

2. シャトルシップによる二酸化炭素輸送・貯留システムの検討

シャトルシップ輸送・貯留システムは、CO₂ 排出源と貯留サイト間を船舶でシャトル輸送し、直接(プラットフォームを介さず)CO₂ を圧入・貯留を行う方式(以下、シャトルシップ方式)のシステムを指す。シャトルシップ方式は、東京大学大学院新領域創成科学研究科の尾崎雅彦教授が提唱されている方式である。同方式の全体概要を図 2-1 に示す。

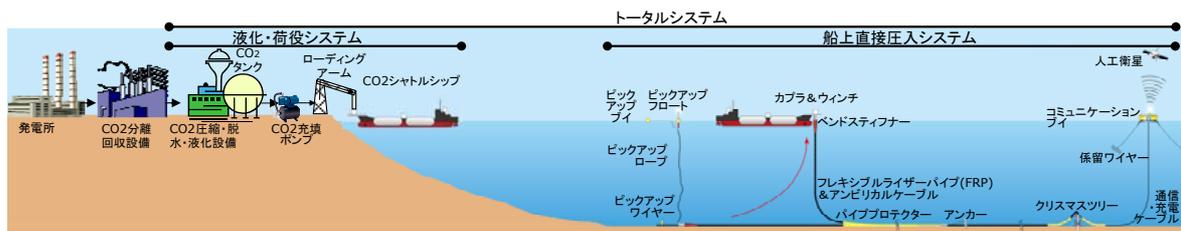


図 2-1 シャトルシップ・洋上圧入方式説明図

このシステムの長所・短所は、以下の通りである。

(1)長所

- ① Source-Sink matching の制約を緩和
- ② 圧入ラインを用いることにより水深の制限を緩和
- ③ 洋上一時貯蔵設備が不要
- ④ 計画変更に対する柔軟性(スケールメリット→ユニット化)
- ⑤ 撤去、移設・再利用、冗長性確保の容易さ

(2)短所

- ① 最適化されたパイプライン輸送と比べ、コスト高
- ② 海象の影響を受ける
- ③ 船舶燃料消費による CO₂ 排出

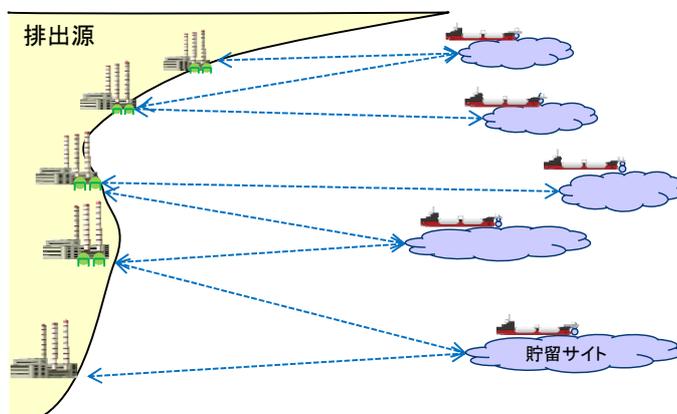


図 2-2 シャトルシップ方式におけるソース・シンク・マッチング

CO₂ の主要排出源が沿岸各地に立地され、かつ沿岸海域が高度に利用されている我が国においては、沖合海域における CO₂ 貯留を可能にするシャトルシップ方式は、地球温暖化対策の有力なオプションになると期待される。(資料編 2-3)

本業務は、シャトルシップ輸送・貯留システム及びその構成要素を明確化するとともに、システム全体(トータルシステム)の試設計および技術課題解決に向けたオペレーション試験の計画立案を行うことを目的とする。(資料編 2-4)

本業務の実施項目と検討の流れを図 2-3 に示す。①で船舶輸送 CCS の現状を整理する。②では本実証の与件および貯留候補海域の海象条件等から規定される基本条件を設定し、定常運航の計画(基本計画)を検討し、荒天休止後の運航最適化のための物流シミュレータの開発に着手する。③～⑤ではシャトルシップ方式のトータルシステムの構成装置・機器・設備を検討する。⑥では緊急離脱ケースの考え方を整理する。⑦では海底設備の調査、ピックアップオペレーション試験(船上直接圧入システムの部分試験)の計画、船上直接圧入システムおよびオペレーション検討のための液化 CO₂ 流動試験を実施する。

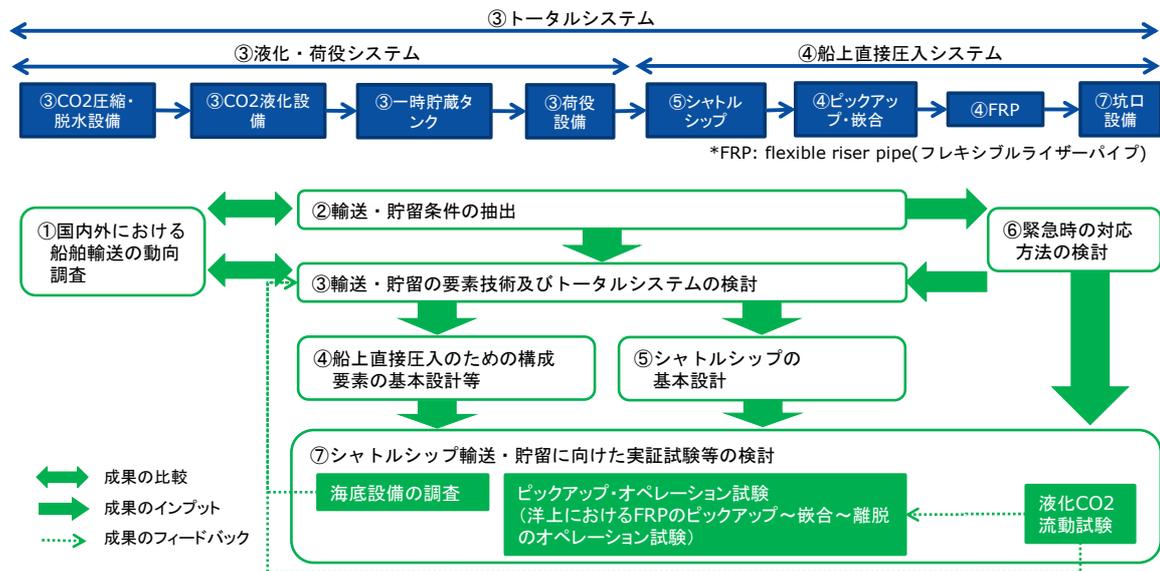


図 2-3 本業務の検討フロー

2.1. 国内外における船舶輸送の動向調査

国内外における二酸化炭素船舶輸送の技術開発事例から、その圧入方式、コスト試算例について調査した。調査対象は、以下の5件である。

1. NEDO「革新的ゼロエミッション石炭ガス化発電プロジェクト 発電からCO₂貯留までのトータルシステムのフィジビリティ・スタディー」(国内)。輸送はENAA[2]、トータル検討はIAE+AIST[3]が実施した。(資料編 2-5)
2. KIOST (韓国海洋科学技術研究所) による船舶輸送 CCS の研究[4][5][6]。2015年までに年間100万トン以上貯留可能なサイトを特定し、2017年からの貯留開始が目標。(資料編 2-6)
3. CINTRA(オランダ) : GCCSI の支援による CINTRA プロジェクトの FS(フィジビリティ・スタディー)[7][8]。欧州政府の支援延期により2013年に中止。(資料編 2-7)
4. Tel-Tek(ノルウェー)+TNO(オランダ): Tel-Tek(ノルウェー国立エネルギー効率研究所)によるスカゲラク海峡(ノルウェー)への船舶輸送 CCS の可能性検討[9]。TNO(オランダ応用科学研究機構)と共同でCO₂-EORの可能性検討も進めている[10]。(資料編 2-8)
5. UNSW+CO₂CRC(豪州) : UNSW(ニューサウスウェールズ大学)とCO₂CRC(温室効果ガス対策技術共同研究センター)は共同でCO₂船舶とパイプラインの輸送コストについて比較研究している[11]。(資料編 2-9)

表 2-1 国内外の CO2 船舶輸送研究事例の比較

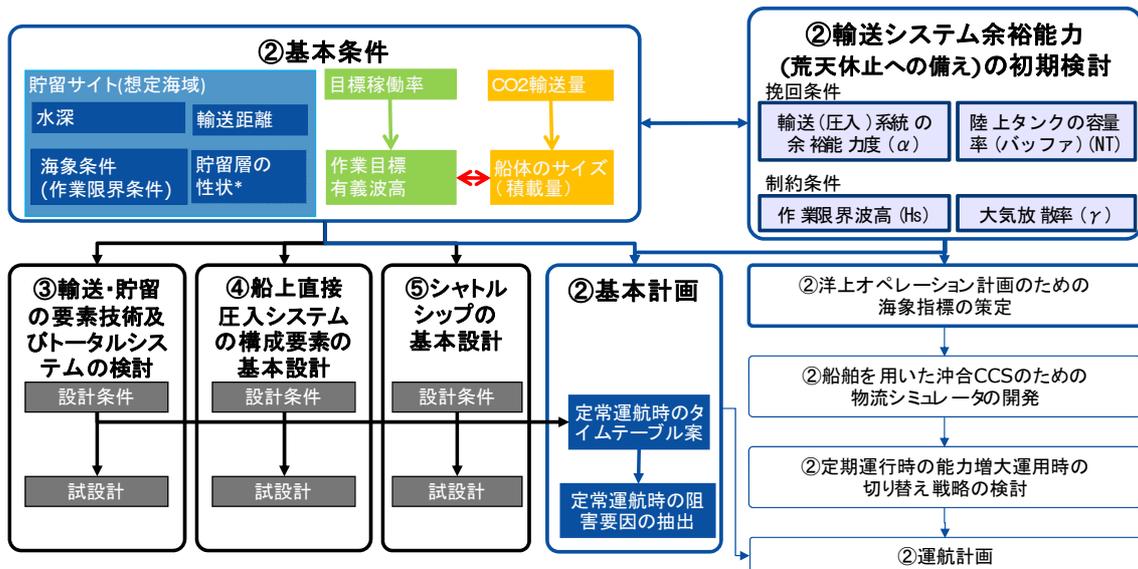
調査対象		輸送・圧入方式の検討状況	船舶のほうが経済的になる輸送距離	備考
国内	NEDO	<ul style="list-style-type: none"> ●洋上着底基地から圧入 ●洋上浮体基地から圧入(154万 t タンクあり, タンクなし, 526 万 t タンクあり) ▲係留ブイ+船上直接圧入 ▲潜水ブイ+船上直接圧入 	300~500 km (年間 154 万 t, 526 万 t)	H24 に終了
海外	KIOST + KAIST (韓国)	▲洋上中間貯留タンク+船上直接圧入	パイプラインと船舶の輸送距離(ルート)が異なり比較できず	現在の船舶輸送の検討状況は不明
	CINTRA (蘭)	▲オフローディングタワー+船上直接圧入 ▲STL ブイ+船上直接圧入	150 km前後 (年間 100 万, 200 万, 400 万 t)	中止
	Tel-Tek (ノルウェー) +TNO(蘭)	★洋上タンク+浮体	距離問わず(年間 30 万, 60 万 t)、500km(年間 500 万 t)、1,200km(年間 1,500 万 t)	圧入も含めた技術検討を開始予定
	UNSW + CO2CRC (豪州)	— (輸送のみ、圧入なし)	750 km(年間 600 万 t、深海域)、900 km(年間 600 万 t、浅海域)	
参考	本業務	●ピックアップブイ+船上直接圧入 (洋上タンクなし)	—	船上直接圧入システムの検討中
検討状況：●概念設計以上、▲概念検討、★今後検討予定、—検討外				

上記のうち概念設計以上の検討事例は、NEDO 及び本業務の国内 2 件だけである。特に船上直接圧入システムについて現在進行中の事例は本業務以外に存在しない。

コストについては、総じて輸送量が多いほどパイプラインが有利、輸送距離が遠いほど船舶が有利である。Tel-Tek+TNO は、30 万トン/年、60 万トン/年の輸送量では輸送距離を問わず船舶が有利と試算している。

2.2. 輸送・貯留条件の抽出

本業務の与件および各種の制約条件から基本条件を設定し、基本計画（荒天休止を考慮しない全体初期計画）、海象指標（荒天休止を考慮した場合の余裕能力の追加）を検討した。（資料編 2-10）



※図中の②～⑤は図 2-3 で示した検討項目と同様

図 2-4 輸送・貯留条件の検討フロー

シャトルシップによる輸送システムの計画手法は、次の3つの段階で進めている。

荒天休止を考慮しない全体初期計画（基本計画）

- 最小限必要な船の積載量・航海速度・隻数と運航計画および圧入流量
- CO₂ 輸送流量、輸送距離、港における作業時間帯制限・荷役時間・その他必要な時間、圧入サイトにおける作業時間帯制限・圧入準備時間・離脱に要する時間などを考慮

荒天休止を考慮した場合の余裕能力の追加（海象指標）

- 圧入サイトの海象特性に応じた、海上輸送能力・圧入流量の増強および陸上貯蔵能力の評価

海象の時系列データを用いた詳細な物流シミュレーションによる計画の確定

2.2.1. 基本条件の設定

本業務では、輸送・貯留条件のうち、初期段階に決める必要があり、ほぼすべての設計条件に影響するものを「基本条件」と定義し優先的に仮置きした。(資料編 2-11)

主な基本条件は、以下の通りである。

- 水深：200～1,000m (海底から直接ピックアップする方式の対応深度は 500m まで)
- 輸送距離：185～970km
- 目標稼働率 (輸送・圧入)：90% → 作業目標有義波高：3.0m
- CO₂ 輸送量：1,000t (1 日分)、2,000t (2 日分)、3,000t (3 日分) → 積載量：3,000t

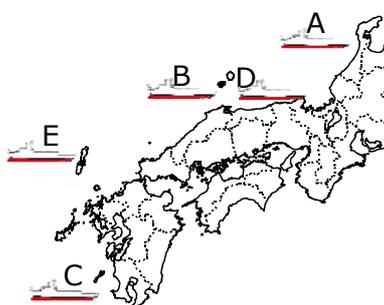


図 2-5 貯留候補海域の位置

2.2.2. 輸送システム余裕能力 (荒天休止への備え) の初期検討

シャトルシップ方式の難点は、荒天時に輸送・圧入オペレーションが停止することにある。この影響を最小限に抑えるために、荒天によるシャトルシップ不稼働を挽回するシステム余力を持たせる必要がある。システム余力のパラメータ (挽回条件) として、「輸送 (圧入) 系統の余裕能力度 (α)」「陸上タンクの容量率 (バッファ) (NT)」、制約条件として「作業限界波高 (H_s)」「大気放散率 (γ)」の 4 つのパラメータを想定する。このとき、制約条件が厳しくなるほど、挽回条件を大きく取る必要が生じる。

表 2-2 輸送システム余裕能力 (荒天休止への備え) の初期検討

挽回条件	挽回条件		定義	
	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> 輸送 (圧入) 系統の 余裕能力度 (α) 0.1~0.2 </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> 陸上タンクの容量率 (バッファ) (NT) 1~2 </div>	α (-)	CO ₂ 輸送 (圧入) 可能量 / CO ₂ 回収量 -1
制約条件	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> 作業限界波高 (H_s) 2.5~3.0m </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> 大気放散率 (γ) 1~3% </div>	NT (-)	陸上タンク容量 / CO ₂ 回収量
			H_s (m)	当該海域において目標稼働率を満たすために作業すべき有義波高
			γ (%)	大気放散される CO ₂ 量 / CO ₂ 回収量

大気放散：シャトルシップ不稼働時の CO₂ 不回収を含む。

荒天時は陸上タンクに CO2 を保管し、荒天後に挽回運転する。万が一、陸上タンク容量を超える日数の荒天が続いた場合は、CO2 不回収（回収設備の待機運転）も想定される。現在開発中の物流シミュレーション等により、上記 4 パラメータの最適化を図る。

2.2.3. 基本計画

基本計画では、図 2-5 の 5 海域(A,B,C,D,E)を調査対象として、後述する所要時間モデル（表 2-5）をベースに荒天休止を考慮しない定常運航のタイムテーブルを例示し、定常運航の所要時間、必要船舶数を算出した。（資料編 2-12、資料編 2-13）



図 2-6 定常運航のタイムテーブル例

表 2-3 定常運航の所要時間と必要船舶数

	地点	A	B	C	D	E
		排出源からの輸送距離	970km	600km	185km	705km
1,000t	1 航海あたりの所要時間	4 日 19 時間半	2 日 21 時間	2 日 5 時間半	3 日 4 時間	2 日 9 時間
	1 サイクル日数と必要船舶数	5 日 5 隻	3 日 3 隻	3 日 3 隻	4 日 4 隻	3 日 3 隻
2,000t	1 航海あたりの所要時間	5 日 21 時間半	3 日 23 時間	3 日 8 時間	4 日 6 時間	3 日 11 時間
	1 サイクル日数と必要船舶数	6 日 3 隻	4 日 2 隻	4 日 2 隻	5 日 3 隻	4 日 2 隻

船のサイズと定常運航サイクル、船の隻数の関係として、以下の点が挙げられる。

- 船のサイズを上げると、1 サイクル日数が増える
- 場合によっては隻数が減る

船のサイズを上げるメリットとして、以下の点が挙げられる。

- 船建設費の低減（隻数の低減が見込める場合）
- 航海時燃料消費量の低減
- FRP ピックアップ、FRP 着底、荷役等の作業回数の低減

- 波浪中の作業性向上（サイズ増大により波浪による船体動揺を低減可能）
船のサイズを上げるデメリットとして、以下の点が挙げられる。
- 陸上タンク容量の増大
- 位置保持時燃料消費量の増大（船の大型化による推進器の出力の増大）
- 現地での連続位置保持時間の増大（天候変動のリスクの増大）

2.2.4. 洋上オペレーション計画のための海象指標の策定

輸送・圧入システムの基本計画のためには、海域の平均的な静穏度（稼働率）や季節性に加え、海上作業が連続して休止する日数や稼働・休止が短期間ごとに入れ替わる断続的な荒天を考慮する必要があり、現地の長期にわたる海象時系列データが望まれる。

そこで、荒天休止への備えのために基本計画段階で簡便に使える『海象指標』を検討した。最終的には詳細な物流シミュレーションで確認するが、本業務では長期海象時刻歴データにもとづく作業限界海象と連続不稼働日数の関係から検討した。

2.2.4.1. 日本周辺海域における海象の連続性について

2.2.4.1.1. 洋上オペレーションと海象の連続性

海洋での施工、掘削、荷役、保守点検、観測機器の揚降などのオペレーションは静穏な海象での実施が求められ、強風や高波などの荒天時には中断や中止が余儀なくされる。海洋プロジェクトの計画では、こうした荒天による制約条件の考慮が必要となる。静穏と荒天を仕切る作業閾値は、実施する洋上オペレーションの種類や利用する船舶などの性能によって異なる。例えば、大きな船舶や、機器の動揺を低減させる装置を備えた船舶であれば、コストは当然高くなるが、作業閾値も高くなり作業効率が高くなる。また天候に左右されない継続的な生産と連動した海上物流や、数日間に及ぶ海洋での施工に関わる作業船チャーターなどの事例からわかるように、静穏や荒天の単純な発現頻度ではなく、その連続性に関する知見が重要となる場合がある。洋上オペレーションの初期計画段階において海象の連続性についての指標が得られれば、費用対効果を最適化した利用船舶の計画あるいは選択ができると考えられる。

以下では、再解析モデル ERA-Interim からの波浪データを利用することで、日本周辺海域の海象の連続性に関する特徴を整理する。

2.2.4.1.2. ERA-Interim データと適用性

ヨーロッパ中期予報センター(ECMWF)による全球再解析モデルの ERA-Interim (Dee et al.[14]) のデータは、大気波浪結合モデルで WAM (Komen et al.[15]) をベースとした波浪推算を実施したものである。波浪については衛星海面高度計の観測結果とデータ同化されている。提供されている時間解像度は 6 時間、水平解像度は 0.75° (モデルの水平解像度は 110km) である。1979~2012 年の 34 年間分のデータが公開されており、長期間のデータによって統計的に有意な検討が期待できる。

ここでは、ERA-Interim にて再現された有義波高データの基本的な統計値を整理する。なお、北緯 45 度以北では海氷によって有義波高データが欠損している海域が存在するため、こうした海域は解析対象から除外した。資料編 2-14「洋上オペレーション計画のための海象指標」に年間平均値と夏季平均(6,7,8月)と冬季平均(12,1,2月)の有義波高を示す。冬季は大陸からの季節風が強まり、夏季と比べて有義波高が著しく増加する様子がわかる。また夏季の平均有義波高の空間分布は台風襲来やそのうねりの影響(磯崎ら[16])により、冬季や年間平均のそれと異なる分布を示している。Kato & Nobuoka[13]の指摘したように、日本周辺海域の特徴を整理する上で季節性が及ぼす影響について検討が必要であることがわかる。

2.2.4.1.3. 日本周辺海域の連続海象指標

ERA-Interim データを用いて、閾値 1~4m の場合における各連続統計指標について解析を行った。結果の一例として、閾値 2.5m における静穏率、7日静穏率、34年最大連続荒天期間の解析結果を図 2-7、図 2-8、図 2-9 に示す。また閾値 1,2,3m に関する 3日静穏率、7日静穏率、34年最大連続荒天期間の解析結果については、資料編 2-15「洋上オペレーション計画のための海象指標(静穏率,連続荒天期間)」にまとめて示す。

静穏および荒天海象の連続性を記述する統計的な指標については、Graham^[12]を参考に、以下のように定義した。

2.2.4.1.3.1. 静穏率(Calmness Factor)

作業可能な状態の単純な発現確率と定義する。作業閾値における累積密度分布と同値である。洋上作業時間が短くなると作業可能期間の発生割合(稼働率)は漸近的に静穏率と一致する。同指標は静穏海象発現の連続性を考慮していない。

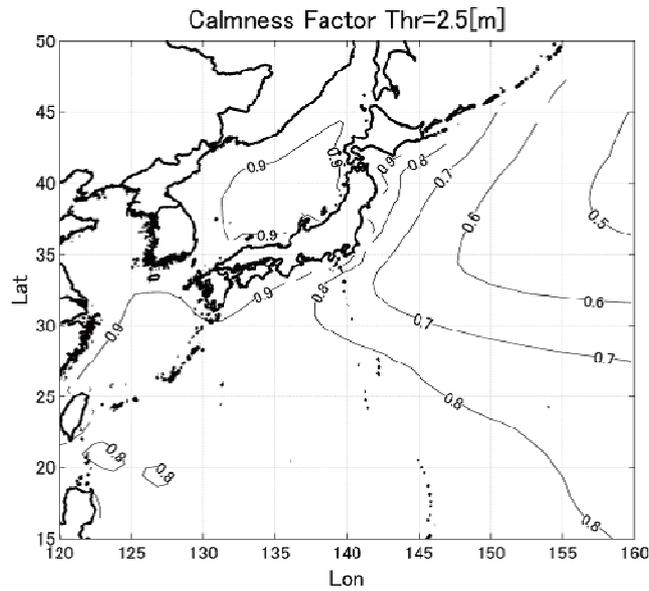


図 2-7 閾値 2.5m における静穏率

2.2.4.1.3.2. N 日静穏率(N days continuous Calmness Factor)

N 日間以上連続で作業可能な状態が続く期間の発現確率と定義する。シャトルシップが出港してから CO₂ を圧入して帰港するまでのサイクルなど、作業の中断が所要期間などに大きな影響を与える作業を計画する上での指標となる。ある時間から開始した時に、中断することなく N 日間以上作業閾値を下回る確率について、統計的な指標として表現する。

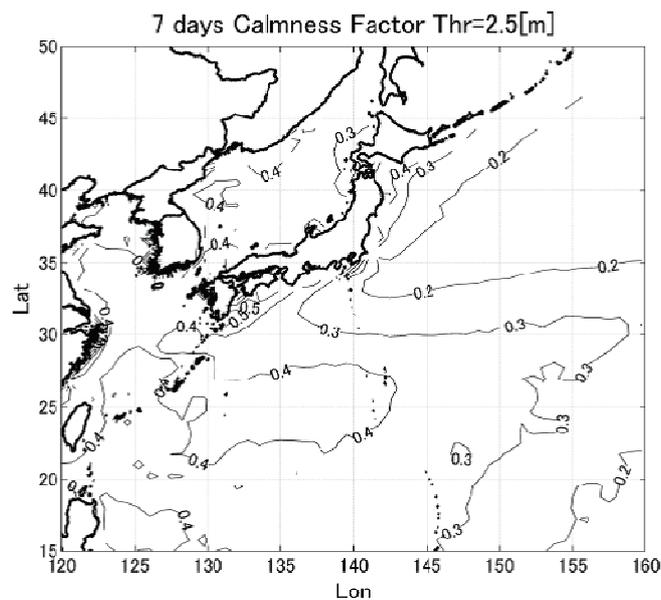


図 2-8 閾値 2.5m における 7 日間静穏率

2.2.4.1.3.3. 再現期間 N 年の連続荒天期間(N-year return-period storm duration)

作業閾値を上回る荒天海象について、N 年の再現期間を持つ連続荒天期間の最大値と定義する。荒天により中断される輸送作業のバッファとなる貯蔵タンクの最適サイズ設計などに有効と考えられる。

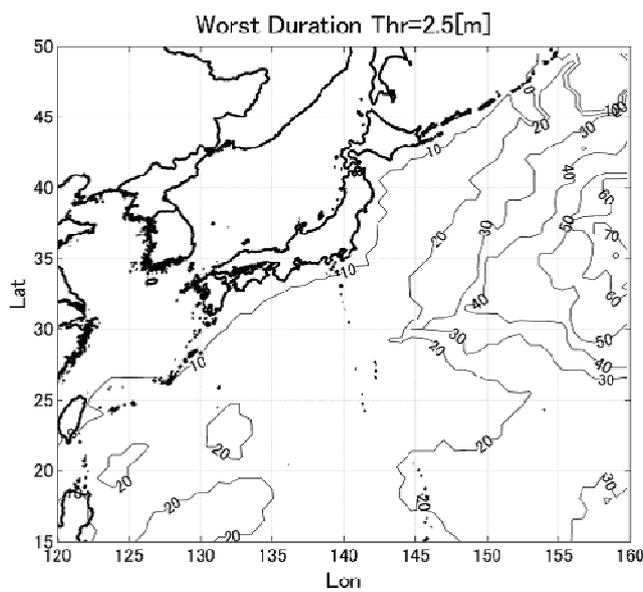


図 2-9 閾値 2.5m における再現期間 34 年最大連続荒天期間(日数)

2.2.4.2. 海象の連続性と輸送・圧入システムの余裕能力

2.2.4.2.1. 余裕能力の必要性

荒天による不稼働を挽回するためのシステムの余裕能力は、システムの様々な要素を増強することに関わってくるが、主要なものとしては、①回収・液化プラントとの間のバッファ容量の大きさ、②定常時に対する増強時の輸送・圧入能力比が考えられる。これらに対する海象の連続性の影響としては、以下のようなことが予想される。

(1) 連続する不稼働日数

海上輸送による CO₂ 搬出が休止を余儀なくされた時、回収・液化プラントからの CO₂ は荷役前の一時貯蔵施設において貯め置かれることになる。船の運用方法によって多少の短縮は可能になるかもしれないが、基本的には沖合で不稼働が続く日数分の CO₂ を貯蔵する容量が陸上の一時貯蔵施設に求められることになる。連続する不稼働日数の最大値は、対象海域の海象の発現確率、稼働中止となる波高・風速など海象の閾値などによって評価される確

率変数である。最大値を過度な余裕をもって（例えば 100 年最大連続荒天期間で）計画条件に盛り込むと経済性が悪化することは容易に想像できる。積み出し港付近に設ける一時貯蔵施設の場所の確保も大変である。一方、備えが不足する計画では、回収した CO₂ の大気中への放散あるいは回収プラントの休止などの対応策が高い頻度で必要になる。

(2) 断続的な不稼働

不稼働が生じた後、運転再開した時に、何日間かけて挽回する能力を持たせるのが妥当か検討する必要がある。例えば 2 日間の不稼働があつてその後 6 日間で挽回して定常状態に戻すならば、定常状態より 33%高い輸送能力が必要になる。余裕能力が不足すると、挽回しおわらないうちに次の不稼働が生じて、累積値でオーバーフローする事態が生じうる。逆に、挽回しおわらないうちに次の不稼働が生じて、累積値が上限値に到達しない場合もありうる。上述した「連続する不稼働日数」は一つの重要な指標であるが、不稼働と稼働がそれぞれ短期間ごとに入れ替わるケースについても考慮できる計画法が必要である。なお、主に経済的な観点から貯留施設の圧入流量を無制限に増やせないで、輸送の余裕能力だけを大きくしても効果は小さいと考えられる。

(3) 定常時運用と増強時運用

荒天がしばらくない状態での「定常時」と、荒天による輸送システム不稼働の後、陸上タンクの貯蔵量を減らす「増強時」とでモードを切り替える必要がある。仕様は増強時で決まるものの、「定常時に、システムが持つ能力をどのように縮小しておくか」「モードの切り替え基準をどうするか」についての検討が重要である。定常時の能力縮小方法としては、

- 運航スケジュールを楽にしておく（待機時間を多めにとる）
- 一部の船を使わない
- 満載で輸送しない
- 航海速度を下げておく

などが思いつく。このような余裕能力の運用戦略は、個々のプロジェクトで課せられる制約等に加え、システムのレダンダンシーのあり方や CCS チェーンの各要素の点検計画とも併せ検討すべき課題である。

2.2.4.2.2. 海象データにもとづく輸送・圧入システム余裕能力の初期検討

ここでは、「断続的な不稼働」を考慮した輸送・圧入システムの余裕能力計画に向け、回

収・液化プラントとの間に設けられるバッファ容量の大きさ、定常時に対する増強時の輸送・圧入能力比、の必要規模について初期検討のケーススタディを行う。

(1) 方法

日本近海で対象海域を想定し、ERA-Interim からの波浪の推移を入力して、荒天にもとづく断続的な不稼働が輸送・圧入システムの運用にどのような影響を及ぼすかシミュレーションにて検討する。

シミュレーションは以下の方法で行う。

- 1) 定常時の輸送システムがまったく過不足なく構築されているものと仮定する。この時、一日あたりの CO₂回収・液化量と、一日あたりの海上輸送量と、海域での一日あたり圧入量は、すべて等しく Q_0 [ton/day] であるとする。
- 2) 船の出港・帰港と海域での作業開始・終了には本来時間差があるが、海域で有義波高が閾値（作業限界波高 H_{CR} [m]）を下回っている間、輸送システムは稼働し、超過している間は稼働を休止するものと仮定する。
- 3) 陸上の一時貯蔵タンクには、回収・液化プラントから常に Q_0 の流量で CO₂ が入り、輸送システムが稼働している間は定常時には Q_0 、増強時には $(1+\alpha)Q_0$ の流量で CO₂ が出ていくとする。ここで α は輸送システムおよび圧入井の余裕能力度を示すパラメータである。
- 4) 陸上の一時貯蔵タンクの容量の上限値を、定常時の一日あたり輸送量 Q_0 の N_T 倍とする。上限値を超えた場合、回収された CO₂ は大気放散されるものとし、大気放散された CO₂ 総量の全回収量に対する割合（34 年間平均値）を γ [%] とする。
- 5) 一時貯蔵タンク内の CO₂ の量が Q_0 の N_S 倍を越えたら増強時モードに切り替わり（ただし $0 < N_S < N_T$ ）、一旦増強時モードになれば CO₂ の量がゼロになるまでは定常時モードに切り替わらないとする。なおここで言うゼロとは、本来の離散的な船舶輸送で必要とされるバッファ機能を満たすためのもの（おそらく船一隻の搭載量程度）を除外してのものであり、陸上の一時貯蔵施設の最大容量にもこのことを考慮する必要がある。

以上にもとづき、時間刻み 6 時間で 34 年分のシミュレーションを行う。

計算法の種類は、広く言えば離散モデルを用いた時系列シミュレーションである。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としていくつもの汎用プログラムがあるが、今回の計算のモデル・ルールはかなり単純であり、Fig. 2-6 に示すようなフローチャートにもとづきモデルおよびプログラムを新たに作成した。

なお量に関する諸値はすべて Q_0 で規格化されるので、独立パラメータは H_{CR} 、 α 、 N_T 、 N_S であり、評価パラメータは γ となる。

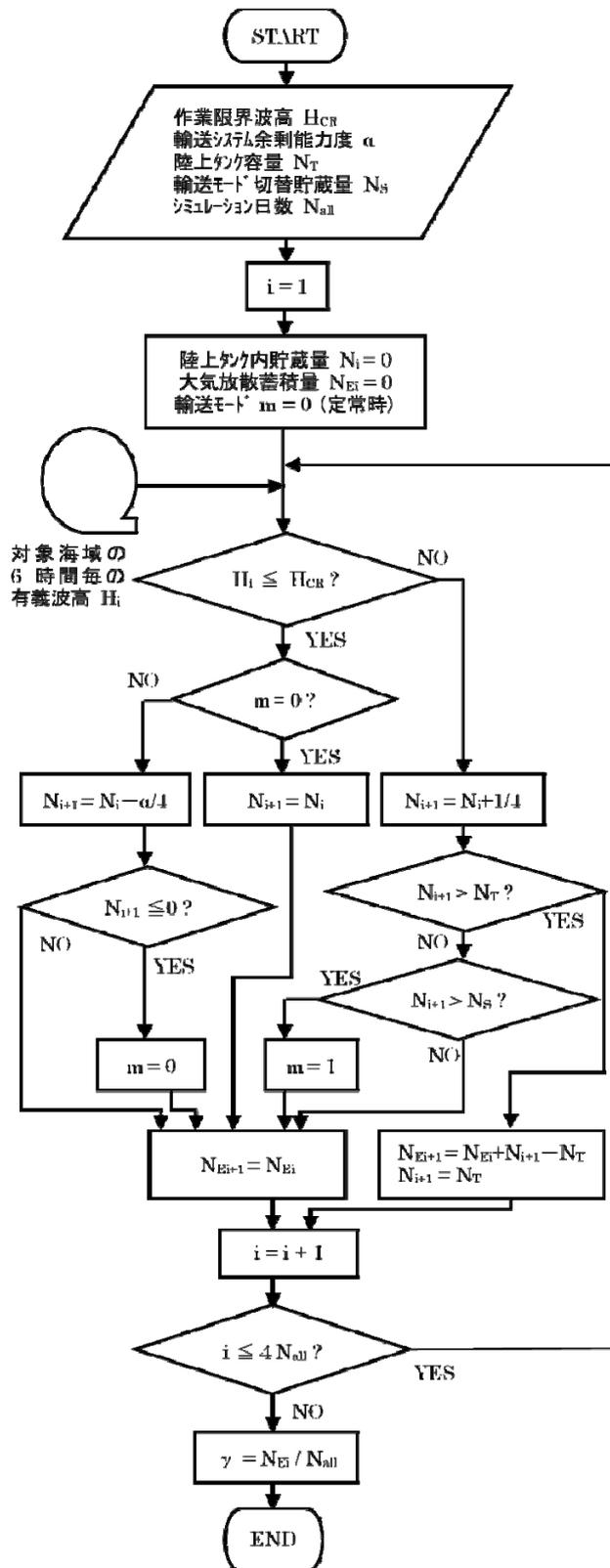


図 2-10 海象データを考慮した CO2 船舶輸送の
離散型事象シミュレーションのフローチャート

(2) ケーススタディ対象海域の波浪データ

ここでは図 2-5 の地点 B をケーススタディの対象海域とする。ERA-Interim から地点 B の 34 年間、6 時間毎の有義波高のデータ（総数 49676 個）を解析すると、平均値は 1.31 m であり、図 2-11 のような未超過確率分布が得られる。例えば単純に年間平均稼働率 90% を得たいなら有義波高 2.6m 以上を作業限界とする必要があることになる。また、作業限界波高（閾値） H_{CR} を連続して超過する日数の長い方から 1 位～5 位、10 位、20 位、30 位を図 2-12 に示す。34 年間で最も長い連続超過日数は、 H_{CR} が 2.1m 以下では二番目に長い日数よりかなり長い。二番目以降は日数の差があまり無い。つまり一度だけ突出して長く続くことがあり、それは半月以上の長期になっている。 H_{CR} が 2.2m 以上になると最長の連続超過日数は二番目以降とあまり差がなくなり、 H_{CR} が 2.5m、3.0m、3.5m、4.0m の時にそれぞれ 6.25 日、4.75 日、3.25 日、2.5 日となっている。資料編 2-16 「洋上オペレーション計画のための海象指標(作業限界連続超過日数)」にも、その試算例を示す。

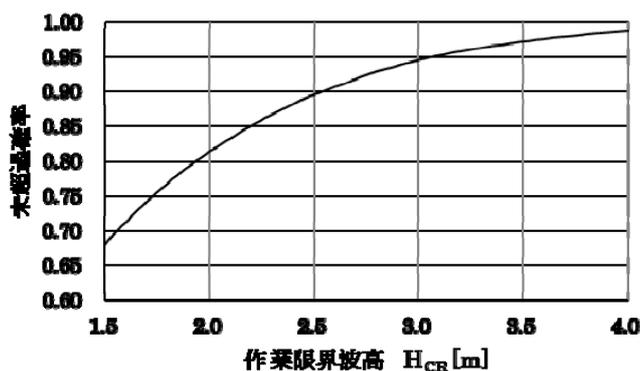


図 2-11 作業限界波高(閾値)に対する未超過確率

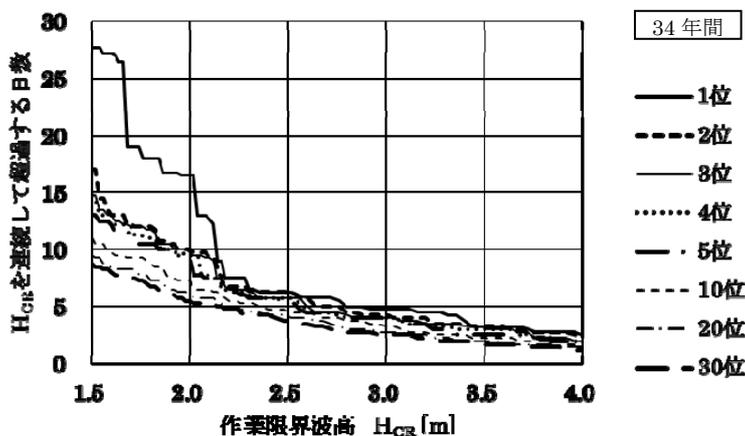


図 2-12 作業限界波高に対する連続超過日数

(3) シミュレーション結果例

作業限界波高； $H_{CR}=3.0\text{m}$ 、輸送システムの余裕能力度； $\alpha=0.2$ 、陸上タンクの容量／一日あたり回収量； $N_T=3.0$ 、定常時から増強時に切り替える陸上タンク内 CO_2 量／一日あたり回収量； $N_S=1.0$ とした時の結果の一部を、図 2-13、図 2-14、図 2-15 に示す。それぞれの図は、ある年の 10 月から翌年 1 月までの 4 ヶ月間の有義波高、陸上タンク内貯蔵量、大気放散累積量の推移を例示している。有義波高が 3.0m を超えている期間、陸上タンク内貯蔵量は増加し、 3.0m 以下になると、陸上タンク内貯蔵量が一日あたり回収量を超えていない場合は増減なし、一旦超えたら減少する様子を見ることができる。そして陸上タンク内貯蔵量が回収量の 3 日分を超えようとすると大気放散され、その累積量がステップ状に上がることをわかる。

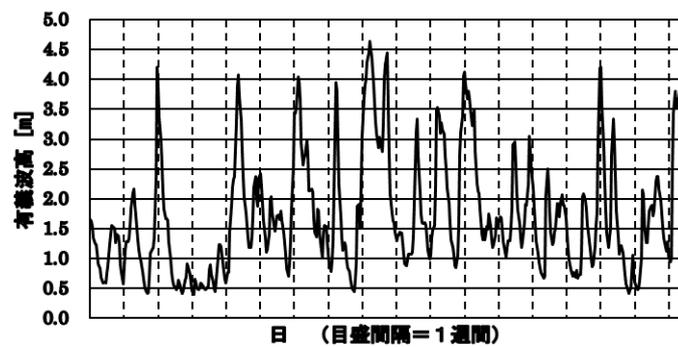


図 2-13 4 か月間の有義波高のシミュレーション例

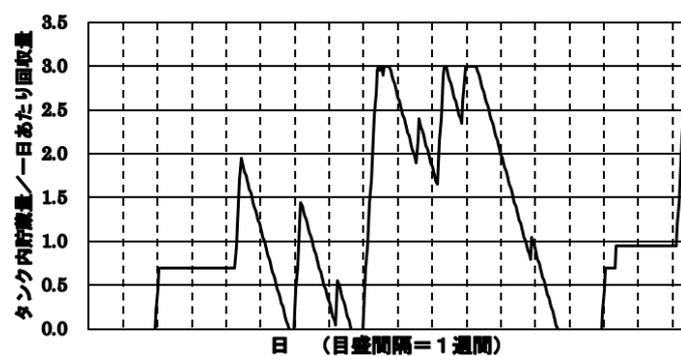


図 2-14 4 か月間の陸上タンク内貯蔵量のシミュレーション例

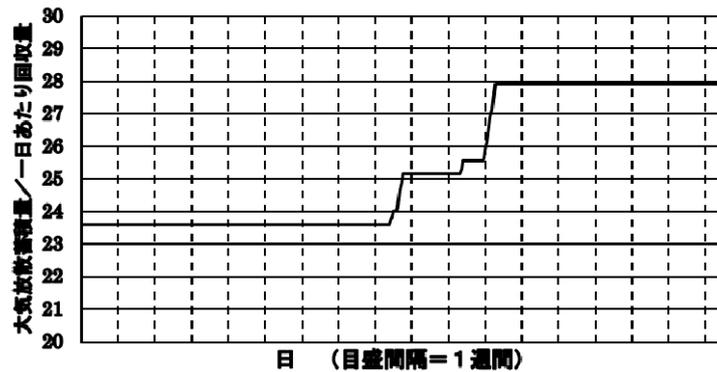


図 2-15 4 か月間の大気放散累積量のシミュレーション例

図 2-16 に、大気放散累積量の 34 年間の推移の結果を示す。パラメータは上述した値と同じであるが、 N_s を 0.5~2.0 で変えて比較を行っている。大気放散累積量は、ほぼ毎年一回、冬場にステップ状に上がっていて、その上昇幅は年によって異なるものの、大気放散される CO_2 総量 (34 年間) は N_s^1 が大きいほど大きくなっている。これは、定常時から増強時への切り替えのタイミングが遅くなることによるものと考えられる。ただし次で示すような他のパラメータに比べて影響は小さい。

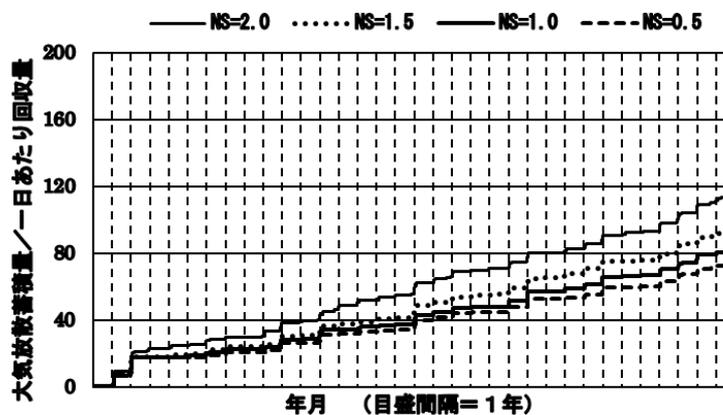


図 2-16 34 年間の大気放散累積量に対する N_s の影響

(4) パラメータ影響と考察

上で用いたパラメータの値 ($H_{CR}=3.0m$ 、 $\alpha=0.2$ 、 $N_T=3.0$ 、 $N_S=1.0$) を基準に、それぞれを変えた時の大気放散される CO_2 総量の全回収量に対する割合 (34 年間平均値) γ への影響を調べる。

¹ N_s : 定常時から増強時に切り替える陸上タンク内 CO_2 量／一日あたり回収量

図 2-17～図 2-19 に、各パラメータを変えた時の大気放散蓄積量の 34 年間の推移の結果を示す。H_{CR} の違いの影響（図 2-17）はかなり大きい。表記の都合から、34 年間の最終値のすべてを図から読み取ることができないが、H_{CR} が 2.0m、2.5m、3.0m、3.5m、4.0m の時の大気放散蓄積量（および 34 年間平均 γ ）はそれぞれ、CO₂ 回収量の 1203 日分（9.68%）、401.5 日分（3.23%）、82.65 日分（0.67%）、12.5 日分（0.10%）、1.05 日分（0.01%）となった。作業限界波高の適切な評価や技術開発による改善見通しは、より詳細な計画・検討を進める上で非常に重要であると言える。

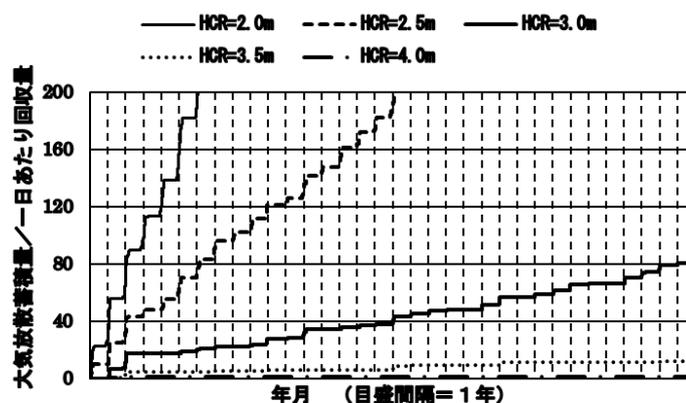


図 2-17 34 年間の大気放散累積量に対する H_{CR} の影響

輸送システムの余裕能力度 α の違いの影響（図 2-18）、陸上タンクの容量 N_T の違いの影響（図 2-19）は、余裕能力の計画において重要なパラメータになることがわかる。特に N_T については、(2)で示したように H_{CR}=3.0m で 34 年間の最長連続超過日数が 4.75 日であったのに対し、 $N_T=6$ あるいは 8 としても若干の大気放散が生じていることから、断続的な不稼働の影響を適切に考慮する必要があることがわかる。

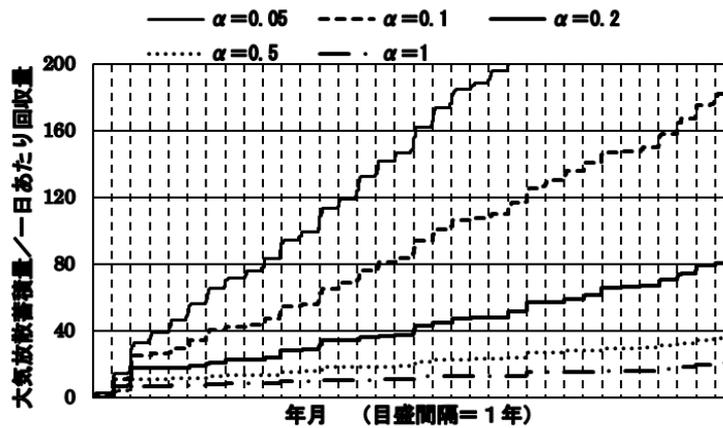


図 2-18 34 年間の大気放散累積量に対する α の影響

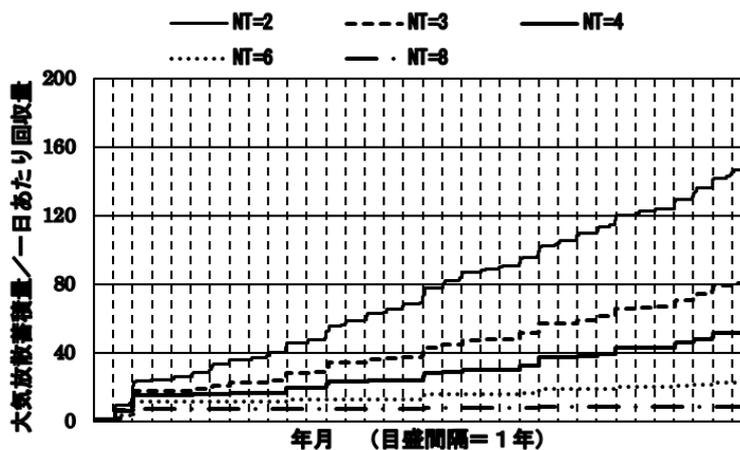


図 2-19 34 年間の大気放散累積量に対する N_T の影響

図 2-20～図 2-22 に、大気放散される CO_2 総量の全回収量に対する割合 (34 年間平均値) γ を 0%、1%、3% に抑える場合に必要とされる輸送システムの余裕能力度 α と陸上タンク容量上限 N_T の組合せについて示す。計算は、図 2-10 のフローチャートにおける最後の結果 γ が目標値になるようにパラメータ (今回は N_T) を取れんさせる方法で行った。 α と N_T はトレードオフの関係にあること、どちらか一方を過度に大きくしても他方の必要量がある一定以上には効果的に下げられないこと、作業限界波高 H_{CR} の影響が大きいことがわかる。

CO_2 の大気放散が認められない時 (図 2-20) は、陸上タンク容量上限 N_T をとりわけ大きく計画する必要がある。例えば $H_{CR}=3.0m$ 、輸送システム・圧入井の余裕能力を定常時の 50% 増しに設定しても、約 10 日分の貯蔵容量が要求される結果になっている。一方で図 2-21、図 2-22 で示されているように、 γ がさほど小さくなくても大気放散による陸上タン

ク必要量の緩和効果は顕著で、CCS チェーン全体計画の検討課題に位置づけられる。

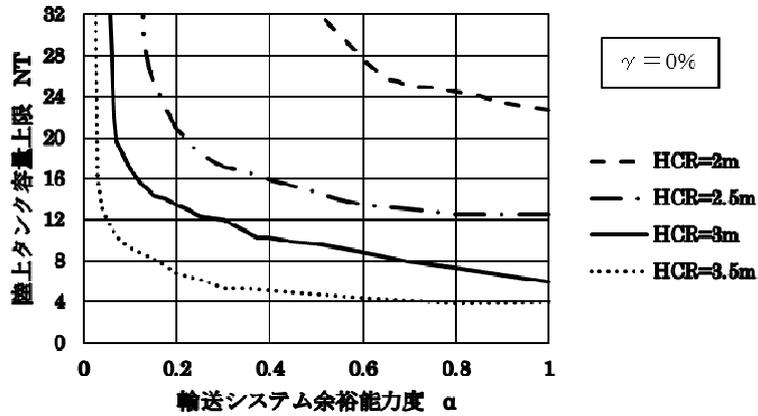


図 2-20 $N_S=1.0, \gamma=0\%$ の場合に必要な輸送システム余裕能力度²

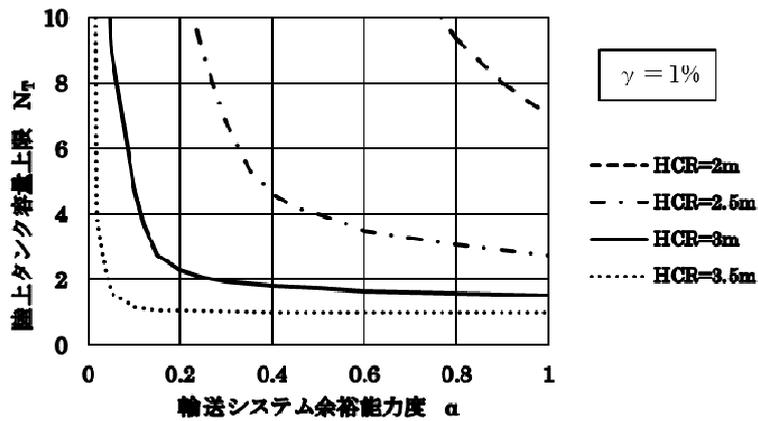


図 2-21 $N_S=1.0, \gamma=1\%$ の場合に必要な輸送システム余裕能力度

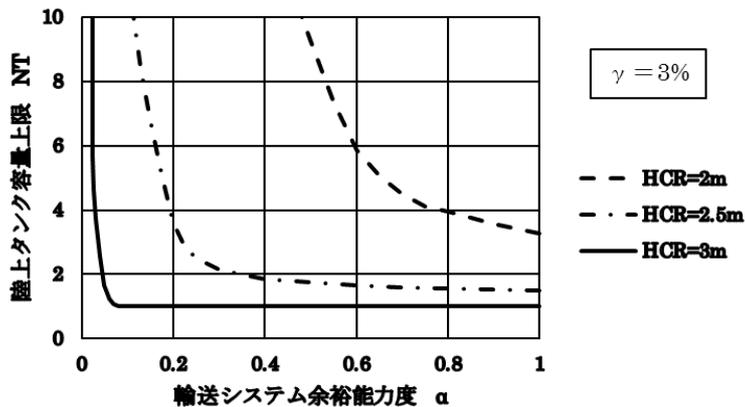


図 2-22 $N_S=1.0, \gamma=3\%$ の場合に必要な輸送システム余裕能力度

² $N_S=1.0$: 陸上タンク貯蔵量が 1 日分の回収量に達したら増強運転に切り替え

図 2-20～図 2-22 のようなチャートを貯留海域に応じて作成することによって、HCR を含め α や N_T に関して与えられる制約の中で、余裕能力を簡便に初期検討することができると思われる。 α については、CO₂ 圧入井の許容流量や基数が主な制約条件になり、 N_T については、CO₂ 積出し港付近の貯蔵タンク設置場所の敷地面積などが主な制約条件になると考えられる。両者とも計画に十分な余裕がとれない場合は、洋上作業施設の作業限界波高を大きくするか、大気放散許容量を上げることになる。

2.2.5. 船舶を用いた沖合 CCS のための物流シミュレータの開発

2.2.5.1. 物流シミュレーションにおけるパラメータ

2.2.5.1.1. 物流シミュレーションの必要性

シャトルシップ方式による輸送・貯留システムの計画にあたっては、荒天等による不稼働を見越し、不稼働があった場合はそれを挽回して定常状態に復旧するようなシステムを、合理的に検討する必要がある。また、2.2.4 で示したように海上での位置保持や結合作業の安全性・作業性の限界海象（例えば有義波高の閾値）が与えられるならば、海象が限界を越える単純な確率（年間の平均稼働率のようなもの）だけでなく、頻度は低くても連続不稼働日数や断続的な不稼働の推移などを適切に考慮する必要がある。さらに 2.2.4.2 で述べたように、海象の時間変化にともなう稼働・不稼働だけではなく、港湾の荷役作業、船舶による海域での海上作業などに対する海象以外の種々の制約、あるいはプラントの定期点検や負荷変動、圧入井の特性の時間変動や不確実性など、実際のより複雑な諸条件をできるだけ取り入れた検討が必要であると考えられる。

一方で、与えられた制約の中で、調節可能な操作量（たとえば船の速度や積載量）あるいは定常時と増強時の切替え基準などを、どのように策定するか、いわゆる運用上の戦略の検討もシステムの効率的な運用にとって重要である。

そこで、上述の検討を行うためのツールとして、与えられる条件（含む制約）や計画値（含む調整可能な操作量）など様々のパラメータを変更して、輸送システムが過不足なく健全であるかどうかを判断する、海象の時系列データを用いた物流シミュレータを開発することとした。（資料編 2-17）

2.2.5.1.2. パラメータ

シャトルシップ方式による輸送・貯留システムのフローに基づき、物流シミュレーション

のパラメータの抽出結果を表 2-4 に示す。表中のパラメータは、以下のように分類した。

- 与件 ; プロジェクトに与えられる前提条件。原則的に変更できない。
- 制約条件 ; プロジェクトを実施する上で課せられる外的要因による制約。
- 計画値 ; 計画者が変更可能な諸量のうち他の計画値に影響を及ぼしうる主要なもの。
- 調節可能 ; 計画値のうち変更幅があまり大きくないもの。

表 2-4 シャトルシップ方式輸送・貯留システムの物流に関するパラメータ

パラメータ	与件	制約条件	計画値	調節可能
回収・液化プラント	定格運転時の CO ₂ 回収量	○		
	プラント稼働率あるいは季節変動	○		
	年間回収量	○		
陸上一時貯蔵タンク	貯蔵量上限値		○	
	年間大気放出許容量		○	
港湾荷役	係船可能数		○	
	船の主要目の制限		○	
	作業時間帯の制限		○	
	入港・離着棧・出港に要する時間			○
	荷役時間			○
	作業限界海象		○	
	港湾付近の海象データ	○		
海上輸送	輸送距離	○		
	船の隻数		○	
	積載可能量		○	
	揚荷残量			○
	定常運転時輸送量		○	
	増強運転時輸送量			○
	定常運転時航海速度			○
	増強運転時航海速度			○
	航海限界海象		○	
	航路の海象データ	○		
洋上圧入	ブイ基数		○	
	作業時間帯の制限		○	
	現地到着から圧入開始までに必要な時間			○
	圧入終了から現地出発までに必要な時間			○
	天候回復後の圧入再開に要する時間			○
	坑井あたり圧入流量の最大値	○		
	定常運転時坑井あたり圧入流量		○	
	ブイあたり坑井数		○	
	荒天退避条件		○	
	ピックアップ作業限界海象		○	
圧入サイト付近の海象データ	○			

2.2.5.1.3. 所要時間モデル

物流シミュレーションを行う場合、基本となる運航スケジュールを念頭におくことが肝要である。その場合、トータル時間の中で重要な割合を占める航海時間は輸送距離と航海速度によって定まり、圧入時間は一回あたりの輸送量と圧入流量によって定まる。その他の作業（港湾荷役や洋上でのピックアップなど）の必要時間については、現在検討中の荷役装置やピックアップ装置のオペレーションから想定し、当面の検討に用いる「所要時間モデル」を作成した。

船の積載可能量を 3000 トン規模、サイトの水深を 500m 程度としたときの、所要時間モデルを表 2-5 に示す。あくまで技術開発中の現時点での想定である。なお、必要性が高い場合は機器の増強などによって調節可能である。

表 2-5 所要時間モデル（暫定）

場所	作業	所要時間
港内	入港・接岸・係船作業	0.5 時間
	荷役準備作業・荷役・荷役終了作業	7.0 時間（満載の場合）
	出港	0.5 時間
往路	航海	輸送距離と速度により算定
サイト	ピックアップブイへの接近	0.5 時間
	ピックアップ作業・嵌合作業	1.5 時間
	圧入準備	0.5 時間
	圧入	輸送量と圧入流量により算定
	圧入終了作業・離脱準備作業	2.0 時間
	復路航海準備	0.5 時間
復路	航海	輸送距離と速度により算定

2.2.5.2. 物流シミュレーションモデルの開発と試行

2.2.5.2.1. 物流シミュレータのプラットフォーム

物流シミュレーションは、一般的に言えば、離散モデルを所定のルールの下で時系列的に動かすもので、そのためのプラットフォームとして汎用ソフトも市販されている。ここでは、物流シミュレーションソフトとして Rockwell Software 社開発の ARENA を用いて試行を行った。

2.2.5.2.2. シミュレーションの試行

(1) 計算条件

以下のような条件でシミュレーション計算を実施した。

○パラメータ

・陸上・港湾

CO₂回収量；3,000ton/日（一定）³

陸上貯蔵タンクの貯蔵上限値；9,000ton（3日分）

係船可能数；1

作業時間帯；6:00～18:00

入出港・係船に要する時間；2.5時間

荷役に要する時間；5.5時間（満載時。量に応じて短縮）

・海上輸送

輸送距離（片道）；600km（図 2-5 の地点 B 想定）

隻数；3

輸送船積載可能量；3,000ton（定常運転時）、3,300ton（増強運転時）

航海速度；30km/h

・貯留サイト（洋上）

圧入作業可能隻数；1

作業時間帯；6:00～18:00

圧入準備・離脱に要する時間；5時間

圧入流量；160ton/h（定常運転時）、176ton/h（増強運転時）

ピックアップ作業限界波高；3.0m

荒天退避波高；3.5m

○荒天休止を考慮しない定常運転時の運航計画

・1隻の船が作業・輸送を1巡させるのに必要な時間

港湾で8h、往路20h、貯留サイト24h、復路20h・・・計72h（3日間）

・船の隻数と積載可能量

1隻の船が1巡するのに3日かかり、その間の回収量は9,000ton

よって、隻数×積載量=9,000ton以上が必要

余裕を考慮しないならば3隻×3,000tonが選択肢の一つ

³ 汎用化の観点から商用規模(100万ton/年)を想定した試算から着手した。

(2) 波浪の時系列データ

荒天による海上作業休止をルールに考慮する。地点 B の 2007 年 6 月～2012 年 5 月の 5 年間の波浪時系列データを用いた。図 2-23 に 5 年間の波高の推移を示す。主に冬季に閾値（ピックアップ作業限界波高 3.0m を赤い破線で示す）を越えることが多い様子がわかる。また各年および 5 年間の平均波高、閾値未超過確率を表 2-6 に示す。年によって比較的穏やかな年と厳しい年があることがわかる。

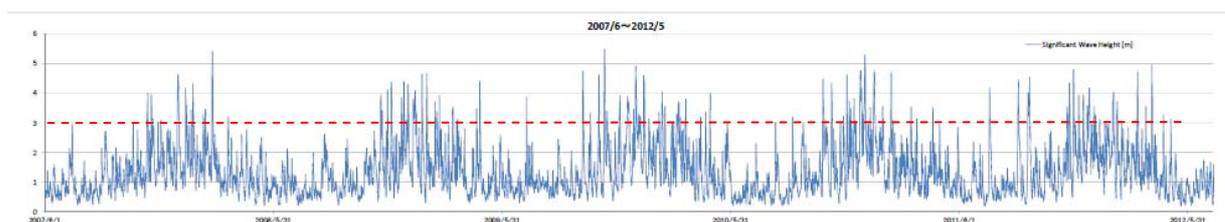


図 2-23 ERA-Interim による地点 B の波浪時系列

表 2-6 5 年間の波浪データの代表値（地点 B の例）

	5 年間	1 年目	2 年目	3 年目	4 年目	5 年目
平均波高 [m]	1.37	1.31	1.31	1.46	1.36	1.40
3.0m 未超過確率[%]	93.9	96.2	94.2	92.3	94.1	92.6
2.5m 未超過確率[%]	89.2	92.4	90.1	86.7	88.7	88.1

(3) 戦略

ここでは、次の 2 種類の戦略の効果をシミュレーションで評価できるかどうか調べた。

- ① 出港戦略：積載量が積載可能量の 2/3 を超えていたら 18:00 出港、超えていなかったら翌日出港
- ② 増強戦略：入港時に陸上タンクの貯蔵量が貯蔵上限値の 2/3 (6,000ton) を超えていたら増強運転へ移行。入港時に陸上タンクの貯蔵量が船の積載量 (3,000ton) を下回っていたら定常運転に戻る。

(4) 結果

図 2-24 に、荒天休止を考慮しない定常運転時の運航計画に対応するパラメータでシミュレーションした結果の一部（3 年目の冬場をはさむ 4 ヶ月）を示す。上下のグラフでところ

どころ単峰状に見える青線は、波高が閾値 3.0m を越えた状況を示すものであり、上図の右肩上がりの赤線は累積大気放出量、下図の上下変動する赤線は陸上貯蔵タンク内の CO₂ の量である。波高が閾値を越えると陸上貯蔵タンクの貯蔵上限値を越える CO₂ が大気へ放出される様子がシミュレーションで現れている。

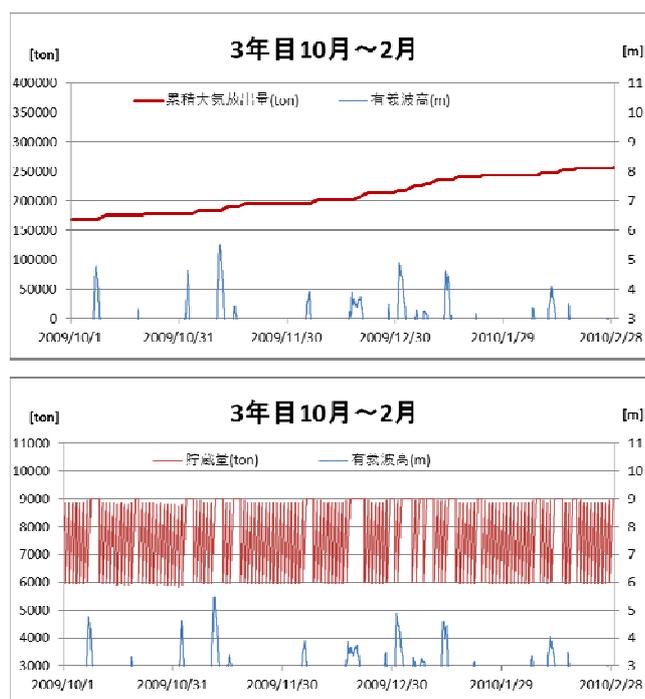


図 2-24 定常運転時の運航計画で戦略なしの場合のシミュレーション結果の例

一方、図 2-25 は、上述した出港戦略と増強戦略を採用した時の結果を、図 2-24 と同様の示し方で示したものである。図で示した期間中の大半が増強モードで推移していること（下図）、上図の左側の縦軸の数値を見てわかるように、大気放出量はかなり低減していることがわかる。

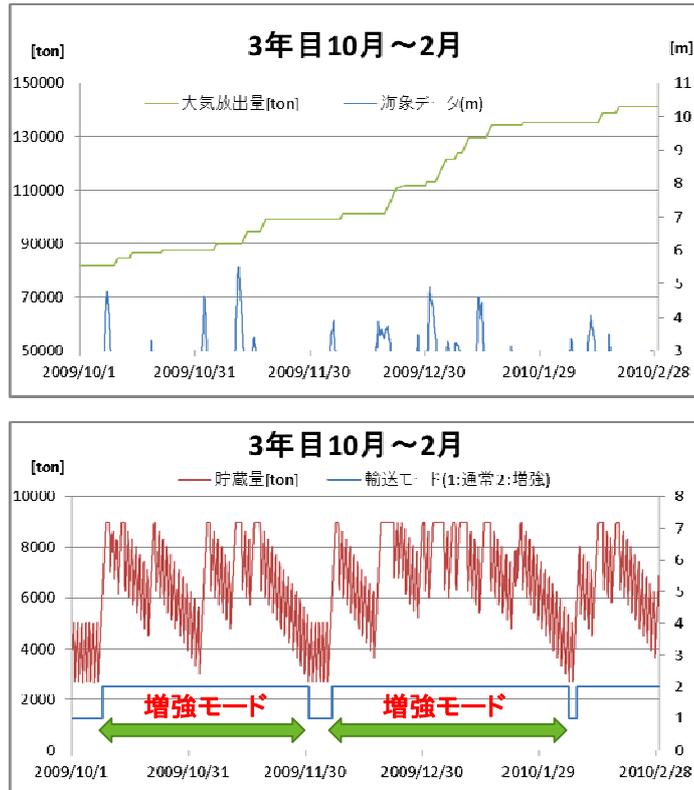


図 2-25 出港戦略と増強戦略を採用した場合のシミュレーション結果の例

図 2-26 は、5年間のシミュレーション期間中に大気へ放出された CO₂ の累積量の推移を、戦略の有無で比較したものである。全体の傾向として、夏場は放出がほとんどなく曲線は水平にフラットであり、冬場を中心に放出されている。出港戦略の効果はさほど大きくなく、増強戦略が有効であることが示されている。冬場の放出量は、各年で異なっている。各年（夏～夏）の放出量が回収量に対してしめる割合の推移を表 2-7 に示す。その大気放出量割合と作業限界波高超過確率（1 - 未超過確率）の関係をプロットしたのが図 2-27 である。数年間の物流シミュレーションで戦略の定量的な良否判断ができる可能性を示していると考えられる。

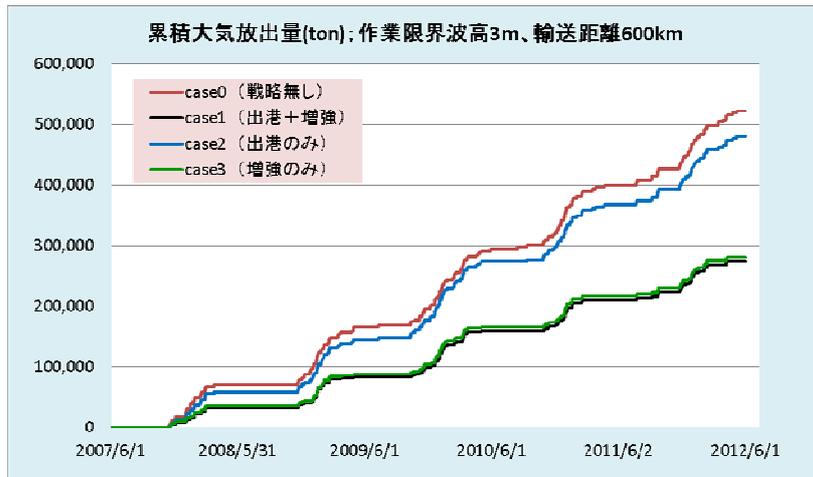


図 2-26 5年間のシミュレーション期間中に大気へ放出されたCO₂の累積量の推移

表 2-7 戦略別の年平均大気放出量割合の推移

	5年間	1年目	2年目	3年目	4年目	5年目
case0 戦略なし	9.5%	6.3%	8.8%	11.8%	9.6%	11.2%
case1 出港+増強	5.0%	3.0%	4.4%	7.0%	4.8%	5.7%
case2 出港のみ	8.8%	5.3%	7.8%	11.9%	8.6%	10.2%
case3 増強のみ	5.1%	3.2%	4.7%	7.1%	4.8%	5.7%

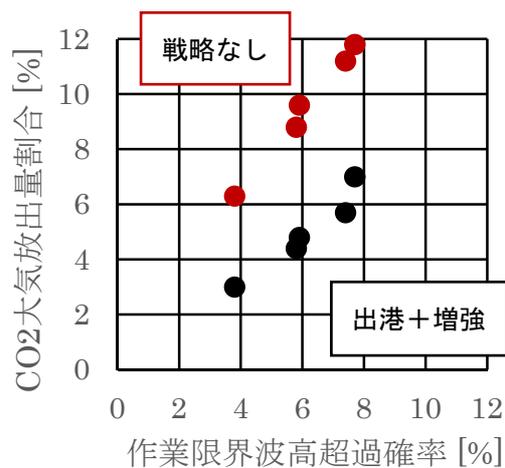


図 2-27 大気放出量割合と作業限界波高超過確率の関係