

稲作における水資源消費の地域性評価

茨城大学 内田晋

稲作における水資源の消費量のインパクトについて、全国7地域の比較分析を行った。分析には、地域ごとに、また連続的に変化する水資源の利用可能量に対する消費量のインパクトを連続的に評価することのできる指標である微分型ウォーターフットプリント (DWF) および積分型ウォーターフットプリント (IWF) を用い、北海道・岩手・茨城・新潟・香川・福岡・沖縄の全国7地域について、水稻栽培における水利用のパターンをシナリオとし、降水および河川の流量のデータから水資源の利用可能量を求め、それに対する水資源消費のインパクトを1日単位で連続的に評価した。いずれの地域でも、本来の農地面積に割り当てられている水資源を超える消費量を示す日が見られ、中でも降水量の少ない香川では他地域と比較してその日数、インパクトともに大きくなった。一方、信濃川水系の豊富な水資源が得られる新潟では小さなインパクトを示した。今回の分析を他の農産物や、さらに工業用水や生活用水に拡大することによって、地域全体での水資源消費のインパクトを評価することが可能になり、さらにそれを地域ごとに積算することにより、日本全体での水利用の持続可能性を示す、真のウォーターフットプリントと呼べる指標として活用されることが期待される。

Regional Analysis of Water Resource Consumption in Rice Cultivation

Susumu Uchida (Ibaraki University)

Water use in paddy rice cultivation was evaluated from the perspective of the environmental impact of water resource consumption for seven regions in Japan. Water resources can be appropriately discussed on a flow basis, and the impact of water consumption depends on the available water flow, which varies largely by time and location, in addition to the amount of water consumption itself. In this study, differential water footprint (DWF) and integral water footprint (IWF) were used as the indexes for the analyses. These indexes were previously developed and can help draw conclusions regarding the continuous impact of consumption on the water resources on a flow basis, taking into account the regional and temporal conditions of water supply. The results showed that the impact of water consumption was higher in regions with less amount of river flow. In particular, a large variation of impact, with temporally high values, was observed in such regions. These results suggest the necessity of water management on the basis of not only total or average water flow but also temporal variation.

稲作における水資源消費の地域性評価

茨城大学 内田晋

1. はじめに

世界人口の増加と経済成長に伴い、天然資源の希少性の問題が顕在化しつつある。その中で淡水資源はこれまで地域的な問題として扱われてきたが、近年では地球規模の問題として認識されるようになった。他の天然資源と同様、淡水資源の不足は今世紀における重要な環境問題の一つであるといえる¹。

農業生産における水利用は世界全体の約70%を占め²、その4分の1が水稻栽培に投入されている³。水稻生産における水利用は淡水資源に大きな影響を与え、他の環境問題とも密接に関連している。日本は食糧を水稻に大きく依存する国の一つであり、降水が豊富であるにもかかわらず一人当たりの水資源量は世界平均の半分にも満たない⁴。さらに地形や気候パターンが地域によって異なるため、水資源の状況はそうした地域特性とその時期による変動に大きく依存する。また需要サイドでも、日本の水稻は間断灌漑を初めとする細かい水管理のもとで生産されており、水資源の需給バランスは時間ごと、また場所ごとに細かく変動している。従ってこれらを適切に評価することが日本における水資源管理を考える上で重要である。

水稻生産における水利用とその水資源への影響に関する研究例は多く^{5,6}、ウォーターフットプリント(WF)やバーチャルウォーターがその指標として用いられてきた。これらの指標は生産物に関わる水の総量を表すもので、農業生産の分析にも多く用いられてきた^{8,9,10}。しかし、こうした水量ベースでの分析には2つの問題点がある。その一つは、淡水資源が他の天然資源と多くの点で異なるため、ストック(水量)ではなくフロー(流量)で評価するのが適切であることである。まず、水資源はその供給速度を人間がコントロールすることが困難である。水資源の供給は原則として降水やその後の河川水によってもたらされ、部分的な貯蔵は行われるものの、その長期的な供給速度は降水に依存している。次に、水資源は経済的に輸送が困難である。付加価値の高い飲料水を除けば水の価格は重量に対して低く、相対的に輸送コストが高い。つまり他の資源のように経済システムの中で輸送することは難しいため、輸送は公共事業によって行われ、その輸送距離や量は限定的である。従って水資源の空間的なばらつきが緩和されにくく、そのことが地域的な水資源の過不足を引き起こす。最後に、水資源は絶えず再生されている。地球上の淡水の大部分は降水→海への流入→蒸発というサイクルで循環しており、水資源の供給問題はその総量ではなく、ある地域や時点での供給速度に大きく依存する。これらの特徴から、水資源はストックベースではなくフローベースで評価することが望ましい。

もう一つは利用可能量に対する利用量、つまり希少性の評価の問題である。水量だけの評価では希少性の評価が不可能であったが、WFに希少性の概念を導入する試みがいくつか行われ^{11,12}、それを面積に換算したwater supply footprint(WSF)という指標も開発されている¹³。これはもともとの“footprint”の概念にも合致しており、地域性も考慮しうる指標であるが、農業生産への応用例はこれまでのところ見当たらない。

水資源の状況が時間と空間に関して連続的に変動していることから、ある時点での水の利用フローと供給フローを比較した評価が水利用の影響の正確な評価のために必要である。WFやWSFには時間の概念が導入されており、月や年といった単位でフローベースの分析が可能であるが、これらの指標にはある時点での水利用フローが定義されていないため、日や分といった短い単位での評価が困難であり、結果としてはストックベースの指標となっている。

この問題を解決するため、Uchida and Hayashi¹⁴は猶予期間の概念を導入することにより水利用のフローを

定義した。猶予期間とはある水利用に対し支障なくそのタイミングを遅らせることのできる限度となる時間として定義され、これを用いて微分型ウォーターフットプリント (DWF) と積分型ウォーターフットプリント (IWF) という新しい指標が提案された。これらは水利用のフローを、その地域にもたらされる水供給フローを受けるのに必要な面積で表したものである。特にDWFは連続的なWFの変化を表現することができ、従来のWFが棒グラフで表されていたものを、折れ線グラフで表すことを可能にしたものである。

日本の水稲生産に関しては、既往研究の多くは水資源の水文学的な解析であり、直接的な水利用に関する研究は少ない¹⁵⁾¹⁶⁾⁷⁾。さらに、水利用をフローベースで解析したものや希少性を考慮した研究例は見当たらない。上述のように、水稲生産の水利用の水資源に対する負荷に関する連続的な解析は地域の水需給バランスを考慮する上で重要である。DWFやIWFはこうした解析に適した指標であるが、水稲生産に応用した例は見当たらない。本研究は、水稲生産における水利用の時間的変動およびその地域性を考慮し、それが水資源に与える負荷について、DWFやIWFを用いて解析することを目的とする。

2. 研究方法

解析は全国7地点で行った(表1)。水供給についてはアメダスの降水量と水文・水質データベース¹⁸⁾の河川流量のデータを用い、水利用については各地域の栽培暦や農業振興部署などからヒアリングした結果をもとに水稲栽培に関するシナリオを設定し、灌漑ベースと蒸発散ベースの2つのモデルを用いて水需給のシミュレーションをスプレッドシート上で行った。河川流量のデータは測定した年が限られているため地域によって解析を行った年が異なるが、1997年から2014年の間の6から10年の範囲で解析を行った。灌漑水は一部が土中に浸透し流出するため、当該水田で純粋に消費された水量としては蒸発散量を用いるのが厳密な考え方である(蒸発散ベース)。しかし水田に保持される水も保温や酸素量のコントロールなど、水稲の生育に一定の機能を果たしているため、広義にはこれらも水稲生産に利用されていると考えられる。この考え方に基づくのが灌漑水量を水利用量とする灌漑ベースモデルである。

表1. 解析した地域

地域	河川名	流量測定地	流域面積 (km ²)	雨量測定地
北海道	石狩川	岩見沢大橋	9405	岩見沢
岩手	北上川	七日町	7641.2	千厩
新潟	信濃川	帝石橋	11903	新潟
茨城	清明川	塙	25.6	土浦
香川	土器川	祓川橋	106.7	祓川橋
福岡	筑後川	瀬ノ下	2295	久留米
沖縄	羽地大川	稲月橋	12	名護

DWFおよびIWFは以下のように算出した。まず、水利用フロー $u_j(t)$ は以下のように定義される。

$$u_j(t) = X_j / E_j \quad \text{for } t_j \leq t \leq t_j + E_j \quad (1)$$

ここで j は個々の水利用イベント、 X_j は水利用量、 E_j は猶予期間、 t_j はイベント j の発生時刻である。例えばある灌水を行う際、生育に支障のない範囲であると2日それを遅らせることが可能であれば、実際の日を含めて3日のうちに一度灌水すればよく、その水量を3日という時間で割った流量が(灌漑水量を用いたモデルにおける)本質的な水利用のフローであると考えられる。ここで得られた流量をもとにDWFとIWFが定義される。水利用フローの水資源フローに対する負荷の大きさ $s_j(t)$ は

$$s_j(t) = u_j(t) / w_j(t) \quad (2)$$

で表される。ここで $w_j(t)$ は水供給フローを表わす。水供給の対象となる領域の面積（通常は流域面積）を A_j で表したとき、DWF はその面積に負荷をかけたものになる。

$$DWF_j(t) = A_j s_j(t) = A_j X_j / E_j w_j(t) \quad \text{for } t_j \leq t \leq t_j + E_j \quad (3)$$

これをすべての水利用について積算したものがその時点での DWF である。

$$DWF(t) = \sum_j DWF_j(t) \quad (4)$$

DWF の単位は面積で表され、概念としては利用する水の流量を確保するために必要な、降水を受ける面積の大きさである。つまり、その面積が実際の面積よりも大きければ、そこで使用されている水量が、本来その面積に割り当てられるべき水資源の量を上回っていることを示す。

また、体積としての水利用の総量は DWF を時間で積分したものであり、これを IWF と定義する。

$$IWF_j = \int_{t=t_j}^{t_j+E_j} DWF_j(t) dt = (A_j X_j / E_j) \int_{t=t_j}^{t_j+E_j} \{1 / w_j(t)\} dt \quad (5)$$

$$IWF = \sum_j IWF_j = \int DWF(t) dt \quad (6)$$

IWF は時間×面積の単位を持つ。これらの指標は単位時間の取り方は任意であるが、本研究では作業が1日単位であることから、シミュレーションは1日を単位として行った。また、降水によるグリーンウォーターと灌漑によるブルーウォーターの区別については、予察の結果前者の値が後者に対して無視できるレベルであったため、両者を区別しないで解析を行った。

3. 結果

灌漑ベースでの解析結果の例として、1998年と2001年の茨城のDWFを図1に示す。どちらの年も周期的に値が高くなっており、特に2001年では50を超える日が見られた。数値の意味は、本来の農地面積に割り当てられた水資源を基準とした水の利用量であるから、1を超えた場合には他の土地の分の水資源を借りて消費していることを意味している。値が周期的な挙動を示しているのは間断灌漑に対応しており、灌漑を行う日の水利用の負荷が非常に高いことがこの図から読み取れる。全体を見ると2001年の方が1998年より値が大きい傾向にあるが、降水量が1998年は2001年と比較して多く、それが負荷の差になっていると考えられる。

同じ茨城におけるIWFの値を図2に示す。この図ではグリーンウォーターとブルーウォーターを区別しているが、前者の値は非常に小さい。この数値はIWFの時間平均に相当するが、いずれの年も1を超えて

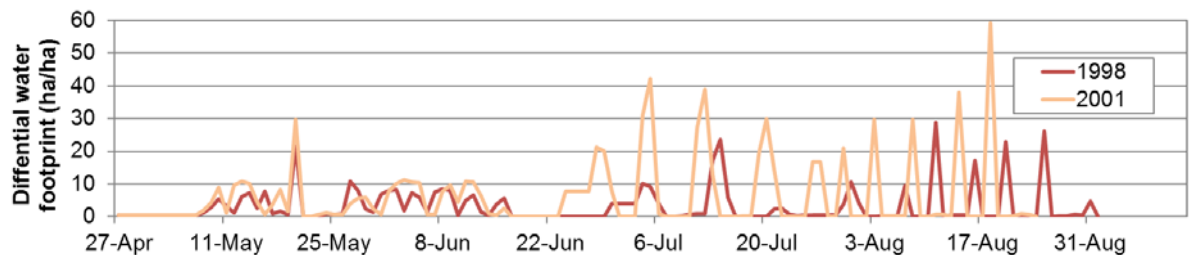


図1 茨城での灌漑ベースでの微分型ウォーターフットプリント

いる。このことは、栽培期間通算でも、この農地単独では割り当てられた水資源を上回る量を消費しており、持続可能性を満たしていないことを表している。ただしDWF、IWFともに灌漑ベースの数値は浸透して他の場所で利用される分を含んでいるため、過大評価されていることに留意が必要である。

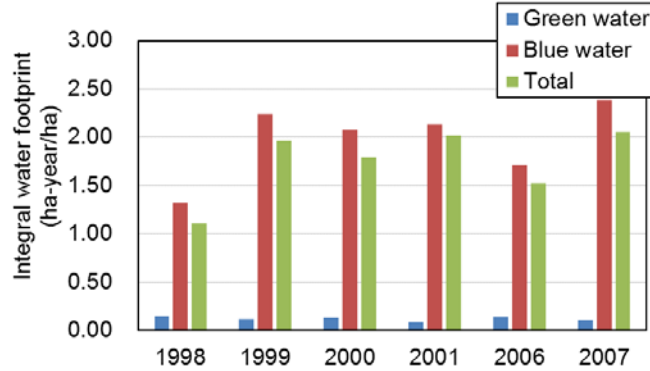


図2 茨城の灌漑ベースでの積分型ウォーターフットプリント

図3には同じ茨城について蒸発散ベースでのDWFを求めた結果を示す。蒸発散は灌漑の影響を受けないため、図1に見られるような間欠性はなく、数値も灌漑ベースより低くなっている。真の消費量といえる蒸発散量で見れば、期間を通じて1以下であることから持続可能性は満たされていることがわかる。

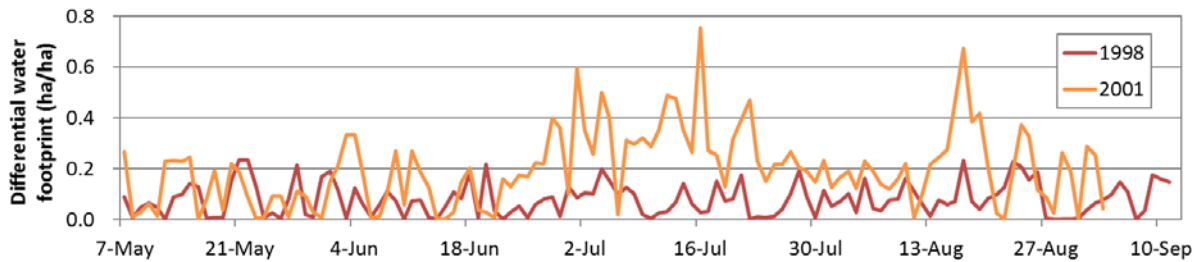


図3 茨城での蒸発散ベースでの微分型ウォーターフットプリント

次に、地域による違いを見るため、各地域の各解析年の灌漑ベースでのIWFの値をプロットしたものを図4に示す。香川の値が突出して高く、次いで沖縄、また最も低いのが新潟となった。しばしば渇水の被害を受けたため池が発達している香川で水資源がひっ迫していることがこの図からもわかる。一方新潟は信濃川の豊富な水量に支えられ、県の農業振興部門に対するヒアリングでも渇水の経験はほとんどないというコメントを得ている。また、蒸発散ベースの値も同様に比較を試みたが、地域間の大小関係はほぼ同じであった。その中で香川は年によって1を超えており、蒸発散ベースでも単独では持続可能性を満たせないことがわかった。

DWFについてさらに詳細に調べるため、日ごとの値をクラス分けした上でその度数分布を求めた。茨城についての結果を図5に示す。灌漑ベースでは0.1から100まで広い分布を示しており、蒸発散ベースでは0.1から1のところ集中する傾向が見られた。他の地域を含め、1を超える日の全体に対する割合を見ると、灌漑ベースでは20%以下の新潟と福岡を除くといずれの地域も30から50%の範囲にあり、香川が突出して多いという傾向は見られなかった。このことは、香川ではDWFが1を超える日は他の地域と同

程度であるが、その中に極めて高い日があり、それが全体の IWF を押し上げているということがわかる。この原因は灌漑用水の源である土器川の水量が少なくなることにありと考えられる。実際にはため池の利用により水資源の問題は緩和されているが、本研究の解析ではため池を考慮していない。

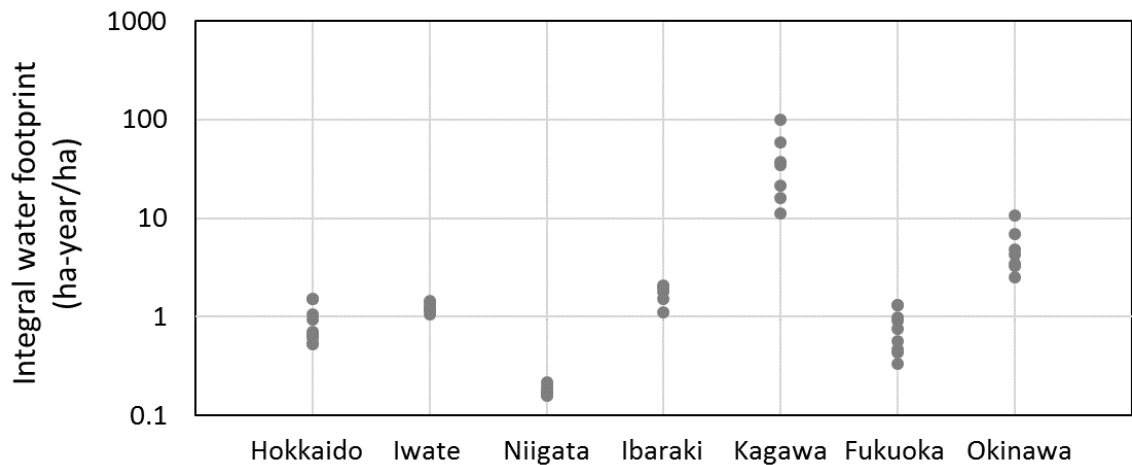


図4 各地域の灌漑ベースでの積分型ウォーターフットプリントの比較

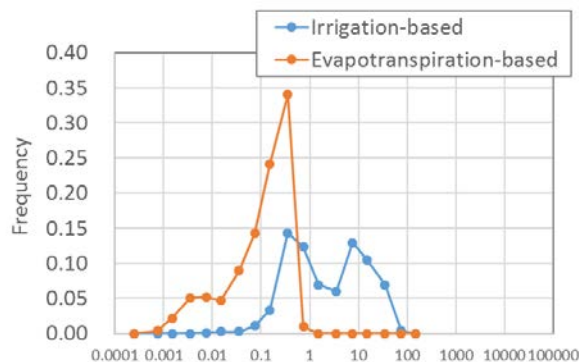


図5 茨城での DWF の度数分布

4. おわりに

本研究では、水稻生産における水利用の時間的変動およびその地域性を考慮し、それが水資源に与える負荷について、DWF や IWF という新しい指標を用いて解析を行った。地域ごとの比較では香川での負荷が高く、それは降水量が少ないことと、特に負荷の高い日があることが原因であった。一方、河川流量の安定している新潟では低い値を示した。灌漑水量で評価した水利用総量による負荷の日変動はオペレーションに依存し、灌漑日に高い負荷を示した。栽培期間を通じた負荷でみると、全ての地域で、その面積に割り当てられた水資源量を超えて水利用が行われていることがわかった。

本研究での水利用の評価を通じ、浸透する水の扱いなど、指標の考え方にさらなる改良が必要と思われる点が見られた。また、ため池などの渇水対策も本研究では考慮されていないため、農業の評価についてもさらに検討が必要である。このような問題点は残るものの、今回用いた DWF や IWF は活動ごとに、また地域ごとに積算することが可能であり、地域の全ての産業活動や消費活動について積算することにより地域全体の水資源の持続可能性を評価することができるとともに、本来の意味でのウォーターフットプリントとして、日本全体、地球全体での水利用の持続可能性評価への応用が期待される。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP25550045 の助成を受けたものです。

参考文献

- ¹ Bouwer H (2000) Integrated water management: emerging issues and challenges. *Agricultural Water Management* 45:217-228.
- ² Shiklomanov IA (1997) Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world: assessment of water resources and water availability in the world. Geneva, WMO.
- ³ Chapagain AK, Hoekstra AY (2010) The green, blue and grey water footprint of rice from both a production and consumption perspective. Value of Water Research Report Series No.40, UNESCO-IHE Institute for Water Education, The Netherlands.
- ⁴ Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries (2017) Annual report. http://www.maff.go.jp/kanto/to_jyo/2017data/ibaraki_h27-28.html. Accessed 10 Sep. 2017 (in Japanese)
- ⁵ Wopereis MCS, Bouman BAM, Kropff MJ, Ten Bergec HFM, Maligayab AR (1994) Water use efficiency of flooded rice fields I. Validation of the soil-water balance model SAWAH. *Agricultural Water Management* 26:277-289.
- ⁶ Borrel A, Garside A, Fukai S (1997) Improving efficiency of water use for irrigated rice in a semi-arid tropical environment. *Field Crops Research* 52:231-248.
- ⁷ Thanawong K, Perret SR, Basset-Mens C (2014) Eco-efficiency of paddy rice production in Northeastern Thailand: a comparison of rain-fed and irrigated cropping systems. *J. Cleaner Production* 73: 204-217.
- ⁸ Marano RP, Filippi RA (2015) Water Footprint in paddy rice systems. Its determination in the provinces of Santa Fe and Entre Ríos, Argentina. *Ecological Indicators* 56: 229-236.
- ⁹ Lovarelli D, Bacenetti J, Fiala M (2016) Water Footprint of crop productions: A review. *Science of the Total Environment* 548-549:236-251.
- ¹⁰ Cao X, Wu M, Shu R, Zhuo L, Chen D, Shao G, Guo X, Wang W, Tang S (2018) Water footprint assessment for crop production based on field measurements: A case study of irrigated paddy rice in East China. *Science of The Total Environment* 610-611: 84-93.
- ¹¹ Hess T, Chatterton J, Daccache A, Williams A (2016) The impact of changing food choices on the blue water scarcity footprint and greenhouse gas emissions of the British diet: the example of potato, pasta and rice. *J. Cleaner Production* 112: 4558-4568.
- ¹² Cao X, Wu M, Guo X, Zheng Y, Gong Y, Wu N, Wang W (2017) Assessing water scarcity in agricultural production system based on the generalized water resources and water footprint framework. *Science of The Total Environment* 609:587-597.
- ¹³ Stoeglehner G, Edwards P, Daniels P, Narodoslowsky M (2011) The water supply footprint (WSF): a strategic planning tool for sustainable regional and local water supplies. *J. Cleaner Production* 19:1677-1686.
- ¹⁴ Uchida S, Hayashi K (2014) Indices of water footprint on the basis of the concept of acceptable delay in water use: their application to evaluation of agricultural production. *J. Life Cycle Assessment, Japan* 10: 40-48.
- ¹⁵ Kato Y, Okami M, Katsura K (2009) Yield potential and water use efficiency of aerobic rice (*Oryza sativa* L.) in Japan. *Field Crops Research* 113:328-334.
- ¹⁶ Kudo Y, Noborio K, Shimoozono N (2014) The effective water management practice for mitigating greenhouse gas emissions and maintaining rice yield in central Japan. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 186:77-85.
- ¹⁷ Maruyama S, Kabaki N, Tajima K (1985) Water Consumptions in Japonica and Indica Rice Varieties. *Japanese Journal of Crop Science* 54:32-38.
- ¹⁸ Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (2002) Water Information System. <http://www.l.river.go.jp/>. Accessed 10 July 2016