

稲作の水資源消費の連続的評価

茨城大学 内田晋

1. はじめに

資源の消費に制約がないと考えられてきた前世紀と比較して、今世紀は化石燃料や金属など、資源の枯渇が問題になり、サステナビリティという概念が広く意識されるようになった。サステナビリティは物質やエネルギーのみならず、経済や社会といった要因とのトレードオフの中でそれらのサステナビリティも満たされるべきであることは言うまでもない。

重要な資源として近年そのサステナビリティに注目が集まっているのは水である。水資源は食料生産と関わりが深く、われわれの生活を大きく左右する要因である。地球は水の惑星とも呼ばれるだけの豊富な水資源を有しているが、そのほとんどは人類が利用できない海水であり、淡水は地球にある水の2.5%である¹⁾。さらに、淡水のうち利用不可能な氷河や永久凍土、利用可能だが現状ではアクセスできない地下水を除くと、現在利用可能な湖や河川の水量は135,000km³であり、地球にある水の1/10,000に限定される¹⁾。また、水資源の供給源は降水であるが、そのパターンは気候変動とともに徐々に変化しつつあると考えられている。同じ降水量でも狭い領域に集中的に降った場合にはその活用は難しく、逆に災害にもつながる。このようアクセス可能な水資源という観点で考えると人類にとって水資源は必ずしも豊富に存在するというわけではなく、また地域によってはますますそれが利用しにくくなっているのである。

サステナビリティの観点から水資源を評価する場合は、その総量よりはフローである流量で考えた方が適切である。その理由としては、金属などの一般的な資源と異なり、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が挙げられる²⁾。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で評価することを意味する²⁾。

こうしたフロー概念による水資源消費の評価方法の一つとして、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) といった指標がこれまで開発されてきた²⁾。これらは、水利用の際の猶予期間という新しい概念に基づくもので、DWFは降水量や河川流量といった水資源賦存量の地域性を考慮しつつ、必要とする水資源のフローを面積に換算したものである。また、IWFはストックとしての水資源を面積×時間で表したものである。フローと面積、ストックと面積×時間という対応関係は他の様々な資源消費にも応用可能であるが、これは、基本的に我々の生産活動が地表という2次元空間上で行われ、それに対する資源やエネルギーの供給がその平面に対して垂直な方向にもたらされることに起因している。DWFの最大の特徴は時間に対して連続的な評価を可能にした点であり、それは従来のウォーターフットプリント (WF) ではうまくいかなかった。面積を単位とすることからWFという語にも呼応する指標であり、「真のWF」とも呼べる指標である。

しかしこれらの指標は水の供給と消費に関する時系列的に詳細なデータを必要とするため、これらを用いた水資源消費の評価の実例は非常に限られている。本研究では、水資源が生産活動の主要な位置を占める農業、とりわけ水田稲作について、コメの主要な生産地である新潟県と、関東近郊の稲作地帯の例として茨城県をケーススタディとし、水利用が地域の水資源に与える影響の強さを時間に対して連続的に評価し、水資源という観点から

の稲作のサステナビリティを評価した。

2. 研究方法

まず、新潟県中部および茨城県南部の稲作について、栽培時の水利用のシナリオを先行研究²⁾に従って設定した。その概要をそれぞれ表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。

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	—	—

評価は、降水量の多かった年と少なかった年をそれぞれ1年ずつ選んで行ったが、河川流量のデータに制約があるため、新潟ではそれぞれ2009年と2002年、茨城県ではそれぞれ1998年と2001年について評価した。水の供給シナリオのうち、降水量についてはアメダス³⁾ (新潟県新潟、茨城県土浦) の値を用いた。また灌漑用水のデータは、水文水質データベース⁴⁾における河川の流量の値を用い、新潟市帝石橋における信濃川 (流域面積11,903km²) および稲敷郡阿見町塙における清明川 (利根川水系・流域面積25.5km²) の流量を参照した。水田における水深の管理方法は、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^{5,6,7)}により行った。

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DWFおよびIWFを算出した。

3. 結果および考察

新潟県について、耕地面積当たりのDWFの計算結果を図1に示す。グラフは1haあたりのDWFを表しており、1を超えることは局所的、また一時的に持続可能性が満たされていないことを示している。2009年、2002年ともに、前半は比較的なだらかに推移しているが、これはこの時期に一定水位での管理を行っているためと考えられる。一方、6月中旬の中干しの後は間欠的に灌水を行うため、その日の水資源消費が前後と比較して大きくなる。またその大きさはその時の降水状況の影響を強く受ける。2009年と2002年を比較すると、2002年の方が灌水時のDWFが大きく出ているが、これは2001年の降水量が少なく河川水を利用せざるを得なかったため、河川水の流域面積に対する流量が降水量と比較すると小さいことから、河川水を利用した場合のDWFが大きくなったと考えられる。図中にはグリーンウォーターとブルーウォーターについてそれぞれを単独で評価した結果を同時に示している。これらは、それぞれについて流域全体の面積を分母として算出したため、その和が合計のDWFと一致していないことに留意する必要がある。図中、ブルーウォーターよりも合計の値が小さくなっている部分は、灌漑の必要な日に降雨によってその一部が供給されたため、灌漑水だけを考えるとDWFが大きくなったものの、全体では降雨の効果により値が低下したことを示している。

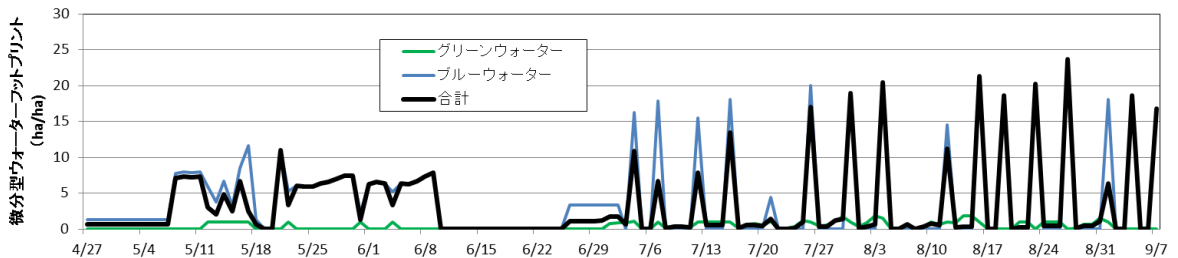


図1 新潟県における稲作の2009年の微分型ウォーターフットプリント

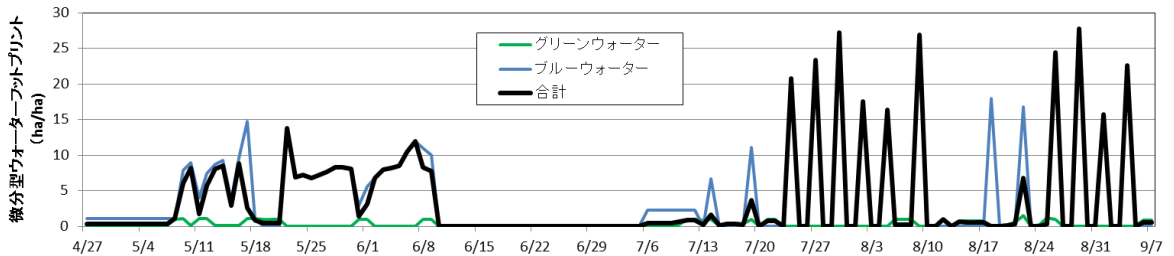


図2 新潟県における稲作の2002年の微分型ウォーターフットプリント

同様に、茨城県について評価した結果を図3および図4に示す。全体的なパターンは新潟のケースと類似しているが、中干し前（6月）の値が新潟よりもばらついている。この時期は水位を保つため毎日ほぼ一定量の灌漑を行っているが、気候上の特色としてこの時期に新潟では降雨が少ないためDWFが安定し、茨城では降雨日が多くその時のDWFが低下した結果と考えられる。

DWFは面積当たりで表した場合、その面積の水消費フローとその瞬間に得られる水資源フローの比であるが、図4では最大60程度の値が見られる。これは得られるフローの60倍の水を瞬間的に消費することを示しており、瞬間的にはサステナビリティを満たしていないが、貯水を行ったりすることでサステナビリティを改善することができる。そのようなやりくりの可能性の限界を表わすのがIWFであり、この値が1を超えることは、その農地単独でのサステナビリティが、栽培期間を通じて達成されないことを表わす。そしてその値は、茨城県の場合、

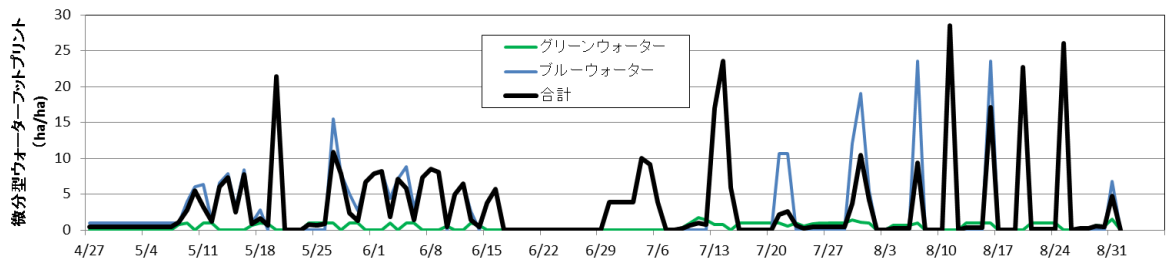


図3 茨城県における稲作の1998年の微分型ウォーターフットプリント

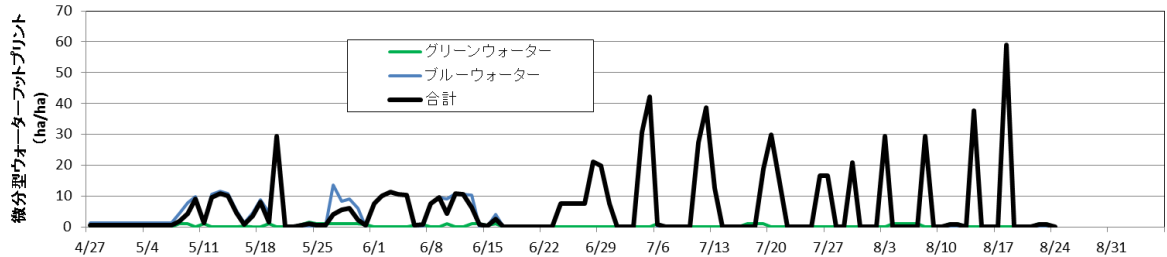


図4 茨城県における稲作の2001年の微分型ウォーターフットプリント

1998年で1.11 ha/ha年, 2001年で2.01である. このことは, 水田での稲作が近隣の分の水資源も消費しながら行われていることを示している.

水田に灌漑された水は, その大部分が地中に浸透し, その一部が河川などに戻るため, 再利用の対象となる. 本来そうした再利用分については, 利用した資源の環境負荷から控除されるべきである. しかし, 地中での水収支に関する知見やその地域的なデータはまだ不備が多いため, 今回は考慮しなかった. ここで, 純粹に作物が消費する水資源という意味でウォーターフットプリントにしばしば用いられる作物からの水分の蒸発散量をベースとしたDWFを算出し, 上述の灌漑ベースの値との比較を行った. その結果を図5および図6に示す. 蒸発散ベースでみた値からも, 投入した水のうち実際に作物の利用する量が非常に小さいことがわかる. しかし, 稲作における水は, 単に作物に水分を供給するだけでなく, 温度調整, 分けつのコントロール, 雑草防除といったさまざまな機能を持っている. それらを考慮すると, 地中への浸透が含まれている灌漑水の環境負荷をすべて稲作に負わせるのは過大評価であるにしても, 蒸発散量だけで評価することは逆に過小評価になると考えられる.

蒸発散量ベースでみた場合の地域別, 年別の値の全体の相対的傾向は, 灌水ベースのときと同様であった. しかし, 蒸発散は基本的に灌水とは関係なく定常的に起きるため, オペレーションには依存せず, 気温, 降水量, 河川の流量といった外的要因だけで決まるため, グラフはよりランダムな形状をしている.

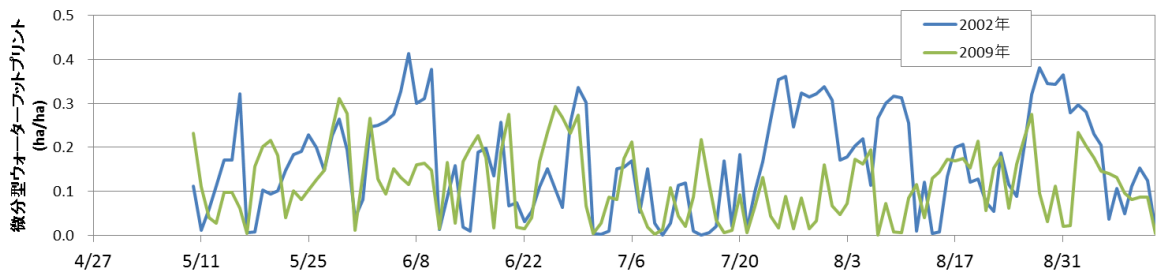


図5 新潟県における稲作の蒸発散ベースでの微分型ウォーターフットプリント

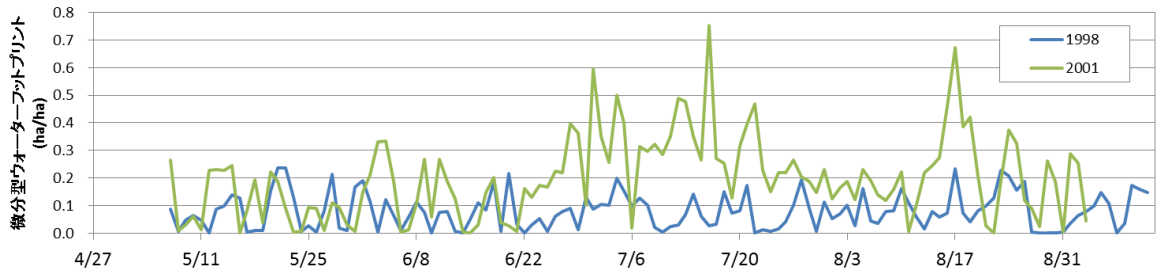


図6 茨城県における稲作の蒸発散ベースでの微分型ウォーターフットプリント

4. おわりに

本研究では新潟と茨城の稲作について微分型ウォーターフットプリントを求め、ブルーウォーターとグリーンウォーターの単独での値と比較した。また、従来の灌漑ベースでの分析に加え、蒸発散ベースでの分析を行い、両者を比較した。灌漑水の水中への浸透とその再利用をどう扱うべきかについては、今後の議論を待つ必要があるが、これらのウォーターフットプリント指標を他の産業や消費部門に展開することにより、産業間の水資源の地域的な競争に関する解析やそれらを緩和する適切な水資源管理ツールへの貢献が期待される。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。

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) Black M., King J., Lacey C., The Atlas of Water: Mapping the World's Most Critical Resource, Second Edition, University of California Press, USA, 2009
- 2) 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.
- 3) 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)
- 4) 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)
- 5) 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.
- 6) 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
- 7) 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