

エコロジカル・フットプリントの海洋食料生産への適用

Application of an ecological footprint index to marine food production

北澤 大輔*

Daisuke KITAZAWA*

東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

摘 要

本稿では、エコロジカル・フットプリント(EF)をわが国のクルマエビ、ブリ養殖事業に適用した。クルマエビ、ブリ養殖事業の各過程のうち、配合飼料の生産、養殖廃棄物の処理、養殖環境の管理のEFを試算した。その結果、クルマエビ、ブリ養殖のEFは、1m²の養殖面積に対してそれぞれ数百倍～数千倍のオーダーとなった。また、配合飼料の生産のEFが支配的であり、これらの傾向は、既存の研究結果とも一致していた。ただし、本稿では、東南アジアのエビ養殖事業で指摘されているように、水田、マングローブ林等でのエビ養殖場の建造に伴う生態系サービスの喪失や、流通過程のEFは考慮されておらず、今後の課題である。試算された値は、養殖事業の持続可能性を直接的に表すものではないが、他の食料生産事業との比較や、周辺環境に負荷の小さい養殖事業の実施検討に有効活用できる。今後の課題として、海洋食料生産の持続可能性を検討するためには、すべての養殖事業、漁業のEFと地球がもつ生産力であるバイオ・キャパシティ(BC)とを比較する必要がある。

キーワード：エコロジカル・フットプリント、サポート・エリア、持続可能性、バイオ・キャパシティ、養殖

Key words : ecological footprint, support area, sustainability, biocapacity, aquaculture

1. はじめに

世界の水産物消費量は年々増加している(図1(a))¹⁾。1961年には約0.27億トンであったが、年々増加し、2007年には約1.1億トンに達した。世界平均の年間水産物消費量は、1961年に約9kg人⁻¹年⁻¹であったのが、2007年には約16.7kg人⁻¹年⁻¹まで増加した(図1(b))¹⁾。ヨーロッパ、アメリカ、アフリカでは、年間の水産物消費量が1980年代まで増加し続けたが、1990年代以降はほぼ横ばいとなっている。一方、アジア、オセアニアでは、現在も年間の水産物消費量が増加し続けている。日本では、年間の水産物消費量が1988年に約72kg人⁻¹年⁻¹まで増加したが、その後減少に転じ、2007年には約61kg人⁻¹年⁻¹となった。

世界の水産物消費量の推移と同様に、水産物生産量も年々増加しているが、その増加分は養殖生産によるものである(図2)²⁾。1980年代までは、海面漁獲量および内水面漁獲量が順調に増加したが、1990年代からはそれぞれ約0.8億トン、約0.1億トンで横ばいとなっている。すなわち、世界の漁獲量は、最近20年間は約0.9億トンでほぼ一定となってい

る。一方、養殖生産量は、1990年代以降急速に増加し、2008年には内水面、海面ともに生産量が約0.34億トンとなった。養殖生産量は、水産物生産量の約4割を占めるようになった。養殖で用いる飼料や可食部のカウント方法など、統計値の正確性については議論の余地があるものの、養殖生産の重要性が増していることは確かである。しかし、養殖生産量が、地球の環境容量に対し、今後どの程度まで増加できるかは明らかではない。

養殖生産法には、粗放養殖法、準集約養殖法、集約養殖法がある³⁾。粗放養殖法は、単位面積、単位体積あたりの生産量が低い生産法であるが、自然の幼生や餌を利用できることや、廃棄物が少量であることなどの利点を有している。すなわち、養殖海域外からの飼料、エネルギーなどの資源投入量が少ない。一方、準集約養殖法や集約養殖法は、単位面積、単位体積あたりの生産量が多い養殖法であるが、稚魚や配合飼料を投入する必要がある。また、浅い海域や池で養殖する場合は、養殖廃棄物の滞留、堆積に起因する赤潮、貧酸素問題が発生するため⁴⁾、酸素供給や廃棄物処理が不可欠である。そのためには、曝気装置や水流発生装置を稼働する必要があり、多

受付：2010年9月29日、受理：2011年1月11日

* 〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1 De-207, e-mail : dkita@iis.u-tokyo.ac.jp

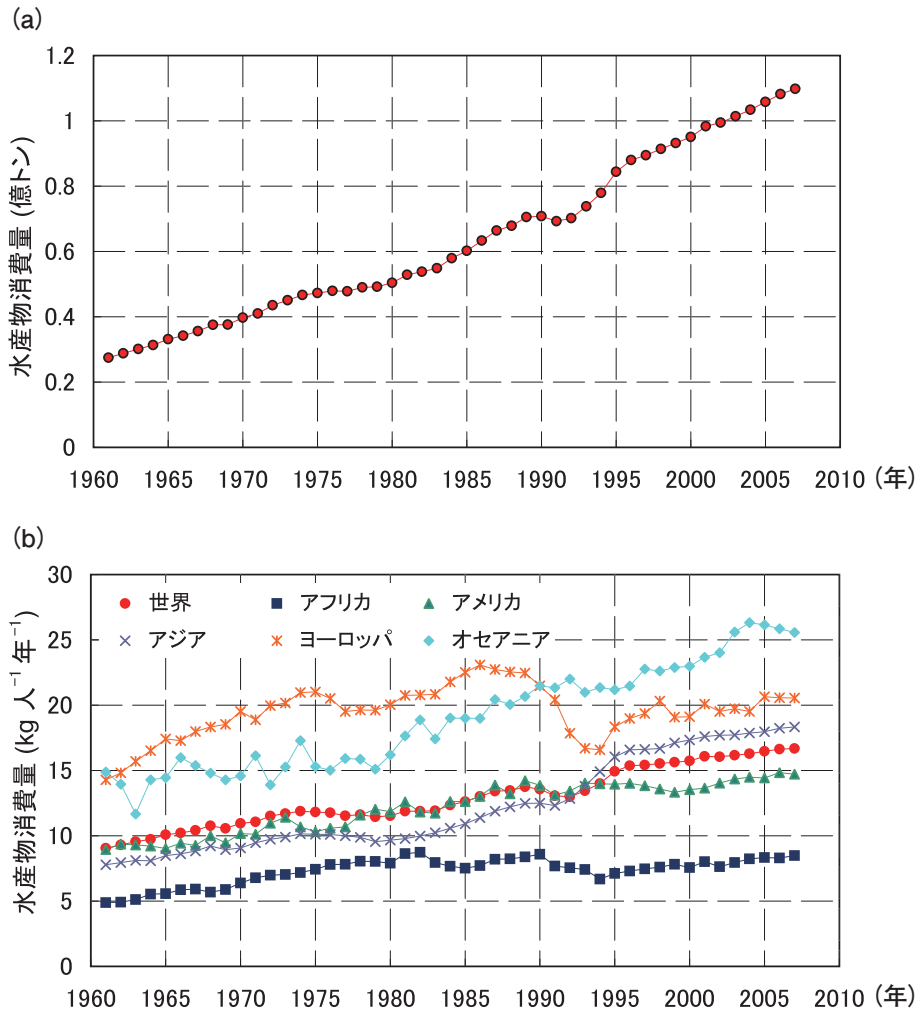


図1 (a) 1961～2007年の世界の水産物消費量の経年変化¹⁾。
 (b) 世界および各地域における1人当たりの年間水産物消費量の経年変化¹⁾。

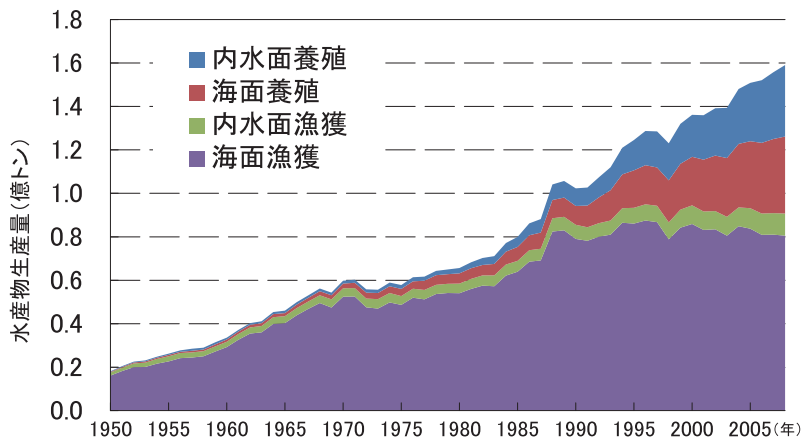


図2 1950～2008年の世界の水産物生産量の経年変化²⁾。

くのエネルギーを要する。ただし、養殖環境の保全のために多くのエネルギーを投入しても、養殖魚の大量死が発生する場合がある。すると、それまで使用されていた養殖海域が放置され、他の海域や水田、マングローブ林などが新たに養殖場として造り替えられることもある⁵⁾。このように、準集約養殖法や集約養殖法は、小さい面積で多くの養殖魚を生産す

る養殖法であるものの、実際には飼料生産や新規養殖場確保のための広大な面積を使用していると言える。地球上の生産性がある土地、海域面積は有限であるため、漁業も含めた海洋食料生産で利用される面積と、生産性がある土地、海域面積を比較することは、海洋食料生産の持続可能性を考える上で一つの目安となる。

表1 養殖事業のエコロジカル・フットプリント(サポート・エリアと実際の養殖場面積との比).
ここでは、日本のクルマエビ養殖以外は、等価係数と呼ばれる係数を乗じる前のエコロジカル・フットプリント(サポート・エリア)の値を示している。

養殖形態	飼料生産	廃棄物処理	環境管理	合計
サケ生簀養殖(スウェーデン) ⁶⁾	40,000 ⁻ 50,000	-	-	40,000 ⁻ 50,000
エビ養殖(コロンビア) ⁷⁾	34~187	-	-	34~187
エビ養殖(アジア) ⁷⁾	-	2~22	-	2~22
クルマエビ養殖(日本) ¹⁴⁾	135	10	17	162
エビ養殖(スリランカ) ⁸⁾	-	-	-	28
ティラピア生簀養殖(ジンバブエ) ⁹⁾	10,000	-	-	10,000
ムール貝養殖(スウェーデン) ¹⁰⁾	20	-	-	20

- : 文献で算出されていない項目

このような背景のもと、養殖事業で実質的に使用される面積の試算がサケ⁶⁾、エビ^{7), 8)}、ティラピア⁹⁾、ムール貝¹⁰⁾等を対象にして行われるようになった。指標としては、飼料生産、廃棄物処理に必要な面積も含めたサポート・エリア(Support Area)が用いられた。また、エコロジカル・フットプリント(Ecological Footprint、以下EF)の概念が提唱されてからは、サポート・エリアはEFに読み替えられた。養殖事業のサポート・エリア、またはEFに関するレビュー¹¹⁾⁻¹³⁾、筆者によるクルマエビ養殖のEFの試算結果^{14), 15)}をまとめると(表1)、生簀養殖(サケ、ティラピア)では、実際的面積の数万倍、池養殖(エビ)では実際的面積の数十~百倍の面積を使用している試算結果となっており、飼料生産に必要な面積の割合が大きくなっている。ただし、各養殖事業のEFは、その養殖事業の持続可能性を示すものではない。実際に、EFの値が大きくても、長期間にわたって持続的に養殖を行っている場合もある。すべての養殖事業や漁業で使用するEFと地球が持つ生産力であるバイオ・キャパシティ(Bio Capacity、以下BC)とを比較することが、海洋食料生産の持続可能性に関する議論を行う上で参考となる。

本稿では、養殖事業の持続可能性評価の第一歩として、わが国のブリの生簀養殖、クルマエビの池養殖のEFを試算し、既存の試算結果と比較する。1m²あたりのブリ、クルマエビ養殖に対し、実質的に使用する面積を試算する。また、EFの試算上の課題、使用法、今後の方針について述べる。

2. エコロジカル・フットプリントの算出手法

2.1 エコロジカル・フットプリント

EFは、ウィリアム・リースとマティース・ワケナゲルによって提唱された概念である^{16), 17)}。限りある資源である土地をベースとした指標であり、土地の経済的側面のみでなく、土地が無償でもたらず気候調節、生物多様性の保護、廃棄物処理、文化的遺

産等の生態学的、社会的な恩恵を評価するものである。資源の消費量や廃棄物の発生量を推計し、人間活動を維持するための自然生産力を算出し、生産力のある土地面積に換算して表現する計算ツールである。この面積と、自然資本が生み出す利息である生物生産力のある土地面積(BC)とを比較することにより、人間活動の持続可能性を議論する。

EFでは、生物生産力のある土地面積を共通の単位とし、耕作地、牧草地、森林地、生産力阻害地、生産力のある海域の生態学的な土地区分を用いる。この区分は、国連食糧農業機関等で用いられているデータの区分が反映されるように決められている。土地区分の面積の単位はhaであるが、各土地区分で生物生産力が異なるため、等価係数と呼ばれる係数を用いて補正し、単位をgha(グローバルヘクタール)とする。等価係数の値は、自然変動によって変化するが、たとえば2003年の値は、主要耕作地が2.21、周辺耕作地が1.79、牧草地が0.49、森林地が1.34、海域が0.36となっている¹⁸⁾。

以上の方法に基づき、地球全体でEF、BCを計算し、1人あたりの値に換算すると、それぞれ約2.2gha人⁻¹、約1.8gha人⁻¹となる。ただし、BCの計算においては、生物生産力のある面積の12%を生物多様性確保のための保護区としている。各事業や各地域のEFを算出することも可能であり、その場合はそれらの環境に対する需要推計をしていることになる。たとえば、日本の1人あたりのEFは約4.4gha人⁻¹である。ただし、EFやBCを国別に比較する場合は、生産力のある土地面積に換算する際に、同じ土地カテゴリー(農地、牧草地、森林地、海洋)の国別生産性を補正するための収量係数を乗じる必要がある。

本稿では、個別の養殖事業を対象としてEFの計算を行うが、サポート・エリアを算出した既存の研究との比較を容易にするため、等価係数や収量係数を乗じる前の値をEFとする。

2.2 養殖事業のエコロジカル・フットプリント

集約的な養殖事業を実施する場合は、さまざまな

資源やエネルギーを投じる必要がある。集約養殖のEFを算出する場合に、考慮すべき項目としては、

- ・ 配合飼料の生産
- ・ 養殖廃棄物の処理
- ・ 養殖環境の管理
- ・ 種苗生産、稚魚生産
- ・ 配合飼料、稚魚、生産物の輸送
- ・ 生産物の梱包
- ・ 養殖場の建設、生簀の製作、設置

が挙げられる。本稿では、これらのうちEFが大きいと考えられる配合飼料の生産、養殖廃棄物の処理、養殖環境の管理を取り上げる。その他の過程で発生する資源消費量、二酸化炭素排出量については考慮せず、今後の課題とする。

2.3 算出手法

図3に示すように、配合飼料の生産では、まず飼料の成分を穀物由来の成分と魚由来の成分に分ける。穀物由来の飼料については、飼料を生産するための農地面積に換算する。ただし、穀物生産に用いる耕作機等の運用に伴う二酸化炭素排出量は無視する。魚由来の飼料については、海洋の魚類生産力との比較により、海域面積を求める。また、飼料とする魚を得るためには漁船漁業が必要となるが、そのための燃料使用量を二酸化炭素排出量に換算し、その二酸化炭素を吸収するための森林面積を求める。配合飼料の生産に用いる面積は、農地面積と海域面積を合計したものである。さらに、養殖廃棄物については、浄化機能をもつ干潟、藻場、酸化池等の面積で表すことが望ましいが、現状のEF計算では、干潟、藻場、酸化池などは、他の沿岸域と同様に生産力のある海域の面積として区分されている。そこで、本稿では、養殖廃棄物が分解され、その結果産出した二酸化炭素、栄養塩を用いたときの一次生産力と、海域の一次生産力を比較することとした。干

潟、藻場、酸化池等の面積への換算は今後の課題とし、その場合は海域の一次生産力を、干潟、藻場の一次生産力と分解能力に置き換える。養殖環境の管理については、曝気装置、水流発生装置等の駆動のための電気使用量から二酸化炭素排出量を求め、その二酸化炭素を吸収するための森林面積を求める。

2.4 算出条件

表2に示すように、集約養殖におけるクルマエビの飼育密度は、数十尾であるが、ここでは生残率も考慮に入れて25尾とした。クルマエビの出荷サイズを20g、成長期間を4ヶ月、生産サイクルを年間2回と仮定すると、稚エビの重量を無視すれば年間の単位面積あたりの生産量は 1 kg m^{-2} となる。一方、ブリ養殖においては、長さ、幅がともに10mで、深さが8mの金網生簀で、生残率を考慮に入れて3,000尾を養殖する場合を想定する。単位面積あたりの飼育密度は30尾となる。ブリの出荷サイズを5kg、生産サイクルを2年間に1回と仮定すると、稚魚の重量を無視すれば年間の単位面積あたりの生産量は75kgとなる。ブリの出荷サイズは、ハマチ等として出荷する場合のように小さい場合も多いが、出荷サイズが小さいと生産サイクルが大きくなり、年間の単位面積あたりの生産量ベースでは大きく変化しないため、ここでは出荷サイズを5kgの場合についてのみ試算するものとした。なお、本稿では 1 m^2 あたりのEFを試算する。

表2 一般的なエビ養殖とブリ養殖の実施形態。

項目	エビ養殖	ブリ養殖
飼育密度(尾 m^{-2})	25	30
出荷サイズ(g)	20	5,000
成長速度(ヶ月)	4	24
生産サイクル(year^{-1})	2	0.5
年間生産量($\text{kg m}^{-2} \text{ year}^{-1}$)	1	75

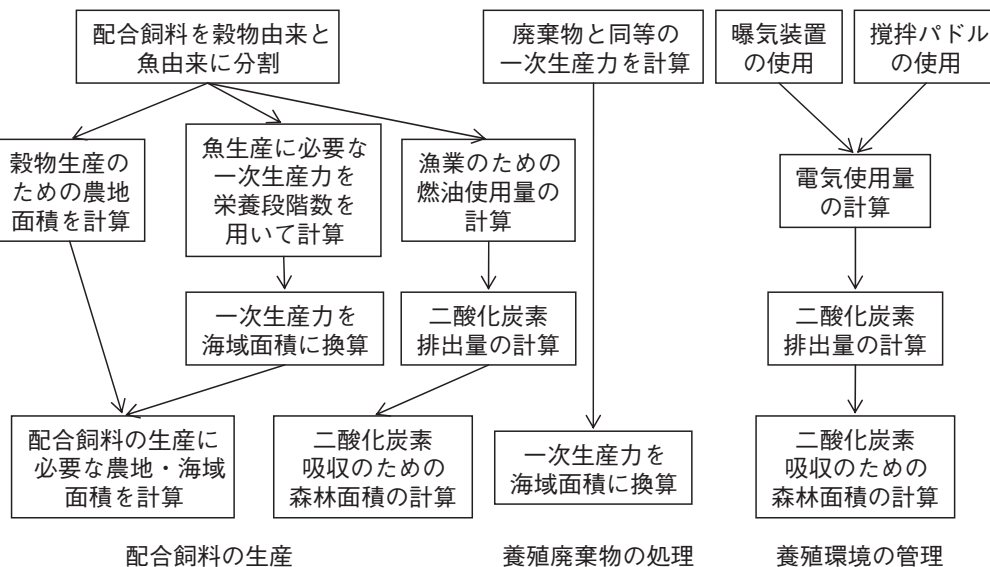


図3 エコロジカル・フットプリント算出のためのフローチャート。

3. エコロジカル・フットプリントの算出結果

3.1 クルマエビ養殖

3.1.1 配合飼料の生産

一般的に、配合飼料は魚粉、魚油、穀物などから構成されている。ここでは、配合飼料の水分を10%とし、魚と穀物に由来する成分をそれぞれ60%、30%と仮定した。1 m²あたりの年間のクルマエビ生産量は1 kgであるため、クルマエビのFCR(Feed Conversion Ratio)を2.0と仮定すると、2 kgの配合飼料が必要となる。水分を10%としたため、配合飼料の乾重量は1.8 kgとなる。クルマエビの水分を74%と仮定すると¹⁹⁾、クルマエビ生産量の乾重量は0.26 kgとなる。クルマエビ生産量の乾重量を与えた配合飼料の乾重量で割ると、クルマエビの成長効率は0.14となり、Kurmalyら²⁰⁾によるクルマエビの成長効率の値0.16とおおむね一致する。

クルマエビの配合飼料のうち、魚に由来する成分は年間1.2 kg必要である。配合飼料の炭素含有率を40%と仮定すると¹⁹⁾、魚に由来する飼料の炭素量は年間0.48 kgC必要である。通常、配合飼料としては、イワシ、イカ、市場価値が低い魚の粉、油、オキアミ等を用いる。飼料となる魚の多くが湧昇域で生産され、その生産力が6.71 gC m⁻²と仮定すると¹⁹⁾、飼料の生産に必要な面積は71.5 m²である。

また、穀物に由来する成分は年間0.6 kg必要である。農地での穀物生産量が年間に乾重量で0.35 kg m⁻²であるとする⁷⁾、配合飼料の生産に必要な面積は1.7 m²となる。

一方、魚に由来する成分である1.2 kg(乾重量)は漁業によりまかなわれる。2006年度のわが国の漁獲量が湿重量で440万トン(水分を75%とすると、乾重量で110万トン)、漁船の二酸化炭素排出量が800万トンとし²¹⁾、これらの間には線形の関係が成り立つと仮定すると、配合飼料を得るための漁業に伴う年間の二酸化炭素排出量は8.7 kgとなる。森林地の二酸化炭素吸収量を0.52 kg m⁻² year⁻¹とすると²²⁾、漁業のEFは16.7 m²となる。

3.1.2 養殖廃棄物の処理

クルマエビ養殖池の排水には、配合飼料のうちクルマエビの成長に利用されなかった86%の成分が含まれる。すなわち、年間の廃棄物量は1.55 kg、炭素含有率を40%とすると619.2 gCとなる。これらの廃棄物が分解されて、再度一次生産に用いられるものと仮定する。沿岸域における一次生産力100 gC m⁻² year⁻¹と比較すると²³⁾、廃棄物の処理に必要な生産力のある海域面積は6.2 m²となる。

3.1.3 養殖環境の管理

クルマエビを集約養殖する場合、溶存酸素濃度を維持し、養殖廃棄物を集積するために、攪拌パドルを用いる。攪拌パドルを駆動するための必要電力量と二酸化炭素排出量を計算する。1,000 m²あたりに

1台の攪拌パドル(1 kW)を設置し、4~8月と9~12月の8ヶ月間(244日間)、24時間駆動するものと仮定する。1台の攪拌パドルから発生する1時間あたりの二酸化炭素排出量は、二酸化炭素排出係数が0.555 kg kWh⁻¹であると仮定して²⁴⁾、0.555 kgとなる。1時間、単位面積あたりの二酸化炭素排出量は0.555 gとなる。攪拌パドルを8ヶ月間(244日間)、24時間連続稼働するものとする、年間の二酸化炭素排出量は3.25 kgとなる。したがって、攪拌パドルの稼働のEFは、森林地の二酸化炭素吸収量を0.52 kg m⁻² year⁻¹とすると、6.3 m²となる。

3.2 ブリ養殖

3.2.1 配合飼料の生産

クルマエビ養殖の配合飼料と同様に、配合飼料の水分を10%とし、魚と穀物に由来する成分をそれぞれ60%、30%とした。1 m²あたりの年間のブリ生産量は75 kgであるため、ブリのFCRを2.0と仮定すると、150 kgの配合飼料が必要となる。水分を10%としたため、配合飼料の乾重量は135 kgとなる。

ブリの配合飼料のうち、魚に由来する成分は年間90 kg必要である。配合飼料の炭素含有率を40%と仮定すると、魚に由来する飼料の炭素量は年間36 kgC必要である。クルマエビ養殖の場合と同様に、湧昇域の魚類生産力を6.71 gC m⁻² year⁻¹とすると、飼料の生産に必要な面積は5365.1 m²である。

一方、穀物に由来する成分は年間45 kg必要である。農地での穀物生産量が年間に乾重量で0.35 kg m⁻²であるとして、配合飼料の生産に必要な面積は128.6 m²となる。

3.2.2 養殖廃棄物の処理

配合飼料のうちブリの成長に利用されなかった86%の成分は、養殖廃棄物となる。養殖廃棄物は、炭素含有率を40%と仮定すると、46.4 kgCとなる。これらの廃棄物が分解されて、再度一次生産に用いられるものとして、沿岸域における一次生産力100 gC m⁻² year⁻¹と比較すると、廃棄物の処理に必要な生産力のある海域面積は464.0 m²となる。

3.3 まとめ

クルマエビ養殖とブリ養殖のEFを表3にまとめる。それぞれの合計は、1 m²の養殖面積に対して102.4 m²、5,957.7 m²となり、表1に示した既存の試算値と比べて、ほぼ同じオーダーである。また、飼料生産のためのEFが圧倒的に大きくなった。EFの値が、養殖事業の持続可能性を直接的に表すものではないが、より周辺環境に負荷の小さい養殖事業を実施するための指標として有効に利用できる。

たとえば、EFを減らすための方法として、池などの浅海域での養殖では、複合養殖への取り組みが始められている。複合養殖は、エビ等と海藻類等を同時に養殖することにより、エビ等の養殖魚からの廃棄物を利用して海藻を育てるとともに、その海藻

表3 エコロジカル・フットプリントの試算結果.

項目	配合飼料の生産	養殖廃棄物の処理	養殖環境の管理	合計
クルマエビ養殖	89.9	6.2	6.3	102.4
ブリ養殖	5,493.7	464.0		5,957.7

を餌等として利用するシステムである。これまでに、サケと海藻の複合養殖やティラピアと野菜の複合養殖によって、EFを減らすことが可能であると試算されている^{25), 26)}。

一方、生簀による養殖では、自家汚染が問題になっている沿岸養殖に対し、自家汚染の懸念が小さいとされる沖合養殖が注目を集めている。沖合養殖では、生簀等の設備費が高くなることや、給餌、収穫等の作業が困難になることなどの欠点もあるが、養殖廃棄物が拡散しやすいこと、酸素が供給されやすいことなどの利点がある。また、養殖魚や生簀への寄生虫、生物の付着が減少することも期待される²⁷⁾。アメリカでは、大型浮沈式生簀や給餌ブイの開発が開始され^{28) - 31)}、日本でも2007年より沖合沈下式養殖の開発が開始された³²⁾。沖合養殖では、現在周辺環境の調査が行われているが、廃棄物による自家汚染ではなく、貧栄養海域の肥沃化による一次生産力の向上が期待される。

4. おわりに

本稿では、日本のクルマエビ養殖とブリ養殖のEFを試算した。その結果、表1で示した既存研究の値とほぼ同じオーダーの値となった。また、配合飼料の生産のEFが大きい傾向も同様であった。ただし、既存研究も含め、養殖池の建造、魚の加工場への輸送や加工場から養殖場への飼料の輸送、また生産物の梱包、輸送等の流通過程で発生する二酸化炭素排出量を考慮に入れていない。最終的には、すべての工程を考慮に入れたEFを試算する必要がある。また、実際には、東南アジアのエビ養殖事業が、マングローブ帯を非持続的に開発することで成立している問題が指摘されており、今後は養殖場の建造に伴う生態系サービスの喪失も考慮する必要がある。さらに、沿岸域の一次生産力や海域の魚類生産力、漁船の燃料使用量など、既存研究より代表的な値を与えているパラメータが多くあるが、各養殖事業の実施方式に合わせてこれらの値の精度を高める努力が必要である。

EFのコンセプト、および算出精度に対しては、各土地カテゴリーがもつ多面的な機能や社会的要素が考慮されないなど、さまざまな批判も展開されてきたが³³⁾、EFの算出手法は少しずつ改良されている³⁴⁾。たとえば、ライフ・サイクル・アセスメントの観点から、EFを直接的な面積の使用と間接的な面積の使用とに分割し、多面的な機能を評価する試

みもなされている³⁵⁾。今後、算出事例が増えることにより問題点が整理され、算出精度が向上するものと期待される。

本稿のEFの値は、持続可能性を示すものではないが、他の食料生産事業と比較するための指標や、周辺環境に負荷の小さい養殖事業を実施するための指標として有効に活用できる。漁業にも適用されているので³⁶⁾、漁業と養殖事業とで、単位生産量あたりのEFを比較することができる。ただし、海洋食料生産の持続可能性を検討するためには、すべての養殖事業や漁業で使用するEFと地球がもつ生産力であるBCとを比較する必要があり、これは今後の課題である。

また、生態リスクやコスト、ベネフィット等の経済的側面も考慮に入れるため、(社)日本船舶海洋工学会IMPACT研究委員会では、EFをベースとして、新たな指標であるTriple I (Ⅲ: Inclusive Impact Index)を開発した³⁷⁾。本指標は、二酸化炭素の海洋隔離³⁸⁾、海洋肥沃化装置³⁹⁾、海上空港⁴⁰⁾、人工海浜⁴¹⁾の評価に適用された。今後も、さまざまな事業に適用される予定である。

謝 辞

本研究の一部は、一般社団法人水産資源・海域環境保全研究会研究助成、および科学研究費補助金基盤研究B(課題番号: 203060389、研究代表者: 多部田茂)により実施された。ここに謝意を表す。

引用文献

- 1) Food and Agriculture Organization of the United Nations (2010) *Global Production Statistics 1950-2008*.
- 2) Food and Agriculture Organization of the United Nations (2010): *Food Supply, Livestock and Fish Primary Equivalent*.
- 3) 多屋勝雄 (2003) アジアのエビ養殖と貿易, 成山堂.
- 4) 古谷 研・岸 道郎・黒倉 寿・柳 哲雄 (2006) 養殖海域の環境収容力, 恒星社厚生閣.
- 5) Ronnback, P., I. Bryceson and N. Kautsky (2002) Coastal aquaculture development in Eastern Africa and the Western Indian Ocean: Prospects and problems for food security and local economies. *Royal Swedish Academy of Sciences*, 31(7-8), 537-542.
- 6) Folke, C. (1988) Energy economy of salmon aquaculture in the Baltic Sea. *Environmental Management*,

- 12(4), 525-537.
- 7) Larsson, J., C. Folke and N. Kautsky(1994) Ecological limitations and appropriation of ecosystem support by shrimp farming in Colombia. *Environmental Management*, 18(5), 663-676.
 - 8) Cattermoul, N. and A. Devendra(2002) A measurement of the ecological footprint of shrimp farming in the Chilaw lagoon area. Final report A-IV. In: P. Wattage ed., *Effective Management for Biodiversity Conservation in Sri Lankan Coastal Wetlands, Final report*. Darwin Initiative, Cemare, University of Portsmouth.
 - 9) Berg, H., P. Michelsen, M. Troell, C. Folke and N. Kautsky(1996) Managing aquaculture for sustainability in tropical Lake Kariba, Zimbabwe. *Ecological Economics*, 18, 141-159.
 - 10) Folke, C. and N. Kautsky(1989) The role of ecosystems for sustainable development of aquaculture. *Ambio*, 18, 234-243.
 - 11) Kautsky, N., H. Berg, C. Folke, A. Jansson and M. Troell(1998) Ecological footprint for assessment of resource use and development limitations in shrimp and tilapia aquaculture. *Aquaculture Research*, 28, 753-766.
 - 12) Folke, C., N. Kautsky, H. Berg, A. Jansson and M. Troell(1997) The ecological footprint concept for sustainable seafood production: A review. *Ecological Applications*, 8(1), S63-S71.
 - 13) Bunting, S. W.(2001) Appropriation of environmental goods and services by aquaculture: a reassessment employing the ecological footprint methodology and implications for horizontal integration. *Aquaculture Research*, 32, 605-609.
 - 14) 北澤大輔(2008) 養殖事業の包括的環境影響評価. 日本船舶海洋工学会論文集, 8, 45-52.
 - 15) 北澤大輔(2009) エビ養殖事業の包括的環境影響評価. 第21回海洋工学シンポジウム, OES21-123 (CD-ROM).
 - 16) ワケナゲル, M., W. リース(2004) エコロジカル・フットプリントー地球環境持続のための実践プランニング・ツール. 合同出版(和田喜彦 監訳・解題, 池田真理 訳).
 - 17) チェンバース, N., C. シモンズ, M. ワケナゲル(2005) エコロジカル・フットプリントの活用ー地球1コ分の暮らしへ. 合同出版(五頭美知 訳, 和田喜彦・岸基史 解説)
 - 18) World Wildlife Fund(2006) *Living Planet Report 2006*.
 - 19) Odum, H. T. and J. E. Arding(1991) *Emergy Analysis of Shrimp Mariculture in Ecuador*, Working Paper, Coastal Resources Center, University of Rhode Island, Narragansett, Rhode Island.
 - 20) Kurmaly, K., A. B. Yule and D. A. Jones(1991) An energy budget for the larvae of *Penaeus monodon* Fabricius. *Aquaculture*, 81, 13-25.
 - 21) (財)省エネルギーセンター(2007) 漁船の省エネルギー推進のてびき.
 - 22) Wackernagel, M., C. Monfreda, D. Moran, S. Goldfinger, D. Deumling and M. Murray(2004) *National Footprint and Biocapacity Accounts 2004: The underlying Calculation Method*. Report of Global Footprint Network, Oakland.
 - 23) Ryther, J.(1969) Photosynthesis and fish production in the sea. *Science*, 166, 72-76.
 - 24) 環境省(2006) 地球温暖化対策の推進に関する法律施行令第三条. 排出係数一覧表, 一号 二酸化炭素, 口: 他人から供給された電気の使用に伴う排出.
 - 25) Troell, M., P. Ronnback, C. Halling, N. Kautsky and A. Buschmann(1999) Ecological engineering in aquaculture: use of seaweeds for removing nutrients from intensive mariculture. *Journal of Applied Phycology*, 11, 89-97.
 - 26) Brummett, R. E.(2000) Integrated aquaculture in sub-saharan Africa. *Environment, Development and Sustainability*, 1, 315-321.
 - 27) Svealv, T. L.(1988) Inshore versus offshore farming. *Aquacultural Engineering*, 7, 279-287.
 - 28) Celikkol, B., J. DeCew, K. Baldwin, S. Boduch, M. Chambers, D. W. Fredricksson, J. Irish, O. Patursson, G. Rice, M. R. Swift, I. Tsukrov and C. A. Turmelle(2006) Engineering overview of the university of New Hampshire's open ocean aquaculture project. *Oceans 2006*, Boston (CD-ROM).
 - 29) Fredriksson, D. W., M. R. Swift, J. D. Irish, I. Tsukrov and B. Celikkol(2003) Fish cage and mooring system dynamics using physical and numerical models with field measurement. *Aquacultural Engineering*, 27, 117-146.
 - 30) Fullerton, B., M. R. Swift, S. Boduch, O. Eroshkin, and G. Rice(2004) Design and analysis of an automated feed-buoy for submerged cages. *Aquacultural Engineering*, 32, 95-111.
 - 31) Turmelle, C. A., M. R. Swift, B. Celikkol, M. Chambers, J. DeCew, D. W. Fredriksson, G. Rice and K. Swanson(2006) Design of a 20-ton capacity finfish aquaculture feeding buoy. *Oceans 2006*, Boston (CD-ROM).
 - 32) 北澤大輔・木下 健・伊藤 翔・角田友将・板倉 博・藤野正俊・鮑 偉光(2008) 沈下式生簀への自動給餌プラットフォームの開発. 第20回海洋工学シンポジウム, OES-48(CD-ROM).
 - 33) Roth, E., H. Rosenthal and P. Burbridge(2000) A discussion of the use of the sustainability index: 'ecological footprint' for aquaculture production. *Aquatic*

- Living Resources*, 13, 461-469.
- 34) Huijbregts, M. A. J., S. Hellweg, R. Frischknecht, K. Hungerbuhler and A. J. Hendriks (2008) Ecological footprint accounting in the life cycle assessment of products. *Ecological Economics*, 64, 798-807.
- 35) Venetoulis, J. and J. Talberth (2008) Refining the ecological footprint. *Environment, Development and Sustainability*, 10, 441-469.
- 36) Newton, K., I. M. Cote, G. M. Pilling, S. Jennings and N. K. Dulvy (2007) Current and future sustainability of island coral reef fisheries. *Current Biology*, 17, 655-658.
- 37) (社)日本船舶海洋工学会 IMPACT 委員会 (2008) 海洋の大規模利用に対する環境影響評価.
- 38) 佐藤 徹・大宮俊孝 (2008) 海洋表層酸性化に対する CO₂ 海洋隔離の Triple I. 日本船舶海洋工学会論文集, 8, 9-16.
- 39) 大塚耕司・大内一之 (2008) 海洋肥沃化装置の包括的環境影響評価. 日本船舶海洋工学会論文集, 8, 17-25.
- 40) 村井基彦・養安明理 (2008) 海上空港に関する包括的環境影響評価. 日本船舶海洋工学会論文集, 8, 27-34.
- 41) 澤田高侑・大塚耕司 (2008) 神戸空港人工海浜の包括的環境影響評価. 日本船舶海洋工学会論文集, 8, 35-43.



北澤 大輔

Daisuke KITAZAWA

東京大学大学院工学系研究科環境海洋工学専攻博士課程修了。数値シミュレーションによる超大型浮体式構造物の環境影響評価の研究を行った。専門分野は海洋生態系工学である。その後、東京大学生産技術研究所の機械・生体系部門において、湖沼や沿岸域を対象とした流動場-生態系結合数値モデルの開発や養殖場の環境調査、数値シミュレーションモデルの開発に携わった。また、海中工学国際研究センターにおいて、沖合沈下式養殖や定置網に関わる漁具、プイの開発を行うとともに、エコロジカル・フットプリントによる養殖事業の環境影響評価の研究に従事し、現在に至る。
