

修士論文

CO₂ 海洋隔離の環境リスク評価に関する研究

指導教員

佐藤 徹 教授

東京大学大学院 新領域創成科学研究科

環境システム学専攻 修士課程2年

大宮 俊孝

もくじ

1. 緒言	5
1.1. 本研究の背景	5
1.2. 既往の研究	5
1.3. 本研究の目的	6
1.4. 本論文の構成	7
2. <i>III</i> (Triple I、トリプル I)	8
2.1. <i>III - Inclusive Impact Indicator</i>	8
2.2. エコロジカル・フットプリント(EF)	9
リスク	9
2.2.1. 生態リスク(ER)	9
2.2.2. 人間リスク(HR)	11
2.3. <i>C</i> (コスト・ベネフィット)	11
3. 生態リスク(ER)の算出	12
3.1. Species Area Relationship (SAR)に基づく仮想環境改変面積	12
3.1.1. Species Area Relationship (SAR)	12
3.1.2. Species Area Relationship (SAR)に基づく仮想環境改変面積の算出手法の導出 ..	12
3.2. クロスインパクト分析による生物多様性の減少確率の算出	16
3.2.1. クロスインパクト分析について	16
3.2.2. 事象生起とインパクトに関する専門家アンケート調査	16
3.2.3. 分析方法	18
3.3. 専門家アンケート調査結果	21
3.3.1. アンケートの構成	21
3.3.2. アンケートの結果	24
3.3.3. クロスインパクト分析の結果	41
3.4. <i>ER</i> の算出	41
4 <i>III</i> の算出	47
4.1. 二酸化炭素海洋隔離の <i>LCA</i>	47
4.2. <i>EF</i>	48
4.3. <i>ER</i>	49
4.4. <i>HR</i>	49
4.4.1. 地球温暖化の <i>HR</i>	49
4.4.2. 酸性化の <i>HR</i>	50
4.4.3. 資源消費の <i>HR</i>	50
4.4.4. 光化学オキシダントの <i>HR</i>	50
4.4.5. <i>HR</i>	51
4.5. <i>C</i>	51
4.6. <i>III</i>	51

5. 結言	53
5.1. 結論	53
5.2. 課題	53

参考文献

謝辞

Table list

Table 1-1 統合的環境影響評価指標	6
Table 2-1 絶滅リスクの指標	9
Table 3-1 各海域の面積	14
Table 3-2 沿岸の等価係数を用いて外洋の等価係数を算出	14
Table 3-3 クロスインパクト分析の対象とした事象	17
Table 3-4 回答者の属性と人数	21
Table 3-5 P_i の判断表現と対応させた生起確率(一様乱数)	24
Table 3-6 α_{j-1} の意味と対応するインパクト値	24
Table 3-7 事象 i の生起する確率(回答者全員)	26
Table 3-8 事象間インパクト平均値(隔離なし・回答者全員)	27
Table 3-9 事象間インパクト標準偏差(隔離なし・回答者全員)	28
Table 3-10 事象間インパクト平均値(隔離あり・回答者全員)	29
Table 3-11 事象間インパクト標準偏差(隔離あり・全員)	30
Table 3-12 事象 i の生起する確率(プロジェクト関係者)	31
Table 3-13 事象間インパクト平均値 (隔離なし・プロジェクト関係者)	32
Table 3-14 事象間インパクト標準偏差(隔離なし・プロジェクト関係者)	33
Table 3-15 事象間インパクト平均値(隔離あり・プロジェクト関係者)	34
Table 3-16 事象間インパクト標準偏差(隔離あり・プロジェクト関係者)	35
Table 3-17 事象 i の生起する確率(プロジェクト関係者以外)	36
Table 3-18 事象間インパクト平均値 (隔離なし・プロジェクト関係者以外)	37
Table 3-19 事象間インパクト標準偏差(隔離なし・プロジェクト関係者以外)	38
Table 3-20 事象間インパクト平均値(隔離あり・プロジェクト関係者以外)	39
Table 3-21 事象間インパクト標準偏差(隔離あり・プロジェクト関係者以外)	40
Table 3-22 生物多様性の減少が起こる確率	41
Table 3-23 深層の ΔER 一覧	42
Table 3-24 沿岸の ΔER 一覧	43
Table 3-25 外洋表層の ΔER 一覧	44
Table 3-26 抽出した 54 ケースの ΔER	45
Table 4-1 127LNG 船 輸送量(t-km) 当たりの資源消費量[kg]	47
Table 4-2 127LNG 船 輸送量(t-km) 当たりの大気環境負荷物質の排出量[kg]	47
Table 4-3 輸送 1 回+隔離 1 回当たりの資源消費量[kg]	47
Table 4-4 輸送 1 回+隔離 1 回当たりの大気環境負荷物質の排出量[kg]	47

Table 4-5 二酸化炭素海洋隔離に伴う全世界の資源消費量[kg / year]	48
Table 4-6 二酸化炭素海洋隔離に伴う全世界の大気環境負荷物質の排出量[kg / year]	48
Table 4-7	49
Table 4-8 LIME における単位被害量当たりの経済価値	49
Table 4-9 単位排出量あたりの地球温暖化の被害額	50
Table 4-10 単位排出量あたりの酸性化の被害額	50
Table 4-11 単位資源消費あたりの被害額	50
Table 4-12 単位排出量あたりの光化学オキシダントの被害額	51
Table 4-13 III の例	51
Table 4-14 III の内訳	52

Figure list

Fig. 2.1 $\Sigma EF / \Sigma GDP$ 1ドルあたりのエコロジカル・フットプリント	8
Fig. 3-1 生物種数減少率と仮想環境改変面積の関係	13
Fig. 3-2 各海域における生物種数減少比と仮想環境消費面積の関係	14
Fig. 3-3 等価係数を用いた場合の各海域における生物種数減少比と仮想環境消費面積の関係	15
Fig. 3-4 事象の因果関係のイメージ(矢印は抑制または促進を表す)	18
Fig. 3-6 アンケートシート	22
Fig. 3-7 海洋隔離なし時として提示したシナリオ(A1F1)	23
Fig. 3-8 550ppm 安定化として提示したシナリオ	23
Fig. 5.1 $\Sigma EF / \Sigma GDP$ 1ドルあたりのエコロジカル・フットプリント(再掲)	54

1. 緒言

1.1. 本研究の背景

大気中の温室効果ガス濃度増加に伴う気候変動[1]のリスク削減が国際的課題となっている。特に二酸化炭素は海洋表層酸性化をも引き起し、生態系に大きな影響を及ぼすことが示唆されている[2]。その対策として、大規模排出源から分離・回収した二酸化炭素を海洋に隔離する方法(二酸化炭素海洋隔離)が提案されている。二酸化炭素海洋隔離のベネフィットとして"海洋表層酸性化の緩和"、"海洋の炭素固定プロセスの人為的な加速"の 2 点があり、実現した場合、大西洋では 24Gt-C、太平洋では 60Gt-C という大量の二酸化炭素を大気中から深海へと隔離することが可能であるとされている。しかし、そのリスクとして"二酸化炭素暴露に伴う深海生物への影響"が指摘されている[3]。そのため、二酸化炭素海洋隔離の環境影響評価モデルの構築が財団法人地球環境産業技術研究機構を中心に二酸化炭素海洋隔離の技術開発と同時に行われている[4]。

しかし、海洋だけでなく全ての生態系には非定常性と不確実性が潜んでおり、仮に研究が進んだとしても生態系の全てを解明することは困難である。このような不確実性を含んだ限られた情報のなかで、意思決定をする際に重要な考え方として、順応的管理(adaptive management)がある[5]。これは、管理対象の非定常性と不確実性を前提に、政策の実行を順応的な方法でおこない不測の事態に備えるものである。

この考え方は、次のような手順で、環境影響評価指標についても適用することが可能である。

1. 現時点で得られる情報を用いて算出した環境影響評価指標に基づいて意思決定を行う。
2. 意思決定にも基づいてある技術を実行する。
3. 実行後に得られた情報を用いて環境影響評価指標の修正を行う。
4. 修正に基づいて順応的に意思決定を変更する。

一方、地球温暖化や海洋表層酸性化の緊急性や、省エネ・新エネなどの普及速度などを考慮すると、現時点の限られた情報下でも、二酸化炭素海洋隔離のベネフィット、リスクを評価し、実施の判断を必要性が高まりつつある。そして、その評価方法として、順応的手法に基づいた包括的環境影響評価指標の開発が求められている。

1.2. 既往の研究

環境と経済が調和した持続可能な社会を目指すためには、日常に利用する製品・サービスの利便性(ベネフィット)の裏には、環境負荷(リスク)があるということを意識しつつ経済活動を行う必要がある。ベネフィットは金銭的利益等で示すことができるが、リスクについては環境負荷が与える影響の範囲が広くかつ因果関係が複雑な場合が多く、評価対象を絞った上で何らかの指標に統合して表現したほうがわかりやすい。以上のような背景から、環境影響評価指標が数多く提案されてい

る(Table 1-1)。

Table 1-1 統合的環境影響評価指標

種類	特徴	指標例
代替指標	環境影響は直接求めず、それに代替する指標で環境影響を評価。	Ecological Footprint
目標との距離を用いた指標	現状と目標(環境基準値等)との乖離の大きさを環境への影響を評価。	JEPIX : Environmental Policy Priorities Index for Japan, Eco-Indicator95, Eco scarcity
経済評価指標	環境負荷回避に必要な費用で評価、もしくはエンドポイントでの環境影響量を経済価値で評価。	LIME : Life cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling, EPS :Environmental Priority Strategy
パネル法	専門家や一般消費者によるアンケート等で環境影響を価値付けして評価。	Eco-Indicator 99

文献[6]より作成。

以下に、統合的指標の利点、欠点(課題)[6]について示す。

利点

- 直感的に理解可能
- 比較が容易
- トレードオフ関係が少ない
- 他の指標との複合的な利用が可能。

欠点(課題)

- 不確実性、信頼性の問題
- 前提条件を無視することで誤解される可能性

これらの欠点から、環境影響評価指標の利点や存在そのものを否定する意見もあるが、環境に関する意思決定を行う際の判断材料としての環境影響評価指標の重要性は高まってきており、同時に、欠点を改善する取り組みが、それぞれの指標で行われている。しかし、表層及び深層の海洋酸性化という環境影響が考慮されていないため、これらの指標をそのまま海洋隔離に適用することはできないため、新たな評価手法の開発が急がれている。

1.3. 本研究の目的

本研究は、日本船舶海洋工学会 海洋の大規模利用に対する包括的環境影響評価委員会 (IMPACT 委員会)によって提案されているエコロジカル・フットプリントと環境リスクの概念を統合した環境影響評価指標 *III* (Inclusive Impact Indicator, Triple I)の枠組み[7]に基づいて、二酸化炭素海洋隔離の生態リスクと人間リスクを考慮した指標を算出し、今後の、指標開発及び技術開発の議論の一助とすることを目的とする。

1.4. 本論文の構成

2 章では、日本船舶海洋工学会 IMPACT 委員会によって提案されている環境影響評価指標 *III* の枠組みについて説明する。3 章ではリスクの構成要素であるハザードを算出するための Species Area Relationship (SAR)に基づく仮想環境改変面積の式を導出する。また、専門家アンケート及びクロスインパクト法の説明を行う。そしてアンケート解析結果とともに算出されたリスクについても整理を行う。4 章では *III* の各項の算出を行い、*III* を算出する。また、いくつかのパラメータを用いて解析を行う。最後に 5 章にて結論及び課題を述べて、終わる。

2. III (Triple I、トリプル I)

2.1. III - Inclusive Impact Indicator

III (Inclusive Impact Indicator, triple III)は、日本船舶海洋工学会 IMPACT 研究委員会によってその枠組みが提案された環境影響評価指標である。次式に III の構成を示す。

$$III = \Delta EF + \alpha \Delta ER + \frac{\sum EF}{\sum GDP} (\beta \Delta HR + \Delta C) \quad (2-1)$$

III の各項は、現状とその技術を適用した場合の差という形式をとっている。ここで EF はエコロジカル・フットプリント、 α は EF-生態リスク換算係数、ER は生態リスク、 $\sum EF / \sum GDP$ は世界の総 EF と総 GDP の比 (EF-経済価値換算係数)、 β は経済価値-人間リスク換算係数、HR は人間リスク (健康リスク、社会資産へのリスク)、C はコストとベネフィットである。III は負の値であればその技術は有効、正の値であれば何らかの改善が必要であるということを意味している。

$\sum EF / \sum GDP$ つまり 1ドルあたりのエコロジカル・フットプリント消費量の値を 1961～2003 年の統計データに基づいて年毎に算出すると、以下ようになる。

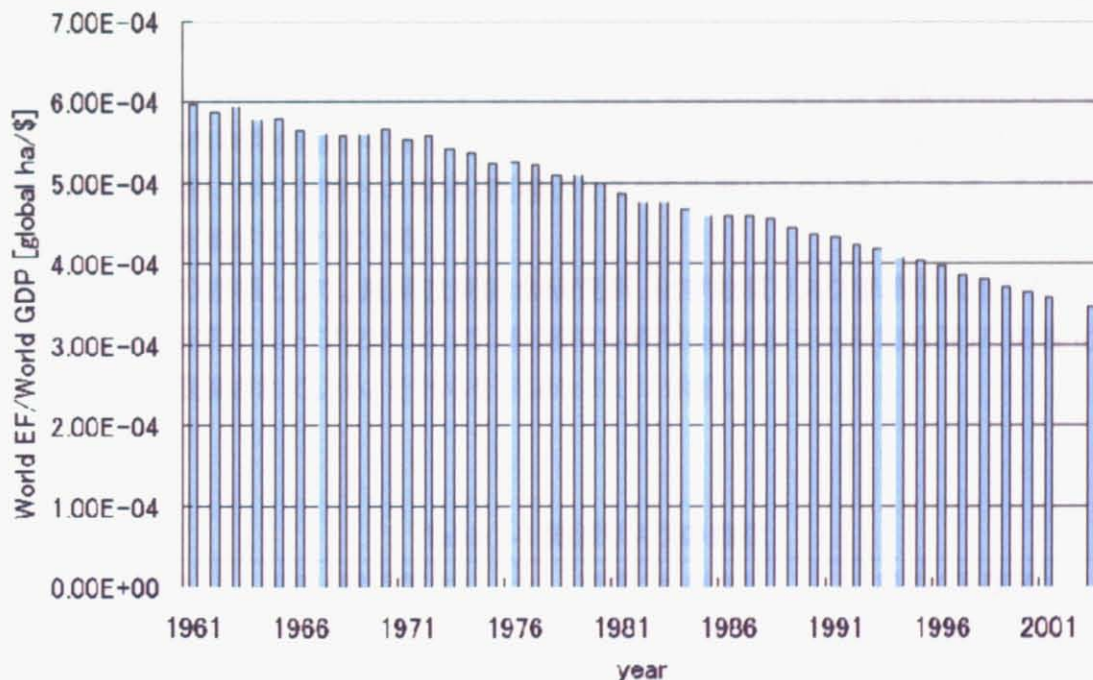


Fig. 2-1 $\sum EF / \sum GDP$ 1ドルあたりのエコロジカル・フットプリント

(2002 年は全世界の消費エコロジカル・フットプリントが算出されていないため、空白。)

III では、将来の HR、C を現在価値に置き換えて算出するために、 $\sum EF / \sum GDP$ として最新の値を用いる。なお、2007/01/29 現在 $\sum EF / \sum GDP$ の値は円換算で、 $2.8E-06$ [gha/yen] である。

2.2. エコロジカル・フットプリント(EF)

エコロジカル・フットプリントは、カナダのブリティッシュ・コロンビア大学の Wackernagel らによって開発され、近年世界中で用いられはじめている環境影響評価指標である[1]。経済活動に伴う生態系の踏みつけ面積を、食糧を得るための農地面積、二酸化炭素を吸収するための森林面積、漁業資源を得るための海面面積などを足し合わせることで求める。III において二酸化炭素海洋隔離に伴う EF は、分離回収、輸送過程で大気中に排出される二酸化炭素のエコロジカル・フットプリントと、海洋隔離によって削減された二酸化炭素のエコロジカル・フットプリントから算出される。

リスク

リスクとは、不確かな危険性を、定量的に表現したものであり、ハザードの大きさ×エンドポイント(どうしても避けたいこと)の発生確率で定義される。現在に対する影響だけでなく将来に対する影響もリスクとして考慮すべき項目として挙げられている。

2.2.1. 生態リスク(ER)

長年に渡って自然に形成された生態系から人間が受ける恩恵(生態系サービス)は、人間が生存するために必要不可欠であるため、生態系破壊により生態系サービスを失った場合、人間は損失を被ることになる。また、直接利用していない生態系を破壊した場合も、直接利用している生態系との関連性や未知の利用価値を考慮すると、人間は将来的になんらかの損失を被ることになる。このような生態系破壊に伴う人間への直接・間接のリスクを生態リスクと呼ぶ。近年、その評価手法について、様々な提案がなされている。

生態リスク評価の指標として、産業技術総合研究所 化学物質リスク管理研究センター 中西準子センター長らの研究グループ[2]によって、絶滅待ち時間(絶滅までの平均時間) T の変化量に基づく3つの指標が提案されている。それらを、Table 2.1 に示す。

Table 2-1 絶滅リスクの指標

提案者	松田(横浜国大)	巖佐(九州大)	田中(国環研)
指標	$\Delta(1/T)$	$\Delta(\log T)$	ΔT
意味	絶滅確率	T の対数の減少量	T の減少量
対象種	希少種	安定種:高密度	安定種:低密度

出典:[2]

中西は生態リスク評価に、種の絶滅リスク評価を用いることにした理由として、以下の4点をあげている[3]。

多くの人が「絶滅を回避したい」と考えるはずだから。

よほどの開発優先主義の人ではないかぎり、積極的に種の絶滅を見過ごしたいと考えるような人はいないだろうという一般に共通すると思われる倫理観に基づいている。

異種の生態リスクの比較が可能になるから。

化学物質と開発の影響を絶滅という共通の観点から評価できるという意味である。これは統合的環境影響指標の利点にも合致する。

資源の持続的利用という目的に合致しているから。

生物を資源として捉えた場合、その生物が絶滅した場合、将来世代は利用することは不可能になる。よって絶滅を回避するように利用することで、将来世代を考慮した持続可能な利用ができる。これは、生態系サービスの概念と合致するものである。

未来影響として評価できるから。

現時点の開発や物質濃度が数年後あるいは数 10 年後にその生物個体群に対して、どれほどの影響があるのかを捉えようとする。

以上の考えに基づき、III においても、生態リスクを種の絶滅リスクとしてとらえる。

内的自然増加率に基づく絶滅リスクの算出[]

現在、主に提案されている絶滅リスクの算出を行うには、ある化学物質濃度における生物個体群の内的自然増加率の情報が必要である。一般に内的自然増加率は、

$$r = \ln \lambda \quad (2-2)$$

としてあらわされる。⁽³⁾ ここで λ は次に示すレスリー行列 L の最大固有値である。

ある年齢構造をもつ生物個体群の t 年目の 1, 2, 3, ... 歳の個体数を $N_{t,1}, N_{t,2}, N_{t,3}, \dots$ 、 a 歳の翌年までの生存率 P_a 、 a 歳のメス 1 個体あたりの繁殖率 m_a 、生後 1 歳までの生存率 P_0 、最大年齢 A 歳とすると、次のような関係が成り立つ。

$$N_{t+1} = L \cdot N_t \quad (2-3)$$

$$L = \begin{bmatrix} m_1 P_0 & m_2 P_0 & m_3 P_0 & \cdots & m_{A-1} P_0 & m_A P_0 \\ P_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & P_2 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_3 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & P_{A-1} & 0 \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

遷移行列 L はレスリー行列と呼ばれ、 L の最大固有値 λ には以下のような性質がある。

$\lambda > 1$: 個体群の個体数が増加する。

$\lambda < 1$: 個体群の個体数が減少する傾向にあり、絶滅に至る場合があることを意味する。

$\lambda = 1$: 個体群の個体数が増加も減少もしない。

よって、(1)式を実際に動かしていくことでその個体群が、何年後に絶滅するかどうかの存続時間 T がわかる。そして $1/T$ を絶滅確率と定義することで、定量的に絶滅リスクを評価できる。

しかし、現在、深海生物個体群に対する二酸化炭素の暴露実験は行われておらず、内的自然増加率を特定することは困難であり、この方法を用いて、二酸化炭素海洋隔離に伴う種の絶滅リスクをもとめることは現時点では不可能であるといえる。

本研究における生態リスク算出手法

ここで、リスクの定義を再確認すると、リスク＝発生確率×ハザードの大きさであることから、エンドポイントに該当するある事象の発生確率とハザードの大きさをもとめることができれば、リスクを算出できることになっていることがわかる。そこで本研究では、エンドポイントの発生確率を、専門家アンケートを用いた準定量的手法であるクロスインパクト法を用いて算出し、新たに考案した生物種数減少率と仮想環境改変面積の関係式に掛け合わせることで、生態リスクを算出することとした。 III では、生態リスクを面積に変換する α が必要とされているが、ここではハザードとして仮想環境改変面積を用いるため、 α を独立して定義する必要はない。本研究における生態リスクの算出方法については次章で詳しく説明する。

2.2.2. 人間リスク(HR)

人間リスクは、健康リスク、社会資産へのリスクから構成される。健康リスクとしては、化学物質の吸引・摂取によって直接的に受ける健康被害、環境変化による感染症の増減、社会資産へのリスクとしては資源枯渇などがあげられる。

本研究では、二酸化炭素海洋隔離の生態リスクに主眼を置いているため、すべての人間リスクについて、個別に発生確率とハザードの大きさ同定することはせず、経済評価指標である LIME によって求めた^[1]。なお、LIME には III における β (経済価値-人間リスク換算係数) に該当するものとして、コンジョイント分析によって求められた単位被害量当たりの経済価値が算定されている。

2.3. C (コスト・ベネフィット)

C は金銭的なコスト及びベネフィットを意味し、

$$C = Cost - Benefit \quad (2-5)$$

という形式とする。

二酸化炭素海洋隔離においては、 $Cost$ は二酸化炭素海洋隔離の単位隔離量当たりのコストとする。また、 $Benefit$ は、隔離によって削減された(大気中に放出されなかった)二酸化炭素量の IPCC インベントリにおける取り扱いが決まっていないが、二酸化炭素排出権取引における売却価格の合計とする。

3. 生態リスク(ER)の算出

本章では、まずはじめに、新たに考案した、仮想環境改変面積の導出方法について説明する。これはリスクの構成要素であるハザードとして用いる

次に、専門家アンケート分析によって、エンドポイント事象である生物多様性の減少が発生する確率を算出を行う。

最後に、深層、沿岸、表層について、海洋隔離なしの場合、ありの場合についてリスクの算出を行い、仮想環境改変面積を基準に場合わけを行い、いくつかの例について次章の III の算出に用いる ΔER を定めた。

3.1. Species Area Relationship (SAR)に基づく仮想環境改変面積

生息地損失による種数の減少の予測に用いられる Species Area Relationship の関係式から、環境改変前後の種数減少比を仮想的な環境改変面積に変換する手法を考案した。この手法を用いると、面的な開発による影響だけではなく、空間的な開発や汚染物質の拡散に伴う影響による影響前後の種数の減少がわかれば、エコロジカル・フットプリントに利用しうる仮想的な面積消費を求めることができる。

3.1.1. Species Area Relationship (SAR)

多数の観測結果から生物種数 S と生息地面積 A の間には次のような関係があることがわかっている[1]。

$$S = c A^z \quad (c, z: \text{constant}) \quad (3-1)$$

この関係は、H.C. Watson が、1835 年に発見したとされ、グレートブリテン島での観察結果を、面積と植物種数の対数をとったものをグラフにプロットしたものが 1885 年に発表されている[2]。

近年では、様々な観測結果から、SAR の有効性が確認され、生息地損失に伴う減少種数の予測に用いられており、気候変動による生息地損失[3]、面的な開発による生息地損失[4]などによる生物多様性への影響を予測する際などに頻繁に用いられている。

3.1.2. Species Area Relationship (SAR)に基づく仮想環境改変面積の算出手法の導出

(3-1)式において環境改変前を

$$S_{original} = c A_{original}^z \quad (3-2)$$

環境改変後を

$$S_{new} = c A_{new}^z \quad (3-3)$$

とし、(3)式を(2)式で割ると

$$S_{new} / S_{original} = (A_{new} / A_{original})^z \quad (3-4)$$

両辺の対数をとって z で割ると、

$$(S_{new} / S_{original})^{1/z} = A_{new} / A_{original} \quad (3-5)$$

両辺に $A_{original}$ をかけると、改変後の面積は、

$$A_{new} = A_{original} (S_{new} / S_{original})^{1/z} \quad (3-6)$$

よって、ある地域の種数が環境改変によって $S_{original}$ から S_{new} に変化した際にその地域で改変された面積 ΔA は、

$$\begin{aligned} \Delta A &= A_{original} - A_{new} \\ &= A_{original} - A_{original} (S_{new} / S_{original})^{1/z} \\ &= A_{original} (1 - (S_{new} / S_{original})^{1/z}) \end{aligned} \quad (3-7)$$

とあらわすことができる。つまり、改変前の生息地面積 $A_{original}$ と改変前後の種数の比 $S_{new} / S_{original}$ がわかれば仮想環境改変面積 ΔA を推定できる。

仮に $A_{original}$ を1とおき、 ΔA と $S_{new} / S_{original}$ の関係をプロットすると、Fig.3-1 のようになる。なお、 z は経験的に 0.25 とされている[3][4]。この概念を用いると、ある環境に人間が手を加えた際に 16% の種数減少が起こると対象面積の約 5 割、40% の種数減少で対象面積の約 9 割を消費（開発）しているのと等しいことがわかる。これにより特に、今まで金銭換算（経済評価）では統一して表現できなかった、人間にとってほとんど利用価値がない生態系（直接的な生態系サービスを提供しない環境下の生態系）そのものの価値を土地面積の変化として換算することが可能になる。つまり、ここで得られる ΔA は、簡易な生態リスク指標として利用可能である。なお、 ΔA は実際の改変面積とは異なる可能性が高い。また、評価対象区域にあたる $A_{original}$ の設定の際に重複をさけるように注意する必要がある。

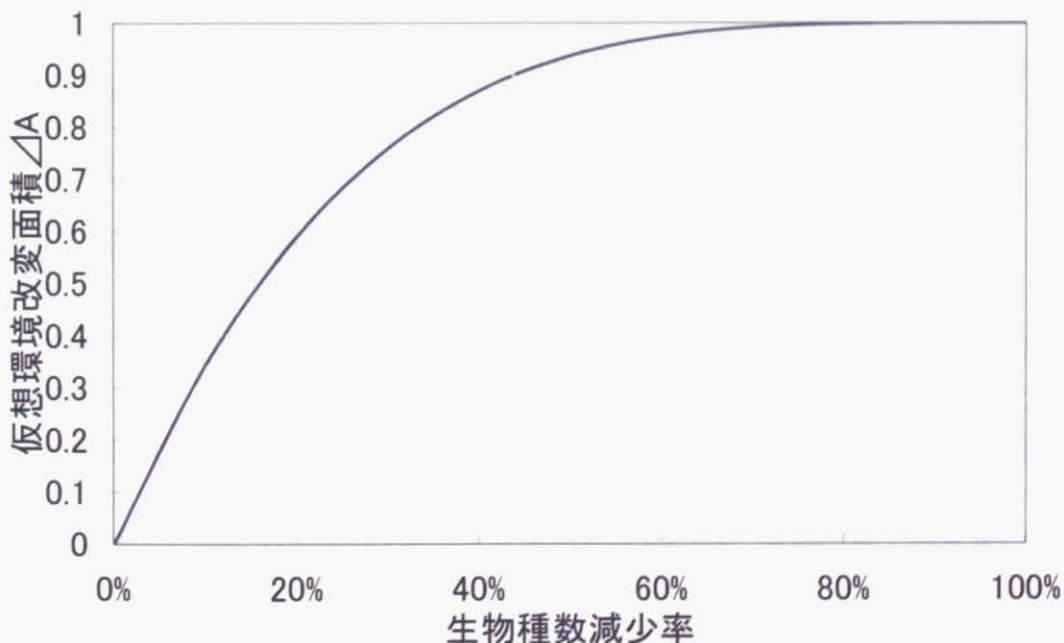


Fig. 3-1 生物種数減少率と仮想環境改変面積の関係

今回、海を深層（隔離対象海域）、外洋表層、沿岸域の3つにわけて考えることにし、それぞれの面積を次のように与えた。またそれぞれの値を(3-9)式に代入して種数減少率を与えると Fig.3-2 のようになる。

Table 3-1 各海域の面積

海域	初期面積[ha]
深層(30000km ² × 527 サイト*)	1.6E+09
沿岸域(全海洋面積の 7.6%)	2.7E+09
外洋表層(全海洋面積から沿岸を引いた値)	3.6E+10
全海洋面積	3.9E+10

* RITE のウェブサイトで公開されている統合評価モデル DNE21[5]の入力条件にある、隔離開始後 75 年間の全世界の二酸化炭素海洋隔離量から年間平均隔離量 2.7E+10 [t-CO₂/year]を算出し、それを1隔離サイトの年間隔離量で割って求めた。

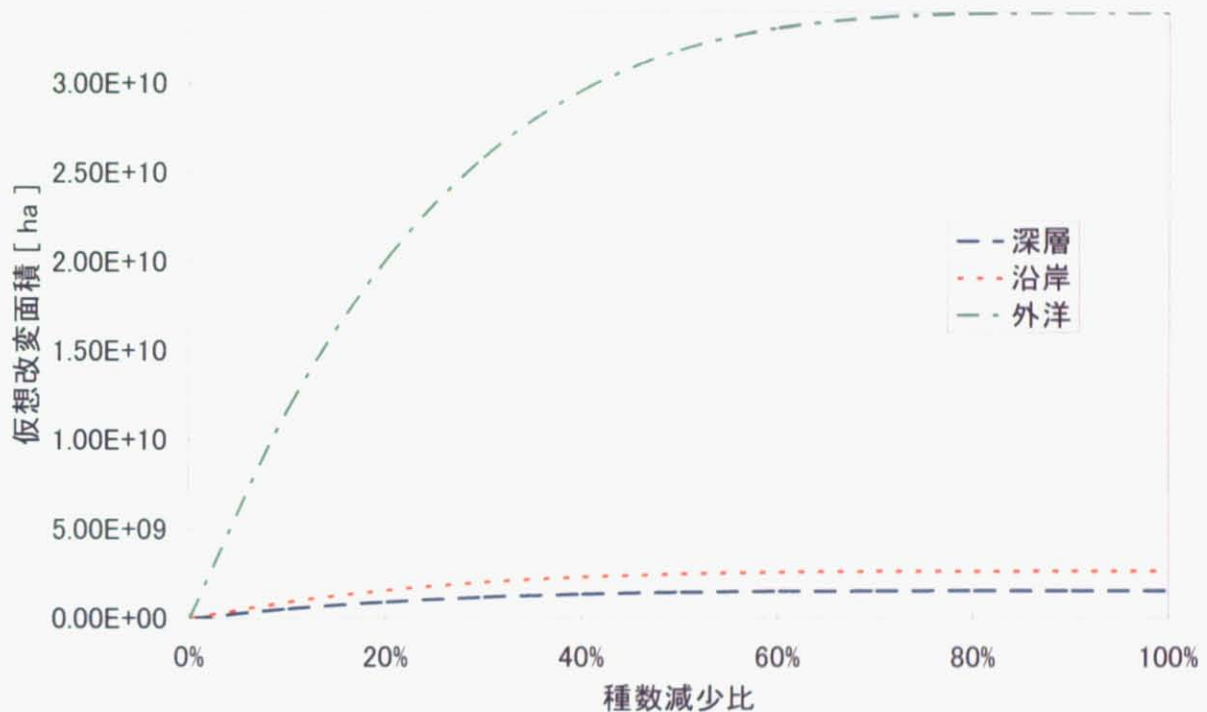


Fig. 3-2 各海域における生物種数減少比と仮想環境消費面積の関係

ここで、面積に関してエコロジカル・フットプリントで用いられている、等価係数を用いる場合を考える。等価係数とは、土地生産性の高さに応じて土地面積を重み付けし、エコロジカル・フットプリントとして合算するための係数である[6]。生産性が高い土地分類ほどこの係数は高く、土地生産性が低い土地は小さい。等価係数は、世界共通係数であり、毎年土地分類別に更新されている。しかし、現在のエコロジカル・フットプリントでは外洋は生産がないとみなし、等価係数 x は存在しない。

Table 3-2 沿岸の等価係数を用いて外洋の等価係数を算出

	沿岸・大陸棚など	沿岸・大陸棚など以外
等価係数[gha/ha]	0.36	x
面積[億 ha]	20	360
世界生物生産力[億gha]	7.2	y
海洋の全生産に占める割合	0.95	0.05

そこで既存の沿岸域の等価係数から Table 3-2 に示した外洋の等価係数 x を求めることにする。
沿岸・大陸棚の世界生物生産力は、

$$20[\text{億 ha}] \times 0.36[\text{gha/ha}] = 7.2[\text{億 gha}] \quad (3-8)$$

全世界の生産力は沿岸・大陸棚が海洋の全生産力に占める割合が 0.95 より

$$7.2[\text{億 gha}] \div 0.95 \div 7.6[\text{億 gha}] \quad (3-9)$$

よって外洋の世界生物生産力 y は、

$$y = 7.6[\text{億 gha}] \times 0.05 = 0.38[\text{億 gha}] \quad (3-10)$$

ゆえに外洋の等価係数 x は、

$$x = 0.38[\text{億 gha}] \div 360[\text{億 ha}] = 1.1\text{E}-3 [\text{gha / ha}] \quad (3-11)$$

この等価係数(沿岸 0.36、外洋・深層 $1.1\text{E}-3$)を用いて、仮想環境改変面積(Fig.3.2)を変換すると、Fig.3-3 のようになる。

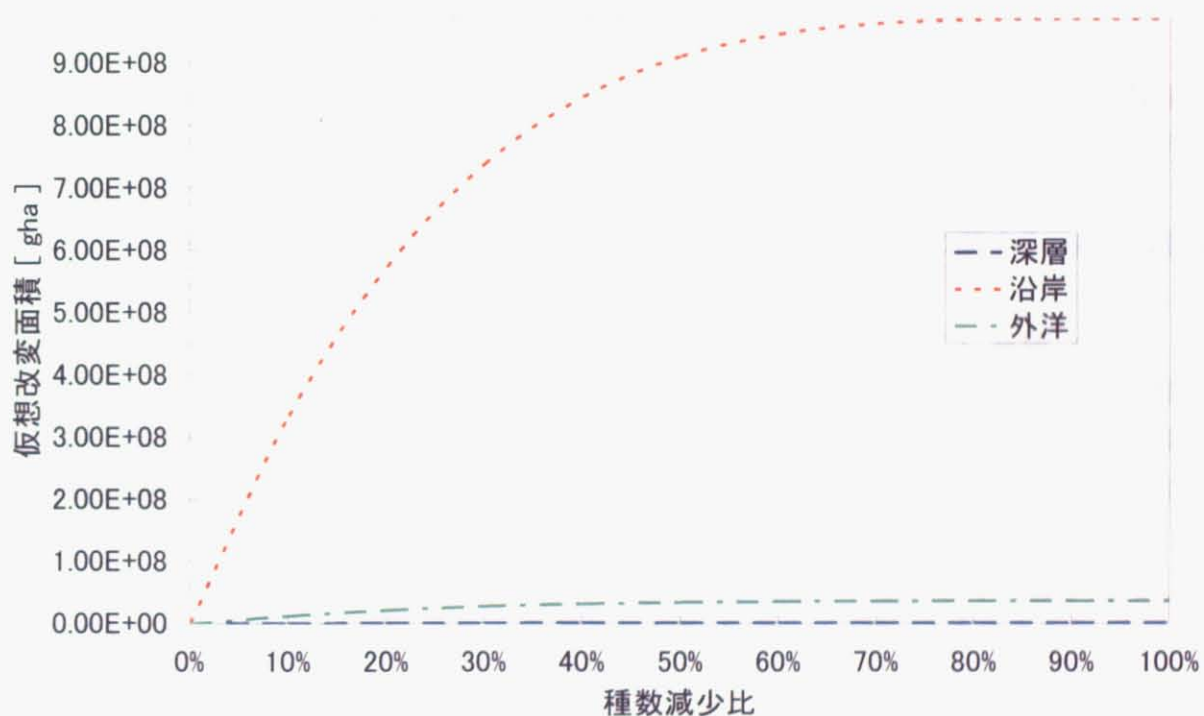


Fig. 3-3 等価係数を用いた場合の各海域における生物種数減少比と仮想環境消費面積の関係

等価係数とは生物生産性の高さによって土地を重み付けしたものであるため、等価係数を持ちいることで沿岸と外洋の面積の大ききの順位が逆転した。これは、生物生産性という観点から評価するためには、必要なことではあるが、生態リスクを考えた場合、生産性の少ない海域(外洋・深層)の生物の価値を過小評価してしまうことにつながる可能性がある。そこで、本研究では、生態リスクに関しては生物生産性による重み付けは行わず、面積をそのまま同一の価値のあるものとする。

3.2. クロスインパクト分析による生物多様性の減少確率の算出

3.2.1. クロスインパクト分析について

クロスインパクト分析は、技術予測手法として 1960 年代から 1970 年代にかけて盛んに開発が進んだ手法で、対象とする事象の生起確率や事象間の相互影響に関する定量的なデータが存在しない場合に、専門家の意見をデータとして代用する準定量的手法である。また、確率として表現できる対照ならば技術予測以外にも適用可能であるとされている[7]。

また、解析のプロセスに、専門家が推定した確率を、確率論の数学的条件に満たすように修正するプロセスを備えていることが特徴であり、単純に専門家の予測を集計するだけでは得られない高次の情報を得ることができる。分析手法については 3.2.3 で説明する。

3.2.2. 事象生起とインパクトに関する専門家アンケート調査

二酸化炭素海洋隔離・海洋生物・海洋生態系に関連する専門家を対象として、二酸化炭素海洋隔離及び海洋表層酸性化に伴って発生する事象が生起する確率と事象間インパクトに関するアンケートを実施した。

まず、アンケートの対象とする事象を、二酸化炭素海洋隔離の環境影響に関する一般的な議論を参考に設定した[8]。Table 3-2 に設定した 21 個の事象を示す。

ここで対象とする生物種類は、植物プランクトン(表層のみ)、動物プランクトン、魚類、ベントス(海山、沿岸のみ)とし、最終的にエンドポイントである各海域の生物多様性の減少(絶滅確率の増加)へとイメージがつながるように事象を設定した。事象の中には、具体的な減少量などをいれると場合わけが非常に多くなり、回答者の負担となるため、事象には定量的な数値は入れず、定性的な表現にした。

また、深層と表層の環境変化を相互につなぐ事象として 20.「深層への沈降粒子の減少」と 21.「湧昇流に含まれる栄養塩の減少」を、深層でより豊富になるバクテリアの変化を考慮するために 8.「バクテリアの組成の変化」を設定した。

また、回答者の負担を少なくするために各事象が一般的にどのような因果関係を持っているかをあらかじめ Fig. 3.2 に示した図のように考え、この因果関係を中心に回答をお願いした。

つぎに、専門家アンケートを行い、事象 i が生起する確率(1次元確率) P_i 、事象 j が生起するとしたときに事象 i の生起に与えるインパクト $\alpha_{j,i}$ を得る。

Table 3-3 クロスインパクト分析の対象とした事象

事象番号	事象内容	
1	CO ₂ 海洋隔離実施	
2	大気中 CO ₂ 濃度の増加	
3	海洋深層酸性化	
4	深層	魚類の減少
5		動物プランクトンの減少
6		海山でベントスの減少
7		生物多様性の減少
8		バクテリアの組成の変化
9		深海生物の食資源の減少
10	海洋表層酸性化	
11	沿岸域	ベントスの減少
12		動物プランクトンの減少
13		植物プランクトンの減少
14		魚類の減少
15		生物多様性の減少
16	外洋表層	動物プランクトンの減少
17		植物プランクトンの減少
18		魚類の減少
19		生物多様性の減少
20	深層への沈降粒子の減少	
21	湧昇流に含まれる栄養塩の減少	

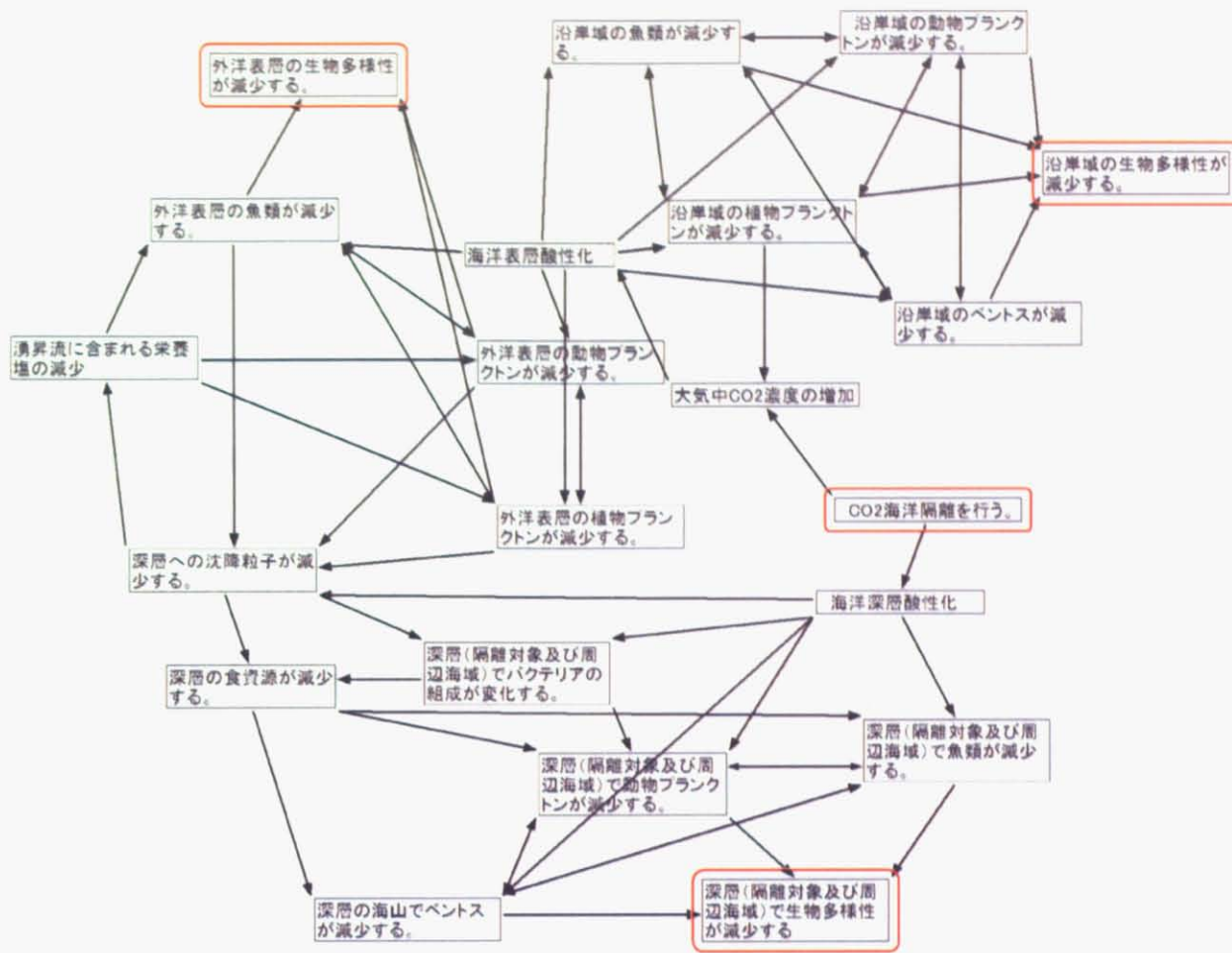


Fig. 3-4 事象の因果関係のイメージ(矢印は抑制または促進を表す)

3.2.3. 分析方法

アンケートから得られた P_i と $\alpha_{j \rightarrow i}$ を用いて、事象 i が将来、生起する確率 $P(i)$ と期間当初に事象 j が生起したとするとときに i が生起する確率 $P(j \rightarrow i)$ を求める[9]。

$$P(i) = P_i \times \prod_m (1 + \alpha_{m \rightarrow i}) \quad (0.1 \leq |\alpha_{m \rightarrow i}|) \quad (3-12)$$

m : 着目してるグループより下位のグループのクロスインパクト分析の結果生起するとなった事象。

$$P(j \rightarrow i) = P(i) + \alpha_{j \rightarrow i} \quad (0 \leq |P(j \rightarrow i)| \leq 1) \quad (3-13)$$

ここで得られたインパクト確率 $P(j \rightarrow i)$ を条件付確率 $P(j, i)$ に次の手順で変換する[7]。

まず、Fig.3.4 に示すようなマルコフ連鎖モデルにおいて、2 事象 e_i, e_j を考え、時刻 t で、各状態 $E_1(0,0), E_2(1,0), E_3(0,1), E_4(1,1)$ に存在する確率を $P_1(t), P_2(t), P_3(t), P_4(t)$ とする。また微小時間内には 2 つの事象が同時に生起することはないと仮定する。

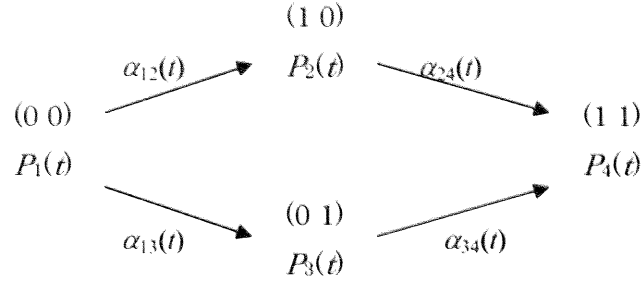


Fig. 3-5 2 事象の場合の遷移図

E_k から E_l への遷移確率を $\alpha_{kl}(t)$ とすると、各状態の存在確率 $P_k(t)$ は次の微分方程式で表せられる。

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = -\{\alpha_{12}(t) + \alpha_{13}(t)\}P_1(t) \quad (3-14)$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = \alpha_{12}(t)P_1(t) - \alpha_{24}(t)P_2(t) \quad (3-15)$$

$$\frac{dP_3(t)}{dt} = \alpha_{13}(t)P_1(t) - \alpha_{34}(t)P_3(t) \quad (3-16)$$

$$\frac{dP_4(t)}{dt} = \alpha_{24}(t)P_2(t) + \alpha_{34}(t)P_3(t) \quad (3-17)$$

ここで、 $\alpha_{kl}(t)$ を

$$\alpha_{kl}(t) = \frac{q_{kl}}{1 - q_{kl}} \quad (3-18)$$

と仮定し、3-12～3-15 式に代入して、連立微分方程式を解くと、次の解は、

$$P_1(t) = P_1(0)(1 - q_{12}t)(1 - q_{13}t) \quad (3-19)$$

$$P_2(t) = P_2(0)(1 - q_{24}t) + \frac{q_{12}}{q_{24}}P_1(0)\left[q_{13}t - \left(1 - \frac{q_{13}}{q_{24}}\right)\ln(1 - q_{24}t)\right](1 - q_{24}t) \quad (3-20)$$

$$P_3(t) = P_3(0)(1 - q_{34}t) + \frac{q_{13}}{q_{34}}P_1(0)\left[q_{12}t - \left(1 - \frac{q_{12}}{q_{34}}\right)\ln(1 - q_{34}t)\right](1 - q_{34}t) \quad (3-21)$$

$$P_4(t) = 1 - P_1(t) - P_2(t) - P_3(t) \quad (3-22)$$

ここで期間 T における事象 e_i の生起確率 $P(i)$ は、初期条件

$$P_1(0) = 1, \quad P_2(0) = P_3(0) = P_4(0) = 0 \quad (3-23)$$

の下での $P_2(T) + P_4(T)$ によって与えられ、

$$P(i) = 1 - (1 - q_{12}T)(1 - q_{13}T) - \frac{q_{13}}{q_{34}} \left[q_{12}T - \left(1 - \frac{q_{12}}{q_{34}} \right) \ln(1 - q_{34}T) \right] (1 - q_{34}T) \quad (3-24)$$

同様に、

$$P(j) = 1 - (1 - q_{12}T)(1 - q_{13}T) - \frac{q_{13}}{q_{24}} \left[q_{13}T - \left(1 - \frac{q_{13}}{q_{24}} \right) \ln(1 - q_{24}T) \right] (1 - q_{24}T) \quad (3-25)$$

また、 $P(B \rightarrow A)$ は初期条件

$$P_3(0) = 1, \quad P_1(0) = P_2(0) = P_4(0) = 0 \quad (3-26)$$

の下での $P_4(T)$ に等しいので、

$$P(j \rightarrow i) = q_{34}T \quad (3-27)$$

同様に

$$P(i \rightarrow j) = q_{24}T \quad (3-28)$$

次に、専門家の回答値 $P(i)$ 、 $P(j \rightarrow i)$ などから、 q_{kl} を逆算する。ここでは、一般性を持たせるため、 $T=1$ とする。 q_{34} 、 q_{42} は(3-24)、(3-25)から求めることができる。ここで(3-21)、(3-22)を変形すると、

$$q_{12} + Q_{34}q_{13} - S_{34}q_{12}q_{13} = P(i) \quad (3-29)$$

$$Q_{24}q_{12} + q_{13} - S_{24}q_{12}q_{13} = P(j) \quad (3-30)$$

となる。ただし、

$$Q_{34} = 1 + \ln(1 - q_{34}) \cdot (1 - q_{34}) / q_{34} \quad (3-31)$$

$$Q_{24} = 1 + \ln(1 - q_{24}) \cdot (1 - q_{24}) / q_{24} \quad (3-32)$$

$$S_{34} = 1 + \{q_{34} + \ln(1 - q_{34})\} (1 - q_{34}) / q_{34}^2 \quad (3-33)$$

$$S_{24} = 1 + \{q_{24} + \ln(1 - q_{24})\} (1 - q_{24}) / q_{24}^2 \quad (3-34)$$

である。(3-26)、(3-27)より、 q_{12} を消去して、

$$(Q_{34}S_{24} - S_{24})q_{13}^2 + \{S_{24}P(i) - S_{34}P(j) + Q_{24}Q_{34} - 1\}q_{13} + P(i)Q_{24} - P(j) = 0 \quad (3-35)$$

以上で q_{kl} をすべて確定し、これらを用いて、以下の初期条件、

$$P_1(0) = 1, \quad P_2(0) = P_3(0) = P_4(0) = 0 \quad (3-36)$$

下での $P_4(T)$ として、 $P(i, j)$ を求める。

最後に、得られた $P(i)$ 、 $P(i, j)$ を確率論的に整合な値 $P^*(i)$ 、 $P^*(i, j)$ に修正する。

$$\theta'_k = \begin{cases} 1 & : \text{事象 } i \text{ がある状態 } k \text{ で生起の場合} \\ 0 & : \text{事象 } j \text{ がある状態 } k \text{ で非生起の場合} \end{cases} \quad (3-37)$$

$$i = 1, 2, \dots, 21 \quad k = 1, 2, \dots, 2^{21}$$

とし、ある状態 k に対する n 次結合確率 π_k を変数として次の非線形最適化を解く。

$$\min. \sum_i^n \{P^*(i) - P(i)\}^2 + \sum_{i < j}^n \{P^*(i, j) - P(i, j)\}^2 \quad (3-38)$$

ここで

$$P^*(i) = \sum_{k=1}^N \theta_k^i \theta_k^j \pi_k \quad (3-39)$$

$$P^*(i, j) = \sum_{k=1}^N \theta_k^i \theta_k^j \pi_k \quad (3-40)$$

$$\sum_{k=1}^N \pi_k = 1 \quad (3-41)$$

$$\pi_k \geq 0 \quad (3-42)$$

である。

こうして得られた生物多様性に関する事象の P^* を、ハザードと掛け合わせ、生態リスクを算出する。算出結果については3. 4に示す。

3.3. 専門家アンケート調査結果

回答者は、二酸化炭素海洋隔離についての知識を持っている二酸化炭素海洋隔離・海洋生物・海洋生態系に関連する専門家 11 人である。

Table 3-4 回答者の属性と人数

属性	RITE Project*関係者	RITE Project 関係者以外	
専門分野	海洋生物学 4 名	海洋物質循環 2 名	
	海洋性体系モデル 1 名	海洋生物学 2 名	
	海洋微生物生態学 1 名		
	海洋化学 1 名		
合計	7 人	4 人	総計 11 人

RITE Project* : RITE 二酸化炭素海洋隔離プロジェクト

3.3.1. アンケートの構成

回答者に配布したアンケートの構成について説明する。Fig. 3-6 が専門家に配布したアンケートシート(Excel シート)である。

問. 1 事象の生起に関する設問

① 海洋隔離や他の温暖化対策を実施しないで、約100年後に大気中CO₂濃度が1000 ppmになるシナリオ(資料①シート)を想定した場合、② 海洋隔離や他の温暖化対策を実施して、約100年後に大気中CO₂濃度が550 ppm安定化させるシナリオ(資料②シート)で海洋隔離開始後を想定した場合、各事象の生起はどのようになるとおもいますか？1～6から選択して、下の表の緑色のセルに入力してください。(セルをクリックするとプルダウンメニューが表示されますのでそこから数値を選択していただくことも可能です。)

深層…隔離対象及び周辺海域の深層 沿岸域、外洋表層…CO₂海洋隔離からは直接的な影響を受けないと仮定。

確実に生じる 生じると思われる どちらかといえば生じるかもしれない どちらかといえば生じないかもしれない 生じないと思われる 確実に生じない

1 2 3 4 5 6

問. 2 事象間の影響に関する設問

問. 1の回答を踏まえて、影響事象が起きた場合、被影響事象をどれくらい抑制あるいは促進すると思いますか？海洋隔離なしの場合（オレンジ色のセル）と海洋隔離ありの場合（黄緑色のセル）について、影響度（-4～4）の数値を入力してください。
無回答のセルは必ず空白にしてください。また、斜線がはいっている白いセルに影響度の数値を入力することも可能です。
回答後に問. 1の回答を修正していただいても結構です。

影響度

非常に強く抑制 かなり抑制 ある程度抑制 わずかに抑制 影響なし わずかに促進 ある程度促進 かなり促進 非常に強く促進

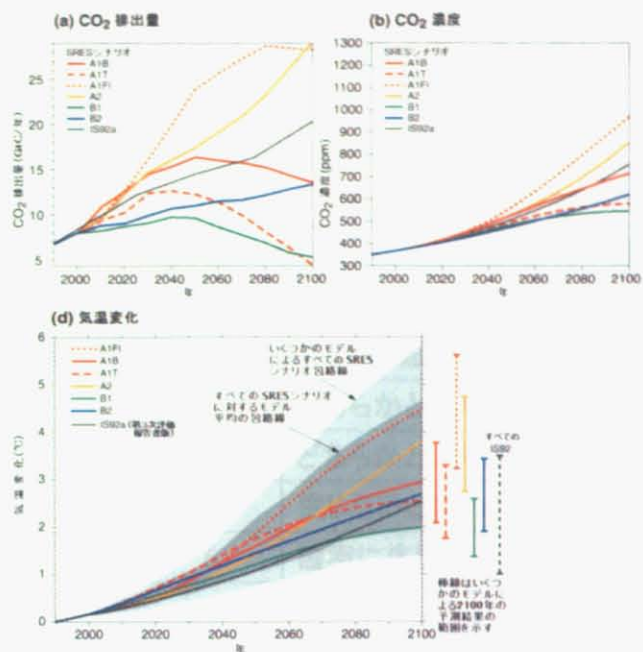
-4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4

事象番号		被影響事象(2～21まであります。)																				
事象番号	問. 1 ①	問. 2 ②	2 大気中CO ₂ 濃度の増加	3 海洋深層酸性化	4 魚類の減少	5 トンブの減少	6 スの減少	7 減少多様性の減少	8 組成の減少	9 バクテリアの減少	10 資源の減少	11 海洋表層酸性化	12 少ベントスの減少	13 トンブの減少	14 トンブの減少	15 魚類の減少	16 減少多様性の減少	17 トンブの減少	18 トンブの減少	19 魚類の減少	20 減少多様性の減少	21 子深層への沈降粒の減少
CO ₂ 海洋隔離実施の有無	あり	なし	あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり	あり
1 CO ₂ 海洋隔離実施																						
2 大気中CO ₂ 濃度の増加																						
3 海洋深層酸性化																						
4 魚類の減少																						
5 トンブの減少																						
6 スの減少																						
7 減少多様性の減少																						
8 組成の減少																						
9 資源の減少																						
10 海洋表層酸性化																						
11 ベントスの減少																						
12 トンブの減少																						
13 トンブの減少																						
14 魚類の減少																						
15 減少多様性の減少																						
16 トンブの減少																						
17 トンブの減少																						
18 魚類の減少																						
19 減少多様性の減少																						
20 深層への沈降粒の減少																						
21 湧昇流に含まれる栄養塩の減少																						

Fig. 3-6 アンケートシート

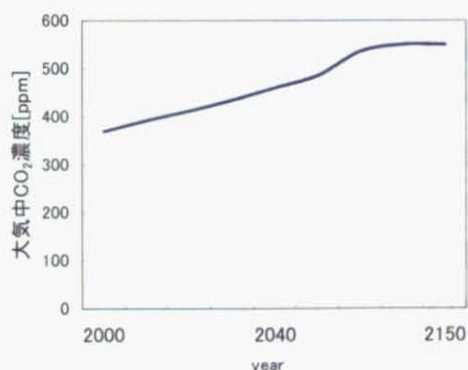
まず、問1として、事象 i が生起する確率（1次元確率） P_i を、①二酸化炭素海洋隔離を行わず約100年後に大気中二酸化炭素濃度が1000ppmになる場合(IPCC A1F1シナリオ)、Fig. 3-7)、②二酸化炭素海洋隔離(及び他の二酸化炭素削減技術)を行い550ppmになる場合(DNE21モデル[5]計算条件550ppm安定化を参考に作成、Fig. 3-7)、2つの場合について回答を求めた。事象 j が生起するとした時に事象 i の生起に与えるインパクト α_{ji} についても同様に①隔離なし、②それぞれ、回答をもとめた。なお、回答者の負担を軽減するために、因果関係が少ない事象間インパクトのセルにあらかじめ斜線をいれ、因果関係があると考えられる事象間インパクトのセルに色をつけた。なお、斜線の入ったセルにも回答できることを回答者には問題文中で説明してある。

回答者の現段階におけるより率直なリスク認知が反映されるように、前提条件として特にどのような生物影響があるかなどの情報を与えないこととした。



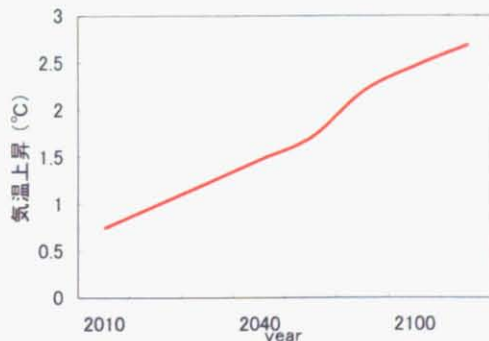
A1F1(化石燃料依存型)を参考にしてください。

Fig. 3-7 海洋隔離なし時として提示したシナリオ(A1F1)
(出典:IPCC 第三次評価報告書)



このアンケートにおいてCO₂海洋隔離とは以下のようなものを想定しています。

方式	Moving Ship(溶解希釈型)
隔離海域	300×100km
隔離深度	1000~2500m
希釈濃度	500 ppm以下(※生物に対する予測無影響濃度)
目的	大気中CO ₂ 濃度550ppm安定化(他の温暖化対策技術と併用)
隔離開始年	2075年



全球平均気温上昇(°C)

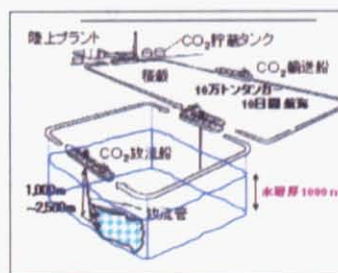


Fig. 3-8 550ppm 安定化として提示したシナリオ
(DNE 21 モデル[5]の計算前提を参考に作成。)

P_i の回答(問. 1)にあたっては、生起確率を Table.3-5 のような文章で示し、6つの選択肢から選択するという形式にした。また分析の際はそれぞれの判断表現に対応する生起確率を一様乱数で与えた。

Table 3-5 P_i の判断表現と対応させた生起確率(一様乱数)

選択肢	判断表現の目安	生起確率
1	確実に生じる。	0.9～1.0
2	生じると思われる。	0.7～0.9
3	どちらかといえば生じるかもしれない。	0.5～0.7
4	どちらかといえば生じないかもしれない。	0.3～0.5
5	生じないと思われる。	0.1～0.3
6	確実に生じない。	0.0～0.1

事象 j が生起するとしたときに事象 i の生起に与えるインパクト $\alpha_{j \rightarrow i}$ に関しても(問. 2) 同様に、Table 3-6 のように文章でインパクトを表現した。

Table 3-6 $\alpha_{j \rightarrow i}$ の意味と対応するインパクト値

選択肢	意味	インパクト $\alpha_{j \rightarrow i}$
-4	非常に強く抑制	-0.4
-3	かなり抑制	-0.3
-2	ある程度抑制	-0.2
-1	わずかに抑制	-0.1
0	影響なし	0
1	わずかに促進	0.1
2	ある程度促進	0.2
3	かなり促進	0.3
4	非常に強く促進	0.4

3.3.2. アンケートの結果

事象 i の生起する確率 P_i 、事象間インパクト(事象 j が生起するとしたときに事象 i の生起に与えるインパクト $\alpha_{j \rightarrow i}$)について、回答者全員、RITE 二酸化炭素海洋隔離プロジェクト関係者、RITE 二酸化炭素海洋隔離プロジェクト関係者以外の3つの場合に分けて、集計をおこなった。それぞれの平均、標準偏差を Table 3-6～3-20 に示した。

まず、回答者全員の集計結果について、次の Table 3-6～3-10 を見ると、深層、沿岸域、外洋表層すべてにおいて、隔離ありの方が隔離なしよりも、生物多様性の減少が起こる確率が 7, 8%低い値となっている。これは大気中二酸化炭素濃度が急激に 1000ppm へと上昇することにより引き起こ

された海洋表層酸性化(事象番号 8)の影響で、深層への沈降粒子の減少(事象番号 20)が生じ、深海生物の食資源が減少(事象番号 21)してしまうことが原因、それぞれの事象の確率及び事象間インパクトの値から読み取れる。

また、プロジェクト関係者と関係者以外の回答を比較すると、深層に関して、関係者の方が全体的に低い確率を回答している。これは、隔離なしの場合は表層酸性化の深海への影響に関して、隔離ありの場合は海洋深層酸性化の影響に関して、認識(リスク認知)に違いがあることを示唆している。特に二酸化炭素海洋隔離は極力環境への影響を最小限に止めることを前提に開発が進められているため、プロジェクト関係者にとっては、影響はあまりないという認識になっているからであろう。

Table 3-7 事象 *i* の生起する確率(回答者全員)

			平均		標準偏差	
			隔離なし	隔離あり	隔離なし	隔離あり
1	CO ₂ 海洋隔離実施		(0.00)	(1.00)	-	-
2	大気中 CO ₂ 濃度の増加		(1.00)	(1.00)	-	-
3	海洋深層酸性化		(0.00)	0.72	-	0.26
4	深層	魚類の減少	0.55	0.50	0.15	0.15
5		動物プランクトンの減少	0.53	0.50	0.12	0.13
6		海山でベントスの減少	0.50	0.50	0.16	0.16
7		生物多様性の減少	0.63	0.55	0.18	0.21
8		バクテリアの組成の変化	0.54	0.57	0.14	0.19
9		深海生物の食資源の減少	0.61	0.55	0.22	0.21
10	海洋表層酸性化		0.89	0.75	0.12	0.26
11	沿岸域	ベントスの減少	0.62	0.54	0.14	0.17
12		動物プランクトンの減少	0.66	0.56	0.16	0.19
13		植物プランクトンの減少	0.51	0.51	0.12	0.17
14		魚類の減少	0.63	0.52	0.19	0.19
15		生物多様性の減少	0.66	0.59	0.19	0.21
16	外洋表層	動物プランクトンの減少	0.70	0.56	0.13	0.19
17		植物プランクトンの減少	0.54	0.51	0.11	0.17
18		魚類の減少	0.67	0.53	0.18	0.19
19		生物多様性の減少	0.59	0.52	0.17	0.15
20	深層への沈降粒子の減少		0.63	0.52	0.12	0.15
21	湧昇流に含まれる栄養塩の減少		0.47	0.45	0.21	0.22

()内の数字は回答値ではなく固定値。

Table 3-8 事象間インパクト平均値(隔離なし・回答者全員)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1		0.10																			
2										0.25											
3																					
4					-0.02	0.03	0.10	0.06												0.04	0.06
5				0.11		0.05	0.09	0.07	0.07											0.04	0.06
6				0.08	0.05		0.08	0.06	0.08											0.04	0.07
7																					
8				0.05	0.05	0.05	0.06		0.05											0.06	0.07
9				0.13	0.12	0.11		0.09													0.04
10											0.16	0.17	0.04	0.18		0.19	0.04	0.14		0.02	
11												0.07	0.07	0.14	0.13	0.04	0.04	0.04	0.09		
12											0.14		0.01	0.19	0.14	0.04	0.06	0.09	0.07	0.09	0.08
13											0.13	0.20		0.18	0.13	0.07	0.02	0.10	0.08	0.12	0.09
14											0.02	0.01	0.04		0.12	0.06	0.02	0.08	0.07	0.08	0.06
15																					
16											0.06	0.06	0.03	0.09	0.08		-0.01	0.19	0.13	0.11	0.13
17											0.06	0.08	0.03	0.07	0.06	0.20		0.18	0.12	0.19	0.13
18											0.04	0.06	0.04	0.08	0.07	0.01	0.07		0.11	0.09	0.06
19																					
20								0.16	0.16												0.17
21											0.10	0.09	0.11	0.09	0.08	0.16	0.18	0.14	0.10	0.16	

空白は過半数以上から回答を得られなかったもの。X-I 分析では0として扱う。

Table 3-9 事象間インパクト標準偏差(隔離なし・回答者全員)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1		0.20																			
2										0.14											
3																					
4					0.15	0.10	0.10	0.10												0.10	0.11
5				0.10		0.11	0.11	0.10	0.11											0.12	0.11
6				0.10	0.11		0.10	0.11	0.10											0.10	0.13
7																					
8				0.11	0.11	0.11	0.11		0.11											0.11	0.11
9				0.12	0.13	0.15		0.14													0.12
10											0.13	0.13	0.16	0.12		0.12	0.15	0.13		0.06	
11												0.13	0.11	0.13	0.13	0.13	0.10	0.10	0.12		
12											0.14		0.16	0.15	0.13	0.10	0.11	0.14	0.11	0.14	0.14
13											0.12	0.14		0.12	0.13	0.10	0.07	0.13	0.11	0.15	0.14
14											0.17	0.18	0.15		0.13	0.10	0.04	0.11	0.11	0.13	0.14
15																					
16											0.09	0.09	0.07	0.12	0.10		0.15	0.14	0.13	0.18	0.15
17											0.07	0.11	0.07	0.09	0.07	0.13		0.13	0.13	0.14	0.15
18											0.07	0.07	0.07	0.08	0.09	0.20	0.13		0.13	0.13	0.14
19																					
20								0.12	0.12												0.16
21											0.14	0.14	0.15	0.15	0.14	0.14	0.15	0.13	0.13	0.14	

Table 3-10 事象間インパクト平均値(隔離あり・回答者全員)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1		-0.12	0.05																		
2										0.08											
3				0.05	0.07	0.09		0.15	0.04											0.06	
4					-0.01	0.04	0.11	0.11												0.05	0.08
5				0.12		0.06	0.10	0.11	0.08											0.04	0.08
6				0.07	0.06		0.09	0.10	0.08											0.04	0.08
7																					
8				0.05	0.06	0.06	0.08		0.05											0.06	0.11
9				0.11	0.12	0.13		0.12													
10											0.11	0.10	0.04	0.09		0.10	0.01	0.07		0.02	
11												0.03	0.06	0.09	0.09	0.03	0.03	0.03	0.04		
12											0.09		0.00	0.10	0.10	0.03	0.02	0.06	0.04	0.08	0.08
13											0.10	0.13		0.11	0.09	0.04	0.02	0.07	0.04	0.08	0.08
14											0.01	0.00	0.05		0.09	0.04	0.02	0.04	0.04	0.06	0.06
15																					
16											0.03	0.03	0.03	0.03	0.03			0.09	0.08	0.06	0.09
17											0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.12		0.10	0.08	0.12	0.09
18											0.01	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04		0.08	0.07	0.05
19																					
20								0.14	0.14												0.13
21											0.07	0.07	0.09	0.06	0.06	0.13	0.14	0.11	0.07	0.13	

空白は過半数以上から回答を得られなかったもの。X-I 分析では0として扱う。

Table 3-11 事象間インパクト標準偏差(隔離あり・全員)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1		0.14	0.09																		
2										0.17											
3				0.11	0.11	0.11		0.12	0.10											0.12	
4					0.15	0.10	0.09	0.16												0.11	0.12
5				0.10		0.10	0.10	0.15	0.11											0.12	0.12
6				0.10	0.12		0.10	0.16	0.10											0.10	0.14
7																					
8				0.11	0.11	0.11	0.10		0.11											0.11	0.17
9				0.13	0.12	0.12		0.15													
10											0.11	0.12	0.13	0.12		0.12	0.10	0.11		0.06	
11												0.10	0.09	0.11	0.11	0.10	0.07	0.07	0.07		
12											0.13		0.11	0.10	0.11	0.07	0.07	0.10	0.07	0.11	0.12
13											0.10	0.11		0.09	0.11	0.07	0.07	0.10	0.07	0.11	0.12
14											0.15	0.15	0.11		0.11	0.07	0.04	0.07	0.07	0.10	0.12
15																					
16											0.05	0.05	0.07	0.05	0.05		0.11	0.11	0.10	0.12	0.11
17											0.04	0.07	0.04	0.04	0.04	0.11		0.10	0.10	0.11	0.11
18											0.03	0.05	0.05	0.05	0.04	0.15	0.09		0.10	0.10	0.11
19																					
20								0.13	0.13												0.16
21											0.10	0.10	0.13	0.10	0.10	0.12	0.13	0.11	0.10	0.12	

Table 3-12 事象 *i* の生起する確率(プロジェクト関係者)

			平均		標準偏差	
			隔離なし	隔離あり	隔離なし	隔離あり
1	CO ₂ 海洋隔離実施		(0.00)	(1.00)	-	-
2	大気中 CO ₂ 濃度の増加		(1.00)	(1.00)	-	-
3	海洋深層酸性化		(0.00)	0.66	-	0.29
4	深層	魚類の減少	0.51	0.46	0.14	0.14
5		動物プランクトンの減少	0.51	0.48	0.14	0.14
6		海山でベントスの減少	0.49	0.49	0.18	0.18
7		生物多様性の減少	0.56	0.49	0.14	0.18
8		バクテリアの組成の変化	0.49	0.56	0.14	0.25
9		深海生物の食資源の減少	0.59	0.51	0.22	0.18
10	海洋表層酸性化		0.85	0.64	0.14	0.27
11	沿岸域	ベントスの減少	0.61	0.49	0.16	0.18
12		動物プランクトンの減少	0.67	0.52	0.18	0.21
13		植物プランクトンの減少	0.49	0.49	0.09	0.18
14		魚類の減少	0.60	0.44	0.18	0.12
15		生物多様性の減少	0.62	0.51	0.19	0.18
16	外洋表層	動物プランクトンの減少	0.72	0.54	0.14	0.21
17		植物プランクトンの減少	0.51	0.49	0.09	0.18
18		魚類の減少	0.65	0.46	0.18	0.14
19		生物多様性の減少	0.59	0.51	0.18	0.18
20	深層への沈降粒子の減少		0.62	0.48	0.13	0.14
21	湧昇流に含まれる栄養塩の減少		0.46	0.46	0.24	0.25

()内の数字は回答値ではなく固定値。

Table 3-13 事象間インパクト平均値 (隔離なし・プロジェクト関係者)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1		0.08																			
2										0.23											
3																					
4					-0.01	0.04	0.10	0.06												0.05	0.06
5				0.11		0.05	0.10	0.07	0.06											0.03	0.06
6				0.08	0.07		0.07	0.08	0.07											0.06	0.08
7																					
8				0.05	0.05	0.05	0.05		0.05											0.07	0.07
9				0.14	0.13	0.11		0.11													0.06
10										0.17	0.19	0.01	0.20			0.21	0.03	0.16		0.03	
11											0.09	0.06	0.16	0.14	0.14	0.06	0.06	0.04	0.10		
12										0.14			0.04	0.20	0.16	0.06	0.07	0.11	0.09	0.09	0.07
13										0.14	0.21		0.19	0.14	0.14	0.07	0.03	0.11	0.10	0.13	0.09
14										0.01	0.01	0.07			0.13	0.07	0.03	0.10	0.09	0.10	0.07
15																					
16										0.07	0.07	0.04	0.11	0.10	0.10		0.01	0.21	0.16	0.14	0.13
17											0.10	0.10	0.04	0.09	0.07	0.23		0.20	0.14	0.21	0.13
18										0.06	0.07	0.06	0.10	0.09	0.09	0.04	0.10		0.13	0.11	0.07
19																					
20								0.17	0.17												0.19
21										0.10	0.10	0.11	0.09	0.09	0.09	0.16	0.17	0.13	0.10	0.14	

空白は過半数以上から回答を得られなかったもの。X-1 分析では0として扱う。

Table 3-14 事象間インパクト標準偏差(隔離なし・プロジェクト関係者)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1		0.13																			
2										0.15											
3																					
4					0.15	0.11	0.12	0.11												0.12	0.11
5				0.11		0.12	0.12	0.11	0.13											0.14	0.11
6				0.12	0.12		0.12	0.12	0.12											0.11	0.13
7																					
8				0.12	0.12	0.12	0.12	0.12												0.12	0.12
9				0.14	0.15	0.17		0.15													0.15
10										0.13	0.13	0.17	0.12			0.11	0.17	0.14		0.08	
11											0.15	0.11	0.14	0.14	0.14	0.15	0.11	0.11	0.13		
12										0.14	0.14		0.17	0.16	0.14	0.11	0.13	0.15	0.12	0.15	0.15
13										0.14	0.14	0.16	0.13	0.14	0.14	0.11	0.08	0.15	0.12	0.16	0.15
14										0.20	0.20	0.20	0.16		0.14	0.11	0.05	0.12	0.12	0.14	0.15
15																					
16										0.10	0.10	0.08	0.08	0.12	0.10		0.16	0.15	0.14	0.19	0.16
17										0.08	0.08	0.12	0.08	0.09	0.08	0.14		0.14	0.14	0.15	0.16
18										0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.22	0.13		0.14	0.13	0.15
19																					
20								0.14	0.14												0.18
21										0.15	0.15	0.15	0.16	0.16	0.16	0.16	0.17	0.15	0.15	0.16	

Table 3-15 事象間インパクト平均値(隔離あり・プロジェクト関係者)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1		-0.13	0.07																		
2										0.10											
3				0.06	0.07	0.08		0.14	0.03											0.03	
4						0.06	0.11	0.11												0.05	0.07
5				0.13		0.06	0.11	0.13	0.07											0.03	0.07
6				0.08	0.08		0.08	0.13	0.07											0.06	0.09
7																					
8				0.05	0.07	0.07	0.07		0.05											0.07	0.12
9				0.11	0.13	0.14		0.16													
10											0.10	0.10	0.01	0.09		0.10	-0.01	0.07		0.03	
11												0.04	0.04	0.09	0.09	0.04	0.04	0.03	0.04		
12											0.07		0.03	0.09	0.10	0.04	0.03	0.07	0.06	0.07	0.07
13											0.10	0.13		0.10	0.09	0.04	0.03	0.07	0.06	0.07	0.07
14													0.08		0.09	0.06	0.03	0.06	0.06	0.07	0.07
15																					
16											0.04	0.04	0.04	0.04	0.04		0.03	0.09	0.09	0.07	0.09
17											0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.13		0.10	0.09	0.13	0.09
18											0.01	0.04	0.04	0.04	0.03	0.06	0.07		0.09	0.09	0.06
19																					
20								0.14	0.14												0.14
21											0.07	0.07	0.10	0.06	0.06	0.13	0.14	0.10	0.07	0.13	

空白は過半数以上から回答を得られなかったもの。X-1 分析では0として扱う。

Table 3-16 事象間インパクト標準偏差(隔離あり・プロジェクト関係者)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1		0.08	0.10																		
2										0.18											
3				0.13	0.13	0.12		0.15	0.13											0.14	
4					0.14	0.11	0.11	0.17												0.12	0.13
5				0.11		0.11	0.11	0.16	0.13											0.14	0.13
6				0.12	0.13		0.12	0.18	0.12											0.11	0.15
7																					
8				0.12	0.12	0.12	0.12		0.12											0.12	0.18
9				0.15	0.14	0.14		0.15													
10											0.10	0.10	0.11	0.11		0.10	0.09	0.11		0.08	
11												0.11	0.08	0.11	0.11	0.11	0.08	0.08	0.08		
12											0.11		0.11	0.11	0.12	0.08	0.08	0.11	0.08	0.11	0.13
13											0.12	0.13		0.10	0.11	0.08	0.08	0.11	0.08	0.11	0.13
14											0.16	0.16	0.10		0.11	0.08	0.05	0.08	0.08	0.11	0.13
15																					
16											0.05	0.05	0.08	0.05	0.05		0.11	0.12	0.11	0.13	0.12
17											0.05	0.08	0.05	0.05	0.05	0.13		0.12	0.11	0.13	0.12
18											0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15	0.08		0.11	0.11	0.11
19																					
20								0.15	0.15												0.18
21											0.11	0.11	0.14	0.11	0.11	0.14	0.15	0.12	0.11	0.14	

Table 3-17 事象 *i* の生起する確率(プロジェクト関係者以外)

			平均		標準偏差	
			隔離なし	隔離あり	隔離なし	隔離あり
1	CO ₂ 海洋隔離実施		(0.00)	(1.00)	-	-
2	大気中 CO ₂ 濃度の増加		(1.00)	(1.00)	-	-
3	海洋深層酸性化		(0.00)	0.82	-	0.17
4	深層	魚類の減少	0.65	0.59	0.11	0.18
5		動物プランクトンの減少	0.58	0.53	0.00	0.10
6		海山でベントスの減少	0.53	0.53	0.10	0.10
7		生物多様性の減少	0.77	0.71	0.18	0.21
8		バクテリアの組成の変化	0.63	0.58	0.10	0.00
9		深海生物の食資源の減少	0.65	0.65	0.27	0.27
10	海洋表層酸性化		0.95	0.95	0.00	0.00
11	沿岸域	ベントスの減少	0.65	0.65	0.11	0.12
12		動物プランクトンの減少	0.65	0.65	0.12	0.12
13		植物プランクトンの減少	0.55	0.55	0.17	0.17
14		魚類の減少	0.71	0.71	0.21	0.21
15		生物多様性の減少	0.77	0.77	0.18	0.18
16	外洋表層	動物プランクトンの減少	0.65	0.59	0.12	0.18
17		植物プランクトンの減少	0.59	0.55	0.15	0.17
18		魚類の減少	0.71	0.71	0.21	0.21
19		生物多様性の減少	0.59	0.53	0.18	0.10
20	深層への沈降粒子の減少		0.65	0.59	0.12	0.18
21	湧昇流に含まれる栄養塩の減少		0.50	0.42	0.12	0.00

()内の数字は回答値ではなく固定値。

Table 3-18 事象間インパクト平均値 (隔離なし・プロジェクト関係者以外)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1		0.13																			
2										0.28											
3																					
4					-0.05		0.10	0.05												0.03	
5				0.10		0.05	0.05	0.05	0.10											0.05	
6				0.07			0.10		0.10												
7																					
8				0.05	0.05	0.05	0.10		0.05											0.05	
9				0.10	0.10	0.10															
10											0.13	0.13	0.10	0.13		0.13	0.07	0.10			
11													0.10	0.10	0.10			0.05	0.05		
12											0.15		-0.10	0.15	0.10					0.10	
13											0.10	0.15		0.15	0.10	0.05		0.05		0.10	
14											0.05		-0.05		0.10						
15																					
16																	-0.10	0.10	0.05		
17																0.10		0.10	0.05	0.10	
18																-0.10	-0.05		0.05		
19																					
20								0.13	0.13												0.10
21											0.10	0.05	0.10	0.10	0.05	0.15	0.20	0.20	0.10	0.20	

空白は過半数以上から回答を得られなかったもの。X-1 分析では0として扱う。

Table 3-19 事象間インパクト標準偏差(隔離なし・プロジェクト関係者以外)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1		0.30																			
2										0.13											
3																					
4					0.21			0.07												0.06	
5				0.10		0.07	0.07	0.07												0.07	
6				0.06																	
7																					
8				0.07	0.07	0.07			0.07											0.07	
9																					
10										0.15	0.15	0.15	0.17	0.15		0.15	0.12	0.10			
11													0.14	0.14	0.14			0.07	0.07		
12										0.21				0.07	0.14					0.14	
13											0.07	0.07		0.07	0.14	0.07		0.07		0.14	
14										0.07	0.14	0.07	0.07		0.14					0.14	
15																					
16																			0.07	0.14	
17																			0.07		
18																	0.07		0.07		
19																					
20								0.06	0.06												
21										0.14	0.07	0.14	0.14	0.14	0.07	0.07					

Table 3-20 事象間インパクト平均値(隔離あり・プロジェクト関係者以外)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1		-0.10	0.03																		
2										0.05											
3				0.03	0.07	0.10		0.15	0.05											0.10	
4					-0.05		0.10													0.05	
5				0.10		0.05	0.05	0.05	0.10											0.05	
6				0.03			0.10		0.10												
7																					
8				0.05	0.05	0.05	0.10		0.05											0.05	
9				0.10	0.10	0.10															
10										0.13	0.10	0.10	0.10	0.10		0.10	0.07	0.07			
11												0.10	0.10	0.10	0.10			0.05	0.05		
12											0.15		-0.10	0.15	0.10					0.10	
13											0.10	0.15		0.15	0.10	0.05		0.05		0.10	
14											0.05		-0.05		0.10						
15																					
16																	-0.10	0.10	0.05		
17																0.10		0.10	0.05	0.10	
18																-0.10	-0.05		0.05		
19																					
20								0.13	0.13												0.10
21										0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15	0.15	0.15	0.05	0.15	

空白は過半数以上から回答を得られなかったもの。X-I 分析では0として扱う。

Table 3-21 事象間インパクト標準偏差(隔離あり・プロジェクト関係者以外)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1		0.22	0.10																		
2										0.17											
3				0.06	0.06	0.10		0.06	0.06											0.10	
4					0.21															0.07	
5				0.10		0.07	0.07	0.07												0.07	
6				0.06																	
7																					
8				0.07	0.07	0.07			0.07											0.07	
9																					
10											0.15	0.17	0.17	0.17		0.17	0.12	0.12			
11													0.14	0.14	0.14			0.07	0.07		
12											0.21			0.07	0.14					0.14	
13												0.07		0.07	0.14	0.07		0.07		0.14	
14											0.07	0.14	0.07		0.14						
15																					
16																			0.07	0.14	
17																			0.07		
18																	0.07		0.07		
19																					
20								0.06	0.06												
21											0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	

3.3.3. クロスインパクト分析の結果

クロスインパクト分析の結果から、生物多様性の減少が起こる確率は、次表のようになった。

Table 3-22 生物多様性の減少が起こる確率

	深層		沿岸		表層	
	$P_{\text{隔離なし}}$	$P_{\text{隔離あり}}$	$P_{\text{隔離なし}}$	$P_{\text{隔離あり}}$	$P_{\text{隔離なし}}$	$P_{\text{隔離あり}}$
回答者全員	0.38	0.31	0.40	0.33	0.35	0.29
RITE 関係者	0.29	0.25	0.32	0.26	0.30	0.26
RITE 以外	0.54	0.50	0.54	0.54	0.41	0.37

表中の「回答者全員」は回答者全員の回答を平均後、クロスインパクト分析して得られた値である。「RITE 関係者」、「RITE 以外」についても同様。

深層、沿岸、表層どの場合も隔離なしの場合の生物多様性の減少確率が大きい値となった。この理由は、沿岸・表層については、隔離ありで提示したシナリオでは、大気中二酸化炭素濃度が 550ppm に安定化されるので、海洋表層酸性化の海洋生物に対する影響は、隔離なしの場合と比べ小さくなると考えたからであろうと予想される。深層に関しては、海洋表層酸性化の緩和の直接的な影響は少ないが、間接的な影響（深海生物の食資源への沈降粒子の影響）が大きいと考えた可能性、二酸化炭素海洋隔離による海洋深層酸性化の影響がそれほど大きくないものと考えている可能性が理由としてあげられる。

ここで、「RITE 以外」、「RITE 関係者」の値を比較してみると、深層、沿岸、表層、隔離ありなしに関わらず、どの確率に関しても、「RITE 以外」の回答者は「RITE 関係者」より、大きい値になった。これは、前述したように、PROJECT 関係者とその他の専門家の間で、二酸化炭素海洋隔離について共有されている情報量の違いやリスク認知の差が生じている可能性を示唆している。また、推進者の方がリスクを過剰に低くまたは関係者以外がリスクを過剰に高く評価（認知）している可能性もある。しかし、二酸化炭素海洋隔離について十分に知っている専門家の人数はあまり多くなく、実際の深海生態系への二酸化炭素海洋隔離の影響は未知である部分が多いため、これを検証することは困難であろう。

3.4. ER の算出

ここで種数減少比を s とおくと、 ΔER は次のように定義される。

$$\begin{aligned}\Delta ER &= \Delta A_{\text{隔離なし}} \cdot P_{\text{隔離なし}} - \Delta A_{\text{隔離あり}} \cdot P_{\text{隔離あり}} \\ &= A_{\text{original}} \{ (1 - (1 - s_{\text{隔離なし}})^{1/2}) \cdot P_{\text{隔離なし}} - (1 - (1 - s_{\text{隔離あり}})^{1/2}) \cdot P_{\text{隔離あり}} \} \end{aligned} \quad (3-43)$$

Table 3-22 の確率（回答者全員）と Fig. 3-2 のハザードを掛け合わせて深層、沿岸、表層について、ハザードの組み合わせごとの ΔER の表を作成した。

Table 3-23 深層のΔER 一覧

	あり	なし	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
			0.00E+00	1.73E+08	2.97E+08	3.83E+08	4.38E+08	4.72E+08	4.91E+08	5.00E+08	5.03E+08	5.04E+08	5.04E+08
0%	0.00E+00		0.00E+00	1.73E+08	2.97E+08	3.83E+08	4.38E+08	4.72E+08	4.91E+08	5.00E+08	5.03E+08	5.04E+08	5.04E+08
10%	3.08E+08		-3.08E+08	-1.35E+08	-1.10E+07	7.44E+07	1.30E+08	1.64E+08	1.82E+08	1.91E+08	1.95E+08	1.95E+08	1.95E+08
20%	3.63E+08		-3.63E+08	-1.89E+08	-6.52E+07	2.02E+07	7.59E+07	1.10E+08	1.28E+08	1.37E+08	1.40E+08	1.41E+08	1.41E+08
30%	4.67E+08		-4.67E+08	-2.93E+08	-1.69E+08	-8.39E+07	-2.82E+07	5.59E+06	2.42E+07	3.30E+07	3.63E+07	3.70E+07	3.71E+07
40%	5.34E+08		-5.34E+08	-3.61E+08	-2.37E+08	-1.52E+08	-9.61E+07	-6.23E+07	-4.37E+07	-3.49E+07	-3.16E+07	-3.08E+07	-3.08E+07
50%	5.76E+08		-5.76E+08	-4.02E+08	-2.78E+08	-1.93E+08	-1.37E+08	-1.03E+08	-8.49E+07	-7.61E+07	-7.28E+07	-7.20E+07	-7.20E+07
60%	5.98E+08		-5.98E+08	-4.25E+08	-3.01E+08	-2.16E+08	-1.60E+08	-1.26E+08	-1.08E+08	-9.87E+07	-9.54E+07	-9.47E+07	-9.46E+07
70%	6.09E+08		-6.09E+08	-4.36E+08	-3.12E+08	-2.26E+08	-1.71E+08	-1.37E+08	-1.18E+08	-1.09E+08	-1.06E+08	-1.05E+08	-1.05E+08
80%	6.13E+08		-6.13E+08	-4.40E+08	-3.16E+08	-2.30E+08	-1.75E+08	-1.41E+08	-1.22E+08	-1.13E+08	-1.10E+08	-1.09E+08	-1.09E+08
90%	6.14E+08		-6.14E+08	-4.41E+08	-3.17E+08	-2.31E+08	-1.76E+08	-1.42E+08	-1.23E+08	-1.14E+08	-1.11E+08	-1.10E+08	-1.10E+08
100%	6.14E+08		-6.14E+08	-4.41E+08	-3.17E+08	-2.31E+08	-1.76E+08	-1.42E+08	-1.23E+08	-1.14E+08	-1.11E+08	-1.10E+08	-1.10E+08

左列：海洋隔離なしの場合の種数減少率(%)と対応するリスク、最上行：海洋隔離ありの場合の種数減少率(%)と対応するリスク

Table 3-24 沿岸の ΔER 一覧

あり なし	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
	0.00E+00	2.73E+08	4.69E+08	6.03E+08	6.91E+08	7.44E+08	7.74E+08	7.88E+08	7.93E+08	7.94E+08	7.94E+08
0%	0.00E+00	2.73E+08	4.69E+08	6.03E+08	6.91E+08	7.44E+08	7.74E+08	7.88E+08	7.93E+08	7.94E+08	7.94E+08
10%	3.30E+08	-3.30E+08	-5.67E+07	1.39E+08	3.61E+08	4.15E+08	4.44E+08	4.58E+08	4.63E+08	4.64E+08	4.64E+08
20%	5.66E+08	-5.66E+08	-2.93E+08	3.73E+07	1.25E+08	1.78E+08	2.08E+08	2.21E+08	2.27E+08	2.28E+08	2.28E+08
30%	7.29E+08	-7.29E+08	-4.56E+08	-1.25E+08	-3.75E+07	1.58E+07	4.51E+07	5.90E+07	6.41E+07	6.53E+07	6.54E+07
40%	8.35E+08	-8.35E+08	-5.62E+08	-2.31E+08	-1.43E+08	-9.02E+07	-6.09E+07	-4.70E+07	-4.18E+07	-4.06E+07	-4.06E+07
50%	8.99E+08	-8.99E+08	-6.26E+08	-2.96E+08	-2.08E+08	-1.55E+08	-1.25E+08	-1.11E+08	-1.06E+08	-1.05E+08	-1.05E+08
60%	9.34E+08	-9.34E+08	-6.61E+08	-3.31E+08	-2.43E+08	-1.90E+08	-1.61E+08	-1.47E+08	-1.42E+08	-1.40E+08	-1.40E+08
70%	9.51E+08	-9.51E+08	-6.78E+08	-3.48E+08	-2.60E+08	-2.07E+08	-1.77E+08	-1.63E+08	-1.58E+08	-1.57E+08	-1.57E+08
80%	9.57E+08	-9.57E+08	-6.84E+08	-3.54E+08	-2.66E+08	-2.13E+08	-1.84E+08	-1.70E+08	-1.65E+08	-1.63E+08	-1.63E+08
90%	9.59E+08	-9.59E+08	-6.86E+08	-3.55E+08	-2.68E+08	-2.14E+08	-1.85E+08	-1.71E+08	-1.66E+08	-1.65E+08	-1.65E+08
100%	9.59E+08	-9.59E+08	-6.86E+08	-3.55E+08	-2.68E+08	-2.14E+08	-1.85E+08	-1.71E+08	-1.66E+08	-1.65E+08	-1.65E+08

左列：海洋隔離なしの場合の種数減少率(%)と対応するリスク、最上行：海洋隔離ありの場合の種数減少率(%)と対応するリスク

Table 3-25 外洋表層のΔER 一覧

あり なし	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
	0.00E+00	3.82E+09	6.56E+09	8.44E+09	9.67E+09	1.04E+10	1.08E+10	1.10E+10	1.11E+10	1.11E+10	1.11E+10
0%	0.00E+00	3.82E+09	6.56E+09	8.44E+09	9.67E+09	1.04E+10	1.08E+10	1.10E+10	1.11E+10	1.11E+10	1.11E+10
10%	4.55E+09	-4.55E+09	2.01E+09	3.89E+09	5.12E+09	5.87E+09	6.28E+09	6.47E+09	6.54E+09	6.56E+09	6.56E+09
20%	7.81E+09	-7.81E+09	-1.25E+09	6.33E+08	1.86E+09	2.61E+09	3.02E+09	3.21E+09	3.28E+09	3.30E+09	3.30E+09
30%	1.01E+10	-1.01E+10	-3.49E+09	-1.61E+09	-3.81E+08	3.64E+08	7.74E+08	9.69E+08	1.04E+09	1.06E+09	1.06E+09
40%	1.15E+10	-1.15E+10	-4.95E+09	-3.07E+09	-1.84E+09	-1.10E+09	-6.87E+08	-4.93E+08	-4.21E+08	-4.04E+08	-4.03E+08
50%	1.24E+10	-1.24E+10	-8.58E+09	-3.96E+09	-2.73E+09	-1.99E+09	-1.58E+09	-1.38E+09	-1.31E+09	-1.29E+09	-1.29E+09
60%	1.29E+10	-1.29E+10	-9.07E+09	-4.45E+09	-3.22E+09	-2.47E+09	-2.06E+09	-1.87E+09	-1.80E+09	-1.78E+09	-1.78E+09
70%	1.31E+10	-1.31E+10	-9.30E+09	-4.68E+09	-3.45E+09	-2.70E+09	-2.29E+09	-2.10E+09	-2.03E+09	-2.01E+09	-2.01E+09
80%	1.32E+10	-1.32E+10	-9.39E+09	-4.76E+09	-3.54E+09	-2.79E+09	-2.38E+09	-2.19E+09	-2.11E+09	-2.10E+09	-2.10E+09
90%	1.32E+10	-1.32E+10	-9.41E+09	-4.78E+09	-3.56E+09	-2.81E+09	-2.40E+09	-2.21E+09	-2.13E+09	-2.12E+09	-2.12E+09
100%	1.32E+10	-1.32E+10	-9.41E+09	-4.79E+09	-3.56E+09	-2.81E+09	-2.40E+09	-2.21E+09	-2.14E+09	-2.12E+09	-2.12E+09

左列：海洋隔離なしの場合の種数減少率(%)と対応するリスク、最上行：海洋隔離ありの場合の種数減少率(%)と対応するリスク

深層、沿岸、表層との ΔER の表を作成したが、これだけでは無数の海洋全体の ΔER が存在するため、次のような条件で54ケースを抽出した。

- ・ 表層の種数減少比は(沿岸、外洋問わず)、表層全体で一定とする。
- ・ 表層へ直接的に影響を及ぼすような二酸化炭素海洋隔離表層は実施されないであろうと考えられるため、種数減少比_{隔離なし} \geq 種数減少比_{隔離あり}とする。
- ・ 種数減少比 40%(ハザード=全面積の約 9 割を改変し、これ以上の種数減少おきても改変面積は少ししか上昇しないので、場合わけに関して、種数減少 40%以上は考えなくてもよい。)の場合、種数減少比 20%(ハザード=全面積の約 5 割を改変)の場合、参考としてそれらより種数減少の小さい種数減少比 10%の 3 つの種数減少比について、組み合わせを作る。

Table 3-26 抽出した 54 ケースの ΔER

沿岸	10% V.S. 10%	10% V.S. 10%	10% V.S. 10%	10% V.S. 10%	10% V.S. 10%	10% V.S. 10%	10% V.S. 10%	10% V.S. 10%	10% V.S. 10%
	-5.67E+07	-5.67E+07	-5.67E+07	-5.67E+07	-5.67E+07	-5.67E+07	-5.67E+07	-5.67E+07	-5.67E+07
表層	10% V.S. 10%	10% V.S. 10%	10% V.S. 10%	10% V.S. 10%	10% V.S. 10%	10% V.S. 10%	10% V.S. 10%	10% V.S. 10%	10% V.S. 10%
	-7.28E+08	-7.28E+08	-7.28E+08	-7.28E+08	-7.28E+08	-7.28E+08	-7.28E+08	-7.28E+08	-7.28E+08
深層	10% V.S. 40%	10% V.S. 16%	10% V.S. 10%	16% V.S. 40%	16% V.S. 16%	16% V.S. 10%	40% V.S. 10%	40% V.S. 16%	40% V.S. 40%
	2.27E+08	4.17E+07	-3.80E+07	1.30E+08	-5.54E+07	-1.35E+08	-3.61E+08	-2.82E+08	-9.61E+07
合計	-5.58E+08	-7.43E+08	-8.23E+08	-6.55E+08	-8.40E+08	-9.20E+08	-1.15E+09	-1.07E+09	-8.81E+08
沿岸	16% V.S. 10%	16% V.S. 10%	16% V.S. 10%	16% V.S. 10%	16% V.S. 10%	16% V.S. 10%	16% V.S. 10%	16% V.S. 10%	16% V.S. 10%
	-2.08E+08	-2.08E+08	-2.08E+08	-2.08E+08	-2.08E+08	-2.08E+08	-2.08E+08	-2.08E+08	-2.08E+08
表層	16% V.S. 10%	16% V.S. 10%	16% V.S. 10%	16% V.S. 10%	16% V.S. 10%	16% V.S. 10%	16% V.S. 10%	16% V.S. 10%	16% V.S. 10%
	-2.82E+09	-2.82E+09	-2.82E+09	-2.82E+09	-2.82E+09	-2.82E+09	-2.82E+09	-2.82E+09	-2.82E+09
深層	10% V.S. 40%	10% V.S. 16%	10% V.S. 10%	16% V.S. 40%	16% V.S. 16%	16% V.S. 10%	40% V.S. 10%	40% V.S. 16%	40% V.S. 40%
	2.27E+08	4.17E+07	-3.80E+07	1.30E+08	-5.54E+07	-1.35E+08	-3.61E+08	-2.82E+08	-9.61E+07
合計	-2.80E+09	-2.99E+09	-3.07E+09	-2.90E+09	-3.09E+09	-3.16E+09	-3.39E+09	-3.31E+09	-3.13E+09
沿岸	40% V.S. 10%	40% V.S. 10%	40% V.S. 10%	40% V.S. 10%	40% V.S. 10%	40% V.S. 10%	40% V.S. 10%	40% V.S. 10%	40% V.S. 10%
	-5.62E+08	-5.62E+08	-5.62E+08	-5.62E+08	-5.62E+08	-5.62E+08	-5.62E+08	-5.62E+08	-5.62E+08
表層	40% V.S. 10%	40% V.S. 10%	40% V.S. 10%	40% V.S. 10%	40% V.S. 10%	40% V.S. 10%	40% V.S. 10%	40% V.S. 10%	40% V.S. 10%
	-7.69E+09	-7.69E+09	-7.69E+09	-7.69E+09	-7.69E+09	-7.69E+09	-7.69E+09	-7.69E+09	-7.69E+09
深層	10% V.S. 40%	10% V.S. 16%	10% V.S. 10%	16% V.S. 40%	16% V.S. 16%	16% V.S. 10%	40% V.S. 10%	40% V.S. 16%	40% V.S. 40%
	2.27E+08	4.17E+07	-3.80E+07	1.30E+08	-5.54E+07	-1.35E+08	-3.61E+08	-2.82E+08	-9.61E+07
合計	-8.03E+09	-8.21E+09	-8.29E+09	-8.12E+09	-8.31E+09	-8.39E+09	-8.62E+09	-8.54E+09	-8.35E+09
沿岸	16% V.S. 16%	16% V.S. 16%	16% V.S. 16%	16% V.S. 16%	16% V.S. 16%	16% V.S. 16%	16% V.S. 16%	16% V.S. 16%	16% V.S. 16%
	-8.28E+07	-8.28E+07	-8.28E+07	-8.28E+07	-8.28E+07	-8.28E+07	-8.28E+07	-8.28E+07	-8.28E+07
表層	16% V.S. 16%	16% V.S. 16%	16% V.S. 16%	16% V.S. 16%	16% V.S. 16%	16% V.S. 16%	16% V.S. 16%	16% V.S. 16%	16% V.S. 16%
	-1.06E+09	-1.06E+09	-1.06E+09	-1.06E+09	-1.06E+09	-1.06E+09	-1.06E+09	-1.06E+09	-1.06E+09
深層	10% V.S. 40%	10% V.S. 16%	10% V.S. 10%	16% V.S. 40%	16% V.S. 16%	16% V.S. 10%	40% V.S. 10%	40% V.S. 16%	40% V.S. 40%
	2.27E+08	4.17E+07	-3.80E+07	1.30E+08	-5.54E+07	-1.35E+08	-3.61E+08	-2.82E+08	-9.61E+07
合計	-9.19E+08	-1.10E+09	-1.18E+09	-1.02E+09	-1.20E+09	-1.28E+09	-1.51E+09	-1.43E+09	-1.24E+09
沿岸	40% V.S. 16%	40% V.S. 16%	40% V.S. 16%	40% V.S. 16%	40% V.S. 16%	40% V.S. 16%	40% V.S. 16%	40% V.S. 16%	40% V.S. 16%
	-4.36E+08	-4.36E+08	-4.36E+08	-4.36E+08	-4.36E+08	-4.36E+08	-4.36E+08	-4.36E+08	-4.36E+08
表層	40% V.S. 16%	40% V.S. 16%	40% V.S. 16%	40% V.S. 16%	40% V.S. 16%	40% V.S. 16%	40% V.S. 16%	40% V.S. 16%	40% V.S. 16%
	-5.94E+09	-5.94E+09	-5.94E+09	-5.94E+09	-5.94E+09	-5.94E+09	-5.94E+09	-5.94E+09	-5.94E+09
深層	10% V.S. 40%	10% V.S. 16%	10% V.S. 10%	16% V.S. 40%	16% V.S. 16%	16% V.S. 10%	40% V.S. 10%	40% V.S. 16%	40% V.S. 40%
	2.27E+08	4.17E+07	-3.80E+07	1.30E+08	-5.54E+07	-1.35E+08	-3.61E+08	-2.82E+08	-9.61E+07
合計	-6.14E+09	-6.33E+09	-6.41E+09	-6.24E+09	-6.43E+09	-6.51E+09	-6.73E+09	-6.65E+09	-6.47E+09
沿岸	40% V.S. 40%	40% V.S. 40%	40% V.S. 40%	40% V.S. 40%	40% V.S. 40%	40% V.S. 40%	40% V.S. 40%	40% V.S. 40%	40% V.S. 40%
	-1.43E+08	-1.43E+08	-1.43E+08	-1.43E+08	-1.43E+08	-1.43E+08	-1.43E+08	-1.43E+08	-1.43E+08
表層	40% V.S. 40%	40% V.S. 40%	40% V.S. 40%	40% V.S. 40%	40% V.S. 40%	40% V.S. 40%	40% V.S. 40%	40% V.S. 40%	40% V.S. 40%
	-1.84E+09	-1.84E+09	-1.84E+09	-1.84E+09	-1.84E+09	-1.84E+09	-1.84E+09	-1.84E+09	-1.84E+09
深層	10% V.S. 40%	10% V.S. 16%	10% V.S. 10%	16% V.S. 40%	16% V.S. 16%	16% V.S. 10%	40% V.S. 10%	40% V.S. 16%	40% V.S. 40%
	2.27E+08	4.17E+07	-3.80E+07	1.30E+08	-5.54E+07	-1.35E+08	-3.61E+08	-2.82E+08	-9.61E+07
合計	-1.76E+09	-1.94E+09	-2.02E+09	-1.86E+09	-2.04E+09	-2.12E+09	-2.35E+09	-2.27E+09	-2.08E+09

※ 各海域で(なし V.S.あり)という形式をとっている。

灰色のセルは表層(沿岸・外洋)の種数減少比が同じ場合に深層のリスクが最大になっている場合である。このなかでリスクが一番大きい場合は、隔離なしの時に、沿岸：種

数減少比 10%、表層：種数減少比 10%、深層：種数減少比 10%で、隔離ありの時に、
沿岸：種数減少比 10%、表層：種数減少比 10%、深層：種数減少比 40%である。

これは、表層で隔離なしの時に 0.35 の確率で種数 10%の減少が、隔離ありの時に 0.29 の確率で種数 10%の減少が、沿岸で、隔離なしの時に 0.40 の確率で種数 10%の減少が、隔離ありの時に 0.33 の確率で種数 10%の減少が、深層では隔離なしの時に 0.38 の確率で種数 40%の減少が、隔離ありの時に 0.31 の確率で種数 40%の減少が起こるケースである。表層ではリスクが削減されているが、深層でのリスクが高まっている例である。

4 III の算出

4.1. 二酸化炭素海洋隔離の LCA

ここでは、EF および HR を算出するために、既存の船舶 LCA データを用いて、二酸化炭素海洋隔離の簡易な LCA を行う。

液化 CO₂ 運搬船・隔離船は現行の 127LNG 船とほぼ同じタイプ船舶が用いられると考えられるため、平岡ら(2005)による 127LNG 船 輸送量(t-km)当たりの環境負荷量のデータを用いる[1]。

Table 4-1 127LNG 船 輸送量(t-km)当たりの資源消費量[kg]

ボーキサイト	石炭	石油	天然ガス
1.3E-06	2.1E-05	3.4E-03	2.9E-03

Table 4-2 127LNG 船 輸送量(t-km)当たりの大気環境負荷物質の排出量[kg]

CO ₂	NO ₂	SO ₂	CO	CxHy	PM	CH ₄	NMVOC	N ₂ O
1.9E+01	3.0E-02	2.0E-01	2.3E-03	6.2E-03	8.1E-04	3.9E-04	4.0E-10	6.8E-05

まず、RITE のウェブサイトで公開されている統合評価モデル DNE21 の入力条件にある、隔離開始後 75 年間の全世界の二酸化炭素海洋隔離量から年間平均隔離量 2.7E+10 [t-CO₂/year]を算出した。

そして、分離回収施設から隔離サイトまでの距離は片道 1500km、載貨重量は 67554 t、LNG 船 1 隻の輸送 CO₂ 量は、48000t、放流船の CO₂ 放流量は 360[t/hour]、放流船速 10.8[km/hour]と仮定し、輸送 1 回+隔離 1 回当たりの環境負荷量を求めた。

Table 4-3 輸送 1 回+隔離 1 回当たりの資源消費量[kg]

ボーキサイト	石炭	石油	天然ガス
2.5E+02	4.1E+03	6.6E+05	5.7E+05

Table 4-4 輸送 1 回+隔離 1 回当たりの大気環境負荷物質の排出量[kg]

CO ₂	NO ₂	SO ₂	CO	CxHy	PM	CH ₄	NMVOC	N ₂ O
3.6E+06	5.8E+03	3.8E+04	4.5E+02	1.2E+03	1.6E+02	7.6E+01	7.8E-05	1.3E+01

1 隻の輸送 CO₂ 量は、48000t であるから、全世界の年間平均隔離量 2.711E+10 [t-CO₂/year]を隔離するためには、輸送 1 回+隔離 1 回を 401375 セット行う必要がある。よって、全世界の二酸化炭素海洋隔離に伴う、資源消費及び環境負荷物質量は、Table 4-5, 4-6 のようになる。

Table 4-5 二酸化炭素海洋隔離に伴う全世界の資源消費量[kg / year]

ボーキサイト	石炭	石油	天然ガス
8.7E+07	1.4E+09	2.3E+11	8.7E+07

Table 4-6 二酸化炭素海洋隔離に伴う全世界の大気環境負荷物質の排出量[kg / year]

CO ₂	NO ₂	SO ₂	CO	CxHy	PM	CH ₄	NMVOC	N ₂ O
1.9E+11	1.2E+12	2.0E+09	1.3E+10	1.5E+08	4.1E+08	5.4E+07	2.6E+07	2.7E+01

CH₄、N₂Oを二酸化炭素換算すると、それぞれの温暖化係数は21、310であるから、温室効果ガス排出量は合計 1.2E+09 [t-CO₂ / year]となる。

一方、二酸化炭素分離・回収プロセスにおける二酸化炭素排出量は、電力に関する排出原単位を 0.555 [kg-co₂ / kWh]、出力低下率を10%とすると、3.0E+09[t-CO₂/ year]である。

4.2. EF

まず通常のエコロジカル・フットプリントの計算を行う。Ecological Footprint Network(2006)によると森林の二酸化炭素吸収量は1.42[t-C / ha / year](5.2[t- CO₂ / ha / year])、森林地の等価係数は1.34[gha / ha](gha:グローバルヘクタール=地球上に存在する生産性を有する土地・水域の総計(114億ha)の世界的平均生産性を有する仮想的な土地1ha)であるから[2]、二酸化炭素海洋隔離(分離回収・輸送)に伴うエコロジカル・フットプリントは、

$$\begin{aligned} & 4.3\text{E}+09 \text{ [t-CO}_2 \text{ / year]} \div 5.2 \text{ [t- CO}_2 \text{ / ha]} \times 1.34 \text{ [gha / ha]} \\ & = 1.1\text{E}+09 \text{ [gha / year]} \end{aligned} \quad (4-1)$$

となる。

同様に、二酸化炭素海洋隔離によって削減されたエコロジカル・フットプリントを算出する。全世界の年間平均隔離量は 2.7E+10 [t-CO₂/year]であるから、

$$\begin{aligned} & 2.7 \text{ E}+10 \text{ [t-CO}_2 \text{ / year]} \div 5.2 \text{ [t- CO}_2 \text{ / ha]} \times 1.17 \text{ [gha / ha]} \\ & = 6.9 \text{ E}+09 \text{ [gha / year]} \end{aligned} \quad (4-2)$$

また、回収液化施設の面積は 245[t-CO₂ / hour]の回収液化能力のある施設で 4.2[ha]であること[3]から、回収量と施設面積の比例計算より、全世界で必要な回収液化施設の面積は 5.3E+04[ha]となる。生産地阻害地(建築物によって使用されている土地)の等価係数は 2.21[gha / ha]であるから、分離回収施設の生産地阻害によるエコロジカル・フットプリントは、

$$5.3\text{E}+04 \text{ [ha / year]} \times 2.21 \text{ [gha / ha]} = 1.2 \text{ E}+05 \text{ [gha]} \quad (4-3)$$

となる。

ΔEF は何もしなかった場合とある技術を適用した場合の差分で表せるので、増分である二酸化炭素海洋隔離(分離回収・輸送)に伴うエコロジカル・フットプリントと分離回収施設の生産地阻害によるエコロジカル・フットプリントから、減少分である二酸化炭素海洋隔離によって削減されたエコロジカル・フットプリントを引けばよい。ゆえに、

$$\begin{aligned} \Delta EF & = 1.1\text{E}+09 \text{ [gha / year]} + 1.2 \text{ E}+05 \text{ [gha / year]} - 6.9\text{E}+09 \text{ [gha / year]} \\ & = -5.8\text{E}+09 \text{ [gha / year]} \end{aligned} \quad (4-4)$$

4.3. ER

種数減少率を $\Delta s' = 1 - S_{new} / S_{original}$ とおき、Table 3-26 に抽出した 54 の ΔER から2つの例を Table 4-7 に示した。

Table 4-7

		(A)		(B)	
		隔離 なし	隔離 あり	隔離 なし	隔離 あり
沿岸	$\Delta s'$	40%	40%	40%	16%
	ΔER [ha/year]	-1.43E+06		-4.36E+06	
表層	$\Delta s'$	40%	40%	40%	16%
	ΔER [ha/year]	-1.84E+07		-5.94E+07	
深層	$\Delta s'$	40%	40%	10%	40%
	ΔER [ha/year]	-9.61E+05		2.27E+06	
合計	ΔER [ha/year]	-2.08E+07		-6.14E+07	

4.4. HR

本研究では、生態リスクの算出に主眼をおいているため、HR(人間健康、社会資産に対するリスク)の算出には LIME を用いた。個々の係数の算出方法については、伊坪ら(2005)を参照されたい。なお、LIME ではコンジョイント分析によって、人間健康、社会資産、生物多様性、一次生産に対する単位被害量当たりの経済価値が算出されており、ここではそれらによって経済価値に換算された単位排出量あたりの被害額用いた。

Table 4-8 LIME における単位被害量当たりの経済価値

保護対象	経済換算係数	単位
人間健康	9.70E+06	円/DALY
社会資産	1.00E+04	円/万円
生物多様性	4.80E+12	円/種
一次生産	2.02E+04	円/ton

4.4.1. 地球温暖化の HR

Table4-8 に示した単位排出量あたりの被害額及び、Table4-6 の二酸化炭素排出量より、地球温暖化の HR は、-4.54E+13 [円]となる。

Table 4-9 単位排出量あたりの地球温暖化の被害額

	人間健康	社会資産
単位	円/kg	円/kg
CO ₂	1.19E+00	5.48E-01

4.4.2. 酸性化の HR

Table 4-9 に示した単位排出量あたりの被害額及び、Table4-6 の SO₂、NO₂ 排出量より、それぞれの物質による被害額は、8.03E+11[円]、8.60E+10 [円]であるから、酸性化の HR は 8.89E+11 [円]となる。なお、ここでの酸性化とは SO_x、NO_x などが沈着して土壌などが酸性化することを意味している(一般に知られる酸性雨も含まれる。)。

Table 4-10 単位排出量あたりの酸性化の被害額

	社会資産
単位	円/kg
SO ₂	6.08E+01
NO ₂	4.34E+01

4.4.3. 資源消費の HR

Table 4-10 に示した単位排出量あたりの被害額及び、Table4-6 の資源消費量より、資源消費の HR は利子率 5%の時、4.67E+11 [円]、3%の時 1.22E+12[円]となる。

Table 4-11 単位資源消費あたりの被害額

	社会資産	
単位	円/kg	
利子率	5%	3%
ボーキサイト	7.33E-05	4.67E-03
石炭	9.34E-03	1.61E-01
原油	1.47E+00	3.55E+00
天然ガス	6.91E-01	2.11E+00

4.4.4. 光化学オキシダントの HR

Table 4-11 に示した単位排出量あたりの被害額及び、Table4-6 の NMVOC 排出量より光化学オキシダントの HR は 2.55E+03 [円]となる。

Table 4-12 単位排出量あたりの光化学オキシダントの被害額

	人間健康	社会資産
単確定	円/kg	円/kg
NMVOC 平均	6.78E+01	2.72E+01

4.4.5. HR

4.4.1～4.4.4 より、 ΔHR は、資源消費 HR での利子率が 5%の時に $-4.4E+13$ [円 / year]、利子率が 3%の時に $-4.3E+13$ [円 / year]となる。なおそれぞれ $(\Sigma EF / \Sigma GDP) \cdot \Delta HR$ は、 $-1.3E+08$ [gha / year]、 $-1.2E+08$ [gha / year]となる。今回は最大リスクの場合を考えるため、3%の時の値を使用する。

4.5. C

年間平均隔離量 $2.7E+10$ [t-CO₂/year]から、二酸化炭素海洋隔離の Cost と Benefit を求める。

NEDO による試算[4], [5]によると二酸化炭素海洋隔離の単位隔離量当たりのコストは 7959 [yen / t-CO₂]である。また、隔離によって削減された(大気中に放出されなかった)二酸化炭素量をそのまま排出権として売却した価格の合計をベネフィットとして考えるので、二酸化炭素の排出権取引が行われている EU の市場価格(14 ユーロ/t-CO₂ 2006 年平均)を参考に 1, 14, 50, 100 ユーロ/t-CO₂ の場合を考え、それぞれケース(a), (b), (c), (d)とした。

4.6. III

以上から、A,B それぞれについて(a), (b), (c), (d)の場合について III を求めると、次の表のようになる。

Table 4-13 III の例

ΔA B	A $\Delta s' = 40\%$	B 表層 $\Delta s' = 40\% - 16\%$ 深層 $\Delta s' = 10\% - 40\%$
a (排出権 1ユーロ)	-5.36E+09	-5.35E+09
b (14ユーロ)	-5.51E+09	-5.50E+09
c (50ユーロ)	-5.94E+09	-5.93E+09
d (100ユーロ)	-6.54E+09	-6.53E+09

ここで、例として Ab のケースを Table 4-14 に取り出して III の各項の値をみることにする。すると、CO₂ 海洋隔離の III の項で一番大きな値を占めているのは、 ΔEF であることがわかる(中央のコラム)。また III の値はマイナスになっているので、この場合、二酸化炭素海洋隔離は有効な

技術であるとの判断が可能になる。

ここで、 ΔEF の中で一番大きな要素を占めるのは CO_2 の EF であり、また、 ΔHR との二重計算の可能性も考えられることから、 EF の項を除外してみることにする(右のコラム)。すると C の項が一番大きく占めることがわかる。また、 III の値は正となり、この場合何らかの改善が必要つまりコストの改善が必要であることが示されている。この場合、50%以上のコストダウンが必要であることが示唆される。

Table 4-14 III の内訳

	[yen / year]	Δb [gha / year]	EF 削除 [gha / year]
ΔEF	-	- 5.8E+09	-
ΔER	-	- 2.1E+07	- 2.1E+07
ΔHR	- 4.8E+13	- 1.2E+08	- 1.2E+08
C	2.2E+14	6.0E+08	6.0E+08
$-B$	- 5.9E+13	- 1.7E+08	- 1.7E+08
III	-	- 5.5E+09	3.0E+08

$III > 0$: 何らかの改善が必要、 $III < 0$: 有効な技術



Fig. 4-1 III の内訳

5. 結言

以上 4 章までの結果を踏まえて、本章では結論及び課題、問題点を述べる。

5.1. 結論

- 実観測データや二酸化炭素暴露実験データなどの不足および生態影響のメカニズムの解明にかかる時間を考慮すると二酸化炭素海洋隔離の指標化を行うことは非常に困難であるが、視点を変え、より公平な判断ができると考えられる専門家のリスク認知を利用することで、生態リスクを指標化できることが示唆された。しかし、生態系の複雑性を考慮すると、ここで得られる値は、生態系の挙動を必ずしも反映しているとはいえず、やはり、生態学的な手法を用いた厳密な評価もあわせておこなっていく必要がある。
- 今までエコロジカル・フットプリントでは、考慮されていなかった生態リスクを面積に変換する手法を開発することで土地面積としてリスクを統合することができた。
- 二酸化炭素海洋隔離の *III* は、 ΔEF が一番大きな割合を占める。
- 二酸化炭素海洋隔離を行うことで、表層、沿岸に対する海洋表層酸性化のリスクを低減できることが示唆された。ただし、評価範囲をグローバルに考えた場合であり、局所的な環境の変化の影響に関して気をつける必要がある。
- 深海に関する事象の発生確率が海洋隔離ありの時の方が小さかった。深海への表層酸性化の間接的な影響を考慮したため、また海洋隔離は環境影響を最小にすることを目標に行うことが目標とされているためであると考えられる。

5.2. 課題

- 今後、技術革新が進むと、 $\Sigma EF / \Sigma GDP$ の値はさらに小さくなっていく可能性がある(Fig. 5-1)。なぜなら、現在、全世界のエコロジカル・フットプリントの大半を占めるのが二酸化炭素排出によるものであり、今後、脱炭素型社会が実現していった場合、 $\Sigma EF / \Sigma GDP$ の *EF* は農林水産物及び土地利用のエコロジカル・フットプリントが閉める割合が大きくなっていく可能性があるからである。そして、結果的に *III* の後半の人間リスク及びコストに関する項が相対的に小さくなっていく可能性がある。

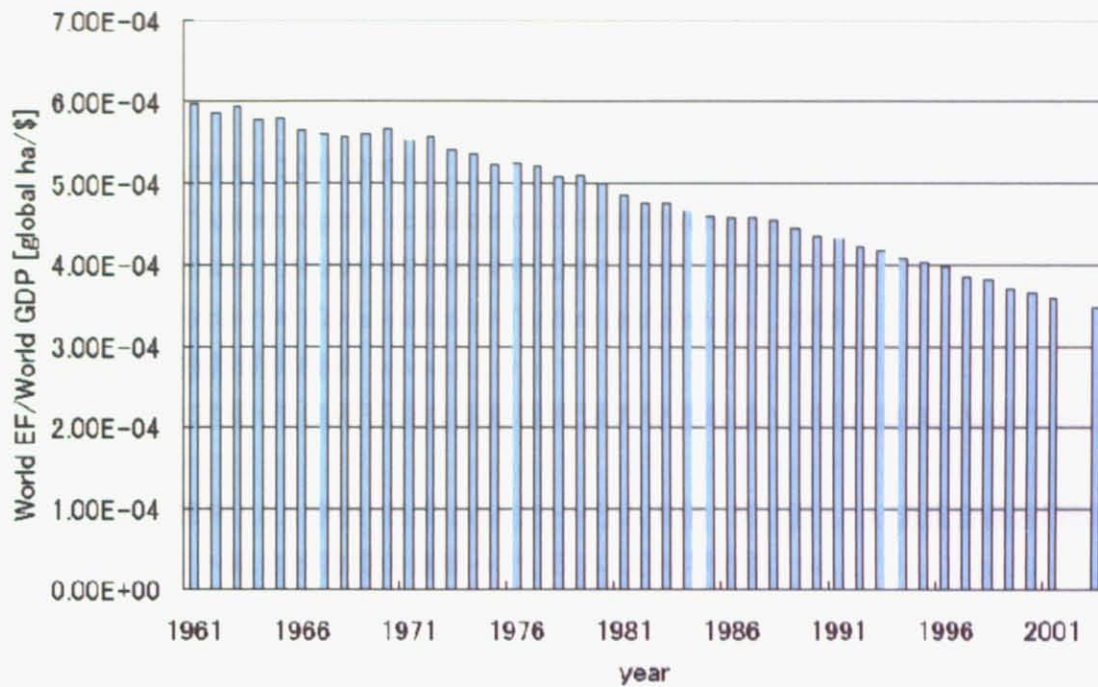


Fig. 5-1 $\Sigma EF / \Sigma GDP$ 1ドルあたりのエコロジカル・フットプリント(再掲)

- Species Area Relationship (SAR)に基づく仮想環境改変面積の種数減少比を実際の観測データを用いて、実証を行う必要がある。特に深海に対してもこの式が成立するかどうかを検証する必要がある。
- 本来ならば種数減少率を個体群モデルなど用いて自然科学的な見地からもとめる必要がある。

参考文献

1 章

1. IPCC, *Climate change* 2001. 2001
2. J.C. Orr, et al., "Anthropogenic acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms," *Nature*, 437:681-686, 2005
3. IPCC, *Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage*, 2005
4. 地球環境産業技術研究機構 www.rite.or.jp
5. 勝川俊雄, 「非定常・予測不可能な多魚種資源の管理理論」 月刊 海洋, Vol37, No3, 198-204, 2005
6. 端谷隆文ら, "日本 LCA 学会・日本 LCA フォーラム共催 第 2 回 LCA 講演会報告「環境影響評価手法 ～統合的指標の意味～」", 日本 LCA 学会誌, Vol.2, No. 3, pp300-303, 2006
7. 大塚耕司, "海洋の大規模利用に対する包括的環境影響評価指標の一提案", *Proceedings of Techno-Ocean 2006/ 19th JASNAOE Ocean Engineering Symposium*, 2006

2 章

1. M Wackernagel, WE Rees, "Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth", New Society Publishers, 1996
2. 中西準子, "環境リスク学", 日本論評社, 2004
3. J. Nakanishi, "Risk Management of Chemicals: Achievements and Seeds for Future", Proc. of 4th International Workshop on Risk Evaluation and Management of Chemicals, 2001, (available online <http://risk.kan.ynu.ac.jp/ws2001/>)
4. 伊坪徳宏ら, "ライフサイクル環境影響評価手法 LIME", 産業環境管理協会, 2005

3 章

1. M. L. Rosenzweig, *Species diversity in space and time*, Cambridge University Press
2. C.D. Thomas., et al., "Extinction risk from climate change", *Nature*, 2004
3. C.B. Williams, *Patterns in the Balance of Nature*, Academic Press, 1964
4. T.M. Brooks, et al, "Habitat Loss and Extinction in the Hotspots of Biodiversity", *Conservation Biology*, 2002
5. RITE DNE 21 www.rite.or.jp
6. サステナビリティの科学的基礎に関する調査プロジェクト, "第 5 部「地球の環境収容力」をどうとらえるか", サステナビリティの科学的基礎に関する調査報告書, 2006
7. 石谷久ら, 社会システム工学, pp33-65, 1992
8. 原田晃ら, 「二酸化炭素海洋隔離: 適切な環境影響評価のあり方について」, 日本海洋学会秋季大会シンポジウム講演要旨, 2006

9. 林礼美ら、“クロスインパクト分析による地球温暖化対策評価のための叙述的シナリオの構築”、エネルギー・資源、Vol.26、No.3、2005

4 章

1. 平岡克英ら、“LCA 解析のための外航貨物船の運航状況分析と海上輸送の大気環境負荷物質の排出係数”、海上技術安全研究所報告、第 5 巻 3 号、pp.25-90、2005
2. Ecological Footprint Network, *ECOLOGICAL FOOTPRINT AND BIOCAPACITY TECHNICAL NOTES: 2006 EDITION*, 2006
3. 横山隆壽ら、“化学吸収式 CO₂ 回収技術の評価ーモノエタノールアミンプロセスの運転特性及び LNG 焚き火力発電プラントへの適用に関するフィージビリティスタディー”、電力中央研究所研究報告 T94057、1995
4. 新エネルギー・産業技術総合開発機構、火力発電プラントからの CO₂ 回収システムに関する調査 (I)、平成4年度報告書、1993
5. 新エネルギー・産業技術総合開発機構、「地球環境から見た総合的化石燃料サイクル分析評価手法の調査 (II)」、1996
6. European Energy Exchange AG, available online www.eex.de
7. IPCC, *Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage.*, 2005

謝 辞

本研究を行うにあたり、ご指導いただきました佐藤徹先生には大変感謝しております。また、ミーティングにおいて様々なアドバイスをして頂いた多部田茂先生、日本船舶海洋工学会海洋の大規模利用に対する包括的環境影響評価委員会(IMPACT 委員会)にて議論をさせていただいた、大阪府立大学 大塚先生、海上技術安全研究所 城田さん、東京大学 北澤先生、大内さん、日本大学 岡本先生、東京大学 山口先生、東京大学 段先生、東京大学 山吉さん、IHI 横澤さん、東京大学 川淵君、大阪府立大学 富士君、北海道での IMPACT 合宿中のドライブで熊を見た横浜国立大学 村井先生、山中先生、野尻君、みなさまには大変お世話になりました。委員のみなさまの議論がなかったら、この研究を行うことは不可能でした。

アンケート項目決定の際に、丁寧なコメントをいただきました、KANSO 渡辺さん、長崎大学 石松先生、栗原さん、海洋環境生物研究所 喜田さん、北海道大学 増田さんには大変感謝しております。

また、アンケート時に約束したため、具体的なお名前をここでは申し上げられませんが、年末年始のお忙しい中アンケートに快くご協力いただいたみなさまには、厚く御礼申し上げます。

M1 の時、本郷の生活でお世話になりました水槽の皆様、ありがとうございました。

最後に、柏に引っ越してから研究の方向性を見失いつつあった自分を叱咤激励してくださった佐藤研のみなさま、丁さん、乾さん、平林さん、バクティアさん、上城さん、同期の水向君、中山君、杉田君、林さん、加野さん、野尻君、ありがとうございました。