus and nitrate in a clayey converted ex-paddy field in a plain of the Hokuriku region during the snow periods

¹ 農業環境技術研究所 (305-8604 つくば市観音台3-1-3)

² 中央農業総合研究センター 北陸研究センター (943-0193 上越市稲田1-2-1)

³ 現在、中央農業総合研究センター 北陸研究センター(943-0193 上越市稲田1-2-1)

Corresponding Author: 鈴木克拓

2011年3月18日受付・2011年9月11日受理

日本土壌肥科学雑誌 第83巻 第1号 p.47~51 (2012)

2. 方法

測定は、新潟県上越市の中央農業総合研究センター北陸研究センター（北緯 37 度 12 分，東経 138 度 27 分，海岸から約 8 km）の転換畑圃場（100 m × 30 m，1996 年に畑転換）において 2003 年 8 月から 2006 年 11 月まで行った。なお，気象庁は 2005 年 12 月から 2006 年 2 月にかけての 20 年ぶりの大雪を「平成 18 年豪雪」と命名し（気象庁，2006），このときの同センターにおける最深積雪は 135 cm に達した。なお，高田特別地域気象観測所における測定期間の積雪期および夏作期の降水量は平年の 20 % 以内の変動であった（気象庁，2011a）。また，北陸地方の 12 月から翌年 2 月までの気温は，2003～2004 年は平年より高く，2004～2005 年は平年並み，2005～2006 年は平年より低かった（気象庁，2011b）。

土壌は細粒質斑鉄型グライ低地土（clayey, montmorillonitic, mesic typic Epiaquepts）に分類され，土性は作土が LiC，下層が HC である。粘土鉱物はスメクタイトを主体とし，イライトおよびカオリナイトを随伴する（中野，1978）。測定圃場には暗きょが圃場の長辺方向に深さ 65 cm，5 m 間隔で施工されている。さらに，圃場の周囲に深さ約 30 cm の表面排水溝を設けるとともに，2004 年の春には 5 m 間隔で深さ 30 cm に，2005 年には 2 m 間隔で深さ 20 cm に弾丸暗きょを暗きょと直交方向に施工した。夏期には作土（厚さ約 20 cm）直下の耕盤層と下層土に約 10 cm 間隔で幅が数 mm の亀裂が見られた。毎年 5 月下旬に耕起，施肥（2003，2004，2005 年にそれぞれ N として 16，11，20 kg ha⁻¹，P として 17，12，22 kg ha⁻¹）および大豆（品種 エンレイ，*Glycine max* (L.) Merr. cultivar Enrei）の播種を同時に行った。有機質肥料および堆肥は施用しなかった。収穫は 10 月中旬に行ったが，残渣は翌年の耕起時までそのまま残した。耕起・施肥・播種日から収穫日までを夏作期とした。なお，2003 年夏作に坪刈り収量を測定し，2045 kg ha⁻¹ であった。

暗きょ流出量は電磁流量計（愛知時計電機 SA65）で連続的に，表面流出流量は三角堰を用いて 5～10 分間隔で測定し，いずれも圃場面積で割った値（mm 単位）で表した。なお，2004 年 1 月 1 日から 29 日まで，2004 年 12 月 29 日から 2005 年 1 月 19 日までおよび 2006 年 1 月 3 日から 20 日までは欠測のため，計算から除外した。気象データは同センターの気象観測露場における測定値を用いた。同露場で積雪深が観測された期間を積雪期とし，2003 年 12 月 19 日～2004 年 2 月 22 日，2004 年 12 月 9 日～2005 年 3 月 31 日，2005 年 12 月 9 日～2006 年 3 月 31 日であった。

積雪期の暗きょおよび表面流出水は，2 週間間隔を目途に採水可能時に採取し，分析まで 5 °C 以下で保存した。なお，表面流出水の採取は 2005 年 3 月まで行った。流出水試料は，一部を孔径 0.1 μm のメンブレンフィルタ（ADVANTEC A010A090C）で吸引ろ過し，通過画分（以下「溶存態試料」と呼ぶ）に含まれる成分を溶存態とし

た。懸濁物質濃度は次のように求めた。すなわち，流出水試料および溶存態試料の一定量を恒量にした蒸発皿に量り取り，105 °C で 24 時間乾燥した蒸発乾固物の重量を測定し，流出水試料と溶存態試料の蒸発乾固物濃度を求め，流出水試料の蒸発乾固物濃度から対応する溶存態試料の蒸発乾固物濃度を引いた値を懸濁物質濃度とした。全リン濃度は，流出水試料および溶存態試料について，ペルオキシニ硫酸カリウム分解－モリブデン青（アスコルビン酸還元）吸光光度法（日本工業標準調査会，1998）により測定した。懸濁態リン濃度は，流出水試料の全リン濃度から溶存態試料の全リン濃度を差し引いて求めた。硝酸態窒素濃度は，溶存態試料をイオンクロマトグラフ（DIONEX DX-500）で測定した。積雪期・非積雪期における暗きょ流出水・表面流出水中の各成分の平均濃度の t 検定は，R 2.9.0 (R Development Core Team, 2009) で行った。

3. 結果

積雪期における測定圃場からの水の流出について，図 1 に 2003～2004 年，2004～2005 年および 2005～2006 年の積算暗きょ・表面流出水量および積雪深を示す。期間中，暗きょおよび表面からは水がほぼ連続的に流出し，積算流出水量の傾きの変化から，暗きょ流出流量は，表面流出に比べて積雪深および時期の違いによる変化が小さいことが分かった。積算流出水量は，弾丸暗きょを施工していない 2003～2004 年は暗きょが 357 mm，表面が 328 mm であったのに対し，弾丸暗きょを 5 m 間隔で施工した 2004～2005 年は暗きょが 983 mm，表面が 606 mm，2 m 間隔で施工した 2005～2006 年は暗きょが 889 mm，表面の 253 mm と，弾丸暗きょの施工年には暗きょ流出の割合が増加した。

積雪期および非積雪期における流出水中の懸濁物質，硝酸態窒素，全リンおよび懸濁態リンの平均濃度を表 1 に示す。積雪期における全ての成分の平均濃度は非積雪期の 3 分の 1 から 6 分の 1 で，積雪期と非積雪期の間にはいずれの成分・流出経路においても 0.1 % 水準で有意差があった。また，積雪期の懸濁物質を除き，表面流出水と暗きょ流出水との間に有意差があった。しかし，積雪期間内の濃度変化は小さく，時期による大きな違いは認められなかった（図 2）。

2003 年 8 月から 2005 年 3 月までの暗きょおよび表面流出水量，積雪期における流出水中の各成分の濃度の平均値を用いて見積もった暗きょおよび表面流出量および同期間の非積雪期および夏作期における流出量を表 2 に示す。積雪期における全流出量に占める暗きょ流出の割合は，懸濁物質は 49 % と，表面流出とはほぼ同じであったが，全リンは 77 %，硝酸態窒素は 66 % と，暗きょが主要な流出経路であった。また，暗きょ流出では 95 %，表面流出では 55 % のリンが懸濁態であった。積雪期の長短などによって流出量は変わるが，4 ヶ月近くわたって積雪が継続し，高田特別地域気象観測所における最深積雪が 126 cm（気象庁，2011a）と，平年値に近かった 2004～2005 年の

積雪期では、22日間の欠測期間を計算に入れていないにもかかわらず、暗渠と表面からの合計流出量が、懸濁物質では2004年夏作期の70%，リンでは81%，硝酸態窒素では47%に相当した。

4. 考察

積雪期間の暗渠と表面の合計流出量は、降水量に比べて多かった(表2)。横山ら(2003)は冬期における降水量計による降水の捕捉特性を検討し、捕捉率が風速、雪・雨の別、降水量計の種類に影響され、例えば、北陸地方の気象観測点の多くで使われている温水式降水量計による風速 2 m s^{-1} における雪の捕捉率が0.5程度であることを示した。これに基づく、高田特別地域気象観測所における12冬期の温水式降水量計の補正率(補正值/観測値)は約1.7であった(横山ら, 2004)。一方、測定圃場における積雪期の降水量測定値に対する暗渠と表面の合計流出量の比は1.6程度であった(表2)。観測露場では温水式より捕捉率が高い溢水式降水量計(横山ら, 2003)を用いていることなどから、積雪期における水収支は概ね妥当であると考えられる。

融雪期に水系の栄養塩類濃度が上昇するとの報告が多

くなされているが、本研究では、積雪末期における硝酸イオンおよびリン濃度の上昇は認められなかった(図2)。融雪期に栄養塩類濃度が上昇する現象について、大村・黒川(1991)は、融雪期の表面流去水が冬期間に地表に蓄積された汚濁物質を搬送しながら流下するため、水系に懸濁成分を中心とした高濃度の負荷をもたらすと考察した。鶴木ら(2003)は、気温の上昇に伴って表層土壌が融解し、融雪水や降水が地下に浸入することにより、土壌中の水質成分が流出するとした。岡澤ら(2005)は、水みちなどに滞留した懸濁成分が融雪初期の小規模な流出によって一挙に流出するとし、桜井・中本(1982)は、融雪期における河川水の硝酸態窒素およびリン酸態リン濃度の上昇が、融雪水の地下浸透に伴う浅層地下水を通じた流出によることを指摘した。しかし、同センター圃場における2月の積雪下での地温は、深さ5 cmで 0.5°C 、15 cmで 1°C 程度であるため(小南ら, 1998)、冬期であっても土壌凍結が発達し難く、融雪水および降雨の浸入に伴う流出が積雪期にわたって継続的に発生する(図1)ことから、積雪期における土壌内の栄養塩類の滞留が起こりにくかったと考えられる。

暗きょから流出した懸濁物質は、非積雪期では平均濃度 $0.118 \pm 0.092\text{ g L}^{-1}$ であったが、積雪期では $0.022 \pm 0.020\text{ g L}^{-1}$ にとどまり、懸濁態リン濃度も $0.052 \pm 0.026\text{ mg-P L}^{-1}$ と非積雪期の4分の1弱であった(表1)。この原因の一つとして、積雪のために雨滴衝撃が土壌に直接加わらなかったことによる土壌粒子の分散の抑制が考えられる。Kinnell(2000)は、圃場測定および室内降雨試験を行い、降雨強度が高いほど表面流出水中の懸濁物質濃度が高いと指摘した。また、Suzuki and Katou(2002)は、充填作

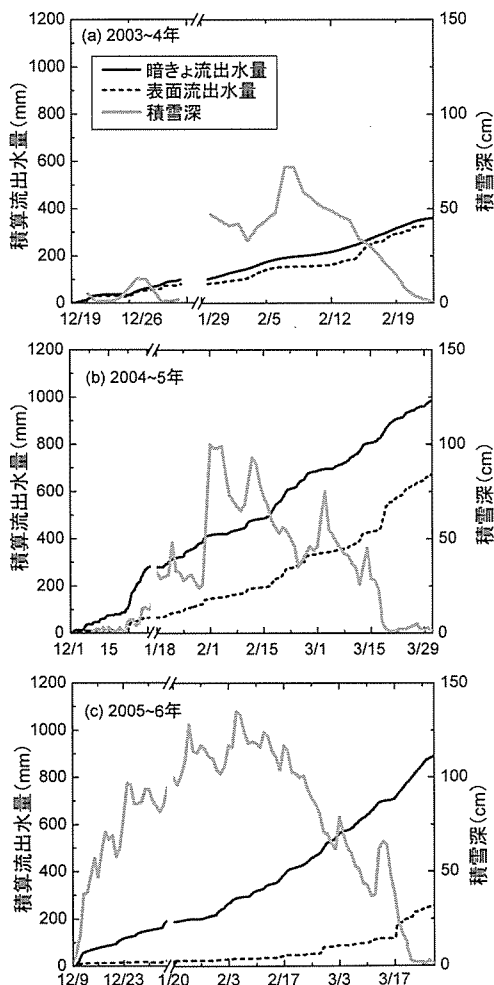


図1 積雪期における暗きょおよび表面流出水量(左軸)ならびに積雪深(右軸)

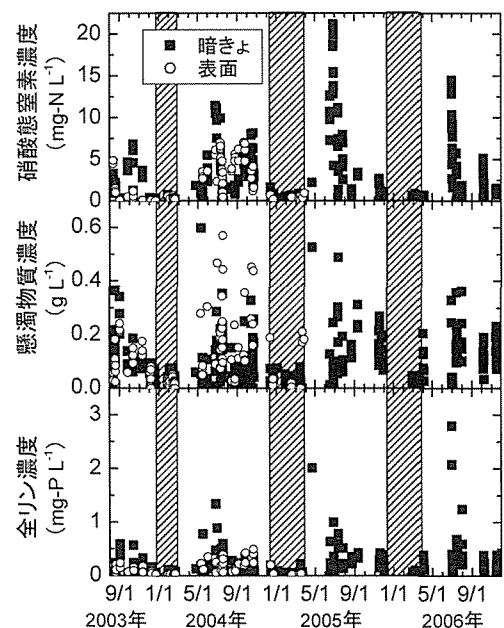


図2 測定期間における流出水中全リン、懸濁物質および硝酸態窒素濃度(斜線部は積雪期を示す)

表1 測定期間(2003年8月~2006年11月)の積雪期および非積雪期における暗きょおよび表面流出水中の懸濁物質・リンおよび硝酸態窒素の平均濃度と標準偏差

	懸濁物質 (g L ⁻¹)	全リン (mg-P L ⁻¹)	懸濁態リン (mg-P L ⁻¹)	硝酸態窒素 (mg-N L ⁻¹)
積雪期				
暗きょ流出 (n=102)	0.022±0.020	0.055±0.026***	0.052±0.026***	0.49±0.19***
表面流出 (n=39)	0.032±0.050	0.024±0.008	0.014±0.007	0.31±0.19
非積雪期				
暗きょ流出 (n=261)	0.118±0.092**	0.247±0.295**	0.235±0.294***	3.88±4.28*
表面流出 (n=112)	0.158±0.142	0.152±0.091	0.098±0.089	2.65±2.25

表面流出水の採取および測定は2005年3月まで行った。

*は5%, **は1%, ***は0.1%水準で暗きょ流出水と表面流出水の間有意差があることを示す。

積雪期と非積雪期の間には、いずれの成分・流出経路においても0.1%水準で有意差があった。

表2 2003年8月~2005年3月における粘土質転換畑からの水、懸濁物質、リンおよび硝酸態窒素流出量

		流出水量 (mm)	懸濁物質 (Mg ha ⁻¹)	全リン (kg-P ha ⁻¹)	懸濁態リン (kg-P ha ⁻¹)	硝酸態窒素 (kg-N ha ⁻¹)
03~04年積雪期 (36日)* (降水量 419 mm)	暗きょ	357	0.08	0.20	0.19	1.7
	表面	328	0.11	0.08	0.04	1.1
04~05年積雪期 (91日)* (降水量 954 mm)	暗きょ	983	0.21	0.54	0.51	4.4
	表面	606	0.19	0.14	0.08	2.0
非積雪期 (431日) (降水量 2860 mm)	暗きょ	1290	1.39	1.88	1.67	28.5
	表面	830	1.26	1.21	0.80	8.7
うち04年夏作期 (146日) (5月26日~10月19日) (降水量 828mm)	暗きょ	300	0.33	0.57	0.51	9.7
	表面	163	0.24	0.27	0.21	4.0

* 欠測期間(2004年1月1日~1月29日および2004年12月29日~2005年1月19日)は計算から除外した。

土と粗大孔隙を有する不攪乱下層土からなる粘土質土壌の成層カラムを用いた人工降雨実験を行い、降雨強度の上昇が下方流出する懸濁粒子の生成と輸送を促進することを示した。Cerdan *et al.* (2002) は、圃場スケールで降雨流出を解析し、降雨強度の上昇が表面流出水中の懸濁物質濃度を上昇させると報告した。また、積雪期における暗きょ流出流量は夏作期の大雨時の数分の一程度であり、水の流れによる掃流力が小さかったことも原因として考えられる。さらなる原因として、地温が低かったため、鉄酸化細菌の活性が低く、鉄を主体とする懸濁物質の生成が抑えられたことが考えられる。測定圃場では、夏作期の暗きょ流出開始直後に赤褐色をした鉄含量の高い懸濁物質の流出が生じる(Suzuki *et al.*, 2008)。しかし、5°Cにおける暗きょ流出水中の鉄酸化の反応速度は20~30°Cの10分の1程度であり(Wheatley, 1988)、Gameda *et al.* (1983) は、圃場測定において、水温が4~5°Cでは酸化鉄の沈殿はほとんど暗きょ流出しないと報告した。積雪下での深さ15 cmの地温は1°C程度であることから、暗きょ内では鉄酸化由来の懸濁物質が生成しにくかったと考えられる。なお、積雪期も非積雪期と同様に、流出水中の全リンに占める懸濁態リンの割合が表面流出水より暗きょ流出水の方が高い(表1)ことから、土層から暗きょ出口に至る水の浸

入過程において、懸濁粒子による溶存態リンの収着が年間を通じて生じていることが示唆される。

積雪期の暗きょ流出水中の平均硝酸態窒素濃度は、非積雪期の7分の1弱で、新潟県内における降水中の硝酸態窒素濃度(武・大泉, 2002)の0.2 mg-N L⁻¹の数倍程度にとどまった(表1)。これは、積雪期における多量の浸入水による希釈が影響した可能性に加えて、粘土質土壌は、土壌マトリクスの不飽和透水係数が低いため、粗大孔隙を通じた速い水移動がほとんどである(井上, 1989; 鈴木ら, 2005)こと、土壌の硝化活性は15°Cを下回ると急激に低下する(Frederick, 1956)ことから、この圃場において、夏作期に作土層で硝化した窒素が冬期までかかって暗きょ流出したり、冬期に作土内で活発に硝化が起きたりする可能性が低いと考えられる。これは、硝酸態窒素が厚さ1 mの土層を月・年単位で移動する黒ボク土畑(江口, 2006)とは対照的である。

以上から、北陸地方平野部の粘土質転換畑では、積雪期には降水量が多く、気温が高いため、大量の水が継続的に浸入し、流出することにより、積雪期における懸濁物質およびリンの流出は、濃度は低いものの、その量は、懸濁物質では夏作期の7割以上、リンでは8割以上(表2)と、夏作期に匹敵する場所のあることが明らかになった。

謝辞：本研究を行うにあたり、積雪期の降水量測定値について有益な意見をいただいた中央農業総合研究センター農業気象災害研究チームの横山宏太郎博士、気象観測露場における観測データを提供いただいた同チームの皆様、室内実験の補助を頂いた農業環境技術研究所の桜井恵子、山下祐司、郷原弘美、齊藤忠臣、中野高志、倉持藤代の各氏、圃場管理などでお世話になった北陸研究センターの各位に御礼申し上げます。

文 献

- Cerdan, O., Bissonnais, Y. L., Souchère, V., Martin, P., and Lecomte, V. 2002. Sediment concentration in interrill flow: interactions between soil surface conditions, vegetation and rainfall. *Earth Surf. Processes Landf.*, 27, 193–205.
- 江口定夫 2006. 黒ボク土畑圃場における水移動と硝酸塩の溶脱。土壌の物理性, 102, 19–30.
- Frederick, L. R. 1956. The formation of nitrate from ammonium nitrogen in soils: I. Effect of Temperature. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 20, 496–500.
- Gameda, S., Jutras, P. J., and Broughton, R. S. 1993. Ochre in subsurface drains in a Quebec fine sandy soil. *Can. Agric. Eng.*, 25, 209–213.
- Hayakawa, A., Nagumo, T., Kuramochi, K., and Hatano, R. 2003. Characteristics of nutrient load in a stream flowing through a livestock farm during spring snowmelt. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 49, 301–305.
- Hayashi, Y., and Hatano, R. 1999. Annual nitrogen leaching to subsurface drainage water from a clayey aquic soil cultivated with onions in Hokkaido, Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 45, 451–459.
- 広田知良 2008. 北海道・道東地方の土壌凍結深の減少傾向および農業への影響。天気, 55, 548–551.
- 井上久義 1989. 亀裂が発達した粘土質圃場における水移動現象のモデル化。土壌の物理性, 59, 35–51.
- 伊藤滋吉 1987. 多雪地における転換畑の窒素吸収と融雪水による無機成分の溶脱。土肥要旨集, 33, 114.
- Jamieson, A., Madramootoo, C. A., and Enright, P. 2003. Phosphorus losses in surface and subsurface runoff from a snowmelt event on an agricultural field in Quebec. *Canadian Biosystems Engineering*, 45, 1.1–1.7.
- Kinnell, P. I. A. 2000. The effect of slope length on sediment concentrations associated with side-slope erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64, 1004–1008.
- 気象庁 2006. 平成18年の冬に発生した大雪の命名について。http://www.jma.go.jp/jma/press/0603/01a/18gousetu.html
- 気象庁 2011a. 気象統計情報。http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html
- 気象庁 2011b. 年・季節・各月の天候。http://www.jma.go.jp/jma/press/tenko.html
- 小林大二 1979. 融雪水の流出。気象研究ノート, 136, 39–48.
- 国立天文台 2009. 世界各地の月別平年降水量。理科年表, p. 302–303. 丸善, 東京。
- 小南靖弘・高見晋一・横山宏太郎・井上 聡 1998. 季節的積雪地帯における積雪下の CO₂濃度。雪氷, 60, 357–366.
- Lapp, P., Madramootoo, C.A., Enright, P., Papineau, F., and Perrone, J. 1998. Water quality of an intensive agricultural watershed in Quebec. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 34, 427–437.
- 増村仁美・嶋 栄吉・多田 智・堤 聡・渡辺一哉 2006. 積雪と融雪期における放牧草地からの栄養塩類の流出特性。環境情報科学論文集, 20, 25–30.
- 中野啓三 1978. 低湿重粘土水田の畑転換に伴う土壌物理性の推移。北陸農試報, 21, 63–94.
- 日本工業標準調査会 1998. リン化合物及び全りん。工業用水試験方法 JIS K0101, p. 181–188. 日本規格協会, 東京。
- 野田昌治 1979. 北陸の土壌。北陸地域における作物面からみた水田高度利用。北陸農業研究資料, 6, 16–22.
- 岡澤 宏・長澤徹明・井上 京・山本忠男・鶴木啓二 2005. 森林流域と農業流域における融雪流出時の汚濁負荷流出特性。農土論集, 237, 57–65.
- 大村邦男・黒川春一 1990. 農業地域を流れる小河川の水質変化。北海道立農試集報, 61, 31–39.
- 大村邦男・黒川春一 1991. 融雪期の表面流去水が河川の水質に及ぼす影響。北海道立農試集報, 62, 35–45.
- 桜井善雄・中本信忠 1982. 融雪期における菅平高原からの窒素およびリンの流出量とその流出特性について。水温の研究, 26, 11–18.
- R Development Core Team. 2009. R: A language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, http://www.R-project.org.
- 菅谷 博 1990. 暖地積雪面の微細気象的特性とそれに基づく積雪質量推定モデル。北陸農試報, 32, 43–64.
- 鈴木克拓・足立一日出・関口哲生・吉田修一郎・中野恵子・加藤英孝 2005. 亀裂が発達した転換畑における懸濁物質およびリンの暗渠流出。土肥誌, 76, 43–47.
- Suzuki, K., Adachi, K., Sekiguchi, T., Yoshida, S., Nakano, K., and Katou, H. 2008. Discharge process of suspended matter and associated phosphorus discharged to tile drains in a clayey field, 5th International conference interfaces against pollution 2008 program & abstracts, p. 236. IAP2008 Office, Tsukuba.
- Suzuki, K., and Katou, H. 2002. Transport of suspended particles through macropores in layered soils. In L. W. de Jonge *et al.* (ed.) Colloids and colloid-facilitated transport of contaminants in soils and sediments, DIAS report Plant Production no. 80, p. 157–164. Danish Institute of Agricultural Sciences, Tjele.
- 武 直子・大泉 毅 2002. 新潟県の田園地域における降雨組成とその経年変化。新潟県保健環境科学研究所年報, 17, 83–88.
- 鶴木啓二・山本忠男・井上 京・長澤徹明・岡澤 宏 2003. 少雪寒冷な酪農流域における融雪融凍期の水質水文環境。農土論集, 228, 9–15.
- Wheatley, R. E. 1988. Ochre deposits and associated bacteria in some field drains in Scotland. *J. Soil Sci.*, 39, 253–264.
- 横山宏太郎・大野宏之・小南靖弘・井上 聡・川方俊和 2003. 冬期における降水量計の捕捉特性。雪氷, 65, 303–316.
- 横山宏太郎・小南靖弘・川方俊和・大野宏之・井上 聡 2004. 降水量計の捕捉損失を補正すると雪による降水量は観測値よりはるかに多くなる。平成15年度関東東海北陸農業研究成果情報。http://www.affrc.go.jp/seika/data_common/h15/kanto/kan03044.html