平成 31 年 1 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）

CO2 の海域長距離輸送を伴う CCS のソース・シンクマッチング計画手法

Source-Sink Matching for ship-based Offshore CCS Systems

学籍番号 47176628　　青木　周
指導教員　　尾崎　雅彦　特任教授

(平成 31 年 1 月 30, 31 日発表予定)
Keywords: CCS，ソースシンクマッチング，コスト，最適化，ハブ
Keywords: CCS, Source-sink matching, Cost, Optimization, Hub

１．序論

1.1　研究の背景

2015 年にパリ協定が採択され、平均温度上昇が 2℃を十分下回るように努力を求める、との世界共通の目標が設定された。この目標達成にはこれまでよりも大幅な CO2 削減が必要となる[1]。原子力や再生可能エネルギーによる化石エネルギー代替が期待されるが、原子力政策の不透明さや経済性の観点から化石燃料に高く依存した状態が続いている。現実的な対策として、化石燃料を利用しつつ大気中への CO2 排出量削減を行う CCS には大きな期待がかかっている。

日本では、CO2 の主要大規模排出源である発電所や製鉄所は臨海地域に多く立地している。一方で陸域に有望な CO2 貯留サイトがなく、海底下への貯留が計画されている。CO2 排出源と沿岸・沖合に点在する貯留サイト間の CO2 輸送システムが必要となる。その輸送方式は大きく、パイプライン方式と船舶輸送方式に大別され、各方式が適する条件は異なっている。特に船舶輸送方式は、ソース・シンクマッチングや水深の制約が緩和され柔軟な設計が可能となること、パイプラインの建設・撤去が不要であること、移設・再利用、冗長性確保の容易さから優位性のある方式だと考えられる。

CO2 排出量大幅削減に資するような CCS 大規模導入には個々のプロジェクトのみならずトータルコストの低減が不可欠であり、多数のソースとシンクの組合せをコスト最小にする計画手法が必要である。そのためには、輸送・圧入システムについて全体コストを俯瞰した取り組み、またスケールメリットによるコスト低減効果が期待されるハブの導入効果について議論が必要となる。

1.2　研究の目的

本研究では、多様な規模と所在地を持つソースとシンクを効率的に繋ぐ（マルチソース・マルチシンクマッチング）輸送システムを検討する。研究の目的は、日本の CCS において輸送システム設計に関する理解を深めることである。特にハブ導入の有効性を示すとともに、効果的なハブ設置の考え方を整理する。そのために、輸送システムの最適化を実現するためのソースシンクマッチング手法を構築する。

２．研究手法

本研究で取り扱う輸送システムを Fig. 1 に示す。プラントから分離・回収された CO2 を輸送用に圧縮し、貯留サイトまで輸送し、圧入設備を用いて海底下の地層に圧入する。

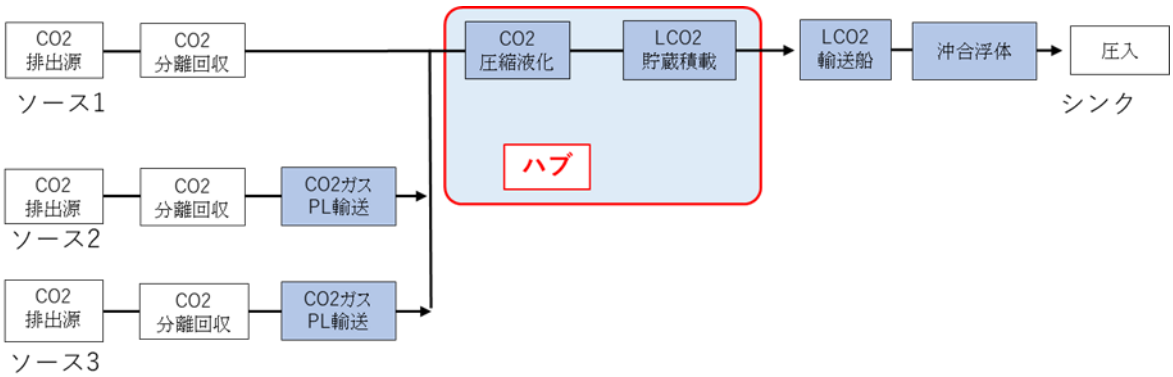

Fig. 1 本研究で想定する輸送システムおよびハブ

輸送システムのコストを目的関数とした最適化を検討する上で、1) ソースシンク間の輸送距離の算出、2) 輸送コストの算出、3) 最適マッチング手法、の３点が必要となる。またソースとシンクの間にハブを配置することでスケールメリットが得られる可能性について検討を行う。特に輸送コスト算出については本研究における重要検討事項のため、次節に詳細を記載する。

Fig. 2 ソースの位置

2.1 輸送距離算出モデル

臨海域に立地するソース（107 点：石炭火力、LNG・天然ガス火力、鉄鋼プラント、セメントプラント）と沿岸または沖合に存在するシンク（15 点）を結ぶ経路について最短距離を算出する。前提条件として、経路は海域のみを通り、また水深について影響はないものとした。海域を細かいメッシュで区切り、ダイクストラ法により最短経路を求める。これによりソースとシンクの全ての組合せについて最短距離マトリックスを生成した。

2.2 最適マッチング手法

ソースシンクマッチングは線型計画法における一般化割当問題の知見を活用することができる。どう手法は、いくつかの仕事をエージェントに割当てるとき、それに伴うコストの総和を最小化する問題である。線形問題なので計算負荷が小さく、計画段階において大量のシナリオを考慮する際に有効である。

n 個の仕事 J = {1,2,…..,n}と m 人のエージェント I = {1,2,…..,m} において、仕事 j ∈ J をエージェントi ∈ I に割当てたときの c_{ij} と資源の要求量a_{ij} (≥0), および各エージェント i ∈ I の利用可能資源量 b_i (≥0)である。仕事 j をエージェント i に割当てるならば 1、そうでないならば 0 を取る 0-1 変数x_{ij}を用いて一般化割当問題を以下のように定式化出来る。

$$\text{Minimize cost} \quad \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} c_{ij}\, x_{ij} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \tag{1}$$

$$\text{subject to} \quad \sum a_{ij}\, x_{ij} \le b_i \quad \forall i \in I, \tag{2}$$

$$\sum x_{ij} = 1, \quad \forall j \in J \tag{3}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \tag{4}$$

(1) ハブなしのソース・シンクマッチング
ソースとシンクの組み合わせが決まった際に、その距離と規模から輸送コストが算出できる。つまり割当によるコストが既知のため、一般化割当問題（仕事＝ソース、エージェント＝シンク、コスト＝輸送コスト）として最適化が可能。

(2) ハブありのソース・シンクマッチング
ハブには幾つかのソースから CO2 が集約されるためハブーシンクにスケールメリットが生じる。このため、輸送コストが予めソース、ハブ、シンクの組合せが決まっても輸送コストが決まらない非線形問題となる。本研究では、ハブの規模を多段階に分類し、行き先のシンクによっても分類したエージェントを複数用意する。多段階のハブによりスケールメリットを考慮し、ハブとシンクを一体化したエージェントとすることで一般化割当問題として近似的に解くことができる。

$$\text{Minimize cost} \quad \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} C_{ij}\, x_{ij} + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} D_{ij}\, y_{ij} \tag{5}$$

$$\text{Subject to} \quad \sum a_{ij}\, x_{ij} \ge b_i \quad \forall i \in I, \tag{6}$$

$$\sum a_{ij}\, x_{ij} \le c_i \quad \forall i \in I, \tag{7}$$

$$\sum x_{ij} = 1, \quad \forall j \in J \tag{8}$$

$$\sum y_{ij} = 1, \quad \forall j \in J \tag{9}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \tag{10}$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \tag{11}$$

3　コスト推定モデルの構築

輸送システムの総コストを求めるために、船舶、パイプライン、圧縮・液化設備、圧入設備に関するコスト推定モデルを構築する。ここでは代表的ないくつかについてコスト推定モデルを紹介する。また輸送コスト試算に当たっては建設コスト、運転コスト、ファイナンスを考慮した 20 年間のプロジェクトコストを算出した。

(1) 船舶コスト：輸送距離と輸送規模によりコストを算出する。輸送オペレーションを想定すると隻数離散的に変化する。

(2) パイプラインコスト：輸送距離と輸送規模によりコストを算出する。

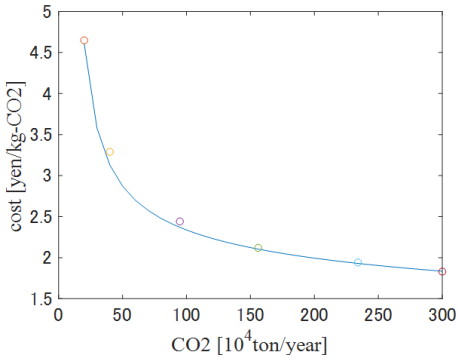

Fig. 3 圧縮液化設備コスト

(3) 圧縮設備コスト：使用する圧縮機の駆動モーターの大きさが約 30,000kW 以下に制限されるため、1 系列当たりの受け入れ可能な CO2 回収量は、300 万 ton/年に制限される。このためコスト試算は 1 系列に対して設定する必要がある。

$$圧縮液化コスト＝1.835 * (回収量／300)^{(-0.19-0.03*(100 / CO_2 回収量\ [万\ t/年]))} [¥／kg\text{-}CO_2]$$

4　ソースシンクマッチングの結果

4.1　ハブなしのソースシンクマッチング

ハブを利用しない輸送システムについて 1) 目的関数をコストとした場合、2) 目的関数を距離とした場合、3) 一つのシンク（福島沖）が利用できない場合、4) 石炭火力発電所のみをソースとした場合、の 4 つのケースについてソースシンクマッチングを実施した。

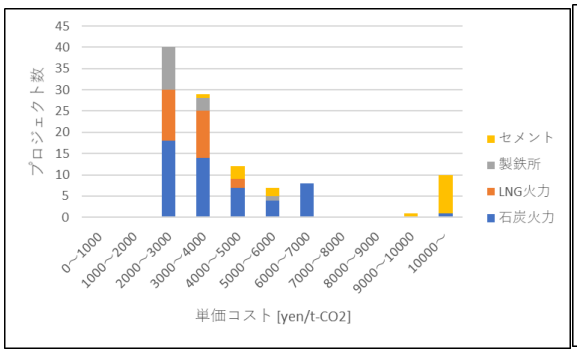

Fig.4 目的関数をコストとした場合

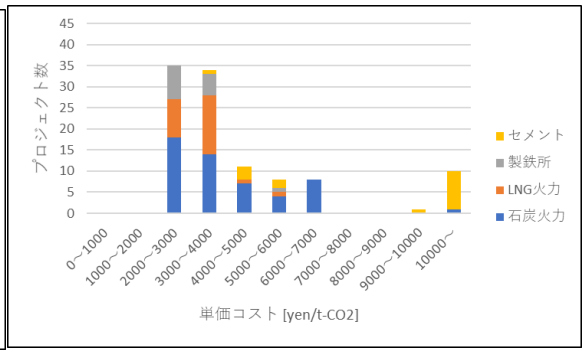

Fig.5 目的関数を距離とした場合

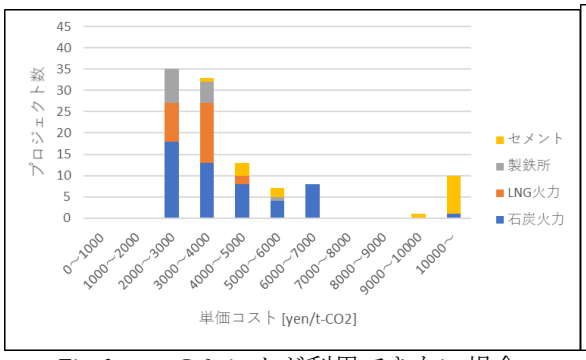

Fig.6 一つのシンクが利用できない場合

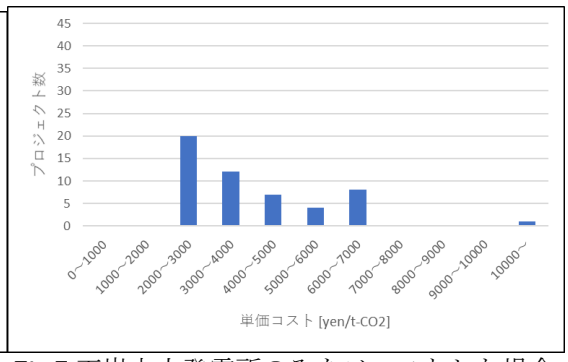

Fig.7 石炭火力発電所のみをソースとした場合

4.2　ハブありのソースシンクマッチング

(1) ハブ設置の効果

ハブを設置する場合、圧縮液化設備と圧入サイトまでの輸送においてスケールメリットが期待される一方で、ハブまでの輸送コストは割高な PL 輸送となり追加コストが発生する。ハブ設置の効果のケーススタディとして、上記のハブなしの最適化において宮崎沖のシンクへと圧入された瀬戸内海の 3

個のソースに対象を絞って、これらのソースとシンクの間にハブを設置した場合の効果について検討を行なった。

その結果、追加コストとして 13.2 km の CO2 ガスパイプラインによる 9.74e+08 (yen/y)が発生し、・ハブからシンクへのスケールメリットにより、632.4 km の液相 CO2 輸送船がスケールメリットを享受し 6.29e+09(yen/y)だけコストが削減される。以上の結果から、ハブを用いて CO2 をまとめて輸送した方が 5.31e+09(yen/y)コストが削減されることが確認できた。ハブを用いることにより、発生するパイプラインコストよりもまとめて運ぶことによるスケールメリットの方が大きく、ハブ設置の効果を確認することが出来た。

(2) ハブ有りのソース・シンクマッチング

ハブ有りのソース・シンクマッチングのモデルを用いて、瀬戸内海付近のソース 13 点、宮崎沖のシンク 1 点についてマッチングを行った。その結果、13 点のうち 5 点でハブを確認することが出来た。小規模なソースは直接シンクへ運ぶと割高となるため、近くの大規模発生源まで輸送し、スケールメリットを考慮してコスト低減すると考えられる

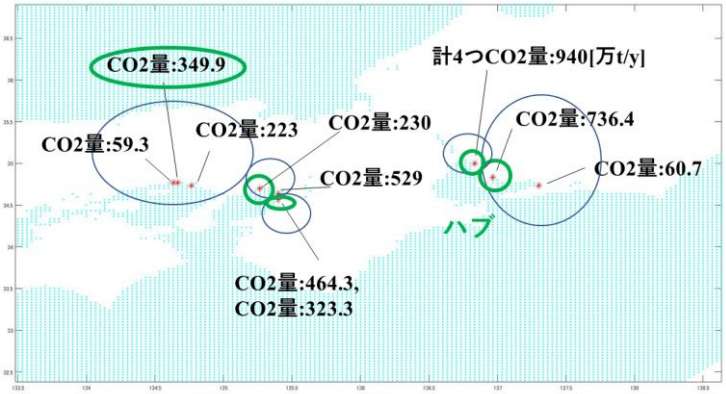

Fig.8 瀬戸内海付近のソース 13 点及びハブのイメージ図

５．結論

① CCS におけるソースシンクマッチングについて、1) ソースシンク間の輸送距離の算出、2) 輸送コストの算出、3) 最適マッチング手法、の３点により輸送システムコストを目的関数とした最適化手法を構築した。

② ハブ設置の効果について、非線形な最適化問題を線形問題へと変換することで簡易にその効果を推定する手法を構築した。

６．参考文献

参考文献

[1] 環境省 HP　パリ協定の概要（仮訳）