

平成 26 年 3 月修士論文要旨

(東京大学大学院 新領域創成科学研究科 海洋技術環境学専攻)

## 回収量の変動と荒天による稼働休止を考慮した

## CCS の海上輸送システムに関する研究

## CO<sub>2</sub> Marine Transport System Considering Fluctuation of Capture Rate and Service Suspension due to Rough Sea State

学籍番号 47126652 新井 陽介

指導教員 尾崎 雅彦 教授

(平成 26 年 2 月 3 日発表予定)

Keywords: 二酸化炭素回収・貯留, 船舶輸送, 荒天休止, 回収量, 物流シミュレーション

Keywords: CCS, Ship Transport, Service Suspension, Capture Rate, logistics simulation

### 1. 序論

地球温暖化対策として、世界の二酸化炭素排出量を 2050 年に 50%削減するという長期目標が掲げられている。その中で、先進国としての日本は 80%削減しなければならない。この目標を達成するためには発電における二酸化炭素排出量はゼロを目指す必要がある。有力な方法と考えられていた原子力発電は震災以降動向が不明確であり、また 2030 年に 30%の導入目標が掲げられた再生可能エネルギーによる発電のみでは電力需要を満たすことはできず、不足分を補うために火力発電が必要となるため、CCS が不可欠となるであろう。さらに再生可能エネルギーの普及を考えると、火力発電の役割として、需要変動に応じた発電と再生可能エネルギーの変動を吸収するような柔軟性のある運用が求められ、CCS における二酸化炭素回収量は変動を前提として考えなければならない。一方で CCS の実証実験が世界的になされている中で、日本における CCS の実現に向けた取り組みが世界的に見て遅れている。その理由としては陸上や沿岸付近にサイトの適地が少ないこと、社会的な受容を得ることが難しいこと等がある。これらの問題を解決する手段として考えられているのが船舶輸送方式による CCS である。しかし、荒天時の稼働休止の挽回、陸上タンクの必要容量計画等の検討課題が存在し、適正な輸送システムを計画する手法が必要となっている。

### 2. 研究意義・目標

二酸化炭素量の変動に対応する CCS チェーンの構築による、発電における二酸化炭素排出量の削減を意義として、本研究では①船舶輸送方式におけるコスト要因、並びに二酸化炭素量変動影響の分析、②二酸化炭素量の変動を考慮したシステム・オペレーション方法の計画と提案を研究目標とし、①船舶輸送型 CCS における時系列物流シミュレーションモデルの構築、②モデル計算による分析・計画、を行う。

### 3. 研究手法

初めに時系列シミュレーションモデルの構築を行う。物流シミュレーションソフトとして Rockwell Software 社開発の Arena[1]を利用する。本ソフトは、離散モデルを所定のルール下で時系列的に動かすためのフレームワークであり、これまでに、新設する工場の生産能力の事前検証、稼働率低下につながるボトルネックの発見、輸送システムの最適な運航計画立案などに使われた実績がある。次に二酸化炭素回収量の時間変動モデルを構築する。次に二酸化炭素回収量時間変動モデルの作成と海象特性の分析を行う。電力使用実績、風速データ、日射量データから火力発電に求められる発電量を算出し、ここから求めた二酸化炭素回収量をシミュレーションのための仮想モデルとする。また対象海域の特性から、洋上作業に支障をきたす荒天の発生頻度・継続性を分析する。最後に、構築したシミュレーションモデルを用いて、回収量の変動・荒天時の稼働休止の影響を分析し変動吸収のためのシステム・オペレーション計画を行う。

### 4. 時系列物流シミュレーションモデルの構築

#### 4.1 モデルの構築

Fig. 1 のようにパラメータを定め、設計条件として以下のように定めた。回収サイトと貯留サイトが 1 対 1。Loading 時間は積載可能量に応じて調整。輸送船の係船は一度に一隻まで。船の積載可能量に達するか、陸上タンクが空にな

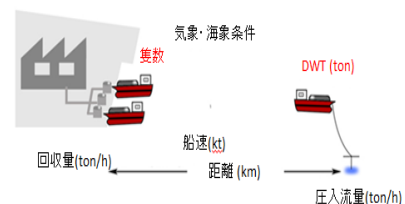


Fig. 1 Parameter of CO<sub>2</sub> Shipping

ったら出航。洋上での係船も一度に一隻。船が運んできた二酸化炭素の全量を圧入。Loading・圧入前後に準備期間を設ける。

またシミュレーションを行う際主要コストの比較評価も行えるようにする。タンク・船舶の建造費は10年で償却。隻数・積載可能量を変化させ、陸上タンク必要容量を求める。隻数・積載可能量の組み合わせから Ship Cost を算出し、陸上タンク必要容量から Tank Cost を算出。また船舶の往復の回数を記録し Fuel Cost を算出し、Ship Cost, Tank Cost, Fuel Cost の合計で評価する。これらのコスト算出は IEA レポート[3], 岡崎[4]の先行研究を参考にした。

#### 4.2 港・圧入サイトの利用可能時間の検討

利用時間帯が厳しくなることごとくコストは高くなるが、積載可能量、隻数、最初の輸送船の到着時間  $FCS$  (h), 次の輸送船が来るまでの時間間隔  $TBA$ (h)の組み合わせを調整することによる適切なシステムの計画により港・圧入サイトの時間制限の影響をほとんど受けることのないシステムの構築の可能性を示せた。

#### 4.3 圧入流量の影響

圧入サイトにおける圧入流量が大きくなると要求される積載可能量は小さくなり Ship Cost は減少するが、Fuel Cost は大きくなるので圧入流量を一定以上大きくしても Total Cost への影響はほとんどないことを示した。

### 5. 二酸化炭素回収量変動

#### 5.1 二酸化炭素回収量時間変動モデル

電力使用実績から、火力発電以外の発電量(原子力発電, 風力発電, 太陽光発電, その他)を引いたものを必要火力発電量として算出し、二酸化炭素回収量を求める。この際、原子力発電の比率、再生可能エネルギーの割合、電力需要(実績)でシナリオをつくる。風力発電量は風速データを風車出力曲線[2]に合わせ風車一基当たりの発電量を求めシナリオに合わせて基数を決定し、太陽光発電については、太陽光発電量と日射量が比例することからシナリオに沿った係数を設定した。シミュレーションへの回収量の入力方法として①年平均固定②確率分布③月別時系列④日別時系列の4つを用いる。

#### 5.2 回収量変動の影響分析

圧入流量は初め、①の年平均回収量の20%増と③における年最大回収量の20%に合わせて設定した。年回収量固定条件で設計したシステムにおいて回収量変動をさせ影響をみる。Fig. 2 に輸送距離 200 km に回収量変動によるコストの変化を示す。Tank Cost が増大しており、年間の変動の影響が大きいことがわかる。Fig. 3 では回収量③の時のタンク内二酸化炭素量の推移を示す。二酸化炭素量が季節変動に合わせて変動しており、輸送能力が足りないことがわかる。輸送距離 1,000km でも同様に初期システムでは回収量の変動を大きく受けてしまうことがわかった。

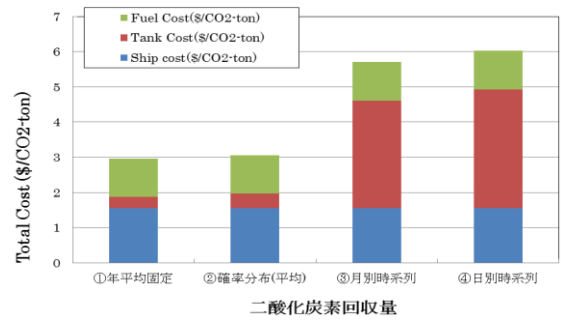


Fig. 2 Effects of capture conditions on costs

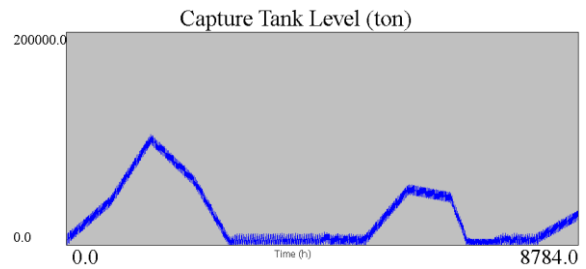


Fig. 3 Quantity of CO<sub>2</sub> in a capture tank(Initial System)

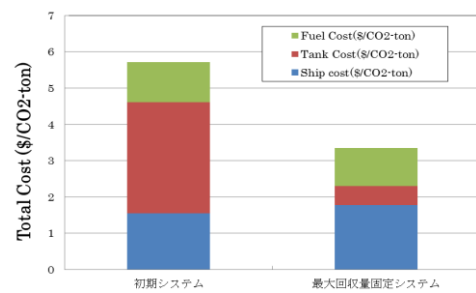


Fig. 4 Total cost (Max System).

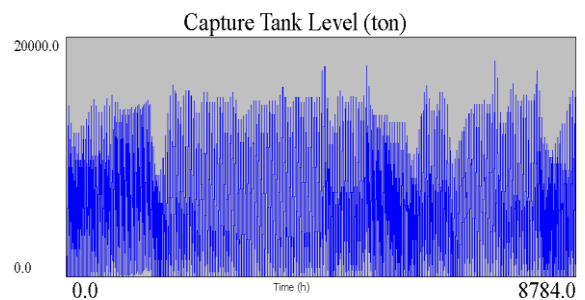


Fig. 5 Quantity of CO<sub>2</sub> in a capture tank(Max System).

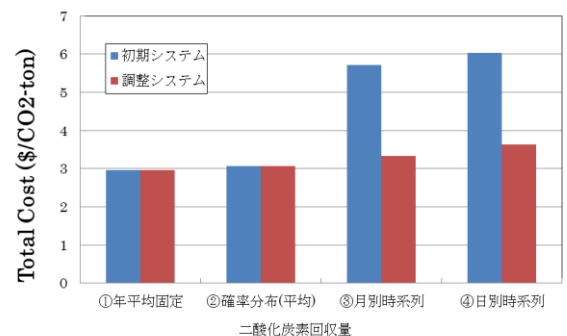


Fig. 6 Total cost (Appropriate System).

### 5.3 回収量変動への対応

年間最大回収量固定条件で設計したシステム（最大システム）において回収量③の時の Total Cost とタンク内二酸化炭素量の推移を Fig. 4, Fig. 5 に示す。回収量の変動をほぼ受けることなく稼働していることがわかる。ここで各二酸化炭素回収量に合わせて積載可能量, 隻数, *FCS*, *TBA* の組み合わせを調整し(調整システム), シミュレーションを行った。Total cost の変化を Fig. 6 に示す。Total Cost が非常に小さく抑えられている。このことから回収量の予測を高精度で行うことができるならば, プロジェクトスタート時プロジェクトスタート時に適切なシステム設計を行うことができることを意味している。しかしながらシステム設計の際に, 未来の二酸化炭素回収量を完璧に予測することは不可能に近い。そこで現実的には最大の回収量予想のみで設計することができる最大システムでの運用が有力であると考えられる。

## 6. 荒天による稼働休止

### 6.1 海象データの分析

ERA-Interim[5]からの 1979 年から 2012 年までの 6 時間刻み, 1 度×1 度の有義波高データを用いて稼働休止の条件を作成した。対象となる海域において, 稼働休止の条件を有義波高 2 m ~ 3 m に設定した時の連続稼働休止日数の発生確率をそれぞれ算出した。稼働休止がある日数以上連続して起こる現象が一年に発生する回数の期待値を Fig. 7 に示す。海域ごとに違う特徴が見て取れた。

### 6.2 圧入サイト閉鎖による輸送システムへの影響

連続稼働休止日数の変化によるコストへの影響を Fig. 8 に示す。稼働休止の影響は圧入が行えるにもかかわらず圧入サイトで輸送船が停滞しているときに発生する。稼働休止が連続するほど Tank Cost が増加していることがわかる。また, 稼働休止がない場合で設計したシステムにおける断続的な稼働休止の影響を Fig. 9 上図に示す。1 度稼働休止が発生すると連続稼働休止日数におうじてタンク内二酸化炭素量は増大し減少することはない。そのため稼働休止が発生するたびに二酸化炭素が増大し続けていることがわかる。そこで増加したタンク内二酸化炭素量を次の稼働休止が生じるまでに十分減少させる必要がある。そこで稼働休止を考慮した調整システムを用いた場合のタンク内二酸化炭素量の推移を Fig. 9 下図に示す。

### 6.3 海象データを用いたシミュレーション

実際の海象データを用いて 1 年分の時系列シミュレーションを行った。稼働休止がない場合設計した初期システムと条件設計した調整システムを用いた。陸上タンク二酸化炭素量の推移を Fig. 10 に示す。稼働休止時に二酸化炭素量が増加しており, 初期システムでは次の稼働休止まで復旧する気配もなく変わらず推移し, ステップ状に二酸化炭素量が増加し続けているのに対し, 調整システムでは一度増加した二酸化炭素量が減少し, 次の稼働休止に備えていることがわかる。次にコストの比較を Fig. 11 に示す。稼働休止条件が弱まるごとに Tank Cost が減少していることがわかる。またこのサイトでは調整システム採用時, 閾値 2 m の場合の Total Cost が突出して大きい。このことからサイトでは稼働休止条件を有義波高 2.5 m 以上に設定することができればコスト削減効果が大きくなると考えられる。

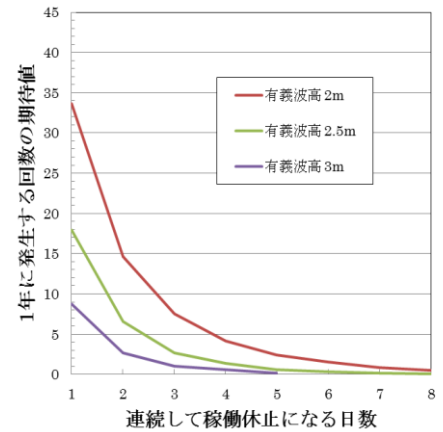


Fig. 7 Statistics of time series model

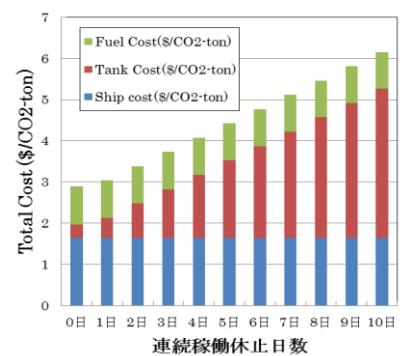


Fig. 8 Effects of emergency stop on costs

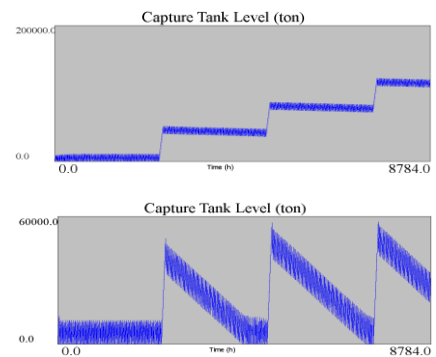


Fig. 9 Effects of emergency stop on a tank

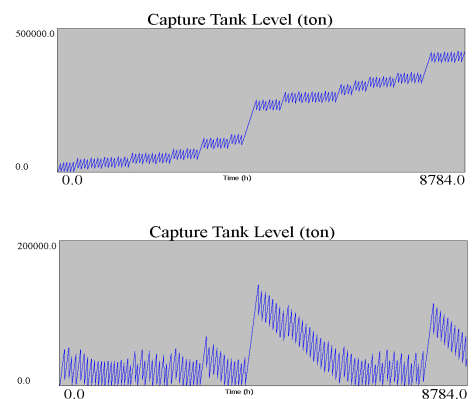


Fig. 10 Effects of emergency stop on a tank

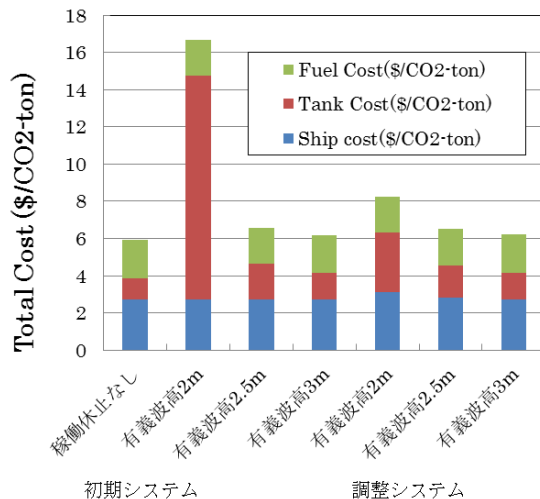


Fig. 11 Effects of emergency stop on costs

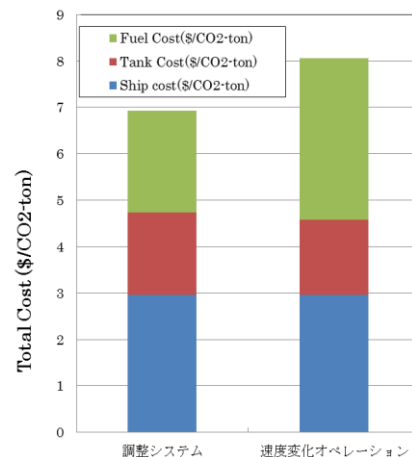


Fig. 12 New operation (Appropriate system)

## 7. オペレーションの提案と検証

二酸化炭素回収量の変動や荒天による稼働休止によりタンク内二酸化炭素量は増加し、輸送システムへ影響を与える。そこでタンク内二酸化炭素量に応じて輸送能力を変化させる速度変化オペレーションを考案した。定常運転時の船速を 27.78 km/h (15 kt) と定め輸送能力向上時の船速を変化させる。

このオペレーションにおいて 10 日間連続稼働休止がおきた時の二酸化炭素量の推移調べた結果、輸送距離が大きくなると効果があることが確かめられた。

そこで回収量③の時の初期システムと調整システムにおいて速度変化オペレーションを適用した。結果を Fig. 12 に示す。速度変化オペレーションが機能し、Tank Cost が減少している。しかしながら船速を大きくしたことにより Fuel Cost が増加し、コストのみを考えると速度変化オペレーションは有用でないことがわかった。しかしコストよりもタンク内二酸化炭素量の削減が優先される場合には非常に有用なオペレーションである。

## 8. 結果とまとめ

本研究では船舶輸送型 CCS における輸送システムの時系列物流シミュレーションモデルを構築し運用することで二酸化炭素回収量変動や荒天による稼働休止による輸送システムへの影響を検討した。二酸化炭素回収量の再生可能エネルギーの短時間での変動影響は、輸送方式の一時貯蔵タンクの存在によって吸収される一方で、需要の季節変動に伴う長期間の変動は輸送システムに大きな影響を与えることがわかった。稼働休止を事前に考慮していないシステムではタンク内二酸化炭素量が増加し続けることを示した。また、システムを調整することで様々な変動を吸収することができることを示した。

## 9. 今後の展望

今後の展望としてはより多くのパラメータの分析を行うためのシステムの拡張、モデルの精度向上などが課題で、大規模実証プロジェクトの輸送システム計画で実力をつけ、多数の回収プラント対多数の圧入サイトを対象としたオペレーションなどへ応用していくことが望まれる。

## 参考文献

- [1] W. D. Kelton, R. P. Sadowski, D. T. Sturrock, シミュレーション-Arena を活用した総合的アプローチ-, 2007
- [2] 藤岡弘幸: 浮体式洋上風車の風車-浮体連星応答特性に関する研究, 東京大学(2012年)
- [3] IEA-GHG PH4-30 Ship Transport
- [4] 岡崎俊宏: 船舶輸送方式による CCS システム評価に関する研究, 東京大学(2012年)
- [5] Dee DP et. al., 2011: *The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system*. Q. J. R. Meteorol. Soc. 137: 553–597. DOI:10.1002/qj.828