

水田排水による河川濁度上昇に関する現地研究

INFLUENCE OF RICE PADDY OPERATION ON RIVER WATER TURBIDITY

石川忠晴¹・張怡²・浅井勇磨³・嶋国吉⁴・磯部久貴⁵

Tadaharu ISHIKAWA, Yi ZHANG, Yuma ASAI, Kuniyoshi SHIMA and Hisataka ISOBE

¹フェロー会員 工博 東京工業大学教授 環境理工学創造専攻 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259)

²学生会員 修(理) 東京工業大学 環境理工学創造専攻 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259)

³非会員 東京工業大学 土木環境工学科 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259)

⁴非会員 学(農) (株) 日水コン東北支所 河川事業部 (〒980-0811 仙台市青葉区一番町4-7-17)

⁵非会員 修(工) (一財) 水源地環境センター 研究第1部 (〒102-0083 東京都千代田区麹町2-14-2)

This paper discusses the influence of fine sediment discharge from paddy field on the river water turbidity being based on filed measurements conducted in the Eai River catchment in 2014. The data of continuous turbidity measurement in a drainage channel were formulated into an empirical relation for suspended sediment flux using the mathematical quantification theory class II by taking the stages of paddy field operation and the rainfall intensity as the influential parameters. The results successfully explained the variation of turbidity in the river reach where the paddy field discharge is comparatively large not only for the data obtained in 2014 but also the data for the four years from 2010 to 2013.

Key words: *paddy field operation, influence on river turbidity, simulator, field study*

1. はじめに

我が国の沖積平野にある水田の多くには河川からの灌漑水路網が完備しており、天水への依存度は低い。国土交通省の調査によると、全国の水田取水水源の約 88%が河川からとなっている¹⁾。このため多雨の時期には田面に余剰水が生じて河川に放流される。その際、田面の細粒土砂が流出し河川濁度に影響を及ぼす恐れがある。

一方、我が国では稲の成長段階によって田面水位が細かく制御されている。一般的には、代掻き・田植え、活着期の深水灌漑、分けつ期の浅水灌漑、土壌通気のための中干しおよび間断灌漑、出穂期の浅水灌漑、その後の間断灌漑と落水に区分されている²⁾。本研究では、これらの作業工程を“稲作カレンダー”と呼ぶことにする。張ら³⁾は江合川流域の水田で現地観測を行い、稲作カレンダーの段階によって降雨に対する水田の水文応答特性が変化することを示している。

したがって水田からの濁質の排出も稲作カレンダーの段階によって異なるものと考えられる。代掻き・田植えのように田面を人為的に攪乱する時期については、排水の水質が実測されている^{4), 5), 6), 7)}。須戸らは琵琶湖に流入する宇曾川流域の計測から、田面排水の SS が 1200 mg/l に達することを示している⁴⁾。また北村らは霞ヶ浦

湖岸の用排水機場からの負荷量解析を行い、灌漑排水システムの異なる地域との代掻き田植え期の負荷を比較している⁸⁾。稲作カレンダーの他の期間の濁質排出は代掻き・田植え期に比較して小さいと考えられるが、計測データがほとんどなく、河川環境に及ぼす期間ごとの影響は十分把握されていない。

本研究では、灌漑期を通して宮城県大崎平野の水田において現地観測を行い、排水路における SS フラックスと降雨との関係を稲作カレンダーの各段階について検討した。またその結果を用いて、水田排水が集中する江合川の区間の SS フラックス変化を推定し、河川における国交省の実測結果と比較した。

2. 対象地域の概要

図-1に江合川と鳴瀬川の流域の土地利用区分を色別けして示す⁹⁾。大崎平野は江合川および鳴瀬川によって形成された沖積低地である。17世紀前半に仙台藩が行った北上川大改修に伴い江合川は北上川の一支出川となり、その後の用排水路整備により、大崎平野は東北地方有数の穀倉地帯となった。

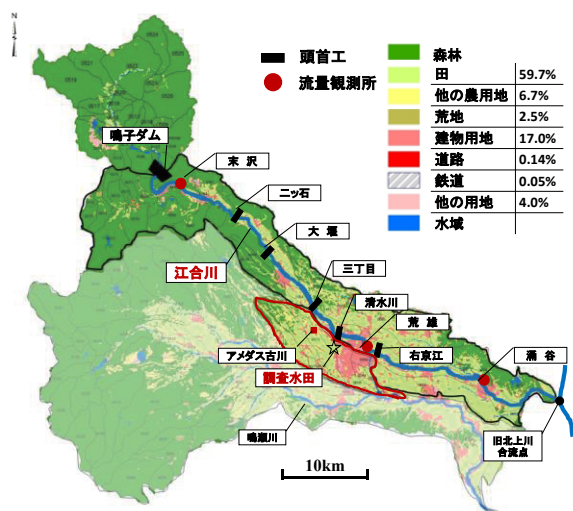


図-1 江合川の流域・灌漑域の土地利用

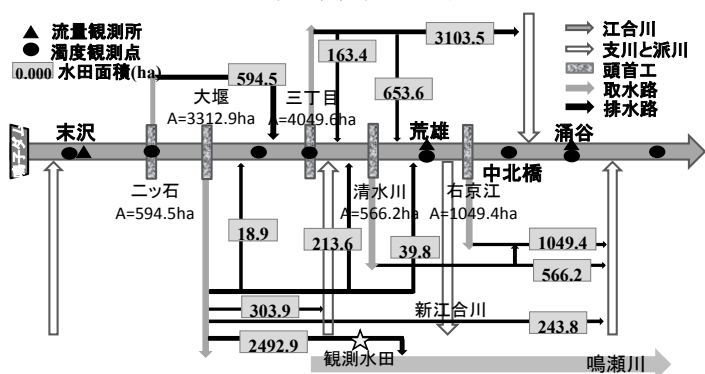


図-2 江合川流域の灌漑系統図

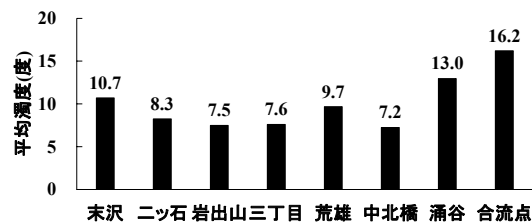


図-3 灌漑期の平均的濁度縦断分布

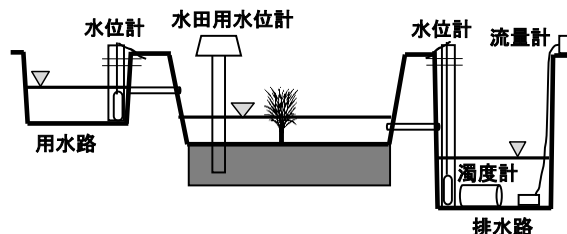


図-4 計測装置

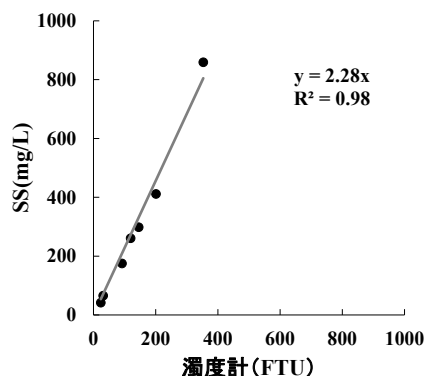


図-5 水田土壌の濁度とSSの相関

江合川は秋田県境に近い荒雄カルデラから鳴子ダムを経て大崎平野を流下する。同平野は石巻湾に向かって傾斜しているため、江合川からの灌漑用水の一部は鳴瀬川に落水する。そこで鳴子ダム下流の江合川集水域と、鳴瀬川集水域のうち江合川から灌漑される区域を濃く色づけし、他の鳴瀬川流域を薄くしている。山地森林を除く平野部の水田面積の割合は60%である。ただし近年の減反政策のために実質的な水田割合は40%となっている。

図-2に支川・派川および用排水路の系統を図式化して示す。図中の▲は水位・流量観測点で通年的に計測されている。一方濁度計測は●で示す8地点で行なわれているが、後に示すように計測時期及び頻度は定まっておらず、また観測地点数が少ない場合もある。また、頭首工名の下に灌漑面積を、主要排水路の出口に排水区域面積を示している。これからわかるように、大堰頭首工と三丁目頭首工の取水量が卓越している。また水田排水が最も集中するのは【中北橋～涌谷】の間に流入する支川を介してである。なお荒雄観測所下流の新江合川は放水路であり、洪水時以外は流れていない。

図-3に国土交通省が2010年から2014年の灌漑期に江合川で観測した河川濁度の平均値の縦断分布を示す⁹⁾。図-2において水田排水が最も集中する【中北橋～涌谷】の区間で明確な濁度上昇が見られる。過去の調査に

よれば、濁度が10度になるとアユの摂餌行動に影響が現れ、15度になると忌避行動を開始する¹⁰⁾。したがって図-3に示した江合川下流部における灌漑期の濁度上昇は無視できるレベルではない。

3. 現地観測の方法

大崎地域水管理協議会から図-1および図-2に☆で示す地点に位置する1ha(100m×100mの矩形)の水田の営農者を紹介いただき、その協力のもとに現地観測を実施した。この水田は大堰頭首工からの灌漑区にあり、鳴瀬川支川の渋井川に排水される。図-4に示すように計測器を設置して、2014年4月27日～8月31日の期間に計測を行った。計測器の詳細と設置状況は張ら³⁾に記してある。本論文では、主に排水路に設置した流量計(TELEDYNE社製ISCO2150)と濁度計(JFEアレック社製COMPACT-CLW)による計測の結果を用いる。観測された濁度をSSに換算するために、田面から試料を採取し、室内試験により相関を求めた。その結果を図-5に示す。排水路は50cm×50cmのコンクリート製矩形水路である。なお雨量についてはアメダス古川(観測位置は図-1参照)のデータを使用した。

表-1 各作業段階の期間と管理水深

	作業段階	期間 (2014)	管理水深
①	深水管理	5/7~5/26	5 cm
②	浅水管理-1	5/26~6/25	3 cm
③	中干し	6/25~7/15	0 cm
④	間断灌溉-1	7/15~8/11	0~2 cm
⑤	浅水管理-2	8/11~8/15	2 cm
⑥	間断灌溉-2	8/15~8/24	0~2 cm
⑦	落水後	8/24~8.31	—

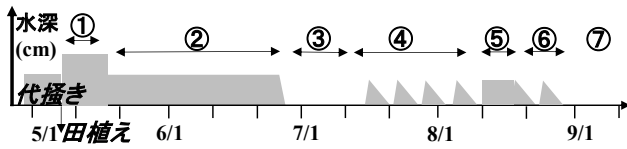


図-6 稲作カレンダーの模式図

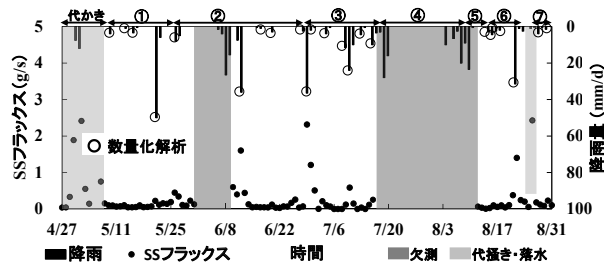


図-7 排水路内のSSフラックス

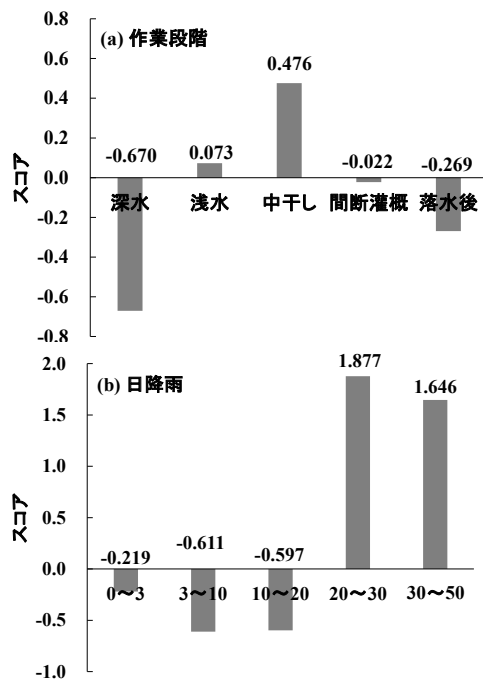


図-8 カテゴリ・スコア (排水路)

図-6は稲作カレンダーの各段階における管理目標水深を模式的に示したものである。横軸は大体の期間で、年ごとの気象条件や品種によって若干の差異はある。図中の数字は表-1に対応している。張らは³⁾、同地域のJA資料、現地観測結果および営農者へのインタビューから、田植え終了後の各段階における管理水深を推定し、表-1に示すように数値化している。期間の欄には現地観測を実施した水田において2014年に実際に行われた期間を記入している。ただしこの営農者は複数枚の水田を有して

おり、所有水田全体では各段階の作業開始に3日の幅があった。また品種によっても1週間程度の時差の可能性はある。

4. 水田からのSS負荷量

(1) 水田排水路データの解析

図-5の中に示す回帰式により計測濁度をSSに換算し、それに流量を乗じてSSフラックスを求めた。日平均のSSフラックス時系列を日雨量とともに図-7に示す。図の上には表-1に示した各作業段階の番号を記している。薄い灰色は代掻き・田植え期と落水期を示している。この期間は降雨がなくても濁水が排出されており、本研究の対象外である。また濃い灰色を付けた期間は、流量計のバッテリー切れあるいは濁度計の故障による欠測である。それらの期間を除けば、降雨に反応してSSフラックスが増大することがわかる。また応答の程度は作業段階によって異なることがわかる。また図では必ずしも明確でないが、同程度の降雨でも作業段階によってSSフラックスは微妙に異なっている。

そこで本研究では次式を仮定して日単位のSSフラックスの経験式を作成することにした。

$$F_{SS} = \alpha \cdot f_1(T) \times f_2(R) \cdot A \quad (1)$$

ここに α は係数、 F_{SS} は日単位のSSフラックス、 $f_1(T)$ は作業段階Tにより定まる値、 $f_2(R)$ は日雨量Rの関数、Aは排水する水田の面積である。

図-7に示したデータから日雨量が1mm以上の日(同図の○)を抽出し、その日の F_{SS} のピーク値との関係を解析することとした。ただし6時間以内の休止で降雨が2日に跨っている場合は一つの降雨とした。これらのデータは全部で24個あり、式(1)の関数形を直接的に回帰するには必ずしも十分と言えない。そこで F_{SS} を目的変数、TとRを説明変数とし、数量化解析Ⅱ類を以下のように段階的に適用して相関関係を推定した。

まず日降雨量をアイテム化するために、気象庁が定義する時間雨量の強度区分の数値¹¹⁾を参考に日降雨量を5段階に区分した。また表-1に示した作業段階の②と⑤、④と⑥は同一として5つのアイテムとした。続いて F_{SS} の値について閾値を設定して2つのカテゴリに分けた。数量化Ⅱ類ではカテゴリの分離が最大となるようなアイテム・スコアが求められるが、その結果は閾値の設定の仕方に依存する。そこで閾値の F_{SS} を0.6, 0.5, 0.4, 0.25g/sに設定し、それぞれの最大分離度を調べたところ、0.63, 0.69, 0.58, 0.62となったので、0.5g/sを採用した。

図-8(a)に各作業段階のアイテム・スコアを示す。これから濁質流出量は深水管理期に少なく中干し期に最大になることがわかる。また図-8(b)から、日降雨量が20mmを超えると濁質流出が急激に増加することが推定

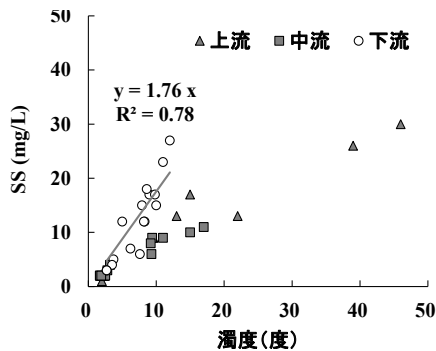


図-9 河川濁質の濁度とSSの相関

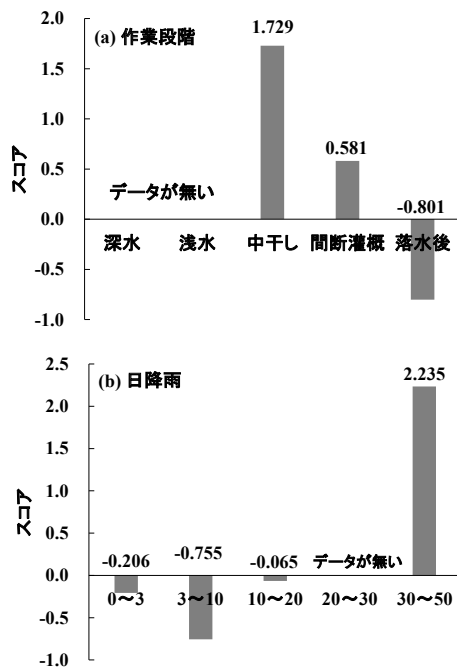


図-10 カテゴリ・スコア (河川)

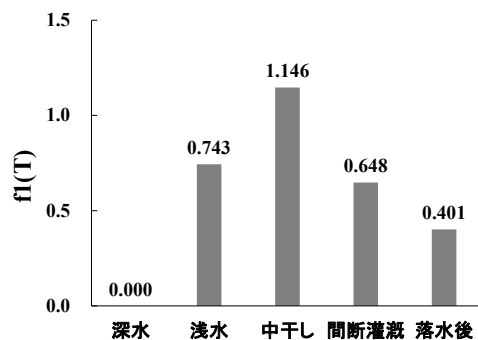


図-11 式(1)の関数形の設定

された。

(2) 江合川の濁度データの解析

図-3 に示したように、水田排水が最も集中する【中北橋～涌谷】の区間において明確な濁度上昇が見られる。そこで前節で検討した水田排水路での観測結果と【中北橋～涌谷】区間での濁度フラックス増分の関係を検討することにした。

2010 年から 2014 年に国土交通省が江合川で実施した濁度観測の結果⁹⁾から、同区間の SS フラックス増分

F'_{SS} を以下の式により計算した。

$$F'_{SS} = SS_W \cdot Q_W - SS_N \cdot (Q_A - q_U) \quad (2)$$

ここに SS_W , SS_N は涌谷と中北橋の SS ; Q_W , Q_A は涌谷と荒雄の日流量 ; q_U は右京江頭首工での日平均取水量である (図-2 参照)。

濁度から SS への換算は国交省が行ったサンプル試験のうち灌漑期に得られたデータに基づき推定した⁹⁾。同試験結果を図-9 に示す。図中では上流【末沢、ニッ石、大堰】、中流【岩出山、三丁目、清水川】、下流【荒雄、中北橋、涌谷、旧北上川合流点】の区間に分けてプロットしている。水田排水の集中する下流区間のみ特性が異なっていることがわかる。そこで下流区間のデータについて線形回帰式を作成したところ図中の式を得た。図-5 に示した水田土壌の試験結果に近いことがわかる。このことから下流区間における濁度上昇の原因が水田排水によっているのではないかと考えられる。

解析対象とした国交省のデータは 2010 年から 2014 年に平均 2 週間おきに得られているが、業務発注時期の関係から 7 月に始まっていることが多く、灌漑期の全てはカバーされていない。また 11 月まで計測されている年もあるが、刈取り後の水田では 10 月に稲わらのすき込み、11 月に秋耕が行われて田面状態が変化する。そこで本研究では計測の最初から 9 月までのデータを使用した。全データ数は 80 であったが、このうち 1mm 以上の降雨のあった日のデータは 18 であり、深水量期と浅水量期のデータはなかった。また日降雨量が 20～30mm のデータもなかったため、これらのアイテムは削除して解析を行った。

ところで降雨がなくても SS フラックスは存在する。そこで前 2 日間に降雨のなかった日について計算された F'_{SS} の値の平均値を求めたところ 83g/s となった。この値を原データ値から差し引いた F'_{SS} を目的変数として前節と同様に数量化Ⅱ類を適用した。なお前節と同様に F'_{SS} の閾値を 50, 100, 150, 200g/s に設定して最大分離度を調べたところ、それぞれ 0.32, 0.53, 0.50, 0.47 となった。そこで閾値を 100g/s としたときの解析結果を図 10-(a) (b) に示す。ただし前述の理由により深水量期と浅水量期の期間および日降雨量が 20～30mm のデータはない。これから、データの存在するアイテムについてのスコアの相対関係の全体的傾向は図-8(a) (b) と共通していることがわかる。

(3) 水田 1ha あたりの濁度流出量の推定式

河川での計測データは十分でないことから、ここでは水田排水路での計測データをもとに式(1)の関数形を定めた。ところで数量化Ⅱ類の解析結果は全データのスコア合計がゼロになるように出力されるので、一定数を足しても分離度に変化はない。そこで農業カレンダーの作業段階については、図-11 に示すように、図-8(a) の

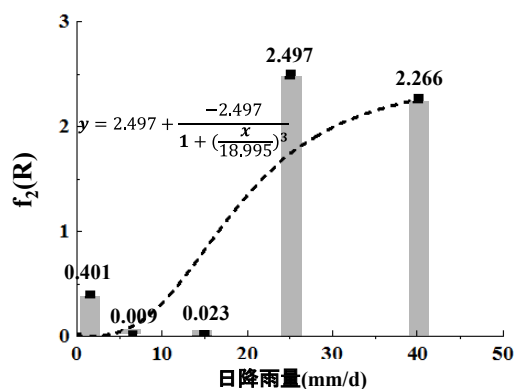


図-12 式(1)の $f_2(R)$ の設定

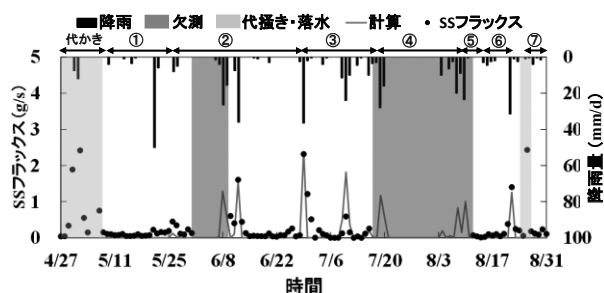


図-13 排水路の経験式による排水路SSフラックス

スコアに最小値（深水灌漑：-0.67）の絶対値を足して全ての値が正となるよう $f_1(T)$ を定めた。また降雨量については、日降雨量が最小のアイテム（1～3mm）のスコアが最小値にならなかったため、0.62 を足して全ての値が正になるようにした後に、図-12 に示すようにロジスティック曲線を当てはめて $f_2(R)$ とした。また係数 α については、試行計算により 0.26 とした。なお排水路の観測地点より上流の水田面積は 3.7ha であるので、式(1)の A を 3.7 とし α を求めた。

5. SS 流出の経験式の適用

式(1)から得られた結果を、まず図-7 に示した水田排水路の計測結果と比較したところ図-13 を得た。なお 4 月 26 日～5 月 10 日は人為的攪乱が与えられる代掻き・田植えの時期であるため、本研究の対象外である。計測値と推定値は深水管理以降の灌漑期において概ね一致していることがわかる。

次に、観測水田排水路の計測に基づく経験式により【中北橋～涌谷】区間の濁度上昇をどの程度説明できるかを調べた。図-2 に示したように観測水田と【中北橋～涌谷】区間に排水される水田群は異なる灌漑区にあるが、ここでは農作業が同一であると仮定して計算を行った。

式(1)から求められる 1ha あたりの F_{SS} に【中北橋～涌谷】に排水する水田面積を乗じ、4(2)で述べた基底値（83g/s）を加えて、同区間における SS フラックス増分を推定した。降雨データは 2010～2014 年のアメダス古

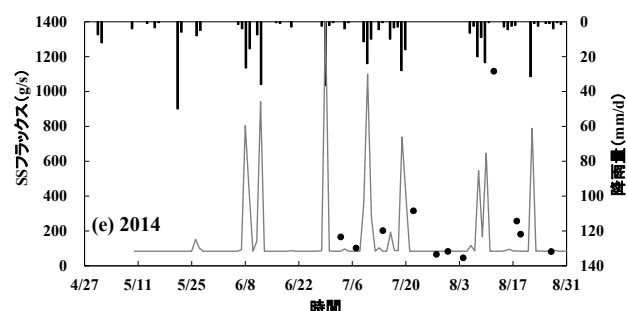
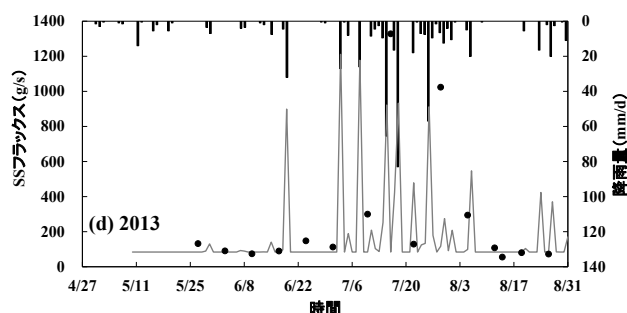
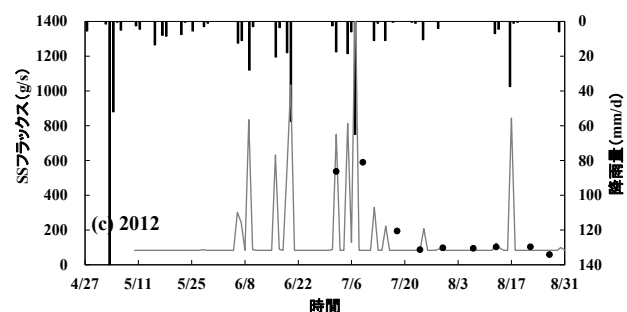
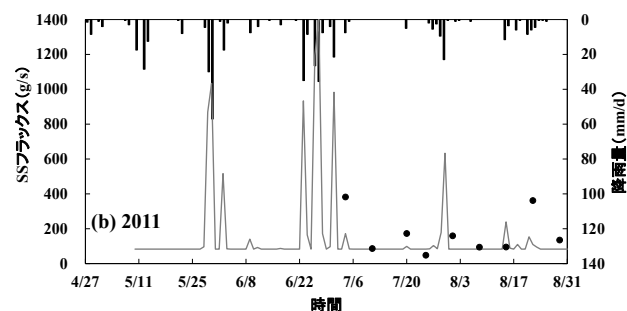
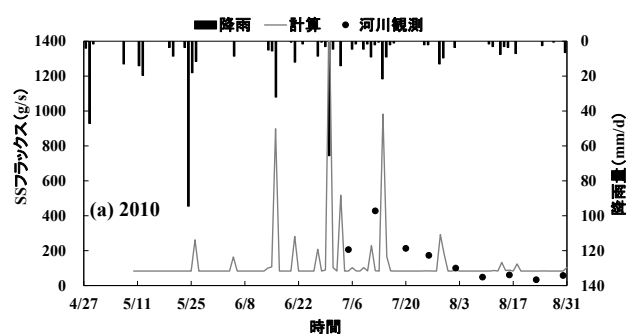


図-14 河川SSフラックス増分の推定結果(2010～2014)

川のデータを使用した。また稲作カレンダーの各作業段階の期間は 2014 年と同一とした。計算結果と実測値を図-14(a)～(e)に比較する。一致度は必ずしも十分とは

言えない。その原因として以下のような点が挙げられる。

計算においては、水田直下の排水路における SS フラックスが滞滞なく河川に流出すると仮定している。しかし対象区域に灌漑する三丁目頭首工から【中北橋～涌谷】区間の排出口までは図-1 に示したように約 20km の距離があり、水田から河川までの排水路長は平均 10km のオーダーである。このため流達時間や排水路での貯留を無視できない恐れがあり、また土砂の沈殿・再浮上が生じていることも考えられる。加えて支川を介して江合川に流入するため、その区間での土砂フラックスの変化を考慮する必要もあるであろう。

前節では日単位での SS フラックスについて経験式を作成したため、日内の降雨時間分布が偏っている場合には最大 1 日の時差を生じることになる。また降雨時点の水田水深によって SS 生産量は影響を受けることも考えられるが、前述したように、本計算では全ての水田が観測水田と同様に挙動していると仮定している。実際には稲の品種や作業機器の手配あるいは取水の輪番などにより、水田状態は均一でないと思われる。また計算では稲作作業の段階として 2014 年の観測水田における実績を他の年にもそのまま適用したが、実際には各年の気象条件によって変化する。これらの点については農作業に関してさらに詳細な聞き込み調査が必要とされる。なお水田土壌の性質も SS 発生に影響を及ぼすと考えられ、この点の調査も今後必要とされるであろう。

以上のように、本研究における経験式の精度向上、適用範囲と適用条件などについては今後検討すべき課題が多い。しかし、本計算では日降雨量と稲作カレンダーのみの情報から河川における SS フラックス上昇のオーダーを概ね推定できていることから、上述の問題点について改良を加えることにより、水田の農作業が河川濁度に及ぼす影響を簡易に検討するツールの一つに発展させられるものと考えられる。

6. おわりに

本研究では東北地方の主要な稲作地域の一つである江合川流域（宮城県大崎市）の水田排水路において濁度観測を実施し、国交省が実施した江合川濁度観測の結果と併せて、水田作業段階と日降雨量を変数として数量化解析Ⅱ類により、水田からの SS 排出について解析した。その結果、以下に述べる事項が明らかになった。

- 水田地表面が露出している中干し期間において降雨に対する SS の応答レベルが高く、以下、浅水管理、間断灌漑、深水管理の順となった。また日降雨量が 20mm を超えると SS フラックスが増加することがわかった。

- 数量化解析Ⅱ類に基づき作成した SS フラックス算定式は、江合川で水田排水が集中する【中北橋～涌谷】の区間の濁度上昇をある程度説明した。
- ただし広範囲の水田の影響を精度よく捉えるには、排水路が SS 輸送に及ぼす影響、農作業の空間時差の推定、土質の違いによる影響など、よりきめ細かなモデル化が必要と考えられた。

以上のように今後の課題も多数あるが、水田が河川濁度に及ぼす影響を稲作カレンダーに基づいて検討する枠組みについて、基礎的知見が得られたと考えられる。

謝辞：本研究の現地計測は大崎市古川在住の佐々木喜美夫氏の多大な協力を得て実施できた。国土交通省鳴子ダム管理所および北上川下流河川事務所には種々のデータを提供いただいた。また大崎地域水管理協議会の方々からは用排水系統図など有用な資料を頂戴した。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 水文・水資源学会編：水文・水資源ハンドブック，朝倉書店，pp.509, 1997.
- 2) 新潟県農林水産部：水稻栽培指針，平成 17 年。
http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen.type/h.sehi.kizyun/ni_i03.html
- 3) 張 怡，石川忠晴，浅井勇磨，赤穂良輔，嶋 国吉ら：水田灌漑が河川流量に与える影響について—宮城県江合川下流部を対象として，水工論文集，Vol.59, No.2, pp.337-342, 2015.
- 4) 若井泰祐，金木亮一，板倉啓人，坂野美里：代かき・田植期の河川水質と負荷量，水文・水資源学会誌，Vol.18, No.2, pp.167-176, 2005.
- 5) 須戸 幹，三木俊和，増田佳昭：代かき・移植時における水田からの濁水流出特性，農業農村工学会論文集，No.260, pp.7-13, 2009.
- 6) 北村立実，黒田久雄，石井裕一ら：代掻き田植え期における用排水機場からの負荷特性，水環境学会誌，Vol.34, No.5, pp.73-80, 2011.
- 7) Somura, H., Takeda, I., and Mori, Y.: Influence of puddling procedures on the quality of rice paddy drainage water, *Agricultural Water Management*, Vol.96, pp.1052-1058, 2009.
- 8) 国土数値情報 土地利用細分メッシュデータ，平成 21 年度，<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-b.html>
- 9) 国土交通省東北地方整備局：鳴子ダム貯水池濁水対策検討業務報告書（2010 年～2014 年）.
- 10) （財）電力中央研究所：電力中央研究所報告，内水面魚類影響調査報告書（総括報告書），1981.
- 11) 国土交通省気象庁：雨の強さに関する用語，http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo_hp/kousui.html

(2015. 4. 3受付)