

二酸化炭素回収貯留の社会的便益の分析

宮城 充宏^{*1}・山本 肇^{*1}・熊本 創^{*1}・阪本 浩章^{*2}

Keywords : Carbon dioxide Capture and Storage, social benefit, Data-driven Spatial Climate Impact Model

二酸化炭素回収貯留, 社会的便益, Data-driven Spatial Climate Impact Model

1. はじめに

二酸化炭素回収貯留 (Carbon dioxide Capture and Storage : CCS) は、工場等から排出される CO₂ を分離・回収し、地下深部の砂岩層などに貯留する地球温暖化対策技術の一つである。経済産業省の「CCS の長期ロードマップ検討会」¹⁾では、IEA による世界の脱炭素シナリオから逆算し、我が国では 2050 年までに 1.2 億トン/年～2.4 億トン/年規模の CCS が必要であると報告されている。CCS はカーボンニュートラル実現のための重要技術の一つと位置付けられており、現在、国は事業化へ向けた動きを進めている。

CCS 事業から得られる利益は、その便益から費用を差し引くことで求められる。CCS の事業性に関わる既存の研究として、CCS にかかる費用分析については多く報告されている^{2,3,4)}。

単純には、CCS から得られる便益は、

$$\text{CCS の便益} = \text{CO}_2 \text{ 価格} \times \text{総貯留量} \quad (1)$$

から評価できる。ここで、CO₂ 価格とは、1 トンの CO₂ 貯留に対して設定する価格である。式(1)中の CO₂ 価格については、欧州の Emission Trading System やカーボンクレジット等の市場価格を参照する手法が考えられる。ただし、この手法の問題点として、CO₂ の市場価格が市場制度及び政策に大きく依存する点や排出量評価の透明性の確保が困難である点等が挙げられる。その他に、CCS の便益を直接設定する方法も考えられる。例えば、CCS の市場価格が低く、CCS 実施のためにインセンティブが必要な場合、CCS 実施に関わる費用を計算し、その費用よりも便益が大きくなるように国などが補助金を設定する場合もある。

本研究では、これらと違う立場から、CCS の本来の

便益を考察する。すなわち、気候変動を緩和することで社会全体が得られる便益（これ以降、社会的便益と呼ぶ）に着目する。これまでの研究において、CCS の社会的便益を評価した事例は報告されていない。本研究では、CCS から得られる社会的便益の評価技術の開発を目的とする。

本研究では、CCS の社会的便益を評価する手法を提案する。提案手法では、CCS を実施しない場合に発生する気候変動による被害・対策費用と CCS を実施することで緩和された気候変動による被害・対策費用の差を CCS から得られた社会的便益と定義する。なお、提案手法を用いることで式(1)中の左辺 (CCS の便益) を評価できるため、数値シミュレーションなどによって総貯留量が評価できれば、社会的便益に基づいた CO₂ 価格も求められる。

気候変動の影響を定量的に評価するためのツールとして Integrated Assessment Model (IAM) が提案されている。既存研究^{5,6,7)}では、IAM を用いて、ある年に 10 億トンの CO₂ を排出した時の社会的費用を算出し、1 トンの CO₂ を排出するときの被害について分析している。ここで、社会的費用とは、気候変動の影響によって生じた被害・対策費用である。

本報では IAM の一つである Data-driven Spatial Climate Impact Model (DSCIM) を用いて CCS の社会的便益を分析した。具体的には、2030 年～2080 年の一定期間で、現実的と考えられる貯留レート (20 万トン/年, 200 万トン/年, 2000 万トン/年) で CCS を実施した際の社会的便益について分析した。本報は事業規模が異なる CCS の社会的便益の分析を試みた事例として、今後の CCS の事業計画や事業性評価に役立つと考えられる。

2. 社会的便益の計算手順

* 1 技術センター 社会基盤技術研究部 地盤研究室

* 2 神戸大学

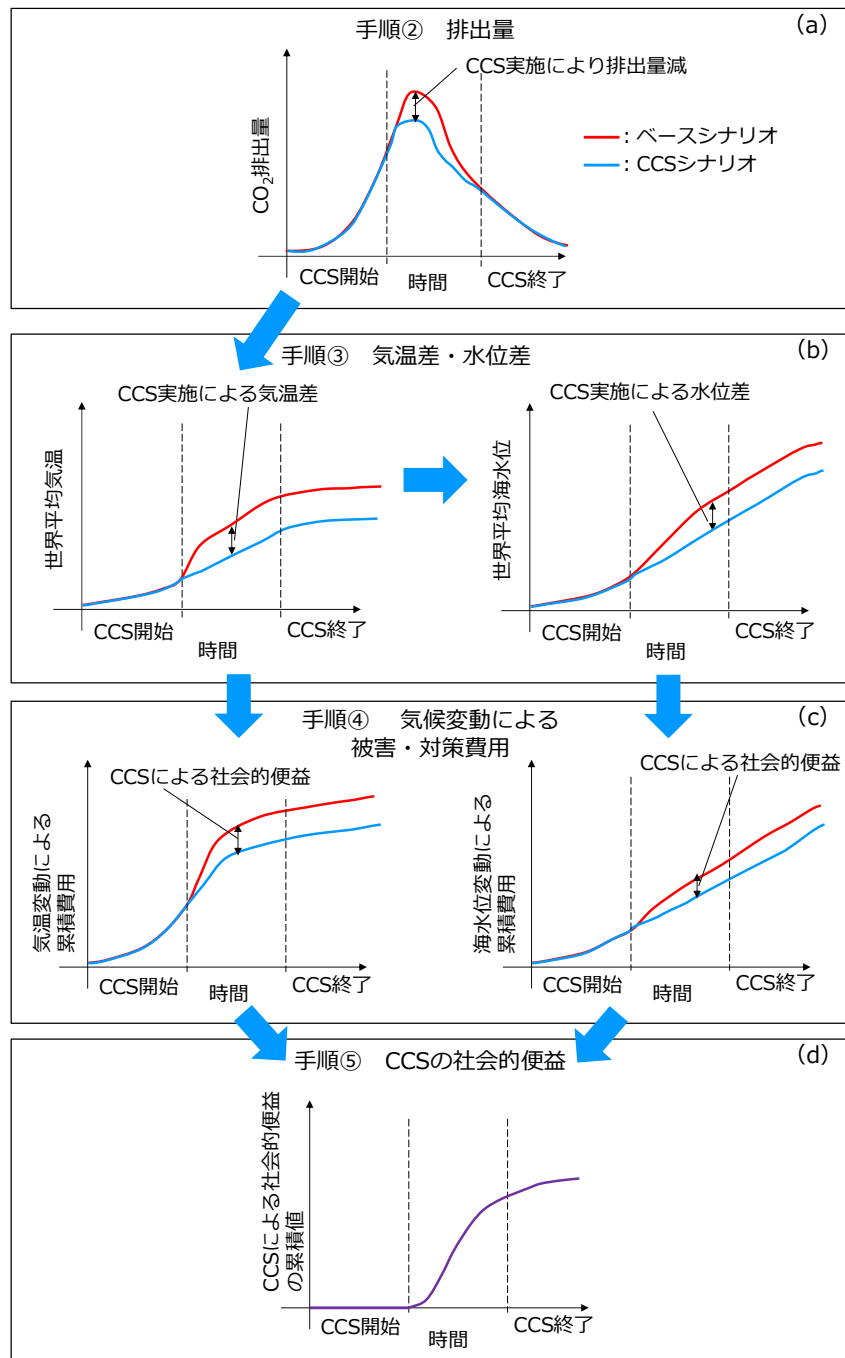


図-1 CCS の社会的便益計算のフロー

Fig.1 Workflow for calculating the social benefit obtained by CCS

2.1 手順の概要

今回提案する CCS の社会的便益を計算する手順の概略を以下に示す。また、下記手順②～⑤のイメージを図-1 に示す。

- ① 入力データとして、CO₂ 排出シナリオデータ、一人当たりの GDP シナリオデータ、気候変動による農業分野や海水位変動等の被害・対策費用の推定で用いるデータ、割引率（将来の社会的便益を現在の社会的便益に換算する割合）、CCS の事業シナリオ（CO₂ 貯留量や操業期間など）を用意する。

今回用いるシナリオデータの詳細については後述する。

- ② CCS を実施しない際の CO₂ の排出シナリオデータ（ベースシナリオ）と CCS を実施した際の CO₂ の排出シナリオデータ（CCS シナリオ）を作成する。（図-1(a)）
- ③ ベースシナリオと CCS シナリオでの、各々の世界平均気温（これ以降、平均気温と呼ぶ）と世界平均海水位（これ以降、平均海水位と呼ぶ）の変動を予測する。（図-1(b)）

- ④ 気候変動の被害・対策費用の推定で用いるデータと予測された平均気温及び平均海水位から、被害・対策費用を DSCIM によって算出する。(図-1(c))
- ⑤ ベースシナリオと CCS シナリオで求められた被害・対策費用の差から CCS の社会的便益を推定し、割引率を用いて、事業開始時期の社会的便益に換算する。(図-1(d))

本研究では、手順②でベースシナリオの CO₂ 排出シナリオを CCS の CO₂ 貯留量や操業期間などにより変化させることで、CCS の社会的便益を評価する。各手順の詳細については以下に述べる。

2.2 入力データ (手順①, ②)

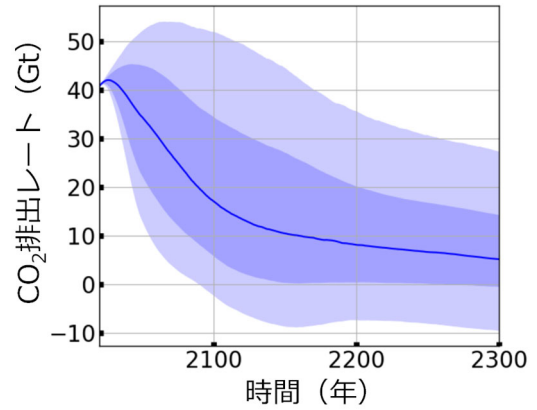
手順①の入力データには公表データを用いる。今回用いる 2020 年～2300 年の CO₂ 排出と一人当たり GDP のシナリオデータを図-2 に示す。両データは現在までの観測データをもとに 2300 年まで推定された 10000 シナリオのデータセットである。これらのデータはアメリカの研究所で非営利団体である Resource For the Future により公表されている⁶⁾。図-2(a)から CCS の特定プロジェクトの貯留レートを減じることで、CCS の実施シナリオを作成する (手順②)。次に、気候変動の被害・対策費用の推定で用いるデータは既存の研究⁷⁾で公開されているデータを使用する。割引率は 2300 年まで一定値で、1.5%, 2%, 2.5%とする。

2.3 気候変動エミュレータ (手順③)

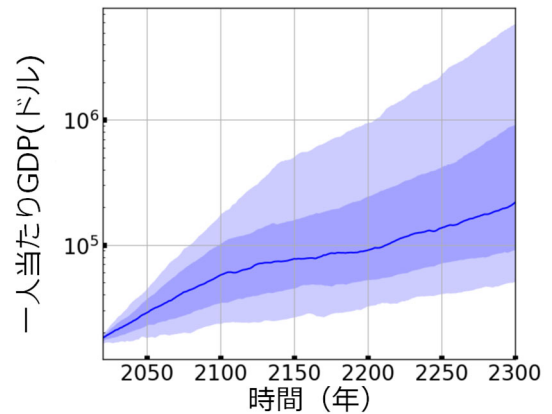
手順③の平均気温・平均海水位を求める一つの手法として、各地域での気温・海水位変動を計算し、最終的に各時刻で平均化する方法が考えられる。このとき、大規模計算機を用いて空間的・時間的な大気・海水の流れを解く手法が用いられている^{8,9)}。しかし、これらの計算には膨大な計算資源・計算時間を必要とする。そこで、これらの気候変動シミュレーションを近似し、短時間で平均的な挙動を評価できる気候変動エミュレータを使用する。

平均気温については、Finite Amplitude Impulse Response (FAIR)¹⁰⁾を使用する。FAIR は、空間的に平均化された温暖化効果の変動のみを考慮し、CO₂ 排出シナリオデータを入力として、長期的な平均気温の変動を短時間で予測するエミュレータである。大気中の CO₂ が海洋等に吸収される量よりも大量の CO₂ が放出され、放射強制力が高まり、温暖化効果が高まるという基本的な考えのもと設計されている。

FAIR では、地表と海洋との熱伝達率等の不確実な内部パラメータがある。これらのパラメータの不確実性



(a) CO₂ 排出シナリオデータ



(b) 一人当たりの GDP シナリオデータ

— : 50パーセンタイル値 ■■■ : 25~75パーセンタイル幅
■■■ : 10~90パーセンタイル幅

図-2 CO₂ 排出シナリオデータと
一人当たりの GDP シナリオデータ

Fig.2 Scenario data CO₂ emission and GDP per capita

は、気候変動シミュレーションとの比較によりキャリブレーションされた 1000 パラメータセットにより評価できる¹¹⁾。今回は、一つの CO₂ 排出シナリオデータから、1000 個の平均気温推移を計算し、50 パーセンタイル値を代表値として評価する。

平均海水位については、Semi-Empirical Sea Level (SESL)¹⁴⁾を使用する。SESL では、空間的に平均化された海水位の変動のみを考慮し、FAIR から得られた平均温度を入力として、平均海水位変動を求める。SESL では、平均海水位は、

$$S(t) = \sum_{s=s_s}^t [a(T(s) - T_e(s)) + c(s)] \quad (2)$$

$$\frac{dT_e(t)}{dt} = \frac{(T(t) - T_e(t))}{b} \quad (3)$$

$$\frac{dc(t)}{dt} = \frac{c}{d} \quad (4)$$

より計算される。ここで、 $T(t)$ は時刻 t での平均気温、

$S(t)$ は時刻 t での平均海水位, T_e は平衡気温, a, b, c, d はハイパーパラメータ, s_s は計算開始時刻, である。既存研究¹²⁾では平均海水位の既存データ^{13, 14)}に整合するようにハイパーパラメータが求められている。しかし, 求められたハイパーパラメータは公表されていない。そこで今回は, 別の既存データ⁵⁾と整合するようなハイパーパラメータを求めて使用する。

ベースシナリオにおける平均気温変動値 $\Delta T(t)$ 及び平均海水位変動値 $\Delta S(t)$ のエミュレーション結果を図-3に示す。ここで, 平均気温変動値 $\Delta T(t)$ とは 1850~1900 年での平均気温 (平均気温を期間で平均化した気温) と各年の平均気温との差を, 平均海水位変動値 $\Delta S(t)$ は 2000 年での平均海水位と各年の平均海水位との差を各々意味している。本研究では, 図に示す平均気温変動値・平均海水位変動値を CCS によって低減させることで得られる社会的便益の分析を目的としている。

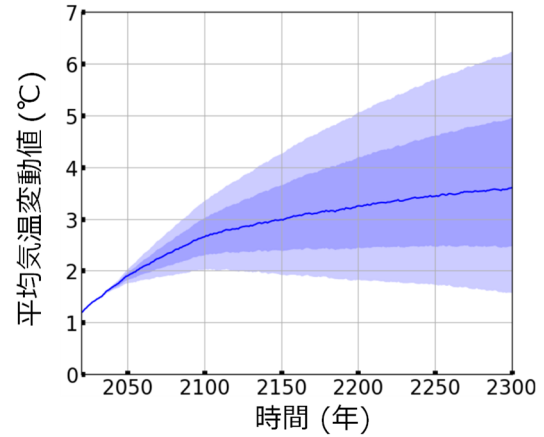
2.4 DSCIM (手順④)

手順④では, Discrete Spatial Climate Impact Model (DSCIM)⁷⁾を用いて気候変動による被害・対策費用を推定する。DSCIM は CO₂ 排出の社会的な限界コストを求めることを目的に開発された。DSCIM では, 気候変動による被害・対策費用は平均気温変動値及び平均海水位変動値の関数としてモデル化されている。具体的には, 過去の平均気温変動値及び平均海水位変動値と各地域での被害・対策費用とが整合する回帰関数を求めてモデル化している。ただし, 回帰関数によるモデル化は, 致死率¹⁵⁾, エネルギー¹⁶⁾, 農業¹⁷⁾, 労働生産性¹⁸⁾, 海水位¹⁹⁾の分野における被害・対策費用に限られる。

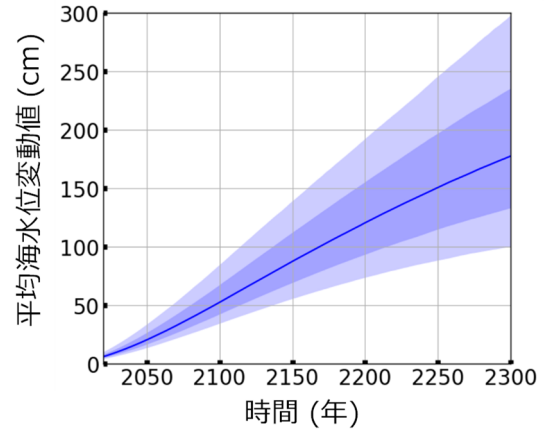
単年の致死率, エネルギー, 労働生産性, 農業 (海水位以外) の費用は, 平均気温変動値に関わる二次関数でモデル化されており,

$$D_i(t, \Delta T(t)) = \alpha_i(t) \times \Delta T(t)^2 + \beta_i(t) \times \Delta T(t) \quad (5)$$

より計算される。ここで, i は対象分野のインデックスで, 致死率, エネルギー, 労働生産性, 農業のいずれかを意味し, D_i は i 分野での被害・対策費用, α 及び β は回帰関数の係数, である。係数 $\alpha_i(t)$ 及び $\beta_i(t)$ は, 各年の一人当たりの GDP に依存するように設定されており, 時刻 t 毎に与えられている。つまり, 一人当たりの GDP が多ければ, 被害・対策費用も大きくなるという自然な振る舞いがモデル化されている。各 t 年で一人当たり GDP は 10000 個用意されているため, $\alpha_i(t)$ 及び $\beta_i(t)$ についても同様に 10000 個用意されている。



(a) 平均気温変動値



(b) 平均海水位変動値

— : 50パーセンタイル値 ■■■ : 25~75パーセンタイル幅
■■■ : 10~90パーセンタイル幅

図-3 ベースシナリオでの平均気温変動値と平均海水位変動値のエミュレーション結果

Fig.3 Emulation results of the global mean surface temperature and global mean sea level

海水位の変動による単年の被害・対策費用は, 平均海水位変動値に関わる二次関数でモデル化されており,

$$D_s(t, \Delta S(t)) = \gamma(t) \times \Delta S(t)^2 + \epsilon(t) \times \Delta S(t) \quad (6)$$

より計算される。ここで, D_s は海水位変動による被害・対策費用で, ΔS は平均海水位変動値, γ 及び ϵ は回帰関数の係数, である。係数 $\gamma(t)$ 及び $\epsilon(t)$ は上記の係数 $\alpha_i(t)$ 及び $\beta_i(t)$ と同様に一人当たりの GDP に依存するように設定されているため, 10000 個のパラメータセットが用意されている。なお, 係数 $\gamma(t)$ 及び $\epsilon(t)$ は政策により被害・対策費用を最小化されたケースでの係数なため, 費用 $D_s(t)$ は過少に評価される可能性がある。詳細は既存研究¹⁹⁾を参照されたい。

上記のように, DSIM で対処できる分野は限られているため, 実際にはより多くの被害・対策費用が必要になると考えられる。例えば, 豪雨や台風等の自然災害

による被害・対策費用は考慮されていない。DSCIM の詳細な課題については既存研究⁵⁾を参照されたい。

2.5 社会的便益の推定 (手順⑤)

手順⑤で推定する各年の CCS による社会的便益は、

$$B_e(t) = \Sigma_i(D_i(t, \Delta T_b(t)) - D_i(t, \Delta T_{CCS}(t))) + D_s(t, \Delta S_b(t)) - D_s(t, \Delta S_{CCS}(t)) \quad (7)$$

より求まる。ここで、 B_e は CCS より得られる社会的便益、 ΔT_b 及び ΔS_b はベースシナリオでの平均気温変動値と平均海水位変動値、 ΔT_{CCS} 及び ΔS_{CCS} は CCS シナリオでの平均気温変動値と平均海水位変動値、である。ただし、今回のような遠い将来の社会的便益（例えば、 $B_e(2300)$ ）は不確実であり、そのまま社会的便益として評価するにはリスクがある。このリスクを考慮するために、将来の社会的便益を割引いて評価することが考えられる。

本研究では、ラムゼイモデル^{20, 21)}を用いて割引効果を含んだ社会的便益を評価する。割り引かれた社会的便益 $B_d(t)$ は、

$$B_d(t) = B_e(t) \times e^{-r(t, t_s)} \quad (8)$$

$$r(t, t_s) = \rho(t - t_s) + E \left[\ln \left(\frac{C(t)}{C(t_s)} \right)^\eta \right] \quad (9)$$

より計算される。ここで、 ρ 、 η は割引率に関わるハイパーパラメータ、 C は一人当たりの消費（GDP）、 $E[x]$ は x の期待値を求める関数、 t_s は基準となる年で今回は CCS の開始年とする。ハイパーパラメータ ρ 、 η については、既存研究^{6, 7)}で使用されたパラメータを用いる。なお、既存研究^{6, 7)}では、割引率の予測モデル²²⁾と整合するように決められている。式(8)及び(9)から、今回用いるラムゼイモデルでは、CCS の開始年（基準年）から離れるほど（将来のリスクが大きくなるため）割引効果は大きくなるという自然な振る舞いがモデル化されていることがわかる。

割り引かれた社会的便益 B_d は不確実性に関するリスクが考慮されているため、CCS の開始年の社会的便益と同等に評価できる。つまり、CCS より得られる社会的便益 $B(t_s)$ は、

$$B(t_s) = \Sigma_{t=t_s}^{t_e} B_d(t) \quad (10)$$

となる。ここで、 t_e は社会的便益評価終了時期（本研究では 2300 年）、である。

3. CCS の社会的便益分析

上記の計算手順に従って CCS の社会的便益を求め、分析する。以下に分析の条件設定及び結果を記載する。

3.1 条件設定

CCS により CO₂ 排出量を大幅に削減できれば、大気中の二酸化炭素濃度上昇を緩和し、平均気温変動値も小さくなり、気候変動による被害・対策費用の上昇を大きく緩和できると考えられる。そこで、分析する CCS の事業シナリオとしては、CO₂ の貯留レートを 20 万トン/年、200 万トン/年、2000 万トン/年の一定とした 3 ケース（50 年の事業期間における総貯留量が 1000 万トン、1 億トン、10 億トンの 3 ケース）である。操業期間を 2030 年から 2080 年とし、2300 年までの被害・対策費用を評価する。

上記分析では、様々な不確実性を考慮するために、10000 個の CO₂ 排出シナリオデータ及び一人当たりの GDP シナリオデータを用いて、CCS の社会的便益を 10000 個計算し、その平均値を用いて評価する。

3.2 分析結果

各ケースにおける社会的便益の計算結果を表-1 にまとめた。同表が示す通り、CCS 事業の貯留量が大いほど社会的便益は大きくなっていることがわかる。分析結果より、今回の CCS 事業の貯留量及び割引率では、平均的な社会的便益は約 12 億ドル～約 3454 億ドル程度であることが示された。

CCS による社会的便益の累積値推移の一例として、割引率 2%で貯留レートが 200 万トン/年のケースの結果を図-4 に示す。同図より、多くのシナリオデータで、CCS の実施期間である 2030～2080 年から得られる社会的便益よりも、その後で得られる社会的便益のほうが大きいことがわかる。これは、より後のほうがベースシナリオの平均気温変動値が大きいためである。これについては次節の考察で述べる。

上記分析結果に加えて、CO₂ の 1 トンあたりの社会的便益 U.S.ドル/トン（式(1)での CO₂ 価格）の平均値を表-2 にまとめた。表-2 が示す通り、どのケースでも CO₂ 価格はほぼ同じ値を示した。つまり、この規模（20 万トン/年～2000 万トン/年）の CCS 事業であれば、CO₂ は同額で貯留されることが合理的であると考えられる。貯留量に関わらず CO₂ 価格がほぼ同じとなった結果は次節で考察する。

3.3 考察

上記分析において、貯留量に関わらず CO₂ 価格がほ

表-1 分析結果 (単位：十億ドル)

Table 1 Analysis results (Unit : Billion U.S.\$)

貯留量 (百万トン)	割引率(%)		
	1.5	2.0	2.5
10	3.45	2.06	1.23
100	34.54	20.58	12.28
1000	345.41	205.79	122.81

表-2 CO₂ 価格 (単位：ドル/ トン)Table 2 CO₂ price on analysis (Unit : U.S.\$ / t)

貯留量 (百万トン)	割引率(%)		
	1.5	2.0	2.5
10	345.448	205.810	122.825
100	345.442	205.807	122.824
1000	345.407	205.786	122.810

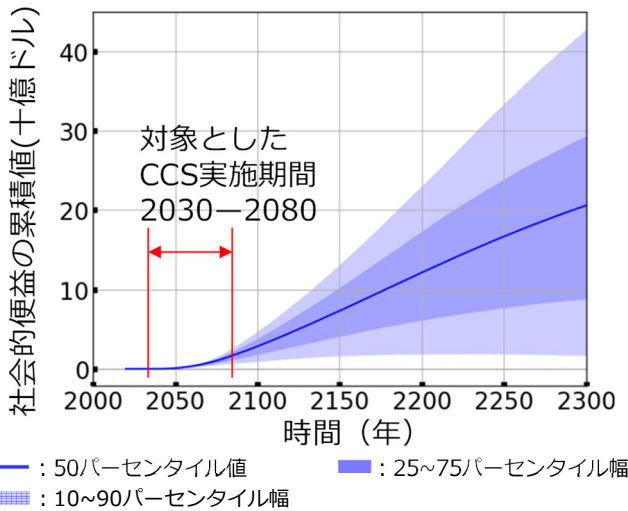


図-4 社会的便益の累積推移 (貯留レート：200 万トン/年)
Fig. 4 Cumulative social benefit from CCS
(Storage rate : 2 Mt/y)

ば同じとなった結果について以下に考察する。

時刻 t までの貯留量を $V(t)$ とし、CCS から得られる社会的便益は貯留量に依存するように $B(t_s, V(t_e))$ と表記する。ここで、CO₂ 価格が貯留量に依存しないとは、

$$\frac{B(t_s, V(t_e))}{V(t_e)} = \text{const} \quad (11)$$

を意味する。ただし、平均海水位変動値による影響は小さいため、本考察では取り扱わないこととする。例えば、割引率2%で200万トン/年のケースで、平均海水位変動値によるCO₂は2ドル/トンで、全体の約1%であった。

社会的便益 $B(t_s, V(t))$ は式(8)と(10)を用いて、

$$B(t_s, V(t_e)) = \sum_{t=t_s}^{t_e} B_e(t, V(t)) \times e^{-r(t, t_s)} \quad (12)$$

と変形できる。ここで、式(11)を示すために、 $B_e(t, V(t))/V(t) = \text{const}$ を示すことを考える。社会的便益 $B_e(t, V(t))$ は、平均海水位変動値の項を無視して、式(5)と(7)を用いて、

$$B_e(t, V(t)) = \alpha_a(t)(\Delta T_b(t)^2 - \Delta T_{CCS}(t)^2) + \beta_a(t)(\Delta T_b(t) - \Delta T_{CCS}(t)) \quad (13)$$

となる。ここで、 α_a は $\sum_i \alpha_i$ 、 β_a は $\sum_i \beta_i$ 、である。式(13)を変形し、 $\Delta T_b(t) + \Delta T_{CCS}(t) \approx 2\Delta T_b(t)$ と近似すれば、

$$\begin{aligned} \frac{B_e(t, V(t))}{\Delta T_b(t) - \Delta T_{CCS}(t)} &= \alpha_a(t)(\Delta T_b(t) + \Delta T_{CCS}(t)) + \beta_a(t) \\ &\approx 2\alpha_a(t)\Delta T_b(t) + \beta_a(t) \\ &= \text{const} \end{aligned} \quad (14)$$

となる。なお、貯留レートが2000万トンのCCSケースで、 $\frac{\Delta T_b(t) - \Delta T_{CCS}(t)}{\Delta T_b(t)}$ は凡そ 10^{-3} であったことを確認してお

り、近似 $\Delta T_b(t) + \Delta T_{CCS}(t) \approx 2\Delta T_b(t)$ は大きく間違っていないと考えられる。平均気温変動値の差 $\Delta T_b(t) - \Delta T_{CCS}(t)$ はFAIRによって計算されるが、 $\Delta T_b(t) - \Delta T_{CCS}(t) \approx \eta(t)V(t)$ と近似できれば、式(14)より、

$$\frac{B_e(t, V(t))}{V(t)} \approx \eta(2\alpha_a(t)\Delta T_b(t) + \beta_a(t)) = \text{const} \quad (15)$$

となる。これより、式(11)を示すことができた。

なお、式(15)では、 $\Delta T_b(t)$ が大きい時ほど、CCS から得られる社会的便益は大きくなることを意味する。これより、図-4において、CCS 実施後の社会的便益のほうが大きくなった理由として、ベースシナリオの平均気温変動値はより後のほうが大きかったためと考えられる。

ここで、 $\Delta T_b(t) - \Delta T_{CCS}(t) \approx \eta V(t)$ の精度を調査するために上記分析の3ケースについて、 $\bar{\eta}(t) = \frac{\Delta T_b(t) - \Delta T_{CCS}(t)}{V(t)}$ (貯留量あたりの気温低下量)の推移を図-5に示す。同図では、50パーセンタイル値を丸印で、10~90パーセンタイル値をエラーバーで示し、2030~2300年の期間で5年毎にプロットした。図では、CCSのケース毎の $\bar{\eta}(t)$ はほぼ重なっており、読み取れないほど小さい差しか確認できなかった。本結果より、

$\bar{\eta}(t)$ は CCS の貯留レートに関わらず、ほぼ一定であり、近似 $\Delta T_b(t) - \Delta T_{CCS}(t) \approx \eta(t)V(t)$ が大幅に間違っていないことを示している。

最後に、今回の分析では、 $\Delta T_b(t) - \Delta T_{CCS}(t) \approx \eta V(t)$ とできたため、式(11)が示す通り、貯留量に関わらず CO₂ 価格がほぼ同じになったと考えられる。近似 $\Delta T_b(t) - \Delta T_{CCS}(t) \approx \eta V(t)$ の適用範囲調査やより高度な解析は今後の課題である。

3.4 追加分析

総貯留量が同じ CCS 事業であっても、式(15)より、CCS の社会的便益及び CO₂ 価格はベースシナリオの平均気温変動値 $\Delta T_b(t)$ に大きく依存すると考えられる。つまり、将来の平均気温変動値 $\Delta T_b(t)$ がより上昇するシナリオにおいて、CCS の社会的便益及び CO₂ 価格はより大きくなると考えられる。

上記の検証を目的に追加分析を行う。ここでは、ベースケースの 2300 年時点において平均気温変動値が 20, 50, 80 パーセンタイルを示すシナリオを抽出し、上記実験で貯留レートが 200 万トン/年のケースの CCS を実施した時の社会的便益を分析する。抽出した CO₂ 排出シナリオを図-6 に示す。図中、抽出したシナリオは赤色の実線で(平均気温変動値が小さいほうから 80, 50, 20 パーセンタイルとする)、背景は図-2(a)と同じである。抽出したシナリオについて上述した手順②～⑤を実施する。

追加分析の結果を表-3 及び表-4 に示す。同表が示す通り、平均気温変動値が大きくなるシナリオにおいて CCS の社会的便益が大きくなっている。この結果は以下のように解釈できる。平均気温変動値が大きいシナリオでは、式(5)より、気候変動による被害・対策費用も大きくなる。今回示した手法で CCS の社会的便益を

評価する際は、ベースシナリオの平均気温変動値を適切に評価することが重要であることが示された。

4. まとめ

本研究では CCS の便益を評価する手法として、CCS を行うことで削減される気候変動の被害・対策費用を CCS の社会的便益として評価する手法を提案した。公表されている 10000 のデータセットを用いて、経済性の不確実性を考慮した。提案手法を用いることで、CCS の社会的便益を評価できることが示された。貯留規模の異なる CCS の社会的便益を分析した結果得られた知見を以下にまとめる。

- 今回の分析結果より、一人当たりの GDP が増加していくシナリオを用いた場合、CCS 実施期間(2030-2080 年)で得られる社会的便益よりも、その後(2080 年以降)で得られる社会的便益の

表-3 追加分析の結果 (単位：十億ドル)

Table 3 Result of additional analysis (Unit : Billion U.S.\$)

パーセンタイル	割引率(%)		
	1.5	2.0	2.5
20	53.5	30.8	17.8
50	30.4	17.7	10.4
80	17.0	11.1	7.2

表-4 追加分析での CO₂ 価格 (単位：ドル/t)

Table 4 CO₂ price on additional analysis (Unit : U.S.\$ / t)

パーセンタイル	割引率(%)		
	1.5	2.0	2.5
20	535	308	178
50	304	177	104
80	170	111	72

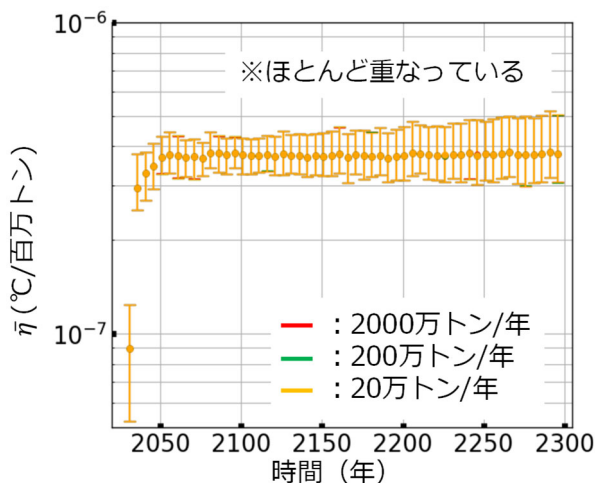


図-5 $\bar{\eta}(t)$ (貯留量あたりの気温低下量) の分析結果
Fig. 5 Analysis of $\bar{\eta}(t)$

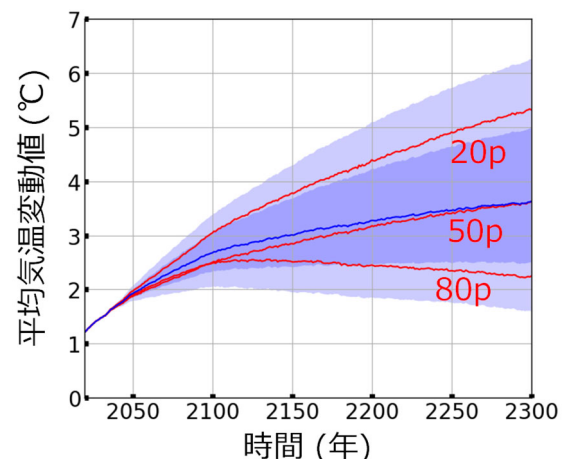


図-6 追加分析のために抽出したシナリオ
Fig. 6 Selected scenarios for additional analysis

ほうが大きくなることがわかった。

- CCS の社会的便益から計算した CO₂ 価格は貯留量に関わらずほぼ一定であることが示された。これは、1 トンの CO₂ を貯留することで得られる気温低下量がほぼ同じであったためである。今回分析した CCS の規模（20 万トン/年～2000 万トン/年）であれば、CO₂ は同額で取引し、貯留されることが合理的であると考えられる。

今回用いた DSCIM では、気候変動による被害・対策費用の評価対象分野が限定されている。このため、今回の分析で得られた CCS の社会的便益は過小評価であると考えられる。より広範な被害・対策費用に対処し、より精度高く社会的便益を評価することは今後の課題である。

今後は本手法を用いて、CCS 事業の便益評価や取引される CO₂ 価格評価に役立てていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 経済産業省：「CCS 長期ロードマップ検討会 最終とりまとめ」, 2023 年。
- 2) Michael T. C., Haibo Z., Paulina J., Kelly K. : Trade-offs in cost and emission reductions between flexible and normal carbon capture and sequestration under carbon dioxide emission constraints, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Volume 66, Pages 25-34, ISSN 1750-5836, 2017.
- 3) David K., Harry L., and Chris C. : Technology Readiness and Costs of CCS, *Global CCS institute*, 2021.
- 4) Jonathan D. O., Ryan M. K., Jeffrey A. B., Kevin M. E., Richard S. M. : Screening for Geologic Sequestration of CO₂: A Comparison Between SCO₂TPRO and the FE/NETL CO₂ Saline Storage Cost Model, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Volume 114, 103557, ISSN 1750-5836, 2022.
- 5) Environmental Protection Agency (EPA) : EPA External Review Draft of Report on the Social Cost of Greenhouse Gases: Estimates Incorporating Recent Scientific Advances in Supplementary Material for the Regulatory Impact Analysis for the Supplemental Proposed Rulemaking, Standards of Performance for New, Reconstructed, and Modified Sources and Emissions Guidelines for Existing Sources: Oil and Natural Gas Sector Climate Review, Docket ID No. EPA-HQ-OAR-2021-0317, 2022.
- 6) Rennert, K., Brian C. P., William A. P., Richard G. N., David A., Cora K., Lisa R., Roger C., Adrian E. R., Hana Š., and Frank E. : The Social Cost of Carbon: Advances in Long-term Probabilistic Projections of Population, GDP, Emissions, and Discount Rates. working paper 21—28. *Resources For the Future*, 2021.
- 7) Rennert, K., Errickson, F., Prest, B.C. et al. : Comprehensive evidence implies a higher social cost of CO₂, *Nature* 610, 687–692, 2022.
- 8) Suzuki, T., and Ishii, M. : Regional distribution of sea level changes resulting from enhanced greenhouse warming in the Model for Interdisciplinary Research on Climate version 3.2, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L02601, 2011.
- 9) Eyring, V., Bony, S., Meehl, G., Senior, C., Stevens, B., Stouffer, R., and Taylor, K. : Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937–1958, 2016.
- 10) Leach, N., Jenkins, S., Nicholls, Z., Smith, C., Lynch, J., Cain, M., Walsh, T., Wu, B., Tsutsui, J., and Allen, M. : FaIRv2.0.0: a generalized impulse response model for climate uncertainty and future scenario exploration, *Geoscientific Model Development*, 14(5), 3007–3036, 2021.
- 11) Smith, C., Cummins, D., Fredriksen, H.B., Nicholls, Z., Meinshausen, M., Allen, M., Jenkins, S., Leach, N., Mathison, C., and Partanen, A.I. : fair-calibrate v1.4.1: calibration, constraining and validation of the FaIR simple climate model for reliable future climate projections, *EGUsphere*, 1–36, 2024.
- 12) Robert E. K., Andrew C. K., Klaus B., Benjamin P. H., Jeffrey P. D., W. Roland G., Carling C. H., Jerry X. M., Eric D. M. and Stefan R. : Temperature-driven global sea-level variability in the Common Era, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(11), E1434-E1441, 2016.
- 13) Michael E. M., Zhihua Z., Scott R., Raymond S. B., Malcolm K. H., Drew S., Caspar A., Greg F. and Fenbiao N. : Global Signatures and Dynamical Origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly, *Science* 326, 1256-1260, 2009.
- 14) Shaun A. M., Jeremy D. S., Peter U. C., and Alan C. M. : A Reconstruction of Regional and Global Temperature for the Past 11,300 Years. *Science* 339, 1198-1201, 2013.
- 15) Carleton, T., et. al. : Valuing the Global Mortality Consequences of Climate Change Accounting for Adaptation Costs and Benefits, *Quarterly Journal of Economics*, 2022.
- 16) Rode, A., Carleton, T., Delgado, M., Greenstone, M., Houser, T., Hsiang, S., Hultgren, A., Jina, A., Kopp, R.E., McCusker, K.E. and Nath, I. : Estimating a social cost of carbon for global energy consumption. *Nature*, 598(7880), pp.308-314, 2021.
- 17) Hultgren, A., et. al. : Estimating global impacts to agriculture from climate change accounting for adaptation, SSRN, 2022.
- 18) Rode, A., et. al. : Labor disutility in a warmer world: The impact of climate change on the global workforce, SSRN, 2022.
- 19) Diaz, D.B. : Estimating global damages from sea level rise with the Coastal Impact and Adaptation Model (CIAM), *Climatic Change*, 137(1), pp.143-156, 2016.
- 20) Ramsey, F.P. : A mathematical theory of saving. *The Economic Journal*, 38(152), pp.543-559, 1928.
- 21) Koopmans, T.C. : On the Concept of Optimal Economic Growth (No. 163), *Cowles Foundation for Research in Economics*, Yale University 1963.
- 22) Michael D. B., Glenn D. R. : The Rising Cost of Climate Change: Evidence from the Bond Market, *The Review of Economics and Statistics*, 105 (5), 1255–1270, 2023.