

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 27 日現在

機関番号：12101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25550045

研究課題名(和文) 経済及び水資源を考慮したライフサイクルアセスメント手法と農業生産の評価

研究課題名(英文) Study of methodology in Life Cycle Assessment Considering Economy and Water Resource and Evaluation of Agricultural Production

研究代表者

内田 晋 (Uchida, Susumu)

茨城大学・農学部・准教授

研究者番号：30631014

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：農業生産における水の利用状況を降水量や河川の流量といった地域的な水の供給特性と比較し、水資源に与えている相対的な負荷を連続的に表現することのできる、折れ線グラフで表せるウォーターフットプリントとして「微分型ウォーターフットプリント(DWF)」、また期間を通じた水利用の持続可能性を表した「積分型ウォーターフットプリント(IWF)」を開発した。またそれらを用いて全国各地の稲作における水利用状況を解析し、水のひっ迫する地域や時期について評価を行った。

研究成果の概要(英文)：We developed 2 indexes "Differential Water Footprint (DWF)" and "Integral Water Footprint (IWF)." DWF indicates relative burden of water use in agricultural production against regional and temporal water resource supply, and IWF indicates total sustainability of the production. In particular, DWF enabled to indicate water footprint continuously as line graph, with which water footprint has not been expressed. We further evaluated water usage of rice production and their sustainability in 7 sites in Japan, and clarified the period in which the burden to water resource in each site.

研究分野：環境影響評価

キーワード：ウォーターフットプリント 水資源 灌漑 水田作 農業用水

1. 研究開始当初の背景

ライフサイクルアセスメント(LCA)を行う上での農業部門における大きな問題の一つは、農業が気候要因、個別要因といった様々な不確実性を抱えていることであり、それゆえにLCAを用いた環境影響評価手法の確立は他の産業と比較して遅れている状況にあった。農業分野では特に水資源消費が重要な環境負荷であるが、当時広く用いられているウォーターフットプリント(WF)は環境容量との比較可能性やその可積算性などの点で課題が残されており、環境負荷を適切に表現した環境影響領域の指標として確立するためには改良が必要であった。本研究代表者は、「猶予期間」の概念を導入することにより環境容量との比較を可能にした瞬間値の指標「微分型ウォーターフットプリント(DWF)」および積算値の指標「積分型ウォーターフットプリント(IWF)」のアイデアを提示し、LCAの新たな環境影響領域としての可能性を示した。しかしこれらのアイデアには、ブルーウォーターとグリーンウォーターの重複性に関する取扱いなど課題が残されており、LCAにおける計算方法も明らかにされていない。

2. 研究の目的

農業と経済の双方に深く関わりを持つ水資源消費の負荷を連続的に評価する指標を開発し、環境容量との比較が可能なウォーターフットプリント概念で表わした新たな環境影響領域として、栽培技術・産地などの比較を通じて、日本の農業の持続可能性についての知見を得るとともにその評価を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

まず、水資源消費についての指標を環境影響領域として整理し、算出方法を確定させた。また、その結果を環境影響評価手法として確立するとともに、それを実際の農業生産に適用し、栽培技術・栽培地域による違いを分析し、水資源消費の観点からの環境影響を比較した。最後にそれらの結果から、日本の農業の持続可能性について評価と検討を行った。水資源の消費による環境負荷について、過去の研究において開発した微分型フットプリント(DWF)と積分型ウォーターフットプリント(IWF)を発展させ、環境影響領域として確立した。まず、グリーンウォーターとブルーウォーターの重複に関する取り扱いなど、未解決の部分についての整理をしたのち、LCAにおける算出方法の検討を行った。水資源の状況がプロセスごとに異なるため、プロセスツリーから水利用量の多いプロセスを選んだ後、各プロセスについて2つの指標をそれぞれ計算する方法が適切と考えられるが、実際に算出する際の必要事項などを確認し、計算方法のマニュアル化を行った。実際の農業生産の評価にあたっては、まず

現地調査を行った。主な対象作物としては水利用、生産高ともに国内で主要な位置を占めているイネとし、調査地としては、北海道、東北(岩手)、関東(茨城)、中部北信越(新潟)、近畿中四国(香川)、九州(福岡)、沖縄の7地域7か所を選んだ。水利用については標準技術体系への掲載がないため、猶予期間(対象とする水利用を行わなかった場合に、作物に影響が開始するまでの期間)をはじめとした水利用の詳細についてヒアリング調査を実施した。その他の一般的な栽培プロセスについては、公開された標準技術体系のデータも活用し、不足する部分を調査で収集するという形式をとった。解析の際には、対象地域の水供給(降水量など)、気温、蒸発散量といった気象に関わるデータについては日本気象協会のアメダスのデータを用い、河川の流量、流域面積、地下水の状態といった水文学的データについては国土交通省の水文水質データベースを用いた。また、出穂日等のイネの成長に関する情報については、農業環境技術研究所のモデル結合型作物気象データベース(MeteoCrop DB)を用い、シナリオにより設定した移植日から気象データを用いた計算により推定した。

以上の現地調査結果をもとに、各地の水田における水利用モデルを構築するとともにDWFとIWFを求め、それを用いて持続可能性の観点からの水資源消費の評価を行った。

4. 研究成果

現地調査の結果、稲作における水資源消費のパターンの共通性と地域性が明らかになった。共通する基本的な考え方は以下のとおりである。まず移植前にやや深め(35mm程度)に水を入れて代かきをし(冬の間に土が乾燥するので、この時は湛水量の3~5倍の水を入れる必要がある)、移植後活着すると水深を浅く(25mm程度)して分けつを促進する。その後水深を大きくしてから一発剤による雑草防除を行う。移植後40日程度経過したら排水して中干しを行うが、その際に小さなひびが入る程度まで乾燥したら地面を濡らす程度の水を供給する(走り水と呼ばれる)、10日~2週間程度の中干しが終わると、出穂までは間断灌漑を行う。この時期の稲は特に水を必要とする一方で根に十分な酸素を供給しなくてはならない時期でもあり、この時期の水管理のノウハウが重要であり、それを収穫まで続ける。

現地調査で明らかになった各地の水管理の特徴については以下の通りである。

まず北海道では、降水の他に雪解け水が利用できるため、水資源の状況は比較的良好で、深刻な渇水はほとんどないものの、最近では平成15年に渇水があった。土壌については水はけが悪く、落水が1日あたり10mm以下のところが多い。北海道の稲作技術は言うまでもなく低温対策が重要な要素で、その主な

方法は深い水深で栽培することである。一般的な深水管理の場合の水深は 60mm 程度だが、北海道では最大 200mm 程度湛水することもある。従って水田の造りも、あぜをしっかりとしたものにして、排水も水尻の開閉だけでコントロールし、細かな水位の調整機構がないのが大きな特徴である。時系列的な水管理としては、中干しを幼穂形成期と出穂前の 2 回行うのが大きな特徴であるが、低温の年には中干しを行わず、土壌還元による根への障害を防ぐこともある。これも低温による直接的な障害とのトレードオフを判断しながら注意深く行うことになる。出穂後は、軽く水が浸る程度の状態にしてから間断灌漑を行い、出穂後 25 日くらいで落水（排水）し、その後収穫まで 25 日程度あるため、その途中で田面が乾燥したら走り水（田面が濡れる程度に水を流す）を行う。

次に岩手県であるが、東北地方の水資源は豊富で、深刻な渇水はほとんど経験しない。地力にも富んでおり、落水は低地では 1 日あたり 10mm、山間部では 30mm 程度である。岩手県の稲作の水管理には慣行農法と深水栽培の 2 つのパターンがあるが、慣行農法は主に地力の高い土壌で行われ、中干し前から間断灌漑を行うのが特徴である。これにより根に酸素を供給することができ、また養分を調整する働きもある。間断灌漑は週 2 回（水持ちのいい田）から 3 回（落水の早い田）程度の頻度で水を入れるが、地域によって 4 湛 3 落（4 日でなくなるくらいの水を入れ、さらに水がなくなってから 3 日置いてから水を入れる）や 2 湛 2 落といったパターンが決まっている。水を入れる深さは農家によってまちまちであるが、だいたい 30～40mm 程度と思われる。一方、深水栽培は水を多めに湛水して行う栽培方法で、分げつを抑制して保温を行う効果があるが、地力の高い所で行うと窒素が過剰になるリスクもある。どちらの水管理方法でも中干しは行われるが、その際には小ひびで管理（地面に小さいひびが入るくらいまで乾燥し、その後も雨が降らないようなら走り水をして濡らす）をし、コンバインを入りにくいような所は強めに乾かす（ただし乾き過ぎると脱室が起きて収量が低下する）。中干しの後、冷害の恐れがある場合には出穂時まで深水で栽培するが、その場合は 10～15cm の深さに水を入れる。より土壌を酸化させる必要がある時には、間断灌漑よりもさらに水を少なくする飽水管理という方法がとられる。これは水を入れて落水した後、足跡にまで水がなくなったら次の水を入れるというタイミングで管理をし、出穂前後は水を十分に供給する必要があるため湛水（花水）するという方法である。

新潟県では、山間部を除けば水資源には恵まれており、渇水になることはあまりない。ため池も県内に 200 か所以上あるが、その供給対象となる水田は面積にして全体の 1 割以下である。土壌は、西部の糸魚川地方と東部

の新潟地方ではやや異なり、糸魚川の方が平野部が狭いせいか土粒が粗く、水が抜けやすい傾向にある。それでも落水は 1 日あたり 15mm 程度である。一方で、糸魚川地方は山からの水量が十分にあり、水はけのよさをカバーしている。逆に新潟平野では水資源の量は糸魚川より少ないものの、土壌が粘土質なので水が抜けにくく、水資源と土質のバランスが取れている。土の粒度は一般的に山地では粗く、平地では細かいが、新潟県でも山地の粗いところでは水が 1 日で 80mm も落ちることがある。この地域でも中干し後には飽水管理を行っているが、その内容は東北地方とはやや異なっている。出穂前後の時期も含め、水が全部なくなる前にやや早いタイミングで水を 30mm 程度入れる管理方法を取っている。この地域は夏季にフェーン現象が発生し、特に近年ではその高温による障害が問題になっているが、水を早めに入れるのはその対策の一つであり、通常はその熱容量の大きさを利用して低温対策に用いられる水を、逆に高温対策に利用している例である。また、富山県ではカドミウム対策として出穂前後の湛水を行っている。

茨城県では、中干し前には間断灌漑を行わず浅水での湛水管理を行っている。中干し後の間断灌漑では、水が完全に排水されてから次の水を入れるというタイミングで管理を行っている。水資源は比較的豊富で、落水深は 15mm 程度と標準的である。

古くから渇水の被害を受けてきた瀬戸内地方に位置する香川県では水管理に対する意識が高く、土壌の浸透性は平均的なレベルだが、乏しい水資源を有効に利用する工夫がなされている。例えば中干しは行わない傾向にあり、また、田面が乾燥して大きなひびが入ってしまうと、水を入れても抜けやすくなってしまいうため、ひびが入る前に走り水などを行って、常に湿り気を保つようにしている。また渇水時になると節水栽培という独自の水管理方法に切り替え、農業用水の供給も番水などの細かい管理方法で行う体制が確立している。水供給のハード面でも、古くからのため池事業の他、香川用水の開通によりかなり改善し、かつてのような渇水の頻度は減少したものの、現代でも干ばつが全くなくなったわけではなく、1994 年と 2005 年には深刻な干ばつを経験した。特に 2005 年の干ばつは、底をついていた早明浦ダムの貯水量が台風によって 1 日で回復することで解決するという、水資源の不安定性を象徴する事例となった。

福岡県でも降水だけでは供給は十分ではなく、ため池が随所に造られている。気温の高い福岡県の稲作の最大の特徴はスクミリンゴガイ（ジャンボタニシ）対策が必要な点で、長期間の湛水がタニシの繁殖につながるため、移植後にはすぐ落水し、その後の中干し前の時期にも間断灌漑を行う。間断灌漑の目安は 3 湛 2 落と呼ばれるが、灌水して 3 日

程度で自然落水し、その後2日放置してから次の灌水を行うのが標準的なタイミングである。土壌の排水性は悪くなく、麦との輪作も行う乾田が多い。

さらに高温である沖縄県では2期作が行われている。幼穂形成と分けつが同時に進行するため中干しの必要性はあまりなく、また4月から5月にかけて降雨量が少ないため、浅く湛水したままの管理が行われる。ただしタニシ対策のため、移植後はすぐに落水し、その後灌水とともに薬剤投入を行う。しかし近年では排水設備が整備されたことに伴い、中干しを行うところも増えている。かつてはしばしば湧水が起きていたが、ダム事業により供給面では改善された。この地方の降水量に関する大きな特徴としては台風の影響が大きいことが挙げられる。これまで気象条件の変化に強い品種が主力であったこともあり、水管理に関する意識はそれほど高くなく、他の地方ほど厳密な管理方法が確立していない。

これらの調査結果をもとに、各地での水田作における水利用モデルを構築するとともにそれに基づくDWFとIWFの算出を行い、水資源消費の負荷について評価を行った。また評価にあたり、水自体の機能に着目した蒸発散ベースと、保温、雑草防除、分けつ促進といった水のさまざまな機能を考慮した灌漑ベースの2つの評価方法を開発した。評価の結果、地域の水資源の賦存量(降水および河川の比流量)を反映した水資源の需給状況を定量的かつ連続的に表すことに成功した。例えば香川のように水資源のひっ迫した地域では他の地域と比較して指標の数値が大きくなるといった傾向が数値で明らかとなった。また、降水量の少ない時期や水使用量の多い時期など、需要と供給の双方の観点からそのバランスがひっ迫する時期をグラフ上で明示することに成功した。

また、畑作については、過去に調べた徳之島のサトウキビ栽培のデータをもとに、灌漑を想定したサトウキビ栽培の水資源への負荷を評価し、日本LCA学会誌に原著論文が掲載され、同学会の論文賞を受賞したほか、国際学会を含むいくつかの学会での成果発表を行った。また、これらの成果の一部については、ウェブサイトを作成し公開した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

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巻、1号、40-48、2014、査読有

[学会発表](計4件)

内田晋、『稲作の水資源消費の連続的評価』、日本地域学会第52回(2015年)年次大会、2015.10.11、岡山大学(岡山県・岡山市)
Susumu Uchida, 『Evaluation of Water Use in Paddy-Rice Production on the Basis of Differential Water Footprint』、EcoBalance2014、2014.10.29、International Congress Center (Tsukuba, Ibaraki)

内田晋、『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』、日本地域学会第51回(2014年)年次大会、2014.10.5、麗澤大学(千葉県・柏市)
Susumu Uchida, 『Improved Water Footprint and Its Application to Agricultural Production』 The 23rd Pacific Conference of the Regional Science Association International、2013.7.4、Gedung Merdeka and Savoy Homann Hotel (Bandung, Indonesia)

[その他]

ホームページ等

経済及び水資源を考慮したライフサイクルアセスメント手法と農業生産の評価

(<http://env.agr.ibaraki.ac.jp/index.html>)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

内田 晋 (UCHIDA SUSUMU)

茨城大学・農学部・准教授

研究者番号：30631014