

(16) 降雨および農業イベント時に水田から流出する溶存有機炭素の生分解性と流出量

Quantity and Biodegradability of Dissolved Organic Carbon from paddy fields
during rainfall and agricultural events

沈秀用*, 増田貴則**, 細井由彦**, 史承煥***

Sooyong SHIM*, Takanori MASUDA**, Yoshihiko HOSOI**, Seunghwan SA***

ABSTRACT: The aim of this study is to quantify and characterize dissolved organic carbon (DOC) in effluents (i.e. surface and drain flow) from a paddy field. Water samplings were taken from four paddy fields in Tottori, Japan, during rainfall and agricultural events between April and September 2003, including irrigation and non-irrigation periods, and then DOC concentration was measured. DOC concentration after 50 days incubation was also measured to determine biodegradability. In addition, EMCs (Event Mean Concentration) and Tank model were applied to quantify DOC loadings from the paddy fields. As a result, DOC concentrations of surface flow were between 1.1 and 10.1 mgC/l. The highest concentration was seen in the beginning of rainfall-runoff in non-irrigation period in April. However, the variation of DOC concentration did not always correspond to rainfall. It seems that it varied depending on agricultural event, i.e. decreasing DOC concentration was found during irrigation period. As a result of calculation by Tank model and EMC, the yearly DOC loading and non-biodegradable DOC from a paddy field were estimated 190-296 kg/ha/year and 153-241kg/ha/year, respectively. More than 80 % of the total DOC was non-biodegradable. Especially, the large amount of non-biodegradable DOC was discharged from Shirokaki event in May and from drain in non-irrigation period.

KEYWORDS: DOC; paddy field; Tank model; EMC; non-biodegradable

1. はじめに

水田や畑からの肥料成分(窒素, リン)の流出はダム・湖沼等閉鎖性水域の富栄養化の一つの原因として多くの調査研究が行われてきた(浮田ら 1984; 武田ら 1991; 近藤ら 1994; 中曽根ら 1996). また最近では, 琵琶湖北湖, 霞ヶ浦等いくつかの湖沼でCOD濃度の増加が見られる(国立環境研究所 2004)ことから, 湖や河川などでの溶存有機炭素(DOC: dissolved organic carbon)の収支や特性に関する研究や, 森林からのDOC流出特性に関する研究が行われてきている(Fukushima et al., 1996, Imai et al. 2001)が, 農業地域の水田や畑のようなノンポイント汚染源から流出したDOCの濃度や負荷量, 特性に関する情報は非常に少ない. そこで本研究では, 鳥取市の農業地域である福井と大畑流域の水田を対象に, 水田から流出したDOC量とその生分解性を調べ, 水田から流出するDOCの特性把握を試みた. また, タンクモデルと流出水DOCのEMC (Event Mean Concentration) 値を利用して水田からのDOC流出量の評

* 春川市水道課 (Chuncheon-City, Korea)

** 鳥取大学工学部社会開発システム工学科 (Dept. of Social Systems Eng., Tottori University)

*** 韓国環境政策・評価研究院政策研究部 (Policy Research Division, Korea Environment Institute)

価を試みた。これらの調査を通じて、河川や湖など水系への水田から流出する有機物の影響を考察する。

2. 研究方法

本研究で調査の対象としたのは、鳥取県鳥取市湖山池周辺に位置する4枚の水田である。いずれも平地に位置するグライ土壌の水田で、灌漑は用排水分離で行われている。以下、これらの水田を水田A～水田Dと呼ぶ。調査期間は2003年4月から9月までの期間で、これらの期間、水田からの流出水を採水し、DOCの分析を行った。各水田でのサンプリングは月別(降雨イベント時)および農業イベント別(代かき・田植え、中干し、落水)に、表面流出と暗渠流出が発生する時のみを選定して行った。各イベントに対して1%の採水ボトルを用い、流出開始から流出がほぼ終了するまでの間、約30分から数時間間隔の不定期の間隔で採水を行った。採水した試料は、Whatman GF/F filters でろ過し、ろ過後試料のDOC、およびその生分解性を測定した。DOCは全有機炭素計(TOC-V, Shimadzu)により分析し、有機物の生分解性は、国立環境研究所(2001)を参考に、それぞれろ過した試料を殺菌した300ml ガラスボトルに入れて、20℃の暗所で一定期間培養した前後のDOC濃度を測定し、その変化率とした。

また、観測した流出量資料を基に全期間および期間別の流出量を評価するために、各流出イベントの EMC (Event Mean Concentration) 値を計算した上で、水田の流出量モデルとして二段タンクモデル(図1)を利用して灌漑期と非灌漑期の一年間の対象水田からのDOC流出量を算定した。なお、タンクモデルのパラメータ値の導出にはGA (Genetic Algorithm, 遺伝的アルゴリズム) (たとえば, Goldberg 1989, 石田ら 1997) を利用した。

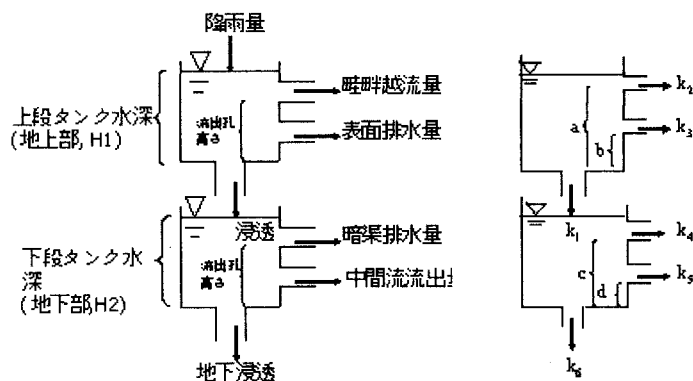


図1 本研究で用いた水田タンクモデルのスキーム

3. 結果および考察

3.1 水田からのDOC流出特性

図2に観測期間を通して流出水の採水を行うことのできた水田AのDOC流出状況を示す。図2に示しているのは、採水を行うことのできた4月(非灌漑期降雨時)、5月(代かき・田植え時)、6月(湛水期降雨時)、7月(中干し期)、8月(灌漑期降雨時)の表面排水および暗渠排水の流量とDOC濃度である。ただし暗渠排水については水田暗渠が開栓されていた4月、7月のみの流出である。この図より以下の特徴を読み取ることができる。

灌漑期前の4月の降雨流出時に観測期間を通して最も高いDOC濃度が観測され、全体的には、4月から8月にかけて徐々にDOC濃度が低下しているように見える。

特に、4月の降雨時初期の流出DOC濃度は高い値を示しており、時間が経過するに従い濃度が低減した。暗渠水のDOC濃度も同様の傾向を示した。これは、10月から4月までの非灌漑期間中に水田に残った株または施用された堆肥や土壌改良材の分解物が降雨によって流出することに起因すると思われる。

代かき・田植えの時期(5月下旬)には、流出水の流量は他の月より少ないが、DOC濃度の変化が大きく、濃度も比較的高い。これは水田の代かき・田植えという農業イベント特有の流出現象で、農作業に伴い、稲株や堆肥の分解物を含む土壌が多量に流出することによるものと考えられる。

6月の降雨イベント時は、流量変化は大きい濃度変化(4~6 mg/l)は小さかった。降雨に伴い流出量

は増加しているが、4月や5月のようにDOC濃度に極端な変化は生じていない。水田では田植えを終え湛水している状態なので、降雨があると流出が生じやすいが、湛水された田面水が流出するだけなので、DOC濃度に大きな変化が表れないものと思われる。

中干し時（7月）は、降雨と重なったために途中で若干流出量の増加を見せたが、全流出時間を通じてDOC濃度にはあまり変化がなかった。流出初期には暗渠水のDOC濃度は表面水の濃度より高く、時間が経つにつれて低減するが、やがてほぼ一定の値を示し、比較的高濃度のままで推移した。図には示していないが、他の水田でも暗渠のDOC濃度は比較的高濃度のままで推移していた。この水田では中干し時の排水のほとんどが表面から排出されていたが、暗渠からの排水量が多い場合その影響は無視できないと考えられる。

8月の降雨イベント時の流出水のDOC濃度は他の月より低かった。全体を通して、DOC濃度の変化は降雨の強さ、流出の量に依存していないように思われる。

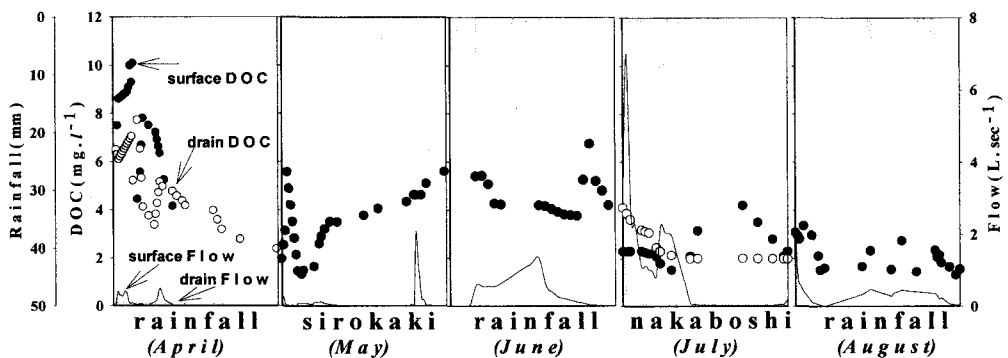


図2 降雨イベントおよび農業イベント時の水田からの流出水の流量およびDOC濃度

3. 2 各イベントのDOC-EMCの特徴

イベント間の平均的なDOC濃度の比較を行うために、水田からの流出水を採水することのできたイベントについてEMC(Event Mean Concentration)値を計算した。図3に、水田A～Dの各イベントのEMC値を示す。表面排水のEMCは4月から6月まで徐々に減る傾向が見られ、その後9月までほぼ一定の値を示す傾向が見られた。特に、4月と5月の各イベント時に高い値を示しているのは、先に述べたように4月までの非灌漑期間に水田に残った稲株または堆肥や土壌改良材の分解物が降雨により流出することと、代かきによって土混じりの高濁度の水田表面水が流出することが原因と考えられる。ところで、同じイベントでも水田の土壌状態や水管理の状況に

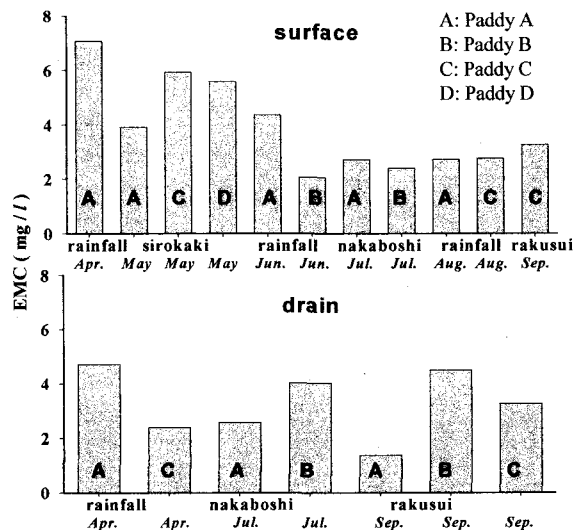


図3 水田流出水のDOC-EMC値

よって流出負荷量は大きく異なり、水田によって10倍程度の違いが生じることが報告されている（竹谷ら 2003）が、図 3には水田が違っても同じイベント時のEMCの値は大きくは違わなかったことが示されている。これらのことから、どの水田であってもEMC値は同一の値になると考え、各水田でのイベント時の流出水量に対してEMCを原単位的に与えてやることで、DOC流出量の評価ができるものと思われる。このとき表面排水の各イベントのEMC値は図 3の傾向が示すように灌漑期前の降雨時に最も高く、次いで代かき・田植え時、・・・というようにイベント別に違う値を与えるのが妥当かと思われる。一方、暗渠水のEMCについては今回の結果からは明確な傾向が見られないことからこれらの平均値で代用してよいものと思われる。

3. 3 水田流出水のDOCの生分解性

図4に、様々なイベント時の水田表面排水および暗渠排水の50日間培養後の生分解性比率を示す。全サンプルの難分解性DOC比率は50～97%の範囲にあるが、表面排水の難分解性比率は、6月、8月の降雨時を除いた（5月、7月、9月の）農業イベント時に限っては70-80%となり、全体的に農業イベント時の水田からの排水は難分解性比率が高いことが明らかとなった。また、暗渠水のDOCは特に高い難分解性比率を示し、90%～97%の値を示した。これは、水田土壌が水が通下する過程で土壌のフミン物質が流出してきたためと考えられる。同様の試験方法で100日後の生分解率の調査を行った国立環境研究所（2001）によると、DOCの生分解率は霞ヶ浦周辺の河川で27.6%、湖水11.7%、森林渓流水6.3%、畑地浸透水12.4%、生活排水65.7%を示したとある。本研究による水田流出水の生分解性は、暗渠排水については森林や畑地の浸透水と同程度に難分解性比率が高く、表面排水はそれより若干生分解性が高く、河川と同程度の値を示すことが確認できた。

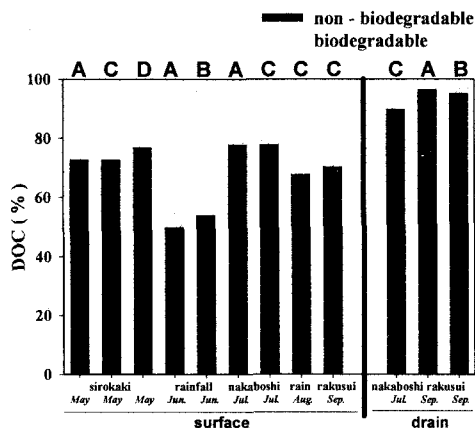


図4 水田流出水のDOC生分解性

3. 4 水田の単位面積あたりDOC負荷流出量の評価

図5にタンクモデルによって計算されたシミュレーション結果を示す。左の図は2003年4月から8月までの水田Aの表面からの流出量の実測値と予測値を比較したものである。本研究では、GA(Genetic Algorithm, 遺伝的アルゴリズム)によって実測値と予測値の平均誤差が最も小さくなるようにタンクモデルのパラメータを求め、それを用いている。この図において、一部、実測値と予測値が一致していない。特に、ピークが再現できていないことから

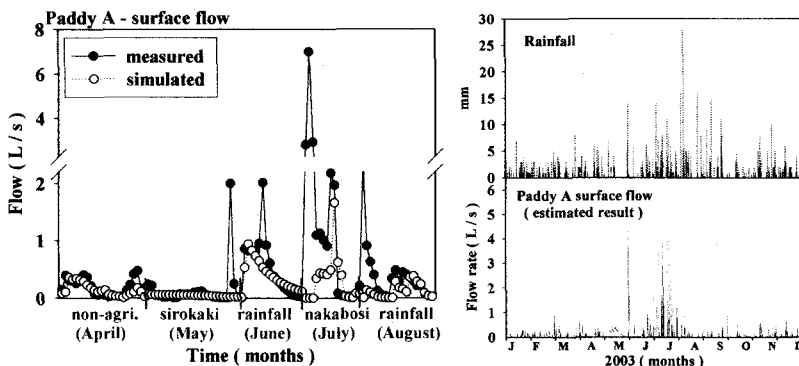


図5 タンクモデルによる表面排水の流量計算結果（水田A）

総流量を過少評価する傾向があるが、全般的な流量変化の傾向としては再現できているものと判断した。右の図は平均的な降水量（1943mm）であった2003年一年間の日降水量と、このモデルパラメータを用いてその年一年間の表面水の流出量を推定した結果の図である。

次に、このようにしてタンクモデルを利用して求めた流量に各イベントのEMC値をかけて、イベント期間中に水田から流出した表面水と暗渠水の単位面積あたりのDOC負荷流出量を求めた。表1にその結果を示す。全ての水田で表面排水は暗渠排水より高いDOC負荷を排出すると計算された。水田A、水田B、水田Cの単位面積あたり年間DOC負荷流出量は、それぞれ270.1, 189.8, 295.7 kg/ha/yearとなり、水田により多少異なる値を示している。単位面積あたりのDOC負荷流出量は、それぞれの水田の様々な特性（地理的、地質的要因、水管理、農業慣習）の違いによって、ばらつきがあると考えられるが、今回計算の対象とした3水田ではあまり大きな差はなかった。

表1 モデル計算によって求めた単位面積あたりの年（日）DOC負荷流出量

	Paddy A	Paddy B	Paddy C
Surface	153.3 (0.0042)	105.9 (0.0029)	164.3 (0.0045)
Drain	116.8 (0.0032)	84.0 (0.0023)	131.4 (0.0036)
Total	270.1 (0.0074)	189.8 (0.0052)	295.7 (0.0081)

unit : kg/ha/year (kg/a/day)

図6に2003年一年間のシミュレーションの結果から月別合計値を求め、日単位に換算した水田単位面積あたりDOC負荷流出量を示す。水田によって流出の特徴が異なるが、いずれの水田も5月と6月で他の月よりDOC負荷流出量が多かった。5月は代掻き・田植え、6月は降雨の多い時期と重なったため、表面からのDOC負荷量が特に高くなっている。一方、10月から4月までの非灌漑期間には、暗渠からのDOC負荷量の割合が表面排水と同程度、または表面排水より大きくなっており、非灌漑期間中に暗渠排水からのDOC負荷量が全体に占める割合が高いことが示されている。なお、これらの結果のうち、降雨の影響を受ける部分は、年による雨の降り方によって変化するものと考えられる。

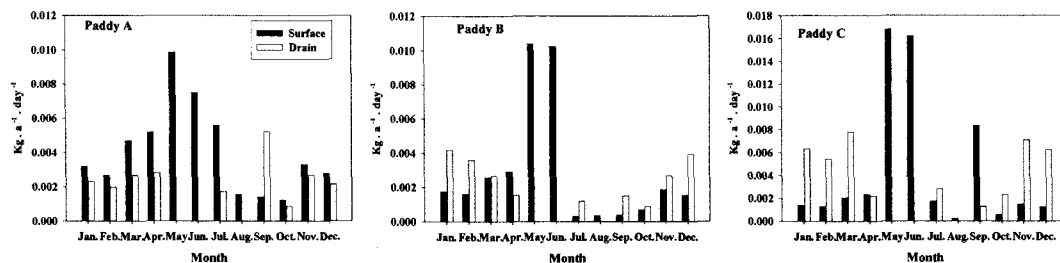


図6 月間DOC負荷流出量

次に、計算の結果を降雨および農業イベントに分けてそれぞれでDOC負荷量を合算し、負荷量の比率としてまとめたものを図7に示す。全期間中で非灌漑期の降雨イベントによる流出量の比率が約50～57%を占める結果となった。鳥取を含む日本海側では例年10月から4月までの非灌漑期と重なる期間に降水量が多いことが影響しているようである。また、2003年の降雨時系列を与えた場合には、灌漑期間のイベントでは降雨イベント及び代かきイベントによる流出が大半を占める結果となった。中干しや落水

については全体の6%~20%程度を占めており、水田によってその差が大きい結果となった。このように特定の農業イベントにおいて差が大きくなっていることから、中干しや落水時に水田から水を落とす際の水管理の仕方が影響しているとも考えられる。

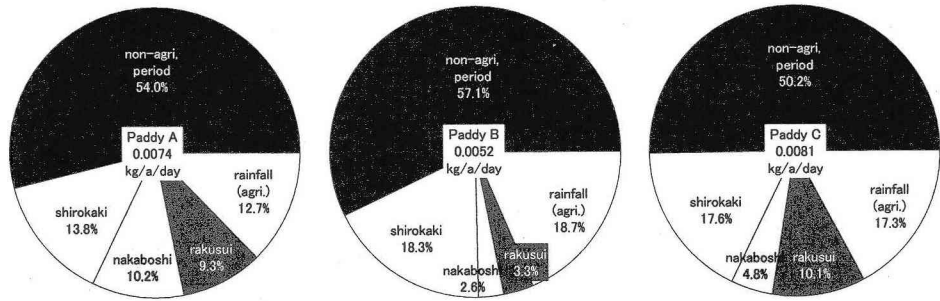


図7 降雨および農業イベント別のDOC流出負荷の割合

生分解性（難分解性比率）の結果とタンクモデルで求めた各水田の一年間(あるいは月別)のDOC負荷量を利用して各水田から流出する難分解性DOC量を求めた。結果を表2に示す。水田A、水田B、水田Cの一年間単位面積あたりの難分解性DOC負荷量はそれぞれ219、153、241kg/ha/yearであった。従って、難分解性DOCの比率は、表1に示した一年間の総DOC負荷量の約80%程度を占めることがわかる。また、総DOC負荷量の時には、暗渠排水より表面排水からの負荷量が多かったが、難分解性のDOCに限ってみると暗渠排水からの方が表面排水からより多いことが示された。これは、生分解性の分析結果からも明らかのように、暗渠排水中の有機物の難分解性比率が約95%(表面水は約75%)程度で大部分の有機物は分解ができないことによる。この結果より、水田からの排水が受水域の難分解性有機物の供給源となっているものと思われる。

表2 単位面積あたりの年(日)難分解性DOC負荷流出量

	Paddy A	Paddy B	Paddy C
Surface	110 (0.0030)	73 (0.0020)	117 (0.0032)
Drain	110 (0.0030)	80.3 (0.0022)	124 (0.0034)
Total	219 (0.0060)	153 (0.0042)	241 (0.0066)

unit : kg/ha/year (kg/a/day)

4. まとめ

本研究では、複数の水田を対象に降雨イベントおよび農業イベント時の水田からの流出水中に含まれるDOC濃度およびその生分解性の調査を行い、その結果を基にイベント時のDOC流出量の評価を行った。その結果を以下にまとめる。

流出水中のDOC濃度は4月降雨初期、および5月の代かき時に高く、6月から9月にかけて低減する傾向にあった。春先および代かき時にDOC濃度が高いのは、非灌漑期間に水田に残った稲株や施用された肥料の分解物の影響や、代かき時期の土壌攪拌の影響を受けているものと考えられる。また、流出水のDOC-EMC値は、流出水のDOC濃度の傾向と同様に4月、5月に高く、6月までは低減する傾向があったが、その後は9月にかけてほぼ一定の値を示した。特徴として、異なった水田でも同一のイベントにおいてはほぼ同程度のEMC値を得ることがわかった。このことから、各水田でのイベント時の流出水量に対してEMCを原単位的に与えてやることで、DOC流出負荷量の評価ができるものと思われる。

DOCの生分解性調査の結果からは、水田流出水の難分解性DOCの比率は、表面排水においては約50～80%、暗渠排水においては約90～97%を占め、暗渠排水の難分解性比率が特に高いことが示された。表面排水については河川と同程度、暗渠排水については森林渓流水や畑地浸透水と同程度の難分解性を示しており、河川・湖沼等受水域の難分解性有機物の重要なソースとなっているものと思われる。

タンクモデルとEMCを用いて計算した年間の水田のDOC負荷流出量は、 $189.8 \sim 295.7 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$ 、表面排水のDOC負荷量は暗渠排水の負荷量の約1.5倍程度を示した。非灌漑期間の降雨による流出のものが特に多く、全体の50～57%程度を占めており、灌漑期においては、代かき期および降雨時の負荷流出が多いことがわかった。また、水田流出水の難分解性DOC負荷量は $153 \sim 241 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$ であり、水田からの年間総DOC負荷量の80%程度が難分解性を示すものであると推定された。また、難分解性DOCに限ればその50%以上が暗渠排水に含まれていることとなり、表面排水からの負荷量より多いと推定された。

以上より、湖沼や河川の難分解性有機物の起源として流域の水田からの流出水の重要性が示唆される。水田からの流出水は、難分解性有機物を多量に含んでおり、水系の湖沼や河川に流入し、その水を水源とする浄水処理過程でTHMを発生する原因となっていると考えられる。DOC濃度の高さと難分解性比率の高さを考慮に入れると、特に、代かき・田植え時期の田面流出水、および、春先を含む非灌漑期間中の暗渠からの流出水の寄与が大きいと思われる。

参考文献

- 石田良平, 村瀬治比古, 小山修平 (1997) 遺伝的アルゴリズムの基礎と応用, 森北出版
- 浮田正夫, 中西弘 (1984) 富栄養化の原因と対策, 公害対策, 8(5), 69-85.
- 国立環境研究所 (2001) 湖沼において増大する難分解性有機物の発生原因と影響評価に関する研究, 国立環境研究所特別研究報告SR-36-2001
- 国立環境研究所 (2004) 湖沼における有機炭素の物質収支および機能・影響の評価に関する研究, 国立環境研究所特別研究報告SR-62-2004
- 近藤正, 三沢真一, 豊田勝 (1994) 代かき田植え時期 N, P成分の流出性について, 農業土木学会論文集, 164, 147-155.
- 武田育郎, 國松孝男, 小林慎太郎, 丸山利輔 (1991) 水田における水田群の汚濁物質の収支と流出負荷, 農業土木学会論文集, 153, 63-72.
- 竹谷直起, 増田貴則, 史承煥, 細井由彦, 田中太朗 (2003) 灌漑期のイベント時における水管理が水田からの汚濁流出に与える影響に関する調査, 第37回日本水環境学会年会講演集, pp.10
- 中曽根英雄, 黒田久夫, 久保田建蔵 (1996) 地形連鎖と水田灌漑を有する農業集水域から流出する水質の特性について, 水環境学会誌, 19(1), 56-62.
- Fukushima, T., J. C. Park., A. Imai., and K. Matsushige (1996) Dissolved organic carbon in a eutrophic lake; dynamic, biodegradability and origin., *Aquat. Sci.* 58, 139-157.
- Goldberg, D.E. (1989) Genetic algorithm in search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley Publishing
- Imai, A., Fukushima, T., Matsushige, K., and Yonghwan K. (2001) Fractionation and characterization of dissolved organic matter in a shallow eutrophic lake, its inflowing rivers, and other organic matter sources, *Wat. Res.* 35, 17, 4019-4028.