

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	水田灌漑が河川流量と濁度に及ぼす影響について
Title(English)	
著者(和文)	張 怡
Author(English)	Zhang Yi
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10034号, 授与年月日:2015年12月31日, 学位の種別:課程博士, 審査員:石川 忠晴,木内 豪,山中 浩明,中村 恭志,浅輪 貴史
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10034号, Conferred date:2015/12/31, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

平成 27 年度 学位論文

水田灌漑が河川流量と濁度に及ぼす
影響について

指導教員

石川忠晴 教授

木内豪 教授

東京工業大学 大学院総合理工学研究科

環境理工学創造専攻

張 怡

目次

第1章	1
序論	1
1.1 はじめに	1
1.1.1 世界の稲作の概要	1
1.1.2 日本の水田の特徴	2
1.1.3 稲作カレンダー	2
1.1.4 灌漑水田が河川に及ぼす影響	5
1.2 関連する既往研究	5
1.2.1 水管理が水稻の生育に及ぼす影響	5
1.2.2 水田用水量に関する研究	6
1.2.3 水田灌漑が河川流量に及ぼす影響に関する研究	9
1.2.4 水田灌漑が河川水質に及ぼす影響に関する研究	9
1.3 本研究の着眼点と目的	10
1.4 論文の構成	11
参考文献	12
第2章	21
現地観測	21
2.1 本章の概要	21
2.2 観測対象	21
2.2.1 江合川の概要	21
2.2.2 農業灌漑システム	24
2.2.3 観測水田の概要	26
2.3 現地観測の内容	26
2.3.1 測定器の配置	26
2.3.2 取排水量の推定方法	27
2.3.3 水田水深の推定方法	28
2.4 観測結果	29
2.4.1 稲の生育と稲作作業	29
2.4.2 取排水量および田面水深の変化	29
2.4.3 濁質流出量	30
2.5 まとめ	31
参考文献	32

第3章	61
水田灌漑が河川流量に及ぼす影響	61
3.1 本章の概要	61
3.2 水田の水収支	61
3.2.1 水田水収支モデル	61
3.2.2 蒸発散の推定	62
3.2.3 浸透量と有効面積率の推定	64
3.2.4 計算結果	65
3.3 水田管理シミュレータ	65
3.3.1 基本の設計概念	65
3.3.2 水田操作のルール化	66
3.3.3 水田水深の推定	68
3.4 河川流量への影響	68
3.4.1 江合川流量変化の特徴	68
3.4.2 取排水システムのモデル化	69
3.4.3 シミュレーションの結果	71
3.5 少雨の年における縦断的流量変化	74
3.5.1 少雨条件の設定	75
3.5.2 シミュレーションの結果	75
3.6 まとめ	76
参考文献	77
第4章	107
水田排水が河川濁度に及ぼす影響	107
4.1 本章の概要	107
4.2 江合川の濁水問題	107
4.2.1 濁水が魚類に及ぼす影響	107
4.2.2 濁水の発生原因	108
4.2.3 江合川における濁度の縦断分布	109
4.3 水田からのSS排出量の解析	110
4.3.1 SSフラックスの表現方法	110
4.3.2 数量化Ⅱ類	111
4.3.3 数量化Ⅱ類の設定	112
4.3.4 解析結果	112
4.4 江合川濁質増分の解析	113
4.4.1 対象区間と分析期間	114
4.4.2 濁質増分の推定	114

4.4.3	数量化Ⅱ類の設定.....	115
4.4.4	解析結果	116
4.5	水田から流出する濁質の推定と検証.....	116
4.5.1	経験式関数の設定.....	116
4.5.2	水田排水路の推定結果.....	118
4.5.3	江合川濁質増分の推定結果.....	118
4.6	まとめ	119
	参考文献	120
第5章	132
結論	132
5.1	主要な結論	132
5.1.1	日本の稲作に関する調査.....	132
5.1.2	水田の取水・排水が河川流量に及ぼす影響.....	133
5.1.3	水田の取水・排水が河川濁度に及ぼす影響.....	134
5.2	今後の課題	134
付録	136
謝辞	140

第 1 章

序論

1.1 はじめに

1.1.1 世界の稲作の概要

図 1-1 に各穀物の生産高（億トン）を示す（米農務省, 2012）。米はトウモロコシ、小麦について第三位である。なおトウモロコシ、米、小麦は世界の三大穀物と言われ、いずれもイネ科の植物である。野生のイネは 20 種ほどあるが栽培されているイネはアジアイネとアフリカイネの 2 種であり、狭義のイネはアジアイネを指す。アジアイネにはジャポニカ種とインディカ種の 2 つの系統がある。図 1-2 に国別のコメ生産量を示す（国際稲研究所(IRRI), 2008）。主要な生産国はアジアに集中していることがわかる。コメはアジア諸国の主食であり、高い人口密度を支えている。2010 年における日本のコメ生産量は 1060 万トンであり、一人当たりで約 100kg である。

生育地の状態によって、イネは水稲と陸稲に分けられる。これらは性質の違いはあるものの、同じ種の連続的変異によると考えられている。水稲を生育させるために周囲を畦で囲み湛水した耕地を水田という。水稲栽培は水田整備にコストがかかるが、面積当たりの収量は陸稲に比較して多く、また連作障害がほとんどない。日本を始めアジアにおける稲作の多くは水稲である。

水稲は水を大量に消費する作物であり、同量の小麦やトウモロコシの生産に比べて 2~3 倍の水が必要である（Bouman et al, 2002）。そこで生産量を安定かつ大量にするために灌漑が行われている水田が多い。図 1-3 はアジア諸国における水田の区分である（IRRI, 2009）。

“Irrigated” は主に河川や湖沼から導水して灌漑を行っている水田、“Rain-fed” は 100% 雨水に依存する水田（天水田）、“Deepwater” は通常水深が 50cm 以上の天水田、“Upland” は陸稲の畑である。全体的に灌漑水田の比率が高く、平均で約 50% に達している。日本、パキスタンや中国ではほぼ 100% 灌漑水田である。2 番目は天水田で約 35% 程度であり、ラオス、タイ、カンボジアなどの東南アジア諸国での比率が高い。

また、水田は様々な環境保全機能を有している。魚類、両生類、昆虫類等の湿地生態系を有し、水鳥の生息地、渡り鳥の中継地としても機能しているために、ラムサール条約の対象湿地の 1 つに含められ、第 10 回締約国会議において「湿地システムとしての水田の生物多

様性の向上」の決議案が採択されている。また畔によって区切られた水田は豪雨に対して遊水地の機能を持っており、また貯留水が徐々に地下に浸透するため、河川水の涵養にも寄与している。

1.1.2 日本の水田の特徴

日本の農業は稲作中心であり、水田が全耕地面積の 54.4%を占めている。地域別に見ると、北陸地方が 89.5%で最も高く、次いで近畿地方の 77.4%、中国地方の 76.8%、東北地方の 71.7%の順となっている。水田面積では、東北地方が 611,200ha で最も大きく、収穫量も 1 位である（農林水産省, 2014）。

前述したように日本では灌漑水田が主体となっている。現在の灌漑システムは、区画整理事業によって分散した耕地を集団化し、大型の集約的農業水利施設の建設により効率化されている。図 1-4 に水田の区画整理の推移を示す。減反政策により水田面積は減少傾向にあるが、集団化される水田の面積が段々増えつつある。区画が 30a 程度以上に整備された面積は時代とともに増加し、現在は全水田の約 60%に達している。また区画が 1ha 程度以上の水田は全体の 8%を占めるに至った。

農林水産省の統計（2007）によると、農業用水路の総延長は約 40 万 km で、地球の 10 週分の距離に相当している。そのうち基幹的農業水路が 4 万 8 千 km（うち用水路が 3 万 7 千 km、排水路が約 1 万 1 千 km）であり。この他に農業用ダム、頭首工、ポンプ場などの灌漑用土木施設の新設・改良も進められた。

灌漑水の取水源の 88%は河川である（水文・水資源学会, 1997）。河川取水の一般的方式は、頭首工（河川を横断する堰）で河川水を塞ぎ上げ、上流湛水部から水を取り、幹線水路、支川水路を経て水田際まで導く。各水田には取水用の孔または堰があり、その開閉によって取水量を調節する。河川の次ぐ水源はため池で、全体の 10%である。ため池は天水や河川水を一時貯留し、必要な時に水田に送水する人工池である。河川水量や雨量の変動の影響を緩和し、水稻を安定して栽培する役割を持っている。図 1-5 に全国に分布するため池の比率を示しているが、雨量の少ない近畿地方と中国・四国地方には、全国の約 7 割のため池が集中している。

1.1.3 稲作カレンダー

日本ではお米ができるまでの稲作カレンダーがある。図 1-6 に全農京都のホームページに載せている稲作カレンダーを例として示す。また、付録にインターネットで「稲作カレンダー」をキーワードとして出力した各地域の稲作カレンダーを示す。冬の土づくり作業、春の育苗作業及び 5 月～10 月の本田作業という順番で一年間を通して稲を栽培している。特に、本田作業の段階では、稲の健全な生育のためには、生育ステージに応じた田面の水管理が重要

となる。図 1-7 に標準的稲作カレンダーにおける水管理のイメージを示す。代かき・田植え、深水管理、浅水管理、中干し、間断灌漑、出穂期の湛水管理、間断灌漑、落水という順番で田面がコントロールされる。

- (1) 代掻き：田植え前には田面に薄く水を張り、耕運機で丁寧にかき混ぜて土砂を沈殿させる。これにより土の表面が平らになり、また土面が細粒の土砂に覆われ水密性が向上する。
- (2) 田植え：苗床で約 5 週間育成した苗を等間隔でライン上に移植する。以前は全て手作業であったが、現代では専用の機械で短時間に行うことができる。
- (3) 深水管理：田植え後の約 5～10 日間は、植えられた苗が土壤に根付く期間（活着期）である。植えられたばかりの苗は寒さや強風に対しての抵抗力がないため、水没しない程度に水深を大きくして保温し、また茎の下部が強風に曝されないようにする。また深水管理開始後 7 日程度の時に除草剤を散布する。なお除草剤等が田面に沈殿するまでは、下流河川の水質に影響を生じないように、排水を極力生じないようにする期間（7 日間程度）を設定している。
- (4) 浅水管理（分けつ期）：活着した苗は地中から養分を吸収して成長し、根に近い部分から株別れする（分けつという）。この時期には水深を浅くして株別れを容易にさせる。ただし分けつが進み過ぎると成長が阻害されるので、適当に分けつが進んだ時点（約 4～5 週間）で浅水管理を終了する。
- (5) 中干し：1 株 20 程度の茎数が確保されたら、これ以上の無効分けつを抑えるため、土中に酸素を補給して根腐れを防ぎ、根の活力や刈り取りなどの作業性を高めるために、水を抜いてヒビが入るまで田んぼを乾かす必要がある。その作業は中干しと呼ばれる。ただし、中干しがやりすぎると根がきれたり、土の保水性が悪くなり、登熟期に水不足が起きるので、気候や稲の種類などによって適当な期間（一般に 7～10 日程度）を決められている。
- (6) 間断灌漑：中干し終了後に稲の幼穂が形成し始める。稲体の活力を向上し、幼穂の発育が低温や干ばつなどの影響を受けさせないために、水分と酸素を交互に供給する必要がある。具体的には浅水程度に水を入れ、水がなくてもすぐ水を入れず、1～2 日待つて再び浅水程度に水を入れる。その作業は間断灌漑と言われ、幼穂形成から出穂までの約 20～40 日程度に行われる。
- (7) 浅水管理（出穂期）：出穂期に水稻の生育期間中で一番水が必要な時期であるので、湛水にして十分な水が供給できるような水管理を行う。水が不足すると穂が出すくみ、途中で止まりなどの深刻な被害を起こすことになる。品種、地域によって、出穂期あるいはその前後に最短 5 日、最長 30 日程度に湛水を管理する。
- (8) 間断灌漑（登熟期）：穂を出す後に稲が穂に炭水化物を送り込んで溜め込む登熟期に入る。登熟不良や白粒発生を防し、登熟に必要な土壤水分を保持するため、また根に酸素を供給して根の老化を防ぎ、根の活力を維持するために、出穂期前と同様に、水分と酸

素を両方に供給できる間断灌漑を行う。

- (9) 落水および乾燥：登熟期に玄米形成がほぼ完了する後に水田の水を抜く落水を行う。落水は米の収量や品質を低下させないように、概ね出穂期後 15 日から 30 日に実施される。その後に、田んぼに乾燥させて収穫を待つ。

以上の水田水管理は稲の成長を確保して米の生産量を上げるために様々な室内研究や圃場試験により得られた。活着期、分けつ期、幼穂形成期、出穂期、登熟期などの稲の各生育ステージによって、順番に最適な水管理が行われている。そこで、稲作カレンダーの水管理は稲の生理学・物理的状态を反映したものと考えられる。

稲作カレンダーに含んだ農作業全般は、地域の気象や地形条件及び品種を考慮して農業組合などにまとめられ、実例はインターネットやパンフレットで公開されている。表 1-1 に論文の付録に載せている各農業協同組合 (JA) が提案する稲作カレンダーを稲の生育ステージと対応する水管理、目安の時間などの項目に分類してまとめた結果を示す。地域、品種によって水管理が違うことがわかる。各地に多く栽培されるコシヒカリを例として説明する。普通期コシヒカリは 5 月の中下旬に移植され、30~35 日程度の湛水管理後に、10 日間の中干しを始め、その後に幼穂形成期に間断灌漑し、出穂期に湛水を行われる。早期コシヒカリは 3 月下旬~4 月下旬に移植され、40~50 日程度の湛水管理後に 10 日間の中干しを始められる。山口県稲作技術指導指針 (2000) から、定点調査における移植時期別の水稻生育ステージの結果はコシヒカリが 5 月上中旬に移植される場合に 8.5 葉期 (中干し開始) までの平均日数が 38 日で、5 月下旬に移植される場合に 8.5 葉期までの平均日数が 30 日であることがわかる。すなわち、移植時期の遅れに伴い、8.5 葉期 (中干し開始) までの日数が短くなる。早期栽培の 3 月下旬~4 月下旬の場合に、中干し開始までの日数がもっと長くなる可能性が高い。それは表 1-1 に示す各 JA におけるコシヒカリの栽培情報と一致する。各 JA は管内の特徴によって、水稻栽培指針を参考して稲作カレンダーを作ると考える。

田植えの移植時期については、早期品種を除く通常の栽培においては、東北地方、北陸地方の各地域に 5 月の上中旬、関東地方に 5 月下旬、九州地方に 6 月に田植えを行われる。北から南までの順番で時期をずらして田植えを行う傾向がある。図 1-8 に都道府県別の田植えの最盛期を示す (農林水産省, 2007)。米生産が有名な東北地方と北陸地方に 5 月の上旬と中旬に田植えを行い、南の方に少し遅れて 5 月の下旬~6 月の中旬に田植えを行うことがわかる。

同じ JA の管内では場所の違いによって稲作カレンダーが違うこともある。例えば、山口県の JA 周南に山間部と平坦地 (標高 100m 以下) に稲の各生育ステージに対応する水管理が同じであるが、山間部に湛水や間断灌漑の作業日数が長くなり、中干しの日数が短くなった。山口県の稲作技術指導指針 (2000) と新潟県の水稲栽培指針 (2005) によると、田植え直後の深水と活着後の浅水管理は保温的水管理で、水温の上昇を図り、分けつの発生を促し、良質茎の早期確保に努める。山間・高冷地に気温が低い可能性が高いので、湛水時期を延長して中干しを短くし、水で稲を保護するために平坦地と違う水管理を行っていると考えられる。

また、異常低温が予想される場合は、中干しを早めに終わるようにし、一時的深水管理を実施する調整がある。

ただし、稲作カレンダーの各農作業の構成は基本的同じである。特に水田水管理では田植え後の深水、浅水、中干し、間断灌漑、湛水、間断灌漑、落水という作業の順番はほぼ変化しない。同じ地域では同じ稲作カレンダーに従って稲を栽培し、水田水管理の共通性が高いと考えられる。

1.1.4 灌漑水田が河川に及ぼす影響

日本の水稻栽培は河川水の灌漑によっているため、取水期には河川の流量を減少させる。また、豪雨時には雨水が田面に貯留されるため、洪水の緩和機能を持っている。一方、豪雨時や前述した田面管理の切り替え時に発生する余剰水は河川に排水されるが、一般に取水口と排水口は異なるため、河川流量は縦断的に変化することになる。このような水田の水文学的応答は、前項で述べた稲作カレンダーの段階によって異なるものと思われる。

田面の余剰水が排出される際には、田面表層土壌や、そこに含まれる有機物および化学物質も流出するので、河川水質や河川環境に影響を及ぼすと考えられる。日本の稲作では農薬はほとんど使われなくなっているものの、肥料などの流出により下流の河川や湖沼において富栄養化を引き起こすこともある（田渕ら, 1985）。また表層土壌の流出に伴う河川濁度上昇が河川生物に影響を及ぼすと考えられる事例もある（藤原, 1997）。これらの流出特性は、稲作カレンダーの各段階で異なるものと考えられる。

次節に述べるように、水田が河川に及ぼす影響については種々の角度からの調査研究が実施されているが、現状では稲作カレンダーに着目したものはほとんどない。そこで本研究では、灌漑期を通して現地観測を行い、稲作カレンダーと水田水文特性の関係に着目して解析することとした。計画の詳細は 1.3 および 1.4 に述べる。

1.2 関連する既往研究

1.2.1 水管理が水稻の生育に及ぼす影響

水稻の生育過程は栄養生長期、生殖生長期の2つに分けられる（GRSP, 2013）。栄養成長期には“発芽”と“分けつ”を含んでいるが、移植水田の場合に発芽は育苗箱の中で行われ、苗が本田に移植されて数日後に活着してから茎や葉を茂り分けつ期を迎える。栄養成長期は緯度によって異なるが日本の中央部では4月から7月である。生殖生長期には、“出穂”、“開花”、“受精”、“登熟”などの時期からなる。季節的には8、9月である。

前述のように、日本の水稻栽培では収量をあげるために小まめな水管理が行われている

が(大山ら, 1971)、そのために各生育ステージ別に水管理方法について多くの研究が行われてきた。星川(1981)は田植え後の深水管理水深について研究し、植付けの深度によって異なるが3cm~5cmが適切であるとしている。桐山ら(1986)は倒伏しやすい品種であるコシヒカリを対象として、移植後の水稻生育前期における草丈、茎数、乾物量などを比較した。その結果、深水管理によって草丈の伸長が促進されること、弱小分けつの発生が抑制され一茎当たりの乾物重が増加することを報告した。山口ら(1954)は、根を好気状態に保つことにより K_2O 、 Mn 、 SiO_2 の吸収が活発になりタンパク質合成が促進されることを示している。また山口ら(1972)は、分けつ期の水管理として2~3cmの浅い湛水が優れていること、分けつ期後の茎数過多や倒伏を防ぐとともに土壌通気を良好にするために中干しが有効であることを指摘した。米野ら(1982)、杠ら(1985)は、中干しにより倒伏を軽減することにより収量や米質を向上できることを圃場実験で実地に検証した。また Rahman et al (2013)は、中干し期間の違いが水稻根の活性や窒素吸収及び収量に与える影響を検討し、慣行的に行われている中干しが早期中干しおよび常時湛水よりも高い効果を有することを示した。山口ら(1972)は有効分けつ終止期から成熟期の水管理について検討し、草姿改善、根部活力の維持、登熟性の観点から間断灌漑が優れていることを示した。また、川田ら(1977)は幼穂形成期から出穂期にかけて、土壌表面近傍に形成するうわ根と水管理との関係を検討した結果、間断灌漑を行った場合には、多数の根が地表に分布し、2次根の出現密度も常時湛水の水田より顕著に増大することを指摘した。宮坂ら(1991)、岩田(1987)は、間断灌漑によりうわ根をしっかりと張らせることは、出穂期以降の登熟促進や稲の倒伏防止に役立つことを示している。一方、田植え後の除草剤散布が河川水質に影響を及ぼすことから、石井ら(2004)は除草剤の有効成分の濃度変化を調査し、7日間に止水することにより流出する田面水中の除草剤濃度を減少させることが可能であることを示し、通常行われている3~4日の止水はやや短いと指摘している。

以上のような多数の研究を通して、現在の標準的な稲作カレンダーの基礎が形成された。

1.2.2 水田用水量に関する研究

水稻栽培に必要な水量は一般に減水深で表される。減水深は蒸発散量(稲の葉面蒸発と水田面からの蒸発)と浸透量(耕盤浸透とアゼ浸透)の和である(山崎, 1960)。田面水管理を合理的に行うために、減水深の構成要素について種々の計測がなされている。

減水深(両者の合計)は水収支法(谷口ら, 2006)で求められる。この方法は、湛水深の変化と取排水量の差から一定期間の水収支を計算して減水深を逆算するもので、各地で広く適用されている実用的方法である。ただし蒸発散量と浸透量を分離できないという難点があり、また天候変化や日間サイクルといった短期的変動を求めるには精度的問題がある。

そこで蒸発散量と浸透量の各々についての推定方法および代表的推定結果を以下に紹介する。

(1) 水田の蒸発散量

蒸発散量は科学的知見に基づき開発された各種気象測器とくに純放射計の進歩によって計測可能である。必要な圃場条件と測定器条件が満足されれば、5~10%の精度で作物群落の蒸発散量を与えられている (Budacovsky, 1964)。代表的な手法は以下の3つである (井上ら, 1967)。

① 熱収支法：水田の熱収支式は次の式に表される。

$$R_n = \lambda E + H + G \quad (1.1)$$

ここに R_n は放射量； λE は潜熱伝達量； H は顕熱伝達量； G は地・水への伝道熱量である。 H 、 G を観測すれば、その残りとして E を得ることができる。

② 傾度法 (空気力学法)：風速、比湿、気温の鉛直分布を測定し蒸発散量、顕熱輸送量を求める方法である。

$$E = -\rho K_e \frac{\partial q}{\partial z} \quad (1.2)$$

ここに、 K_e は水蒸気の乱流拡散係数、 z は高度である。大気が中立な場合、水蒸気の拡散係数は運動量の拡散係数と等しいと仮定できるので、蒸発散量、顕熱輸送量はそれぞれ2つの高度における水平風速と比湿、気温を測定することによって得られる。

③ 複合法：複合法は式 1.3 に示すように顕熱伝達量 H は水蒸気圧力差を用いて水収支式に代入し、蒸発散量を求める方法である。

$$H \approx \frac{\lambda E_0}{2\delta} - \frac{\lambda E_a}{2\delta} \quad (1.3)$$

$$\lambda E_0 = \frac{0.622\lambda}{P} \rho D_w (e(T_0) - e_1)$$

$$\lambda E_a = \frac{0.622\lambda}{P} \rho D_w (e(T_1) - e_1)$$

ここに、 $e(T_0)$ 、 $e(T_1)$ は地面 (または植皮面) の温度と高さ z_1 の気温での飽和水蒸気圧力 (mmHg)； e_1 は z_1 の水蒸気圧力 (mmHg)； $\delta = de/dT$ は飽和水蒸気圧力-温度曲線の $T_0 - T_1$ の間での平均傾度 (mmHg°C⁻¹) である。接地気層内の気温・飽差・純放射・地中伝達量の測定データなどがわかると蒸発散量は容易に求めることができる。

山崎 (1960) は全国各地域における田葉水面蒸発量のデータをもとに、平均値は3~8mm/日であることを示している。羽生ら (1960) は青森農試圃場で水収支法 (株間蒸発計と吸水計) により蒸発散量を測定した。その結果によれば、6月~9月の栽培期間には概ね3~8mm/日の間で変化するが、幼穂形成期から出穂期後10日くらいの期間の蒸発散量が特に大きい。

井上ら（1965）は埼玉県の水田地帯において、熱収支法、傾度法、複合法を用いて水稻の全生育期間における総蒸発散量を推定した。それぞれの結果は、熱収支法では 309mm、複合法で 347mm、傾度法で 317mm であり、概ね一致した。なお、近接露場内に設定した小型蒸発計の観測値はこれらよりやや大きかったが、気象条件や周辺環境の差異を考慮すれば、比較的妥当な結果であるとしている。瀬尾ら（1969）は倉敷の研究用圃場における観測を通して、熱収支法と空気力法で水田蒸発散を推定した。熱収支法の結果では 7、8 月が高く、この期間の日量は最大約 6mm に達し、9 月と 10 月の最大値は約 4 mm/日と 2.5mm/日であった。一方、空気力法の精度は長期間観測の場合には低いとしている。

近年に FAO の基準蒸発散量算定式と作物係数法を統合した方法が、蒸発散量の推定に広く用いられるようになってきた（例えば、Dolman, 2015）。また、作物生育モデルと微気象モデルを統合し、蒸発散量の計算モデルを開発し、温暖化の影響と作期移動による水田の蒸発散量の変化を行う研究もある（丸山, 2008）。

(2) 水田の浸透量

水田の浸透量は土質、土層の構造、地下水位、耕種方法などにより異なるため一般的な定式化は困難で、水田ごとに調べる必要がある。ただし、蒸発散量について信頼できるデータが存在する場合は、それらと水収支法から得られる減水深との差し引きから推定することが可能である。

水田の浸透量は、耕盤を通り下方に浸透する降下浸透量とアゼを通過して隣接の水田や排水路などに流出する側方浸透量からなる（山崎, 1960）。降下浸透量は根の発育に必要な土壌への酸素輸送に関係している。山崎ら（1960）は、降下浸透量を計測するためにビュレット式測定法とマリ奥特式測定法を開発している。前者は無底の円筒を湛水中に没するまで土中に押し込み、円筒の上にビュレット管を設置し、ビュレット管に満ちた状態まで水を入れ、円筒の側面に水位指示管と連結する測定器である。測定円筒内の水は土中に浸透し、水位指示管内の水面が低下してゆくから、ビュレットのコックを開けて水を補給し、水位指示管内の水面が最初の位置に戻るまでの時間とビュレット管の水位目盛り変化で浸透量を求める方法である。後者は一時に数カ所を測定できるために、ビュレットの代わりにマリ奥特管を用いて浸透量を測る方法である。彼らは水田に無底のワクを押し込み、その内部の水位の低下をフックゲージで測定する方法の結果と比較し、開発した手法が降下浸透量を正しく測定できると報告している。その結果によれば、水田内の 16 ヶ所の実測降下浸透量は 0.92cm/日～15cm/日の間で変動し、また場所によって差があることを示している。前述したように水収支法から逆算した例として、千葉県小櫃川流域の沖積低地水田と香川県綾川及び本津川流域の沖積低地及び洪積台地で行った浜崎（1984）の研究がある。それによれば降下浸透量 0～0.9cm/日に変化していた。

1.2.3 水田灌漑が河川流量に及ぼす影響に関する研究

日本における年間農業用水量は約 600 億 m^3 であり、全国の降る雨量の約 1% (年平均降雨量 1718mm、日本面積 377,961.73 km^2 、全面積に降る雨量は約 6500 億 m^3) にあたる。そのうち 90%が水稻生育等に必要の水田灌漑用水量である (日本の水資源, 2013)。前述したように、水田取水源の約 88%が河川からとなっており、排水は直接的あるいは間接的に河川に流出する。加えて、排水先が取水した河川でないこともあり、広大な水田は水系水循環を大きく変質させる。岡本ら (1990) は、利根川の利根大堰が水を供給する水田を対象として、水田用水の水文学的、水資源工学的特性を検討し、渇水期においても流量 ($110 \text{m}^3/\text{s}$ まで落ちる) の約 55%にあたる $60 \text{m}^3/\text{s}$ が取水されていること、排水のかなりの部分が中川に排出されていること、その排水により灌漑期中川の流量は基底流量の $10 \text{m}^3/\text{s}$ 程度から約 $40 \text{m}^3/\text{s}$ まで増えることを報告した。

水田貯留による雨水流出の調節機能に関する研究も多く行われている。原田ら (2008) は愛知県新川の支川・五条川流域における現地観測から水田貯留効果を評価し、その機能を高める方法も提案している。すなわち落水口に流出幅を狭めた「切欠き板」を設置することにより、貯留水深を約 40mm 増加させ、流出ピーク値を大幅に低減できることを示した。Yoshikawa et al (2010) は新潟県神林農業地区における豪雨後の水田排出量、水路水深、洪水被害低減効果を水文モデルによって検討し、排水制御装置を設置した場合には、排水路流量が 26%減少し、水深も 0.17m 低下すると報告した。

水田における流域の水利用形態が河川流量に及ぼす影響について種々のモデルが提案されている。中桐ら (1998) は、農業用水の需給や反復利用と河川流況の関係を検討できる流域水循環モデルを開発し、河川流量、ダム貯水量、頭首工取水量などの実測値と計算値を比較して、紀の川流域の水循環構造を解明した。吉田ら (2012) は、広域水田灌漑地区における取水・用水・還元などの水循環過程と貯水池操作を組み込んだシステムモデルを提案し、貯水池の放流量、河川流量、取水量及び水田供給水量、河川への還元量などを定量的に評価できる可能性を示している。

1.2.4 水田灌漑が河川水質に及ぼす影響に関する研究

水田排水は濁質や栄養塩類および化学物質を含むので、下流の河川や湖沼の水質に影響を与える (藤原, 1997)。武田ら (1990) は、琵琶湖に流入する野洲川の中流域における現地観測に基づき、水田群からの汚濁負荷流出と降雨、地形、施肥及び水管理方法との関係を検討した。その結果、降雨による流量増加に伴って TN、TP、T-COD_{Mn}、SS などの汚濁物質の濃度が変動する様子を示している。また TN が施肥の影響を受けて過剰に流出している場合を除けば、TP、T-COD_{Mn} と同じで、総流出負荷量と総流量が概ね比例関係にあった。また、田面水が集水域の多くの部分を覆い、表土の流亡による負荷流出を抑制できる可能性を指

摘した。Yoon ら (2003) は韓国の Konkuk 大学の農業研究場における計測結果から、灌漑期施肥量の異なる条件の下での水田の水収支と物質収支 (N、P) を検討した。その結果、N、P とも負荷量が施肥量の影響をあまり受けず、地表面排水量に左右されることを示した。Yoshinaga (2007) らも水管理を改善して排水量を減じるだけで窒素の負荷量を低減できるとしている。また、松井ら (2013) は石垣島における二期作 (1~3 月に一作、8 月に二作) を多く行っている水田群からの SS 流出を計測し、降雨時に $3.279\text{kg ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ 、無降雨時に $3.851\text{kg ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ が流出し、そのうちの 76% が代かき・田植え期に集中すると報告している。

代かき・田植え期には田面を人為的に攪乱するため汚濁物質負荷量は一時的に増加する。そこでこの期間の排水の水質についての研究が多く行われている。若井ら (2005) は琵琶湖に流入する農業系負荷の割合が大きい宇曾川において水質と流量を計測し、晴天時と降雨時について代かき田植え期とそれ以外の時期の差異を検討した。その結果、晴天時負荷量は代かき田植え期に高いが、降雨時には代かき田植え期の方が逆に低い傾向にあった。この結果に基づき、代かき田植え期以外の時期における降雨時の濁質流出に関する対策を検討する必要があるという興味深い指摘を行っている。なお須戸ら (2009) も宇曾川流域での計測から、春作業時の SS 濃度と流出負荷量が代かき時と移植前の強制落水の 2 つのピークをもち、排水 SS が最大 1200mg/l に達することを示している。また北村ら (2011) は霞ヶ浦湖岸の用排水機場からの負荷量解析を行い、代かき田植え期の負荷量を異なる灌漑排水システムの地域と比較し、排水を循環利用することにより COD、TN、TP の排出量が平均 1/5.7 に減少すると述べている。

1.3 本研究の着眼点と目的

1.2.1 に述べたように、イネの成長過程における生理的变化と、良好な生育のための水管理技術についての知見が、農学技術者によって蓄積されてきた。それら調査研究の結晶が図 1-6 に示した稲作カレンダーであると言える。ただし稲作カレンダーは地域や品種および取排水施設の構造によって変化し、また農家ごとのノウハウもある。Internet で「稲作カレンダー」と検索すれば、一般的な解説の他に、地域ごと、品種ごと、農協ごと、あるいは個人単位で工夫した稲作カレンダーの頁がでてくる。このことは逆に、稲作カレンダーが全国的に普及し、日本の水稻栽培の根幹を形成していることを物語っている。

一方、1.2.2、1.2.3 で述べた水田用水量や水田が河川水量に及ぼす調査研究は、水文学の研究者が主体となって行われている。また、減水深中の蒸発散量の研究は、水田だけでなく森林、草地、畑地においても広く行われており、計測手法や推定式は共通化している。蒸発散量の定式化は、グローバルな水循環のモデル化や気象変動の科学的予測において最重要の項目となっている。このようなグローバル化とアプローチの一般化は、人工的装置としての水田の特殊性を失念させる原因になっている恐れがある。すなわち、水田の水文サイク

ルをコントロールしている稲作カレンダーという term が明示的に取り扱われている調査研究は、筆者が調べた限り見当たらない。水田という半自然・半人工の広大な地面が有する水文学的特性は、自然と人為が組み合わさって存在すると考えられるのである。

また、1.2.4 で述べた河川や湖沼の水質および水環境に水田排水が及ぼす影響は、主に水環境学の分野で研究されている。ここでの主要な研究テーマは、富栄養化項目の排出原単位と、農薬などの流達率であり、特に田面を人為的に攪乱する代掻き・田植え期に関する研究が集中的に行われている。水田排水が公共水域の環境に及ぼす影響という観点からすれば、それらは確かに最重要のテーマであると言える。しかし若井ら (2005) が指摘しているように、代掻き・田植え期以外の時期にも、雨水流出による SS の排出と、それに伴う懸濁態のリンや COD の排出の影響も無視できない恐れがある。その場合、稲作カレンダーの段階による流出特性の変化が問題となると考えられる。

以上の考察を踏まえて、本研究では、まず水田の水文学的特性を、稲作カレンダーを基軸にして捉えることとした。稲作カレンダーに準拠して行われる営農者の取水・排水行動は一定のパターンを持つと考えられることから、そのパターンをルール化することにより、降雨に対する水田の水文学的応答のモデル化を試みる。続いて、代掻き・田植え期以外の時期における水田からの SS 流出が河川環境上無視できない場合のあることを現地データから示した上で、SS 流出を、稲作カレンダーに準拠した営農行為と降雨強度の複合作用として捉えたモデル化を試みる。すなわち、稲作カレンダーに焦点を当てて水田が河川に及ぼす影響を把握しようとするところに本研究のオリジナリティがある。

1.4 論文の構成

本論文の構成を以下に示す。

第1章「序論」では、既往の資料や文献をもとに本研究の基礎となる知見を整理した。すなわち、日本の水田の多くが河川水の灌漑に依存していること、イネの成長過程における生理的变化を考慮した「稲作カレンダー」をもとにした小まめな水管理が行われていること、水田の灌漑と排水が河川水量や河川水質に及ぼす影響は稲作カレンダーの段階によって異なる可能性があることである。その上で、本研究の着眼点と目的を示した。

第2章「現地観測」では、宮城県の江合川下流域の水田で実施した現地観測について記述する。この流域の60%は水田であり、水田の灌漑・排水が河川に及ぼす影響を調べやすい。まず、流域の地形・水文的特徴と用水路・排水路について調査した結果をまとめた後、計測器の設置方法とキャリブレーション方法について説明する。続いて、取水・排水量、水田水深、排水路のSSフラックスなどの観測結果を整理して提示する。

第3章「水田灌漑が河川流量に及ぼす影響」では、水田の水収支を計算する上で稲作カレンダーに準拠して行われる営農者の取水・排水行動パターンをルール化し、降雨に対する水

田の水文学的応答のモデル化を試みる。このモデルを「水田管理シミュレータ」と称する。まず水田水収支の計算方法を述べ、水田水深の観測結果と計算結果を比較し、本計算方法の妥当性を確認する。続いて観測水田の水深データにより水田管理シミュレータの応答の妥当性を示し、また江合川の取水・排水路システム図にもとづき河川流量の縦断変化を予測し、国土交通省の河川流量観測結果と比較する。最後に灌漑期に下流域が渇水である場合を想定してシミュレーションを行い、河川流量が特に減少する時期と区間について検討する。

第4章「水田排水が河川濁度に及ぼす影響」では、稲作カレンダーに準拠した営農行為と降雨強度の複合的作用として捉えたモデル化を試みた結果を記述する。まず国土交通省が江合川で行った濁度観測の結果から、灌漑期の水田排水による濁度増加がアユの生息環境に対して無視できない影響を持つことを示し、水田排水が集中する区間のSSフラックス増分を推定する。続いて、水田排水路で実施した計測の結果から、単位面積の水田からの濁質排出量を整理し、稲作カレンダーの各作業段階と日降雨量を説明変数として数量化解析Ⅱ類によりSSフラックスの経験的定式化を行った結果を説明する。最後に、経験式に基づき江合川へのSS流入濁質フラックスの時系列を求めて河川での観測結果と比較し、その精度を検討する。

第5章「結論」では、各章の検討結果を総括し本研究の結論をまとめ、今後の課題を整理する。

参考文献

- Bouman, B.A.M., Hengsdijk, H., B.Hardy, Bindraban, P.S., Tuong, T.P., Ladha. J.K., 2002. Water-wise rice production. IRRI: VII.
- Dolman, A.J., 2005. 45: Actual evaporation. Encyclopedia of Hydrological Sciences.
- IRRI, AfricaRice, CIAT. 2013. Rice almanac (Fourth Edition). Global Rice Science Partnership: 6-7, 16-18.
- Yoon, C. G., Ham, J.H., Jeon, J.H., 2003. Mass balance analysis in Korean paddy rice culture. *Paddy Water Environment*, 1: 99-106.
- Yoshinaga, I., Miura, A., Hitomi, T., Hamada, K., Shiratani, E., 2007. Runoff nitrogen from a large sized paddy field during a crop period. *Agricultural Water Management*, 87: 217-222.
- Yoshikawa, N., Nagao, N., Misawa. S., 2010. Evaluation of the flood mitigation effect of a Paddy Field Dam project. *Agricultural Water Management*, 97: 259-270.
- Budagovsky, A.I. (内島善兵衛訳) . 1965. 耕地の蒸発散. 農林水産技術会議. 154.
- 井上栄一, 久保祐雄, 内島善兵衛, 上村賢治ら. 1967. 水田の蒸発散. 農業気象, 22(4): 149-157.
- 岩田忠寿. 1987. 福井県におけるコシヒカリの根群の分布と生育収量の特徴. 北陸作物学会

報, 22: 91-94.

大山信雄, 坂井弘. 1971. 水管理による水田耕土の酸化還元状態の変化(第1報): 現地高収水田の実態. 日本土壌肥料科学雑誌, 42(8): 317-322.

日本土壌肥料科学雑誌, 42(8): 317-322.

岡本雅美, 佐藤政良. 1990. 日本における水田用水の水文・水資源学的特性. 水文・水資源学会誌, 3(1): 1-6.

川田信一郎, 副島増夫. 1977. 水稲における "うわ根" の形成と水管理との関係について. 日本作物学会紀事, 46(1): 24-36.

北村立実, 黒田久雄, 石井裕一, 吉尾卓宏ら. 2011. 代か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: 34(5): 73-80.

桐山隆, 中谷治夫. 1986. 深水管理とコシヒカリの生育. 北陸作物学会報, 21: 45-46.

須戸幹, 三木俊和, 増田佳昭. 2009. 代かき・移植時における水田からの濁水流出特性—滋賀県宇曾川流域の水田群を事例として—. 農業農村工学会論文集, 77(2): 113-119.

水文・水資源学会編, 1997. 水文・水資源ハンドブック. 朝倉書店: 509.

新潟県農林水産部, 2005. 水稲栽培指針. <http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen.type/h.sehi.kizyun/nii03.html>.

瀬尾琢郎, 山口信之. 1969. 水田の蒸発散—1963年倉敷における観測—. 農学研究, 53(1・2): 81-89.

武田育郎, 國松孝男, 小林慎太郎, 丸山利輔. 1990. 降雨時における水田群からの汚濁負荷流出—水田群からの汚濁負荷流出に関する研究(I)—. 農業土木学会論文集, 147: 79-85.

田淵俊雄, 高村義親, 久保田治夫, 鈴木誠治. 1985. 集水域からの窒素・リンの流出. 東京大学出版会: 75-129.

谷口智之, 佐藤政良. 2006. 耕起乾田直播水田における実測減水深の分析—茨城県報恩寺地区を事例として—. 農業土木学会論文集, 245: 9-18.

建設省土木研究所・下水道部三次処理研究室, 下水処理水の農業利用に関する調査報告書(第1報)—水稲栽培における窒素の影響に関する基本調査—, 土木研究所資料第1920号, 1983.

中桐貴生, 渡辺紹裕, 堀野治彦, 丸山利輔. 1998. 紀の川流域における流域水循環モデルの開発—流域水循環モデルによる農業用水利用の分析(I). 農業土木学会論文集, 198: 1-11.

農林水産省, 2007. 水土とは?. http://www.maff.go.jp/j/nousin/sekkei/suido/s_suido/.

農林水産省, 2014. 平成26年耕地面積. http://www.maff.go.jp/j/tokei/sokuhou/kouti_14/.

羽生寿郎, 小野清治. 1960. 寒地水田の蒸発散に関する研究(1). 農業気象, 16(3): 23-30.

浜崎忠雄. 1984. 各種水田土壌の降下浸透量について. 日本土壌肥料学会講演要旨集, 30: 146.

国土交通省. 2013. 日本の水資源: 79.

原田守博, 大森美喜夫, 森富雄, 藤澤悟. 2008. 水田貯留による雨水の流出抑制効果とその強化方策に関する現地実験. 水工学論文集, 52: 469-474.

- 藤原公一. 1997. 濁水が琵琶湖やその周辺河川に生息する魚類へ及ぼす影響. 滋賀県水産試験場研究報告, 46: 9-37.
- 藤原正幸, ラボン エドワード, 泉智揮, 濱上邦彦ら. 2012. 四万十川支流広見川のSS負荷量とそれに及ぼす水田農業の影響. 土木学会論文集 B1(水工学), 68(4): 631-636.
- 星川清親. 1981. 水稲の生理からみた直播・移植. 農業機械学会誌, 43(2): 289-293.
- 松井広之, 須永吉昭. 2013. 石垣島・水田地帯からの浮遊土砂流出量の長期観測およびL-Q式の適用. 土木学会論文集 B1 (水工学) , 69(4): 955-960.
- 丸山篤志, 大場和彦. 2008. 温暖化が水田の蒸発散量に及ぼす影響と作期移動によるその変化. 日本農業気象学会大会講演要旨, 08sp(0): 77.
- 宮坂昭, 吉川嘉一. 1991. 水稲根の生理生態的特性と地上部諸器官の発育との関係: 第4報 水稲のうわ根が登熟に及ぼす影響. 北陸作物学会報, 26: 28-30.
- Rahman, S.M., 角田憲一, 佐々木由佳, 安藤豊. 2013. 東北地方の水田で水稲生育初期の水管理が水稲根の活性、窒素吸収および収量に与える影響. 山形大学紀要. 農学, 16(4): 197-206.
- 山口尚夫, 師田和夫. 1954. 水稲の中干しの効果に関する二三の究明. 日本作物学会紀事, 23(2): 145-146.
- 山口県農林部, JA 山口経済連. 2000. 山口県稲作技術指導指針, 72-81.
- 山口隆, 佐本啓智, 宇田昌義. 1972. 間断かんがいによる水稲の生態反応について: II 生育時間別水管理と生育収量およびかんがい効率. 日作東海支部研究梗概, 64: 21-24.
- 山崎不二夫. 1960. 水田の減水深, 浸透量. 土壌の物理性, 3: 9-14.
- 山崎不二夫, 八幡敏雄, 長田昇, 岩田進午, 田淵俊雄. 1960. 水田の降下浸透量の新しい測定法—水田の浸透に関する研究—. 農業土木研究, 27(6): 381-386.
- 杠政則, 阿部恭洋, 城島昇. 1985. コシヒカリの積極多収栽培のための水管理による倒伏防止. 九州農業研究, 47: 26.
- 吉田武郎, 増本隆夫, 工藤亮治, 谷口智之, 堀川直紀. 2012. 広域水田灌漑地区の用水配分・管理モデルの実装による流域水循環のモデル化. 農業農村工学会論文集, 227: 9-19.
- 米野操, 田中順一, 板垣賢一, 青柳栄助, 田中伸幸. 1982. 水稲生育中期の水管理にともなう土壌の2, 3の性質と生育収量に及ぼす影響. 山形県立農業試験場研究報告, 17: 45-57.
- 若井泰佑, 金木亮一, 板倉啓人, 坂野美里. 2005. 代かき・田植期の河川水質と負荷量. 水文・水資源学会誌, 18(2): 167-176.

表 1-1 各農業協同組合が公開した稲作カレンダーのまとめ

農業組合	県	品種	田植え期 (目安)		各生育ステージ対応の水管理、時間(目安)							
					活着期	有効分けつ期	有効分けつ終止 (無効分けつ)	幼穂形成期	穂ばらみ期	出穂期	登熟期	成熟期
JA 周南	山口	コシヒカリ ひとめぼれ	山間部	5月中旬	深水 10日	浅水、間灌 20、7日	中干し 7日	間灌 15日	浅水 40日	間灌 20日	落水 9月中旬	
			平坦地	5月下旬	深水 10日	浅水、間灌 15、5日	中干し 10日	間灌 10日	浅水 40日	間灌 15日	落水 9月中旬	
JA 庄内	山形	はえぬき ひとめぼれ	5月10日(中心)		深水 10日	浅水、間灌 20、20日	中干し 10日	間灌 30日	浅水 5日	間灌 20日	落水 上旬	
JA いるま野	埼玉	コシヒカリ キヌヒカリ	5月下旬		浅水(強風低温:深水) 35日		中干し 10日	間灌 10日	浅水 10日	深水 15日	間灌 25日	落水 9月中旬
JA 岩船	新潟	コシヒカリ	5月中旬		深水 10日	浅水 20日	中干し 15日	間灌 40日	深水 15日	間灌 15日	落水 9月中旬	
JA 宮崎中央	宮崎	早期 コシヒカリ	3月下旬		深水 15日	浅水 30日	中干し 10日	間灌 20日	浅水 30日	間灌 15日	落水 7月下旬	
		早期 さきひかり	3月下旬		深水 15日	浅水 40日	中干し 7日	間灌 20日	浅水 30日	間灌 20日	落水 8月上旬	
		普通期 ヒノヒカリ	6月下旬		深水 10日	浅水 20日	中干し 7日	間灌 20日	浅水 20日	間灌 25日	落水 10月中旬	

農業組合	県	品種	田植え期 (目安)		各生育ステージ対応の水管理、時間(目安)						
					活着期	有効分けつ期	有効分けつ終止 (無効分けつ)	幼穂形成期	穂ばらみ期	出穂期	登熟期
JA 鈴鹿	三重	あきたこまち	4月15日(中心)		深水 田植え 直後	浅水 35日	中干し 7日	間灌 40日	浅水 20日	間灌 15日	落水 8月上旬
		みえのえみ	4月21日(中心)			40日	7日	30日	20日	15日	8月中旬
		コシヒカリ				40日	10日	30日	20日	15日	
		キヌヒカリ	5月1日(中心)			45日	7日	30日	20日	15日	8月下旬
		みえのゆめ				50日	7日	35日	25日	15日	9月上旬
農業試験研 究センター	佐 賀	早期 コシヒカリ	4月中旬		深水 20日	浅水 30日	中干し 10日	間灌 30日	浅水 10日	間灌 30日	落水 9月上旬
JA いわき	福 島	コシヒカリ	平坦地	5月中旬	深水 5日	浅水 40日	中干し 10日	間灌 25日	浅水 15日	間灌 25日	落水 9月中旬
		ひとめぼれ	山間部	5月中旬	深水 5日	浅水 40日	中干し 7日	間灌 25日	浅水 15日	間灌 25日	落水 9月中旬
JA 古川	宮 城	ひとめぼれ つや姫 ササニシキ	5月中旬		深水 10日	浅水 30日	中干し 10日	間灌 35日	浅水 10日	間灌 15日	落水 9月上旬

[全世界の3大穀物の生産量]

2012年、米農務省調べ(単位: 億トン)

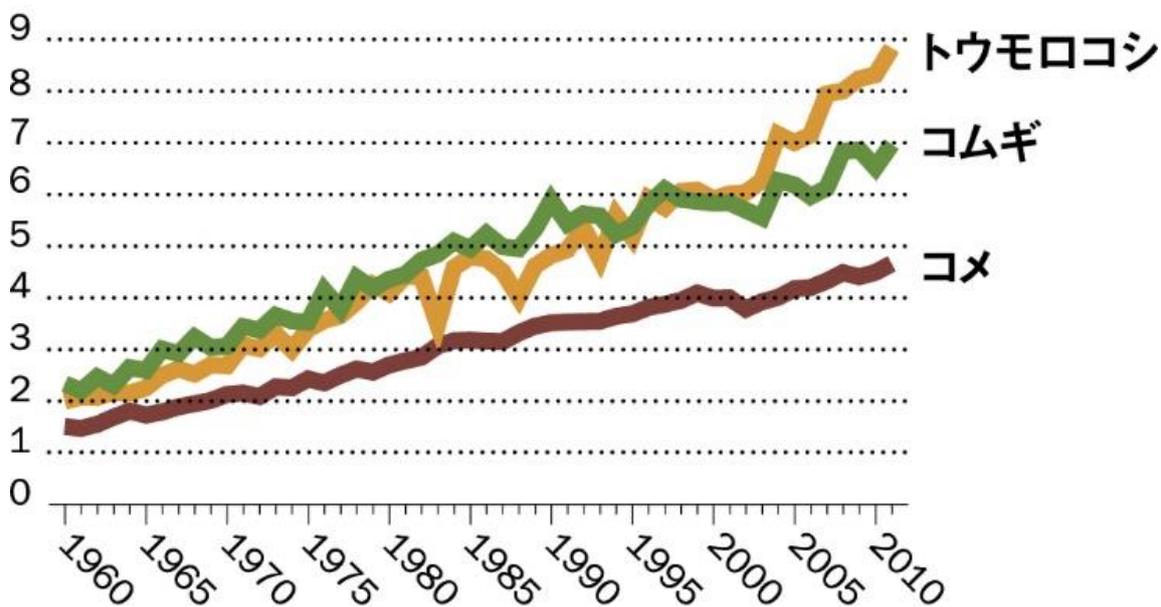


図 1-1 各穀物の生産高 (単位: 億トン)

Global Rice Production (in million tons)



Source: IRR, World Rice Statistics 11/2008

図 1-2 国別のコメ生産量

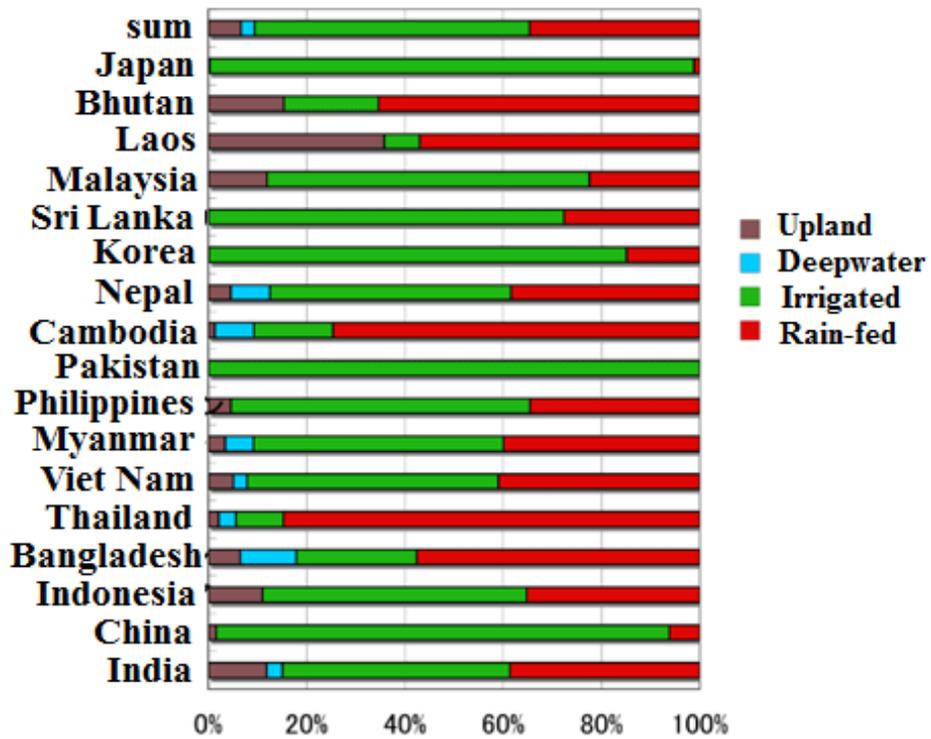


図 1-3 アジア諸国における水田の区分

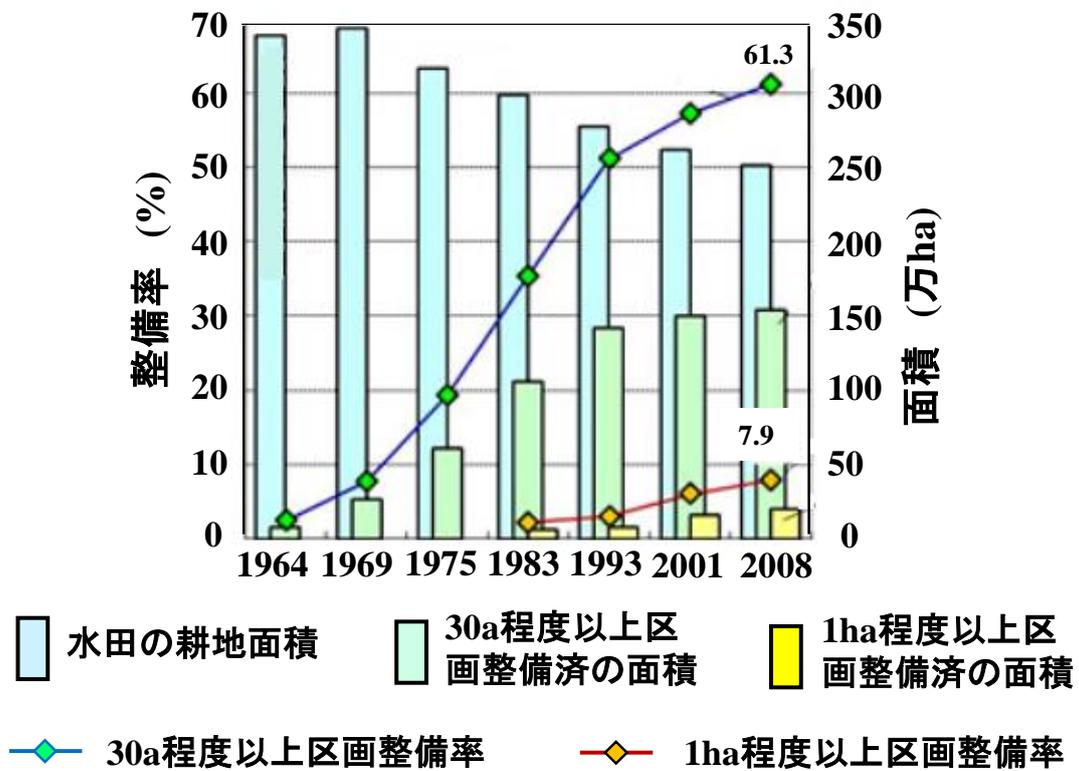


図 1-4 水田整備状況の推移

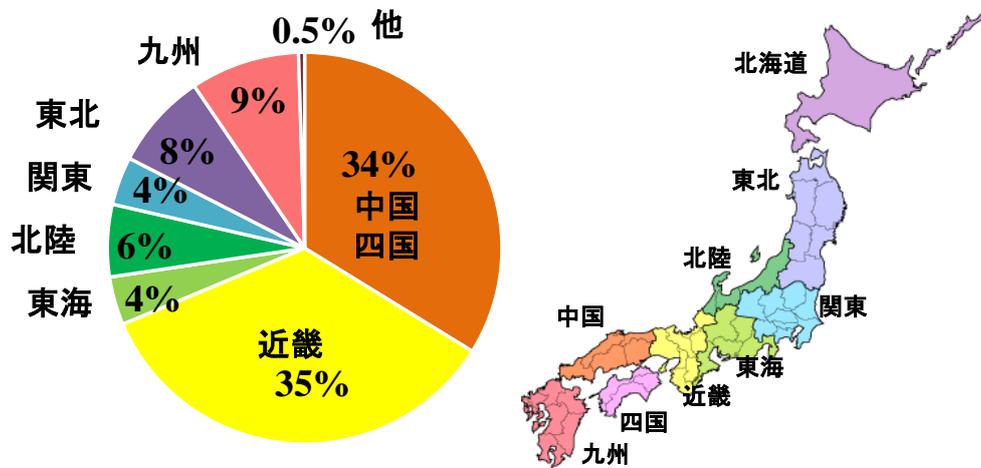


図 1-5 全国に分布するため池の比率

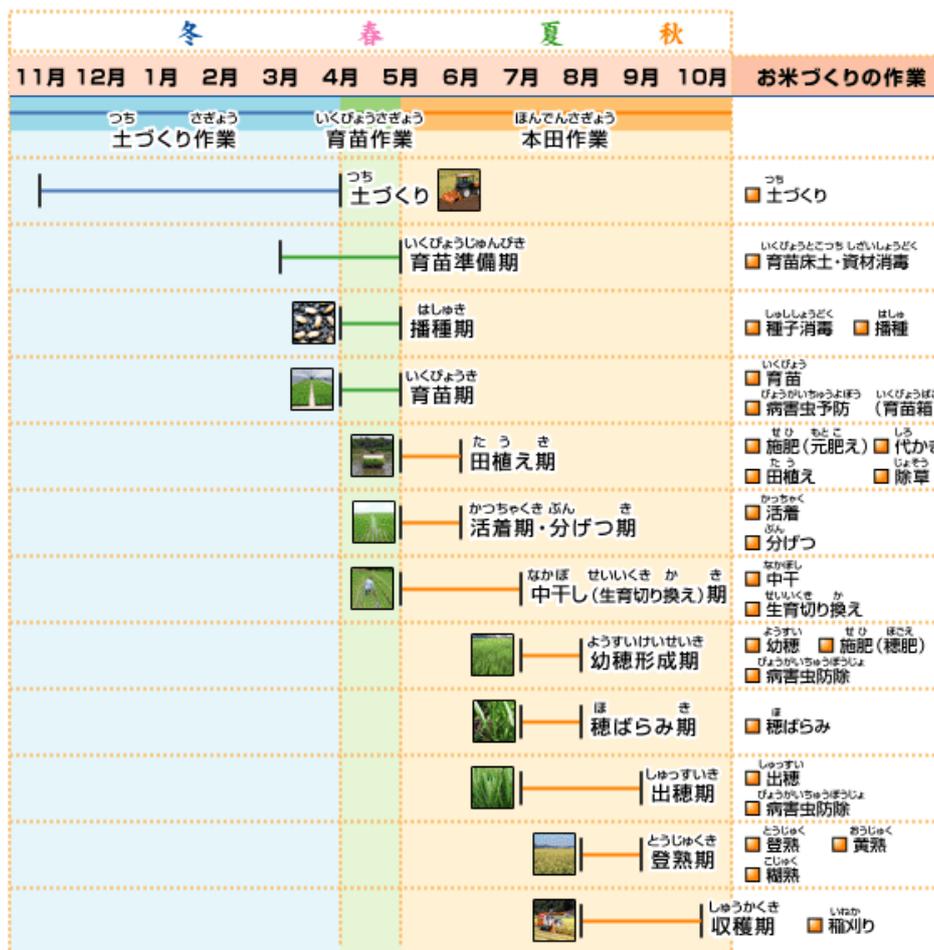


図 1-6 お米ができるまでの稲作カレンダー (全農京都)

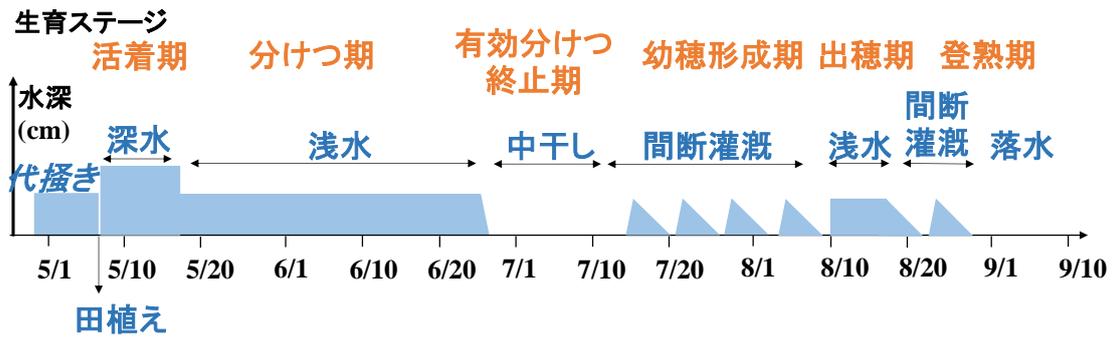


図 1-7 稲作カレンダーにおける水管理のイメージ図

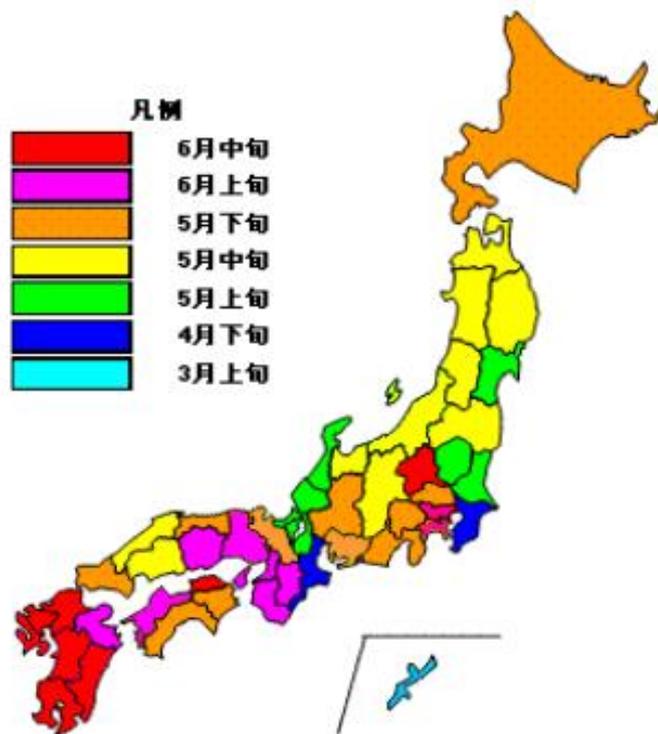


図 1-8 都道府県別の田植えの最盛期

第2章

現地観測

2.1 本章の概要

本章では宮城県江合川下流域において実施した現地観測について述べる。2.2 では、江合川流域の概要（地形、水文条件、土地利用、取水・排水システム）をまとめ、2.3 では現地観測を行った水田の諸元、計測器の配置、計測方法を解説する。2.4 では観測結果（取水・排水量、水田水深、排水路のSSフラックス）を整理して提示する。

2.2 観測対象

2.2.1 江合川の概要

(1) 流域の概要と流況

宮城県北部の水系図を図 2-1 に示す。江合川は秋田県および山形県との県境に近い鬼首盆地に発する。鬼首盆地は標高 984m の荒尾岳を中心とする直径約 13km のカルデラ地形で、多数の温泉や、間歇泉、地熱発電所を有する。江合川上流河道（荒雄川）は荒雄岳をほぼ一周してカルデラ南端から大崎平野に流出し、平野北部を東流して石巻市和湊で旧北上川に合流する。総流路延長は約 118km、総流域面積は 577km² である。カルデラ流出口には 1958 年に鳴子ダムが竣工している。鳴子ダム下流の河道延長は 89km、流域面積は約 367km² である。なお図 2-1 には国土交通省の流量観測所（末沢、荒雄、涌谷）の位置も示している。

鳴子ダムは日本初のアーチ式コンクリートのハイダムで、ダム流域面積は 210.1km²、堤高は 94.5m、総貯水容量は 5,000 万 m³ である。洪水調節・不特定利水（灌漑用水）及び水力発電のための多目的貯水池である。江合川下流域の河川流況は鳴子ダムによって以下のように制御されている。洪水期は 7 月～9 月、非洪水期は 10 月～翌年 6 月となっている。通常の洪水調節による放流はダムゲートから行われ、上限放流量は 250 m³/s とされている。非常時にはクレストゲートから放流される。また常時の発電放流量は 10～20m³/s 程度である。図 2-2 に 2010～2014 年におけるダム放流量と日降雨量を示す（鳴子ダム管理所提供）。総放流量（黒線）はダムゲート放流量（緑線）と発電放流量（赤線）の合計である。この 5

年間での最大放流量は $160\text{m}^3/\text{s}$ であり、放流上限値に達していない。また灌漑期（4月下旬～8月下旬）には常に $10\text{m}^3/\text{s}$ 程度の流量が保たれている。なお4月～5月は融雪出水放流量が平均 $30\text{m}^3/\text{s}$ を上回る年が多い。水田が最も水を必要とする代掻き・田植え期は、この期間に相当している。

図 2-1 に示した 3 つの流量観測所における 2010～2014 年の流量時系列を図 2-3 に示す。ダム放流および降雨による流量増加を除いて基底流量に着目すると、最上流に位置する末沢の基底流量は灌漑期（5～8月）に約 $20\text{m}^3/\text{s}$ 弱、他の時期に約 $10\text{m}^3/\text{s}$ である。図 2-2 と比較すれば鳴子ダム放流量とほぼ同じであることがわかる。一方、荒雄における灌漑期の基底流量は $5\text{m}^3/\text{s}$ 以下であり、末沢の同期間の値に比較してかなり小さい。下流にあるにも関わらず流量が減少するのは、途中の区間で取水されるからである。なお灌漑のための取水については後ほど詳述する。ちなみに他の時期の基底流量は $10\text{m}^3/\text{s}$ 程度であり、末沢とほぼ同じである。また涌谷の基底流量は荒雄よりやや多いが、その程度は灌漑期が非灌漑期に比べて大きい。これは水田排水のためであると思われる。図 2-4 に末沢における過去 34 年間の豊水、平水、低水、渇水流量を示すが、それぞれの平均は $23.31\text{m}^3/\text{s}$ 、 $15.09\text{m}^3/\text{s}$ 、 $10.25\text{m}^3/\text{s}$ 、 $6.33\text{m}^3/\text{s}$ である。なお渇水流量は冬季と 3 月に発生することが多い。

(2) 大崎平野について

江戸時代以前の江合川の流路は、涌谷町から南に折れて石巻湾に直接流出していた。大崎平野は江合川とその南を流れる鳴瀬川によって形成された沖積平野である。江戸時代初期の伊達政宗の統治時代に川村孫兵衛の指揮のもとに北上川の大規模な改修が行われ、江合川は北上川の一支出川となった。これにより大崎平野の水害は減少し、また用水路が整備された結果、大崎平野は東北地方屈指の穀倉地帯に変貌した（東北農政局, 2008）。

図 2-5 に江合川流域と隣接する鳴瀬川流域の土地利用区分を示す。黒線に囲まれた区域が江合川流域で、鳴瀬川流域には薄いベールをかけている。鳴子ダムより下流の土地利用区分割合を表 2-1 に示す。森林が 47.78%だが、そのほとんどは山地及び丘陵地に分布している。そこで、森林の部分を除いた平野部の水田面積割合を計算すると 61.83%となっている。ただし、近年の減反政策のため、約 3 分の 1 が大豆などに転作されているので、実質的な水田割合は約 40%となっている。

鳴子ダムから旧北上川合流点までの間に主な支川が 4 つある（図 2-6）。各支川の流域面積と主な土地利用区分割合を表 2-2 に示す。最上流で流入する大谷川の流域は山地であり、そのほとんどは森林で覆われている。この支川には県管理の岩堂沢ダムがあり、主に渇水時の利水補給に使われている（農業用水を確保して用水の安定供給と用水管理の合理化を図る）。右支川の蛭沢川の上流半分は丘陵地帯で森林に覆われているが、下流の平野部で合流する田尻川と出来川の流域は平坦で、その水田率はそれぞれ 56%と 78%となっている。なお図 2-6 で蛭沢川合流部と田尻川合流部の間に記入されている新江合川は 1933 年に開削された放水路で、本川とは越流堰で画され、洪水時のみ鳴瀬川に放流が行われる。

図 2-7 に大崎平野北部の水田の簡易土壌マップ（大崎地域水管理協議会, 2013）を示す。

山間地の水田土壌は褐色森林土であるが、平野部のほとんどは灰色低地土とグライ土で、一部が黒泥土・泥炭土である。灰色低地土とグライ土は沖積低地の水田の代表的土壌タイプで保水性に優れている。なお若嶋ら（2010）によれば、宮城県の水田では土壌改良によって黒泥土の割合が低下し、灰色低地土やグライ土の割合が増加する傾向にある。

(3) 気候および水文条件

大崎平野は石巻湾に面しており海風が入りやすく、一年を通じて比較的穏やかな気候である。しかし5月～8月にオホーツク気団が優勢な年は「やませ」と呼ばれる冷たく湿った北東風が流れ込み気温を低下させることがある。またやませは霧を発生させるので日射量が減少する。東北地方の平均的な水稲栽培は、晩春に田植えをし、夏季の高温を利用して収量を確保するが、イネの開花期にやませが吹くと冷害が生じ、収量が激減する。近年では1993年と2003年に発生し、青森県と岩手県が深刻な冷害に見舞われたが、大崎平野でも若干の被害が生じている。

図2-8に大崎平野のアメダス古川観測所における過去38年間（1978～2014）の月平均降雨量を示す。灌漑期（5月～8月）の月平均降雨量は100mm以上で、4か月間総降雨量は約550mmである。しかし、図2-9に示すように、灌漑期総降雨量の年変動は大きく、最少は297mm（1994年）、最大は926mm（1980年）である。

灌漑期における降雨量が次式で表される対数正規分布に従うかどうかを調べた。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x_i - \bar{x})^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (2.1)$$

$$x_i = \log P_i \quad (2.2)$$

ここに \bar{x} は x_i の平均値； σ は標準偏差； P_i は灌漑期総降雨量である。

x の超過確率 $W(x_i)$ を次式に示すHazenプロット法で求めた。

$$W(x_i) = \frac{2i-1}{2N} \times 100 \quad (2.3)$$

ここに $W(x_i)$ は i 番目のデータ x_i の超過確率； N はデータ数である。

その結果を図2-10に示す。データがほぼ直線状に並んでいることから、灌漑期総降雨量是对数正規分布に従うと考えてよいであろう。図中に示すように最少二乗法で直線回帰すると、超過確率50%の灌漑期総降雨量は528mmである。また渇水を非生起確率1/10と定義した場合の灌漑期総降雨量は389mmである。

図2-11に2010～2014年の灌漑期における降雨の累積量を示す。8月31日の最終値は最大613mm、最小438mmであるが、期間内の時間分布にはかなりの差がみられる。例えば2010年と2012年には灌漑前期に累積値が増大したが、2013年には6月まで少なく、7月になって急増した。このような降雨の時間的不均一性は天水による水稲栽培を不安定にする。

したがって、江戸時代初期の江合川の付け替えと用排水路整備が大崎平野の水田収量増加に大きく貢献したわけである。また次節に述べるように、第二次大戦後の国営灌漑改良事業により大型の頭首工が建設され、水供給はさらに安定化された。

2.2.2 農業灌漑システム

図 2-12 に農業用水の取排水系統図を示す。青が河川を示している。前述のように主要な支川は大谷川、蛭沢川、田尻川、出来川の 4 本で、新江合川は鳴瀬川に接続する放水路である。江合川の河道内に描かれている▲は国土交通省が設置している水位・流量観測所、●は国土交通省が半定期的に濁度を計測している点で、観測時期は年度によって異なるが、7 月から概ね 1 週間に一度の頻度で計測されていることが多い。

江合川を横切って描かれている黒棒が取水堰を示しており、上流から順に、二ツ石頭首工、大堰頭首工、三丁目頭首工、清水川頭首工および右京江頭首工の 5 つである。各頭首工が灌漑する水田の範囲を図 2-13 に示している。二ツ石頭首工と三丁目頭首工は江合川右岸の水田を灌漑し、大堰頭首工、清水川頭首工及び右京江頭首工は江合川左岸の水田を灌漑している。なお大堰頭首工からの取水は、鳴瀬川流域の一部の水田にも送られている。前述したように、江戸初期の江合川付け替え以前には、この 2 つの河川の流末は一体であったと考えられる。

図 2-12 には各頭首工の灌漑面積も示している。大堰頭首工と三丁目頭首工が全体の 77% を占めている。また、図 2-12 に緑色の矢印が導水路幹線、オレンジの矢印が排水路を示している。各排水に対応する水田面積を緑四角の中に記している。このうち田尻川を介して中北橋と涌谷の間に排水する水田面積が最も大きく、次いで鳴瀬川への排水、出来川を介した涌谷下流への排水が大きい。後に述べる観測水田の位置が★で示されている。

水稻栽培のための灌漑期間は 4 月 26 日～9 月 5 日の約 5 ヶ月であり、4 月 26 日～5 月 10 日が代かき・田植え期、5 月 11 日～9 月 5 日が普通灌漑期とされている。なお 9 月 6 日から翌年の 4 月 25 日までは非灌漑期だが、この期間には収穫、圃場の土作り、育苗などが行われている。

頭首工は水利使用協議書により水利権（計画取水量）を定められて取水している。図 2-14 に江合川における 5 つ頭首工からの取水量時系列を 2010～2014 年にわたって示している。黒実線が上述の計画取水量で、代掻き田植え期（4 月 26 日～5 月 10 日）に大きく、普通灌漑期（5 月 11 日～9 月 5 日）はそれよりやや小さくなっている。非灌漑期にも一定量の導水が計画されている。この導水は、水腐れや土砂堆積防止などの用排水路維持の他に、景観・親水、生態系保全などの役割も果たしている。また防火用水、消流雪用水、生活用水などの用途にも供されている。表 2-3 に各頭首工の計画取水量と灌漑面積を示す。非灌漑期の維持水量は平均的に代かき・田植え期の約 22%で、普通灌漑期の約 35%であることがわかる。図 2-15 に計画取水量と灌漑面積の相関を示す。代掻き・田植え期、普通灌漑期とも概ね直

線的關係がみられる。このことから灌漑水量は水田面積に比例して計画されていると思われる。ただし循環灌漑を行っている地区もあるために完全に 1:1 の対応にはなっていない。

一方、各年の実際の取水量(カラーの折れ線)は、計画取水量より若干小さくなっている。この原因は、近年の減反政策で水田の約 3 分の 1 が大豆などの畑に転作されたためである。しかし厳密に 2/3 にはしていないので、余剰水が若干生じていると思われる。またパルスの取水がゼロとなっていることが多い。この原因は明確でないが、取水を停止するタイミングが全頭首工で比較的そろっていることと、また図 2-14 下段に示す末沢の 5 年間の流量時系列との比較から、出水時には取水ゲートを閉じているものと思われる。

前述のように、日本では稲作カレンダーに従った水稻栽培が行われているが、カレンダーは地域、品種によって多少変動する。江合川流域と鳴瀬川流域の水田灌漑と関係する大崎地域水管理協議会の方から「JA 古川米栽培カレンダー」をいただいた。図 2-16 に JA 古川(古川農業協同組合)の管理範囲を示し、概ね江合川流域内における三丁目頭首工から右京江頭首工までの稲作事業を担当している。「JA 古川米栽培カレンダー」によると、この地域で栽培される品種は「ササニシキ」、「ひとめぼれ」、「まなむすめ」、「つや姫」の概ね 4 種類である。「ひとめぼれ」と「つや姫」は環境保全米で、農林水産省が提示している特別栽培農産物の生産基準を参考に、全農安心システム米に対応した生産基準を設定している。「ササニシキ」は提携米のため、需要者と JA 古川が生産基準等を協議の上決定している。なお環境保全米も提携米も、殺菌剤・殺虫剤・除草剤、化学肥料の使用回数と使用量を慣行の 5 割以下としている。「まなむすめ」は基準米で、できるだけ化学肥料・化学合成農薬の使用量・使用回数を減らし、環境に配慮した栽培を行うことと規定されている。この 4 種類の米は「JA 古川米栽培カレンダー」に従ってほぼ同じな水管理を行われ、播種、田植えおよび収穫の時期も概ね同じである。付録の 9 番に示したように 5 月に代かき・田植えを行い、苗が活着まで深水管理、活着後の分けつ期に浅水管理(途中に根腐れを防止するために時々落水の場合もある)、有効茎が確保される 6 月の下旬に落水して中干しを行い、その後に間断灌漑をし、8 月中旬の出穂期に湛水してから再び間断灌漑を行い、9 月に落水するという順番で水田をコントロールする。なお JA 古川は田植えに適した時期として 5 月 10 日~20 日を提案している(古川農業協同総合, 2014)。

しかし、JA 古川は江合川中流部の水田栽培のみを管理する。そこで、インターネットで隣接の下流域の水田栽培を担当する農業協同組合(JA みどりの)を探した。ホームページに掲載している情報から JA みどりの管内に「ひとめぼれ」、「まなむすめ」、「ササニシキ」の作付面積は 94.3%であることがわかる。付録の 10 番に JA みどりの環境保全米「ひとめぼれ・ササニシキ」の栽培カレンダーを示す。JA 古川の稲作カレンダーと同様で、5 月に田植え、苗が活着まで深水管理、活着後の分けつ期に浅水管理(途中に根腐れを防止するために時々落水の場合もある)、有効茎が確保される 6 月の下旬に落水して中干しを行い、その後に間断灌漑で、8 月の出穂期に湛水し、9 月に落水する。少し違い所は出穂後に足跡に水が残る程度の飽水管理を行うことである。なお目安の田植え時期として 5 月 10 日~25 日を提

案している（JA みどりの, 2014）。

また、図 2-14 に示す江合川に位置する 5 つの頭首工の取水時間変化が上流でも下流でも同じようになっていることから、流域内における水稻栽培の稲作カレンダーは共通であると考えられる。ただし天候や農業機械の使いまわし等の都合で前後することはある。

2.2.3 観測水田の概要

国土交通省鳴子ダム管理所から大崎地域水管理協議会を紹介していただいたので、訪問して水田現地観測について説明したところ、大崎市古川塚目千刈町在住の佐々木喜美夫氏に協力をいただけることとなった。佐々木氏は専業農家で、合計約 5.5ha の水田を保有している。観測した水田は 1ha（100m×100m の矩形）の区画で図 2-12 に★で示す位置にある。水田の水収支、濁質排出及び実際の水深管理と操作などを調査した。

写真 2-1 に観測水田（赤枠で示す矩形）と用水路（青線）・排水路（オレンジ線）の位置を示す。観測水田への灌漑水は大堰頭首工から取水されており、排水は鳴瀬川支川の渋井川に排出される。用水路は 30cm×30cm のコンクリート製矩形水路である。水田への給水口は 3 か所あり、写真 2-2 に示すような直径 15cm の円形孔に付けられた手動回転蓋を開閉させて行う。排水路は 50cm×50cm のコンクリート製矩形水路である。写真 2-3 に示すような円形のコンジットが田面との間に 3 か所設置され、田面側に設置した堰（上部から板を挿入する）により田面水位と排水量をコントロールするようになっている。田面からの畔の高さは 40cm である。

土壌はグライ土で、栽培品種は“つや姫”であった。この品種は 2005 年に山形県農業総合研究センター水田農業試験場で開発され、2009 年から宮城県で採用され、晩生種に属し、背丈が短いため耐倒伏性がやや強い（結城ら、2010）。また食味官能値（外観、香り、味、硬さなど）が他の品種より高く、優れた食味特性がある新品種である（浅野目ら、2009）。

2.3 現地観測の内容

観測期間は 2014 年 4 月 27 日～8 月 31 日である。この年の農作業の工程を表 2-4 に整理した。代掻きは 4 月 27 日に開始し、落水は 8 月 24 日であった。なお表中の野外調査日は、濁水の採水、イネの生育状況の確認、観測器具の点検とデータ回収、営農者への聞き込みを行った日を示している。合計で 8 回であった。

2.3.1 測定器の配置

測定器の配置を図 2-17 に模式的に示す。

水田水位を連続的に記録するために水位計（ウイジン社製 UIZ-WLR100）を田面内に設置した（写真 2-4-a）。この水位計は内部の圧力センサーで水圧を計測し、出力値を電圧で記録し、水位～電圧換算式で電圧から水深を求める。センサー全長は 1380mm である。透水孔を多数開けた塩ビ管の周囲を布で包み土砂が入らないようにし、約 500mm の穴を穿ち垂直に立て、その中にセンサーを設置した。設置位置は、稲の成長と営農者の操作を邪魔しないように枕地（稲株と畦畔の間の水辺空間部）とした。なお、計測時間間隔は 10 分間である。

用排水路に水深を計測できる内蔵バッテリー式圧力計（Onset 社製 HOBO U20 水位ロガー U20-001-01）を設置した。水路内の流れの影響を受けないように、透水孔がある塩ビ管の中に入れ、コンクリートの壁に固定した（写真 2-4-b）。また、排水路の近傍に同型の圧力計を設置し、大気圧の変化の影響を補正した。圧力計の計測時間間隔はすべて 10 分間である。

排水濁度を計測するために排水路に小型メモリー式クロロフィル濁度計（JFE アレック社製 COMPACT-CLW）を設置した。この濁度センサーは、ピーク発光波長 880nm の近赤外光を水中懸濁粒子に照射し、そこからの散乱（反射）光強度を受光素子で測定する後方散乱光検出方式のセンサーである。測定値は FTU（Formazin Turbidity Unit）単位である。なお、太陽光の影響を受けないように濁度計の真上に 60cm×90cm の木板を置いた（写真 2-4-c）。データ容量、バッテリー容量及び観測期間を考慮して、計測時間間隔を 30 分とした。

2014 年 6 月 24 日から、排水路に断面流速流量モジュール（TELEDYNE 社製 ISCO2150）を設置した（写真 2-4-d）。このモジュールは水深と流速を同時に測定する複合センサータイプの流量計であり、水深から計算される断面積に流速を乗じて流量を求めている。当初は計測時間間隔を 5 分としたが、途中でバッテリー切れが発生したため、8 月 12 日から 30 分間隔での計測とした。

2.3.2 取排水量の推定方法

取水量は以下のように計測した。写真 2-5 に示すように、給水口の回転蓋に回転開度を計測できるように指針とメジャーを取り付け、種々の水深と開度のもとで、写真 2-6 に示すように水田側で給水を受け、ストップウォッチで計測した時間で水量を測って吸水速度を求めた。その結果を図 2-18 に示す。以上の準備の後に、営農者において給水口蓋の回転角度を毎日記録していただき、その値と水圧計で計測されている水深とから、図 2-18 に基づき給水量を推定した。

排水量は以下のように計測した。図 2-19 に模式的に示すように、排水孔に堰を設置していない場合と設置している場合がある。そこで、種々の状態において排水孔出口からの流出水をバケツで受け、満杯となる時間をストップウォッチで計測し、堰の無い場合は田面水深と、堰のある場合は越流水深との相関を調べた。なお前者については代掻き・田植え期と落水期に、後者については浅水期と間断灌漑期に計測した。計測結果を図 2-20 に示す。図中に示す回帰式を用いて、その時の堰高の情報と水位計測値から排水量を計算できる。

2.3.3 水田水深の推定方法

田面は完全にはフラットでない。そこで、前節に述べた田面水位計測値から平均水深を求められるように、以下の補足的計測を行った。田植えが終了した後に、図 2-21 に示す 8 地点の枕地（稲株と畦畔の間の水辺空間部）にメジャー付きの木杭を設置し（写真 2-7）、地表面の値を記録した。続いて 5 月 27 日午前 9 時の湛水無風時に水面の目盛りを読み、水面が水平と仮定して各地点の地表面高を求めた。表 2-5 にその結果を示す。図中の地盤高は①の木杭目盛りに換算して示している。この基準によれば平均地盤高は 7.3cm、標準偏差は 2.7cm である。水田の内部において多数の点を計測できればよかったが、農作業に影響を与えないという条件で観測をさせていただいているので、枕地のみでの計測しかできなかった。なお 100m×100m の広さで 2.7cm しか標準偏差がないということは、代掻きによる田面平坦化の精度が非常に高いことを意味している。なお地点別にみると西側にある①、②、⑦、⑧が相対的に高くなっている。2.2.3 で述べたように、給水口と排水口がそれぞれ西側と東側にあるので、この地形勾配は排水を考慮して設定されている可能性がある。

次に、田面水位計のキャリブレーションを行った。上記 8 地点の水位標の目盛りから平均水位を求めて 7.3cm を引き、平均水深を求めた。その時の田面水位計の出力電圧値と平均水深とを表 2-6 に示す。またその相関をグラフ化すると図 2-22 のようになり、ほぼ直線関係が得られた。そこで図中に示す回帰式を用いて、水位計出力電圧から平均水深を求めることとした。これによれば出力電圧が 3.07V の時に平均水深がゼロとなり、田面が露出することになる。

図 2-23 に観測期間の出力電圧の時系列を実線で示す。水平の黒点線（3.07V）は平均水深ゼロを表している。回帰直線を用いて平均水深に換算すると図 2-24 を得る。上から下がる棒グラフは単位面積当たりの流入水量（降雨量と給水量）である。水深が正の場合の波形は、上昇が急だが下降は緩やかである。すなわち流入は比較的短時間に生じ、損失（蒸発散と浸透）および流出は比較的ゆっくりだからである。一方、水深が負の場合は、上昇、下降とも急である。この理由は、地中の空隙が限られているために、流入あるいは損失の速度が同じであっても、地下水面変動は自由水面変動に比べて急になるためである。これについては 3.2.3 で定量的に考察する。

ところで詳細に見ると、上記の運動の変化の境目は、平均水深ゼロの線よりやや上（20mm 付近）にある。この原因は明確でないが、おそらく田面の不整に起因すると思われる。表 2-5 に示したように、木杭を設置した 8 地点における田面標高の標準偏差は 2.7cm であった。つまり平均水深が正であっても田面の一部は露出している。表 2-5 からわかるように、水位計設置位置に近い地点①は標高が高いグループにあるので（地盤補正值の欄）、平均水深が正であっても田面が露出すると考えられる。

2.4 観測結果

2.4.1 稲の生育と稲作作業

表 2-7 に観測水田における 2004 年の農作業の工程と、排水口の堰高を示す。代掻きは 4 月 30 日（荒代）と 5 月 2 日（植代）の 2 回に分けて行われた。なお表 2-7 の代掻き期間には給水、攪拌された土砂の沈殿、代かき後の排水の期間も含まれている。代掻き後の水田様子を写真 2-8 に示す。田植えは 5 月 6 日の午前中に行われた。写真 2-9 左に田植え時の苗の様子を示す。草丈は約 12cm である。写真 2-9 右に示すように、田植え機により 18cm の等間隔で一か所 3~4 本の苗を植え一株とする。1ha の面積に約 180,000 株の苗が植えられている。その後 20 日間は深水、30 日間は浅水管理が行われた。深水管理では堰を高くし排水が生じないようにしていた。この期間内の 5 月 14 日に除草剤が散布されている。浅水管理では堰高を 68mm としていた。6 月 25 日の午後に排水堰を撤去し、20 日間の中干しをした。続いて総計 40 日の間断灌漑を行ったが、途中の出穂期において約 5 日間の浅水管理を行っている。その時の排水口の堰高は約 22mm である。最後に 8 月 24 日に排水堰を撤去し落水した。

写真 2-10 にイネの生育の様子を、図 2-25 にイネの高さの変化を示す。示す段階における稲の高さ変化を示す。田植え後の 20 日間に稲が活着し、約 20cm の高さになった（写真 2-10-a）。その後、分けつが始まり、水田がイネで覆われていく。分けつから約 20 日間を経った水田の様子を写真 2-10-b に示す。この時のイネの高さは約 30cm であった。また 6 月末の分けつ盛期の様子を写真 2-10-c に示す。この時のイネの高さは約 40cm であった。中干しが終了した 7 月中旬の様子を写真 2-10-d に示す。この時のイネの丈は 75cm に達している。写真 2-10-e は 8 月中旬の出穂期の様子である。この時のイネ丈は約 90cm であり、9 月の収穫時には約 95cm に達した。

2.4.2 取排水量および田面水深の変化

観測結果を一括して図 2-26 に示す。黒の実線が水深、水色の横線が排水口の堰高を示している。また上段の棒グラフは、青が降雨量、緑が単位面積当たりの給水量、オレンジが単位面積当たりの排水量である。以下、取水量、排水量および水深変化の特徴を述べる。

(1) 取水量

表 2-8 に観測期間の取水記録を示す。給水口の回転角度とは、写真 2-5 に示した開度のことである。取水時間と開度は営農者に記録していただいた。また取水速度は図 2-18 に示したグラフから求めた。ただし 4 月 27 日~29 日の取水については、3 つの用水口において実際に計測した値を示している。

代掻き・田植え期には、短期間に湛水と排水を繰り返す行うために、大量の取水が集中的に行われた。深水管理期間には、水深を 50cm 付近で一定に保つために小刻みな給水が行われ、また除草剤散布の前（5 月 14 日）には水深を上げるために集中堤に給水されている。浅水期間には、損失によって水位が低下した場合に補給されているが、この年には降雨が比較的多かったために、頻度は少なかった。間断灌漑期には間歇的に給水されている。

(2) 排水量

排水量は、堰のない場合と堰のある場合に分け、図 2-20 に示した実験式から推定した。

代掻き・田植え期には排水堰が 2 回撤去され、水田の水は完全に排出された。深水期間には排水堰が高く設置され排水がなかった。中干し期が開始する前には排水口が解放されて排水されている。間断灌漑期には、自然の損失（蒸発散と浸透）だけで水位が十分低下しない際に不定期に排水されている。また落水時の直前に降雨があったので、4 日続けて排水が行われている。

(3) 水田水深

田植え以降の田面水深の変化を稲作カレンダーとの対応で以下のように捉えられる。深水期には約 50mm の水深を目標に小まめに管理されており、除草剤散布の前に約 75mm に上昇させている。浅水期には降雨が多かったので深水期よりも水位が上昇した。6 月 13 日、14 日に余剰水を排出し、その後は降雨がなかったので水深は徐々に下がり、中干し期直前ではほぼ自然に干上がった。中干し期には田面を乾燥させる予定であったが、降雨があったために田面がときどき冠水した。このため中干しは予定の 10 日間から延長され 20 日間となった。間断灌漑期には湛水－土壌露出－湛水を繰り返す予定であったが、前半では降雨のために湛水が継続し、後半では不規則ながら乾湿が繰り返された。なお排水口の堰により湛水時の水深は約 20mm にコントロールされた。この年は 8 月 11 日～15 日が出穂期であり浅水状態に移行したが、ちょうど降雨があったために、取水を行わなくても水深は 20mm～50mm の間にあった。落水後は土壌が露出したが、降雨により短期間冠水することもあった。

以上のように、営農者が稲作カレンダーに従って水田水深を管理しようとしても、気象条件（降雨、蒸発散量）の影響により、思い通りにコントロールできないことがわかる。このような田面水位の変動特性については、第 3 章で検討する。

2.4.3 濁質流出量

(1) 水田土壌の特性

観測水田の田面から土壌を採取し、レーザー回折式粒度分布測定装置（島津製作所製 SALD-3000）を用いて粒度分布を分析した。その結果を図 2-27 に示す。水田土壌の 50% 径（メディアン径）とモード径（最頻粒子径）は 7.806 μm であり、1 μm ～10 μm の粒子が支配的となっていることが分かる。土壌区分としては粘土・シルトである。

排水路で計測する濁度から SS を求めるために、現地で採取した水田土壌を容器内の純水

で攪拌し、その濁度と SS の相関を調べた。SS は、JIS K0102 工業排水試験方法に従い、2mm のふるいを通した試料水を孔径 1 μ m のガラス繊維ろ紙でろ過し、ろ紙に捕捉された物質を水洗し、110 $^{\circ}$ C の乾燥器中で 2 時間乾燥した後、デシケーター中で放冷して質量を測定し、式(2.4)で試料水の SS を得た。

$$SS = (a - b) / V \quad (2.4)$$

ここに、 a はろ過乾燥後のろ過材及び SS の質量(mg) ; b はろ過材の質量(mg) ; V は試料水量(mL)である。濁度は現地排水路で用いた濁度計 (JFE アレック社製 COMPACT-CLW) を容器に挿入して求めた。以上から得られた SS と濁度の相関関係を図 2-28 に示す。両者は高い相関を示す。そこで、図中に示す相関式を用いて、濁度計測値を SS に換算することとした。

(2) SS フラックス

SS フラックスとは断面内を通過する懸濁物質量で、次式で算出される。

$$F_{ss} = SS \times Q \quad (2.5)$$

ここに、 F_{ss} は SS フラックス (g/s) ; Q は排水路の流量 (m^3/s) である。2.3.1 で述べた流量計モジュール (TELEDYNE 社製 ISCO2150) で求められる流量に、式(2.4)データから得られる SS 時系列を乗じて各時刻の F_{ss} を求めた。

それを日平均した結果を図 2-29 に示す。薄緑は代掻き・田植え期と落水期であり、この期間は降雨がなくても人為的な排水のために SS フラックスが上昇している。薄オレンジ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期間である。それらを除けば、降雨に反応して SS フラックスが増大することが見て取れる。また同程度の降雨でも稲作カレンダーの作業段階によって SS フラックスは微妙に異なっている。例えば、深水管理の 5 月 21 日、浅水管理の 6 月 12 日、中干しの 6 月 29 日及び間断灌漑の 8 月 22 日に、降雨量はそれぞれ 50mm、36 mm、36.5 mm、31.5 mm であるが、SS フラックスは 0.22g/s、1.60 g/s、2.31 g/s、1.40 g/s である。SS フラックスのこのような特性については、第 4 章で検討する。

2.5 まとめ

水田が広く分布する宮城県の江合川流域を研究対象として流域の地形・水文的特徴と用水路・排水路について調査した。流域内の一枚水田で現地観測を行い、営農者の操作、取・排水量、水田水深及び排水路の SS フラックスを計算した。結論を以下にまとめる。

(1) 江合川流域に森林を除いた平野部の 60%は水田である。水を安定的に供給するための取・排水の灌漑システムはとても複雑であり、取水の頭首工がほぼ河川の中流に位置し、排水が下流の中北橋～涌谷の間に集中している。

- (2) 営農者の操作については、主に稲作カレンダーに従って、田植え前の代掻きから、深水管理、浅水管理、中干し、間断灌漑、落水のように水田をコントロールした。
- (3) 水田取水量の結果では、最初の代掻き・田植え期、深水管理及び少雨の7月末の間断灌漑期に取水量が集中的に大きい。浅水管理と他の間断灌漑期には、損失によって水位が低下した場合に補給されているが、この年には降雨が比較的多かったために、頻度は少なかった。
- (4) 水田排水量の結果では、代掻き・田植え期の排水と中干し及び最終落水の時に排水堰が完全に撤去され、浅水管理と間断灌漑時期には高さが約6.7cmと2.3cmの堰が設置された。代掻き・田植え期の排水量が一番大きく、その後の排水量が堰の高さ及び降雨量と関係がある。
- (5) 水田水深の結果から、営農者が稲作カレンダーに従って水田水深を管理しようとしても、気象条件（降雨、蒸発散量）の影響により、思い通りにコントロールできないことがわかる。
- (6) 排水路のSSフラックスは代かき・田植え期などの人工排水の時期を除けば、降雨に影響されることが分かった。また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。

参考文献

- JFE アレック株式会社. 2007. 小型メモリークロロフィル濁度計 COWPACT-CLW 取扱説明書: 3.
- 浅野目謙之, 森谷真紀子, 鈴木啓太郎, 大坪研一. 2009. 水稻新品種「つや姫」の食味特性評価: 第2報理化学測定によるコシヒカリとの比較. 日本作物学会講演会要旨集, 228(0): 236.
- 国土数値情報. 2009. 土地利用細分メッシュデータ. <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-b.html>.
- 東北農政局. 2008. お米. <http://www.maff.go.jp/tohoku/monosiritai/syokutaku/okome.html>.
- 東北農政局. 2010. 河川法第95条 水利使用協議書(変更更新): 4.
- 古川農業協同総合. 2014. JA古川米栽培カレンダー.
- みどりの農業協同組合. 2010. <http://www.ja-midorino.or.jp/product/rice01.html>
- 結城和博, 佐藤久実, 中場勝, 櫻田博, 佐野智義ら. 2010. 水稻新品種「つや姫」(山形97号)の育成. 山形県農業研究報告, 2: 19-40.
- 若嶋惇子, 瀧典明, 高橋浩明, 熊谷千冬, 畑中篤ら. 2010. 宮城県内水田土壌の変化と実態. 宮城県古川農業試験場研究報告, 8: 15-22.

表 2-1 江合川流域の土地利用区分

土地利用タイプ	割合 (%)	森林を除いた割合 (%)
森林	47.78	—
田	32.29	61.83
その他の農用地	3.36	6.44
荒地	0.78	1.50
建物用地	9.38	17.95
道路	0.08	0.15
鉄道	0.03	0.05
その他の用地	1.80	3.44
河川及び湖沼	4.51	8.64

表 2-2 支川の流域面積と土地利用区分割合

支川	流域面積 (km ²)	水田割合 (%)	森林割合 (%)	建物用地 (%)
大谷川	59.38	2.41	93.28	0.93
蛭沢川	19.82	24.57	63.62	6.86
田尻川	88.44	56.12	21.72	10.98
出来川	32.17	78.09	2.92	12.96

表 2-3 各頭首工の灌漑面積と計画最大取水量

頭首工	灌漑面積 (ha)	計画最大取水量 (m ³ /s)		
		代掻き・田植え期	普通灌漑期	非灌漑期 (非/代, 非/普)
二ッ石	594.5	2.319	1.522	0.500 (22%, 33%)
大堰	3312.9	11.786	6.940	2.497 (21%, 36%)
三丁目	4049.6	11.362	8.074	2.918 (26%, 36%)
清水川	566.2	1.709	1.164	0.398 (23%, 34%)
右京江	1049.4	2.925	1.588	0.600 (21%, 38%)

表 2-4 野外調査日と対応の作業段階

野外調査日	作業段階	野外調査日	作業段階
4.27～5.8	代掻き・田植え、深水	5.24～5.27	深水、浅水
6.14～6.16	浅水	6.24～6.27	浅水、中干し
7.15～7.16	中干し、間断灌漑	8.10～8.13	浅水
8.23～8.24	間断灌漑、落水	9.20	落水後

表 2-5 水位標目盛りの詳細と平均地盤高

水位標	目盛り (cm)								平均地盤高 (cm)	標準偏差 (cm)
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧		
地盤処	9.8	10.3	0.4	8.1	3.7	4.3	6.6	10.4		
湛水無風時	15.3	15.9	12.9	18.2	13.8	12.8	12.0	17.0		
補正值	—	0.6	-2.4	2.9	-1.5	-2.5	-3.3	1.7		
地盤補正值	9.8	9.7	2.8	5.2	5.2	6.8	9.9	8.7	7.3	2.7

表 2-6 記録した平均目盛り、水田水深及び電圧値

時間	平均目盛り (cm)	平均水深 (cm)	電圧値 (V)
5.24 18:30	15.3	8.0	3.364
5.25 05:20	14.9	7.6	3.348
5.25 11:20	14.8	7.5	3.346
5.25 15:50	14.8	7.5	3.344
5.25 18:00	14.7	7.4	3.344
5.26 09:20	14.4	7.1	3.334
5.26 12:00	14.4	7.1	3.323
5.26 17:40	14.3	7.0	3.321
5.27 09:20	15.3	8.0	3.359
5.27 11:40	15.0	7.7	3.356
6.14 16:20	14.7	7.4	3.355
6.15 09:20	14.3	7.0	3.337
6.15 12:20	14.1	6.8	3.333
6.15 15:00	14.0	6.7	3.326
6.15 18:00	13.9	6.6	3.317
6.16 09:30	13.6	6.3	3.301
6.16 12:20	13.5	6.2	3.307
8.11 10:00	11.3	4.0	3.224
8.12 15:00	10.1	2.8	3.171
8.13 10:00	10.4	3.1	3.184

表 2-7 稲作カレンダーに対応する各作業段階

作業段階	時間帯	持続時間	排水口堰高
代掻き	4.27～5.6	—	—
田植え	5.6	—	—
深水	5.6～5.26	20 日間	排水なし
浅水	5.26～6.25	30 日間	6.8cm
中干し	6.25～7.15	20 日間	0
間断灌漑	7.15～8.10	25 日間	2.2cm
浅水	8.10～8.14	5 日間	2.2 cm
間断灌漑	8.14～8.24	10 日間	2.2 cm
最終落水	8.24	—	0

表 2-8 取水記録、平均水深と推定取水量

取水時間	給水口の回転蓋の開度			平均水深 (cm)	推定取水量 (mm/ha)
	①	②	③		
4.27 10:00 ~ 4.29 12:00					80.55
4.30 9:00 ~ 18:00	3	3	3	7.17	12.10
5/2 12:00 ~ 18:30	3	3	3	7.05	8.47
5/2 18:30 ~ 5.3 12:00	5	5	5	6.93	33.61
5/3 12:00 ~ 17:00	1	1	1	6.47	2.05
5.3 17:00 ~ 5.4 6:00	5	—	5	8.61	23.43
5.6 12 : 00 ~ 17:00	3	3	3	8.23	8.40
5.6 17:00 ~ 5.7 12:00	5	5	5	7.98	46.16
5.8 7:00 ~ 5.12 18:00	1	—	—	11.27	19.15
5.13 6:00 ~ 12:00	7	7	7	11.30	24.96
5.19 6:00 ~ 14:00	7	7	7	10.60	31.42
6.2 7:00 ~ 14:00	4	4	4	8.50	15.11
6.4 6:00 ~ 14:00	3	3	3	8.50	14.07
7.15 14:00 ~ 16:30	7	7	7	8.97	8.30
7.15 16:30 ~ 7.16 6:00	4	4	4	6.80	20.20
7.26 6:00 ~ 7.28 17:00	5	5	5	6.34	56.04
8.1 18:00 ~ 8.2 6:00	7	7	7	5.47	18.26



図 2-1 宮城県北部の水系

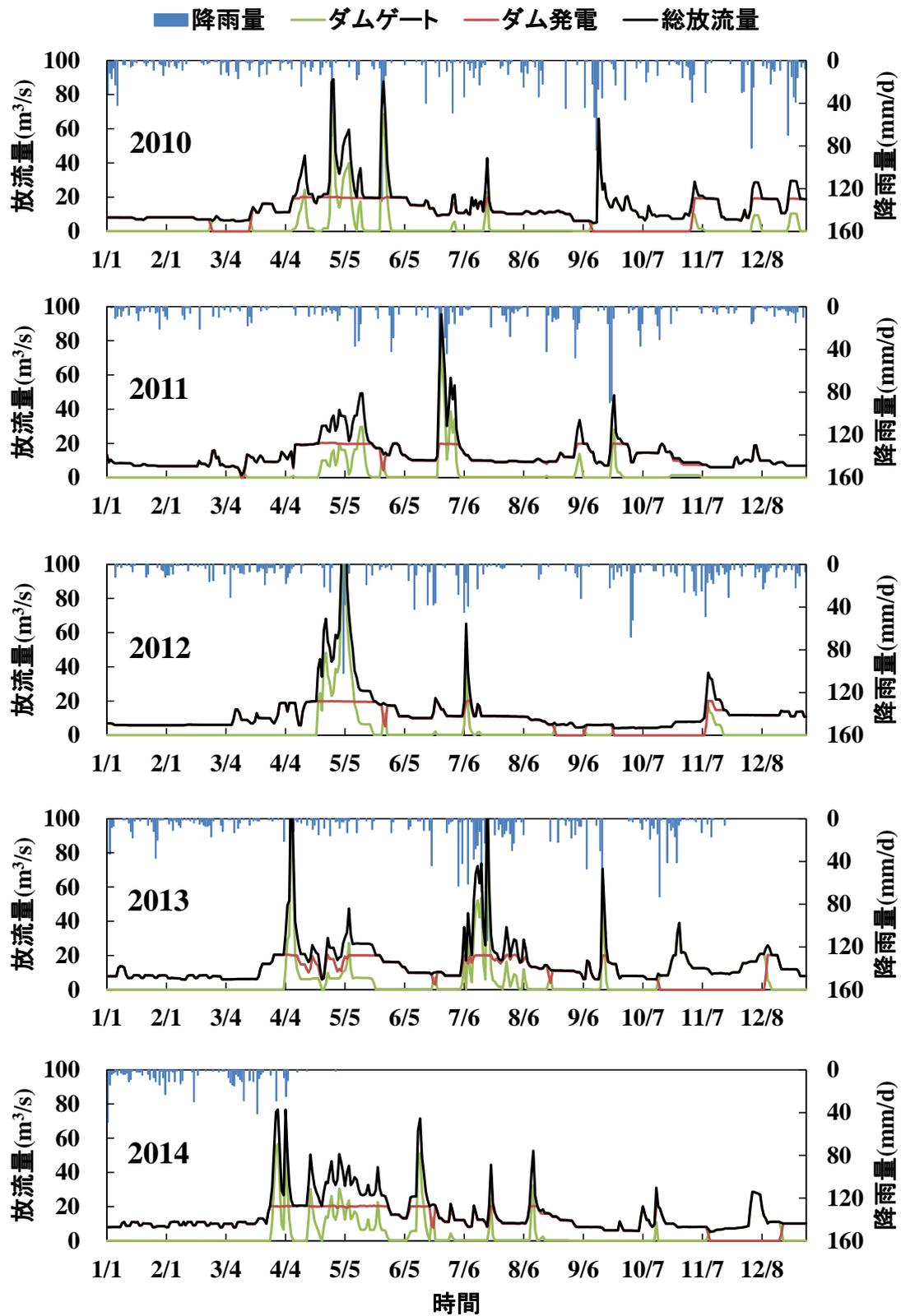


図 2-2 2010～2014 年に鳴子ダム放流量と日降雨量

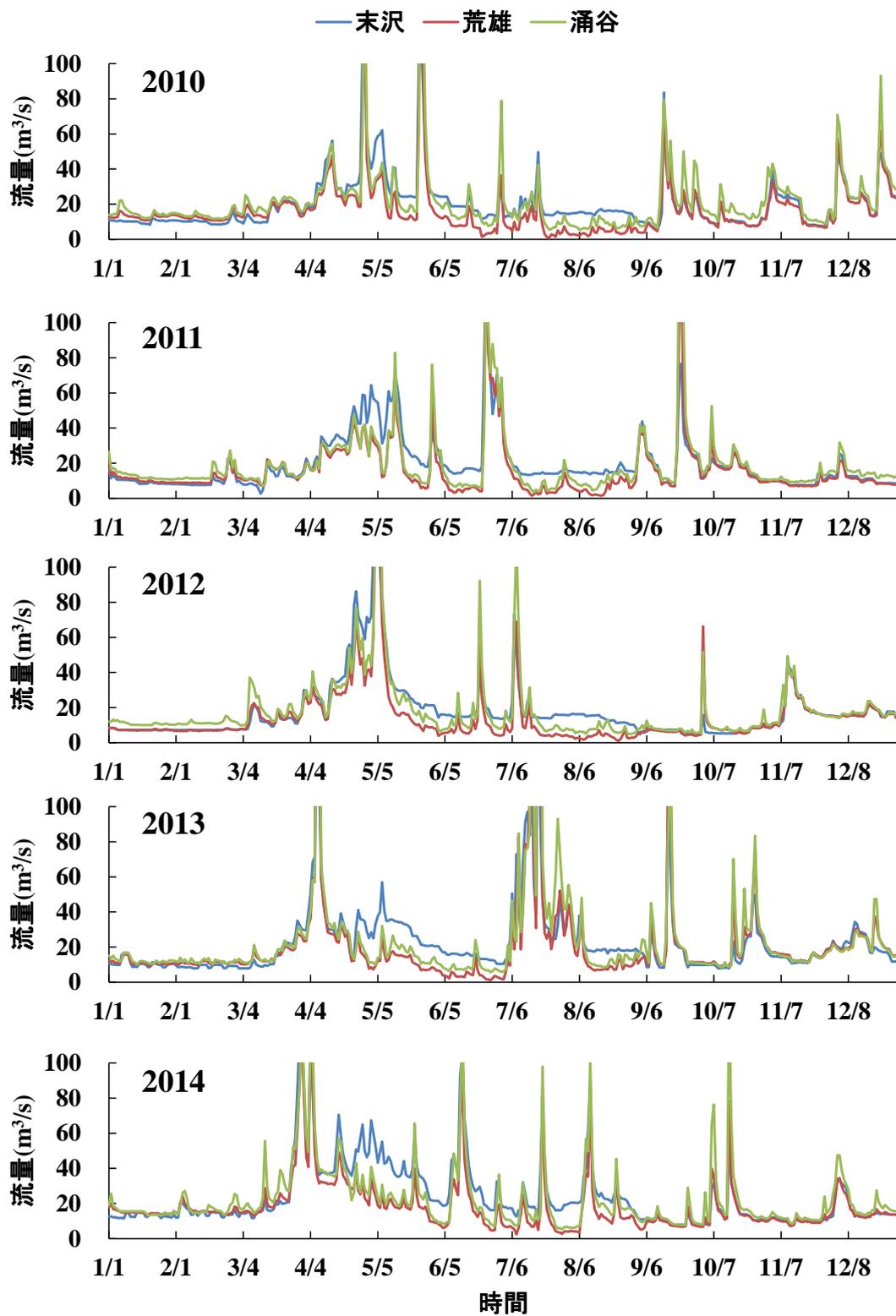


図 2-3 2010～2014 年に末沢、荒雄、涌谷の流量

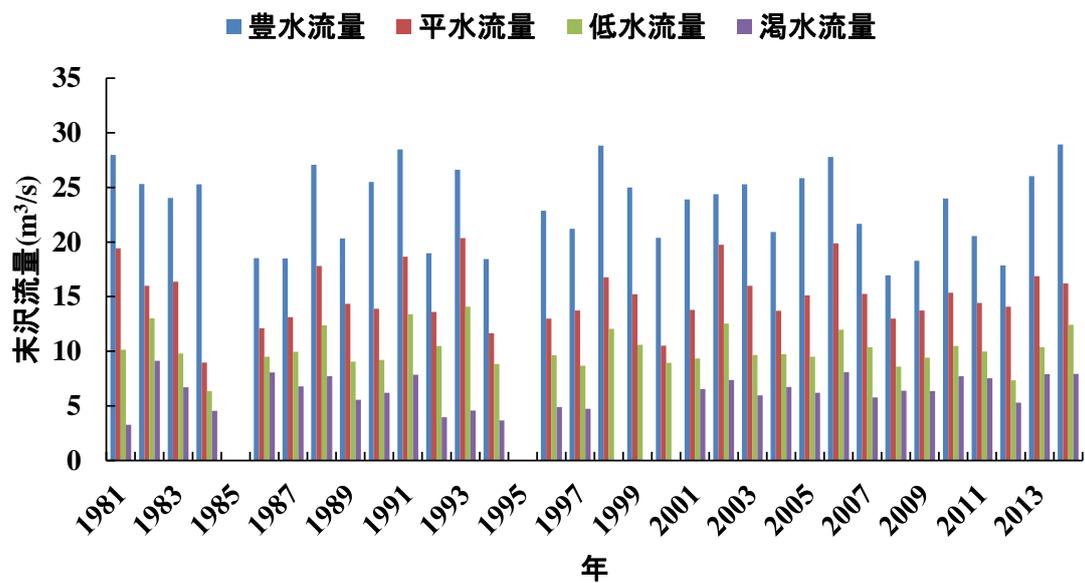


図 2-4 末沢における過去 34 年間の豊水、平水、低水、渇水流量

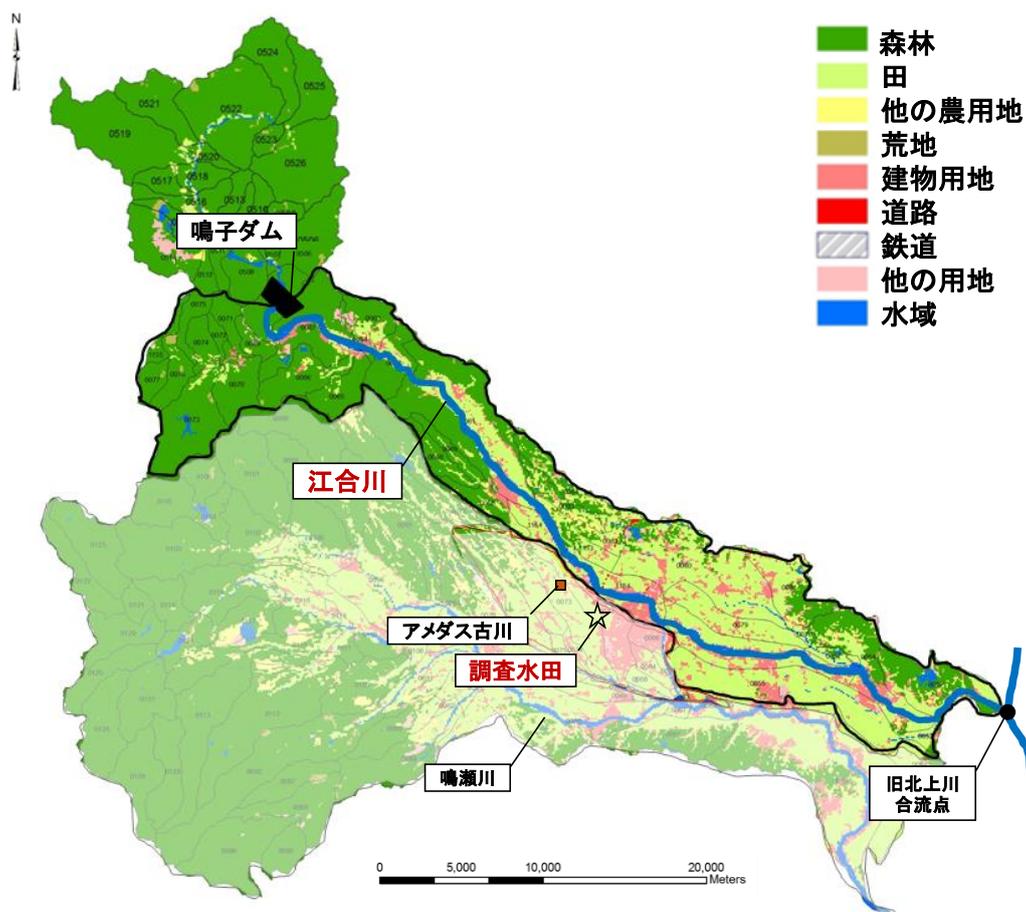


図 2-5 江合川流域と隣接の鳴瀬川流域の土地利用

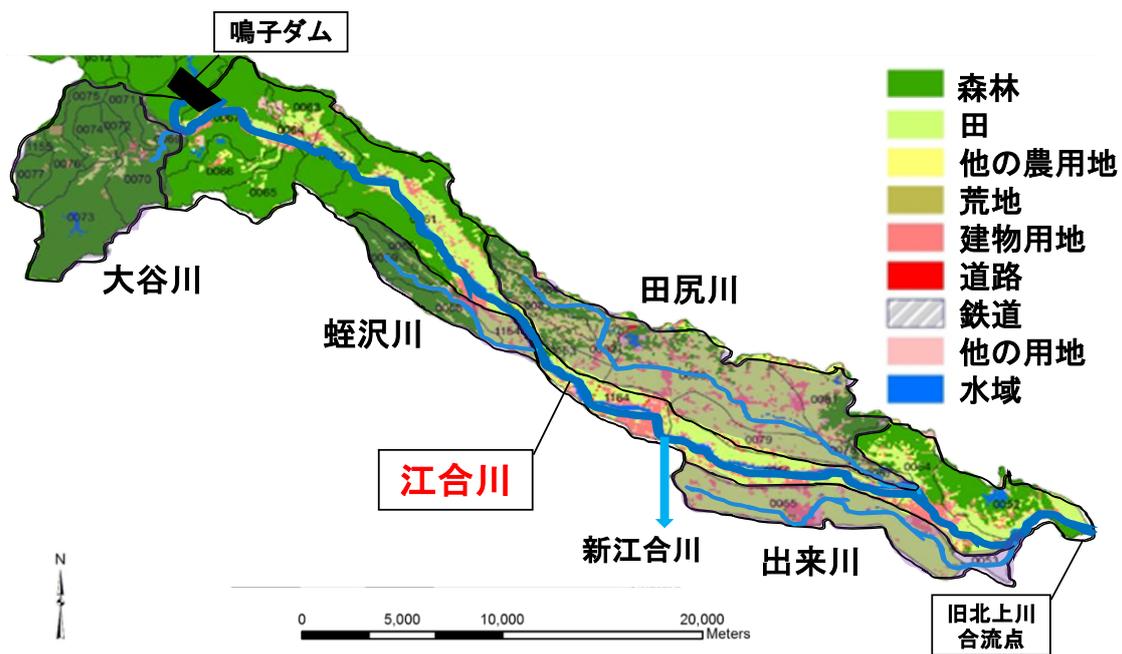


図 2-6 江合川の支川と放水路

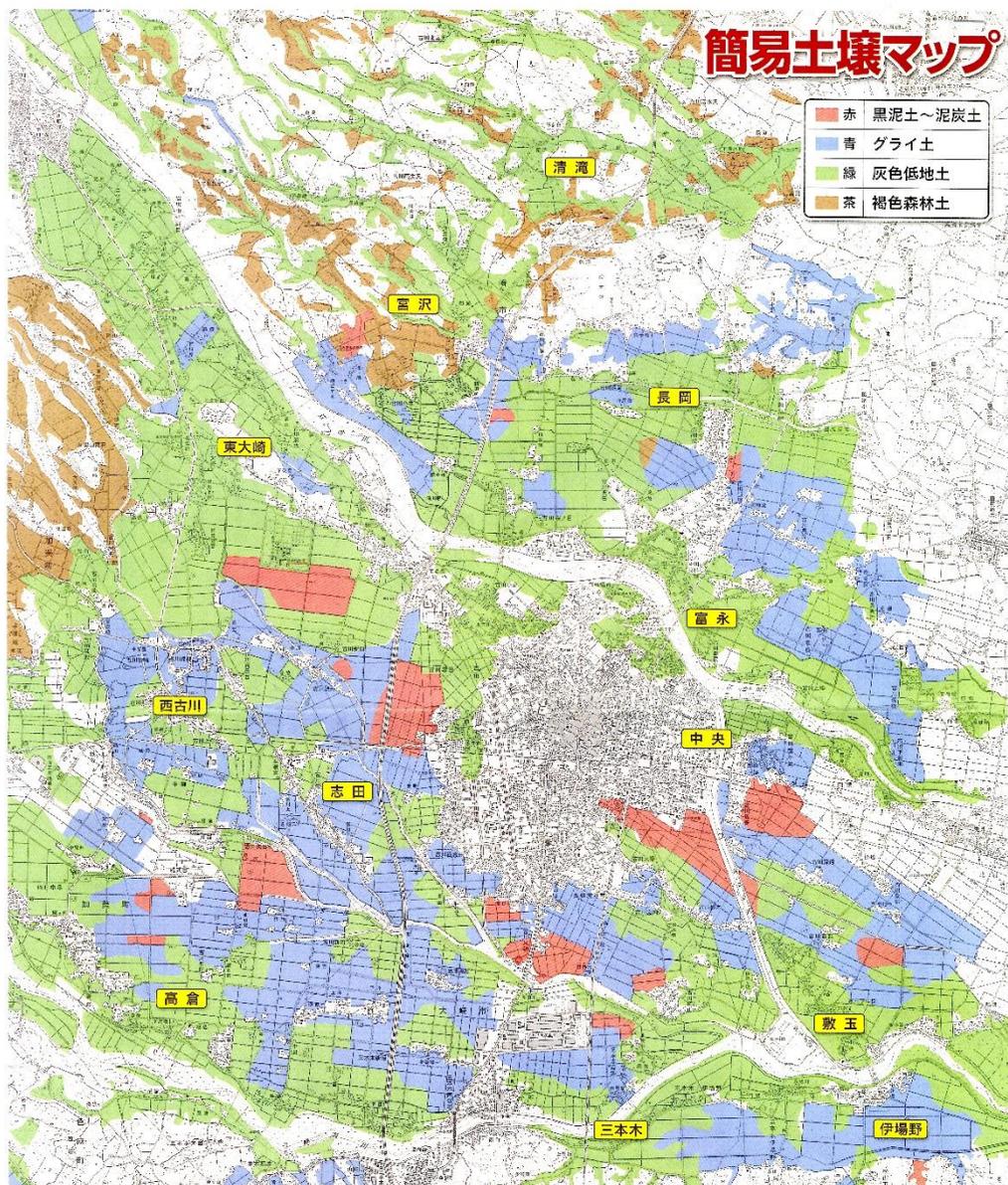
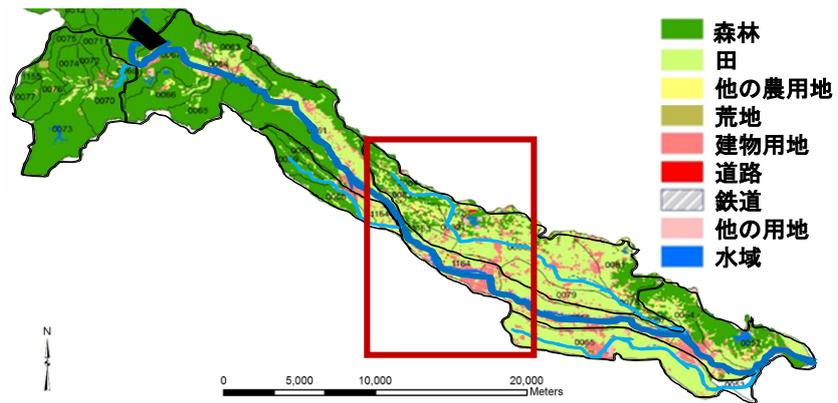


図 2-7 江合川中流部の簡易土壌マイブ

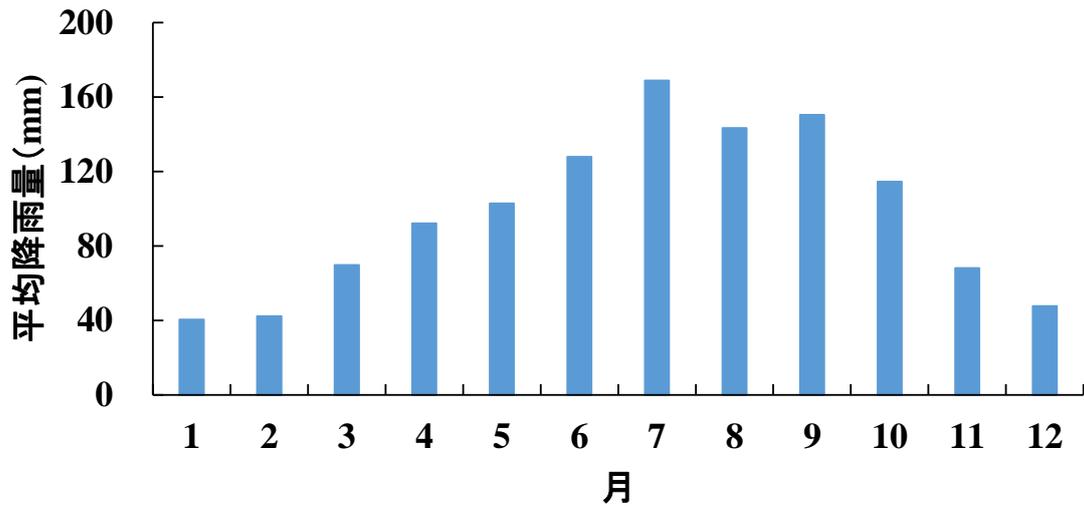


図 2-8 1978~2014 年にアメダス古川観測所における月平均降雨量

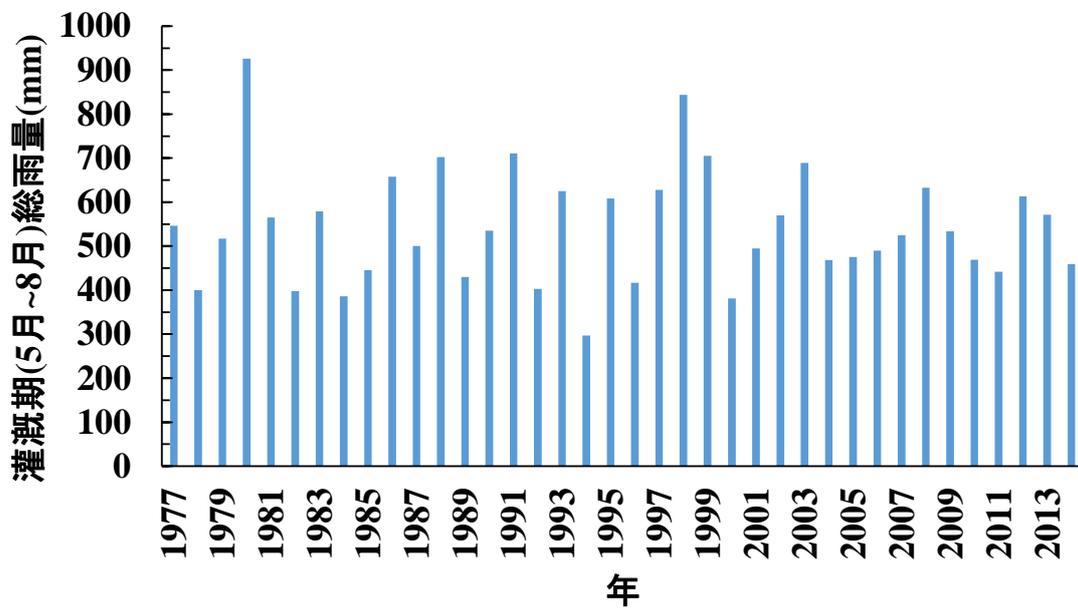


図 2-9 1978~2014 年の灌漑期 (5~8 月) における総降雨量

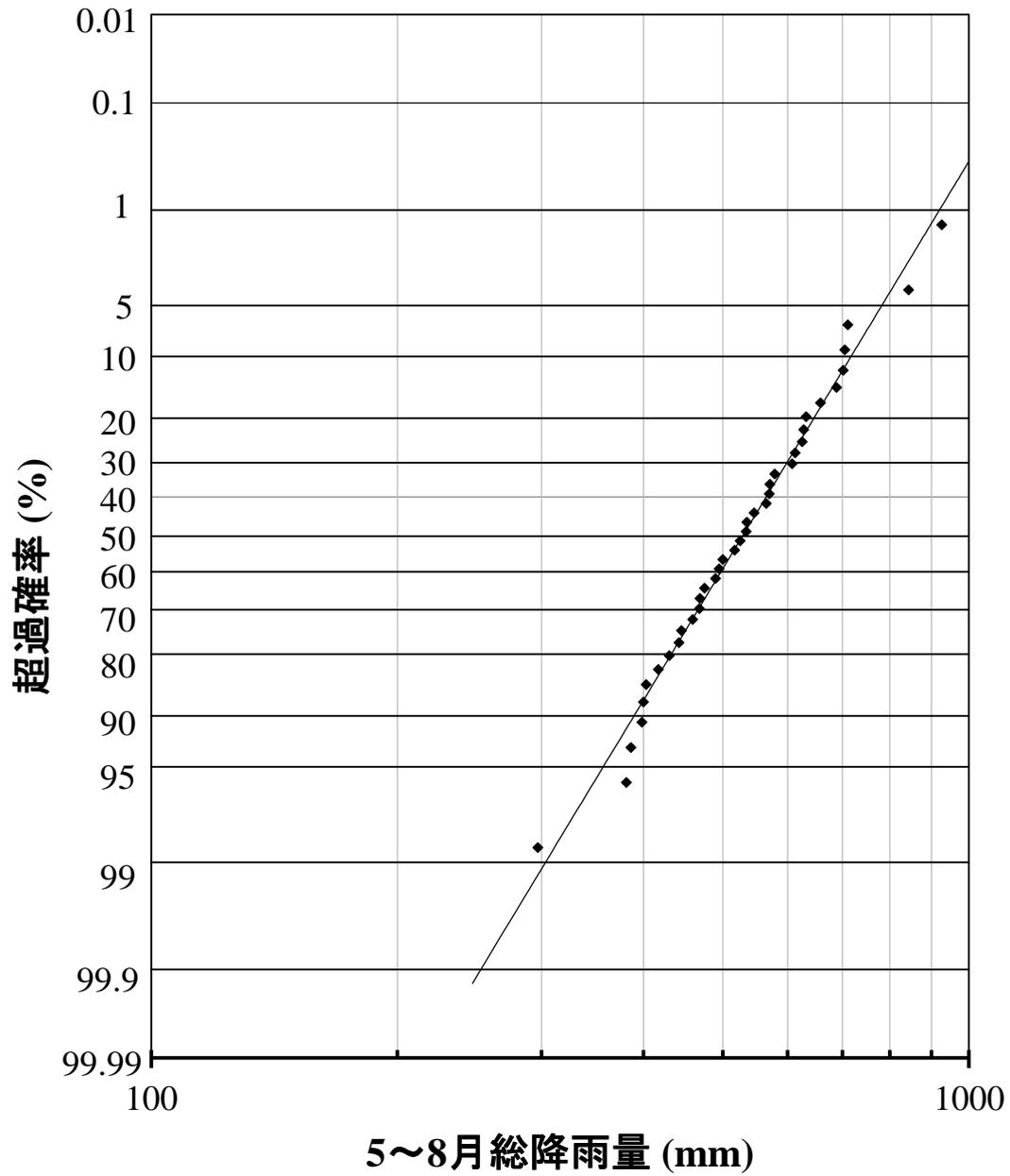


図 2-10 Hazen Plot 法による超過確率分布

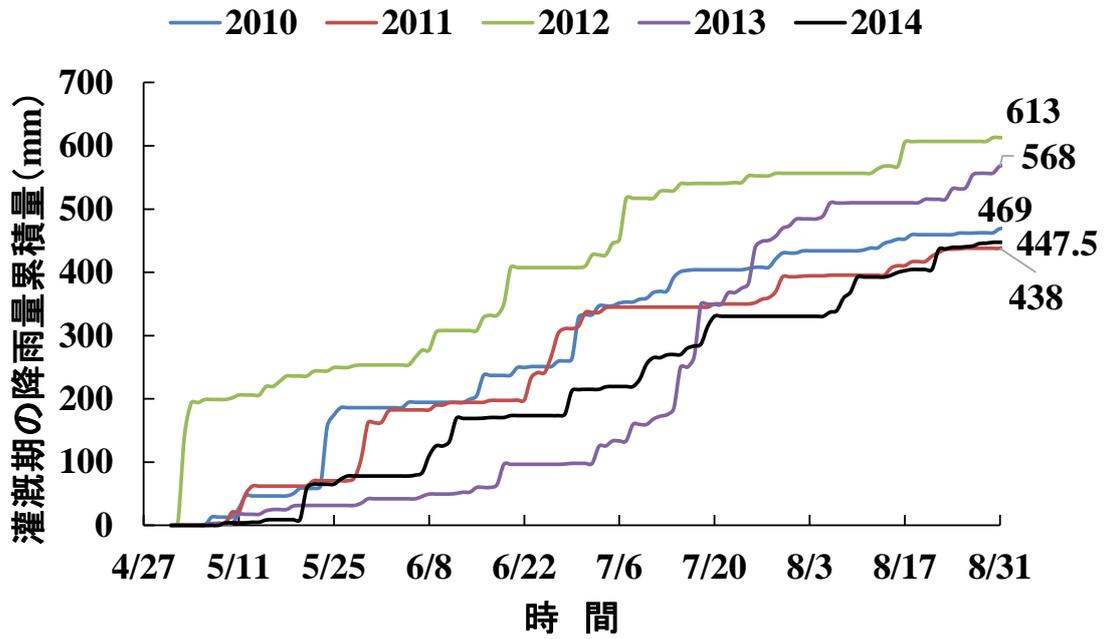


図 2-11 2010～2014 各年の灌漑期における降雨の累積量

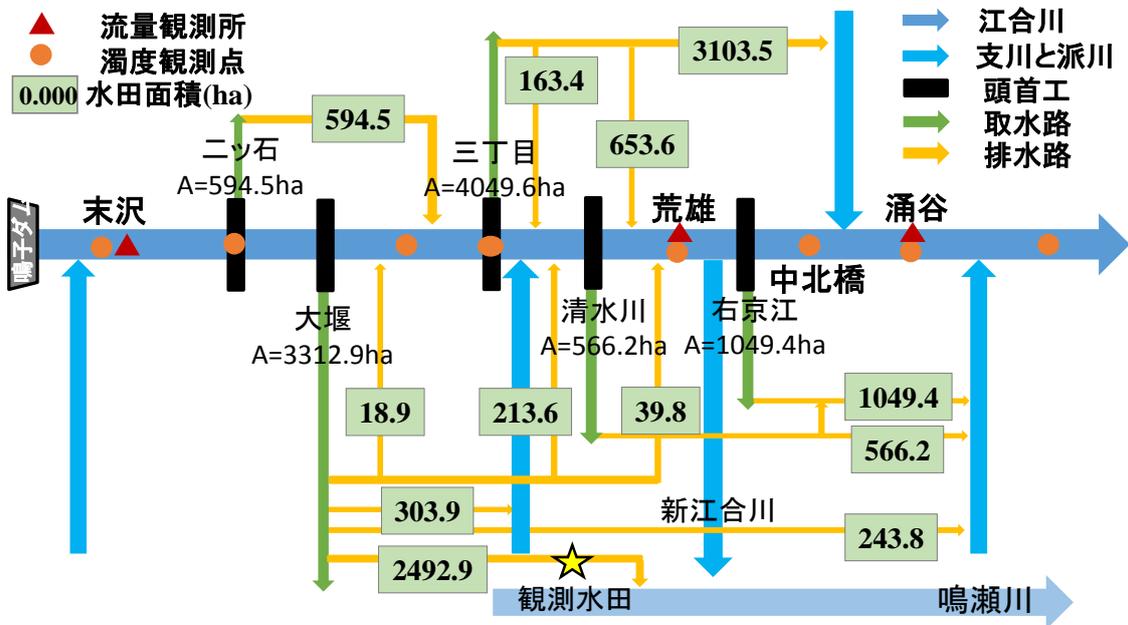


図 2-12 農業用水の取排水系統

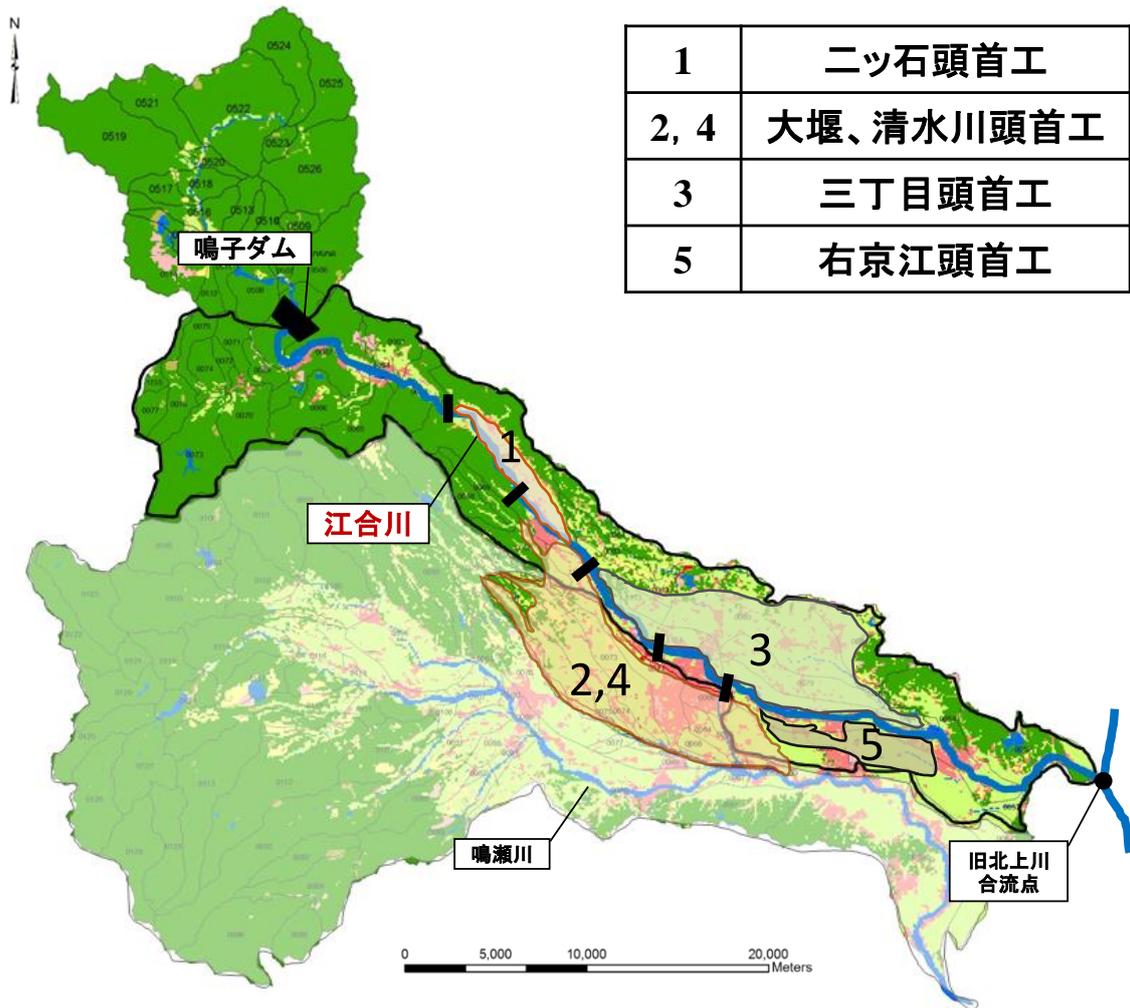


図 2-13 各頭首工が灌漑する水田の範囲

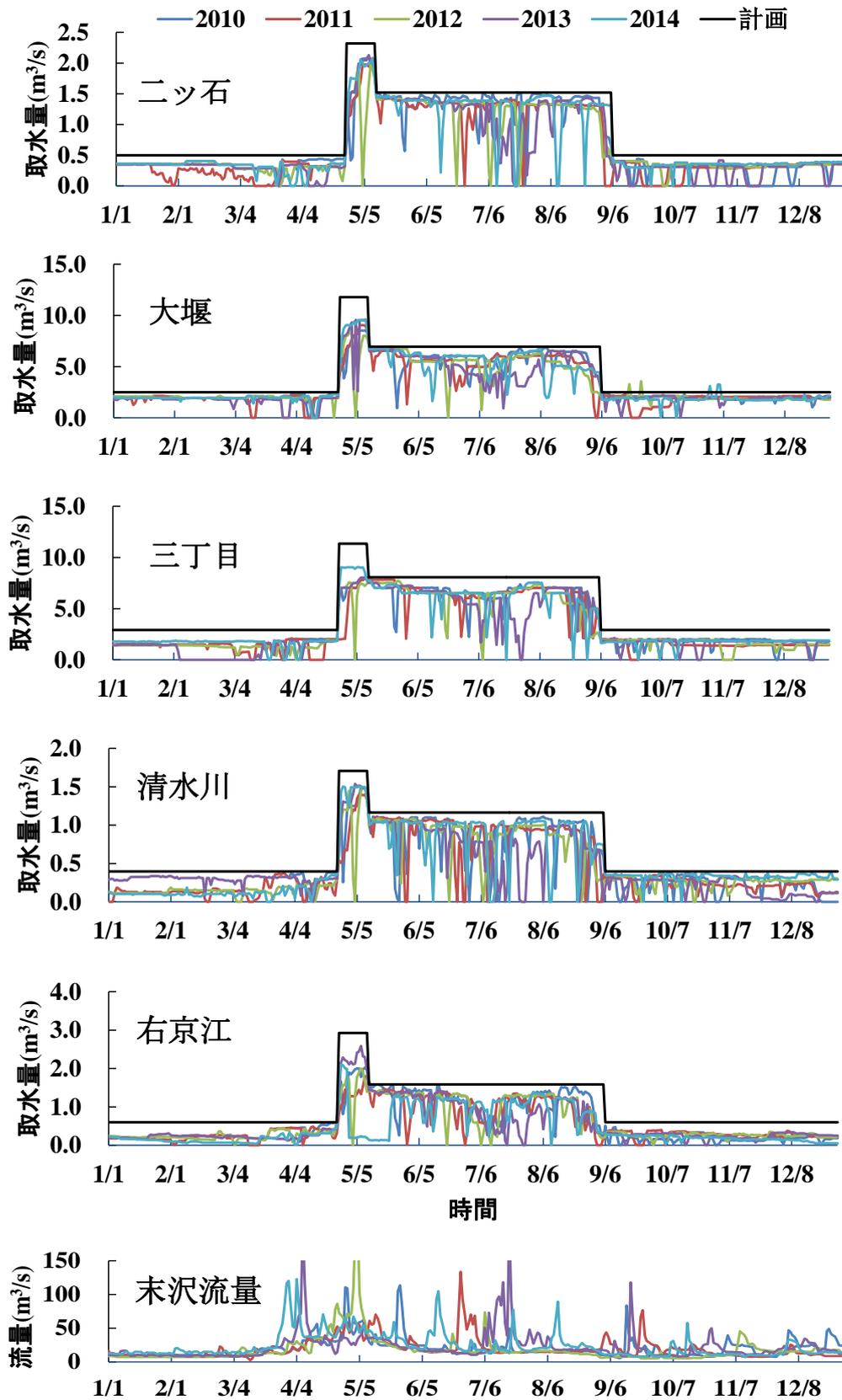


図 2-14 2010~2014 年に各頭首工の取水量

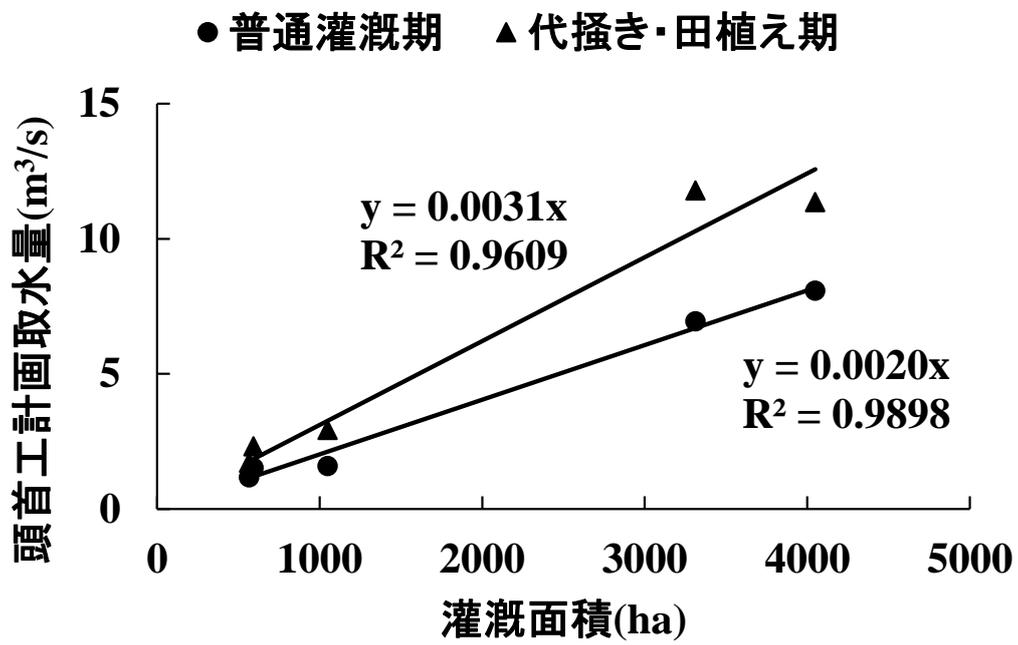


図 2-15 頭首工計画取水量と灌漑面積の関係

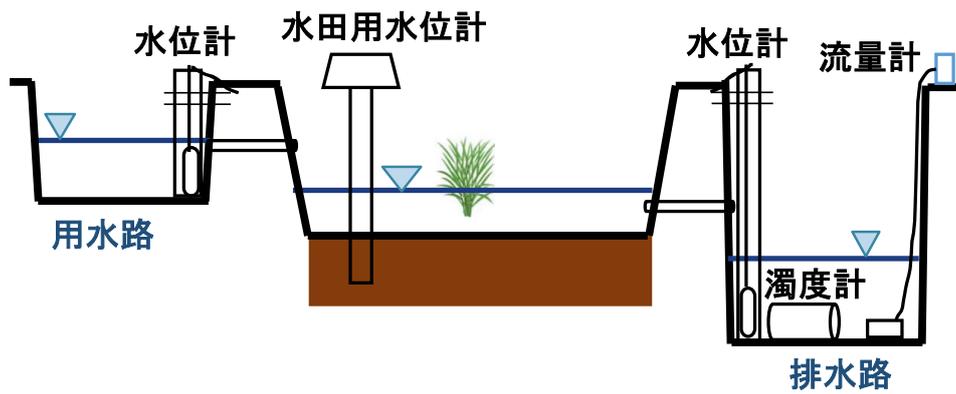


図 2-17 観測水田における計測装置

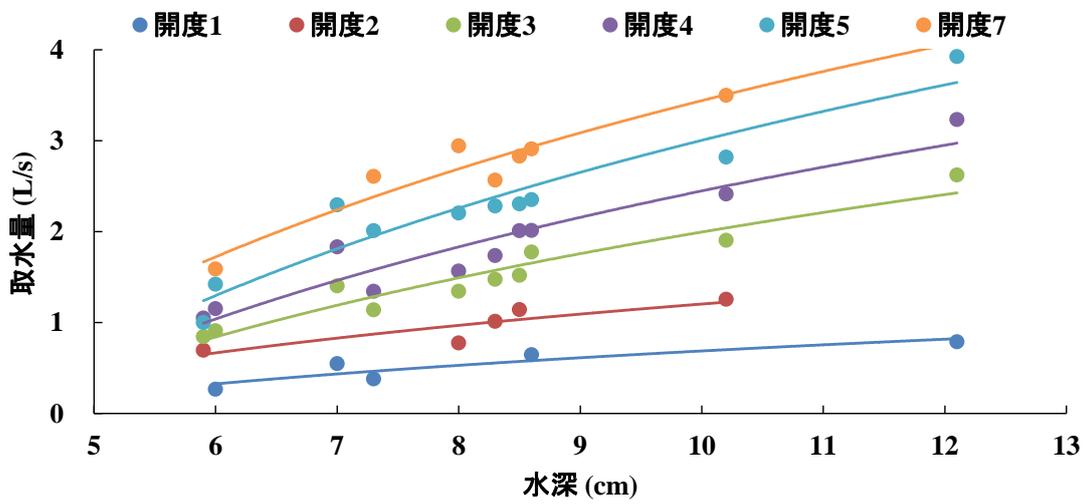


図 2-18 水田取水量～取水口回転開度、用水路水深の関係

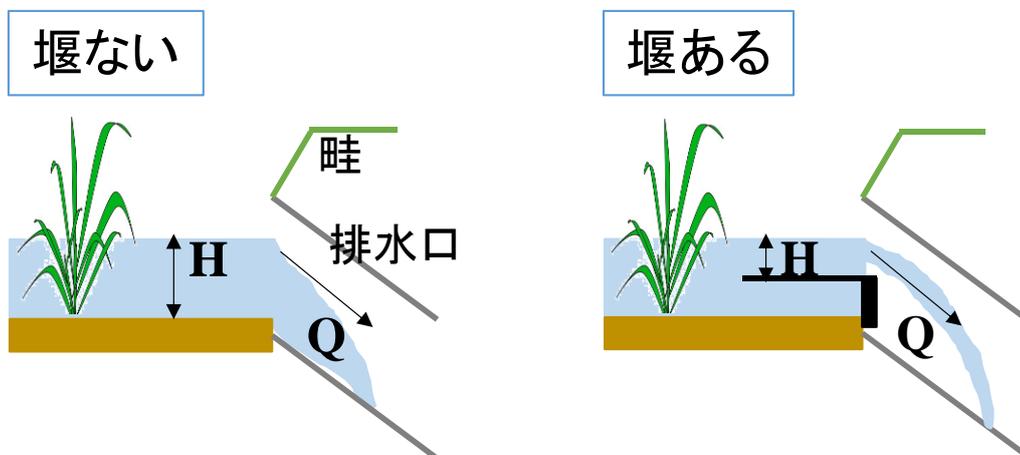


図 2-19 排水口における排水堰の状態

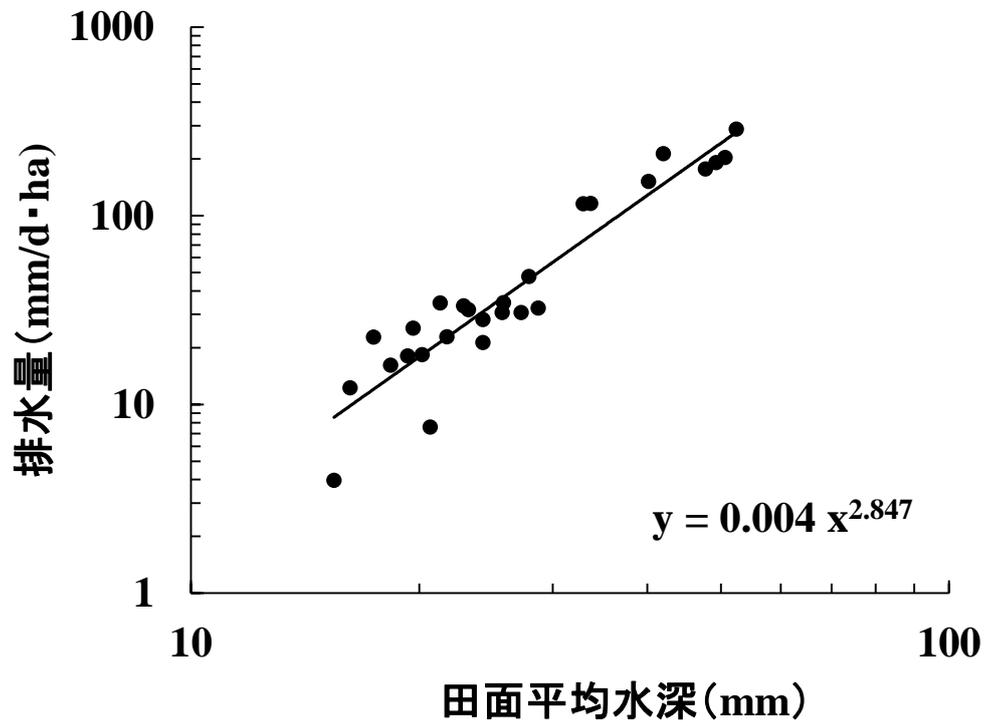


図 2-20-a 排水量と水田平均水深の関係

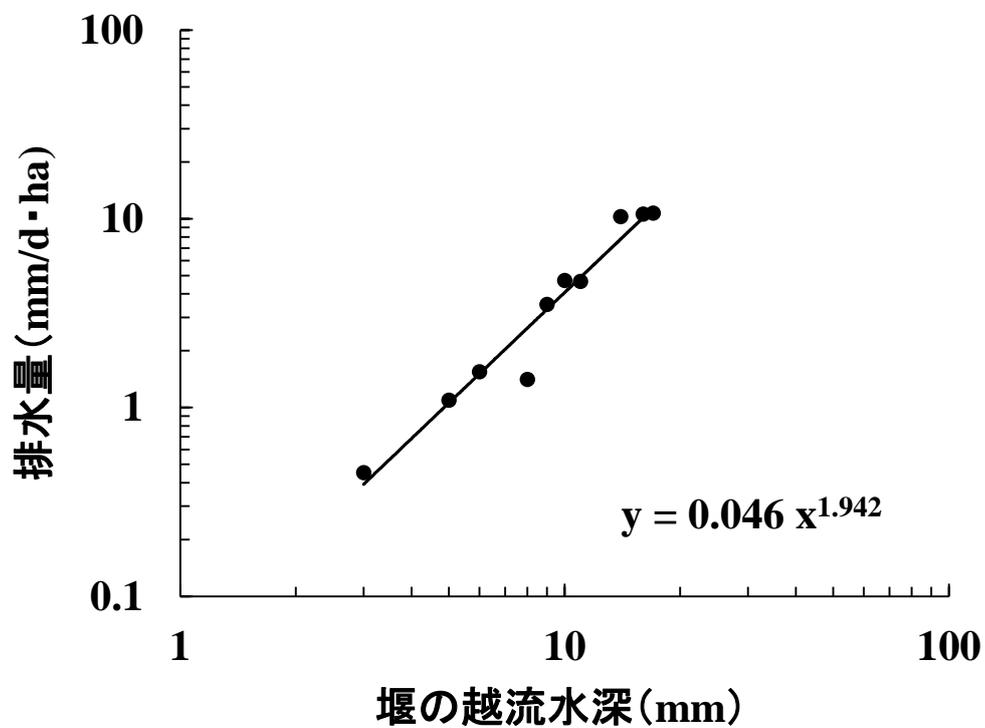


図 2-20-b 排水量と越流水深の関係

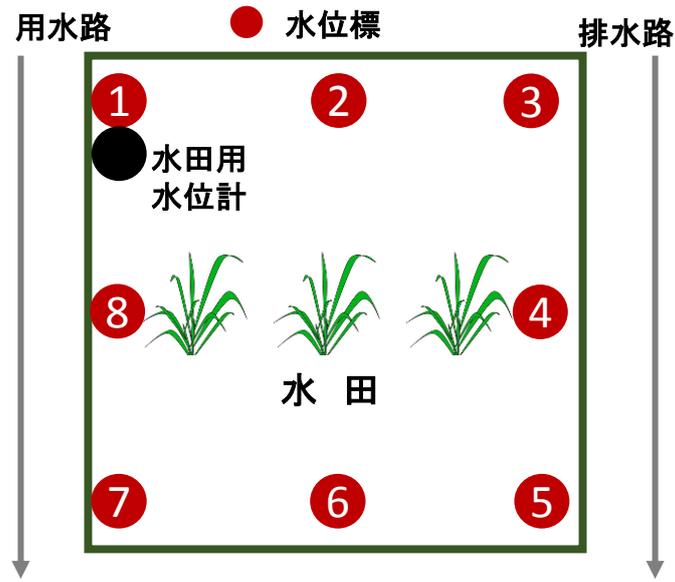


図 2-21 水位標の位置

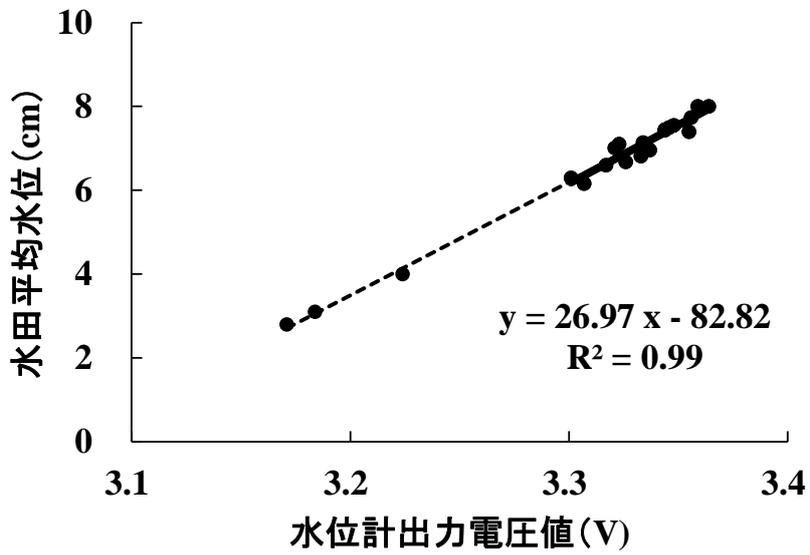


図 2-22 水田平均水深と電圧値の関係

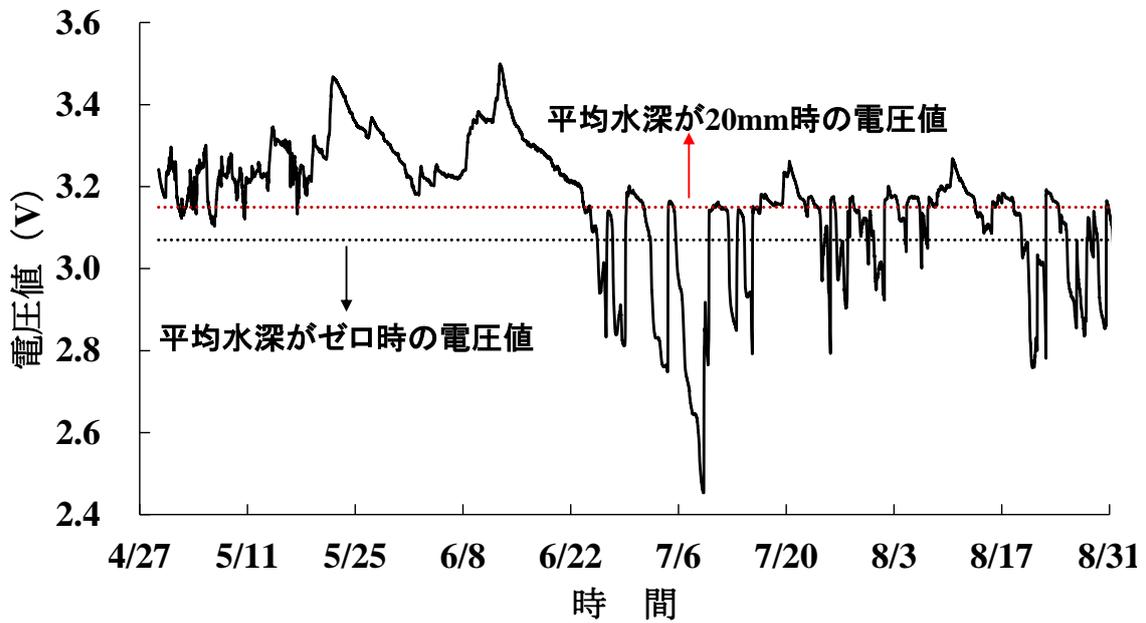


図 2-23 観測期間における水位計出力電圧値

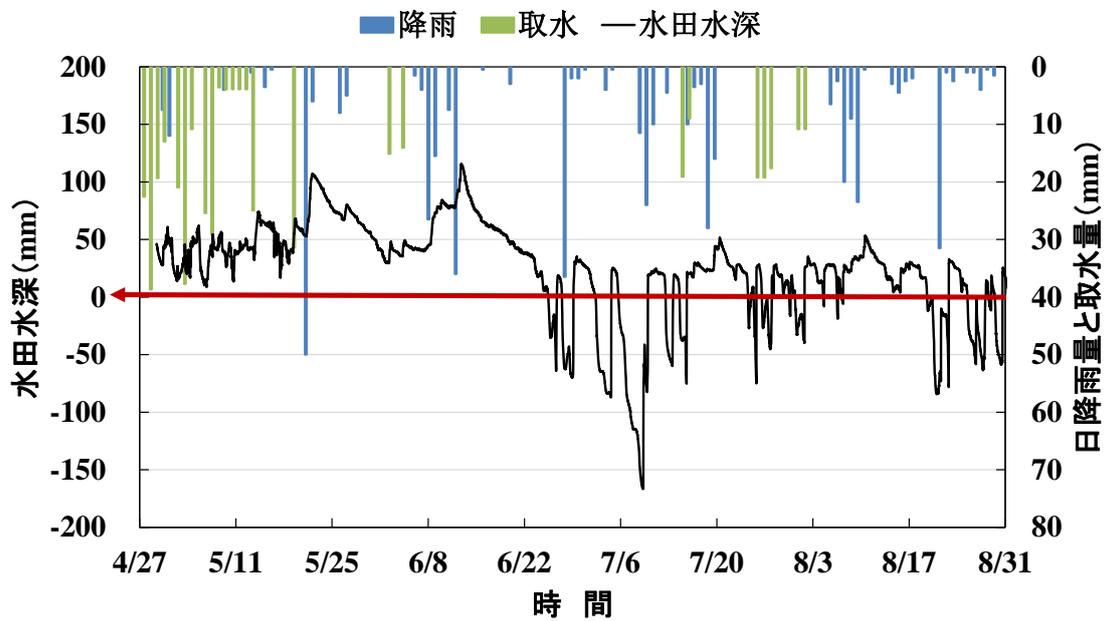


図 2-24 水田水深の計測結果

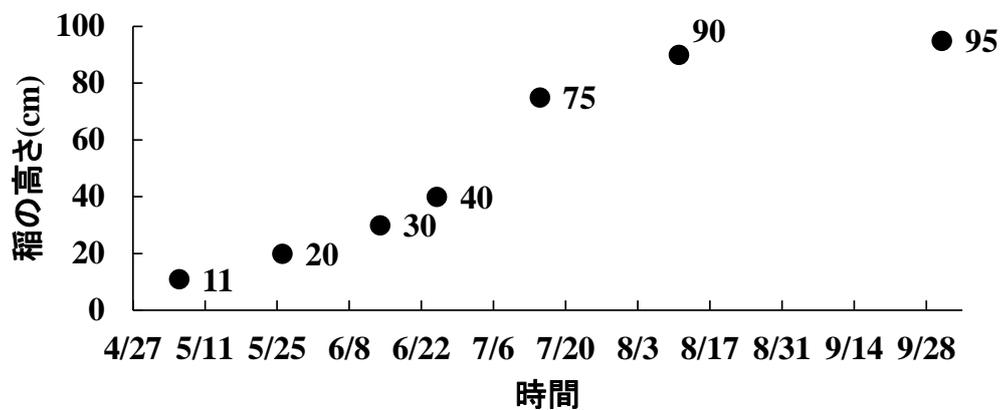


図 2-25 稲高さの調査結果

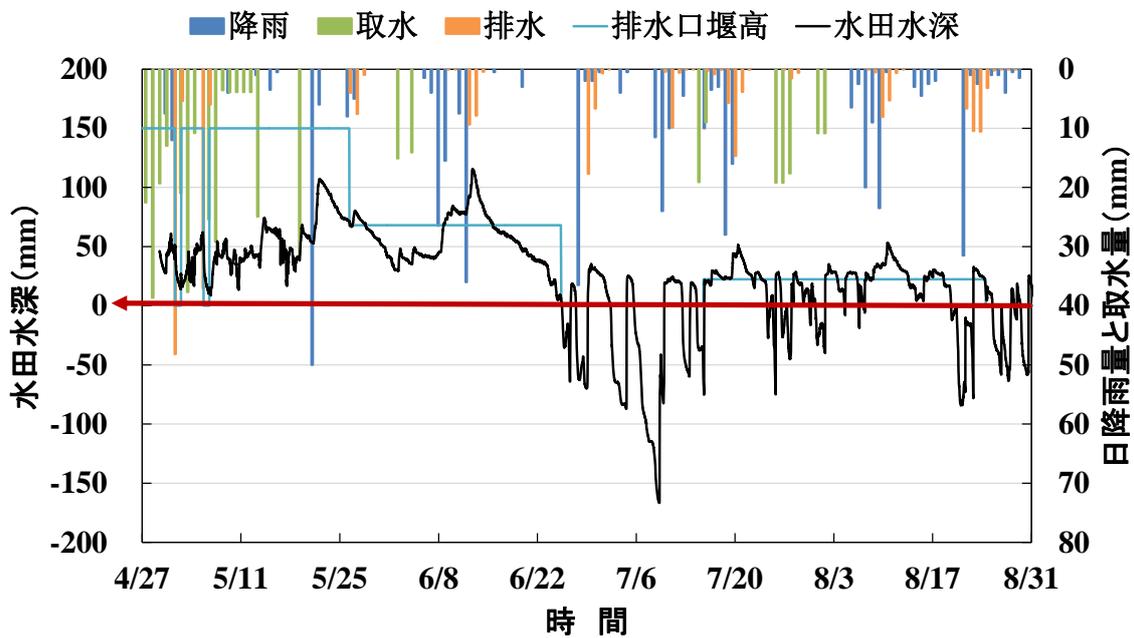


図 2-26 観測結果のまとめ (取・排水量、水田水深、堰高など)

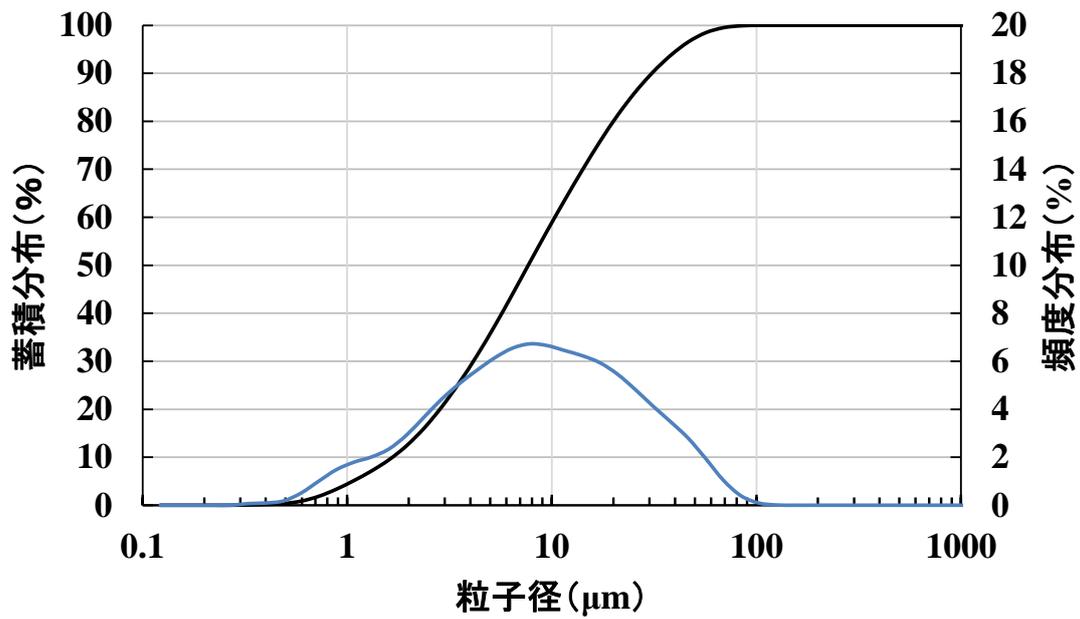


図 2-27 水田土壌の粒度分布

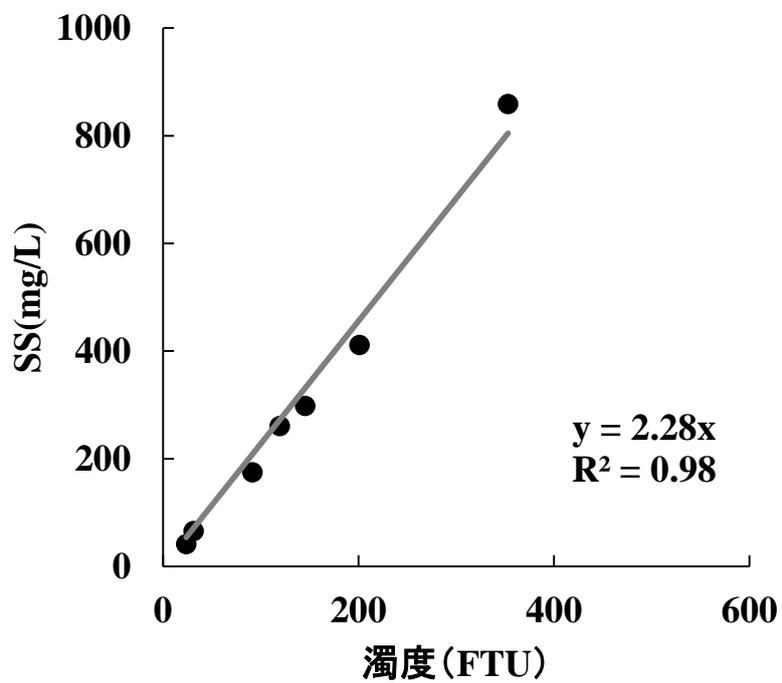


図 2-28 水田土壌の濁度と SS の相関

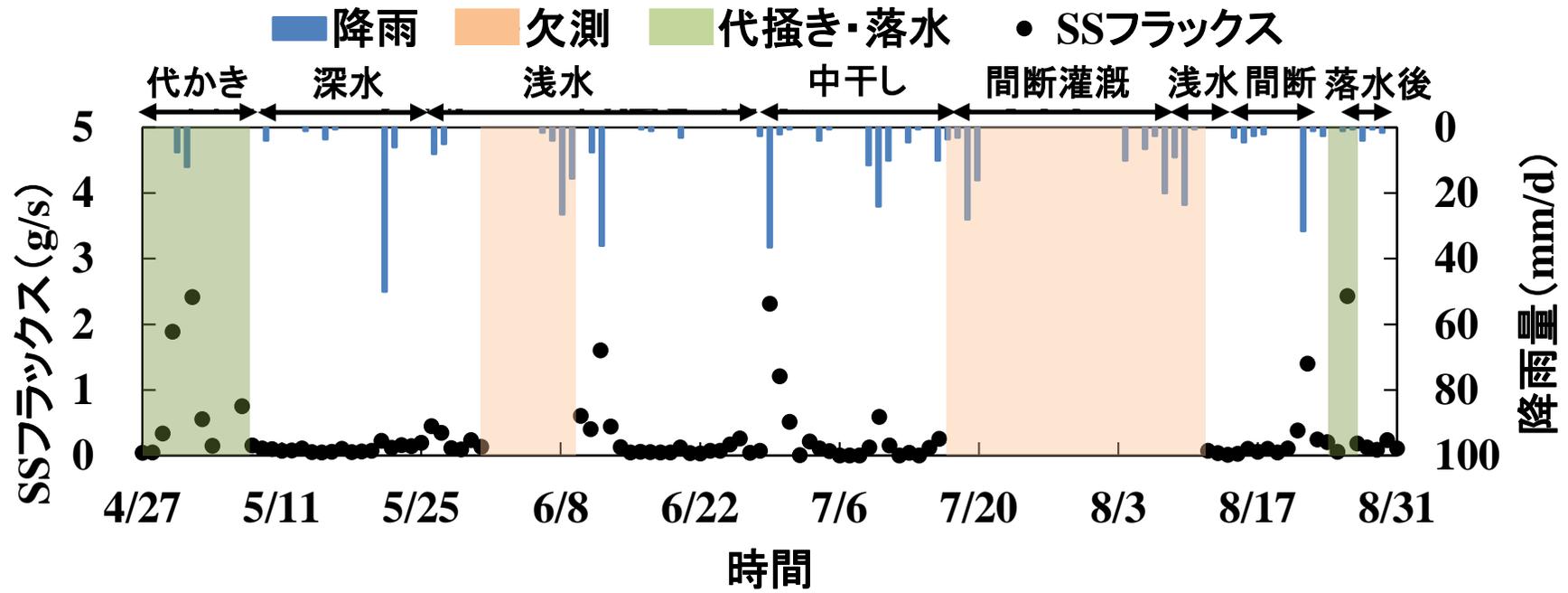


図 2-29 排水路内の SS フラックス



写真 2-1 観測水田と灌漑区画の平面図



写真 2-2 取水口の仕組み



写真 2-3 排水口の仕組み



a



b



c



d

写真 2-4 計測装置の様子

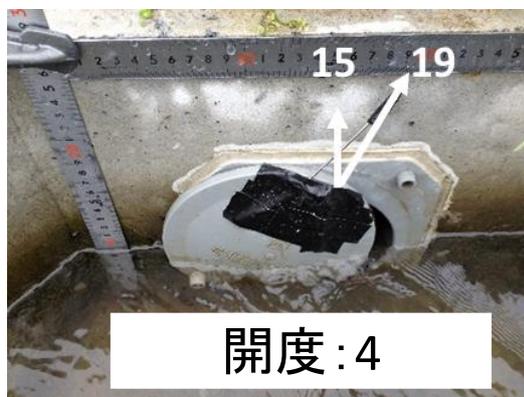


写真 2-5 取水口設置の様子



写真 2-6 水田側で水収集の様子



写真 2-7 水位標の設置様子



写真 2-8 代かき後の水田様子 (左：荒代 右：植代)



写真 2-9 田植え時に苗の様子



写真 2-10 稲の様子

第3章

水田灌漑が河川流量に及ぼす影響

3.1 本章の概要

本章では、観測水田での水収支を解析し、水田の取排水が河川流量に及ぼす影響を検討する。3.2では水田水収支モデルを説明する。すなわち水収支式、蒸発散量の推定方法、地中浸透量の逆算結果を示すとともに、この手法により推定した水田水深と観測水深を比較し考察する。3.3では水田シミュレータについて説明する。まず営農者が実際に行った取排水操作を分析し、稲作カレンダーおよび天候への依存性をルール化する。続いて気象データのみを入力条件としてシミュレーションを行い、水田観測水深との比較からシミュレータの妥当性を検証する。3.4では江合川における水田取排水の分布を考慮して水田シミュレータを適用し、推定された流量縦断変化を河川流量観測結果と比較し、シミュレーションの妥当性を検討する。3.5では灌漑期に水田への降雨がなかった場合について水田管理シミュレータを運転し、河川流量が特に減少する恐れの高い時期と区間を推定し考察する。

3.2 水田の水収支

3.2.1 水田水収支モデル

水田の水収支を図3-1に概念的に示す(吉田, 1981)。流入成分は用水路からの取水と降雨である。前者は必要に応じて営農者が行い、後者は自然条件に依存する。流出は、排水路への排水、田面およびイネからの蒸発散、地下および畦畔への浸透の3つの成分からなる。排水は営農者が必要に応じて行う。蒸発散は自然条件に依存するが、これについては1.2.2の(1)に述べたように過去に種々の研究がある。また浸透は1.2.2の(2)に述べたように過去に観測事例があるものの、地盤条件等に左右されるために不確定である。なお営農者が行う取水と排水は、基本的に稲作カレンダーに基づいて行われる。

図3-1に基づき、一枚の水田における水収支を式3.1のようにモデル化する。なお以下では長さの単位としてmm、時間の単位としてdayを用いている。

$$\alpha_0 \frac{dH}{dt} = q_{in} + R - q_{out} - ET - P \quad (3.1)$$

ここに、 H は水田水深(mm); q_{in} は単位面積当たりの日取水量; R は日降雨量; q_{out} は単位面積当たりの日排水量; ET は日蒸発散量; P は一日当たりの浸透量; α_0 は有効面積率である。このうち P と α_0 は経験的に定められる。

本章では式3.1に基づいて水田水収支を検討するが、水田水深、取水量、排水量の実測値は前章の図 2-26 に示している。また降雨量にはアメダス古川観測所(図 2-5)のデータを用いた。蒸発散の計算に必要な気象データも古川観測所での観測値を用いた。なお古川観測所の位置は、図 2-5 に示すように観測水田から北西方向に約 5km である。

3.2.2 蒸発散の推定

蒸発散(ET)については、近年最も一般的に実用されている FAO Penman-Monteith 法と作物係数法(Allen, 1998)により日単位で算定した(Dolman, 2005)。計算式は以下に示す。

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3.2)$$

$$ET = K_c \cdot ET_0 \quad (3.3)$$

ここに、 ET_0 は基準蒸発散量; R_n は正味放射量($\text{MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$); e_s は気温 T における飽和水蒸気圧(kPa); e_a は空気の水蒸気圧(kPa); Δ は飽和水蒸気曲線の傾き ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); γ は乾湿定数($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); u_2 は 2m での風速(ms^{-1}); T は日平均気温($^\circ\text{C}$, 日最大気温と日最小気温の平均値); G は地中熱流量; K_c は作物係数である。

(1) 基準蒸発散量(ET_0)各項目の計算式

正味放射量 R_n の値は Allen ら(1998)の方法により日照時間などから求めた。

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (3.4)$$

ここに、 R_{ns} は下向き短波放射量($\text{MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$); R_{nl} は下向き長波放射量($\text{MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$)であり、それぞれ式 3.5、式 3.6 で表される。

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \quad (3.5)$$

ここに、 R_s は全天日射量; α はアルベド(地表面の日射反射率)であり、水面の場合は 0.08、作物の場合には 0.23 とされている((Allen, 1998))。

$$R_{nl} = \sigma \left[(T_{\max,K}^4 + T_{\min,K}^4) / 2 \right] \left(0.34 - 0.14 \sqrt{e_a} \right) \left(1.35 R_s / R_{so} - 0.35 \right) \quad (3.6)$$

ここに、 σ は $4.903 \times 10^{-9} \text{MJK}^{-4} \text{m}^{-2} \text{day}^{-1}$; $T_{\max,K}$ は日最大絶対温度 ($T_{\max} + 273.16$, T_{\max} は日最大温度); $T_{\min,K}$ は日最小絶対温度 ($T_{\min} + 273.16$, T_{\min} は日最小温度); R_{so} は快晴日の全天日射量(日平均)である。

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} z) R_a \quad (3.7)$$

ここに、 R_a は大気上端の水平面日射量 ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$); z は観測所の標高である。

$$R_a = 24 \times 60 \pi G_{sc} d_r (\omega_s \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s) \quad (3.8)$$

$$d_r = 1 + 0.033 \cos(2\pi / 365 J) \quad (3.9)$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \quad (3.10)$$

$$\delta = 0.409 \sin(2\pi / 365 J - 1.39) \quad (3.11)$$

ここに、 G_{sc} は太陽定数 ($0.0820 \text{ MJm}^{-2} \text{min}^{-1}$); d_r は太陽地球間の相対距離; ω_s は日没の時角 (rad); ϕ は計算地点の緯度; δ は計算日の赤緯; J は 1 月 1 日からの通算日数である。

$$R_s = [a_s + b_s (n / N)] R_a \quad (3.12)$$

$$N = 24 \omega_s / \pi \quad (3.13)$$

ここに、 a_s と b_s は係数で、それぞれ 0.25 と 0.50 と設定した。 n は日照時間 (h); N は可照時間 (h, 日の出から日没までの時間)。

飽和水蒸気圧 e_s 、空気の水蒸気圧 e_a 、飽和水蒸気曲線の傾き Δ 、乾湿定数 γ 及び 2m での風速 u_2 は下式より計算する。

$$e_s = [e^0(T_{\max}) + e^0(T_{\min})] / 2 \quad (3.14)$$

$$e_a = [e^0(T_{\max}) \cdot RH_{\min} / 100 + e^0(T_{\min}) \cdot RH_{\max} / 100] / 2 \quad (3.15)$$

$$e^0(T) = 0.6108 \exp[17.27T / (T + 237.3)] \quad (3.16)$$

$$\Delta = 4098 \{ \exp[17.27T / (T + 237.3)] \} / (T + 237.3)^2 \quad (3.17)$$

$$\gamma = 0.665 \times 10^{-3} P \quad (3.18)$$

$$P = 101.3[(293 - 0.0065z)/293]^{5.26} \quad (3.19)$$

$$u_2 = u_z[4.87/\ln(67.8z - 5.42)] \quad (3.20)$$

ここに、 RH_{min} と RH_{max} は日最大相対湿度と日最小相対湿度(%); P は大気圧(KPa); u_z は風速計設置地上高さ(m)。

なお、長期的な収支を計算する場合には G は R_n に比較して無視できると考えられているので(Burba et al, 1999)、本研究でも $G=0$ とした。

以上の計算に必要な気象データについては、アメダス古川観測所の観測データを用いた。図3-2に気温、相対湿度、風速の日平均値及び日照時間を示す。また、観測所の緯度は北緯38.6°、標高は28m、風速計の設置地上高さは6.5mである。

(2) 作物係数の設定

作物係数は一般に図3-3のように与えられる。すなわち、初期、発展期、中期～成熟期、晩期の各成長ステージの期間と、3つの値(初期: $K_{c\ ini}$ 、中期: $K_{c\ mid}$ 、晩期末: $K_{c\ end}$)を作物ごとに決定する必要がある。初期は作物を植えてから10%地表を覆う程度まで、発展期は地表を覆う程度が10%から100%までの期間、中期は地表面を完全に覆う状態から成熟までであり、晩期は成熟から収穫までの期間と定義されている(Allenら, 1998)。

そこで観測水田において生育状況を定期的に調査し、また稲作カレンダーにおける対応する農作業段階を営農者に聞いた上で、各成長ステージを表3-1のように定めた。また各期の作物係数についてはAllenら(1998)により与えた(表3-1)。その結果を図3-4に示す。ただし、この結果は田面が湛水している場合なので、土壌面が露出している中干し期などにおける ET については、灌漑葦原乾燥期におけるLinら(2013)の実測値を参考に、 $ET=0.5ET_0$ とした。

(3) 蒸発散量の計算結果

蒸発散量の計算結果を図3-5に示す。赤点線は基準蒸発散量 ET_0 、青点線は蒸発散 ET である。毎日の蒸発散量は気温、日照時間、降雨などの気象条件により大きく変動していた。5月～8月末の平均蒸発散量は4.24mm/dayで、月ごとの平均蒸発散量はそれぞれ4.35 mm/day、4.21 mm/day、4.54 mm/day、3.86 mm/dayである。

3.2.3 浸透量と有効面積率の推定

(1) 浸透量(P)

田面が湛水し、且つ取水量(q_{in})、排水量(q_{out})、降雨量(R)が共にゼロの期間を選択し、その期間の水田水深の日減少量(ΔH)と、前述の方法で求められた蒸発散量(ET)を式3.1に代入して浸透速度を求めた。算定対象とした期間を図3-6に赤色で示す。算定結果を表3-2に示す。以下ではその平均値として $P=2.00\text{mm/day}$ を用いることとした。

(2) 有効面積率(α_0)

田面が湛水している場合、イネの茎の面積率を b とすると、有効面積率は $1-b$ である。しかし実際には b は 0.035 (一株の直径は約 5cm) 程度であるので無視し、湛水期間では $\alpha_0=1$ とした。一方、地表が露出している場合には、 α_0 は地下水面位置における土壌有効空隙率となる。土壌有効空隙率は土壌特性および含有水分に依存するので、厳密には 1 つの値に定めることはできないが、ここでは便宜的に一つの値で近似できるものと仮定し以下の方法で求めた。田面が露出し、且つ取水量(q_{in})、排水量(q_{out})、降雨量(R)が共にゼロの期間 (図 3-7 に赤色で示す) において、先に推定された浸透量(P)と蒸発散量(ET)の推測値と、観測された水田水深の日減少量 (ΔH)から、次式により逆算した。その結果、 $\alpha_0=0.15$ を得た。

$$\alpha_0 = \frac{ET + P}{\Delta H} \quad (3.21)$$

3.2.4 計算結果

4月27日から8月31日までの全観測期間について、前節のモデル方程式に気象条件を代入して水田水深の時間変動を計算した。その結果とともに図3-8に示す。これから自由水面が存在する場合に計算結果と観測結果はよく一致することが、田面が乾燥している場合の精度は多少落ちることが分かる。これは有効空隙率の仮定がやや不正確であることと、田面の不整による影響があるものと思われる。すなわち実際の田面は平均高さから 20mm ほどの凹凸を持つため、田面露出の判定に同程度の誤差が生じる。なお水田水位計は観測水田の端に置かれている。このような問題はあつたものの、式3.1は水田水位の変動を比較的よく再現していると判断した。そこで、次節においては、以上の方法に基づき、水田管理シミュレータを構築することから自由水面が存在する場合にはよく一致することがわかる。田面が乾燥している場合の精度は多少落ちるが、これは地下水とした。

3.3 水田管理シミュレータ

3.3.1 基本の設計概念

1.1.3 で述べたように、営農者は稲作カレンダーに従って水田水深を管理しようとする。しかし式3.1の中の降雨と蒸発散量はときどきの天候によって変動する。そこで営農者は、各作業段階における目標水深に近付けるために取水・排水を調節することになる。言い換えると、営農者の行う取水・排水は、稲作カレンダーの作業段階と、各時点での目標からのズレに対して応答することになる。

そこで、各作業段階における目標水深と用排水速度などをルール化することができれば、気象

条件に対する水田水深の応答を直接求めるモデルができることになる。このようなモデルを本研究では“水田管理シミュレータ”と呼ぶことにする。図 2-26 に示した水田水深の観測結果と、営農者へのインタビューをもとに、次節に述べるように営農者の行動をモデル化した。

3.3.2 水田操作のルール化

ルール化に必要なパラメータは、代かき・田植え、深水、浅水、中干し、間断灌漑の各作業段階における水田水位の目標値と、継続時間、それに近付けるための取水時間帯と取水速度、及び排水口の堰高である。なお 2.3.3 に述べたように、実際の田面は±20mm 程度の凹凸があるので、田植えのように水面を田面すれすれにしたい場合には+20mm に設定するものとした。

取水時間帯と取水速度については営農者へのインタビューに基づき、以下のように定めた。営農者はほぼ毎日、早朝と昼頃に水田の状態をチェックしている。そこで水深が目標値に対して不足している場合は、対応する水量を午前 6 時から 12 時の 6 時間で取水するものと設定した。なお、取水開始日、代かき期、田植え期のように特殊な取水を行う期間では、必ずしも上記の時間ではないので、その場合は 2014 年の実績とした。

稲作カレンダーの各作業段階における「目標水深」、「水深持続時間」及び「排水口の堰高」などの操作ルールを、稲作カレンダーの段階ごとに以下にまとめる(図 3-9)。

(1) 取水開始

冬季には田面に給水をしていないので地下水位がさがり、土壌は非常に乾燥している。そこで土壌を飽和状態になるまで数日かけて給水を行う。観測水田の営農者の話に基づき、シミュレータでは取水開始日の午前 6 時から翌日の 12 時までの 30 時間に取水口をずっと開放するものとした。また取水開始時の地下水位置はそれ以前の降雨状況によるが、ここでは-100mm と仮定し、また目標水深は 2014 年の実績に基づき+50mm とし、この水位を 1 日間を維持した後、4 日目に代かきを行うものとした。なお取水開始から代かきまでの期間には排水口は完全に閉められている。

(2) 代かき

代かきは表土を細かく砕き、丁寧にかき混ぜて、土の表面を平らにする作業である。土塊の破碎を中心とする荒代と、田面を平坦に整える植代の 2 回からなる。なお代掻きの効能は、水漏れを防止すること、苗を植えやすくすること、苗の活着と発育を良くすること、肥料や雑草を埋め込むこと、土壌中に溜まっていた有害ガスを抜くことなどである。

荒代では、前日に水深を 30mm に設定し、当日の朝に 50mm になるように微調整した後、代かきを行い、静穏状態を 1 日保って土砂を沈殿させてから、堰を取り除いて排水するものとする。排水の時間帯は午後 5 時から翌日の 12 時までである。植代は翌日の排水と共に行われる。続いて、水深を 50mm になるように、植代を行う当日の午後 13 時から翌日の 6 時まで取水するものとする。その後 2 日間 50mm の水深を維持してからまた堰を取り除いて排水するものとする。

(3) 田植え

田植えが取水開始の 10 日後の午前中に行うものとする。田植え時の水深を 20mm に設定した。

(4) 深水管理

植え終わった苗は深水管理により寒さから保護しなければならない。そこで田植えを行った日の午後 1 時から翌日の午前 6 時までの 17 時間に取り水を行って水位を上昇させる。深水管理の目標水深は 50mm とし、開始後 6 日間はこの水深を維持するよう小刻みに取水する。深水管理の 7 日目に除草剤を散布する。除草剤を含んだ水が河川に流れると河川水質に影響を与えるので、散布後の 7 日間は排水を行わず、静穏状態を保つものとする。

その後も深水管理を継続するが、自然の蒸発散と地下浸透による水位低下に小まめに対応する手間を省くために、除草剤散布直前に水深を 75mm まで上昇させておき、その後は、水深が 35mm から 70mm 間になるように取水を適宜行う。なお、この期間は排水口が完全に閉じられているので、強い雨が合った場合は水深が 70mm 以上になることもある。

(5) 浅水管理

深水管理を合計で 20 日行った後に浅水管理に移行し、これを 30 日間を継続する。浅水期間では、水深を 35mm から 50mm の間になるように取水するものとした。ただし排水堰の高さは実績に基づき 70mm とする。したがって蒸発量と地下浸透の速度を上回る降雨があれば、水位は 50mm を超えることもある。

(6) 中干し

中干しで田面にヒビが入るまで乾かす。これにより土中に酸素が補給され根腐れが防がれる。また土中の有害ガスが抜け、根の活力を高まり、過剰分けつが抑制される。

田植えから 50 日後の浅水管理終了日に堰を取り除いて排水し、10 日間の中干しを始める。中干し期には取水を一切行わないが、降雨により田面が浸潤することがある。その場合は土壤が露出した日数の累積が 10 日になるまで行うものとする。

(7) 間断灌漑と出穂期の浅水管理

間断灌漑では、湛水と落水を数日ごとに繰り返し、水と酸素の両方を供給して根の活力を維持する。

中干し終了後に水深 20mm になるまで取水し、その後は自然の蒸発散や浸透に任せて水深を減少させ、土壤が露出した次の日に再び 20mm まで水深を上げる。このプロセスを合計 25 日間繰り返すものとする。なお排水堰の高さは 20mm とし、降雨による余剰水は堰を越えて排出される。

間断灌漑を開始して 30 日経つ頃にイネは出穂を始める。出穂の時期にはイネは生育期間中で最も水を必要とする。そこで出穂期の 5 日間だけは浅水管理を行うものとする。この時の管理水深は 20mm である。なお出穂期の浅水管理後の間断灌漑は 10 日間行い、その後に落水させる。

(8) 落水後

落水後は排水口を完全に開放し、水田水深は、降雨、蒸発散、浸透及び降雨排水により自然に変動するものとする。

上述のルールにより、現場で水田の取水量と排水量を測らなくても、気象条件を与えるだけで、水田の水深をシミュレーションできることになった。また、水田をシミュレーションする同時に、取水量と排水量も自動的に計算できる。

3.3.3 水田水深の推定

上述のルールにより、現場で水田の取・排水量を逐一測定しなくても、水田状態を推定できる。言い換えれば、気象条件を与えるだけで、水田水深および取・排水量をシミュレーションできる。このモデルを本研究では「水田管理シミュレータ」という。

水田管理シミュレータによる水田水深の再現性を確認するために、現地観測を行った 2014 年についてシミュレーションを行った。シミュレーションの基礎式は式 3.1 の収支方程式であり、取水量および排水量は 3.3.2 に述べたルールにより決定される。その他の入力データ(降雨量、蒸発散量、浸透量)は 3.2.4 に述べた再現計算と同様である。計算期間は取水開始日の 4 月 27 日から落水後の 8 月 31 日までと設定した。

シミュレーション結果を図 3-10 にオレンジ線で示す。黒線は観測結果である。これから自由水面が存在する場合にはよく一致することがわかる。田面が乾燥している場合の精度は多少落ちるが、これは 3.2.4 で述べた理由によると思われる。実際、図 3-10 に示した結果は、3.2.4 の図 3-8 とほぼ同じである。

そこで、2010～2013 年の気象条件のもとで水田管理シミュレータを適用した結果を図 3-11 に示す。なお灌漑の開始日は 2014 年と同様に 4 月 27 日とした。どの場合も稲作カレンダーに従っているため、大局的には同様の結果だが、細部は気象条件(特に降雨:図中の青色の棒グラフ)によって変化している。また、それにより取・排水量(それぞれ緑色と黄色の棒グラフ)や中干し期間も変化していることが分かる。

3.4 河川流量への影響

前節で述べた水田管理シミュレータは、営農者が稲作カレンダーに従い、農作業の各段階における望ましい田面水深になるように操作することを仮定している。その結果、営農者は、気象条件と現在の水田状態をもとに取排水量を定めることになる。前節では 1 枚の水田の観測結果(2 章)をもとに作成されたが、江合川流域における水稻栽培が共通の稲作カレンダー(古川農業協同組合, 2014)に従っていることから、本節では、この水田管理シミュレータを江合川全流域に適用し、水田が江合川の縦断的水量変化に及ぼす影響を検討する。

3.4.1 江合川流量変化の特徴

図 2-12 に示したように、江合川には末沢、荒雄、涌谷の 3 つの流量観測所がある。【末沢～荒雄】の区間には二ツ石頭首工、大堰頭首工、三丁目頭首工及び清水川頭首工と 4 つの頭首工があり、その中で大堰頭首工と三丁目頭首工の取水が卓越している。排水路の出口は 7 か所あるが排水する水田の面積は小さく、多くは【荒雄～涌谷】および【涌谷～旧北上川合

流点】の間に排水される。一方【荒雄～涌谷】の区間には右京江頭首工があるが、その給水水田からの排水は全て涌谷より下流に排水される。

図 2-3 に示した 2010 年～2014 年の流量観測値から、【末沢～荒雄】の流量差を求めた結果を図 3-12 に黒線で示す。なお両地点の間には 55km の距離があり、流量波形に時差が見られたので、波形相関が最大となるよう 6 時間の時差を設定した。その場合の平均位相速度は 2.55m/s である。この図より【末沢～荒雄】区間では灌漑期に河川流量が大きく減少することがわかる。また同図には同区間にある取水堰（二ツ石頭首工、大堰頭首工、三丁目頭首工、清水川頭首工）の合計取水量を赤線で示している。ただし河川流量変化と比較しやすいように負値で示している。これから、同区間の灌漑期における流量減少は主に水田取水によっていることがわかる。4 月末から 5 月上旬の取水量が特に多いが、これは代かき前の土壌の冠水、代かきおよび田植えの期間に当たっている。なお河川流量の鋭いピークは出水である。この時、水田取水量（図では正負逆）は減少していることから、出水時には取水ゲートを閉じているものと思われる。

同様に求めた【荒雄～涌谷】における流量差を図 3-13 に黒線で示す。また同区間にある右京江頭首工の取水量（赤線）を示す。なお荒雄と涌谷の間の距離は 16km であり、時差は 2 時間としている。また 2 つの波形のオーダがことなることから、プロットするスケールを変えている。この区間の流量差は年ごとに異なっている。非灌漑期（9 月～翌年 4 月）の流量差は 2010 年～2011 年および 2011 年から 2012 で大きな正の値を示しており、2012 年～2013 年、2013 年～2014 年および 2014 年末はほぼゼロである。この年ごとの傾向の違いの理由は明確でない。一方、灌漑期には、出水時を除けば、流量は縦断的增加していることがわかる。これは図 2-12 に示したように、水田からの排水がこの区間に集中するからである。

同区間では時々流量が鋭く減少する場合が見られるが、その多くは出水時であることから、上述の時差が出水時には異なるための計算誤差である可能性があるが、同区間には放水路である新江合川の呑口も存在するため、分流による流量減少かもしれない。そこで新江合川の分水量を調べたところ図 3-14 に示すようであり、図 3-13 との比較から、【荒雄～涌谷】における急激な流量減は新江合川への分水の結果であると思われる。

3.4.2 取排水系統のモデル化

取排水系統を流量観測所の位置によって 3 つの区間ごとにまとめて取り扱う（図 3-15）。【末沢～荒雄】間の 4 つの取水口（二ツ石頭首工、大堰頭首工、三丁目頭首工、清水川頭首工）を一つにまとめている。また該当する水田からの排水先には【末沢～荒雄】間、【荒雄～涌谷】間、【涌谷下流】および【鳴瀬川】の 4 つ可能性がある。それらを便宜的に水田①、水田②、水田③、水田④と称する。また【荒雄～涌谷】区間の右京江頭首工で取水する水田の排水先は全て【涌谷下流】である。この水田を水田⑤とする。また水田に利用されずに用排水路を循環して排出される水もある

ので、それも「還元」として図 3-15 に含めている。

国土交通省鳴子ダム管理所からいただいた「大崎地区<変更水利権> 計画水収支計算用水系統模式図」から、上記の各部分に対応する面積を研鑽した。まず【末沢～荒雄】間で取水する水田の合計面積は 8523.2ha である。このうち水田①、②、③、④はそれぞれ、1521.4ha、3232.6ha、1213.9ha、2555.3ha である。しかし最近は 1/3 が減反政策により大豆畑などに転作されているので、実際の水田割合を 2/3 と仮定すれば、合計水田面積は 5682.1ha、①、②、③、④の内訳はそれぞれ、1014.3ha、2155.1 ha、809.2ha、1703.5ha となる。また【荒雄～涌谷】間で取水する水田⑤は、前述資料に記載された数値の合計は 1049.4 ha であるが、減反を考慮すると 699.6 ha となる。以上の区分に従って、河川水量の変化を次式により計算する。

末沢～荒雄:

$$Q_{S-A} = -Q_s + \left(\frac{Q_s}{A_1} - q_{in} \right) \cdot A_{1-A} + q_{out} \cdot A_{1-A} \quad (3.22)$$

荒雄～涌谷:

$$Q_{A-W} = -Q_u + \left(\frac{Q_s}{A_1} - q_{in} \right) \cdot A_{1-B} + q_{out} \cdot A_{1-B} \quad (3.23)$$

ここに、 Q_{S-A} 、 Q_{A-W} は水田取排水による【末沢～荒雄】、【荒雄～涌谷】での水量減少量(ms^{-1}); Q_s と Q_u は、【末沢～荒雄】に位置する 4 つ頭首工の取水量の合計値および【荒雄～涌谷】に位置する右京江頭首工の取水量(m^3s^{-1}); q_{in} 、 q_{out} は 1ha 水田の取水量と排水量($\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{ha}^{-1}$); A_1 は【末沢～荒雄】の頭首工が灌漑する水田の総面積(5682.1ha); A_{1-A} 、 A_{1-B} は【末沢～荒雄】の頭首工から取水して、【末沢～荒雄】と【荒雄～涌谷】に排水するそれぞれの水田面積(1014.3ha、2155.1ha)である。

q_{in} 、 q_{out} の与え方において以下の仮定をした。すなわち多くの農家が複数の水田を持っているため、農作業機械の使いまわし等のために、実際には全ての水田が同時に作業することではない。実際、観測水田の営農者は 6 枚の水田を持ち、田植えには合計 3 日間を要している。そこで、水田管理シミュレータを用いてシミュレーションする際には、1 日ずつ時差を持つ 3 つのグループが存在するとして(図 3-16)、それらの取排水量を足し合わせた。

取水開始日の開始日は 4 月 26 日、4 月 27 日、4 月 28 日とした。

$$q = \frac{q_1 + q_2 + q_3}{3} \quad (3.24)$$

ここに、 q は 1ha あたりの水量(取水量または排水量)、 q_1 、 q_2 、 q_3 は各作業グループの 1ha あたりの水量である($\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{ha}^{-1}$)。

また古川農業協同組合(2014)は田植え期として 5 月 10 日～20 日の 10 日間を推奨している一方、各頭首工における江合川からの取水の波形(図 2-14)を見ると、取水計画量は 4 月 26 日～5 月 10 日の 2 週間程度の期間に大きくなっており、実際の取水量もそれに従っている。それらの間

の不整合の理由は明確でない。また頭首工から取水している期間の全てで水田に給水されているとは限らない。しかし代かき・田植えの時期が割合分散している可能性がある。そこで上記の数字を睨み、作業工程を1日ずつずらした合計10グループから構成されると仮定したケースについても計算を行った。なお取水開始日は4月26日～5月5日の10日間とした。

$$q = \frac{q_1 + q_2 + \dots + q_{10}}{10} \quad (3.25)$$

式(3.24)および式(3.25)は以下のように一般的に書かれる。

$$q^j = \frac{\sum_{i=1}^N q_i^j}{N}, \quad j < i: q_i^j = 0 \quad (3.26)$$

ここに下添え字(i)はグループ番号を表し、上添え字(j)は最初のグループが取水を開始した日からの通算日数である。またNはグループ数を表す。j < iのときは、第iグループは農作業を開始していないので q_i^j はゼロとなる。それ以外の場合、 q_i^j は水田管理シミュレータから求められる取水量ないし排水量である。

ここで以下の点に注意する必要がある。水田シミュレータは降雨や蒸発散量(日射量などから推定)などの気象条件によって異なるから、 q_i の時間波形は同一波形を単純に1日ずつスライドさせたものではない。すなわち、

$$q_i^j \neq q_{i+k}^{j+k} \quad (3.27)$$

ここに、kはグループ間の作業日数のズレである。

3.4.3 シミュレーションの結果

図3-17に3つグループ(N=3)の場合について、2010～2014年の気象条件で計算した【末沢～荒雄】の流量変化を示す。なおシミュレーションにおける気象条件には各年の数値を代入しているが、取水開始日は前述のとおり共通とした。実線がシミュレーション結果、点線が河川流量観測値から求めた流量差(3.4.1)である。なお本シミュレーションでは水田排水のみを計算するため、水田以外の土地からの雨水排水は求めていない。そこで後者があった可能性を判別できるように、古川アメダスにおける日降雨量を青棒グラフで、荒雄における全流量を青線グラフで同図に掲載している。また、水田管理シミュレータから求められた日取水量と排水量を緑棒とオレンジ棒でそれぞれ示している。

これらの図から出水時を除いて計算値と観測値は概ね一致していることがわかる。また前述のように、【末沢～荒雄】における流量変化は、灌漑のための取水により減少している。また、出水時にはシミュレーション結果がゼロおよび正に転じることがあるが、これは頭首工における取水停止と、水田からの排水によっている。なおシミュレーションから得られた水田用排水量は、取水量(緑棒)

と排水量(オレンジ棒)によって小刻みに変動する。特に浅水と間断灌漑の期間に降雨が少ないと河川から取水をするため、河川流量の減少量が増加する。ただし河川での実測流量差は比較的滑らかである。この違いは用排水路の貯留をモデルでは考慮していないことによると思われる。すなわち前者は各水田への給水口および排水口における値であり、後者は河川の取水口と排水口での値であるからである。以上のように、水田管理シミュレータは気象条件に対する応答がやや過敏であるという問題はあるが、水田用排水が【末沢～荒雄】区間の流量変化に及ぼす影響を概ね表していると言える。

図 3-18 に 3 つグループ(N=3)の場合について、2010～2014 年の気象条件で計算した【荒雄～涌谷】の流量変化を示す。計算方法およびグラフの描き方は上述の【末沢～荒雄】の場合と同様である。なお前述したように、本モデルでは水田のみの排水を扱っているため、降雨時およびその後では、実際の流量差(点線)とのずれが大きくなっている。また、図 3-13(3.4.1)で述べたように、2010 年後半から 2012 年前半までは、非灌漑期においても【荒雄～涌谷】の流量差が継続的に大きいことから、流量観測において何らかの問題があった可能性がある。以上の点を考慮して考察を進める。

【荒雄～涌谷】では排水量が取水量を上回るため、シミュレーション結果(実線)は全体に正の値を示しており、前述の流量計測の問題の可能性があった期間(2012 年前半まで)を除けば、流量増加量を概ね近似しているものと考えられる。なお出水があった期間にシミュレーション結果と観測値にズレが生じるのは、シミュレーションでは水田のみを計算しているからである。またシミュレーションから得られた水田用排水量(実線)が細かく振動する理由は、【末沢～荒雄】区間に関して述べたのと同じであるが、【荒雄～涌谷】区間では振動振幅が大きくなっている。特に浅水期後半と間断灌漑期の変動が大きい。これは無降雨日が継続して田面減水量が大きくなった場合、上流側でも下流側でも水田給水を比較的同時期に行うことになるからである。すなわち田面を迂回して余剰水を排水する水路の流量が減少し、その変動が下流区間ほど大きくなる。その結果、浅水期や間断灌漑期に降雨がないと、迂回している流量がゼロに近づくことになる。

日単位の計算値(水田の取排水による流量変化)は実測流量差より変動がやや大きいことがあるので、【末沢～荒雄】、【荒雄～涌谷】区間の流量変化の累積量を計算し、計算値と観測値の一致性を検討してみた。モデルでは降雨後に河川の増水を考慮していないので、降雨がない日のデータを抽出した。また 2011～2014 年に何らかの原因で代かき・田植え期(4 月 26 日～5 月 10 日)に【末沢～荒雄】における実際の流量減少が激しく、区間内の流量差が頭首工の取水量より非常に高いことがあるので、普通灌漑期の 5 月 10 日から降雨がない日の両区間内の流量差の日累積量を計算した。図 3-19 に【末沢～荒雄】における流量変化の日累積量を示す。2011 年 6 月下旬の影響で観測値(点線)の流量減少量が大きくなること以外に計算値(実線)は概ね観測値(点線)と一致し、変動の傾向も同じである。図 3-20 に【荒雄～涌谷】における流量変化の日累積量を示す。図 3-18 に示す 2012 年 5 月 4、5 日の合計 192mm の降雨の影響による 5 月の下旬でも区間内の流量増加量が大きく、計算値より非常に高いことがある。それは 2012 年の計算値と観測値の一致性が低くなる原因だと考える。また、2011 年に小さい降雨が降った後でも区間内の流量増加

が大きくなり、何日間続いていたことがあり(図 3-18)、それは日累積量の計算値と観測値の一致性が低くなる原因だと考える。ただし、2013、2014年に計算値(実線)と観測値(点線)は概ね一致し、他の年にも流量差累積量の変化傾向が同じである。

ところで、河川への排水は、“水田からの排水量”と“使用されずに用排水路を循環して排出される水量”からなる。そこで単位面積当たりの水田における排水の内訳を図 3-21 に示す。水田地帯からの排水量が赤線、使用されずに用排水路を循環して排出される水量が黒線、頭首工からの取水量を青線で示している。青線と黒線の差が実際に水田に導水された水量に相当する。これらの図から、頭首工から取水されても使われずにそのまま排水される分の多いことがわかる。このことは頭首工でかなりの余裕を持って取水されていることを示唆している。

余裕に取水する原因はいくつかあると考える。一つは、水田用水量は水田の蒸発散、浸透による損失への補給量などの栽培管理用水量だけでなく、用水が水源から末端水田に到達するまでの損失量、用水路の水位維持、配水ための無効放流などの施設管理用水量、営農雑用水や消火用水、景観用水などの地域用水量を含んでいる(古木敏也, 1991)と考えられる。すなわち、頭首工の取水は水田の安全で安定的な用水を確保する目的の以外に、維持用水、景観、生態系保全などの役割も果たしている。そこで、観測水田に水を供給する大堰頭首工の 2010~2014 年の実際取水量を例として水田損失量、地域用水量などを計算し、その内訳を把握した。図 3-22 にその結果を示す。ここに取水量の単位は減反後の大堰頭首工の水田面積(2208.6ha)を用いて m^3/s から mm/d に変換された。黒線は頭首工の実際取水量で、5月10日からの普通灌漑期に出水時の場合を除けば、取水量が約 $21.8\text{mm}/\text{d}$ である。緑線は非灌漑期の計画取水量で、図 2-14 に 2010~2014 年の非灌漑期の実際取水量がほぼ計画と同じであるので、計算上の便利のために非灌漑期の計画取水量を用水路の水位維持などの施設管理水量と消火、景観用水などの地域用水量の総和とし、約 $9.8\text{mm}/\text{d}$ で、頭首工取水量の約 45%である。赤線は節 3.2.2 と 3.2.3 に推定した観測水田の蒸発散量と浸透量の総和であり、水田損失への補給量などの栽培管理用水量とする。5年間の普通灌漑期における損失量の平均値は約 $6.3\text{mm}/\text{d}$ で、頭首工取水量の約 29%である。淡青線は緑線と赤線の総和で、頭首工取水量の黒線との差の平均値は約 $5.7\text{mm}/\text{d}$ で、約頭首工取水量の 26%である。この差は灌漑期に水源から末端水田に水が到達でき、水田用水の不足を防ぐための無効放流水と考えられる。すなわち、灌漑期に水田の損失と地域の水量維持を考慮するだけでなく、水不足を行わないように、消費以上の多量の水を提供して水田の安全を確保する必要がある。余裕取水のもう一つの原因は浅水、間断灌漑などの時期に、営農者は毎日も用水路から水を取るのではなく、最大の目標水深まで水田に導水し、最小の目標水深以下になる際に再び水を入れる。その途中、もし雨が降れば、雨水が水田内に貯留され、稲の成長に十分な水量を提供し、水田水深が蒸発散、浸透、排水によって徐々に低下する。何日間も用水路から取水する必要がない可能性が高い。その時に、水利権に従って河川から取られる水は用水路を通して河川に還元する。

また、2010~2014年の雨量と水田取水量の累積および水田での損失水量(蒸発散量+浸透量)の累積量を計算した。その結果を図 3-23 に示す。各年の灌漑期(4月27日~8月31日)の損失

水量の累積量は、それぞれ 731mm、730 mm、733 mm、737 mm、788 mm であり、年ごとの変動があまり大きくないことがわかる。一方、降雨の累積量は別々 521.5 mm、453 mm、616.5 mm、561.5 mm、477 mm であり、取水の累積量は 361 mm、499 mm、408 mm、484 mm、408 mm である。これらのデータより、灌漑期全体としては、水田での損失水量のかなりの部分が降雨によって賄われていることがわかる。しかし、灌漑期の中の偏差が大きい場合、短期的水不足が生じる恐れがある。

そこで灌漑期の月ごと(5 月、6 月、7 月、8 月)の降雨量の確率分布と、その中における計算対象年(2010 年～2014 年)の位置を図 3-24 に示す。これより月ごとの降雨量は概ね対数正規分布に従うこと、月雨量の大小は年ごとに大きく変化することがわかる。一方、稲作カレンダーは一か月より短期間で水田管理状態を移行させる。したがって、同カレンダーに従って一律的水田管理を行った場合、たまたまの無降雨継続によって給水が集中的に行われることによる短期的水量不足の生じる可能性がある。実際、無降雨が比較的長く続いた 2012 年の間断灌漑期、2014 年の浅水前期には、【荒雄～涌谷】区間の流量差の実測値にも、シミュレーションと類似した変動が見られる。前述のように本シミュレータは用排水路の水貯留効果を考慮していないので、気象条件に対する河川変動の応答を実際より敏感に表す。しかし逆に言えば、用排水路の貯留に余裕がなくなる厳しい小降雨の年の水田管理に対しての示唆を与える可能性があるともいえる。そこで次節(3.5)において、水田に降雨が非常に少ない場合に生じる状況について、本シミュレータを用いて検討を行う。

最後に水田グループを 10 グループ設定した場合(式 3-25 による)の計算結果を図 3-25(【末沢～荒雄】)および図 3-26(【荒雄～涌谷】)に示す。また【荒雄～涌谷】における排水の内訳を図 3-27 に示す。ここでは、流量計測の信頼性の高い 2013 年と 2014 年について示した。前述したように、2010 年後半から 2012 年前半は、非灌漑期においても荒雄と涌谷の間の流量差が大きく、流量計測に何らかの問題(例えば低流量における H~Q カーブの誤差)があった可能性があるからである。これらを図 3-17、図 3-18、図 3-21 の同年の図の計算結果を比較すると、若干の平滑化は生じているが、それほど大きな差はない。

この理由は以下のように考えられる。稲作のための水田取水開始日を 10 日ずらす(つまり稲作カレンダーを 10 日ずらす)ことは、田面管理水深の設定を 10 日ずらすことを意味するが、田面への給水波形を 10 日ずらすということを意味しない。給水の必要性は降雨及び蒸発散という気象因子によって生じる田面水深変化に左右されるからである。したがって、管理水深の設定が 10 日ずれていたとしても、実際の給水は比較的同じ日に集中する可能性が高い。そこで次に水田に降雨が非常に少ない条件で、稲作カレンダーに従って営農を継続した場合に河川流量に生じる変化を、本シミュレータを用いて検討を行う。

3.5 少雨の年における縦断的流量変化

3.5.1 少雨条件の設定

日本の低平地で昔から稲作が発達したのは、雨水湛水だけでも稲作がある程度可能な条件ができていたためと考えられる。実際、図 3-21、図 3-27 に示したように、通常の降雨量の年には灌漑水量に十分余裕がある。しかし図 3-28 に示すアメダス古川観測所における過去 38 年間の灌漑期降雨量データから見ると、灌漑期(5 月～8 月)の総降雨量は最小が 297mm、最大が 926mm とかなり大きい。渇水の超過確率を 1/10(回/年)とすると、同図から求まる渇水年の灌漑期総降雨量は 389mm となり、同時期の損失水量(蒸発散量+浸透量;約 750mm)のほぼ半分にあたる。同図には過去 38 年間の 5 月～8 月における月ごとの降雨量の内訳を示しているが、灌漑期内における偏差が大きいことがわかる。例えば、5 月の平均降雨量は約 100mm だが、最大は約 250mm、最小は 50mm 未満である。また 8 月の平均降雨量は 143mm だが、30mm 以下の場合もある。

そこで本節では、水田地帯に降雨が少ない状況において水田管理シミュレータを運転し、河川流量の縦断的变化を検討した。なお江合川では、上流の鳴子ダムによる流況調整と発電放流量があり、また厳しい渇水の場合は大谷川の岩堂沢ダムからの利水補給もあるので、比較的安定している。ここでの検討の目的は、江合川水田の渇水評価ではなく、渇水時に水田が稲作カレンダーに基づく営農を実施した場合に生じる河川流量減少量である。ここでは 2 つのケースについて検討する。第一のケースは、江合川流域の水田に全く降雨がなく、必要水量を全て河川灌漑水に頼った場合である。第二のケースは、雨量データのある過去 38 年間に於いて灌漑期(5 月～8 月)の総降雨量が一番小さかった 1994 年の気象条件である。蒸発散量については、架空の条件である第一のケースでは 2013 年の計算で用いた時系列を使用し、第二のケースでは 1994 年の気象条件から 3.2.2 で述べた方法により求めた。農作業については、20 年の開きがあるので、稲作カレンダーが同一という保証はないが、情報がなかったので、2014 年と同じ稲作カレンダーに従って水稲栽培を行うと仮定した。なお、水田のグループは 3 つとし、最初のグループの取水開始日は 4 月 26 日と仮定した。

3.5.2 シミュレーションの結果

(1) 水田への降雨がない場合(ケース1)

上流の末沢流量観測所の流量を基準として、水田管理シミュレータにより、第一のケースにおける荒雄および涌谷における流量減少量を計算した。その結果を図 3-29 に示す。図の上には、最初のグループの稲作カレンダーも載せている。末沢を基準とした荒雄(赤)と涌谷(青)の水量減少量の波形は非常に似ておいるが、涌谷がわずかに大きい。これは、水田灌漑のための取水が主に【末沢～荒雄】の区間で行われている一方、排水は【荒雄～涌谷】で大きいからである。第1回目の代掻きにおいて最大の減少量が表れているが、その他の期間でも $10\text{m}^3/\text{s}$ ~ $15\text{m}^3/\text{s}$ の河川流量減少が断続的に発生することがわたる。なお前述したように、実際には用排水路での貯留により波形は平滑化される、そこで荒雄での水量減少量について 3 日間の移動平均を行った結果を点線で

示す。これから、中干し期間を除くと $5\text{m}^3/\text{s}$ 程度の流量減少が生じることになる。

図 3-30 に、取水量(青線)のうち水田を迂回して排水された量(黒線)と、稲作カレンダーによる水深制御の結果として水田から排水された量を単位面積当たりの水田についてプロットした結果を示す。図 3-21 の 2013 年の場合と比較すると、未使用量は減少しているものの、多くの期間について約 50%であり、灌漑水量はかなりの余裕を持っていることがわかる。つまり、この水量を取水しなかった場合、【荒雄～涌谷】の間の河川流量減少は低く抑えられることになる。

(2) 1994 年の気象条件による場合(ケース 2)

図 3-31 に 1994 年 5~8 月の日降雨量と第一グループの稲作カレンダーを示す。5 月中は 15 日と 27 日を除いて降雨が少なく、また 7 月下旬~8 月 20 日にも無降雨日が続いた。一方 6 月下旬から 7 月上旬には降雨量が大きかったが、この期間は中干し期に当たっている。

末沢の流量を基準とした荒雄と涌谷の流量減少量を図 3-32 に、単位面積当たりの水田における排水の内訳を図 3-33 に未使用量を黒線で、水田からの排水を赤線で示す。結果は無降雨であるケース 1(図 3-29、図 3-30)と類似しており、2010~2014 年の実績に比べて未使用率が低くなっている。無降雨の場合との際立った違いは、5 月 15 日の降雨により、その後しばらくの間、田面給水が必要でなかったこと、6 月下旬の中干し期と 8 月下旬の落水時期に降雨があったため、田面から大量の排水が行われたということである。この時期の降雨は、第 4 章で述べるように、河川に濁水を排出して水質を悪化させる恐れがある。

(3) 河川流況改善のための水田シミュレータの役割

江合川上流の鳴子ダムは洪水調節と水力発電を主目的に建設された多目的ダムで、不特定利水は含まれているものの灌漑対象域は少ない。しかし発電水量が最大で $21\text{m}^3/\text{s}$ 、常時でも $17\text{m}^3/\text{s}$ 程度あり、これが実質的に灌漑水源となっている。また発電放流で不足する場合には右支川の大谷川にある岩堂沢ダム(県管理)からも補給される。一方、本節の検討結果からわかるように、江合川の灌漑取水は、降雨が少ない年でもかなりの余裕を持っている。その結果、上流の頭首工で取水した水が水田用排水路により迂回して下流部に排水されており、その間の河川区間の水量を単に減少させている。もちろん水田給水が集中する期間には図 3-29 および図 3-32 に示したように、使用率が 100%に達することもあるが、そうでない期間は長い。

そこで、河川環境保全のための維持用水をできるだけ確保するには、天気予報などにより降雨条件を予想し、水田管理シミュレータによって必要給水量を算定して、それにより頭首工取水量を減少させることが考えられる。またシミュレーション結果が多量の必要給水量を示した場合は、その時だけダム放流量を増加することも考えられる。

3.6 まとめ

本章の検討結果を以下にまとめる。

(水田水収支)

(1) 対象水田について式 3.1 を仮定して水収支を検討した。気象因子には近傍のアメダス古川のデータを用い、取水、排水量に観測結果を用い、蒸発散量を FAO Penman-Monteith で推定した。その結果、水田土壌に関しての2つのパラメータは次のように決定された。 α_0 (地下水面の有効面積率)=0.15、 P (地中浸透速度)=2mm/day。

(2) その結果を用いて灌漑期(4月27日~8月31日)における対象水田の水収支をシミュレーションしたところ、観測された田面水深の変化がよく再現された。

(水田管理シミュレータ)

(3) 2014年の現地観測と営農者へのインタビューによって水田農作業をルール化し、「水田管理シミュレータ」を作成した。農作業ルール化におけるパラメータは、稲作カレンダーの各期における目標水深、給水速度と時間および排水堰高である。

(4) 農作業のルール化により、気象条件に対する水田の水文学的応答のシミュレーションが可能となった。そこで、2014年の気象条件で対象水田のシミュレーションを行った結果、観測された田面水深の時間変化をよく再現できた。

(5) 江合川流量観測所(末沢、荒雄、涌谷)の間にある取水堰および排水口に対応する水田面積をそれぞれ求め、水田管理シミュレータを用いて灌漑期における各区間の流量変化を求めたところ、洪水時間帯を除けば、国交省の観測結果を概ね再現できることがわかった。しかし、気象条件に対する応答がやや敏感であった。この原因は、シミュレーションでは水路および排水路の貯留を考慮していないことによると考えられた。

(水田が江合川水量に及ぼす影響について)

(6) 水田観測を行った2014年のシミュレーション結果から、水田での損失水量のかなりの部分が降雨によって賄われていたことがわかった。その結果、取水された水量のかなりの部分は再び河川に戻るが、取水量の大きい大堰および三丁目頭首工から排水量の大きい田尻川合流点の間の江合川流量はかなり減少し、河川環境に影響を及ぼしている恐れがある。

(7) 灌漑期に降雨の少なかった1994年の水文条件および灌漑期に無降雨という条件でシミュレーションを行ったところ、代かきの取水時期、中干しから間断灌漑に移行する時期に水量が厳しくなるが、その他の期間にはかなり余裕のあることがわかった。したがって、河川環境保全という観点からすると、稲作カレンダーをもとにした水田管理シミュレータにより、予想される天候条件のもとで必要な時期にのみダム放流を増加することが得策であると考えられる。

参考文献

Allen, R.G, Pereira, L.S. and Raes, D., Smith, M.: Crop evapotranspiration—guidelines for computing crop requirements—, FAO irrigation and drainage paper 56. Rome, p111, 1998.

Burba, G.G, Verma, S.B. and Kim, J. Surface energy fluxes of *Phragmites australis* in a prairie wetland,

Agric. For. Meteorol., Vol.94, pp.31-51, 1999.

Dolman, A.J., 2005. 45: Actual evaporation. Encyclopedia of Hydrological Sciences.

Lin, Q., Ishikawa, T., Akoh, R., Yang, F.L., Zhang, S.S.: Field study on water content variation just after irrigation period in reed colony of Shuangtai wetland, China, Proceedings of IAHR world congress, 2013.

古木敏也. 1991. 近年における水田用水量変化の実態解明と用水量計画への適用に関する実証的研究. 農業工学研究所報告, 30: 1-132.

吉田昌一. 1981. 稲作科学の基礎. 博友社.

表 3-1 作業段階と対応の成長ステージ及び作物係数

時間帯	作業段階	成長ステージ	作物係数
5.6～5.25	田植え、深水	初期	1.05
5.25～6.24	浅水	発展期	1.05～1.20
6.24～8.24	中干し、間断灌漑	中期～成熟期	1.20
8.24～9.24	落水後	晩期	1.20～0.75

表 3-2 浸透量の算定結果

開始時間	終止時間	持続時間 (h)	開始水深 (mm)	終止水深 (mm)	浸透量 (mm/day)
5.14 7:00	5.15 19:00	36	74.81	62.10	2.85
5.16 1:00	5.19 5:00	76	63.91	40.41	3.22
5.19 13:00	5.21 6:00	41	61.20	53.55	3.10
5.22 13:00	5.26 19:00	102	105.91	68.01	2.60
5.29 0:00	6.2 6:00	102	65.28	29.41	2.58
6.2 15:00	6.4 5:00	38	46.42	35.46	0.94
6.4 15:00	6.6 1:00	34	48.70	42.12	1.16
6.15 12:00	6.20 10:00	118	71.48	46.84	0.17
6.20 22:00	6.24 12:00	86	42.70	6.22	2.71

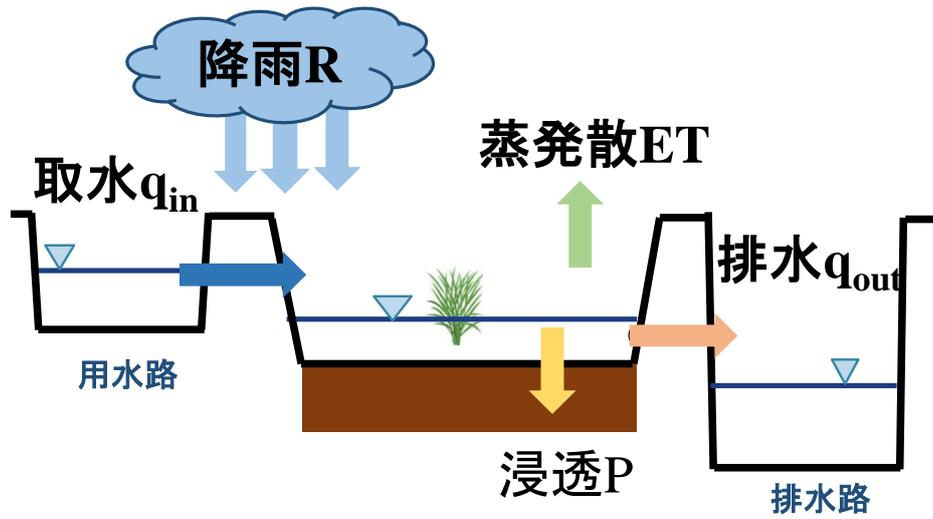


図 3-1 水田の水収支

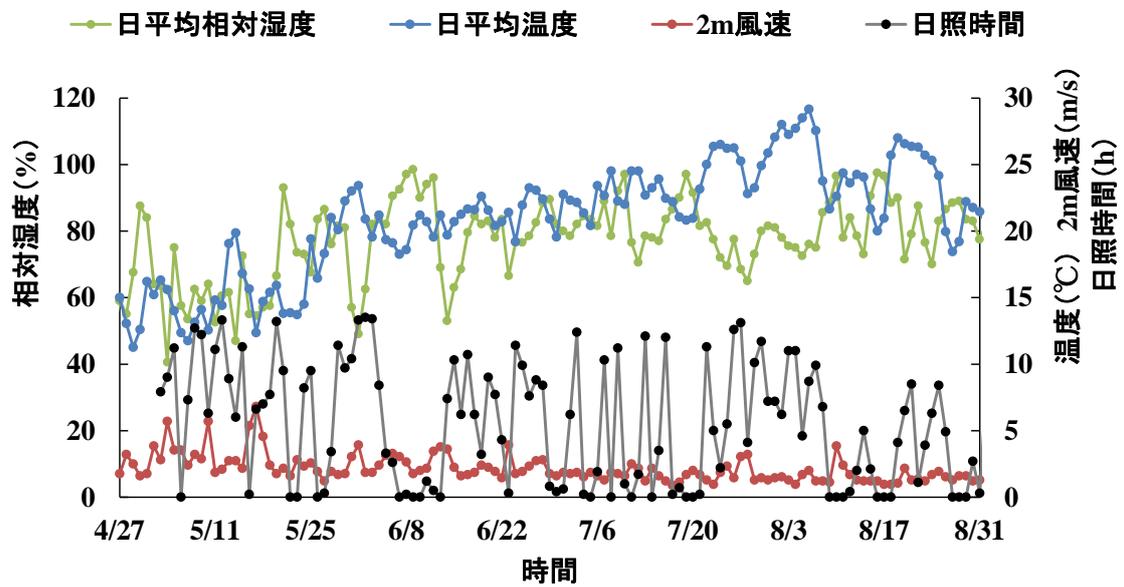


図 3-2 蒸発散量計算に必要な代表的なデータ

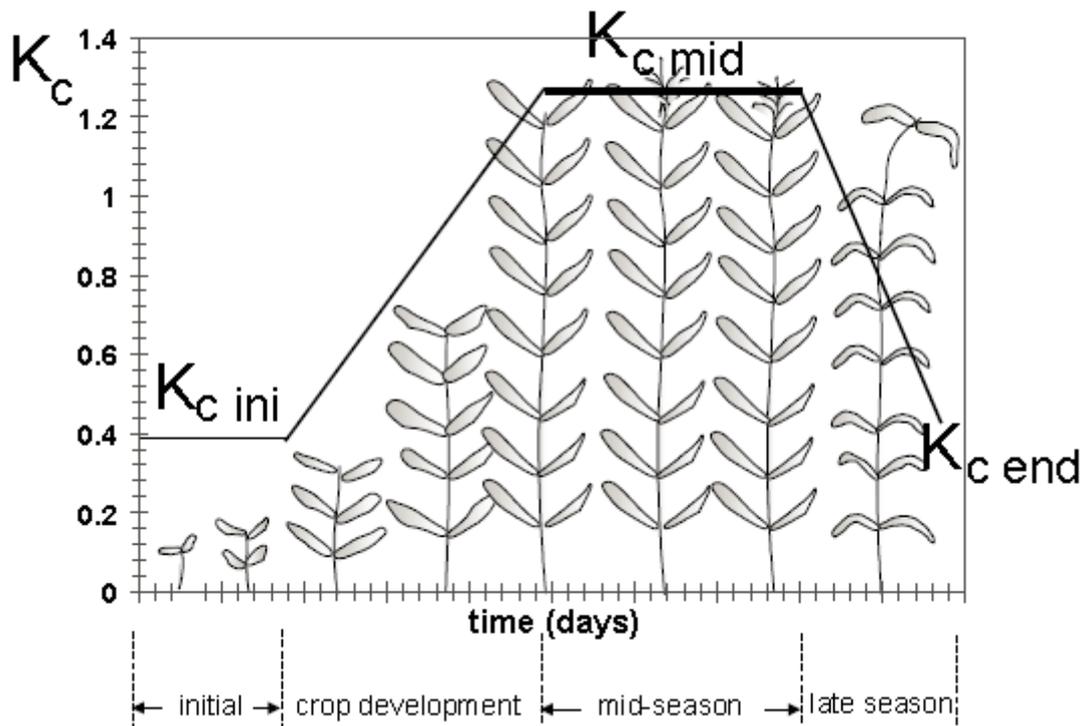


図 3-3 作物係数の一般設定 (Allen ら, 1998)

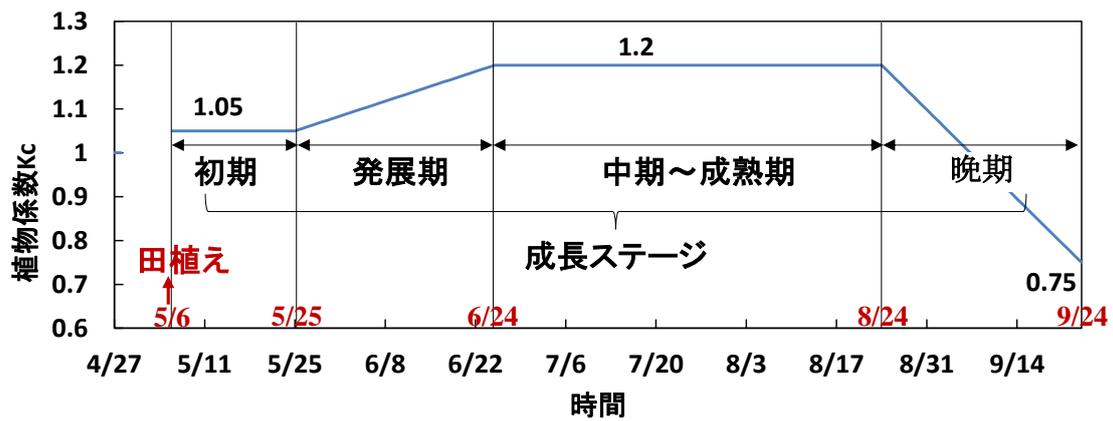


図 3-4 観測水田における各期の作物係数 K_c

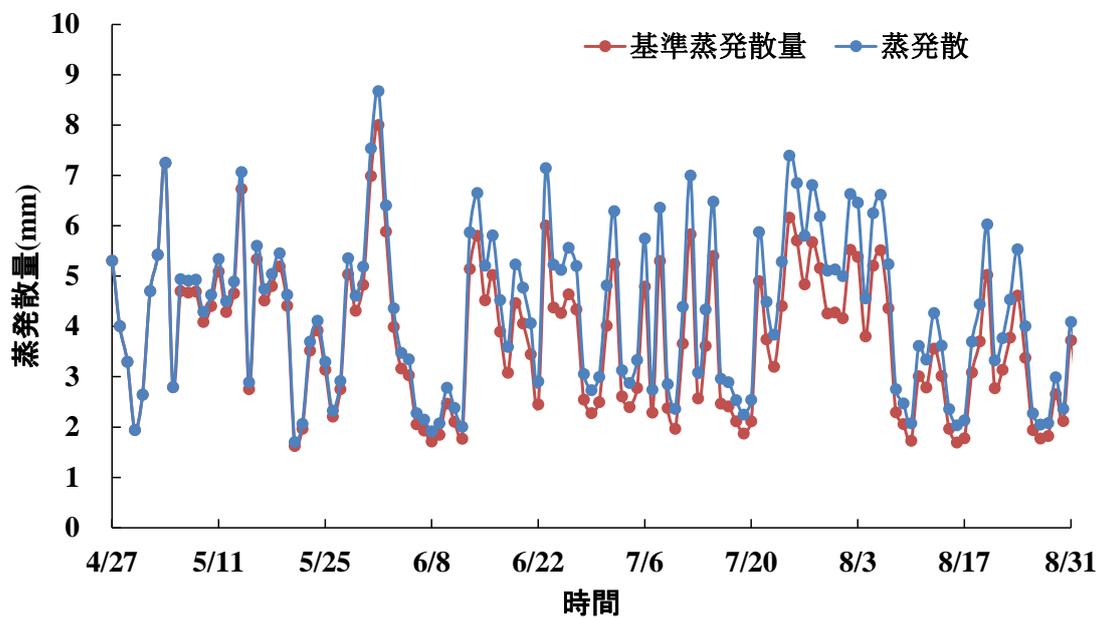


図 3-5 蒸発散量の計算結果

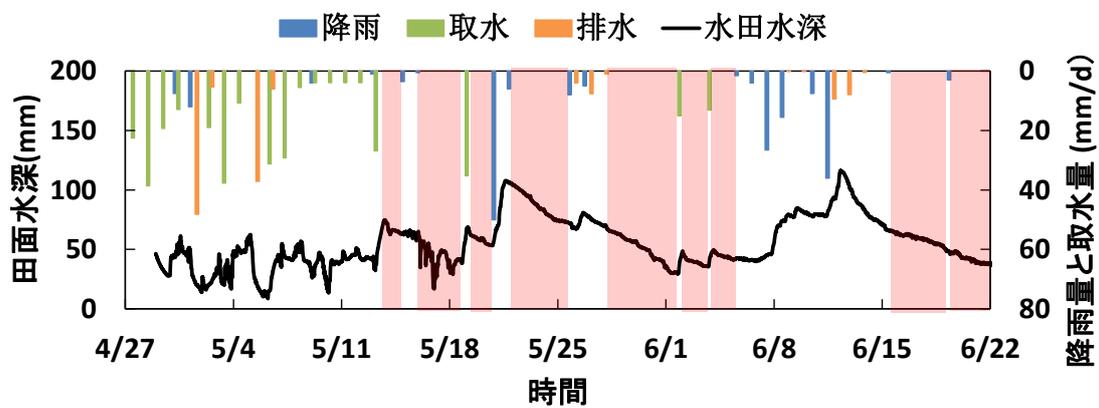


図 3-6 浸透量を計算する期間 (赤色部分)

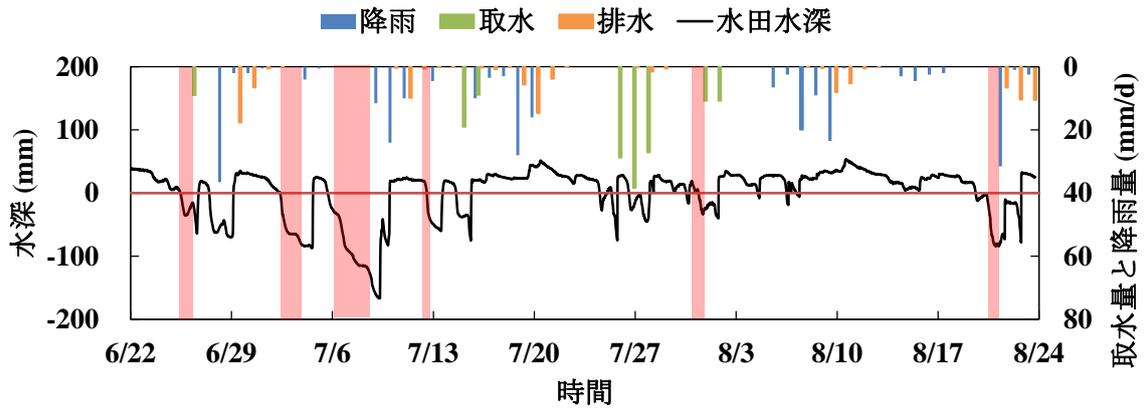


図 3-7 有効面積率を計算する期間（赤色部分）

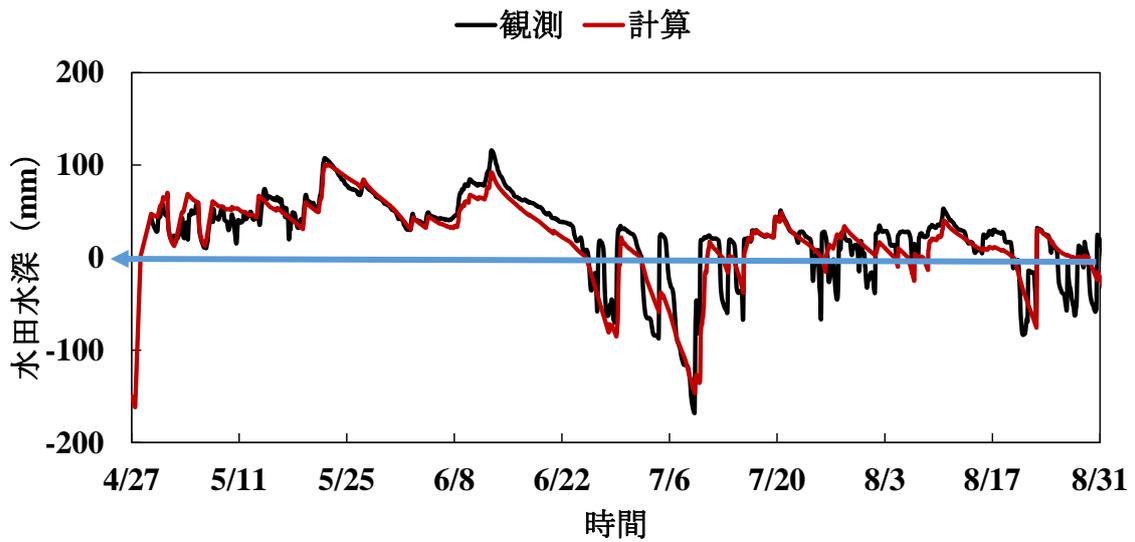


図 3-8 水収支式による計算水深と観測水深の比較

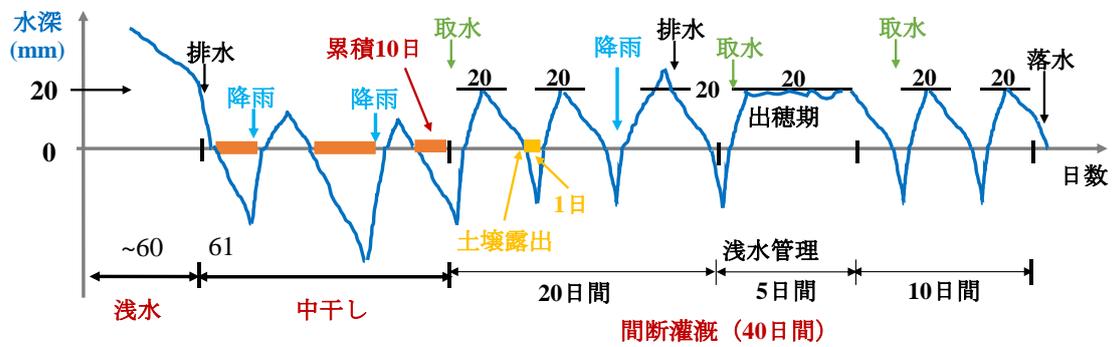
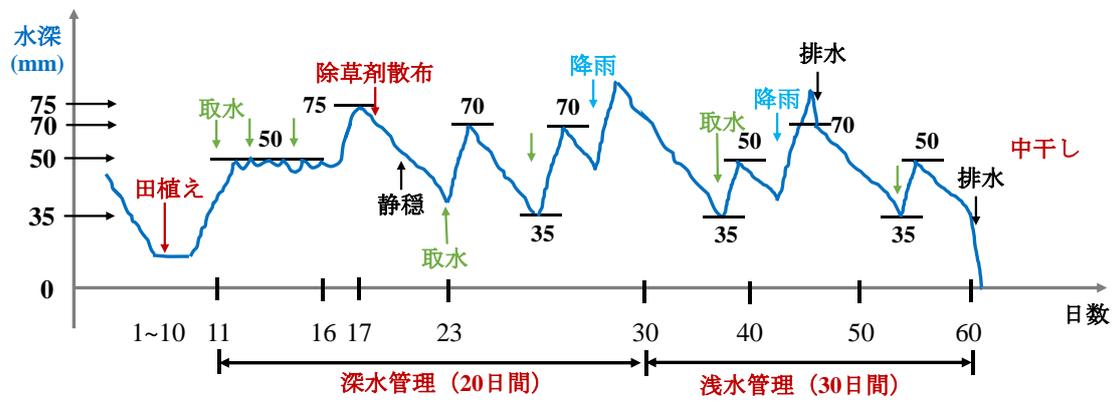
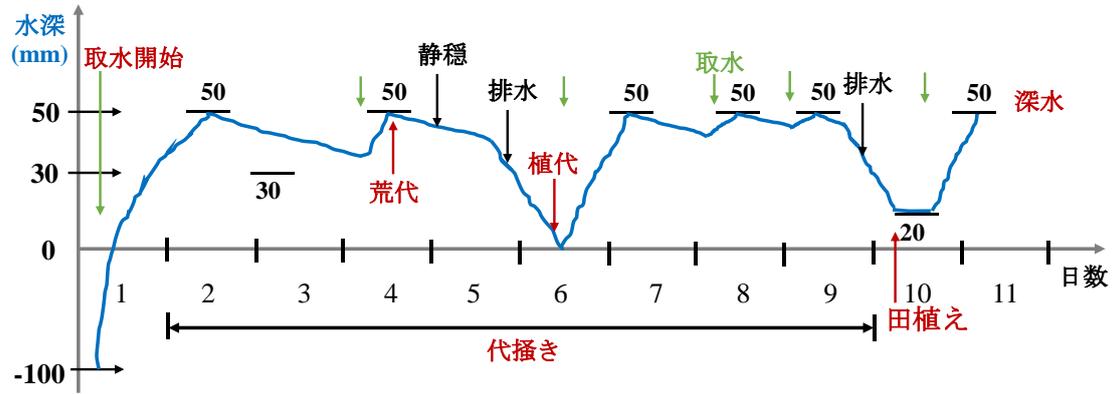


図 3-9 稲作カレンダーの各作業段階における水田操作のルール

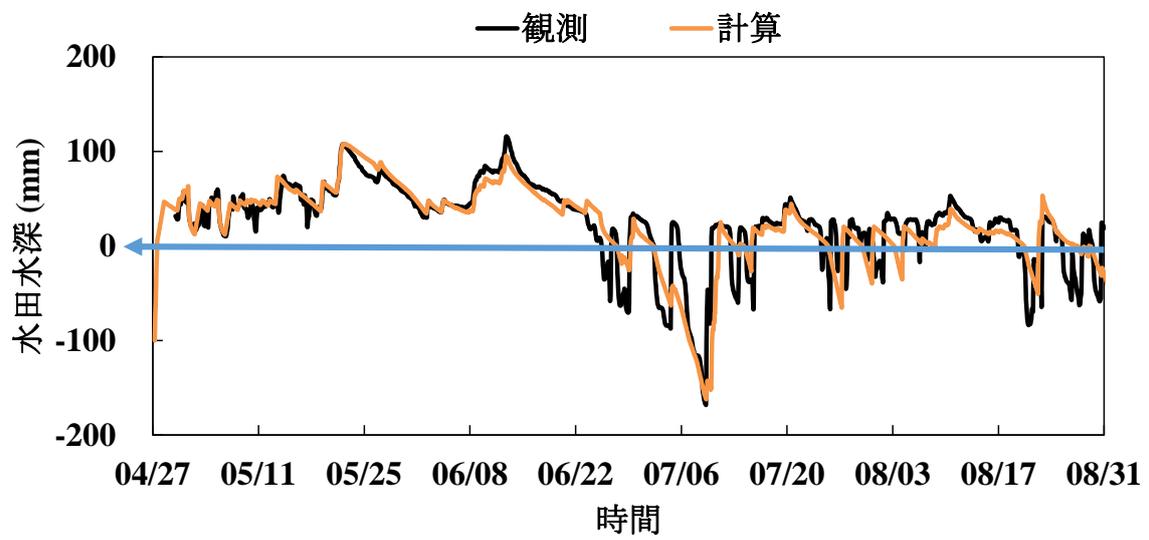


図 3-10 ルール化された操作による水深変化 (2014 年の気象条件)

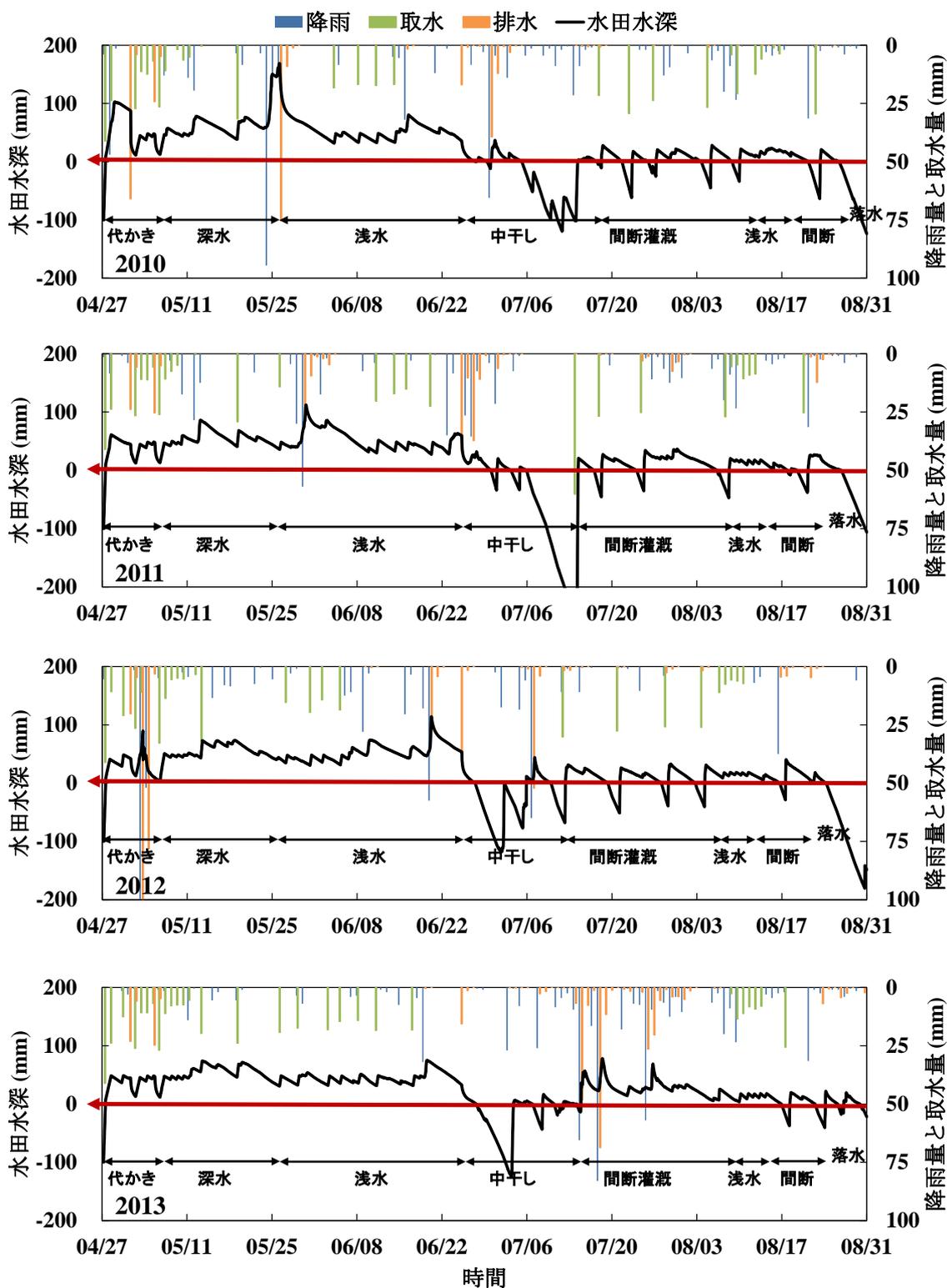


図 3-11 水田シミュレータによる水深変化 (2010~2013 年の気象条件)

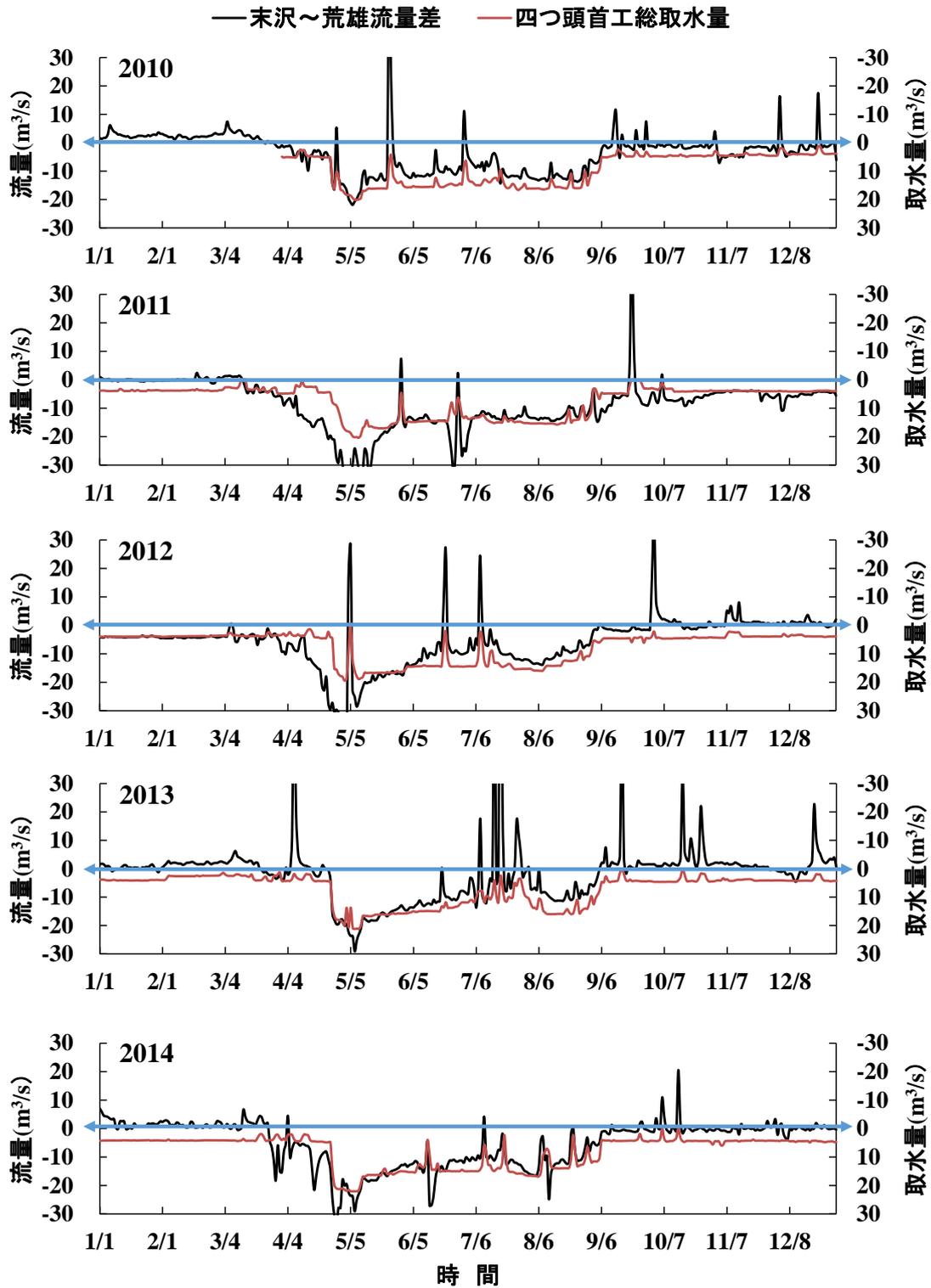


図 3-12 2010~2014 年に末沢～荒雄流量差と 4 つ頭首工の総取水量

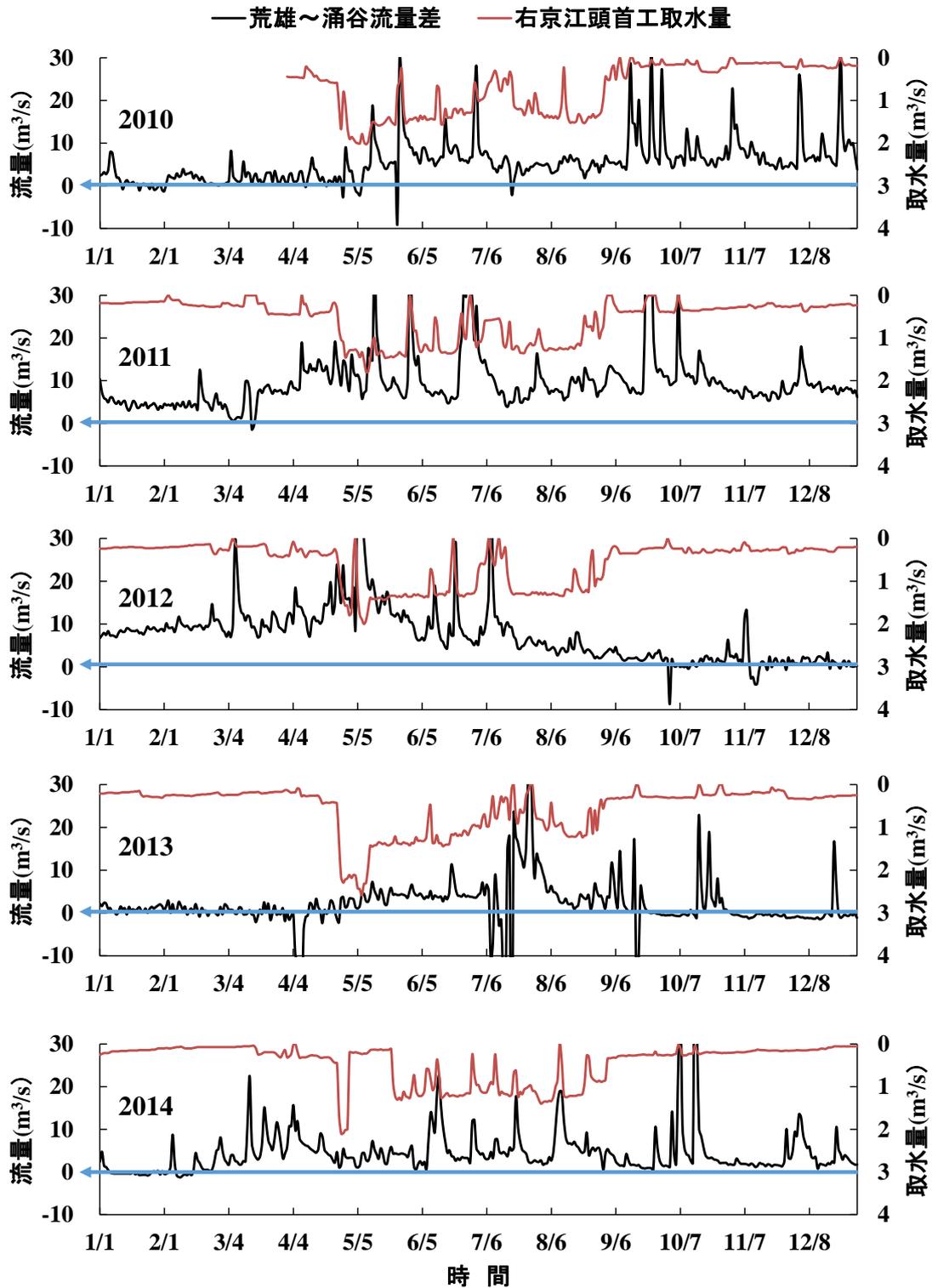


図 3-13 2010~2014 年に荒雄～涌谷流量差と右京江頭首工の取水量

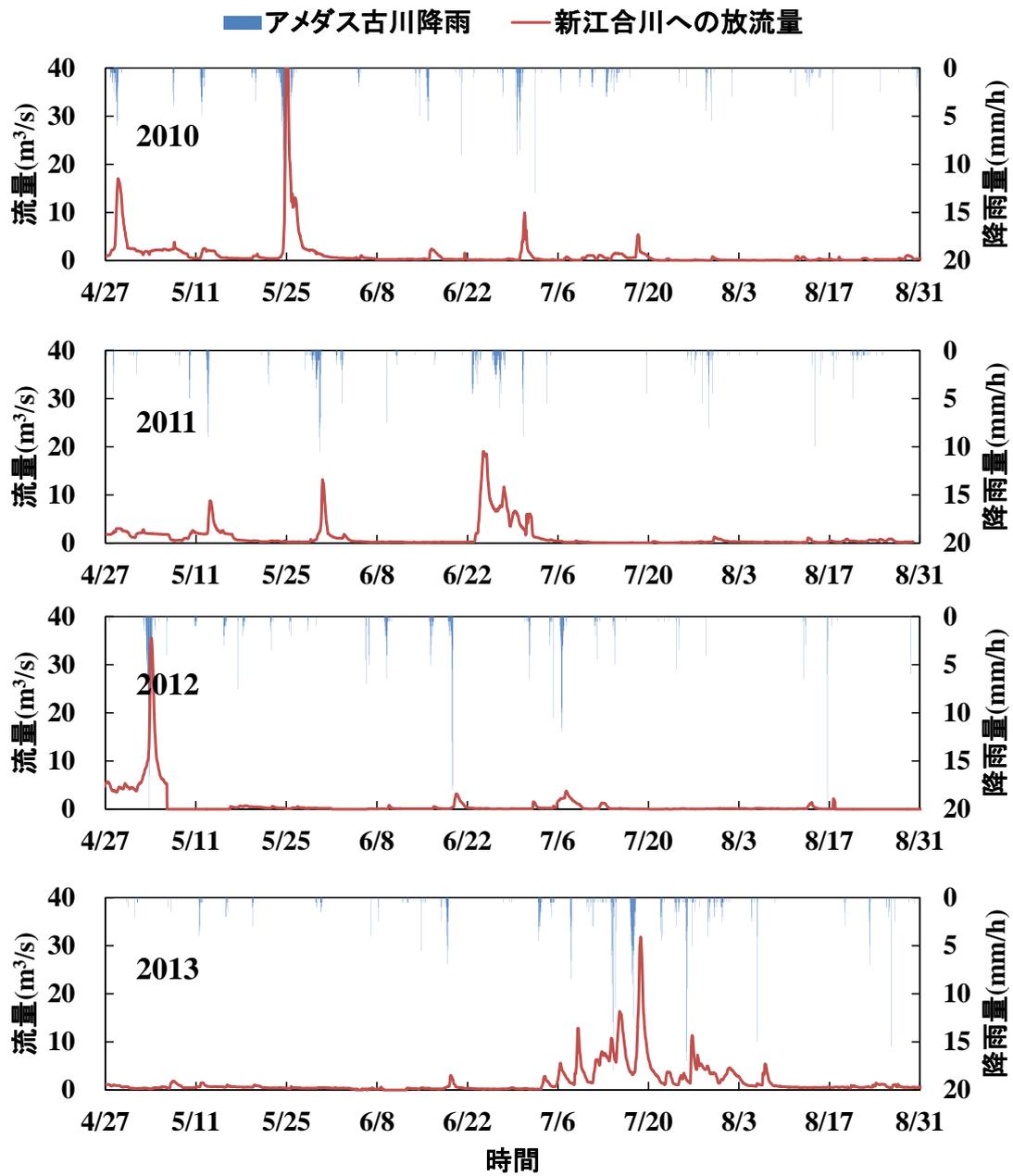


図 3-14 2010~2013 年の灌漑期に新江合川への放流量

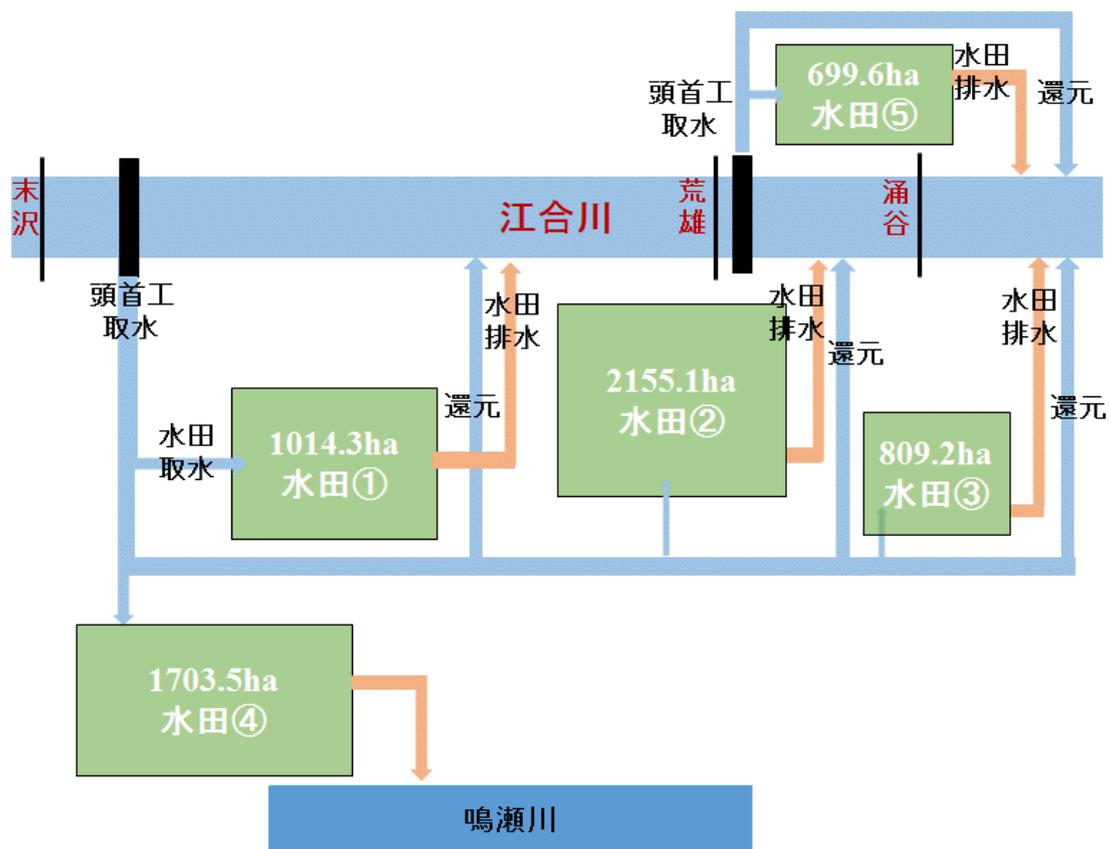


図 3-15 河川流量への影響を計算する灌漑システムのモデル

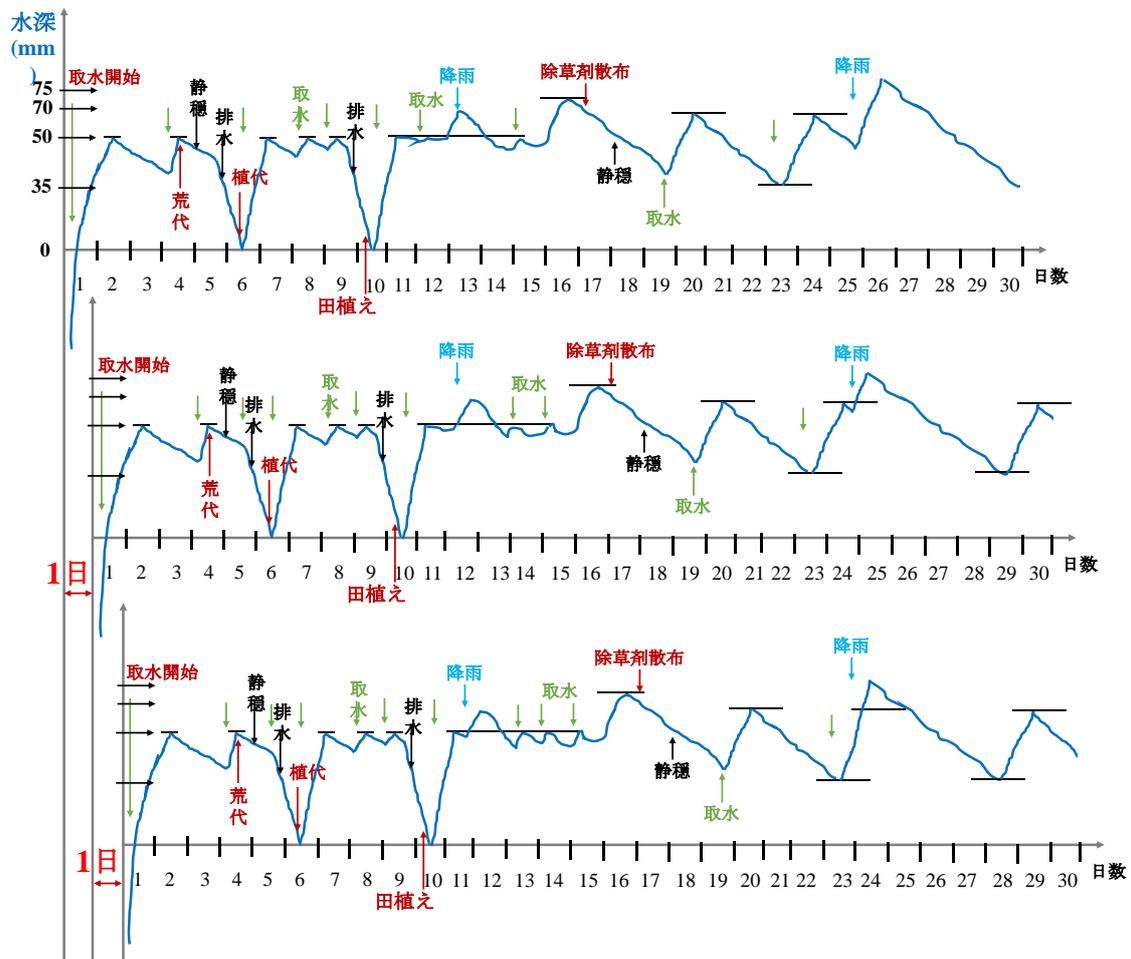
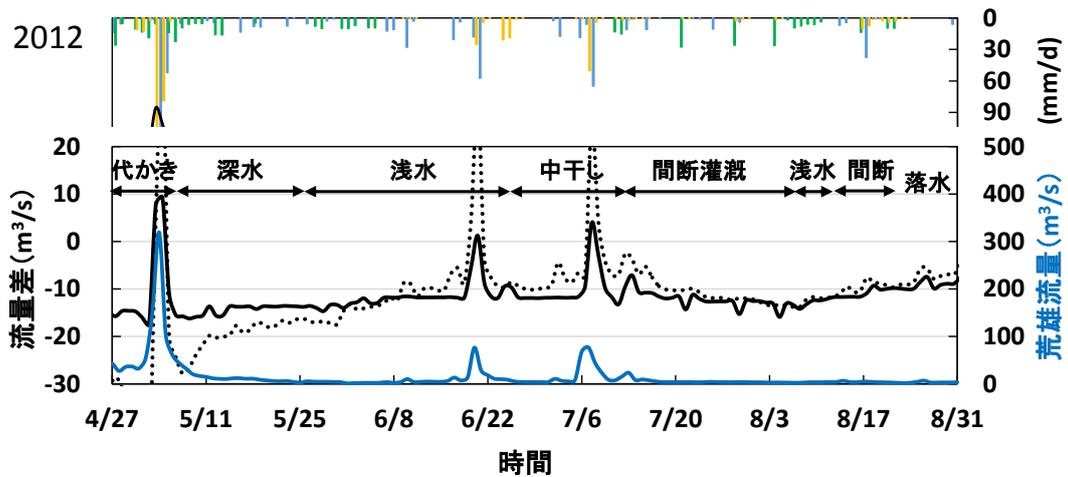
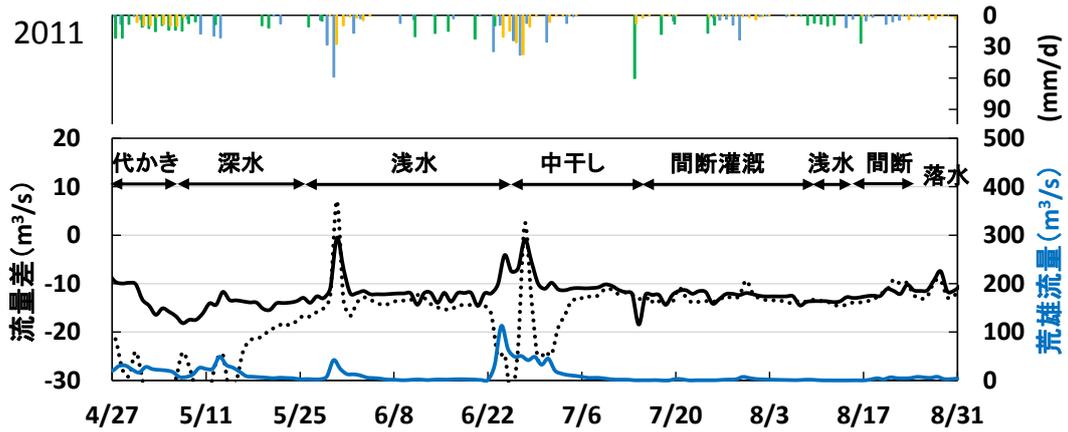
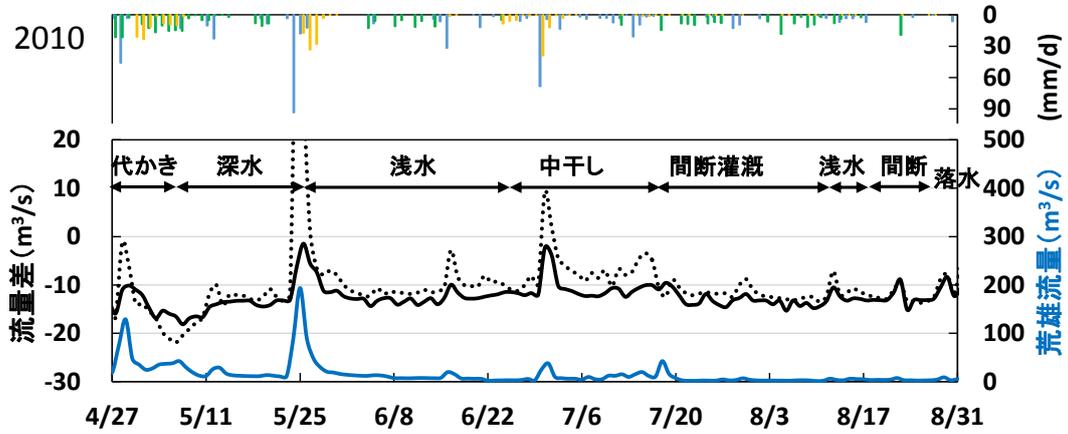


図 3-16 作業時差の設定

—— 水田用排水による流量変化 末沢～荒雄流量差 —— 荒雄流量
 ■ 日降雨量 ■ 日取水量 ■ 日排水量



—— 水田用排水による流量変化 末沢～荒雄流量差 —— 荒雄流量
 ■ 日降雨量 ■ 日取水量 ■ 日排水量

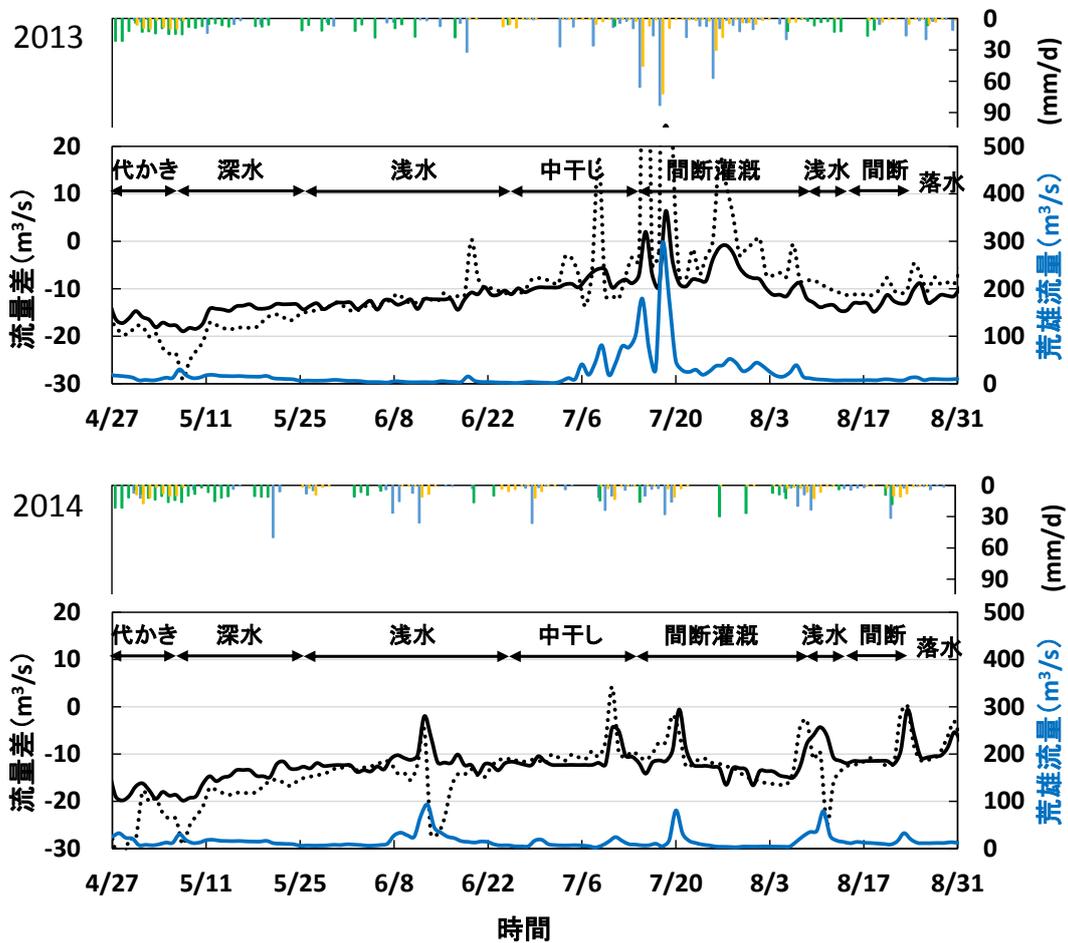
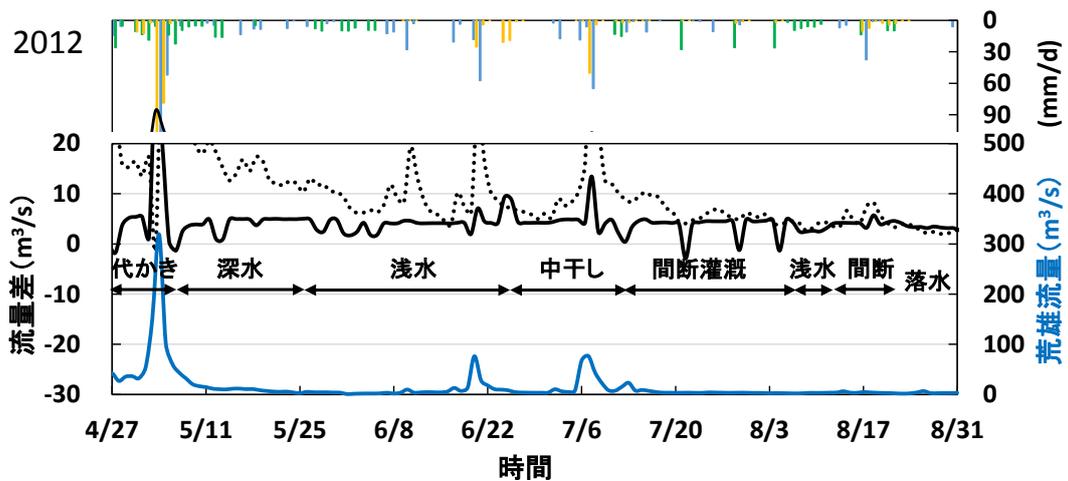
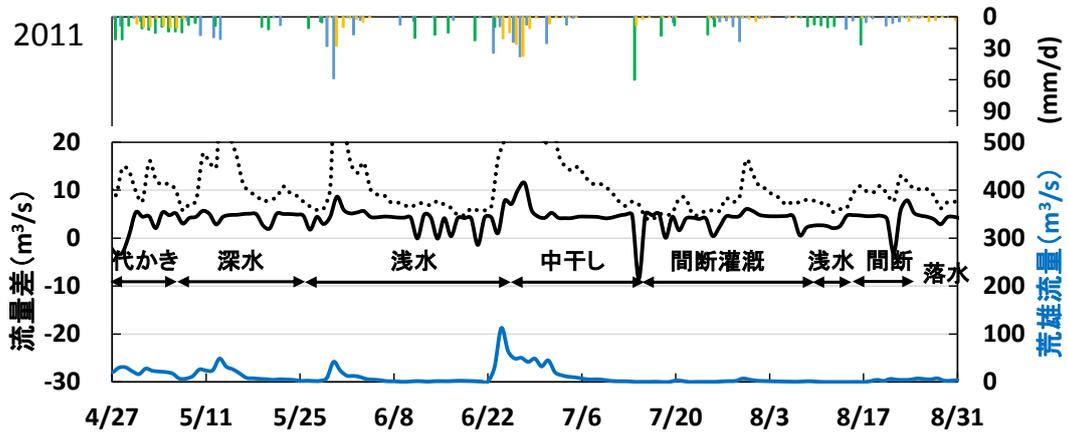
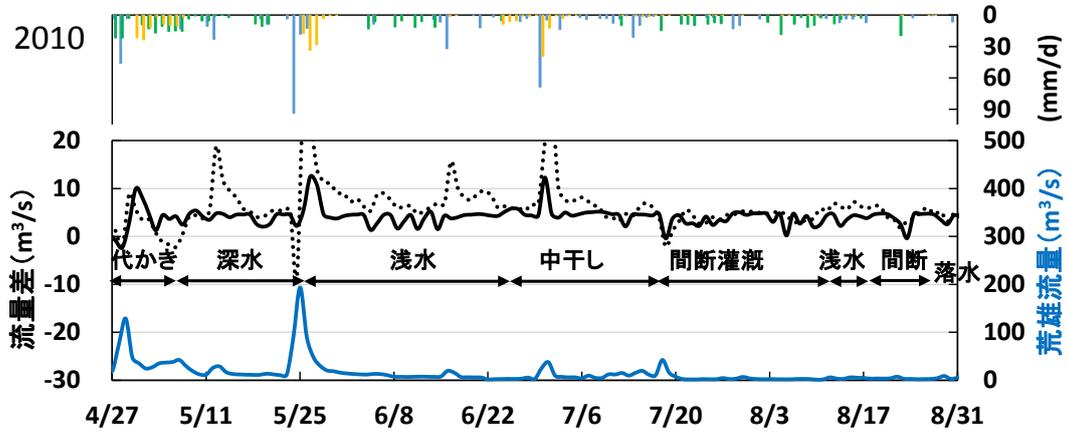


図 3-17 2010～2014 年の気象条件での末沢～荒雄の流量変化 (3 つ)

— 水田用排水による流量変化 荒雄～涌谷流量差 — 荒雄流量
 ■ 日降雨量 ■ 日取水量 ■ 日排水量



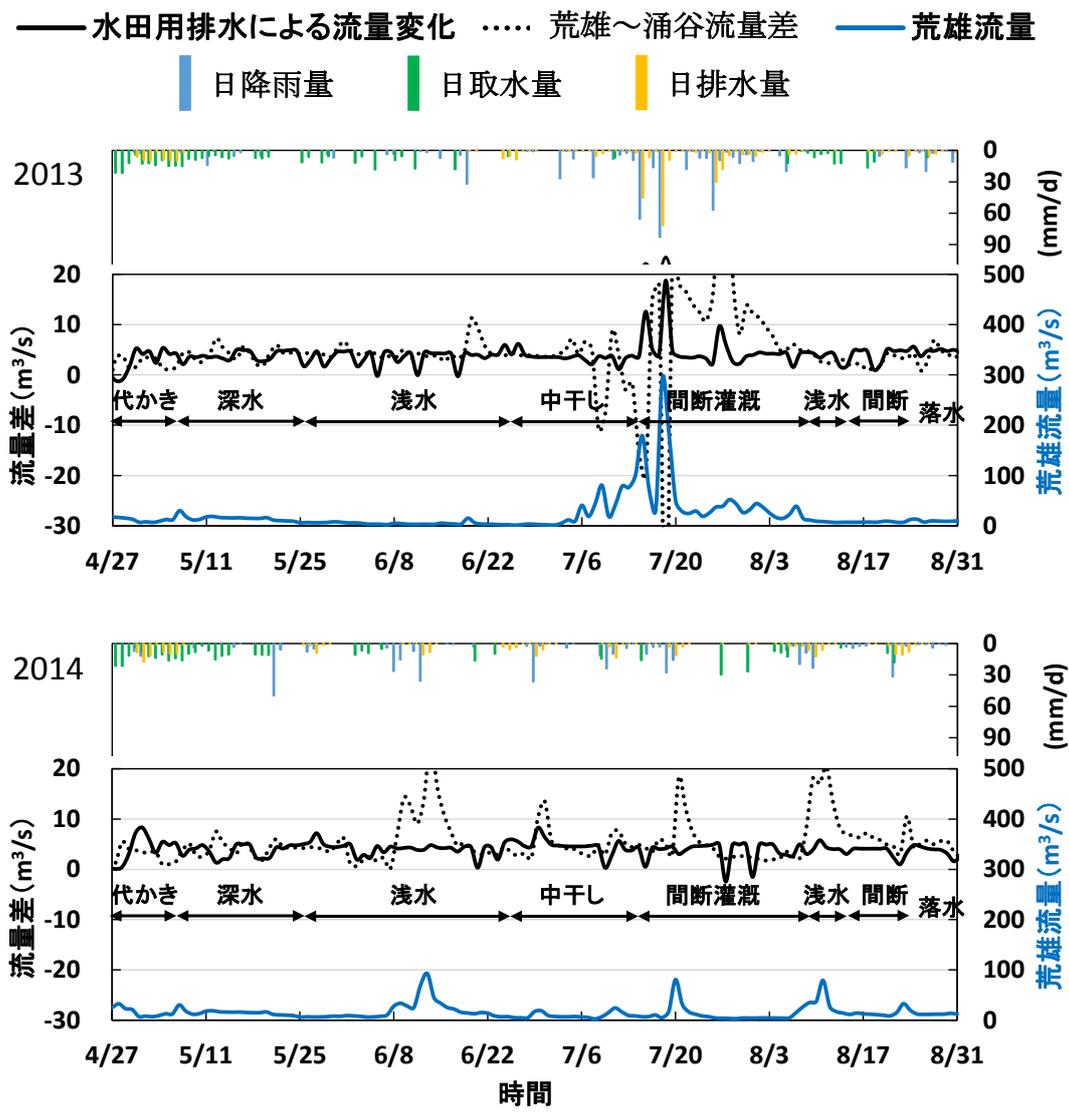


図 3-18 2010～2014 年の気象条件での荒雄～涌谷の流量変化 (3 つ)

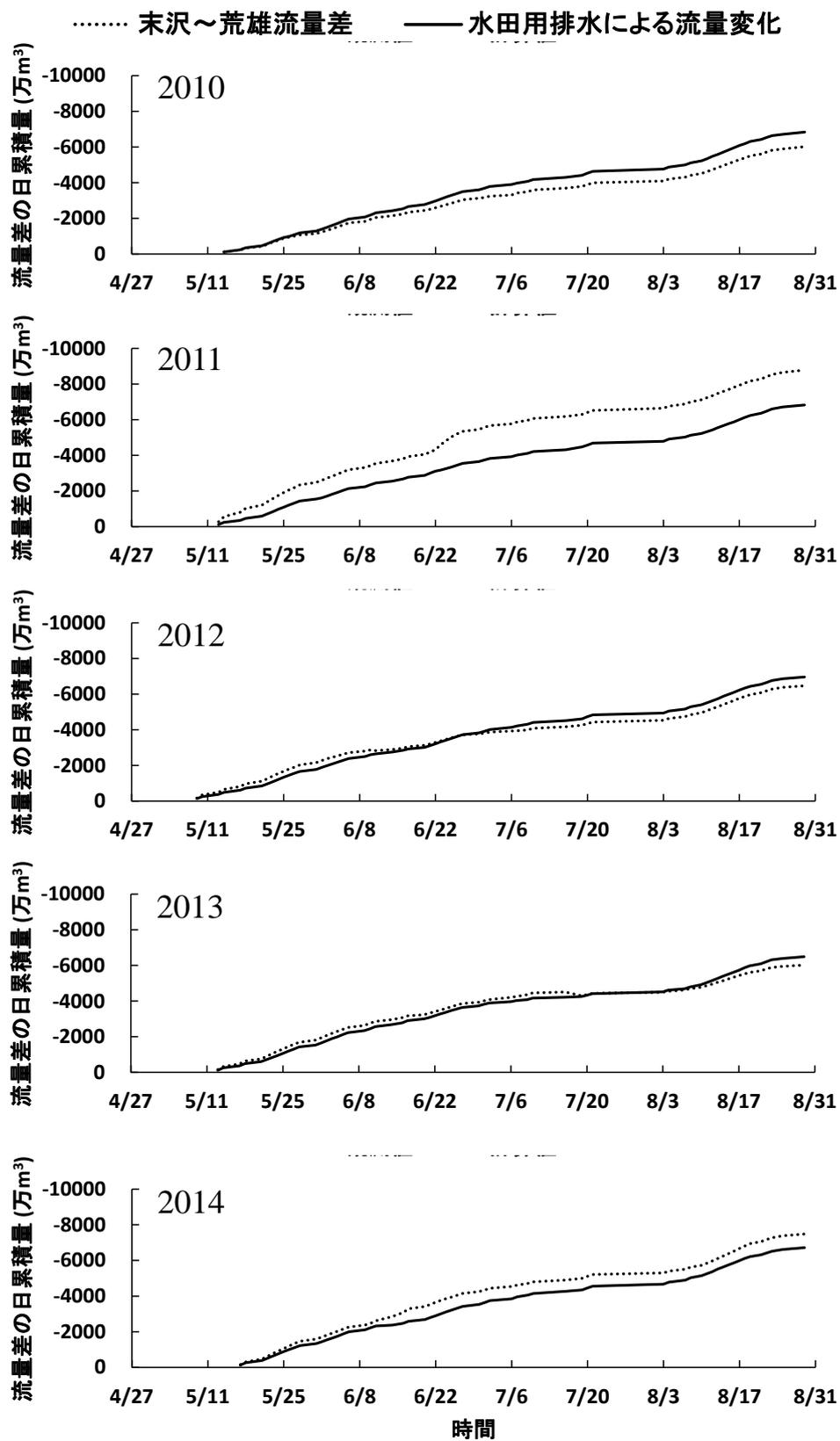


図 3-19 2010~2014 年に末沢～荒雄の流量変化の日累積量

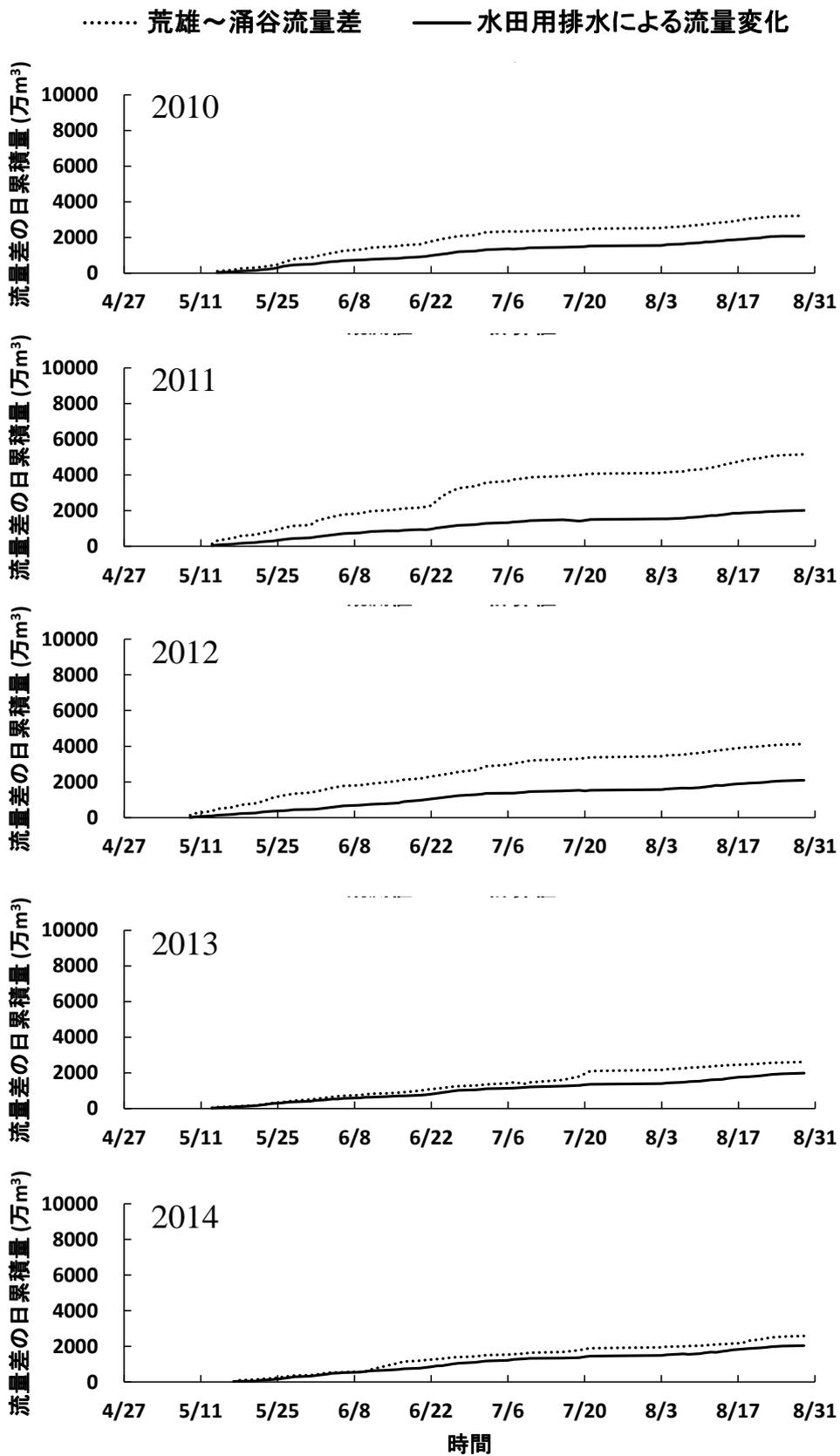


図 3-20 2010~2014 年に荒雄～涌谷の流量変化の日累積量

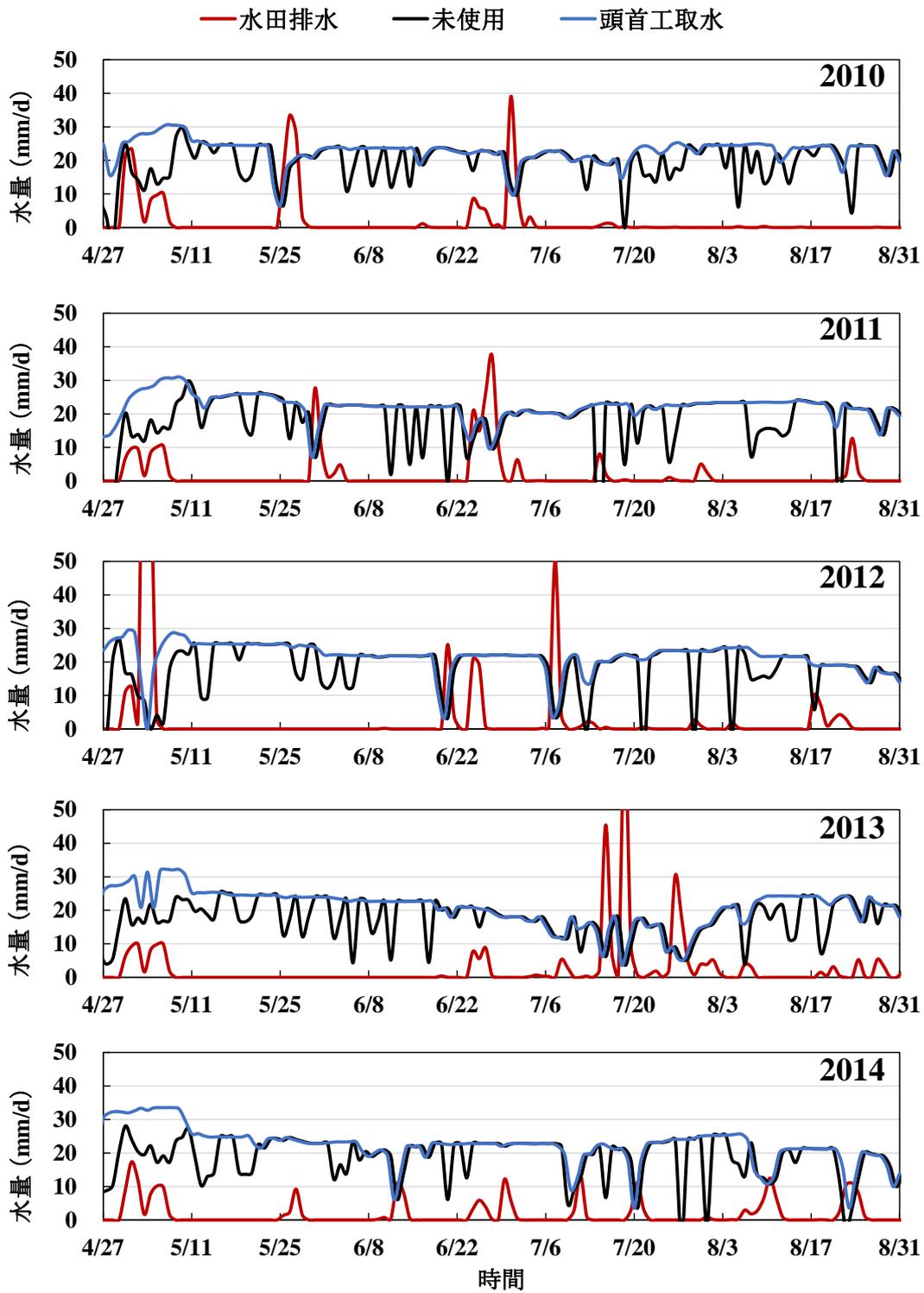


図 3-21 2010~2014 年に単位面積当たりの水田における排水の内訳 (3つ)

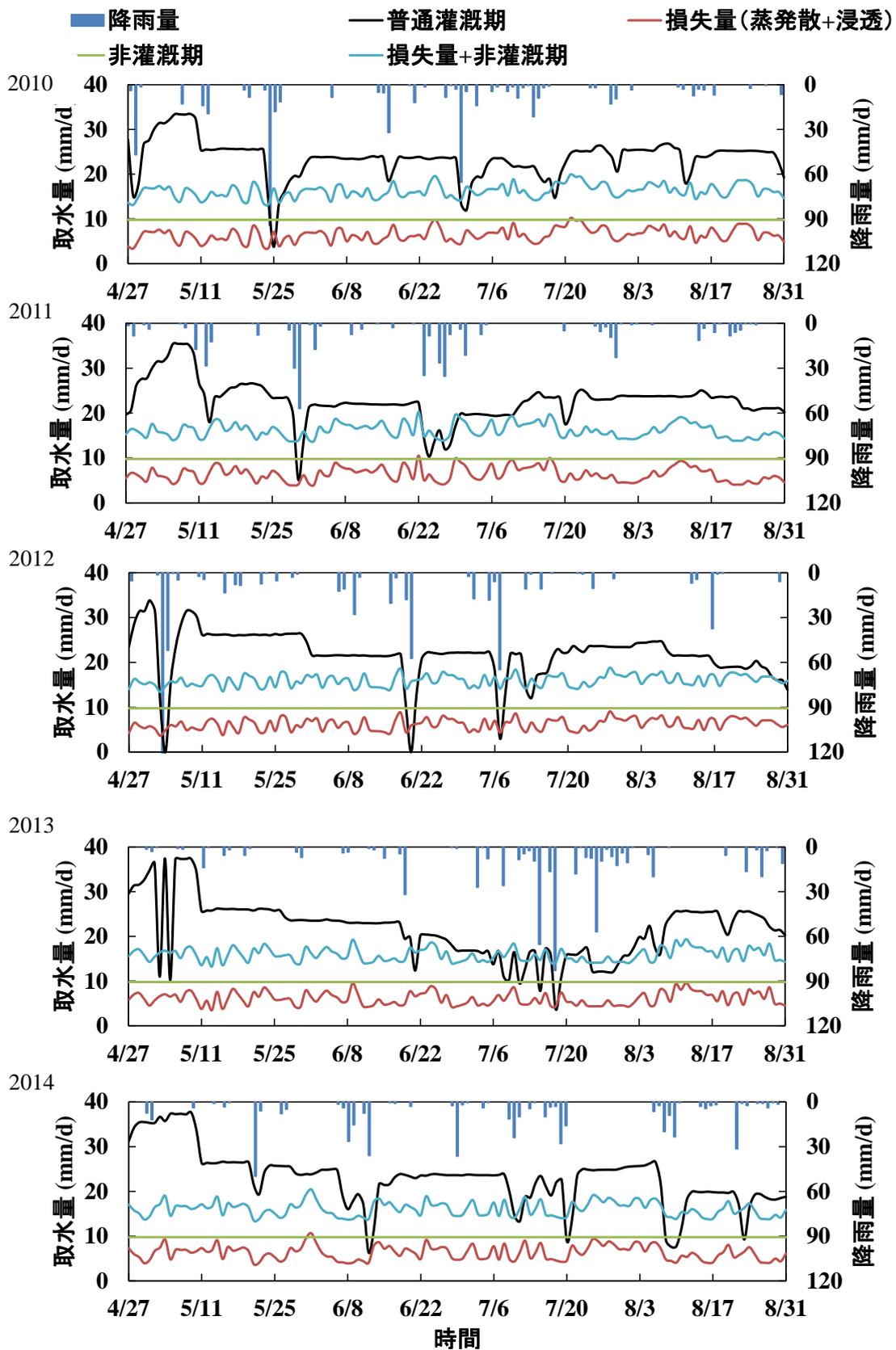


图 3-22 大堰頭首工取水量（灌溉期、非灌溉期）、水田損失量及び降雨量

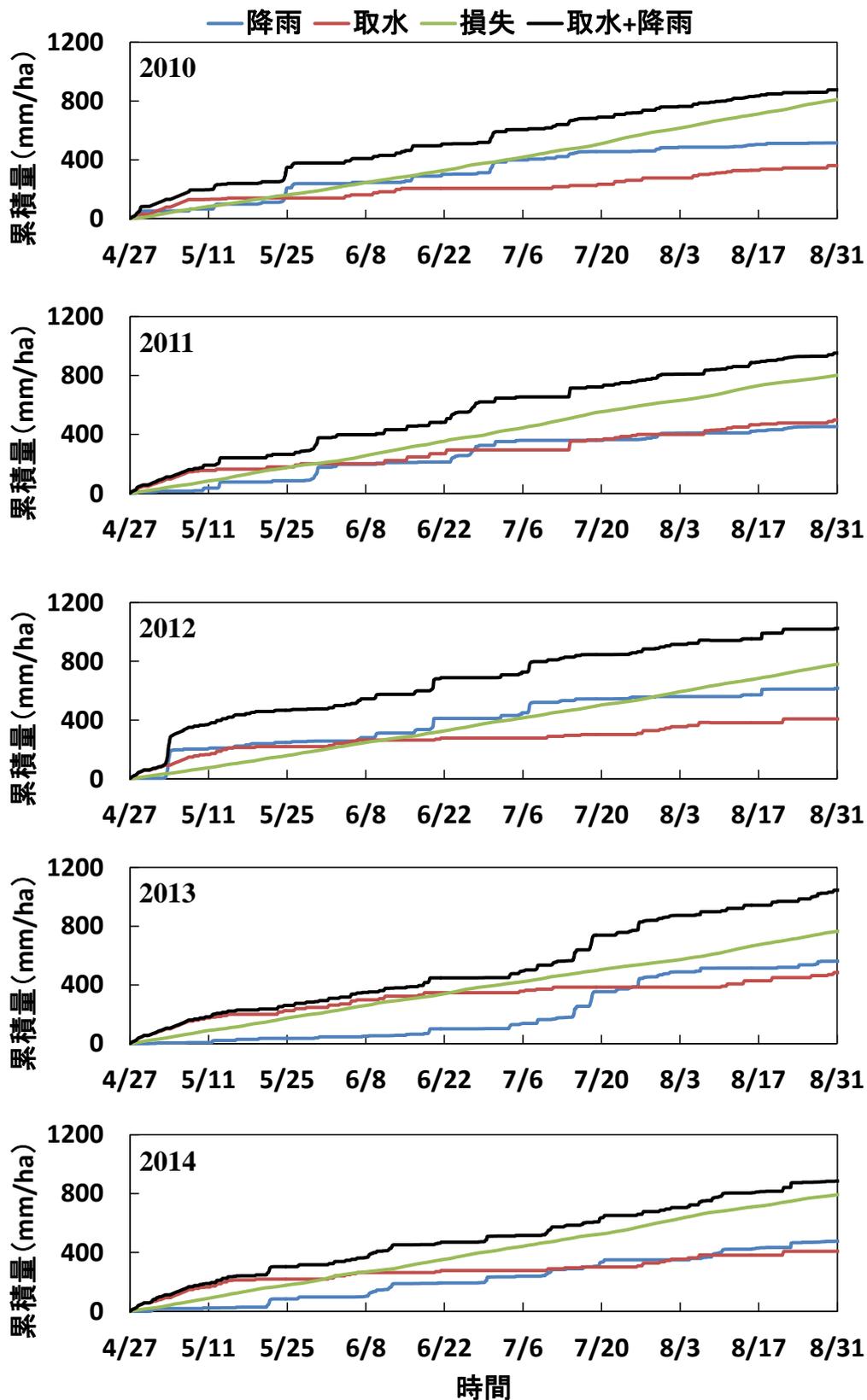


図 3-23 2010~2014 年に雨量、損失量と取水量の比較 (3 つ)

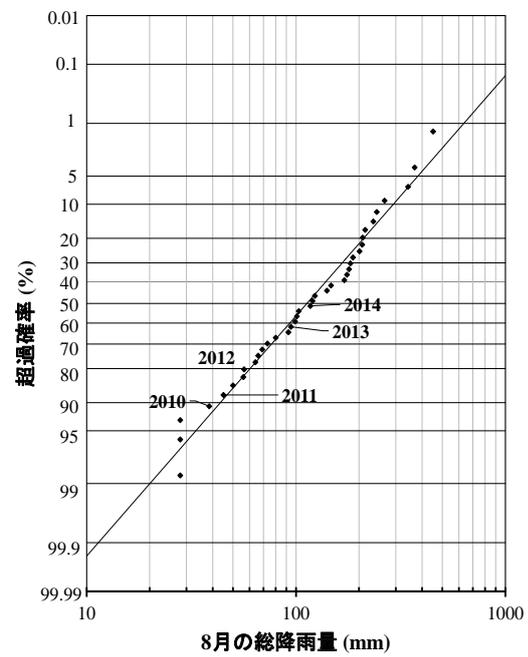
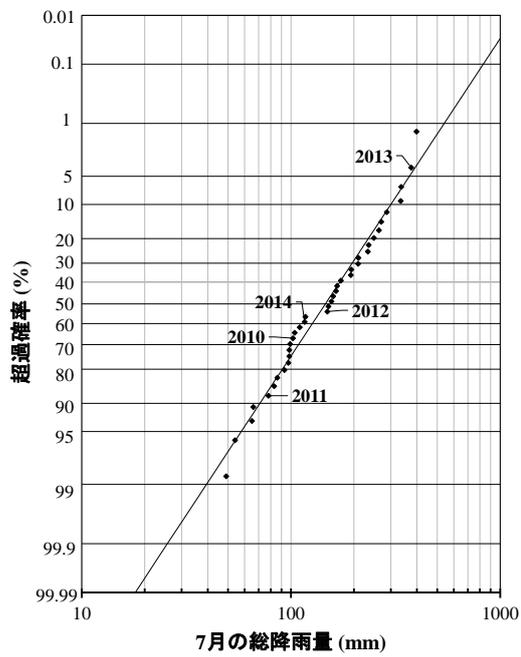
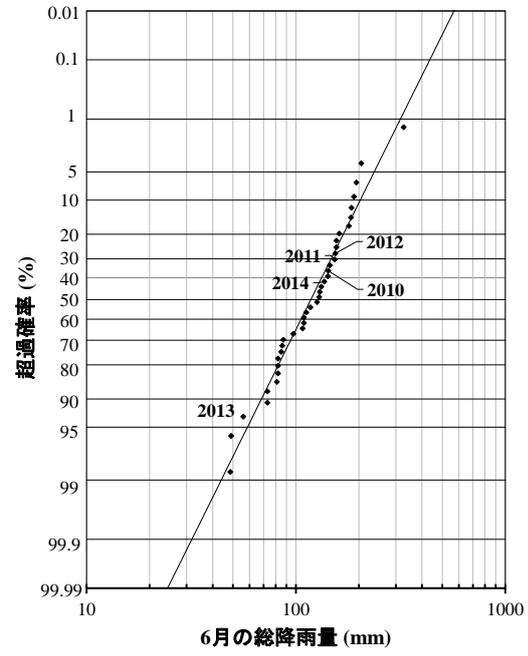
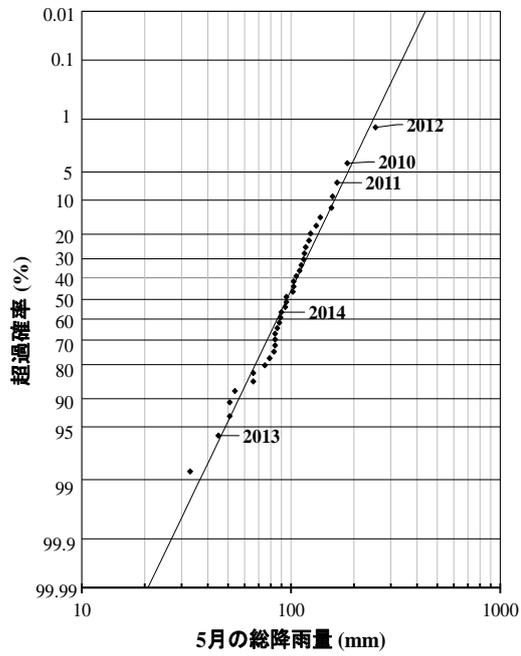


図 3-24 灌漑期の月ごと (5~8月) の降雨量の確率分布

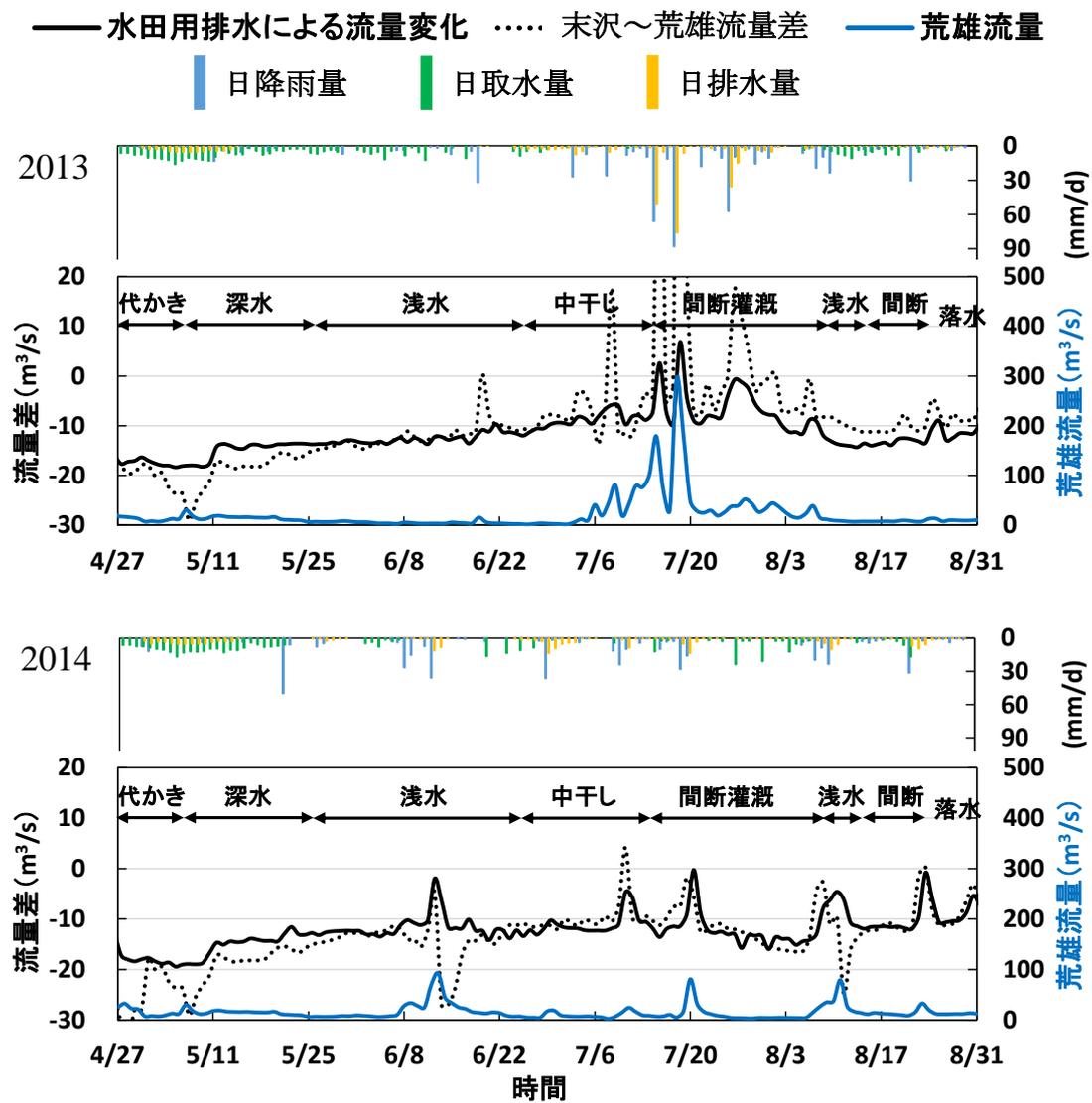


図 3-25 2013～2014 年の気象条件での末沢～荒雄の流量変化 (10 つ)

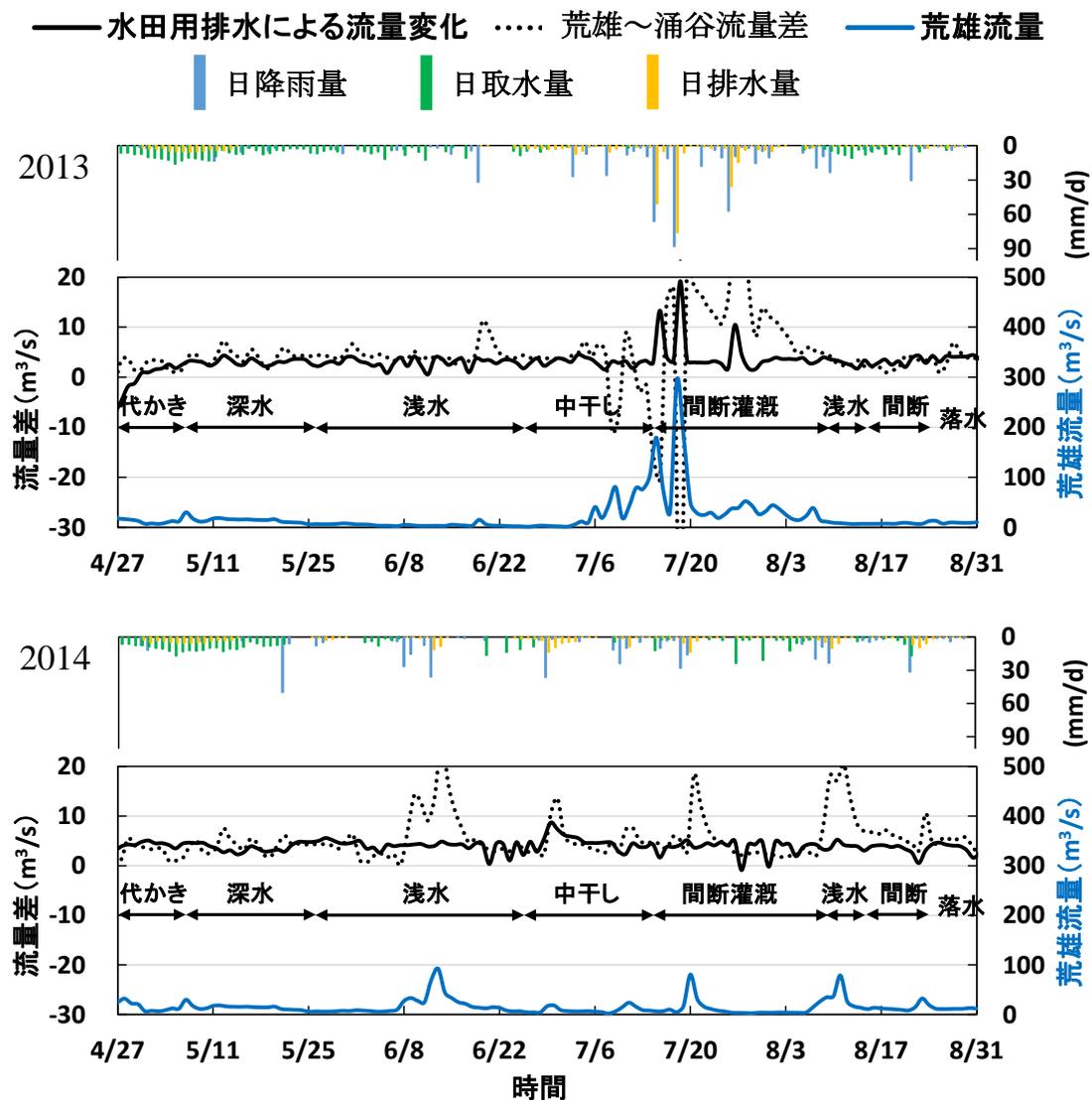


図 3-26 2013～2014 年の気象条件での荒雄～涌谷の流量変化 (10 つ)

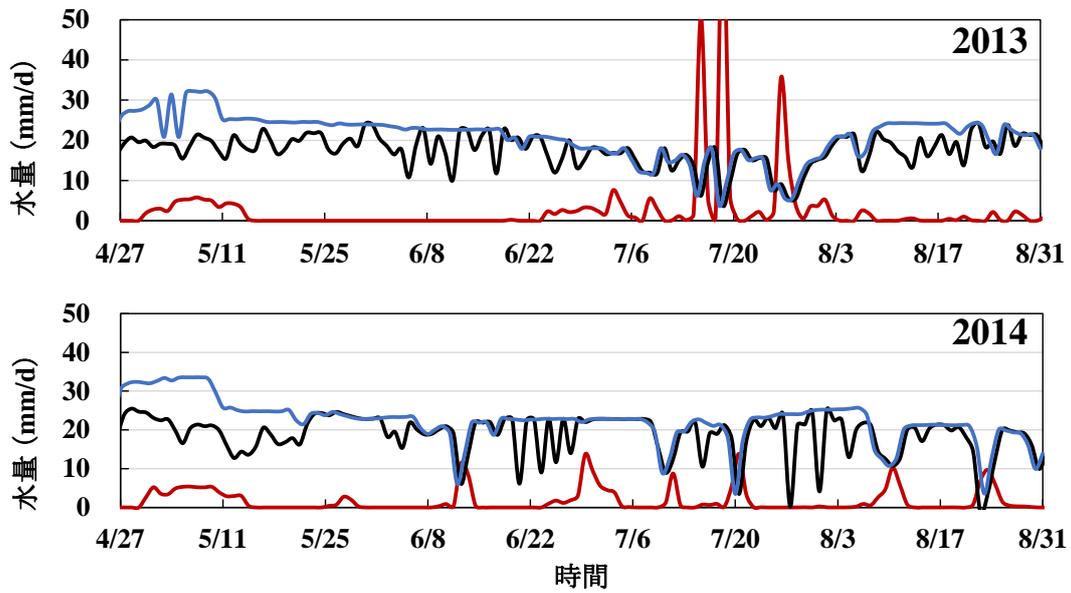


図 3-27 2010~2014 年に単位面積当たりの水田における排水の内訳 (10 つ)

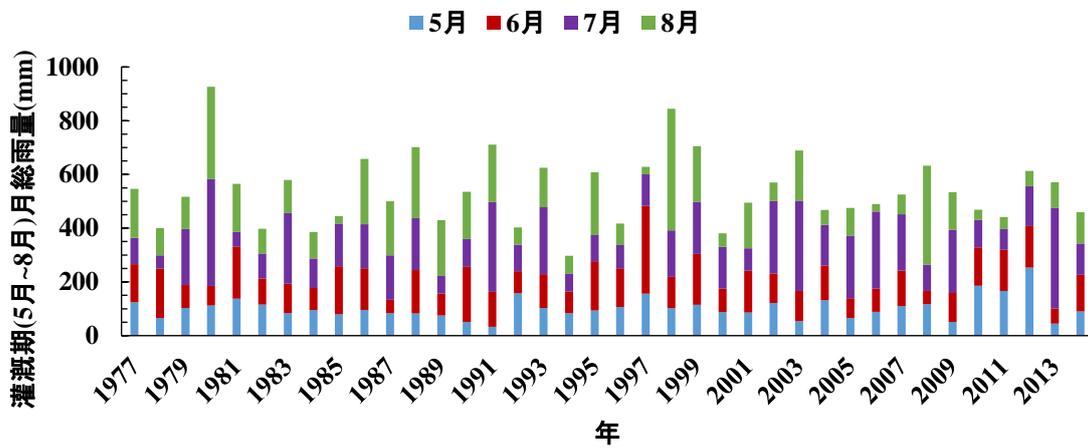


図 3-28 過去 38 年間の 5 月～8 月における月総降雨量

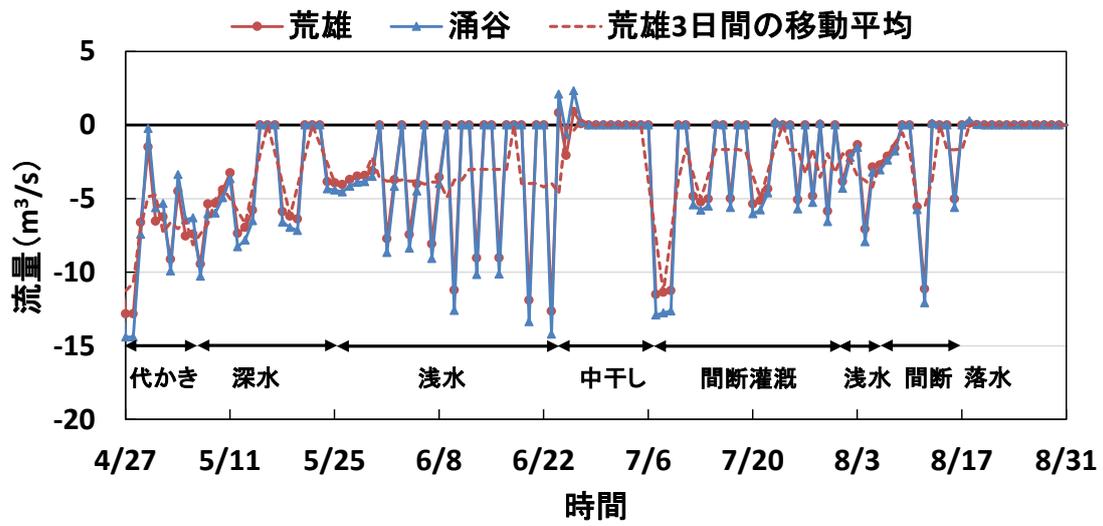


図 3-29 水田に降雨がない場合の河川流量減少

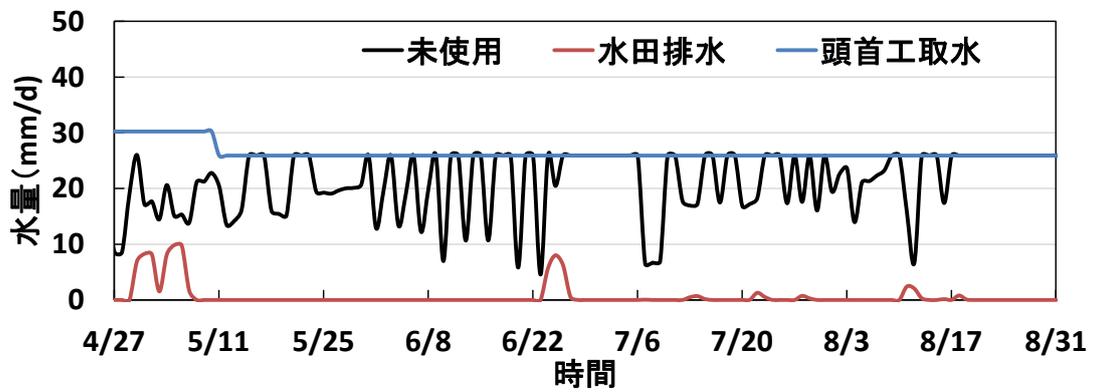


図 3-30 単位面積当たりの水田における排水の内訳 (降雨なし)

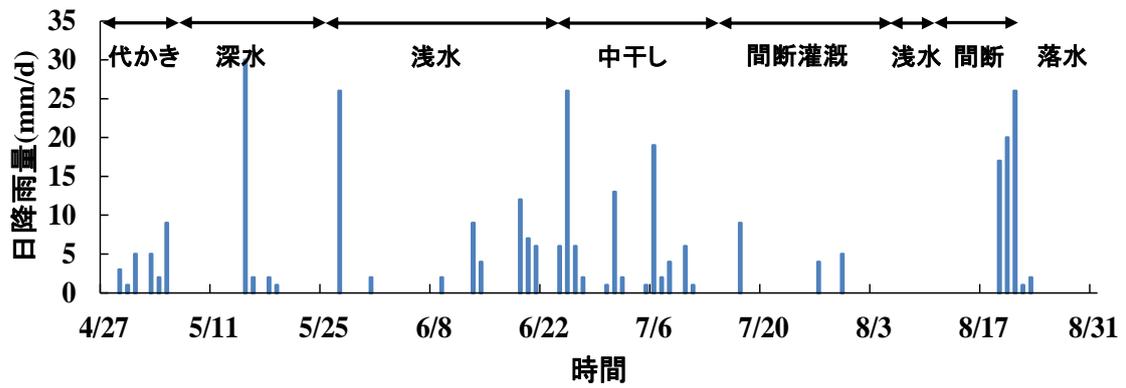


図 3-31 1994 年 5~8 月の日降雨量

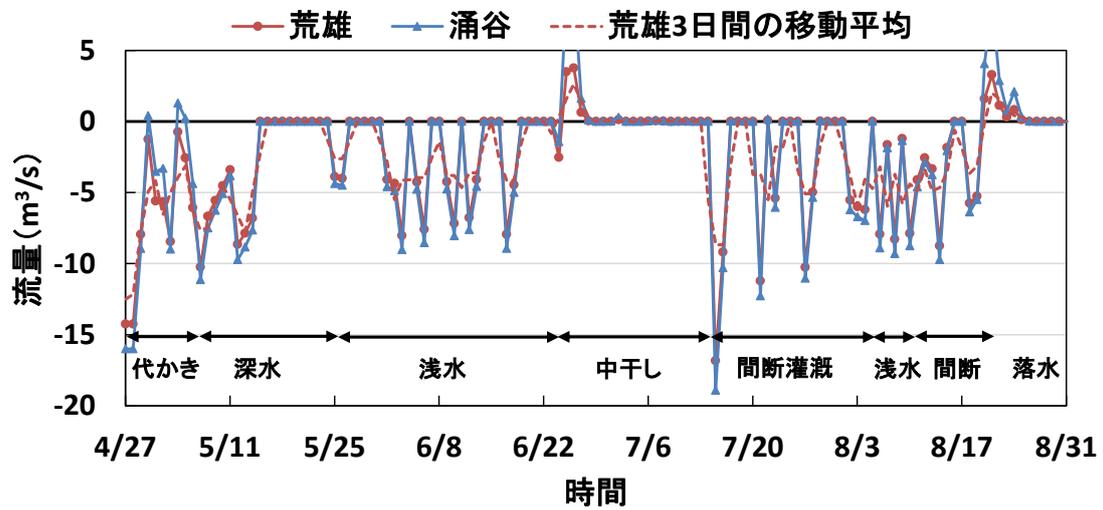


図 3-32 1994 年気象条件場合の河川流量減少

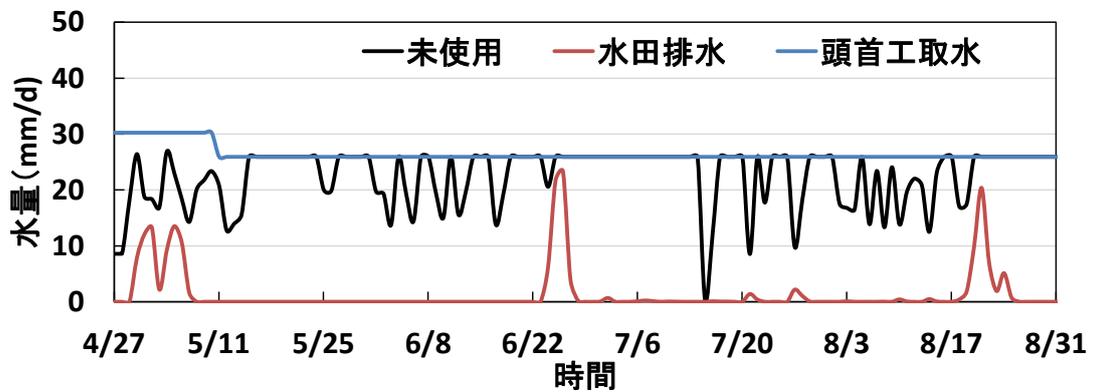


図 3-33 単位面積当たりの水田における排水の内訳 (1994 年)

第4章

水田排水が河川濁度に及ぼす影響

4.1 本章の概要

本章では水田排水が江合川の濁度に及ぼす影響を定量的に検討する。4.2 では河川濁度の生物影響に関する資料と江合川濁度の既往のデータから、農業排水に含まれる SS が江合川の水環境に及ぼしている影響をまとめる。4.3 では水田排水路で得られた SS フラックスのデータ (図 2-28) をもとに、稲作カレンダーと降雨量を説明変数として数量化Ⅱ類を用いて水田から排出される SS を定式化する。4.4 では国土交通省が江合川で行った濁度観測の結果に基づき、水田排水が集中する区間での SS フラックス増分を解析する。4.5 では、4.3 で求めた水田からの SS フラックス推定式を 4.4 で検討対象とした河川区間に適用し、推定結果と観測結果を比較し考察する。

4.2 江合川の濁水問題

4.2.1 濁水が魚類に及ぼす影響

濁水が河川の生態系に影響を及ぼしていることは多くの研究で指摘されている (例えば、Newcombe and MacDonald, 1991; Bruton, 1995; Richter et al., 1997; Henley et al., 2000; Sutherland et al., 2002)。また高濃度の SS が魚類の健康や増殖に及ぼす具体的な影響も検証されている。例えば Sigler ら (1984) は室内実験水槽において *steelheads* と *coho salmon* を高濃度濁水に曝露し、鰓に損傷の生じることを示している。Reid ら (1999) は室内実験とカナダ東部の Ontario 湖における濁水中の *largemouth bass* の行動観察し、高濁度の水中では摂餌頻度の減少や捕食に対する脆弱化の生じることを指摘している。また Sutherland ら (2007) は川に住む二種類の魚の成長率が濁水濃度の増加とともに低下することを室内実験により示している。Smit ら (1998) は南アフリカの Kruger National Park 内の川に多く生存する *Oreochromis mossambicus* の卵や稚魚に及ぼす影響が濁度によって増加することを報告している。

江合川では昔からアユ漁が盛んだが、近年、濁水がアユの生態に影響を及ぼしているとの

指摘がなされている（鳴子ダム管理所, 2013）。ただし、その現象が最近発生したのか、環境意識の高まりとともに近年指摘されるようになったかは明確でない。アユ (*Plecoglossus altivelis*) は東アジアから東南アジアに分布する淡水魚だが、その中心は日本であり（高橋勇夫・東健作, 2006）、重要な水産対象魚類の一つとなっている。成魚は河川で生活して産卵するが、仔稚魚は川を下り河口周辺の海域で生活する。河口域の環境によっては、河口域にも仔稚魚の成育場が形成される場合もある。一般的な生態は以下のとおりである。9月中旬から12月にかけて、小石混じりの砂地で産卵し、2週間ほど後に孵化した仔稚魚は川を下り、河口周辺海域を回遊する。翌年4~5月に河川を遡上し、以後は河川内で岩に付着した珪藻などを食べて成長する。秋から河川のやや下流部に移動して産卵する。したがって鮎の成長に重要な時期は水田灌漑期と重複している。

濁水がアユの生育や行動に及ぼす影響に関する研究が日本では多く行われている（例えば、井上ら, 1982；本田, 1983；岡村ら, 1998, 2011；安房田ら, 2010；鬼東ら, 2013）。村岡ら（1998）はSS濃度とアユの生存率および生存期間の関係を室内実験により検討した。それによればSSが32,000ppmの場合には30分以内に死亡し、10,000ppmでは半数致死時間が2~3時間程度であること、死亡原因は鰓に付着したケイソウ土が呼吸を防げることでであると結論している。実際、低濃度の濁水で48時間以上生存したアユを清浄な水に戻すと、鰓が洗浄させるために死亡しなくなる。安房田ら（2010）は、比較的低濃度の濁水（50~500mg/L）に異なる時間で曝露した実験により、アユのストレス応答を調べた。それによると、50mg/Lでも長時間曝露した場合にはストレスが高くなる。鬼東ら（2013）は、種々の濁度においてアユの遊泳特性に及ぼす濁度の影響を検討し、濁度の増加とともに、アユの遊泳距離が短く、遊泳速度も遅くなることを示し、その原因が濁水中での視認距離の低下であるとしている。

以上の調査研究は、自然界における常態では生じにくい高濁度状態についてのものがほとんどである。すなわち出水による短時間の高濁度状態、ダム操作に伴う高濁度の継続、何らかの人為排水の影響などを対象としている。一方、下茂ら（1981）は、アユの行動を広範囲の濁度レベルについて調べ、濁度10度になるとアユの摂餌行動に影響が現れ、15度で忌避行動を開始し、20度になるとアユの成長が悪化することを示した。後に述べるように、この程度の濁度であれば農業排水の流入によっても生じ得る。

4.2.2 濁水の発生原因

河川水の濁度は、様々な自然現象や人間活動により上昇する。自然的要因としては、強風による浅瀬での低泥巻き上がり、大雨や融雪に伴う土砂流出、富栄養化による植物プランクトンの大量発生などがある。人為的な濁水問題の代表は、ダムに貯留された洪水濁水が徐々に放流されることによる河川濁度の長期化である。この現象は1970年代から問題視されるようになり、現在ではダム建設後の濁水変動について事前に検討されるようになってきている（樽屋ら, 1998）。原田ら（1996）はバイパス排砂システムによる濁水の長期化現象を

どの程度軽減できるかをモデルで検討した。片山ら（1998）は滋賀県の永源寺ダムを対象とし、濁水問題の解決対策を提言するために、出水に伴い流入した濁水のダム湖内における挙動を数値モデルで検討している。梅田ら（1999）は、宮城県の七ヶ宿ダムを対象として、水温成層下での流入濁水の滞留を現地観測と数値シミュレーションで検討している。

一方、近年の人工林の荒廃や斜面での農地開発により、小さな降雨でも河川濁度上昇の生じる場合のあることが指摘されている（安房田ら，2010）。また、農地の中でも水田が特に大きな負荷原になっていると指摘され、その流出特性の解明や流出抑制対策に関する研究も行われている（須戸ら，2009；北村ら，2011；松井ら，2013）。江合川においても、下流部の水田地帯を流下した後に濁度が上昇しているとの報告がある（鳴子ダム管理所，2013）。

4.2.3 江合川における濁度の縦断分布

1958年に江合川上流部の鬼首カルデラ出口に鳴子ダムが建設された。それ以降に江合川の濁水長期化が発生するようになったと考えられるが、問題視されるようになったのは比較的最近である。すなわち、ダムによる洪水調節が濁水長期化を引き起こすことが1970年代に各地で指摘され、また2000年以降にダム不要論などが盛んになるにつれ、江合川でもダム関係者と地元の住民により鳴子ダムの濁水問題が議論されるようになった。具体的にはアユの生態への影響、有備館（仙台藩の学問所で、観光施設となっている）の池の濁りによる景観問題である。この議論の過程で濁度の縦断分布が観測され、下流部の水田などの耕作地からの濁質流入も指摘されるようになった。

江合川に主な濁度観測点は、上流から末沢、二ツ石頭首工、岩出山大橋、三丁目頭首工、荒雄流量観測所、中北橋、涌谷流量観測所及び一番下流の旧北上川合流点である（図2-12に掲載）。5年間における濁度調査は合計133回であり、そのうち灌漑期（4月26日～9月5日）における観測は65回、非灌漑期は68回であった。灌漑期の観測時期を標準の稲作カレンダーの中に位置づけたところ、代掻き・田植え期（4月26日～5月10日）に4回、普通灌漑期（5月11日～9月5日）に61回であった。

代掻き・田植え期の観測例を図4-1に示す。この期間は田面を攪拌して排水するために、排水濁度はかなり高くなる。この図から、下流に行くほど濁度が増大し、特に【中北橋～涌谷】における増加が顕著であることがわかる。図2-12に示したように、この区間には水田排水が特に集中している。したがって、代掻き・田植え期の水田排水は、アユの生態に対して大きな影響を与えうる。

図4-2に全観測データの縦断分布を3つのパターンに分類した結果を図示する。各パターンの個数は図中に示しているように、Aパターンが8回、Bパターンが61回、Cパターンが64回であり、図にはパターンごとの平均を図化している。Aパターンは最上流で濁度が最も高く、下流に向けて漸減する。これは鳴子ダムが放流する濁水の影響と考えられる。一方、Cパターンは最上流から中北橋まで漸増し、涌谷から増加程度が更に強くなる。これは

水田排水の影響ではないかと思われる。実際、普通灌漑期のみデータの平均縦断分を図化すると図 4-3 の黒棒のようになる。また代かき・田植え期の次に濁質を排出しやすいと思われる中干し期の観測例は青棒のようにプロットされる。なお図 4-2 の B パターンは、A パターンと C パターンの中間的形狀である。普通灌漑期における平均濁度は涌谷より下流の濁度は 10 度を超え、中干し期には 20 度以上となっている。4.2.1 に述べたように、濁度 10 度以上でアユの摂餌行動に影響が表れ、20 度に達すると成長が阻害されることから、水田排水の含む濁度はアユの生態に影響を及ぼしている恐れがある。なお、水田の中干しは一般に 7 月に行われ、アユが河川内に定着して成長している時期にあたる。以上に基づき、次節から稲作カレンダーの各作業段階における水田排水が江合川の濁度に及ぼす影響を定量的に検討する。

4.3 水田からの SS 排出量の解析

4.3.1 SS フラックスの表現方法

水田から排出される SS は、[田面水の SS 濃度×排水量]と表される。物理的に考えれば、田面水の SS 濃度は、雨滴による田面土壌の剥離や、風に起因する田面水の流動に伴う土壌の浮遊によるであろう。両者をまとめて「土粒子の洗掘」と呼ぶことにする。土粒子の洗掘というマイクロな物理現象をモデル化するのは容易でない。実際、水工学の分野では斜面や河道における流水作用のもとでの土粒子洗掘の過程について多くの研究がなされているが（例えば、水理公式集（1999））、十分な精度の式は未だに提案されていない。水田の場合には湛水深がさまざまであり、また稲株の存在などにより、さらに現象は複雑である。また排水量は、堰を越流する水量であるから、堰高と水深の関係から水収支式により算出することも考えられるが、SS 濃度の算定精度が十分でない現状では、排水量のみを微分方程式から算定する意味はあまりない。加えて排水路の中の土砂の運動を取り扱うことも簡単ではない。そこで本研究では、2 章で得られた濁度データの特性を考慮して、SS フラックスを経験的に算出する方法を検討することとした。

2 章で述べたように、灌漑期の現地観測で水田排水路において得られた濁度データ（図 2-29）は以下の特性を示していた。すなわち、SS フラックスは降雨があると上昇する。前述したように、厳密には降雨量と排水量は同じではない。しかし、降雨量を元に SS フラックスを定式化することは実用性が非常に高いと言える。また同じ程度の降雨でも稲作カレンダーの作業段階によって値は微妙に異なっていた。すなわち、水田の状態が異なるからである。そこで本研究では、SS フラックスを日降雨量と稲作カレンダーの作業段階を説明変数として回帰式を求めることを考える。

複数の説明変数で回帰式を作成する場合、重回帰分析がよく使用される。すなわち被説明

変数を説明変数の線形結合と仮定し、自乗誤差が最小となるように重み（回帰係数）を求める方法である。しかし、降雨と稲作作業段階とは性質が全く異なり変数であり、また上に述べたように、SSフラックスに対する降雨と稲作作業段階の効果は、線形和というより、掛け算の形で作用しているように思われる。そこで本研究では、次式のような式形を仮定して回帰式を求めることにする。

$$F_{ss} = \alpha \cdot f_1(T) \times f_2(R) \cdot A \quad (4.1)$$

ここに α は係数； F_{ss} は日単位の SS フラックス； $f_1(T)$ は稲作カレンダーの作業段階 T により定まる値； $f_2(R)$ は日降雨量 R の関数； A は排水する水田の面積である。

T は作業段階であって定量的変数ではない。そこで本研究では、まず、非定量的因子についても適用可能な数量化Ⅱ類により各説明因子の効果を調べた後、その結果をもとに、重み付き残差法により SS フラックスの推定式を作成する。

4.3.2 数量化Ⅱ類

数量化Ⅱ類は、ダミー変数を導入して質的データを分析する数学的手法である。数量化理論では、アイテム、カテゴリー、外的基準という特別の用語を使用する。アイテムは説明因子、カテゴリーはアイテムの中の項目、外的基準は目的変数に対応する。アイテムの各カテゴリーにダミー変数を割り当てられる。本研究の場合、アイテム「稲作カレンダーの作業」と「日降雨量の程度」であり、前者の中のカテゴリーは、「深水管理」、「浅水管理」というような具体的な作業段階である。また外的基準は、SS フラックスが大きい、小さいということである。

ここでは、ダミー変数を $\delta_{i\lambda}(j,k)$ と書く。ここに i はサンプルの通し番号； j はアイテム； k はアイテムの中のカテゴリーに相当する。また λ は目的変数に対応するカテゴリーであり、後に述べるように本研究では“SS フラックスがある基準値より大きいか小さいか”という2つの λ を用意する。この基準の設定により、全データはいくつかのグループに分けられる。上述の例の場合、グループ数は2となる。ここで、 i 番目のサンプルがアイテム j のカテゴリー k に該当する場合に、もし目的変数 λ に対応する結果を示した場合には $\delta_{i\lambda}(j,k)$ に p という値（例えば1）を割り当て、そうでない場合には異なる値 q （例えば0）を割り当てるものとする。この操作に基づき、各サンプルに対してのサンプル・スコアを以下のように表記する。

$$Y_{i\lambda} = \sum_{j=1}^R \sum_{k=1}^{G_j} a(j,k) \cdot \delta_{i\lambda}(j,k) \quad (4.2)$$

ここに、 R はアイテムの個数、 G_j は j 番目のアイテムのカテゴリーの個数である。ダミー変数にかかる係数 $a(j,k)$ はカテゴリー・スコアと呼ばれ、次に述べる基準により決定される。

基本的考え方は以下のとおりである。「サンプル・スコアの数直線上において、目的変数に対応するカテゴリー j により構成されているグループが、最も大きく分離されるように $a(j,k)$ を決定する」。例えば本研究の問題の場合、農作業の段階と日降雨のレベルの 2 つの j を設定するが、それぞれにおけるカテゴリー (k) に対して与えた $a(j,k)$ の組み合わせにおいて、SS フラックスが閾値以上のグループの $Y_{i,j}$ が負 (正) の側に偏るというように、分離度が最大になるように $a(j,k)$ の値を定める。具体的には、各グループに含まれる標本のサンプル・スコアがその平均値に全て集中とした時の $Y_{i,j}$ の分散 σ_B^2 (これを外分散という) と、もともとのデータの分散 σ^2 の比 η^2 を最大化する。なお本研究では菊地 (2010) のプログラムを用いた。

4.3.3 数量化 II 類の設定

解析用のデータとして、図 4-4 に示した観測データから日降雨量が 1mm 以上の日を抽出して用いた。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。表 4-1 に降雨日、作業段階、最大日降雨量及び対応する日単位の SS フラックスを示す。総データ個数は 24 である。

アイテムは稲作カレンダーの作業段階と、上述の日降雨量である。作業段階のアイテムは、深水、浅水、中干し、間断灌漑、落水後の 5 つであり、対応するデータ数はそれぞれ 8, 10, 1, 1, 4 である。なお代かき・田植え及び落水の期間は、人為的に排水が行われるので、降雨と無関係に SS フラックスが生じるため、解析から除外している。

また、日降雨量をカテゴリー化するために、気象庁が定義する時間雨量の強度区分の数値を参考し、日降雨量を 1~3mm、3~10mm、10~20mm、20~30mm、30~50mm の 5 段階に区分した。各カテゴリーにおけるデータ数はそれぞれ 8, 10, 1, 1, 4 個である。

続いて、SS フラックスのピック値については、閾値を設定して 2 つのグループ (カテゴリー) に分けた。数量化 II 類では目的変数のグループ間変動と全変動との比率 (相関比 η^2) 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 SS フラックスのピック値を 0.60、0.50、0.40、0.25g/s に設定した。各相関比を調べたところ、0.63、0.69、0.58、0.62 となったので、0.5g/s が目的変数をグループ化する際の閾値として採用された。

4.3.4 解析結果

図 4-5 に各作業段階のカテゴリー・スコアを示す。深水、浅水、中干し、間断灌漑及び落水後は対応するスコアはそれぞれ -0.670, 0.073, 0.476, -0.022, -0.269 である。水田から流出する濁質量は深水に一番少なく、続いて落水後、間断灌漑、浅水の順番で、中干しに最大になることが分かる。深水管理期に水田の排水口が完全に閉じられ、水田からの排水がほぼ

0である。また、約5cmの水が溜まっているから、雨や風から水田土壌を守り、侵食を防ぐ働きがあると考えられる。浅水管理期に水田の排水口に約6.7cmの堰が設置され、大雨の場合に水が外に出ることがある。また、水が浅くなるし、稲がまだ大きく成長していないから、土壌侵食が起きやすくなる。これは水田から流出する濁質の量が多い原因だと考える。中干し期に水田の排水口が完全に撤去され、水田土壌が乾燥状態になる。大雨が降ると、地表面の土壌が侵食され、排水とともに濁質が排出される。また、稲が大きく成長したが、完全に水田地表面を覆う程度ではないから、中干し期に最大値が生じる原因だと考慮する。間断灌漑期に水田の排水口に約2.2cmの堰が設置され、水深が非常に浅くなり、乾燥状態もあるから、浅水管理と同じように土壌侵食が起きやすくなるはずである。しかし、稲が大きく成長してほぼ100%地表面を覆う状態になるので、雨滴は稲によって遮断され、全ての降水が地表面に到達するわけではない。そのため、降雨により生じた土壌侵食が弱くなり、排出される濁質量が小さくなる。また、数量化Ⅱ類の結果から見ると、稲の遮断作用は降雨後水田からの濁質流出の低減に大きい役割があることが分かる。落水後は中干しと同じように排水口が完全に開放され、稲刈りを待つ時期である。この時期にスコアが小さい原因は二つあると考えている。1つは落水後に稲の完熟を待つためにすぐ稲刈りを行わず、降雨の際に雨滴を遮断し、田面侵食防止の効果がある。もう一つは観測結果から抽出したデータの中に、落水後の日降雨量が全部6mm以下で、大雨のケースがない。2014年の灌漑期(4月27日～8月31日)だけに現地観測を行ったので、他の年に気象条件が違う場合の状況を把握できなかった。ただし、国交省が2010～2014年に行った江合川濁度定期調査のデータを用いて数量化Ⅱ類で解析した結果は2014年に現地観測で得られた傾向と同じで、中干し、間断灌漑、落水後の順番になる。また、水田排水路における数量化Ⅱ類の解析結果を用いて作成したSSフラックス経験式は現地観測を行った2014年だけでなく2010～2013年のデータについても比較的良い結果を与えたので、他の年も同じ傾向があると考えられる。(江合川の解析について節4.4と4.5で詳しく述べる)。

図4-6に日降雨量のカテゴリー・スコアを示す。1～3mm、3～10mm、10～20mm、20～30mm、30～50mmのスコアはそれぞれ-0.219、-0.611、-0.597、1.877、1.646である。日降雨量の増加に伴い、水田から流出する濁質の量が増える傾向が見える。また、日降雨量が20mm以下の際に濁質流出が小さく、20mmを超えると濁質流出が急激に増加することが分かる。

4.4 江合川濁質増分の解析

一枚の水田の濁質流出特性を検討した上で、国土交通省の観測データを用い、稲作カレンダーの各作業段階の降雨後に大規模な水田地帯から排出する濁質の特性を研究した。ここで、前節と同じように、SSフラックスを用いて水田から排出する濁質の量を表す。SSフラックスを使って濃度を使わない原因は幹線排水口から江合川に流入する水田排水による江

合川水に及ぼす影響が河川上流から流れる水量に影響されていると考える。SS が高くて水量が少ない水田排水は流量が相対的大きい江合川に流入する場合に高濃度の水田排水は希釈され、河川の濁度にあまり影響を与えない可能性が高い。その一方、SS があまり高くなって水量が多い水田排水は流量が相対的小さい江合川に流入する時に、河川水の濁度を増加させる恐れがある。そこで、流量も河川の濁度に変化させる 1 つの重要な因子であり、濃度に流量をかけて得た SS フラックスを用いて水田から流出する濁質が河川に及ぼす影響を検討した方がいいと考える。

4.4.1 対象区間と分析期間

第 2 章に述べたように、国土交通省が江合川に末沢、荒雄、涌谷の 3 つの流量観測所と末沢、ニツ石頭首工、岩出山大橋、三丁目頭首工、荒雄流量観測所、中北橋、涌谷流量観測所及び旧北上川合流点の 8 つの濁度定期計測点があり、流量と濁度の観測点は下流に集中する（図 2-12）。また、中北橋～涌谷流量観測所の区間に田尻川に介して水田排水が一番集中する排水口がある。この区間に排水する水田は田尻川流域に位置する。表 2-2 の江合川支川の土地利用区分割合によって、田尻川流域内に主に水田で、その割合が 56.12%である。森林の割合は 21.72%だが、ほぼ北西側の山地に分布する。建物用地の割合は 10.98%で、約半分が荒雄流量観測所の上流に位置する。そこで、中北橋～涌谷流量観測所の区間における SS フラックスの増分はほぼ水田排水に影響されると考える。以上のことに基づき、中北橋～涌谷流量観測所の区間を対象として、水田から流出する濁質が稲作カレンダーの各作業段階と日降雨量の関係を検討する。

解析対象とした国土交通省のデータは 2010 年から 2014 年に平均 1 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、9 月末の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。

4.4.2 濁質増分の推定

中北橋～涌谷流量観測所の区間における SS フラックスの増分 F'_{SS} を以下の式により計算した。

$$F'_{ss} = SS_W \cdot Q_W - SS_N \cdot Q_N \quad (4.15)$$

ここに SS_W 、 SS_N は涌谷と中北橋の SS 濃度； Q_W 、 Q_N は涌谷と中北橋の日流量である。

中北橋に流量データがないけど、6km 離れる上流に荒雄流量観測所がある。また、荒雄流量観測所と中北橋の間に右京江頭首工があるが、日の取水量データが得られる。そこで、中

北橋の日流量は下式により計算した。

$$Q_N = Q_A - q_u \quad (4.16)$$

ここに、 Q_A は荒雄の日流量； q_u は右京江頭首工での日平均取水量である。

濁度からSSへの換算は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サンプル試験のうち、5月10日～9月5日の普通灌漑期に得られたデータに基づき推定した。サンプル試験の結果を図4-7に示す。図中では上流【末沢、ニッ石頭首工、大堰頭首工】、中流【岩出山大橋、三丁目頭首工、清水川頭首工】、下流【荒雄流量観測所、中北橋、涌谷流量観測所、旧北上川合流点】の区間に分けてプロットしている。江合川の上流と中流におけるデータがほぼ同じ直線に位置するが、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分かる。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。SSは濁度と1.76倍の関係があり、図2-28に示した水田土壌の試験結果(2.28倍)に近いことが分かる。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るのではないかと考えられる。

なお、降雨がなくてもSSフラックスは存在する。その基底値を求めるために、観測日の前2日間から降雨がなかった日を抽出した。式4-15で計算されたSSフラックス増分の平均値は83g/sであり、この数値を中北橋～涌谷流量観測所の区間におけるSSフラックス増分の基底値とした。

4.4.3 数量化Ⅱ類の設定

水田排水路における濁質解析と同じで、SSフラックスを目的変数、作業段階と日降雨量をアイテムと設定した。表4-2に分析データを示しており、合計25個である。その中に、落水後は水田の最終落水～稲刈りの9月末と設定し、日降雨量が10mm以上のケースが1つで、30mm以上のケースは3つある。

作業段階のカテゴリーは深水、浅水、中干し、間断灌漑、落水後であり、日降雨量のカテゴリーは1～3mm、3～10mm、10～20mm、20～30mm、30～50mmである。前述のように、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個あったが、このうち1mm以上の降雨のあった日のデータは25個であり、深水管理期と浅水管理期のデータはなかったが、他の作業段階におけるデータ数がそれぞれ3、9、13である。また日降雨量が20～30mmのデータもなかったが、他のカテゴリーに対応するデータ数が13、5、4、3である。数量化Ⅱ類を用いて解析を行う時にデータがないカテゴリーを削除した。

SSフラックスの増分は、各観測日の原データ値から基底値の83g/sを差し引いて取り扱われた。なお前節と同様にSSフラックスの増分の閾値を50、100、150、200g/sに設定して最大分散比を調べたところ、それぞれ0.32、0.53、0.50、0.47となった。そこで、100g/sが目的変数をグループ化する際の閾値として採用された。

4.4.4 解析結果

図 4-8 に各作業段階のカテゴリー・スコアを示す。前述の理由により深水管理と浅水管理の期間にデータはないが、中干し、間断灌漑及び落水後は対応するスコアはそれぞれ 1.729, 0.581, -0.801 である。水田から流出する濁質量は中干し期に一番大きく、続いて間断灌漑、落水後の順番である。データの存在する作業段階についてのスコアの相対関係の全体的傾向はほぼ水田排水路の結果（図 4-5）と同じである。

図 4-9 に日降雨量のカテゴリー・スコアを示す。1～3mm、3～10mm、10～20mm、30～50mm のスコアはそれぞれ-0.206, -0.755, -0.065, 2.235 である。日降雨量の増加に伴い、水田から流出する濁質の量が増える傾向が見える。また、データの存在するカテゴリーについてのスコアの相対関係の全体的傾向も水田排水路の結果（図 4-6）と共通していることがわかる。

4.5 水田から流出する濁質の推定と検証

4.5.1 経験式関数の設定

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解析結果をもとに式 4.1 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散比に変化はない。そこで、水田排水路のスコアを全部正になるよう、式 4.1 を下式のように変形した。

$$F_{ss} = \alpha \cdot [f_1(T) + C_1][f_2(R) + C_2] \cdot A \quad (4.17)$$

ここに、 $f_1(T)$ 、 $f_2(R)$ は作業段階と日降雨量のカテゴリー・スコアであり、 C_1 、 C_2 は常数項である。 α 、 C_1 と C_2 を求めるために、式 4.18 に示す重み付き残差法を用いた。

$$\int \{\text{残差} \varepsilon \times \text{重み関数} w\} dx \rightarrow 0 \quad (4.18)$$

ここで、SS フラックス、日降雨量などの観測データは連続的なデータではないので、重み付き残差法を式 4.19 に示すように総和公式に変わった。

$$\Sigma\{\varepsilon \times w\} \rightarrow 0 \quad (4.19)$$

残差 ε は式 4.20 に示され、近似関数 Y （式 4.21）と観測値 Z の差であり、重み関数を三つの値を設定した（式 4.22）。

$$\varepsilon = Y - Z \quad (4.20)$$

$$Y = \alpha[f_1(T) + C_1] \cdot [f_2(R) + C_2] = \alpha \cdot f_1 \cdot f_2 + \alpha \cdot C_2 \cdot f_1 + \alpha \cdot C_1 \cdot f_2 + \alpha \cdot C_1 \cdot C_2 \quad (4.21)$$

$$w_1 = f_1 \quad w_2 = f_2 \quad w_3 = f_1 \cdot f_2 \quad (4.22)$$

以上の設定により、式 4.19 の重み残差方程式を下式のように書き換える。

$$\sum_{j=1}^N (Y_j - Z_j) \cdot w_i = 0 \quad (4.23)$$

$$\sum_{j=1}^N \{(\alpha \cdot f_1 \cdot f_2 + \alpha \cdot C_2 \cdot f_1 + \alpha \cdot C_1 \cdot f_2 + \alpha \cdot C_1 \cdot C_2 - Z) \cdot f_1\} = 0 \quad (4.24)$$

$$\sum_{j=1}^N \{(\alpha \cdot f_1 \cdot f_2 + \alpha \cdot C_2 \cdot f_1 + \alpha \cdot C_1 \cdot f_2 + \alpha \cdot C_1 \cdot C_2 - Z) \cdot f_2\} = 0 \quad (4.25)$$

$$\sum_{j=1}^N \{(\alpha \cdot f_1 \cdot f_2 + \alpha \cdot C_2 \cdot f_1 + \alpha \cdot C_1 \cdot f_2 + \alpha \cdot C_1 \cdot C_2 - Z) \cdot f_1 \cdot f_2\} = 0 \quad (4.26)$$

f_1 と f_2 は観測データから選んだ各サンプルの作業段階と日降雨量のスコアで、常数項になるので、式 4.24~4.26 は α 、 C_1 と C_2 の三つの未知数を含める 3 元 1 次連立方程式になった。この 3 元 1 次連立方程式を解けた結果は $\alpha=0.319$ 、 $C_1=1.369$ 、 $C_2=1.205$ である。図 4.5 と図 4.6 に示す作業段階と日降雨量のスコアを 1.369 と 1.205 を足して、全部のスコアを正になり、その結果を図 4.10 と図 4.11 に示す。作業段階では、深水、浅水、中干し、間断灌漑及び落水後はそれぞれ 0.699, 1.442, 1.845, 1.347, 1.100 になる。これらの数値を用いて作業段階の関数 $f_1(T)$ を定めた。日降雨量では、1~3mm、3~10mm、10~20mm、20~30mm、30~50mm はそれぞれ 0.986, 0.594, 0.608, 3.082, 2.851 になる。また、連続的に精度が高い日降雨量の関数を求めるために、図 4-11 に得られた数値を用いて連続的な曲線を作成する。具体的な方法は以下に述べる。まず、各カテゴリーの日降雨量範囲の平均値を求めて、それぞれは 2cm、6.5 cm、15cm、25cm、40cm である。続いてソフト origin で日降雨量の平均値と C_2 を足したスコアに適応してロジスティック曲線を生成した。その後、日降雨量が 20mm 以下の際に濁質流出が小さく、20mm を超えると濁質流出が急激に増加するという数量化Ⅱ類結果の特徴に基づき、図 4.11 の赤線が示すように曲線を調整した。その近似方程式を日降雨量の関数 $f_2(R)$ とした。

係数 α については、上述の計算により 0.319 とした。また、排水路の観測地点より上流の水田面積は 3.7ha であり、 α 、 C_1 と C_2 を求める際に、直接にこの 3.7 ha 水田から流出する SS

フラックスの結果を用いた。そこで、3.7 ha を単位として、水田排水路と河川の濁質増分を計算する。

4.5.2 水田排水路の推定結果

前節に述べた関数を用いて水田排水路における濁質を推定した。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、8月24日に最終落水であるため、推定してなかった。得られた結果を図4-12の赤線に示す。降雨がない際に、水田排水路におけるSSフラックスはほぼ0付近で、降雨があると大きくなる。稲作カレンダーの作業段階の関数も考慮したから、同じ程度の降雨量でもSSフラックスの応答が違う。また、浅水管理の6月12日、間断灌漑の8月12日の降雨イベントにおけるSSフラックスがよく再現でき、中干し期の6月29日に過小評価し、7月10日に過大評価したが、計算値は深水管理からの灌漑期において概ね観測値と一致していると考ええる。

4.5.3 江合川濁質増分の推定結果

以上の関数を用い、中北橋～涌谷流量観測所の区間に排水する水田面積(2155.1ha/3.7ha)を乗じ、4.4.2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年と同一と設定した。

計算結果と河川の観測値を図4-13に比較する。黒点は河川の観測値で、赤線は計算値である。国交省が行った観測は約1週間ごと一回で、業務発注時期の関係から2010～2012年及び2014年に7月から始まっているが、2013年に5月から早い段階に観測を行った。全体的から見ると、節4.4.2に述べたように中北橋～涌谷流量観測所の間にはSSフラックス増分の基底値があり、概ね得られた83g/sと一致することがわかる。計算では降雨によるピク値を生じる多くの日に観測データがないから、比較できなかった。また、2012年7月9日、2013年7月29日及び2014年7月22日などの日に観測結果は計算結果と比較すれば、1日か2日の遅れがある。その原因は計算においては、水田直下の排水路におけるSSフラックスが遅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～涌谷流量観測所の区間の排出口までは図2-12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る。

また、以下に挙げられる点も計算値と観測値の一致度を影響する原因だと考える。

- (1) 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。
- (2) 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。

(3) 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。

(4) 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。

4.6 まとめ

本章の結論を以下にまとめる。

(1) 河川の濁水問題と魚類に与える影響及び濁水の発生原因を簡単に紹介した。国土交通省が行った観測データを用いて江合川における濁度の縦断分布を分析し、灌漑期に水田排水が河川の濁度に及ぼす影響を無視できないことがわかった。

(2) 2014 年の灌漑期に行った現地観測の結果によって、水田からの濁質流出が稲作カレンダーの作業段階と日降雨量に影響されることがわかり、作業段階と日降雨量を関数とする濁質流出の推定式を作成した。

(3) 質的データで判別分析を行われる数量化Ⅱ類を用いて、SS フラックスを目的変数、作業段階と日降雨量を説明変数(アイテム)として、水田から流出する濁質の特性を解析した。水田排水路における結果は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。

(4) 水田排水路データを分析した上で、稲作カレンダーの各作業段階の降雨後に大規模な水田地帯から排出する濁質の特性を研究した。水田割合が大きくて水田排水が集中する中北橋～涌谷流量観測所の区間を選び、数量化Ⅱ類により、水田排水路と同じで、濁質増分の特性を解析した。その結果はほぼ水田排水路の結果と共通していることが分かった。

(5) 数量化Ⅱ類の結果に基づき、濁質流出推定式の作業段階と日降雨量の関数を定めた。それにより推定した水田排水路の濁質はほぼ観測結果と一致することがわかった。また、江

合川で水田排水が集中する中北橋～涌谷流量観測所の区間の濁度上昇をある程度説明した。(6) 最後に、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。

参考文献

- Bruton, M.N., 1995. Have fishes had their chips? The dilemma of threatened fishes. *Environ. Biol. Fish.* 43: 1–27.
- Henley, W.F., Patterson, M.A., Neves, R.J., Dennis Lemly, A., 2000. Effects of sedimentation and turbidity on lotic food webs: a concise review for natural resource managers. *Rev. Fish. Sci.* 8: 125–139.
- Newcombe, C.P., MacDonald, D.D., 1991. Effects of suspended sediments on aquatic ecosystems. *N. Am. J. Fish. Manag.* 11: 72–82.
- Reid, S.M., Fox, M.G., Whillans, T.H., 1999. Influence of turbidity on piscivory in largemouth bass (*Micropterus salmoides*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 56: 1362–1369.
- Richter, B.D., Braun, D.P., Mendelson, M.a., Master, L.L., 1997. Threats to imperiled freshwater fauna. *Cons. Biol.* 11: 1081–1093.
- Sigler, J., W. Bjornn and F. H. Everest., 1984. Effects of chronic turbidity on density and growth of steelheads and coho salmon. *Trans. Am. Fish. Sci.*, 113: 142–150.
- Smit, L., Du Preez, H.H., Steyn, G.J., 1998. Influence of natural silt on the survival of *Oreochromis mossambicus* yolk sac larvae. *Koedoe* 41: 57–62.
- Sutherland, A.B., Meyer, J.L., Gardiner, E.P., 2002. Effects of land cover on sediment regime and fish assemblage structure in four southern Appalachian streams. *Fresh. Biol.* 47: 1791–1805.
- Sutherland, A.B., Meyer, J.L., 2007. Effects of increased suspended sediment on growth rate and gill condition of two southern Appalachian minnows. *Environ. Biol. Fish.* 80: 389–403.
- 荒木英一. 2010. 数量化 II 類による景況調査の構造分析. 桃山学院大学総合研究所紀要, 35(3): 75-92.
- 梅田信, 横山勝英, 石川忠晴. 1999. センセキ貯水池における洪水時の濁質の流動, 堆積過程に関する観測と数値解析. 水工学論文集, 43: 599-604.
- 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 藏本更織, 野口翔平, 上田紗奈江. 2013. 静止流体中を単独で遊泳するアユの遊泳特性に及ぼす濁度の影響. 土木学会論文集, 69(6): II_337-II_342.
- 片山雅彦, 岡本麻美, 千家正照, 伊藤健吾. 1998. 永源寺ダムにおける水温と濁度の長期変動解析. 農業土木学会誌, 66(11): 1129-1134.
- 鈴木伴征, 櫻井寿之, 柏井条介. 2004. 川治ダム貯水池の洪水時濁水現象. 水工学論文集, 48:

1357-1362.

- 下茂繁ほか. 1981. 内水面魚類影響調査報告書 (総括報告書). 電力中央研究所.
- 高橋勇夫・東健作. 1998. ここまでわかったアユの本. 築地書館.
- 樽屋啓之, 中達雄, 藤井秀人. 1998. 農業用ダムの濁水問題に関する全国調査の分析. 農土誌, 66(11): 1103-1109.
- 鳴子ダム管理所. 2013. 第一回鳴子ダム濁水対策検討会資料. 国土交通省東北地方整備局.
- 原田稔, 寺田昌史, 出野尚, 葛岡昌基. 1996. 貯水池のバイパス排砂システムによる濁水長期化軽減効果の検討. 水工学論文集, 40: 613-618.
- 村岡敬子, 角哲也. 1998. 高濃度の濁りがアユに与える影響について. 土木学会関東支部年次学術講演概要集, 1048-1049.
- 村岡敬子, 天野邦彦, 土居隆秀, 久保田仁志, 三輪準二. 2011. 高濃度濁水下におけるアユの生存率と懸濁物質の粒度組成の関係. 魚類学雑誌, 58(2):141-151.
- 安房田智司, 武島弘彦, 鶴田哲也, 矢田崇, 井口恵一郎. 2010. 短時間・長時間の濁りに対するアユのストレス応答. 水産増殖, 58(3):425-427.

表 4-1 降雨日、作業段階、最大日降雨量及び日 SS フラックス (水田排水路)

番号	降雨日	作業段階	最大日降雨量 (mm/d)	SS フラックス (g/s)
1	5.9	深水	4	0.104
2	5.13	深水	1	0.038
3	5.15~5.16	深水	3.5	0.055
4	5.21~5.22	深水	50	0.222
5	5.26~5.27	浅水	8	0.448
6	6.11~6.12	浅水	36	1.603
7	6.17	浅水	1	0.048
8	6.20	浅水	3	0.119
9	6.28	中干し	2.5	0.070
10	6.29	中干し	36.5	2.314
11	6.30	中干し	2	1.209
12	7.4	中干し	4	0.105
13	7.9	中干し	3.5	0.122
14	7.10~7.11	中干し	24	0.588
15	7.13~7.14	中干し	4.5	0.038
16	7.16	間断灌溉	10	0.254
17	8.15	間断灌溉	3	0.025
18	8.16	間断灌溉	4.5	0.099
19	8.17	間断灌溉	2.5	0.056
20	8.18	間断灌溉	2	0.100
21	8.22~8.23	間断灌溉	31.5	1.401
22	8.28~8.29	落水後	4	0.120
23	8.30	落水後	1.5	0.231
24	9.2	落水後	2.5	0.134

表 4-2 江合川濁度の調査日、作業段階、降雨量及び対応する SS フラックス (河川)

番号	降雨日	作業段階	日降雨量 (mm/d)	SS フラックス (g/s)
1	2010.7.12	中干し	11	428.243
2	2012.7.2	中干し	19.5	536.800
3	2014.7.14	中干し	5	201.081
4	2011.7.20	間断灌溉	5	172.304
5	2011.8.15	間断灌溉	1.5	94.494
6	2011.8.22	間断灌溉	11	361.099
7	2012.7.24	間断灌溉	0.5	87.243
8	2012.7.30	間断灌溉	4	98.067
9	2013.7.16	間断灌溉	4.5	1327.286
10	2013.7.29	間断灌溉	1	1023.224
11	2014.8.12	間断灌溉	0.5	1115.842
12	2014.8.18	間断灌溉	2	255.802
13	2010.8.26	落水後	2	61.090
14	2012.9.3	落水後	4.5	101.605
15	2013.9.2	落水後	0.5	109.776
16	2014.8.27	落水後	1.5	80.890
17	2014.9.2	落水後	2.5	105.640
18	2010.9.13	落水後	45.5	774.470
19	2011.9.12	落水後	0.5	-31.293
20	2013.9.9	落水後	0.5	706.920
21	2010.9.27	落水後	1	180.998
22	2011.9.20	落水後	40	1043.416
23	2011.9.22	落水後	101	4356.458
24	2012.9.24	落水後	10.5	71.210
25	2014.9.26	落水後	0.5	174.436

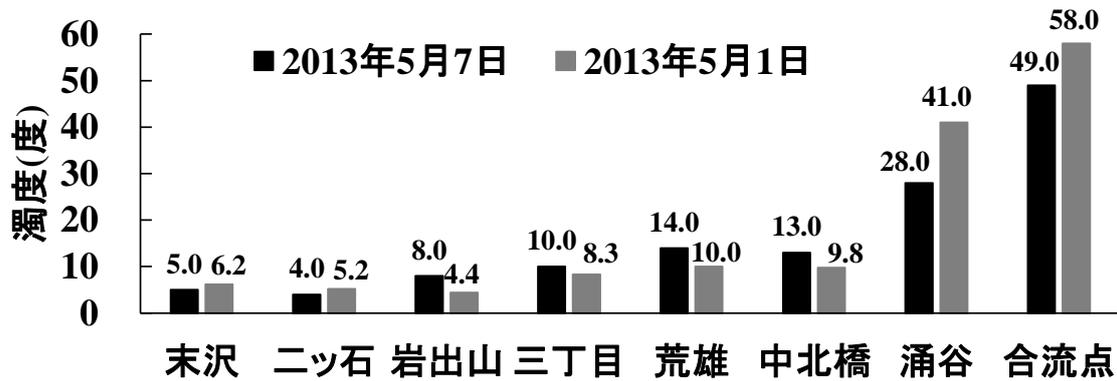


図 4-1 代かき・田植え期に江合川における濁度縦断分布

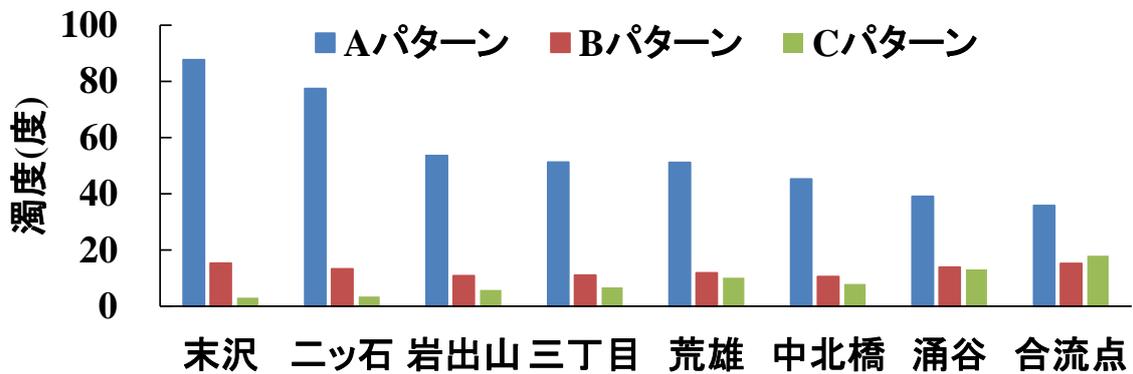


図 4-2 江合川における濁度縦断分布のパターン

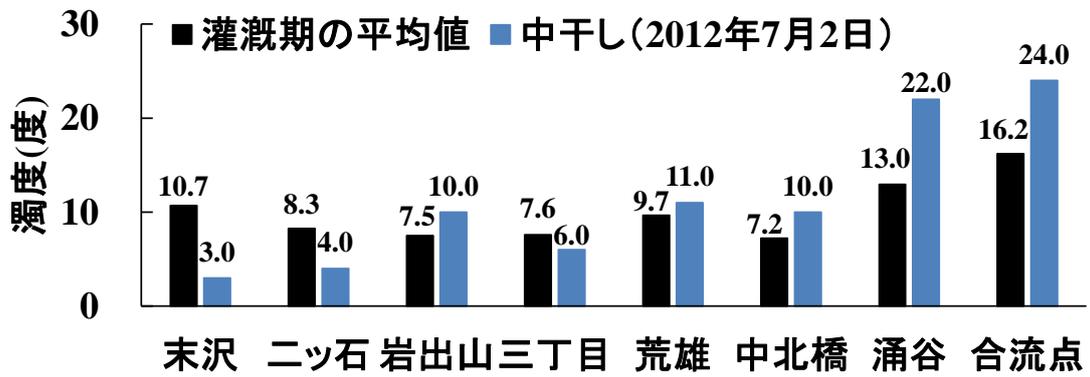


図 4-3 2010～2014 年の灌漑期に平均的濁度縦断分布

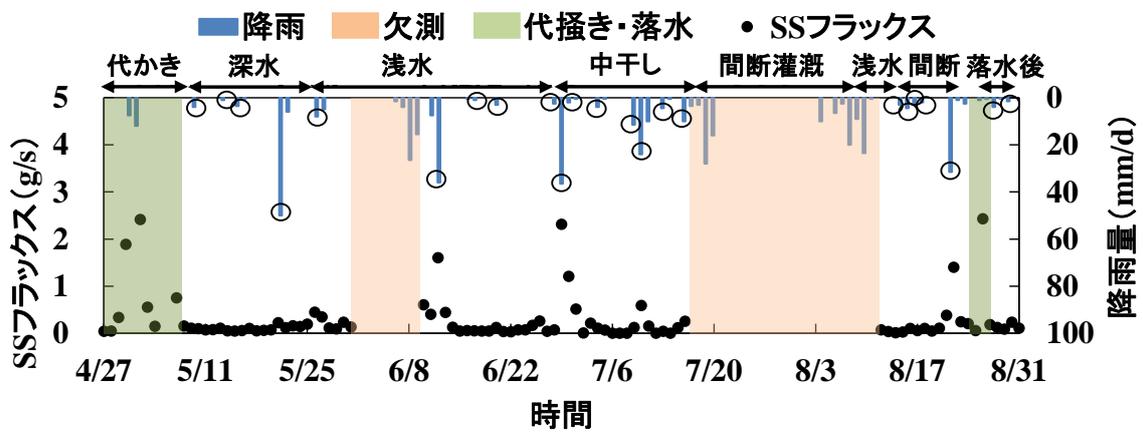


図 4-4 水田排水路の濁質解析用データ

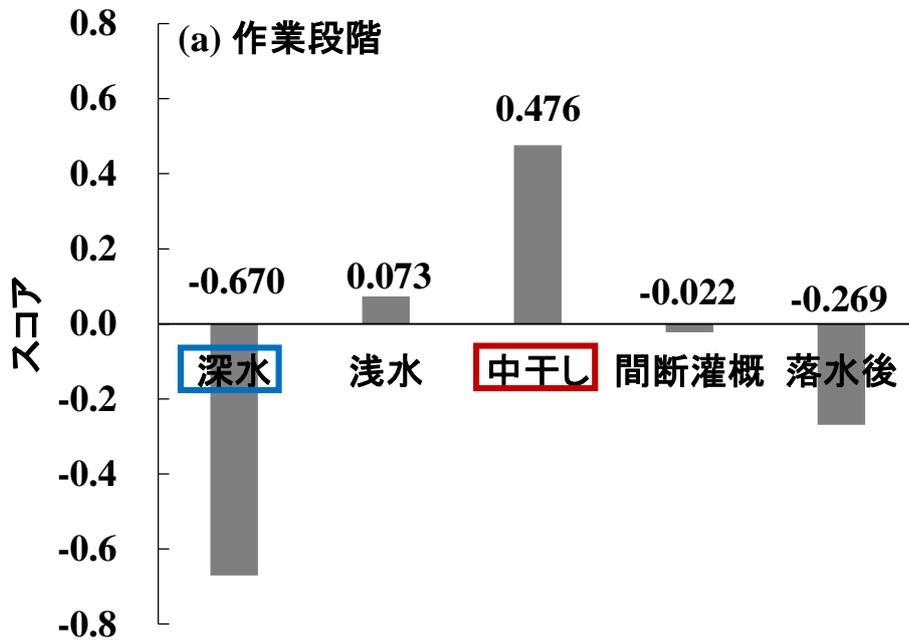


図 4-5 作業段階の 카테고리・スコア (水田排水路)

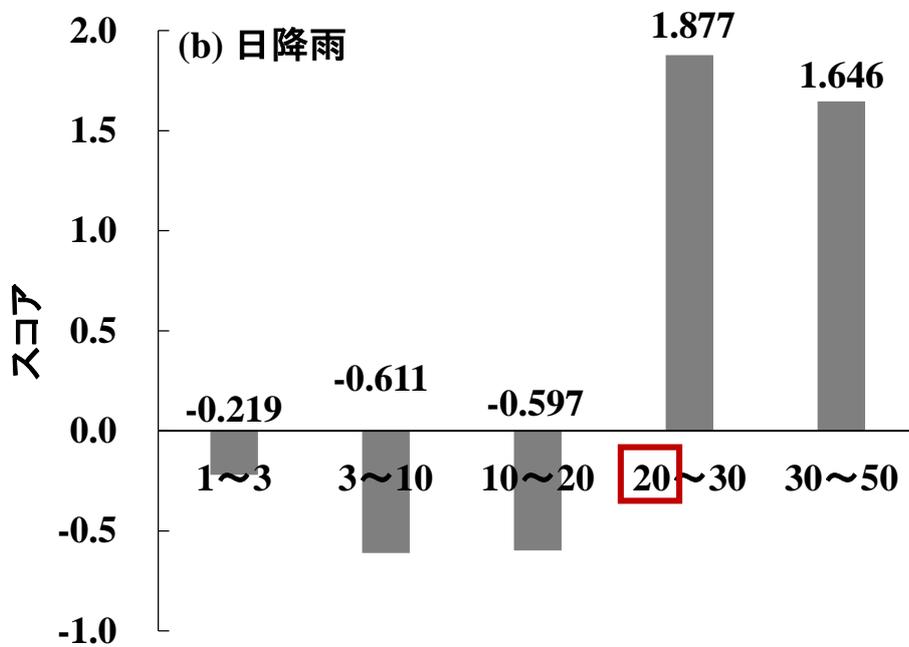


図 4-6 日降雨量の 카테고리・スコア (水田排水路)

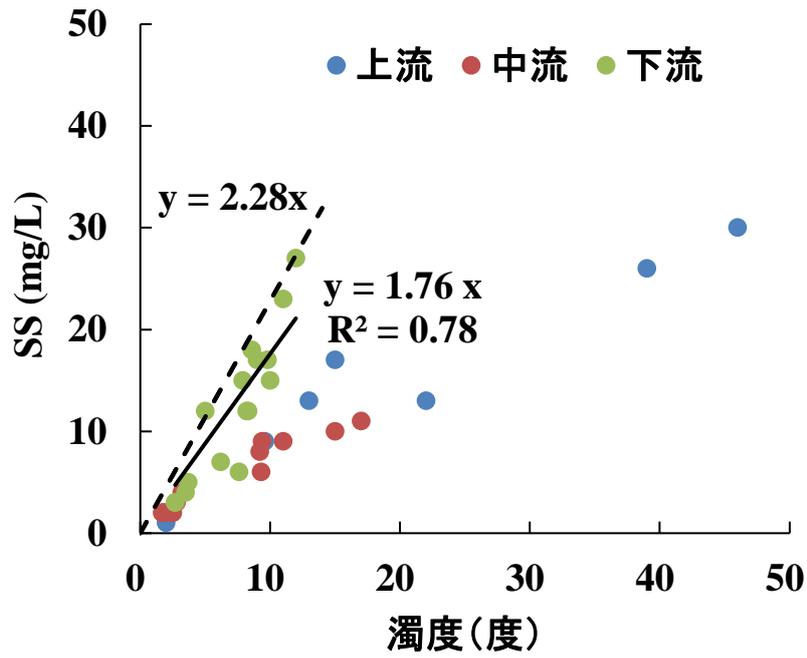


図 4-7 河川濁質の濁度と SS の相関

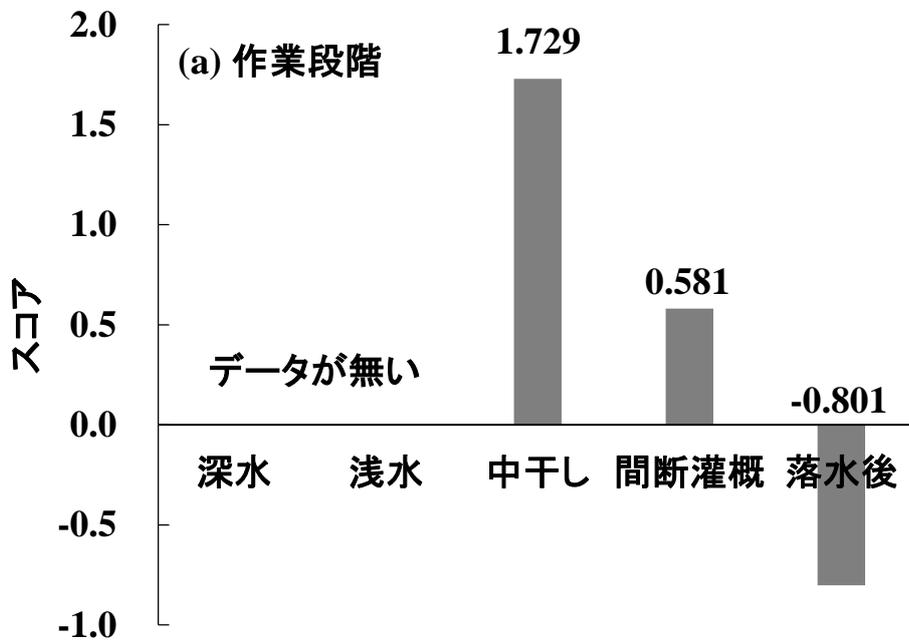


図 4-8 作業段階のカテゴリー・スコア (江合川)

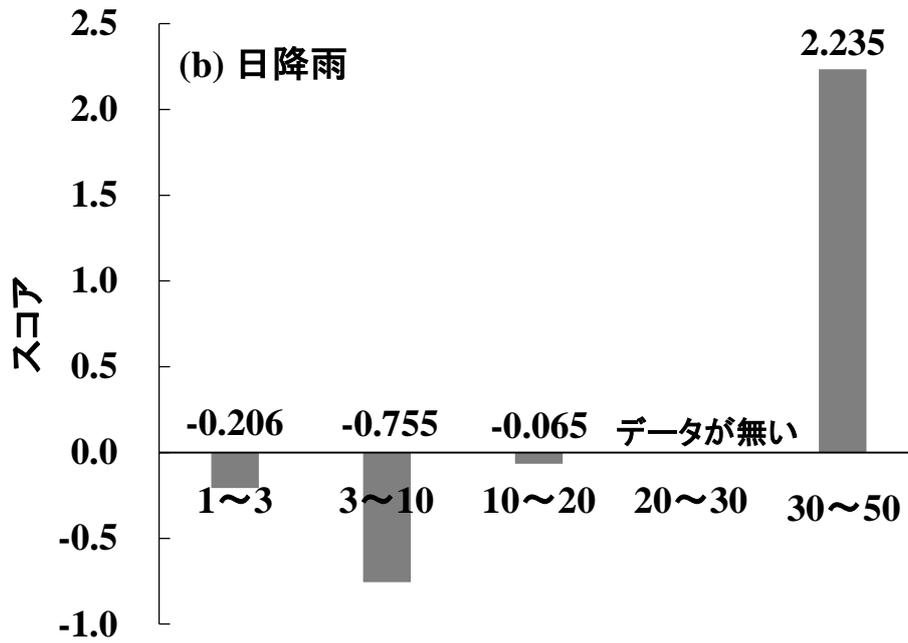


図 4-9 日降雨量の 카테고리・スコア (江合川)

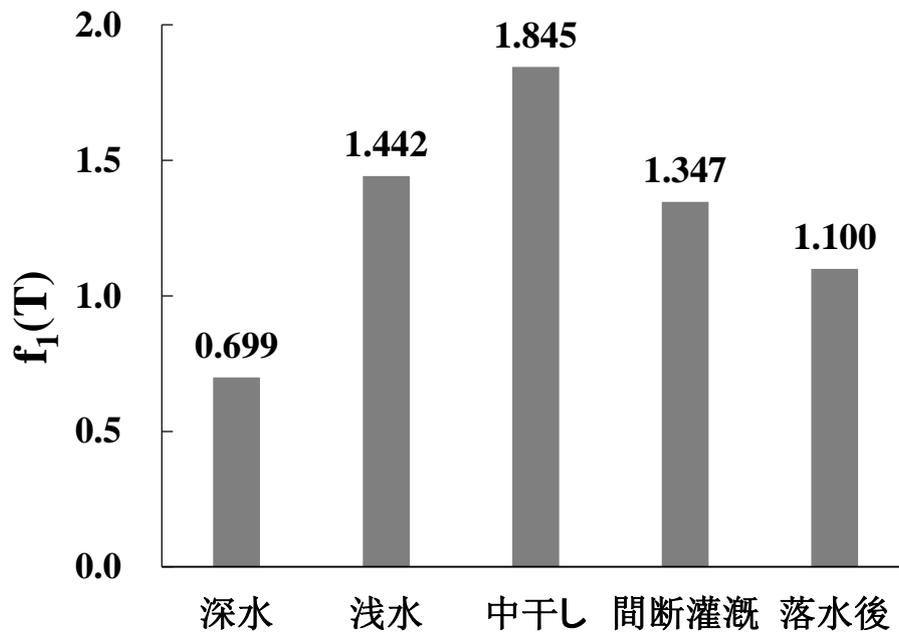


図 4-10 濁質流出推定式における作業段階 $f_1(T)$ の設定

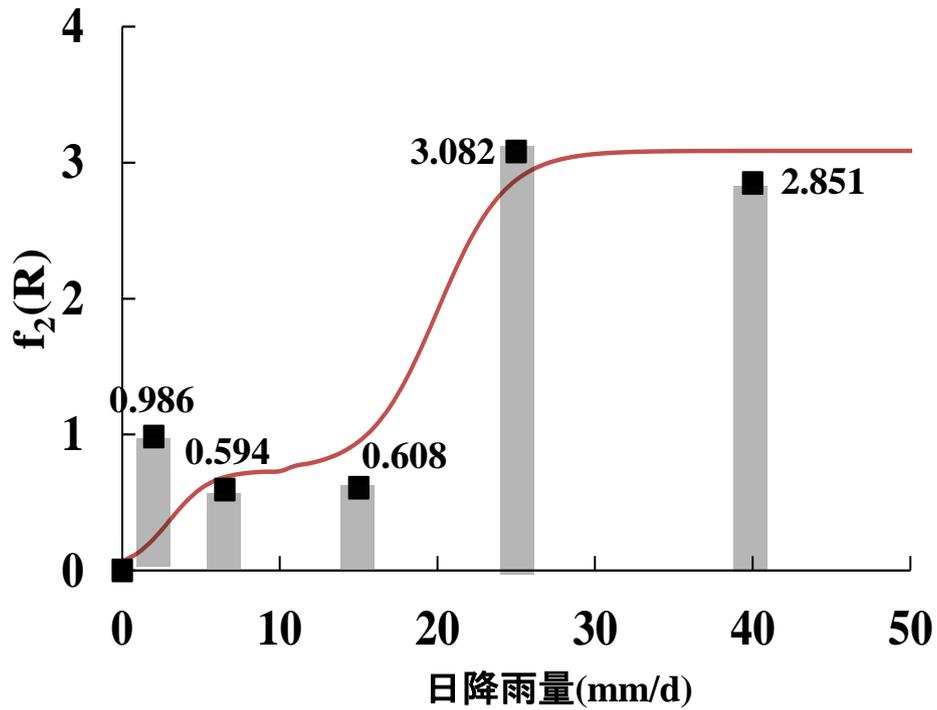


図 4-11 濁質流出推定式における日降雨量 $f_2(R)$ の設定

$$R \leq 10\text{mm} : f_2(R) = \frac{0.734}{1+10^{0.333(3.000-R)}}$$

$$R > 10\text{mm} : f_2(R) = 0.734 + \frac{3.087-0.734}{1+10^{0.200(20.000-R)}}$$

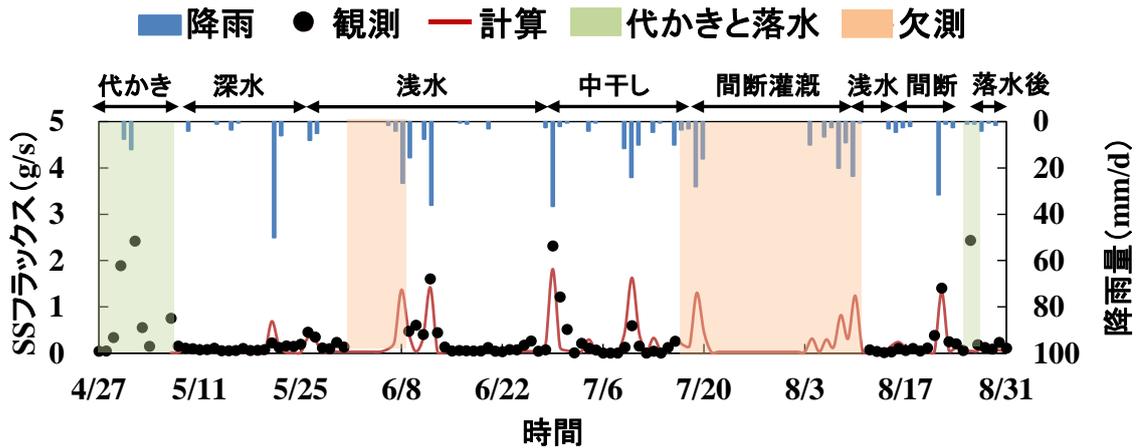
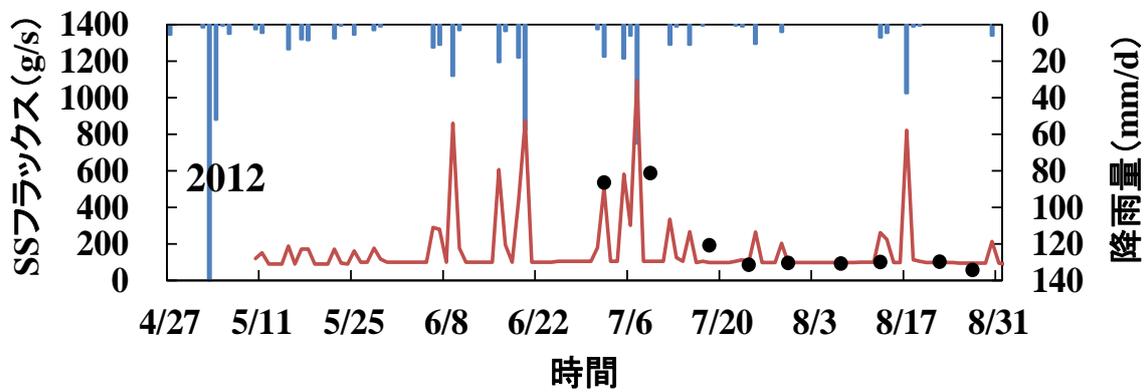
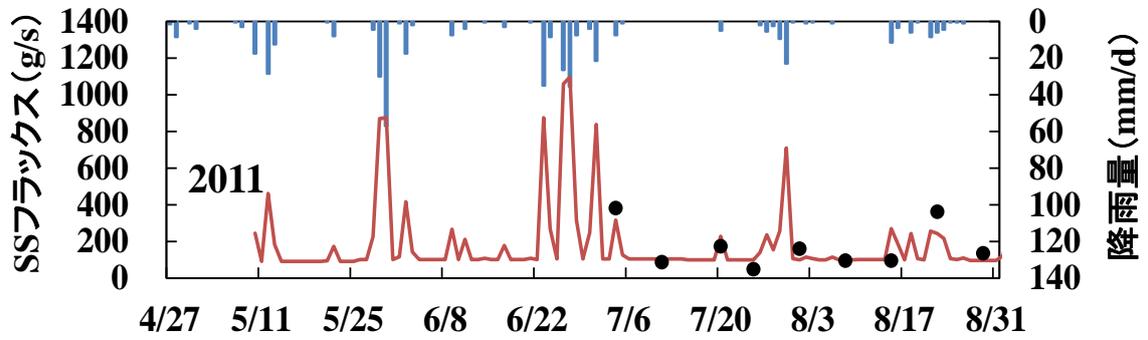
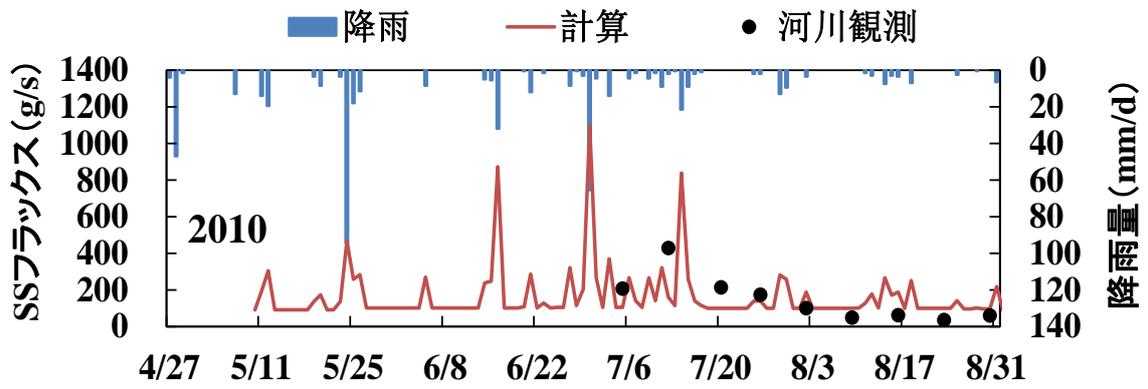


図 4-12 濁質流出推定式による水田排水路 SS フラックスの推定結果



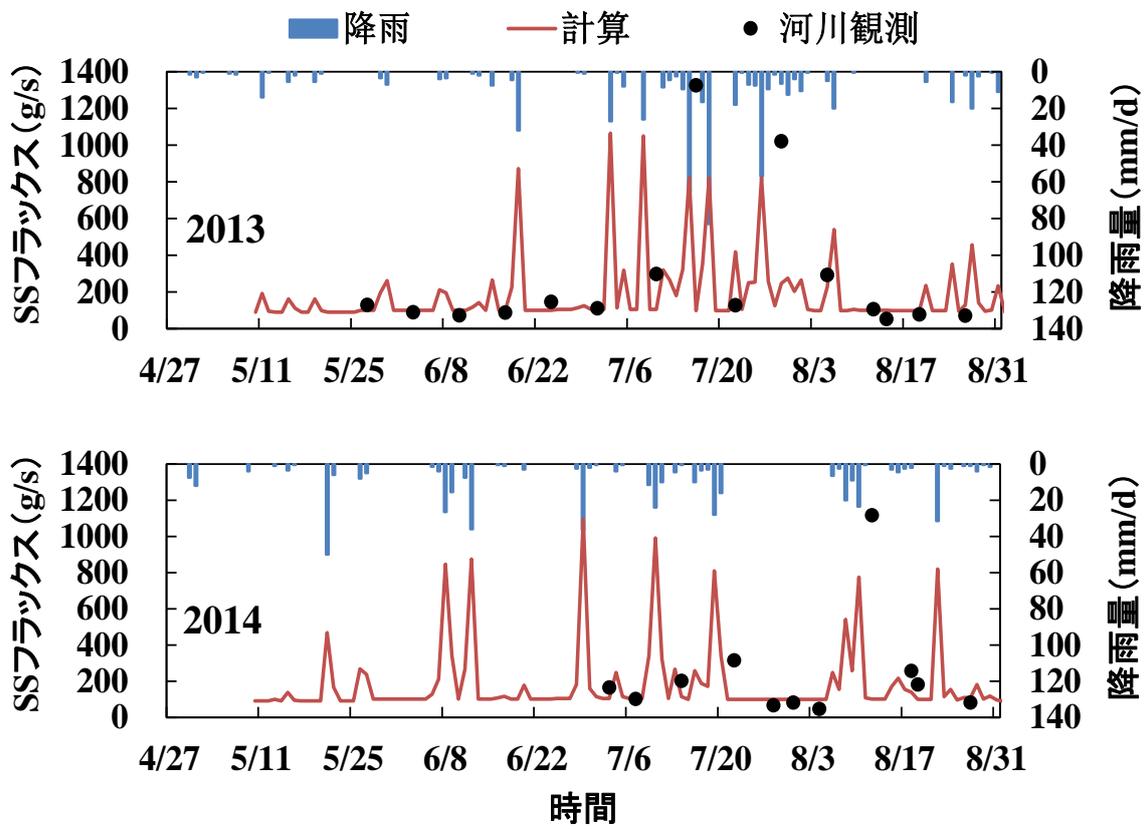


図 4-13 2010~2014 年に河川濁質増分の推定結果

第5章

結論

5.1 主要な結論

日本の耕地の 54%は稲作のための水田であり、その約 99%は灌漑水田である。また灌漑の取水源の 88%は河川となっている。このため水田での取水・排水が河川に大きな影響を及ぼすと考えられる。そこで本研究では水田の取水・排水の方式を調査した上で、宮城県を流れる江合川流域を対象にして、河川水量と河川濁度の変化との関係を定量的に検討した。以下に主要な結論をまとめる。

5.1.1 日本の稲作に関する調査

文献および Internet による調査の結果、以下に述べる事柄が明らかになった。

- (1) イネの生育に関する過去の研究の結果、日本の水稻栽培は「稲作カレンダー」という形のマニュアル化が進んでおり、一部地域で行われている二期作を除けば、年間の作業スケジュールは概ね固定している。すなわち、農閑期の土壌整備に始まり、代掻きおよび田植え、イネの成長段階による水深管理（深水管理、浅水管理（分けつ期）、中干し、間断灌漑、浅水管理（出穂期）、間断灌漑（登熟期））、落水・乾燥と刈取りである。これらの時期および期間は、各地域の JA（全国農業協同組合連合会）によって標準的なカレンダーが提示されている。
- (2) 稲作カレンダーは地域の気象特性と品種によって時期や各作業工程の長さに差異がある。一般的には、低緯度地域に比べて高緯度地域の稲作カレンダーは時期が早く、東北地方と九州地方では平均的に約一か月のずれがある。温暖な低緯度地域では品種による時期の差異も大きく、宮崎中央 JA の例では、早期米と普通米で 3 か月近いずれがある。一方、各作業期間の区分は、中干しまではほぼ共通ののだが、間断灌漑と浅水管理（出穂期）については区分の異なる JA もある。しかしいずれの場合でも、農作業の段階ごとに取水・排水の方式が明確に変化する。
- (3) 水田稲作が河川の水量および水質に及ぼす影響は、ミクロにみればイネの成長段階、田面水位状態、土壌状態などの物理的条件によって変化するが、それらを逐一定量的にモデル化するのは容易でない。しかし上述のように日本の水田の状態は稲作カレンダーにおけ

る作業段階ごとにかなりパターン化されていることから、対象地域の稲作カレンダーを基準として、計測、データ解析、定式化を行うことにより、水田が河川に及ぼす影響を経験的に定式化できるものと考えられた。

5.1.2 水田の取水・排水が河川流量に及ぼす影響

宮城県を流れる江合川の水田の一区画（1ha）に計測器を設置して、代掻き期から落水期の期間に、取水量、排水量、田面水位を観測するとともに、稲作カレンダーごとの田面水位管理方針を営農者から聞き取り調査した。これらの結果を近傍のアメダス古川の気象データとの関連で整理したところ、以下の事柄が明らかとなった。

(1) 営農者の農作業は、所属する JA 古川の稲作カレンダーに準拠していた。ただし気象条件（降雨と蒸発散）により田面水位は変動し、必ずしも目標とする水位が達成されるとは限らなかった。そこで蒸発散を FAO Penman-Monteith 法で推算し、降雨量、取水量、排水量の計測値を用いて地下水面の有効面積率(α_0)と地中浸透速度(P)を逆算し、 $\alpha_0=0.15$ 、 $P=2\text{mm/day}$ として対象水田の水収支を精度よく推定できることが明らかとなった。

(2) 以上から、気象条件と取水量および排水量がわかれば田面水位を推定することはできるが、取水量と排水量は、稲作カレンダーの作業段階ごとの田面水深目標値に向かって人為的に行われる項目である。そこで前述の観測結果と営農者への聞き取り調査から、現在水深と目標水深とのずれを補正するための営農者の取水・排水方法をルール化し、水田管理シミュレータを作成した。このシミュレータを当該水田に適用して観測値と比較した結果、気象条件のみを与えることにより取水量、排水量、田面水位の時系列を推定できることが明らかになった。

(3) 農作業工程が江合川流域全体に共通すると仮定して2010～2014年の気象条件のもとで水田管理シミュレータを適用し、同河川の縦断的流量変化の時系列を推定したところ、水田現地観測を行った2014年以外の年においても、河川の流量観測データから得られる結果と概ね一致した。また計算を行った年では水田における損失のかなりの部分は降雨によって賄われており、それゆえ取水量の大きな大堰頭首工および三丁目頭首工から河川流量の低下が著しく、排水量の大きな田尻川合流点以降でかなり回復することが明らかになった。したがって、この間の区間では、余分の取水によって河川環境が損なわれている恐れがある。

(4) 灌漑期に降雨の少なかった1994年の水文条件と、灌漑期に水田に降雨が全くないという条件のもとで水田管理シミュレータを適用したところ、特に代掻き期と中干しから間断灌漑に移行する時期には水田必要水量が増加するが、それ以外の時期には取水量にかなりの余裕のあることが分かった。このことから、水田管理シミュレータにより稲作カレンダーの各期における必要水量を予測して適正な取水量とすることが河川環境保全という観点から望ましいと考えられた。

5.1.3 水田の取水・排水が河川濁度に及ぼす影響

国土交通省が8地点で観測している濁度およびSSのデータを解析し、縦断的なSSフラックスの変化を調べた。また前述の水田観測の際に、排水路に濁度計と流量計を設置して、水田からのSSフラックスの時系列を算出した。その結果を、稲作カレンダーの農作業段階と日降雨量を影響因子として数量化解析Ⅱ類により解析した。その結果、以下の事柄が明らかになった。

- (1) 灌漑期における江合川の濁度は、水田排水が集中する区間以降で急増し、特に代掻き期と中干し期には、アユの生態に影響すると言われている10ppmを超える。また計測地点を上流、中流、下流に区分して濁度とSSの相関を調べたところ、水田排水の集中する下流区間において、両者の関係が水田土壌に対する濁度とSSの相関に近接する。このことから、水田排水に伴うSSフラックスが河川環境に対して無視できない影響を及ぼしていることが明らかになった。
- (2) 水田排水路におけるSSフラックスを数量化Ⅱ類で解析した結果から、深水管理から落水に至る期間の中では、日降雨量が20mmを超えるとSSフラックスが増加することと、特に田面土壌が露出している中干し期に降雨に対するSSフラックスの応答レベルの高いことが明らかとなった。また、その解析結果に重み付き残差法を適用して回帰式を作成したところ、排水路のSSフラックスの時系列を概ね再現できることが示された。
- (3) 農作業工程が江合川流域全体に共通すると仮定して2010～2014年の気象条件のもとで上記の回帰式を適用し、水田排水が集中する河川区間のSSフラックス増分を推定したところ、河川における観測値を概ね説明できることが示された。ただし、この計算では水田から本川までの流達時間や排水路における土砂の沈殿・再浮上を考慮していないために、計算値と観測値の間には時間的に差異が認められた。モデルの精度向上のためには、排水路での土砂輸送に関するきめ細かなモデル化が必要と考えられた。

5.2 今後の課題

本研究では、江合川流域の水田一区画(1ha)における観測結果をもとに、稲作カレンダーという新たな視点から同河川の流量および濁度の縦断変化を検討し、河川観測データをかなりの程度説明できた。その結果、稲作カレンダーにおける作業段階を指標とすることにより、山地部や都市部と同様に、気象条件に対する水田の水文学的応答を定式化できる可能性を示すことができたと考える。この観点からの水文モデルをさらに発展させるには、以下の課題について検討することが重要であると考えられる。

- (1) 本研究の対象領域では水田の比率が高いので、モデル構築にあたっては他の土地利用の区域からの流出を無視している。またSS流出に関しては水田排水が集中している区間の

みで検証している。将来的には他の土地利用も含めた総合的流出モデルとして江合川の全区間および他流域にも適用できるようにする必要がある。

(2) 本研究で作成したモデルは、水量に関しては定量的だが、SS に関しては稲作カレンダーの取り扱いが定性的であり、両者が結合できていない。両者を最終的に結合するには、排水路データから遡って、各作業段階での田面 SS 生産量を定式化していく必要があると考えられる。それには田面のマイクロな過程を取り扱うことになり、学術的には重要な課題である。ただし実用性という観点からは、どこまで精緻化するかを検討する必要があるだろう。

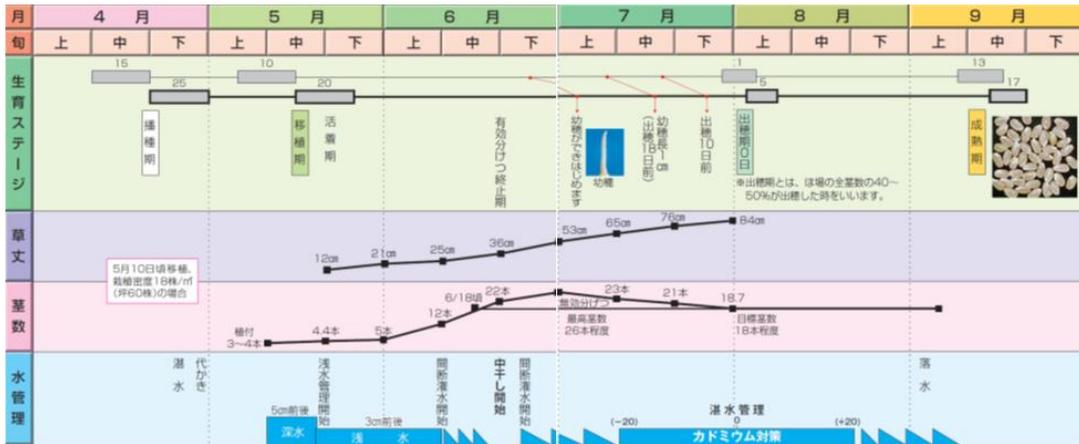
(3) 本研究で提案した SS フラックスの回帰式は、水田排水口直下の水路での値である。実際には排水路が河川に出るまでに最長 10km オーダの距離があるので、その間の水路において土砂の沈殿や再浮上が生じ得る。したがってモデルの精度向上のためには、水路部での土砂輸送に関するきめ細かなモデル化が必要となる。ただし土砂輸送のマイクロな物理過程をモデルに含めるのは実用的ではないので、何らかの簡略化が必要と思われる。

付録

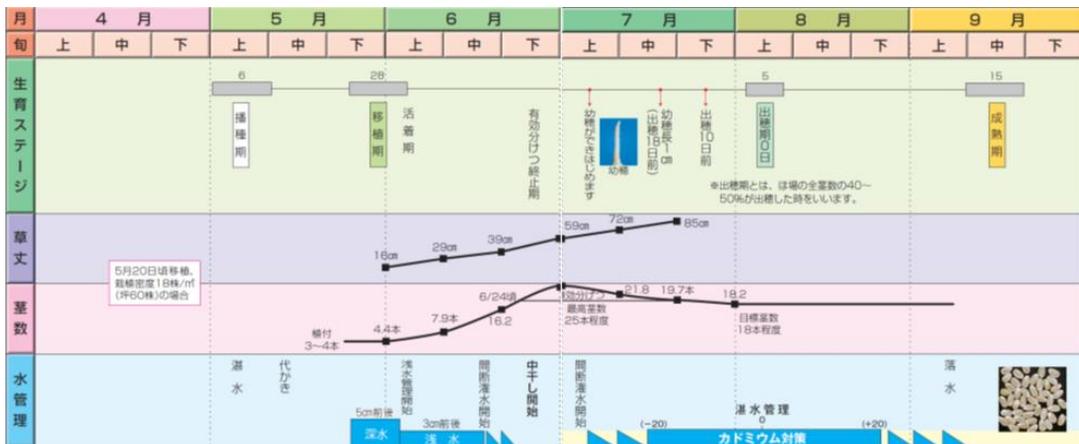
Yahoo! Japan → 「稲作カレンダー」を検索する

1. JA 周南（山口県、中国地方）

山間部



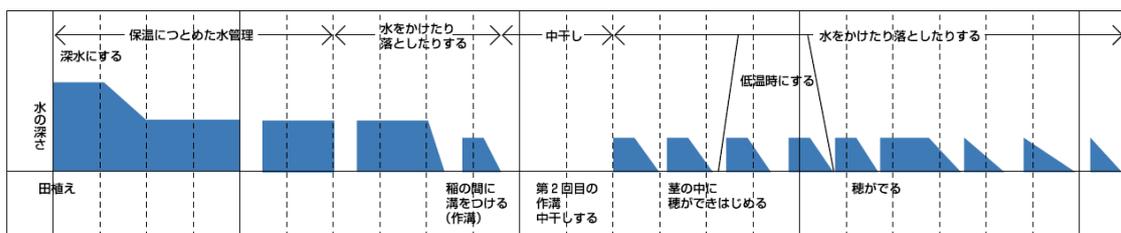
平坦部



2. JA 庄内（山形県、東北地方）

田植えから刈り取りまでの水管理

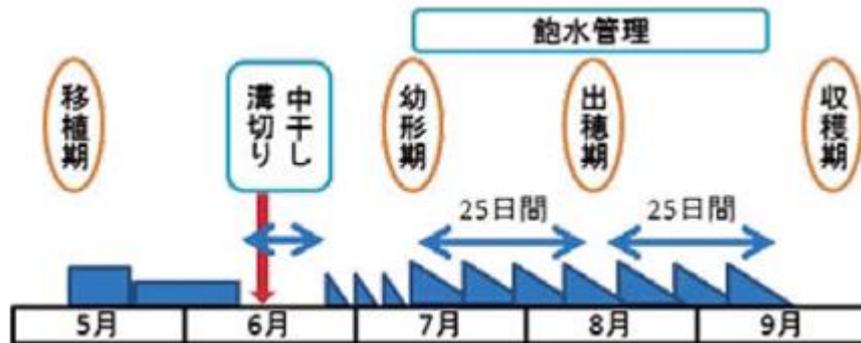
5/10日 15日 20日 25日 6/1日 5日 10日 15日 20日 25日 7/1日 5日 10日 15日 20日 25日 8/1日 5日 10日 15日 20日 25日 9/1日



3. JA いるま野（埼玉県、関東地方）

月	4月			5月			6月			7月			8月			9月			10月
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬
生育ステージ	播種期			育苗期			移植期			有効分げつ定期	幼穂分化期	最穂分化期	減数分裂期	出穂期	穂揃期	乳熟期	成熟期		
主な農作業	床土準備	種子消毒	播種	育苗管理 土壌改良資材散布	基肥散布	田代・箱施薬	除草剤散布				中干し	種肥散布	病害中防除				収穫	乾燥調整	
水管理	浅水管理(強風時深水)						中干し			間断灌水			深水(花水)			落水			

4. JA 岩船（新潟県、北陸地方）

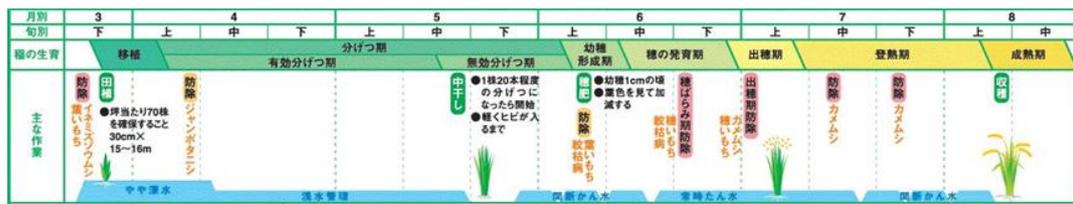


5. JA 宮崎中央（宮崎県、九州地方）

早期コシヒカリ



早期さきひかり



普通期ヒノヒカリ



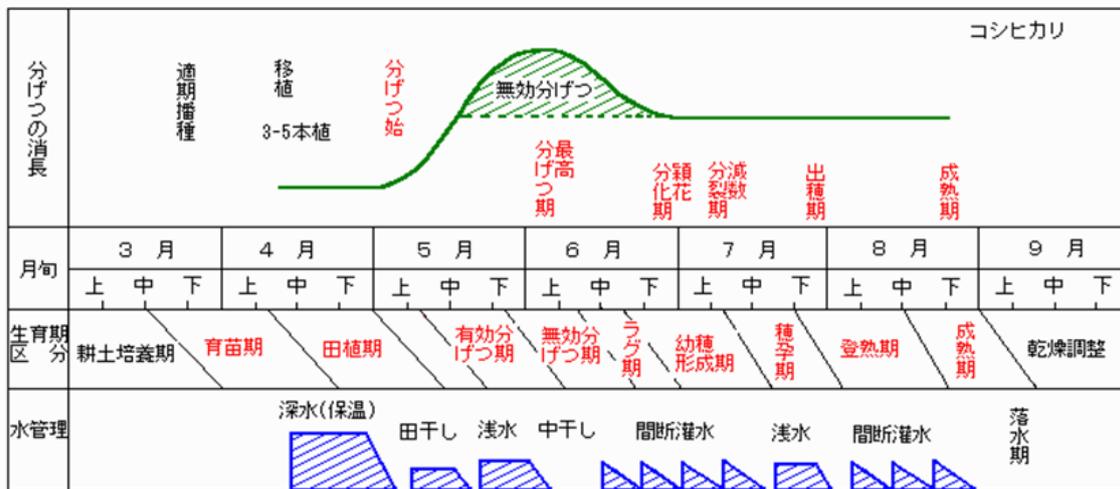
6. JA 鈴鹿 (三重県、近畿地方)

目標	良い苗を作る	早く分げつさせる	無効分げつ防止	良い穂を作る	実りをよくする	土づくり
苗の育成過程 (稚苗栽培)	播種	田植	田植	田植	田植	田植
主要品種別生育月日	あきたこまち	みえのえみ	コシヒカリ	キヌヒカリ	みえのゆめ	
作業メモ						
水管理						

●土づくり 増わは年内にすぎ込み、地力増進のために堆肥を施用しましょう。その後、珪酸(珪)を施し、土づくりにつとめる。(10a 当たり) 生 ね 5 全量 堆肥(牛ふん) 500kg 珪酸(珪) 10袋

●水田管理 期別作業 第1回 9月~11月 第2回 12月~2月 第3回 3月

7. 農業試験研究センター (佐賀県、九州地方)



8. JA いわき (福島県、東北地方)

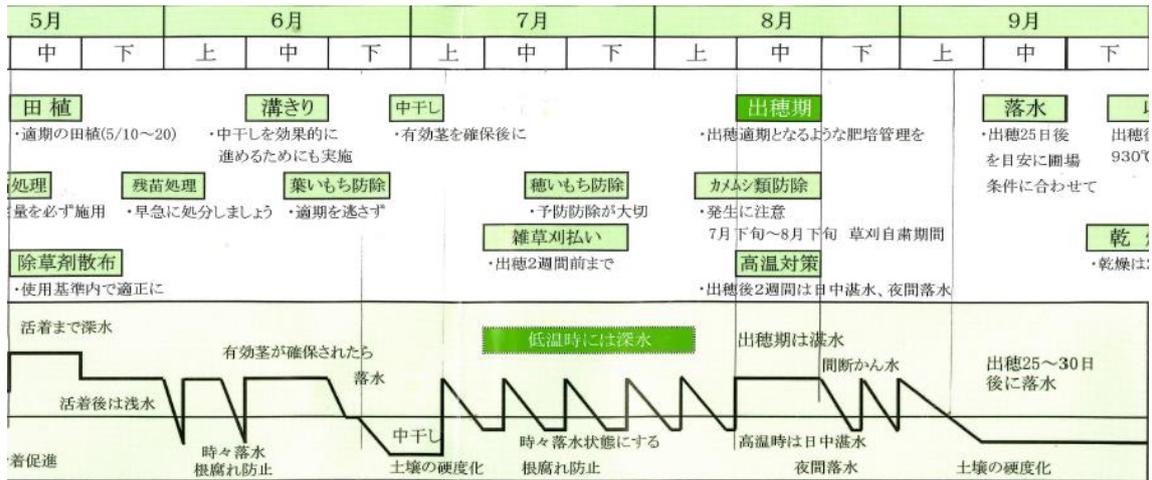
平坦地

生育ステージ	出芽期・緑化期・硬化期	活着期	有効分げつ決定期	幼穂形成期 (7/20頃)	出穂期 (8/10頃)	登熟期	
放射線物質吸収抑制対策 ○反転耕及び深耕 ○水による攪拌除去(未耕転) ○ゼオライト・カリの施用							
水管理	活著まで深水	活著まで深水	中干し	間断灌水	灌水管理	間断灌水	
月	1月 2月 3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月
旬	上旬 中旬 下旬	上旬 中旬 下旬	上旬 中旬 下旬	上旬 中旬 下旬	上旬 中旬 下旬	上旬 中旬 下旬	上旬 中旬
主な作業	土づくり	施肥耕起	代かき・田植	溝切り・中干し・カリ追肥			

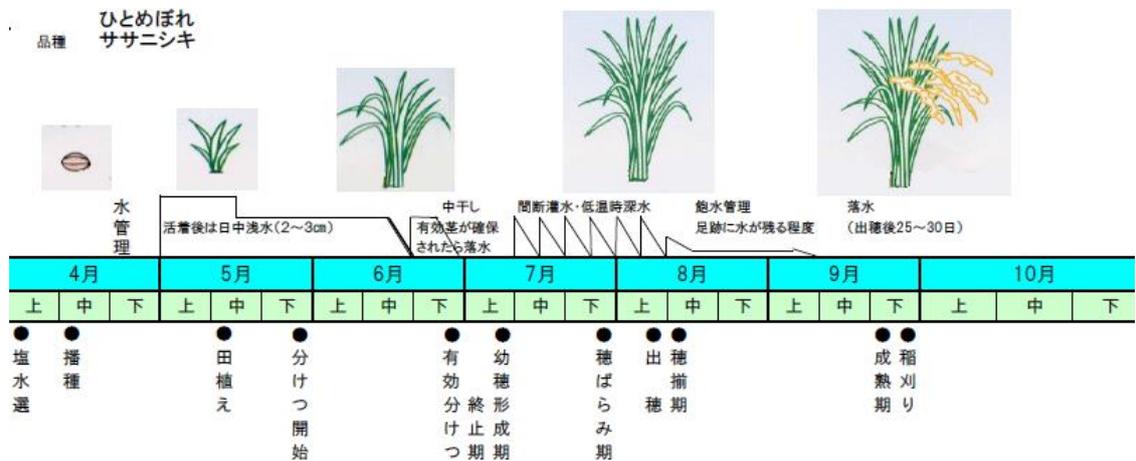
山間部

生育ステージ	放射線物質吸収抑制対策 ○反転耕及び深耕 ○水による攪拌除去(米耕転) ○ゼオライト・カリの施用			出芽期・緑化期・硬化期	活着期	有効分けつ決定期	幼穂形成期 (7/20頃)	出穂期 (8/5頃)	登熟期			
水管理				活着まで深水	深水管理(低温強風時深水)	中干し 溝切り	間断灌水 低温時深水	落水管理 花水	間断灌水 落水			
月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月			
旬		上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬
主な作業	土づくり			施肥耕起			代かき・田植			溝切り・中干し・カリ追肥		

9. JA 古川 (江合川流域、宮城県、東北地方)



10. JA みどりの (江合川流域、宮城県、東北地方)



謝辞

本論文は、筆者が東京工業大学大学院総合理工学研究科環境理工学創造専攻博士課程の学生として、石川研究室に在籍した3年間をかけて行った研究をまとめたものです。ここに私を支えていただいた多くの方々への謝意を表したいと思います。

本研究を進めるにあたり、終始懇切なる御指導、御助言を贈りました恩師、石川忠晴先生に心から深く感謝申し上げます。研究テーマの相談、フィールドの考察、研究の進めかたなどの研究の基礎から、論文の書き方、発表の仕方などの貴重な経験まで熱心にご教授していただきました。いつもちゃんと整理しないこと、分からない時に聞かないことなどを厳しくて優しくてご鞭撻をいただいて、この反省を今後にも注意深く頑張っていきたいと思えます。

本論文の審査にあたり、東京工業大学の山中浩明教授、木内豪教授、浅輪貴史准教授、中村恭志准教授には、数多くの重要なご意見を賜りました。本当にありがとうございました。

木内豪教授、中村恭志准教授には、直接御指導をいただく機会は少なかったものの、ゼミ発表の助言、測定器の使用などで度々お世話になりました。深く感謝の意を表します。赤穂良輔助教（現岡山大学准教授）には、ゼミ発表の助言のみならず、計算プログラムの作成に関してもご協力くださいました。本当に感謝いたします。

宮城県大崎市古川千刈り町在住の佐々木喜美夫氏には、水田観測を実施させていただき、また測定器の設置、取排水の記録、水田作業の説明などの具体的な作業までいろいろご協力していただきました。現地観測の際にいつもお菓子や飲み物などをいただき、食べながら水田に関する様々な知識を教えていただきました。本当にありがとうございます。

日水コン東北支所の嶋国吉さん、水源地環境センターの磯部久貴さん、国土交通省鳴子ダム管理所の方々には、研究に役立つ種々なデータを送っていただきました。大崎地域水管理協議会の方々には、観測と現地調査でいろいろご協力していただきました。皆様はご多忙中にもかかわらず、お時間を割いていただいたことを、心より感謝いたします。

石川研究室の卒業した浅井勇磨さんには、観測の準備、測定器の設置、データの整理、先生との打ち合わせ等々一緒に研究に取り組んでいただきました。苦勞な現地作業を協力していただくだけでなく、いつも観測の計画や改善方法などを相談していただき、頼れる後輩といつも感じさせておられます。また、卒業した安藤誠さん、菊地喬さんには、観測とデータの整理でお世話になっていただきました。彼らの協力がなくては、観測は成り立たなかったと思います。本当にありがとうございました。

石川研究室秘書の高橋さんと小林さんには、書類申請や現地観測、実験用品の会計管理でいつもいろいろご面倒をお掛けしました。本当にありがとうございました。

卒業した許曉飛さん、劉暢さん、王張嬌さん、高爽さん、曾新翔さん、林倩さん、LiuTongさん、辛卓航さん、松延和彦さん、王明陽さん、余丹さん及び木内研の韋樂章さん(D3)には、研究のご相談も生活面のご面倒もたくさんいただきました。皆様の努力のお姿や真剣さ、笑

顔に私もたくさんの勇気や原動力をいただいております。本当にありがとうございました。

今年9月に卒業した張秋松さん、田潤さんには、一緒に論文を執筆し、お互いに頑張ってきて忙しくて楽しかった日々を過ごさせていただきました。これからもしっかり頑張っていきたいと思います。

研究室の曾妍さん、呂艶萍さん、文豪さん、その他の学生方には、いつも親切していただき、誠にありがとうございます。

東北師範大学の盛連喜先生、何春光先生には、いつも私の研究や生活を心配して励ましていただきました。心より感謝申し上げます。

最後に、いつでも心配をかけて、多大な支えをいただく祖母、父、母及び家族と親友の皆様には、深く感謝と敬意を表します。本当にありがとうございました。

平成27年12月

張 怡