

陸海域環境統合モデルによる環境投資配分の推定：
最適な統合的沿岸域管理のシミュレーション
Estimating Optimal Investment Allocation for Land-sea Environment:
Simulation Analysis of Integrated Coastal Management

結城知佳・佐藤赳*†・鈴木宣弘*

(国際協力機構・*東京大学)

Chika YUKI, Takeshi SATO*† and Nobuhiro SUZUKI*

(JICA/ *The University of Tokyo)

E-mail : †atakeshi@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

【要約】

本研究の目的は、統合的沿岸域管理の枠組みによる環境投資をモデル化し、汚濁排出量削減に与える効果を定量的に評価することである。モデルは、各地域で個別に環境投資を行う地域内環境投資と、地域全体でプールし配分する国際環境投資という二種の環境投資を組み込んでいる。シミュレーションの結果、国際環境投資によって地域全体の GDP 成長率を減らすことなく最大約 2 倍の COD 削減率を達成できること、また、汚濁物質削減率の制約を強めるほど国際環境投資の果たす役割が大きくなることが明らかになった。漁業・水産業の生産量増大のためにも、協調的な国際環境投資によって効率的かつ適切に産業・生活排水の汚濁物質排出量をコントロールすることが望ましいと考えられる。

【キーワード】

環境、陸海域環境統合モデル、統合的沿岸域管理、シミュレーション

【abstract】

In this paper, we model and quantitatively evaluate the impact of environmental investments to reduce pollutant emissions within the framework of the integrated coastal zone management. The proposed model incorporates two types of environmental investments: regional environmental investments, in which investments are done for investors of each region themselves, and international environmental investments, in which the return on investments is pooled and distributed to a whole region. As the results of simulations, international environmental investments double a pollutant emission reduction rate without causing a reduction of the total GDP growth rate. To increase the production of fisheries, international environmental investment will efficiently and appropriately control pollutant emissions.

1. はじめに

経済成長に伴い沿岸地域での生活・経済活動の集中が進む一方、産業・生活排水由来の汚濁物質が過剰に海域に流入することで、海の環境が悪化し、赤潮の発生等により、漁業資源が減少しうるということが指摘されている（安藤ら(2013)、手塚ら(2013)）。もちろん、漁業資源の利用という観点では、海水中の無機塩類の濃度が適切な範囲で存在する必要があり、例えば瀬戸内海でのノリ養殖は水がきれいになりすぎたことで生産量が低下したという見方もある（多田ら(2010)）。しかしながら、我が国で2016年に策定された第8次総量削減④では、有機汚濁解消の観点から水環境の改善・維持を進めるため、汚濁負荷量の削減が設定されており、引き続き海洋環境を改善することが基本指針とされている。持続可能な形で沿岸地域や漁業が発展するためには、様々な関係者の協力のもと、海洋への汚濁物質排出を、汚濁投資シミュレーションに基づき効率的にコントロールし、沿岸地域の経済発展と、海洋保全や漁業発展の両立を目指すことが重要と考えられる。汚濁物質排出のコントロールのための包括的な海洋管理について、現在、統合的沿岸域管理（Integrated Coastal Zone Management: ICZM）という手法が注目されている（Clark (2018)）。Sorensen(1997)によれば、統合的沿岸域管理は「動態的な沿岸体系の内外両方において、物理的、社会経済的、そして政治的な連帯に基づく方法で沿岸資源・環境を統合的に策定および管理すること」と定義される。統合的沿岸域管理の意義は、環境を保全し漁業資源の持続可能な利用を実現しながら、海洋発展に関わる各産業が社会基盤や情報および技術を最大限活用することである（Clark(2018)）。日本は、中国、韓国、ロシアと協調し、黄海、渤海、日本海を対象とする北西太平洋行動計画（Northwest Pacific Action Plan; NOWPAP）に参加しモニタリング等を実施しているが、沿岸陸域の各産業における環境投資などの実行力のある環境保全の取り組みは未だ行われていない（Kim(2015)）。沿岸陸域の各産業が経済行動を行いつつ水環境や漁業資源を保全するための具体的施策を検討するには、複数の沿岸国の沿岸陸域の各産業が海洋環境保全を行う投資効果を定量的に明らかにする必要がある。

そこで本研究では、各地域が協調して沿岸域管理に取り組んだ際に、効率的に汚濁物質の削減が実現しうるかをモデル化し、統合的沿岸域管理の有効性を検討する。環境制約が沿岸陸域の経済活動に及ぼす影響の評価や、最適な環境投資の配分を検討するために、陸海域環境統合モデル（櫻井(2006)）を発展させ、日本海を対象として、水質汚濁物質排出量を制約とした地域全体のGDP成長率の最大化問題を解いた。なお、本研究は、あくまで陸域の経済活動が、漁業・水産業の生産に関わる汚濁物質の排出量に与える影響を求めることを目的として設定しており、漁業・水産業の経済効果は直接求めない。

水質汚濁物質を削減するための具体的な措置としては、沿岸地域における排水処理施設の建設を水質汚濁負荷削減投資とし、その建設を沿岸10地域が共同で行う統合的沿岸域

陸海域環境統合モデルによる環境投資配分の推定：
最適な統合的沿岸域管理のシミュレーション

管理プロジェクトを国際環境投資の有無等によってシナリオ分けし、国際環境投資の効果と最適な配分をシミュレーションした。

2. 先行研究

統合的沿岸域管理の評価研究について、特定の評価項目に絞って分析を行った事例には、Pendleton(1995)や Lakshmi *et al.*(2000)による報告がある。さらに、統合的沿岸域管理を包括的に評価したものは、中国廈門のプロジェクトを対象とした Benrong *et al.*(2006)がある。この研究は 1992 年から 2001 年の実証データを用いて、海洋に関わる様々な産業がプロジェクトから受ける経済的・環境的便益を評価し、年間の社会経済便益が 40%以上増加するという結果を示した。

一方、本研究と同様に陸海域環境統合モデルを用いて、陸域から排出された水質汚濁物質が海洋環境汚濁に与える影響を評価した研究のうち、日本を対象としたシミュレーション分析には、Kawabe (1998)や Higashi *et al.*(2012)がある。Kawabe (1998)は、各家庭における食料廃棄や下水道による汚濁負荷物質削減量に複数のシナリオを設け、それぞれの状況において排水処理施設管理にどの程度費用が必要かを評価した。Higashi *et al.*(2012)は伊勢湾を対象とし、最適な管理法がとられた場合に、陸域由来の汚濁物質による水中の貧酸素が現状の約 67%改善できることが明らかにしている。日本海および沿岸域の複数国にまたがる統合的沿岸域管理を扱ったものには、櫻井ら(2005)、櫻井ら(2006)がある。櫻井ら(2005)は日本から中国、韓国、ロシアへの環境投資をモデルに組み込み、1995 年を初年とした 12 年間の各地域の経済成長率や化学的酸素要求量 (Chemical Oxygen Demand: COD) 排出量の最適値を求めるシミュレーションを行っている。そして櫻井ら(2006)は、CO₂も加え地域全体が日本海に排出する COD の量や地域全体の GDP 成長率という観点から、同様の期間で日本がどのように投資を行うのが最適か検討している。

本研究は、管理法によってシナリオを分けた Higashi *et al.*(2012)らを参考に、櫻井ら(2006)のモデルを発展させ、各国間の投資の方向性に制限を設けず、参加地域全体で環境投資がプールして配分される場合の、最適な投資を導出した。本モデルは、各地域内だけでなく、地域全体の国際環境投資が COD 排出量に与える影響をモデルへ組み込んでいる。

3. 分析手法とデータ

3-1. 本研究における国際環境投資と陸海域環境統合モデルの概要

本研究では、櫻井ら(2006)と同様に、水質汚濁負荷物質として代表的な水質指標である COD を陸域由来の水質汚濁負荷量を制約条件とし、沿岸地域全体の GDP 合計額を目的変数とした線形計画問題を解く。この定式化は、汚濁物質の削減量や地球温暖化ガスの削減

量の目標値を設定し、その条件の下で産業の目的である経済活動の大きさを最大化させるという意味となり、環境制約が経済活動に及ぼす影響の評価や、最適な環境投資の配分を検討することができる（増井ら(2000)）。沿岸域から日本海に排出される COD の総量は、産業由来と家計由来に分類し、各産業の生産額から決定される産業系 COD 排出量および污水处理別形態人口から決定される生活系 COD 排出量の和からなるものとした。

本研究の想定は以下である。日本海における統合的沿岸域管理のプロジェクトとして、2005 年を前期として 2 期（2 年間）にわたる COD 排出量削減プロジェクトとした。ここで、生産を 2 期とした理由は、1 期のみを生産額を最大化した場合と比して、複数の時点での効果を見ることができ、より長期の影響の展望に役立てられると考えられるためである。前提条件として、後期における COD 削減率を達成するために、沿岸各地域が COD 排出量削減のための投資を行う。投資には地域内環境投資と国際環境投資の 2 種類を設ける。地域内環境投資とは、ある地域がそのまま当該地域内に污水处理施設を建設するものである。国際環境投資とは、対象沿岸地域内の全地域から出資された資金をプールし、適切な地域に振り分け、污水处理施設を建設するものである（図 1 参照）。ここで、同じ国内でのみ資金をプールするという国内環境投資というケースも検討される。国内環境投資の効果は、地域内環境投資と国際環境投資の間に位置すると考えられるが、沿岸部の産業や生活に関わるそれぞれの地方自治体は異なっている。日本海は多数の国と地域が影響する比較的大きな閉鎖海を対象とし地方自治体間の連携は見られていないことから、本研究では国内環境投資という投資のケースは扱わないこととした。

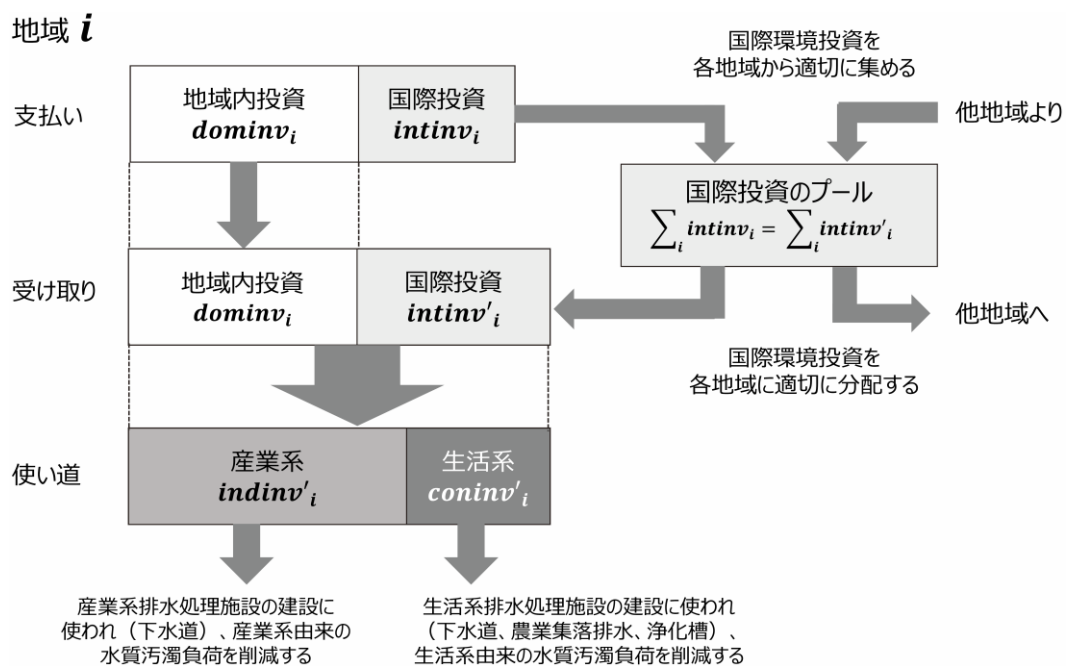


図 1 投資のフロー

陸海域環境統合モデルによる環境投資配分の推定：
最適な統合的沿岸域管理のシミュレーション

統合的沿岸域管理によるプロジェクトを行わない場合は地域内環境投資のみ、プロジェクトを行う場合は地域内環境投資と国際環境投資の両方を行うものとする。それぞれの環境投資は、当該地域内で、産業系・生活系に最適に配分される。本研究ではこのモデルを定式化し、統合的沿岸域管理による COD 排出量削減プロジェクトの有無（国際環境投資の有無）、国際環境投資を設ける場合の前期と比較した後期の COD 排出量削減率制約の決め方に基づき、複数のシナリオでの COD 削減率や GDP 成長率をシミュレーションした。日本海の沿岸地域を対象とし、日本貿易振興の日中韓国際産業連関表に基づき、Dongbei、Hokkaido、Tohoku、Kanto、Chubu、Kinki、Chugoku、Kyushu Jungbukwon、Yeongamkwon の 10 地域に分割した。ただし、北朝鮮およびロシアは適切なデータが取得できず割愛した。北朝鮮とロシアを抜いたことによる影響は結果にて考察を加える。なお、本研究で用いた産業連関表データは、漁業・水産業の独立した区分は無く、それらの経済活動に関する効果は直接に求めている。

3-2. 分析モデルの定式化

(1) 目的関数と制約条件

目的関数は後期の対象地域全体の GDP 合計とし、後期に日本海沿岸地域から排出される COD の量を制約条件とした最大化問題として定義する（櫻井ら(2006)）。COD 削減率については、(A)：域内全体で課す（地域の合計で制約を課す）ケースと、(B)：各地域で個別に課す（地域ごとに一律で制約を課す）ケースを想定する。なお、以降登場する数値で符号に言及がないものはすべて非負である。

$$\max GDP(2) \quad (1)$$

$$(A) \text{における COD 排出量制約条件 } \textit{subject to } SUMCOD(2) \leq \overline{SUMCOD(2)} \quad (2-i)$$

$$(B) \text{における COD 排出量制約条件 } \textit{subject to } COD_i(2) \leq \overline{COD_i(2)} \quad (2-ii)$$

$GDP(t)$: t 期における対象地域の 1 年間の地域総生産合計

$t=1$ は前期、 $t=2$ は後期を表す。以下の式においても同様である。

$SUMCOD(t)$: t 期における地域全体から排出される 1 年間の COD の総量

$\overline{SUMCOD(2)}$: 後期における地域全体から排出される 1 年間の COD の総量の制約値

$COD_i(t)$: t 期における地域 i から排出される 1 年間の COD の量

$\overline{COD_i(2)}$: 後期における地域 i から排出される 1 年間の COD の量の制約値

本研究では、GDP 合計は、地域的な GDP に相当する地域内生産額 GRP（各地域の地域内総生産）の総和と定義する。COD 総量は、各地域から排出される COD の量の総和とおく。

$$GDP(t) = \sum_i GRP_i(t) \quad (3)$$

$$SUMCOD(t) = \sum_i COD_i(t) \quad (4)$$

$GRP_i(t)$: t 期における地域 i の 1 年間の地域内総生産

(2) COD の量の算出

生活系水質汚濁負荷削減のための投資は、各処理形態の排水処理施設の建設のために利用され、産業系水質汚濁負荷削減のための投資は、後期における産業系水質汚濁負荷削減の資本蓄積となり、COD の排出量削減に寄与する。本研究では対象地域全体で一つのプロジェクトを想定するため、産業系水質汚濁負荷削減投資額が COD 削減に与える影響 R (産業系の COD 汚濁負荷削減係数)、及び、生活系水質汚濁負荷削減投資額が COD 削減に与える影響 S^u (生活系排水処理施設 u の使用人口増加係数) は各地域で一律と仮定する。各地域から排出される COD の量は、生活系 COD 排出量と産業系 COD 排出量の和から産業系水質汚濁負荷削減投資による COD の削減量を減じたものによって決定される。

$$COD_i(t) = COD_i^{con}(t) + COD_i^{ind}(t) - Rk_i^{ind}(t) \quad (5)$$

$COD_i^{con}(t)$: t 期における地域 i の生活系活動より排出される 1 年間の COD の量

$COD_i^{ind}(t)$: t 期における地域 i の産業系活動より排出される 1 年間の COD の量

R : 産業系の COD 汚濁負荷削減係数

$k_i^{ind}(t)$: t 期における地域 i の産業系水質汚濁負荷削減の資本蓄積

R は、環境省「平成 20 年度污水处理施設の効率的整備促進に関する調査」、環境省「平成 17 年度水質汚濁物質排出量総合調査」から推定した。ここで生活系 COD 排出量は污水处理形態 u ごとの人口から排出される COD によって構成され、産業系 COD 排出量は各産業から排出される COD によって構成される。

$$COD_i^{con}(t) = \sum_u E_u z_i^u(t) \quad (6)$$

$$COD_i^{ind}(t) = \sum_j P_j x_i^j(t) \quad (7)$$

E_u : 生活系の污水处理形態 u の COD 排出係数

$z_i^u(t)$: t 期における地域 i の污水处理形態 u の使用人口

P_j : 産業 j の COD 排出係数

$x_i^j(t)$: t 期における地域 i の産業 j の 1 年間の生産額

E_u は、国土交通省・国土技術政策総合研究所「2012 年国総研プロジェクト研究報告 第

陸海域環境統合モデルによる環境投資配分の推定：
最適な統合的沿岸域管理のシミュレーション

39号 日本近海における海洋環境の保全に関する研究 第3章 陸域からの汚濁負荷シミュレーション」の値を用いた。 $z_i^u(t)$ は、日本は、総務省「2005年国勢調査」、国土交通省「平成17年度都道府県別污水处理人口普及率」を、中国は、National Bureau of Statistics of China “Population at Year-end by Region(2005)”と National Bureau of Statistics of China “Basic Statistics on Municipal Infrastructure in Cities by Region (2005)”を、韓国は、Korean Statistical Information Service “Population Census (2005)”と Republic of Korea Ministry of Environment “Korea’s Sewage Policies and Private Investment (2007)”をもとに推定した。 P_j は環境省「平成17年度水質汚濁物質排出量総合調査」、日本貿易振興機構「日中韓地域間アジア国際産業連関表(2005年)」から推定し、 $x_i^j(t)$ は同様に「日中韓地域間アジア国際産業連関表(2005年)」を用いた。

ここで、生活系COD排出量について、污水处理形態 u の使用人口は以下に定められる。

$$coninv'_i = \sum_u coninv'_i^u \quad (8)$$

$$indinv'_i = k_i^{ind}(2) \quad (9)$$

$$z_i^u(2) = z_i^u(1) + S^u coninv'_i^u \quad (u = 1,2,3) \quad (10)$$

$$z_i^A(2) = z_i(2) - \sum_u^{1,2,3} z_i^u(2) \quad (11)$$

$coninv'_i^u$: 地域 i が利用する2年間の生活系排水処理施設 u の建設のための投資
 S^u : 生活系排水処理施設 u の使用人口増加係数

S^u は環境省「平成20年度污水处理施設の効率的整備促進に関する調査」、「平成17年度水質汚濁物質排出量総合調査」、国土交通省「2009年水資源の利用状況」より推定した。

(3) 環境投資の配分

各地域は水質汚濁負荷削減のために地域内環境投資と国際環境投資を負担する。投資の資金は各産業の生産額から支払う。国際環境投資を設けない場合は地域内環境投資のみが、国際環境投資を設ける場合は国際環境投資のみが、負の値をとりうる。値が正の場合は投資資金を支払い、負の場合は他の産業から補助金を得ることを意味する。

$$dominv_i = \sum_j dominv_i^j \quad (12)$$

$$intinv_i = \sum_j intinv_i^j \quad (13)$$

$dominv_i$: 地域 i が負担する2年間の地域内環境投資の和

$intinv_i$: 地域 i が負担する2年間の国際環境投資の和

$dominv_i^j$: 地域 i の産業 j が負担する 2 年間の地域内環境投資

$intinv_i^j$: 地域 i の産業 j が負担する／補助される 2 年間の水質汚濁負荷削減投資

各地域は、地域内環境投資は各地域に、国際環境投資は地域間で最適に配分されたものを受け取り、その和を生活系汚濁負荷削減、産業系汚濁負荷削減に最適に配分し利用する。

$$\sum_i intinv_i = \sum_i intinv'_i \quad (14)$$

$$dominv_i + intinv'_i = coninv'_i + indinv'_i \quad (15)$$

$intinv'_i$: 地域 i が受け取る 2 年間の国際環境投資

$coninv'_i$: 地域 i が利用する 2 年間の生活系水質汚濁負荷削減のための投資

$indinv'_i$: 地域 i が利用する 2 年間の産業系水質汚濁負荷削減のための投資

(4) 生産物市場のフロー条件

各地域において各産業の生産額は生産物市場の 1 年間のフロー条件に従う。左辺は供給、右辺は需要を表す。供給は廃棄を含み、需要と同じかそれ以上の値を取るものと仮定する。この仮定は櫻井ら(2005)、櫻井ら(2006)と同様であるが、このように供給超過を許すモデルを用いた点について、特に製造業やサービス業など、価格調整が働き需給が一致すると想定することがより一般的であることも考えられ、今後の改善点としたい。なお、水質汚濁負荷削減のための投資は 1 期 2 年間の値であるために 1/2 を乗じている。以下の A_i^j 、 $c_i^j(t)$ 、 $TR_i^j(t)$ も日本貿易振興機構「日中韓地域間アジア国際産業連関表 (2005 年)」を参照している。

$$x_i^j(t) \cong A_i^j x_i^j(t) + c_i^j(t) + \frac{1}{2} dominv_i^j + \frac{1}{2} intinv_i^j + proinv_i^j(t) + TR_i^j(t) \quad (16)$$

A_i^j : 地域 i 、産業 j における投入が産出に変換される係数

$c_i^j(t)$: t 期における地域 i 、産業 j の 1 年間の消費需要

$proinv_i^j(t)$: t 期における地域 i 、産業 j の 1 年間の生産投資

$TR_i^j(t)$: t 期における地域 i 、産業 j の 1 年間の輸出入

(5) 後期における生産額および GRP

後期における各地域の各産業の生産額は、前期の生産額、生産資本減耗係数、生産投資および資本産出率によって決定される。 δ_i^j 、 ω_i^j 、 v_i^j は日本貿易振興機構「日中韓地域間アジア国際産業連関表 (2005 年)」を用いた。

$$x_i^j(2) = (\delta_i^j)^2 x_i^j(1) + 2 proinv_i^j(1) \omega_i^j, \quad 0 \leq \delta_i^j \leq 1, \quad 0 \leq \omega_i^j \leq 1 \quad (17)$$

δ_i^j : 地域 i 、産業 j の 1 年間の生産資本減耗係数

陸海域環境統合モデルによる環境投資配分の推定：
最適な統合的沿岸域管理のシミュレーション

ω_i^j : 地域 i 、産業 j の資本産出率

各地域の各産業の GRP は生産額に付加価値率を乗じたものとする。ここで付加価値率とは、それまでのフローの生産額（原材料費）／当該産業のフローの生産額を示し、ここでは地域ごとの外生的なパラメータを用いた。

$$GRP_i(t) = v_i^j x_i^j(t), 0 \leq v_i^j \leq 1 \quad (18)$$

v_i^j : 地域 i 、産業 j の付加価値率

(6) 投資に関する制約

各地域において地域内環境投資および国際環境投資は前期の GRP の一定比率内とする。

$$proinv_i \leq \alpha GRP_i(1), \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (19)$$

$$dominv_i \leq \beta GRP_i(1), \quad 0 \leq \beta \leq 1 \quad (20)$$

$$intinv_i \leq \gamma GRP_i(1), \quad 0 \leq \gamma \leq 1 \quad (21)$$

α : 生産投資比率

β : 地域内環境投資比率

γ : 国際環境投資比率

各地域で国際環境投資は地域内環境投資よりも小さいとする。

$$intinv_i \leq dominv_i \quad (22)$$

さらに本研究では、各地域から排出される総窒素（T-N : Total Nitrogen）と総リン（T-P : Total P）の量についても、シナリオごとに、同様のデータを用いて併せて算出した。

3-3. シナリオ設定

国際環境投資の有無、国際投資があった場合に COD 排出量削減率の制約を地域全体で課すか（地域の合計での制約か）、各地域個別で課すか（地域ごとに一律の制約か）、及び、削減率の具体的な数値、に基づいて複数シナリオに分けシミュレーションを行った。汚濁物質の排出量について削減量でなく削減率を用いた理由は、研究の対象が、範囲が大きな日本海であり、%削減による目標値設定が先行研究において確認されたためである（国土交通省(2011)）。伊勢湾や瀬戸内海のように総量削減の値が明確に設定⁽²⁾されているケースでは、削減量を設定したシミュレーション分析がより適切と考えられる。

4. 結果と考察

表 1 がシナリオを変えたシミュレーション結果である。表の縦方向はシナリオ条件、横

方向は各シナリオの GRP や COD 削減量等の結果を示す。ここで GRP の成長率は、実行可能解が得られたほとんどすべての COD 削減量制約条件で約 6%以上であった。例外は国際投資なし、かつ域内全体で 11%COD を減少させた場合のみ (2.4%) であった。国際環境投資なしにおいて、10%減から 11%減にした際に、国際環境投資ありにおいて 20%減から 22%減にした際に、GRP の値が変化しているのは、それぞれ、10%減、20%減までは、環境投資より効率的な投資先が無く、環境投資を行ったとしても GDP を下げることが無かったためである。ただし、COD 削減率をさらに増加させると、環境投資より効率的な投資先に配分されていた分も環境投資に配分せざるを得なくなり、GDP が低下する。

個別のケースを見ると、国際環境投資なしの場合、域内全体での制約ならば 11%、地域で個別の制約ならば 5.6%、削減量を向上させることができた。ただし、それ以上の COD 削減制約を課しシミュレーションを行った場合、実行可能解を得られなかった。したがって、本研究のモデルでは、域内全体で 11%、地域個別で 6%が、それぞれ国際環境投資なしの場合の最大の COD 削減量であったといえる。一方、国際環境投資ありの場合では、域内全体での制約ならば 22%、地域で個別の制約ならば 14%上昇させること確認された。つまり、本モデルのシミュレーションにおいては、国際環境投資ありの場合に約 2 倍の COD 削減量を達成することができたといえる。最大限の COD 削減量の制約が達成された場合の GRP 成長率は、域内全体での制約ならば 6.0%、地域で個別の制約ならば 6.4%であった。これは、前期以下という最も小さな制約で GRP を最大化させた場合の GRP 成長率 6.5%と比して大幅な減少ではない。以上、国際環境投資を行うことで GRP をほとんど減少させずに、より効果的に域内全体の COD を削減することができると考えられる。ただし、自国の排出量にのみ着目した場合は、地域によっては、自らへの環境投資を周辺他国への環境投資に回すことになるので、自国周辺の海の汚濁のみを考えた場合には、投資のインセンティブが低下する恐れがある。T-N や T-P についても試算したところ、ほぼ COD と同様の結果が得られた。

ここで、北朝鮮やロシアのデータが含まれないことについて、国際環境投資は資金全体プールし最適な投資先に配分するため、仮に北朝鮮やロシアでの投資効果が大きければ、国際環境投資ありでの汚濁物質削減効果は、国際環境投資なしのケースと比して、さらに大きく増大すると考えられる。北朝鮮やロシアでの投資効果が小さい場合にも、国際環境投資ありでの汚濁物質削減効果は本推定結果の水準が維持されるため、国際環境投資ありのケースでより効率的に COD が削減できる、という本研究の結論は保たれる。

表 2 は環境投資の配分額である。表中の左側は、地域内環境投資か/国際環境投資か、表中の右側は、環境投資の投資先が産業系か/生活系か、を分類している。まず、地域内環境投資か国際環境投資かの配分について、COD 削減量の制約なしという条件では、100%が地域内環境投資に配分されることが最適という結果となった。一方で、COD 削減量の制約条件を高くするほど、国際環境投資への配分額が増大する結果となった。これは、制約

陸海域環境統合モデルによる環境投資配分の推定：
最適な統合的沿岸域管理のシミュレーション

条件が高いほど、1 度資金をプールし、排出量が多い地域に集中的に投資することが有効であることを意味する。沿岸地域において、高い COD 削減数値目標を達成する際には、統合的沿岸域管理プロジェクトとして、国際的に協調し環境投資を行うことが効率的であると考えられる。

また、産業系と生活系の配分について、域内全体で制約を課す際には、全て産業系に配分されることが最適となった。一方で、地域で個別に制約を課す場合には、生活系への投資の割合が増大した。この理由には、特定の地域で生活系からの汚濁物質排出量が多く、個別の制約では集中的に環境投資を行う必要があったことが考えられる。ただ、全体の割合では、いずれの場合においても産業系への投資の割合が大きかった。

表 1 シミュレーション分析結果

COD削減量の制約条件		後期の GRP (10 ¹² US\$)	GRPの成長率 (%)	後期COD排出量 (10 ⁶ tons)	CODの削減率 (%)	T-Nの削減率 (%)	T-Pの削減率 (%)
全体／個別 制約(%)		国際環境投資なし					
なし	なし	5.19	6.5%	1.61	5.6%	7.5%	4.6%
域内全体で制約	前期以下	5.19	6.5%	1.61	5.6%	7.5%	4.6%
	10%減	5.18	6.4%	1.54	10.0%	12.9%	9.9%
	11%減	4.99	2.4%	1.52	11.0%	14.4%	10.9%
地域で個別に制約	前期以下	5.19	6.5%	1.61	5.6%	7.5%	4.6%
全体／個別 制約(%)		国際環境投資あり					
なし	なし	5.19	6.5%	1.60	6.4%	8.5%	5.4%
域内全体で制約	前期以下	5.19	6.5%	1.42	16.9%	21.4%	17.7%
	20%減	5.19	6.5%	1.37	20.0%	25.0%	21.2%
	22%減	5.16	6.0%	1.33	22.0%	27.2%	23.8%
地域で個別に制約	前期以下	5.19	6.5%	1.52	11.1%	14.5%	11.0%
	12%減	5.19	6.4%	1.43	16.1%	20.5%	16.8%
	14%減	5.18	6.4%	1.41	17.4%	22.0%	18.3%

表 2 環境投資の配分額

COD削減量の制約条件		地域内／国際環境投資の配分				環境投資の産業系／生活系の配分			
		地域内環境投資額 (10 ¹⁰ US\$) (%)		国際環境投資額 (10 ¹⁰ US\$) (%)		産業系 (10 ¹⁰ US\$) (%)		生活系 (10 ¹⁰ US\$) (%)	
全体／個別 制約(%)									
なし	なし	1.23	100%	0.00	0.0%	0.00	0%	1.23	100%
域内全体で制約	前期以下	1.25	97.5%	0.00	2.5%	1.25	100%	0.00	0.0%
	20%減	1.40	88.2%	0.19	11.8%	1.59	100%	0.00	0.0%
	22%減	1.43	82.0%	0.31	18.0%	1.75	100%	0.00	0.0%
地域で個別に制約	前期以下	1.25	100%	0.00	0.0%	0.59	46.7%	0.67	53.3%
	12%減	1.34	82.3%	0.29	17.7%	1.14	70.1%	0.49	29.9%
	14%減	1.35	79.2%	0.35	20.8%	1.29	75.7%	0.41	24.3%

5. 結論と今後の課題

本研究では、日本海を対象として 2005 年を前期として 2 年間にわたる COD 排出量削減プロジェクトを想定し、沿岸地域全体の GDP 成長率や、地域全体と個別の地域から排出される水質汚濁物質の量について分析を行った。この分析により、環境制約が経済活動に及ぼす影響の評価や、環境投資の配分の最適化を検討した。さらに、対象沿岸地域内の全地域から出資された資金をプールし、適切な地域に振り分ける国際環境投資を行うことによる効果をシミュレーションした。これは、適切な地域に振り分けることによって、地域内環境投資と比較して大きな費用対効果が期待できる。国際環境投資を設ける場合は設けない場合と比べ、同等程度の GDP 成長率（2 年間で約 6.0%程度）を達成しながらも、COD の削減率では地域全体で最大 22%と、設けない場合の最大削減率 11%を大きく超える効果を実現されることが示された。したがって、COD 排出量を削減しつつ地域全体の GDP を最大化するために、統合的沿岸域管理プロジェクトによる国際環境投資が効果的であると考えられる。

また、地域内環境投資か国際環境投資かの配分について、域内全体の削減率を高めるほど最適な国際環境投資額が大きくなり、国際環境投資の果たす役割が大きくなるといえた。これは、域内全体の COD 削減量の制約条件を高くするほど、COD をより効率的に削減できる国際環境投資の活用が有効になるということを示している。さらに、産業系か生活系かの配分について、生活系よりも産業系に投資する方が効果が高いことが示された。ここで、地域全体の排出合計量で 1 つの制約を設けるか、各地域個別で制約を設けるかによって、シミュレーションの結果は大きく異なっていた。全体で制約を設けた方が、沿岸陸域における GDP 成長率を高く維持したまま、COD や、T-N、T-P の排出量を減らすことができた。水質改善が、動植物プランクトンの減少に繋がり、海藻、貝類や小魚の不漁につながっているということも懸念されているが、その一方で、COD や、T-N、T-P の過剰な流入は、赤潮などの深刻な海洋汚染と漁業資源の減少を招く危険がある。海洋環境を適切に保全するためには、本研究でシミュレーションされた結果を参考に、過剰な環境投資を行うのではなく、適切な投資によって、効率的に、沿岸陸域の産業・生活排水における汚濁物質排出量をコントロールする必要があると考えられる。そのためには、本研究に加え、漁業生産の最適化という視点から、適切な汚濁物質排出量の設定も合わせて検討することが望ましい。

政策上の課題としては、統合的沿岸域管理の枠組みで、国際環境投資を実践することが効率的であるにも関わらず、現時点でそのような協調的な管理・投資が必ずしも行われていないという点が挙げられる。本研究で算出された、地域全体の GDP 成長率最大化を達成するために最適な環境投資配分は、各地域が、自地域及びその周辺の海域の環境のみを改善することを目的とした場合には、パレート効率を実現するものではない。国際環境投

陸海域環境統合モデルによる環境投資配分の推定：
最適な統合的沿岸域管理のシミュレーション

資を促進し、効率的に汚濁物質の削減・管理を実現するためには、各国が協調するインセンティブの形成が課題である。その実現のためには、本研究で示されたように、地域間で強調し、包括的に汚濁物質の管理を行うことによる経済効果や環境保全効果を具体的な数値を持って示し、各国で同意を得ることが重要であると考えられる。

本研究の限界と今後のさらなる研究課題としては、以上の適切な汚濁物質排出量の設定に加え、本シミュレーション分析の前提条件の緩和が挙げられる。本分析は、国際環境投資の有無で場合分けし2期という条件でシミュレーションを行っている。国内のみでの資金のプールなどのより細かな環境投資パターンや、より長期的な年次でもシミュレーションなど、国際環境投資が最も効率的であるという結論は変わらないことが想定されるものの、具体的な数値の推定のためには、より現実に即した多様なシナリオのシミュレーションが実施されることが望ましい。また、本研究ではデータ取得上の問題から2005年データを用いたが、より最新のデータを用いる事が課題と考えられる。地域間、さらに、産業間で、公平性や公平感の観点から、どのように国際環境投資を行う取り決めをするのかについては、今後さらなる検討が必要である。

注

- (1) 環境省のウェブサイト「水質総量削減」www.env.go.jp/water/heisa/8kisei.html (2020年3月27日閲覧) を参照した。
- (2) (1)と同様に環境省のウェブサイト「水質総量削減」www.env.go.jp/water/heisa/8kisei.html (2020年3月27日閲覧) を参照した。

参考文献

- [1] Benrong P., Huasheng H., Xiongzi X. and Di J. (2006) “On the measurement of socioeconomic benefits of integrated coastal management (ICM): Application to Xiamen, China”, *Ocean and Coastal Management*, 49(3-4), 93-109.
- [2] Clark J. R. (2018) *Coastal zone management handbook*, CRC press.
- [3] Higashi H., Koshikawa H., Murakami S., Kohata K., Mizuochi M. and Tsujimoto T. (2012) “Effects of land-based pollution control on coastal hypoxia: a numerical case study of integrated coastal area and river basin management in Ise Bay, Japan”, *Procedia Environmental Sciences*, 13, 232-241.
- [4] Kawabe M. (1998) “To enhance the environmental values of Tokyo Bay - a proposition for integrated coastal zone management”, *Ocean & Coastal Management*, 41, 19-39.
- [5] Kim S. K. (2015) “Marine Pollution Response in Northeast Asia and the NOWPAP Regime”, *Ocean Development & International Law*, 46(1), 17-32.
- [6] Lakshmi A. and Rajagopalan R. (2000) “Socioeconomic implications of coastal zone

- degradation and their mitigation: a case study from coastal villages in India”, *Ocean & Coastal Management*, 43, 749-62.
- [7] Pendleton L. (1995) “Valuing coral reef protection” *Ocean & Coastal Management*, 26, 119-131.
- [8] Sorensen J. (1997) “National and international efforts at integrated coastal management: definitions, achievements, and lessons”, *Coastal management*, 25(1), 3-41.
- [9] 安藤晴夫・和波一夫・石井裕一(2013)「東京湾における赤潮の発生条件について」、『東京都環境科学研究所年報 2013』第1巻、pp.31-36。
- [10] 国土交通省(2011)『日本近海における海洋環境の保全に関する研究』、pp.1-22、www.nilim.go.jp/lab/ebg/nihonkinkai_j.pdf。
- [11] 櫻井一宏・小林慎太郎・水野谷剛・氷鮑揚四郎(2005)「日本海へ流入する陸域起因汚濁負荷削減政策の動学分析」、『地域学研究』第35巻第3号、pp.637-653。
- [12] 櫻井一宏・小林慎太郎・水野谷剛・氷鮑揚四郎(2006)「陸海域統合環境経済評価モデルによる環日本海地域のシミュレーション分析」、『地域学研究』第36巻第4号、pp.977-991。
- [13] 多田邦尚・藤原宗弘・本城凡夫(2010)「瀬戸内海の水質環境とノリ養殖」、『分析化学』第59巻第11号、pp.945-955。
- [14] 手塚公裕・大串浩一郎・緒方直人(2013)「有明海における陸域負荷の長期変動の推定および赤潮発生に及ぼす流入水量の影響」、『土木学会論文集 B1』第69巻第4号、pp.1735-1740。
- [15] 増井利彦・松岡譲・森田恒幸(2000)「環境と経済を統合した応用一般均衡モデルによる環境政策の効果分析」、『環境システム研究論文集』第28巻、pp.467-475。