CO₂ 海洋隔離の社会受容性に関する研究 ーアンケート調査とリスクコミュニケーションの試行ー

正員 上城功紘* 正員 佐藤 徹**

A Study on Public Acceptance of CO₂ Ocean Sequestration
- Questionnaire Investigation and Trial of Risk Communication -

by Hironori Kamishiro, Member Toru Sato, Member

Summary

CO₂ sequestration will be one of the effective options for the mitigation of the global warming, and its technology development is underway widely in the world. In spite of number of benefits of the technology, there are also risks, i.e. local impact on deep-water environments. In order to implement this technology, public acceptance is inevitable, even though the impact is proved to be trivial. In this study, a questionnaire survey was conducted to obtain the correlations of possible factors to the public acceptance by the covariance structure analysis and to estimate marginal willingness to pay for this technology by the conjoint analysis. The results show that the outreach of information increases the acceptance and that the people who make much of its benefits have tendency to accept but those who consider the use of deep ocean ethically are concerned about its risks. In addition, we carried out risk communication via Internet, where the logic analysis of the discussions in its BBS site reveals that field experiment and adaptive management are important.

1. 緒 言

大気中の CO₂ 濃度を今世紀末に 550 ppm あるいはそれ以下に安定化させるためには、化石燃料の利用を 2050 年ころから減少させ、2100 年にはゼロとしなくてはならない。CO₂ 海洋隔離とは、再生可能エネルギー等の CO₂ を排出しないクリーンエネルギーに徐々に移行していく過程で、今世紀中に排出する化石燃料起源の CO₂ を、大気から海洋に隔離する技術である。大気に排出した CO₂ はいずれ海洋が吸収し、大気ー海洋間で平衡に達するが、温度躍層の存在により、CO₂ が中深層に拡散するには数千年かかる¹⁾。このように海洋の CO₂ 吸収は非常に遅いプロセスであるため、2100 年から数百年間に大気中濃度のピークが生じ、この間の温暖化によるハザードが懸念されている。海洋隔離はこの濃度ピークを低減する効果を持つ。また海洋内の中深層に数千年かかって拡散する自然のプロセスを人工的に促進する技術であると解釈できる。

海洋隔離は上記のような温暖化対策というベネフィット

を持つ一方、リスクとして深海の CO₂ 放出近傍域における局所的な環境影響が考えられる。仮に人知の及ぶ範囲で生物影響が理解されたとしても、さらにその上でこの技術の実施・普及には一般の人々の理解、すなわち社会受容性が重要となる。一般に社会受容性を向上させるためには、技術開発成果や海域観測結果に関する情報を正確に社会に伝えるのみならず、その方法も事業者からの一方的なものでなく、利害関係者と対話を行いながら情報交換を行っていくリスクコミュニケーション²⁾³⁾が重要となる。

海洋だけでなく全ての生態系は、人類には完全に把握できない非定常性と不確実性を内在しており、全てを完全に解明することは不可能であると考えられる。仮に環境影響を 100% 理解しなければ開発ができなくなると、経済性や安全性とのバランスが崩れ、むしろ社会が不利益を被ることも起こり得る。そこで開発と環境への配慮を両立させるため提案されている手法が順応的管理である⁴⁾。これは、管理対象である生態系が非定常性と不確実性を含んでいるということ为前提に、政策の実行を順応的な方法で、多様な利害関係者の参加のもとに実施するものである。このような取り組みは、予め開発段階において実施することで、実用段階に起こるであろう問題を事前に把握することが可能となり、以下の点において有効であると考えられる。一つ目は、実用段階に

*三井海洋開発(株) (研究当時 東京大学大学院工学系研究科)

**東京大学大学院新領域創成科学研究科

原稿受理 平成 18 年 7 月 7 日

において何らかの問題発生が起きた場合にも不作為責任の回避が出来るという点、二つ目には一般の人々の問題意識を把握することが出来ることから、開発段階における研究投資の重点化が出来るという点、最後に今後 CO₂ 海洋隔離が事業化された際に、順応的管理のプロセスを経て合意形成を得たという実績により、国際競争において優位に立てるという点である。

以上の事から、CO₂ 海洋隔離を実用段階に移行する以前の開発段階において、その社会受容性を評価し、人々の価値観や問題意識を把握しておくことは、今後この技術を普及させていくための重要な足掛かりになると言える。そこで本研究では、情報提供を挟んで2回のアンケート調査結果を実施し、情報提供による受容性の変化や、アンケートの各因子の相関について調べる。またコンジョイント分析による選好調査を実施し、CO₂ 削減量や海洋隔離の希釈に対する支払い意思額を算出する。さらにリスクコミュニケーションの試行として web site を立ち上げ、仮想的な CO₂ 放出実験を行い、BBS に書き込まれた意見・対話を通じて人々がこの技術をどう受けとめるかを解析する。

2. CO₂ 海洋隔離の社会受容性に関するアンケート調査

アンケート調査では、社会受容性に対して影響を与えている因子を割り出し、どのような情報が社会受容性に対して効果を与える可能性があるのか解析を行った。調査は、複数大学の講義時間の一部を利用し、質問紙により行った。被験者は CO₂ 海洋隔離に関する知識がそれほど無いと考えられる長崎大学水産学部、東海大学海洋学部、京都大学理学部、東京大学教養学部・工学部の大学生、合わせて 174 名であった。時間と予算の制約から理系大学生を対象としたため、必ずしも一般市民を代表するものにはならない点に注意を要する。アンケート調査結果に対し、アンケート因子の相互連関を定量化するため、共分散構造分析を実施した。共分散構造分析についての詳細は前田らの文献⁹⁾を参照されたい。

2.1 質問紙構成

質問紙は、徳重らの文献⁶⁾を参考に、Table 1 に示した 38 の設問と、4 つの電力に関する設問に対して回答を求めた。尺度は SD 法の 7 点尺度とした。また徳重ら⁷⁾が社会的受容の因子に対してリスク認知、ベネフィット認知因子以外の因子が影響を及ぼしていると示唆していることを参考に、Table 1 の 13~33 の質問項目にあるように環境倫理因子と事業実施者への信頼因子を加えた。

2.2 アンケート調査の因子

本アンケートは、「社会的受容」、「リスク認知」、「ベネフィット認知」、「環境倫理」、「信頼」の各因子によって構成されている。「社会的受容」とは、人々が CO₂ 海洋隔離をどの程度受容しているのかを示し、「リスク認知」、「ベネフィット認知」は人々の CO₂ 海洋隔離に対するリスク、ベネフィットの感じ方や捉え方の状態を示す因子である。「環境倫理」は、人々の環境に対する倫理観を示し、「信頼」は人々が CO₂ 海洋隔離を行う組織に対する信頼の強さを表した因子である。本研究ではこれらの因子を定量化することにより分析を行っていく。

Table 1 Contents of questionnaire

ベネフィット認知に関する設問	1. 社会の便益	信頼に関する設問	22. 組織への信頼
	2. 個人の便益		23. 情報の公開
	3. 将来世代の便益		24. 組織の能力
	4. 社会への貢献		25. 海洋生物の安全への関心と配慮
	5. 個人的な必要性		26. CO ₂ モニタリングの実施
			27. CO ₂ モニタリング期間
			28. CO ₂ 挙動予測の実施
			29. CO ₂ 挙動予測期間
			30. 情報の公開
			31. 万一の場合の被害者への補償
			32. 第三者評価機関の存在
			33. 安全・環境基準の存在
リスク認知に関する設問	6. 安全性	将来への期待	34. 個人的な受容
	7. 結果の深刻さ		35. 場所による受容
	8. リスクの観察可能性		36. 社会の受容
	9. リスクの科学的知見		37. 将来世代の受容
	10. リスクの新規性		38. 推進の可否
	11. 海洋環境への影響		
	12. 海洋生物への影響		
			39~42. 電力に関する設問
環境倫理に関する設問	13. 防止の積極性	社会的受容に関する設問	
	14. 自然の摂理への適合性		
	15. 文明発展のツケ		
	16. 人間の立ち入りの是非		
	17. 自然の摂理への適合性		
	18. 自然のコントロール		
	19. 環境が経済か		
	20. 自然のまま		
	21. 自然の権利		

Table 2 Contents of supplied information

地球温暖化に関する情報	CO ₂ 海洋隔離技術に関する情報
① 地球温暖化の原因	① 海洋隔離の概念
② 炭素循環	② 海洋隔離の効果1
③ 地球温暖化のメカニズム	③ 海洋隔離の効果2
④ 地球温暖化の予測	④ 海洋隔離技術の概要
⑤ 地球温暖化の影響	⑤ 海洋隔離のリスク
⑥ 地球温暖化の対策	⑥ 希釈技術と環境影響評価技術の開発
	⑦ 海洋隔離技術の現状と今後
	⑧ 海洋隔離に関する組織

2.3 情報提供の概要

被験者に対して質問紙調査を実施した後、地球温暖化と CO₂ 海洋隔離に関する情報を提供し、再度、1 回目と同じ質問紙調査を実施した。これによって、情報提供が社会的受容やリスク認知、ベネフィット認知にどのような変化をもたらしたかの評価を行った。Table 2 に、提供した情報の項目の概要を示す。それぞれの情報提供は図・グラフを中心にした 16 スライド (8 ページ) ほどの紙面による説明とした。実際のアンケートや情報提供資料は文献⁸⁾を参照されたい。

2.4 調査結果と考察

(1) 情報提供による社会受容性の変化

情報提供前後での「社会的需要」、「ベネフィット認知」、「リスク認知」の回答者全員の因子得点の変化を Table 3 に示す。各因子得点は、0 を平均として -1 から 1 の範囲になるように正規化してある。情報提供は「社会的需要」と「ベネフィット認知」の向上に効果的であることがわかる。但し、その絶対値は小さい。「リスク認知」に対しても、値は「ベネフィット認知」対比約 7.7%と小さいものの、情報提供によって回答者が CO₂ 海洋隔離のリスクをより正確に知ったために「リスク認知」が上昇したことが見て取れる。

Table 3 Change of factor scores by information supply

	ベネフィット認知	リスク認知	社会的受容
情報提供前	-0.0840	-0.0065	-0.0679
情報提供後	0.0840	0.0065	0.0679

ベネフィットとリスクのどちらを重要と捉えるかで「社会的需要」の因子得点が大きく二極化されていたため、回答者を「ベネフィット認知」の因子得点が「リスク認知」よりも大きい回答者（分類 1）と、その逆の回答者（分類 2）の 2 種類に分類し、それぞれに対して情報提供の前後での「リスク認知」、「ベネフィット認知」、「社会的受容」の各因子得点の変化を Fig. 1 に示した。図中、円の大きさは「社会的受容」の因子得点を示しており、斜線で描かれた円は負の値を示す。また矢印は、情報提供の前後の時間的変化を示す。尚、分類 1 の情報提供前の人数比率は 49.3%、提供後は 56.1%であった。

分類 1 の回答者については、情報提供前後とも「ベネフィット認知」、「社会的受容」の因子得点は正、「リスク認知」

Fig. 1 Changes of acceptance and recognitions before and after information supply

は負となっており、情報提供により 3 因子とも増加している。

「リスク認知」が増加しているのは、情報提供前には曖昧であったリスクが情報提供により、より明確に捉えられるようになったためと考えられる。分類 2 の回答者については分類 1 とは逆に、情報提供前後とも「ベネフィット認知」、「社会的受容」の因子得点は負、「リスク認知」は正值をとっている。また各因子得点が情報提供後に増加しているのは分類 1 と同様だが、中でも「ベネフィット認知」が大きく増加している。その一方、「社会的受容」の増加は僅かで、その変化は分類 1 より小さい。このことから、分類 2 の回答者にとって、「社会的受容」に関して、例えば倫理観のように情報提供によって左右されない因子の影響があるのではないかと考えられる。

(2) 社会受容性に影響を与える因子

2 回目のアンケート結果を用い、リスクやベネフィットの認知による社会的受容への寄与を共分散構造分析によって評価し、決定係数 R^2 は 0.84 以上の統計的に有意であった 8 つの係数を Fig. 2 に示す。「社会的受容」は「ベネフィット認知」から最もプラスの影響を受けており、「環境倫理」から最もマイナス影響を受けている。また環境に対する倫理観が強い人は、ベネフィットを低く、リスクを高く捉える傾向にあり、事業実施組織に対しての信頼が強い人ほど、「社会的受容」に対してプラスの影響を与えるベネフィットを高く捉える傾向がある。

Fig. 3 では各因子からそれぞれの質問項目へのパス係数、すなわち因子負荷量を示す。例えば「ベネフィット認知」の場合、「社会への貢献」、「社会の便益」、「将来世代の便益」に関する質問項目に対して強い関連性があることを示している。「リスク認知」に関しては、主に海洋環境や、海洋生物への影響を低減させることが重要であり、これらに関す

Fig. 2 Correlations among question factors

る研究や研究成果の情報発信がリスク認知低減に繋がると言える。Fig. 2 で示されたように、「環境倫理」も受容に及ぼすマイナス影響は大きく、CO₂海洋隔離が自然の摂理に反すると解釈されると、社会受容性が減少する可能性がある。緒言において述べたように、海洋隔離は自然の炭素循環を促進させるものであるということの理解促進が重要であると言える。このように、各因子との関連性が強い項目に対して重点的に研究開発や広報を充てることにより、社会的受容の向上へと繋がる可能性がある。「信頼」において、「情報の公開」のパス係数がマイナスになっているのは、この質問項目であった「CO₂海洋隔離を実施する組織や人々は、情報をマイナス面も含めて十分に公開すると思いますか」が、組織への信頼そのものではなく、「組織が情報を正確に出すことに対する信頼」と解釈されたためであると考えられる。

さらに、事業実施者のどのような行動が将来の信頼の向上に繋がるのかを調べた結果が Fig. 4 である。「将来の信頼」を高めるためには「海洋生物の安全への関心と配慮」や「CO₂モニタリングの実施」に関して対策を講じること、すなわち

実施者が海洋生物をリスクから守ることに関心を払うことが信頼を高める重要な対策であると言える。また「第三者機関の存在」も重要であることがわかる。

3. コンジョイント分析

上記アンケート調査の2回目に、2章で分析対象とした質問に加えて、コンジョイント分析による選好調査を実施した。

3.1 属性と水準の選定

コンジョイント分析ではプロフィールを用いてアンケートを行う。プロフィールは、その事象を表現する複数の属性とその水準によって構成される。水準とは、各属性がとるさまざまな値のことである。隔離する CO₂ は集中排出源、すなわち火力発電所からの方が自動車などの分散排出源から回収するより効率的である。そこで本調査では、海洋隔離のコストを電気料金として受益者が負担するものとし、通常属性として電気料金を、環境属性として CO₂削減量と海水 CO₂濃度を選定した。これら選定した属性の詳細を以下の(1)～(3)に示す。また設定した各属性の水準を Table 4 にまとめる。

Table 4 Attributes and levels for conjoint analysis

属性	水準1	水準2	水準3	水準4
電気料金[円]	6,500	6,750	7,000	7,250
CO ₂ 削減量[万ton]	1,000	2,000	3,000	4,000
海水CO ₂ 濃度[ppm]	1,000	3,000	5,000	10,000

(1) 電気料金

Table 5 に示す原単位等を用いると、1世帯の月平均電力使用量 290kWh から発生する CO₂ 量 113kg のコストは約 834 円/月となる。ここで CO₂ 海洋隔離のコストの現時点での見積り値は予想幅の 6,518～8,229 円/t-CO₂⁹⁾ の平均値とした。この金額を目安に電気料金約 6,200 円（電気事業連合会ホームページより）に上乗せした料金を水準として提示した。

Table 5 List of costs

	コスト	単位
CO ₂ 海洋隔離コスト	6518～8229	円/t-CO ₂
平均的な一世帯電力料金	6200	円/290kwh
排出量原単位	0.39	kg-CO ₂ /kwh

(2) CO₂削減量

上記電気料金により回収できる予算によって、CO₂ 海洋隔離を行った場合に達成できる年間の CO₂ 削減量を水準として提示した。

Fig. 3 Question factors and factor loadings

Fig. 4 Future-reliability factor and factor loadings

(3) 海水 CO₂ 濃度

CO₂ 放出点近傍での局所的な海水 CO₂ 濃度を水準として提示した。この濃度を直感的に理解させるために、Kurihara et al.¹⁰⁾によるウニの幼生の各濃度別の成長の様子を示す写真をアンケートに添付した。ウニは中深層に生育せず、むしろ表層海水酸性化に影響されるが、ここでは CO₂ 濃度別の成長の差異が視覚的にわかりやすいものとして採用した。

3.2 プロファイル・デザイン

選定した属性の水準を組み合わせ、プロファイルの作成を行う。このとき属性間に相関があると、属性の推定に影響を及ぼす可能性がある。市販の統計ソフトを用いて、実験計画法に基づいた直交表 (L₁₆(4⁵)) を作成し、それによって属性間の相関がゼロとなるように 16 種類のプロファイルを作成した。作成したプロファイルの一部を Table 6 に示す。

Table 6 Example of profiles for conjoint analysis

	1	2	3	4	5
電気料金 [円]	6,500 円 (+300 円)	6,750 円 (+550 円)	7,250 円 (+1,050 円)	7,250 円 (+1,050 円)	どれも好ましくない
CO ₂ 削減量 [万 ton]	1,000 万 ton (0.8%)	1,000 万 ton (0.8%)	3,000 万 ton (2.4%)	2,000 万 ton (1.6%)	
海水 CO ₂ 濃度 [ppm]	5,000ppm	3,000ppm	1,000ppm	3,000ppm	

3.3 分析結果と考察

本調査で得られた家庭用電力の選択に関する設問の回答結果について、条件付ロジットモデルを用いて属性毎に推定を行い、コンジョイント分析を行った。その結果を以下の(1)~(4)に示す。

(1) パラメータ

属性の電気料金、CO₂削減量、局所的 CO₂ 濃度の 3 項目について条件付ロジットモデルにより推定されたパラメータ β (選好強度) を Table 7 に示す。電気料金の係数の符号がマイナスであるため、電気料金が高くなると回答者の効用が低下、すなわち回答者の満足度合いが低下し、その電力が選択される確率が低下することを意味している。局所的 CO₂ 濃度においても同様に符号がマイナスであることから、局所的 CO₂ 濃度が増加することにより回答者の効用が低下し、その電力が選択される確率が低下することを意味している。また CO₂ 削減量においては係数がプラスであることから、CO₂ 削減量が増加することにより回答者の効用が増加し、その電力が選択される確率が増加することを意味している。

t 値と P 値の算出結果も Table 7 に示す。本調査において推定した 3 項目のすべてが t 値についてはその絶対値が 5

Table 7 Estimated parameters, p-ratings, and t-ratings

	係数	t 値	p 値
電力料金	-12.0472	-5.372	0.000
CO ₂ 削減量	0.2728	5.336	0.000
海水CO ₂ 濃度	-0.1629	-6.671	0.000

以上、P 値については 0.05 以下であり、すべてのパラメータが高い有意性を持って推定されたといえる。

(2) 部分効用値

推定されたパラメータを用いて属性毎の水準の部分効用値を算出し、各水準がどのくらい好まれているかを属性内で比較したグラフが Fig. 5 である。部分効用値とは、個々の属

Fig. 5 Partial utilities of electric rate (a), CO₂ reduction (b), and CO₂ concentration (c)

性内の水準を採用することによって得られる効用の値、つまり回答者のその水準に対する魅力の度合いのことである。算出された部分効用値から、電気料金が上昇することにより、あるいは局所的 CO₂ 濃度が上昇することにより、効用が大きく低下することがわかる。また CO₂ 削減量に関しては、上昇することにより効用は上昇することがわかる。

(3) 重要度

次に属性毎の部分効用値の最高値と最小値の差分（レンジ）を求め、全てのレンジ合計に対する属性毎のレンジの割合を示す属性毎の重要度を式(1)により算出した。

$$I_j = \frac{\max_k a_{jk} - \min_k a_{jk}}{\sum_j (\max_k a_{jk} - \min_k a_{jk})} \quad (1)$$

ここで、 I は重要度、 a は部分効用値、 j は属性、 k は水準である。重要度とは、回答者がどの属性をどの程度重視して回答したかを表す指標である。Fig. 6の重要度の算出結果から、回答者は電気料金を最も重視して回答している。以降局所的 CO₂ 濃度、CO₂ 削減量の順となった。この結果から、回答者は CO₂ 海洋隔離のベネフィットである CO₂ 削減量より、リスクである CO₂ 海洋隔離によって上昇する局所的 CO₂ 濃度を重視して選択を行っていることがわかる。但し、両者の重要度とも、電気料金の重要度と比較するとその値は小さい。

(4) 限界支払意思額（MWTP : Marginal Willingness To Pay）

$$MWTP_{x_1} = \frac{dT}{dx_1} = -\frac{\partial V}{\partial x_1} / \frac{\partial V}{\partial T} = -\frac{\beta_1}{\beta_T} \quad (2)$$

式(2)で算出される MWTP を地球温暖化負荷と海洋への負荷の2属性について算出し、結果を Table 8 に示す。

Fig. 6 Importance degrees of attributes

Table 8 Resultant marginal willingness to pay

属性	限界支払意思額	単位
CO ₂ 削減量	226.4	円/千万t
海水CO ₂ 濃度	-135.2	円/千ppm

CO₂削減量については、1,000 万 t 削減することが、1 ヶ月 290kWh の電気料金が約 6,200 円から約 226 円追加的に上昇することを受け入れさせるほどに評価された。また局所的 CO₂ 濃度については、CO₂ 注入による濃度上昇分を 1,000ppm 低減することに対して、電気料金が約 135 円追加的に上昇することを受け入れさせるほどに評価されたことがわかる。

一世帯の月平均電力使用量 290kwh から発生する CO₂ を全て CO₂ 海洋隔離によって回収・固定を行うと仮定し、Table 5 に基づいてコストの上積み分を算出すると月額 834 円/世帯である。従って、月々 834 円電気料金の値上げを行った場合の最低限の技術達成目標は、MWTP の算出結果から、CO₂ 削減量で 3,679 万 t、局所的 CO₂ 濃度においては 6,161 ppm 低減となる。一方、日本の全世帯数 4,686 万は電気使用により 6,360 万 t/年の CO₂ を排出しており、電気料金を毎月 834 円余計に払った総額は 4,690 億円/年となる。もし人々が 834 円の上乗せで期待する隔離量が 3,679 万 t でよいのであれば、上記金額の 42% の 1,970 億円/年は、局所的 CO₂ 濃度低減のための技術開発や新たな革新的エネルギーの開発に回すことが考えられる。但し、今回のアンケートの被験者が生活観念の乏しい学生であることを考慮すると、これらは大きめに見積もりすぎであると言えよう。

4. web site によるリスクコミュニケーションの試行

ここでは web site 上において仮想的な海洋実験を舞台として議論を行い CO₂ 海洋隔離に対してどのように人々が感じているのか意見を抽出する。海洋実験は現実にはまだ実施されていないため、魚類死亡率モデル¹¹⁾と動物プランクトン死亡率モデル¹²⁾¹³⁾を用いて影響量を推定する。

4.1 リスクコミュニケーションの概要

web site 上において仮想的な実験を舞台とし、生物死亡率モデルを用いて、そこで行われる作業、結果について自由に BBS 上で議論を行ってもらう。作成した web site は CO₂ 海洋隔離技術の説明、CO₂ 海洋隔離実験の様子、議論・質問の場から構成されている。被験者にはまず一通りの実験の様子を理解してもらい、その後議論へと移ってもらう。

Fig. 7 Top page of risk communication URL

Fig. 7に示すトップページには更新情報と本サイトの説明書きを加え、必要であれば Fig. 8 に示した CO₂ 海洋隔離についての基礎情報も得られるようにした。次に実験についてのページでは、CO₂ 投入・CO₂ 拡散・モニタリング等について説明し、最後に仮想実験結果である生物影響量について説明した。ある時点での生物影響量の説明の一例を Fig. 9 に示す。ここでは前述したとおり、生物死亡率モデルを用いて、生物影響量を算出した。

本研究では CO₂ の初期投入濃度を変化させ、その結果議論がどのように発展していくのか時系列変化を分析する。提示した初期投入濃度と死亡率の時間変化は Fig. 10 のとおりである。web site の公開は平成 18 年 1 月 5 日から 20 日間行った。CO₂ 濃度を変化させるたびに、メーリングリストに登録してもらった被験者に web site を見てもらうよう連絡した。最後に BBS ページにて CO₂ 海洋隔離についての議論を行ってもらった。20 日間の議論総数は 200 弱であった。その一部を Fig. 11 に示す。

Fig. 8 Web page explaining concept of CO₂ ocean sequestration in risk communication URL

Fig. 9 Web page explaining virtual field experiment in risk communication URL

Fig. 10 Time change of CO₂ concentration and mortality informed to participants of BBS discussion

<p>Re: CO2海洋隔離 ポブ - 2006/01/14(Sat) 16:26 No.24</p> <p>はじめまして いつも興味深く拝見しております。</p> <p>私はstudentAさんの仰るとおり、現状では、他の温暖化対策技術よりも削減ポテンシャルに魅力があるので、何もせずにPJ中止というのはもったいないのではと思います。ただ実行するにはうらさんの仰るとおり慎重に何度も実験を繰り返し行い結果を何度も検討し、コンセンサスをとる必要があると思います。</p>
<p>Re: CO2海洋隔離 たろう - 2006/01/16(Mon) 02:37 No.25</p> <p>はじめまして</p> <p>僕は賛成できないですね。どのようにうまく海洋隔離をしても少なからず生物に影響は出るのですから、いい方法だとは思いません。</p>
<p>Re: CO2海洋隔離 StudentA - 2006/01/16(Mon) 17:41 No.26</p> <p>>たろうさん</p> <p>「海洋隔離は生物に影響を与えるからいい方法ではない」とありますが、「いい」「悪い」とは何か基準があり、相対的に述べるものです。たろうさんは、他の何と比べていい方法ではないと思っているのでしょうか？</p>
<p>Re: CO2海洋隔離 うら - 2006/01/16(Mon) 17:52 No.27</p> <p>>ポブさん</p> <p>何をもちコンセンサスが取れるのかというのが難しい問題になりそうですね。短期的な実験によってプランクトンの死亡したという結果だけでも、反対意見を待つ人はいらっしゃいます。私は工学系の学生なので、理論・実験で検証できればGOサインという考え方がありますが、検証は必ずしも100%信用できるものでもないですし、環境団体からの反対もあるでしょう。近海で生活している方にとってはさらに大きな問題でしょうね。</p>
<p>Re: CO2海洋隔離 たろう - 2006/01/16(Mon) 19:39 No.28</p> <p>>studentAさん</p> <p>確かに否定しているのですから、何か他の案を推薦したいのですが、現状ではどの技術もバツたしたものがないですね。ただ人間が存続するのに他の生物に迷惑をかけるというのが海洋隔離に対して賛成できない理由ですね。</p>
<p>Re: CO2海洋隔離 StudentA - 2006/01/16(Mon) 19:58 No.29</p> <p>>たろうさん</p> <p>たろうさんの意見は理解できます。必要がないのなら、海洋隔離なんてやるべきではないです。ただ、温暖化問題とまず天秤にかけてから考えるべきです。温暖化によっても他の生物に迷惑はかかるでしょう。</p>
<p>Re: CO2海洋隔離 たろう - 2006/01/16(Mon) 21:31 No.30</p> <p>>studentAさん</p> <p>これといった技術が無い今、最小限の影響にとどめてくれるなら、海洋隔離技術の開発を進めて、いざという時に使えるようにしとくべきかもしれませんね</p>

Fig. 11 Example of discussions held in BBS page

4.2 分析方法

議論の分析は、堀田¹⁴⁾を参考に、以下の5つの定義により議論単位ごとに関係付けを行う。

- ① 証明 (Prove) : 議論単位 A よると議論単位 B は必然的に真である (ApB と記す)。
 - ② 支持 (Support) : 議論単位 A によると議論単位 B が真であることがあり得る (AsB と記す)。
 - ③ 反論 (Challenge) : 議論単位 A によると議論単位 B が偽であることがあり得る (AcB と記す)。
 - ④ 反証 (Disprove) : 議論単位 A によると議論単位 B は必然的に偽である (AdB と記す)。
 - ⑤ その他 (Others) : 議論単位 A は議論単位 B に対して論理的帰結を持たない (AoB と記す)。例として議論の一般化や特定化、非誘導的質問、感嘆的応答等がある。
- 定義①～⑤によって定式化された5種類の議論単位間関係は、その論理積に関して閉じた系をなしていることが証明できる。これに基づき、Horita¹⁵⁾は下記の公理系を構築した。

$$pp \equiv sp \equiv p \quad (3)$$

$$ps \equiv ss \equiv cc \equiv cd \equiv dc \equiv dd \equiv s \quad (4)$$

$$pc \equiv cp \equiv sc \equiv cs \equiv dp \equiv ds \equiv c \quad (5)$$

$$pd \equiv sd \equiv d \quad (6)$$

$$op \equiv os \equiv oc \equiv od \equiv oo \equiv o \quad (7)$$

これらの公理を繰り返し適用することにより、当初の主要議題とそこから派生した議論との関係を5種類の1つとして表現することができる。すなわち任意の長さ議論単位鎖が、2つの議論単位間の直接的関係によってどのように根拠づけられているかを表現する。Horita¹⁵⁾によると、ある議論単位 A と直接または間接的に証明、支持、反論、反証、その他いずれの関係を持つ議論単位の個数をそれぞれ $i_p(A)$, $i_s(A)$, $i_c(A)$, $i_d(A)$, $i_o(A)$ とし、これらを要素とする集合を $i(A) = \{i_p(A), i_s(A), i_c(A), i_d(A), i_o(A)\}$ とすると2つの指標、肯定的根拠率 (Positive Ground Rate: PGR) と被議論率 (Attention Rate: AR) とが定義される。

$$PGR_A = \frac{i_p(A) + i_s(A)}{i_p(A) + i_s(A) + i_c(A) + i_d(A)} \quad (8)$$

$$AR_A = \frac{\sum_{j \in \{p, s, c, d, o\}} i_j(A) + 1}{\sum_{a \in \Omega} \sum_{j \in \{p, s, c, d, o\}} i_j(a)} \quad (9)$$

ここで Ω は議論単位 A と比較対象となる議論単位 a の集合である。PGR は議論単位 A から派生した全ての議論のうち、A を証明または支持するものの占める割合であり、A がどの

程度他の議論単位によって肯定的に根拠づけられているか、すなわち「議論の趨勢」を指標にしたものと考えられる。議論単位 A から派生した議論が全て A にとって肯定的であった場合、PGR は最大値 1 を取り、逆に全て否定的（反論または反証）であった場合、最小値 0 を取る。AR は議論単位 A と比較対象となるような全ての議論単位のうち、A から派生した議論の占める割合であり、その取りうる範囲は(0, 1)である。分子に 1 を加えるのは、A 自身を含めるという意味である。ある議論単位が高い PGR を示していたとしても、極めて少数の議論により根拠づけられている場合は、PGR 自体が新しい議論によって大きく変動しやすく、安定性が低い。AR はこの安定性を指標化したものと言える。

4.3 分析結果

web site 上で行われた議論（1 月 24 日時点）の一部をツリー構造にすると Fig. 12 のようになる。Fig. 12 では、本研究での議論は全て「CO₂ 海洋隔離に関する賛否」という主題から派生するように表現され、各々の議論が主題とどのような論理的・意味論的關係にあるか、現時点でどの程度他の議論により根拠付けられているか等を把握することができる。例えば、議論グラフ 2 行目の「生態系への影響が不安」という議論は、他のどの議論と比較しても最も高い AR を示しており、この話題が議論全体のバランスを決める上で重要な位置を占めていることがわかる。さらに実際に議論グラフのリンクをたどると、この主張は同 4 行目の「実験を行えばいい」という主張の妥当性を巡って主な議論が構成されていることが把握できる。

このような議論の視覚化により、議論グラフの下位部分に

属する議論も主題との関連を明確に示すことができる。例えば今主題を A₀、13 行目の「実験により少しでも多くのことを解明すべき」を A₁ とすると、両者の関係は式(3)から式(7)に示した公理により、

$$A_1 \text{ccccsscc} A_0 = A_1 s A_0 \quad (10)$$

となり、主題に対する「支持」であることが導出できる。これらと同様の作業を行うことにより、各議論が他の議論とどのような論理的関係にあるかを視覚的に把握した。

AR が高く、より多くの議論が行われていたと考えられる議題として、「生態系への影響が不安」、「濃度を上げて実験すべき」が挙げられる。これらの議論グラフのリンクをたどっていくと、前者においては「実験を行うことにより不安が取り除けるのではないか」という意見が多く見られる。また「生物を人間の犠牲にして良いのか」というような倫理観からの意見も見られる。これらから、実験を行い生態系の影響解明を行い、また CO₂ 海洋隔離が自然に踏み込んでいると取られないことが社会的受容性の増加に繋がるのではないかと考えられる。

後者の「濃度を上げて実験すべき」という議題に関しては、CO₂ を投入する海域における生物量に関しての議論が多かったことがわかる。このことから海域の生物量調査を正確に行い、できるだけ生態系への影響が出ない海域を選択することが社会的受容性の増加に繋がると考えられる。これら AR の高かった議論において、PGR が高かったものをまとめたものが Fig. 13、Fig. 14 である。

	PGR	AR
海洋隔離についての賛否	0.66	1.00
生態系への影響が不安	0.36	0.37
不安は取り除けないのか？	1.00	0.02
実験を行えばいい	0.58	0.30
実験を行ってもわからない問題はある	1.00	0.02
深刻な影響を出す可能性もある	1.00	0.02
慎重に実験を行えばいい	0.67	0.23
繰り返し実験を行えばいい	0.67	0.16
どんなに努力しても影響はでる	0.20	0.14
人間のために生物を犠牲にしているのか	0.75	0.12
地球温暖化を放置しても生物に影響はある	0.00	0.00
いつでも実行できるように準備はすべき	1.00	0.02
実験により少しでも多くのことを解明すべき	1.00	0.05
実験してもしなくても同じなのでは	1.00	0.02
結果を検討し一般の人々の理解を得るべき	0.00	0.05
環境団体の反対がある	1.00	0.02
多少の損害は目をつむるべき	1.00	0.02
実験は中止すべきではない	1.00	0.07
地球温暖化に対して他に有効な打開策がない	1.00	0.05
削減ポテンシャルが魅力的	1.00	0.02
濃度を上げて実験を行うべき	0.67	0.23
生物量が少ない海域なら比較的高い濃度でも良いと思う	0.63	0.23
生物調査を長期間行うべき	1.00	0.02
貴重な生物がいる可能性もある	0.33	0.16
生物が多いところよりは少ないところを選択すべき	0.50	0.07
短期の死亡率だけを考えるならそれでよい	1.00	0.02
生物量の少ない場所ですらに生物を少なくしてしまえば	1.00	0.02
その海域の生態系は回復不能になるのでは	0.50	0.07
生物量の多い場所で開催して回復力に期待する	1.00	0.05
やはり、多い場所で行う方がよいのでは	1.00	0.05
生物量が多くても回復力はわからないのでは	1.00	0.02
生物量より希釈技術の発展を重視すべき	1.00	0.02

Fig. 12 Example of tree-structures of discussions

Fig. 13 Main arguments on impact to deep-water ecosystems

Fig. 14 Main arguments on amount of marine organisms

次に初期投入濃度を变化させたことによる、議論の変化について分析した。本議論の開始当初においては、CO₂ 海洋隔離についての賛否に関する議論はほとんど行われておらず、そのほとんどが CO₂ 海洋隔離やその実験手法に関する質問であった。よって議論の蓄積が多くなってきた1月17日以降についての「海洋隔離についての賛否について」の PGR の変化を Fig. 15 に示す。

Fig. 15 から、50,000 ppm の時点で PGR は最も高い値を示していることがわかる。これは「魚類・プランクトンの死亡率が、濃度変化に対して想像より増加しなかった」という被験者の意見があり、他の被験者もこれを支持したためと考えられる。最終的に濃度を 100,000 ppm に変化させると PGR は下がるが、この時の議論の半数以上は CO₂ 海洋隔離に対

Fig. 15 Change of PGR for concept of CO₂ ocean sequestration depending on local CO₂ concentration

Fig. 16 Time change of AR distribution

する賛成意見が占めている。

最後に AR の変移について分析を行う。議論は「生態系への影響が不安」、「実験は中止すべきでない」、「濃度を上げて実験を行うべき」の3つを中心に行われており、この3つの議題の AR の時間変化を Fig. 16 に示す。Fig. 16 から開始当初は生態系への影響についての議論が中心になされていたが、徐々に実験濃度に関する議論へと移行していったことがわかる。「生態系への影響が不安」という議題に対しての PGR が低いことから、被験者は生態系への影響をそれほど不安に感じておらず、これが影響して徐々に議論の中心からはずれていったのではないかと考えられる。議論が移行した「濃度を上げて実験を行うべき」という議題の PGR は高く、被験者の関心も高かったのではないかと考えられる。この議論は後に CO₂ を投入する海域での生物量に関する議論に発展しており、被験者は海域の選択に対しても関心が高いと言える。

5. 結 言

アンケート調査とリスクコミュニケーションの結果より、CO₂ 海洋隔離の社会受容性の向上のためには以下のように研究、また情報発信していくことが重要であるといえる。

- 1) CO₂ 海洋隔離に関しての一般的な情報提供は社会的受容の増加に繋がる。
- 2) CO₂ 海洋隔離の社会的受容を構成する因子として、プラス影響を与えるものとしてベネフィット認知・信頼、マイナス影響を与えるものとして、リスク認知・環境倫理が挙げられる。
- 3) コンジョイント分析の結果から、家庭で使用される電力の発電時に発生する CO₂ を海洋隔離により固定する場合、そのコストを電力料金（現在 6,200 円/世帯/月）により賄うとすると、CO₂ を 1,000 万 t 隔離する限界支払意思額は 226 円、深海での局所的 CO₂ 濃度を 1,000ppm 低減させるための限界支払意思額は 135 円であった。

- 4) 社会的受容を高めるためには、CO₂ 海洋隔離のベネフィットに関する適切な情報発信や、海洋生物の安全を意識し、隔離後の CO₂ の挙動をしっかりとモニタリングすること、環境影響評価技術の研究・研究成果についての情報発信、CO₂ 海洋隔離が自然の摂理に反していると受け取られないこと等が有効な手段として挙げられる。
- 5) CO₂ 海洋隔離の海洋実験を行い、また CO₂ 海洋隔離実行の予定海域での生物現存量調査を行い、生態系の知見を増やすことが今後の社会受容性の拡大に繋がる。

謝 辞

本研究の一部は(財)地球環境産業技術研究機構 (RITE) からの援助を受けている。本研究のアンケート調査に関する部分は RITE の秋元圭吾氏、徳重功子氏の指導を受けた。同機構の村井重雄氏、間木正道氏には web site に用いる資料の提供を受けた。長崎大石松惇教授、東海大中田喜三郎教授、京大白山義久教授、東大染矢聡助教授、環境省谷津龍太郎氏には貴重な講義時間を割いてアンケート調査に協力いただいた。(株)環境テクノスの渡辺雄二氏、(財)海洋環境生物研究所の吉川貴志氏には生物実験のデータを提供していただいた。(独)産業技術総合研究所の丸山康樹氏、東大堀田昌英助教授にはリスクコミュニケーションについてのアドバイスをいただいた。ここに謝意を表明します。最後にアンケート及び BBS に協力いただいた各大学の学生諸君に感謝申し上げます。彼らの問題意識の高さや真剣な議論は期待以上で、心から感服しました。

参 考 文 献

- 1) Hoffert, M., Wey, Y.-C., Callegari, A. J., Broecker, W. S. : Atmospheric response to deep-sea injections of fossil-fuel carbon dioxide. *Climate Change*, Vol. 2, pp. 53-68, 1979.
- 2) Slovic, P. et al. : Characterizing perceived risk. In Kates, R. et al. (Eds.), *Perilous progress - Managing the hazards of technology*, Westview, 1985.
- 3) Slovic, P. : Perception of risk. *Science*, Vol. 236, pp. 280-285, 1987.
- 4) 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, Vol. 37, pp. 198-204, 2005.
- 5) 前田忠彦：日本人の満足感の構造とその規定因に関する因果モデルー共分散構造分析の“日本人の国民性調査”への適用, 統計数理, 第 43 巻, 第 1 号, pp. 141-160, 1995.
- 6) 徳重功子他：二酸化炭素地中貯留技術のリスク認知と社会受容性に関する分析・評価, 第 20 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, pp. 555-558, 2004.
- 7) 徳重功子他：CO₂ 地中貯留技術のリスク認知・ベネフィット認知とその社会的受容への寄与, 第 21 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, pp. 625-628, 2005.
- 8) 上城功紘：CO₂ 海洋隔離の社会受容性に関する調査研究, 東京大学工学系研究科修士論文, 2006.
- 9) (財)地球環境産業技術研究機構：平成 16 年度二酸化炭素の海洋隔離に伴う環境影響予測技術開発報告書, 2005.
- 10) Kurihara, H., Shimode, S., Shirayama Y. : Sub-lethal effects of elevated concentration of CO₂ on planktonic copepods and sea urchins. *J. Oceanogr.* Vol. 60, pp. 743-750, 2004.
- 11) 吉本直広：魚類の CO₂ に対する馴致を考慮した死亡率モデルの開発, 東京大学大学院工学系研究科修士論文, 2004.
- 12) Sato, T. : Numerical simulation of biological impact caused by direct injection of carbon dioxide in the ocean”, *J. Oceanogr.*, Vol. 60, pp. 807-816, 2004.
- 13) Sato, T., et al. : Extended probit mortality model for zooplankton against transient change of PCO₂. *Marine Poll. Bull.*, Vol. 50, pp. 975-979, 2005.
- 14) 堀田昌英他：参画型パブリック・マネジメントの情報基盤 CRANES の開発, 土木学会論文集, Vol. 686, pp. 109-120, 2001.
- 15) Horita, M. : Folding arguments: a method for representing conflicting views of a conflict. *Group Decision and Negotiation*, Vol. 9, pp. 3-83, 2000.