

# CO<sub>2</sub>海上輸送・希釈放流システムの荒天稼働停止を 考慮に入れた初期計画法に関する研究

正員 尾崎 雅彦\*      正員 南浦 純一\*  
正員 太田 真\*      正員 佐々木 裕一\*  
正員 松浦 正己\*

Initial Plan of CO<sub>2</sub> Marine Transport and Release into Deep Waters Allowed for Rough Sea State

by Masahiko Ozaki, *Member*      Junichi Minamiura, *Member*  
Makoto Ohta, *Member*      Yuichi Sasaki, *Member*  
Masami Matsuura, *Member*

## Summary

Ocean storage of the captured CO<sub>2</sub> from fossil-fuel burning is a possible option for mitigating the increase of CO<sub>2</sub> concentration in the atmosphere. Moving-ship type of CO<sub>2</sub> ocean storage is a concept whereby captured and liquefied CO<sub>2</sub> is delivered by ship to a site and injected into the deep ocean by means of a pipe suspended beneath a ship as it slowly moves through the water. In case of bad weather conditions, CO<sub>2</sub> marine transport and operation on the sea should be adjourned although CO<sub>2</sub> would be captured at the plant every day. It is, therefore, required that the system would have the buffer storage at the port and the extra shipping ability to recover the delay of schedule. Since the large scale of such spare capability might lead to the increase in cost, it is needed to investigate how to plan the system allowed for weather conditions reasonably. In this study, a time series model of sea state through one year is generated for a hypothetical ocean storage site, based on the wind data observed with satellite remote sensing, and simulations of CO<sub>2</sub> marine transport and operation on the sea are carried out considering the operational limit of sea state. In this approach, the continuing bad weather days or the frequent occurrences of rough sea condition during the specific season are counted automatically. In order to pursue higher efficiency of the operation, side-by-side type and tandem type of moorings are applied for the simulations and compared. Finally, cost assessments under the several assumptions are carried out to see the relative merits among that the number of ships would be increased, that the loading capacity of a ship would be increased, and that the storage capacity at the port would grow, which are generally in trade-off relationships.

## 1. 緒言

温暖化対策のための CO<sub>2</sub> 排出量削減の一方法として、火力発電所などの人為的集中発生源で CO<sub>2</sub> を捕捉し地中や深海へ送り込んで大気から長期間隔離するという、CO<sub>2</sub> 回収隔離 (Carbon dioxide Capture and Storage) の可能性が、国内外で精力的に検討されている<sup>1)</sup>。CO<sub>2</sub> を陸上の発生源から所定の隔離サイトまで海を横断して輸送する必要がある場合には、海底パイプラインによる方法と船による方法が考えられる。海洋石油開発の大水深化にともない、大水深域での海底パイプラインの敷設・運用技術が進歩してきているものの、

輸送距離が長い場合や越えるべき水深が数千メートルに及ぶような場合などには、船による海上輸送が合理的である。

筆者らは、CO<sub>2</sub> 海上輸送のコスト試算<sup>2)</sup>や CO<sub>2</sub> 海上輸送・海洋隔離システムからの CO<sub>2</sub> 排出量試算<sup>3)</sup>を行ったが、その経緯で以下の2点を今後の検討課題と考えた。1点めは、荒天時の稼働停止を挽回するために、輸送船や放流船に定常運航時からどの程度の余剰能力を持たせればよいか、また、積出し前にバッファとして CO<sub>2</sub> を一時貯蔵しておくための陸上タンクに、どの程度の総容量が必要か、である。2点めは、荒天の影響を受けやすい輸送と放流の接点で、いかなる性能が優先されるべきか、適切な輸送・放流切替方法はあるべきか、ということである。

本研究では、荒天稼働停止を考慮に入れた CO<sub>2</sub> 海上輸送・希釈放流システムの設備規模の初期計画法を検討するとともに、洋上での輸送・放流切替における係船方式の優劣についてケーススタディを行う。

\* 三菱重工業株式会社 長崎研究所

2. CO<sub>2</sub>海上輸送・希釈放流システム

CO<sub>2</sub>海上輸送・希釈放流システムの概念図を Fig.1 に示す。火力発電所や製鉄所などの発生源で排ガスから分離回収し液化した CO<sub>2</sub> (例えば -50℃、0.7MPa) を輸送船で隔離サイトの海域まで輸送し、隔離海域では放流船が CO<sub>2</sub> を受け取り、船から吊り下げた長いパイプ (例えば直径 0.2m、長さ 2,500m) を使って CO<sub>2</sub> を深海へ放流する<sup>4),5)</sup>。放流した CO<sub>2</sub> が溶けることによって周辺の海水が酸性化し、海洋生態系へ影響することが懸念されるが、近年、海水中の CO<sub>2</sub> 濃度上昇にともなう生物影響の研究<sup>6)</sup> が進展するとともに、CO<sub>2</sub> を放流しながら船を前進させることによって CO<sub>2</sub> 濃度を抑制する技術 (Moving ship 型と称される) の有効性が示されるようになってきている<sup>7),8)</sup>。

このシステムにおいてパラメタは、「与えられる条件」「技術で範囲が決まる条件」「計画値」に大別される。与えられる条件のうち主なものは、一日当たりの CO<sub>2</sub> 回収量、CO<sub>2</sub> 積出港から隔離海域までの輸送距離、放流流量である。技術で範囲が決まる条件としては、輸送船の航海速度や港での荷役時間、洋上での係船・荷役時間など必要時間に関するものと、航海、洋上での係船・荷役、放流などにおける限界海象、すなわち稼働率に関するものが考えられる。これらは必要性が高ければ改善の余地もある。そして計画値には、陸上貯蔵タンクの最大容量、輸送船の積載可能量や隻数、放流

船の積載可能量や隻数などがあり、ここにいかなる余裕能力を持たせるかを検討することが、本研究の主題の一つである。

なお Fig.1 では、輸送船と放流船がそれぞれ専用で、隔離海域で並列係船して荷役作業を行う様子を描いてあるが、洋上での輸送・放流切替方法としてはほかに、縦列係船して荷役作業を行う方式、輸送・放流兼用船を使用し洋上にてその都度パイプを揚降する方式、などが考えられる。Table 1 にこれらの定性的な比較結果を示す。それぞれの方式には、洋上作業の限界海象や作業時間で一長一短があり、総合的な得失の観点からいずれを選択するか考える必要がある。本報では輸送船と放流船がそれぞれ専用で、隔離海域で並列係船する方式と縦列係船する方式の比較評価を行う。

Table 1 Comparison of types for shifting CO<sub>2</sub> from transport mode to release mode

	並列係船	縦列係船	輸送・放流兼用
	輸送船と放流船が夫々専用で、洋上にて並列係船により荷役作業を行う	輸送船と放流船が夫々専用で、洋上にて縦列係船により荷役作業を行う	輸送・放流兼用船を使用。洋上にてその都度、放流用パイプの揚降を行う
洋上係船	海象影響受けやすい	並列係船より海象の制限穏やか	不要
荷役	縦列係船よりも容易で早い	荷役装置の開発課題多い	不要
パイプ揚降	常時は不要	常時は不要	時間のかかる作業が毎回必要

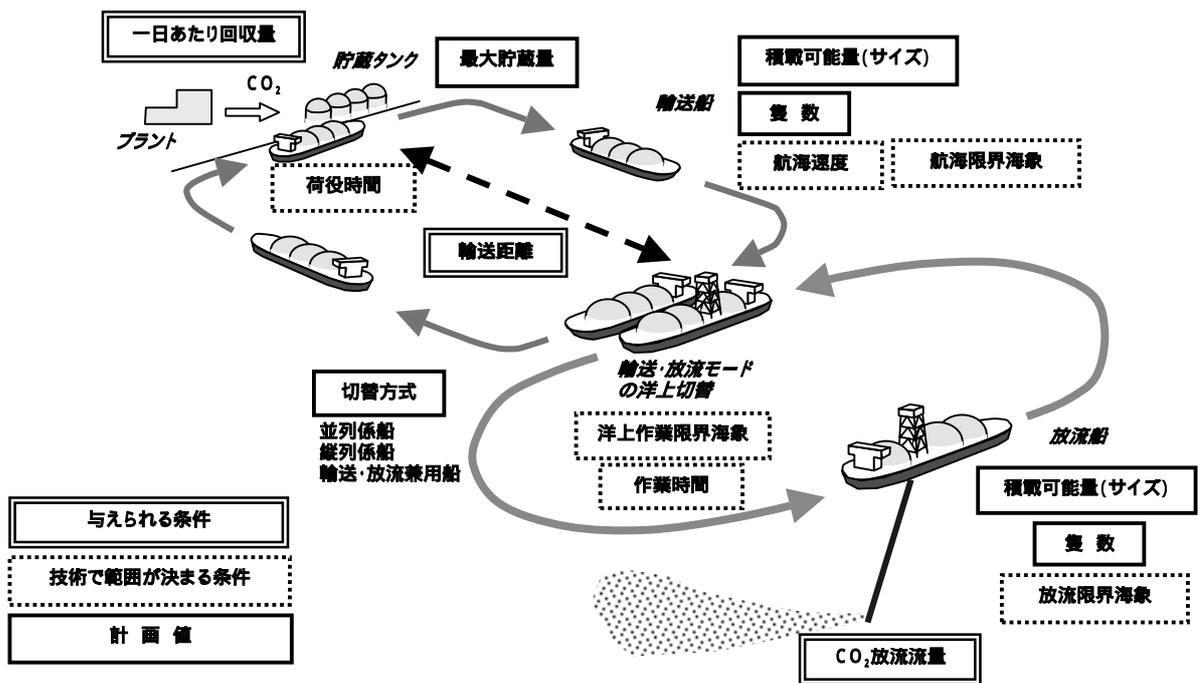


Fig.1 Conceptual view of CO<sub>2</sub> marine transport and release into deep waters

### 3. 初期計画法

#### 3.1 輸送船

定常運航時における輸送工程の1サイクルに要する日数  $n$  [day]は、港での荷役時間  $h_l$ 、往路にかかる時間  $h_g$ 、洋上作業時間  $h_s$ 、復路にかかる時間  $h_r$  (いずれも[hour])および夜間等の待機時間の総計であり、

$$h_l + h_g + h_s + h_r \leq 24n \quad (1)$$

$$h_r + h_g = 2L/V \quad (2)$$

と表される。ここで  $L$  は片道の輸送距離 [km]、 $V$  は航海速度 [km/h]であり、 $V$  を現実的な範囲に限れば  $n$  が絞られる。

輸送船の積載可能量  $W$  [ton]と隻数  $m$  は、荒天における休止を挽回できるような輸送量の確保が必要条件なので、

$$W \times m > q \times (n + d_m) \quad (3)$$

ここで  $q$  は陸上における一日あたり CO<sub>2</sub>回収量 [ton/day]、 $d_m$  は輸送船がサイトに到着した後に作業限界を超える荒天が続く日数の期待値 [day]である。

(1)(2)(3)式で  $n$  を消去すると、

$$W > \left( \frac{h_l + h_s + 2L/V}{24} + d_m \right) \times \frac{q}{m} \quad (4)$$

また不可欠ではないが、常時において輸送船が帰港するのは一日に1隻以下であるとする

$$n \geq m \quad (5)$$

が必要になり、(3)(5)式で  $n$  を消去すると次が得られる。

$$W > q \quad (6)$$

$$m > d_m / (W / q - 1) \quad (7)$$

(4)(6)(7)式が、輸送船の初期計画のための式である。

#### 3.2 放流船

放流船については、洋上での受渡しを考えると、積載可能量を輸送船と同一の  $W$  [ton]とするのが合理的であろう。また洋上での CO<sub>2</sub>受取りおよび放流の1サイクルに要する日数を  $N$  [day]とする。

海水中への CO<sub>2</sub>希釈放流性能の観点から、1隻の放流船からの放流流量には上限値  $Q$  [ton/h]が設けられるであろうから、放流船の積載可能量には  $N$  に応じて上限値が存在することになる。すなわち、

$$Q \times (24N - h_s) \geq W \quad (8)$$

一方、放流船の積載可能量の下限および隻数  $M$  は、輸送船の場合と同様、荒天における休止を考慮できるような放流量の確保が必要条件なので、

$$W \times M > q \times (N + d_m) \quad (9)$$

(8)(9)式で  $N$  を消去すると、

$$M > q / 24Q \quad (10)$$

$$W > (24d_m + h_s) / (24M / q - 1 / Q) \quad (11)$$

となって、放流船の初期計画のための式が得られる。

#### 3.3 陸上貯蔵タンク

荒天が続いた時に、すべての輸送船が CO<sub>2</sub> を搭載したままサイト近くで待機している状況において、陸上タンクでは CO<sub>2</sub> の貯蔵量が日々増加しつづける。必ずしも回収予定のすべての CO<sub>2</sub> を貯蔵・隔離してしまふ必要はないので、陸上タンクの総容量を万一に備えて過度に大きくする必要もないが、十分な容量がある場合に貯蔵量の最大値がどれほどになるかを予想できることは計画にとって重要である。

不運な場合、輸送船がサイトに到着した直後から作業限界を超える荒天になり、その継続日数の最大値  $d_{max}$  [day]と、放流船への CO<sub>2</sub> の積替時間  $h_s$  [hour]と、復路にかかる時間  $h_r$  [hour]の合計時間が経って帰港することになる。陸上側では、 $m$  隻の最後の輸送船が出航してから「不運な」最初の輸送船が帰港してくるまでの期間に、毎日  $q$  の CO<sub>2</sub> がタンクに追加貯蔵されていることになり、その量  $w$  [ton]は、

$$w = q \times (d_{max} - (m-1) + (h_s + h_r) / 24) \quad (12)$$

である。

荒天が断続的に発生する季節や、作業限界が低い場合には、陸上タンクに一時的に貯蔵された CO<sub>2</sub> が一掃されないうちに次の追加貯蔵が開始されるので、輸送船の余剰能力が小さいと貯蔵量は累積して最大値が大きくなる。比較的穏やかな季節に挽回できないで翌年の荒天期に累積を持ち越すようなら、システムとしての能力が不足していることになる。

### 4. CO<sub>2</sub>海上輸送・希釈放流システムの物流シミュレーション

#### 4.1 海象発現モデル

前章で述べたように、システムの余裕能力を検討する上で洋上作業に支障を来すような荒天が対象海域でいかなる頻度・パターンで発現するかは重要な影響因子である。特に陸上貯蔵タンクの必要容量は、稼働できない荒天の連続日数や、特定の季節に荒天が頻繁に生じることと関連があると予想されるので、海象変化の時系列を考慮することが肝要である。洋上作業に影響を及ぼす自然環境要因としては、当該海域付近の風およびそれに起因する風浪、遠方から伝播してくるうねりを考慮する必要があるが、本研究では、風のみを対象とした。人工衛星によるリモートセンシングデータから一年間の風速の時系列を取り出し、海象発現モデルとした。

米国の国家航空宇宙局 NASA では、極軌道衛星(現状3基)に搭載したマイクロ波放射計(SSM/I)を用いて、おおむね全球にわたる海域の海表面付近の諸データを観測している。Remote Sensing Systems 社がウェブで1987年以降の最

新解析結果を公開しており<sup>9)</sup>、ここではその中から海上 10m の風速データを参照して利用する。経度緯度方向 1/4 度の格子点データが一日 2 回の観測機会ごとに収録されていて、ウェブ閲覧者が指定する任意の日時における世界の海上風速分布が表示されるほか、閲覧者が指定する任意の場所の風速の平均値・最小値・最大値・rms 値が数値で表示される。本報では試みに、2003 年 1 月 1 日から 12 月 31 日の、東経 135 度北緯 20 度(以降サイト A)および東経 140 度北緯 20 度(以降サイト B)の、いずれも日本本土から南方約 1,500km の地点を中心とする 2 度×2 度の風速(空間的平均値)を読み取り、風速変化の時系列モデルとした。なお衛星が上空を通過しない日時については、3 基の人工衛星のデータを補完させあうことでできるだけ埋めたが、それでも残る欠測率 2.6% (サイト A)、1.8% (サイト B)の空白日時は、前後データで内挿補完した。

以上のようにして得られた風速の時系列モデルを Fig.2 に示す。両サイトとも 4 月から 7 月にかけてはほとんど 10m/sec 以下だが、台風シーズンや冬季には 12m/sec を超えることも少なくない。サイト A とサイト B は東西方向に 500km 弱離れているものの、大局的には同じ海域で類似の気象特性の下にあると考えられ、日々の海象(風速)にも相関がある(相関係数 0.65)。しかしながら同一の時系列ではないので、物流シミュレーションの結果が時系列の違いでどの程度変動するか照査できる。風速データの統計的な特性値(著者らによる)を Table 2 に示す。2003 年においては、サイト A に比べてサイト B がやや穏やかである。

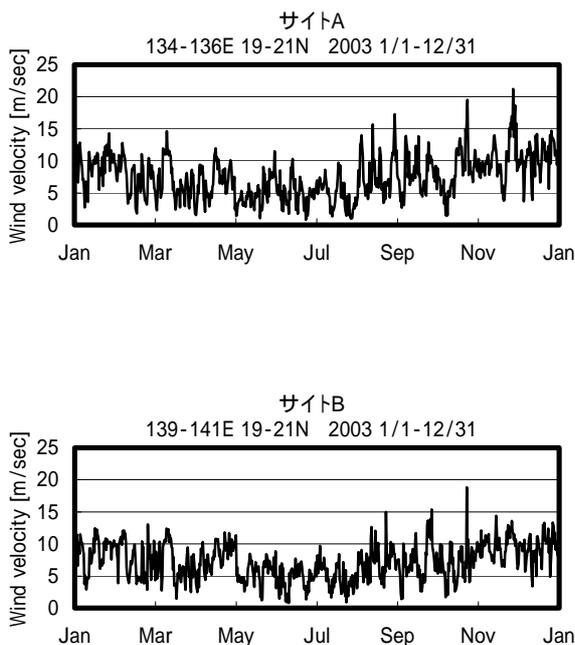


Fig.2 Time series model of wind velocity

Table 2 Statistics of time series model

<サイト A>			
年間平均値	月間平均最大値	月間平均最小値	
7.48 m/sec	10.41 m/sec (12月)	4.71 m/sec (7月)	
風速	未超過確率	超過連続日数 期待値 $d_m$	超過連続日数 最大値 $d_{max}$
8 m/sec	57.7 %	1.19 日	13.0 日
10 m/sec	77.0 %	0.39 日	6.5 日
12 m/sec	91.2 %	0.11 日	5.0 日
14 m/sec	97.1 %	0.02 日	2.5 日
<サイト B>			
年間平均値	月間平均最大値	月間平均最小値	
7.25 m/sec	9.94 m/sec (11月)	4.49 m/sec (6月)	
風速	未超過確率	超過連続日数 期待値 $d_m$	超過連続日数 最大値 $d_{max}$
8 m/sec	59.2 %	1.00 日	9.0 日
10 m/sec	80.0 %	0.32 日	6.0 日
12 m/sec	95.8 %	0.03 日	2.0 日
14 m/sec	99.5 %	0.003 日	0.5 日

## 4.2 物流シミュレーション

物流シミュレーションソフトとして Rockwell Software 社開発の Arena<sup>10)</sup>を利用する。本ソフトは、離散モデルを所定のルールの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行計画立案などに使われた実績がある。

本研究では、次のようなルールを設定した。実際の運用は、より柔軟できめ細かなルール、あるいは作業船や港湾の規則・慣習等による制限に従うことになるだろうが、大局を把握するために単純化してある。

### (1) 港における係船・荷役

- ・ 輸送船の入港の時間帯が 6 時から 18 時の間であれば係船・荷役作業を開始する。それ以外なら作業を翌 6 時から開始する。
- ・ 輸送船の係船は、一度に 1 隻までとする。
- ・ 荷役作業中に次の船が入港してきた場合、
  - その時点の陸上タンク貯蔵量が 1 隻分の積載可能量以下なら、荷役を止め、ただちに出航する。
  - 陸上タンク貯蔵量が 1 隻分以上なら、満載にしてから出航する。
- ・ 輸送船は、陸上貯蔵タンクが空になれば、積載量が少な

くても出航する。

## (2) 洋上における係船・荷役

- ・ 輸送船が隔離海域に到着したら、風速が作業限界以下になるのを待って、係船・荷役作業を開始する。ただし、作業開始が6時から14時の時間帯でなければ、次の6時まで待つ。
- ・ 一旦作業を開始したら、海象の変化によらず放流船は輸送船が運んできたCO<sub>2</sub>を全量受け取る。受け取る量が少なくても次の輸送船からの受け取りは行わず、放流作業を開始する。輸送船は港への帰途につく。
- ・ 荒天や夜間の待機後、隔離海域に複数の輸送船や放流船がいる場合には、1対1でペアを組んで係船・荷役作業を並行して実施する。その間、相手の無い輸送船あるいは放流船は、次の相手が来るまで待機する。放流船より輸送船の隻数が多い場合には、荷物量の多い輸送船を優先する。

## 4.3 作業時間・限界風速

物流シミュレーションにおける作業時間・限界風速の設定にあたっては、浮体式石油生産設備FPSO(Floating Production, Storage and Offloading Unit)の稼働実績や、最近のLNG FPSOに関する研究を参考にした。

FPSOは1970年代から使用実績があり、比較的穏やかな海域では並列係船による洋上荷役がよく用いられ、その限界海象として有義波高1.5~2.5m、平均風速5~10m/sの実績がある<sup>11, 12)</sup>。縦列係船はより厳しい海象での使用が可能であり、有義波高3~5m、平均風速10~15m/sでの洋上荷役の実績がある<sup>12, 13)</sup>。また、係船作業開始から切り離しまでの洋上荷役に要する合計時間について、1回あたり平均52,000klの原油の荷役を並列係船で約25時間、縦列係船で約40時間であったとの実績が報告されている<sup>13)</sup>。

原油の洋上荷役にはハンドリングが容易なフレキシブルホースが用いられることが多いが、常温・常圧でない液体CO<sub>2</sub>(-50℃、0.7MPa)の取扱いが必要とされる本システムの場合は、金属パイプを用いた荷役装置となる可能性が高い。最近、LNG FPSOの開発研究が行われはじめており、温度・圧力条件は異なるものの液化ガスの洋上荷役を検討する上で参考になる。ソフトヨーク式係船装置を用いた縦列係船とパイプによる荷役装置の組み合わせによる方式の開発に関する研究報告<sup>14)</sup>によると、有義波高3.5m、平均風速12m/s、荷役作業12~24時間が想定されている。

以上のようなFPSOの稼働実績及びLNG FPSO開発に関する検討結果を参考として、Table 3に示す条件を設定した。

Table 3 Assumed necessary hours and marginal wind velocity in simulation

	作業時間	限界風速
港内荷役作業	8時間	制限なし
輸送船の航海	距離と速度による	制限なし
並列係船の洋上作業	18時間	8 m/sec
縦列係船の洋上作業	32時間	12 m/sec
放流船による放流	積載量と放流流量による	16 m/sec

## 5. 結果と考察

### 5.1 ケーススタディ条件

次の「与えられる条件」を想定してケーススタディを行う。

- ・ CO<sub>2</sub>回収量  $q=20,000$  ton/day

100万kW級石炭火力発電所の定格運転時に排出されるCO<sub>2</sub>全量を対象とした場合の回収量相当値

- ・ 輸送距離  $L=1,500$  km

関東から関西にかけての太平洋側港湾・沿岸域から4.1節で想定した海域までの直線距離相当値

- ・ 深海へのCO<sub>2</sub>放流流量  $Q=360$  ton/h

「技術で範囲が決まる条件」としては、Table 2、3を参照することとし、輸送船の船速  $V=26\sim 37$  km/hの範囲とする。

### 5.2 初期計画法による検討例

上述の値を(1)(2)式にあてはめ、定常運航時の輸送工程の1サイクルに要する日数  $n$  が整数になるよう計画を進めると、並列係船の場合で  $n=5$  日、 $V>31.9$  km/hを得るので、計画速度としては33 km/hとしておく。また縦列係船では  $n=6$  日、 $V>28.8$  km/hを得るので、計画速度を30 km/hとする。さらに(6)式より  $W>20,000$  ton、(10)式より  $M\geq 3$  隻である。

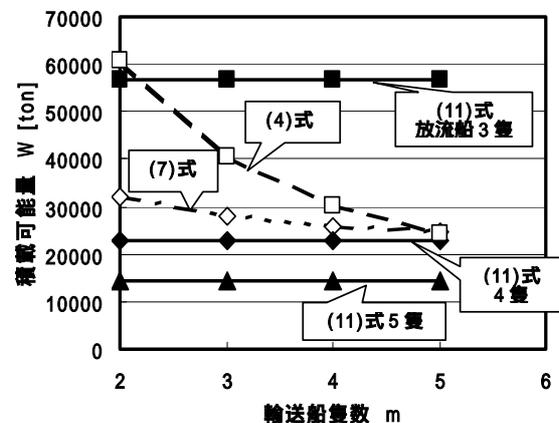


Fig.3 Lower limit of ship capacity for side-by-side mooring case

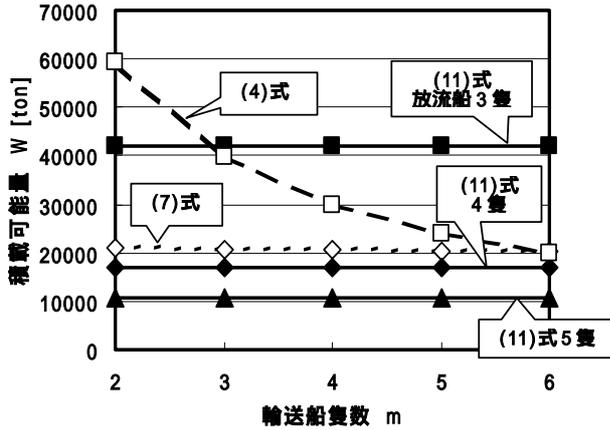


Fig.4 Lower limit of ship capacity for tandem mooring case

(4)(7)(11)式より、船の隻数に応じた  $W$  の下限値が Fig.3 (並列係船)、Fig.4 (縦列係船) のように示される。

陸上貯蔵タンクの必要容量については、輸送船の能力が十分な場合には(12)式で算出される  $w$  が目安になると考えられる。今回検討条件の値をあてはめると、サイト A の風速データを用いる場合、輸送船の隻数が 2、3、4 隻の時に並列係船ではそれぞれ  $w=29.3$  万 ton、27.3 万 ton、25.3 万 ton になり、縦列係船では  $w=14.8$  万 ton、12.8 万 ton、10.8 万 ton となる。

5.3 物流シミュレーションの結果

Fig.5、6 に物流シミュレーションで得られた陸上タンク貯蔵量の時系列結果の例を示す。輸送船と放流船を 3 隻ずつ用いた縦列係船方式の場合でサイト A の風速データを用いた時のものであり、Fig.5 は船の積載可能量  $W$  を 4.6 万 ton、Fig.6 は 5.0 万 ton とした結果である。シミュレーションにおいては、風速の時系列モデル一年分を繰り返して用いて 3 年間の推移を調べたが、図は 2 年目の一年分を示している。Fig.5 では、年間を通じて陸上タンク貯蔵量が変動しながら上昇しつづけており、船による輸送能力が不足していると解釈できる。一方 Fig.6 では、冬季に貯蔵量が多くなるものの滞留は解消されており、システムの能力が確保されていると考えられる。

Fig.7 は、上述の条件で船の積載可能量  $W$  を変更した場合の陸上タンク貯蔵量の最大値(2 年目最大値と 3 年目最大値の平均)を示すものである。また Fig.8 は、サイト B の風速データを用いた時の同様の結果を示すものである。図では表記を区別していないが、 $W$  が 4.7 万 ton 以下に加え、5.1~5.3 万 ton でシステムの能力不足が表われている。 $W$  が 5.2 万 ton 前後でシステム能力不足が生じるのは、サイト A、B では風速の時系列が異なるにも関わらず同じ箇所が発生している

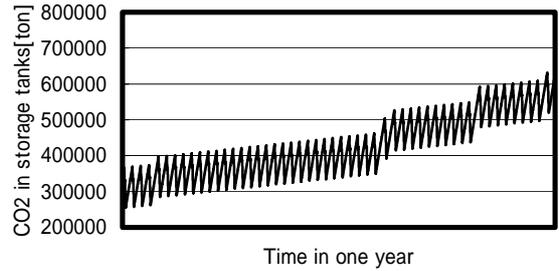


Fig.5 Example of CO<sub>2</sub> storage at port in case of shortage of system capability

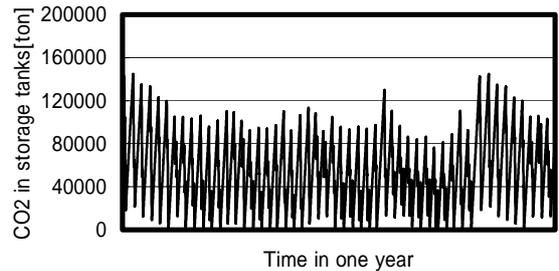


Fig.6 Example of CO<sub>2</sub> storage at port in case of sufficient system capability

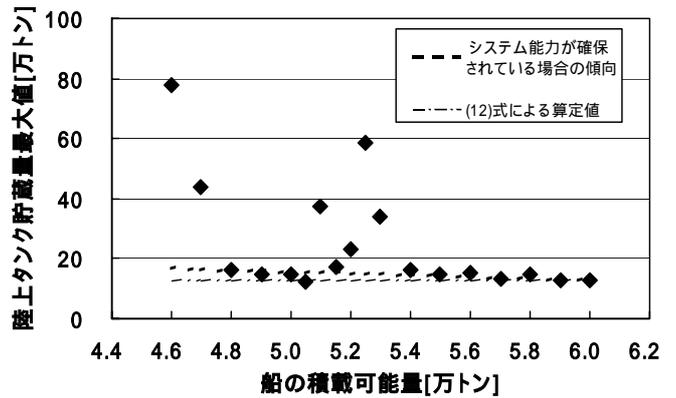


Fig.7 Necessary storage capacity at port vs ships' size in case of wind conditions at site A

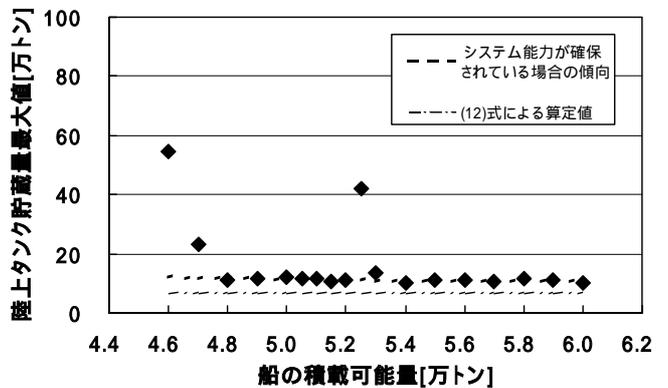


Fig.8 Necessary storage capacity at port vs ships' size In case of wind conditions at site B

ことから偶発的なものではなく、放流船にとって1サイクルに要する時間が非効率になっているためであると考えられる。すなわち、5.2万 ton は、今回計算条件でCO<sub>2</sub>放流に要する時間と輸送船・放流船の係船・荷役作業時間の合計(放流船の1サイクルに必要な最小時間)が7日間と8時間になる総量に相当し、洋上作業開始可能時間帯(6時から14時までの8時間で設定)に作業を開始した放流船は、次は必ず夜間待機する巡り合せになる。ちなみにこの前後で同じような‘特異点’は、Wが4.3万 tonと6.1万 ton近傍に存在しうる。初期計画法(Fig.4)によると輸送船・放流船が3隻ずつの場合の積載可能量の下限値は4.2万 ton強と評価され、物流シミュレーションではそれが4.8万 ton弱になっているのは、この影響であると考えられる。

システム能力が不足する領域以外の全体的な傾向としては、Wが大きくなると陸上タンクに必要とされる貯蔵容量が漸減している。定量的には(12)式の $w$ より幾分大きい。例えば、サイトAの風速データを用いる場合、陸上タンクの必要容量の目安になる $w$ が縦列係船では12.8万 tonとなる(5.2節)のに対して、Fig.7で最大値は12.8~16.0万 tonである。船の積載可能量が小さめの時には、3.3節で述べた『陸上タンクに一時的に貯蔵されたCO<sub>2</sub>が一掃されないうちに次の追加貯蔵が開始』される事態があることにより、高めの最大値になったものと考えられる。

次に、船の隻数や洋上で係船方式を変えた場合に、輸送・放流システムの能力確保に必要であった船の積載可能量・陸上タンク容量の結果(サイトA)をFig.9に示す。なおFig.7、8でも示されたとおり、船の隻数に対し積載可能量(必要サイズ)が一意に決まるわけではなく、ここでは陸上タンク容量が過大にならない範囲(特異点近傍を回避)で代表的な結果を示す。

まず明瞭なのは、船の隻数やサイズが同じ場合、陸上タンクの必要容量は、並列係船方式の方が縦列係船方式よりも圧

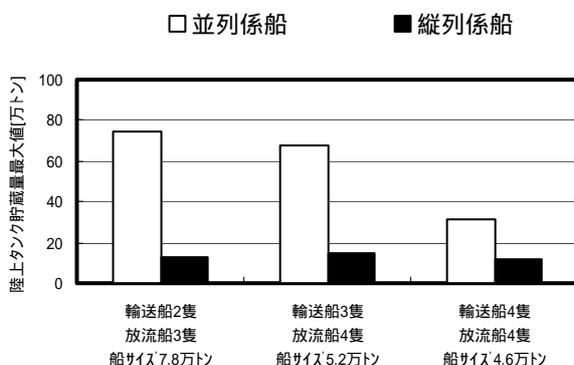


Fig. 9 Examples of necessary specification for ships and storage at port

倒的に多く必要である。これまで述べたように、輸送船の能力が十分な場合には(12)式で算出される $w$ が陸上タンクの必要容量の目安になる。縦列係船ではこの予測値より幾分大きい結果になっているものの、 $w$ が目安として概ね有効であることがわかる。一方並列係船では、輸送船・放流船が4隻ずつの場合には予測値(25.3万 ton)に比較的近いものの、船のサイズが大きく隻数が少ない場合には過大である(目安値がかなり過小評価である)。並列係船で作業を休止する風速条件8m/sec以上は頻繁に生じ(Table 2に示すとおり未超過確率が58%しかない)『陸上タンクに一時的に貯蔵されたCO<sub>2</sub>が一掃されないうちに次の追加貯蔵が開始されるほど荒天継続期間が断続的に発生した』のであろう。輸送船の隻数 $m$ を増やす効用の原理は明確ではないが、荒天が断続的に生じる時にその合間を縫う機会が増えるのではないかと思われる。隻数が増えても並列係船方式は縦列係船より陸上タンク必要容量の観点で不利である。洋上作業時間の短さのメリットが作業限界の厳しさのデメリットに打ち負けている。ちなみに並列係船方式の諸条件において、洋上作業限界風速のみを上げていった場合の結果をTable 4に示す。限界風速の影響が顕著であることがわかる。

Table 4 Effect of marginal wind velocity on necessary specification for ships and storage at port

限界風速	並列係船方式：輸送船4隻、放流船4隻の場合に必要なとされる容量(代表例)
8m/sec	船積載量4.6万トン、陸上貯蔵31万トン
10m/sec	船積載量3.5万トン、陸上貯蔵17万トン
12m/sec	船積載量3.3万トン、陸上貯蔵15万トン

#### 5.4 最適化の可能性

前節より、今回検討に用いている諸仮定の下では、洋上で係船・荷役の作業時間が長く必要であっても、作業限界が高い縦列係船方式の方がすぐれることが明らかになった。特に船のサイズが大きく、隻数が少ない時に、その差は顕著である。縦列係船方式で計画を進める場合、船の隻数を増やすか、積載可能量を増やすか、あるいは陸上貯蔵容量が大きくなってもかまわないかはトレードオフの関係にある。港湾の敷地制約など別に考慮すべきことはあるものの、ここではコスト概算によって比較評価を行い、最適化の可能性を考える。

コストの評価にあたっては、船・陸上タンク・荷役装置の建造費(初期コスト)を年率11%で償却するとともに、運用コストとして操業に必要な燃料費(輸送船・放流船の航行に必要な燃料消費量を年間の航行回数に応じて算定)、人件費・保守費(固定費として初期コストに一定比率を乗じて算定)などを合計し、年間に輸送・放流されるCO<sub>2</sub>の総量で

除して、CO<sub>2</sub>トンあたりの経費として表す。設備建造費や操業費用などの算出根拠は、先行研究<sup>2)</sup>で用いられた仮定を踏襲した。ただしプラントにおける回収・液化、プラントから港までの輸送など、海上輸送よりも上流の工程や、用地確保・港湾使用など共通でかつ個別事情要素の強い事項に要するコストは今回算定からは除外した。また簡便のため、陸上プラントで回収される一日あたり CO<sub>2</sub> の量は一年間を通じて一定とした。海象発現状況の年による違いも重要であるが、今回は考慮から外した。以上のような仮定や基本条件あるいは船価・エネルギー料金などの変化によって、コスト評価結果の絶対値は変わるので、留意が必要である。

Fig.10 は輸送船 2 隻、放流船 3 隻、Fig.11 は輸送船 4 隻、放流船 4 隻とした場合に、船のサイズを変えてコストを比較した結果である(サイト A)。図中、主に船に関するコストと陸上タンクに関するコストの区分がわかるようにした。まず船に関するコスト分に注目すると、船の隻数を固定した場合には船のサイズとコストには正の相関関係が認められる。船をある程度大型化しても航海回数減で利得を得るにはいたっていないようである。船の隻数を増やしてサイズを小さくした場合にはコストが増加している。一般的な船輸送におけるスケール効果があてはまると言える。次に陸上タンクに関するコスト分に注目すると、船のサイズが大きくなるにつれ減少している。これは(12)式では捕捉できない傾向である。ただし隻数の少ない Fig.10 で顕著である一方、

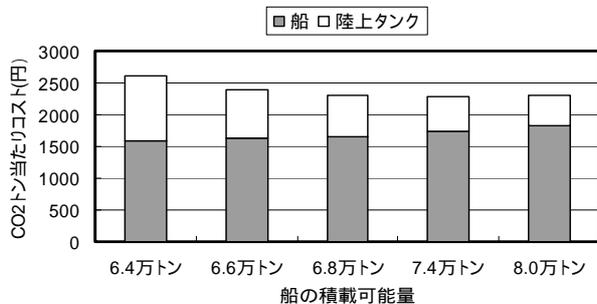


Fig.10 Cost per ton-CO<sub>2</sub> for tandem mooring system in case of 2 carriers and 3 release ships

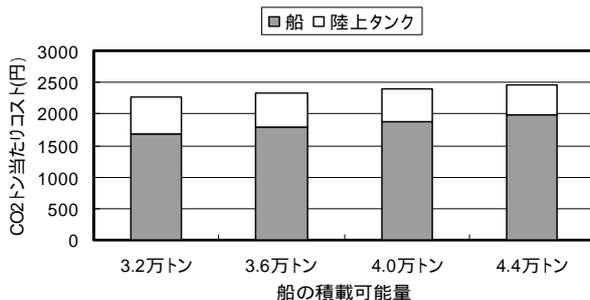


Fig.11 Cost per ton-CO<sub>2</sub> for tandem mooring system in case of 4 carriers and 4 release ships

Fig.11 ではみとめ難い。前節で、並列係船方式では隻数が少ないと陸上タンクの必要容量が過大になる結果について「隻数を増やすことは、荒天の間を縫う機会を増やす効用があると思われる」と推察したが、縦列係船でも同様と考えられる。結局、船と陸上タンクを合わせた総コストは、隻数の少ない Fig.10 では船の余裕能力と陸上タンクの余裕能力のトレードオフで最適解がありそうであり、隻数の増えた Fig.11 では船のサイズ増にはほとんど効用が無い、という結果になった。ただし比較している範囲内で総コストの絶対値にさほど大きな違いがあるわけではない。

## 6. 結 言

CO<sub>2</sub> 海洋隔離の実施海域を仮想し、荒天時の稼働休止を考慮に入れた CO<sub>2</sub> 海上輸送・希釈放流システムの初期計画について検討した。作業限界に関わる主要な海象統計量が得られることを前提に初期計画法を考案するとともに、実海域の海象発現モデルとして人工衛星によるリモートセンシングデータを参照して風速変動時系列を作成し、作業限界の異なる 2 種類の洋上係船方式を対象に物流シミュレーションを実施して、初期計画法による結果との比較・考察を行った。またコスト概算によるパラメタの最適化の可能性についてケーススタディを行った。主な結果は以下のようである。

- (1) 荒天時の稼働休止を挽回するには、船による輸送能力(含む、深海への放流)と陸上で貯蔵容量を十分確保する必要がある。輸送能力が不足すると陸上の CO<sub>2</sub> 滞留量が年々増加する。輸送能力確保に必要な船のサイズ・隻数の初期設定には 4 章で示した方法(主に(4)(11)式)が有効である。ただし放流船の 1 サイクルに必要な最小時間が、洋上作業可能時間帯と適合しない「特異点」を回避した計画が必要である。あるいは、洋上作業可能時間帯の制約を柔軟に運用することで対処できる可能性があると考えられる。
- (2) 陸上の貯蔵タンクは、作業限界以上の荒天が連続あるいは頻繁に生じた際、日々回収される CO<sub>2</sub> を貯めおける容量が必要である。船の輸送能力が十分であれば(12)式で算出される  $w$  が必要容量の目安となるが、概ね過小評価になる。特に洋上作業限界が低く荒天待機が断続的に生じる並列係船方式では、隻数が少ない場合にかなりの過小評価となる。
- (3) 陸上タンクの必要容量の点で、作業限界条件が緩やかな縦列係船方式の方が、洋上作業時間がより多大にかかるにも係らず、並列係船方式よりも優位である。
- (4) 輸送能力を確保するための船のサイズ・隻数及び陸上タンクの容量は、いずれかを減らすと他が増えるというトレードオフの関係にあると考え、コストによる最適化の可能性

を検討した。船の隻数が少ない場合には船の余裕能力と陸上タンクの余裕能力のトレードオフに関して最適点が見つかりそうだが、隻数が増えると陸上タンクの必要容量は船サイズにほとんど依存せず、船サイズ増の効用は無い。

今後の検討課題としては、CO<sub>2</sub>回収量のスケール効果、隔離海域までの輸送距離の影響、海象データの年ごとあるいは海域の違いによる差等がある。開発課題としては、洋上での輸送・放流切替技術の確立、作業限界向上が挙げられる。

## 謝 辞

本研究は、(財)地球環境産業技術研究機構 (RITE) の「二酸化炭素の海洋隔離に伴う環境影響予測技術開発」の一環として行われた。関係各位に謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage, IPCC Working Group III (in press).
- 2) M. Ozaki, J. Davison, J. Minamiura, Marine Transportation of CO<sub>2</sub>, 7<sup>th</sup> Int. Conf. on Greenhouse Gas Control Technologies, Vancouver (2004).
- 3) M. Ozaki, J. Minamiura, M. Akai, M. Nishio, CO<sub>2</sub> Emissions from CO<sub>2</sub> Ocean Storage System, 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Marine Science and Technology for Environmental Sustainability, ENSUS2005, Newcastle (2005) 313-326.
- 4) M. Ozaki, CO<sub>2</sub> Injection and Dispersion in Mid-ocean Depth by Moving Ship, Waste Management, Vol.17, No.5/6 (1997) 369-373.
- 5) M. Ozaki, T. Ohsumi, S. Masuda, Dilution of Released CO<sub>2</sub> in Mid Ocean Depth by Moving Ship, 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Greenhouse Gas Control Technologies, Interlaken (1998) 275-280.
- 6) Y. Shirayama *et al* Ed., Advances in Biological Research for CO<sub>2</sub> Ocean Sequestration, J. of Oceanography, Vol.60, No.4 (2004).
- 7) J. Minamiura, H. Suzuki, B. Chen, M. Nishio, M. Ozaki, CO<sub>2</sub> Release in Deep Ocean by Moving Ship, 7<sup>th</sup> Int. Conf. on Greenhouse Gas Control Technologies, Vancouver (2004).
- 8) T. Sato, Numerical Simulation of Biological Impact Caused by Direct Injection of Carbon Dioxide in the Ocean, J. of Oceanography, Vol.60 (2004) 807-816.
- 9) <http://www.remss.com/>
- 10) 高桑 宗右衛門, 生産システム・シミュレーション - アプローチと SIMAN -, コロナ社 (1993)
- 11) O. Dangles, W.J. van Heijst, Two Years Experience with the SBS, 8<sup>th</sup> Offshore Technology Conference, OTC 2722 (1976).
- 12) W.R. McLeod, L.H. Smulders, An Analysis of Tanker- Based Floating Production Systems for Small Offshore Fields, J. of Petroleum. Vol.34, No.8 (1982) 1871-1879.
- 13) T.E. Rees, M.A. Reber, J.R. Seery, Design, Installation and Field Operations of Offshore Tandem Loading System - NIDO Field, Offshore Philippines, 13<sup>th</sup> Offshore Technology Conference, OTC4012 (1981).
- 14) Y. Liu, L.T. Boatman, Analysis of Duplex Yoke Mooring System for Tandem Offloading of LNG, Proc. of 24<sup>th</sup> Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Halkidiki, OMAE2005-67119 (2005).