

特集2 複数のアプローチを用いた霞ヶ浦の生態系サービス経済評価の試み

事例研究 CASE STUDY

霞ヶ浦の生態系サービスの享受量の変遷及び代替法による経済評価

北村 立実^{1)*}・松崎 慎一郎²⁾・西 浩司³⁾・松本 俊一¹⁾・久保 雄広²⁾・山野 博哉²⁾・
幸福 智³⁾・菊地 心³⁾・吉村 奈緒子³⁾・福島 武彦¹⁾

1) 茨城県霞ヶ浦環境科学センター 〒300-0023 茨城県土浦市沖宿町 1853

2) 国立環境研究所生物・生態系環境研究センター 〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2

3) いであ株式会社国土環境研究所 〒224-0025 神奈川県横浜市都筑区早瀬 2-2-2

Tatsumi KITAMURA^{1)*}, Shin-ichiro S. MATSUZAKI²⁾, Koji NISHI³⁾, Shun-ichi MATSUMOTO¹⁾, Takahiro KUBO²⁾, Hiroya YAMANO²⁾, Satoshi KOUHUKU³⁾, Kokoro KIKUCHI³⁾, Naoko YOSHIMURA³⁾, Takehiko FUKUSHIMA¹⁾:
Temporal changes in multiple ecosystem services of Lake Kasumigaura and the economic evaluation using a replacement cost method. *Ecol. Civil Eng.* 23(1), 217-234, 2020

1) Ibaraki Kasumigaura Environmental Science Center, 1853, Okijuku, Tsuchiura, Ibaraki 300-0023, Japan

2) Center for Environmental Biology and Ecosystem Studies, National Institute for Environmental Studies, 16-2, Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506, Japan

3) Institute of Environmental Informatics, IDEA Consultants, Inc, 2-2-2 Hayabuchi, Tsuzuki, Yokohama, Kanagawa 224-0025, Japan



Abstract: 多くの人々が霞ヶ浦から多様な恩恵（生態系サービス）を受けていることから、今後も持続的に利用していくために、その内容や享受量の変遷を把握するとともに、生態系サービスの価値を経済的に可視化することで、政策の意思決定や行動に反映させるなどの適切な湖沼・流域管理に結びつける必要がある。そこで、本研究では霞ヶ浦の生態系サービスの項目を整理し、享受量の変遷を把握することで特徴を明らかにするとともに、代替法を用いて生態系サービスの経済評価を試みた。その結果、生態系サービスを供給サービス、調整サービス、文化的サービス、基盤サービスの4つに大別し、生態系サービスのフローの構成として、自然資本、人工資本、人的資本の3種の資本を介して得られていると定義した。また、生態系サービスの享受量の推移の特徴として、取水や洪水調節などの人間活動を豊かにする項目は増加したものの、魚種や植物などの生物多様性や人々が霞ヶ浦と触れ合うような項目が減少したことが明らかとなった。さらに、2016年の霞ヶ浦の生態系サービスの経済的な価値として1,217.3億円/年と見積もられ、供給サービスや調整サービスで高い傾向にあり、文化的サービスや基盤サービスは貨幣換算できない項目が多かった。一方、経済的な価値を算出する上でいくつか課題も明らかとなったことから、今後はこれらの課題解決に向けた研究も必要である。

キーワード: 霞ヶ浦, 生態系サービス, 享受量, 代替法, 経済評価

Key words: Lake Kasumigaura, ecosystem service, Temporal changes, Replacement cost method, economic evaluation

2020年3月3日受付, 2020年6月28日受理

*e-mail: t.m.home@hotmail.co.jp

はじめに

霞ヶ浦流域には約 96 万人が生活し市街地が多く、水田や畑地などの農地も広く分布している。多くの人々は霞ヶ浦から取水し浄水場によって浄化された水を飲んだり、霞ヶ浦から取水した水によって育てられた農作物を食べたり、霞ヶ浦で漁獲されたコイやワカサギ等を食べるなど、霞ヶ浦は多くの水や食料を供給し、その範囲は流域にとどまらない。また、1970 年代に着工し、1995 年に完了した霞ヶ浦総合開発では、霞ヶ浦の周囲を堤防で覆い、常陸川水門で水位を管理することによって、洪水の阻止能力を高める（治水）と共に、水がめ化すること（利水）で人々の生活の安心安全の向上に大きく貢献した。さらに、霞ヶ浦は多様な動植物が生息しており、散策する場や野鳥観察の場、水環境を学習する場になるなど、人々に様々な恩恵を与えている（前田 2012）。

これらの恩恵は生態系サービスと呼ばれ、2005 年に国連ミレニアムエコシステム評価が公表されたことによって、生態系サービスは供給、調整、文化的、基盤サービスの 4 つに分類された（Millennium Ecosystem Assessment 2005）。これらの生態系サービスが人間の厚生に影響を与え、安全や豊かな生活の基本資材、健康、良い社会的な絆、選択と行動の自由を保障するとしている（吉田 2010a）。

生物多様性に基づく生態系サービスを維持していくために公共の政策やプロジェクトを実施することが多いが、政策実施による便益が費用を上回るのかという議論が度々問題になる。そのため、市場経済に馴染まない場合が多い生態系サービスへの支払いが市民生活の中で、その価値を正当に評価されることは重要である（吉田 2010b）。2010 年に名古屋で生物多様性条約締約国会議（COP10）が開催され、「生態系と生物多様性の経済学」（The Economics of Ecosystems and Biodiversity: TEEB）の報告書がとりまとめられ、生態系サービスの価値を経済的に可視化し、意思決定や行動に反映させることの有効性を指摘した（TEEB 2010）。世界の生態系サービスの経済評価として、1997 年に評価した事例では、1995 年 US ドル換算で年間平均 33 兆ドル（その内湖沼・河川は 1.7 兆ドル）と見積もられ（Costanza et al. 1997）、2011 年に同様な手法で面積や金額の変動を考慮すると 2007 年 US ドル換算で年間平均 125 兆ドル（その内湖沼・河川は 2.3 兆ドル）に変化したことを報告している（Costanza et al. 2014）。また、わが国では、湿地に関す

る経済評価として、湿原は年間約 8,391 億円～9,711 億円、干潟は年間約 6,103 億円と評価した事例（環境省 2013a）や、農業や森林の多面的機能を評価した事例（日本学術会議 2001）、水産業及び漁村の多面的機能を評価した事例（日本学術会議 2004）などがある。また、TEEB の現状と課題として、ドイツの例では、国ではある程度生態系の経済評価は進んでいるが、州や自治体レベルでは進んでいないことが報告されている（高橋 2019）。わが国においても生物多様性地域戦略を策定しているのは都道府県で 87% であるが、経済評価を独自に実施したのは 1 県のみであった（遠香・西田 2014；高橋 2019）。環境の経済評価の手法として様々な方法があるが（栗山ほか 2013）、継続的に環境を評価し、政策等の意思決定や行動に反映させていくためには、できるだけ容易にデータを整理し、住民に分かりやすい評価手法を用いる必要がある（新井 2013）。

これまで、地域の包括的な生態系サービスの指標の変遷や湖沼流域における生態系サービスの指標の変遷を検討した事例はあるが（山本・大野 2019；Chen 2017）、個別湖沼の生物多様性や生態系サービスの指標の変遷を検討した事例はなく、それらの指標について経済的な価値を総合的に評価した例はない。霞ヶ浦においても多くの生態系サービスを有していると考えられるが、生態系サービスの項目やその経済的価値が十分に明らかとなっていないことから生態系サービスを維持するための議論ができないのが現状である。また、霞ヶ浦流域面積は茨城県全体の面積の 3 分の 1 を占めており、霞ヶ浦の生態系サービスの県民への寄与は非常に大きい。そのため、茨城県が積極的に経済的な価値を評価し、生態系サービスを維持するための政策に関わることは重要である。さらに、市民生活や経済活動に大きく寄与している霞ヶ浦を評価することから、公益的機能の他に、資本投入によって強化された項目等についても言及して評価し、人々が霞ヶ浦からどのような形で恩恵を受けているかを正確に把握することが、政策を議論する上で重要となる。

そこで、本研究では霞ヶ浦の生態系サービスについて、まずは生態系サービスの項目を整理し、享受量（本研究では各サービス指標の値）の変遷を把握することで特徴を明らかにし、さらに、代替法を用いて生態系サービスの経済評価を試みた。代替法は環境のような非市場財がもたらす便益を、その財と同等な便益をもたらす他の市場財で代替し、それを供給した場合に必要な費用によって計測する手法である。代替法の利点としては、直観的に理解しやすく、一般住民への説明も容易というこ

とや、一定の手法が確立すれば、評価者によらず安定的な計測結果を得ることができることが挙げられている(国土交通省河川局河川環境課 2010)。霞ヶ浦の生態系サービスの享受量の変遷や経済的な価値の評価を今後も継続していくために既存の統計資料等で整理および評価していくことは重要であるため、代替法を用いて可能な限り評価することとした。

評価対象の概要および評価方法

霞ヶ浦は茨城県の南部に位置し、東京から約 50 km と都心から比較的近い(図 1)。湖面積は約 220 km² と日本で 2 番目に広い湖であり、流域は栃木県や千葉県まで広がっている。霞ヶ浦の生態系サービスは湖内や流域、さらに流域外にも及んでいるが、本研究の評価の対象は霞ヶ浦(湖内)のみとし、生態系サービスの項目及び指標については、生物多様性と生態系サービスの総合評価報告書(Japan Biodiversity Outlook2: JBO2)(環境省 2016)で評価されている項目や指標を参考にし、供給・調整・文化的・基盤の 4 つのサービスに分類した。指標に関するデータは既存の統計資料等から実際に市場に流

通しているものについては市場価格で代替した。それ以外の指標については代替となる原単位に物量を乗ずることで算出した。原単位は可能な限り霞ヶ浦流域内で算出されたものを用いるようにしたが、無い場合は流域外(茨城県内、もしくは県外)の数値を参考に決定した。

図 2 に霞ヶ浦の生態系サービスのフローの構成を示した。霞ヶ浦を自然資本とし、各項目がどのようなフローで生態系サービスと関係しているのか、さらにそのサービスによって人間の福利にどう影響しているのかを示した。人間の幸福は自然資本から直接得られるものではなく、人的資本等を介して得られると報告している(Costanza et al. 2014)。さらに人的資本の中には生産、人間、社会、文化、金融など多くの資本が含まれ、それらは潜在的な生態系サービスを創出するための不可欠な要素として、そして、そのサービスの需要を形成する受益者を通じて生態系サービスの流れを実現するために必要な追加資本の形で寄与していると報告されている(Jones et al. 2016)。霞ヶ浦においても水産物を得るために船舶を利用したり、水を利用するために浄水場や配管を設置したりするなど、生態系サービスのフローを生み出すために様々な資本を必要としている。また、地域の

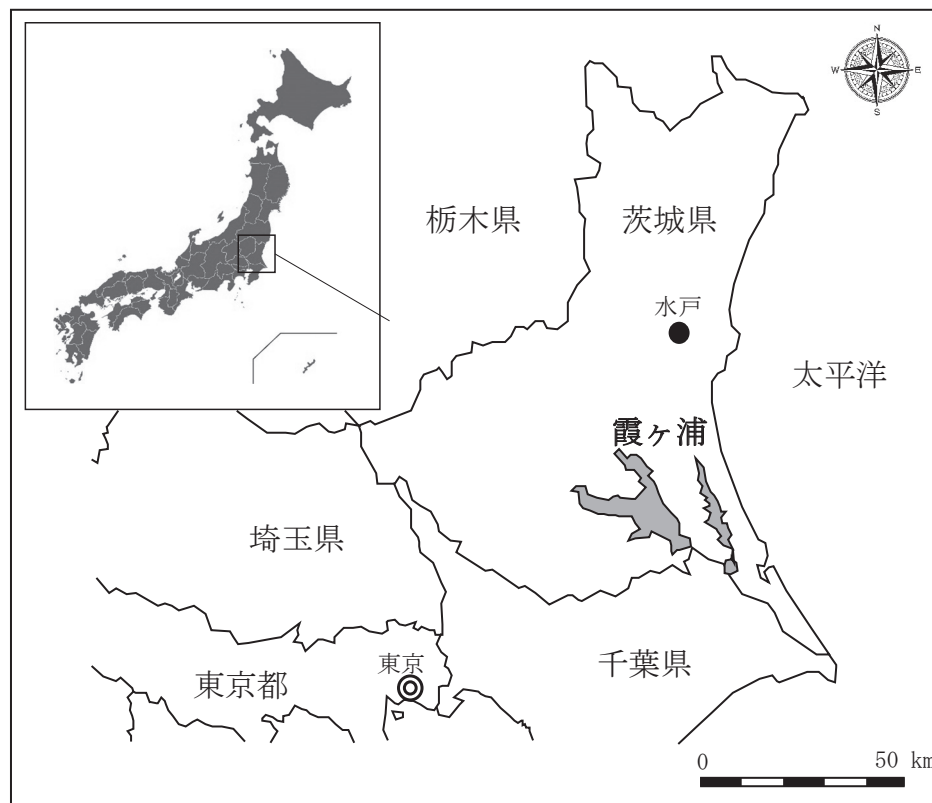


図 1 霞ヶ浦の位置図.

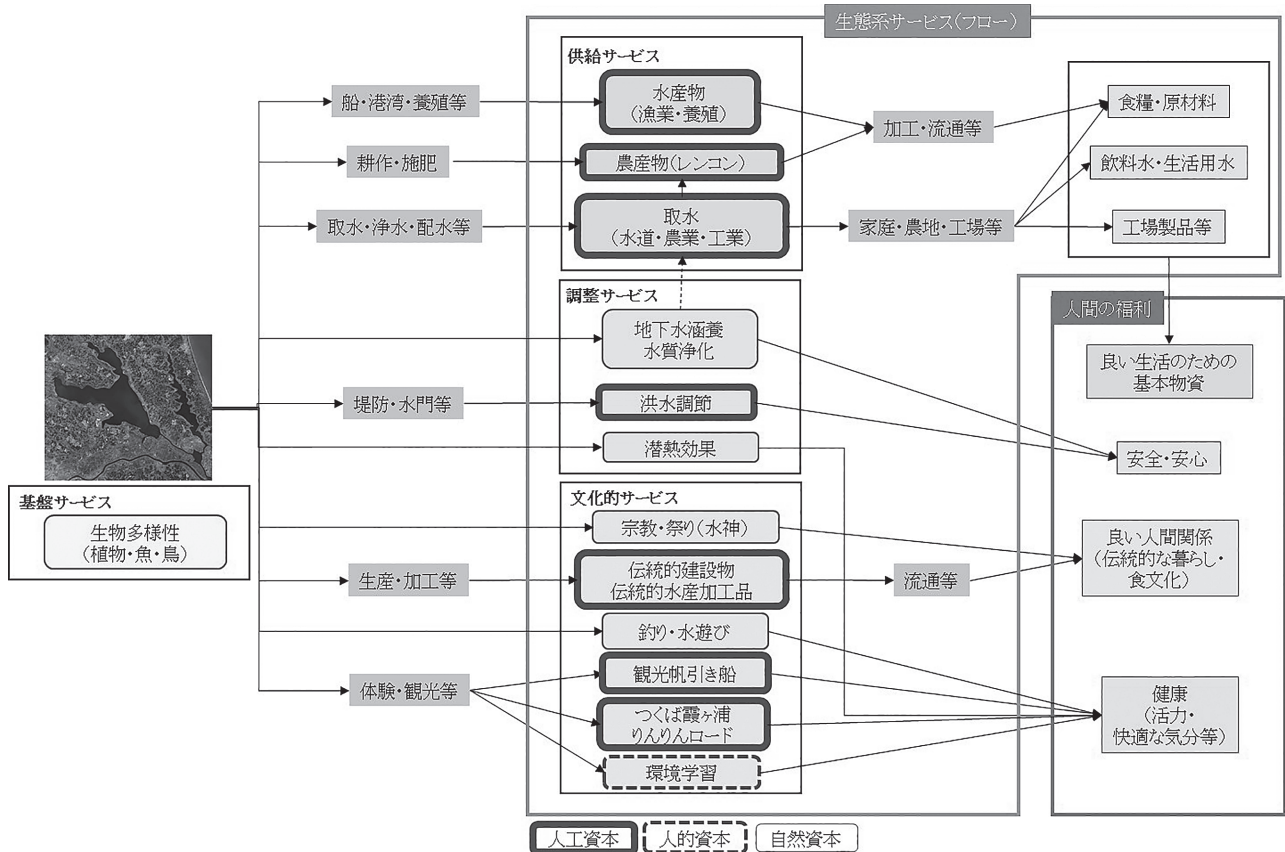


図2 霞ヶ浦の生態系サービスの構成。

社会福祉のレベルを地域の資産と捉え、それらを数値化することで地域の持続可能性を評価した事例では、地域の資産を人工資本、人的資本、自然資本の3つの資本に大別して評価している（若松ほか 2018）。そこで、霞ヶ浦においても生態系サービスを受けるフローがインフラ（構造物等の高額の資本投入）を介して得られる項目を人工資本、人材を介して得られる項目を人的資本、生物や植物等の自然から直接得られる項目を自然資本として位置づけた。一般的に生態系サービスの評価では、自然資本を主な評価対象としているが、本研究では人工構造物によって機能が強化された資本についても評価対象として項目の整理と経済評価を実施した。

また、本研究の評価対象期間として、生態系サービスの享受量については、1945年から2018年のデータを利用し、経済評価については、現在の価値を評価することとし、1996年から2016年のデータから算出した。

〈供給サービス〉

（1）食糧・原材料

水産物（漁業）は漁業・養殖業生産統計年報及び漁業生産額統計（農林水産省関東農政局 http://www.maff.go.jp/kanto/to_jyo/nenpou/index.html, 2017年9月18日確認；国立環境研究所 <http://db.cger.nies.go.jp/gem/inter/GEMS/database/kasumi/>, 2017年9月14日確認）より霞ヶ浦・北浦の内水面漁業生産量および生産額を抽出し、合計することで霞ヶ浦全体の生産量および生産額を算出した。生産量は1965年～2014年まで抽出し、生産額は2006年の金額を抽出した。

また、霞ヶ浦では西浦を中心にコイや淡水真珠など養殖が盛んであることから項目を水産物（養殖）とし、指標を淡水真珠と、コイ・その他魚類とした。水産物（漁業）と同様に、漁業・養殖業生産統計年報及び漁業生産額統計（農林水産省関東農政局 http://www.maff.go.jp/kanto/to_jyo/nenpou/index.html, 2017年9月18日確認；国立環境研究所 <http://db.cger.nies.go.jp/gem/inter/GEMS/database/kasumi/>, 2017年9月14日確認）より霞ヶ浦・北浦の内水面養殖生産量および生産額を抽出し、合計することで霞ヶ浦全体の生産量および生産額を算出した。淡水真珠と、コイ・その他魚類の生産量をそれぞれ1967年～2014年まで抽出し、生産額は淡水真珠と、コイ・その他魚類を足し合わせて養殖生産額として2006

また、霞ヶ浦では西浦を中心にコイや淡水真珠など養殖が盛んであることから項目を水産物（養殖）とし、指標を淡水真珠と、コイ・その他魚類とした。水産物（漁業）と同様に、漁業・養殖業生産統計年報及び漁業生産額統計（農林水産省関東農政局 http://www.maff.go.jp/kanto/to_jyo/nenpou/index.html, 2017年9月18日確認；国立環境研究所 <http://db.cger.nies.go.jp/gem/inter/GEMS/database/kasumi/>, 2017年9月14日確認）より霞ヶ浦・北浦の内水面養殖生産量および生産額を抽出し、合計することで霞ヶ浦全体の生産量および生産額を算出した。淡水真珠と、コイ・その他魚類の生産量をそれぞれ1967年～2014年まで抽出し、生産額は淡水真珠と、コイ・その他魚類を足し合わせて養殖生産額として2006

年の金額を使用した。

さらに、霞ヶ浦湖岸にはハス田が広く分布し、県内の作付面積の約 96% が湖岸の市町村の作付面積となっている（農林水産省 2006）。また、茨城県は全国の出荷量の約 48% を占め、全国第 1 位の出荷量を誇っている（農林水産省 2016）。レンコンは湖内でなく湖の周辺で栽培されているが、栽培環境や水利用など霞ヶ浦の依存が非常に強く、象徴的な作物であることから本研究では霞ヶ浦湖内の生態系サービスとして含めた。レンコンの収穫量は作物統計（農林水産省 http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/sakkyou_yasai/index.html, 2017 年 9 月 18 日確認）より茨城県のレンコン収穫量を 1968 年～2016 年まで抽出した。県内のレンコンの生産地はほぼ霞ヶ浦周辺であることから、生産量は茨城県の統計値をそのまま採用した。レンコンの生産額は 2014 年の東京卸売市場での平均価格 485 円/kg（東京都卸売市場 <http://www.shijou.metro.tokyo.jp/torihiki/>, 2018 年 2 月 12 日確認）を 2014 年の生産量 29,000 t/ 年に乗じて算定した。

(2) 水供給

霞ヶ浦の湖水は農業用水や工業用水、水道用水として利用されている。各種用水の取水量を指標とした。

農業用水量は霞ヶ浦用水による農業揚水量実績を霞ヶ浦用水ホームページから抽出した（水資源機構霞ヶ浦用水管理所 <http://www.water.go.jp/kanto/kasumiy/>, 2017 年 9 月 22 日確認）。霞ヶ浦用水以外にも湖岸には百以上の揚水機場が存在しているが、個々の機場の揚水量は不明であるため、利根川水系利水現況図（茨城県農林水産部農地計画課 1989）で示された霞ヶ浦湖岸のすべての揚水機場の受益面積を 11,084.3 ha とし、既往文献（北村 2010）から単位面積当たりの揚水量 $13,794.5 \text{ m}^3/(\text{ha} \cdot \text{年})$ を算出した。これらに乗ずることで霞ヶ浦湖岸の揚水機場から揚水量 ($152,903,000 \text{ m}^3/ \text{年}$) を算出し、さらに 2014 年の霞ヶ浦用水の農業揚水量 ($42,843,000 \text{ m}^3/ \text{年}$) を足し合わせることで 2014 年の霞ヶ浦からの農業用水量 ($195,746,000 \text{ m}^3/ \text{年}$) とした。農業用水量の推移は霞ヶ浦用水のデータしか存在しないため、このデータの 1988 年～2014 年の推移を検討した。また、資料（農林水産省関東農政局 2015）から霞ヶ浦用水Ⅱ期地区および霞ヶ浦用水Ⅲ期地区の受益面積と年間効果額から単位面積当たりの受益単価 $1,376,808 \text{ 円/ha}$ を算出し、先に算出した単位面積当たりの揚水量から単位水量当たりの便益単価 $99.8 \text{ 円/}\text{m}^3$ を算出した。この原単位に 2014 年の霞ヶ浦用水の農業揚水量を乗ずることで 2014

年の農業用水の経済価値を算出した。

工業用水は霞ヶ浦に係る湖沼水質保全計画の資料（茨城県ほか 2013）から木原、関城分水、新治分水、武井、爪木、鰐川の取水量を抽出してそれぞれ足し合わせることで霞ヶ浦の工業用水量を算出した。工業用水量は 1986 年～2011 年の 5 年毎のデータを抽出した。また、鹿島工業用水道事業と県南西広域工業用水道事業の水道の基本料金（茨城県企業局 2011a）の平均から原単位を $45 \text{ 円/}\text{m}^3$ を算出した。この原単位に 2011 年の霞ヶ浦の工業用水量を乗ずることで 2011 年の工業用水の経済価値を算出した。

水道用水は霞ヶ浦に係る湖沼水質保全計画の資料（茨城県ほか 2013）から木原、関城分水、新治分水、爪木、鰐川の取水量を抽出してそれぞれ足し合わせることで霞ヶ浦の水道用水量を算出した。水道用水量は 1986 年～2011 年の 5 年毎のデータを抽出した。県南広域水道用水供給事業と県西広域水道用水供給事業の使用料金（茨城県企業局 2011b）を平均して $53 \text{ 円/}\text{m}^3$ を算出した。さらに、飲料用水の場合、活性炭などの他の資本投入の影響を受けていることからその影響を控除した。上水 6 施設で用いられている活性炭の年間額原単位は $11.1 \text{ 円/}\text{m}^3$ であったことから、水道使用料金 ($53 \text{ 円/}\text{m}^3$) から活性炭の利用額を差し引いて $41.9 \text{ 円/}\text{m}^3$ とした。この原単位に 2011 年の霞ヶ浦の水道用水量を乗ずることで 2011 年の水道用水の経済価値を算出した。

〈調整サービス〉

(1) 水の調整

湖沼には降水を地下へと浸透させるなどして緩やかに流下させる機能があるため、その一部である地下水涵養を評価した。地下水涵養量は既往資料（国土交通省 2010）に示された以下の式を用いて算出した。

$$G = P - ET - R_{surf} - R_{sub}$$

$$ET = a_1 \exp(b_1 i p T)$$

$$R_{surf} = a_2 \exp[b_2 (1 - i)]$$

$$R_{sub} = a_3 (i\beta)^{-b_3}$$

ここで、 G ：地下水涵養量 (mm/ 年)、 P ：降水量 (mm/ 年)、 ET ：蒸発散量 (mm/ 年)、 R_{surf} ：表面流出量 (mm/ 年)、 R_{sub} ：中間流出量 (mm/ 年)、 T ：年平均気温 (摂氏)、 i ：浸透面積率、 β ：斜面の垂直距離に対する水平距離 (m) であり、また a 、 b は表層土壌の飽和透水係数に応じた係数である。 T および P については国土数値情報（国土交通省国土政策局 <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>, 2017 年 9 月 12 日確認）から 2012 年の平年値メッシュデータを取得した。 i は資料（高木ほか 2001）

から土地利用毎の値を取得し、本分析の土地利用（国土数値情報の土地利用細分メッシュ：1976年，2014年）に合わせて設定した。 β は国土数値情報の標高5次メッシュより平均傾斜を取得し算出した。表層土壌の飽和透水係数に関しては，資料（環境省 2013b）に記載の土地分類基本調査の土壌図の大分類毎にGeoNetworkのSoil Map of the WorldとNatural Resources Conservation Service (NRCS)のSoil Texture Calculatorを用いて土質を設定して，資料（FAO 1998）より算出した透水係数を用いた。その結果，地下水涵養量は1976年と2014年の2か年で推移を検討した。また，資料（林野庁 2010）より開発水量あたりの利水ダム年間減価償却費52.6円/($\text{m}^3 \cdot \text{年}$)に2014年の地下水涵養量を乗ずることで2014年の地下水涵養の経済価値を算出した。

また，湖沼においては底泥中のバクテリアの働きにより硝酸の酸素を利用し，窒素を大気中に放出する脱窒現象が生じる。これは，窒素を除去する作用があることから水質浄化機能として知られている（中島・相崎 1981）。ここでは，底泥の脱窒量を水質浄化の指標とした。また，ヨシについても同様な水質浄化機能があることが知られていることから（左子 2010），霞ヶ浦におけるヨシの脱窒量も水質浄化としてあわせて評価した。まず，文献（北村ほか 2018）より2010年の西浦底泥の脱窒量は638 kg/日，北浦底泥の脱窒量は325 kg/日となっている。これを年間値に換算し西浦と北浦を足し合わせることで，2010年の霞ヶ浦底泥の脱窒量とした。また，霞ヶ浦におけるヨシ群落の面積を，2016年度の河川水辺の国勢調査（いであ株式会社 2017a）からヨシ群落面積（堤防敷を除く）58.19 haを求め，これに文献（田畑ほか 1996）から得たヨシ群落の（4月～12月）平均水質浄化能67.8 mg/($\text{m}^2 \cdot \text{日}$)をかけ年間値に換算することで2016年のヨシ群落による脱窒量とした。ただし，底泥，ヨシ群落ともに単年度のデータのみで脱窒量の推移は検討できなかった。また，資料（関東経済産業局 2008）より東京湾に立地する下水処理場（浄化施設）について年間84.2 tの窒素を処理するコストとして，建設費及び維持管理費の合計で9億9,460万円を要すると試算されたことから1 tあたりの処理費用は1,181 万円/($\text{t} \cdot \text{年}$)となった。これに底泥とヨシ群落の脱窒量をそれぞれ乗ずることで2010年の底泥の脱窒による経済評価と2016年のヨシの浄化による経済価値を算出した。

(2) 気候の調整

水の蒸発は気温を低下させる（潜熱効果）ことから，湖沼は気候を調節する機能がある。ここでは，蒸発散量

を潜熱効果の代替の指標とすることで，霞ヶ浦の気候調節機能を評価した。また，1976年と2014年の2か年で機能の変化について整理した。気候調節機能の経済価値については，適切な原単位がないため実施しなかった。蒸発散量の計算には文献（藤田ほか 2006）の蒸発散可能エネルギーを用いた。なお，水面からの蒸発散の計算に水温ではなく気温を用いて計算しているため，今回は気温に基づく水域の蒸発散量を推定した。

$$\sum_{i=1}^{12} ET_{(0,i)} = 13.97 d_i D_i^2 W_i$$

$$W_i = 4.95 \exp(0.062 T_i) / 100$$

ここで， ET_0 は月間の蒸発散可能エネルギー， i は月， d は各月の日数， D は各月平均での日照時間（12時間を1とした）， W は飽和蒸気密度（ g/m^3 ）， T は月平均気温（ $^{\circ}\text{C}$ ）である。 D については，簡略化のために国土数値情報から2012年度の平年値メッシュデータを取得し，この日照時間を用いた。気温は2012年度の年平均値を採用した。計算対象は，国土数値情報の土地利用細分メッシュ（1976年，2014年）を再分類し，「河川地および湖沼」の土地利用区分を抽出して算出した。その結果，蒸発散量は1976年と2014年の2か年で推移を検討した。経済価値については適切な原単位がないため評価できなかった。

(3) 自然災害の防護

霞ヶ浦は1950年代まで洪水に悩まされていたが（前田 2012），1971年に霞ヶ浦開発事業によって堤防整備や常陸川水門の設置等の工事が着工し，1995年に完了，1996年から水位管理の運用が開始された。これによって流域からの流入水をさらに貯留することが可能となり洪水調節機能を強化した。そこで，堤防整備前と後の治水容量を検討することで洪水調節機能を評価することとした。まず，堤防整備後（1996年以降）は常時満水位（平水位）Y.P. 1.30 m，洪水時満水位 Y.P. 2.85 mと設定され，洪水時の治水容量〔夏季制限期間（6月1日～7月31日）以外の期間〕として3億3,900万 m^3 が割り当てられた（水資源機構 1995）。Y.P.とは利根川水系の水位基準面である。一方，堤防整備前（1945年～1958年）について，霞ヶ浦の水位は，西浦の湖心に近い井上水位観測所で平水位 Y.P. 1.06 m，最高水位 Y.P. 2.38 mという記録が残っていた（茨城県総合開発事務局 1961）。最高水位は9月，10月の台風通過によって観測された値であったことから，平水位から最高水位までを治水に関する水位とした。よって，堤防整備前の治水容量は，堤防整備後の水位差（1.55 m）と治水容量（3億3,900万 m^3 ）の関係から水位差1 m当たりの治水容量を算出

し、堤防整備前の水位差（1.32 m）を乗ずることで算出した。経済評価は多目的ダムの建設費及び維持管理費から代替した。2012年度ダム建設事業費（コンクリートタイプダム、フィルタイプダム）のうち、河川総合開発事業及び治水ダム建設事業の有効貯水量の事業費（一般社団法人日本ダム協会 2013）の平均値を計算した結果、多目的ダムの建設費は154円/（ $\text{m}^3 \cdot \text{年}$ ）、維持管理費43.7円/（ $\text{m}^3 \cdot \text{年}$ ）となり、合計で197.7円/（ $\text{m}^3 \cdot \text{年}$ ）となった。これに現在（1996年以降）の治水容量を乗ずることで洪水調節の経済価値を算出した。

〈文化的サービス〉

（1）宗教・祭り

生態系は農作物の豊穡や水産物の大漁をもたらし、また、雷や嵐などの自然災害を起こすなどして、人々に形而上的な神の存在を想起させ、宗教的・精神的な影響を与えてきた。ここでは、人々が思い描く地域の神様を指標として、宗教・祭りを評価した。資料（鳥越 2005）より霞ヶ浦湖畔の水神石祠数が57箇所あると報告している。しかし、経済価値については適切な原単位がないため算出できなかった。

（2）教育

自然は生態学や生物学に関する学習や研究の機会を与えるのみならず、水との触れ合いなどを通じて、学問以外の知恵や生活に資する知識を習得する機会を提供する。このような機会はとりわけ子どもの成長過程において重要であり、それゆえ霞ヶ浦を利用した体験学習、霞ヶ浦を題材とした霞ヶ浦環境科学センター事業の環境学習教室等の参加者数を指標として評価した。霞ヶ浦を利用した船上での体験学習〔湖上体験スクール（2008年～2016）、湖上実践セミナー（2005年～2010年）〕、霞ヶ浦水辺での体験学習〔霞ヶ浦野外講座（2005年～2013年）、霞ヶ浦自然観察会、水辺ふれあい事業〕、霞ヶ浦を題材とした室内での環境学習〔霞ヶ浦出前講座、霞ヶ浦環境科学センター研修室での学習、霞ヶ浦入門講座（2005年～2013年）、霞ヶ浦学講座（2014年～2016）〕として集計し、それらを足し合わせることで環境学習教室等の参加者数を算出した。参加者数の推移として、センターが開館した2005年から2016年にかけての参加者数を抽出した。経済評価は、環境学習はすべて参加費が無料であるが、茨城県森林湖沼環境税を活用して実施しているため、平成28年度（2016年）森林湖沼環境税活用事業の実績に関する資料（茨城県 https://www.pref.ibaraki.jp/nourinsuisan/rinsei/shinkozei/forest/perform/file/H28sinkozei_jisseki.pdf, 2020年5月12日確認）より県民参

加水質保全活動推進事業の実績額を使用した。

（3）景観、観光・レクリエーション

風光明媚な自然や広大な水面、多様な動植物は、観光やレクリエーションの機会を提供する。ここでは、霞ヶ浦水辺の利用者数（釣り利用者数および水遊び人数）、帆引き船を見学するための観光帆引き船利用者数、サイクリングするためのつくば霞ヶ浦りんりんロードの利用者数を指標として評価した。資料（水資源機構 2016）より、水辺での釣り利用者数、水遊び人数をそれぞれ抽出した。また、観光帆引き船利用者数はかすみがうら市と行方市から2001年から2015年までの年間乗船者数入手した。つくば霞ヶ浦りんりんロードの利用者数は資料（国土交通省 <http://www.mlit.go.jp/road/bicycleuse/good-cycle-japan/about/>, 2019年11月18日確認）より2015年～2018年の利用者数を抽出した。経済評価は水辺の利用者数やつくば霞ヶ浦りんりんロードは適切な原単位がないため評価できなかったが、観光帆引き船の利用については一人あたりの乗船料が大人2,000円（かすみがうら市、行方市、2017年現在）であったことから、これに2015年の利用者数を乗ずることで観光帆引き船の経済価値を算出した。

（4）伝統芸能・伝統工芸

地域を特徴づける生態系は、その地特有の儀式や製品を生み出す源となり、伝統芸能や伝統工芸を発達させてきた。霞ヶ浦周辺で伝統的な原料としては、湖岸の妙岐ノ鼻地区のヨシ・カモノハシ群落（ヨシの下層にカモノハシが成育する群落）が高級屋根材の原料として有名である。生産量が明らかではないため、妙岐の鼻地区のヨシ・カモノハシ群落面積という指標を用いて評価した。妙岐の鼻地区のヨシ・カモノハシ群落の面積は資料（いであ株式会社 2017b）より1996年～2016年の面積を抽出した。経済評価は文献（前田ほか 2003）より、面積当たりの生産量は100 m^2 /haとし、茅購入単価は輸送費を含まない2地区の平均値から2900円/ m^2 とした。これらに2016年のヨシ・カモノハシ群落の面積を乗ずることで伝統的建造物の経済価値を算出した。

さらに、霞ヶ浦の名産として製造されている伝統的水産加工品（霞ヶ浦の水産物を用いた佃煮や煮干し、焼き物）の生産量を指標とした。まず、資料（茨城県霞ヶ浦北浦水産事務所 <http://www.pref.ibaraki.jp/nourinsuisan/kasui/shinko/kasumigaurakitaurosuisan.html>, 2018年2月15日確認）より佃煮や煮干し、焼き物のその他を除くすべての種類の生産量を合計した。その合計に対して100%から県外や海外の移入原料の割合を差し引いた県

内産の占める割合を乗じることで霞ヶ浦の生産量とした。2001年から2014年のデータを抽出した。経済評価についても同様な資料から生産額を合計し同様な計算をすることで2014年の生産額を算出した。

〈基盤サービス〉

(1) 生物多様性

基盤サービスはこれまで記述した供給サービス、調整サービス、文化的サービスを支える重要なサービスである。生物多様性は霞ヶ浦の漁獲や水質浄化、釣りや水遊びの親水など幅広いサービスを提供する基となっている。そこで純淡水魚類の種数と水生植物（抽水植物、浮葉植物、沈水植物）の分布面積、鳥類の種数を指標とした。文献値から魚類種（Matsuzaki et al. 2016；松崎ほか2016）は1950年代～2000年代、水生植物（Nishihiro et

al. 2014）は1972年～2002年、鳥類（環境省 http://www.biodic.go.jp/gankamo/gankamo_top.html, 2019年10月12日確認；環境省自然環境局 2016）はカモの種数として1996年～2015年のデータを抽出した。生物多様性は市場で取引されないため経済価値を検討することができなかった。

結果および考察

(1) 各指標の推移

供給サービスについて、内水面漁業生産量は1970年代後半をピークとしてその後急速に落ちこんでいた（図3）。これは、水質汚濁（北畠・青木 1981）、外来魚（アメリカナマズ等）による食害（春日 2001）、植生帯の衰

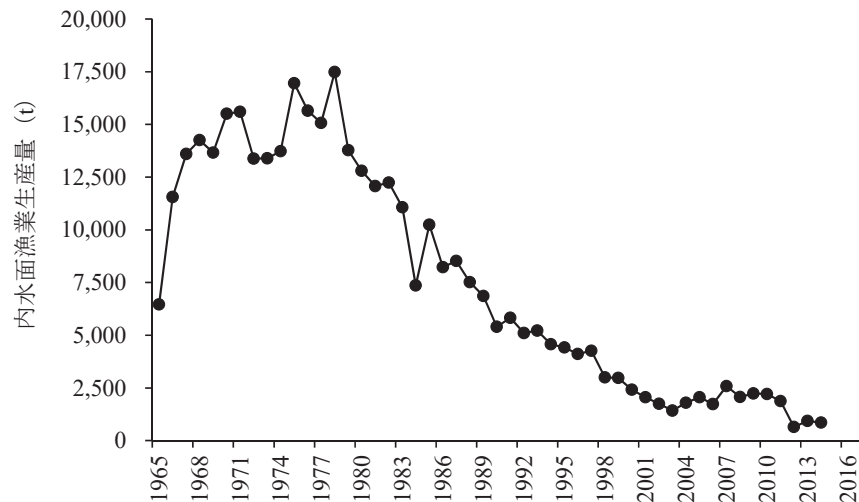


図3 内水面漁業生産量の推移。

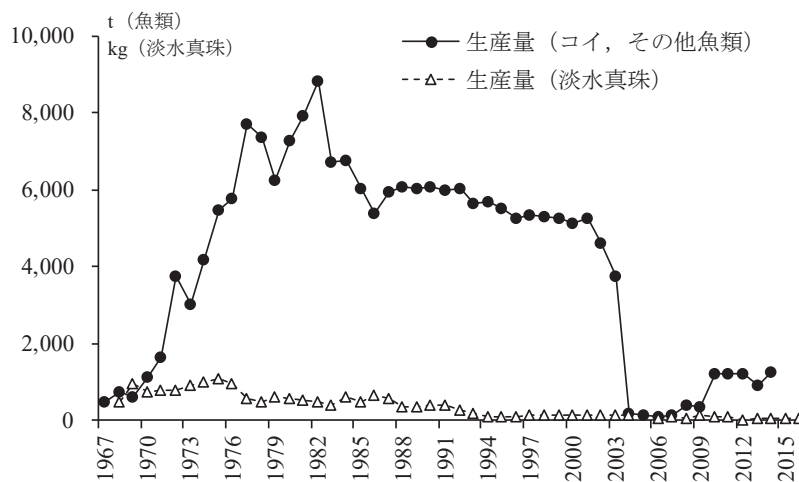


図4 養殖の生産量の推移。

退（碓井ほか 2014）、漁業者の減少（茨城県霞ヶ浦北浦水産事務所 <http://www.prefibaraki.jp/nourinsuisan/kasui/shinko/kasumigaurakitaurosuisan.html>, 2018 年 2 月 15 日確認）などが影響していると考えられた。また、淡水真珠の収穫量は 1970 年代、コイ、その他魚類の収穫量は 1980 年代に最も多かったが、その後両方とも減少した（図 4）。特にコイ、その他魚類については 2003 年にコイヘルペスが発生し、コイの生産を中止したため大きく減少した。レンコンの生産量は 1968 年より増加傾向にあり、1980 年に一旦減少したものの、その後は再び増加した（図 5）。農業用水は霞ヶ浦用水のみになるが、長期的に増加、工業用水や水道用水も 1986 年から長期的に増加した（図 6）。これは、1970 年代から流域にお

ける人口増加や生活様式の多様化、産業活動の進展などに伴い、水の需要が増加したことによって各種用水量が増加したと考えられた。

調整サービスについて、地下水涵養量は、1976 年は $72,350,000 \text{ m}^3/\text{年}$ 、2014 年は $71,600,000 \text{ m}^3/\text{年}$ と、ほぼ横ばいであった。蒸発散量についても 1976 年は $1,578,000 \text{ m}^3/\text{年}$ 、2014 年は $1,567,000 \text{ m}^3/\text{年}$ とほぼ横ばいで推移した。治水容量は、1945 年～1958 年は 2 億 $8,900 \text{ 万 m}^3$ であったが、堤防整備や常陸川水門の設置等により、1996 年以降は 3 億 $3,900 \text{ 万 m}^3$ となり、 $5,000 \text{ 万 m}^3$ 増加した。

文化的サービスについて、霞ヶ浦環境科学センター主催の環境学習の参加者数は 2005 年に 7,021 人であった

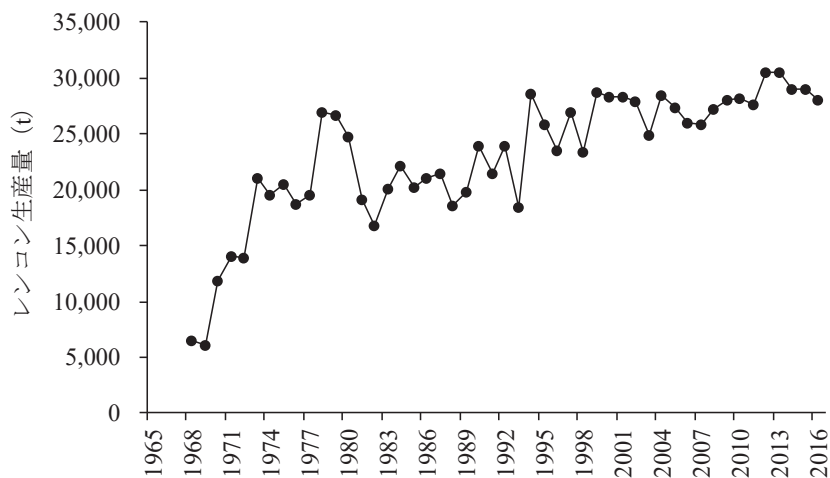


図 5 レンコン生産量の推移.

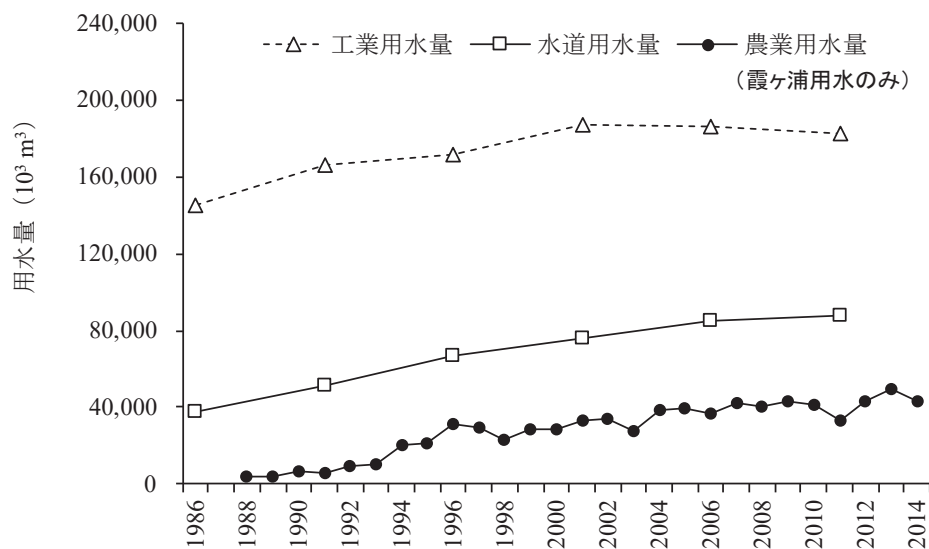


図 6 各種用水量の推移.

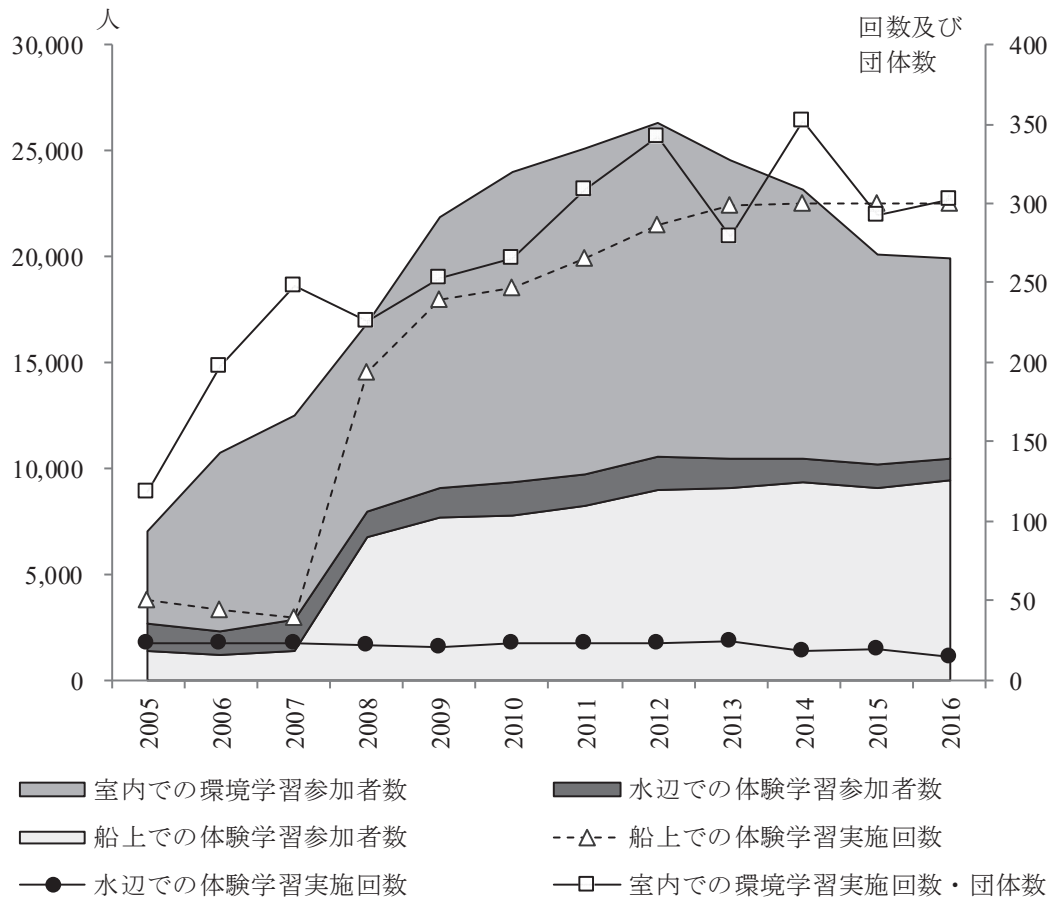


図7 環境学習実施回数及び参加者の推移.

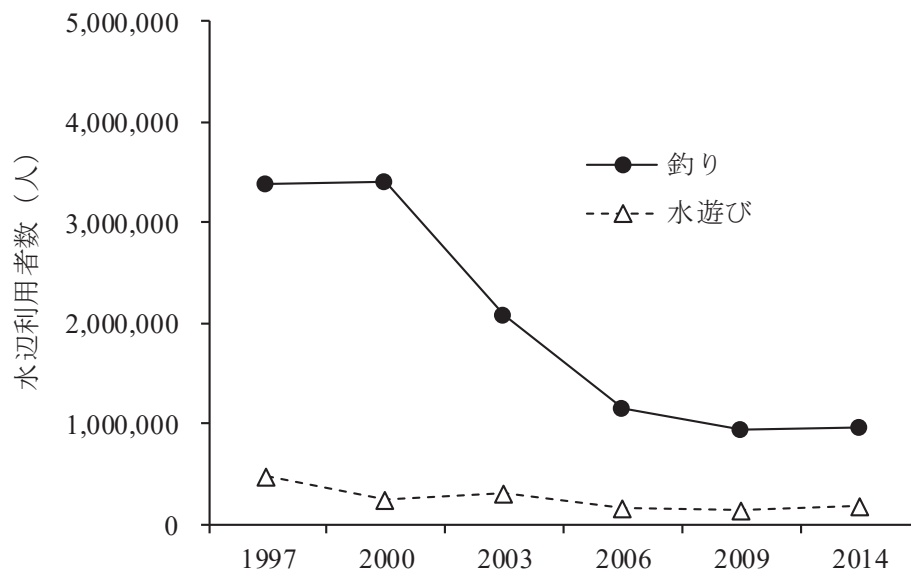


図8 水辺利用者数の推移.

のが、2016年には19,938人に増加した（図7）。内訳をみると、船上での体験学習については、参加人数が湖上体験スクール開始後増加していた。水辺での体験学習は実施回数が減少していたことから、参加者数もやや減少していた。室内での環境学習については、2012年度以降参加者が減少していたが、回数は横ばいであったことから1回の参加者が少なかったと考えられた。レクリエーション利用者の釣り利用者数、水遊び人数は1997年の調査開始時から共に減少しており、特に釣り利用者が多く減少していた（図8）。また、観光帆引き船の利用者数は、近年は横ばいで推移しているが、2001年当初

の600人から比較すると2015年は1,591人に増加した（図9）。つくば霞ヶ浦りんりんロードの利用者数は2015年約39,000人から2018年81,000人と増加した（図10）。妙岐ノ鼻地区のヨシ・カモノハシ群落の面積は1996年の調査開始時の32haより2016年は19haと減少した（図11）。佃煮や煮干し、焼き物の生産量は2001年に342tであったが、増加と減少を繰り返し、2014年は182tに減少した（図12）。

基盤サービスについて、純淡水魚類種は1970年代以降、16種から12種まで減少し、ゼニタナゴやホトケドジョウなどが確認されなくなった（図13）。また、抽水

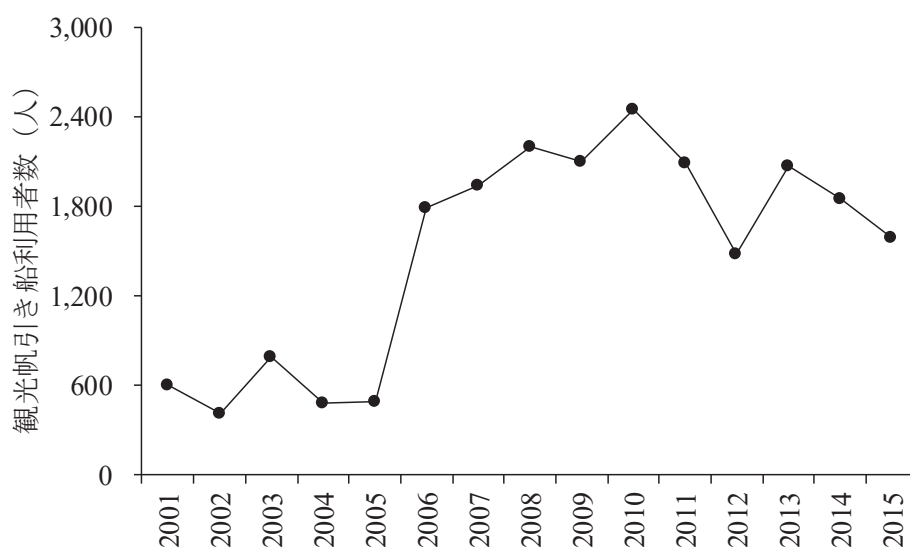


図9 観光帆引き船利用者数の推移。

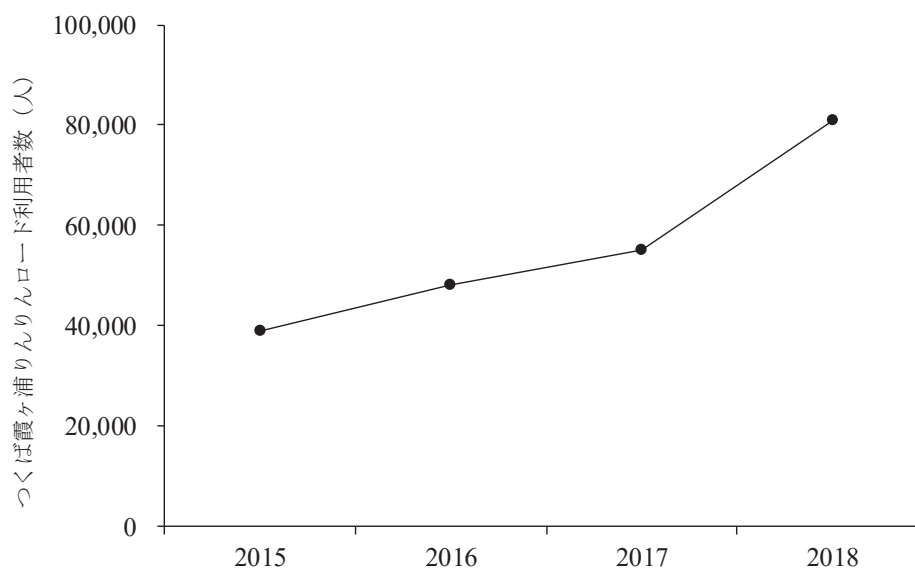


図10 つくば霞ヶ浦りんりんロード利用者数の推移。

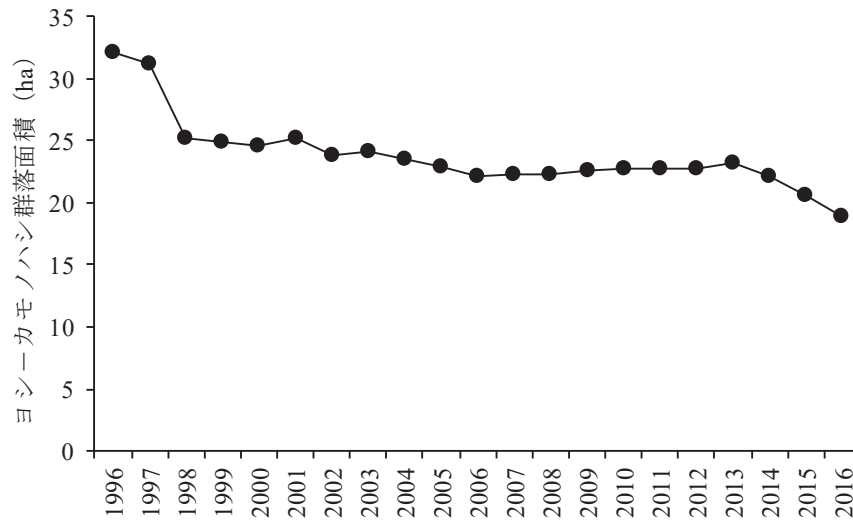


図 11 妙岐の鼻地区におけるヨシーカモノハシ群落面積の推移.

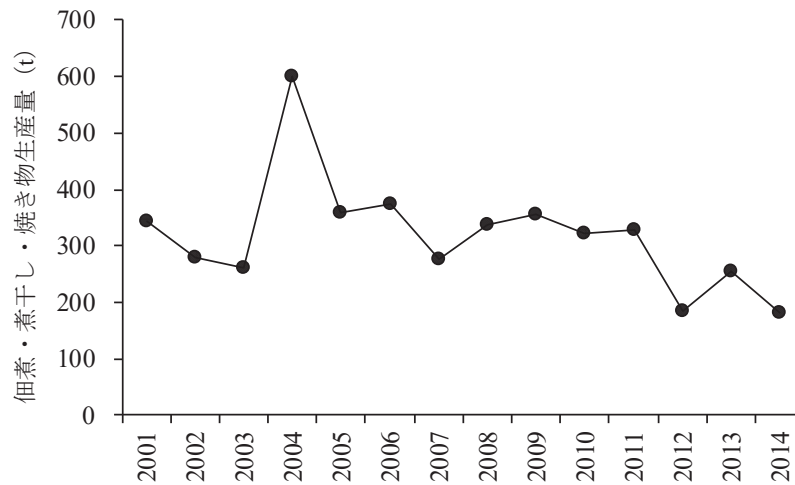


図 12 佃煮や煮干し、焼き物の生産量の推移.

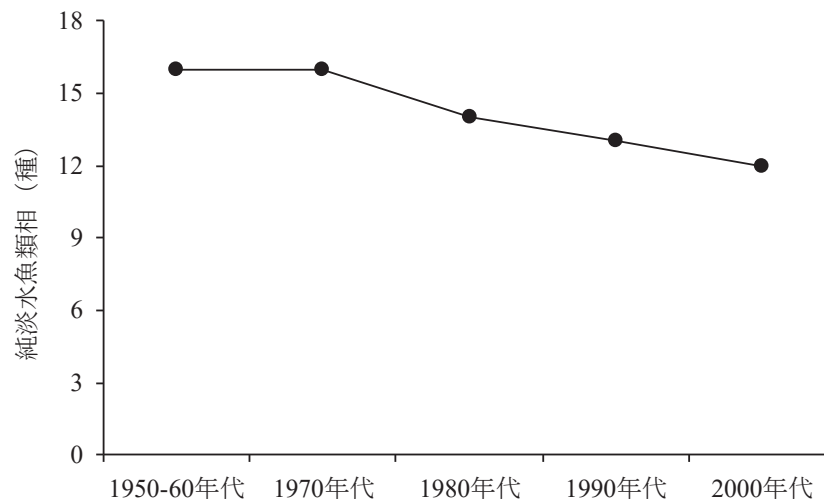


図 13 純淡水魚類相種の推移.

植物、浮葉植物、沈水植物についても 1970 年代以降減少しており、特に沈水植物は近年霞ヶ浦湖内ではほとんど見られなくなった（図 14）。沈水植物については湖底の光環境の影響が大きく、透明度の低下と水位管理による水位の上昇が相まって減衰したと考察した研究がある（天野・大石 2009）。鳥類種について、カモ類は 1996 年に 14 種であり、増減はあるものの 2015 年も 14 種であったことから横ばいとした（図 15）。

表 1 に 1945 年から 2018 年までの各指標の推移の増減を示した。推移は主に農産物や取水（水道、農業、工業）、洪水調節、環境学習、観光帆引き船など人間活動を豊かにする項目は増加した。しかし、漁獲や養殖、水

辺遊び、魚種や植物など生物多様性や人々が霞ヶ浦と触れ合うような項目が減少した。霞ヶ浦については、経済の発展によって流域人口が増加し、霞ヶ浦を水がめとしての水利用の需要が増加したこと、周辺住民の安心安全を守る防災の需要が増加したことで大規模な人工資本の投入により取水や洪水調節の享受量が大幅に増加したが、それらによって水質汚濁の進行や動植物の減少等によって霞ヶ浦と触れ合うことに幸福を感じるものが少なくなっていることが考えられた。現在、環境学習等によって教育の項目が増加しているが、環境を教える人材も重要であり、茨城県においてもエコ・カレッジを開催し環境学習の講師を養成する（茨城県ほか 2017）など、人的

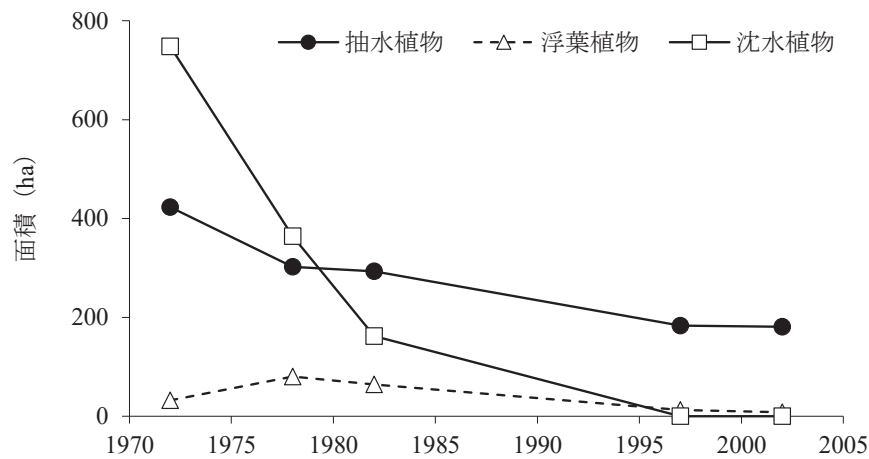


図 14 水生植物面積の推移。

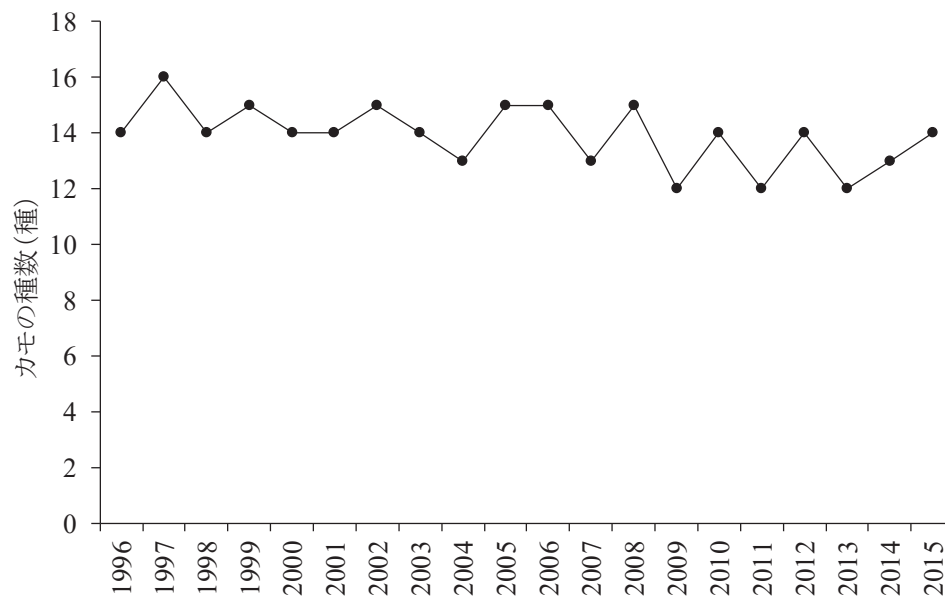


図 15 カモの種数の推移。

表1 霞ヶ浦の生態系サービスの指標の推移と経済価値.

大項目	中項目	小項目	指標	指標の増減	経済価値 (億円/年)
供給 サービス	食糧・原材料	水産物	内水面漁業生産量	➡	5.0
		水産物（養殖）	淡水真珠生産量	➡	3.1
			コイ, その他魚類生産量	➡	
		農産物	レンコン生産量	➡	141.0
	水供給	取水	農業用水量	➡	195.4
			工業用水量	➡	82.3
			水道用水量	➡	36.6
調整 サービス	水の調整	地下水涵養	地下水涵養量	⇨	37.7
		水質浄化	底泥の脱窒量	—	41.5
			ヨシによる浄化量	—	1.7
	気候の調整	潜熱効果	蒸発散量	⇨	—
	自然災害の防護	洪水調節	治水容量	➡	670.0
文化的 サービス	宗教・祭り	水神	水神の社数	—	—
	教育	環境学習	霞ヶ浦環境科学センター主催参加者数	➡	0.7
	景観, 観光・レ クリエーション	レクリエーション 利用者	観光帆引き船利用者数	➡	0.04
			釣り利用者数	➡	—
			水遊び人数	➡	—
		つくば霞ヶ浦りん りんロード	利用者数	➡	—
	伝統芸能・伝統 工芸	伝統的建造物（茅 葺屋根の原材料）	妙岐の鼻地区ヨシーカモノハシ群落面 積（茅葺に利用される群落）	➡	0.06
		伝統的水産加工品	佃煮・煮干し・焼き物生産量	➡	2.2
基盤 サービス	生物多様性	魚類	純淡水魚類種	➡	—
			抽水植物面積	➡	—
		水生植物	浮葉植物面積	➡	—
			沈水植物面積	➡	—
		鳥類	カモの種数	⇨	—

資本を投入することで水辺遊びの享受量の増加も図るなど、霞ヶ浦と触れ合う機会を増やすことに努めている。今後も霞ヶ浦から持続的に生態系サービスを楽しむためには人間活動に利用しながらも生態系などの自然資本も注意しながら霞ヶ浦と関わっていくことが重要である。

(2) 経済的な価値について

表1に各項目における経済的な価値を示した。最も高かったのは洪水調節の670.0億円/年となり、次いで取水の農業用水で195.4億円/年となった。各サービスを単純に合計すると、供給サービスで463.4億円/年、調整サービスで750.9億円/年、文化的サービスで3.0億

円/年となり、供給サービスや調整サービスで高い傾向がみられた。文化的サービスや基盤サービスは貨幣換算できない項目が多かった。また、各サービスを合計して霞ヶ浦の生態系サービスの経済的な価値を算出すると1,217.3億円/年と見積もられた。世界の生態系サービスの経済的な価値について、2011年に世界の湖・河川群の経済的な価値を評価した事例では、2007年USドル換算で12,512ドル/(ha・年)と見積もった事例があり(Costanza et al. 2014)、2007年の毎月の東京市場ドル・円スポット中心相場の月中平均の金額(日本銀行 https://www.stat-search.boj.or.jp/ssi/mtshtml/fm08_m_1。

html, 2019年12月5日確認)を平均すると、2007年は117.8円/ドルであったことから、円で換算すると約147万円/(ha・年)となった。そこで、本研究で得られた2016年の霞ヶ浦の生態系サービスの経済的な価値1,217.3億円/年を霞ヶ浦湖面積(220 km²)で除すると553万円/(ha・年)となった。為替レートの変化の影響を受けるが、霞ヶ浦は世界の湖・河川群の経済的な価値より約4倍高かった。

経済的な価値の内訳として世界の湖・河川群では、2011年は総額の60%が水の流れの制御で、17%がレクリエーション、14%が水の貯留に関する項目であったと報告している(Costanza et al. 2014)。霞ヶ浦の場合、水の流れの制御に関する項目は26%、水の貯留に関する項目は3%、レクリエーションは1%未満であり、最も割合が大きかったのは生態系の攪乱を制御する項目(洪水調節等)で55%であった。生態系の攪乱を制御する項目は世界の湖・河川群では0%であり、湿地群で経済的な価値の高い項目であった。しかし、一方で世界の湖沼の生態系サービスの経済的な価値をヘドニック法で検討した事例では、洪水調節機能は比較的高かったと報告しており(Reynaud and Lanzanova 2017)、評価手法によって湖沼の経済的な価値は異なることが考えられた。また、様々な湿地の価値について検討した事例では、人工湿地は生物多様性の向上、水質の改善、洪水制御で高く評価されたと報告しており(Ghermandi et al. 2010)、人間の活動が生態系サービスを改善したり、潜在的な価値を生み出すことに貢献したりすることが明らかとなっている。これらのことから、霞ヶ浦は、従来から妙岐の鼻などの湿地が存在し洪水調節機能が高かったが、堤防整備や常陸川水門の設置等の人工資本の投入によってさらに洪水調節機能サービスが強化されている湖であると考えられた。一方、治水や利水のための人為的な水位管理は抽水植物帯の衰退を引き起こすなど(西廣 2012)、人工資本の投入によって劣化する生態系サービスもあるだろう。このようなトレードオフの関係を総合的に検討した上で評価することが重要である。

本研究で経済的な価値を算出する上で以下の課題が明らかとなった。供給サービスや調整サービスは正味現在価値や代替法などで比較的貨幣換算によって定量化されやすいことが報告されているが(庄山・山形 2015)、文化的サービスや基盤サービスは人の意識として重要であることは認識していても市場で取引されていないもの(非利用価値)が多いため経済的な価値が過小評価されてしまう。これらについてはCVMやコンジョイント分

析など非利用価値も評価できる手法(栗山ほか 2013)を用いて総合的に解析する必要があるだろう。また、調整サービスの水質浄化について、底泥やヨシの脱窒による窒素除去量を下水処理場の処理費用に代替して経済的な価値を算出したが、除去量が増えると経済的な価値が増える計算となっている。しかし、脱窒は湖水の硝酸濃度が高いほど脱窒量が増加することが報告されており(北村ほか 2014)、水質汚濁が進行するほど価値が増えるという水環境の観点からすると矛盾してしまう。また、供給サービスの水道用水についても、水道料金から活性炭処理の費用を差し引いて評価したが、こちらも活性炭処理以外にもオゾン処理などしており、それについては考慮していないため、霞ヶ浦の水質汚濁の影響で余計にかかる費用が経済的な価値として評価されてしまっている部分もある。湖の富栄養化の潜在的な損害費用を算出した事例もあるが(Mueller et al. 2016)、霞ヶ浦の生態系サービスにおいても富栄養化による損害費用を考慮して評価する必要があるだろう。また、供給サービスの内水面漁獲量と文化的サービスの佃煮・煮干し・焼き物生産量の経済的な価値がダブルカウントされている可能性がある。どちらもワカサギなど同じ魚種が含まれているが、佃煮などの加工品には魚本体と加工による費用が含まれている。今後はこれらの課題解決に向けた研究も必要である。

まとめ

本研究ではJBO2の評価手法に準じて、霞ヶ浦の生態系サービスを供給サービス、調整サービス、文化的サービス、基盤サービスの4つに分類し、サービスの項目を整理するとともに、代替法を用いることでそれらの経済的な価値の算出を試みた。

その結果、霞ヶ浦の生態系サービスについて取水(水道、農業、工業)、洪水調節など人間活動を豊かにする項目が増加し、水辺遊びや魚種や植物など生物多様性や人々が霞ヶ浦と触れ合うような項目が減少していることが明らかとなった。生態系サービスのフローの多くが人工資本を介すことによって受けており、増加した全ての項目が含まれていた。逆に減少した項目は水産物や伝統的建築物、伝統的水産加工品を除いて全て自然資本から直接得られるものであった。また、経済的な価値として、供給サービスで463.4億円/年、調整サービスで750.9億円/年、文化的サービスで3.0億円/年となり、供給サービスや調整サービスで高い傾向がみられた。しかし、

経済評価の課題として、正確な原単位が得られず、霞ヶ浦以外の知見などを活用していること、文化的サービスが過小評価であり、基盤サービスが評価できなかったこと、経済的な価値が水環境の観点から矛盾する結果となる項目があることから富栄養化の損害費用の考慮が必要であること、経済的な価値のダブルカウントなどが挙げられた。

今後は複数の評価手法を相補的に用いることで、文化的サービスや基盤サービスの適切な経済的な価値を把握し、総合的な霞ヶ浦の生態系サービスの享受量と価値を見極めること（松崎ほか 2020）、また、それらを生態系や水質の保全に関する政策に活かす必要がある（山野ほか 2020）。霞ヶ浦では web アンケート調査を実施しコンジョイント分析によって文化的サービスや基盤サービスに関連する項目の支払い意思額を算出していることから（幸福ほか 2020）、それらを活用して議論することが可能であると考えられる。さらに、web アンケートや霞ヶ浦周辺の施設や公園等で直接霞ヶ浦に訪れた人へアンケートを行い、霞ヶ浦の生態系サービスで重要と思う項目を検討した事例がある（西ほか 2020）。本研究で生態系サービスのフローが霞ヶ浦周辺の人間活動に応じて変化していることが明らかとなったが、今後も持続的にサービスを享受するためには人々のニーズを把握した上で、生態系などの自然資本を増やす、もしくは維持していくことが重要である。また、トレードオフについて先に触れたが、霞ヶ浦では他に、統計解析によって栄養塩と一次生産、動物プランクトン、ワカサギのボトムアップ連鎖が示唆され、良好な水質と高漁業生産は対立する可能性があることを報告している（Matsuzaki et al. 2018）。さらに、農作物と水質のトレードオフを解決するためにため池などの湿地が重要であることを示し、湿地としての耕作放棄地の活用を議論している（Matsuzaki et al. 2019）。多様な生態系サービスを持続的に享受していくためには、このような様々なトレードオフの課題に直面することがあると考えられることから、霞ヶ浦に関わる全ての人々が課題の認識や、課題解決の方法について情報共有し連携していくことが重要である。

謝 辞

本研究は「霞ヶ浦の生態系サービスに関する経済評価・評価検討委員会」を 2017 年に設置し、有識者から助言を頂きながら実施した。座長の北海道大学大学院農学研究院の中村太士教授をはじめ、委員として検討に携

わって頂いた方々に謝意を表する。また、本研究は国環研と地環研との I 型共同研究「霞ヶ浦の生態系サービスに係る経済評価に関する研究」において情報・意見交換を介して実施された。また、一連の研究は、国立環境研究所の自然共生プログラム（プロジェクト 5 生態系機能・サービスの評価と持続的利用）および環境経済評価連携研究グループの成果の一部である。関係各位に謝意を表する。

引用文献

- 天野邦彦・大石哲也（2009）霞ヶ浦における沈水植物群落の消長と環境変遷の関連性解析に基づく修復候補地の抽出。水工学論文集 **53**: 1369-1374.
- 新井誠一（2013）政策評価制度 10 年の軌跡～制度導入以降の省察と今後の展望～。日本評価研究 **13**(2): 3-19.
- Chen X., Chen Y., Shimizu T., Niu J., Nakagami K., Qian X., Jia B., Nakajima J., Han J., Li J. (2017) Water resources management in the urban agglomeration of the Lake Biwa region, Japan: An ecosystem services-based sustainability assessment. *Science of the Total Environment* **586**: 174-187.
- Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R. V., Paruelo J., Raskin R. G., Sutton P. & van den Belt M. (1997) The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* **387**: 253-260.
- Costanza R., de Groot R., Sutton P., van der Ploeg S., Anderson S. J., Kubiszewski I., Farber S., Turner R. K. (2014) Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change* **26**: 152-158.
- FAO (1998) FAO Training Series: Simple methods for aquaculture, Soil Chapter.
- Ghermandi A., van den Bergh J. C. J. M., Brander L. M., de Groot H. L. F., & Nunes P. A. L. D. (2010) Values of natural and human-made wetlands: A meta-analysis. *Water Resources Research*, **46**, W12516: 1-12.
- 藤田光一・伊藤弘之・小路剛志・安間智之（2006）水循環物質モデルを活用した水環境政策評価～霞ヶ浦とその流域を対象として～。国土技術政策総合研究所資料: pp. 299.
- 茨城県企業局（2011a）工業用水道事業料金体系（http://www.pref.ibaraki.jp/kigyuu/002_water_supply/industrial_water/fee_structure.html, 2017 年 9 月 18 日確認）。
- 茨城県企業局（2011b）水道用水供給事業水道料金の仕組み（http://www.pref.ibaraki.jp/kigyuu/002_water_supply/city_water/mechanism_of_water_rates.html, 2017 年 9 月 18 日確認）。
- 茨城県農林水産部農地計画課（1989）利根川水系利水現況図。
- 茨城県総合開発事務局（1961）霞ヶ浦総合利水調査報告第 1 報: 21-45.
- 茨城県・栃木県・千葉県（2013）霞ヶ浦に係る湖沼水質保全計画策定資料（1 期～7 期）。
- 茨城県・栃木県・千葉県（2017）霞ヶ浦に係る湖沼水質保全計画（第 7 期）。
- いであ株式会社（2017a）平成 28 年度霞ヶ浦水辺現地調査（河川環境基図作成）業務報告書。
- いであ株式会社（2017b）平成 28 年度妙岐の鼻地区環境調査業務報告書。

一般社団法人日本ダム協会 (2013) ダム年鑑.

Jones L., Norton L., Austin Z., Browne A. L., Donovan D., Emmett B. A., Grabowski Z. J., Howard D. C., Jones J. P. G., Kenter J. O., Manley W., Morris C., Robinson D. A., Short C., Siriwardena G. M., Stevens C. J., Storkey J., Waters R. D. & Willis G. F. (2016) Stocks and flows of natural and human-derived capital in ecosystem services. *Land Use Policy* **52**: 151-162.

環境省 (2013a) 湿地が有する生態系サービスの経済価値評価. 環境省 (2013b) 平成 25 年度生態系サービスの定量的評価に関する調査等業務報告書.

環境省 (2016) 生物多様性及び生態系サービスの総合評価報告書.

環境省自然環境局 (2016) 第 47 回ガンカモ類の生息調査報告書.

関東経済産業局 (2008) 東京湾の水質改善に資する技術に関する実証モデル調査.

春日清一 (2001) 霞ヶ浦の外来魚による生態系崩壊. 国立環境研究所ニュース **20**(4): 3-4.

北畠能房・青木陽二 (1981) 霞ヶ浦漁業における水質汚濁影響に関する実証的研究. 国立公害研究所研究報告 **24**: 27-51.

北村立実・黒田久雄・山本麻美子・根岸正美・田淵俊雄 (2010) 霞ヶ浦湖岸循環利水水田地区の水収支と物質収支. 農業農村工学会論文集 **78**(3): 175-181.

北村立実・渡邊圭司・須能紀之・吉尾卓宏・位田俊臣・花町優次・中村剛也・戸田任重・林誠二・黒田久雄 (2014) 霞ヶ浦底泥における脱窒活性の分布特性及び水温と硝酸イオン濃度の影響. 水環境学会誌 **37**(6): 265-271.

北村立実・渡邊圭司・吉尾卓宏・戸田任重・内海真生・黒田久雄 (2018) 霞ヶ浦底泥における脱窒速度の水平・垂直分布と窒素除去量の推計. 水環境学会誌 **41**(6): 213-221.

国土交通省 (2010) 雨水浸透施設の整備促進に関する手引き (案).

国土交通省河川局河川環境課 (2010) 河川に係る環境整備の経済評価の手引き (本編).

幸福智・久保雄広・北村立実・松崎慎一郎・松本俊一・山野博哉・西浩司・菊地心・吉村奈緒子・福島武彦 (2020) 選択型実験を用いた霞ヶ浦の生態系サービスの経済価値評価. 応用生態工学 **23**: 235-243.

栗山浩一・庄子康・柘植隆宏 (2013) 初心者のための環境評価入門. 勁草書房, 東京.

前田直之・後藤春彦・山崎義人 (2003) 労力支出からみる茅葺き屋根の継続的な補修作業モデルの構築～新潟県高柳町荻ノ島地区と大島村田麦地区の過去と現在の比較を通して～. 日本建築学会計画系論文集 **571**: 77-84.

前田修 (2012) 霞ヶ浦への招待. 茨城県霞ヶ浦環境科学センター, 茨城県.

Matsuzaki S., Sasaki T. & Akasaka M. (2016) Invasion of exotic piscivores causes losses of functional diversity and functionally unique species in Japanese lakes. *Freshwater Biology* **61**: 1128-1142.

松崎慎一郎・西廣淳・山ノ内崇志・森明寛・蛸名政仁・榎本昌宏・福田照美・福井利憲・福本一彦・後藤裕康・萩原彩華・長谷川裕弥・五十嵐聖貴・井上栄壮・神谷宏・金子有子・小日向寿夫・紺野香織・松村俊幸・三上英敏・森山充・永田貴丸・中川圭太・大内孝雄・尾辻裕一・小山信・

榎原靖・佐藤晋一・佐藤利幸・清水美登里・清水稔・勢村均・下中邦俊・戸井田伸一・吉澤一家・湯田達也・渡部正弘・中川恵・高村典子 (2016) 純淡水魚と水生植物を指標とした湖沼の生物多様性広域評価の試み. 保全生態学研究 **21**: 155-165.

Matsuzaki S. S., Suzuki K., Kadoya T., Nakagawa M., Takamura N. (2018) Bottom-up linkages between primary production, zooplankton, and fish in a shallow, hypereutrophic lake. *Ecology* **9**(9): 2025-2036.

Matsuzaki S. S., Kohzu A., Kadoya T., Watanabe M., Osawa T., Fukaya K., Komatsu K., Kondo N., Yamaguchi H., Ando H., Shimotori K., Nakagawa M., Kizuka T., Yoshioka A., Sasai T., Saigusa N., Matsushita B. & Takamura N. (2019) Role of wetlands in mitigating the trade-off between crop production and water quality in agricultural landscapes. *Ecosphere* **11**(10): 1-15.

松崎慎一郎・北村立実・西浩司・松本俊一・久保雄広・山野博哉・幸福智・菊地心・吉村奈緒子・福島武彦 (2020) 複数のアプローチを用いた霞ヶ浦の生態系サービス経済評価の試み：特集を企画するにあたって. 応用生態工学 **23**: 213-215.

Millennium Ecosystem Assessment (2005) Ecosystems and human well-being: Synthesis (Millennium Ecosystem Assessment 編, 横浜国立大学 21 世紀 COE 翻訳委員会責任翻訳 (2007) 『国連ミレニアム エコシステム評価 生態系サービスと人類の将来』, 株式会社オーム社, 東京.

水資源機構 (1995) 霞ヶ浦事業開発計画 (<http://www.water.go.jp/kanto/kasumiga/works04.html>, 2018 年 2 月 12 日確認).

水資源機構 (2016) 第 25 回関東地方ダム等管理フォローアップ委員会霞ヶ浦開発事業定期報告書.

Mueller H., Hamilton D. P. & Doole G. J. (2016) Evaluating services and damage costs of degradation of a major lake ecosystem. *Ecosystem Services* **22**(B): 370-380.

中島拓男・相崎守弘 (1981) 霞ヶ浦高浜入における脱窒. 国立公害研究所研究報告 **22**: 89-97.

日本学術会議 (2001) 地球環境・人間生活にかかわる農業及び森林の多面的な機能の評価について (答申).

日本学術会議 (2004) 地球環境・人間生活にかかわる水産業及び漁村の多面的な機能の内容及び評価について (答申).

西浩司・久保雄広・北村立実・松崎慎一郎・松本俊一・山野博哉・幸福智・菊地心・吉村奈緒子・福島武彦 (2020) バスト・ワースト・スケーリングによる霞ヶ浦の生態系サービスの重要度評価. 応用生態工学 **23**: 245-256.

西廣淳 (2012) 霞ヶ浦における水位操作開始後の抽水植物帯面積の減少. 保全生態学研究 **17**: 141-146.

Nishihiro J., Akasaka M., Ogawa M. & Takamura N. (2014) Aquatic vascular plants in Japanese lakes. *Ecological research* **29**(3): 369-369.

農林水産省 (2006) 作物統計, 作況調査 (野菜), 野菜生産出荷統計, 平成 18 年度産 (http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/sakkyou_yasai/index.html, 2017 年 9 月 18 日確認).

農林水産省関東農政局 (2015) 霞ヶ浦用水 (二期) 地区の事業の効用に関する説明資料.

農林水産省 (2016) 作物統計, 作況調査 (野菜), 市町村別データ (http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/sakkyou_yasai/index.html, 2017 年 9 月 18 日確認).

- 遠香尚史・西田貴明 (2014) 自然資本による価値の経済評価における動向と課題. 季刊政策・経営研究 **3**: 51-64.
- Reynaud A. & Lanza D. (2017) A Global Meta-Analysis of the Value of Ecosystem Services Provided by Lakes. *Ecological Economics* **137**: 184-194.
- 林野庁 (2010) 水源林造成事業評価技術検討会資料 10: 費用対効果分析について.
- 左子芳彦 (2010) 琵琶湖ヨシ帯の脱窒活性と脱窒細菌の分子生態学的研究. Institute for Fermentation, Osaka, Research Communications **24**: 213-222.
- 庄山紀久子・山形与志樹 (2015) 土地利用シナリオに基づいた生態系サービスの空間評価と社会的価値の定量化. 日本生態学会誌 **65**(2): 145-153.
- 田畑真佐子・加藤聡子・川村晶・鈴木潤三・鈴木静夫 (1996) ヨシ植栽水路における河川水中の窒素・リンの除去効果. 水環境学会誌 **19**(4): 331-338.
- 高木康行・羽田野琢磨・中村茂・Herath S. (2001) グリッド型水循環系解析における不浸透面積率の決定手法について. 土木学会第 56 回年次学術講演会.
- 高橋卓也 (2019) 生態系サービス (自然の恵み) の経済評価—TEEB の現状と課題. 環境情報科学 **48**(1): 14-19.
- TEEB (2010) The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Mainstreaming the Economics of Nature: A synthesis of the Approach, Conclusions and Recommendations of TEEB.
- 鳥越皓之・荒川康・五十川飛暁・卯田宗平・古家信平・神谷智昭・古家晴美 (2005) 平成 16 年度ミリオンズレイク調査研究事業報告.
- 碓井星二・加納光樹・佐野光彦 (2014) 茨城県北浦のヨシ帯と護岸帯での魚類群集構造の比較. 日本水産学会誌 **80**(5): 741-752.
- 若松美保子・山口臨太郎・池田真也・馬奈木俊介 (2018) 新国富指標—地域での持続可能性評価と政策活用に向けて—. 環境経済・政策研究 **11**(2): 43-56.
- 山本真人・大野研 (2019) 三重県における生態系サービスの変化. ランドスケープ研究 (オンライン論文集) **12**: 21-32.
- 山野博哉・久保雄広・松崎慎一郎 (2020) 霞ヶ浦生態系サービスの経済評価の意義, 課題, そして活用. 応用生態工学 **23**: 257-259.
- 吉田謙太郎 (2010a) 生物多様性と生態系サービスの経済学的評価. 農村計画学雑誌 **29**(2): 132-137.
- 吉田謙太郎 (2010b) 生物多様性の経済評価と生態系サービスへの支払い. 環境情報科学 **39**(3): 27-32.