

# 那須野ヶ原扇状地における灌漑農業のエネルギー収支

農研機構 農村工学研究部門 上田達己\* 國光洋二

## 要 約

那須野ヶ原扇状地では、自然の地形の傾斜を生かして、小水力発電を中心とする再生可能エネルギーを生産しつつ灌漑農業を営んでいる。本研究は、このような灌漑農業(営農活動および水利施設の建設・運用)を対象に、都道府県間産業連関分析によるライフサイクルアセスメントの手法を用いて、そのエネルギー収支を評価する。結果として、水利施設の運用に限れば再生可能エネルギー生産量は消費量の約 12 倍となること、水利施設の建設を含めるとその比率は 93%であること、また、営農活動との比較では、受益地で米と飼料作物のみ作付けされると仮定するとエネルギー生産量が電力消費量(直接・間接)の 125%を供給し、現状の地域の作目構成を反映してエネルギー集約的な施設栽培などを含めると電力消費量の 51%を供給できることが明らかとなった。

# Energy balance of irrigated agriculture in the Nasunogahara alluvial fan

Tatsuki Ueda\* and Yoji Kunimitsu (Institute for Rural Engineering, NARO)

## Abstract

In the alluvial fan of Nasunogahara, irrigated agriculture is conducted in conjunction with small hydropower generation by utilizing the topographic slope of the region. We investigate energy balances of irrigated agriculture in the region by using a life cycle assessment on irrigation facilities and crop production based on the inter-prefectural input-output analysis. As a result, we demonstrated that: (1) the irrigation facilities alone produce 12-fold energy as the energy consumption by the facility operations; (2) and still produce 93% of energy consumption when including construction works of the facilities. Furthermore, (3) the produced energy provides 125% of electricity consumption of irrigated agriculture in the district if only paddy and fodder crop productions are considered; (4) and still supplies 51% if more energy-intensive greenhouse horticulture and other crops are included in accordance with the cropping patterns of the district.

JEL classifications: C67, Q15, Q42, Q56

Keywords: Input-Output analysis, Irrigation, Renewable Energy

# 那須野ヶ原扇状地における灌漑農業のエネルギー収支

農研機構 農村工学研究部門 上田達己\* 國光洋二

## 1. はじめに

現代農業は、太陽光エネルギーによる植物生産に基盤をおく産業であると同時に、農業機械などの燃料やハウス等の冷暖房などへの直接投入、ならびに化学肥料や農薬などの中間投入財の製造過程（間接投入）において、化石エネルギーに多くを依存する産業でもある。そこで、農業の持続可能性を明らかにするため、ライフサイクルアセスメント（LCA）の手法を用いた農業のエネルギー収支に関する分析が数多く取り組まれてきた。しかし、農業は開放的な自然生態系の物質代謝のなかで営まれる活動であるため、その LCA を行うにあたっては、分析の境界・対象や手法について十分な検討が必要である（小林・阿部，2003）。とくに、我が国の農業の特徴である水利施設の建設・運営に関する環境影響は、地形条件などの影響を強く受けるため、地域差を無視することができない。

水利施設の建設に関する LCA については、例えば、小林・阿部（2003）や丹治ら（2003）によって行われたが、主として積み上げ法に基づく分析であり、分析に含まれる投入財は、コンクリートや鉄鋼などの土木材料に限られていた。また、水利施設の運用について、吉田（2011）は、低平地である新潟平野において、かんがい排水用のエネルギー投入が営農に用いるエネルギーに匹敵することを明らかにし、また、かんがい排水に要するエネルギーは、地域の地形条件（勾配）に大きく左右されることを指摘した。

これらの既往研究を踏まえ、本研究では、水利施設の建設段階に関する LCA を、筆者らの開発した、都道府県間産業連関分析に基盤をおく「経済波及効果・環境影響評価ツール」（上田・國光，2018）を用いて行う。産業連関分析を用いた LCA の特徴の一つは、土木材料のみならず、上流産業（ここでは原材料・サービスを提供する産業のことをいう）の環境影響を網羅して分析できることである。さらに、水利施設の運用にかかるエネルギー収支が地形条件に左右されることを踏まえ、本研究では、高低差の大きい扇状地の地形条件を生かして、複数の小水力発電等を運用しエネルギー生産を行いつつ水利施設の維持管理を行っている那須野ヶ原土地改良区連合の受益地を対象として分析を行う。

## 2. 分析の手法

本研究の対象地域は、那須野ヶ原土地改良区連合（以下、土地改良区連合）の受益地とする。これは、国営那須野原総合農地開発事業（1968 年着工，1995 年完工）の事業地区と一致する。受益面積は、4,329ha（うち田 3,025ha，畑 1,164ha，輪換耕地 140ha）である。また、本研究の対象とする「水利施設」とは、国営事業で整備されたかんがい排水施設（ダム，水路など），およびその他の事業で整備された再生可能エネルギー施設（小水力発電施設 6 箇所（計 1,500kW），太陽光発電施設 1 箇所（400kW））を、便宜上総称して指す。

LCA の評価の単位（機能単位）は、原則として、上記受益地で営まれる耕種農業において作付面積 1ha あたり 1 年間に生じる環境影響とする。また、評価項目は、エネルギー生産・消費量とする。なお、酪農をはじめとする畜産業は、当該 2 市の農業産出額の 54%を占める主要な農業であるが、畜産業は上記国営事業の用水計画に含まれないので、畜産業による環境影響はシステム境界外とする。ただし、畜産業に青刈トウモロコシなどの飼料を供給する飼料畑は、受益地のうちおよそ 700ha を占めるので、分析対象とする。

産業連関分析のために、石川・宮城(2004)によって開発された47都道府県間産業連関表の2011年版(Tithipongtrakulら, 2017)を用いる。この表は、内生部門として51部門を有するが、筆者らがこれに小水力発電の運用に関する2部門を追加・拡張して53部門とした(以下これを拡張表という)。

拡張表を用いた生産誘発額(後方連関効果)の計測は、 $(I-(I-M)A)^{-1}$ 型モデルを地域間分析に拡張した次式に基づく(上田・國光, 2018)。

$$\mathbf{x}_1 = [I - (A - \hat{M}A^*)]^{-1} [\mathbf{f}_d - \hat{M}\mathbf{f}^* + \mathbf{e}] = B\mathbf{f}_x \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{x}_1$ は生産誘発額ベクトル； $I$ は単位行列； $A$ は投入係数行列； $\hat{M}$ は輸入係数を対角要素とする対角行列； $A^*$ は地域内の取引のみを抽出した投入係数行列； $\mathbf{f}_d$ は最終需要額の全国計ベクトル； $\mathbf{e}$ は輸出額ベクトル； $\mathbf{f}^*$ は当該輸入品消費地域の地域内最終需要額ベクトル；

$B = [I - (A - \hat{M}A^*)]^{-1}$ は輸入内生レオンチェフ逆行列； $\mathbf{f}_x = \mathbf{f}_d - \hat{M}\mathbf{f}^* + \mathbf{e}$ は外生最終需要額ベクトルである。

耕種農業によるエネルギー消費量は、2011年全国産業連関表(生産者価格評価表・基本分類)より推計した投入額ベクトル(耕種農業10部門)を、最終需要としてモデルに与え波及効果を求め、これに南斎(2013)によるエネルギー消費係数(3EID)を乗じて求めた。このようにして求めた間接エネルギー消費量に加えて、耕種農業各部門自身による直接エネルギー消費量(例えば、トラクターやハウスの暖房にかかる燃料など)を、耕種農業10部門の投入額ベクトルから、化石燃料各部門(ガソリン、軽油等)の投入額データを抽出して求めた。ただし、本研究では、間接エネルギー消費量のうち、耕種農業が直接用いる電力消費量に限り、直接エネルギー消費として取り扱った。

水利施設の建設に必要なエネルギー消費量は、事業完了誌などから入手した建設費データを2011年の実質費用に換算し、前述の耕種農業と同様の手法でエネルギー消費量を求めたのち、各施設の耐用年数で除することにより、年あたりの消費量に換算した。これら水利施設の建設(固定資本形成)は、耕種農業に関する産業連関分析の枠外であるため、そのエネルギー消費量に上乗せするかたちで計上される。

水利施設の運用に必要なエネルギー消費量は、土地改良区連合から取得した電力・化石燃料の消費量データから把握した。このうち、電力は、土地改良区連合が管理する揚水機場9基の運転のほか、庁舎管理や施設の遠隔操作のため消費される。化石燃料は、公用車の燃料のほか、草刈機、水中ポンプや庁舎管理などの雑用途で消費される。これら水利施設の運用は、産業連関分析上は、土地改良区を含む「農業サービス」部門から耕種農業各部門への投入として扱われる。したがって、そのエネルギー消費量は、耕種農業による間接エネルギー消費量の内数として位置付けられる。

研究対象地域の作目構成については、農林水産省や栃木県の統計データから、那須塩原市および大田原市の作目構成を推算し、これが対象地域の構成を代表しているとみなして使用した。

### 3. 結果と考察

#### 3-1. 各作物の生産によるエネルギー消費量

**Fig. 1a**と**Fig. 1b**に、作物ごとの生産(耕種農業)によるエネルギー消費量を、それぞれ生産額100万円あたりおよび作付面積haあたりで示す。

まず、生産額あたりのエネルギー消費量(**Fig. 1a**)をみると、穀物や露地栽培される畑作物の間でばらつきが大きい。これは、生産額あたり消費量が、haあたり生産額の大小(例えば、米:1.06百万円/ha, 麦類:0.28, 豆類:0.25など)を包含した指標であるためである。そこで、haあたりのエネルギー消費量(**Fig. 1b**)に換算し比較すると、飼料作物が最も少なく、次いで豆類, 麦類, 米, いも類の順である。また、生産額あたりの値と異なり、米と麦類が概ね同じレベルである。

次いで、露地野菜、その他耕種作物、果実の順で大きくなる(**Fig. 1b**)。野菜や果実は、穀類などに比べると、化学肥料や農薬等の農業資材の投入が比較的多く、また直接消費者に販売される割合も多いため、販売先までの運搬も比較的長距離に及ぶためではないかと推察される。最後に、エネルギー多消費型の作物として、施設野菜と花き類が突出している(**Fig. 1b**)。これらの作物では、化石燃料の直接消費が大きく(**Fig. 1a**)、主に施設の暖房に使用する燃料であると考えられる。さらに、花き類では、これに加えて電力の直接消費も大きく(**Fig. 1a**)、主に施設内の照明などによる消費であると考えられる。

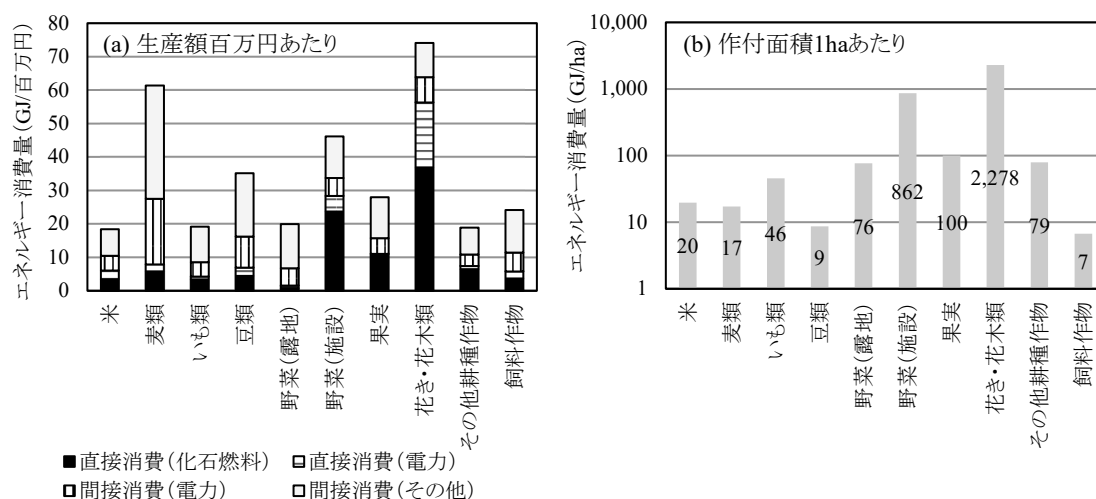


Fig. 1 各作物の生産に要するエネルギー消費量

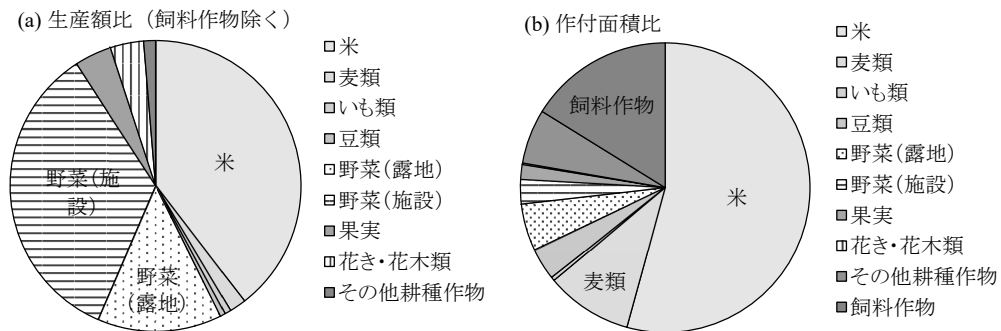
### 3-2. 地域農業の作目構成と LCA のシナリオ

対象地域の耕種農業の作目の生産額比および作付面積比を、それぞれ **Fig. 2a**, **Fig. 2b** に示す。生産額では、米(40%)、施設野菜(34%)、露地野菜(14%)の順でシェアが大きく、これら3品目で88%を占める(**Fig. 2a**)。しかし、野菜や花き類は作付面積あたりの生産額が大きいため、面積比で見ると、米(54%)を筆頭に、麦類や飼料作物のシェアが大きい(**Fig. 2b**)。

次節で論じる地域農業の LCA は、前節で求めた作目ごとの ha あたり環境影響に、地域農業の作目構成(面積比)を重み付け係数とすることにより、「加重平均された農地 1ha」あたりの環境影響を求めるものである。そこで、受益地の作目構成のシナリオとして次の2つを提示する。

シナリオ 1 は、環境影響の突出している施設利用型の作物の寄与をひとまず排除し、受益地の農業が、面積比で過半を占めている「土地利用型」の農業のみからなっているとする単純かつ仮想的なシナリオである。具体的には、国営事業の地目別割合(2.3節)を参照し、田(70%)において「米」が、残りの畑(17%)および輪換耕地(3%)において「飼料作物」が栽培されると仮定する。ここで、畑作物として飼料作物のみを抽出したのは、地域の主要畑作物のひとつであることと、面積あたりではエネルギー消費量が最小である(**Fig. 1b**)ことから、「受益地で想定できる最小のエネルギー消費をとまなう農業の姿」を模擬できると考えたからである。このシナリオは、作物を2種類に絞っていることから、決して地域内で食料を自給自足することを想定するものではないが、土地改良区連合が供給する再生可能エネルギー生産量が、地域農業の「最小限度のエネルギー消費量」をどの程度まかなえるかを検討することに意義があると考え設けた。

シナリオ 2 は、**Fig. 2b** に示す作付面積比で受益地の農業が営まれていると仮定するものである。ここで用いる作付面積比は間接的な推計値なので、必ずしも受益地の作目構成を正確に反映しているとは限らないが、施設野菜や花き類などのエネルギー多消費型農業も含めて、現状の地域農業のエネルギー消費量を、再生可能エネルギーがどの程度まかなえるかを概略検討するためにこのシナリオを設けた。



**Fig. 2** 那須塩原市・大田原市における耕種農業の構成 (推計値)

### 3-3. 地域農業を対象とした LCA

地域農業を対象としたエネルギー収支を検討する前に、再生可能エネルギー施設のみに着目したエネルギー収支を **Fig. 3** に示す。これを示した理由は、当該の小水力発電施設が既存の灌漑排水施設に付加して建設されているため、既存の灌漑排水施設は所与ととらえて、小水力を含む再生可能エネルギー施設の建設・運用に限定した場合に、エネルギー収支が正であることが、再生可能エネルギー事業成立の必要条件であるからである。結果として、再生可能エネルギー施設の建設・運用にかかるライフサイクルエネルギー消費量(建設は耐用年数 20 年で除して年あたりに換算)でみた場合、生産量の約 12 分の 1 であることがわかる。したがって、建設に要したエネルギーは、運転開始後おおむね 2 年弱で元がとれることになる。

次に、受益地全体を対象とした耕種農業のエネルギー収支を **Fig. 4** に示す。ここでは、前述の再生可能エネルギー施設に加えて、ダム・用水路などの水利施設や営農活動が、エネルギー消費側の分析対象に含まれる。まず、エネルギー生産量と水利施設の運用によるエネルギー消費量を比較すると、再生可能エネルギー施設は、消費量の約 12 倍のエネルギーを生産していることがわかる。エネルギー生産量のほとんどは小水力発電であり、扇状地という地形に賦存する水の位置エネルギーが配水などにかかるエネルギーを圧倒していることがわかる。しかしながら、運用にくわえて、水利施設の建設まで勘案すると、エネルギー充足率は 93%である。各施設の耐用年数の 20~80 年で 1 年あたりにならしてもなお、水利施設全体の建設には大量のエネルギー投入が必要であることが示唆される。

最後に、営農活動全般のエネルギー消費量と比較すると、シナリオ 1 では、直接・間接の電力消費量または化石燃料も含めた直接消費量に限れば、再生可能エネルギー生産量で充足されていることがわかる(充足率はそれぞれ 125%, 148%)。しかし、間接の化石燃料消費量等も含めると充足率は 47%に、施設の建設まで含めると 32%となる。

シナリオ2では、電力消費量に限っても充足率は51%にとどまり、営まれる農業の構成によってエネルギー収支は大きな影響を受けることがわかる。また、施設農業での化石燃料の消費が大きいため、化石燃料を含む直接消費量との対比で、充足率がさらに30%にまで低下する。

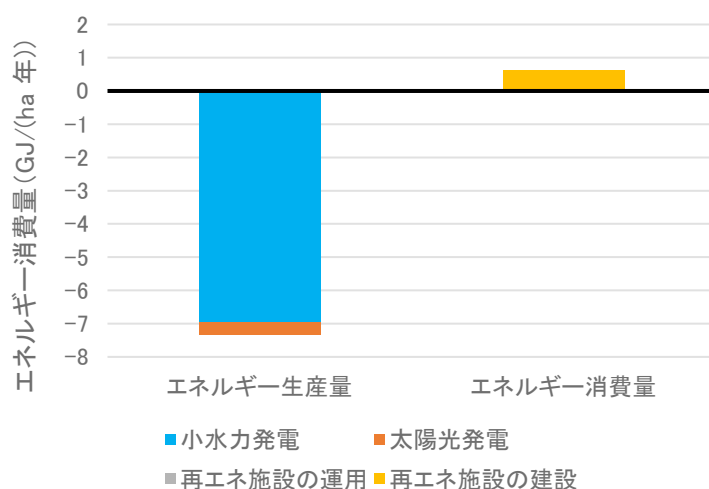


Fig. 3 再生可能エネルギー施設を対象としたエネルギー収支

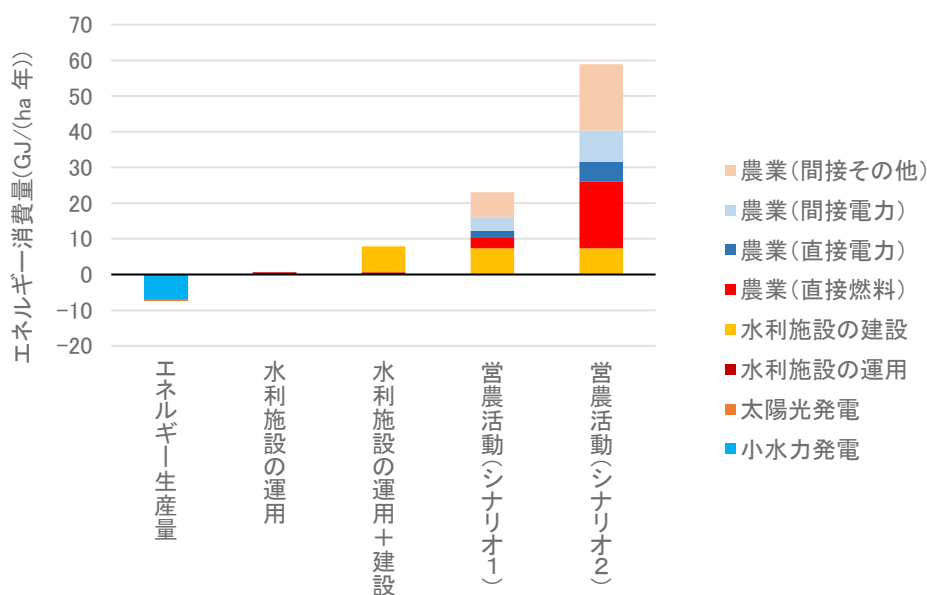


Fig. 4 地域農業を対象としたエネルギー収支

#### 4. おわりに

本研究は、都道府県間産業連関分析に基づくLCAを用いて、水利施設において再生可能エネルギーを生産している扇状地の灌漑農業におけるエネルギー収支について論じた。結果として、第一に、水利施設の運用に限ればエネルギー生産量は消費量の約12倍となること、しかし水利施設の建設段階を含めるとその比率は93%であることがわかった。第二に、営農活動との比較では、受益地で米と飼料作物のみ作付けされると仮定すると(シナリオ1)、エネルギー生産量が電力消費量(直接+間接)または化石燃料を含めた直接消費量を充足し(充足率はそれぞれ125%, 148%), 現状の地

域の作目構成を反映してエネルギー集約的な施設栽培などを含めると(シナリオ 2), 電力消費量の51%を供給できることが明らかとなった。

以上の結果から示唆されることは、第一に、ダムや用水路など営農に必要な水利施設全体の建設が、全体の収支に影響を与えるほど大きなエネルギーを消費することである。本研究では、施設の補修にかかるエネルギーは分析に含めていないが、施設建設にかかる環境影響を削減するには、なるべくエネルギーを消費しないこまめな補修作業を積み重ねることによって、施設の実働年数を伸ばすことが重要ではないかと考えられる。ただし、小水力発電施設を除くダム・用水路等の灌漑排水施設を所与として、再生可能エネルギー施設に限った評価を行うと、明らかに正のエネルギー生産量が得られており、上記の考察は、再生可能エネルギー施設建設の意義を否定するものではない。

第二に、地形条件に恵まれた扇状地においても、エネルギー生産量が、土地利用型農業の直接・間接のエネルギー消費量のおよそ半分しか満たせなかったことから、現代の農業が化石燃料に強く依存していることが示唆された。しかしながら、この地域の農業においては、伝統的には、平地林と農地の複合的な土地利用に基づいた、落葉や薪などの農業・エネルギー資材としての利用が広く営まれていた(犬井, 1988)。したがって、地域の農業がより持続可能性を高めていくためには、このような伝統的な営農の知恵も取り込みながら、化石燃料への依存度を小さくしていく努力が必要と思われる。

第三に、以上述べた限界はあるものの、低平地の大規模農業に比べて、扇状地の灌漑農業は、エネルギー自給という観点からは、より持続可能性が高いことが明らかとなった。同様に、全国各地の水利施設を利用した小水力発電施設も、その大半はいわゆる中山間地域に整備されている。したがって、中山間地域を、分散型の再生可能エネルギーの供給地、ないしはよりエネルギー自立的な農業地域として評価し直すことにより、今後地域の活性化につなげていくことが望まれる。

## 引用文献

- 犬井正(1988):那須野原台地西原における平地林利用の変容, 人文地理, 40(2), 66-81.
- 石川良文, 宮城俊彦(2004):全国都道府県間産業連関表による地域間産業連関構造の分析, 地域学研究, 34(1), 139-152.
- 小林久, 阿部幸浩(2003):農業を対象とした LCA の特殊性と推計手法に関する考察, 農業土木学会誌, 71(12), 1077-1081.
- 南斉規介(2013):2005 年産業連関表に基づく部門別エネルギー消費量および温室効果ガス排出量の推計方法—産業連関表を用いた環境負荷原単位データブック(3EID)— 2013 年 8 月改訂版, 国立環境研究所.
- 丹治肇, 吉田貢士, 蘭嘉宣, 宗村広昭(2003):農業用水におけるライフ・サイクル・アセスメントの検討, 農業土木学会誌, 71(12), 1087-1090.
- Tithipongtrakul, N., 石川良文, 土谷和之, 仲条仁(2017):平成 23 年(2011 年)47 都道府県間産業連関表の作成, 第 28 回環太平洋産業連関分析学会大会抄録集.
- 上田達己, 國光洋二(2018):都道府県間産業連関分析による農業農村整備事業および小水力発電事業の波及効果計測のための WEB アプリケーション, 農研機構研究報告(農村工学研究部門), 2, 81-103.
- 吉田修一郎(2011):低平地水田におけるかんがい排水用エネルギー投入の実態分析, 農業農村工学会論文集, 275, 41-49.