

地球温暖化による海洋環境への影響と経済被害：CCS技術の導入

玉置 哲也¹・野澤 亘²・馬奈木 俊介³

¹正会員 九州大学特任助教 工学研究院 (〒 819-0395 福岡市西区元岡 744)

E-mail: tamaki@doc.kyushu-u.ac.jp

²九州大学特任助教 工学研究院 (〒 819-0395 福岡市西区元岡 744)

³九州大学教授 工学研究院 (〒 819-0395 福岡市西区元岡 744)

地球温暖化に向けた対策が喫急の課題として議論されている現在、我々は我々自身の経済水準の維持と地球温暖化に対する適応策・緩和策をバランスよく取り組むことが求められている。本研究では、Nordhausにより提案されたDICEモデルを改良し、今まであまり考慮されてこなかった生態系への影響の分析を行う。特に、近年CO₂の削減に対する期待が寄せられているCCS技術に着目し、海洋環境への影響を含めたこの技術の導入可能性について分析を行う。

Key Words: global warming, climate change, DICE model, ecosystem, 1.5 °C, CCS

1. はじめに

(1) 地球温暖化に向けた取り組み

近年、地球温暖化は国際的な問題として認識されている。2015年にはパリにおいてCOP21が開催され、各国の今後の目標が発表された。地球温暖化は、20世紀末頃からその可能性について注目され始め、1992年には環境と開発に関する国際連合会議（地球サミット）が開催され気候変動枠組条約が採択された。1997年に議決、2005年に発行された京都議定書では、温暖化の主因と考えられる人為的な温室効果ガスの排出削減目標が設定された。急速な大気や海水温度の上昇に伴い、生態系への影響や海水面の上昇、異常気象の発生確率の増加等、あらゆる方面に大きな影響がもたらされることが懸念されているが、このような状況下において、我々はどういった経済活動を行うべきであろうか。一般に生産活動を高めれば、多くの温室効果ガスを排出することにつながるものの、経済的な成長を望める。しかし、温暖化による被害や対策コストの増加を考慮し、生産量を抑えて温室効果ガスの排出量を削減することが最適である可能性は高い。

実際、COP21では、世界の気温上昇を産業革命前から2度未満に抑える「2度目標」を採択し、さらには1.5度未満に抑えることの重要性についても言及している。地球温暖化によってもたらされるリスクは多くの研究者によって分析が行われてきた。例えば、Parry et al.¹⁾は、気温が1.5-2度上昇した場合に水不足、飢餓、沿岸洪水、マラリア発生が急増する可能性があるとい

摘している。また、Warren²⁾は気温上昇に伴う生態系の変化についても警告をしている。このほかにも、干ばつ³⁾、沿岸洪水⁴⁾、健康被害⁵⁾⁶⁾など、地球温暖化によるリスクの分析が進められている。

以上のような、個々のリスクを対象とした研究だけでなく、地球温暖化に伴う影響を総合的に分析も行われてきた。Cline⁷⁾⁸⁾による費用便益分析では、温暖化による環境被害や健康被害、災害などを考慮し、積極的な政策の必要性を唱えている。また、Stern⁹⁾も、早期の温室効果ガスの削減が長期的な費用を抑えるために有用であると提示している。一方、Nordhaus¹⁰⁾は、地球温暖化ガスの排出制限を設けた場合の生産の動学的最適化問題をモデル化したDICE (Dynamic Integrated Climate economy) モデルを開発し、気候変動対策のための政策に対し議論を行っている。このモデルでは、国の生産活動に加え、大気・海洋間での温室効果ガス循環をモデルの中に組み込むことで、気候変動の影響を加味している。DICEモデルはClineやSternによる分析に比べて長期継続的な温暖化ガスの排出削減を掲げており、つまり、温暖化に対してより許容的な立場をとっていると言える。しかし一方で、明確な数理モデルとして構築されており、理論的にわかりやすいモデルとなっているため、気候変動への適応策を考慮したモデル¹¹⁾など、様々なモデルへと発展している。

本研究では、DICEモデルをベースに1.5度目標を実施する場合の経済影響を分析する。DICEモデルが温暖化に対してより許容的である一つの要因として、バックストップ技術などの将来的な技術革新を想定してい

ることが考えられる。また、生態系などへの影響など定量化の難しいリスクが十分に考慮されていないことも要因であろう。本研究では、これらの問題点を踏まえ、DICE モデルの改良を行い、新たな技術や環境問題に対する考察を行う。

(2) 総合的な気候変動評価モデル

先に紹介したように、地球温暖化による個々のリスク毎(災害、環境被害、健康被害など)の推計や予測は重要な研究であるが、我々が国際的に協力をを行い、温暖化ガスの削減や適応策・緩和策を施行するためには総合的な評価が影響評価も行う必要がある。総合的な評価を行うモデルの中にも、最適化問題や均衡問題などの数理モデルや、シミュレーションを用いたモデルなど多くの手法が用いられており、それぞれ一長一短がある¹²⁾。本研究で取り上げる DICE モデルは、ラムゼーモデルを基本としている動学最適化モデルであり、多くの分析に利用されている¹³⁾¹⁴⁾。

一方で、DICE モデルに対する批判もある。Kaufmann¹⁵⁾ は DICE モデルには説明が不十分な仮定が用いられていると指摘している。また、Hu et al.¹⁶⁾ はモデルのロバスト性が十分でないことを示し、排出規制をしない政策は決して理にかなった対応ではないとしている。このような批判はあるものの、理論的に理解しやすく明示的な数理モデルであり、有用なモデルであるといえる。実際に、De Bruin et al.¹¹⁾ は温暖化への適応費用を分析可能にした AD-DICE モデルとして改良を加えている。そのほかにも、技術革新を内生的に与える ENTICE モデル¹⁷⁾¹⁸⁾ や不確実性を考慮したモデル¹⁹⁾²⁰⁾ など様々な派生モデルが開発されている。

本研究では、生態系への影響を加味した DICE モデルの開発に挑む。これまで Nordhaus 自身が行ってきた DICE モデルの改良やその他の派生モデルにおいても十分に生態系などへの影響は考慮されてこなかった。生態系の変化は、あまり我々の生活に直接的な影響をもたらさないため軽視されがちである。しかしながら、近年、一見我々の生活に関係のない動植物の激減または激増が、我々に脅威をもたらす事例も報告されており、こうした生態系の損失に対する軽視は見直され始めてきた。また、Costanza et al.²¹⁾ や Balmford et al.²²⁾ は生態系サービスの価値と生態系を破壊して得られる短期的な利益について推計を行い、生態系を破壊しないほうが良いと結論付けている。生態系サービスは食物連鎖など要素が複雑に絡み合っており、その価値を見定めることは非常に困難である。知らぬ間に取り返しのつかない事態に陥り、想定外の損失を被る可能性を看過することはできないだろう。そこで、本研究では、生態系への被害を含めた分析を可能とするための

足掛かりの構築に挑む。

例えば、DICE モデルでは、技術革新により、温室効果ガスの排出をなくす、もしくは抑えるようなバックストップ技術の単価が将来的に低下することで、その技術に徐々にシフトし、最終的には排出がゼロになることを想定している。このバックストップ技術として考えられるものとして、風力発電などの再生可能エネルギーや CCS(Carbon capture and storage) などの二酸化炭素を閉じ込める技術である。この CCS には大きな期待が寄せられている²³⁾ もの、保管場所や輸送パイプからの二酸化炭素の漏洩やそれに伴う海中の酸性化²⁴⁾ などが懸念されており、海中の酸性化による生態系への影響も指摘されている²⁵⁾。だが、既存の DICE モデルにおいては、これらのリスクが十分に考慮されているとはいえない。

本研究の貢献は以下の 3 点である。まず、DICE モデルに生態系に影響を組み入れるために、バックストップ技術をの改変を行う。次に CCS 導入による最適な戦略の変化について分析を行う。そして、海洋環境の変化を考慮するための手法を提案し、我々のとるべき政策について言及する。

2. 本研究で用いるモデル

(1) DICE モデル

DICE モデルは Yeal 大学 Nordhaus によって開発された気候変動による経済影響を分析するためのモデルであり、改良が重ねられてきた。ここで、DICE モデルの構造を簡潔に説明しよう。DICE モデルはラムゼーモデルがベースとなっているため、各時点における消費と投資を決定し効用を最大化させるものである。

$$\sum_{t=1}^T U[c(t), L(t)] (1 + \rho)^{-t} \quad (1)$$

$$U[c(t), L(t)] = L(t) \frac{[c(t)]^{1-\alpha}}{1-\alpha}.$$

ただし、 U は効用、 $L(t)$ は t 期の労働量、 $c(t)$ は t 期の一人当たり消費量である。また、 ρ は割引率、 α は消費に関する限界効用の弾力性パラメータである。この式 (1) を最大化させるにあたり、経済的な条件式と環境に関する条件式が存在する。経済的な条件式として、 t 期の生産、および CO_2 排出量がある。 t 期の技術および資本を $A(t)$ 、 $K(t)$ としたとき、

$$Q(t) = Q_{net}(t) - \Lambda(t)A(t)K(t)^\gamma L(t)^{1-\gamma} \quad (2)$$

$$Q_{net}(t) = A(t)K(t)^\gamma L(t)^{1-\gamma} [(1 - \Omega(t))] \quad (3)$$

と与えられる。式 (2) は t 期の生産量を示し、第一項は、式 (3) に示されるように、Cobb-Douglas 型の生産関数に、温暖化による被害率 $\Omega(t)$ が加味された項と、第二

項の CO_2 排出量制限による生産低下率 $\Lambda(t)$ によって生じる減少量を示す項から成っている。そして、生産量 $Q(t)$ は、その期の消費量 $C(t) [= c(t)L(t)]$ と投資 $I(t)$ となり、それらの最適量が決定される。

$$Q(t) = C(t) + I(t).$$

一方、環境に関する条件式として、大気循環モデルが与えられている。ここでは、大気、海洋浅層部、海洋深層部の 3 か所を炭素が循環すると仮定しており、それぞれの貯留量を $M_{AT}(t)$, $M_{UP}(t)$, $M_{LO}(t)$ とすると、

$$M_{AT}(t) = E(t) + \phi_{11}M_{AT}(t-1) + \phi_{21}M_{UP}(t-1) \quad (4a)$$

$$M_{UP}(t) = \phi_{12}M_{AT}(t-1) + \phi_{22}M_{UP}(t-1) + \phi_{32}M_{LO}(t-1) \quad (4b)$$

$$M_{LO}(t) = \phi_{23}M_{UP}(t-1) + \phi_{33}M_{LO}(t-1) \quad (4c)$$

となる。 ϕ_{ij} は循環パラメータであり、また、 $E(t)$ は t 期の人為的な排出量を示しており、以下の式で表される。

$$E(t) = E_{Ind}(t) + E_{Land}(t) \quad (5)$$

$$E_{Ind}(t) = \sigma(t) [1 - \mu(t)] A(t)K(t)^\gamma L(t)^{1-\gamma}.$$

ここで、 $\sigma(t)$ は調整パラメータである。 $\mu(t)$ は排出量の制御する変数であり、 CO_2 排出量制限による生産低下率 $\Lambda(t)$ にも影響を及ぼす変数である。つまり、これが 1 に近づければ CO_2 の排出は 0 に近づき、気温上昇による被害は抑制されるものの、生産活動に対しても制限がかかる。一方、0 に近づけば、生産活動に対する制限はなくなるが、温暖化による被害率が高まる。一方、大気中の炭素濃度 $M_{AT}(t)$ の上昇は大気温 T_{AT} の上昇につながり、 T_{AT} が上昇すれば、温暖化による被害率 $\Omega(t)$ が連動して大きくなる構造になっている。また、式 (5) に含まれる土地利用による排出量 $E_{Land}(t)$ は、DICE モデルでは外生的に与えられている。

最近では DICE2013R²⁶⁾ が公開されており、ここでは、この DICE2013R にバックストップ技術の改良を行う。

(2) 複数のバックストップ技術のモデル化

DICE モデル 2013R においてバックストップ技術コスト $p(t)$ は以下のように外生的に与えられている。

$$p(t) = pback(1 - gback)^{t-1}$$

ここで、 $pback$ は、バックストップ技術の初期コスト ($\$/tCO_2$) であり、 $gback$ は毎期の技術コスト低下率である。そして、 CO_2 排出量コントロール変数 $\mu(t)$ を用いて、 t 期の排出制限による生産低下率 $\Lambda(t)$ は

$$\Lambda(t) = \theta_1 p(t) \mu(t)^{\theta_2}$$

として計算されている。つまり、 $p(t)$ は減少関数のため、期を追うごとに生産低下率は減少し、より高い $\mu(t)$ が実行されやすくなる。

このモデルで提案されているバックストップ技術とは、再生可能エネルギーなどであり、そのコストの変化は、排出制限による生産低下率 $\Lambda(t)$ のみ影響を及ぼしている。しかしながら、これらの技術の将来的なコスト低下は妥当な仮定かもしれないが、例えば CCS のような、環境に対する安全性が十分理解されていない技術もある。本研究では、このバックストップ技術を、従来通りの仮定が成り立つ技術 (以下、再エネ型 BS 技術とする) と、将来的な環境悪化の可能性を含む技術 (以下、CCS 型 BS 技術とする) の 2 種類を想定し、その影響を分析する。前者の技術コストを $p_r(t)$ 、後者を $p_c(t)$ とすると、

$$p_r(t) = pback_r(1 - gback_r)^{t-1}$$

$$p_c(t) = pback_c(1 - gback_c)^{t-1}.$$

排出制限による生産低下率 $\Lambda(t)$ は、CCS 型 BS 技術を用いる割合を $x(t)$ として、

$$\Lambda(t) = \theta_1 [(1 - x(t))p_r(t) + x(t)p_c(t)] \mu(t)^{\theta_2}$$

として表すこととする。また、CCS 型 BS 技術により制限された CO_2 排出量 $E_{CCS}(t)$ は

$$E_{CCS}(t) = \sigma(t) \mu(t) x(t) A(t) K(t)^\gamma L(t)^{1-\gamma}$$

となる。CCS では、この CO_2 排出量 $E_{CCS}(t)$ の一部が地表や海中に漏洩したり、それに伴う環境の変化が懸念されている。特に海中への漏洩は海洋の酸性化を引き起こすこと危険性が指摘されている。この影響を分析するために、以下のような CCS 型 BS 技術による貯留量 $V(t)$ を導入しよう。

$$V(t+1) = (1 - l(t))V(t) + E_{CCS}(t)$$

$l(t)$ はストレージからの t 期の漏洩率であり、外生的に与えるものとする。このとき、例えば大気や海洋浅層部において漏洩が発生した場合、大気中への漏洩割合を k とすれば、式 (4) は、

$$M_{AT}(t) = E(t) + \phi_{11}M_{AT}(t-1) + \phi_{21}M_{UP}(t-1) + k \cdot l(t)V(t) \quad (6a)$$

$$M_{UP}(t) = \phi_{12}M_{AT}(t-1) + \phi_{22}M_{UP}(t-1) + \phi_{32}M_{LO}(t-1) + (1 - k)l(t)V(t) \quad (6b)$$

$$M_{LO}(t) = \phi_{23}M_{UP}(t-1) + \phi_{33}M_{LO}(t-1) \quad (6c)$$

のように表すことができる。

3. バックストップ技術と最適戦略

2. において構築したモデルをもとに、複数のバックストップ技術による最適な戦略に対する変化を見ていこう。ここでは新たに導入した CCS 型 BS 技術のコストおよび漏洩率、漏洩場所などに着目する。

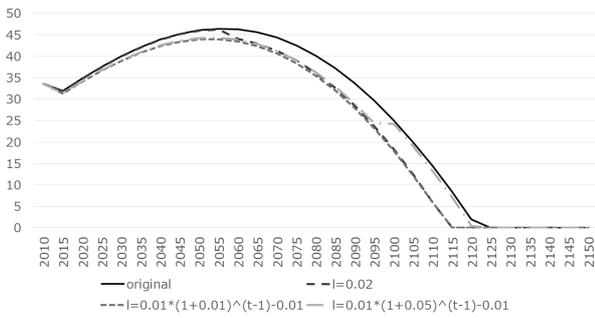


図-1 排出量 $E_{ind}(t)$ の変化

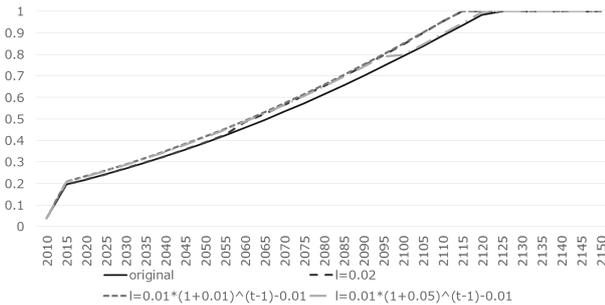


図-2 排出量コントロール $\mu(t)$ の変化

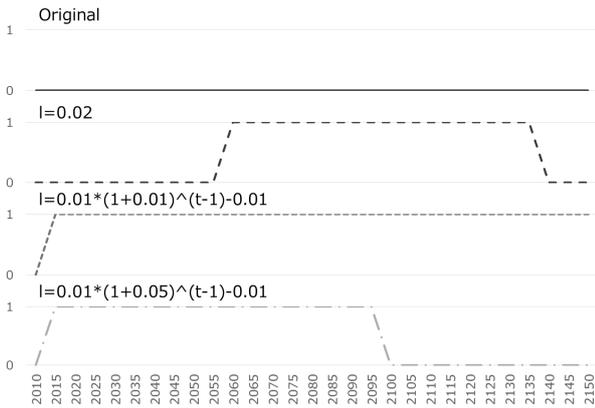


図-3 CCS 型 BS 技術の利用状況 $p(t)$

まず初めに、 CO_2 の漏洩が海洋へのみの場合を考えよう。つまり、式 (6) において $k = 0$ の場合を考える。DICE モデルでは、バックストップ技術の初期のコスト p_{back} は $344(\$/tCO_2)$ とされている。CCS 型 BS 技術がこれよりも高い場合、この技術は CO_2 漏洩リスクを含んでいるので、利用されることはない。そこで、ここでは便宜的に初期コストを再エネ型 BS 技術より低い $300(\$/tCO_2)$ として分析を行ってみよう。分析結果を図-1～図-3 に示す。

ここでは、CCS 技術によって地下に埋蔵された CO_2 の漏洩率の違いによって用いる BS 技術の利用形態に大きな違いが生じていることが分かる。CCS 型 BS 技術を

取り入れた場合、 CO_2 の漏洩が起こるものの、再エネ型 BS に比べて十分コストが安く、 CO_2 漏洩率が低ければ、導入が期待でき、排出量を抑えることにつながる事が分かる。ただし、漏洩率 $l(t)$ の違いによってとりうる戦略が大きく変わる。漏洩率が每期一定 ($l(t) = 0.02$) の場合、はじめは CCS 型 BS 技術を導入しないが、2060 年ごろから導入し、2140 年ごろには利用をやめるような戦略が望ましいという結果になった。これは漏洩率が高いため、初期は導入しないほうが望ましいが、 CO_2 の排出量増加率が下がってきた際には漏洩リスクよりも CCS 型 BS 技術を用いるコスト低下のほうが社会にとってより良い選択となりうる。そして、十分に BS 技術が開発されコストが下がり、社会的な CO_2 排出量が低下した際には、 CO_2 が漏洩するリスクを許容する必要がなくなるためと考えられる。また、漏洩率が每期増加する ($l(t) = 0.01(1 + 0.05)^{t-1} - 0.01$) 場合、漏洩率が低い初期にのみ CCS 型 BS 技術を利用するような戦略が望ましくなる。また、漏洩率が十分低い場合には、再エネ型 BS 技術よりもコストが低いため、常に利用することが望ましくなる。

4. 海洋環境への影響

続いて、海洋環境への影響について焦点を当ててみよう。前節でみたように、CCS 型 BS 技術は、そのコストと漏洩率次第で十分に社会に適用される可能性が考えられる。しかしながら、CCS 技術によって懸念されていることは、単に CO_2 の漏洩だけではなく、漏洩によって海洋が酸性化し、生態系システムが変化してしまうことである。そこで、本研究では、さらに海洋酸性化の指標として海水の pH を考えよう。海洋中の炭酸ガス濃度を $Z(t)(mol/l)$ としたとき、その pH は次のようになる。

$$pH(t) = \frac{pK - \log Z(t)}{2}$$

ここで、 pK は解離定数である。この時の海洋の生態系の変化によって受ける効用の減少量 $F(t)$ を $pH(t)$ の関数として、

$$F(t) = (pH(t) - pH(0))^d$$

と仮定すれば、式 (1) は

$$\sum_{t=1}^T \{U[c(t), L(t)] - \omega F(t)\} (1 + \rho)^{-t}$$

として表すことができる。ここで d, ω はパラメータである。以上の式より海洋環境を含めた影響分析を行う。詳細は口頭発表に譲る。

謝辞: 本研究は、環境省環境研究総合推進費 S-14 「気候変動の緩和策と適応策の統合的戦略研究」の助成を

受け実施しました。

参考文献

- 1) Parry, M., Arnell, N., McMichael, T., Nicholls, R., Martens, P., Kovats, S., Livermore, M., Rosenzweig, C., Iglesias, A., and Fischer, G.: Millions at risk: defining critical climate threats and targets, *Global Environmental Change*, Vol.11, No.3, pp.181–183, 2001.
- 2) Warren, R.: Impacts of global climate change at different annual mean global temperature increases, *Avoiding Dangerous Climate Change*, pp. 93–132, 2006.
- 3) Vicente-Serrano, S. M., Lopez-Moreno, J.-I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Sanchez-Lorenzo, A., García-Ruiz, J. M., Azorin-Molina, C., Morán-Tejeda, E., Revuelto, J., Trigo, R., Coelho, F., and Espejo, F.: Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern europe, *Environmental Research Letters*, Vol.9, No.4, pp.044001, 2014.
- 4) Hinkel, J., Lincke, D., Vafeidis, A. T., Perrette, M., Nicholls, R. J., Tol, R. S., Marzeion, B., Fettweis, X., Ionescu, C., and Levermann, A.: Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol.111, No.9, pp.3292–3297, 2014.
- 5) Hajat, S., Vardoulakis, S., Heaviside, C., and Eggen, B.: Climate change effects on human health: projections of temperature-related mortality for the uk during the 2020s, 2050s and 2080s, *Journal of Epidemiology and Community Health*, Vol.68, No.7, pp.649–656, 2014.
- 6) Komen, K., Olwoch, J., Rautenbach, H., Botai, J., and Adebayo, A.: Long-run relative importance of temperature as the main driver to malaria transmission in limpopo province, south africa: A simple econometric approach, *EcoHealth*, Vol.12, No.1, pp.131–143, 2015.
- 7) Cline, W. R.: Economics of global warming, 1992a.
- 8) Cline, W. R.: *Global warming: The economic stakes*, Institute for International Economics, Washington, D.C., 1992b.
- 9) Stern, N. H., Peters, S., Bakhshi, V., Bowen, A., Cameron, C., Catovsky, S., Crane, D., Cruickshank, S., Dietz, S., Edmonson, N., et al.: *Stern Review: The economics of climate change*, Vol. 30, Cambridge University Press Cambridge, 2006.
- 10) Nordhaus, W. D.: An optimal transition path for controlling greenhouse gases., *Science(Washington)*, Vol.258, No.5086, pp.1315–1319, 1992.
- 11) De Bruin, K. C., Dellink, R. B., and Tol, R. S.: Ad-dice: an implementation of adaptation in the dice model, *Climatic Change*, Vol.95, No.1-2, pp.63–81, 2009.
- 12) Stanton, E. A., Ackerman, F., and Kartha, S.: Inside the integrated assessment models: Four issues in climate economics, *Climate and Development*, Vol.1, No.2, pp.166–184, 2009.
- 13) Hatase, K. and Managi, S.: Increase in carbon prices: analysis of energy-economy modeling, *Environmental Economics and Policy Studies*, Vol.17, No.2, pp.241–262, 2015.
- 14) Hwang, I. C., Reynès, F., and Tol, R. S.: Climate policy under fat-tailed risk: an application of dice, *Environmental and Resource Economics*, Vol.56, No.3, pp.415–436, 2013.
- 15) Kaufmann, R. K.: Assessing the dice model: Uncertainty associated with the emission and retention of greenhouse gases, *Climatic Change*, Vol.35, No.4, pp.435–448, 1997.
- 16) Hu, Z., Cao, J., and Hong, L. J.: Robust simulation of global warming policies using the dice model, *Management Science*, Vol.58, No.12, pp.2190–2206, 2012.
- 17) Popp, D.: Entice: endogenous technological change in the dice model of global warming, *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol.48, No.1, pp.742–768, 2004.
- 18) Popp, D.: Entice-br: The effects of backstop technology r&d on climate policy models, *Energy Economics*, Vol.28, No.2, pp.188–222, 2006.
- 19) Traeger, C. P.: A 4-stated dice: quantitatively addressing uncertainty effects in climate change, *Environmental and Resource Economics*, Vol.59, No.1, pp.1–37, 2014.
- 20) Crost, B. and Traeger, C. P.: Optimal co2 mitigation under damage risk valuation, *Nature Climate Change*, Vol.4, No.7, pp.631–636, 2014.
- 21) Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Faber, S., Grasso, M., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P., and van den Belt, M.: The value of the world's ecosystem services and natural capital, *Nature*, Vol.387, No.6630, pp.253–260, 1997.
- 22) Balmford, A., Bruner, A., Cooper, P., Costanza, R., Farber, S., Green, R. E., Jenkins, M., Jefferiss, P., Jessamy, V., Madden, J., Munro, K., Myers, N., Naeem, S., Paavola, J., Rayment, M., Rosendo, S., Roughgarden, J., Trumper, K., Turner, and Kerry, R.: Economic reasons for conserving wild nature, *science*, Vol.297, No.5583, pp.950–953, 2002.
- 23) Metz, B., Davidson, O., De Coninck, H., Loos, M., and Meyer, L.: Carbon dioxide capture and storage, 2005.
- 24) Blackford, J., Jones, N., Proctor, R., Holt, J., Widdicombe, S., Lowe, D., and Rees, A.: An initial assessment of the potential environmental impact of co2 escape from marine carbon capture and storage systems, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, Vol.223, No.3, pp.269–280, 2009.
- 25) Kroeker, K. J., Kordas, R. L., Crim, R., Hendriks, I. E., Ramajo, L., Singh, G. S., Duarte, C. M., and Gattuso, J.-P.: Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming, *Global Change Biology*, Vol.19, No.6, pp.1884–1896, 2013.
- 26) Nordhaus, W. D. and Sztorc, P.: Dice 2013r: Introduction and user's manual, retrieved November, 2013, <http://aida.wss.yale.edu/nordhaus/homepage/>.

(2012. 11. 18 受付)