

目次

第1章	序論	9
1.1.	研究背景	9
1.2.	火力発電の役割	9
1.3.	CCS 概要	11
1.3.1.	二酸化炭素の分離・回収	12
1.3.2.	二酸化炭素の輸送	12
1.3.3.	圧入・貯留	14
1.4.	日本における CCS	15
1.4.1.	日本における輸送方式の検討	16
1.5.	本研究の必要性	17
1.6.	本研究の目的と内容	18
1.7.	本論文の構成	18
第2章	時系列物流シミュレーション	19
2.1.	初期計画	19
	シミュレーションモデル構築の前に初期計画法の検討を行う	19
2.1.1.	用いる記号	19
2.1.2.	輸送船	19
2.2.	物流シミュレーションモデルの構築	20
2.2.1.	コストの算出	21
2.2.2.	シミュレーションにおけるルール	22
2.2.3.	時系列物流シミュレーションモデルの構築	22
2.3.	シミュレーションモデルの妥当性評価	24
2.3.1.	ケーススタディ	24
2.3.2.	初期計画による検討とシミュレーション結果	25
2.3.3.	Total Cost 最小の組み合わせ	34
2.4.	港・圧入サイトの利用可能時間	35
2.5.	圧入流量の影響	42
2.5.1.	輸送距離 200 km	43
2.5.2.	輸送距離 1000 km	44
2.6.	まとめ	45
第3章	二酸化炭素回収量変動	46
3.1.	二酸化炭素回収量時間変動モデル	46
3.1.1.	シナリオの構築	46

3.1.2.	風力発電量の算出.....	48
3.1.3.	太陽光発電量の算出.....	51
3.1.4.	二酸化炭素回収量.....	53
3.2.	シミュレーションへの反映.....	55
3.3.	時系列物流シミュレーションによる回収量変動の影響分析.....	56
3.3.1.	二酸化炭素回収量変動による輸送システムへの影響.....	56
3.3.2.	回収量変動への対応.....	68
3.3.3.	まとめ.....	77
第4章	荒天による稼働休止.....	78
4.1.	海象モデルについて.....	78
4.2.	海象特性の概略分析.....	79
4.2.1.	各サイトの特性.....	79
4.2.2.	連続稼働休止日数の考察.....	79
4.3.	稼働休止の影響に関する基礎的検討.....	81
4.3.1.	連続稼働休止日数の影響.....	82
4.3.2.	断続的な稼働休止の影響.....	86
4.3.3.	稼働休止への対応.....	87
4.4.	海象データを用いたシミュレーション.....	92
4.5.	まとめ.....	96
第5章	オペレーションの提案と検証.....	97
5.1.	オペレーションの必要性.....	97
5.2.	オペレーション手法.....	97
5.2.1.	オペレーションの方法.....	97
5.2.2.	フェーズの移行.....	97
5.2.3.	速度変化オペレーションの基礎能力の検討.....	98
5.2.4.	二酸化炭素回収量変動への効果.....	100
5.2.5.	まとめ.....	103
第6章	結言.....	104
6.1.	本研究の結果.....	104
6.2.	今後の展望.....	106
	謝辞.....	107
	参考文献.....	108

目次

Fig. 1-1 電力需給曲線	10
Fig. 1-2 季節による需要変動	10
Fig. 1-3 太陽光発電と風力発電の出力変動	11
Fig. 1-4 Example of the global potential contribution of CCS.....	11
Fig. 1-5 2つの輸送方式のフロー	12
Fig. 1-6 輸送方式別の輸送コスト	13
Fig. 1-7 Transportation cost of CCS at Japan evaluated by RITE.....	13
Fig. 1-8 貯留方法のイメージ	14
Fig. 1-9 背斜構造	15
Fig. 1-10 層位トラップ	15
Fig. 1-11 貯留可能な帯水層分布と調査状況.....	16
Fig. 2-1 時系列シミュレーションモデル全体イメージ	23
Fig. 2-2 二酸化炭素回収・貯蔵パート	23
Fig. 2-3 船作成パート	23
Fig. 2-4 港パート	24
Fig. 2-5 圧入パート	24
Fig. 2-6 必要タンク容量算出パート	24
Fig. 2-7 積載可能量を変化させたときのコスト変化 ($m=1$).....	25
Fig. 2-8 積載可能量を変化させたときのタンク内二酸化炭素量 ($m=1$).....	27
Fig. 2-9 <i>FCS</i> による必要タンク容量の変化	28
Fig. 2-10 <i>FCS</i> を変えた時の二酸化炭素量の推移へ影響.....	29
Fig. 2-11 $W=11000$ ton でのタンク内二酸化炭素量の推移	30
Fig. 2-12 $m=2$ の時の輸送船のサイクル	31
Fig. 2-13 積載可能量を変化させたときのコスト変化 ($m=2$).....	32
Fig. 2-14 積載可能量を変化させたときのタンク内二酸化炭素量 ($m=2$).....	32
Fig. 2-15 スタート時のタンク内二酸化炭素量の推移 ($m=2, W=22,000$ ton).....	33
Fig. 2-16 (<i>FCS, TBA</i>)を調整したスタート時のタンク内二酸化炭素量の推移.....	34
Fig. 2-17 (<i>FCS, TBA</i>)の調整によるコスト変化	34
Fig. 2-18 OptQuest for Arena による探索過程	35
Fig. 2-19 港・圧入サイトの利用可能時間によるコスト変化($L=200$ km)	36
Fig. 2-20 港・圧入サイトの利用可能時間別のタンク内二酸化炭素量の推移($L=200$ km).....	37
Fig. 2-21 組み合わせを調整したコスト変化($L=200$ km).....	38
Fig. 2-22 組み合わせを調整したタンク内二酸化炭素量の推移($L=200$ km)	38

Fig. 2-23 港・圧入サイトの利用可能時間によるコスト変化($L=1,000$ km).....	39
Fig. 2-24 港・圧入サイトの利用可能時間別のタンク内二酸化炭素量の推移($L=1,000$ km).....	40
Fig. 2-25 組み合わせを調整したコスト変化($L=1,000$ km).....	41
Fig. 2-26 組み合わせを調整したタンク内二酸化炭素量の推移($L=1,000$ km)	41
Fig. 2-27 圧入流量が Total Cost へ与える変化($L=200$ km)	43
Fig. 2-28 圧入流量が Total Cost へ与える変化($L=1,000$ km)	44
Fig. 3-1 二酸化炭素回収量推定の概念図.....	46
Fig. 3-2 東京電力, 電力使用実績 (2012年6月9日~2012年6月11日).....	48
Fig. 3-3 風車出力曲線	48
Fig. 3-4 MWT92/2.4 の出力曲線	49
Fig. 3-5 5MW 風車の出力曲線	49
Fig. 3-6 銚子の風速データ(2012年6月9日~2012年6月11日).....	50
Fig. 3-7 風車一基による出力(2012年6月9日~2012年6月11日).....	50
Fig. 3-8 風力発電量の推移(2012年6月9日~2012年6月11日).....	51
Fig. 3-9 銚子の日射量データ(2012年6月9日~2012年6月11日).....	52
Fig. 3-10 太陽光発電量の推移(2012年6月9日~2012年6月11日).....	52
Fig. 3-11 2012年ゼロシナリオにおける電力需給図(2012年6月9日~2012年6月11日).....	53
Fig. 3-12 必要火力発電量(2012年6月9日~2012年6月11日).....	53
Fig. 3-13 常陸那珂火力発電所における火力発電量(2012年6月9日~2012年6月11日).....	54
Fig. 3-14 二酸化炭素回収量(2012年6月9日~2012年6月11日).....	55
Fig. 3-15 月別の平均二酸化炭素回収量.....	56
Fig. 3-16 二酸化炭素回収量変動による Total Cost の変化($L=200$ km, $F=588$ ton/h) 57	
Fig. 3-17 回収量別のタンク内二酸化炭素量の推移($L=200$ km, $F=588$ ton/h)	58
Fig. 3-18 月別の平均二酸化炭素回収量と年平均回収量の差.....	59
Fig. 3-19 二酸化炭素回収量変動による Total Cost の変化($L=1,000$ km, $F=588$ ton/h)	60
Fig. 3-20 回収量別のタンク内二酸化炭素量の推移($L=1,000$ km, $F=588$ ton/h)	61
Fig. 3-21 二酸化炭素回収量変動による Total Cost の変化($L=200$ km, $F=720$ ton/h). 62	
Fig. 3-22 回収量別のタンク内二酸化炭素量の推移($L=200$ km, $F=720$ ton/h)	64
Fig. 3-23 二酸化炭素回収量変動による Total Cost の変化($L=1,000$ km, $F=720$ ton/h)	65
Fig. 3-24 回収量別のタンク内二酸化炭素量の推移($L=1,000$ km, $F=720$ ton/h)	67
Fig. 3-25 最大システムを用いた時の Total Cost の変化($L=200$ km).....	69

Fig. 3-26 最大システムを用いた時のタンク内二酸化炭素量の推移($L=200$ km)	69
Fig. 3-27 最大システムを用いた時の Total Cost の変化($L=1,000$ km).....	70
Fig. 3-28 最大システムを用いた時のタンク内二酸化炭素量の推移($L=1,000$ km)	70
Fig. 3-29 システム調整による Total Cost の変化($L=200$ km, $F=588$ ton/h)	72
Fig. 3-30 システム別タンク内二酸化炭素量推移($L=200$ km, $F=588$ ton/h).....	72
Fig. 3-31 システム調整による Total Cost の変化($L=1,000$ km, $F=588$ ton/h)	73
Fig. 3-32 システム別タンク内二酸化炭素量推移($L=1,000$ km, $F=588$ ton/h).....	73
Fig. 3-33 システム調整による Total Cost の変化($L=1,000$ km, $F=720$ ton/h)	74
Fig. 3-34 システム別タンク内二酸化炭素量推移($L=1,000$ km, $F=720$ ton/h).....	74
Fig. 3-35 システム調整による Total Cost の変化($L=1,000$ km, $F=720$ ton/h)	75
Fig. 3-36 システム別タンク内二酸化炭素量推移($L=1,000$ km, $F=720$ ton/h).....	75
Fig. 3-37 最大システムと調整システムのコスト比較($L=200$ km)	76
Fig. 3-38 最大システムと調整システムのコスト比較($L=1,000$ km).....	76
Fig. 4-1 サイトの位置	78
Fig. 4-2 サイト A における連続稼働休止の 1 年の発生回数の期待値	80
Fig. 4-3 サイト B における連続稼働休止の 1 年の発生回数の期待値	80
Fig. 4-4 サイト C における連続稼働休止の 1 年の発生回数の期待値	81
Fig. 4-5 稼働休止時のタンク内二酸化炭素量の推移 ($L=200$ km).....	82
Fig. 4-6 稼働休止による Total Cost の変化($L=200$ km).....	83
Fig. 4-7 稼働休止時のタンク内二酸化炭素量の推移 ($L=1,000$ km)	84
Fig. 4-8 稼働休止による Total Cost の変化($L=1,000$ km)	85
Fig. 4-9 断続的な稼働休止時のタンク内二酸化炭素量の推移 ($L=200$ km).....	86
Fig. 4-10 断続的な稼働休止時のタンク内二酸化炭素量の推移 ($L=1,000$ km).....	87
Fig. 4-11 システム調整による Total Cost の変化($L=200$ km, 連続稼働休止日数 3 日)	88
Fig. 4-12 システム別タンク内二酸化炭素量推移($L=200$ km, 連続稼働休止日数 3 日)	88
Fig. 4-13 システム調整による Total Cost の変化($L=200$ km, 連続稼働休止日数 4 日)	89
Fig. 4-14 システム別タンク内二酸化炭素量推移($L=200$ km, 連続稼働休止日数 4 日)	89
Fig. 4-15 システム調整による Total Cost の変化($L=1,000$ km, 連続稼働休止日数 3 日)	90
Fig. 4-16 システム別タンク内二酸化炭素量推移($L=1,000$ km, 連続稼働休止日数 3 日)	90
Fig. 4-17 システム調整による Total Cost の変化($L=1,000$ km, 連続稼働休止日数 4 日)	

.....	91
Fig. 4-18 システム別タンク内二酸化炭素量推移($L=1,000$ km, 連続稼働休止日数 4 日)	91
.....	91
Fig. 4-19 システム別タンク内二酸化炭素量推移(サイト A)	93
Fig. 4-20 システム調整による Total Cost の変化(サイト A)	93
Fig. 4-21 システム別タンク内二酸化炭素量推移(サイト B)	94
Fig. 4-22 システム調整による Total Cost の変化(サイト B)	94
Fig. 4-23 システム別タンク内二酸化炭素量推移(サイト C)	95
Fig. 4-24 システム調整による Total Cost の変化(サイト C)	95
Fig. 5-1 速度変化オペレーションにおける二酸化炭素量の推移($L=200$ km)	99
Fig. 5-2 速度変化オペレーションにおける二酸化炭素量の推移($L=1,000$ km)	100
Fig. 5-3 速度変化オペレーションによる Total Cost の変化($L=1,000$ km, 初期システム)	101
Fig. 5-4 速度変化オペレーションによる二酸化炭素量の推移($L=1,000$ km, 初期システム)	101
Fig. 5-5 速度変化オペレーションによる Total Cost の変化($L=1,000$ km, 調整システム)	102
.....	102
Fig. 5-6 速度変化オペレーションによる二酸化炭素量の推移($L=1,000$ km, 調整システム)	102

表目次

Table 1-1 震災前の電源構成とエネルギー基本計画 ¹⁾	9
Table 1-2 震災後の 3 つのシナリオ	9
Table 1-3 船舶輸送方式とパイプライン輸送方式の比較	16
Table 2-1 LCO ₂ 船輸送船	21
Table 2-2 本研究で使用した重油価格と為替レート	22
Table 2-3 積載可能量を変化させたときのコスト	25
Table 2-4 FCSによる NOI, NOP の変化	28
Table 2-5 $W=11000$ ton でのコスト算出結果	30
Table 2-6 $W=11000$ ton の時の港待ち時間と圧入待ち時間	30
Table 2-7 Total Cost 最小の組み合わせ($L=200$ km)	37
Table 2-8 Total Cost 最小の組み合わせ($L=1,000$ km)	40
Table 2-9 輸送距離別の港・圧入サイト利用可能時間の影響	42
Table 2-10 圧入量別の Total Cost 最小の組み合わせ($L=200$ km)	43
Table 2-11 Total Cost 最小の組み合わせ($L=1,000$ km)	44
Table 3-1 2030 年における 3 つのシナリオ	46
Table 3-2 再生可能エネルギー導入内訳	46
Table 3-3 本研究で用いた電源構成シナリオ	47
Table 3-4 本研究でのエリア設定	47
Table 3-5 常陸那珂火力発電所概要	47
Table 3-6 MWT92/2.4 の仕様	49
Table 3-7 5MW 風車の仕様	49
Table 3-8 それぞれの風車の総発電量と定格出力での発電量	51
Table 3-9 燃料別二酸化炭素排出量	54
Table 3-10 回収量変動による Total Cost の輸送距離別変動割合(圧入流量 588 ton/h)	60
Table 3-11 回収量変動による Total Cost の輸送距離別変動割合(輸送距離 200 km)63	
Table 3-12 回収量変動による Total Cost の輸送距離別変動割合(圧入流量 720 ton/h)	66
Table 3-13 回収量変動による Total Cost の輸送距離別変動割合(輸送距離 1,000 km)	66
Table 3-14 システムパラメータ($L=200$ km, $F=588$ ton/h)	72
Table 3-15 システムパラメータ($L=200$ km, $F=588$ ton/h)	73
Table 3-16 システムパラメータ($L=200$ km, $F=720$ ton/h)	74

Table 3-17 システムパラメータ($L=1,000$ km, $F=720$ ton/h)	75
Table 4-1 サイト設定	78
Table 4-2 各サイトの特性	79
Table 4-3 稼働休止による必要タンク容量と NOI,NOP の変化($L=200$ km)	83
Table 4-4 稼働休止による必要タンク容量と NOI,NOP の変化($L=1,000$ km)	85
Table 4-5 システムパラメータ($L=200$ km, 連続稼働休止日数 3 日)	88
Table 4-6 システムパラメータ($L=200$ km, 連続稼働休止日数 4 日)	89
Table 4-7 システムパラメータ($L=1,000$ km, 連続稼働休止日数 3 日)	90
Table 4-8 システムパラメータ($L=1,000$ km, 連続稼働休止日数 4 日)	91
Table 4-9 システムパラメータ(サイト A)	93
Table 4-10 システムパラメータ(サイト B)	94
Table 4-11 システムパラメータ(サイト C)	95
Table 5-1 用いた初期システム($L=200$ km)	98
Table 5-2 用いた初期システム($L=1,000$ km)	99
Table 5-3 月別時系列二酸化炭素回収量に対するシステムパラメータ($L=1,000$ km)	101

第1章 序論

1.1. 研究背景

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) の第4次評価報告書(2007年)において、気候システムの温暖化には疑う余地がないと断定された。温暖化の原因とされている温室効果ガスの中でも二酸化炭素の増加が最も影響が大きく^[1]、地球温暖化対策として二酸化炭素の排出量の削減が急務である。

2009年G8ラクイア・サミットにて2050年までに世界全体の温室効果ガス排出量を50%削減、また先進国全体として80%削減するという目標が支持された。^[2]これを受けて日本でも2050年までに温室効果ガスの80%削減を目指す。この目標を達成するためには少なくとも発電における二酸化炭素排出量はゼロを目指さなければならない。

原子力を基幹電源とするエネルギー選択で二酸化炭素排出量の削減を実現するエネルギー基本計画 (Table 1-1) が2010年6月に策定された^[3]が、2011年3月の東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所事故によって大きな見直しが必要となり、原子力発電依存度を可能な限り減らす方向に動き始めている (Table 1-2)。中期的には2030年の再生可能エネルギーの導入目標が30~35%と設定されているが、原子力と再生可能エネルギーだけでは電力需要の半分以下しか満たすことは出来ず、不足分を補うため火力発電が必要となるためCCS (Carbon Dioxide Capture and Storage) が不可欠であると考えられる。

Table 1-1 震災前の電源構成とエネルギー基本計画^[3]

	2010年	2030年
原子力	26%	45%
再生可能	10%	20%
化石燃料	63%	35%

Table 1-2 震災後の3つのシナリオ^[4]

	2010年	2030年		
原子力	26%	0%	15%	20~25%
再生可能	10%	35%	30%	30~35%
化石燃料	63%	65%	55%	50%

1.2. 火力発電の役割

従来の一日の電力需給曲線のイメージと季節による電力需要の変動イメージを Fig. 1-1, Fig. 1-2 に示す。

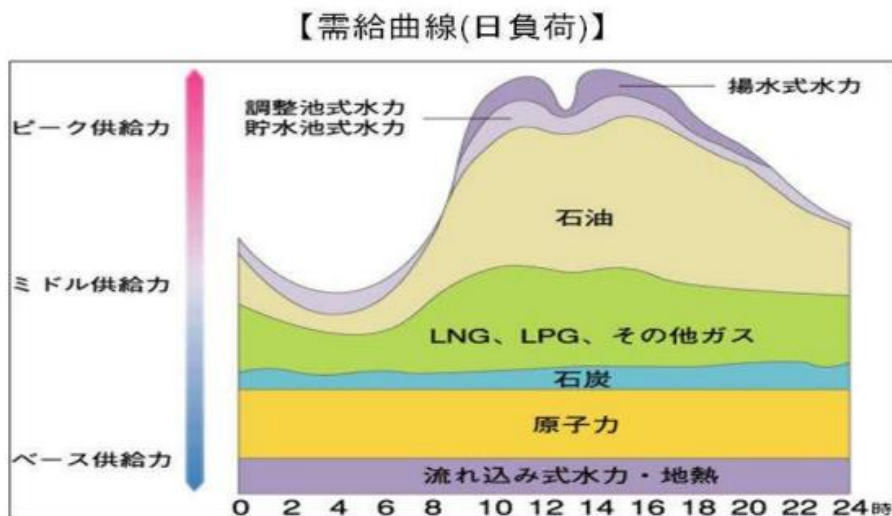


Fig. 1-1 電力需給曲線^[5]

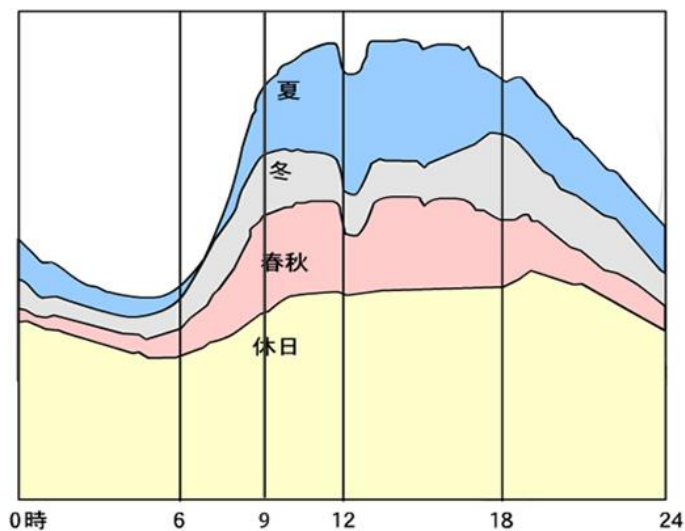


Fig. 1-2 季節による需要変動

2014年1月現在、原子力発電所は震災を受け、稼働停止、もしくは点検停止中となっており原子力発電による発電量はゼロとなっている。しかし震災前は一年を通して一定量の発電を行っており、今後再開された場合でも一定の出力で稼働することが予測される。

また石炭火力発電所は季節により発電量を変えるものの、短期間においては一定の出力で稼働し、原子力発電に続くベース電源となっている。これは燃料費が比較的安いことに起因している。その上で石油・ガス火力発電所は日々の需要を満たすように出力を変動させ稼働している。

一方、最近注目されている再生可能エネルギーは需要に関係なく発電が行われている。流れ込み式水力や地熱発電はその発電方法からほとんど一定量の発電を続け、風力発電は

風が吹いたときに、太陽光発電は日が出ているときに発電を行う。Fig. 1-3 に太陽光発電、風力発電の出力変動のイメージを示す。蓄電池の普及やスマートグリッドの導入により、日変動のレベルでは平均化することができたとしても、天候の変化に対応する長周期の変動は吸収することは難しく、季節による需要変動への対応は極めて困難である。

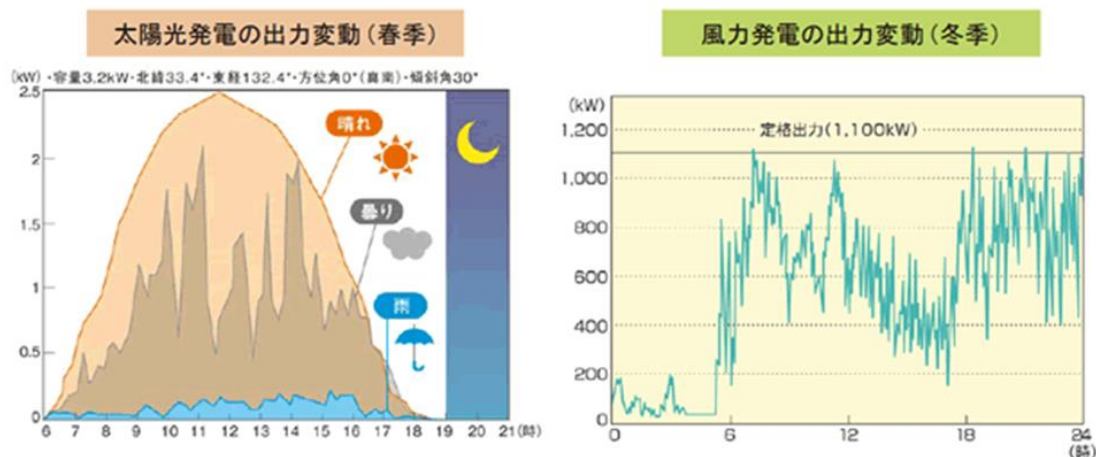


Fig. 1-3 太陽光発電と風力発電の出力変動^[6]

二酸化炭素排出量の削減を目指すには、需要に関係なく一定の稼働を続ける原子力発電と、需要に関係なく変動し続ける再生可能エネルギーと、需要とのギャップを埋める火力発電と CCS の共存が必要となる。特に、再生可能エネルギーの割合が増えてくるにつれ火力発電には、電力需要による変動と再生可能エネルギーによる変動をまとめて吸収するような柔軟性のある運用が求められる。すなわち普及が進んだ時の CCS における二酸化炭素回収量は大きく変動するということになる。

1.3. CCS 概要

CCS は、二酸化炭素の大規模発生源である発電所や製鉄所等の排ガスから二酸化炭素を分離・回収し地中や海中にため込む技術であり、2050 年において世界の二酸化炭素排出量削減の 20%ほどを占めると期待されている (Fig. 1-4)。

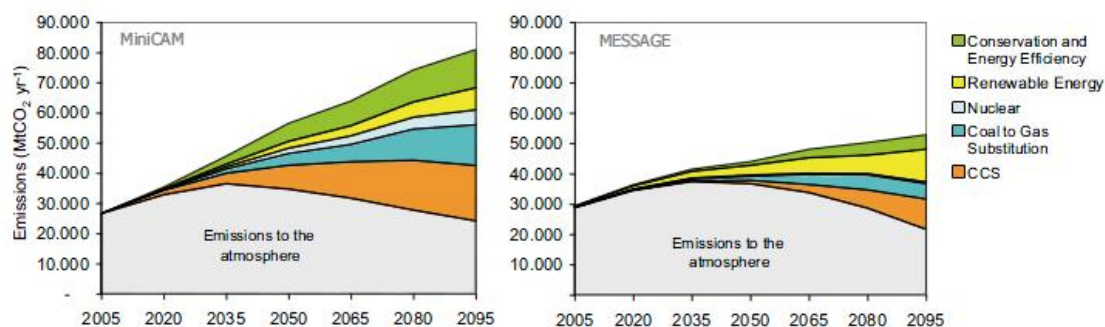


Fig. 1-4 Example of the global potential contribution of CCS^[7]

CCS のプロセスは大きく分けて、二酸化炭素の分離・回収、輸送、圧入・貯留の 3 つに分けることができる。

1.3.1. 二酸化炭素の分離・回収

二酸化炭素を分離・回収する技術として、化学吸収法、物理吸収法、物理吸着法、膜分離法、深冷分離法、酸素燃焼法などがある。それぞれに特徴があり、発電所のような回収するガスが低圧で二酸化炭素濃度が低い場合には化学吸収法、化学プラントのような二酸化炭素濃度が高い排ガスを扱う場合は物理吸着法、IGCC（石炭火力複合発電所）などの高圧の排ガスの場合は物理吸着法を用いるなど使い分けが考えられている。

分離・回収のプロセスは CCS の全工程の中で最もコストがかかり、新設の石炭火力発電所で化学吸着法を用いた場合 4200 円/CO₂-ton、既存の火力発電所に回収プラントを追設した場合 7800 円/CO₂-ton⁸⁾かかることとされている。

1.3.2. 二酸化炭素の輸送

二酸化炭素の輸送方式には、パイプライン輸送方式と船舶輸送方式の 2 つが考えられている。これらの輸送方式のフローを Fig. 1-5 に示す。

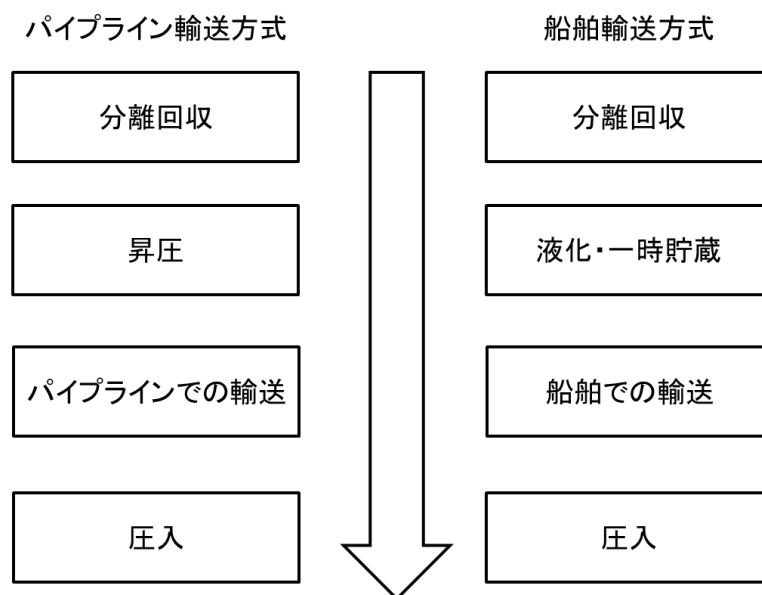


Fig. 1-5 2つの輸送方式のフロー

パイプライン輸送方式と船舶輸送方式の大きな違いとして、輸送時の二酸化炭素の状態がある。貯留サイトが海底の場合、パイプライン輸送方式では分離・回収の後、コンプレッサーによって常温高圧の状態ですべて貯留サイトまで輸送される。一方船舶輸送方式では一度に多くの二酸化炭素を輸送するために密度を高め、液体で輸送する。このため距離に依存しない液化コスト・貯蔵タンクコストが余計にかかることとなり遠距離の貯留サイトを対象

にしない限り、パイプライン輸送方式が優位であると考えられてきた。世界中で進行中の CCS 実証実験においてもパイプライン輸送方式が用いられている。IPCC の報告書によると、回収プラントから貯留サイトまでが 1000 km より遠い場合船舶輸送方式の方がコストは小さくなるといわれている (Fig. 1-6)。

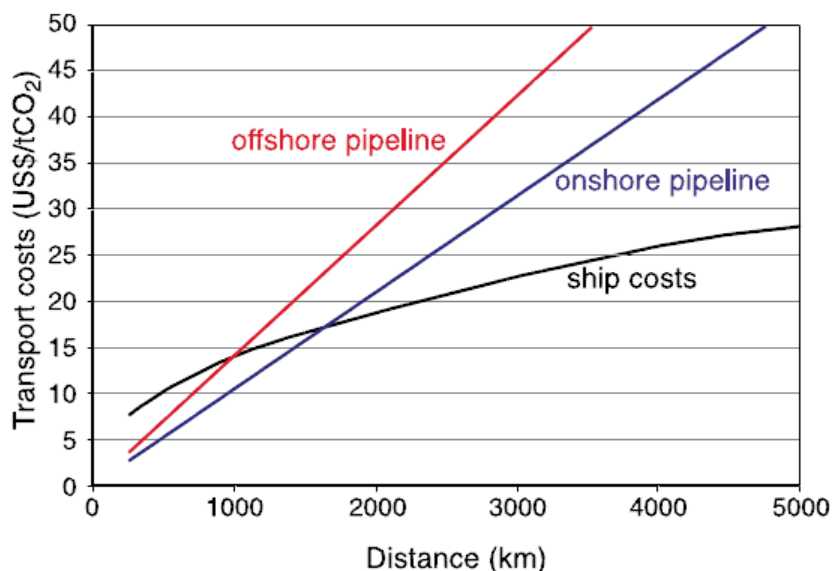


Fig. 1-6 輸送方式別の輸送コスト⁷

しかし、この結果は欧米のようなこれまでにパイプライン敷設の実績がある場合のものであり、そのまま日本に適用することは出来ない。日本における輸送コストの試算を RITE (公益財団法人地球環境産業技術研究機構)が行った。結果を Fig. 1-7 に示す。

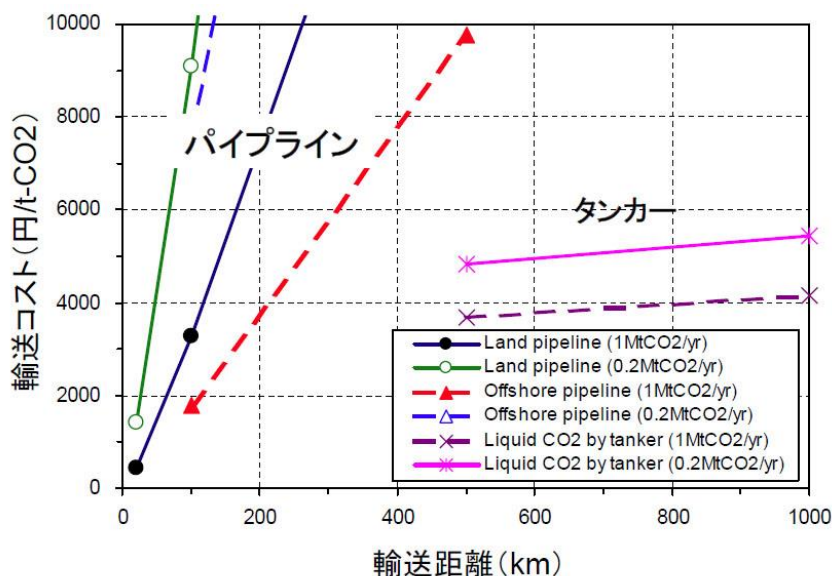


Fig. 1-7 Transportation cost of CCS at Japan evaluated by RITE

RITE の算出基礎は不明であり、単純比較はできないが、IPCC の結果 (Fig. 1-6) に比べて、船舶輸送で 3 倍程度、海底パイプラインで 12 倍程度、陸上パイプラインで 30 倍以上となっている。今後の精査が必要であるものの、RITE 試算で、1 MtCO₂/yr 規模のプロジェクトではパイプライン輸送方式と船舶輸送方式のコストは約 100~200 km で交わることがわかる。

1.3.3. 圧入・貯留

二酸化炭素の貯留方法として大きく地中貯留（陸上・海底下）と海洋隔離がある。貯留方法のイメージ図を Fig. 1-8 に示す。

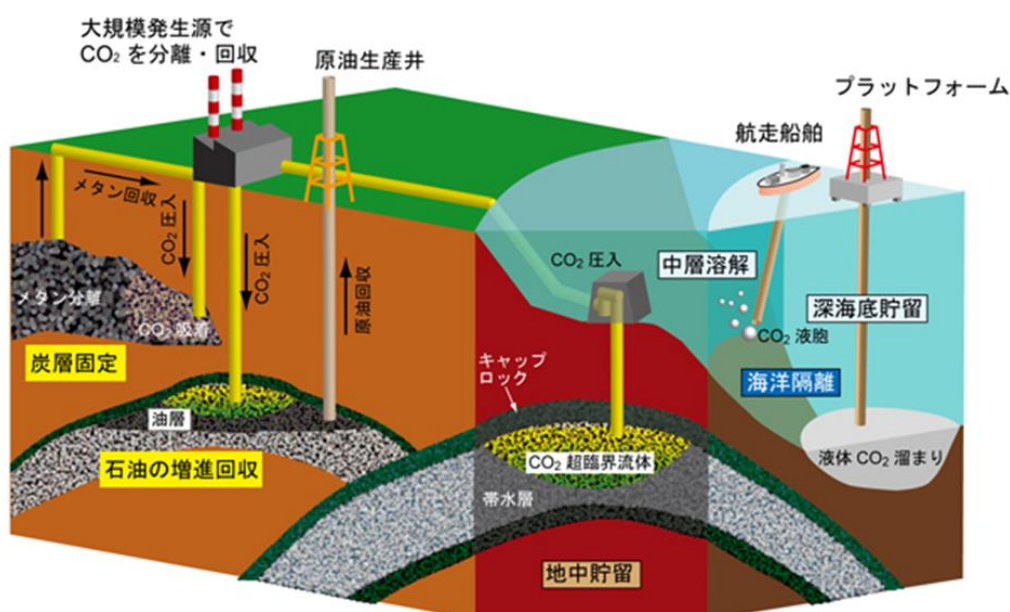


Fig. 1-8 貯留方法のイメージ^[9]

地中貯留の対象となる地層として選ばれるには次の 3 つの条件が必要となる。

- ① ある程度の貯留可能性と CO₂ 圧入性を有すること
- ② 密閉構造を形成できるキャップロックが存在すること
- ③ 地層が安定していること

地中貯留はさらに圧入する地層によって帯水層貯留や炭層固定、枯渇油・ガス層貯留などに分けることができる。しかしながら、人口密度が大きい地域では社会的受容性は低く、日本においては陸上での地中貯留は難しい。海底下地中貯留については、陸上から離れた場所に圧入サイトを設定するため、陸上に比べ貯留施設の建設コストや、輸送コストなどが大きくなるが、二酸化炭素漏洩などの不慮の事態の際のリスクが低いことなどから日本や西欧では積極的に検討されている。

海洋隔離は溶解希釈方式と深海底貯留方式に分類できる。溶解希釈方式は分離・回収した

二酸化炭素を、パイプラインを通して、または液化ガスタンカーなどで輸送しながら海中へ希釈・溶解させる方法である。また、深海底貯留は、水深 3000 m 以深の深海の低温・高圧環境下に二酸化炭素を送り込み、表面をハイドレート化させることによって周囲への拡散を防ぎながら貯留する方法である。

また油田やガス田に二酸化炭素を圧入することで地下に残存する資源の回収率を高める EOR (Enhanced Oil Recovery) プロジェクトも多く進んでいる。

1.4. 日本における CCS

日本近海において地下深部塩水層への二酸化炭素貯留はカテゴリーA (背斜構造 Fig. 1-9) への貯留とカテゴリーB (層位トラップなどを有する地質構造 Fig. 1-10) への貯留に分類される。RITE は、カテゴリーA では 301 億 ton-CO₂, カテゴリーB では 1,160 ton-CO₂ の貯留ポテンシャルがあると発表している。

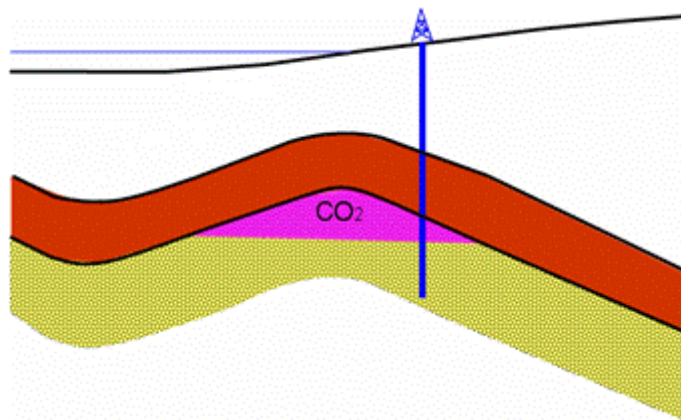


Fig. 1-9 背斜構造^[10]

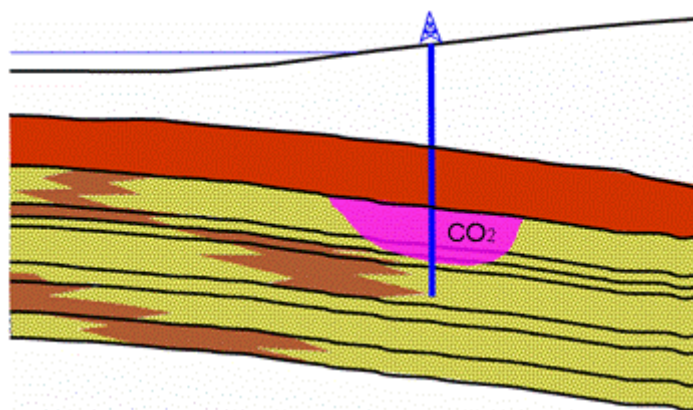


Fig. 1-10 層位トラップ¹⁰

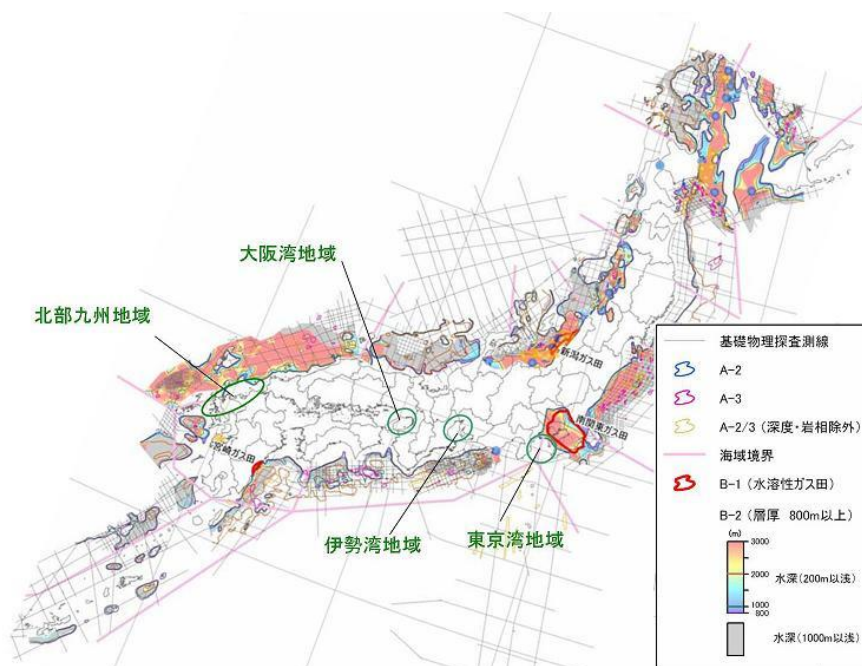


Fig. 1-11 貯留可能な帯水層分布と調査状況^[11]

日本で行われてきた実証実験として 2003 年から 2005 年まで新潟県長岡市で RITE を中心に実施された CO₂ 圧入実証試験がある。この試験では地下 1,100 km の帯水層に計 10,405 ton の二酸化炭素を圧入した。試験途中、新潟中越地震を経験したが、二酸化炭素が漏洩することなく貯留されていることが確認されている。また、2012 年から苫小牧における実証実験も開始している。

しかしながら欧米諸国に比べると CCS に関して日本は後進的だといえる。その理由としては下のことが挙げられる。

- ① 国土が狭い
- ② 石油開発産業に関する業務の経験が乏しい
- ③ 社会的受容性が得られにくい
- ④ 地震・津波が多い
- ⑤ ひとつひとつの貯留サイトの規模が小さい

1.4.1. 日本における輸送方式の検討

このような問題の中で輸送方式について考えてみる。日本で実施する場合のパイプライン輸送方式と船舶輸送方式の比較 Table 1-3 に示す。

Table 1-3 船舶輸送方式とパイプライン輸送方式の比較

	技術	社会的受容性	貯留サイト	柔軟性	輸送コスト	荒天時	パラメータ
船舶	○	○	○	○	100~200 km以上	△	多
パイプライン	△	△	△	×	100~200 km以内	○	少

パイプライン輸送方式は輸送効率がよく回収サイトと貯留サイトとの距離が 100～200 km 以内であればコストも小さい。

問題点としてはまず、社会的受容性の問題がある。パイプライン輸送方式の場合、沿岸部から貯留サイトまで海底パイプラインを通すこととなる。ここで漁業組合等との調整問題が発生する。以前サハリンから日本へ海底パイプラインを通して天然ガスを供給するというサハリンプロジェクトが中止になってしまったことは漁業補償問題も少なからず関係している。次にオペレーションに柔軟性がないことが挙げられる。パイプライン輸送方式の場合、パイプラインを敷設後には流量の大幅な調整や、貯留サイトの変更等ができない。パイプライン敷設の際には輸送する物質の物性値、流量、圧力、温度、周囲環境などを総合して輸送効率が良い設計をする。このことは変化に弱いということを意味する。日本のように地震や津波が多く、貯留サイトの規模が小さい国にとっては大きなデメリットであるといえる。また、石油開発産業が発達していないため、地層評価やパイプライン輸送方式での CCS に必ず必要なパイプライン敷設などの業務経験が少ない。さらに地震や津波が多く緻密な地質のため、貯留サイト選定のために綿密な調査が必要となり、プロジェクトの実施の遅れや調査コストの増大などを招いてしまう。

一方船舶輸送方式では 100～200 km 以内の距離ではパイプライン方式よりもコストがかかってしまうが、距離制限を撤廃することができ長距離輸送が可能になるため貯留サイトを日本の沿岸域に限定する必要がなく、さらに沿岸付近における漁業補償問題を切り離すことができ、また LNG 船や LPG 船などの建造実績があるため既存の技術を利用して CO₂ 船を建造することができる。

以上より、日本のような特殊な環境のなかで CCS の普及を目指すならば、船舶輸送方式による CCS が有望であるといえる。しかしながら船舶輸送方式においては陸上タンクの必要容量などの設計パラメータが多く存在し、さらに荒天時の稼働休止に伴う輸送量の変動への適応も考慮した輸送システムを構築する必要がある。

1.5. 本研究の必要性

地球温暖化対策として先進国である日本は、二酸化炭素削減量 80%を目標として掲げており、実現のためには発電における二酸化炭素量はゼロを目指さなければならない。しかし、需要に関係なく一定で稼働する原子力発電と需要に関係なく変動する再生可能エネルギーだけでは電力需要を満たすことは難しく火力発電と CCS の組み合わせが必要不可欠となる。この時二酸化炭素回収量は大きく変動すると考えられる。一方で日本における CCS 普及を目指すならば船舶輸送方式による CCS が有望であると考えられるが荒天時の稼働休止に伴う輸送量の変動を考慮しなくてはならない。

二酸化炭素回収量の変動や荒天時の稼働休止に伴う輸送量の変動を考慮した輸送システムの構築が必要となる。

1.6. 本研究の目的と内容

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。

1.7. 本論文の構成

第 2 章では二酸化炭素量の変動を考慮するための、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およびその妥当性の検証、また構築したモデルを用いての船舶輸送におけるいくつかの項目についての検討を示す。

第 3 章では二酸化炭素回収量の時間変動モデルを作成し、それを用いた時系列物流シミュレーションを行い、二酸化炭素回収量変動による輸送システムへの影響分析を示す。

第 4 章では圧入サイト稼働休止による輸送システムへの影響分析の後、実際の海象データを用いて荒天時の稼働休止による輸送量変動を考慮したシミュレーションの結果と分析を示す。

第 5 章では二酸化炭素量の変動に対応するオペレーション提案とシミュレーションによる効果検証について示す。

第 6 章では結論と今後の研究展開について述べる。

第2章 時系列物流シミュレーション

本研究で考慮する船舶輸送方式 CCS では港と貯留サイトが一对一の関係である 1 source to 1 sink モデルとする。

2.1. 初期計画

シミュレーションモデル構築の前に初期計画法の検討を行う。

2.1.1. 用いる記号

船舶輸送方式を考える際与えられる条件として次のものがある。

- 輸送距離 $L(\text{km})$
- 二酸化炭素回収量 $q(\text{ton/h})$
- 圧入流量 $I(\text{ton/h})$
- 平均稼働率 α

また一定の制限の範囲内で決定する条件として次のものがある。

- 船速 $V(\text{km/h})$
- 満載量に必要なローディング時間 $T(\text{h})$
- 港でのローディング準備時間と出発準備時間 $T_p(\text{h})$
- 圧入サイトでの圧入準備時間と出発準備時間 $T_q(\text{h})$

さらに自ら設定出来るパラメータとして

- 輸送船の積載可能量 $W(\text{ton})$
- 輸送船の隻数 m

2.1.2. 輸送船

常に満載での定常運行時における輸送工程 1 サイクルに要する時間 $h_t(\text{h})$ は、港での荷役時間 $h_l(\text{h})$ 、往路にかかる時間 $h_g(\text{h})$ 、洋上作業時間 $h_i(\text{h})$ 、復路にかかる時間 $h_r(\text{h})$ 、および待機時間の総計なので

$$h_t \geq h_l + h_g + h_i + h_r \quad (1)$$

$$h_g + h_r = \frac{2L}{V} \quad (2)$$

$$h_l = T_p + T_l \quad (3)$$

$$h_i = T_q + \frac{W}{I} \quad (4)$$

と表される。

式(1)～式(4)より

$$h_t \geq T_p + T_l + T_q + \frac{W}{I} + \frac{2L}{V} \quad (5)$$

また、定常運行時には各 T_q を除き、常に圧入しているとする

$$h_i = \frac{h_t}{m} \quad (6)$$

を満たす。

また、輸送能力がある一定期間（稼働率 α ）の二酸化炭素回収量を超える必要があるため

$$\alpha \times m \times W = q \times h_t \quad (7)$$

となる。

式(5)と式(6)より

$$(m-1) \times \frac{W}{I} \geq T_p + T_l + \frac{2L}{V} - (m-1) T_q \quad (8)$$

となる。

さらに式(5)と式(7)より

$$\alpha \times m \times W = q \times (T_p + T_l + T_q + \frac{W}{I} + \frac{2L}{V}) \quad (9)$$

となる。

式(9)を W についてとくと

$$W \geq \frac{qI(T_p + T_l + T_q + \frac{2L}{V})}{\alpha m I - q} \quad (10)$$

が W の必要条件となる。

またここで式(8)と式(9)から I を消去すると、 $m \neq 1$ の時、 W が満たす条件は、

$$W \geq \frac{q}{\alpha(m-1)} \times (T_p + T_l + \frac{2L}{V}) \quad (11)$$

となり、式(11)で定まった W と式(9)を用いて I は

$$I \geq \frac{W}{\frac{\alpha m W}{q} - (T_p + T_l + T_q + \frac{2L}{V})} \quad (12)$$

が必要条件となる。

2.2. 物流シミュレーションモデルの構築

物流シミュレーションソフトとして Rockwell Software 社開発の Arena^[12]を用いた。Arena 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。

またあるシミュレーションにおいて、様々なパラメータを組み合わせたシナリオ評価を行う際 OptQuest for Arena を使用する。OptQuest は OptTek System Inc. のパッケージで、

入力コントロール空間を効率的に探索し、最適点に素早く確実に収束するために、タブー探索 (tabu search) と分散探索 (scatter search) として知られるヒューリスティックな手法を用いている^[12]。これを用いることでパラメータの最適な組み合わせを探索している。

2.2.1. コストの算出

本研究では Ship Cost, Tank Cost, Fuel Cost, の3つのコストおよび、3つのコストの合計である Total Cost をモデル評価に使用した。この際、岡崎^[13]が設計した LCO₂ Ship Cost, Fuel Consumption, Tank Cost を用いた。

岡崎の算出した Ship Cost, C_{Ship} (円)は積載可能量に応じて

$$C_{Ship} = 319.6W^{1.104} + 2.497 \times 10^7 \quad (13)$$

であることを示し、また1日24時間当たりの Fuel Consumption, Q_{fuel} (ton)は v (knot)を用いて、

$$Q_{fuel} = (1.29 \times 10^{-5}W^{0.4144} + 2.711 \times 10^{-7})^{2/3}v^3 \quad (14)$$

であることを示している。

Table 2-1 に岡崎が設計した LCO₂ 輸送船のスペックをまとめる。

Fuel Cost 算出に使用した C 重油価格と為替を Table 2-2 に示す。これらのデータは2014年9月のものを使用している。

また、岡崎は Tank Cost, C_{tank} (円)は

$$C_{tank} = 171429P_{LCO_2}V_{tank} \quad (15)$$

で表されることを示している。 P_{LCO_2} (MPa)は LCO₂ の圧力、 V_{tank} (m³)は貯蔵タンクの体積である。本研究では、 P_{LCO_2} が 0.684 MPa のときの密度 1.1535 kg/m³を用いてコスト算出を行った。

Table 2-1 LCO₂ 船輸送船

DWT(ton)	L(m)	B(m)	D(m)	Construction cost(\$)	fuel consumption[ton/day]
3000	93.4	12.8	8.2	27,174,696	17
5000	105.2	15.4	9.7	28,844,982	20
7000	114.8	17.5	10.9	30,588,172	21
10000	126.9	20.2	12.2	33,299,267	24
30000	181.3	32.3	16.8	52,982,291	32
50000	218.9	40.8	19.3	74,204,514	37

Table 2-2 本研究で使⽤した重油価格と為替レート

C重油価格	63150円/kl
為替	1円=0.010272\$

なお輸送船・貯蔵タンクの建造費は10年で償却するとした。

シミュレーションにおけるコスト算出手順は次のようになる。

- ① 輸送船の積載可能量・隻数を定め Ship Cost を算出する
- ② 時系列シミュレーションを行う
- ③ シミュレーション時のタンク内の最大二酸化炭素量を必要タンク容量として定める
- ④ 必要タンク容量から Tank Cost を算出する
- ⑤ シミュレーション時の往路と復路を通過した船の隻数を数え Fuel Cost を算出する
- ⑥ Ship Cost, Tank Cost, Fuel Cost の合計を Total Cost として算出する

ここからは Ship Cost, Tank Cost, Fuel Cost は二酸化炭素回収量 1 ton 当たりのコストで表す。

2.2.2. シミュレーションにおけるルール

本研究では次のようなルールを設定した。

- ローディング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
- 船の積載可能量に到達するか、陸上タンクが空になったら出航
- 洋上での係船も、一度に一隻まで
- 船が運んできた二酸化炭素の全量を圧入し、港へ向かう
- ローディング・圧入前後に準備時間 T_p , T_q を設ける

2.2.3. 時系列物流シミュレーションモデルの構築

実際に作成した時系列シミュレーションモデルの全体イメージを Fig. 2-1 に示す。

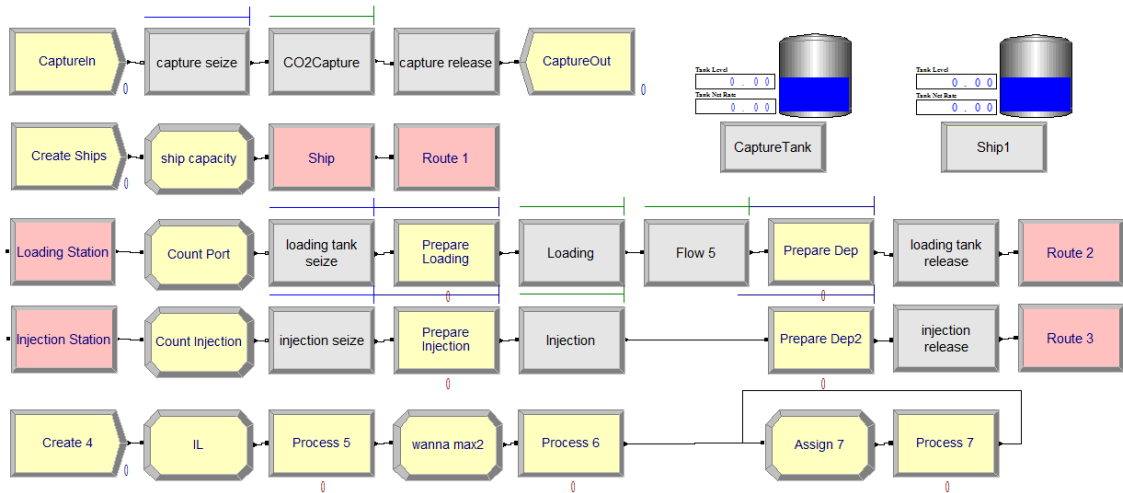


Fig. 2-1 時系列シミュレーションモデル全体イメージ

本モデルは大きく分けて4つのパートからなる。

2.2.3.1. 二酸化炭素回収・貯蔵パート

二酸化炭素回収・貯蔵パート (Fig. 2-2)では1時間に1度二酸化炭素を Capture Tank に貯蔵する。二酸化炭素回収量は固定、もしくは変動させることができる。

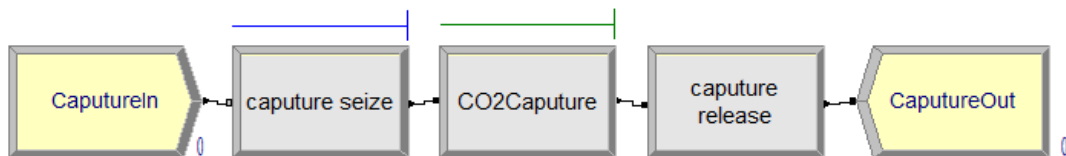


Fig. 2-2 二酸化炭素回収・貯蔵パート

2.2.3.2. 船作成パート

船作成パート (Fig. 2-3)ではシミュレーション開始時に CO₂ 輸送船を作成する。この際、 W (ton), 隻数, 初めの輸送船を作成する時間 FCS (h), 次の輸送船を作成するまでの時間間隔 TBA (h), を定めることができる。船作成パートで作られた船は港パートへと向かう。

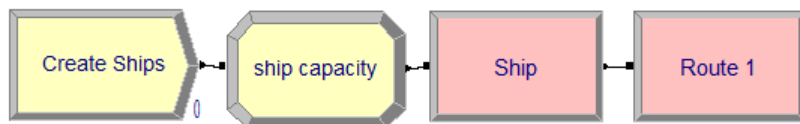


Fig. 2-3 船作成パート

2.2.3.3. 港パート

港パート (Fig. 2-4)には前述の船作成パート、もしくは後述の圧入パートからの船が到着する。到着した船の隻数, NOP をカウントし, Fuel Cost 算出に用いる。次にローディング準備に入る。ここでは準備にかかる時間を設定する他, 準備することが可能かどうか, すなわち港があいているかどうかを設定できる。その後ローディングを行う。ここでローディ

ング流量を定めることにより、ローディング時間は実際の輸送量(ローディング量)によって決められることになる。さらに出発準備(準備時間を設定可能)を経て圧入パートへと向かう。この際にかかる時間 h_g は設定した距離と航海速度によって決定される。ローディング流量は、輸送船の積載可能量すべてをローディングするのにかかる時間 T_1 が 2 時間となるように設定した。

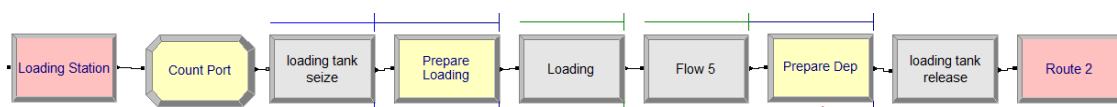


Fig. 2-4 港パート

2.2.3.4. 圧入パート

圧入パート(Fig. 2-5)には前述の港パートからの船が到着する。こちらでも到着した船の隻数, NOI をカウントし, Fuel Cost 算出に用いる。次に圧入準備に入る。準備にかかる時間を設定する他, 準備することが可能かどうか, こちらでは海上作業が可能かどうかを設定できる。その後圧入を行う。圧入時間は輸送量と圧入流量によって決定される。さらに出発準備を経て港パートへ向かう。港パートと同様に h_r は設定した距離と航海速度によって決定される。

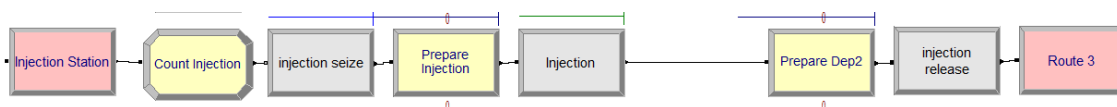


Fig. 2-5 圧入パート

2.2.3.5. 必要タンク容量算出パート

必要タンク容量算出パート(Fig. 2-6)は上の 4 つのパートとは異なり, 実際のオペレーションとは関係なく, Tank Cost 算出のために作成したパートである。シミュレーション内のあるステップと一つ前のステップを比べより大きい方を次のステップと比べさせることで, タンク内の二酸化炭素の最大量を求めている。

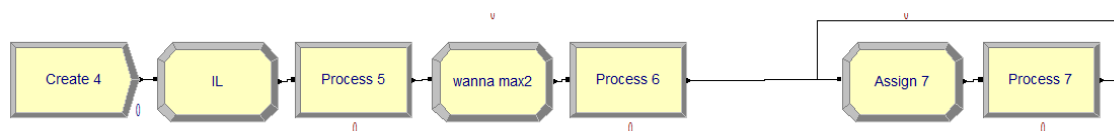


Fig. 2-6 必要タンク容量算出パート

2.3. シミュレーションモデルの妥当性評価

2.3.1. ケーススタディ

- ・ シミュレーション期間は 1000 日
- ・ 二酸化炭素回収量 $q=490$ ton/h 固定
- ・ 輸送距離 $L=200$ km
- ・ 船速 $v=27.78$ km/h (15 kt)

- 圧入流量 $F=539$ ton/h
- ローディング・圧入準備, また港・圧入サイトでの出発準備時間 $T_p, T_q=4$ h
- 港・圧入サイト, 24 h 利用可能

これらの条件でケーススタディを行う。

2.3.2. 初期計画による検討とシミュレーション結果

2.3.2.1. 隻数 $m=1$ のときのシミュレーション

稼働率 $\alpha=1$ とすると, 必要な積載可能量は式(10)より導くことができる。隻数 $m=1$ 隻としたとき式(10)より, $W>131516$ ton を得る。そこで $m=1$ 隻の条件下で W を $W=100,000$ ton~ $150,000$ ton まで変化させシミュレーション結果を考察する。最初の船が作られる時間 $FCS=0$ としてシミュレーションを行った。Table 2-3, Fig. 2-7 にそれぞれのコストを示す。

Table 2-3 積載可能量を変化させたときのコスト

DWT(ton)	Ship cost(\$/CO2-ton)	Tank Cost(\$/CO2-ton)	Fuel Cost(\$/CO2-ton)	Total Cost(\$/CO2-ton)
100000	3.047234797	11.77641669	0.195491799	15.01914328
110000	3.320802007	8.553636424	0.187213854	12.06165228
120000	3.596971356	5.934719946	0.179674444	9.711365746
130000	3.87554723	4.024212744	0.176626158	8.076386132
140000	4.156362755	3.845628308	0.180279016	8.182270078
150000	4.439273803	3.831116616	0.18558511	8.455975528

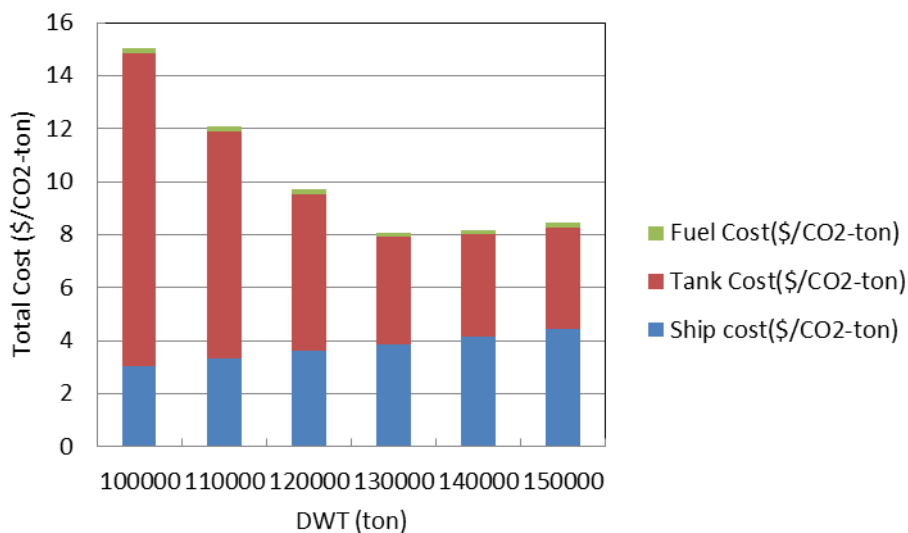


Fig. 2-7 積載可能量を変化させたときのコスト変化 ($m=1$)

積載可能量が大きくなるほど Ship Cost は大きくなっていることが見て取れる。また, Fuel Cost については輸送船の往復回数が少ないため全体的に非常に小さくなっており, $W=130,000$ ton で最小値をとっている。これは積載可能量が大きくなるにつれ Fuel Consumption は増加するものの, 一度の輸送量が大きくなるため輸送の往復回数が減少し

ていくことに起因している。しかしながら Ship Cost, Tank Cost に比べると、どの積載可能量においても非常に小さい。これは積載可能量が非常に大きい値をとっているため、輸送船の往復回数が小さくなっているからと考えられる。ここで Tank Cost に注目すると $W=100,000 \text{ ton} \sim 120,000 \text{ ton}$ までは大きく減少しているが、 $W=130,000 \text{ ton} \sim 150,000 \text{ ton}$ では減少こそしているもののさほど変わらない。

ここでそれぞれの積載可能量でのタンク内二酸化炭素量の推移を Fig. 2-8 に示す。

- $W=100,000 \text{ ton} \sim 120,000 \text{ ton}$

二酸化炭素量が増大し続けており、システムとしてうまく機能していないことがわかる。

- $W=130,000 \text{ ton}$

$W=100,000 \text{ ton} \sim 120,000 \text{ ton}$ ほど顕著ではないがシミュレーション終了時のグラフに注目すると二酸化炭素回収時にも貯蔵タンク内に二酸化炭素が残存していることがみてとれる。このことから Fig. 2-7 では Total Cost が最小となっているが、1000 日以上長いシミュレーションを行うと、このままタンク内二酸化炭素量が増加し続けてしまうことがわかる。

- $W=140,000 \text{ ton}, 150,000 \text{ ton}$

タンク内二酸化炭素量が増え続けることなく、システムとして機能していることがわかる。

以上の結果より初期計画の $W > 131516 \text{ ton}$ を満たさないものは定常状態においてうまく機能せずシミュレーションの妥当性が確認できた。

また OptQuest for Arena を用いて Tank Cost を最小にする W を探索すると $W=140,000 \text{ ton}$ が導出できた。

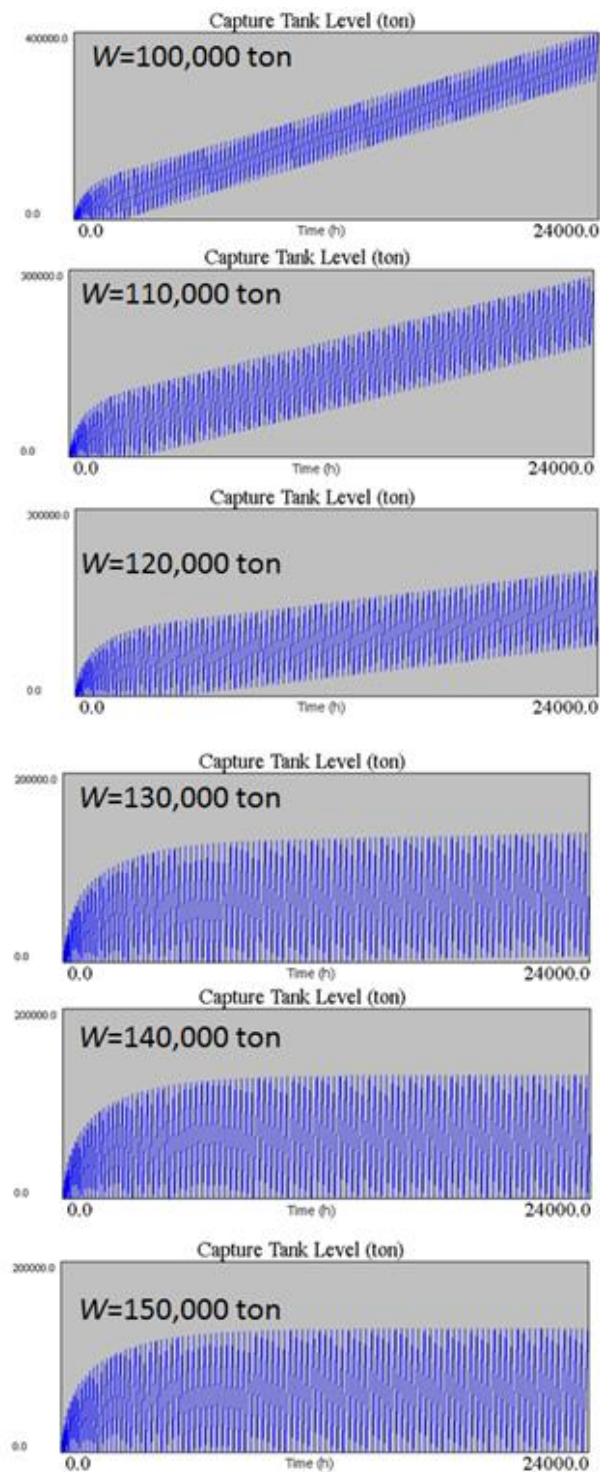
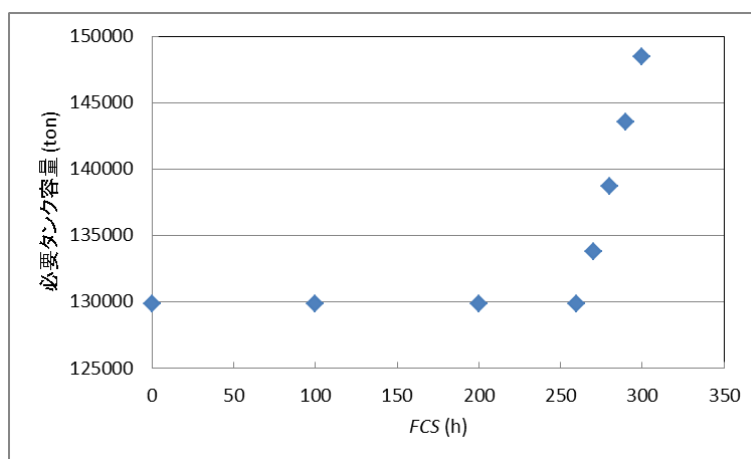


Fig. 2-8 積載可能量を変化させたときのタンク内二酸化炭素量 ($m=1$)

ここで FCS の値を変化させてみる. $W=140,000$ ton のときの港から圧入サイトに到着した隻数 NOI , 圧入サイトから港に到着した隻数 NOP を FCS による必要タンク容量の変化と Fig. 2-9 に示す.

Table 2-4 FCS による NOI, NOP の変化

FCS	必要タンク容量	NOI	NOP
0	129851	101	99
100	129851	97	95
200	129851	92	90
260	129851	89	88
270	133769	89	87
280	138669	89	87
290	143569	88	86
300	148469	88	86

Fig. 2-9 FCS による必要タンク容量の変化

必要タンク容量は $FCS=0\sim 260$ h 一定で、 $FCS=260$ h からは線形に変化している。そこで $FCS=0, 100, 200, 260, 300$ h でのタンク内二酸化炭素量の推移を Fig. 2-10 に示す。どの FCS に対してもシミュレーション時間がある程度経過したのちは定常状態になりタンク内二酸化炭素量は安定していることがわかる。 $FCS=0\sim 260$ h では定常状態における二酸化炭素量が必要タンク容量に等しくなっているのに対し $FCS=300$ h ではシミュレーションスタート時にタンク内二酸化炭素量が最大となっている。

$W=140,000$ ton の時の定常状態におけるタンク内二酸化炭素量の最大値は、129851 ton でこれを1時間当たりの二酸化炭素回収量 $q=490$ ton/h で割ると、タンク内二酸化炭素量の最大値に至るまでの時間 265 h が算出される。ここから、ローディング準備期間の 2 h を引くと 263 h となる。 FCS がこの 263h よりも小さければシミュレーションスタート時の二酸化炭素量が定常状態の二酸化炭素量の最大値を上回ることはない。

また、 $FCS=0\sim 260$ h では必要タンク容量が変化しないものの NOI, NOP の値、すなわち Fuel Cost が減少していることが確認できる。これは、シミュレーションスタート時の輸送量が大きくなることで定常状態に入るまでの時間がはやくなり、輸送船の往復回数が少なくなることを意味している。つまり、同じ輸送船の積載可能量と隻数を用いても、シミュレーションスタート時の条件、 FCS を調整することで、コストを下げるができることが示

された。

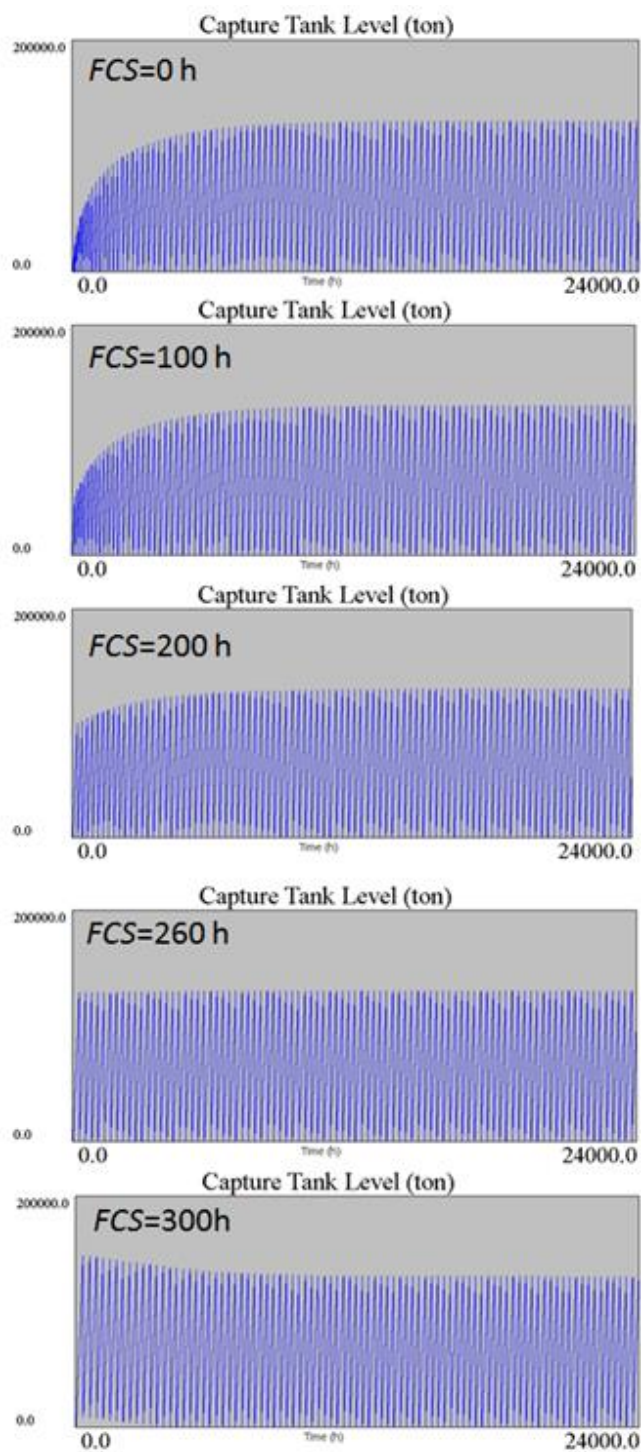


Fig. 2-10 *FCS*を変えた時の二酸化炭素量の推移へ影響

2.3.2.2. 隻数 $m=2$ の時のシミュレーション

次に隻数 $m=2$ 隻としたとき、待機時間が発生しないとすると必要な積載可能量は式(10)

より導くことができ、 $W > 10960$ ton を得る。そこで $W = 11000$ ton でシミュレーションを行った。コスト算出結果とタンク内二酸化炭素量の推移を Table 2-5, Fig. 2-11 に示す。

Table 2-5 $W = 11000$ ton でのコスト算出結果

Ship cost(\$/CO2-ton)	Tank Cost(\$/CO2-ton)	Fuel Cost(\$/CO2-ton)	Total Cost(\$/CO2-ton)
1.594607355	28.3413651	0.878663384	30.81463583

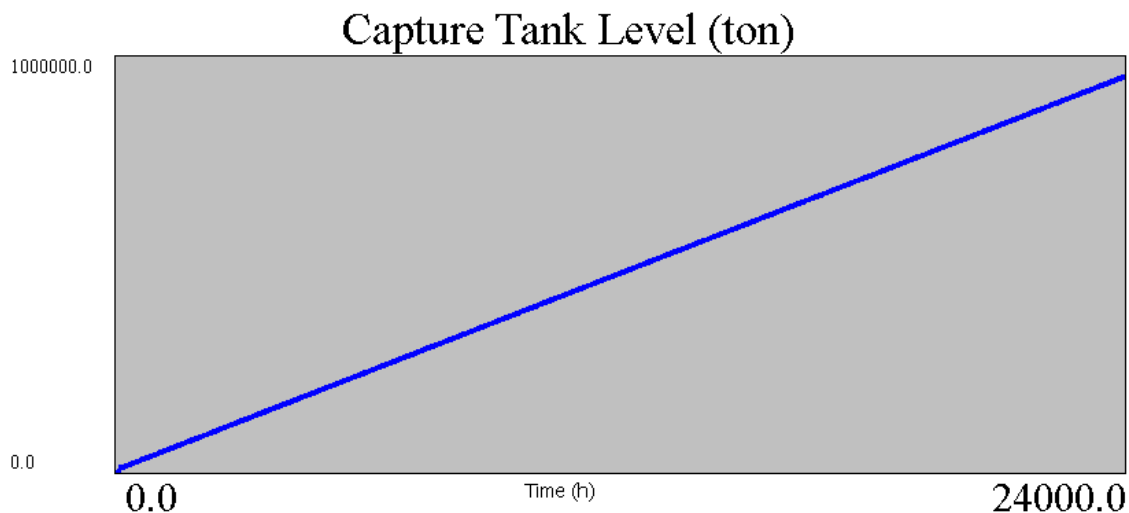


Fig. 2-11 $W = 11000$ ton でのタンク内二酸化炭素量の推移

タンク内二酸化炭素量が増加し続け、システムとして全く機能していないことがわかる。つまり式 (10) で求めた W の値では不足していることを示している。そこで、どちらか一方の船の作業開始が他方の船の作業終了を待つ待機時間 h_m (h) について考えてみる。 $W = 11000$ ton でのシミュレーションにおける港での待ち時間と圧入サイトでの待機時間を Table 2-6 に示す。ローディング流量と圧入流量の差が大きいことにより圧入サイトで輸送船が詰まっていることがわかり、待機時間が発生していることで式 (10) では十分ではないことが確認できる。

Table 2-6 $W = 11000$ ton の時の港待ち時間と圧入待ち時間

	平均	最大
港待機時間 (h)	0.00433208	4.2671
圧入待機時間 (h)	4.0193	18.19

◆ 待機時間 $h_m(h)$ の考察

ここで、ローディング流量と比較して圧入流量が小さく、圧入時間が長くなる時のそれぞれの輸送船の動きを Fig. 2-12 に示す。



Fig. 2-12 $m=2$ の時の輸送船のサイクル

この図より待機時間 h_m は,

$$h_m = (\text{圧入・出発準備時間} + \text{圧入時間}) - (\text{往復の輸送時間} + \text{ローディング時間}) \quad (16)$$

で表されることがわかる。つまり,

$$h_m = \left(T_q + \frac{W}{I}\right) - \left(\frac{2L}{V} + T_p + T_l\right) \quad (17)$$

となる。

ここで式(1)は

$$h_t \geq h_l + h_g + h_i + h_r + h_m \quad (18)$$

となるので式(2)～式(4), 式(7), 式(18)より

$$W > \frac{2qIT_q}{mI - 2q} \quad (19)$$

を得る。これにシミュレーション条件である, $m=2$, $T_p, T_q=4$ h, $q=490$ ton/h, $I=539$ ton/h を代入すると, $W>21560$ ton を得た。

そこで $W=21,000$ ton, $22,000$ ton の時のシミュレーションを行った。この時のコスト比較を Fig. 2-13 に示す。

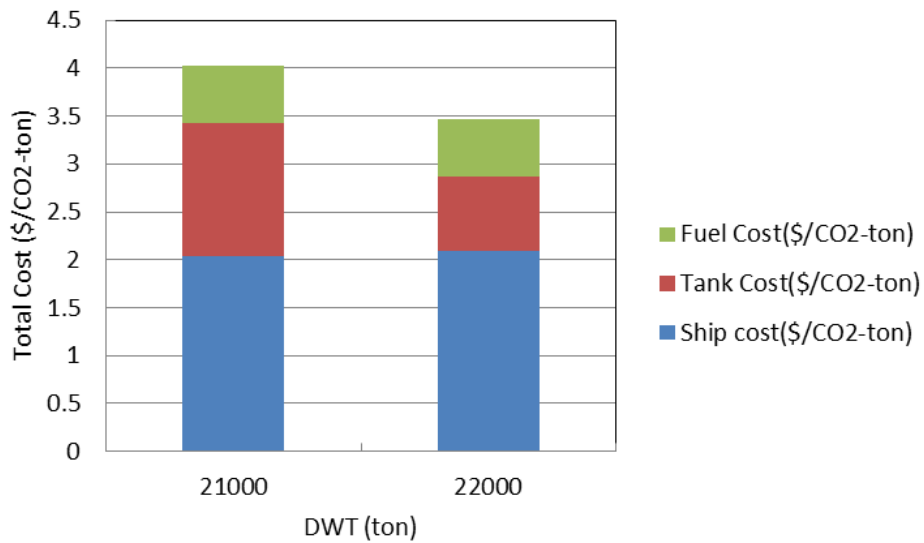


Fig. 2-13 積載可能量を変化させたときのコスト変化 ($m=2$)

積載可能量を大きくすると Ship Cost はわずかに増加する一方, Fuel Cost はわずかに減少している. 輸送量増加の影響が Fuel Consumption 増加の影響よりも大きいことを表している. また, Tank Cost は大幅に減少している. そこでタンク内二酸化炭素量の時系列変化 (Fig. 2-14)を比較する.

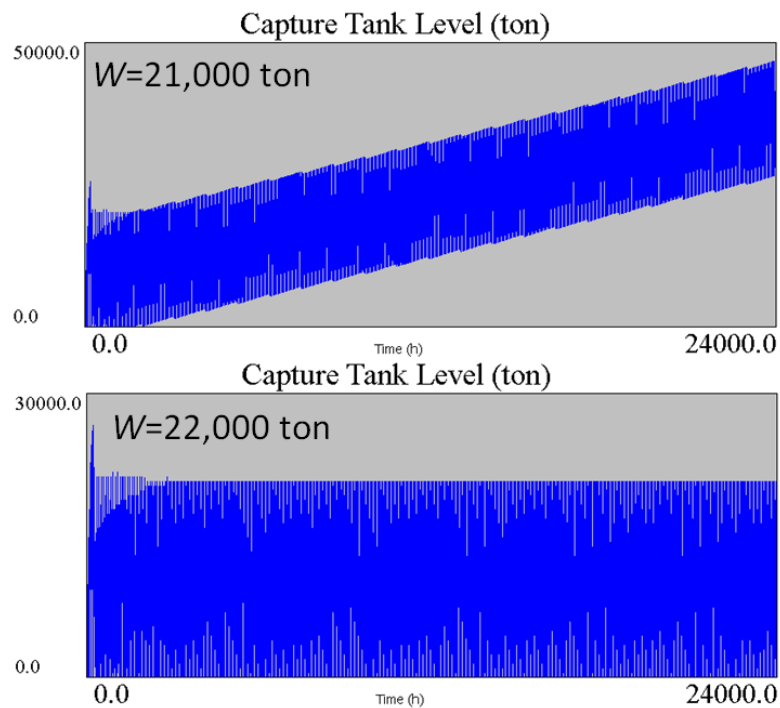


Fig. 2-14 積載可能量を変化させたときのタンク内二酸化炭素量 ($m=2$)

- $W=21,000$ ton

二酸化炭素量が増大し続けており、システムとしてうまく機能していないことがわかる。

- $W=22,000$ ton

タンク内二酸化炭素量が増え続けることなく、システムとして機能していることがわかる。

以上の結果より初期計画の $W>21560$ ton を満たさないものは定常状態においてうまく機能せずシミュレーションの妥当性が確認できた。

また OptQuest for Arena を用いて Tank Cost を最小にする W を探索すると $W=22,000$ ton が導出できた。このことから、OptQuest for Arena は初期計画で考慮していない未知数（待機時間）を検討しなくても最適な値を導出するツールとして有用であると考えられる。

しかしながら $W=22,000$ ton において定常運転時の挙動は安定しているものの、シミュレーションスタート時にタンク内二酸化炭素量が最大を取っていることがわかる。そこでスタート時の 100 日間のタンク内二酸化炭素量の推移を Fig. 2-15 に示す。2 隻の輸送船の輸送量にばらつきがあることで出港時にタンク内に残る二酸化炭素量が増加していることがわかる。次第にバランスが取れてくるもののスタート時からかなりの時間、輸送量にもばらつきが生じている。

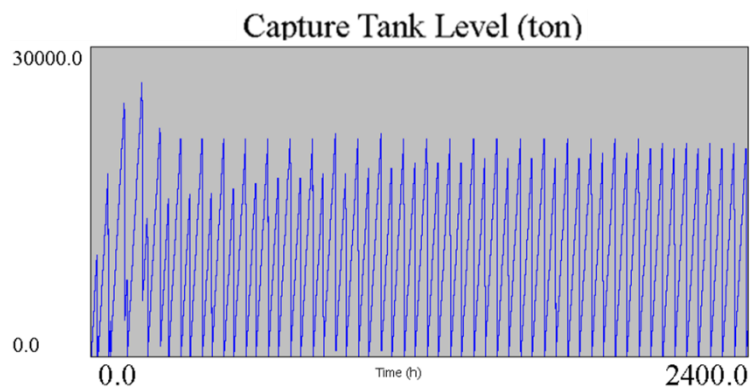


Fig. 2-15 スタート時のタンク内二酸化炭素量の推移 ($m=2$, $W=22,000$ ton)

ここで

- 最初の船が作られる時間 FCS
- 次の船が来るまでの時間間隔 TBA

を変更し、シミュレーションスタート時の問題を解決する。

その前に、 $m=1$ について FCS を変更した際のシミュレーション結果を見てみる。定常運転時にシステムが機能している $W=140,000$ ton のとき、

OptQuest for Arena を用いて探索した Tank Cost が最小となるような組み合わせは $(FCS, TBA) = (22, 22)$ であった。この値を用いて行ったシミュレーション結果を Fig. 2-16,

Fig. 2-17 に示す.

この調整によって、スタート時のタンク内二酸化炭素量の増加が緩やかになり、定常運転時に二酸化炭素量が最大となっていることが示されている。そのため、必要タンク容量が小さくなり Tank Cost を抑えることができている。また定常運転時の 2 隻の輸送船の輸送量がほとんど等しくなっている。このことから輸送船が複数の場合はスタート時の (*FCS*, *TBA*) を調整することでシステムの評価の妥当性を高めることとする。

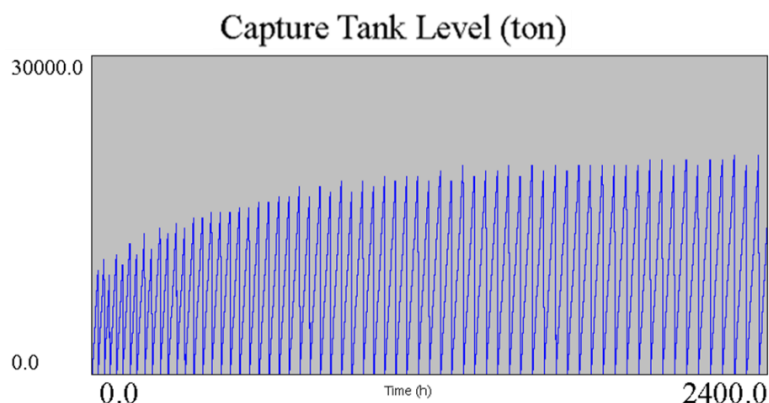


Fig. 2-16 (*FCS*, *TBA*) を調整したスタート時のタンク内二酸化炭素量の推移

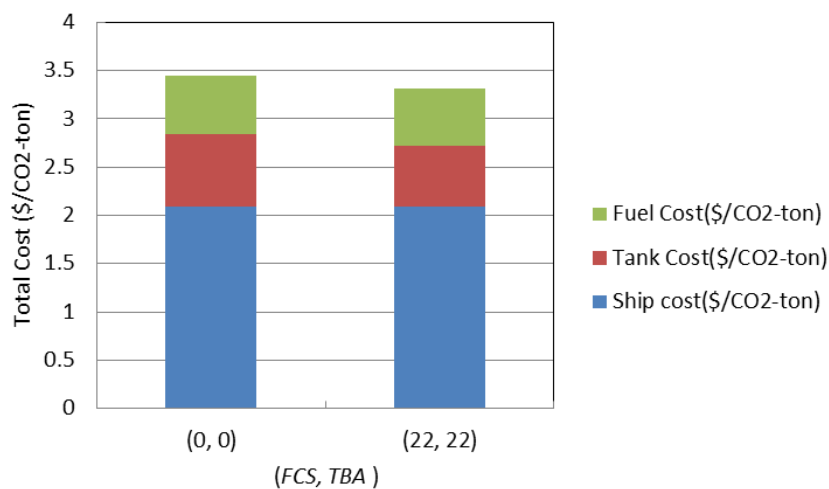


Fig. 2-17 (*FCS*, *TBA*) の調整によるコスト変化

2.3.3. Total Cost 最小の組み合わせ

OptQuest for Arena を用いて Total Cost 最小となる輸送船の積載可能量, 隻数, *FCS*, *TBA* の組み合わせを算出する. OptQuest for Arena による探索過程を Fig. 2-18 に示す. その結果 $W=22,000$ ton, 隻数 $m=2$, (*FCS*, *TBA*) = (22, 22) が得られた. これは 2.3.2.2 で得られた結果と同じであった. このことから, OptQuest for Arena にて得られる結果は待機時間 h_m をも考慮した組み合わせを導出できることが確認できた.

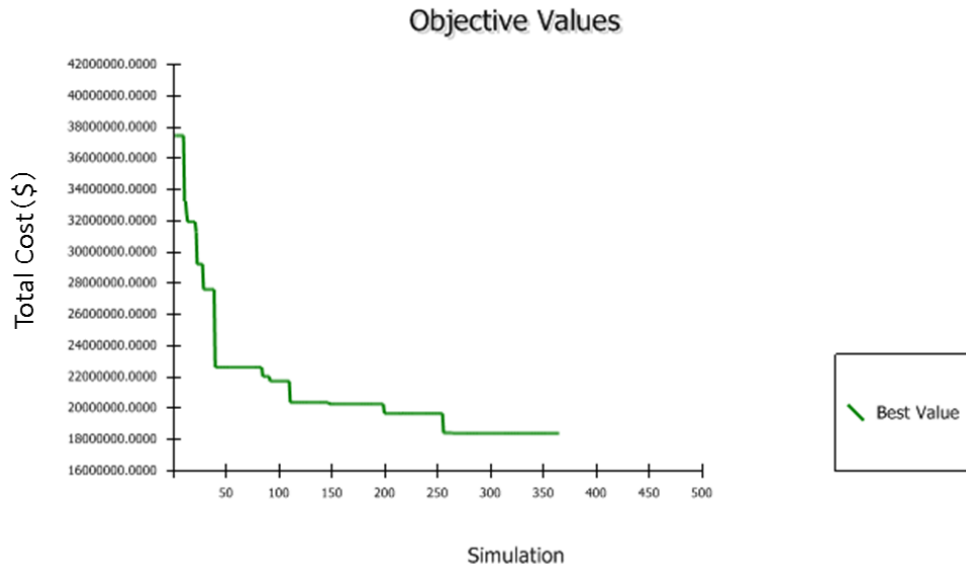


Fig. 2-18 OptQuest for Arena による探索過程

2.4. 港・圧入サイトの利用可能時間

港への入港や港での作業は、港湾の規則・慣習などによって制限される。また、圧入サイトにおける洋上作業も夜間の作業等、制限を設けることが大いに考えられる。

そこで港・圧入サイトの利用可能時間を定めた時の影響を調べる。

- シミュレーション期間は 366 日
- 二酸化炭素回収量 $q=490$ ton/h 固定
- 輸送距離 $L=200$ km, 1000 km
- 船速 $v=27.78$ km/h (15 kt)
- 圧入流量 $F=539$ ton/h
- ローディング・圧入準備, また港・圧入サイトでの出発準備時間 $T_p, T_q=2$ h
- 輸送船の到着が港・圧入サイトの利用可能時間内ならば準備, ローディング・圧入作業を開始し, それ以外ならば待機し, 次の利用可能時間になり次第作業を開始する

以上の条件のもとシミュレーションを行う。港・圧入サイトの利用可能時間は

- ① 港・圧入 24・・・港・圧入サイトともに 24 時間利用可能
- ② 港 6-18・圧入 24・・・港の利用可能時間は 6 時から 18 時までの 6 時間, 圧入サイトは 24 時間利用可能
- ③ 港 24・圧入 6-18・・・港は 24 時間利用可能, 圧入サイト利用可能時間は 6 時から 18 時までの 6 時間
- ④ 港・圧入 6-18・・・港・圧入サイトともに利用可能時間は 6 時から 18 時までの 6 時間の 4 つに定めた。

また輸送距離による影響を見るために $L=200$ km, $L=1000$ km でのシミュレーションを行った。

■ 輸送距離 200 km

輸送距離 $L=200$ km, 港・圧入サイト 24 h 利用可能の時, Total Cost が最小となるような積載可能量, 隻数, FCS , TBA の組み合わせは, $W=22,000$ ton, 隻数 $m=2$, $(FCS, TBA)=(22, 22)$ であった. まずこの条件で上記①～④の利用可能時間の影響を調べる. それぞれのコスト比較を Fig. 2-19 に示す.

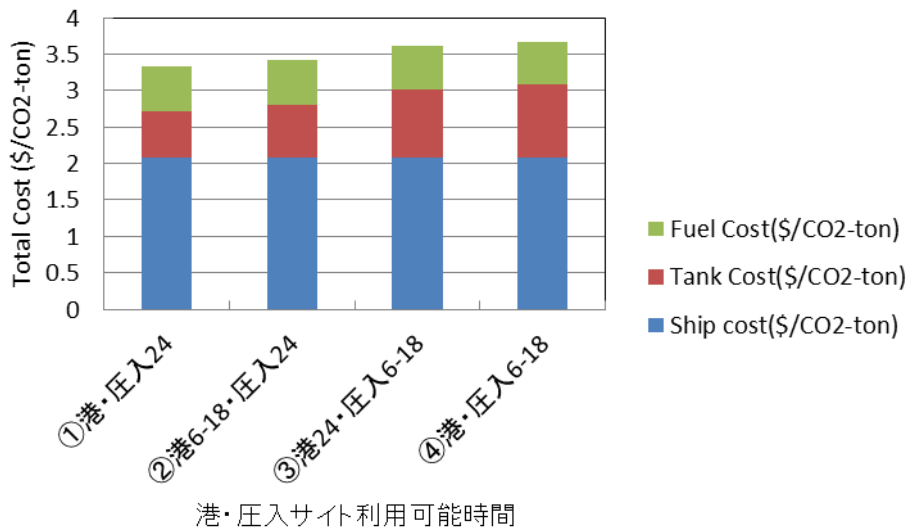


Fig. 2-19 港・圧入サイトの利用可能時間によるコスト変化($L=200$ km)

①, ②, ③, ④の順に Total Cost が大きくなっており, 利用可能時間の制限が厳しくなるごとに Cost が大きくなることを確認できる. それぞれのコストに関しては, 輸送船の条件を変えていないので Ship Cost は変化せず, Fuel Cost にもほとんど変化は見られない一方で, Tank Cost に大きな差が出ている. そこでタンク内二酸化炭素量の推移を Fig. 2-20 に示す. ②ではかろうじてシステムとして機能しているものの③, ④ではタンク内二酸化炭素量が上昇し続けてしまい発散してしまう. 港よりも圧入サイトにおける時間制限が大きく影響していることが示されている. これは, 港・圧入サイトの利用時間の制限によって, 輸送船の 1 サイクルに要する時間が増大していることが影響している.

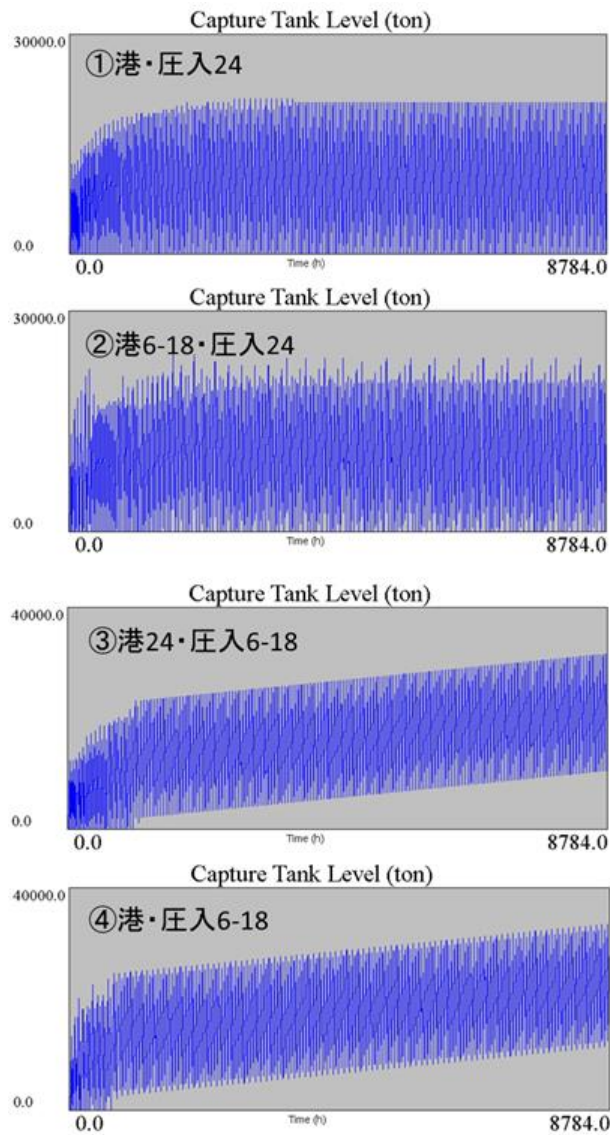


Fig. 2-20 港・圧入サイトの利用可能時間別のタンク内二酸化炭素量の推移($L=200$ km)

そこで②, ③, ④について Total Cost が最小となる積載可能量, 隻数, *FCS*, *TBA* の組み合わせを探索した. 組み合わせとその時のコスト, タンク内二酸化炭素量の推移を Table 2-7, Fig. 2-21, Fig. 2-22 に示す.

Table 2-7 Total Cost 最小の組み合わせ($L=200$ km)

	DWT(ton)	隻数	FCS (h)	TBA (h)
① 港・圧入24	22000	2	22	22
② 港6-18・圧入24	22000	2	45	33
③ 港24・圧入6-18	23000	2	38	26
④ 港・圧入6-18	23000	2	22	30

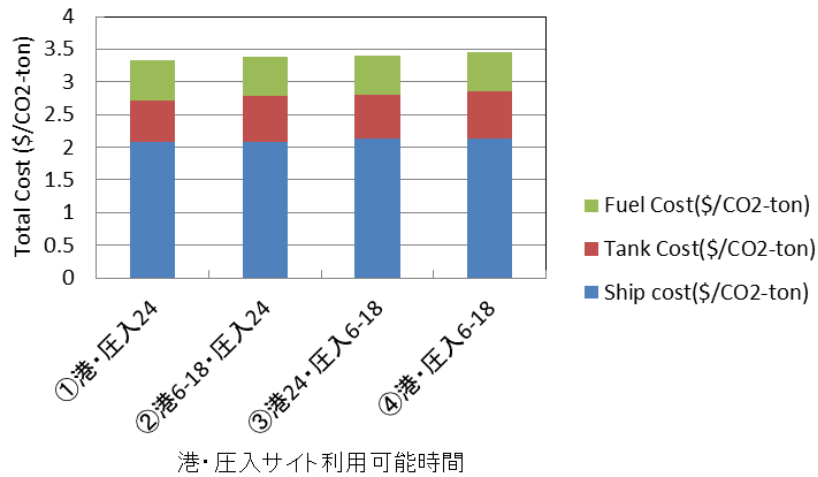


Fig. 2-21 組み合わせを調整したコスト変化($L=200$ km)

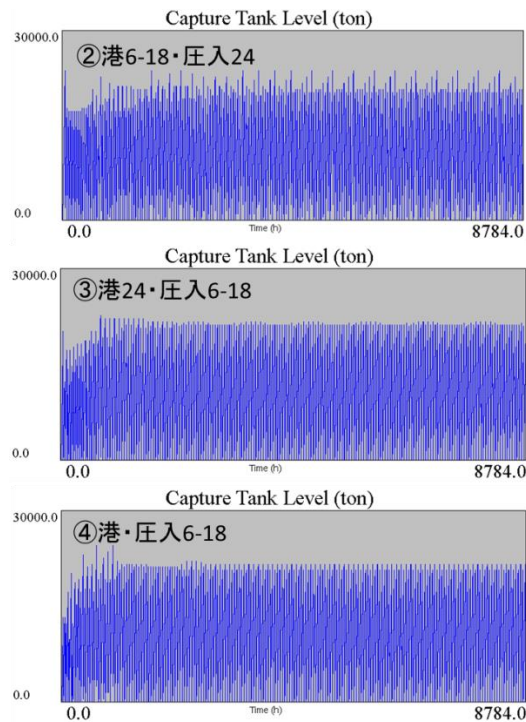


Fig. 2-22 組み合わせを調整したタンク内二酸化炭素量の推移($L=200$ km)

隻数は変わらないものの、要求される積載可能量は大きくなるのがわかる。また積載可能量、隻数、 FCS 、 TBA の組み合わせを調整することで、タンク内二酸化炭素量の発散を防ぎ Total Cost をおさえることができている。適切な輸送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。

■ 輸送距離 1,000 km

輸送距離 $L=1,000$ km, 港・圧入サイト 24 h 利用可能の時, Total Cost が最小となるよう

な積載可能量, 隻数, FCS , TBA の組み合わせは, $W=50,000$ ton, 隻数 $m=2$, (FCS , TBA)=(76, 53)であった. この時のコストを Fig. 2-23 に示す.

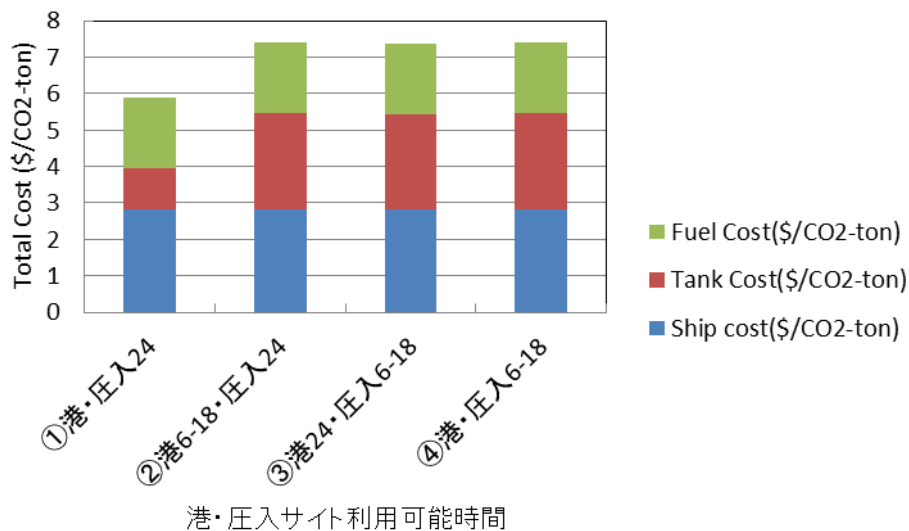


Fig. 2-23 港・圧入サイトの利用可能時間によるコスト変化($L=1,000$ km)

①, ②, ③, ④の順に **Total Cost** が大きくなっており, 利用可能時間の制限が厳しくなるごとに **Cost** が大きくなることを確認できる. 時間制限が大きくなるにつれ輸送船の1サイクルに要する時間が増大するため **Fuel Cost** はわずかに減少しているが **Tank Cost** は大きく増大している. ここでも港よりも圧入サイトにおける時間制限が大きく影響していることが示されている. タンク内二酸化炭素量の推移を Fig. 2-24 に示す. ②, ③, ④すべての場合で程度の違いはあるが, 二酸化炭素量が上昇傾向にあることが確認できる.

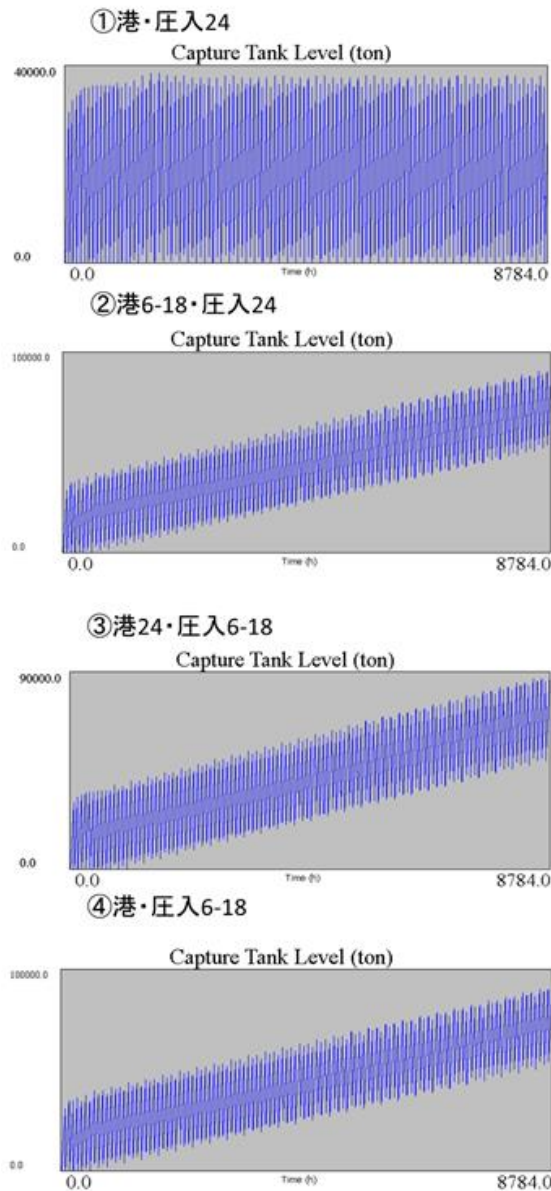


Fig. 2-24 港・圧入サイトの利用可能時間別のタンク内二酸化炭素量の推移($L=1,000$ km)

そこで②, ③, ④について Total Cost が最小となる積載可能量, 隻数, *FCS*, *TBA* の組み合わせを探索した. 組み合わせとその時のコスト, タンク内二酸化炭素量の推移を Table 2-11, Fig. 2-25, Fig. 2-26 に示す.

Table 2-8 Total Cost 最小の組み合わせ($L=1,000$ km)

	DWT(ton)	隻数	FCS (h)	TBA (h)
① 港・圧入24	37000	2	59	68
② 港6-18・圧入24	38000	2	55	73
③ 港24・圧入6-18	38000	2	66	69
④ 港・圧入6-18	38000	2	65	74

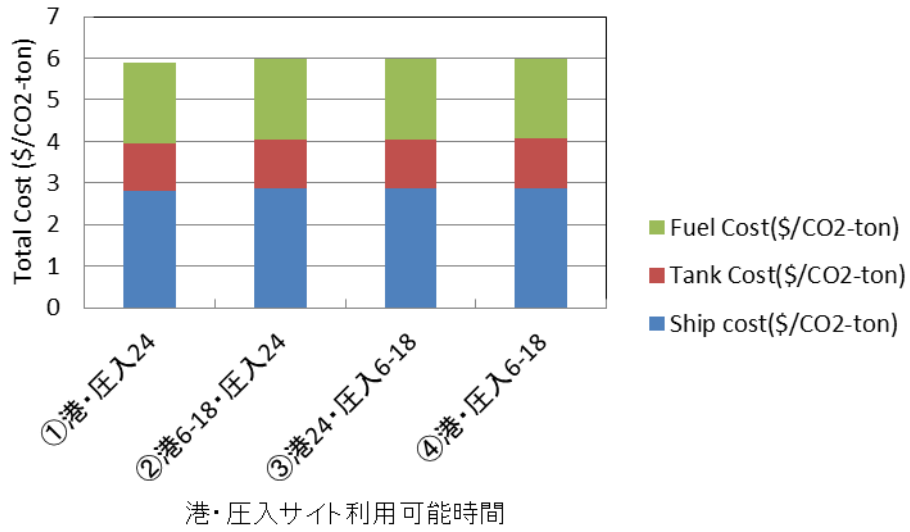
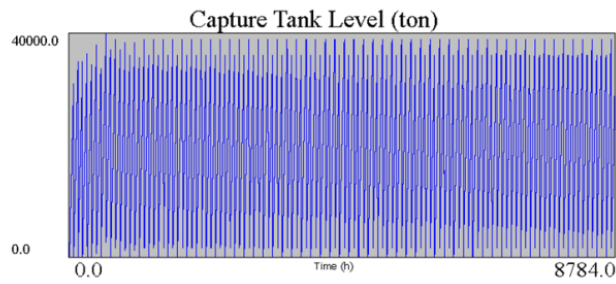
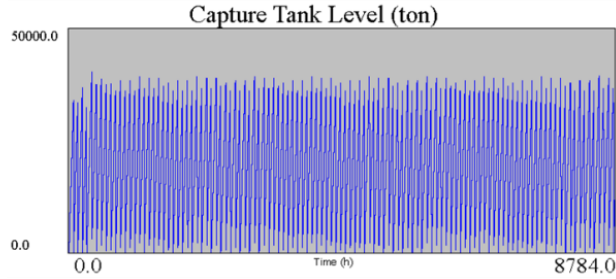


Fig. 2-25 組み合わせを調整したコスト変化(L=1,000 km)

② 港6-18・圧入24



③ 港24・圧入6-18



④ 港・圧入6-18

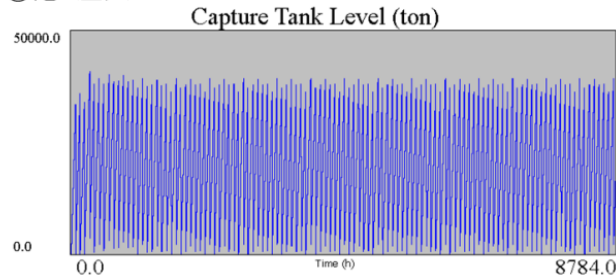


Fig. 2-26 組み合わせを調整したタンク内二酸化炭素量の推移(L=1,000 km)

こちらでも隻数は変わらないものの要求される積載可能量が大きくなり Ship Cost が増大

することがわかる。しかしながら積載可能量が大きくなり一度の輸送量が大きくなることで、Fuel Costが減り、Total Costにはほとんど変化は見られない。輸送距離が長くなっても、積載可能量、隻数、FCS、TBAの組み合わせを調整した適切な輸送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。

■ 輸送距離での比較

輸送距離 200 km と輸送距離 1000 km における港・圧入サイト利用可能時間における影響を比較する。Table 2-9 に①と②～④の比を示す。わずかではあるが 200 km の方が 1000 km に比べて港・圧入サイト利用可能時間の影響が大きいことが示された。輸送距離 200 km の時の片道の輸送時間が $h=7.2$ h に対して 1000 km の時は $h=36$ h となり、輸送距離が短いほど輸送時間が小さくなり、港・圧入サイトの閉鎖時間の影響を受けやすいことが原因である。

Table 2-9 輸送距離別の港・圧入サイト利用可能時間の影響

	200 km	1000 km
①港・圧入24	1	1
②港6-18・圧入24	1.016442	1.012321
③港24・圧入6-18	1.018995	1.013319
④港・圧入6-18	1.036416	1.01286

2.5. 圧入流量の影響

回収した二酸化炭素をすべて圧入するためには、圧入流量 I (ton/h) は二酸化炭素回収量 q (ton/h) よりも大きくなければならない。

$$I > q \quad (20)$$

式(20)と式(12)の2式が圧入流量の必要条件を定めている。

また、式(4)から I が大きくなればなるほど洋上作業時間 h_i (h) が小さくなり、式(1)、式(7)より輸送船に対する制限が緩和される。そこで本項では圧入流量の変化によってどの程度輸送コストに差が出るのかをシミュレーションを用いて算出した。

- ・ シミュレーション期間は 366 日
- ・ 二酸化炭素回収量 $q=490$ ton/h 固定
- ・ 輸送距離 $L=200$ km, 1000 km
- ・ 船速 $v=27.78$ km/h (15 kt)
- ・ ローディング・圧入準備、また港・圧入サイトでの出発準備時間 $T_p, T_q=4$ h
- ・ 港・圧入サイト、24 h 利用可能

以上の条件の下でシミュレーションを行う。

この条件の時、式(12)、式(20)からそれぞれ $L > 337 \text{ km}$, $L > 490 \text{ km}$ が導き出される。

そこで圧入量は

- ① 回収流量の 10%増, $F=539 \text{ ton/h}$
- ② 回収流量の 20%増, $F=588 \text{ ton/h}$
- ③ 回収流量の 30%増, $F=637 \text{ ton/h}$
- ④ 回収流量の 40%増, $F=686 \text{ ton/h}$
- ⑤ 回収流量の 50%増, $F=735 \text{ ton/h}$

の 5 つを用いる。

また輸送距離による影響を見るために $L=200 \text{ km}$, $L=1000 \text{ km}$ でのシミュレーションを行った。

2.5.1. 輸送距離 200 km

輸送距離 $L=200 \text{ km}$ で圧入量を①～⑤まで変えた時のシミュレーション結果を示す。この際、①～⑤の Total Cost が最小となる積載可能量, 隻数, FCS , TBA での結果を示す。それぞれの組み合わせを Table 2-10 に、Total Cost の比較を Fig. 2-27 に示す。

Table 2-10 圧入量別の Total Cost 最小の組み合わせ($L=200 \text{ km}$)

圧入流量(ton/h)	DWT(ton)	隻数	FCS (h)	TBA (h)
①539	22000	2	22	22
②588	12000	2	15	20
③637	10000	2	15	18
④686	10000	2	15	17
⑤735	9000	2	10	16

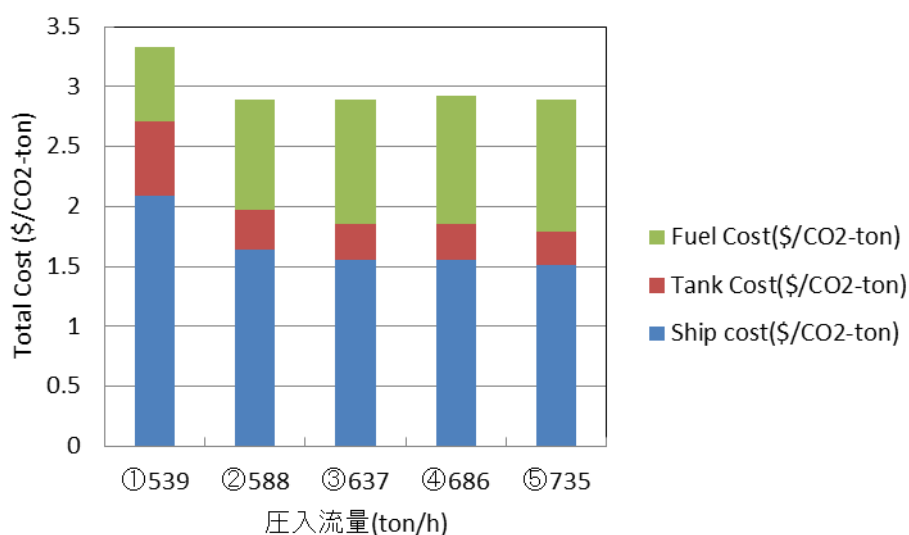


Fig. 2-27 圧入流量が Total Cost へ与える変化($L=200 \text{ km}$)

圧入流量が大きくなると要求される積載可能量が小さくなり、Ship Cost が抑えられる一方で、輸送船の往復回数が増え Fuel Cost は増大する。①と②～⑤を比較すると Ship Cost の減少が大きく響き Total Cost も減少していることがわかる。また、②～⑤では Ship Cost の減少と Fuel Cost の増大が打ち消しあうように働きほとんど変化は見られない。

2.5.2. 輸送距離 1000 km

輸送距離 $L=1000$ km で圧入量を①～⑤まで変えた時のシミュレーション結果を示す。この際、①～⑤の Total Cost が最小となる積載可能量、隻数、FCS、TBA の組み合わせを Table 2-11 に、結果を Fig. 2-28 に示す。

Table 2-11 Total Cost 最小の組み合わせ($L=1,000$ km)

圧入流量(ton/h)	DWT(ton)	隻数	FCS (h)	TBA (h)
①539	37000	2	59	68
②588	35000	2	59	66
③637	33000	2	59	66
④686	32000	2	59	74
⑤735	31000	2	59	76

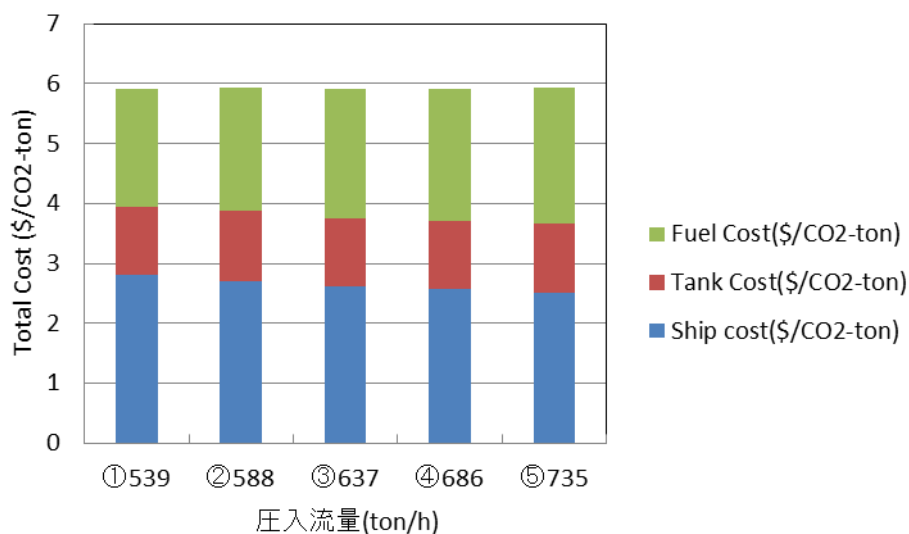


Fig. 2-28 圧入流量が Total Cost へ与える変化($L=1,000$ km)

圧入流量が大きくなると要求される積載可能量が小さくなり、Ship Cost が抑えられる一方で、輸送船の往復回数が増え Fuel Cost は増大する。しかしながら、Ship Cost の減少と Fuel Cost の増大が打ち消しあうように働きほとんど変化は見られない。

以上より圧入流量を大きくすると輸送距離に関わらず要求される積載可能量はちいさくなることが示された。また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

どないことがわかった。

2.6. まとめ

本章では、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と、その妥当性の確認を行った。

さらに船舶輸送型 CCS のパラメータである、港・圧入サイトの利用可能時間と圧入流量に関して考察を行った。

次章以降では、本モデルを用いて計算・分析を行う。

第3章 二酸化炭素回収量変動

3.1. 二酸化炭素回収量時間変動モデル

本章では二酸化炭素回収量の時間変動を考慮する。そのため二酸化炭素回収量の時間変動モデルを作成した。下図に二酸化炭素回収量推定の概念図を示す。



Fig. 3-1 二酸化炭素回収量推定の概念図

まず電源構成を火力発電，原子力発電，風力発電，太陽光発電，その他の5つに大別し，それぞれに総発電電力量に占める比率を割り振る。この際資源エネルギー庁による原子力発電比率に応じた3つのシナリオ^[14] (Table 3-1) と再生可能エネルギーの導入内訳^[15] (Table 3-2) を参考にした。このシナリオは原子力発電割合を0%，15%，20～25%としたときの発電量比率を定めたものである。

Table 3-1 2030年における3つのシナリオ¹⁴

	2010年	2030年		
原子力	26%	0%	15%	20～25%
再生可能	10%	35%	30%	30～35%
化石燃料	63%	65%	55%	50%

Table 3-2 再生可能エネルギー導入内訳¹⁵

再生可能エネルギー割合	風力	太陽光	地熱	水力	バイオマス
35%	12%	6%	4%	11%	3%
30%	7%	6%	3%	11%	3%
25%	3%	6%	3%	11%	3%

この中で火力発電以外の発電量を推定し，電力使用実績との差分を取ることで，火力発電に求められる必要火力発電量を求め，二酸化炭素の排出量（回収量）を算出する。本研究では，風力発電量と太陽光発電量を実際の風力データ，日射量データから時間変動を踏まえた形で算出した。原子力発電，その他に含まれる発電（地熱，水力，バイオマス）は一定とした。

3.1.1. シナリオの構築

本研究で用いた電源構成シナリオを Table 3-3 に示す。原子力発電の稼働を0%とし，火力発電割合が65%となる条件下での二酸化炭素回収量を求める。

Table 3-3 本研究で用いた電源構成シナリオ

	火力	原子力	風力	太陽光	その他
電源構成	65%	0%	12%	6%	17%

また本研究ではエリアとして東京電力を想定し、電力使用実績データを用いた。風速データ、日射量データは銚子のものを使用した。銚子では東京電力が 2009 年 8 月より、NEDO(独立法人新エネルギー・産業技術総合開発機構)から受託した「洋上風況観測システム実証研究」を国立大学法人東京大学と、2010 年 6 月から、「洋上風力発電システム実証研究」を NEDO と共同で行っている^[16]。本研究でのエリア設定を Table 3-4 に示す

Table 3-4 本研究でのエリア設定

電力使用実績データ	東京電力
風速データ	銚子
日射量データ	銚子

また、二酸化炭素を回収する火力発電所として常陸那珂発電所を選択した。常陸那珂発電所の概要を Table 3-5 に表にしめす。

Table 3-5 常陸那珂火力発電所概要

	出力(kW)	ボイラーt/h	タービン(kW)	発電機(kVA)	使用燃料
常陸那珂発電所	1,000,000	2,870	1,000,000	1,163,000	石炭

本研究では震災後の 2012 年における電力使用実績、風速データ、日射量データを用い、2012 年ゼロシナリオとして二酸化炭素回収量を算出した。まず東京電力全体での必要火力発電量を算出し、常陸那珂発電所の発電量を求め、二酸化炭素回収量を推定する。2012 年の東京電力発電実績の合計は 29462147 万 kWh となっている。2012 年 6 月 9 日から 2012 年 6 月 11 日までの 3 日間の電力使用実績を Fig. 3-2 に示す。

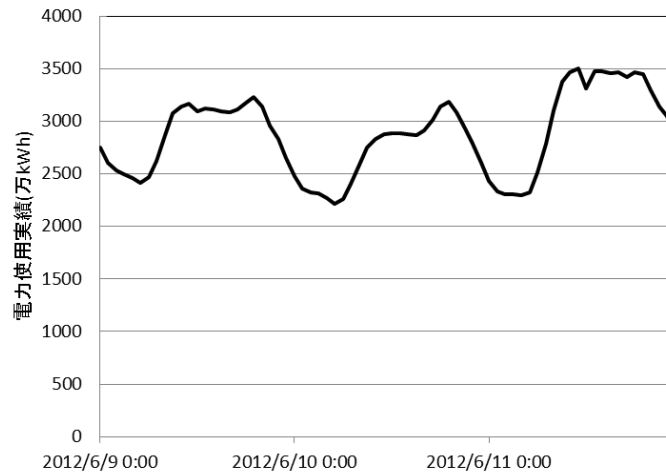


Fig. 3-2 東京電力, 電力使用実績 (2012年6月9日～2012年6月11日)

3.1.2. 風力発電量の算出

風のエネルギーは風速の3乗に比例している。風速を風車の出力曲線に合わせることで風力発電量を算出する。

風車には設計風速(定格風速)と定格出力, Cut-In 風速, Cut-Out 風速が与えられている。出力は Cut-In 風速から増大し, 定格風速において最大値(定格出力)をとる。定格風速以上においてはピッチ制御によって風を受け流し出力を定格出力に保つ。

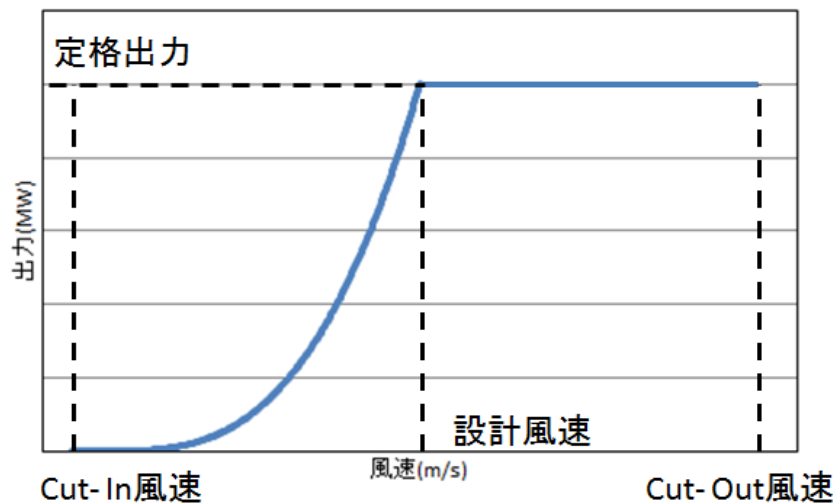


Fig. 3-3 風車出力曲線

本研究では、銚子で行われる洋上システム実証研究にて用いられる定格出力 2400kW の三菱重工製風車, MWT92/2.4 と藤岡が設計した定格出力 5MW の風車^[17]を用いて風力発電量を推定した。それぞれの風車の仕様と出力曲線を Table 3-6, Table 3-7, Fig. 3-4, Fig. 3-5 5MW 風車の出力曲線 17 に示す。

Table 3-6 MWT92/2.4 の仕様^[18]

風車型式	水平軸プロペラ式ピッチ制御風車	カットイン風速	3.0 m/s
定格出力	2400 kW	カットアウト風速	25.0 m/s
ロータ径	92 m	カットアウト・リセット風速	20 m/s
ハブ高さ	70 m	ロータ回転速度 (発電時)	9.0 ~ 16.9 rpm
出力調整方法	独立ピッチ制御、可変速制御	定格回転速度	15.0 rpm
ヨー制御	発電時:アップウインド強制方位制御 強風停止時:ダウンウインド方位制御	トランス	乾式 690V/22kVまたは 34.5kV 2700kVA
設計風車クラス	IEC クラス II A (最大風速 70m/s)	発電機	二次励磁式三相誘導 2520kW, 690V
定格風速	12.5 m/s	周波数	60Hz (50Hz)

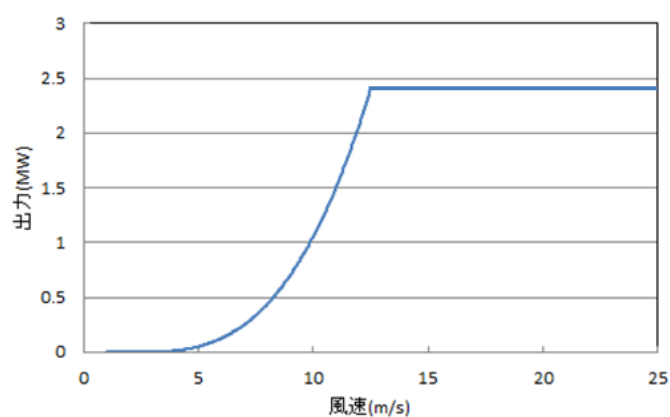


Fig. 3-4 MWT92/2.4 の出力曲線

Table 3-7 5MW 風車の仕様¹⁷

Item	Value	Unit	Item	Value	Unit
Output Power	5	MW	Attack Angle	6.2	degree
Blade Num.	3	-	Cut-In Wind Velocity	4	m/sec
Diameter of Rotor	120	m	Cut-Out Wind Velocity	25	m/sec
Rotor Mass	110	ton	Blade Thickness Ratio	0.15	-
Airfoil	M-F071	-	Pitch Control Interval	1.0	sec

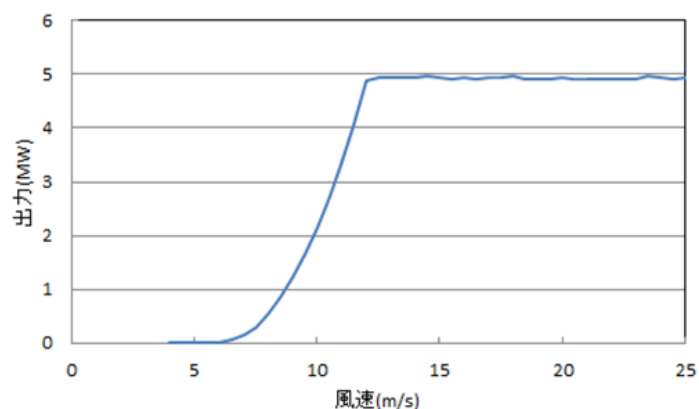


Fig. 3-5 5MW 風車の出力曲線¹⁷

風速データは気象庁による気象統計情報から 2012 年の 1 時間刻みの、計 8784 個のデータを用いた。これらの風速データを風車出力曲線に合わせることで風車一基当たりの発電量を求める。2012 年 6 月 9 日から 2012 年 6 月 11 日までの 3 日間の風速と、2.4MW 風車、5MW 風車一基による出力を Fig. 3-6, Fig. 3-7 に示す。

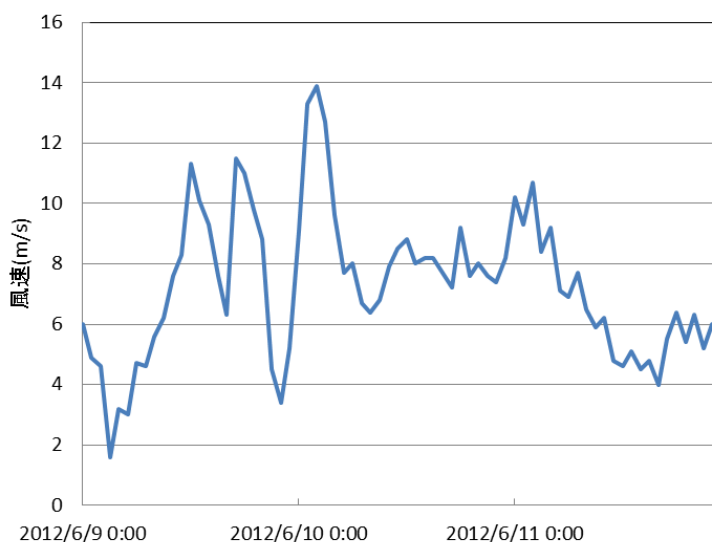


Fig. 3-6 銚子の風速データ(2012 年 6 月 9 日～2012 年 6 月 11 日)

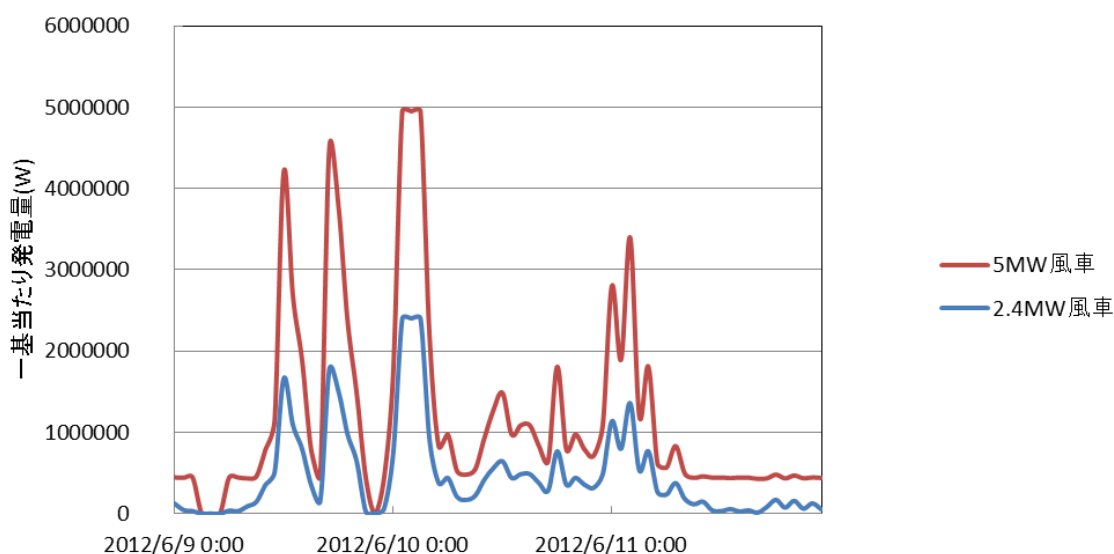


Fig. 3-7 風車一基による出力(2012 年 6 月 9 日～2012 年 6 月 11 日)

これら 2 つの風車は Cut-In 風速は 2.4MW 風車は 3m/s , 5MW 風車は 4m/s と異なるものの、設計風速はともに 12.5m/s , であることから一基当たりの発電量としては 5MW 風車が優位である。また上のように求めた風車一基あたりの銚子での総発電量と常に定格出力で稼働した場合の総発電量をみると 5MW 風車の方が効率よく出力していることがわかる (Table 3-8).

Table 3-8 それぞれの風車の総発電量と定格出力での発電量

	銚子での総発電量(MWh)	定格出力での総発電量(MWh)	割合
2.4MW風車	3040	21082	14%
5MW風車	7729	43920	18%

そこで本研究では 5MW 風車を用いた際の発電量を風力発電量として用いた。次に風車の必要基数を算出する。必要基数は、

$$\text{風車必要基数} = \frac{\text{東京電力の総発電実績}}{\text{風車一基当たりの発電量}} \times \text{風力発電の比率}$$

と表すことができ、算出した東京電力の総発電実績と風車一基当たりの発電量、2012 年ゼロシナリオにおける風力発電の比率 12%を代入すると、必要基数は 4575 基と求まる。必要基数を上で求めた一基当たり発電量にかけ、時間変動を考慮した風力発電量を求めた。Fig. 3-8 に 2012 年 6 月 9 日から 2012 年 6 月 11 日までの 3 日間の風力発電量を示す。風力発電の昼夜を問わない不規則性がみられた。

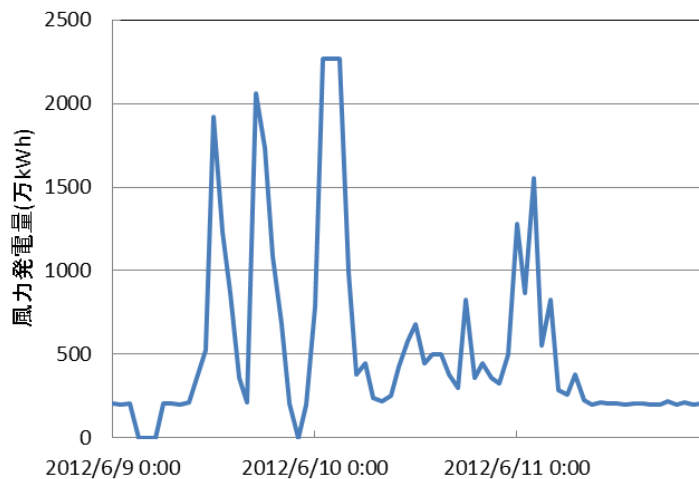


Fig. 3-8 風力発電量の推移(2012 年 6 月 9 日～2012 年 6 月 11 日)

3.1.3. 太陽光発電量の算出

太陽光発電量は日射量に比例する。

$$\text{太陽光発電量} = \text{太陽光発電容量} \times (1 - \text{温度ロス}) \times (1 - \text{その他のロス}) \times \text{日射量}$$

このことから、日射量以外を係数として扱うことで必要太陽光発電量を算出する。日射量データも気象庁による気象統計情報から 2012 年の 1 時間刻みの、計 8784 個のデータを用いた。2012 年 6 月 9 日から 2012 年 6 月 11 日までの 3 日間の日射量を Fig. 3-9 に示す。

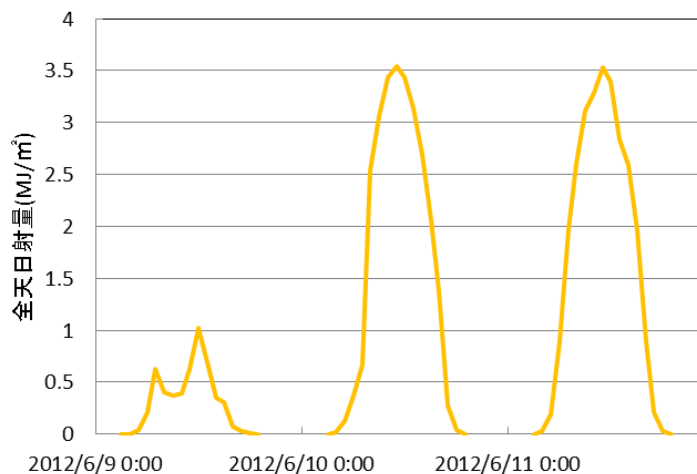


Fig. 3-9 銚子の日射量データ(2012年6月9日～2012年6月11日)

太陽光発電量を求めるために必要な係数は、

$$\frac{\text{東京電力の総発電実績}}{\text{日射量の合計}} \times \text{太陽光発電の比率}$$

と表すことができ、東京電力の総発電実績、日射量の合計、2012年ゼロシナリオにおける風力発電の比率 6%を代入すると 333.9 と求まる。この係数を日射量にかけ、時間変動を考慮した太陽光発電量を求めた。Fig. 3-10 に 2012年6月9日から2012年6月11日までの3日間の太陽光発電量を示す。太陽光発電量は太陽が出ている昼間に大きくなり、太陽が沈む夜にはゼロとなる。これは昼間に大きくなり夜に小さくなる電力使用実績と相関はとれる。

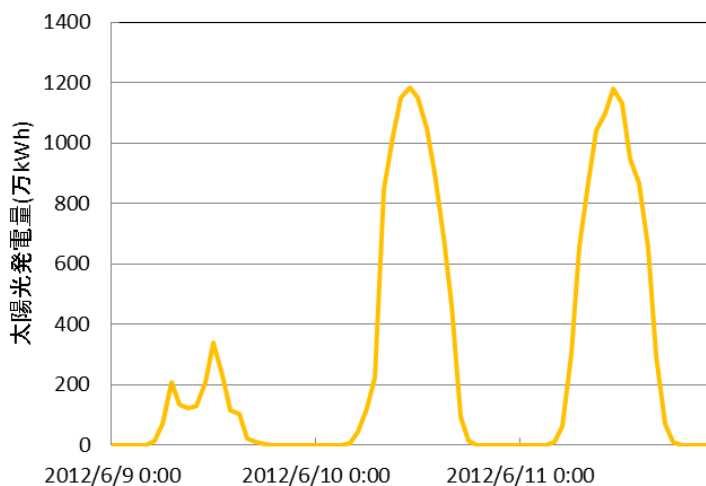


Fig. 3-10 太陽光発電量の推移(2012年6月9日～2012年6月11日)

3.1.4. 二酸化炭素回収量

電力使用実績と 2.1.2, 2.1.3 で求めた風力発電量, 太陽光発電量, またシナリオで設定した原子力発電量, その他の発電量を用いて必要火力発電量を算出する. 2012 年ゼロシナリオにおける電力需給図(2012 年 6 月 9 日から 2012 年 6 月 11 日までの 3 日間)を Fig. 3-11 に示す.

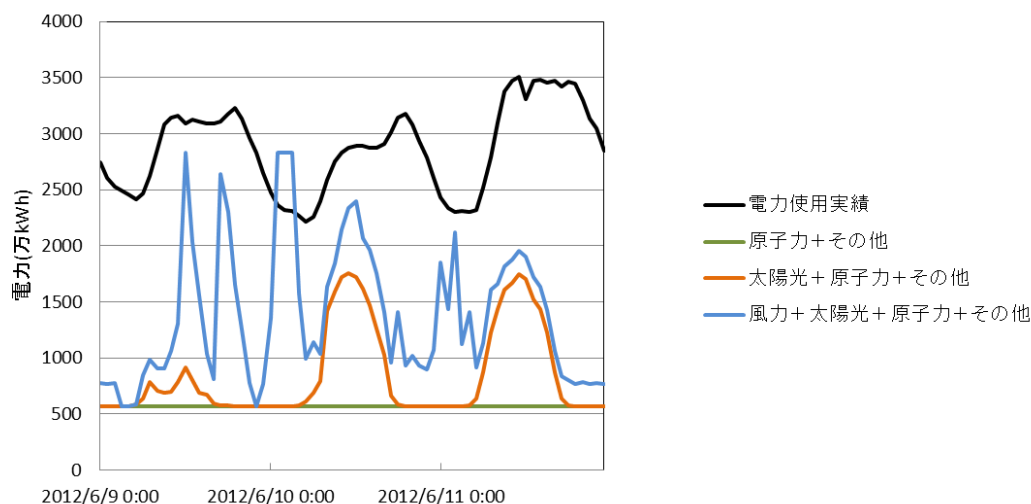


Fig. 3-11 2012 年ゼロシナリオにおける電力需給図(2012 年 6 月 9 日～2012 年 6 月 11 日)

原子力発電とその他の発電は全体の 17%となるよう一定とし, その上に太陽光発電量を加えた発電量, さらにその上に風力発電量を加えたもの, すなわち火力発電量以外の発電による発電量となっている.

必要火力発電量を求めるには電力使用実績から火力発電以外の発電による発電量を引けばよい. もとめた必要火力発電量(2012 年 6 月 9 日から 2012 年 6 月 11 日までの 3 日間)を Fig. 3-12 に示す. この際火力発電以外の発電量が需要を上回っている期間に関しては, 火力発電量をゼロとして算出した.

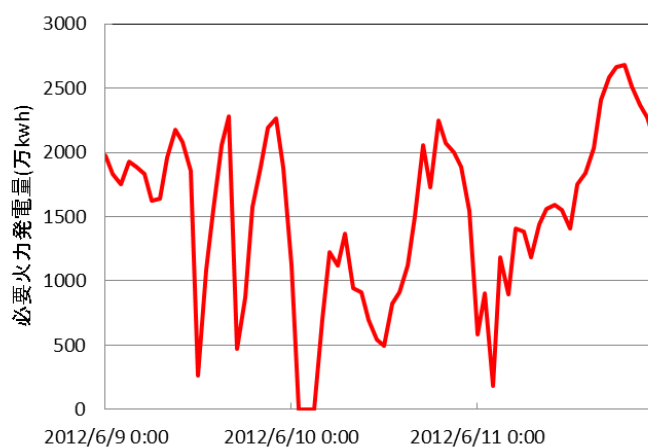


Fig. 3-12 必要火力発電量(2012 年 6 月 9 日～2012 年 6 月 11 日)

東京電力内の火力発電所全てでこの必要火力発電量をまかなうとすると、常陸那珂発電所における発電量は

$$\frac{\text{常陸那珂発電所出力}}{\text{東京電力内の火力発電所の総出力}} \times \text{必要火力発電量}$$

となる。ここで東京電力内の火力発電所が上で求めた東京電力全体での火力発電量同様に変動するとしたときの常陸那珂火力発電所における発電量を算出した。2012年6月9日から2012年6月11日までの3日間の発電量は Fig. 3-13 のようになる。

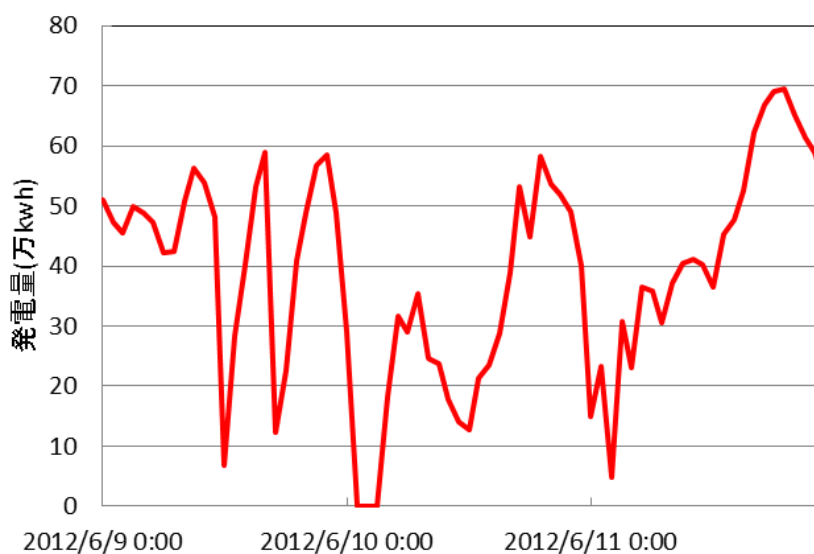


Fig. 3-13 常陸那珂火力発電所における火力発電量(2012年6月9日～2012年6月11日)

ここで火力発電の燃料別 CO2 排出量は Table 3-9 のようになることから、常陸那珂発電所における時間変動を考慮した二酸化炭素回収量(排出量)を推定した。2012年6月9日から2012年6月11日までの3日間の二酸化炭素回収量は Fig. 3-14 のようになる。

Table 3-9 燃料別二酸化炭素排出量^[19]

	LNG火力(複合)	LNG火力(汽力)	石油火力	石炭火力
LC-CO2排出量(直接分)(g-CO2/kWh)	376	476	695	864

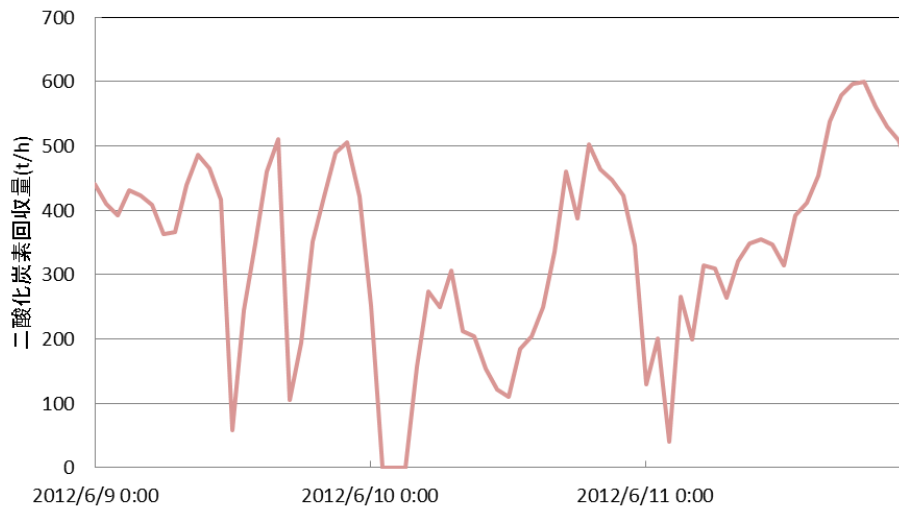


Fig. 3-14 二酸化炭素回収量(2012年6月9日～2012年6月11日)

これにより、2012年ゼロシナリオにおける1時間ごとの二酸化炭素回収量のモデルが完成した。

3.2. シミュレーションへの反映

二酸化炭素回収量変動による船舶輸送方式型 CCS への影響を見るために時系列物流シミュレーションを行う。前項で得られた1時間ごとの二酸化炭素回収量データを用いて変動影響を調べる。

シミュレーション条件を以下に示す。

- シミュレーション期間は366日
- 船速 $v=27.78$ km/h (15 kt)
- ローディング・圧入準備, また港・圧入サイトでの出発準備時間 $T_p, T_q=4$ h
- 港・圧入サイト, 24 h 利用可能

また二酸化炭素回収量の入力として, 3.1 で1時間ごとの二酸化炭素回収量データから次の4つを用いる。

- ① 年平均固定・・・1時間ごとのデータの1年を通した平均値で固定
- ② 確率分布・・・1年を通した1時間ごとのデータをすべて集め平均値, 標準偏差を求め, 正規分布に従う数値を毎時間ごとに回収する
- ③ 月別時系列・・・月別の平均回収量を求め1カ月ごとに回収量を変更する。
- ④ 日別時系列・・・日別に1日ごとに回収量を変更する。

それぞれの回収量の概要を以下に示す。

- ①3.1 で算出した1時間ごとの回収量の平均値は490 ton/hであった。
- ②3.1 で算出した1時間ごとの回収量の平均値は490 ton/h, 標準偏差は183 ton/hであった。

③3.1 で算出した 1 時間ごとの回収量の月別の平均回収量 Fig. 3-15 を示す。この平均回収量を 1 月から 12 月まで 1 カ月ごとに変更しシミュレーションを行う。

④3.1 で算出した 1 時間ごとの回収量を 24 時間ごとに平均化して 1 月 1 日～12 月 31 日まで 1 日ごとに変更しシミュレーションを行う。

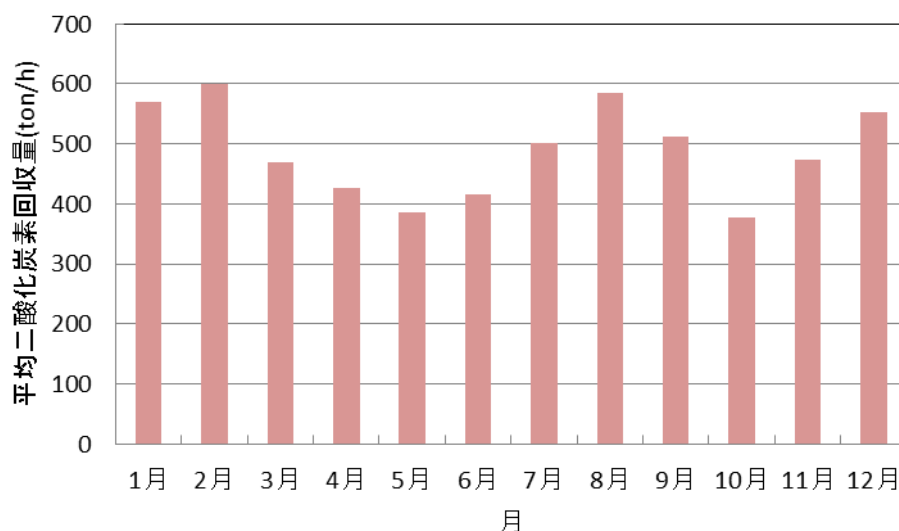


Fig. 3-15 月別の平均二酸化炭素回収量

さらに輸送距離と圧入流量の影響を調べるために次の条件を用いた。

輸送距離

- $L=200$ km
- $L=1,000$ km

圧入流量

- $I=588$ ton/h (年平均回収量 490 ton/h の 20%増)
- $I=720$ ton/h(平均回収量が最大の月-2月の回収量 600 ton/h の 20%増)

以上の条件の下でシミュレーションを行う。

3.3. 時系列物流シミュレーションによる回収量変動の影響分析

3.3.1. 二酸化炭素回収量変動による輸送システムへの影響

二酸化炭素回収量の変動の影響を明らかにするために、①の年平均回収量における適切な輸送システムを構築したのち、そのシステムにおいて、二酸化炭素回収量を変動させたシミュレーションを行う。

3.3.1.1. 輸送距離 200 km, 圧入流量 588 ton/h

二酸化炭素回収量を①に設定した際、Total Cost が最小となるような積載可能量, 隻数, FCS , TBA の組み合わせは, $W=12,000$ ton, 隻数 $m=2$, $(FCS, TBA)=(15, 20)$ であった。こ

の組み合わせを用いて回収量を①～④にかえた時の影響をみる。Total Cost の変化を Fig. 3-16 に示す。②については乱数によって様々な回収量が設定されるのでシミュレーションを 10 回行い Total Cost の平均と最小値, 最大値を示す。

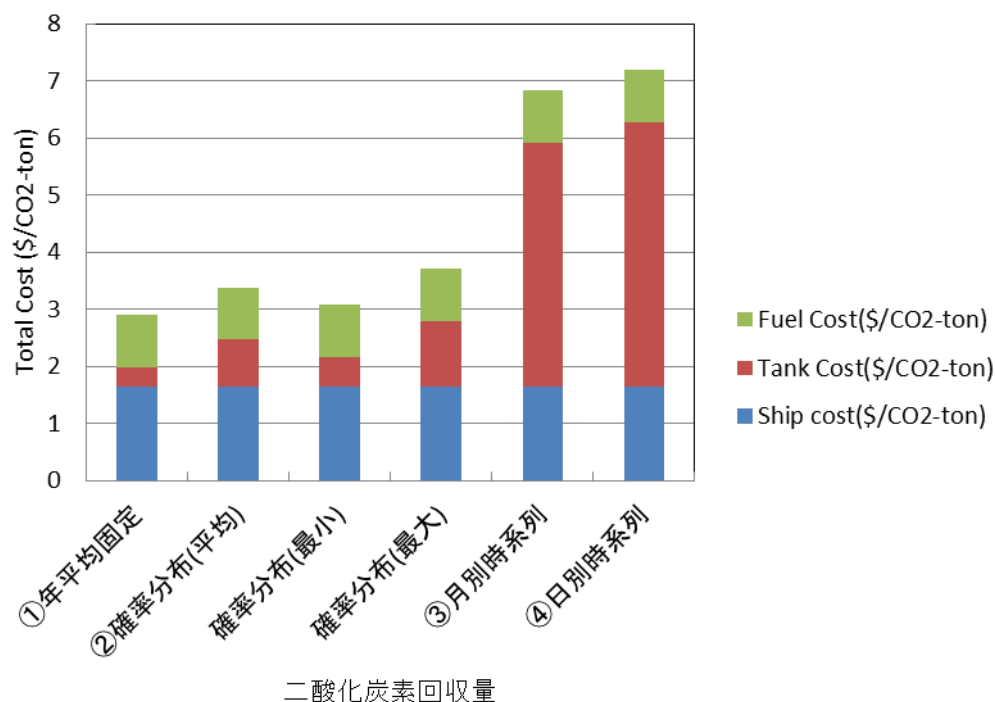


Fig. 3-16 二酸化炭素回収量変動による Total Cost の変化($L=200$ km, $F=588$ ton/h)

②の確率分布に関しては、ばらつきはあるものの、Total Cost が最小となるものでも①の年平均固定を上回っている。年平均固定の回収量に合わせた輸送船の設計では、1 時間おきの変動であろうとも吸収することができないことがわかる。

③、④の年間を通した変動を考慮した回収量設定では Tank Cost が非常に大きくなっていることがわかる。③と④を比べるとわずかではあるが④の日別時系列の方が Tank Cost が大きくなっている。

そこでタンク内二酸化炭素量の変動を見てみる。タンク内二酸化炭素量の推移を Fig. 3-17 に示す。②については 10 回のシミュレーションで Total Cost が最小と最大になった 2 つのシミュレーション結果を示す。

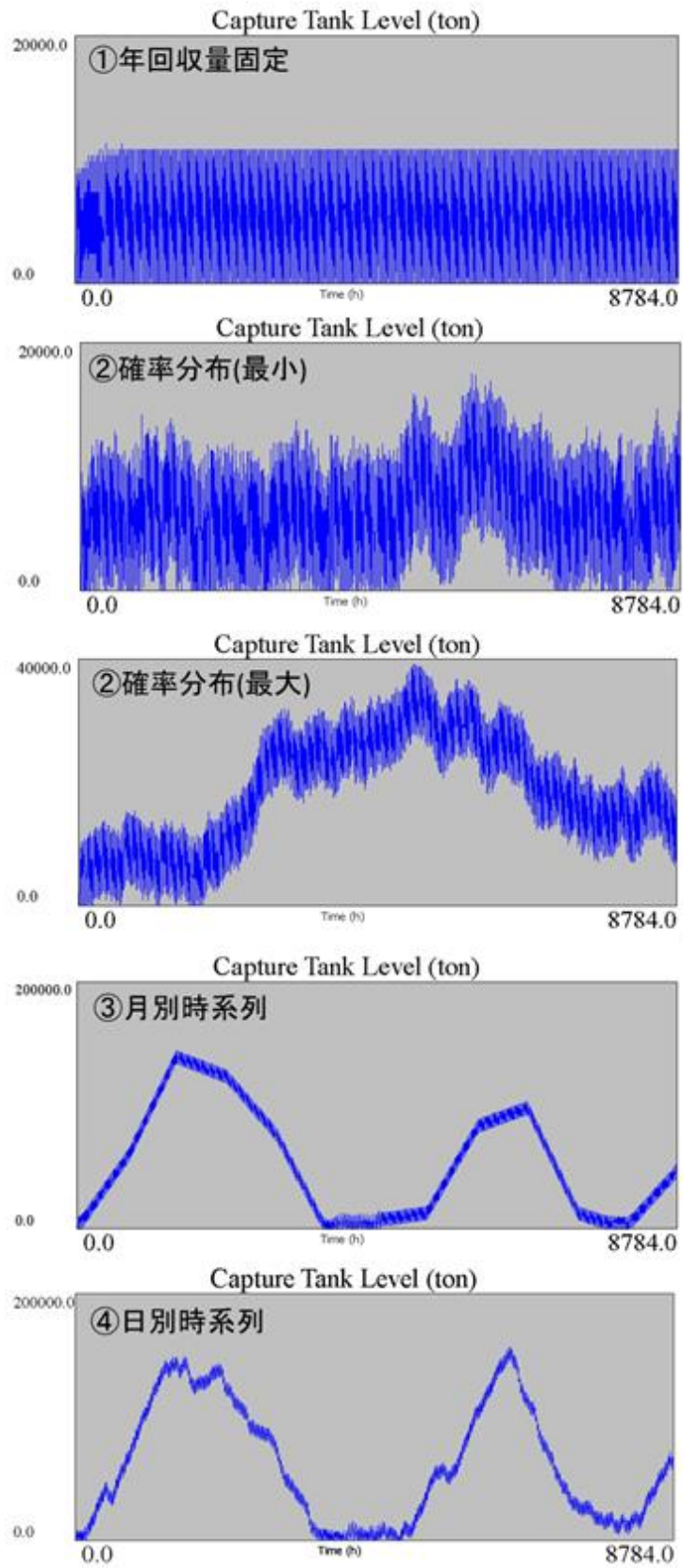


Fig. 3-17 回収量別のタンク内二酸化炭素量の推移($L=200$ km, $F=588$ ton/h)

②を見ると回収量の変動に合わせて、タンク内の二酸化炭素量が変動していることがわかる。これは平均と分散からランダムで回収量を変動させたものであるが、100回のシミュレーションを行ったなかでの最大でも必要タンク容量は年回収量固定の5倍以下となっており、年変動が考慮されている③④に比べると影響は小さいといえる。

③、④に関してはどちらも年間の変動の影響を大きく受け推移していることがわかる。④は日別変動のため、二酸化炭素回収量が大きい日が続くとタンク内二酸化炭素量も大きくなるといった、より細かい変動も組み込まれていることもわかる。二酸化炭素回収量の増減はある程度のまとまりをもって発生し、時間刻みを小さくすればするほどまとまりが顕著に表れ、コストの増加につながることを示されている。しかしながら季節変動の影響よりは、極めて小さいといえる。③に注目すると一カ月ごとの傾きの変化が読み取れる。月別の平均二酸化炭素回収量と年平均回収量の差を Fig. 3-18 に示す。月の回収量が年平均回収量を上回っている月はタンク内二酸化炭素量も増加し、年平均回収量を下回っている月は減少しており、その傾きは年平均回収量との差に比例していることがわかる。

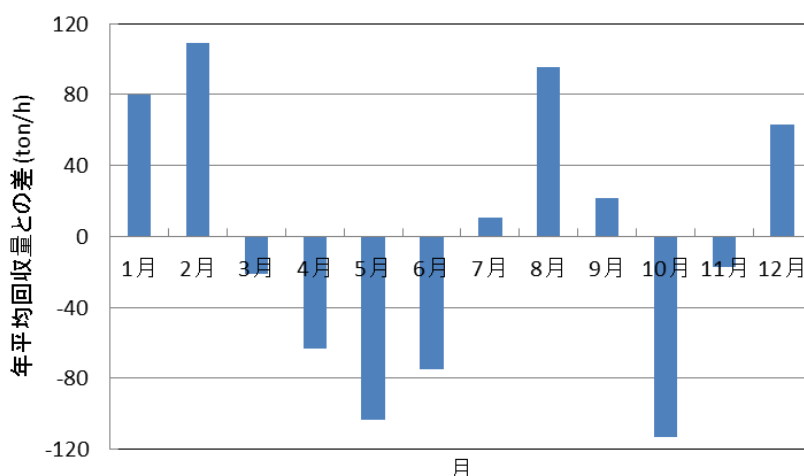


Fig. 3-18 月別の平均二酸化炭素回収量と年平均回収量の差

3.3.1.2. 輸送距離 1,000 km, 圧入流量 588 ton/h

次に輸送距離 $L=1000$ km でのシミュレーション結果を示す。回収量を①に設定した際、Total Cost が最小となるような積載可能量, 隻数, FCS , TBA の組み合わせは、 $W=35,000$ ton, 隻数 $m=2$, $(FCS, TBA)=(59, 66)$ であった。この組み合わせを用いて回収量を①～④にかえた時の影響をみる。Total Cost の変化を Fig. 3-19 に示す。②については乱数によって様々な回収量が設定されるのでシミュレーションを 10 回行い Total Cost の平均と最小値, 最大値を示す。

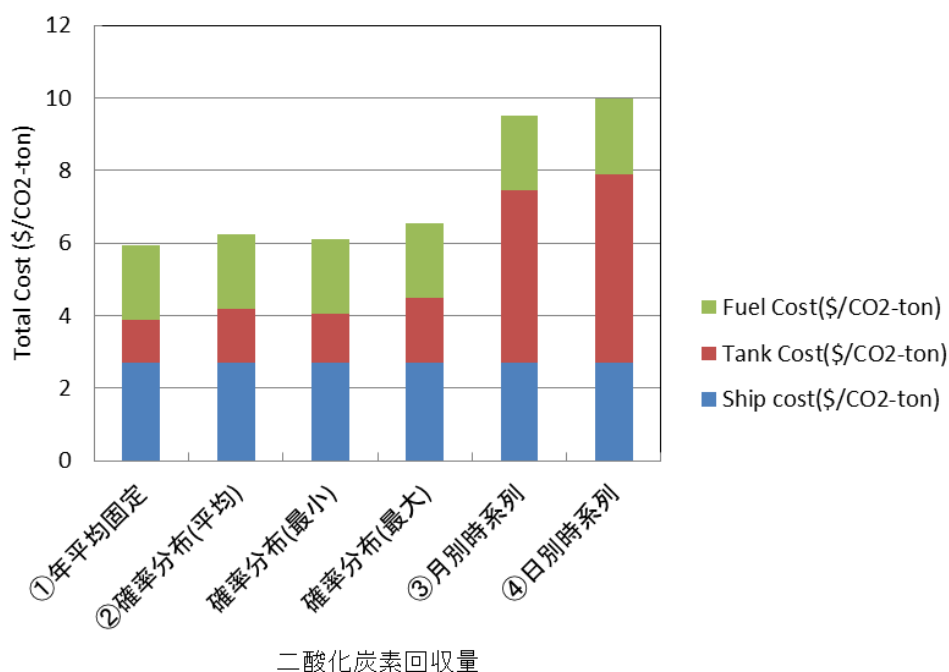


Fig. 3-19 二酸化炭素回収量変動による Total Cost の変化($L=1,000$ km, $F=588$ ton/h)

$L=200$ km と同様に、②の確率分布に関しては、ばらつきはあるものの、Total Cost が最小となるものでも①の年平均固定を上回っている。こちらでも年平均固定の回収量に合わせた輸送船の設計では、1時間おきの変動であろうとも吸収することができないことがわかる。

③、④の年間を通した変動を考慮した回収量設定では Tank Cost が非常に大きくなっていることがわかる。③と④を比べるとわずかではあるが④の日別時系列の方が Tank Cost が大きくなっている。

ここで回収量変動による Total Cost と変動割合を 3.3.1.1 での輸送距離 200 km の結果と合わせて示す (Table 3-10)。輸送距離が長くなることで Total Cost そのものは大きくなっているが、いずれの変動に対しても輸送距離 1,000 km の方が、影響が小さいことがわかる。

Table 3-10 回収量変動による Total Cost の輸送距離別変動割合(圧入流量 588 ton/h)

回収量	輸送距離 200 km		輸送距離 1,000 km	
	Total Cost(\$/CO2-ton)	①に対する割合	Total Cost(\$/CO2-ton)	①に対する割合
①年平均固定	2.890	1.000	5.935	1.000
②確率分布(平均)	3.379	1.169	6.243	1.052
③月別時系列	6.829	2.363	9.516	1.603
④日別時系列	7.201	2.492	9.976	1.681

タンク内二酸化炭素量の推移を Fig. 3-20 に示す。②については Total Cost 最小、最大をとった 2 つのシミュレーション結果を示す。

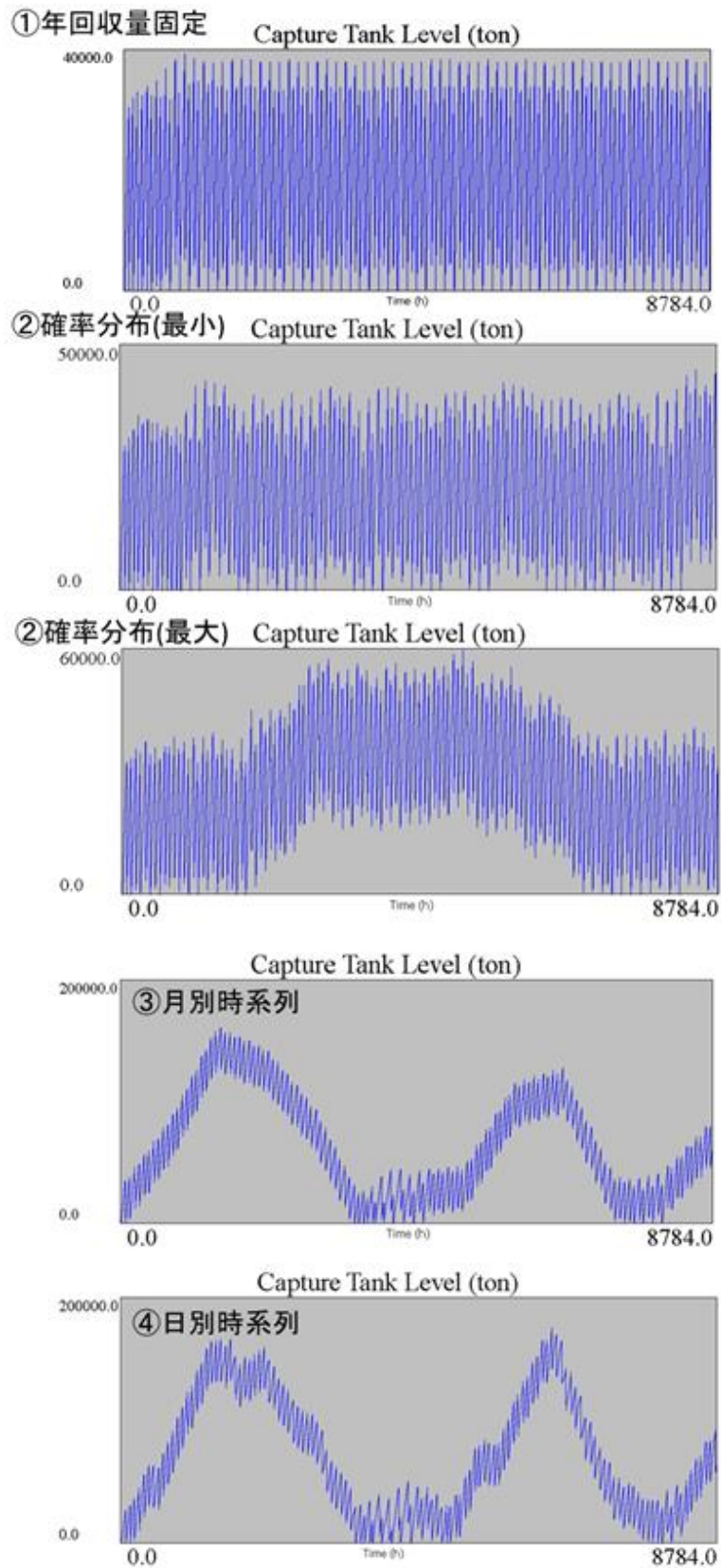


Fig. 3-20 回収量別のタンク内二酸化炭素量の推移($L=1,000$ km, $F=588$ ton/h)

②を見ると回収量の変動に合わせて、タンク内の二酸化炭素量が変動していることがわかるが、年変動が考慮されている③④に比べると影響は小さいといえる。また $L=200$ km に比べて変動は小さいものとなっている。③、④に関してはどちらも年間の変動の影響を受け、推移していることがわかる。④は日別変動のため、二酸化炭素回収量が大きい日が続くとタンク内二酸化炭素量も大きくなるといった、より細かい変動も組み込まれていることもわかる。③をみると一カ月ごとの傾きの変化が読み取れる。

いずれの変動に対しても 3.3.1.1 での輸送距離 200 km の結果である Fig. 3-17 と比較すると変動影響は少ないことが見て取れる。これは輸送距離が長いことで積載可能量を大きく設定しているためであると考えられ、長距離の方が変動に対しては強い、と結論付けられる。

しかしながら、年間の変動影響が大きく、回収量の増加に対応できていないといえる。この理由として、回収量よりも圧入流量が小さくなってしまいう期間が生まれているからであると考えられる。

3.3.1.3. 輸送距離 200 km, 圧入流量 720 ton/h

回収量を①に設定した際、Total Cost が最小となるような積載可能量、隻数、 FCS 、 TBA の組み合わせは、 $W=10,000$ ton, 隻数 $m=2$, $(FCS, TBA)=(17, 17)$ であった。この組み合わせを用いて回収量を①～④にかえた時の影響をみる。Total Cost の変化を Fig. 3-21 に示す。②については乱数によって様々な回収量が設定されるのでシミュレーションを 10 回行い Total Cost の平均と最小値, 最大値を示す。

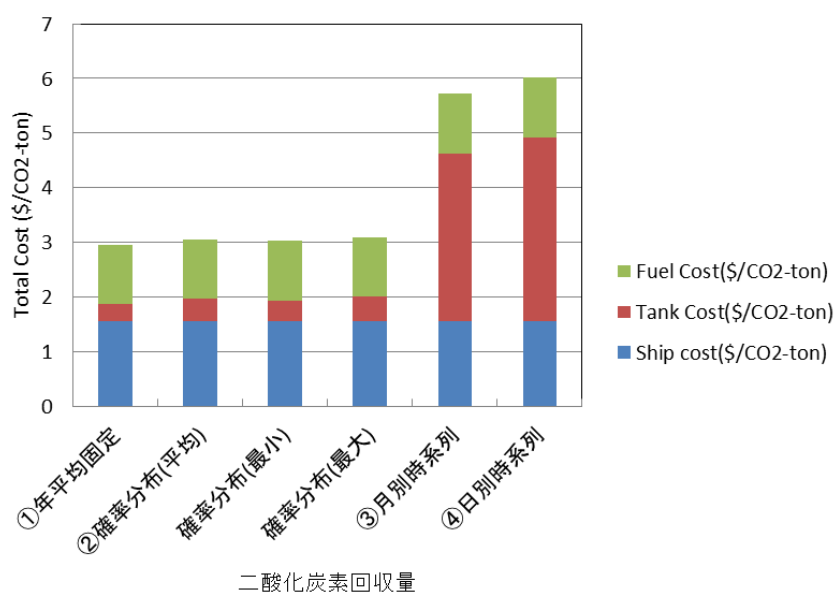


Fig. 3-21 二酸化炭素回収量変動による Total Cost の変化 ($L=200$ km, $I=720$ ton/h)

②の確率分布に関しては、ばらつきはあるものの、Total Cost が最小となるものでも①の年平均固定を上回っている。しかしながら変動影響はわずかである。

③、④の年間を通した変動を考慮した回収量設定では Tank Cost が非常に大きくなっていることがわかり、③と④を比べるとわずかではあるが④の日別時系列の方が Tank Cost が大きくなっている。

ここで回収量変動による Total Cost と変動割合を 3.3.1.1 での輸送距離 200 km, 圧入流量 588 ton/h の結果と合わせて示す (Table 3-11)。いずれの変動に対しても圧入流量が大きい方により変動影響が小さくなっていることがわかる。特に、年間の変動が現れる③、④に関しては顕著である。

Table 3-11 回収量変動による Total Cost の輸送距離別変動割合(輸送距離 200 km)

回収量	圧入流量 588 ton/h		圧入流量 720 ton/h	
	Total Cost(\$/CO2-ton)	①に対する割合	Total Cost(\$/CO2-ton)	①に対する割合
①年平均固定	2.890	1.000	2.957	1.000
②確率分布(平均)	3.379	1.169	3.059	1.034
③月別時系列	6.829	2.363	5.717	1.934
④日別時系列	7.201	2.492	6.026	2.038

次にタンク内二酸化炭素量の変動を見てみる。タンク内二酸化炭素量の推移を Fig. 3-22 に示す。②については Total Cost 最小、最大をとった 2 つのシミュレーション結果を示す。

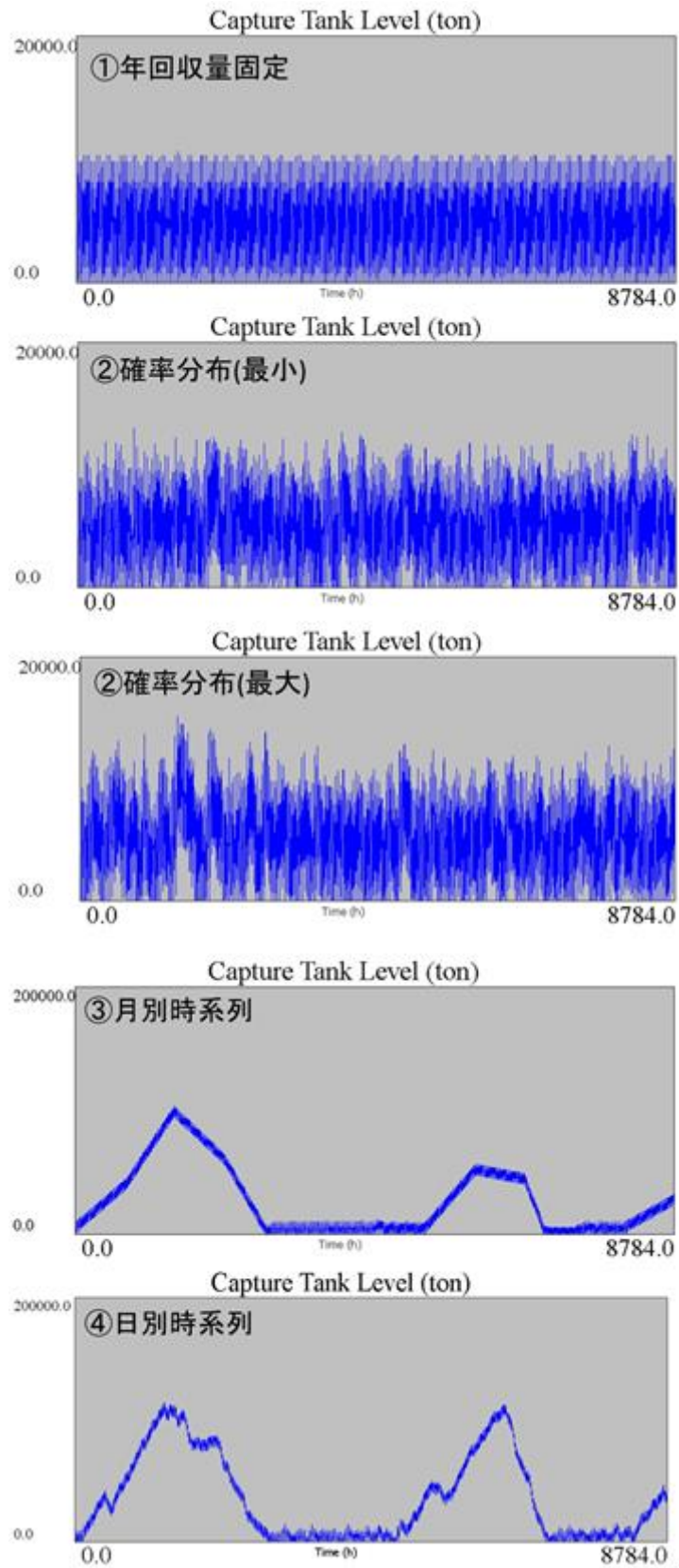


Fig. 3-22 回収量別のタンク内二酸化炭素量の推移($L=200$ km, $F=720$ ton/h)

②をみると回収量の変動に合わせて二酸化炭素量も変動していることが見て取れるが、その変動は圧入流量 $F=588\text{ton}$ の時よりも非常に小さい。③、④では年間の変動の影響が顕著に表れている。

3.3.1.4. 輸送距離 1,000 km, 圧入流量 720 ton/h

次に輸送距離 $L=1,000\text{ km}$, 圧入流量 $F=720\text{ ton/h}$ でのシミュレーション結果を示す。回収量を①に設定した際、Total Costが最小となるような積載可能量、隻数、 FCS , TBA の組み合わせは、 $W=31,000\text{ ton}$, 隻数 $m=2$, $(FCS, TBA)=(59, 66)$ であった。この組み合わせを用いて回収量を①～④にかえた時の影響をみる。Total Costの変化を示す。②については乱数によって様々な回収量が設定されるのでシミュレーションを10回行いTotal Costの平均と最小値, 最大値を示す。

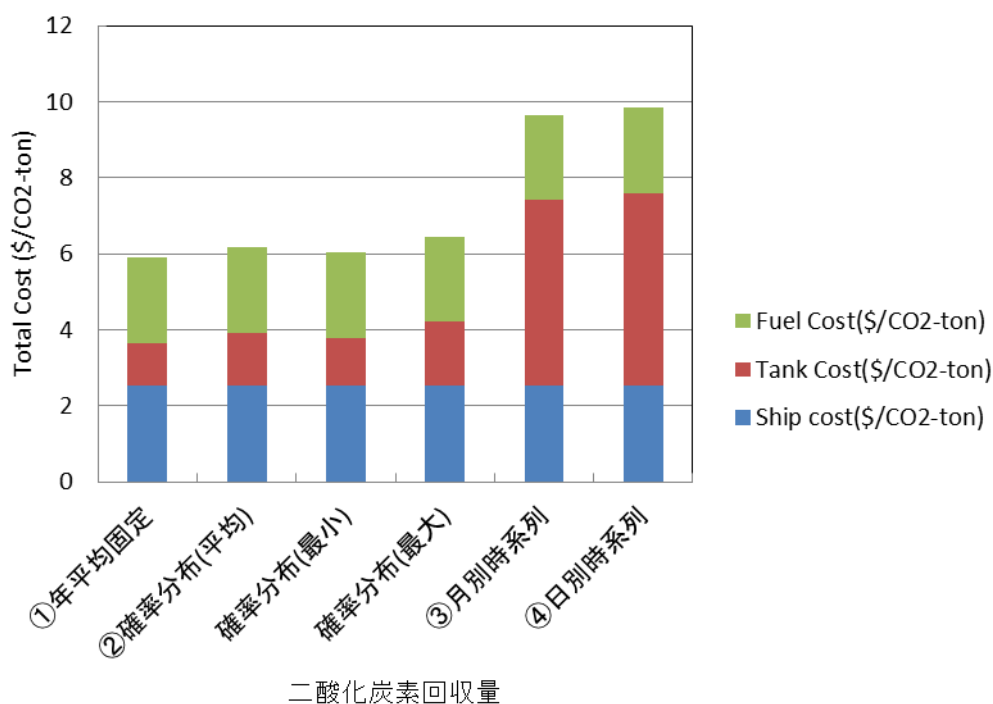


Fig. 3-23 二酸化炭素回収量変動による Total Cost の変化($L=1,000\text{ km}$, $F=720\text{ ton/h}$)

$L=200\text{ km}$ と同様に②の確率分布に関しては、ばらつきはあるものの、Total Costが最小となるものでも①の年平均固定を上回っている。

③、④の年間を通した変動を考慮した回収量設定では Tank Costが非常に大きくなっていることがわかる。③と④を比べるとわずかではあるが④の日別時系列の方が Tank Costが大きくなっている。

ここで回収量変動による Total Costの変動割合を 3.3.1.3での輸送距離 200 kmの結果と

合わせて示す (Table 3-12). 輸送距離が長くなり積載可能量, 輸送量が大きくなることで, 年間変動の影響が大きい③, ④での影響が小さくなっていることがわかる.

Table 3-12 回収量変動による Total Cost の輸送距離別変動割合(圧入流量 720 ton/h)

回収量	輸送距離 200 km		輸送距離 1,000 km	
	Total Cost(\$/CO2-ton)	①に対する割合	Total Cost(\$/CO2-ton)	①に対する割合
①年平均固定	2.957	1.000	5.896	1.000
②確率分布(平均)	3.059	1.034	6.174	1.047
③月別時系列	5.717	1.934	9.650	1.637
④日別時系列	6.026	2.038	9.862	1.673

また, 3.3.1.2 での圧入流量 588 ton/h の結果と合わせて示す (Table 3-13). 圧入流量を大きくすることで Total Cost の値は小さくなっているものの, 回収量の変動に対するコスト増加を防ぐ効果はほとんど見られなかった.

Table 3-13 回収量変動による Total Cost の輸送距離別変動割合(輸送距離 1,000 km)

回収量	圧入流量 588 ton/h		圧入流量 720 ton/h	
	Total Cost(\$/CO2-ton)	①に対する割合	Total Cost(\$/CO2-ton)	①に対する割合
①年平均固定	5.935	1.000	5.896	1.000
②確率分布(平均)	6.243	1.052	6.174	1.047
③月別時系列	9.516	1.603	9.650	1.637
④日別時系列	9.976	1.681	9.862	1.673

そこで, タンク内二酸化炭素量の変動を見てみる. タンク内二酸化炭素量の推移を Fig. 3-24 に示す. ②については Total Cost 最小, 最大をとった 2 つのシミュレーション結果を示す.

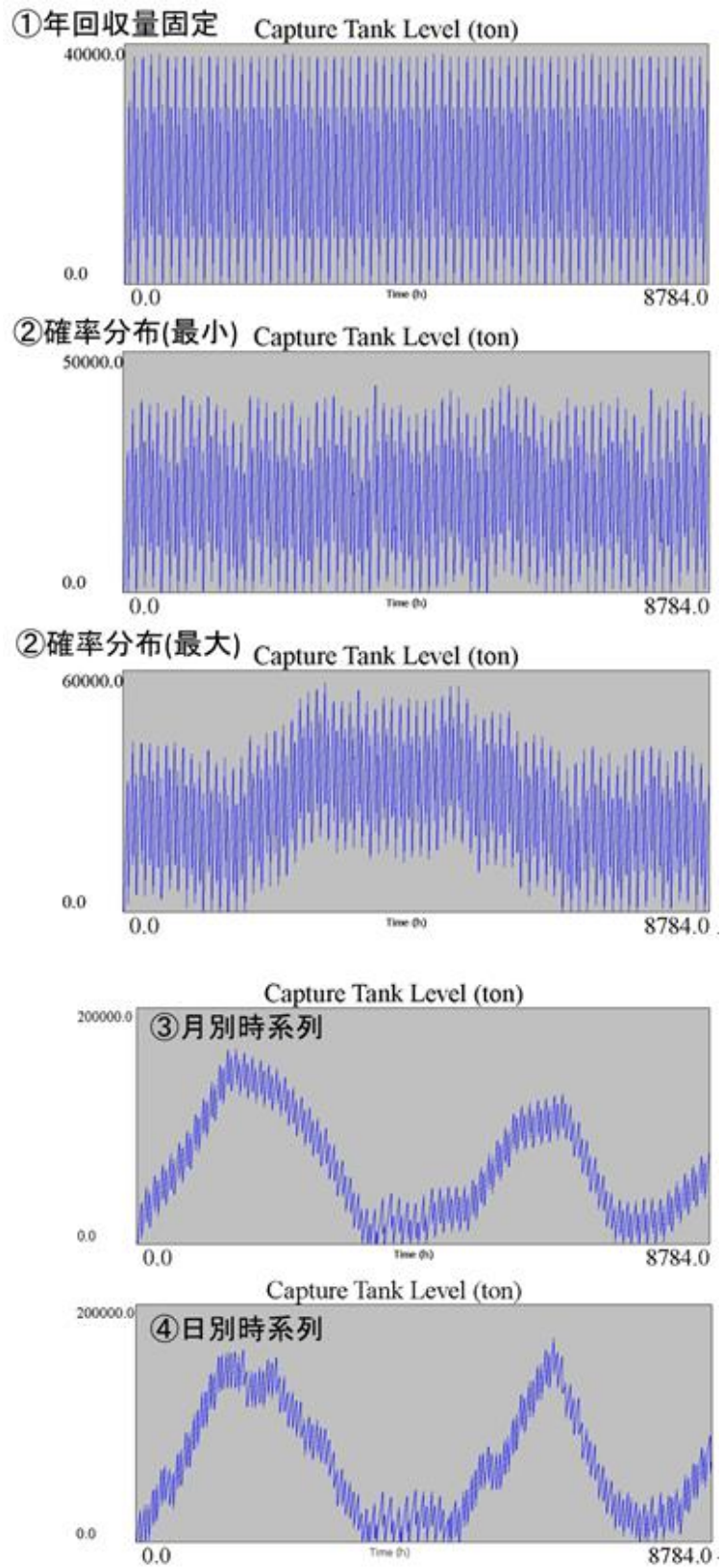


Fig. 3-24 回収量別のタンク内二酸化炭素量の推移($L=1,000$ km, $F=720$ ton/h)

②については回収量の変動によるわずかな変動、③、④については二酸化炭素回収量の年間変動が顕著に表れており、Fig. 3-20における輸送距離 1,000 km 圧入流量量 588 ton/h での二酸化炭素量の推移とほとんど変わることはなく、圧入流量増大の効果がみてとれなかった。

3.3.1.5. まとめ

二酸化炭素回収量変動は輸送システムに対して大きな影響を与えることが示された。その中で②のような細かい変動影響は小さいものの、③、④のような年間の変動影響は非常に大きい。

また、輸送距離が大きいほど二酸化炭素回収量の変動を受けにくく、コストの増加を防げることが示された。さらに圧入流量もコスト増加に関係することが示された。

二酸化炭素排出量の削減を目指すためには、回収量の変動に対応する適切なシステムの構築が必要不可欠となる。

3.3.2. 回収量変動への対応

前項で二酸化炭素回収量の変動影響は非常に大きく、これに対応するシステムの構築が必要であることを述べた。そこで、本項ではどのようなシステムを用いればよいかを考察する。

3.3.2.1. 最大回収量からの検討

年間で 1 番厳しい条件の時に適切な稼働ができるシステムならば年間の変動影響を受ることなく運用できるのではないかと考えた。

そこで二酸化炭素回収量の年間変動に対応するシステムを考察するために次の回収量でシミュレーションを行う。

- ⑤ 年最大固定・・・二酸化炭素回収量を平均回収量が最大の月(2月)の回収量 600 ton/h で固定

この際圧入流量は 720 ton/h とした。

輸送距離 200 km において回収量を⑤に設定した際、Total Cost が最小となるような積載可能量、隻数、FCS, TBA の組み合わせは、 $W=15,000$ ton, 隻数 $m=2$, (FCS, TBA)=(0, 46) であった。この輸送システムは回収量③の最大回収量を許容できるシステムとなっている。このシステムをここでは最大システムと呼ぶこととする。最大システムにおいて、③の月別時系列での二酸化炭素回収量をもちいたシミュレーションを行う。

Fig. 3-25 に Total Cost の変化を、Fig. 3-26 にタンク内二酸化炭素量の推移を示す。

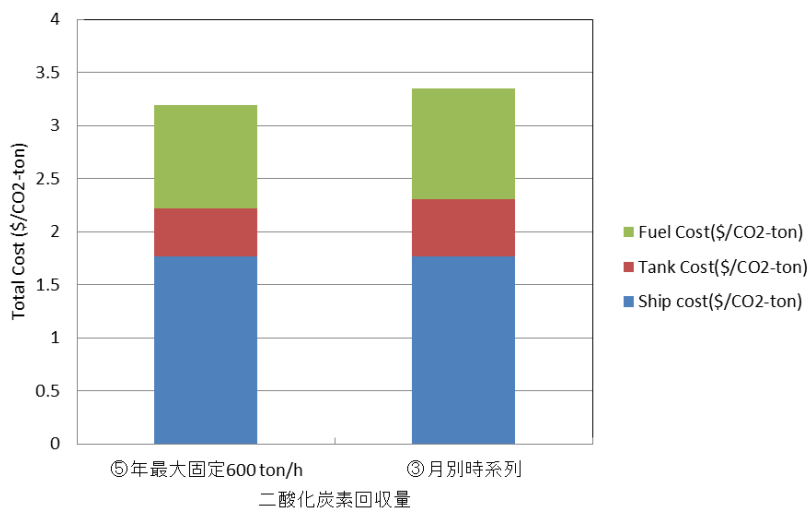


Fig. 3-25 最大システムを用いた時の Total Cost の変化($L=200$ km)

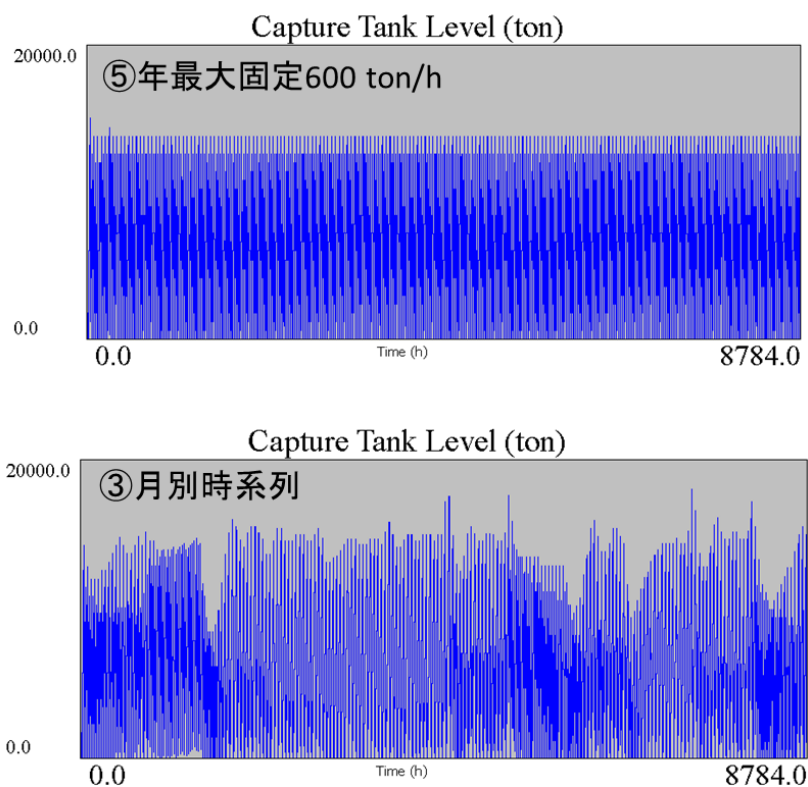


Fig. 3-26 最大システムを用いた時のタンク内二酸化炭素量の推移($L=200$ km)

また輸送距離 1,000 km において回収量を⑤に設定した際, Total Cost が最小となるような積載可能量, 隻数, FCS , TBA の組み合わせは, $W=43,000$ ton, 隻数 $m=2$, $(FCS, TBA)=(65, 66)$ であった. この組み合わせを用いて回収量を③に変えた時の結果をみる. Fig. 3-27 に Total Cost の変化を, Fig. 3-28 にタンク内二酸化炭素量の推移を示す.

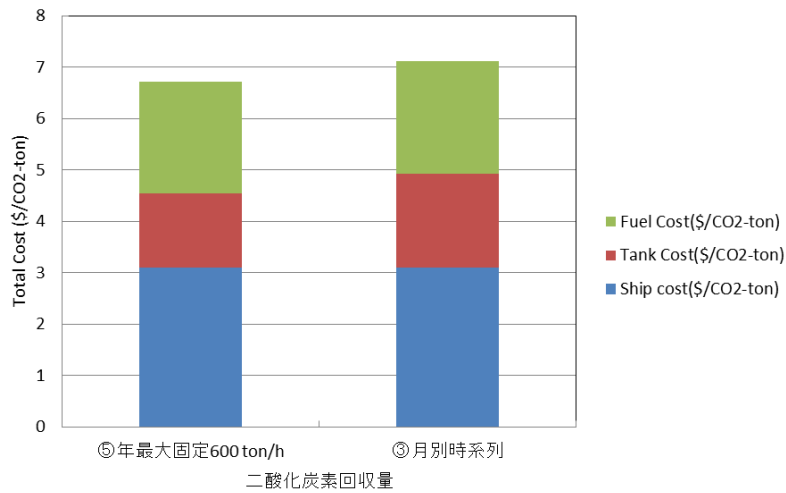


Fig. 3-27 最大システムを用いた時の Total Cost の変化(L=1,000 km)

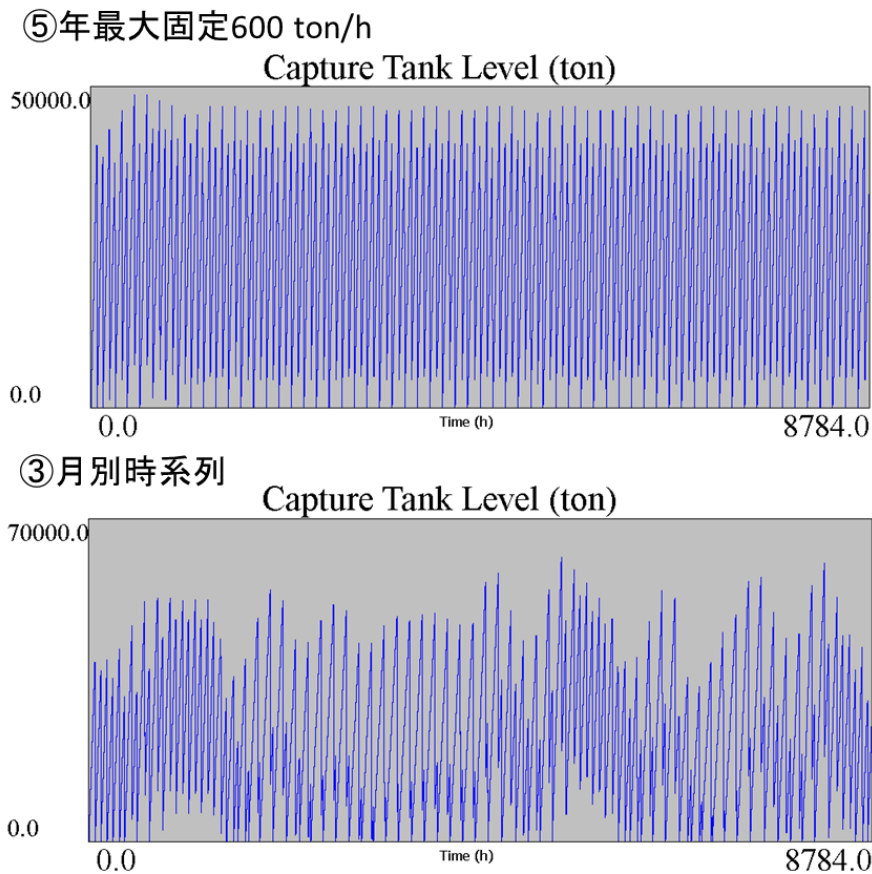


Fig. 3-28 最大システムを用いた時のタンク内二酸化炭素量の推移(L=1,000 km)

これより、⑤の年最大固定を二酸化炭素回収量として用いて設計したシステムは、3.3.1で用いたような、①の年平均固定を回収量として用いたシステムに比べ、二酸化炭素回収量の年間の変動影響を受けることなく稼働することが示された。しかしながらタンク内二

酸化炭素量の変動は存在しており、回収量が大きいときと小さいときで効率が異なっていて無駄がみられる。

3.3.2.2. 回収量変動に対応した最適な組み合わせの検討

積載可能量、隻数、*FCS*、*TBA* の組み合わせを変え、適切なシステムをつくることにより、**Total Cost** を抑えることができる。

そこで、3.3.1 で行った輸送距離と圧入流量の条件において年間変動を考慮した③の二酸化炭素回収量に対して **Total Cost** を最小にするように、適切な組み合わせを用いたシステムでのシミュレーションを行った。この調整したシステムを調整システムとよぶ。またそれぞれについて、3.3.1 で算出した、①の年平均固定を回収量として設計したシステムとの比較を行う。この 3.3.1 で用いたシステムを初期システムと呼ぶこととする。

③の二酸化炭素回収量を用いたシミュレーションを初期システムと調整システムで行った。それぞれのシステムのパラメータを Table 3-14～Table 3-17 に、コスト変化とタンク内二酸化炭素量の推移を Fig. 3-29～Fig. 3-36 に示す。またコスト比較のために初期システムの回収量を①年平均固定とした場合の結果を合わせて示す。

- 輸送距離 200 km, 圧入流量 588 ton/h

Table 3-14 システムパラメータ ($L=200$ km, $F=588$ ton/h)

	DWT(ton)	隻数	FCS (h)	TBA (h)
初期システム	12000	2	15	20
調整システム	30000	2	8	17

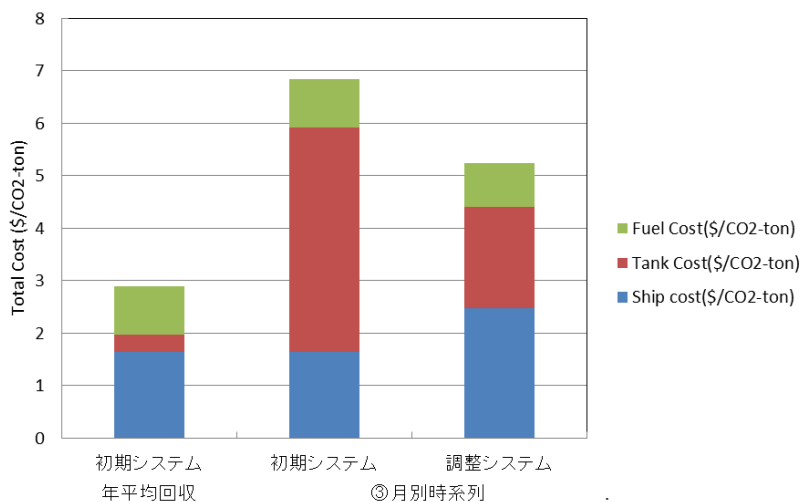


Fig. 3-29 システム調整による Total Cost の変化 ($L=200$ km, $F=588$ ton/h)

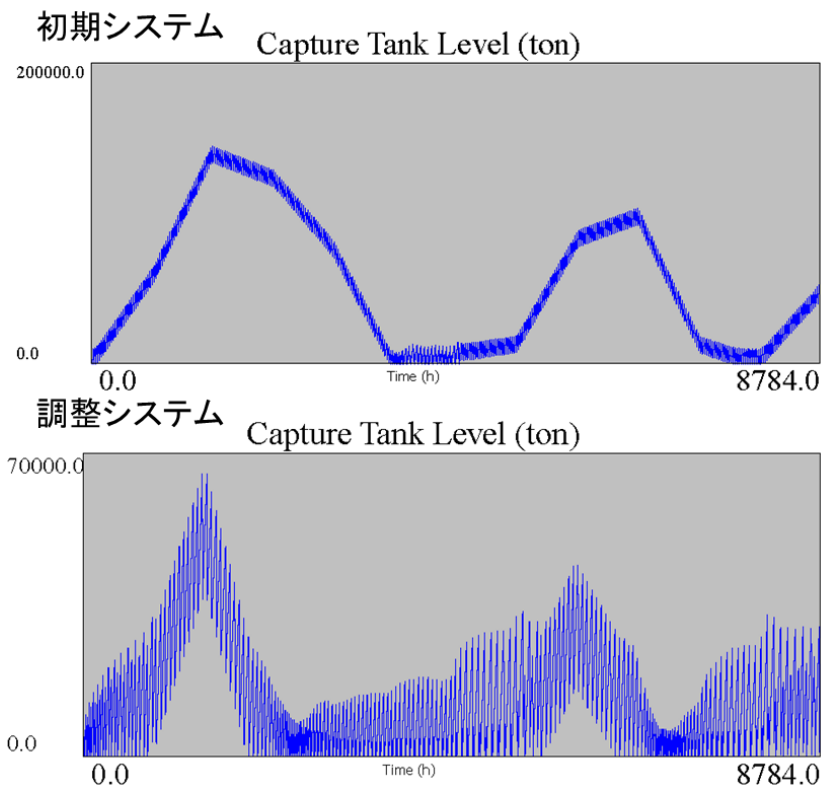


Fig. 3-30 システム別タンク内二酸化炭素量推移 ($L=200$ km, $F=588$ ton/h)

- 輸送距離 1,000 km, 圧入流量 588 ton/h

Table 3-15 システムパラメータ ($L=200$ km, $F=588$ ton/h)

	DWT(ton)	隻数	FCS (h)	TBA (h)
初期システム	35000	2	59	66
調整システム	48000	2	60	70

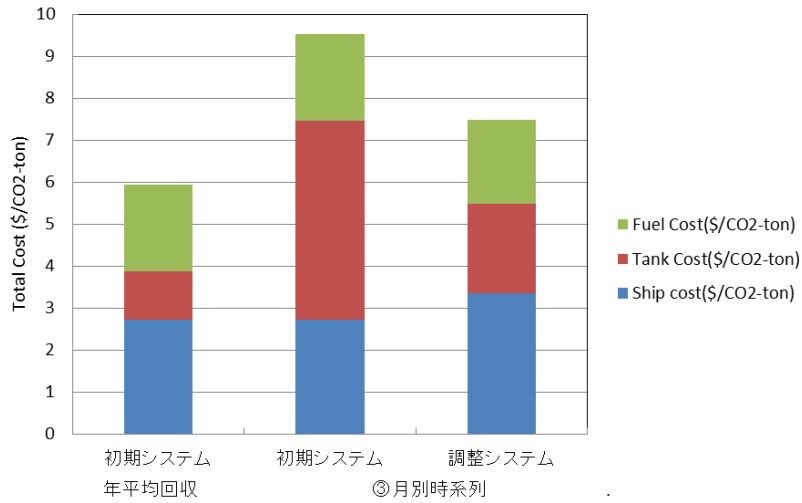


Fig. 3-31 システム調整による Total Cost の変化 ($L=1,000$ km, $F=588$ ton/h)

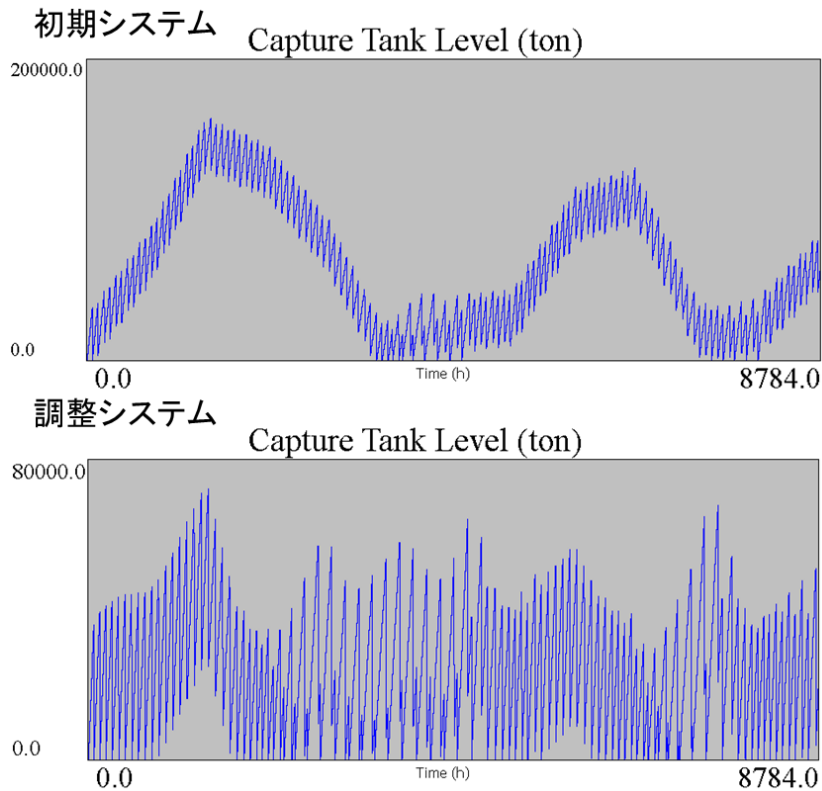


Fig. 3-32 システム別タンク内二酸化炭素量推移 ($L=1,000$ km, $F=588$ ton/h)

- 輸送距離 200 km, 圧入流量 720 ton/h

Table 3-16 システムパラメータ ($L=200$ km, $F=720$ ton/h)

	DWT(ton)	隻数	FCS (h)	TBA (h)
初期システム	10000	2	17	17
調整システム	14000	2	5	50

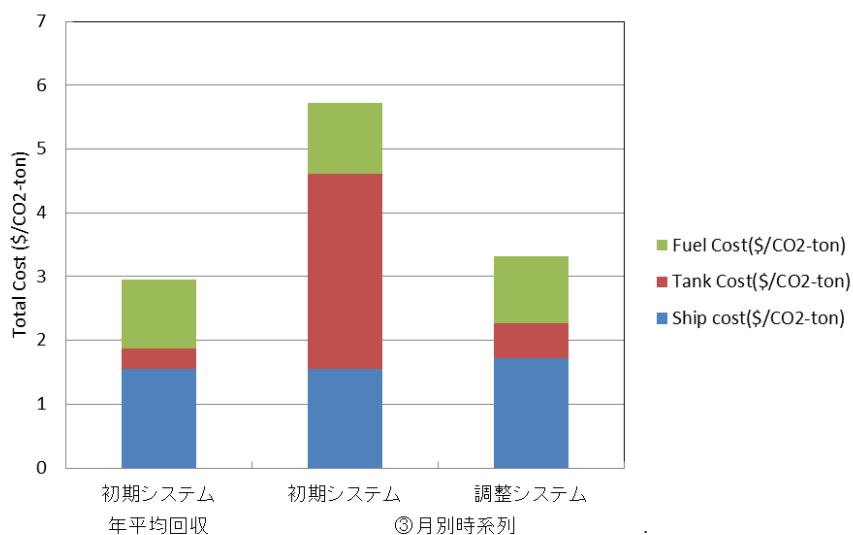


Fig. 3-33 システム調整による Total Cost の変化 ($L=1,000$ km, $F=720$ ton/h)

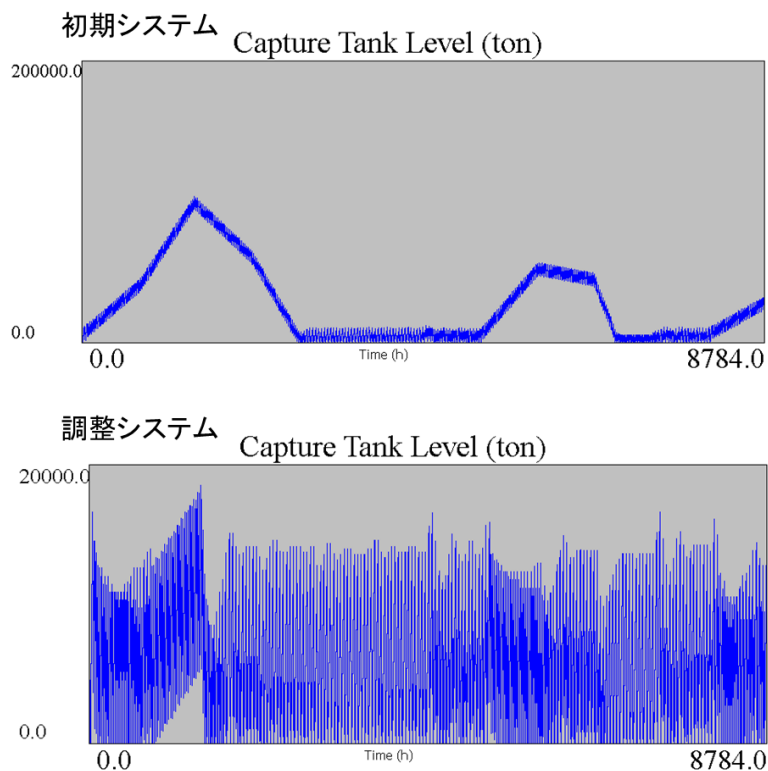


Fig. 3-34 システム別タンク内二酸化炭素量推移 ($L=1,000$ km, $F=720$ ton/h)

- 輸送距離 1,000 km, 圧入流量 720 ton/h

Table 3-17 システムパラメータ ($L=1,000$ km, $F=720$ ton/h)

	DWT(ton)	隻数	FCS (h)	TBA (h)
初期システム	31000	2	59	66
調整システム	40000	2	59	76

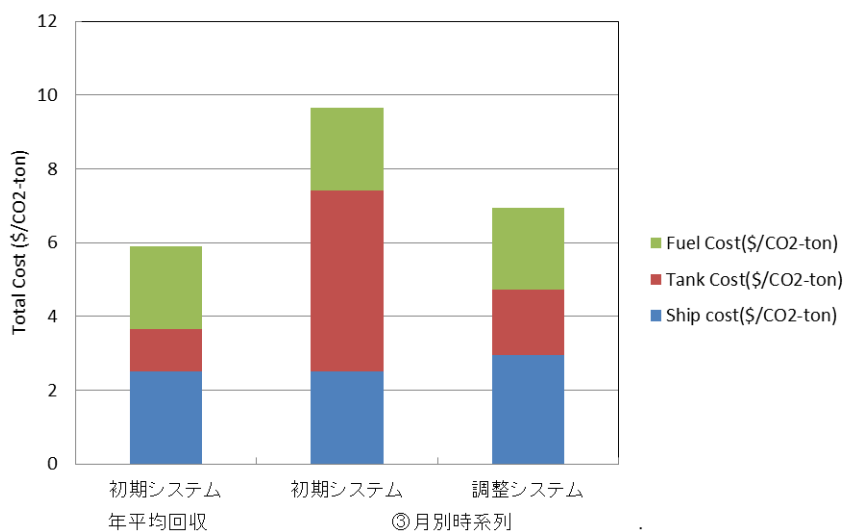


Fig. 3-35 システム調整による Total Cost の変化 ($L=1,000$ km, $F=720$ ton/h)

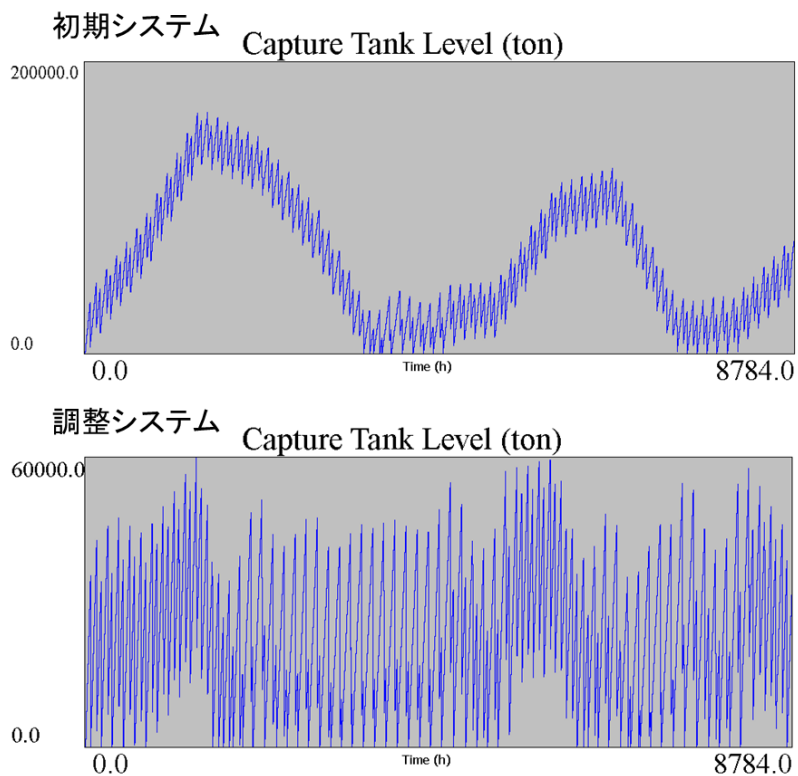


Fig. 3-36 システム別タンク内二酸化炭素量推移 ($L=1,000$ km, $F=720$ ton/h)

調整システムを用いたシミュレーションの結果から以下のことがわかる。

- ◆ どの条件でも積載可能量を大きくすること Ship Cost が大きくなっている
- ◆ 必要タンク容量が大幅に小さくなることで Tank Cost の縮小に成功している
- ◆ 積載可能量が大きくな一度の輸送量が増加したことにより Fuel Cost は減少している
- ◆ 輸送距離が大きいほど回収量変動の影響は緩和されている
- ◆ 圧入流量を二酸化炭素回収量の最大値に合わせて設定することで年間変動の影響を緩和することができる
- ◆ 調整システムを用いても年間の二酸化炭素回収量の変動の影響を受けた挙動を示す

ここで 1.3.2.1. で検討した最大システムと調整システムの比較を行う。

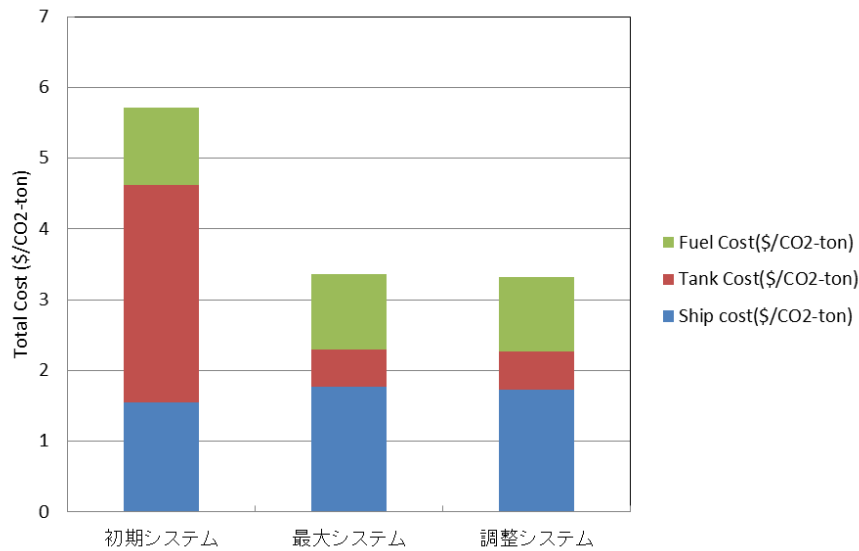


Fig. 3-37 最大システムと調整システムのコスト比較(L=200 km)

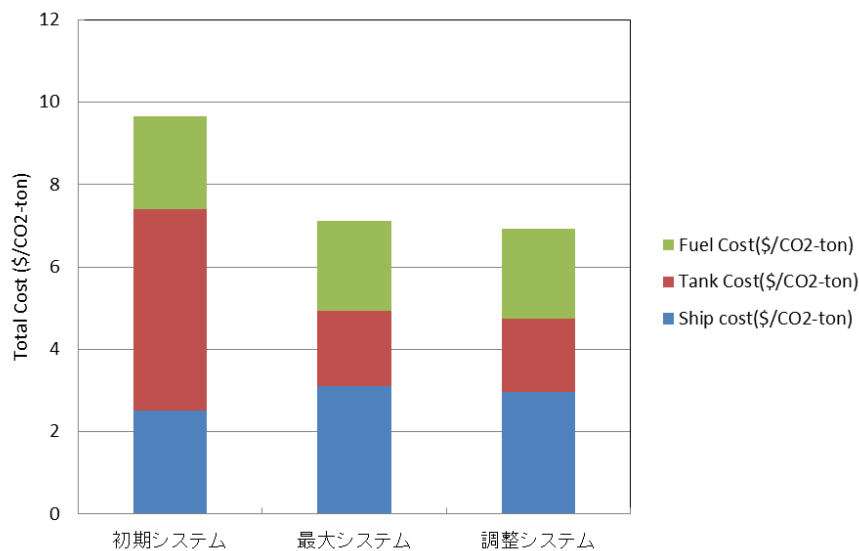


Fig. 3-38 最大システムと調整システムのコスト比較(L=1,000 km)

最大システムと調整システムを比較すると調整システムの方がより積載可能量の小さい輸送船を用いることで Ship Cost を抑え、Total Cost も小さくなっている。しかしながらその差はわずかであり、最大システムも非常に有用であることがわかる。

3.3.3. まとめ

二酸化炭素回収量の変動、特に年間を通した変動の影響は輸送システムの設計に大きな影響を与えることが明らかになった。このことから再生可能エネルギーの短時間での変動影響は火力発電の出力変動が追従できるかはともかくとして、輸送方式が本来持つべき一時貯蔵タンクの存在によって吸収されている。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る。

回収量の変動を考慮していないシステム設計を用いると、回収量変動の影響をそのまま受けまわると言っていいほど機能しない。

また最大の回収量を想定したシステム設計では、非常に大きい効果が見られた。

回収量の変動を想定したシステム設計ではコストを大きく減少させることに成功した。このことは二酸化炭素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が、最大システムにおいては定常運転時の非効率性などの問題が残る。

第4章 荒天による稼働休止

4.1. 海象モデルについて

本章では CCS の輸送システムへの荒天時における稼働休止による影響について検討する。

システムの能力を検討するうえで洋上作業に支障をきたす荒天が対象海域でどのような発生頻度・継続性で発現するかは重要な影響因子となる。洋上作業に支障をきたすものとしては、風、波高などがあるが、本研究では、波高のみを対象とした。ERA-Interim^[20]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る。

対象海域は Fig. 4-1 に示すサイト A, B, C の3か所とした。それぞれの位置を Table 4-1 に示す。サイト A は磐城沖で、東日本震災以前に海底下 CCS 実施のために調査・検討が行われていた。関東近郊からの距離は約 200 km である。また、サイト B, C はそれぞれ北海道の東端に位置する根室周辺と九州の南端に位置する種子島周辺である。それぞれ関東からの直線距離が約 1000 km となっている。サイト B, C はいずれも貯留適地としての根拠に裏付けられたものではなく、地域的な違いが反映されることを考慮したに過ぎない。

Table 4-1 サイト設定

サイトA	東経141度北緯37度
サイトB	東経146度北緯43度
サイトC	東経131度北緯30度

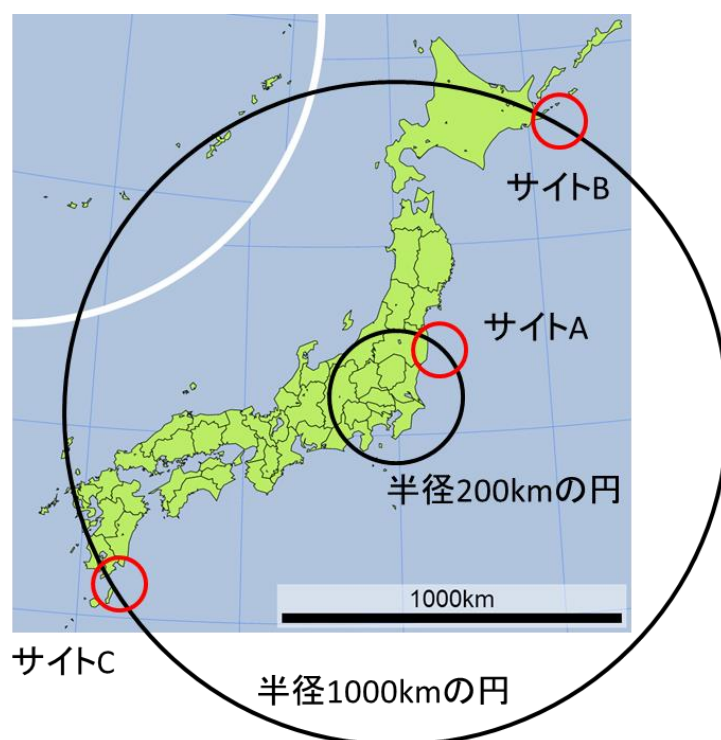


Fig. 4-1 サイトの位置

4.2. 海象特性の概略分析

稼働休止の条件として有義波高の閾値を 2 m, 2.5 m, 3 m とする。有義波高がこの値以上の時、洋上作業に取り掛かれないとした時に、この条件が、どの程度の発生頻度・継続性をもつのかを分析してみる。

4.2.1. 各サイトの特性

各サイトの統計的な特性値を Table 4-2 に示す。なおデータの分析の際に MATLAB7.11.0(R2010b)を用いた。

Table 4-2 各サイトの特性

サイトA(平均有義波高 1.4714 m)		
有義波高	未超過率	超過最大連続日数
1.5 m	62.00%	18日
2.0 m	83.02%	9日
2.5 m	92.77%	7日
3.0 m	96.88%	4日

サイトB(平均有義波高 1.8062 m)		
有義波高	未超過率	超過最大連続日数
1.5 m	45.63%	33日
2.0 m	69.83%	11日
2.5 m	83.51%	10日
3.0 m	90.67%	6日

サイトC(平均有義波高 1.6469 m)		
有義波高	未超過率	超過最大連続日数
1.5 m	53.36%	21日
2.0 m	75.78%	12日
2.5 m	87.94%	9日
3.0 m	94.03%	4日

有義波高の 33 年間の平均値、閾値に対する未超過確率と超過最大連続日数、いずれを見てもサイト B, C, A の順に厳しいことがわかる。

4.2.2. 連続稼働休止日数の考察

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、設定した有義波高別に算出した。サイト別に Fig. 4-2, Fig. 4-3, Fig. 4-4 に示す。

当然であるが、どのサイトにおいても連続日数が大きくなるほど、発生回数は少なくなり、また設定した有義波高が大きいほど、連続日数の最大値や発生が少なくなることがわかる。

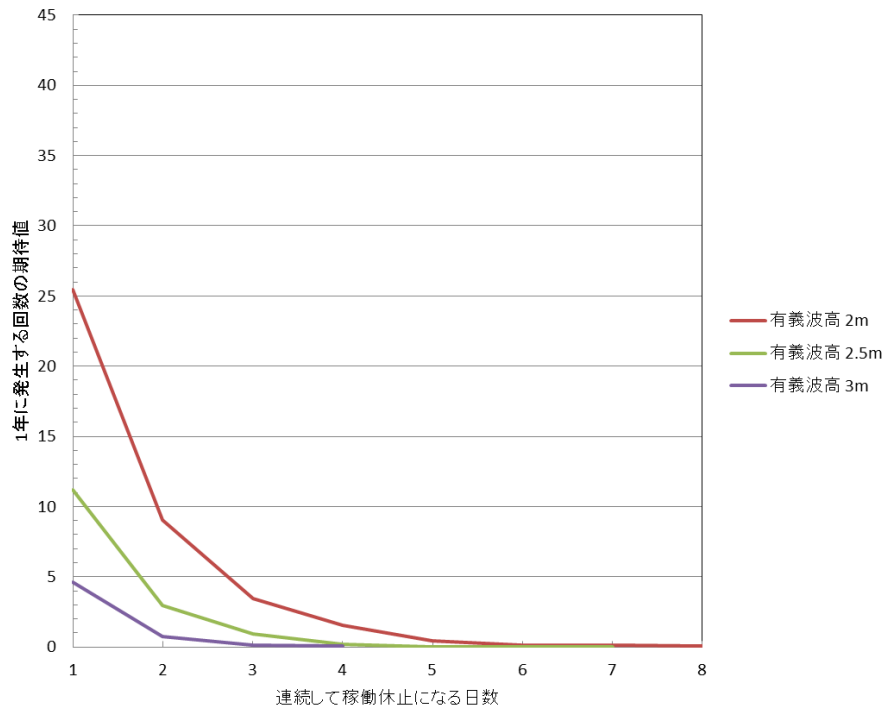


Fig. 4-2 サイト A における連続稼働休止の 1 年の発生回数の期待値

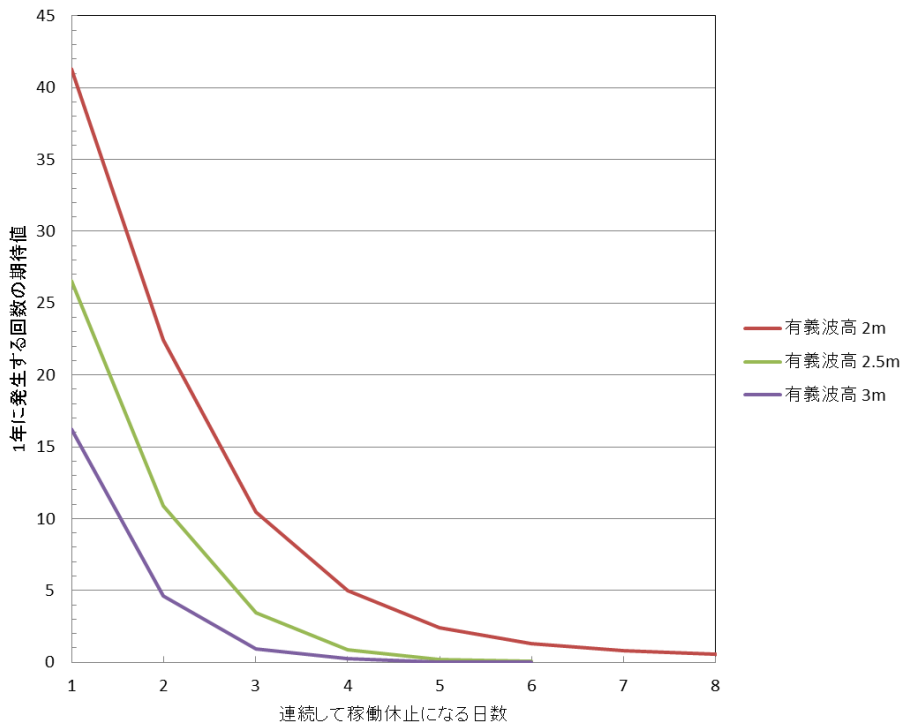


Fig. 4-3 サイト B における連続稼働休止の 1 年の発生回数の期待値

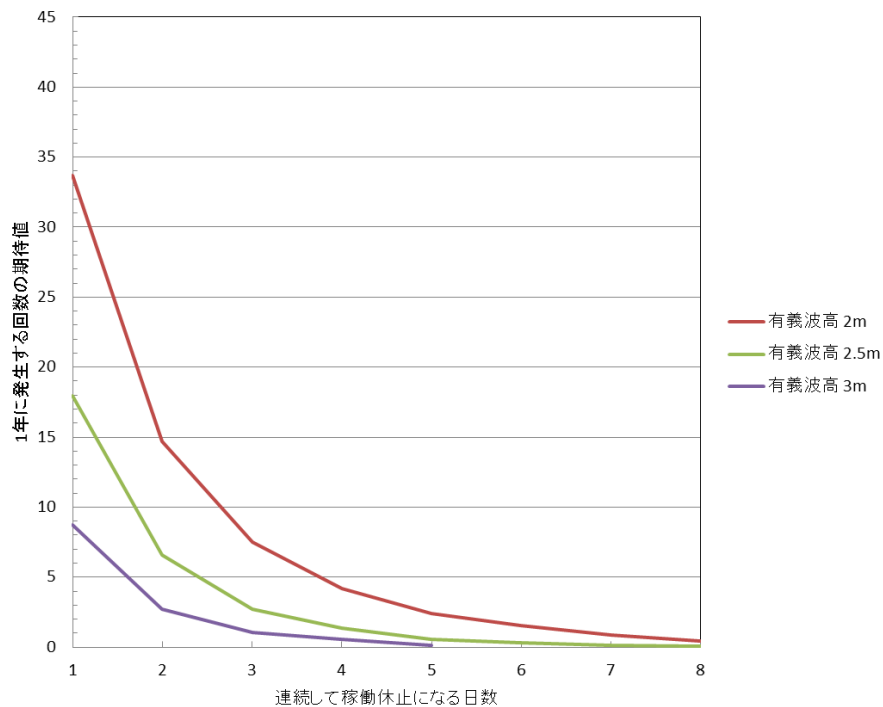


Fig. 4-4 サイト C における連続稼働休止の 1 年の発生回数の期待値

サイト別に見てみると、サイト A は最も穏やかな海象であり、有義波高 2.5~3 m をこえる連続日数は多くても 3 日程度を見込んでおけばよい。有義波高 2 m を超える連続日数でも、5 日以上になるのは年に 1 回あるかないかである。

サイト B は最も厳しい海象であり、有義波高 2.5~3 m ならば連続日数は 5 日程度を見込んでおけばよいが、2 m ならば 1 週間以上続くことも年に 1 回はある。

サイト C は概ねサイト A, B の中間の傾向を有する。

4.3. 稼働休止の影響に関する基礎的検討

実際の海象データを用いたシミュレーションの前に、圧入サイトの閉鎖による輸送システムへの影響を考察する。シミュレーション条件を以下に示す。

- シミュレーション期間は 366 日
- 船速 $v=27.78$ km/h (15 kt)
- ローディング・圧入準備, また港・圧入サイトでの出発準備時間 $T_p, T_q=4$ h
- 港・圧入サイト, 24 h 利用可能
- 二酸化炭素回収量 $q=490$ ton/h 固定
- 輸送距離 $L=200$ km, 1000 km
- 圧入流量 $I=588$ ton/h
- 積載可能量, 隻数, FCS, TBA の組み合わせは初期システムを用いる

4.3.1. 連続稼働休止日数の影響

圧入サイトの稼働休止が輸送システムにどのような影響を与えるかを調べるために 1 年に 1 度だけ稼働休止が発生し、その連続日数を 1 日～10 日の範囲で変化させ、結果を比較する。稼働休止はシミュレーションスタートから 200 日経過後に発生し、設定した日数だけ稼働休止が連続するように設定した。

4.3.1.1. 輸送距離 200 km

輸送距離 200 km での初期システムは $W=12,000$ ton, 隻数 $m=2$, $(FCS, TBA)=(15, 20)$ で構成されている。

稼働休止がない場合と稼働休止日数が 10 日の場合のタンク内二酸化炭素量の推移を Fig. 4-5 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現する。

連続稼働休止日数を 1 日～10 日まで変化させたときの必要タンク容量と NOI, NOP の変化を Table 4-3 に、Total Cost の変化を稼働休止がないものと合わせて Fig. 4-6 稼働休止による Total Cost の変化($L=200$ km)に示す。

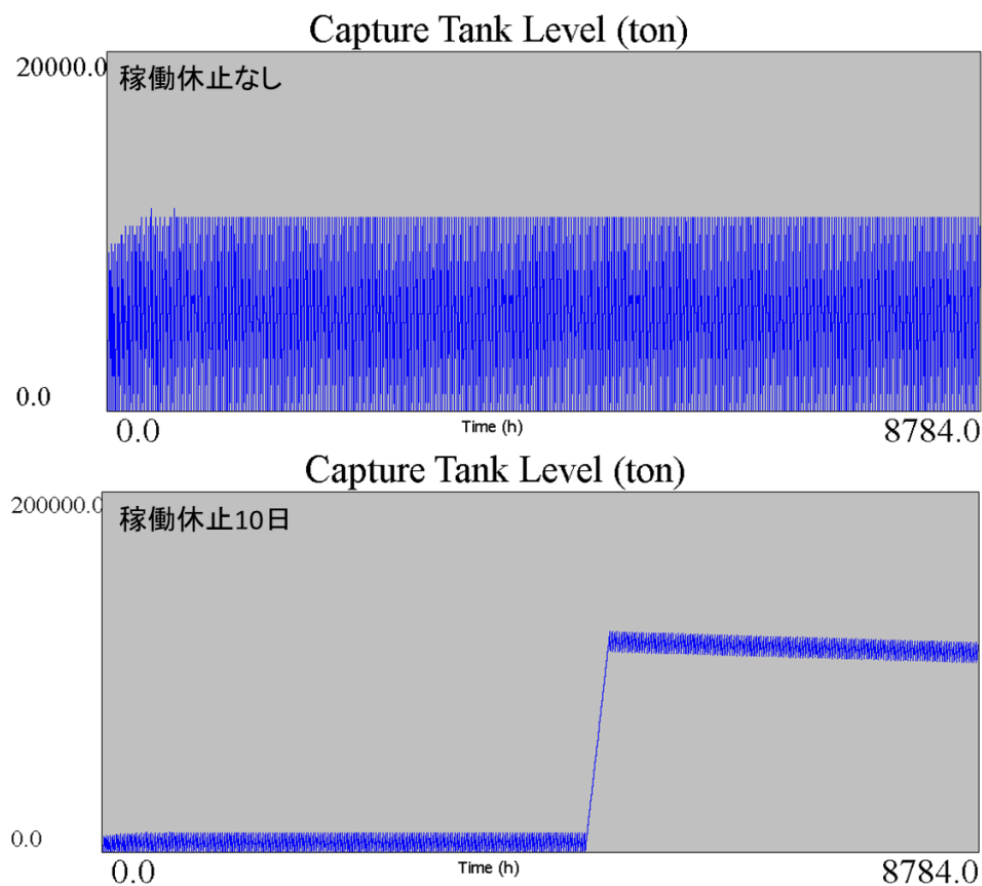


Fig. 4-5 稼働休止時のタンク内二酸化炭素量の推移 ($L=200$ km)

Table 4-3 稼働休止による必要タンク容量と NOI,NOP の変化(L=200 km)

稼働休止日数	必要タンク容量(ton)	NOI	NOP
0日	11271	367	366
1日	16661	363	363
2日	28421	362	360
3日	40181	361	360
4日	51941	360	359
5日	63701	359	358
6日	75461	358	357
7日	87221	357	356
8日	98981	356	355
9日	110741	355	354
10日	122501	354	353

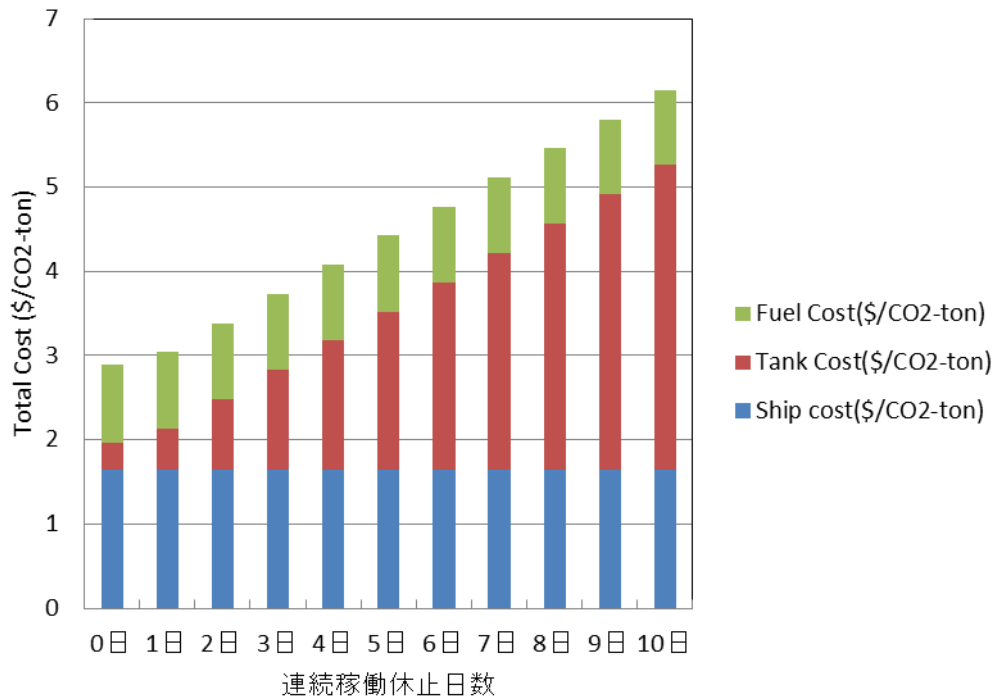


Fig. 4-6 稼働休止による Total Cost の変化(L=200 km)

連続した稼働休止日の増大によって必要タンク容量が増加し、Tank Cost が大きくなっていることがわかる。連続稼働休止日数が2日を超える場合、必要タンク容量の増加は稼働休止日数が1日増えるごとに11,760 ton となっており、これは24時間で回収される二酸化炭素量と等しい。

4.3.1.2. 輸送距離 1,000 km

輸送距離 1,000 km での初期システムは $W=35,000$ ton, 隻数 $m=2$, $(FCS, TBA)=(59, 66)$ で構成されている。

稼働休止がないものと稼働休止日数が 10 日の時のタンク内二酸化炭素量の推移を Fig. 4-7 に示す。また, 連続稼働休止日数を 1 日~10 日まで変化させたときの必要タンク容量と NOI, NOP の変化を Table 4-4 に, Total Cost の変化を稼働休止がないものと合わせて Fig. 4-8 に示す。

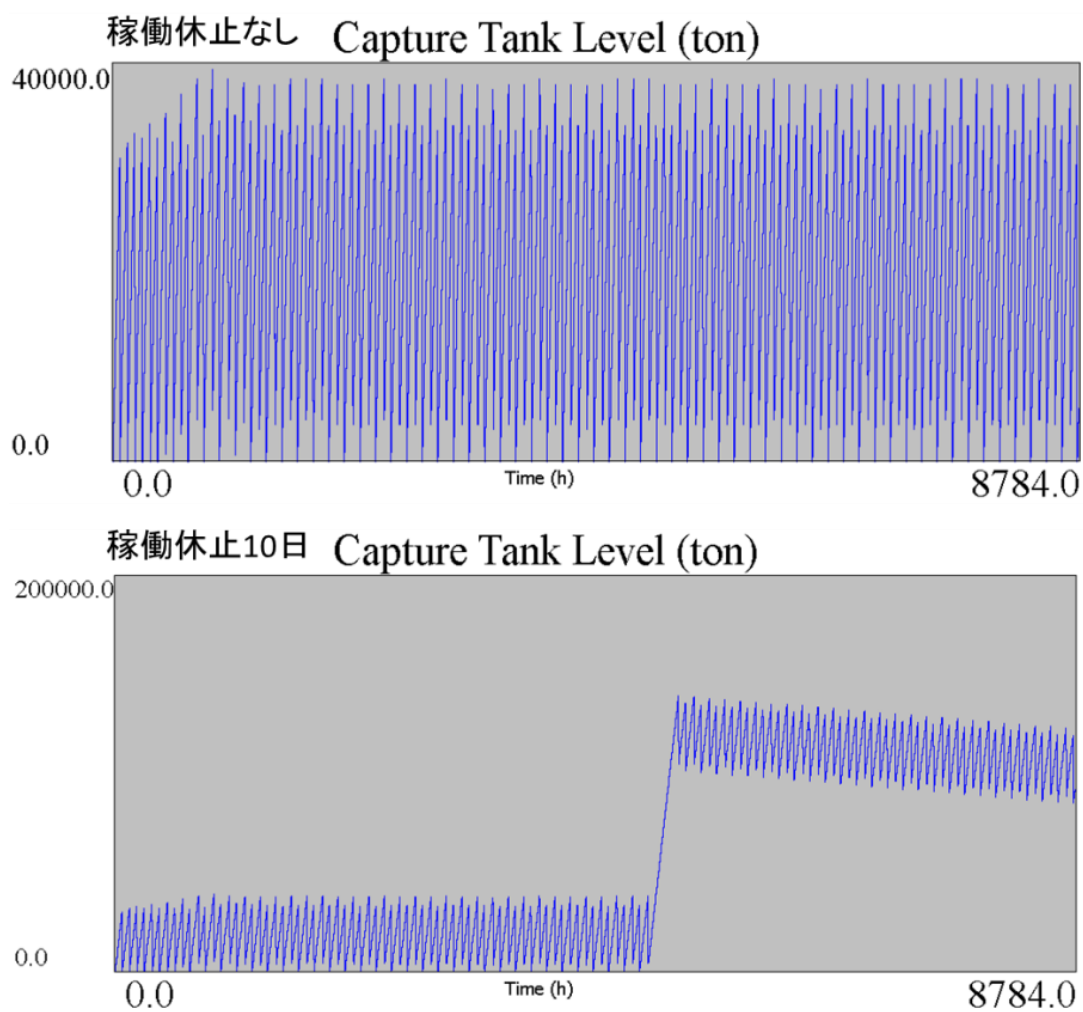


Fig. 4-7 稼働休止時のタンク内二酸化炭素量の推移 ($L=1,000$ km)

Table 4-4 稼働休止による必要タンク容量と NOI,NOP の変化(L=1,000 km)

稼働休止日数	必要タンク容量(ton)	NOI	NOP
0日	39201	123	122
1日	39201	123	122
2日	44871	123	121
3日	56631	123	121
4日	68391	122	121
5日	80151	122	120
6日	91911	121	120
7日	103671	121	120
8日	115431	121	119
9日	127191	121	119
10日	138951	120	119

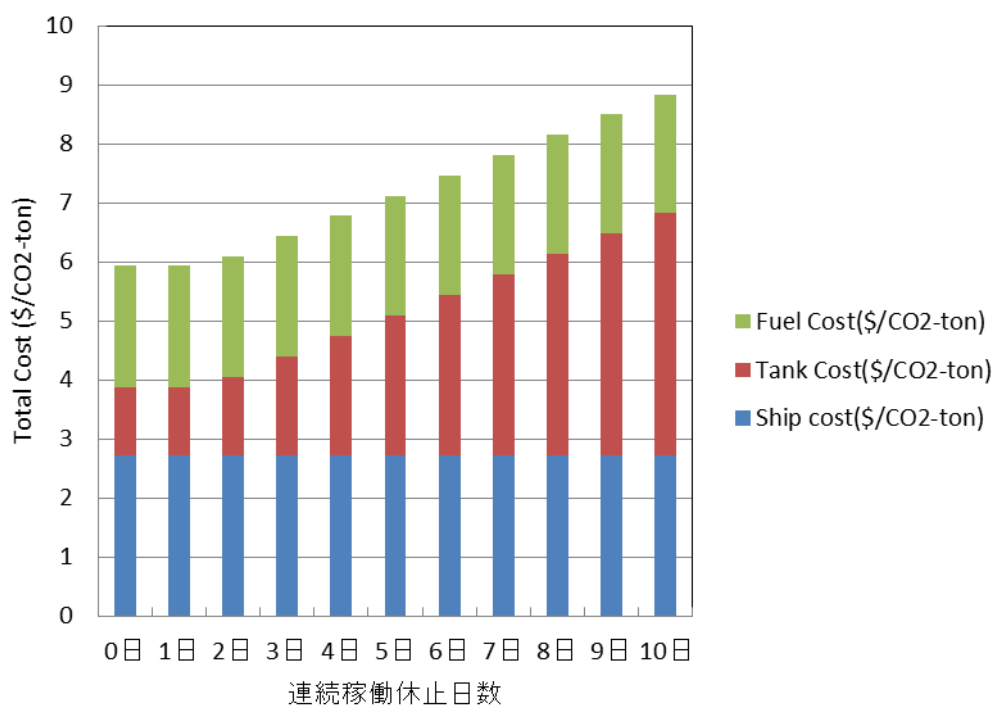


Fig. 4-8 稼働休止による Total Cost の変化(L=1,000 km)

輸送距離 1000 km においても、稼働休止日の増大に伴い Tank Cost が大きくなっていることがわかる。連続稼働休止日数が3日を超える場合、必要タンク容量の増加は稼働休止日数が1日増えるごとに 11,760 ton となっており、これは 24 時間で回収される二酸化炭素量と等しい。

また1日の稼働休止の影響は全く出ず、2日間の稼働休止で影響が出始めていることがわかる。輸送距離が長くなることで輸送時間が大きくなっているため、圧入サイトに到達するまでの時間間隔が大きいこと、また積載可能量が大きいため圧入時間が大きくなって

いることで圧入サイトでの待ち時間が稼働休止に関わらずある程度存在していることで、稼働休止の影響が出にくくなっているからと考えられる。

4.3.2. 断続的な稼働休止の影響

前項で稼働休止時のタンク内二酸化炭素量増大による影響の基本的な傾向を確認できた。しかしながら稼働休止は繰り返し起こり得る。そこで、断続的な稼働休止の影響を調べるために、稼働休止をシミュレーションスタートから100日ごとに1年に3回発生させてシミュレーションを行った。輸送距離200 kmで連続稼働休止日数を3日、4日に設定したタンク内二酸化炭素容量の推移をFig. 4-9に輸送距離1,000 kmで連続稼働休止日数を3日、4日に設定したタンク内二酸化炭素容量の推移をFig. 4-10に示す。

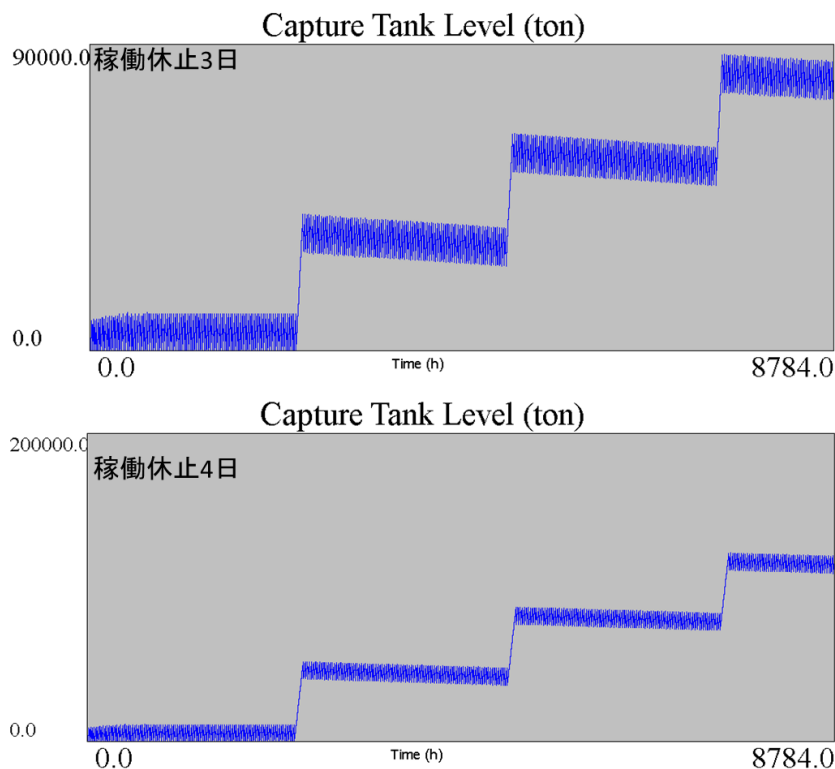


Fig. 4-9 断続的な稼働休止時のタンク内二酸化炭素量の推移 ($L=200$ km)

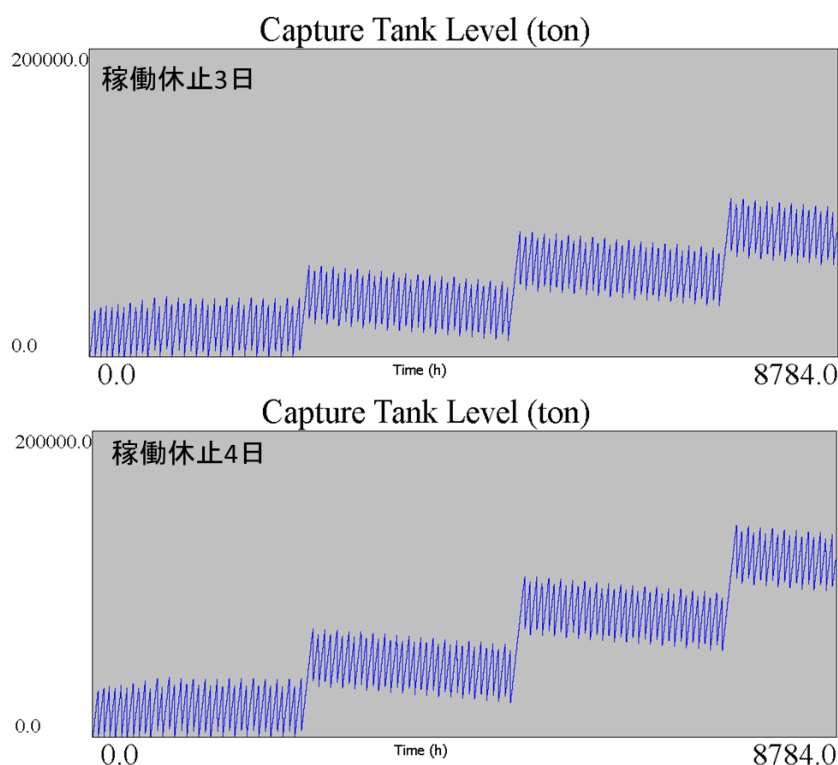


Fig. 4-10 断続的な稼働休止時のタンク内二酸化炭素量の推移 ($L=1,000$ km)

輸送距離に関わらず、1度稼働休止が発生すると連続稼働休止日数に応じてタンク内二酸化炭素量は増加し、増加した二酸化炭素はほぼ一定で減少することはない。そのため以降、稼働休止が発生するたびに二酸化炭素量は増加する一方である。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に減少させることが求められる。

4.3.3. 稼働休止への対応

4.3.3.1. システム調整による対応

積載可能量、隻数、*FCS*、*TBA*の組み合わせを変え、適切なシステムをつくることにより、**Total Cost**を抑えることができる。ここでも各条件において適切な組み合わせを用いたシステムを調整システムと呼ぶ。

4.3.2で行った条件である、稼働休止発生をシミュレーションスタートから100日ごとに1年に3回、連続稼働休止日数を3日連続と4日連続としたときのシミュレーションを初期システムと調整システムで行った。輸送距離200 kmと1,000 kmでのシステムのパラメータをTable 4-5~Table 4-8に、コストの変化とタンク内二酸化炭素量の推移をFig. 4-11~

Fig. 4-18に示す。またコスト比較のために初期システムでの稼働休止がない場合の結果を合わせて示す。

■ 輸送距離 200 km, 連続稼働休止日数 3 日

Table 4-5 システムパラメータ ($L=200$ km, 連続稼働休止日数 3 日)

	DWT(ton)	隻数	FCS (h)	TBA (h)
初期システム	12000	2	15	20
調整システム	14000	2	15	15

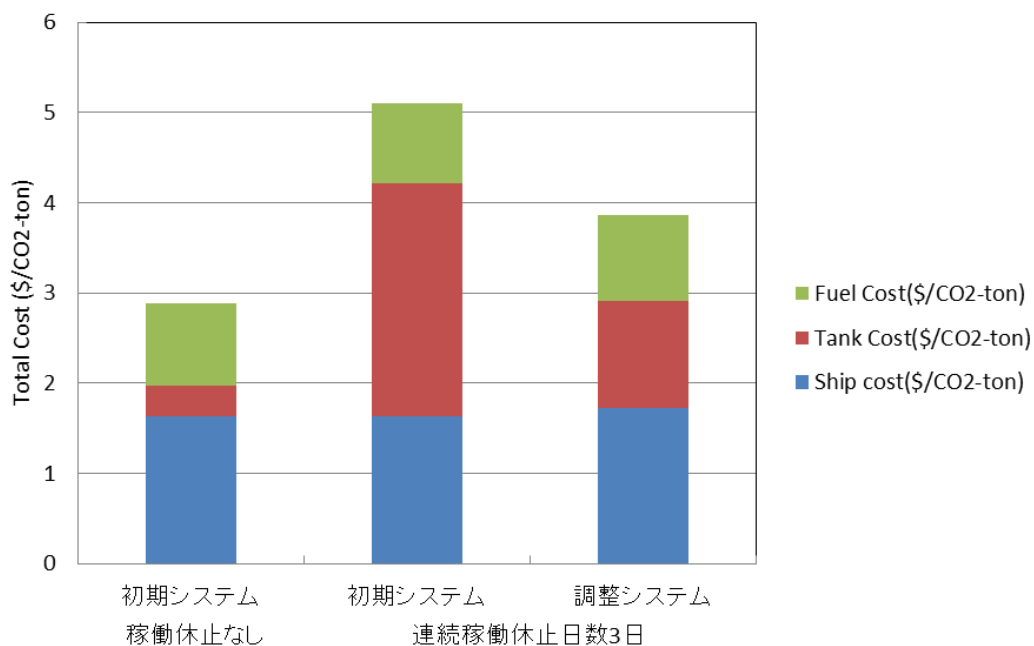


Fig. 4-11 システム調整による Total Cost の変化 ($L=200$ km, 連続稼働休止日数 3 日)

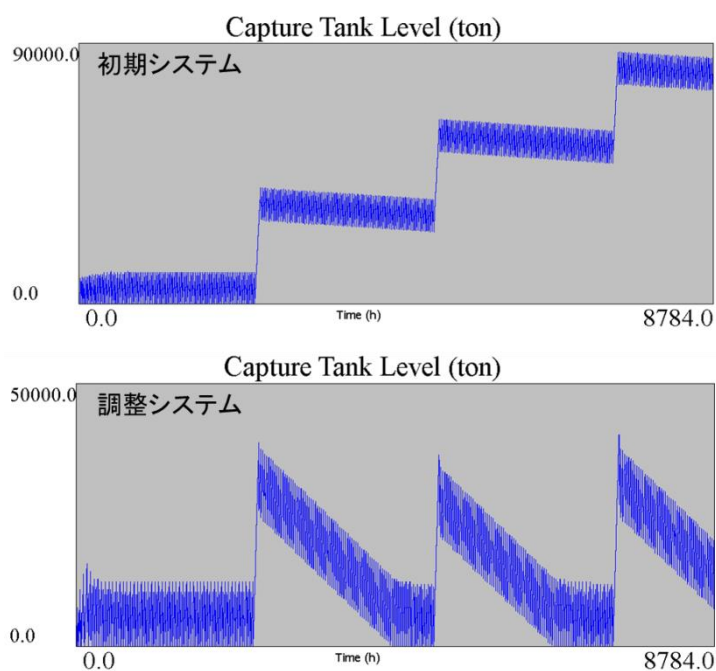


Fig. 4-12 システム別タンク内二酸化炭素量推移 ($L=200$ km, 連続稼働休止日数 3 日)

- 輸送距離 200 km, 連続稼働休止日数 4 日

Table 4-6 システムパラメータ(L=200 km, 連続稼働休止日数 4 日)

	DWT(ton)	隻数	FCS (h)	TBA (h)
初期システム	12000	2	15	20
調整システム	15000	2	23	24

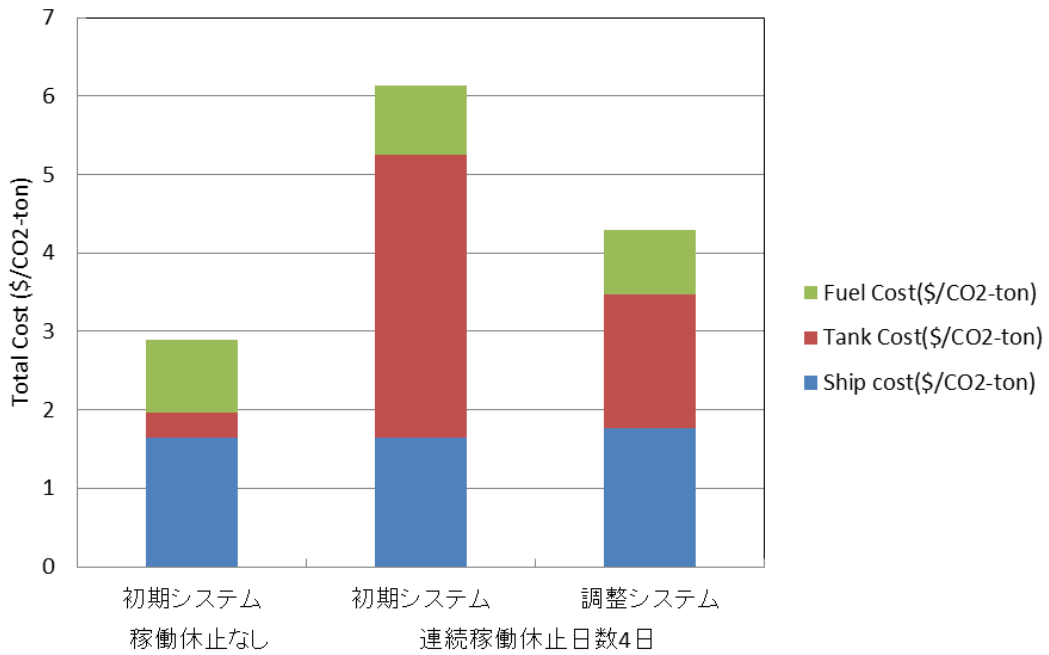


Fig. 4-13 システム調整による Total Cost の変化(L=200 km, 連続稼働休止日数 4 日)

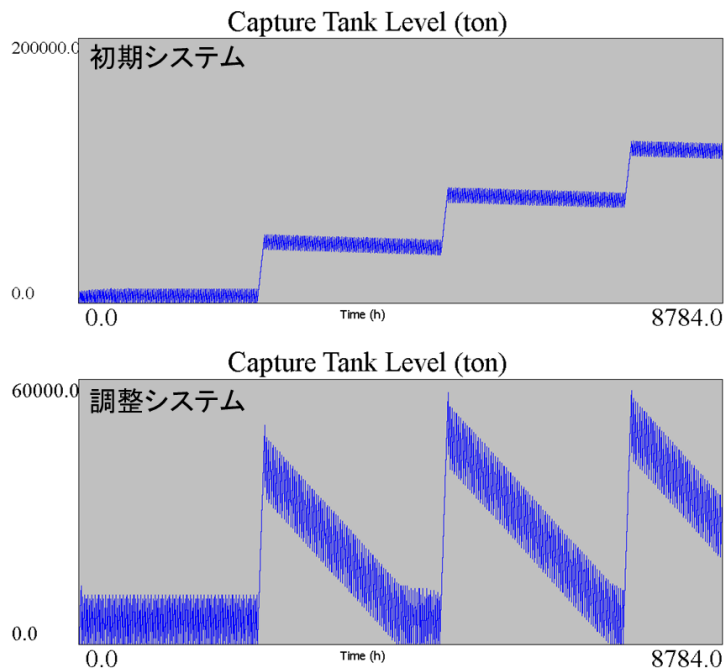


Fig. 4-14 システム別タンク内二酸化炭素量推移(L=200 km, 連続稼働休止日数 4 日)

- 輸送距離 1,000 km, 連続稼働休止日数 3 日

Table 4-7 システムパラメータ(L=1,000 km, 連続稼働休止日数 3 日)

	DWT(ton)	隻数	FCS (h)	TBA (h)
初期システム	35000	2	59	66
調整システム	37000	2	50	67

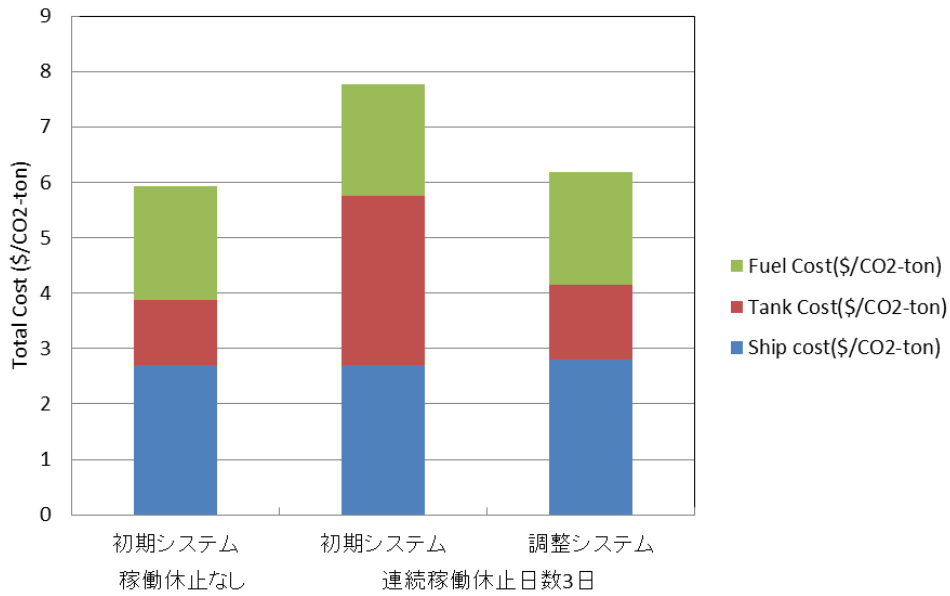


Fig. 4-15 システム調整による Total Cost の変化(L=1,000 km, 連続稼働休止日数 3 日)

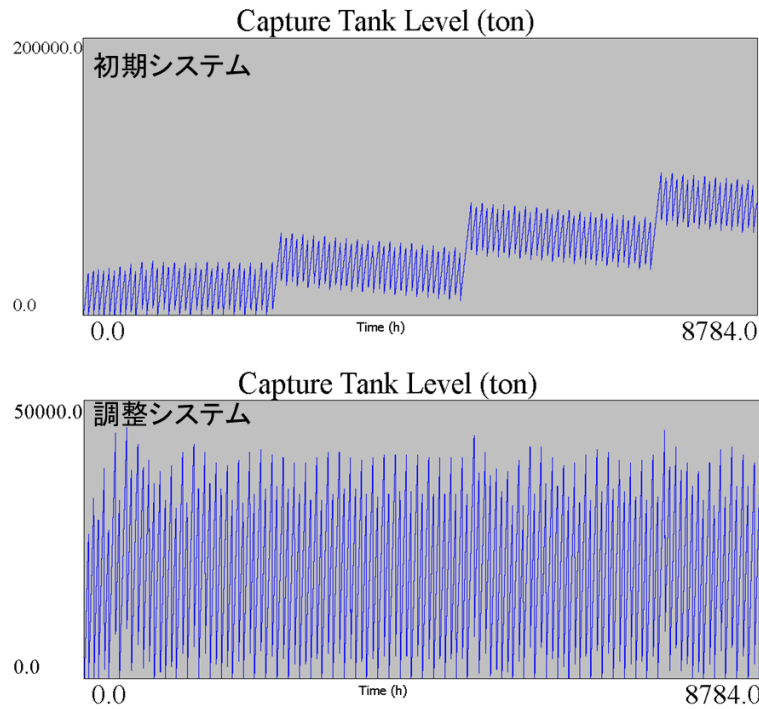


Fig. 4-16 システム別タンク内二酸化炭素量推移(L=1,000 km, 連続稼働休止日数 3 日)

- 輸送距離 1,000 km, 連続稼働休止日数 4 日

Table 4-8 システムパラメータ(L=1,000 km, 連続稼働休止日数 4 日)

	DWT(ton)	隻数	FCS (h)	TBA (h)
初期システム	35000	2	59	66
調整システム	37000	2	50	67

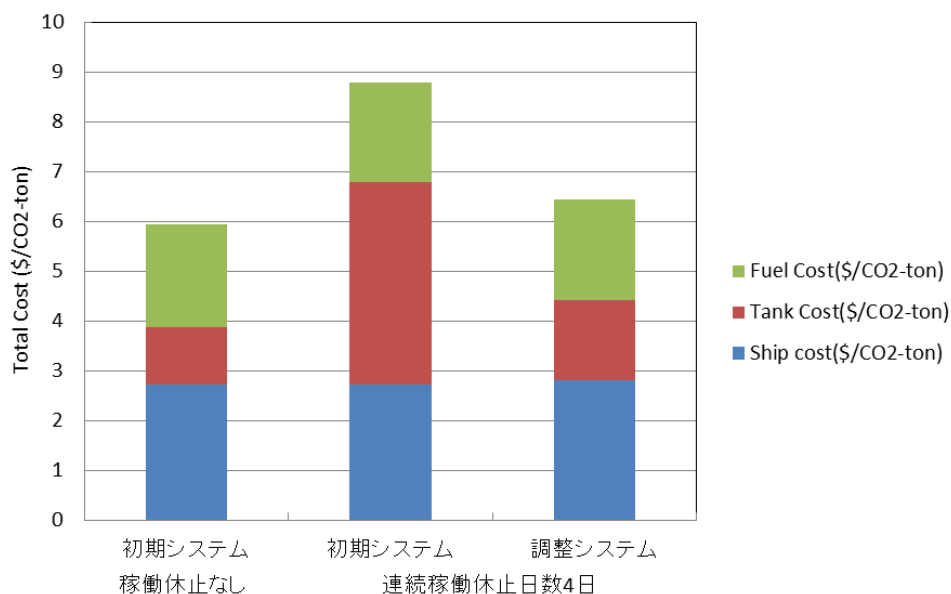


Fig. 4-17 システム調整による Total Cost の変化(L=1,000 km, 連続稼働休止日数 4 日)

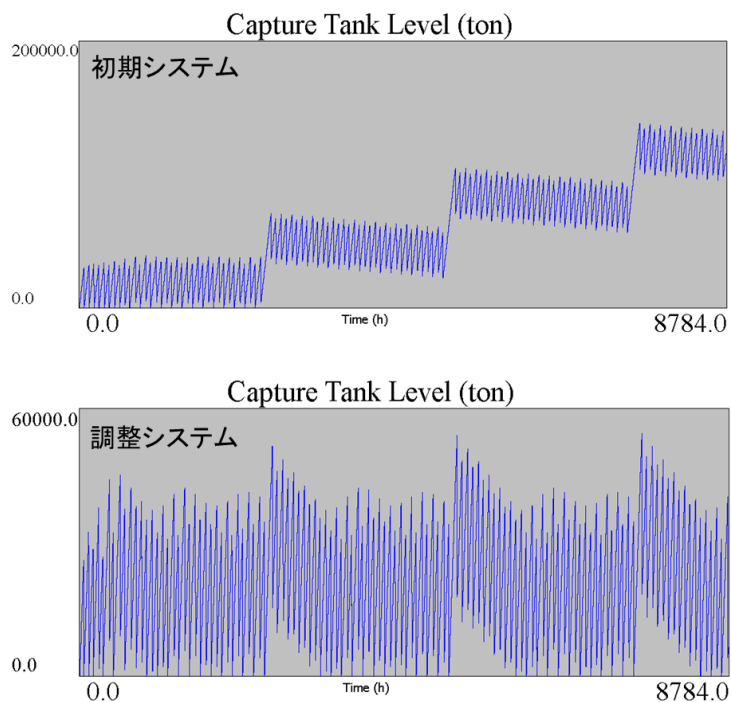


Fig. 4-18 システム別タンク内二酸化炭素量推移(L=1,000 km, 連続稼働休止日数 4 日)

調整システムを用いたシミュレーションの結果から以下のことがわかる。

- ◆ どの条件でも積載可能量を大きくすること **Ship Cost** が大きくなっている。
- ◆ 必要タンク容量が大幅に小さくなることで **Tank Cost** の縮小に成功している。
- ◆ 稼働休止によって増加した二酸化炭素量を次の稼働休止の時までに消化することで断続的な稼働休止の影響を小さく抑えている。

4.4. 海象データを用いたシミュレーション

次に 4.2 で分析した実際の海象データを用いたシミュレーションを行う。

- シミュレーション期間は 366 日
- 船速 $v=27.78$ km/h (15 kt)
- ローディング・圧入準備, また港・圧入サイトでの出発準備時間 $T_p, T_q=4$ h
- 港・圧入サイト, 24 h 利用可能
- 二酸化炭素回収量 $q=490$ ton/h 固定
- 圧入流量 $F=588$ ton/h
- サイト A 輸送距離 200 km, サイト B, C 輸送距離 1,000 km

稼働休止の条件としての有義波高の閾値を 2 m, 2.5 m, 3 m の 3 つに設定した。それぞれの条件において初期システムと調整システムを用いる。システムのパラメータを Table 4-9 ~Table 4-11 に、タンク内二酸化炭素量の推移とコスト変化を Fig. 4-19~Fig. 4-24 に示す。タンク内二酸化炭素量推移は閾値 2 m としたものを示しており、**Total Cost** はシミュレーションを 10 回行った平均値を示している。

■ サイト A

Table 4-9 システムパラメータ(サイト A)

	DWT(ton)	隻数	FCS (h)	TBA (h)
初期システム	12000	2	15	20
2m調整システム	22000	2	28	50
2.5m調整システム	16000	2	46	8
3m調整システム	13000	2	6	45

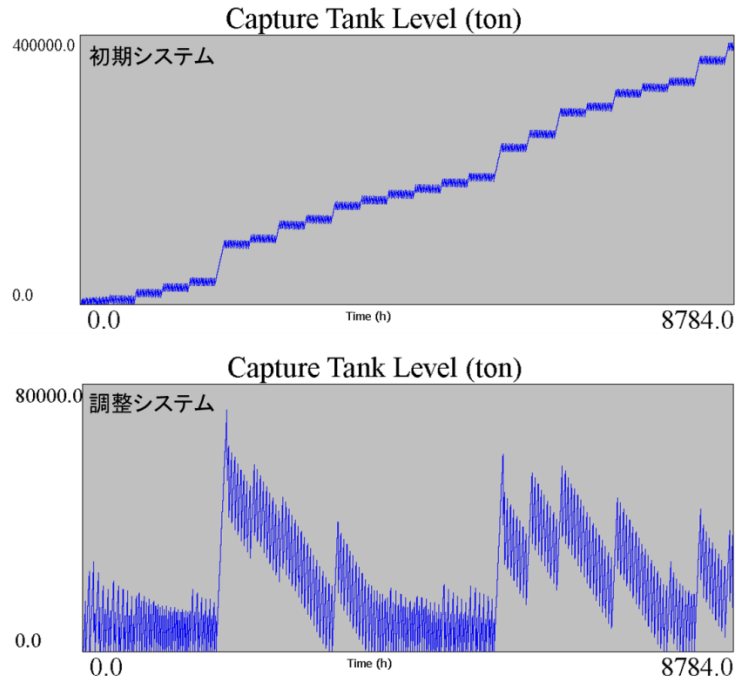


Fig. 4-19 システム別タンク内二酸化炭素量推移(サイト A)

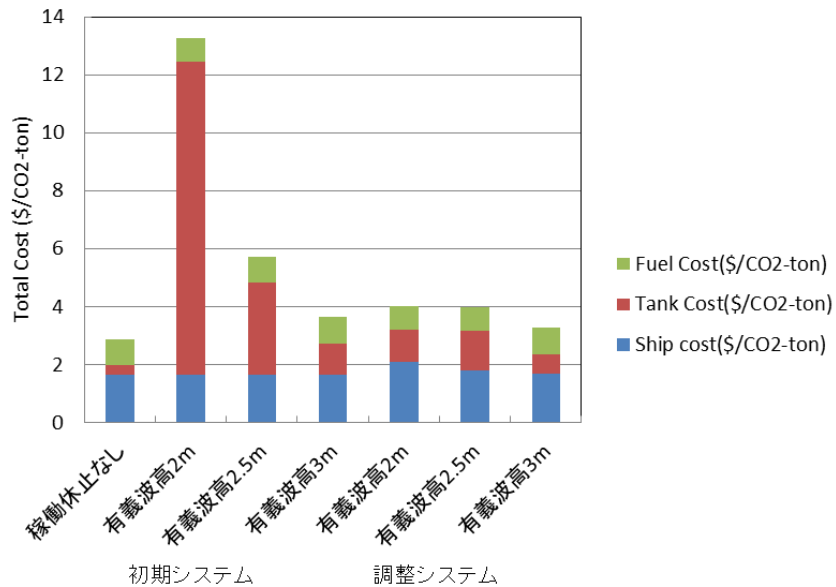


Fig. 4-20 システム調整による Total Cost の変化(サイト A)

■ サイト B

Table 4-10 システムパラメータ(サイト B)

	DWT(ton)	隻数	FCS (h)	TBA (h)
初期システム	35000	2	59	66
2m調整システム	38000	2	50	58
2.5m調整システム	39000	2	71	92
3m調整システム	37000	2	66	73

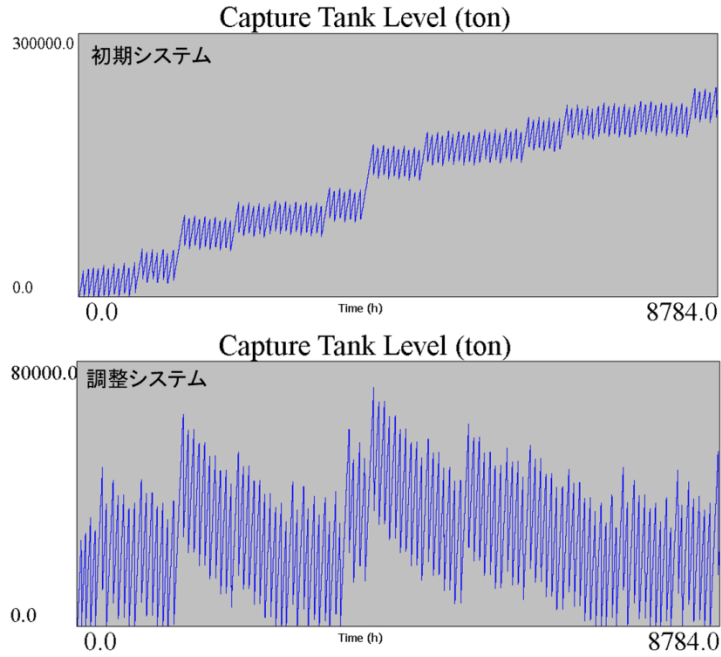


Fig. 4-21 システム別タンク内二酸化炭素量推移(サイト B)

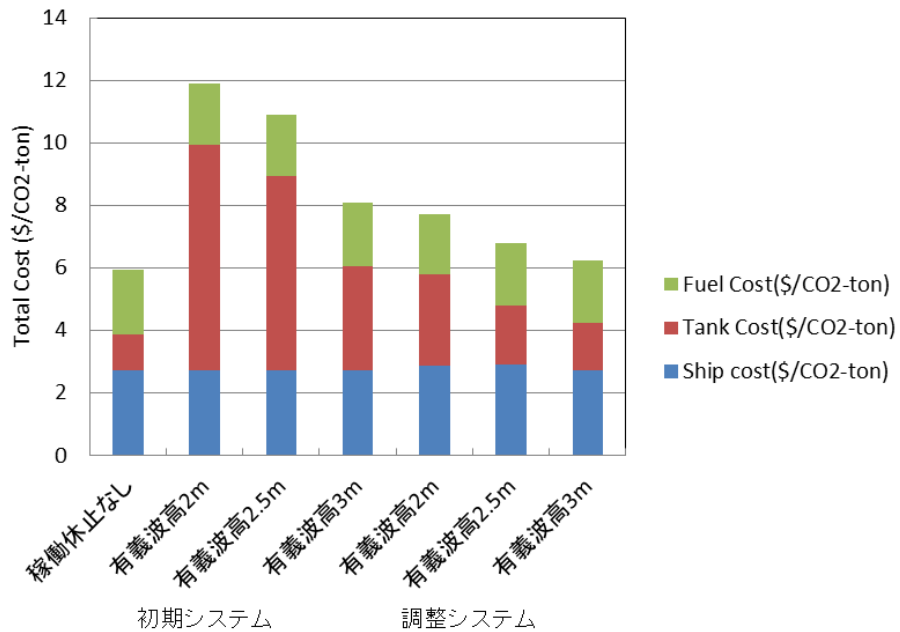


Fig. 4-22 システム調整による Total Cost の変化(サイト B)

■ サイト C

Table 4-11 システムパラメータ(サイト C)

	DWT(ton)	隻数	FCS (h)	TBA (h)
初期システム	35000	2	59	66
2m調整システム	43000	2	100	92
2.5m調整システム	37000	2	52	71
3m調整システム	35000	2	59	66

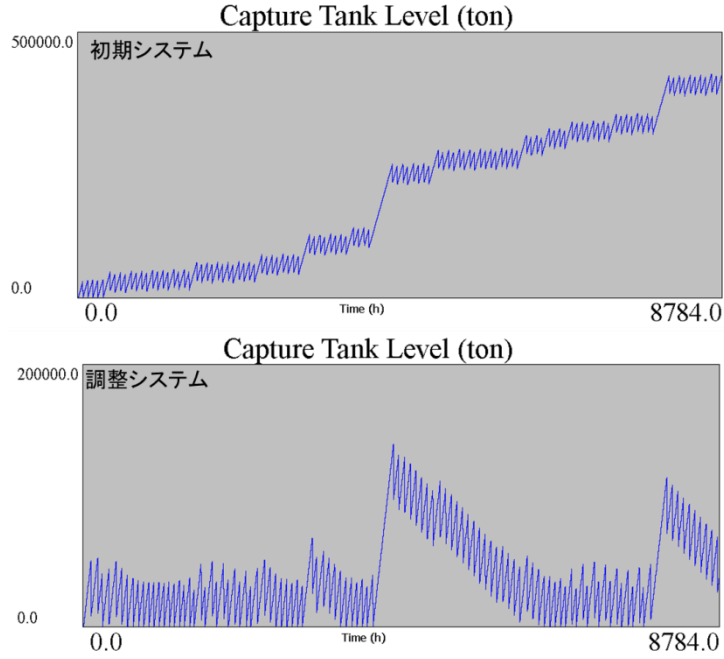


Fig. 4-23 システム別タンク内二酸化炭素量推移(サイト C)

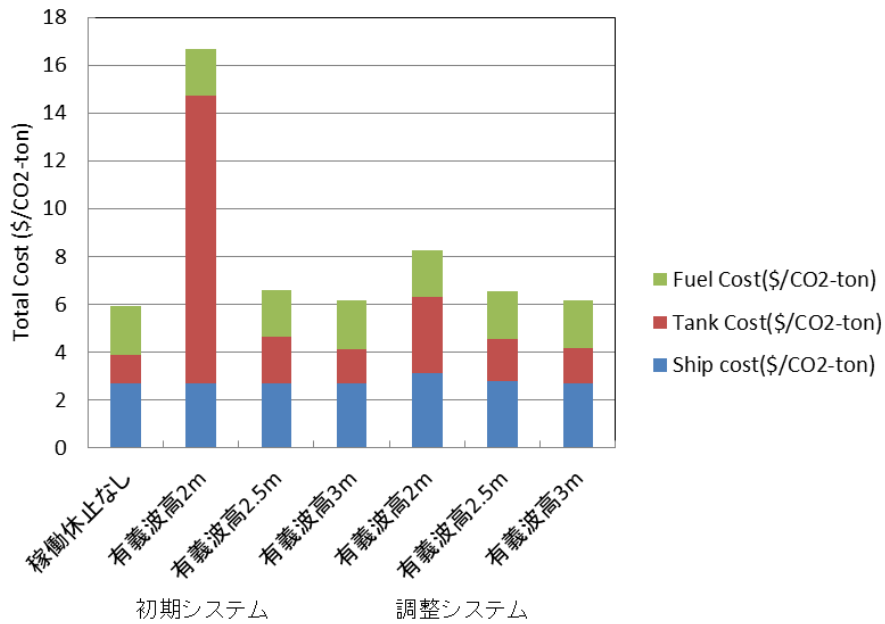


Fig. 4-24 システム調整による Total Cost の変化(サイト C)

タンク内二酸化炭素量の推移に着目すると、どのサイトにおいても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変わらず推移し、二酸化炭素量が増加し続けていることがわかる。一方で調整システムでは増加したタンク内二酸化炭素を、減少させ、次の稼働休止に備えていることがわかる。稼働休止条件が厳しいときほど積載可能量を大きくし、減少速度を上げていることがわかる。

サイトによって稼働休止の発生頻度が異なることも確認できるが、サイト B, C では輸送距離が長いいため短時間の稼働休止の影響が反映されにくくなっている一方で、サイト A ではわずかな稼働休止にも敏感に反応している様子がわかる。

次にコストの変化に着目する。どのサイトにおいても有義波高による稼働休止条件が弱まるごとに **Tank Cost** が減少し **Total Cost** としても小さくなっていることが見て取れる。また、サイト A では稼働休止に敏感なため初期システムでは **Tank Cost** の激しい増大が見えるが調整システムを用いることで **Total Cost** が急激に減少している。また調整システムにおいて閾値が 2 m, 2.5m の場合に比べ閾値を 3 m に設定することでコスト削減効果が大きくなることがわかる。サイト B では初期システム採用時、調整システム採用時どちらのときも段階的にコストが減少している。このことから閾値の設定が困難であることがわかる。サイト C では、調整システム採用時、閾値 2 m の場合のコストが **Total Cost** が突出して大きい。このことからサイト C では稼働休止条件を有義波高 2.5 m 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。

4.5. まとめ

海象を対象とした、荒天時における圧入サイトの稼働休止による輸送システムへの影響を明らかにした。稼働休止を考慮していないシステム設計を用いると 1 度稼働休止で増加した二酸化炭素は減少することはなく、以降、稼働休止が発生するたびに二酸化炭素量は増加してしまう。稼働休止を想定したシステム設計では積載可能量を大きくすることでシステムに余剰能力を確保し、1 度の稼働休止で増加した二酸化炭素量を次の稼働休止までに減少させることでコストを大きく減少させることに成功した。

第5章 オペレーションの提案と検証

5.1. オペレーションの必要性

本研究では第3章で、二酸化炭素回収量の変動による輸送システムへの影響、第4章では海象による圧入サイトの稼働休止が輸送システムへ与える影響について明らかにした。

さらに、システムとしての積載可能量、隻数、*FCS*、*TBA*の組み合わせを調整することで二酸化炭素回収量や、荒天による稼働休止が輸送システムに与える影響を軽減できることを示した。しかし、この輸送システムの調整には様々な問題が存在する。

- 未来の二酸化炭素回収量、荒天による稼働休止を正確に予測しなければならない
輸送船や陸上タンクはプロジェクトのスタート時に建造され、この時点での正確な未来予測が必要となる。
- 柔軟性がない
パイプラインと比較するとかなりの柔軟性は持つものの、輸送船や陸上タンクは建造された後での変更は不可能である。そのため不測の事態に非常に弱い。
- 定常運転時の非効率性
調整システムでは基本的に考えられうる最悪の事態を緩和することで **Total Cost** を抑えている。そのため定常運転時にはオーバースペックとなっている。
そこで、ある程度の余剰能力を持ったシステムを用いてオペレーション方法を変更することで輸送システムの向上を目指す。つまり、通常時の運用と、輸送能力を上げての運用を使い分けるようなオペレーションを考える。
通常時をフェーズ1、輸送能力向上時をフェーズ2とする。

5.2. オペレーション手法

5.2.1. オペレーションの方法

オペレーションとして、速度変化オペレーションを提案する。このオペレーションでは船速を上げることにより輸送船の往復回数を増加させることで輸送能力の向上を狙う。

5.2.2. フェーズの移行

適切な輸送オペレーションの構築のためには、適切なフェーズの切り替えが必要不可欠となる。そこで本研究では次の切り替え方法を検討した。

■ 陸上タンク内二酸化炭素量

輸送能力を上げる必要があるときはすなわち、陸上タンク内二酸化炭素量が増大して速やかに二酸化炭素を輸送したいときである。そこで陸上タンク内の二酸化炭素量を計測し、フェーズの切り替えに用いる。

5.2.3. 速度変化オペレーションの基礎能力の検討

速度変化オペレーションがどの程度の効果を示すのかを調べるために、4.2.1 で行った、連続的な圧入サイトの稼働休止を考慮した基礎シミュレーションを行う。以下にシミュレーション条件を示す。

- シミュレーション期間は 366 日
- ローディング・圧入準備, また港・圧入サイトでの出発準備時間 $T_p, T_q=4h$
- 港・圧入サイト, 24 h 利用可能
- 二酸化炭素回収量 $q=490 \text{ ton/h}$ 固定
- 輸送距離 $L=200 \text{ km}, 1000 \text{ km}$
- 圧入流量 $I=588 \text{ ton/h}$
- 積載可能量, 隻数, FCS, TBA の組み合わせは初期システムを用いる
- シミュレーションスタートから 200 日で 10 日連続稼働休止を発生

フェーズ 1 では前章までと同じ輸送速度 $V=27.78 \text{ km/h}$ (15 kt) を用い, フェーズ 2 では輸送速度を変更してシミュレーションを行った。

タンク内二酸化炭素量の減少速度に着目する。

■ 輸送距離 200 km

用いた初期システムとフェーズ 2 での輸送速度 27.78 km/h (15 kt) , 37.04 km/h (20 kt) のタンク内二酸化炭素量の推移を示す。またフェーズ移行条件として陸上タンク内二酸化炭素量が, 初期システムの積載可能量である 12000 ton を超えた時とした。

Table 5-1 用いた初期システム($L=200 \text{ km}$)

	DWT(ton)	隻数	FCS (h)	TBA (h)
初期システム	12000	2	15	20

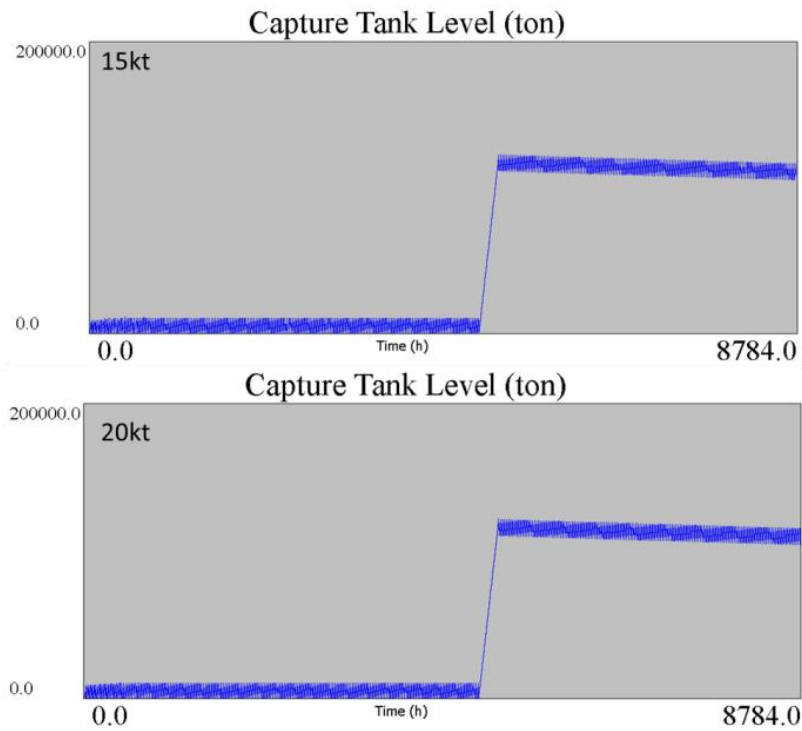


Fig. 5-1 速度変化オペレーションにおける二酸化炭素量の推移(L=200 km)

輸送距離 200km で船速を 15 kt から 20 kt に変更すると片道にかかる時間は約 1.8 時間しか変化しない. 速度変化オペレーションの効果は見られなかった.

■ 輸送距離 1000km

フェーズ移行条件を陸上タンク内二酸化炭素量が 10000 ton の時の Total Cost 変化とタンク内二酸化炭素量の推移を示す. こちらでもフェーズ移行条件として陸上タンク内二酸化炭素量が, 初期システムの積載可能量である 35000 ton を超えた時とした.

Table 5-2 用いた初期システム(L=1,000 km)

	DWT(ton)	隻数	FCS (h)	TBA (h)
初期システム	35000	2	59	66

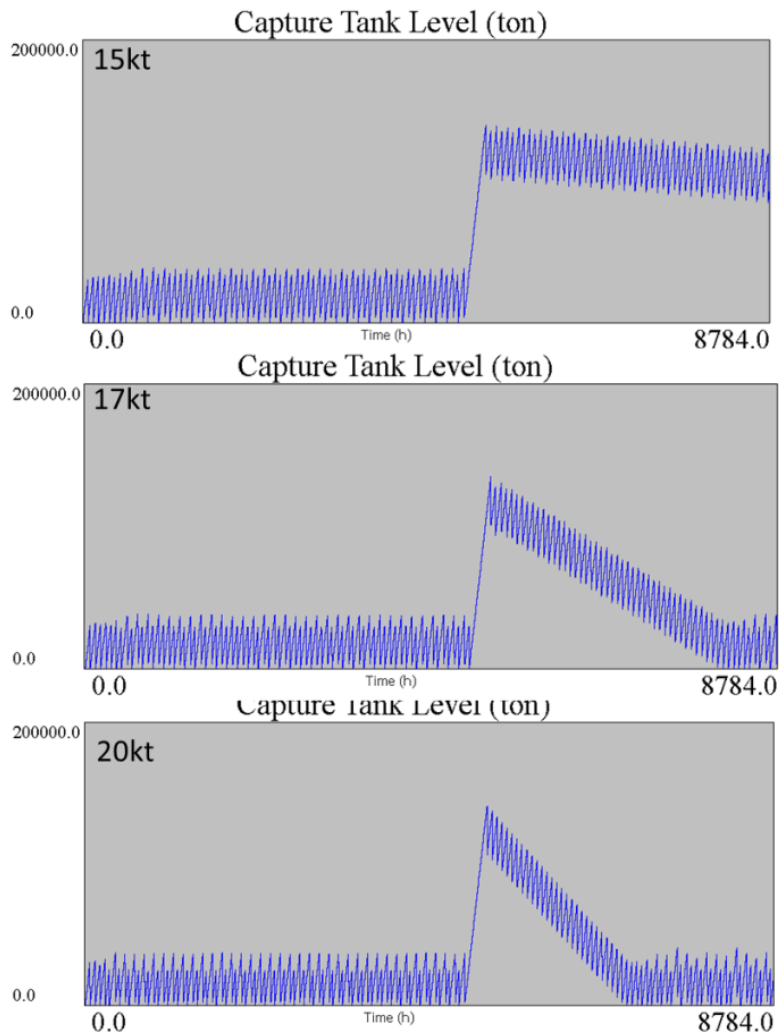


Fig. 5-2 速度変化オペレーションにおける二酸化炭素量の推移($L=1,000$ km)

輸送距離 1,000km で船速を 15 kt から 20 kt に変更すると片道にかかる時間は約 9 時間短くなる。

速度変化オペレーションは輸送距離が大きい場合効果を発揮することが示された。

5.2.4. 二酸化炭素回収量変動への効果

前項で、輸送距離が大きいとき速度変化オペレーションの効果が大きいことがわかった。そこで第 3 章で考察した、二酸化炭素回収量変動に対してどのような効果があるかを調べるために、以下の条件でシミュレーションを行う。

- シミュレーション期間は 366 日
- ローディング・圧入準備, また港・圧入サイトでの出発準備時間 $T_p, T_q=4$ h
- 港・圧入サイト, 24 h 利用可能
- 圧入流量 $q=720$ ton

また二酸化炭素回収量は年間の変動が大きい、③月別時系列での回収量を用いる。また積載可能量、隻数、*FCS*、*TBA*の組み合わせとして初期システム、調整システムの2種類のシステムでシミュレーションを行った。フェーズ移行条件はそれぞれ、陸上タンク内二酸化炭素量が、初期システムまたは調整システムの積載可能量を超えた時とした。

Table 5-3 月別時系列二酸化炭素回収量に対するシステムパラメータ($L=1,000$ km)

	DWT(ton)	隻数	FCS (h)	TBA (h)
初期システム	31000	2	59	66
調整システム	40000	2	59	76

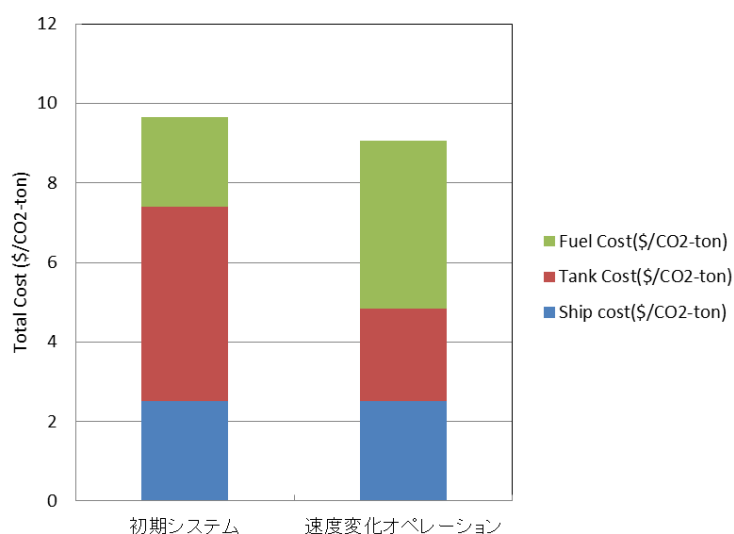


Fig. 5-3 速度変化オペレーションによる Total Cost の変化($L=1,000$ km, 初期システム)

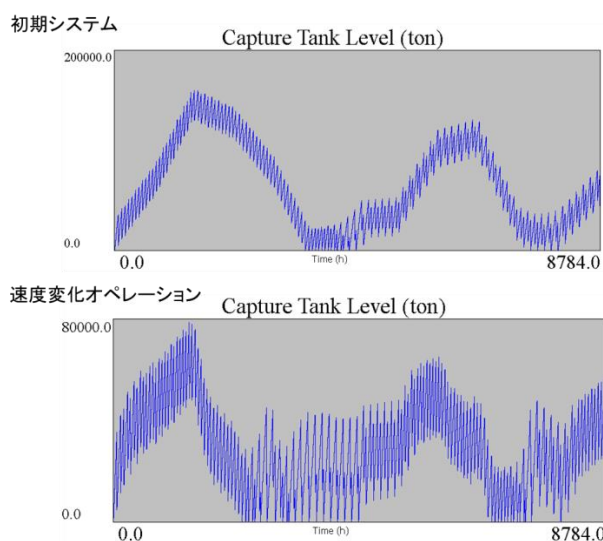


Fig. 5-4 速度変化オペレーションによる二酸化炭素量の推移($L=1,000$ km, 初期システム)
速度変化オペレーションが機能し、タンク内二酸化炭素量が増加していることがわかる。

しかしながら船速を大きくしたことにより、Fuel Cost は著しく増加している。

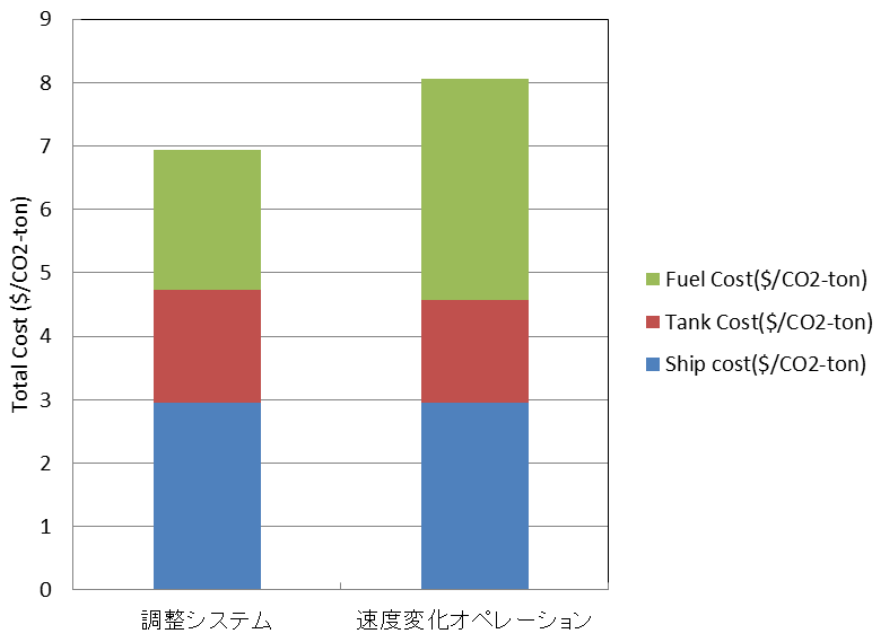


Fig. 5-5 速度変化オペレーションによる Total Cost の変化($L=1,000$ km, 調整システム)

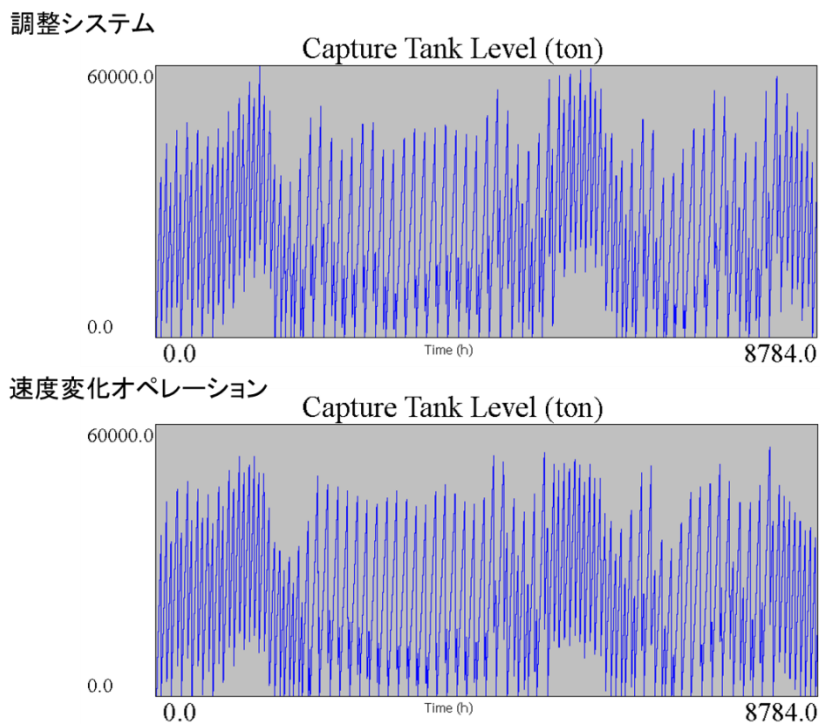


Fig. 5-6 速度変化オペレーションによる二酸化炭素量の推移($L=1,000$ km, 調整システム)

速度変化オペレーションが機能し、タンク内二酸化炭素量が増加していることがわかる。

しかしながら船速を大きくしたことにより、**Fuel Cost** は著しく増加してしまい、**Total Cost** としては速度変化オペレーションを導入しない方がよい。

5.2.5. まとめ

速度変化オペレーションは、輸送距離が長ければタンク内二酸化炭素量の減少に非常に大きな効果を発揮する。しかしながら **Fuel Cost** の増加が著しく **Total Cost** とのバランスが非常に難しい。**Fuel Cost** よりもタンク内二酸化炭素量の減少が優先される場合には積極的に用いていくべきオペレーションであろう。

第6章 結言

6.1. 本研究の結果

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
- を研究目標として定め, 次のことを行った.

■ 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の構築

- 初期計画による検討

初期計画における検討から, 要求される輸送船の積載量, 隻数, 圧入流量を導くことができる.

隻数が 2 以上になると待機時間が発生する可能性が高まるため初期計画で導き出された値よりも大きな積載量, 圧入流量が必要となる

- 物流シミュレーションモデルの構築
- 港・圧入サイトの利用可能時間の検討

港・圧入サイトの利用可能時間の条件を厳しくすればするほど要求される積載可能量, タンク容量は増加するが, 適切なシステム設計を行うことで **Total Cost** を抑えることができる.

- 圧入流量の検討

圧入流量が大きくなるほど要求される積載可能量はちいさくなり, **Ship Cost** は抑えることができる. 一方で 1 度の輸送量は小さくなるので **Fuel Cost** は大きくなり, 圧入流量の増加により **Total Cost** は低下するが, 一定の圧入流量以上になると効果が現れないことがわかった.

■ 二酸化炭素回収量変動による輸送システムへの影響分析

- 二酸化炭素回数時間変動モデルの作成
- 二酸化炭素回収量変動による輸送システムへの影響分析

輸送距離や圧入流量を変化させそれぞれの場合の影響を分析した. 輸送距離が長い方が二酸化炭素回収量の変動の影響を受けにくく, また圧入流量は回収量の最大値よりも大きくした方がよいことがわかった.

二酸化炭素回収量の変動により **Tank Cost** が増大することがわかった. 特に年間変動の影響は大きいことが示された. 再生可能エネルギーの短時間での変動影響は, 輸送方式が本来持つべき一時貯蔵タンクの存在によって吸収されている一方で, 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.

- 二酸化炭素回収量変動への対応

年最大の回収量を輸送できるシステムは二酸化炭素回収量の変動影響をほぼ受けることなく稼働することがわかった。また、回収量の変動が予期できる場合には変動に合わせたシステム設計をすることで **Total Cost** を抑えることができることがわかった。

■ 荒天時の稼働休止による輸送システムへの影響分析

• 海象データの分析

海域によって海象の傾向が異なり、稼働休止の発現確率や傾向が異なることがわかった。

• 圧入サイト稼働休止

連続稼働休止日数や断続的な稼働休止による輸送システムへの影響を分析した。輸送距離が長いほど稼働休止の影響が出る速度が遅く、短時間の稼働休止ならほとんど影響が出ないことが示せた。また稼働休止日数が増えるとタンク内二酸化炭素量も増大しその増加量は1日ごとに1日分の回収量であることが確認できた。稼働休止を考慮していないシステムでは、1度の稼働休止により増加したタンク内二酸化炭素量を消化することができず、以降稼働休止が起こるたびに二酸化炭素量は増加し続けることがわかった。

• 稼働休止への対応

積載可能量を大きくすることで稼働休止により増加した二酸化炭素を消化でき、その大きさによって挽回速度が変わることがわかった。

• 海象データを用いた稼働休止の影響分析

有義波高により稼働休止条件を定め、条件の波高を変えてシミュレーションを行った。どのサイトでも稼働休止条件が弱まるごとに **Total Cost** の減少が見られたが、サイトごとにその減少の仕方が異なり、稼働休止条件緩和の必要性が異なることが示せた。また適切なシステム設計を行うことで、稼働休止によって増加した二酸化炭素量を減少させ **Total Cost** が抑えられることがわかった。

■ 二酸化炭素量の変動に対応するオペレーションの提案と検証

• 速度変化オペレーション

挽回時の速度を定常時に比べ大きくすることで輸送能力を上げるオペレーションを提案した。輸送距離が短いときは効果が見られなかったが、輸送距離が長くなると効果を発揮した。挽回時の速度によってタンク内二酸化炭素の減少するスピードが異なることが示せた。しかしながら **Fuel Cost** が著しく増加するためコストだけを考えるならば速度変化オペレーションの導入はしない方がよく、逆にコストよりもタンク内二酸化炭素量の減少が求められるのであれば効果を発揮する。

様々な検証と分析を通して物流シミュレーションの有用性を確認できた。

6.2. 今後の展望

今後の課題として次のことが挙げられる

- ① より多くのパラメータの分析による完成度の高いシステムの構築
- ② オペレーション方法の検討

本研究では検証できなかったがあるシステムにおけるオペレーション方法は速度変化だけでなく多様に存在する。また本研究では発生した二酸化炭素の全量回収を前提としてシミュレーションを行ったが、緊急時の二酸化炭素の放出等も考慮に入れたオペレーションの検討が望まれる。

- ③ 評価軸の充実

本研究では評価軸として主にコストとタンク内二酸化炭素量を用いた。しかしながら余剰能力やシステム効率などはコスト評価だけでは測れず検討できなかった。

また今後の大きな展望としては

- ④ 大規模実証プロジェクトの輸送システム計画への応用

大規模で長期間のプロジェクトに対して時系列シミュレーションを行うことにより、様々な条件を考慮したシステム計画が可能となる。

- ⑤ 1 source to 1 sink からの拡大

本研究では港と貯留サイトが一对一の 1 source to 1 sink モデルを扱ったが多数の港対多数の貯留サイトでのオペレーションを考えることで船舶輸送の強みが出てくるのではないかと考えられる。

謝辞

本研究を進め、まとめるにあたり、たくさんの方々に支えられてきました。

まず初めに指導教員である尾崎雅彦先生にお礼を申し上げたいと思います。私がこんなにも興味を持って自ら研究に励むことができたのは、尾崎先生に常に見守って頂いて、手を差し伸べていただいたからだと思えます。迷惑をやご心配をかけることもたくさんあったと思えます。尾崎先生のもとで研究ができたこの2年間は、私の人生の中でも特別なものとなりました。このような面白いテーマで研究をさせてくださり、本当にありがとうございました。

副指導教員の平林紳一郎先生には副査面談、また専攻の飲み会などでお世話になりました。平林先生との会話は自分に深い気づきを与えてくれるものばかりでした。ありがとうございました。また専攻の先生方に御礼申し上げます。授業や授業以外にも様々なバックアップをしていただきありがとうございました。

さらに、海象分析の際、力を貸してくださった和田様にも感謝を表したいです。

研究室の1年先輩のウォンさんにもお礼を伝えたいです。いつもにこやかに話をしてくれるウォンさんがいたから最初の1年間は楽しく過ごすことができました。ありがとうございました。また鈴木研究室の先輩であった柴田さん、木村さん、菊池さん、村竹さんにも勉強会や合同研究会等大変お世話になりました。カルマン渦について教えていただいたことが懐かしく思い出されます。ありがとうございました。また研究室の後輩である盧君は本当にまじめで、気がよくて素晴らしい人間だと思います。修士論文提出前日に手作りの料理をふるまってくれて感極まりそうでした。支えてくれてありがとう。山本君にもお礼を届けたいです。至らない先輩で迷惑をかけていたと思えます。早く元気になってください。ありがとう。鈴木研究室の後輩たちもありがとう。駄目な先輩だったと思えますが私はいい後輩を持てたと思っています。ありがとう。そして研究室の同期である張さん。ありがとう。もう一人の研究室の同期である村田君とは、はじめは仲良くなれないだろうなと思っていました。まじめでスポーツマンでいけ好かない奴だと思っていました。ですが2年間に渡り同じ部屋で机を並べていると、なんだかんだでもう感謝の言葉しか出てきません。ありがとう。

また、研究室の先輩である岡崎さん、横山さん、松原さんに感謝申し上げます。先輩方の応援、差し入れがなければ現在目を開けていることすらできないと思えます。先輩方が残してくれたものを受けとり、受け継いでいくことができればと思います。さらに尾崎教授秘書である小河原千織さんには事務的なお手伝いのみでなく、様々な差し入れやその笑顔に救われていました。本当にありがとうございました。

今まで出会ってきたすべての人に感謝しています。

最後に私がここにいることを認めてくれている家族への感謝の意を述べて、終わりの言葉とさせていただきます。

参考文献

- [1] IPCC 第4次評価報告書第1作業部会報告書政策決定者向け要約
http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc/ar4/ipcc_ar4_wg1_es_faq_all.pdf
- [2] 外務省 HP http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/summit/italy09/sum_gai.html
- [3] 資源エネルギー庁 HP
<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/kihonkeikaku/100618honbun.pdf>
- [4] 資源エネルギー庁第28回基本問題委員会配布資料
<http://www.enecho.meti.go.jp/info/committee/kihonmondai/28th/28-1-1.pdf>
- [5] 電気事業連合会 HP <http://www.fepc.or.jp/>
- [6] 四国電力株式会社 HP
<http://www.yonden.co.jp/life/kids/teacher/datashu/sinene5.html>
- [7] IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage P. 13, P.31
- [8] RITE 次世代 CO₂ 分離回収技術の動向と RITE の取り組み
<http://180.235.241.158/news/events/pdf/kakushin101202-kazama-ppt.pdf>
- [9] 地球環境研究センターHP
http://www.cger.nies.go.jp/ja/library/qa/10/10-1/qa_10-1-j.html
- [10] RITE HP <http://www.rite.or.jp/Japanese/project/tityu/fuzon.html>
- [11] RITE 平成17年度地中貯留技術研究開発 成果報告書
- [12] W. D. Kelton, R. P. Sadowski, D. T. Sturrock. 「シミュレーション-Arena を活用した総合的なアプローチ-第4版」, コロナ社 (2007)
- [13] 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(平成23年度)
- [14] 資源エネルギー庁第28回基本問題委員会配布資料
<http://www.enecho.meti.go.jp/info/committee/kihonmondai/28th/28-1-1.pdf>
- [15] 資源エネルギー庁第17回基本問題委員会配布資料
<http://www.enecho.meti.go.jp/info/committee/kihonmondai/19th/19-1.pdf>
- [16] 東京電力 HP <http://www.tepco.co.jp/csr/renewable/wind/offshore.html>
- [17] 藤岡弘幸. (2012) 浮体式洋上風車の風車-浮体連星応答解析法の開発および連星応答特性に関する研究
- [18] 三菱重工 HP <http://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/483/483046.pdf>
- [19] 電力中央研究所 HP <http://criepi.denken.or.jp/research/news/pdf/den468.pdf>
- [20] 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