

微分型ウォーターフットプリント指標を用いた 稲作の水資源消費の評価

茨城大学 内田晋

1. はじめに

水資源（淡水資源）は、金属などの一般的な資源と異なる特性を有する。その主なものとして、第一に供給速度が原則として降水やその後の河川水に依存し、人間がコントロールすることが困難な点、第二に経済的に輸送が困難なため必然的に地産地消となる点、第三にその循環スピードが速い点である。従って、水のリソースとしての本質はその量にあるのではなく、供給速度にあるということである¹⁾。一般的な資源では、その稀少性は利用可能量に対する利用量、つまりストック概念で表わされるが、水の場合は利用可能な流量に対する利用スピード、つまりフロー基準で表わした方が、資源として考えるのに適している。

フロー概念による水資源消費の指標としてはウォーターフットプリント（WF）やヴァーチャルウォーターが広く用いられている。また、近年では利用可能量の地域差や時期的変動を考慮したさまざまな指標が検討されている²⁻⁵⁾。さらに、水フローの対象面積を考慮することにより環境容量との比較が可能になった指標も開発され^{6,7)}、これらは本来のフットプリントの概念に近いものとなっている。

しかしこれらのフロー指標を用いて水利用を評価する手法には問題が残されている。降水量と水利用量の比による評価は月単位や年単位では広く行われているが、これを日単位で評価しようとすると、降雨のない日の評価が不可能である。結果が時間単位の取り方に依存することは厳密な意味でフローベースの評価になっていないことを示している。これは水利用というストックをフローに変換する際、1年や1ヶ月という人為的に設定した時間で割っており本質的なフローではなくなっているためである。また、同量の水利用であっても緊急度の違う農業用水と消火用水では異なる水ストレスの評価がなされるべきと考えられる。このように実態を反映した水利用の環境負荷を評価するためには、新たな概念の導入による「真のWF」と呼べる指標を開発することが必要である。

筆者は先行研究⁸⁾において、水利用の猶予期間という概念を導入することにより定義された水ストレス指標を用い、定常的な生産（フロー）と個々の製品（ストック）の双方について拡張されたWF指標を提案した。またケーススタディとしてサトウキビを原料とするバイオエタノール生産を取り上げ、従来の方法による水資源消費の指標との比較を通じ、提案した指標の環境影響領域としての実用可能性を示すとともに、バイオ燃料生産の水資源消費についての評価を行った。しかし国内全体の水資源とその消費の実態を明らかにするためには、その最大の消費部門である農業、特に水田での稲作の水資源消費の実態を解析することが重要な役割を果たすと考えられる。そこで本研究では先行研究で開発した新しい指標を用い、2か所でのケーススタディを通じて稲作の水資源消費について評価を試みた。

2. 研究方法

ケーススタディとして、国内の主要な稲作地域から新潟県と茨城県を選び、地域の農業振興部門で発行している栽培暦や同部門へのヒアリング調査などから、それぞれの地域の標準的と思われる、栽培における水利用のシナリオを設定した。その概要を表1および表2に示す。表中、猶予期間は当該水利用を問題なく遅らせることのできる期間を表す⁹⁾。

表1 新潟県の水稲栽培における水利用のシナリオ

イベント	日付	水深(mm)	猶予期間
代かき	5月7日	35	22日（4月27日～5月18日）
移植	5月10日	35	1日
浅水管理	5月15日	25	1日
雑草防除	5月17日	60→自然落水	1日
浅水管理	落水直後	25	1日
中干し	6月10日	0（強制落水）	—
飽水管理	5日連続無降雨の翌日または出穂1か月前の早い方	45→自然落水（ただし6日目には強制落水）→直後に45の繰り返し	開始時は7日（当日を含み前後3日ずつ）、以降1日
落水	出穂後30日	0（強制落水）	—
収穫	出穂後40日	—	—

表2 茨城県の水稲栽培における水利用のシナリオ

イベント	日付	水深(mm)	猶予期間
代かき	5月7日	35	22日（4月27日～5月18日）
移植	5月10日	35	1日
浅水管理	5月15日	25	1日
雑草防除	5月17日	60→自然落水	1日
浅水管理	落水直後	25	1日
中干し	6月10日	0（強制落水）	—
間断灌漑A	10日連続無降雨の翌日または出穂1か月前の早い方	60→3日後に自然落水→落水の翌日に60の繰り返し	開始時は7日（当日を含み前後3日ずつ）、以降2日
間断灌漑B	出穂後最初の注水時	45→自然落水（ただし6日目には強制落水）→翌日に45の繰り返し	1日
落水	出穂後30日	0（強制落水）	—
収穫	出穂後40日	—	—

水の供給は、降雨がある場合はそれを利用（グリーンウォーター：GW）し、不足分は河川からの農業用水（ブルーウォーター：BW）で賄われるとした。水深の管理方法は、水尻で水深の調整が可能な水田を想定し、自然落水は1日あたり15mmとした。また自然落水の途中で降雨があった場合はそれに応じて水深が増加するが、最初に設定した水深を超えた分は流出すると仮定した。強制落水は水尻を開け、降水は全て排水されるとした。出穂日の推定はMeteo Cropデータベースを用いた蒸発散モデルのシミュレーション^{9,10,11)}により行った。

降水量のデータはアメダス¹²⁾の値を参照し、新潟県では新潟、茨城県では土浦のデータを用いた。灌漑用水のデータは、水文水質データベース¹³⁾における河川の流量の値を用い、新潟県では新潟市西区山田における帝石橋での信濃川（流域面積11903km²）¹⁴⁾の流量、茨城県では稲敷郡阿見町堀における清明川（利根川水系・流域面積25.5km²）の流量を参照した。解析の対象とした期間は、新潟が2002～2009年、茨城が1998～2001年および2006～2007年で、これは流量データの制約によるものである。

以上のデータを用いて、対象期間における栽培過程での水利用量を1日単位で算出し、さらに想定される猶予期間の値から微分型ウォーターフットプリント（Differential Water Footprint: DWF）および積分型ウォーターフットプリント（Integral Water Footprint: IWF）を算出した。猶予期間の概念は先行研究⁸⁾のものをを用い、またDWFおよびIWFについては同研究においてそれぞれ拡張ウォーターフットプリント、占有ウォーターフットプリントと呼んでいたものに相当する。

3. 結果および考察

新潟県および茨城県の稲作におけるDWFの計算結果をそれぞれ図1、図2に示す。グラフは栽培面積1haあ

たりのDWFを表しており、1を超えることは局所的に持続可能性が満たされていないことを示している。どちらの地域も、前半は一定水位での管理を反映して値がなだらかに推移し、後半は間欠的に灌水を行うことから、その日だけが他の日に比べて高い値を示す傾向が見られた。新潟では、DWFの大きな日でもその値は15から30程度と比較的安定しているが、茨城では30前後で収まる年と50を超える年があり、ばらつきが見られた。標準的な栽培期間として4月27日から9月12日までを設定し、その間の新潟と茨城の水資源の状況を比較すると、総降水量は新潟が平均859mmに対して茨城では574mm、1日1haあたりの河川の比流量は新潟が26.4m³に対して茨城では23.4 m³、またその年ごとの変動係数の平均が新潟0.31に対して茨城0.92であり、新潟の方が総量が大きくばらつきも小さい。こうした傾向がDWFの値にも表れていると考えられる。

図2にはDWFとともに、水の使用量をGWとBWを合わせた利用可能量で除した値を需給比率として示した。両者が一致している部分は、本研究で1日を単位として分析を行っているため、猶予期間が1日である水利用の場合、定義上一致することによる。両者に大きな差が見られるのは、主に最初の代かきの際と、中干しを終了して間断灌漑に移行する際の灌水の時である。代かきは移植の数日前に行うが、移植の時期には3週間程度の幅があるため、灌水もそれに合わせて同程度の猶予期間を設定した。また中干し終了のタイミングも厳格でないと考えられるため、前後3日の猶予期間を設定した。これらのイベントに対応するピークの位置を図2に示したが、需給比率に対してDWFの値が小さくなった。これは猶予期間が長いために利用可能な水資源の量が多くなり、相対的に利用による負荷が小さくなった結果である。

DWFが1を超える日では単独での持続可能性が満たされていないことになるが、隣接する水田で水利用のタイミングをずらすなどのやりくりを行うことでその地域での持続可能性が満たされる可能性がある。マクロ的視点での負荷が1を超えなければそうしたやりくりが可能であるが、その指標となるのがIWFである。新潟と茨城について年間のDWFの集計により算出したIWFをそれぞれ図3と図4に示す。トータルで見ても新潟の方が絶対値・ばらつきともに小さく、負荷が小さいことを示している。この値が1を超えていることは、年間トータルで見て農地1haに供給される水資源の量を使用量が上回っていることを示しており、他の土地の分の水資源を「借用」して農業生産を行っていることを表している。流域全体を見れば利用されていない土地は豊富に存在することから、IWFが最大でも2程度という現時点の状況では全体の持続可能性に影響を及ぼす可能性は小さいものの、今後の気候変動やそれに伴う降雨パターンの変動に伴う需給関係の変化については今後明らかにする必要がある。

4. おわりに

本研究では新潟と茨城を取り上げ、稲作の水利用に伴う水資源への負荷を、新たに開発したDWFとIWFという指標を用いて評価した。その結果、どちらの地域でも後半の間欠的な水利用により一時的に負荷が高まる傾向にあったが、全体的には新潟の方が負荷が低く、年ごとのばらつきも小さかった。ただし年間の水使用量は、どちらの地域もその農地に供給される水資源の量を超えており、単独での持続可能性は満たされていないことが明らかになった。

DWFとIWFのさらなる応用としては、地域的な水資源の競合、特に農業・工業・生活用水といった猶予期間の異なるセクター間の競合に関する解析への貢献が期待される。同時に、そうした問題の緩和に寄与する適切な水資源管理方法を明らかにするためのツールへの応用も可能である。また、もう一つの方向性としては地域的な積算によるグローバルな持続可能性評価が挙げられる。一国あるいは世界全体でのIWFを算出することにより、その持続可能性をエコロジカル・フットプリントと同様に評価することができ、同時に負荷の高い地域や時期などの情報を俯瞰的に得ることが可能である。

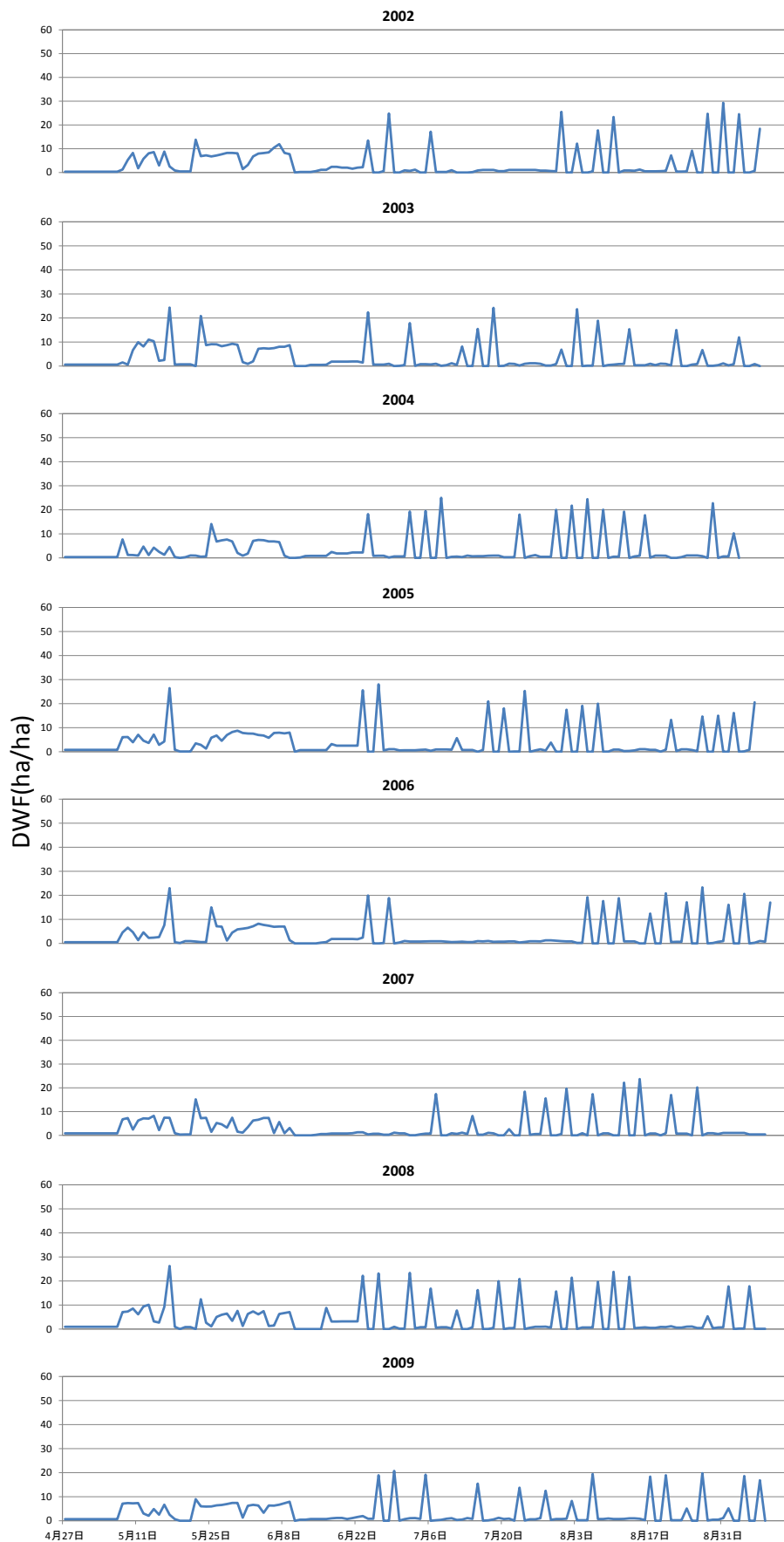


図1 新潟地方の稲作の微分型ウォーターフットプリント

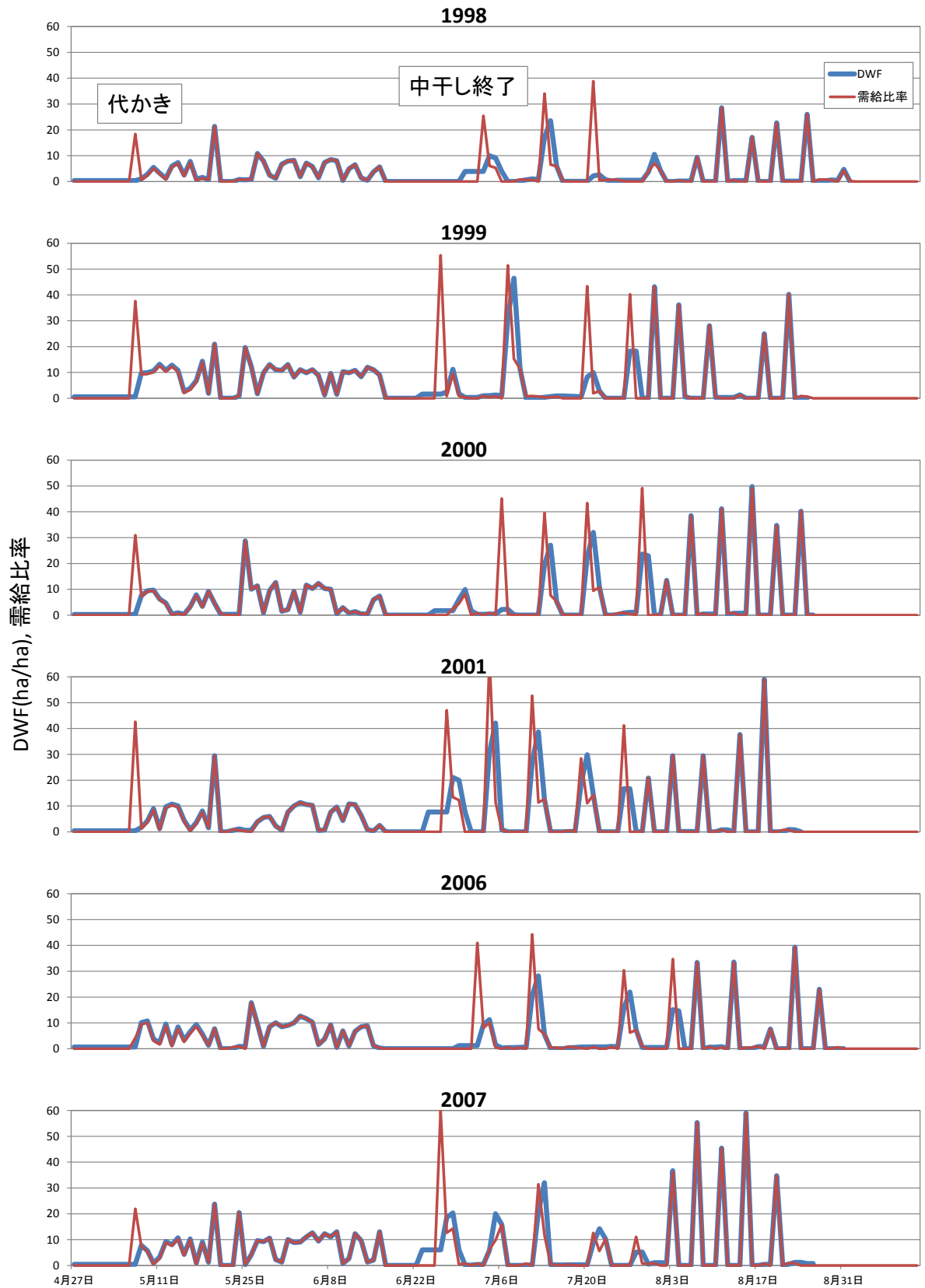


図2 茨城地方の稲作の微分型ウォーターフットプリント

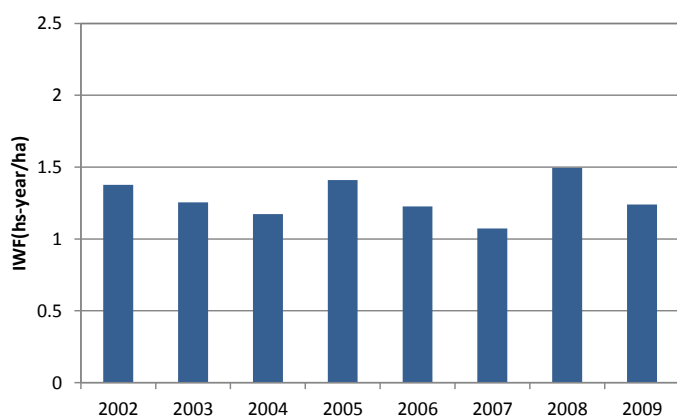


図3 新潟地方の稲作の積分型ウォーターフットプリント

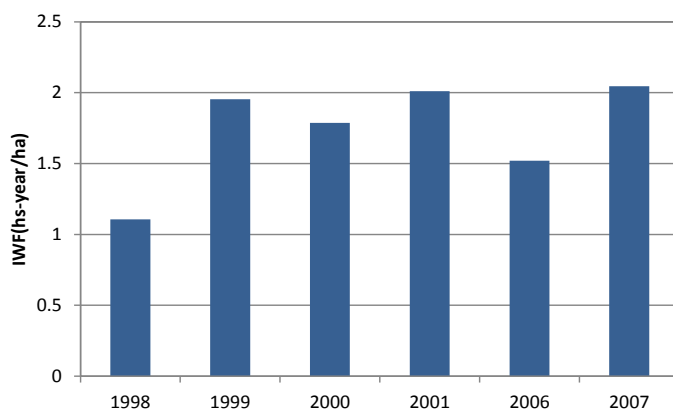


図4 茨城地方の稲作の積分型ウォーターフットプリント

今回の分析では、猶予期間という新たな概念の導入により見られた新しい分析方法による効果は限定的であったが、今回明らかになった水利用負荷のピークを削減するために灌水のタイミングを変更する余地があるか、またそれによりどの程度負荷が軽減されるかといった分析を行う際には、猶予期間の概念によるDWFとIWFを用いた評価方法が重要性を持つことが期待される。

謝 辞

本研究はJSPS科研費 25550045の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 沖大幹, 鼎信次郎 (2007): 地学雑誌, 116(1), 31-42
- 2) Vanham D., Bidoglio G. (2013): Ecological Indicators, 26, 61-75
- 3) Ridoutt B. G., Sanguansri P., Nolan M., Marks N. (2012): J. Cleaner Production, 28, 127-133
- 4) Federal Office for the Environment FOEN (2009): The Ecological Scarcity Method – Eco-Factors 2006, Bern, Switzerland, 188pp.
- 5) Pfister S., Koehler A., Hellweg S. (2009): Environ. Sci. Technol., 43 (11), 4098-4104
- 6) Stoeglehner G., Edwards P., Daniels P., Narodoslawsky M. (2011): J. Cleaner Production, 19, 1677-1686
- 7) Gleeson T., Wada Y., Bierkens M. F. P., van Beek L. P. H. (2012): Nature., 488, 197-200
- 8) 内田晋, 林清忠, 猶予期間の概念に基づく新たなウォーターフットプリント指標の提案と農業生産の評価への適用, 日本LCA学会誌, 10(1), 2014.1.25, pp.40-48.
- 9) Kuwagata T., Yoshimoto M., Ishigooka Y., Hasegawa T., Utsumi M., Nishmori M., Masaki Y., and Saito O. (2011) MeteoCrop DB: an agro-meteorological database coupled with crop models for studying climate change impacts on rice in Japan, J. Agric. Meteorol., 67(4), 297-306.
- 10) Nakagawa, H., Yamagishi, J., Miyamoto, N., Motoyama, M., Yano, M., and Nemoto, K., (2005) Flowering response of rice to photoperiod and temperature: a QTL analysis using a phenological model. Theor. Appl. Genet., 110, 778-786
- 11) Kuwagata T., Hamasaki H., and Watanabe T. (2008) Modeling water temperature in a rice paddy for agro-environmental research, Agric. Forest Meteorol., 148, 1754-1766
- 12) 気象庁, 過去の気象データ検索, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, (参照2014-6-9)
- 13) 国土交通省, 水文水質データベース, <http://www1.river.go.jp/>, (参照2014-6-16)
- 14) 国土交通省北陸地方整備局信濃川下流河川事務所, 信濃川について, <http://www.hrr.mlit.go.jp/shinage/shinanogawa/>, (参照2014-3-17)