

東京大学大学院 新領域創成科学研究科

人間環境学専攻 産業環境学分野

修士論文

洋上石油資源開発プロジェクトへのロジスティック  
ハブ導入についての経済性評価に関する研究

2015年02月06日提出

指導教員 大和 裕幸 教授 印

学生証番号 47-136704

河野 裕



---

# 目次

---

目次.....	I
図目次.....	V
表目次.....	VIII
第1章 序論.....	1
1.1 背景.....	2
1.1.1 化石燃料への依存.....	2
1.1.2 ブラジルにおける海洋開発.....	3
1.1.3 プレソルト層における資源開発.....	4
1.1.4 海洋資源開発におけるロジスティックハブ導入の構想.....	5
1.1.5 ロジスティックハブ導入における問題点.....	7
1.2 目的.....	7
1.3 本論文の構成.....	8
第2章 関連研究.....	9
2.1 はじめに.....	10
2.2 資源開発における不確実性.....	10
2.2.1 資源開発プロジェクトのリスク評価.....	10
2.2.2 貯留槽容量推定.....	13
2.3 シナリオと意思決定.....	14
2.4 海上交通最適化.....	15
2.5 本研究の位置づけ.....	16
第3章 要素技術.....	18
3.1 はじめに.....	19
3.2 オペレーションズ・リサーチ.....	19
3.3 モデリング.....	20
3.3.1 資源開発プロジェクトのモデル.....	21

---

---

3.4 最適化手法 .....	23
3.4.1 非線形計画問題の記述 .....	23
3.4.2 勾配を用いる非線形計画問題アルゴリズム .....	24
3.4.3 勾配を用いない非線形計画問題アルゴリズム .....	26
3.4.4 Python を用いた非線形最適化 .....	29
3.5 経済的不確実性の取り扱い .....	29
3.5.1 ブラウン運動 .....	30
3.5.2 Wiener 過程 .....	30
第4章 提案手法 .....	32
4.1 はじめに .....	33
4.2 概要 .....	35
4.3 モデルの導入 .....	38
4.3.1 ロジスティックハブモデル .....	38
4.3.2 プロジェクトモデル .....	40
4.3.3 輸送モデル .....	45
4.3.4 シナリオモデル .....	47
4.4 開発したシステム .....	48
4.4.1 入力情報 .....	51
4.4.2 出力情報 .....	53
4.4.3 出力の可視化 .....	55
第5章 ケーススタディ .....	58
5.1 はじめに .....	59
5.2 ケーススタディ 1：単純なモデルによるデータ確認 .....	60
5.2.1 概要 .....	60
5.2.2 入力情報 .....	60
5.2.3 結果及び考察 .....	65
5.2.4 まとめ .....	76
5.3 ケーススタディ 2：ロジスティックハブの導入時期に関する検証 .....	77
5.3.1 概要 .....	77
5.3.2 入力情報 .....	77

---

---

5.3.3 結果及び考察 .....	78
5.4 ケーススタディ 3 : 経済的不確実性を含んだロジスティックハブ導入について の検証 .....	81
5.4.1 概要 .....	81
5.4.2 入力情報 .....	81
5.4.3 結果及び考察 .....	82
5.4.4 まとめ .....	84
5.5 ケーススタディ 4 : ロジスティックハブの持つ地理的性質の検証 .....	84
5.5.1 概要 .....	84
5.5.2 入力情報 .....	86
5.5.3 結果及び考察 .....	86
5.5.4 まとめ .....	90
第 6 章 考察 .....	91
6.1 ケーススタディに関する考察 .....	92
6.1.1 輸送モデルに関する妥当性 .....	92
6.1.2 原油価格の変動の影響 .....	93
6.1.3 ブラジル以外の大水深油田に関する考察 .....	94
6.2 提案手法に関する考察 .....	97
6.2.1 人員以外の輸送 .....	97
6.2.2 目的関数の設定 .....	98
6.2.3 最適化における滑降シンプレックス法 .....	98
6.2.4 石油資源開発と輸送コストの関係 .....	99
6.3 本研究の課題 .....	101
6.3.1 モデルに関する課題 .....	101
6.3.2 リアルオプションに関する課題 .....	101
第 7 章 結論 .....	102
7.1 結論 .....	103
7.2 今後の展望 .....	103
謝辞 .....	104

---

---

参考文献..... 106

## 図目次

図 1-1 増加する海上及び深海での原油・ガス生産量 [2] .....	2
図 1-2 ブラジル沖で発見された油ガス田 [3] .....	3
図 1-3 ブラジルにおけるプレソルト層の簡略図 [3].....	4
図 1-4 アンゴラにおけるプレソルト層を含んだ鉱区 [3] .....	5
図 1-5 ロジスティックハブの概要図 [6] .....	6
図 2-1 ENPV 計算のフローチャート [7] .....	11
図 2-2 石油資源開発におけるリアルオプション [9].....	12
図 2-3 石油資源開発におけるディシジョンツリー [10].....	12
図 2-4 プロスペクト評価の再現シミュレーション [11] .....	13
図 2-5 貯留槽評価の推移 [12].....	14
図 2-6 Nathalia ら [14]の考案した意思決定フロー.....	15
図 3-1 オペレーションズ・リサーチを用いたサイクル [21].....	20
図 3-2 洋上石油開発プロジェクトの生産量モデル [22].....	22
図 3-3 滑降シンプレックス法の適用例 [24].....	26
図 3-4 ブラウン運動の例 [28].....	30
図 4-1 ロジスティックハブがない場合の輸送形式 .....	35
図 4-2 ロジスティックハブがある場合の輸送形式 .....	35
図 4-3 必要なモデル .....	36
図 4-4 想定する意思決定手順および提案手法 .....	37
図 4-5 ロジスティックハブの移動決定アルゴリズム .....	39
図 4-6 プロジェクトモデルの模式図 .....	40
図 4-7 プロジェクトにおける生産量および作業人員数の推移 .....	41
図 4-8 提案手法で用いるシステムの概要 .....	49
図 4-9 ヘリコプターの必要数の出力例.....	53
図 4-10 輸送コストの出力例 .....	54
図 4-11 ロジスティックハブの位置の出力例（時系列） .....	55
図 4-12 ロジスティックハブの位置の出力例（座標平面） .....	55
図 4-13 可視化例.....	57

---

図 5-1 ケーススタディ 1 : 生成されたシナリオ .....	63
図 5-2 ケーススタディ 1 : プロジェクトの位置関係 .....	64
図 5-3 ケーススタディ 1 : 地図上でのプロジェクトの位置関係 .....	64
図 5-4 ケーススタディ 1 : プロジェクト実績データ (生産量) .....	65
図 5-5 ケーススタディ 1 : プロジェクト実績データ (生産量と作業人員数) ....	66
図 5-6 ケーススタディ 1 : ハブ導入なし (輸送に関わるコスト) .....	67
図 5-7 ケーススタディ 1 : ハブ導入なし (ヘリコプターの台数) .....	68
図 5-8 ケーススタディ 1 : ハブ導入固定 (輸送に関わるコスト) .....	69
図 5-9 ケーススタディ 1 : ハブ導入固定 (ヘリコプターの台数) .....	70
図 5-10 ケーススタディ 1 : ハブ導入固定 (ヘリポートの面数) .....	70
図 5-11 ケーススタディ 1 : ハブ導入固定 (ストラテジー) .....	71
図 5-12 ケーススタディ 1 : ハブ導入可動 (輸送に関わるコスト) .....	72
図 5-13 ケーススタディ 1 : ハブ導入可動 (ヘリコプターの台数) .....	73
図 5-14 ケーススタディ 1 : ハブ導入可動 (ヘリポートの面数) .....	74
図 5-15 ケーススタディ 1 : ハブ導入可動 (ストラテジー) .....	74
図 5-16 ケーススタディ 1 : 各ケースにおける第 5 週、500 週、1300 週の輸送状況 .....	75
図 5-17 ケーススタディ 2 : 用いるシナリオ .....	78
図 5-18 ケーススタディ 2 : 導入時期による合計輸送コストの変化 .....	79
図 5-19 ケーススタディ 2 : 第 0 週にハブを導入した場合の第 500 週における配置 .....	79
図 5-20 ケーススタディ 2 : 第 200 週にハブを導入した場合の第 500 週における配 置.....	80
図 5-21 ケーススタディ 2 : 第 400 週にハブを導入した場合の第 500 週における配 置.....	80
図 5-22 ケーススタディ 3 : 合計輸送コストの分布 (ドリフト率 0.00015) .....	82
図 5-23 ケーススタディ 3 : 合計輸送コストの分布 (ドリフト率 0) .....	82
図 5-24 ケーススタディ 3 : 合計輸送コストの分布 (ドリフト率-0.00015) .....	83
図 5-25 ケーススタディ 4 : 地理情報に対し導入する 2 指標 .....	85
図 5-26 ケーススタディ 4 : $\alpha = 0.8$ における輸送費の比較 .....	87
図 5-27 ケーススタディ 4 : $\alpha = 0.9$ における輸送費の比較 .....	87

---



---

図 5-28 ケーススタディ 4 : $\alpha = 1.0$ における輸送費の比較 .....	88
図 5-29 ケーススタディ 4 : $\alpha = 1.1$ における輸送費の比較 .....	88
図 5-30 ケーススタディ 4 : $\alpha = 1.2$ における輸送費の比較 .....	89
図 6-1 各プロジェクトの輸送人員数の推移.....	92
図 6-2 世界に存在する大水深油田 [35].....	94
図 6-3 メキシコ湾の大水深油田 [36] .....	95
図 6-4 アンゴラ沖におけるライセンスラウンドと油田 [37].....	96
図 6-5 北海における資源開発状況 [39].....	97
図 6-6 目的関数の等高線表示.....	99
図 6-7 各地域・開発箇所における石油採算価格 [40] .....	100

---

---

## 表目次

---

表 4-1 提案手法にて用いる用語と意味.....	34
表 4-2 最適化問題における数式及びその意味.....	40
表 4-3 プロジェクト生産量の決定における数式及びその意味.....	43
表 4-4 輸送コスト計算における数式及びその意味.....	47
表 4-5 プロジェクト設定.....	51
表 4-6 シミュレーション設定（全般）.....	52
表 4-7 シミュレーション設定（輸送手段）.....	52
表 5-1 ケーススタディの内容.....	59
表 5-2 ケーススタディ 1：シミュレーション設定（一般）.....	60
表 5-3 ケーススタディ 1：シミュレーション設定（輸送手段）.....	61
表 5-4 ケーススタディ 1：プロジェクト設定.....	62
表 5-5 ケーススタディ 1：合計の輸送コスト（単位：円）.....	76
表 5-6 ケーススタディ 3：シミュレーション設定（一般）.....	81
表 5-7 ケーススタディ 3：合計輸送コストの平均及び分散[百万円].....	83
表 5-8 ケーススタディ 4： $\alpha$ 及び $\beta$ のとりうる値.....	86
表 6-1（再掲）ケーススタディ 3：合計輸送コストの平均及び分散[百万円].....	93

---

---

# 第1章 序論

---

1.1 背景.....	2
1.1.1 化石燃料への依存 .....	2
1.1.2 ブラジルにおける海洋開発 .....	3
1.1.3 プレソルト層における資源開発 .....	4
1.1.4 海洋資源開発におけるロジスティックハブ導入の構想.....	5
1.1.5 ロジスティックハブ導入における問題点.....	7
1.2 目的.....	7
1.3 本論文の構成.....	8

---

## 1.1 背景

### 1.1.1 化石燃料への依存

限りある地球の資源に対する関心が高まり、石油や天然ガスの可採年数や化石燃料の使用がもたらす地球への悪影響を環境問題として扱うようになって久しい。そのような中で、一方ではクリーンなエネルギーの開発へ希望を託し、太陽光、水力、潮力、地熱、風力などの自然エネルギーについての研究が進められ、他方では新たな地球の資源の探求として、メタンハイドレートやシェールガス、シェールオイルなどの新資源の開発に力が入れられてきた。

しかし、IEA の予測によれば、化石燃料が全エネルギー源に占める割合は 2035 年の時点で 76%程度に上ると予測されている [1]。2014 年現在では同割合は 82%であり、その差は 6%に過ぎず、今後もなお化石燃料に対する依存度は大きいといえる。

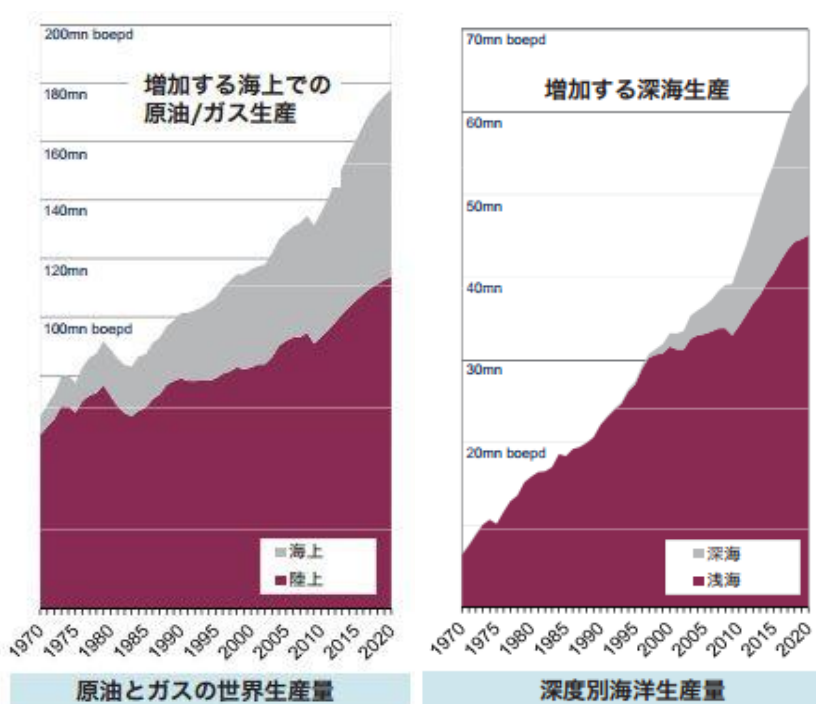


図 1-1 増加する海上及び深海での原油・ガス生産量 [2]

また、化石燃料の生産の動向についても確認が必要である。海上での原油・ガス生産量及び増加する深海での原油・ガス生産量について、図 1-1 に示す。今後、深海に存在する資源の開発がより一層進む可能性がある。

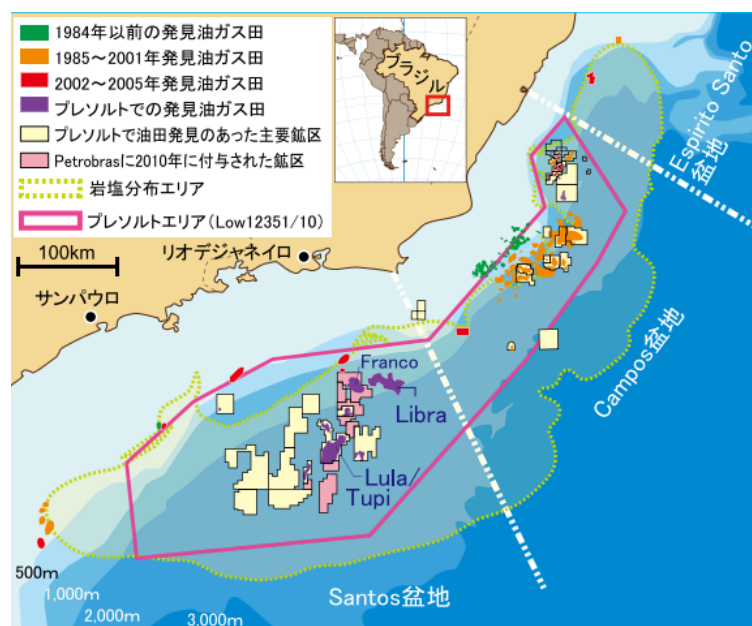


図 1-2 ブラジル沖で発見された油ガス田 [3]

## 1.1.2 ブラジルにおける海洋開発

この項目ではブラジルにおける海洋開発について述べる。

1.1.1 で記した通り、海上、そして深海での資源開発はより増加するであろうが、ブラジルにおいては既にその傾向が見受けられる。図 1-2 に、ブラジル沖で発見された油ガス田の位置を示す地図を示す。

図中の緑色の点は 1984 年以前に発見された油ガス田を表しているが、これらは水深が 500m 程度の比較的浅い海域に点在することがわかる。一方で 1985 年以降に見つかった油ガス田を表すオレンジ色の点や紫色の点、そして今後開発が進むと言われているプレソルト層の油ガス田を表す紫色及びクリーム色の地点は、水深が 1,000m 以上、一部は 2,000m を超える海域にプロットされていることが見て取れる。加えて、これらの油田はいわゆる深海に存在するだけでなく、古くに発見された油田とくらべて沖合に存在することも容易に把握できる。

---

### 1.1.3 プレスルト層における資源開発

1.1.2 にて言及したプレスルト層について説明する。

プレスルト層とは、炭酸塩からなる多孔質な岩石を多く含む地層のことであり、その岩石中には原油や天然ガスを含有することが可能である。こういった地層は岩塩層の下に存在することが多く、岩塩層よりも古い時代に形成された地層という意味で”Pre-Salt”の名前が付けられている。なお、岩塩層の上に存在する地層は反対に”Post-Salt”と呼ばれることがある。

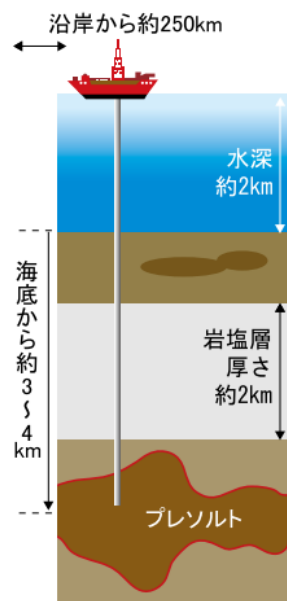


図 1-3 ブラジルにおけるプレスルト層の簡略図 [3]

従来、プレスルト層の資源を開発するには上部の岩塩層を突き抜ける必要があるが、その岩塩層が厚い場合には開発以前の探鉱において障害となり、本格的に開発することが困難と言われていた。しかし、技術が進歩するにつれ、プレスルト層の構造の解析と資源埋蔵量の把握が徐々に進み、一部の海域では実際に開発段階に至っている。

油ガス田として有望なプレスルト層はブラジル沖にも点在するが、ブラジル沖のプレスルト層は非常に厚い岩塩層に覆われている。ブラジルのプレスルト層のイメージを図 1-3 に示す。

---

前述のとおり、このような地層における油ガス田の探鉱および開発は困難を伴うが、ブラジル国営石油会社であるペトロbras社が2007年に Santos 盆地においてプレソルトを発見した。その後、この地域では Tupi を始めとした多くの油田が発見され、特に Franco、Libra などの大型油田は 50 億バレルの可採埋蔵量を持つと予測されていた。

なお、プレソルト層はブラジル沖のみならず、アンゴラ沖でも発見されている。図 1-4 にアンゴラ沖に存在する、プレソルト層を含んだ鉱区を示す。アンゴラはもとより海底油田の開発が盛んであったが、プレソルト層の発見・開発によりさらに原油の生産量が増加すると予想できる。

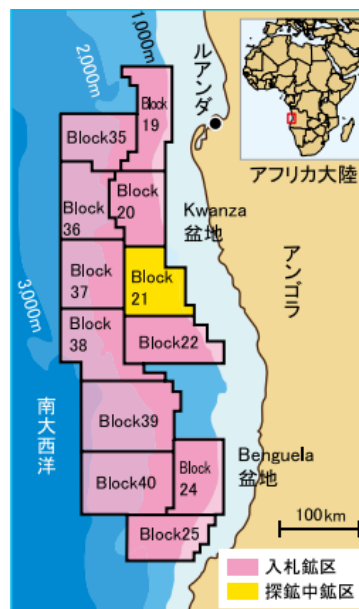


図 1-4 アンゴラにおけるプレソルト層を含んだ鉱区 [3]

#### 1.1.4 海洋資源開発におけるロジスティックハブ導入の構想

ブラジル沖での資源開発の対象となる鉱区や油田が徐々に沖合になるにつれ、いくつかの問題が発生しつつある [4]。

1 つ目は、ヘリコプターの航続距離の問題である。これまで洋上の FPSO (Floating Production, Storage and Offloading system) や掘削船など開発・生産プラットフォームへの人員輸送はヘリコプターによるシャトル輸送に支えられてきた。しかし、プラットフォームと陸上の拠点との距離がより遠くなることで、輸送途中でのヘリコプターへの給油が必要となる

---

可能性が出てきている。また、ヘリコプターの輸送における事故は石油産業における主要なリスクのひとつであるが、輸送の長距離化は事故リスクの上昇を招くという研究結果も存在する [5]。

2 つ目は、ヘリコプターの輸送コストの高さである。HSV (High Speed Vessel) など船舶と比べると、ヘリコプターの人員・距離あたりの輸送コストは著しく高い。そのため、今後も継続してヘリコプターによる輸送を行うことは、経済性についての疑問が残る。

3 つ目は、沖合にあるプラットフォームにおける災害対応の遅延である。資源開発における事故は数え切れないほど存在するが、ここでは一例として 2010 年のメキシコ湾原油流出事故を挙げる。この事故は 2010 年 4 月 20 日に発生した爆発事故であるが、その位置はメキシコ湾沖 80km と現在開発中のブラジル沖の鉱区と比較して近い距離にある。にもかかわらず、油の流出が停止したのは 7 月 15 日であり、実に 3 ヶ月近い期間を要している。この事実は、洋上資源開発における事故対応の難しさを示していると言えるであろう。

これらの問題を解決するため、日本の造船関連企業及び研究所によって作られた J-DeEP 技術研究組合は、ブラジル沖資源開発においてロジスティックハブと呼ばれる洋上物流拠点を導入することを構想している。ロジスティックハブの概要図を図 1-5 に示した。



図 1-5 ロジスティックハブの概要図 [6]

ロジスティックハブは、洋上プラットフォームと陸上の拠点の中間に位置する大型浮体で



---

ある。陸上基地とロジスティックハブの間を HSV による大量輸送、そしてプラットフォームとロジスティックハブの間をヘリコプターによるシャトル輸送で繋ぐことで、プラットフォームへの人員及び物資の輸送を実現する。

### 1.1.5 ロジスティックハブ導入における問題点

ロジスティックハブの導入においては、いくつか考慮すべき問題点が挙げられる。1 つは、ロジスティックハブの持つ一般的な性質が未知であるという点、そしてもう 1 つは、ロジスティックハブ導入に対する適切な条件や設計を明らかにする必要があるという点である。

ロジスティックハブは新しいコンセプトの構造物であり、海上の構造物であるために陸上の拠点と比べると容易に移動が可能である。こういった輸送拠点の前例はなく、導入することでどのような効果があるのか、また導入の要件が如何なるものかは不明である。それらの効果や要件について、資源開発に特有の不確実性を考慮した上で分析する必要があるであろう。

## 1.2 目的

以上の背景から、本研究の目的を洋上石油資源開発におけるロジスティックハブ導入の経済価値について、人員輸送コストの観点から評価する手法を提案することに定める。

提案手法では、人員輸送コストの計算に必要なモデルを構築・導入し、割引率を考慮したコストを最小化するロジスティックハブの配置計画を作成する。輸送に必要なコストに関して、ロジスティックハブ導入の有無による比較を行い、導入によって削減される輸送コストを見積もるとともに、ロジスティックハブや輸送に関する要件を求める。また、その過程で必要となる計算、シミュレーション及び可視化を支援するシステムを開発する。

ケーススタディでは提案手法を用い、ロジスティックハブの経済的・地理的性質を明らかにする。ロジスティックハブが輸送コストに対して与える影響について、地理的・経済的な情報に関わるパラメータを変化させつつ考察する。

---

## 1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下のとおりである。

第 1 章では、研究の背景及び目的について述べた。

第 2 章では、関連研究について述べる。関連の深い分野として、資源開発や意思決定、海上交通を挙げる。

第 3 章では、本研究で用いる要素技術について述べる。研究の枠組みとなるオペレーションズ・リサーチにはじまり、ハブの配置やコストの計算において用いるモデリング、最適化手法、不確実性の取り扱いについて説明を行う。

第 4 章では、本研究で提案する手法について述べる。提案手法にて想定する意思決定プロセスを含め、提案手法にて必要なモデルや開発したシステムについて説明する。

第 5 章では、提案した手法を用いたケーススタディについて述べる。入力情報を変更することで、経済的性質および地理的性質について明らかにする。

第 6 章では、本研究に関する考察を行う。ケーススタディの結果に基づき、ロジスティックハブの導入の実現に向けた検討をするとともに、手法の妥当性についても言及する。

第 7 章では、本研究の結論を述べる。

---

## 第2章 関連研究

---

2.1 はじめに .....	10
2.2 資源開発における不確実性.....	10
2.2.1 資源開発プロジェクトのリスク評価 .....	10
2.2.2 貯留槽容量推定 .....	13
2.3 シナリオと意思決定 .....	14
2.4 海上交通最適化 .....	15
2.5 本研究の位置づけ .....	16

---

---

## 2.1 はじめに

第 2 章では、本研究と関連のある分野の既存研究について紹介する。内容としては、資源開発における不確実性、貯留槽容量に関する推定、シナリオと意思決定、海上交通の最適化が挙げられる。

## 2.2 資源開発における不確実性

### 2.2.1 資源開発プロジェクトのリスク評価

中西 [7]は、石油地質リスクの定量評価及びそれを反映させた経済性評価の手法を提案している。石油地質リスクについては、5 つのメインファクターである熟成根源岩の存在、炭化水素の移動集積、貯留岩の存在、クロージャの存在、炭化水素の保持について 0 から 1 の度合いで確率的評価を行い、そこから可採埋蔵量確率分布を計算する。そして、確率分布から NPV の確率分布曲線を算出し、経済的成功時・経済的不成功時と地質的成功時・地質的不成功時の 4 つの場合分けを行った上で、NPV (Net Present Value) の期待値である ENPV (Expected Net Present Value) を計算している。図 2-1 に、ENPV の計算フローチャートを示した。

安達ら [8]は、複数の投資段階からなるプロジェクトの評価手法に用いるため、モンテカルロ法によってコンパウンド・オプションを評価するアルゴリズムの構築を行っている。資源開発プロジェクトが概査・探査・精査・開発・操業という多段階を持っていることに着目し、それらがリアルオプションにおいてシーケンシャルな多段階投資であるという解釈を行った上で、SSA (Stratified State Aggregation) 法を改良したアルゴリズムを提案した。

Dias [9]は洋上石油開発プロジェクトにおけるフレキシビリティに重点を置いたプロジェクト評価手法を提案している。経済的な不確実性の元での投資判断において、成功確率と成功時の NPV の積から投資額を差し引いた値である EMV (Expected Monetary Value) を用いた計算を行っている。また、生産井の拡張や探鉱情報の確定への投資など、技術的な面の不確実性についても分布の形を考慮している。図 2-2 に石油資源開発とその各段階におけるリアルオプションを図示した。

Morten [10]は資源開発におけるフレキシビリティについて、原油価格の市場リスクと貯留槽の不確実性を導入した上で、動的計画モデルによるプロジェクトの経済性評価を行って

---

いる。図 2-3 には石油資源開発の各ステージにおける単純化されたディシジョンツリーを示す。

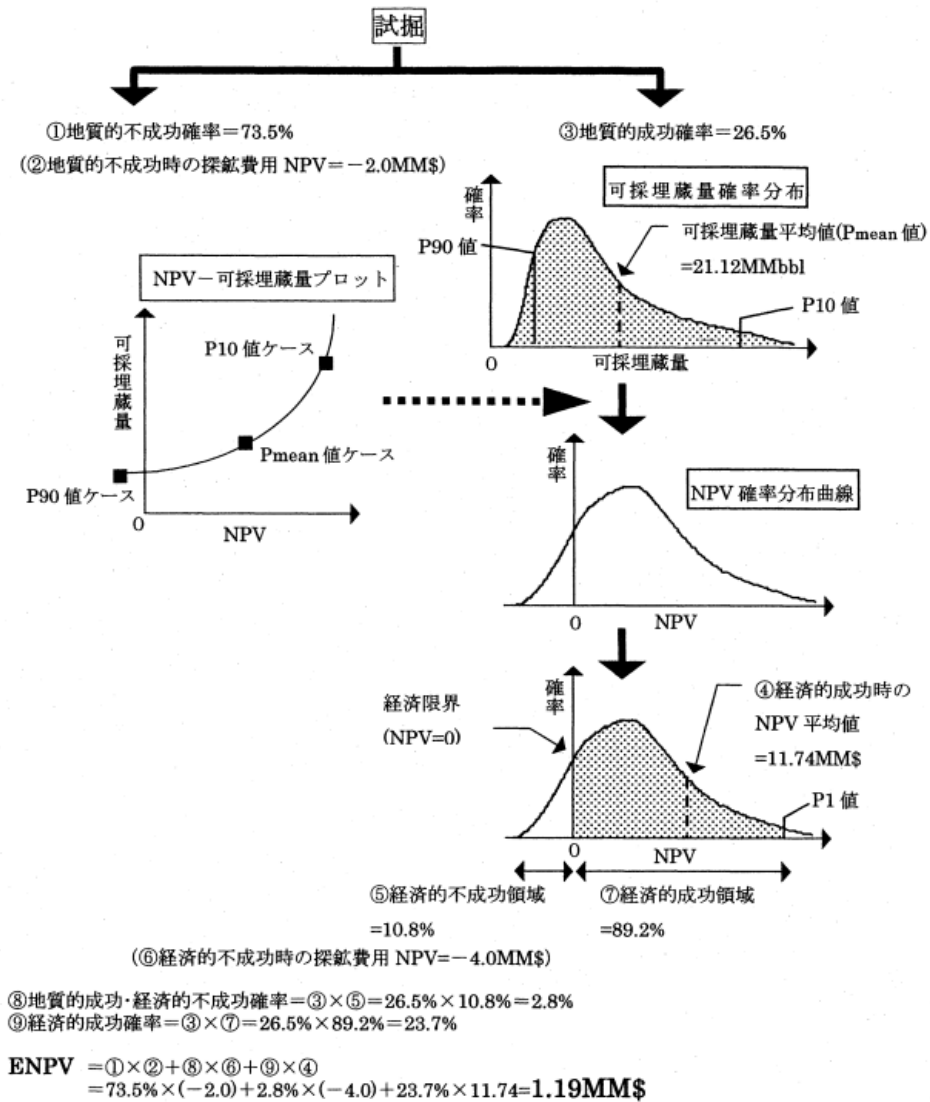


図 2-1 ENPV 計算のフローチャート [7]

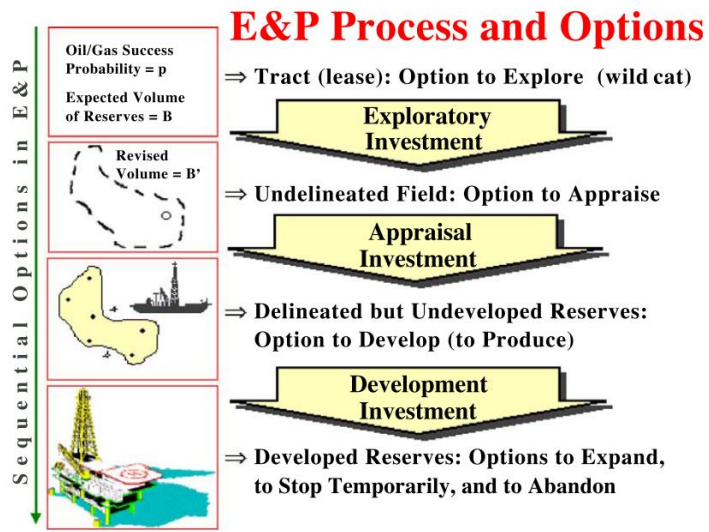


図 2-2 石油資源開発におけるリアルオプション [9]

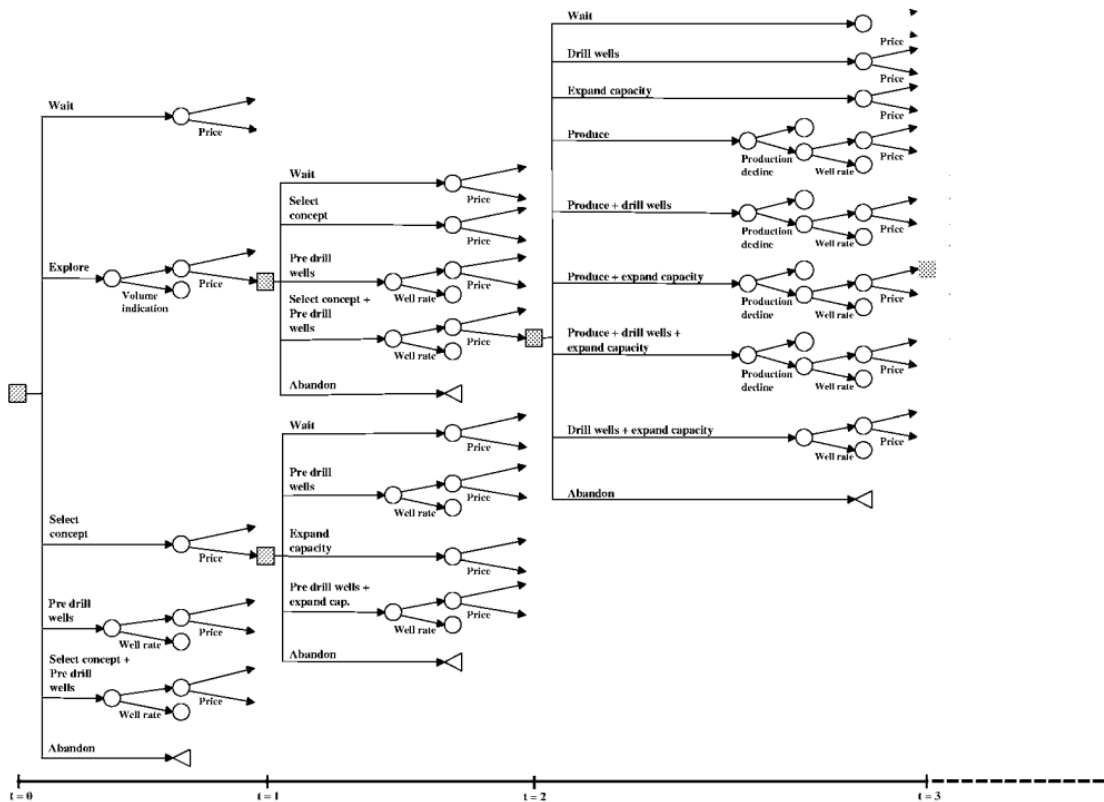


図 2-3 石油資源開発におけるディシジョンツリー [10]

## 2.2.2 貯留槽容量推定

井上ら [11]は、石油探鉱における意思決定を支援するため、リスクを正確に評価し、利用を可能にする手法を複数提案している。その中で、埋蔵量評価において過大評価の原因が評価システムにあることを指摘した。すなわち、油田の分布が小規模なものほど数が多く大規模なものほど数の少ないべき乗分布の形をしていると仮定した上で、その仮定に基づいたモンテカルロ・シミュレーションを行い、実際に過大評価が起こることを示している。図 2-4 に、評価手法の再現シミュレーションの様子を示した。

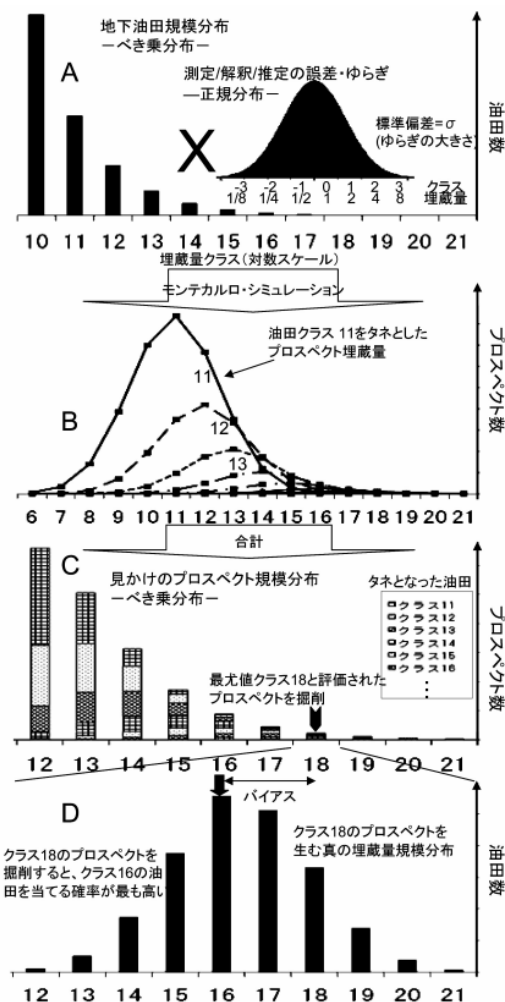


図 2-4 プロスペクト評価の再現シミュレーション [11]

---

Jijun ら [12]は、貯留槽の評価について確率的ジャンプ過程を含んだモデルを提案している。このモデルを用いることで、北海油田の 34 の貯留槽の過去のデータについて再現が可能となった。あくまで応用先のひとつであり、その他の人間による不正確な知識が利用されているシステムに関しても導入が出来るとしている。図 2-5 に、同モデルを用いた場合の貯留槽評価の推移を示した。情報量が増えるとともに、推定される容量のばらつきが減少する傾向が現れている。

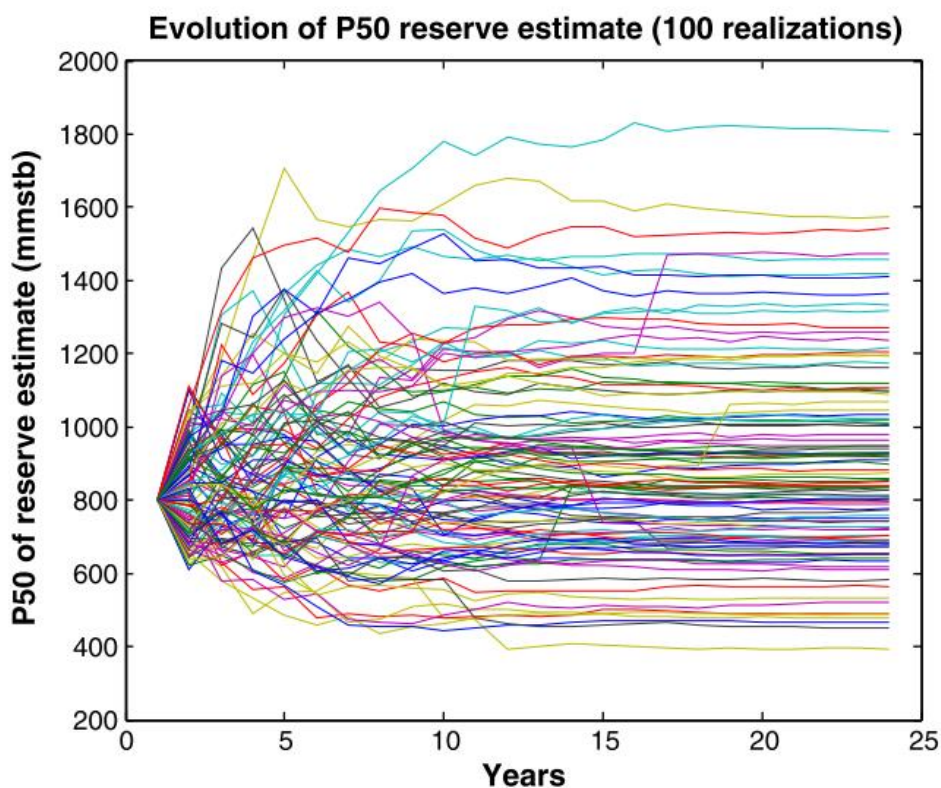


図 2-5 貯留槽評価の推移 [12]

## 2.3 シナリオと意思決定

松倉ら [13]は、海上輸送システムにおける意思決定を支援する手法として、主として原子力発電分野で利用されていた確率論的安全評価(PSA, Probabilistic Safety Assessment)を利用した評価手法を提案している。イベントツリー分析やフォルトツリー解析を導入し、将

---



---

来の変化について意思決定者による主観を交えた確率的な分岐シナリオを生成することで、多くの分岐について自動的に、かつシナリオ間の相関を考慮した発生確率の分布を表現することが可能となっている。この際、発生確率に関する分類や表現を同時に行っている。

## 2.4 海上交通最適化

Nathalia ら [14]は、ペトロブラス社における石油資源開発戦略の策定の一環として、沿岸部への新たなヘリポートの開設を含めた、会場設備への作業員の空輸計画の最適化手法について検討している。Nathalia ら [14]が考案した輸送ネットワークの計画手法のフローを図 2-6 に示す。各掘削リグに関する生産量の将来予測及び過去の人員移動データ、ヘリコプターの市場に関する評価、各ヘリポートに関するコストや設備情報という3つのデータを元にインプット情報を作成し、それらを元に輸送計画の最適化を行う。そして、最適化による結果について感度分析や定量評価を経て、意思決定の一助となる情報を生成する、という流れになっている。

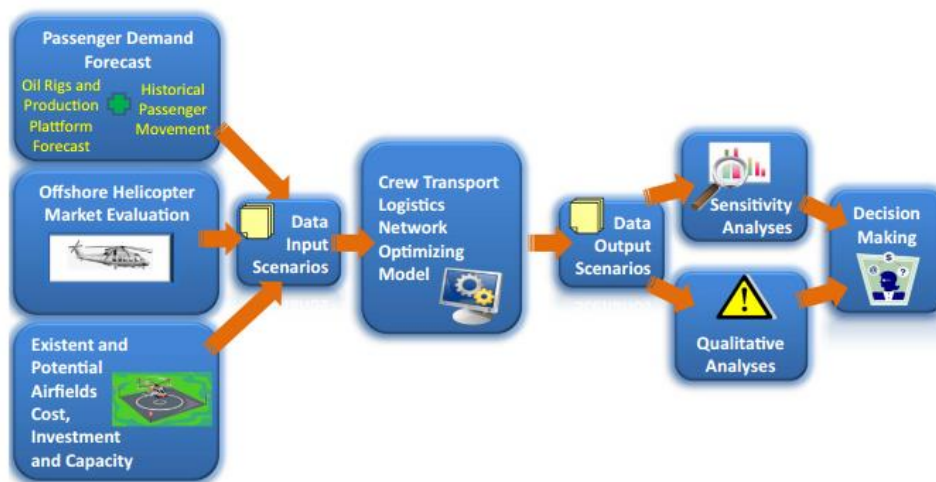


図 2-6 Nathalia ら [14]の考案した意思決定フロー

Gerard ら [15]は海上人員輸送における最適化問題のひとつとして、ヘリコプターの航続距離を含めた線形計画問題を定式化している。クラスタ分割を行った後にルートを生成するというヒューリスティクスを導入することで、従来手法と比べてデータセットに対する結果が

---

---

良いことを示している。

Qian ら [16]は石油資源開発でのヘリコプターの離着陸及び移動における死者数の期待値で表される、被雇用者とパイロットのリスクの最小化を行った。最適な日毎のルーティングを行うとともに、離着陸において乗客がさらされるリスクが大部分を占めるが、そのリスクは乗客数を減らすことで軽減出来るという結果を示した。

Menezes ら [17]はペトロプラス社のヘリコプター輸送に関してコスト削減を行うための日毎のルーティングを算出するシステムを開発した。実際にカンポス盆地に存在する生産プラットフォームへの輸送最適化に用い、年間 20 億円程度のコスト削減に成功している。

Romero ら [18]は遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm, GA)を用いたルーティングを行うためのソフトウェアである SMART-Logistics を開発した。ソフトウェアによって生成されるルートが、10%程度のコスト削減を行えることを示している。

Tam ら [19]は週単位の航空スケジューリング問題に対して、確率的計画法及び多変数最適化を用いた 2 通りのアプローチを比較しており、多変数最適化ではコスト及びロバストネスの 2 つの指標を用いている。

Yan ら [20]は China Airline におけるスケジューリング問題を取り扱った。問題をネットワーク上のフローによってモデル化し、コストを目的関数とした定式化を行っている。

## 2.5 本研究の位置づけ

輸送計画問題については解析期間や対象での分類が可能である。特に対象については、瞬間ごとの最適なルーティングを生成するリアルタイムなものから、艦隊設計の問題、そして長期的なネットワーク計画などがあり、それによって導入すべきモデルも異なる。また、解析期間については日単位、週単位、年単位など、対象とする問題によって異なる。

本研究は、ロジスティックハブの導入における意思決定を支援するため、前例のない構造物であるロジスティックハブに関するコスト削減効果について検討する。その際に、データの生成やコスト計算に必要なモデルやアルゴリズムを導入・構築する。また、結果の可視化を行うための意思決定支援システムを開発する。

ロジスティックハブは海上構造物であり、その耐用期間も長期が想定されるため、問題の種類としては長期のネットワーク計画問題が最も近い分類である。ただし、ロジスティックハブ導入の効果を見極めることを主眼に据えるため、ネットワークにおいて自由に変動しうる

---

---

要素をロジスティックハブの位置に限定する。資源開発に関する不確実性をモデル内に含め、輸送量及び輸送にかかるコストの算出において用いる。

---

## 第3章 要素技術

---

3.1 はじめに .....	19
3.2 オペレーションズ・リサーチ .....	19
3.3 モデリング .....	20
3.3.1 資源開発プロジェクトのモデル .....	21
3.4 最適化手法 .....	23
3.4.1 非線形計画問題の記述 .....	23
3.4.2 勾配を用いる非線形計画問題アルゴリズム .....	24
3.4.3 勾配を用いない非線形計画問題アルゴリズム .....	26
3.4.4 Python を用いた非線形最適化 .....	29
3.5 経済的不確実性の取り扱い .....	29
3.5.1 ブラウン運動 .....	30
3.5.2 Wiener 過程 .....	30

---

---

## 3.1 はじめに

第3章では、本研究に用いる要素技術について説明する。

3.2 で説明するオペレーションズ・リサーチは、研究対象である意思決定プロセスのモデル化において参考としている。3.3 では、資源開発プロジェクトの生産量等の予測において必要となるモデリングについて解説する。3.4 では、ロジスティックハブの配置計画の生成において用いる、目的関数の最小化を行う最適化手法について述べる。3.5 では、本研究において経済的不確実性を取り扱うためのモデルについて説明する。

## 3.2 オペレーションズ・リサーチ

オペレーションズ・リサーチとは、統計学を始めとした各学問を利用したモデル化を用い、経営や生産、運営などの効率化や評価を行うための手法の総称である。オペレーションズ・リサーチに分類される代表的な事例としては、階層的意思決定法 (Analytic Hierarchy Processes, AHP)、線形計画法、組合せ最適化、動的計画法、ネットワーク計画、ゲーム理論、シミュレーションなどが挙げられる。

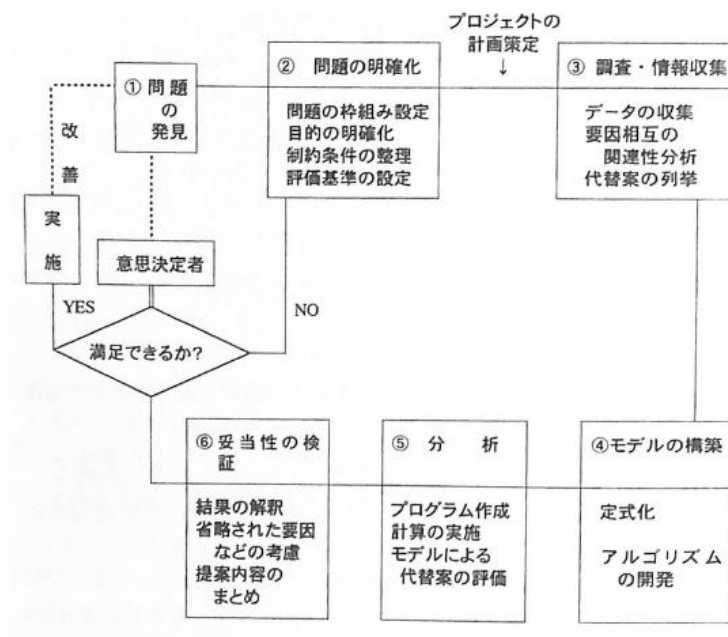


図 3-1 オペレーションズ・リサーチを用いたサイクル [21]

オペレーションズ・リサーチを用いた場合の仕事のサイクルを図 3-1 に示す。問題の発見、問題の明確化、調査・情報収集については一般的な仕事と似ているが、モデルの構築、分析などはオペレーションズ・リサーチに特有といえるであろう。これらの段階を経ることで、必要な評価指標などを導出し、意思決定を支援する。一般的な知的作業プロセスにおいても同様のやり方を行うことは多いが、オペレーションズ・リサーチにおいては問題をより明確にし、評価が行い易い「操作性の高いモデル」をつくり、精緻な検討を進めることとなる。

問題を解決するに当たり、現実に即したモデルを作成し、各代替案についての計算を実行することで評価を行うことがオペレーションズ・リサーチにおいて重要となる [21]。

### 3.3 モデリング

モデリングとは、問題における必要な情報のみを抽出して定式化し、不必要な情報を破棄することである。モデリングには、いくつかの種類があると森ら [21]は述べている。

---

(前略)…モデルにはいくつかのモードがある。

- ① 認識を助けるものとしてのモデル
- ② 問題・減少を理解するための、思考実験および数理実験手段としてのモデル
- ③ 意思決定のシステム化を促進するための手段としてのモデル

OR でも、いろいろなモードのモデルを使っているが、主として③のレベルのモデルを目指している。

モデリングにおいては、情報の取捨選択が非常に重要となる。例えば、機械学習において文章のクラスタリングを行う際、bag of words という手法を用いることを考える。bag of words は文章に用いられている単語の集合で文章自体をベクトル化する手法であるが、その際に単語間の繋がりは無視される。これは、単語の順序が与える影響が無視できるほど小さい、もしくは無視しても十分な精度が出るという前提で行われているためであり、情報の簡略化の一つであると言える。なお、この場合のモデリングとしての正確性についてはここでは考慮していない。

本研究においては、資源開発プロジェクトや輸送手段についてのモデルを用いるが、そのうち資源開発プロジェクトに関しては Jijun [22]の提案したモデルを利用する。

### 3.3.1 資源開発プロジェクトのモデル

Jijun [22]によれば、洋上石油開発プロジェクトは3つの段階に分けることが可能である。すなわち、建設期間、平坦期間、減衰期間の3つである。それぞれの段階の生産量をグラフに表したものを図 3-2 に示す。

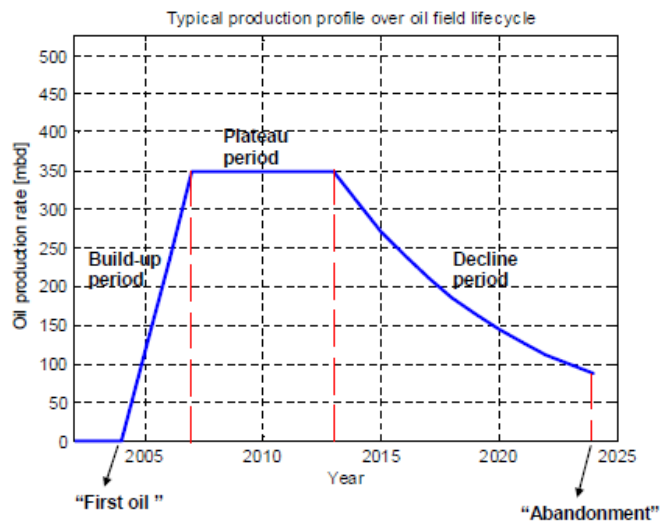


図 3-2 洋上石油開発プロジェクトの生産量モデル [22]

(1) 建設期間 (Build-up period)

建設期間においては、新たな生産設備が設置され、その生産量の増加の割合は生産井や掘削のスケジューリング、洋上設備の容量などに左右される。この段階は数ヶ月から数年間継続する。

(2) 平坦期間 (Plateau period)

生産井が劣化し、その生産量が減るまでは、一定の生産量を保つ期間となる。この期間は石油開発の場合およそ 2~5 年継続する。

(3) 減衰期間

貯留槽内の圧力や生産物内の原油の割合が減るにつれて、生産井の生産量も減少する。この段階は他の 2 つの期間と比べて長くなりおよそ 10~15 年程度となるが、この長さは油田の特性や、原油生産におけるリカバリースキームなどに依存する。

なお、(3)の減衰期間において、技術的または経済的な終了条件に抵触した場合、プロジェクトは終了される。経済的な条件については、一般に収入が運営コストを下回った場合が多い。



---

## 3.4 最適化手法

最適化手法には、線形計画、非線形計画、整数計画、動的計画などの種類が存在する。本研究では、そのうち非線形計画について扱う。

### 3.4.1 非線形計画問題の記述

非線形計画問題は、一般に式(3.1)で表される。

$$\begin{aligned} P: \min. & f(\mathbf{x}) \\ \text{s.t. } & g_i(\mathbf{x}) \leq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m_1), \\ & h_j(\mathbf{x}) = 0 \quad (j = 1, 2, \dots, m_2) \end{aligned} \tag{3.1}$$

ただし、式(3.1)において  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $g_i: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $h_j: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  とする。この際、 $f(\mathbf{x})$  を目的関数、 $g_i(\mathbf{x})$  を不等式制約、 $h_j(\mathbf{x})$  を等式制約と呼ぶ。 $g_i(\mathbf{x})$  および  $h_j(\mathbf{x})$  を合わせて制約式もしくは制約条件といい、これらを全て満たす解は許容解と呼ばれる。さらに、許容解すべての集合  $\Omega$  は許容領域と呼ばれ、式(3.2)で表される。

$$\begin{aligned} \Omega = \{ \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n \mid & g_i(\mathbf{x}) \leq 0, h_j(\mathbf{x}) = 0 \} \\ & (i = 1, 2, \dots, m_1, j = 1, 2, \dots, m_2) \end{aligned} \tag{3.2}$$

また、許容解を持たない問題は実行不能であるといい、問題の最適解  $\mathbf{x}^*$  は式(3.3)で表される。

$$\mathbf{x}^* \in \Omega, \forall \mathbf{x} \in \Omega, f(\mathbf{x}^*) \leq f(\mathbf{x}) \tag{3.3}$$

ここまでの表記は一般的な線形計画問題と同様であるが、非線形計画問題においては目的関数や制約式が非線形な関数で記述される。

なお、非線形計画問題に用いるアルゴリズムは大きく2種類に分類することが可能である。すなわち、目的関数の勾配を用いるか否かによって分けることが出来る。

---

### 3.4.2 勾配を用いる非線形計画問題アルゴリズム

勾配を用いるアルゴリズムとしては、最急降下法、共役勾配法、Newton 法、準 Newton 法などが挙げられる。この場合、アルゴリズムは一般的に以下のような手順として記述される。

- (a)  $\mathbf{x}$  に対し適当な初期値  $\mathbf{x}(k) = \mathbf{x}(0)$  を与える。なお、繰り返し回数を表すパラメータ  $k$  は 0 とする。
- (b) 式(3.4)より、 $\mathbf{x}(k)$  が解であるか否かの判定を行う。

$$\left\| \frac{df(\mathbf{x}(k))}{d\mathbf{x}} \right\| = \left\| \left[ \frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n} \right]^T \right\| = 0 \quad (3.4)$$

なお、実際に計算を行う場合、右辺が 0 と等しくなることは非常に稀であるため、許容できる適当な値  $\varepsilon$  を用いて式(3.5)を終了判定とする。

$$\left\| \frac{df(\mathbf{x}(k))}{d\mathbf{x}} \right\| < \varepsilon \quad (3.5)$$

ただし、計算を行うプログラムによっては式(3.5)のみによる終了判定では不十分な可能性がある。そのような場合は、式(3.6)及び式(3.7)といった終了判定を併用する。

$$\|f(\mathbf{x}(k+1)) - f(\mathbf{x}(k))\| < \varepsilon_2 \quad (3.6)$$

$$\|\mathbf{x}(k+1) - \mathbf{x}(k)\| < \varepsilon_3 \quad (3.7)$$

- (c) (b)による判定の結果、解に収束していない場合は、 $k$ 回目の計算結果を用いて目的関数  $f$  を減少させる新たな点  $\mathbf{x}(k+1)$  を探索する。点  $\mathbf{x}(k+1)$  は式(3.8)によって計算される。

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{x}(k) + \alpha(k)\mathbf{p}(k) \quad (3.8)$$

---

この式の右辺は、現在の点 $\mathbf{x}(k)$ に対し、歩み幅 $\alpha(k)$ 及び探索方向 $\mathbf{p}(k)$ を用いて新たな点を生成することを表している。この歩み幅及び探索方向は、用いるアルゴリズムによって異なる計算により導出される。

### 3.4.2.1 最急降下法

最急降下法では、歩み幅及び探索方向を式(3.9)および式(3.10)で決定する。

$$\alpha(k) = C, C = \text{const.} \quad (3.9)$$

$$\mathbf{p}(k) = -\frac{df(\mathbf{x}(k))}{d\mathbf{x}} \quad (3.10)$$

この方法を用いた場合、大域的収束性が保証されるが、収束が遅く計算回数が増大する傾向がある。そこで、収束を早めるために歩み幅を1次元最適化によって定める場合があるが、その場合は最適勾配法と呼ばれる。

### 3.4.2.2 共役勾配法

共役勾配法はベクトルの共役性を用いたアルゴリズムである。歩み幅を1次元最適化によって定める一方、探索方向 $\mathbf{p}(k)$ を式(3.11)、式(3.12)および式(3.13)によって計算する。

$$\mathbf{g}(k) = \frac{df(\mathbf{x}(k))}{d\mathbf{x}} \quad (3.11)$$

$$\mathbf{p}(k) = -\mathbf{g}(k) + \beta(k)\mathbf{p}(k-1) \quad (3.12)$$

$$\beta(k) = \frac{\mathbf{g}(k)^T(\mathbf{g}(k) - \mathbf{g}(k-1))}{\|\mathbf{g}(k-1)\|^2} = \frac{\|\mathbf{g}(k)\|^2}{\|\mathbf{g}(k-1)\|^2} \quad (3.13)$$

### 3.4.2.3 Newton 法

Newton 法は、歩み幅を一定(=1)、探索方向を式(3.14)および式(3.15)によって定めたものである。 $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ は Hesse 行列である。

$$\mathbf{p}(k) = -\mathbf{H}(\mathbf{x}(k))^{-1} \frac{df(\mathbf{x}(k))}{d\mathbf{x}} \quad (3.14)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}(k)) = [h_{ij}] = \left[ \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \right] \quad (3.15)$$

Newton 法は解近傍における収束速度は速いが、初期点を解の比較的近傍に取る必要がある。また、Hesse 行列及びその逆行列の計算が必要であり、計算量が多くなる。そこで、Hesse 行列の逆行列を近似して求めるアルゴリズムがいくつか考案されているが、それらの方法を準 Newton 法と呼ぶ。

### 3.4.3 勾配を用いない非線形計画問題アルゴリズム

#### 3.4.3.1 滑降シンプレックス法

滑降シンプレックス法では、初期シンプレックスを与え、そのシンプレックスを反射、拡大、縮小させて最適解を求める [23]。滑降シンプレックス法によって目的関数を最小化している例を図 3-3 に示す。

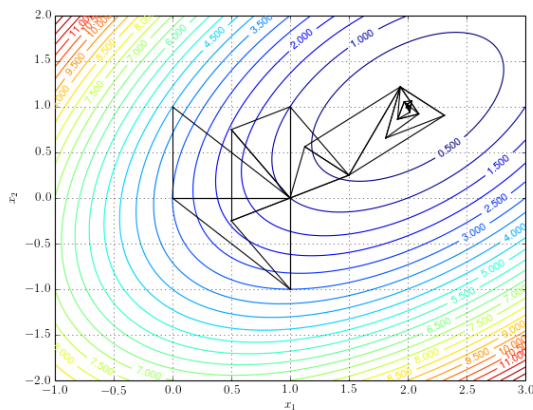


図 3-3 滑降シンプレックス法の適用例 [24]

具体的なアルゴリズムは、以下の手順で記述される。

(a)  $n$ 個の変数に対し $n + 1$ 個の点からなる初期シンプレックス $S_0$ をつくる。一般に

---

は、式(3.16)に示すように、初期点 $x_0$ を選択し、各軸の単位ベクトルと係数 $\alpha$ の積の和をそれぞれ加えて $n$ 個の点を作成する。

$$x_i = x_0 + \alpha * e_i \quad (3.16)$$

$$(i = 1, \dots, n)$$

(b)  $n + 1$ 個の点から、3点 $H, G, L$ を選ぶ。それぞれ式(3.17)、式(3.18)および式(3.19)を満たす点である。

$$x_H \in S_k, \forall x \in S_k, f(x_H) \geq f(x) \quad (3.17)$$

$$x_G \in S_k, \forall x \in S_k \cap \overline{\{x_H\}}, f(x_G) \geq f(x) \quad (3.18)$$

$$x_L \in S_k, \forall x \in S_k, f(x_L) \leq f(x) \quad (3.19)$$

(c) 式(3.20)により、点  $H$  以外の点全ての重心 $x_c$ を計算し、この重心について点  $H$  の鏡映  $R$  を求める。

$$x_R = 2x_c - x_H \quad (3.20)$$

この鏡映  $R$  について関数値 $f_R$ を求め、その値によって場合分けを行い、次に用いられるシンプレックスの点 $x_N$ を求める。

(1) 鏡映  $R$  が「良い点」ではない場合

すなわち、 $f_R \geq f_H$ である場合は、式(3.21)および式(3.22)によってシンプレックスの点の縮小を行う。

$$x_N = (1 - \lambda_1)x_H + \lambda_1 x_R \quad (3.21)$$

$$(0 < \lambda_1 < 1, \lambda_1 \neq 0.5)$$

$$f_N = f(x_N) \quad (3.22)$$

(2) 鏡映  $R$  が「良い点」であり、式(3.23)を満たす場合

---

---

$$f_R < \frac{f_L + (\lambda_2 - 1)f_H}{2} \quad (3.23)$$

$$(\lambda_2 > 1)$$

この場合、式(3.24)および式(3.25)によってシンプレックスの点の拡大を行う。

$$\mathbf{x}_E = \lambda_2 \mathbf{x}_R - (\lambda_2 - 1) \mathbf{x}_H \quad (3.24)$$

$$f_E = f(\mathbf{x}_E) \quad (3.25)$$

拡大を行った結果、式(3.26)を満たすのであれば、 $\mathbf{x}_N = \mathbf{x}_E$ とする。

$$f_E \leq f_R \quad (3.26)$$

(3) 上記以外の場合

$\mathbf{x}_N = \mathbf{x}_R$ とする。

(d) 新たに作成したシンプレックスの点 $\mathbf{x}_N$ が式(3.27)を満たす場合、次回の探索が前回の探索と同じ変形となる。

$$f_N \geq f_G \quad (3.27)$$

プログラムを用いる場合はこの時点で無限ループに陥るため、回避する必要がある。滑降シンプレックス法では、式(3.28)によってシンプレックス全体の縮小を行う。

$$\mathbf{x}_i = 0.5 \times (\mathbf{x}_i + \mathbf{x}_L) \quad (3.28)$$
$$(i = 1, \dots, n)$$

(e) 終了条件である式(3.29)が満たされればアルゴリズムを停止する。そうでない場合、(b)へ戻り、アルゴリズムの手順を繰り返す。

---

---

$$\sum_{i=1}^{n+1} (f_i - f_L)^2 < \varepsilon \quad (3.29)$$

### 3.4.4 Python を用いた非線形最適化

本研究ではシステムの実装においてプログラミング言語である Python を用いるが、Python には科学技術計算に用いるためのライブラリがいくつか存在する。

Scipy [25]は、そのようなライブラリのうちの 1 つである。特に、`scipy.optimize` は最適化に用いるためのルーチンが数多く実装されたサブモジュールとなっている。`scipy.optimize` には以下の手法が実装されている。

(a) `fmin`

滑降シンプレックス法を用いた最適化アルゴリズム。

(b) `fmin_powell`

修正 Powell 法を用いた最適化アルゴリズム。

(c) `fmin_cg`

非線形共役勾配法を用いた最適化アルゴリズム。

(d) `fmin_bfgs`

BFGS 法を用いた最適化アルゴリズム。BFGS 法は準 Newton 法の 1 種である。

(e) `fmin_ncg`

Newton-CG 法を用いた最適化アルゴリズム。

本研究では、勾配を用いたアルゴリズムは局所解に陥る可能性が高いことを考慮し、滑降シンプレックス法によって最適化を行うこととする。

## 3.5 経済的不確実性の取り扱い

経済的不確実性については、原油価格の市場変動を主として取り扱う。市場変動については連続確率分布と離散確率分布による 2 つのモデルが存在する。本研究では、連続確

---

---

率分布を用いた経済的不確実性の表現を導入する。

### 3.5.1 ブラウン運動

ブラウン運動はスコットランドの植物学者であった Robert Brown により発見された現象である。Robert Brown 自身は水中に浮かべた花粉が不規則な運動をしているという事実を発見しただけであったが、その後 Louis Bachelier [26]や Albert Einstein [27]によって粒子の運動を記述するモデルとして定式化された。ブラウン運動の一例を図 3-4 に示す。

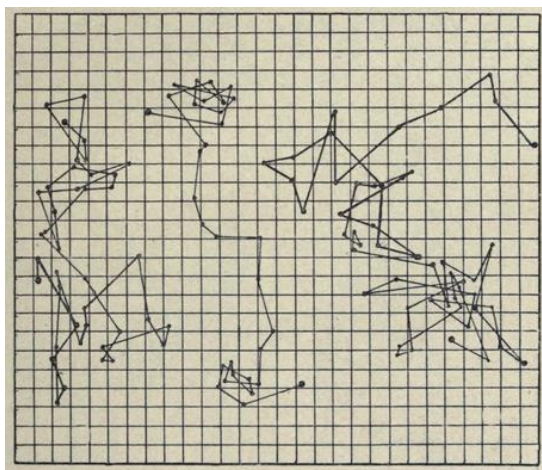


図 3-4 ブラウン運動の例 [28]

### 3.5.2 Wiener 過程

ブラウン運動は数学的モデルとして Norbert Wiener により定式化された。以下の式(3.30)及び式(3.31)を満たす連続な確率過程  $W = (W_t, t \in \mathbf{R}_+)$  を Wiener 過程と呼ぶ。

$$W_0 = 0 \tag{3.30}$$

$$\begin{aligned} \text{Cov}(W_s, W_t) &= \min(s, t) \tag{3.31} \\ s, t &\geq 0 \end{aligned}$$

この確率過程について、各時刻における確率分布に正規分布を用いたものを特に

---



---

Gaussian Wiener 過程と呼ぶ。また、幾何ブラウン運動と呼ばれる場合もある。

なお、資源価格の確率過程の表現に関しては、ジャンプ過程や平均回帰過程などの多くのモデルが研究されている [29] [30]が、本研究では最も一般的と言われている Gaussian Wiener 過程を用いる。

---

## 第4章 提案手法

---

4.1 はじめに.....	33
4.2 概要.....	35
4.3 モデルの導入.....	38
4.3.1 ロジスティックハブモデル.....	38
4.3.2 プロジェクトモデル.....	40
4.3.3 輸送モデル.....	45
4.3.4 シナリオモデル.....	47
4.4 開発したシステム.....	48
4.4.1 入力情報.....	51
4.4.2 出力情報.....	53
4.4.3 出力の可視化.....	55

---

---

## 4.1 はじめに

本章では、本研究における提案手法について説明する。ここでは提案手法において想定している状況について述べる。

資源開発を行う会社(以下、意思決定者とする)がある段階において今後の経営計画を定める状況を想定する。その際、意思決定者はまず現在の情報を収集する。収集される情報としては、現在の開発状況、探鉱状況、落札する予定の鉱区、市場環境などが挙げられる。

次に、意思決定者は将来の予測を行う。すなわち、収集した現在の情報を元に、将来の生産計画、市場環境の変動、開発する貯留槽の情報精度の変化などを緻密に予測する。

ここで、従来通りの人員・物資輸送を行う場合は、予測した結果を元に研究開発や設備投資、販売計画などを定める。一方、ロジスティックハブの導入を検討する場合は、この段階で導入による経済効果を計算し、ロジスティックハブの設計などとともに導入計画を定めると考えられる。

このような状況においてロジスティックハブの導入計画を検討する段階を、本研究の対象とする。すなわち、ある程度の経済的・地質的不確実性を含みながらも将来の開発計画が定められており、将来の生産量なども一定の予想が可能である、という状態を想定している。提案手法やシミュレータの説明にて用いている用語を表 4-1 に示す。

表 4-1 提案手法にて用いる用語と意味

用語	意味
プロジェクト	資源開発プロジェクトを指す。
フェーズ	それぞれのプロジェクトの生産段階を表す単語。
計算期間	提案手法によってシミュレーションが行われる期間のことである。
シナリオ	シミュレーションにおいて経済的・地質学的不確実性を取り扱うためのデータのことである。計算期間における原油価格や貯留槽に関する情報の変動を表す時系列データを含む。
プロジェクト実績データ	プロジェクト実績データは、輸送手段に関する最適化が行われる前に生成される、シナリオごとに確定する情報のことである。プロジェクトにおける生産量や作業人員数、プロジェクトのフェーズなどを時系列データとして持つ。
輸送実績データ	輸送実績データは、輸送設計の最適化が行われた後に生成される輸送に関するデータのことである。単位時間あたりの輸送人員数、輸送時間、輸送コストなどを時系列データとして持つ。
デザイン	提案する手法によって出力される結果のうち、輸送手段に係る設計
ストラテジー	提案する手法によって出力される結果のうち、ロジスティックハブの配置計画に関する部分

---

## 4.2 概要

本研究では、洋上石油資源開発プロジェクトにおけるロジスティックハブ導入の経済価値を評価する手法を提案する。ロジスティックハブは、現在ヘリコプターによって行われている人員輸送の効率化を目的として導入されるが、それによって人員輸送にかかるコストにどのような影響があるのかを明らかにする。

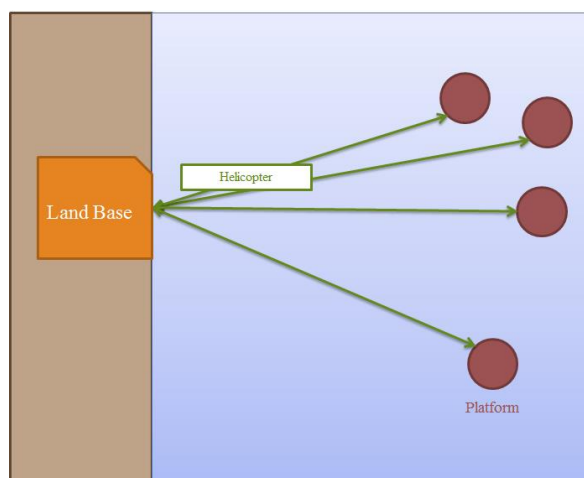


図 4-1 ロジスティックハブがない場合の輸送形式

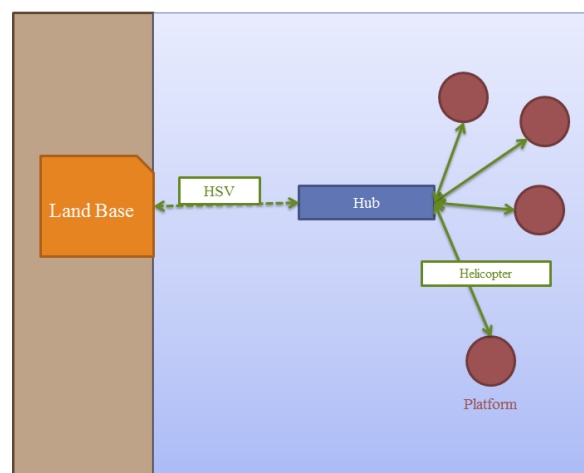


図 4-2 ロジスティックハブがある場合の輸送形式

ロジスティックハブを導入していない場合、すなわち従来の輸送方式を図 4-1 に示す。陸上に存在する基地と海上に存在する資源開発のプラットフォームの間を、ヘリコプターに

---

よるシャトル輸送によって結んでいる。一方、ロジスティックハブを導入した場合の輸送方式を図 4-2 に示す。陸上基地とプラットフォームの間にロジスティックハブを位置させ、陸上基地とロジスティックハブの間を HSV による大量輸送、そしてロジスティックハブとプラットフォームの間をヘリコプターによるシャトル輸送で結ぶ方式となる。

これらの場合において経済価値を算出するには、3 つの段階を経る必要があると考えられる。

#### (1) ロジスティックハブ及び輸送手段に関するモデルの設定

ロジスティックハブを導入する場合、その設計、予算及び配置などは輸送において非常に重要な情報である。また、資源開発プロジェクトや市場環境に関する情報も必要である。本研究においては、ロジスティックハブの導入及び運営に必要なコストは現段階では知り得ないものと仮定し、それ以外の情報を定めることとする。

図 4-3 に、必要なモデルを図示した。市場環境をシミュレートするためのシナリオモデル、輸送に関係する HSV モデル、ヘリコプターモデル、ロジスティックハブモデル、そしてプロジェクトや輸送量を計算するためのプロジェクトモデル、輸送人員モデルを設定する。各モデルの詳細な説明は 4.3 にて記述する。

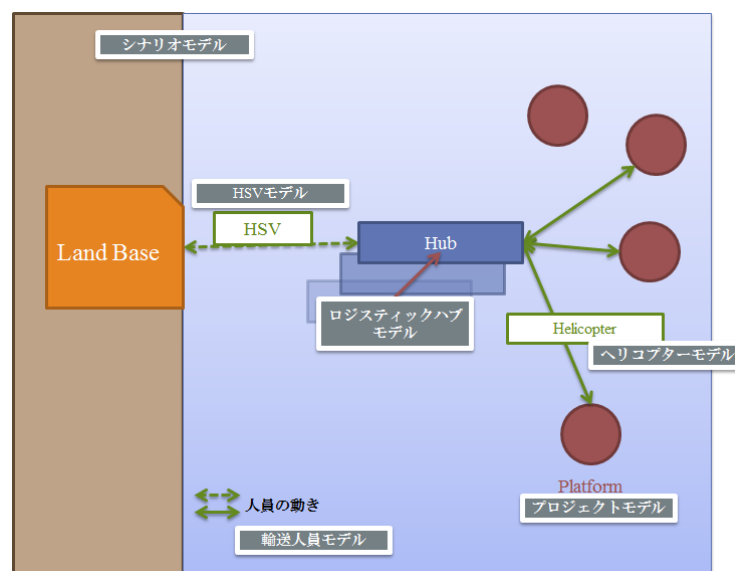


図 4-3 必要なモデル

#### (2) ロジスティックハブ配置計画の生成

導入したモデルを元に、「ロジスティックハブの導入段階で知りうる情報」から輸送に

必要なコストを最小にするロジスティックハブの配置計画を生成する。ロジスティックハブを導入する場合、HSV による大量輸送及びヘリコプターによるシャトル輸送の 2 種類の輸送モードのボリュームによって輸送全体に必要なコストが変化するが、それらのボリュームを決定するにはロジスティックハブの位置が必要不可欠である。

(3) 輸送に必要なコストの計算

生成された配置計画を元に、実際に人員輸送に必要なコストを算出する。輸送コストは、ロジスティックハブに関するコスト、HSV に関するコスト、ヘリコプターに関するコストの 3 種類に分類して計算する。

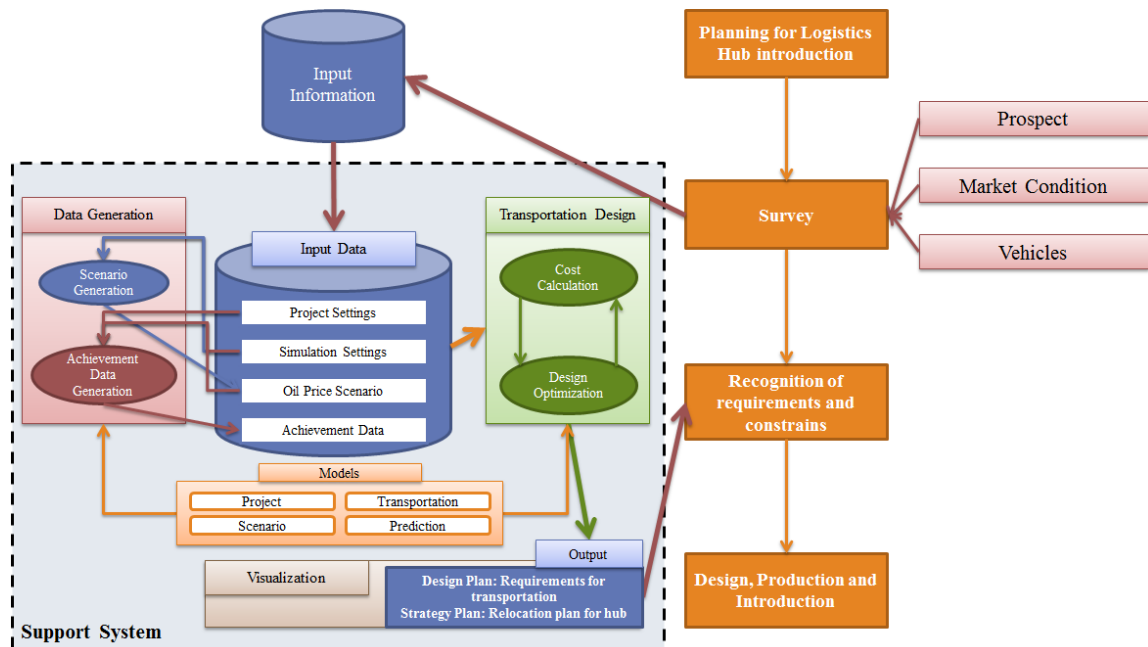


図 4-4 想定する意思決定手順および提案手法

以上の流れを踏まえ、図 4-4 に提案手法を示す。右側の橙の四角は本手法で想定しているプロセスを示す。「ロジスティックハブ導入の計画」から始まり、「現状の把握」、「要件の認知」、そして「建造の開始」という流れである。提案手法では、「現状の把握」から入力情報を導き出し、それらを元に「要件の認知」に必要なデザイン及びストラテジーを生成する。この入力情報については主に既存の研究やモデルを用いて導出するが、特にロジスティックハブについては独自にコストの計算及び移動アルゴリズムを定める。

---

## 4.3 モデルの導入

資源開発プロジェクトの人員輸送にかかるコストを計算するため、図 4-3 に記したモデルを導入する。

### 4.3.1 ロジスティックハブモデル

ロジスティックハブに関しては、現状では未知の情報が多く、具体的な設計に落とし込むのはいささか困難を伴う。そこで、ロジスティックハブに関しては既存の構造物を参考に推測が可能と考えられる係留コスト及び燃料消費量のみをモデルの情報として保持する。製造コスト、運用コストなどはロジスティックハブの設計に依存する変数として捉え、今回はモデルには含めない。

ロジスティックハブに係するコストは式(4.1)によって計算される。時刻 $t$ において $D_{move}$ はロジスティックハブの移動距離、 $P_{oil_c}(t)$ は C 重油の価格、 $FC_{hub}$ はロジスティックハブの燃料消費量、 $C_{hub,moor}$ は係留コストを表す。

$$C_{hub} = \sum_{move} (P_{oil_c}(t) \times FC_{hub} \times D_{move}(t) + C_{hub,moor}) \quad (4.1)$$

#### 4.3.1.1 ロジスティックハブの移動決定モデル

ロジスティックハブの移動の決定を行うアルゴリズムを図 4-5 に示した。

(1) フェーズ変化の検出

各週においてプロジェクトのフェーズが変化したかどうかを検出する。もしフェーズの変化がなければハブを移動させず、次の週へと移る。それ以外の場合、すなわちフェーズの変化があった場合には、(2)の実績の予測へと移行する。

(2) 実績の予測

その週における各実績データから、その週以降の実績データの予測を行う。予測においてはシナリオの値を全て一定とする。

(3) 輸送コスト最適化

予測データを元に、輸送コストが最小となるハブの移動先を算出する。

---



#### (4) 移動の可否

ハブを移動した場合のコストがハブを移動していない場合のコストを下回る場合、ハブの位置を更新する。そうでない場合はハブを移動しない。

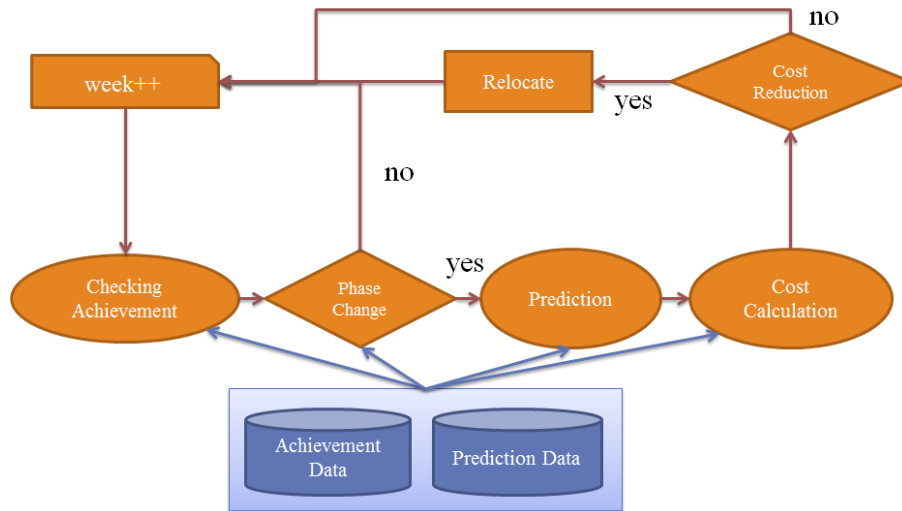


図 4-5 ロジスティックハブの移動決定アルゴリズム

#### 4.3.1.2 最適化問題の定式化

ロジスティックハブの導入によって輸送コストを削減できるよう、目的関数である合計輸送コストの最小化を行う配置計画を求める必要がある。時刻 $T$ におけるロジスティックハブの配置は、式(4.2)について滑降シンプレックス法を適用することで求められる。

$$\min_{x(T), y(T)} C_{total} = \quad (4.2)$$

$$\min_{x(T), y(T)} \sum_{t=T}^{Dur} (C_{hsv} + C_{hub} + C_{heli}) \times \left(\frac{1}{1+r}\right)^t$$

それぞれの数式や変数が示す意味を表 4-2 に記した。

表 4-2 最適化問題における数式及びその意味

数式・変数	意味
$x(t), y(t)$	時刻 $t$ におけるロジスティックハブの座標
$C_{total}$	輸送に関わるコストの合計
$C_{hsv}$	HSV に関する輸送コスト
$C_{heli}$	ヘリコプターに関する輸送コスト
$C_{hub}$	ロジスティックハブに関するコスト (移動費、係留費)
$r$	単位時間あたりの割引率
$Dur$	計算の対象とする期間

これらのコストの具体的な計算は以降の節にて説明する。

### 4.3.2 プロジェクトモデル

プロジェクトに関するモデルは、Lin [22]のモデルを拡張することで作成する。

プロジェクトにはそれぞれ1つの貯留槽が存在し、その貯留槽の上に複数の生産設備が設置される。その模式図を図 4-6 に示す。

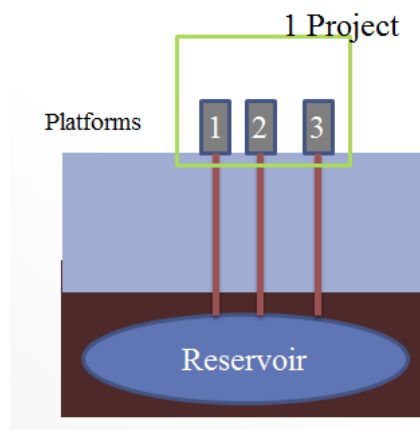


図 4-6 プロジェクトモデルの模式図

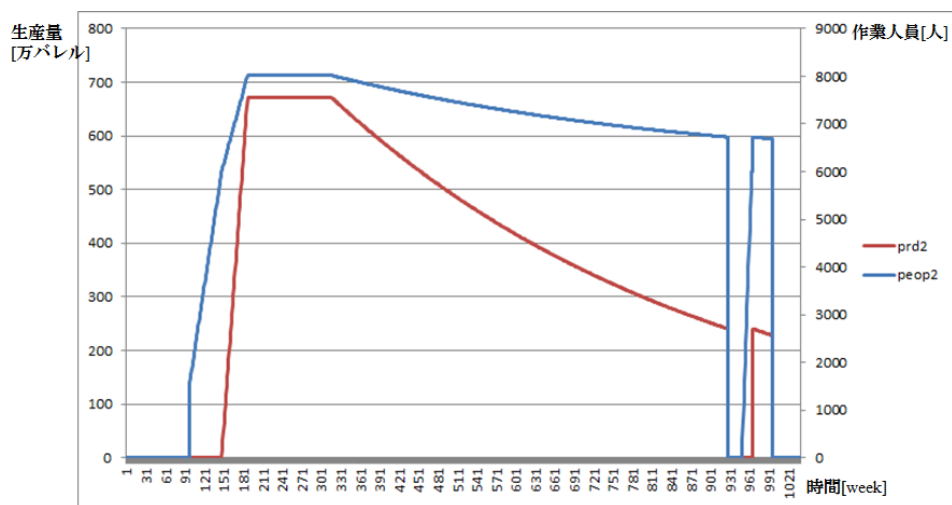


図 4-7 プロジェクトにおける生産量および作業人員数の推移

輸送人員を考慮するために Jijun [22] のモデルを拡張し、全てのプロジェクトは 7 種類のフェーズから成り立つとする。生産量についての変更はないが、輸送人員数を考慮できるように建設段階及び再生産の段階を追加している。図 4-7 にて各状態をグラフに表した。青いグラフはプロジェクトにおける作業人員数、赤いグラフはプロジェクトの生産量を表している。

(1) 開発前フェーズ

開発が行われる前の段階を表す。探鉱など事前調査が行われているが、ヘリコプターによる人員輸送はほとんど存在しないため、本研究では輸送人員数を 0 として扱う。

(2) 開発フェーズ

プロジェクトの開発期間かつ、生産が行われていない段階を表す。開発が進むにつれて徐々に作業人員数が増加するが、生産量は 0 のまま推移する。この期間はプロジェクトごとの開発計画に依存する。

(3) 生産初期フェーズ

プロジェクトの生産初期の段階を表す。生産設備が一定程度整い、生産が開始出来る状態である。ただし、建設中や未稼働の生産井も存在し、それらが稼働に移るたびに徐々に生産量が増加する。この期間はプロジェクトごとの開発計画に依存する。

(4) 生産安定フェーズ

全ての設備が揃い、貯留槽内の圧力の一定以上の減少や技術的な問題が発生して

---

いない段階であり、生産量が安定する。この期間はプロジェクトごとの生産井の設備や油田の特徴に依存する。

(5) 生産減衰フェーズ

ある程度が生産が進み、生産量が減少傾向に入った段階を表す。貯留槽内の圧力の減少や技術的な課題などが主な原因となる。一般に、この段階においては水の注入などで生産量を回復させる処置を行うことがあるが、本研究では扱う対象の事例とはしない。

(6) 中止フェーズ

生産量が減少し、また原油価格の変動などによって原価率がある一定の値を超えてしまった場合、プロジェクトを途中で中止する。

(7) 再生産フェーズ

原油価格の変動により、原価率がある一定の値を下回ると判断された場合、中止していたプロジェクトを再開する。

#### 4.3.2.1 プロジェクト生産量の決定

プロジェクトにおける原油の生産量は、式(4.3)、式(4.4)及び式(4.5)にて決定する [31]。

$$Q_{max,p,t} = \min\{N_{well,p}\widetilde{Q}_{w,t}, Q_{p,t}, Q_{r,t}\} \quad (4.3)$$

$$Q_{r,t} = N_t Q_{w,t} \frac{R_t}{R_0} \quad (4.4)$$

$$\widetilde{Q}_{w,t} = \gamma Q_{w,t} (\gamma \leq 1) \quad (4.5)$$

ここで、各数式の意味を表 4-3 に示した。

表 4-3 プロジェクト生産量の決定における数式及びその意味

数式・変数	意味
$Q_{max,p,t}$	時刻 $t$ におけるプラットフォーム $p$ の最大生産量
$N_{well,p,t}$	時刻 $t$ においてプラットフォーム $p$ に存在する生産井の数
$Q_{w,t}$	時刻 $t$ における生産井 1 つあたりの理論上の最大生産量
$\widetilde{Q}_{w,t}$	時刻 $t$ における生産井 1 つあたりの実際の最大生産量,
$Q_{p,t}$	プラットフォーム $p$ の生産許容量
$Q_{r,t}$	0 次元モデルによる貯留槽 $r$ の最大消費量
$\gamma$	生産井の技術的効率
$R_t$	貯留槽の残量

なお、式(4.3)によって生産量が決定されるプロジェクトのフェーズは(3),(4),(5)のみであり、その他のフェーズにおいては生産量は 0 として扱われる。

#### 4.3.2.2 貯留槽モデル

貯留槽に関しては複数のモデルが存在するが、ここでは Stein-Erik ら [32]が用いている 0 次元モデルを用いる。すなわち、貯留槽から生産井によって生産される原油の量は貯留槽内の圧力によって定まる、と仮定する。その際の式を(4.6)及び式(4.7)に表す。

$$-\frac{dR_t}{dt} = ap_t \quad (4.6)$$

$$p_t = b \frac{R_t}{R_0} \quad (4.7)$$

ここで、 $a$ 及び $b$ はパラメータである。また、 $p_t$ は貯留槽内の圧力、 $R_0$ は貯留槽の大きさを表す定数である。式変形を経て  $t$  について積分すると式(4.8)となり、貯留槽の残量が指数的に推移するモデルであることがわかる。

$$R_t = R_0 \times e^{-t/\tau} \quad (4.8)$$

---

#### 4.3.2.3 作業人員数の決定

プロジェクトに必要な作業人員数の決定は、輸送コストを算出する上で重要な値であることは言うまでもない。

本研究では、作業人員数 $N_{people,t}$ を固定作業人員数 $N_{people,const,t}$ 及び生産量に応じた変動作業人員数 $N_{people,var}$ の2種類に分類する。式(4.9)及び式(4.10)に示すように、変動作業人員数は生産量あたりの割合で示す。

$$N_{people,t} = N_{people,const,t} + N_{people,var} \quad (4.9)$$

$$N_{people,var} = \alpha Q_{max}, \quad (4.10)$$

ここで、固定作業人員数に変数  $t$  が含まれているが、これは生産初期フェーズ及び再生産フェーズにおいて作業人員数を徐々に増やすためである。

#### 4.3.2.4 プロジェクトコストの計算

各プロジェクトが存続されるか中止されるかを判断するためには原価率の計算が必要となる。原価率の計算に用いるプロジェクトのコストについて、本研究では式(4.11)で定める。

$$C_{project,t} = C_{project,fix} + C_{project,worker} + C_{project,product} \quad (4.11)$$

ここで、 $C_{project,t}$ はプロジェクトの時刻  $t$  におけるコスト、 $C_{project,fix}$ はプロジェクトの固定コスト、 $C_{project,worker}$ はプロジェクトの作業人員に必要なコスト、 $C_{project,product}$ はプロジェクトの生産量あたりのコストである。これらをパラメータ  $a$  および  $b$  を用いて書き下すと、式(4.12)となる。

$$C_{project,t} = C_{project,fix} + aN_{people,t} + bQ_{max,p,t} \quad (4.12)$$

#### 4.3.2.5 プロジェクトの収入の計算

プロジェクトにおける原価率を計算するために、プロジェクトの収入が計算される。式(4.13)に示すように、収入はプロジェクトにおいて生産された原油の量と、時刻  $t$  における原

---

---

油価格の積として計算する。

$$Rev_{project,t} = Q_{max,p,t} \times P_{oil,t} \quad (4.13)$$

#### 4.3.2.6 プロジェクトの損益及び原価率の計算

プロジェクトにおけるコスト及び収入が計算された段階で、プロジェクトごとの損益及び原価率の計算が可能となる。損益の計算を式(4.14)に、原価率の計算を式(4.15)に示した。

$$Prf_{project,t} = Rev_{project,t} - C_{project,t} \quad (4.14)$$

$$CR_{project,t} = \frac{C_{project,t}}{Rev_{project,t}} \quad (4.15)$$

### 4.3.3 輸送モデル

#### 4.3.3.1 プロジェクトの作業形態

プロジェクトの作業形態は、プロジェクトごとに定められた交代頻度 $Frequency_{project}$ 及びユニット数 $Units_{project}$ によって表現する。交代頻度は、作業人員が陸上に戻るまでの作業期間を表し、ユニット数はプロジェクトの作業人員の交代制を表すための数である。例えばプロジェクトの作業人員が 3 交代制で 4 週間に一度陸上での休暇を貰う場合、 $Frequency_{project} = 4, Units_{project} = 3$ となる。

#### 4.3.3.2 輸送人員モデル

プロジェクトあたりの輸送人員は、プロジェクトにおいて変動した人数及びプロジェクトにて勤務中の作業員のうち交代を要する人数の和として、式(4.16)によって計算される。

---


$$Tr_{project,t} = \left( (N_{project,t} - N_{project,t-1}) \times Units_{project} + N_{project,t-1} \right. \\ \left. \times \frac{Units_{project}}{Frequency_{project}} \right) \times 2 \quad (4.16)$$

ここで、 $Tr_{project,t}$ は時刻  $t$  におけるプロジェクトごとの輸送人員数を表す。右辺が 2 でかけられているのは、プロジェクトごとの交代作業人員数が往復で計算されるためである。

本来であれば作業人員をグループごとに分け、それぞれについて交代のスケジューリングなどを行う必要があるが、本研究ではモデルの簡略化のために上式のようなヒューリスティクスを導入して計算を行う。

#### 4.3.3.3 輸送時間モデル

輸送時間は、式(4.17)のように移動に必要な時間及びその発着に必要な時間の和で表される。

$$TT_{method,t} = \left( \frac{Tr_t}{Capacity_{method}} \right) \times \left( \frac{Distance}{Speed_{method}} + Stoptime_{method} \right) \quad (4.17)$$

ここで、 $TT_t$ は時刻  $t$  における各輸送手段の輸送にかかる時間を表す。また、 $Capacity_{method}$ は各輸送手段の輸送容量、 $Speed_{method}$ は各輸送手段の移動速度、 $Stoptime_{method}$ は各輸送手段が発着に必要とする時間を表す。

#### 4.3.3.4 ヘリコプターによる輸送とコスト

ヘリコプターのモデルの情報は、輸送人員、燃料消費量、移動速度、1回の離着陸に必要な時間、ヘリポート使用料、年間リースコストで構成される。本研究では、Airbus Helicopters 社の EC 225 [33]を参考にこれらの値を決定する。

式(4.18)に、具体的な計算式を示す。また、各数式及び変数の意味を表 4-4 に示した。



$$C_{heli} = \left( \sum_{project} P_{kerosene}(t) \times FC_{heli} \times D_{hub-project}(t) \right. \\ \left. \times Times_{heli,t,project} \right) + N_{heli}(t) \times C_{heli,lease} \\ + Times_{heli,t} \times C_{heli,port} \quad (4.18)$$

#### 4.3.3.5 HSV による輸送とコスト

HSV のモデルの情報は、輸送人員、燃料消費量、移動速度、1 回の発着に必要な時間、輸送あたりの港湾使用料、年間リースコストで構成される。

具体的な計算式を式(4.19)に示した。また、各数式及び変数の意味を表 4-4 に示した。

$$C_{hsv} = P_{oil_c}(t) \times FC_{hsv} \times D_{land-hub}(t) \times Times_{hsv,t} + N_{hsv}(t) \\ \times C_{hsv,lease} + Times_{hsv,t} \times C_{hsv,port} \quad (4.19)$$

表 4-4 輸送コスト計算における数式及びその意味

数式・変数	意味
$C_{hsv}$	HSV に関する輸送コスト
$C_{heli}$	ヘリコプターに関する輸送コスト
$C_{hub}$	ロジスティックハブに関するコスト (移動費、係留費)
$C_{a,b}$	輸送手段 a の b に関わるコスト
$TT_a(t)$	輸送手段 a の時刻 t におけるのべ輸送時間
$P_{fuel}(t)$	各燃料の時刻 t における価格
$FC_a$	輸送手段 a の燃料消費量
$D_{a-b}(t)$	時刻 t における a-b 間の距離

#### 4.3.4 シナリオモデル

シナリオには、式(4.20)で表される Gaussian / Wiener プロセスを用いて生成するデータを

---

用いる。

$$\frac{dS(t)}{S(t)} = rdt + \sigma dz \quad (4.20)$$

$S(t)$ は原油価格、 $r$ はドリフト率、 $\sigma$ は資源価格のボラティリティ、 $dz$ は Gaussian / Wiener プロセス、すなわち標準正規分布を確率分布として生成される乱数を表す。本研究では、式(4.20)によって原油価格の変動を生成し、また各燃料の価格は原油価格と連動して動くものとする。すなわち、ケロシン及び C 重油の価格は式(4.21)及び式(4.22)によって決定する。

$$P_{kerosene}(t) = P_{kerosene}(0) \times \frac{S(t)}{S(0)} \quad (4.21)$$

$$P_{oilc}(t) = P_{oilc}(0) \times \frac{S(t)}{S(0)} \quad (4.22)$$

## 4.4 開発したシステム

提案手法で用いるシステムの概要を図 4-8 に示す。開発したシステム全体は入力データ、モデルという 2 つの入力情報およびデータ生成機能、輸送デザイン機能、可視化機能の 3 つの機能で構成される。これらの入力情報および機能を用いることで、出力であるデザイン及びストラテジーを得る。

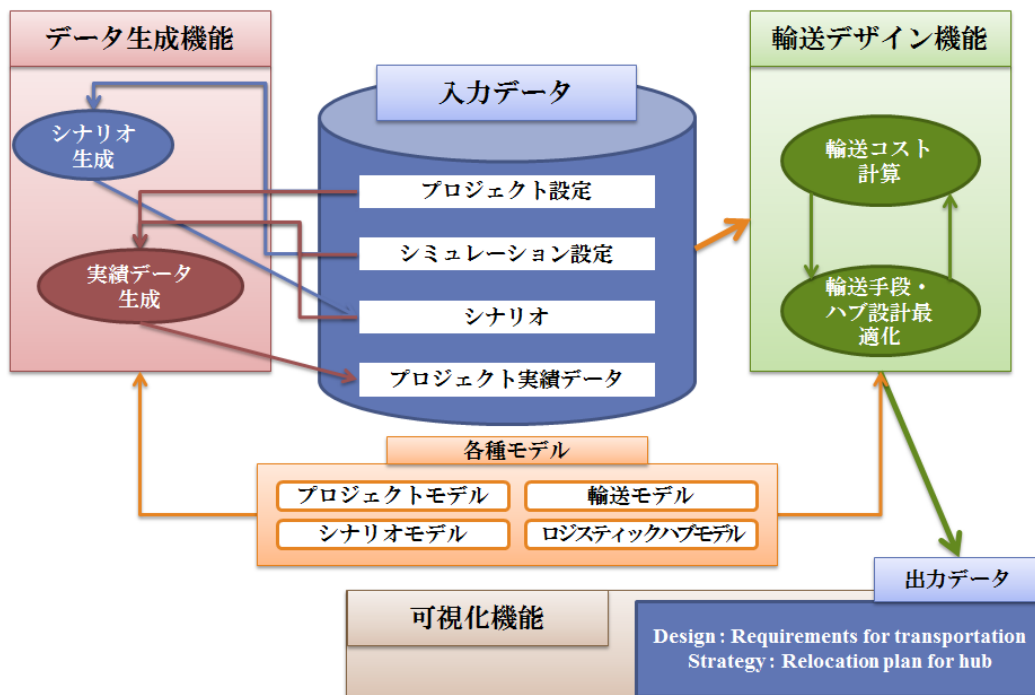


図 4-8 提案手法で用いるシステムの概要

開発したシステムは 6 つの段階で構成される。

(1) 入力データの準備

入力としてプロジェクト設定及びシミュレーション設定の 2 つの設定情報を用意する。プロジェクト設定には、位置情報や貯留槽の情報、設備などプロジェクトに関する情報が CSV 形式で記述されている。また、シミュレーション設定には、原油価格シミュレーションに用いるドリフト率や各輸送手段の燃料消費量、輸送容量など、シミュレーションを行う際に必要な情報が ini 形式で記述されている。

(2) データ生成機能(1)

シミュレーション設定の情報を元に、シナリオを生成する。シナリオの生成にはシミュレーション設定にある原油価格のドリフト率や分散を用い、Gaussian/Wiener プロセスによって一定期間における原油価格の変動を生成する。

(3) データ生成機能(2)

シミュレーション設定、プロジェクト設定の情報及びシナリオを元に、プロジェクト実績データを生成する。

(4) 入力データへの保存

シナリオ及び各シナリオに対応するプロジェクト実績データを入力データのデータ

---

ベースへ保存する。

(5) 輸送デザイン機能

シミュレーション設定、プロジェクト設定、シナリオ、プロジェクト実績データの全てが揃った段階で、輸送コストの計算及び輸送手段設計の最適化を行う。計算及び最適化を繰り返し行うことで、コストを最も低く抑える輸送手段設計を生成する。

(6) 可視化機能

出力されるデータには、デザイン及びストラテジーの 2 種類が存在する。これらの情報は CSV 形式で出力されるため、何らかの可視化を行わなければ情報を得ることは難しい。そこで、出力データの可視化を行い、デザイン及びストラテジーを視覚的に把握することで意思決定の支援を行う。

---

#### 4.4.1 入力情報

##### 4.4.1.1 プロジェクト設定

プロジェクト設定に含まれる情報を表 4-5 に示す。

表 4-5 プロジェクト設定

情報	単位
プロジェクト ID	-
プロジェクトの x 座標	Km
プロジェクトの y 座標	Km
初期フェーズ	-
初期作業人員数	人
生産設備あたり固定作業人員数	人/基
生産量あたり変動作業人員数	人/10 万バレル
作業形態	-
交代頻度	週/回
生産停止原価率	-
生産再開原価率	-
貯留槽最大量	10 万バレル
貯留槽残量	10 万バレル
設備あたり最大生産量	10 万バレル/日,基
生産井効率	-
生産井数	基
作業人員あたりコスト	円/人,週
生産井固定コスト	円/週,基
生産量あたりコスト	円/10 万バレル
プロジェクト開始時期	週
プロジェクト建設期間	週
プロジェクト初期生産期間	週

#### 4.4.1.2 シミュレーション設定

シミュレーション設定に含まれる情報を表 4-6及び表 4-7に示す。なお、シミュレーション設定はシミュレーション全般に関わるものと、輸送手段に関わるものの2つに分けられる。

表 4-6 シミュレーション設定（全般）

情報	単位
計算期間	週
ドル円レート	円/L
初期原油価格	ドル/バレル
ケロシン価格	円/L
原油価格ボラティリティ	-
原油価格ドリフト率	-
シナリオ数	-
再生産に必要な期間の割合	-

]

表 4-7 シミュレーション設定（輸送手段）

輸送手段	情報	単位
ロジスティックハブ	係留コスト	円/回
ロジスティックハブ	燃料消費量	L/h
HSV	燃料消費量	L/h
HSV	輸送容量	人
HSV	輸送速度	Km/h
HSV	発着に要する時間	h
HSV	リースコスト	円/year
ヘリコプター	燃料消費量	L/h
ヘリコプター	輸送容量	人
ヘリコプター	輸送速度	Km/h
ヘリコプター	発着に要する時間	h
HSV	リースコスト	円/year

## 4.4.2 出力情報

出力情報は、デザイン及びストラテジーの2種類で構成される。

### 4.4.2.1 デザイン

デザインには、ヘリコプター及びHSVの必要数、輸送コスト、ロジスティックハブの設計要件などの情報が含まれる。それぞれの詳細を説明する。

#### (a) ヘリコプター及びHSVの必要数

各時刻において、ヘリコプター及びHSVの必要数を出力する。一例を図4-9に示す。縦軸は必要な台数、横軸は時間(週)となっており、各時間における必要なヘリコプターの数を把握することが可能である。プロジェクトの生産量やフェーズなどから定まる輸送人数によって、必要なヘリコプターの数は変動する。

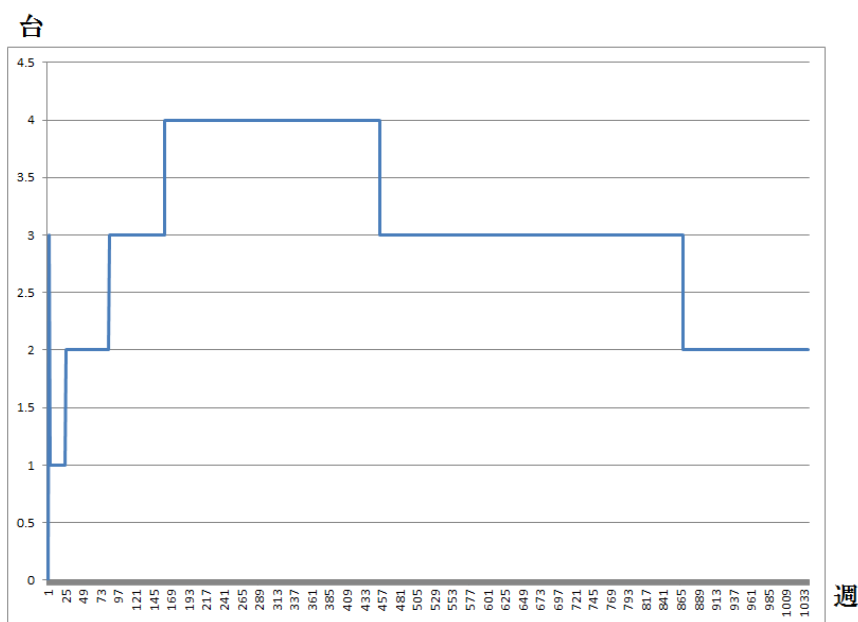


図 4-9 ヘリコプターの必要数の出力例

#### (b) 輸送コスト

各時刻において、どの程度の輸送コストがかかるのかを出力する。一例を図4-10に示す。輸送コストの計算式は4.3.3.4で示したとおりであり、輸送にかかる時間やその時点における燃料価格、レンタルコストなどが含まれる。実際にピーク時に輸送コストが大きくなり、ま

たそれ以外の時点においても燃料価格に応じて細かく輸送コストが変動しているのが見て取れる。

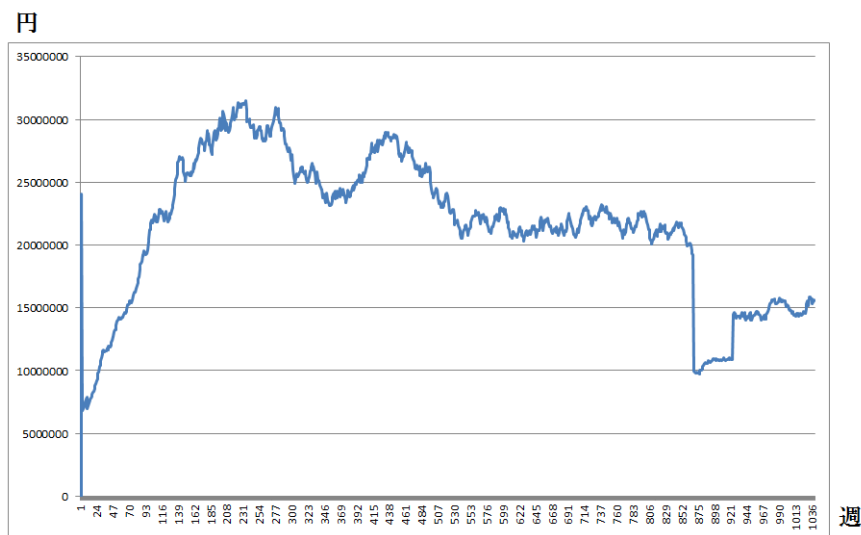


図 4-10 輸送コストの出力例

#### (c) ロジスティックハブに関する制約条件

ヘリポート数やロジスティックハブの導入によって削減されるコストを出力する。

各時刻において、どの程度のヘリポート数が確保されていれば問題なく人員輸送を行えるかというのはロジスティックハブの設計に必要な情報のひとつである。また、ロジスティックハブを導入することにより削減されたコストは、すなわちロジスティックハブの導入に掛けられるコストの最大値と考えられる。

#### 4.4.2.2 ストラテジー

ストラテジーには、ロジスティックハブの設置及び移動に関する情報が含まれる。ロジスティックハブの最適な位置を時間毎に座標で表す。図 4-11 及び図 4-12 では、ロジスティックハブの座標を折れ線グラフ及び平面上の位置で表したものの例を示す。第 1 週に移動した後、しばらく同じ場所にとどまり、1,285 週目及び 1,897 週目で再び位置を変更していることが見て取れる。これらの位置の変更は、各プロジェクトのフェーズや生産量、そして原油価格の変化によって輸送人員の将来予測が変化し、それに伴って最適な位置が算出されているために行われる。



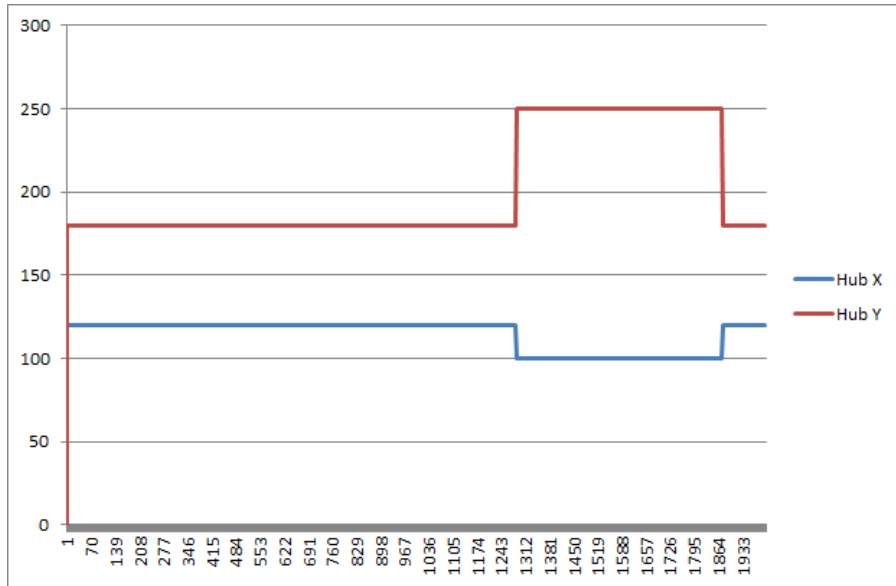


図 4-11 ロジスティックハブの位置の出力例（時系列）

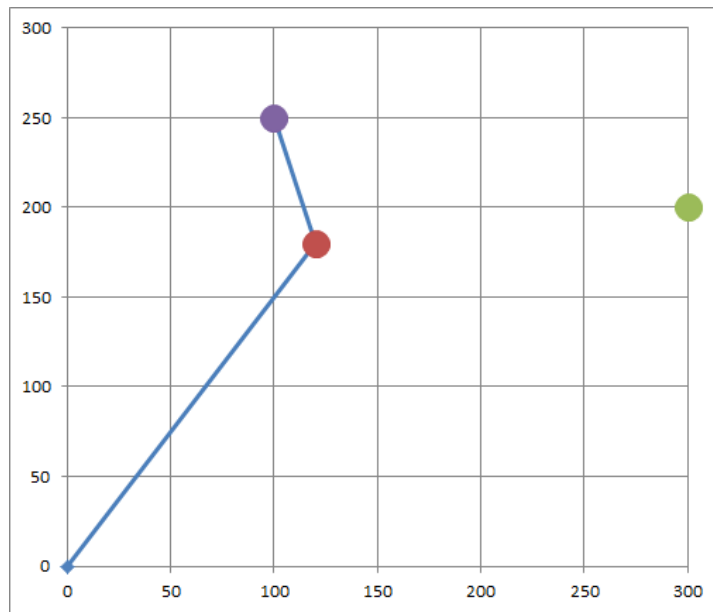


図 4-12 ロジスティックハブの位置の出力例（座標平面）

#### 4.4.3 出力の可視化

4.4.2 にて述べた出力に関して、地図上に表示するための可視化機能を作成した。図

---

4-13 に、可視化を行った際の画面を示す。

左上の部分の「比較対象」の四角形内には、可視化機能によって読み込まれた各出力のリストが表示されている。リスト内には読み込む際に指定された名前、合計コスト、ハブに関するコストの 3 種類の情報が表示されている。

左の部分の「地図」の四角形内には、背景画像として指定された地図などの画像及び、各プロジェクトの位置及びフェーズ、貯留槽の残量、輸送ルート、輸送量が表示されている。プロジェクトのフェーズに関してはプロジェクトの座標におかれる点の色で分類されるようになっており、開発前フェーズが黒、開発フェーズ及び再生産フェーズが水色、生産初期フェーズが黄緑、生産安定フェーズ及び生産減衰フェーズが青、中止フェーズが赤で表示される。また、各プロジェクトに割り当てられている貯留槽の残量は透明度のある赤い円によって表現されている。さらに、輸送量は各地点を結ぶ線の太さで表されるようになっており、HSV の輸送に関しては灰色、ヘリコプターの輸送に関しては黒の線で表示される。

右側の「週の詳細データ」の四角内には、その時点における各プロジェクトやロジスティックハブの状態を表にして示している。各プロジェクトの生産量やフェーズ、必要な輸送人員数、ロジスティックハブの座標、必要なヘリコプター及び HSV の数などが含まれる。

なお、背景画像は PreSalt.com - Pre-Salt Oil & Gas News [34]より引用している。

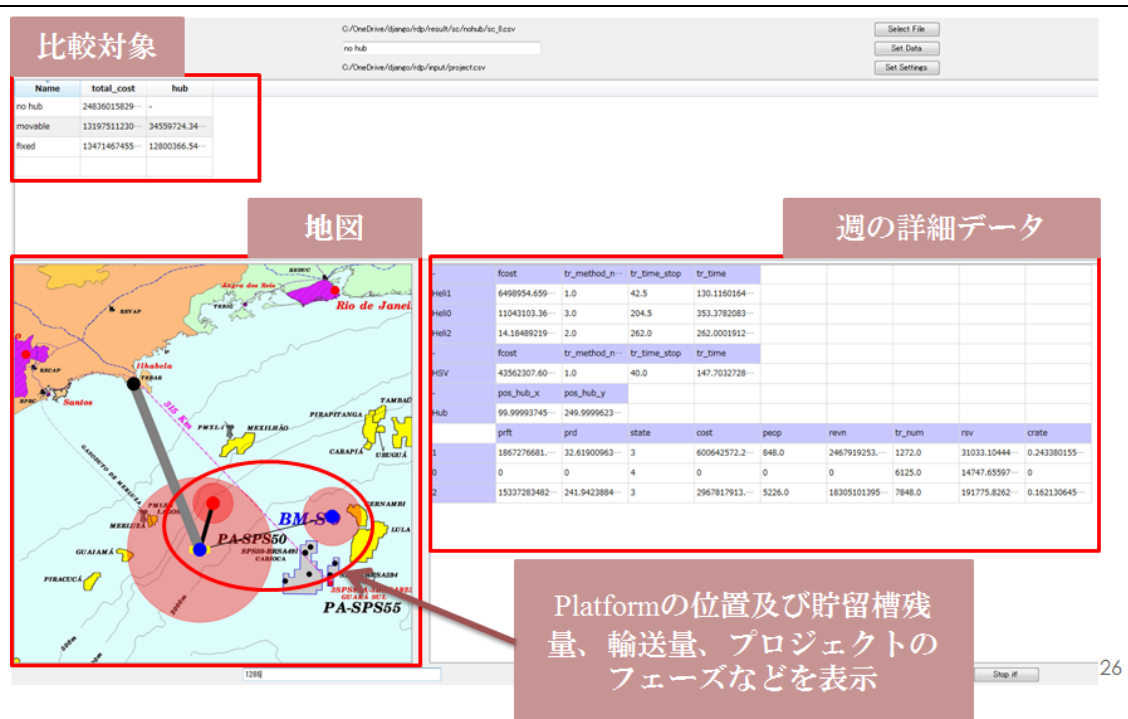


図 4-13 可視化例

---

## 第5章 ケーススタディ

---

5.1 はじめに.....	59
5.2 ケーススタディ 1：単純なモデルによるデータ確認.....	60
5.2.1 概要.....	60
5.2.2 入力情報.....	60
5.2.3 結果及び考察.....	65
5.2.4 まとめ.....	76
5.3 ケーススタディ 2：ロジスティックハブの導入時期に関する検証.....	77
5.3.1 概要.....	77
5.3.2 入力情報.....	77
5.3.3 結果及び考察.....	78
5.4 ケーススタディ 3：経済的不確実性を含んだロジスティックハブ導入について の検証.....	81
5.4.1 概要.....	81
5.4.2 入力情報.....	81
5.4.3 結果及び考察.....	82
5.4.4 まとめ.....	84
5.5 ケーススタディ 4：ロジスティックハブの持つ地理的性質の検証.....	84
5.5.1 概要.....	84
5.5.2 入力情報.....	86
5.5.3 結果及び考察.....	86
5.5.4 まとめ.....	90

---

---

## 5.1 はじめに

本章では、提案手法を用いたケーススタディを行う。内容を表 5-1 に示す。

5.2 では提案手法によって出力される、資源開発プロジェクトにおける各輸送手段に必要なコストの計算結果を確認する。経済的不確実性を含まない状態で、ロジスティックハブを導入しない場合、導入して固定する場合、導入して移動可能にする場合の 3 通りのシミュレーションを行い、実際に出力されるデザイン及びストラテジー、すなわち輸送設計の要件やロジスティックハブの設置及び移動に関する情報について説明する。

5.3 では、ロジスティックハブが持つ経済的性質を明らかにするために、ロジスティックハブの導入時期をずらして提案手法を適用し、導入時期が輸送コストへ与える影響について確認を行う。

5.4 では、ロジスティックハブが持つ経済的性質を明らかにするために、モンテカルロ・シミュレーションによって経済的不確実性を持つシナリオを生成し、それらのシナリオに対してそれぞれシミュレーションを行う。

5.5 では、ロジスティックハブに関する地理的性質を明らかにするために、プロジェクトの位置情報をパラメータを用いて変更し、プロジェクトの密集度と陸上基地からの距離を増減させた状態でシミュレーションを行う。

表 5-1 ケーススタディの内容

章	内容	変数
5.2	提案手法による出力データの確認	なし
5.3	ロジスティックハブの導入時期を考慮した輸送コストの計算	導入時期
5.4	経済的不確実性を考慮した輸送コストの計算	原油価格
5.5	プロジェクトの位置関係を考慮した輸送コストの計算	プロジェクトの位置

---

## 5.2 ケーススタディ 1：単純なモデルによるデータ確認

### 5.2.1 概要

本項では単純なモデルを用い、提案手法によって生成される出力データを確認する。入力した設定値を元にプロジェクトの実績データやシナリオデータを作成し、それらのデータを可視化することで、輸送設計の要件やロジスティックハブの移動計画について確認を行う。

ロジスティックハブの有無については「ロジスティックハブを導入しない場合」「ロジスティックハブを導入し、固定する場合」「ロジスティックハブを導入し、移動可能にする場合」の3つの場合を検討の対象とする。

### 5.2.2 入力情報

#### 5.2.2.1 シミュレーション設定値

シミュレーションの設定値を表 5-2 および表 5-3 に示す。

表 5-2 ケーススタディ 1：シミュレーション設定（一般）

情報	単位
計算期間(週)	2,000
ドル円レート(円/ドル)	100
初期原油価格(ドル/バレル)	100
ケロシン価格(円/L)	100
原油価格ボラティリティ	0.01
原油価格ドリフト率	0.0001
シナリオ数	1
再生産に必要な期間の割合	0.3

表 5-3 ケーススタディ 1：シミュレーション設定（輸送手段）

輸送手段	情報	単位
ロジスティックハブ	係留コスト(円)	10,000,000
ロジスティックハブ	燃料消費量(L/h)	200
HSV	燃料消費量(L/h)	170
HSV	輸送容量(人)	800
HSV	輸送速度(km/h)	50
HSV	発着に要する時間(h)	2
HSV	リースコスト (円)	1,500,000,000
ヘリコプター	燃料消費量(L/h)	5
ヘリコプター	輸送容量(人)	15
ヘリコプター	輸送速度(km/h)	200
ヘリコプター	発着に要する時間(h)	0.5
ヘリコプター	リースコスト (円)	180,000,000

### 5.2.2.2 プロジェクト設定値

プロジェクトの設定値を表 5-4 に示す。

表 5-4 ケーススタディ 1：プロジェクト設定

変数名	Project 1	Project 2	Project 3
初期フェーズ	0	0	0
X	120	300	100
Y	180	200	250
初期作業人員数(人)	0	0	0
固定作業人員数(人)	150	150	150
変動作業人員数(人)	3	3	3
交代制	3	3	3
交代頻度(週/回)	4	4	4
生産停止原価率	0.5	0.5	0.5
生産再開原価率	0.4	0.4	0.4
貯留槽最大量(万バレル)	300,000	100,000	500,000
貯留槽残量(万バレル)	300,000	100,000	500,000
最大生産量(万バレル/週)	21	21	21
生産井効率	0.8	0.8	0.8
生産井数	40	5	30
人件費(円)	125,000	125,000	125,000
固定コスト(円)	500,000,000	250,000,000	500,000,000
開始時期(週)	0	97	385
開発期間(週)	150	30	80
初期生産期間(週)	100	40	80



### 5.2.2.3 シナリオ

シミュレーション設定を元に生成された原油価格のシナリオを図 5-1 に示す。縦軸は初期値を 1 とした場合の値、横軸は経過時間(週)となっている。シナリオのモデルは幾何ブラウン運動であるため、時間毎にランダムに正規分布に従った変動がある。この場合の原油価格は上下に均等に動いているが、実際にシナリオを大量に生成した場合、下降を続けるシナリオ、上昇を続けるシナリオも生成されうる。

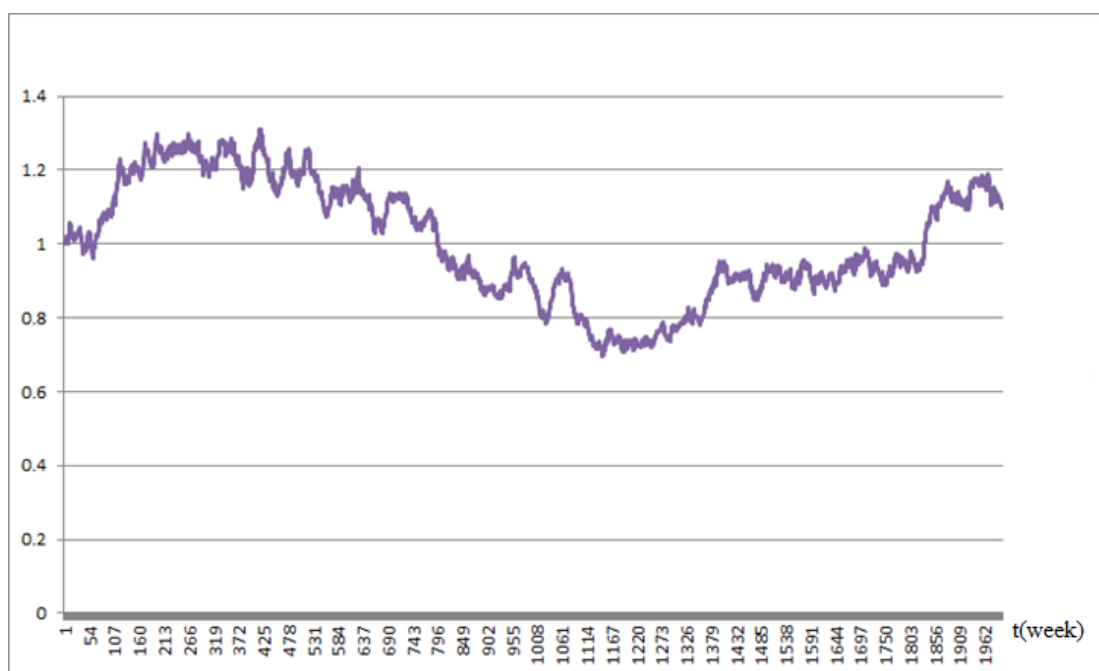


図 5-1 ケーススタディ 1 : 生成されたシナリオ

### 5.2.2.4 プロジェクトマップ

プロジェクト設定の情報を元にした位置関係を図 5-2 に示す。紫の点は陸上基地の座標、青・緑および赤の点はプロジェクトの座標及びそのプロジェクトに割り当てられている貯留槽の大きさを示している。本ケーススタディでは、座標(0,0)に陸上基地があり、座標(120, 180)にプロジェクト 1 及び 30 億バレルの原油が見込まれる貯留槽 1、座標(300, 200)にプロジェクト 2 及び 10 億バレルの原油が見込まれる貯留槽 2、座標(100, 250)にプロジェクト 3 及び 50 億バレルの原油が見込まれる貯留槽 3 が存在する状態を想定している。また、図 5-3 に可視化機能によってプロジェクトを地図上にプロットしたものを示す。黒の点がプロジェクトの位置、赤い半透明の円が各プロジェクトの貯留槽の大きさを表している。なお、

データの変換の都合により、貯留槽の大きさは図 5-2 と異なっている。

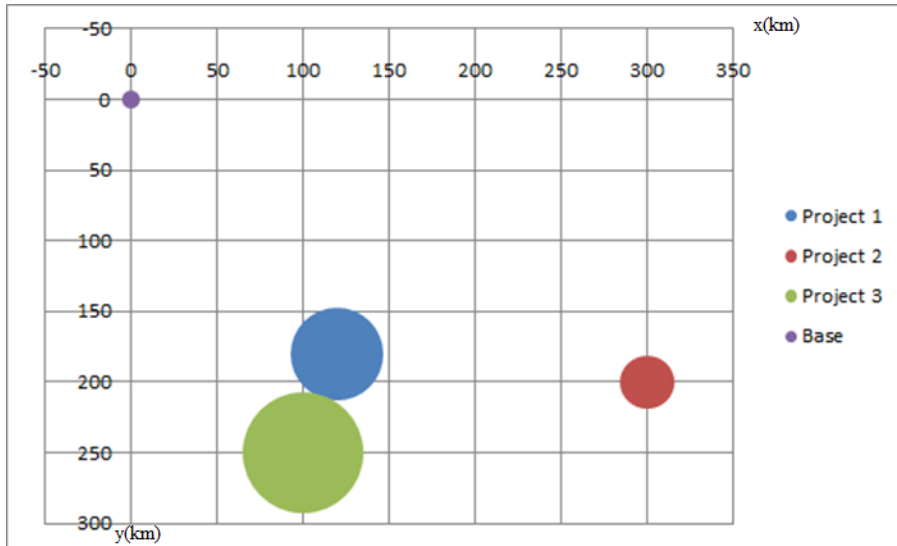


図 5-2 ケーススタディ 1：プロジェクトの位置関係

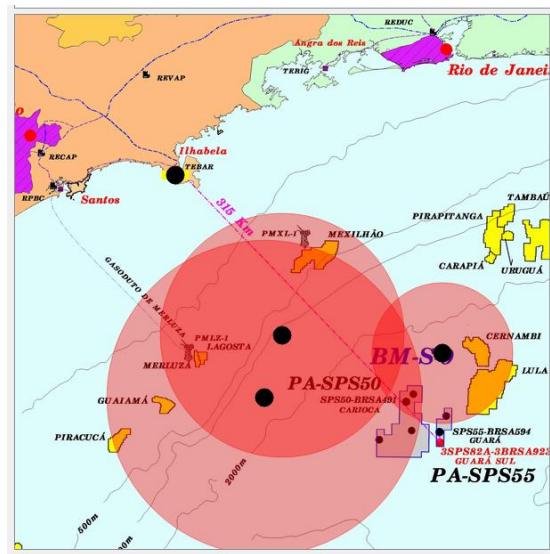


図 5-3 ケーススタディ 1：地図上でのプロジェクトの位置関係

## 5.2.3 結果及び考察

### 5.2.3.1 プロジェクト実績データの出力

シミュレーション設定及びプロジェクト設定、シナリオから生成されたプロジェクト実績データを確認する。

出力されたプロジェクト実績データのうち、各プロジェクトの生産量を表示したものを図 5-4 に示す。縦軸が生産量、横軸が時間となっており、青の線がプロジェクト 1、赤い線がプロジェクト 2、緑の線がプロジェクト 3 の生産量を表している。また、紫の線は原油価格の変動を示している。このグラフにおいて、青い線で示されているプロジェクト 1 の生産量が 1200 週以降凸凹になっていることが読み取れる。これは、原油価格によって生産停止および生産再開の処置が取られたことを表している。実際、生産再開直前における紫色の線で表された原油価格の動きは、ある程度急激な上昇を起こしていることがわかる。原油価格が変動することによってプロジェクト 1 の原価率に変動し、生産量が低下した状態でもある程度の原価率を下回る状態で生産が可能となったため、プロジェクト 1 において生産が再開されることとなる。

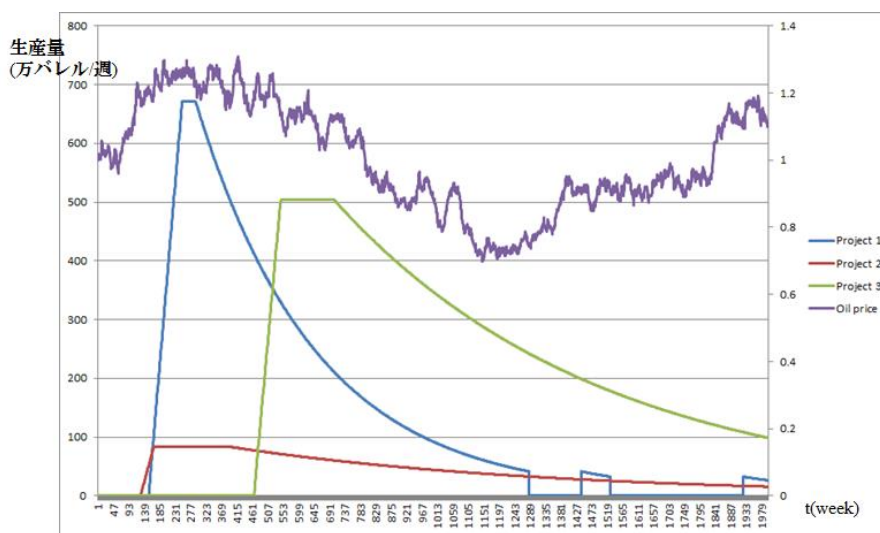


図 5-4 ケーススタディ 1：プロジェクト実績データ（生産量）

次に、プロジェクトの生産量と作業人員数を表示したグラフを図 5-5 に示す。縦軸は生産量及び拠点にいる作業人員数、横軸が時間となっており、青の線がプロジェクト 1 の作業人員数、紫の線がプロジェクト 1 の生産量、赤の線がプロジェクト 2 の作業人員数、水色の線

がプロジェクト2の生産量、緑の線がプロジェクト3の作業人員数、オレンジの線がプロジェクト3の生産量を表している。作業人員数と生産量がある程度の相関を持っており、また生産開始前に作業人員数が徐々に増えていく段階も再現されていることが読み取れる。

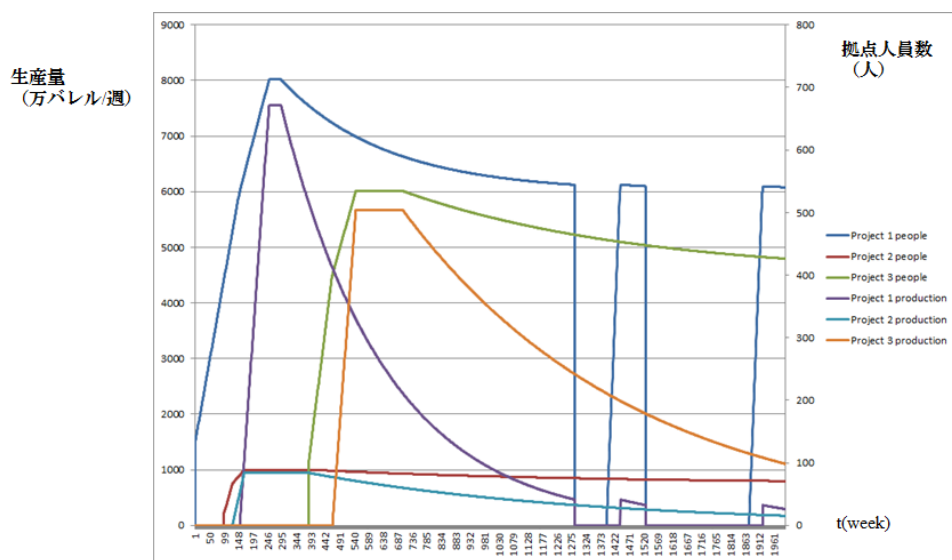


図 5-5 ケーススタディ 1：プロジェクト実績データ（生産量と作業人員数）

### 5.2.3.2 ロジスティックハブを導入していない場合

ロジスティックハブを導入していない場合の出力結果を確認する。

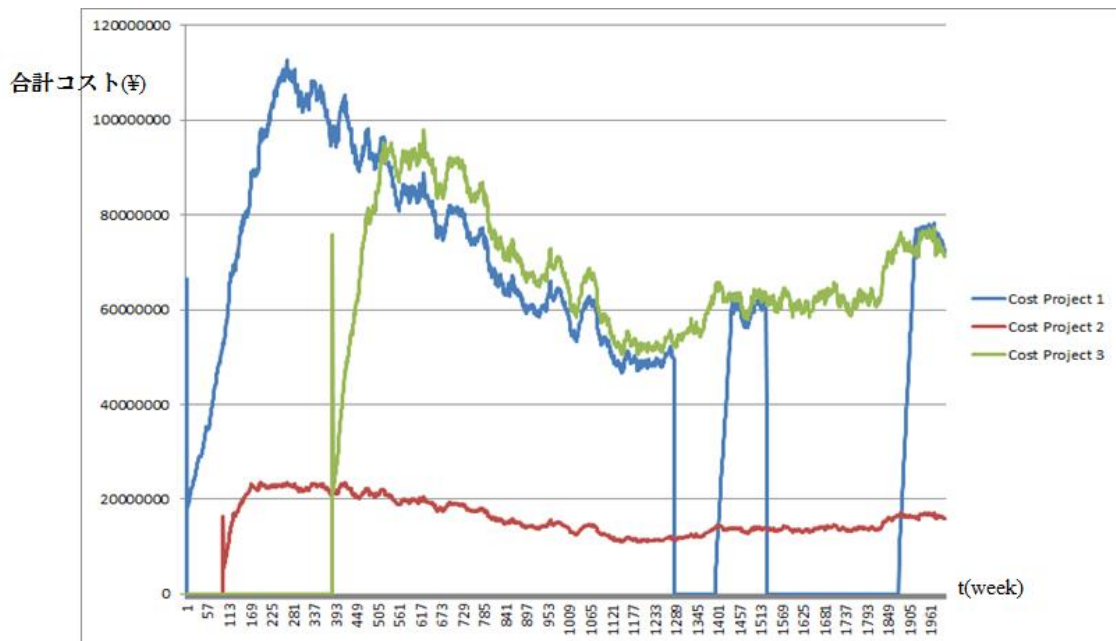


図 5-6 ケーススタディ 1 : ハブ導入なし (輸送に関わるコスト)

図 5-6 に、ロジスティックハブを導入していない場合の輸送コストのグラフを示す。縦軸は輸送コスト、横軸が時間軸となっており、青の線がプロジェクト 1 の輸送コスト、赤の線がプロジェクト 2 の輸送コスト、緑の線がプロジェクト 3 の輸送コストを表している。原油価格による変動を考慮すると、プロジェクトの作業人員数と同様の形状を描いていることが分かる。なお、プロジェクトの開始時に大きなピークを持つグラフとなっているが、これはプロジェクトにおける作業人員数を 0 人からある程度の人数まで急激に増やすために発生するピークとなっており、輸送人員数が大きいために輸送コストも増大するグラフとなっている。それ以外の部分については、生産量や作業人員数とほぼ同様の変動を示している。

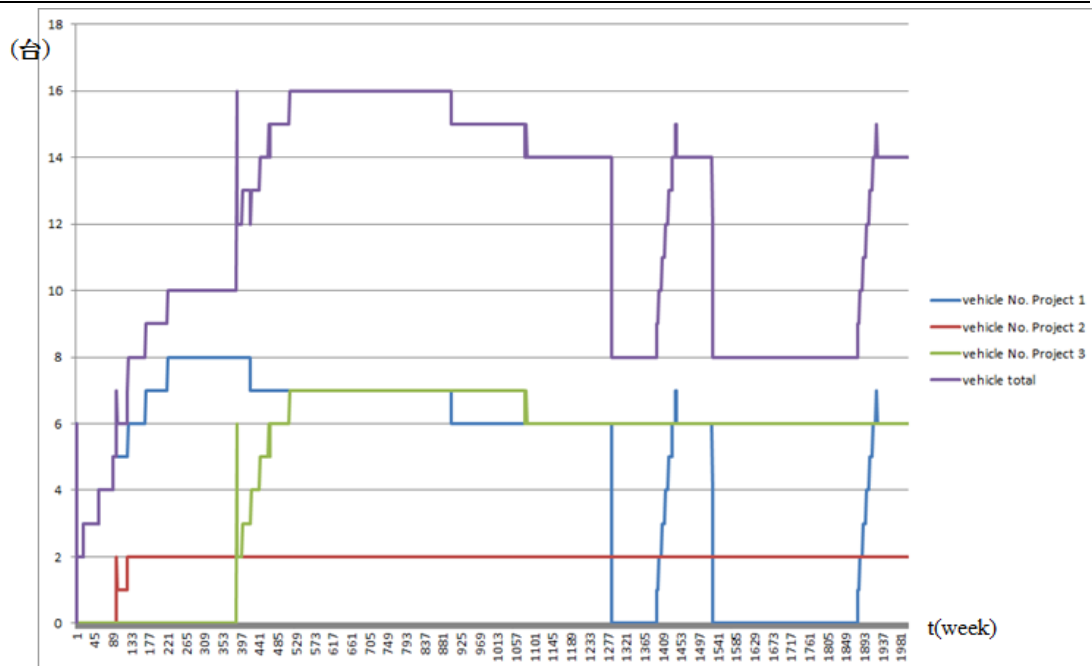


図 5-7 ケーススタディ 1 : ハブ導入なし (ヘリコプターの台数)

図 5-7 はロジスティックハブを導入していない場合におけるヘリコプターの必要台数のグラフを示している。縦軸は必要なヘリコプターの台数、横軸は時間となっており、青の線がプロジェクト1の人員輸送に必要なヘリコプター数、赤の線がプロジェクト2の人員輸送に必要なヘリコプター数、緑の線がプロジェクト3の人員輸送に必要なヘリコプター数、紫の線がそれらの合計を表している。基本的に作業人員数・輸送コストと類似した形状となっており、プロジェクトの開発フェーズに開始に合わせてピークが存在しているのも同様である。全ての輸送がヘリコプターによって行われるため、急激な人員数の変動が起きた際に必要なヘリコプターの台数にも急激な変化が起きていることがわかる。例えばプロジェクト3の開始時には、必要なヘリコプターの台数が10台から16台へと大幅に増えており、またプロジェクト1の中止時には14台から8台へと急激に減少している。

### 5.2.3.3 ロジスティックハブを導入し、固定する場合

ロジスティックハブを導入し、固定した場合の出力を確認する。

図 5-8 に輸送コストのグラフを示す。縦軸には各プロジェクトの人員輸送に必要な輸送コスト、横軸には時間をとっている。青の線がプロジェクト1の輸送コスト、赤の線がプロジェクト2の輸送コスト、緑の線がプロジェクト3の輸送コストを表し、紫の線はHSVによる輸送

コストを表す。後に説明するロジスティックハブの位置がプロジェクト1とほぼ同じ場所となっているため、プロジェクト1まわりの輸送コストはほとんど0となっており、グラフ上では確認が難しい。一方でプロジェクト2及び3については、ロジスティックハブが導入されてない場合と比べて額は小さくなっているものの、図5-6と同様の形状となっている。また、HSVによる輸送コストは、プロジェクト1、プロジェクト2、プロジェクト3の作業人員の全てに関わるため、プロジェクト1が再生産・中止されている時期に大きな変動が見られる。

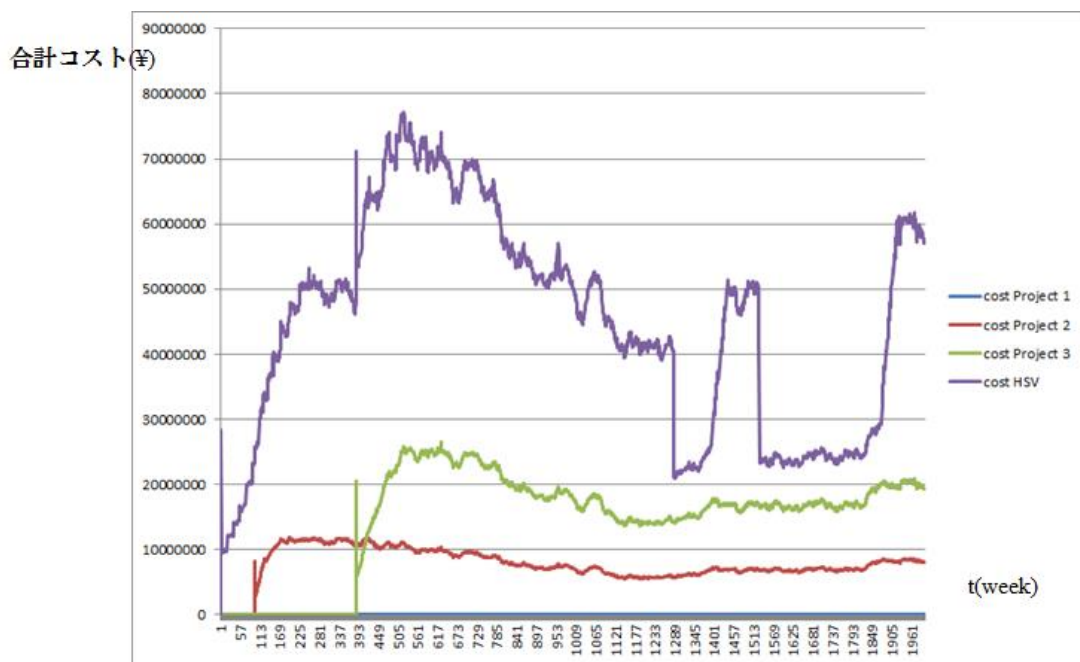


図 5-8 ケーススタディ 1：ハブ導入固定（輸送に関わるコスト）

図5-9はロジスティックハブを導入し、固定した場合において、必要となるヘリコプター及びHSVの台数をグラフとして表したものである。縦軸には必要なヘリコプター及びHSVの数、横軸には時間をとっており、また青の線がプロジェクト1の人員輸送に必要なヘリコプター台数、赤の線がプロジェクト2の人員輸送に必要なヘリコプター台数、緑の線がプロジェクト3の人員輸送に必要なヘリコプター台数、紫の線がそれらヘリコプターの台数の合計、青の線が必要なHSVの数を表している。HSVの必要台数が、第500週前後のピークを除いて殆ど1台であることが見て取れる。必要なヘリコプターの台数も最大で8台となっており、またその変動幅もロジスティックハブを導入していない場合(図5-7)と比較して小さくなっていることが分かる。

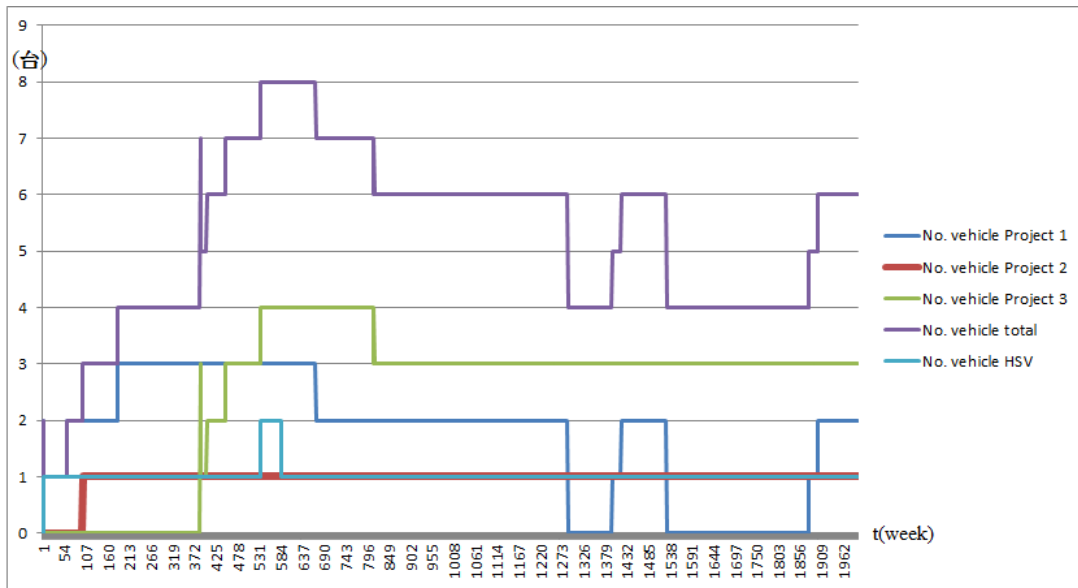


図 5-9 ケーススタディ 1：ハブ導入固定（ヘリコプターの台数）

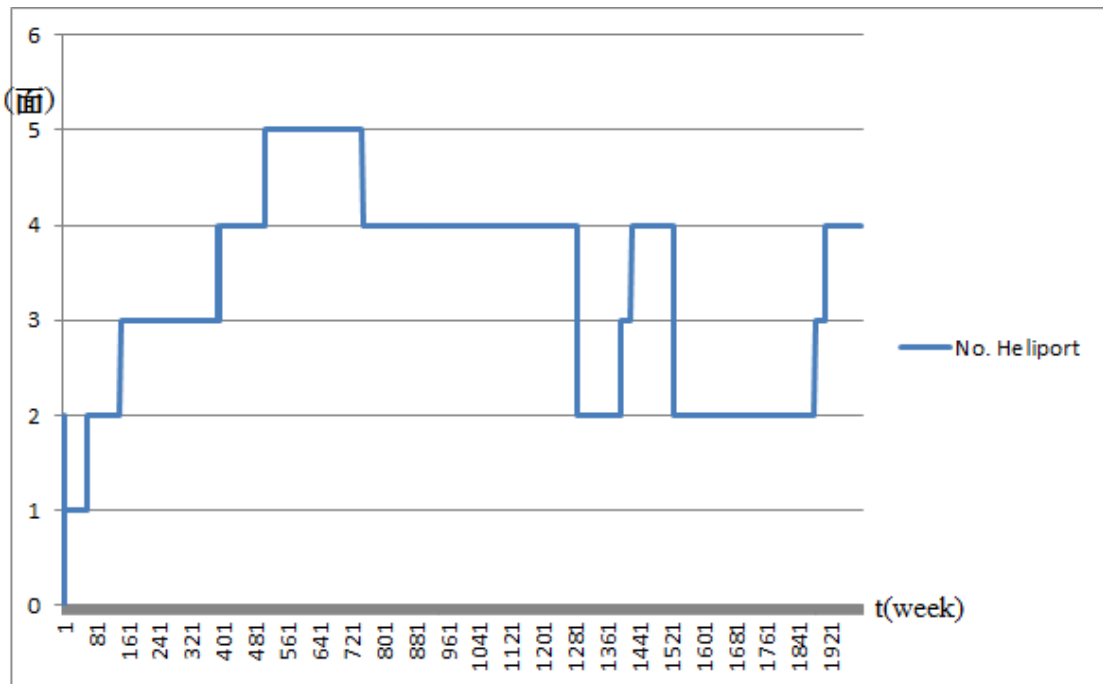


図 5-10 ケーススタディ 1：ハブ導入固定（ヘリポートの面数）



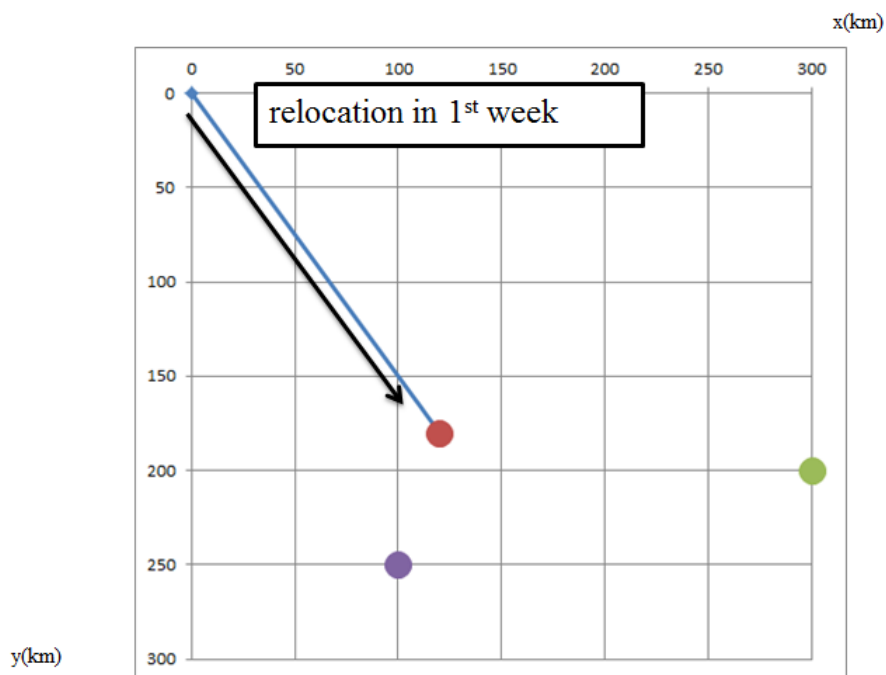


図 5-11 ケーススタディ 1：ハブ導入固定（ストラテジー）

図 5-10 には、ロジスティックハブを導入して固定した場合に必要なヘリポートの面数を示した。必要なヘリコプターの台数とほぼ同じ形状をしており、人員の急激な変動と共に、必要なヘリポートの数も変化していることが読み取れる。本シナリオの場合、最大で 5 面必要であるため、ロジスティックハブにはヘリポートが最低 5 面備えられていれば、人員の輸送が滞りなく行えることを表している。

また、図 5-11 にはハブの導入位置を座標平面で示した。座標(0,0)が陸上基地、赤の点がプロジェクト 1、緑の点がプロジェクト 2、紫の点がプロジェクト 3 の位置を表している。青のグラフがロジスティックハブの移動の履歴を示しているが、これはプロジェクト 1 とほぼ同じ位置にロジスティックハブを設置することでコストが最小化されることを表している。

#### 5.2.3.4 ロジスティックハブを導入し、移動可能にする場合

ロジスティックハブを導入し、導入後も移動が可能とした場合の出力結果を確認する。

図 5-12 に輸送コストのグラフを示す。縦軸には各プロジェクトの人員輸送に必要な輸送コスト、横軸には時間をとっている。青の線がプロジェクト 1 の輸送コスト、赤の線がプロジェクト 2 の輸送コスト、緑の線がプロジェクト 3 の輸送コストを表し、紫の線は HSV による輸送

コストを表す。HSV の運航にかかるコストを示す紫色のグラフは、固定されたロジスティックハブを導入した場合とほぼ同様の形をしているが、1,200 週前後より後半の部分では HSV のコストが比較的高くなっているのが分かる。これはロジスティックハブを移動させることで HSV による輸送距離を長くする一方、ヘリコプターによる輸送距離を短くすることでコストを抑えていることを表している。また、ロジスティックハブを固定した場合にはほとんど 0 であったプロジェクト 1 の輸送コストは、1,285 週にてロジスティックハブの移動が発生しているために一時的にピークを持つ形となっている。

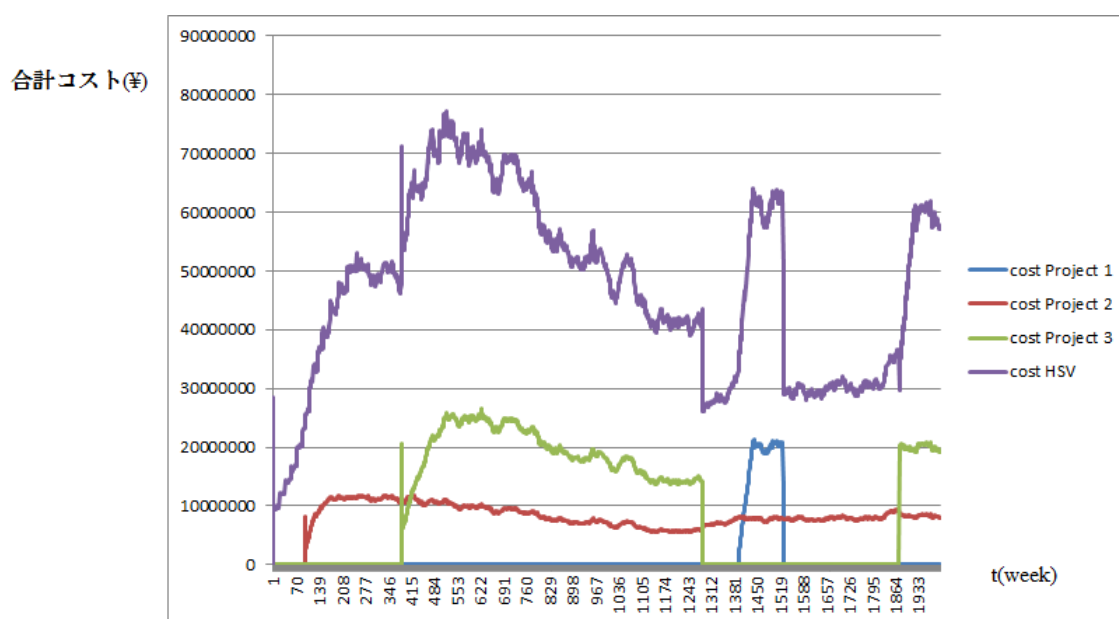


図 5-12 ケーススタディ 1 : ハブ導入可動 (輸送に関わるコスト)

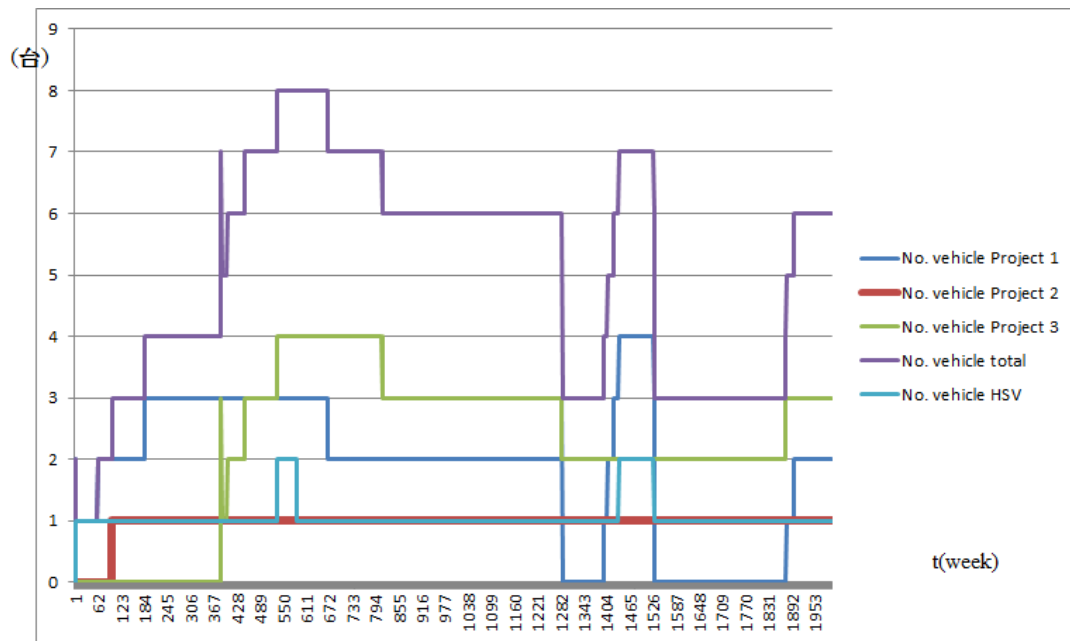


図 5-13 ケーススタディ 1 : ハブ導入可動 (ヘリコプターの台数)

図 5-13 は、輸送で必要となるヘリコプター及び HSV の数の推移をグラフで表している。縦軸には必要なヘリコプター及び HSV の数、横軸には時間をとっており、また青の線がプロジェクト 1 の人員輸送に必要なヘリコプター台数、赤の線がプロジェクト 2 の人員輸送に必要なヘリコプター台数、緑の線がプロジェクト 3 の人員輸送に必要なヘリコプター台数、紫の線がそれらヘリコプターの台数の合計、青の線が必要な HSV の数を表している。これもロジスティックハブが固定されている場合である図 5-9 と同様の形状であるが、シミュレーションの後半でピーク時のヘリコプターの必要数が 1 台多い 7 台になっており、一方でそれ以外の部分では 1 台少ない 3 台によって輸送が可能であることが読み取れる。これは、ロジスティックハブがプロジェクト 3 の付近に移動したことでプロジェクト 3 への輸送に必要なヘリコプターが削減された一方、突然プロジェクト 1 が再開したことによって新たな輸送手段の確保が必要になっているからである。同様に、ロジスティックハブの移動によって 1,500 週前後において必要な HSV の台数も一時的に 2 台に増えていることがわかる。

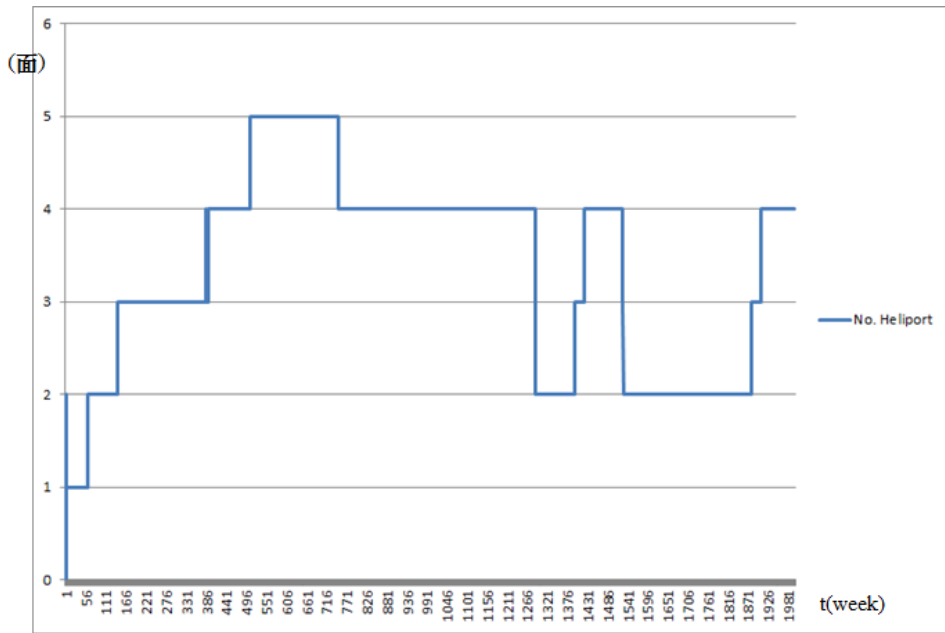


図 5-14 ケーススタディ 1：ハブ導入可動（ヘリポートの面数）

図 5-14 では必要となるヘリポートの面数をグラフで示している。これは図 5-10 とほぼ同様の形であり、ピーク時の面数も等しくなっている。

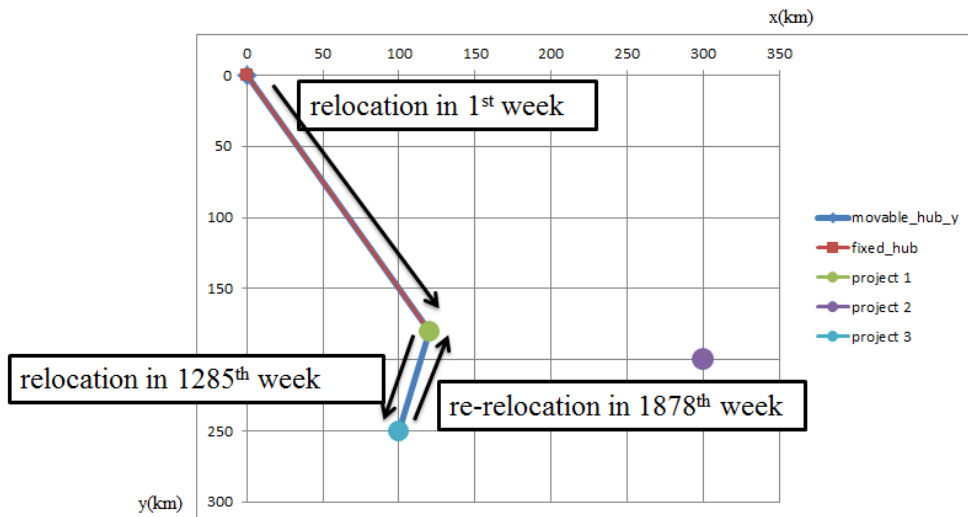


図 5-15 ケーススタディ 1：ハブ導入可動（ストラテジー）

図 5-15 には、ロジスティックハブが移動可能な場合のストラテジーを示した。座標(0,0)が陸上基地、赤の点がプロジェクト 1、緑の点がプロジェクト 2、紫の点がプロジェクト 3 の位置

を表している。プロジェクト 1 が終了する 1,285 週目でロジスティックハブをプロジェクト 3 付近に移動し、プロジェクト 1 が 2 度目の再生産を開始する 1,878 週目で再びプロジェクト 1 付近に戻るのが最適であることを示している。

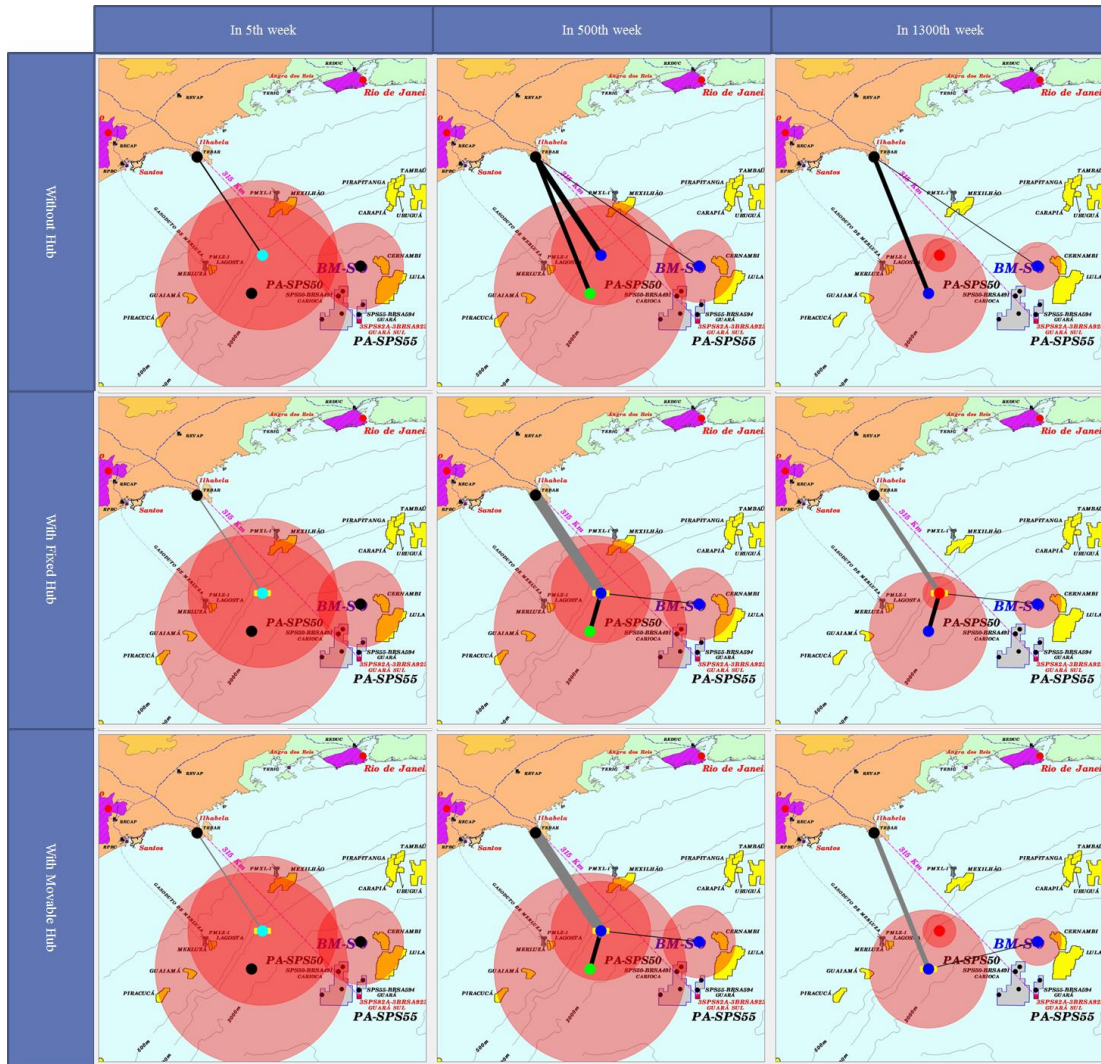


図 5-16 ケーススタディ 1：各ケースにおける第 5 週、500 週、1300 週の輸送状況

### 5.2.3.5 各週における輸送状況の比較

ロジスティックハブを導入しない場合、ロジスティックハブを導入して固定した場合、ロジスティックハブを導入して移動可能にした場合の 3 ケースについて、第 5 週、第 500 週、第 1,300 週における輸送状況を比較した様子を図 5-16 に示す。

当然ながら、各ケースにおいてプロジェクトの状態及び貯留槽の残量は等しくなっている。ロジスティックハブを導入していない場合を上部に示しているが、どの週においてもヘリコプターによってシャトル輸送が行われている様子が見て取れる。一方、ロジスティックハブを導入して固定した場合、ロジスティックハブを表す黄色の長方形がプロジェクト 1 に付近に存在し、プロジェクトの状態の変化に拘らず固定されていることがわかる。また、ロジスティックハブを導入して移動可能とした場合、プロジェクトの状態が変化するとロジスティックハブの移動が行われていることが確認できる。

### 5.2.3.6 輸送コストの比較

ここまでロジスティックハブを導入しない場合、ロジスティックハブを導入して固定した場合、ロジスティックハブを導入して移動可能とした場合の3通りについて比べてきたが、本項ではそれぞれの場合に必要な輸送コストの比較を行う。結果を表 5-5 に示す。

表 5-5 ケーススタディ 1：合計の輸送コスト（単位：円）

	ハブなし	ハブ導入固定	ハブ導入可動
ヘリコプター輸送	248,360,158,299	45,004,647,687	38,038,659,774
HSV 輸送	-	89,697,226,498	93,901,892,805
ハブ関連	-	12,800,366	34,559,724
合計	248,360,158,299	134,714,674,551	131,975,112,302

ロジスティックハブを導入することによって、ヘリコプターの輸送コストが大幅に削減されていることが分かる。全体として削減額が 1,100 億円程度出ているが、この額が実際に 2,000 週間の間にロジスティックハブ導入に掛けられるコストと考えることが出来る。

### 5.2.4 まとめ

提案手法によって行われる、資源開発プロジェクトにおける各輸送手段に必要なコストの計算結果を確認した。また、ロジスティックハブを導入しない場合、ロジスティックハブを導入して固定する場合、ロジスティックハブを導入して移動可能にする場合の 3 通りのシミュレーションを行い、実際に出力されるデザイン及びストラテジー、すなわち輸送設計の要件やロジスティックハブの設置及び移動に関する情報を確認した。

---

## 5.3 ケーススタディ 2：ロジスティックハブの導入時期に関する検証

### 5.3.1 概要

本項では、ロジスティックハブの導入時期が合計輸送コストに対して与える影響を評価する。

ロジスティックハブを導入する時期をある時期に定め、それより前の時点ではヘリコプターによる陸上基地とプラットフォーム間のシャトル輸送によって人員輸送を行うとし、また導入時期の後では HSV およびヘリコプターによるロジスティックハブを経由した輸送を行うと仮定する。その上で合計輸送コストを計算し、輸送コストと導入時期の関係を見極める。

### 5.3.2 入力情報

シミュレーション設定及びプロジェクト設定は 5.2 と同じものとする。また、利用するシナリオのグラフを図 5-17 に示した。縦軸は第 1 週における原油価格を 1 とした場合の原油価格、横軸は時間である。

これらの設定に対し、ロジスティックハブの導入時期を第 1 週から第 1,040 週まで変化させ、それぞれにおいて最適化を行った上で合計の輸送コストを計算する。

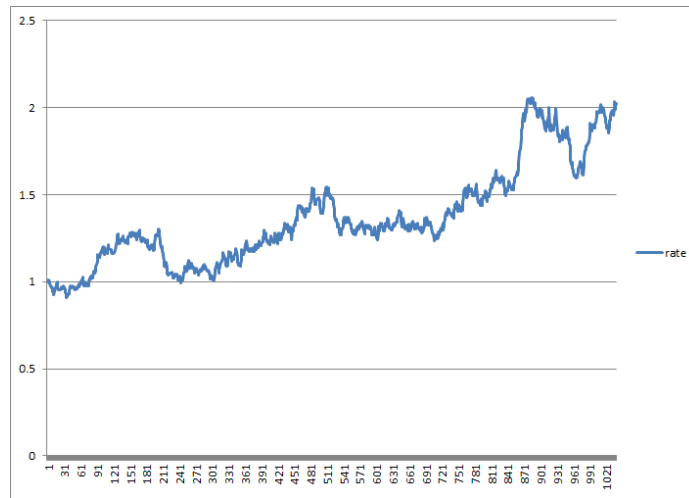


図 5-17 ケーススタディ 2 : 用いるシナリオ

### 5.3.3 結果及び考察

結果を図 5-18 に示す。縦軸は合計の輸送コスト、横軸は導入時期を表しており、赤のグラフはハブを導入しなかった場合、すなわち導入時期に拘らず一定のコストを示す。一方青の線はロジスティックハブをそれぞれの時期で導入した場合の合計輸送コストを表している。

グラフより、導入時期が早いほど輸送コストが削減される傾向があることが読み取れる。これはロジスティックハブの導入がある程度の輸送コスト削減をもたらしていることの証左ともいえる。グラフの一部に凹凸があるが、これは導入時期によってロジスティックハブの最適な配置がわずかに異なるためである。この点について、可視化機能を用いて検討する。

図 5-19、図 5-20 および図 5-21 に、第 0 週、第 200 週、第 400 週にロジスティックハブを導入した場合の第 500 週における配置図を示す。導入時期によってわずかにロジスティックハブの配置が異なっている様子が見て取れる。これは、その導入時点における原油価格によって初期の配置が異なることおよびロジスティックハブの係留コストや移動コストがある程度の大きさを持つことによって引き起こされると考えられる。なぜなら、係留コスト・移動コストを考慮しない場合に最適な位置と現状の位置にロジスティックハブを配置した場合を比較し、そのコスト差が係留コストや移動コストよりも小さいものであった場合、ロジスティックハブの移動は起きないからである。



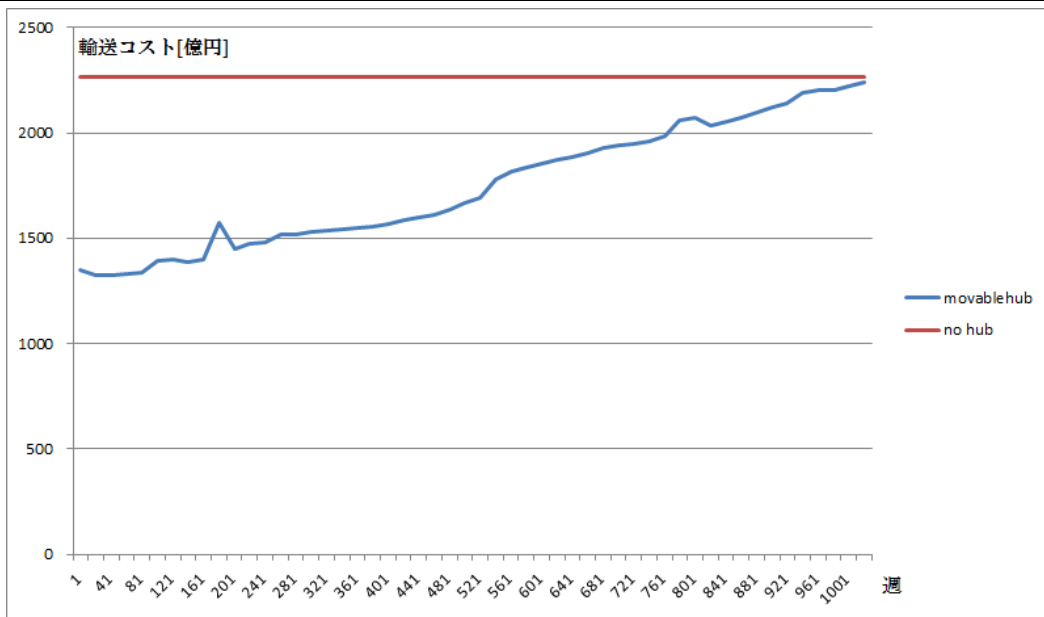


図 5-18 ケーススタディ 2 : 導入時期による合計輸送コストの変化

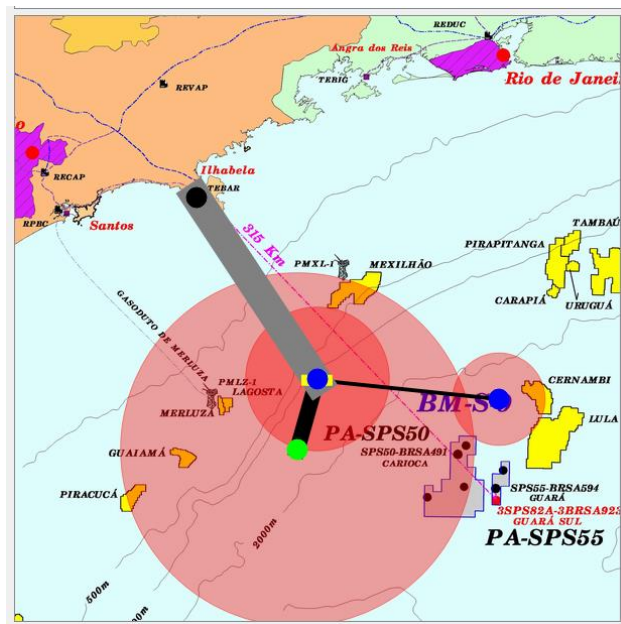


図 5-19 ケーススタディ 2 : 第 0 週にハブを導入した場合の第 500 週における配置

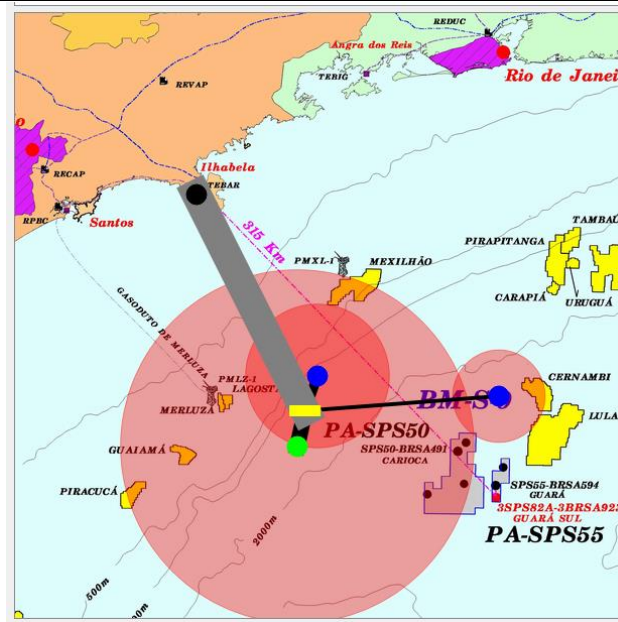


図 5-20 ケーススタディ 2：第 200 週にハブを導入した場合の第 500 週における配置

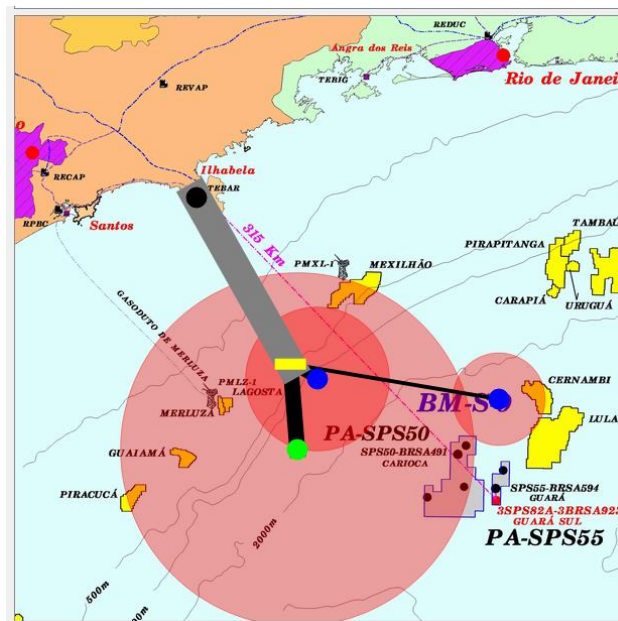


図 5-21 ケーススタディ 2：第 400 週にハブを導入した場合の第 500 週における配置

---

## 5.4 ケーススタディ 3：経済的不確実性を含んだロジスティックハブ導入についての検証

### 5.4.1 概要

本項では、提案手法によって出力されるデザイン及びストラテジーを元に、ロジスティックハブに関する経済的性質を明らかにする。モンテカルロ・シミュレーションによって原油価格の多数のシナリオの生成を行い、不確実性のもとでロジスティックハブの導入が輸送コストに与える影響を平均値・分散などによって確認する。

### 5.4.2 入力情報

シミュレーション設定を表 5-6 に示す。5.2 において用いた入力情報のうち、計算期間、シナリオ数及び原油価格ボラティリティ、ドリフト率のみを変更した。ドリフト率は 0.00015、0、-0.00015 という 3 つの値を用意し、それぞれに対して 2,000 本のシナリオを生成した。

表 5-6 ケーススタディ 3：シミュレーション設定（一般）

情報	単位
計算期間(週)	1,040
ドル円レート(円/ドル)	100
初期原油価格(ドル/バレル)	100
ケロシン価格(円/L)	100
原油価格ボラティリティ	0.015
ドリフト率	0.00015, 0, -0.00015
シナリオ数	2,000
再生産に必要な期間の割合	0.3

### 5.4.3 結果及び考察

ロジスティックハブを導入していない場合、ロジスティックハブを導入して固定した場合、ロジスティックハブを導入した上で移動可能とする場合の輸送コストの度数分布を図 5-22、図 5-23 および図 5-24 に示す。

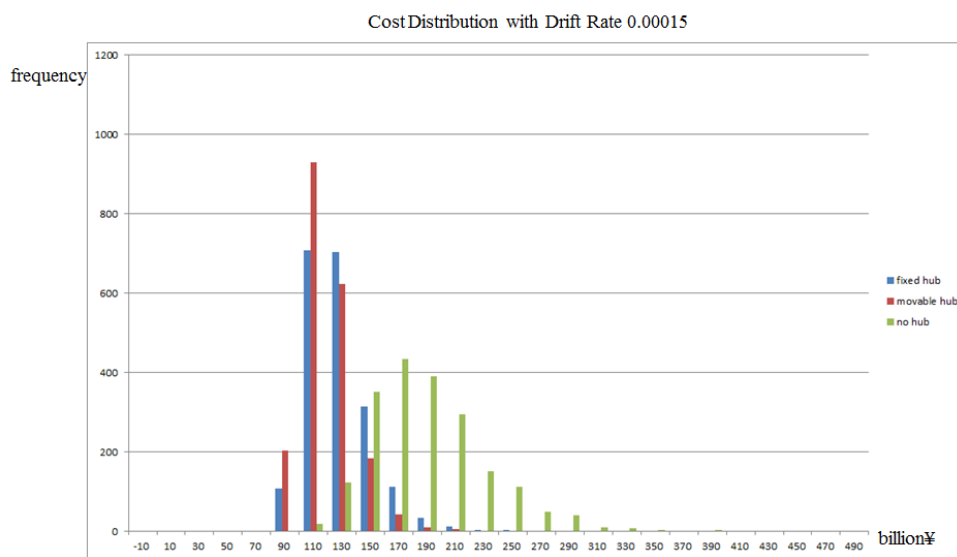


図 5-22 ケーススタディ 3：合計輸送コストの分布（ドリフト率 0.00015）

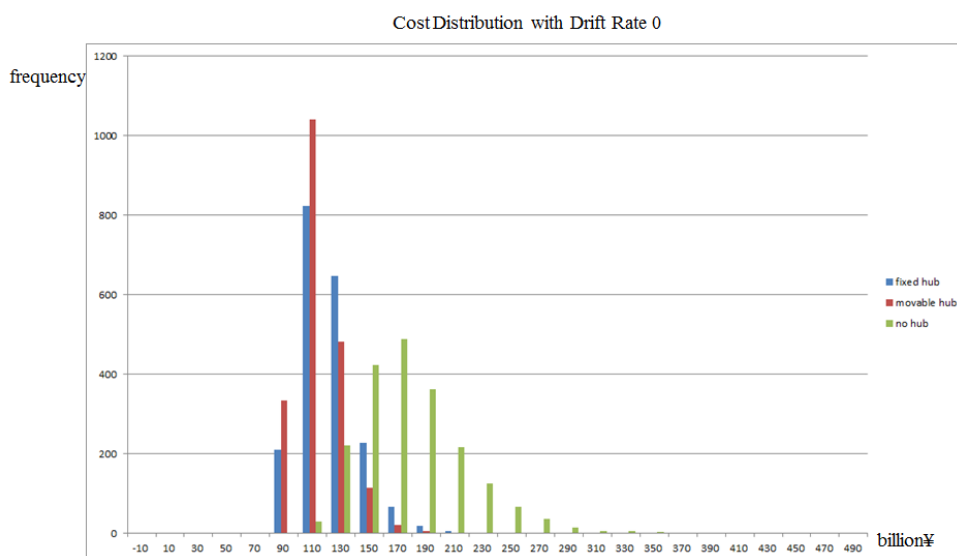


図 5-23 ケーススタディ 3：合計輸送コストの分布（ドリフト率 0）

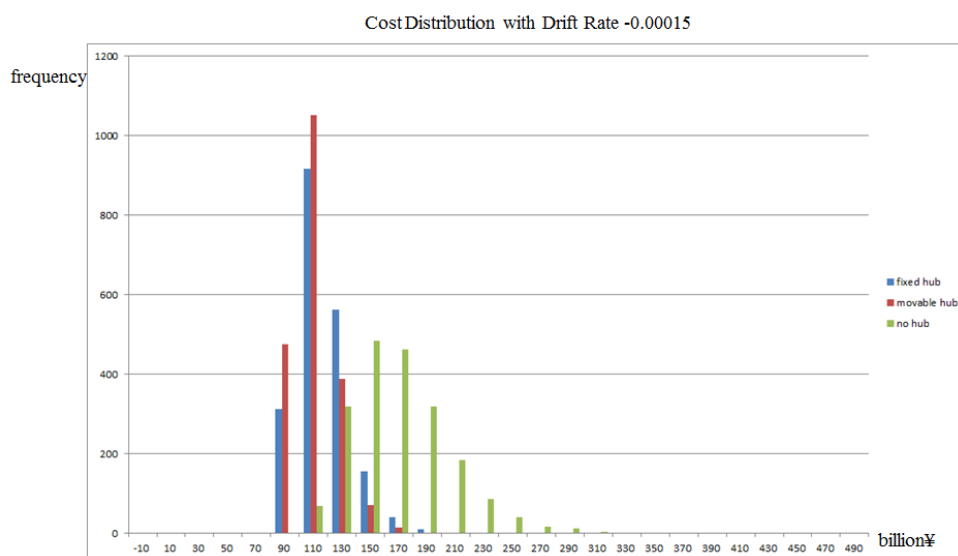


図 5-24 ケーススタディ 3：合計輸送コストの分布（ドリフト率-0.00015）

図 5-22、図 5-23 及び図 5-24 において、縦軸は頻度、横軸は 1,040 週間の輸送コストの合計を表しており、青のグラフがロジスティックハブを固定した場合、赤のグラフがロジスティックハブを移動可能とした場合、緑のグラフがロジスティックハブを導入しない場合の輸送コストの分布を表している。ロジスティックハブを導入した場合は、固定か移動可能かに拘らず、ロジスティックハブを導入していない場合と比べて分散及び平均が抑えられていることが読み取れる。

表 5-7 ケーススタディ 3：合計輸送コストの平均及び分散[百万円]

		Fixed Logistics Hub	Movable Logistics Hub	Without Hubs
Drift rate: 0.00015	Average	128,120	119,613	190,043
	Deviation	22,041	17,712	41,549
Drift rate: 0	Average	122,047	114,708	178,615
	Deviation	19,683	15,888	37,137
Drift rate: -0.00015	Average	117,456	111,014	169,966
	Deviation	18,275	14,767	34,489

平均及び分散を計算した結果を表 5-7 に示す。ロジスティックハブを導入することで、合

---

計の輸送コストの削減が可能となるだけでなく、その変動の幅も抑制されていることがわかる。また、原油価格が下降傾向にある場合は上昇傾向・中立の場合と比べ、削減されるコスト幅が減少することが読み取れる。これは、原油価格の低下と同時に燃料費が下がり、合計の輸送コストを低下させるためである。

#### 5.4.4 まとめ

提案手法を用い、シンプルな入力情報に基づいてロジスティックハブの経済的特性を明らかにするためモンテカルロ・シミュレーションを行った。Gaussian Weiner 過程に基づいて生成された 2,000 通りのシナリオについて合計輸送コストを比較すると、ロジスティックハブを導入することで合計輸送コストの平均・分散はともにロジスティックハブを導入していない場合と比べて低く抑えられることがわかった。また、その輸送コストの抑制は、原油価格が高い場合ほど大きく影響することが判明した。

### 5.5 ケーススタディ 4：ロジスティックハブの持つ地理的性質の検証

#### 5.5.1 概要

本項では、提案手法によって出力されるデザイン及びストラテジーを元に、ロジスティックハブに関する地理的性質を明らかにする。

まず、プロジェクトの地理情報に対し「中心距離」及び「分散」という 2 つの指標を定義する。「中心距離」は全てのプロジェクトの重心と陸上基地の間を結ぶベクトルのことを表す。また、「分散」は全てのプロジェクトの重心から各プロジェクトまでを結ぶベクトルのことを表すとする。2 つの指標の概念図を図 5-25 に示す。

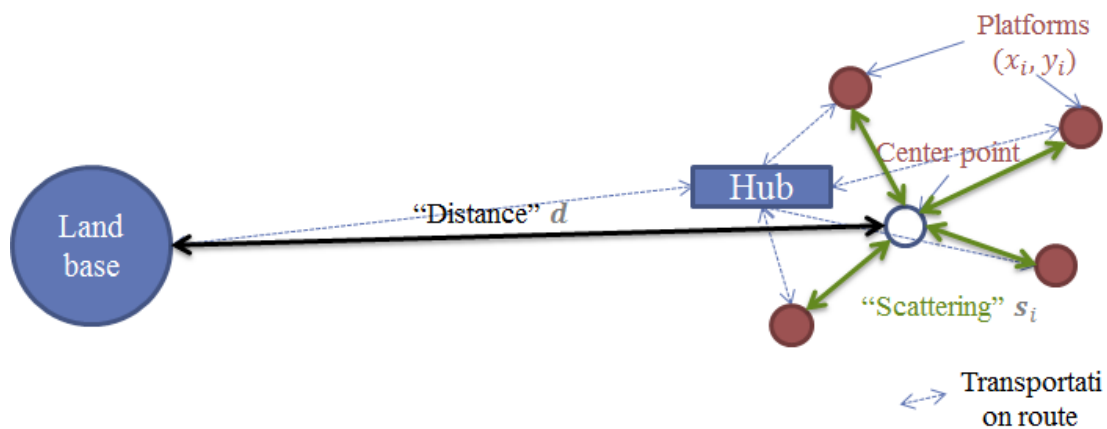


図 5-25 ケーススタディ 4：地理情報に対し導入する 2 指標

本ケーススタディでは、これらの指標を用いて全てのプロジェクトの座標を表現する。各プロジェクトのベクトル  $\mathbf{P}_i$  に対し「距離」ベクトルを  $\mathbf{d}$ 、各プロジェクトの「分散」ベクトルを  $\mathbf{s}_i$  とすると、式(5.1)及び式(5.2)が成り立つ。なお  $n$  はプロジェクトの合計数とする。

$$\mathbf{d} = \frac{1}{n} \sum_i \mathbf{P}_i = \left( \frac{1}{n} \sum_i x, \frac{1}{n} \sum_i y_i \right) \quad (5.1)$$

$$\mathbf{s}_i = \mathbf{P}_i - \mathbf{d} \quad (5.2)$$

これを変形すると、式(5.3)となる。

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{d} + \mathbf{s}_i \quad (5.3)$$

ここで、距離及び分散を変更するためのパラメータ  $\alpha$  及び  $\beta$  を導入し、各プロジェクトの座標を式(5.4)の形式で表現する。

$$\mathbf{P}_i = \alpha \mathbf{d} + \beta \mathbf{s}_i \quad (5.4)$$

ロジスティックハブの地理的性質を検証するため、ここでは「中心距離」及び「分散」のパラメータである  $\alpha$  及び  $\beta$  を一定の範囲で変化させてプロジェクトの位置を調整し、輸送コスト

---

がどのように変化するかを検証する。それぞれのパラメータの組( $\alpha, \beta$ )に対し、ロジスティックハブを導入しない場合、ロジスティックハブを導入して固定する場合、ロジスティックハブを導入して移動可能とする場合の3つのケースを検討する。

### 5.5.2 入力情報

シミュレーション設定及びプロジェクト設定、用いるシナリオは5.2と同じものとする。変化させる $\alpha$ 及び $\beta$ については表5-8の通りである。 $\alpha$ 及び $\beta$ について、20通りの組み合わせを作り輸送コストを比較する。

表 5-8 ケーススタディ 4 :  $\alpha$ 及び $\beta$ のとりうる値

変数	値
$\alpha$	0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2
$\beta$	0.25, 0.5, 0.75, 1

### 5.5.3 結果及び考察

$\alpha$ ごとの結果を図5-26、図5-27、図5-28、図5-29及び図5-30に示す。縦軸が合計の輸送コスト及びその割合、横軸が $\alpha$ および $\beta$ の値による場合分けとなっている。青の棒グラフはロジスティックハブを導入していない場合、赤の棒グラフはロジスティックハブを導入して固定した場合、緑の棒グラフはロジスティックハブを導入して移動可能とした場合を表している。また、折れ線グラフはコストの比を示しており、それぞれ紫の折れ線グラフはロジスティックハブを固定した場合、水色の折れ線グラフはロジスティックハブを移動可能とした場合の輸送額について、ロジスティックハブを導入していない場合と比べた場合の比率を表している。



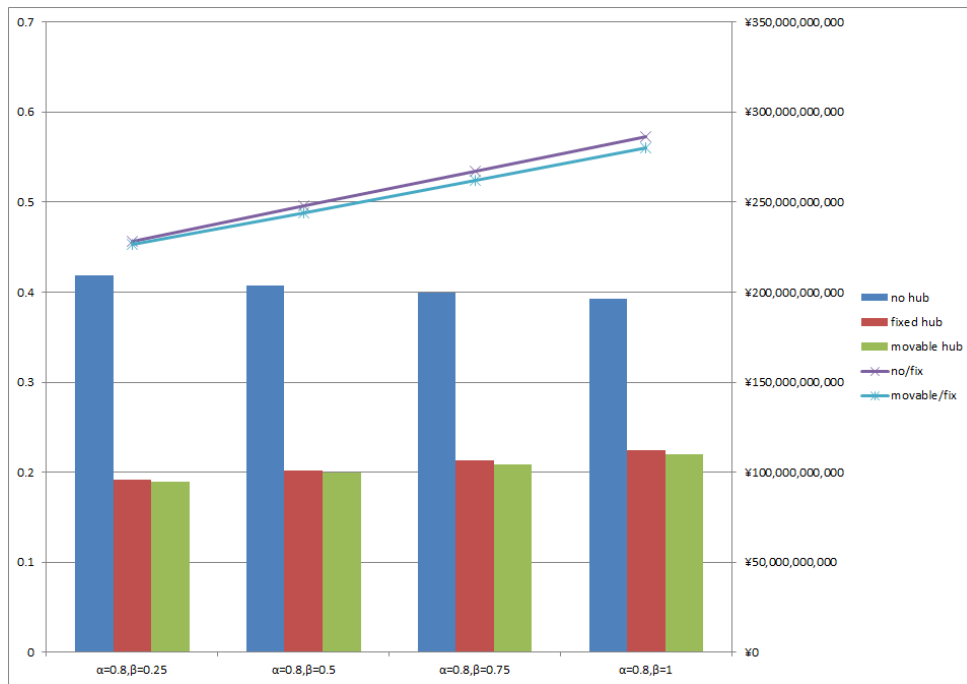


図 5-26 ケーススタディ 4 :  $\alpha = 0.8$ における輸送費の比較

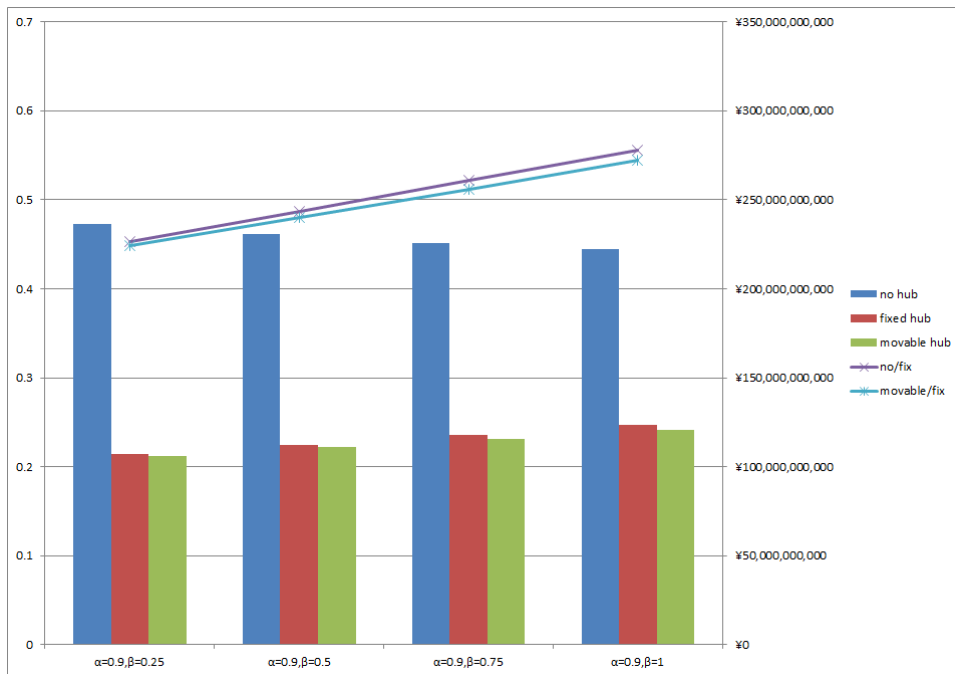


図 5-27 ケーススタディ 4 :  $\alpha = 0.9$ における輸送費の比較

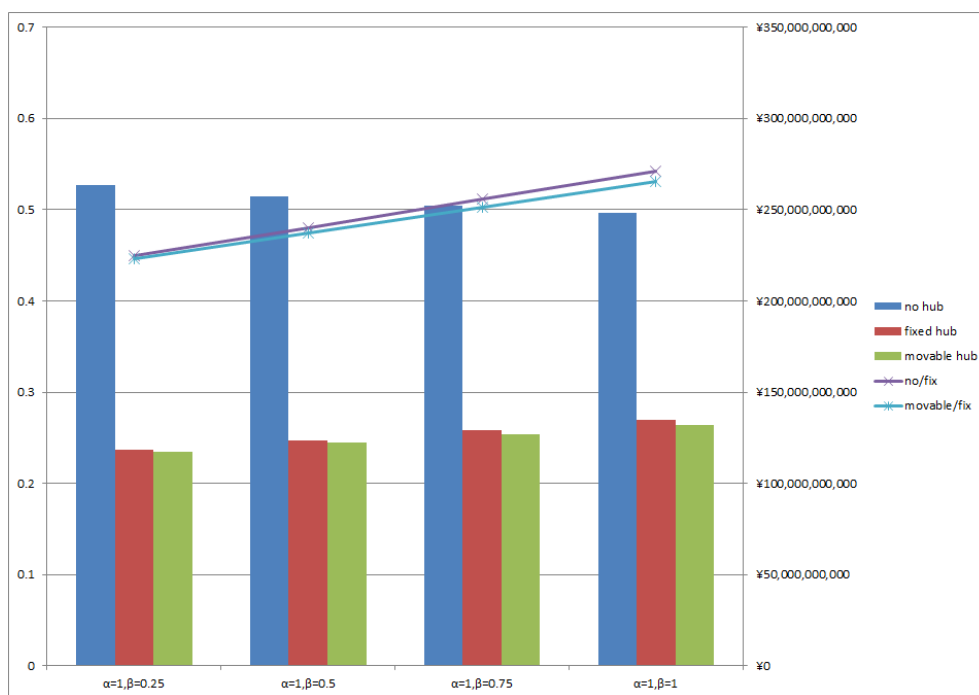


図 5-28 ケーススタディ 4 :  $\alpha = 1.0$ における輸送費の比較

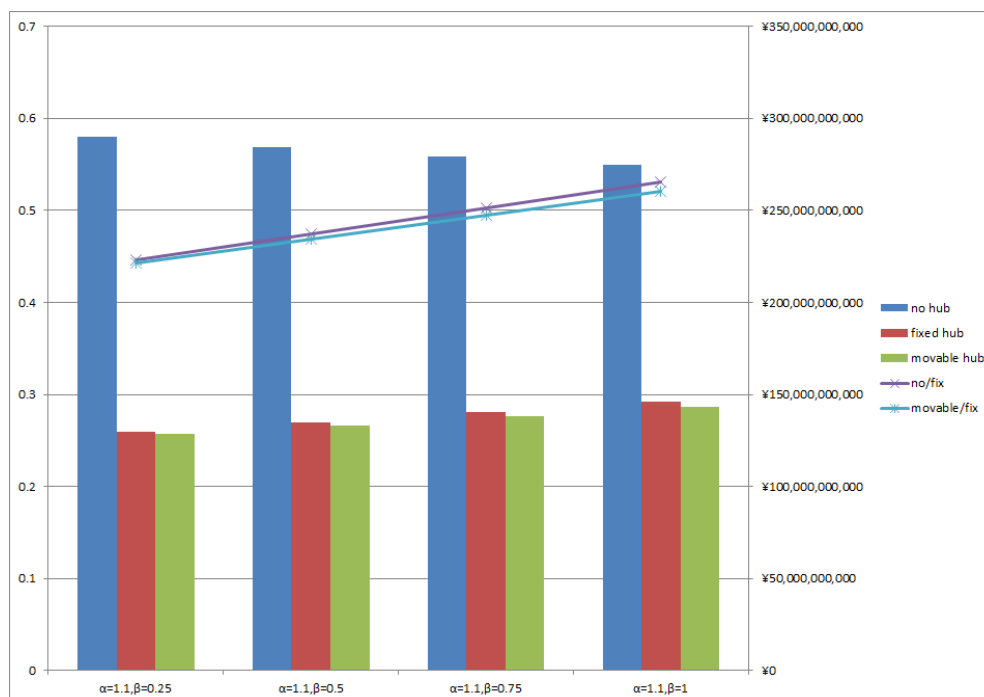


図 5-29 ケーススタディ 4 :  $\alpha = 1.1$ における輸送費の比較

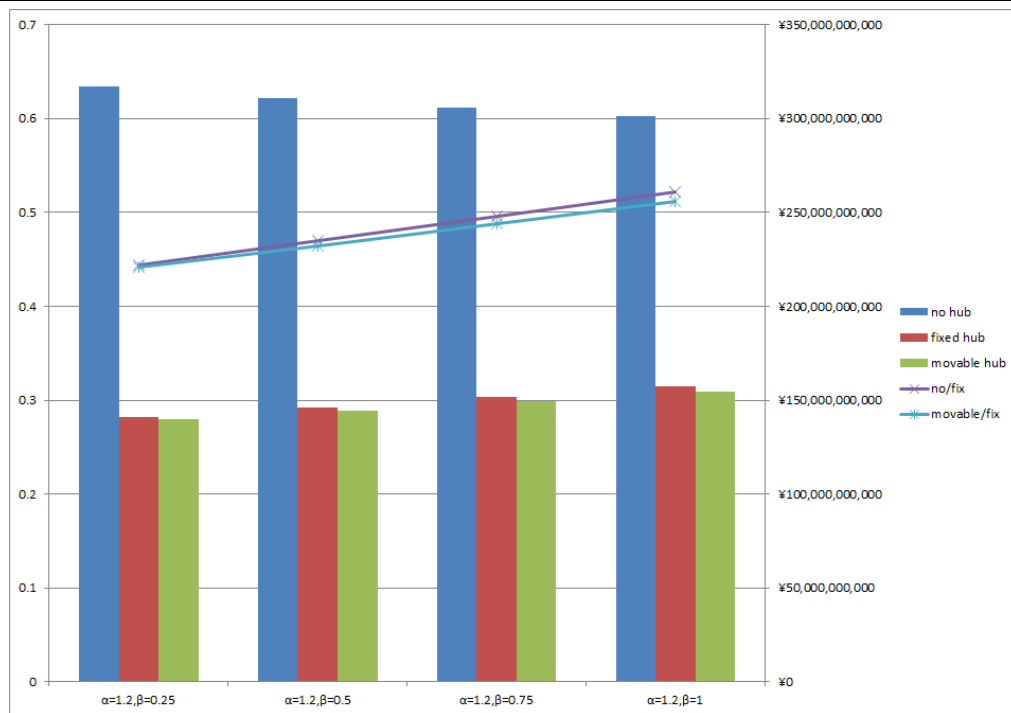


図 5-30 ケーススタディ 4 :  $\alpha = 1.2$ における輸送費の比較

まず、 $\alpha$  の値について、 $\alpha$  の値が大きくなるほどハブを導入しなかった場合に対するハブを導入した場合の輸送コストの比が小さくなっており、陸地から離れるほどロジスティックハブの導入によるコストの削減効果が大きいことを表している。これは、陸上基地と各プロジェクトの距離が離れることにより、ヘリコプターで輸送する距離と比べてHSVによる輸送距離が伸びることで、HSVを使った大量輸送による輸送コストの削減が大きく効果を上げていることが要因だと考えられる。

次に、 $\beta$  の値について、 $\beta$  の値が小さいほどロジスティックハブの導入の輸送コスト削減効果が大きいことがわかる。これも同様に、ヘリコプターで輸送する距離と比べてHSVによる輸送距離が大きくなるために、HSVを使った大量輸送が有利となるからだと考えられる。逆に $\beta$  の値が大きくなるにつれ、ヘリコプターによる輸送距離が伸び、大量輸送による削減効果は相対的に小さくなる。

なお、ロジスティックハブを導入していない場合、 $\beta$  の値が大きいくほどコストが小さくなっているが、これは $\beta$  の値が大きくなるにつれ、最も輸送人員数の多いプロジェクト 1 の座標が徐々に陸地へと近づく方向へ移動するからだと考えられる。

---

#### 5.5.4 まとめ

ロジスティックハブの地理的な性質を明らかにするために、プロジェクトの座標を「平均」及び「分散」の2つのパラメータで表現し、それらのパラメータを変更することで輸送コストがどのように変化するかを確認した。その結果、ロジスティックハブの導入がより大きな効果を上げるのは、よりプロジェクト全体が陸地から遠い位置にあり、またそれらの位置がより密集している状態と考えられる。これに関しては、HSV とヘリコプターの輸送距離の比率による影響が大きいと見られる。

---

## 第6章 考察

---

6.1 ケーススタディに関する考察 .....	92
6.1.1 輸送モデルに関する妥当性 .....	92
6.1.2 原油価格の変動の影響 .....	93
6.1.3 ブラジル以外の大水深油田に関する考察 .....	94
6.2 提案手法に関する考察 .....	97
6.2.1 人員以外の輸送 .....	97
6.2.2 目的関数の設定 .....	98
6.2.3 最適化における滑降シンプレックス法 .....	98
6.2.4 石油資源開発と輸送コストの関係 .....	99
6.3 本研究の課題 .....	101
6.3.1 モデルに関する課題 .....	101
6.3.2 リアルオプションに関する課題 .....	101

---

## 6.1 ケーススタディに関する考察

本節では、ケーススタディに基づいた考察を行う。

6.1.1 では、輸送モデルに関する妥当性を既存研究との比較によって検証する。6.1.2 では、ロジスティックハブの導入に対して原油価格の変動が与える影響について経済的性質の観点から述べる。6.1.3 では、ブラジル以外の大水深油田に対するロジスティックハブの導入について、地理的性質の観点から考察を行う。

### 6.1.1 輸送モデルに関する妥当性

Menezes ら [17]によれば、ペトロbras社は 2005 年頃にカンポス盆地周辺に約 80 基程度のプラットフォームを持ち、40 台以上のヘリコプターで 1 日あたり 1900 人程度の作業員を運んでいた。これと、本研究におけるケーススタディの内容を比較する。

まず、本研究におけるプラットフォームの数は、入力情報の値を合計すると 75 となっており、ペトロbras社の保有する 80 基とおよそ同じ値となっている。

次に、ケーススタディ 1 において出力されたデータから、輸送人員数について確認する。輸送人員数の推移を図 6-1 に示す。

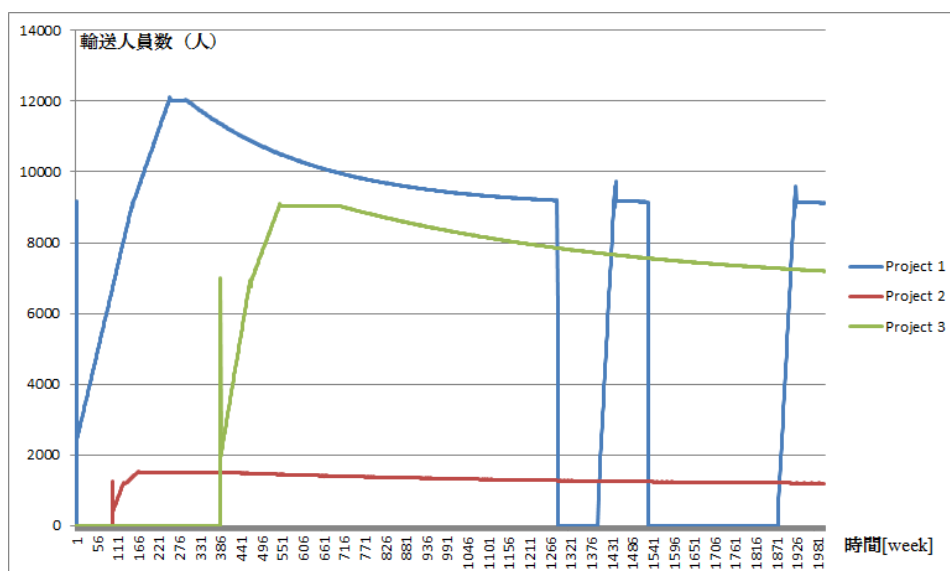


図 6-1 各プロジェクトの輸送人員数の推移

この輸送人員数について、全期間で平均を取ると 3 プロジェクト合計で 14,770 人となり、

1日辺りに換算すれば2,110人となる。これは、先に述べたペトロブラス社のデータと近い値となっている。一方で、ヘリコプターの台数については5.2で述べたとおり、ロジスティックハブを導入していない場合は最大で合計16台が必要との結果が出ている。これはペトロブラス社が保有する40台以上というデータとは離れているが、その原因はヘリコプターの運航が不可能な場合を提案手法では考慮していないためであると考えられる。なぜならヘリコプターは強風や視程障害による影響が大きいため、運航に必要な気象条件が限定され、それによって時間あたりに輸送すべき人員数が増加している可能性があるからである。

### 6.1.2 原油価格の変動の影響

本研究では原油価格の初期値を1バレルあたり100ドルに固定してシミュレーションを行ったが、原油価格自体は2014年後半に大きく低下する傾向にあり、2015年1月時点では1バレルあたり50～60ドルを推移している。このような原油価格の変動と、ロジスティックハブ導入の経済価値の関係についてケーススタディの結果より考察を行う。

表6-1に、5.4で行ったケーススタディの結果を再掲した。これによれば、原油価格が上昇傾向にある場合は現在価値においておよそ600～700億円程度の差があるが、減少傾向では500～600億円程度に減少する。この差の原因は大きく2つが考えられる。1つは燃料価格の低下による輸送コスト自体の減少である。そしてもう1つは、原油価格の低下によるプロジェクト中止によって、輸送すべき人員数が減少し、その結果として輸送コスト全体が押し下げられるということである。

表 6-1 (再掲) ケーススタディ 3 : 合計輸送コストの平均及び分散[百万円]

		Fixed Logistics Hub	Movable Logistics Hub	Without Hubs
Drift rate: 0.00015	Average	128,120	119,613	190,043
	Deviation	22,041	17,712	41,549
Drift rate: 0	Average	122,047	114,708	178,615
	Deviation	19,683	15,888	37,137
Drift rate: -0.00015	Average	117,456	111,014	169,966
	Deviation	18,275	14,767	34,489

このように、原油価格の傾向はロジスティックハブの導入の経済効果に対して大きな影響を持っていると言える。そのため、ロジスティックハブの導入における意思決定では、原油価格に基づいた詳細な検討が必要とされるであろう。

### 6.1.3 ブラジル以外の大水深油田に関する考察

本研究では、ロジスティックハブの導入が検討されたブラジル沖の油田を参考にケーススタディなどを行っている。これは、ブラジル沖は最も開発が盛んな大水深油田の一つであり、また陸上基地と今後開発の進められる鉱区が200～300kmほど離れているためロジスティックハブ導入の効果が大きいと考えられるからである。

一方で、世界にはブラジル沖以外にもいくつかの大水深油田が存在する。図 6-2 に、大水深油田が存在する地域を示した。現在ではメキシコ湾、アンゴラ沖など西アフリカ、そして北海が主な大水深油田として挙げられる。

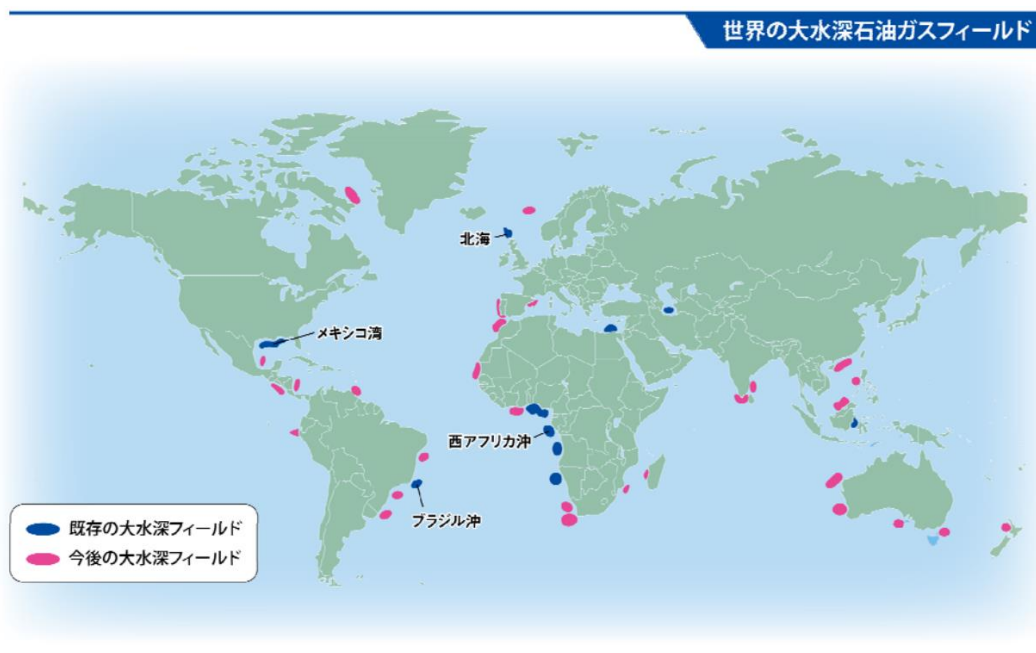


図 6-2 世界に存在する大水深油田 [35]

#### 6.1.3.1 メキシコ湾における大水深油田

図 6-3 に、メキシコ湾に存在する大水深油田の存在箇所及びその大きさを示した。数億



バレル以上の油田の発見もあるが、最も陸地から遠い油田でも沖合 150km 程度となっており、陸地からの距離がブラジル沖と比べて近くなっていることが確認できる。

ケーススタディの結果より、ロジスティックハブの導入効果は陸地からの距離が遠いほど高いと考えられるため、メキシコ湾においてロジスティックハブを導入するにはより詳細なコストの試算・検討が必要であろう。

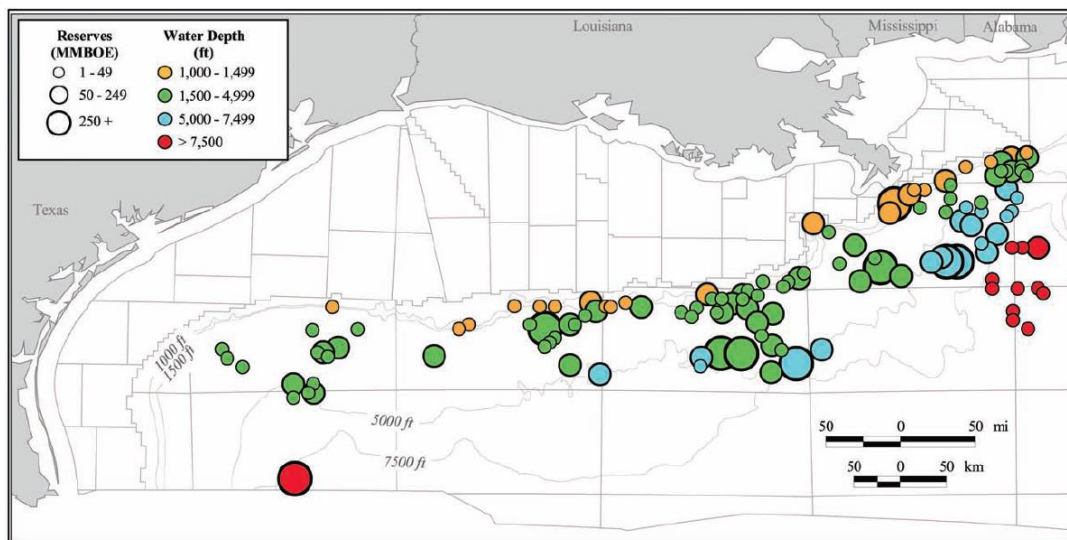


図 6-3 メキシコ湾の大水深油田 [36]

### 6.1.3.2 西アフリカ沖における大水深油田

図 6-4 に、アンゴラ沖での資源開発状況を示した。アンゴラ沖は西アフリカの中でも特に大水深の油田の開発が進んでいる地域であるが、陸地からの距離は大体 200km 前後となっている。メキシコ湾における開発と同様、ロジスティックハブの導入によるコスト削減効果は、ブラジル沖と比べて低くなる可能性が高いと言える。

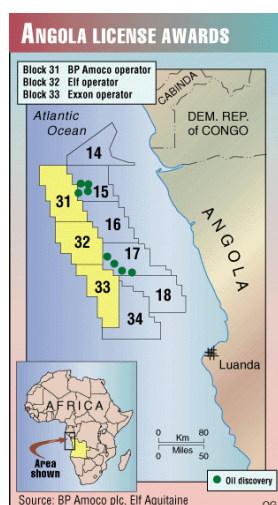


図 6-4 アンゴラ沖におけるライセンスラウンドと油田 [37]

### 6.1.3.3 北海における大水深油田

図 6-5 に、北海における資源開発状況を示した。緑の点が油田、赤の点がガス田を表しているが、最も陸地から遠い海域では 300km 程度の距離となっており、ヘリコプターの航続距離の限界を考慮した輸送ネットワークについての研究が行われている [15]。陸上基地との距離で言えば、北海とブラジル沖の油田が置かれている状況は似ていると言える。一方で、探査コストの高騰のために北海油田での掘削作業は 2014 年には 2000 年以降で最低の水準となっており [38]、今後の資源開発においてロジスティックハブの導入が必要となるかは深く検討すべきである。

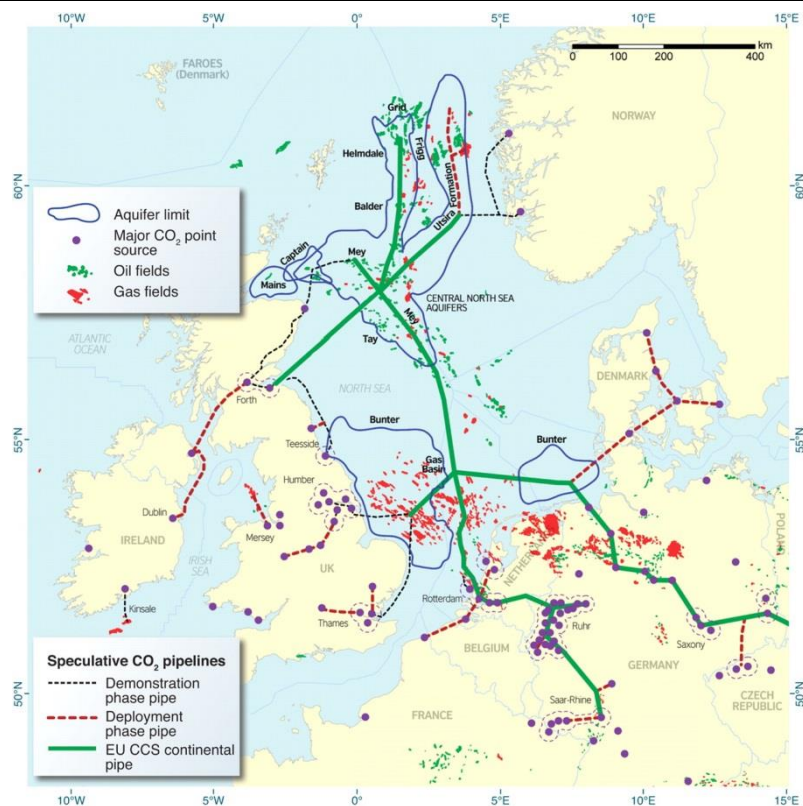


図 6-5 北海における資源開発状況 [39]

## 6.2 提案手法に関する考察

### 6.2.1 人員以外の輸送

本研究では人員輸送コストに主眼を置き、その点についてロジスティックハブの導入が及ぼす影響について評価手法を提案し、検討を行った。

しかし、将来的には人員以外の要素、特に必要物資などが、ロジスティックハブを経由した輸送に含まれると考えるのが妥当である。ロジスティックハブの運用を応用できる可能性がある物資は多様であり、例えば、作業員がプラットフォーム上で生活するための必需品や、プラットフォームの修繕などに必要な部品などが挙げられる。これらについても本研究の手法を適用して考慮することは可能であるが、一方で新たなモデルの導入・実データの取得などが必要となる。

---

### 6.2.2 目的関数の設定

最適化の研究においては可能な限り目的関数を線形に設定し、既存の線形最適化プログラムを用いることが多いが、本研究でロジスティックハブの移動に用いている目的関数は非線形となっている。これは、洋上に設置するためその位置を自由に設定できるというロジスティックハブの特性を考慮するためである。ただし、ロジスティックハブの設置を行う場所が有限個の候補に限定できる場合は、線形化を行うことが可能と考えられる。

また、本研究では合計輸送コストを目的関数にしているが、これはロジスティックハブの目標コストを算出するためである。ロジスティックハブの導入・運用におけるコストが判明しておらず、まずはそのコストの概算を得ることを第一に考えている。ただし、実際の運用においては、輸送コスト以外の目的関数を設定する場合もありうる。例えば、安定的な運用を目指すのであればコストの分散を最小化することも考えられる。

### 6.2.3 最適化における滑降シンプレックス法

本研究では最適化における変数をロジスティックハブの座標のみとしている。すなわち、最適化の解空間は 2 次元であり、容易に可視化が図れる。そこで、5.2 のケーススタディにおいて用いたプロジェクト実績データを元に、第 1 週時点での目的関数、すなわち輸送コストを可視化したものを図 6-6 に示す。なお、プロジェクト及び陸上基地の位置を黒の点で示している。

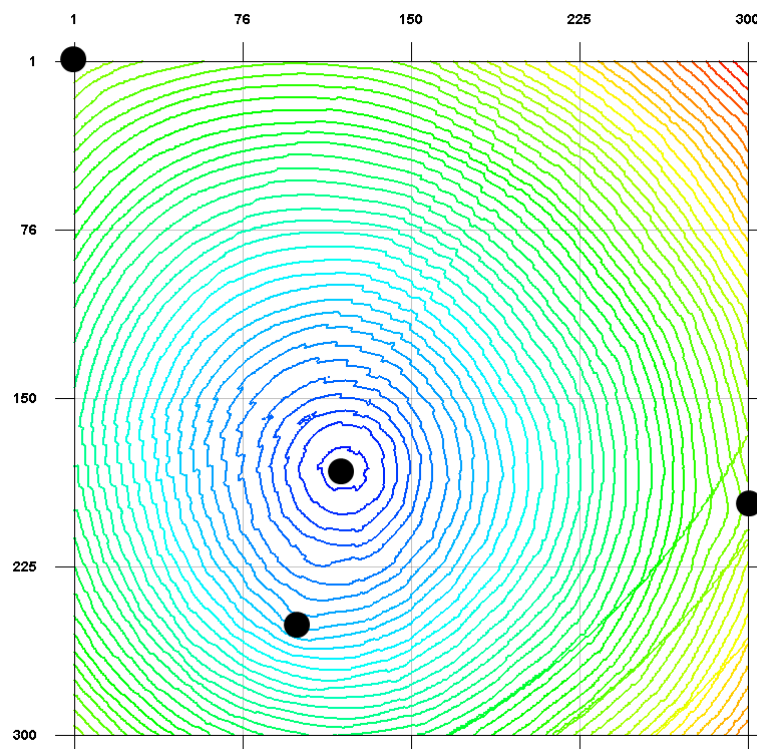


図 6-6 目的関数の等高線表示

図 6-6 より、本研究で入力したデータにおいては目的関数についての複雑な多峰性は存在しないことが窺え、滑降シンプレックス法でも十分な解が得られることが予想される。一方で等高線は滑らかではなく、不連続な点がある程度存在することも見て取れるため、導関数を用いる最適化手法はこの場合不適切であるといえる。なお、この不連続性は、ある距離を境に変化する必要なヘリコプターの数が離散的な値を取るために引き起こされると考えられる。ヘリコプターの台数の離散的な変化はリースコストへ影響し、それが合計の輸送コストにも影響を与えているといえる。

最適化の対象を追加した場合や、プロジェクト数が増え、配置がより複雑になった場合は最適化手法について再度検討をする必要があると思われるが、本研究の段階では滑降シンプレックス法で十分に対応出来るであろう。

#### 6.2.4 石油資源開発と輸送コストの関係

本研究では石油資源開発に関するコストと輸送コストを完全に分離して計算及びシミュ

レーションを行っているが、ここでは、石油資源開発に関するコストを考察する。

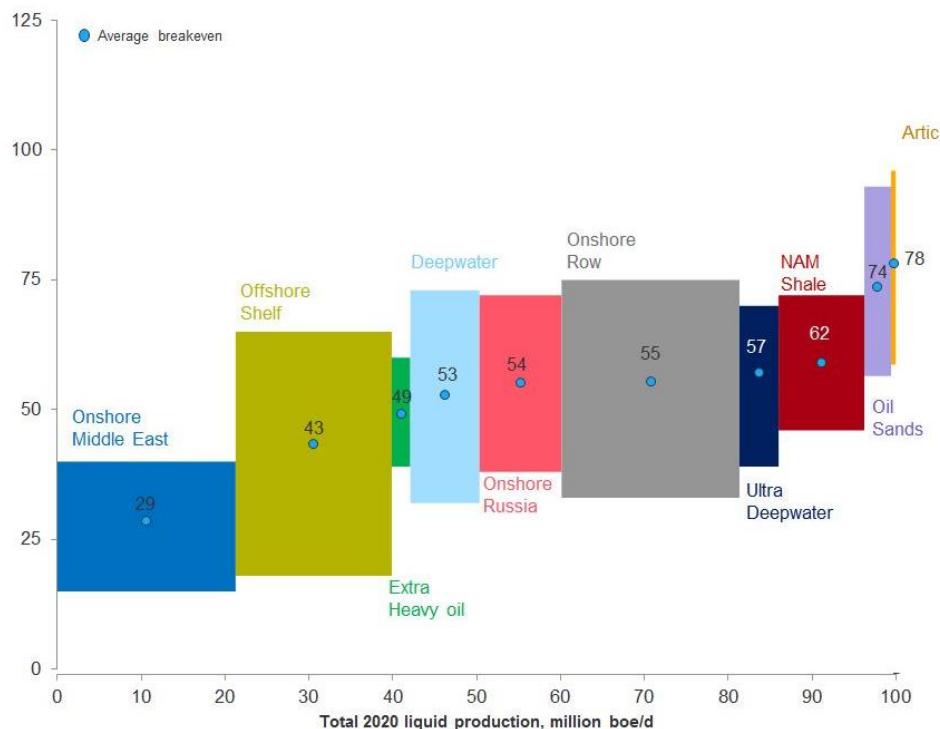


図 6-7 各地域・開発箇所における石油採算価格 [40]

各地域・開発箇所における石油資源の採算価格を図 6-7 に示す。今後の海洋資源開発で伸びるとされている大水深、超大水深はそれぞれ Deepwater および Ultra Deepwater に対応しており、幅はあるもののおよそ 40~70 ドル程度が採算価格となっている。ここではおよその平均値である 55 ドルを元に、石油資源開発に必要なコストを概算する。ケーススタディにおいて設定した埋蔵量は合計 90 億バレルとなっている(これはブラジル沖にて発見された油田のうち、Franco、Libra など大型油田の予想埋蔵量とされている 50 億バレルを参考としたものである)。合計 90 億バレルの開発に掛かるコストは 4,950 億ドル、すなわち約 50~60 兆円となる。この値がそのまま開発コストとなるとは考えにくい、オーダーに関しては大きく外れていないと考えられる。

一方で、5.4 のケーススタディにおいて算出された輸送にかかるコストは、割引率を考慮してはいるものの、約 20 年間でおよそ 1,000 億~2,000 億となっている。すなわち、開発費用に対して 0.2% 程度の割合を占めているのみである。

本研究においてはロジスティックハブの導入コストの考慮はなされていないため、実際に

---

ロジスティックハブを導入することで削減されるコストは 5.4 のケーススタディで算出した数百億円よりも小さいものとなる可能性が高い。これは決して小さい額ではないが、プロジェクトの存続に対して与える影響は軽微であることが予想される。そのため、本研究中ではプロジェクトの実績データと輸送コストを完全に切り離して考慮している。

## 6.3 本研究の課題

### 6.3.1 モデルに関する課題

本研究で導入したモデルは、ロジスティックハブの経済性を明らかにすることを第一の目的としているため、より詳細な輸送計画を決定するには不足する部分がある。例えば、Nathalia ら [14]は 1,000 以上に及ぶ需要点から最適なネットワークを探索し、コストの最小化を行っている。今後ロジスティックハブに関する設計が進むと共に、ロジスティックハブのモデルはもちろん、他の輸送モデルやプロジェクトモデルについての詳細化を行う必要が出てくるであろう。

### 6.3.2 リアルオプションに関する課題

実際にロジスティックハブを導入する場合、その導入時期と経済価値について、市場環境を考慮した上でリアルオプションとして評価する必要があると考えられる。現在のモデルでも現在価値の計算は行っているが、不確実性の取り扱いについてはまだリアルオプションの観点から言えば不足している。イベントツリーなどを導入してより詳細なオプションの列挙を行うとともに、市場環境以外の不確実性についても考慮が必要であろう。

---

## 第7章 結論

---

7.1 結論 .....	103
7.2 今後の展望 .....	103

---



---

## 7.1 結論

本研究では、資源開発プロジェクトへのロジスティックハブの導入に関する経済性評価手法を提案した。

経済価値の算出において必要なモデルを作成・導入し、またコストを最小化するロジスティックハブの配置を求めることで、ロジスティックハブに必要な機能や目標コストの算出が可能になった。

ケーススタディでは、提案手法によってロジスティックハブの導入の有無が及ぼす輸送コストへの影響を確認した。また、ロジスティックハブの経済的および地理的な性質について、モンテカルロ・シミュレーションや独自に用意したパラメータを用いて評価を行った。その結果、ロジスティックハブの導入によって、資源開発プロジェクトでの人員輸送コストを削減し、経済的不確実性がもたらす輸送コストの振動が抑えられることが判明した。更に、陸上基地から資源開発プラットフォームまでの距離がより長く、またプラットフォーム同士がより密に存在している状況ほど、ロジスティックハブの導入によって削減されるコストが大きいことが明らかになった。

陸上基地からの距離という観点においてロジスティックハブが必要となるような大水深油田は現時点では限られているものの、ロジスティックハブの導入による輸送コストの削減は可能であると判断できる。今後の洋上資源開発の状況を注視しつつ検討をすすめるべきであろう。

## 7.2 今後の展望

提案手法によって導出されるロジスティックハブの設計要件や目標コストを元に、それらを満たすプロジェクトのデザインを行うフレームワークを考案することは、今後のロジスティックハブ導入に向けたプロセスにおいて非常に重要なステップとなると考えられる。

また、本研究ではまずロジスティックハブの位置のみをコスト最小化における変数と位置づけているが、実際にロジスティックハブの詳細な設計が明らかになれば、最適化の対象に位置以外の情報、例えばロジスティックハブの大きさなども含めることが必要となると考えられる。

---

## 謝辞

本研究を進めるにあたって、多くの方々に多大なるご助力を頂きました。ここに感謝の意を述べさせていただきます。

東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻 教授 大和裕幸先生には、研究室に所属した当時から今に至るまで、研究の進め方、勉強への取り組み方だけでなく、研究者としての心構え、ひいては人間としての在り方など、非常に多岐にわたるご指導を頂きました。私が幾度と無く不祥事を引き起こしたにも拘らず、また先生自身も非常にお忙しい中で、辛抱強く多くの的確なアドバイスをくださいました。心よりお礼を申し上げます。

東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻 准教授 稗方和夫先生には、ロジスティックハブという題材に対するリアルオプションの適用や経済性の評価の仕方などをはじめ、研究に対する的確なアドバイスを数多く頂きました。また、研究以外にも普段の生活の指導など、多くを学ばせて頂きました。深く感謝いたします。

東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻 助教 満行泰河先生には、研究全体に対するアドバイスやミーティングの設定、そしてプログラミングに至るまで、幅広く丁寧にご指導頂きました。また、研究だけでなく、課外活動においても多くを学ぶ機会を与えてくださいました。深くお礼申し上げます。

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻 白山晋先生には、研究室合同の大輪講を通じて多くの助言やご指導をいただき、研究に対する新しい視点を持たせていただきました。ありがとうございました。

大和研究室秘書の山本和子様、山田祐子様には、日頃の研究に必要な事務手続きをはじめ、研究室生活の多くの場面でお力をお貸し下さいました。特に、山本様から頂いたアドベントカレンダーは、修論執筆の際に大きな励みになりました。本当にありがとうございました。

技術専門職員の榎本昌一様には、ネットワーク・サーバー関連の管理をしていただきまし

---

---

た。また、以前水槽実験を行った際にもお忙しい中お手伝いいただき、非常にお世話になりました。ありがとうございました。

研究室の先輩である孫晶鈺様、岡田伊策様、中村覚様には、非常に多くのアドバイスやご助力を頂きました。発表資料へのレビューや輪講でのコメントなど、勉強させていただくことが非常に多くありました。ありがとうございました。

石黒慧氏、廣井貴彬氏、深田直人氏は、研究室の同期として刺激し合いつつ成長し、また多くの苦楽を乗り越えることができました。これからも、どのような環境にしようとも、お互いに支え合うことの出来る仲間であられることを願ってやみません。ありがとうございました。ここから。

齋藤智輝氏、松原洸也氏、水林義博氏、和中真之介氏には修士1年としてしっかりと研究室の運営を行っていただいただけでなく、研究への鋭い指摘など多くの刺激を頂き、研究室での生活をより有意義なものにさせていただきました。また、学部生として積極的な研究室への参加をしてきた磯沼大氏、小山恭平氏にも、大きく触発されました。ありがとうございました。

研究室OBであり、共同研究員でもある笈田佳彰様には、勉強会を通じて非常に多くのコメントや考え方などを学ばせていただきました。また、既に卒業された金載烈様、そして昨年度までご在籍されていた安藤早紀氏には、普段の輪講や研究室生活など、多くの面でお世話になりました。ありがとうございました。

最後になりましたが、これまでの人生で私を支え続け、最も長く、辛抱強く見守ってくださった家族に、心より感謝の意を述べさせていただきます。

---

## 参考文献

- [1] Internatioanl Energy Agency. (2014, June) WORLD ENERGY INVESTMENT OUTLOOK 2014 FACTSHEET OVERVIEW. [Online]. [http://www.iea.org/media/140603\\_WEOinvestment\\_Factsheets.pdf](http://www.iea.org/media/140603_WEOinvestment_Factsheets.pdf) Accessed on: Jan 15th 2015.
- [2] NYK Line, *NYK Fact Book 2014*, p. 22, 2014.
- [3] 三井物産戦略研究所マテリアル&ライフイノベーション室. (2013, Oct.) 深海底に存在する岩塩層下（プレソルト）大型油田の開発動向. [Online]. [http://mitsui.mgssi.com/issues/report/r1310m\\_kinjo.pdf](http://mitsui.mgssi.com/issues/report/r1310m_kinjo.pdf) Accessed on: Jan 15th 2015.
- [4] J-DeEP 技術研究組合. (2013, July) 海洋ロジスティックハブ構想の展望～技術課題について～. [Online]. [http://www.sof.or.jp/jp/news/301-350/310\\_2.php](http://www.sof.or.jp/jp/news/301-350/310_2.php) Accessed on: Jan 15th 2015.
- [5] Fubin Qian, Irina Gilbkovskaia, Gilbert Laporte, and Oyvind Halskau sr., "Passenger and pilot risk minimization in offshore helicopter transportation," *Omega*, vol. 40, no. 5, pp. 584-593, 2012.
- [6] J-DeEP 技術研究組合. J-DeEP 技術研究組合（略称：ジェイ・ディーブ）の概要. [Online]. <http://www.mlit.go.jp/common/000988029.pdf> Accessed on: Jan 15th 2015.
- [7] 中西 健史, "石油公団探鉱投融資プロジェクトにおける石油地質リスクの定量評価およびそれを反映させた経済性評価," *石油技術協会誌*, vol. 65, no. 3, pp. 217-228, 2000.
- [8] 安達 毅, 茂木 源人, 足達 哲男, "改良 SSA 法による多段階投資からなる資源開発プロジェクトのリアルオプション分析," *Journal of MMIJ*, vol. 124, no. 9, pp. 576-582, 2008.
- [9] Marco Antonio Guimaraes Dias, "Valuation of exploration and production assets: an overview of real options models," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 44, no. 1-2, pp. 93-114, 2004.

- 
- [10] Morten W Lund, "Valuing Flexibility in Offshore Petroleum Projects," *Annals of Operations Research*, vol. 99, no. 1-4, pp. 325-349, 2000.
- [11] 井上 正澄, 中東 秀樹, 足立原 路雄, 松本 和彦, 森山 哲太郎, "石油探鉱戦略の科学 : 熟成・競争時代を勝ち抜く技法," *石油技術協会誌*, vol. 73, no. 1, pp. 7-19, 2008.
- [12] Jijun Lin, Olivier de Weck, and David MacGowan, "Modeling epistemic subsurface reservoir uncertainty using a reverse Wiener jump-diffusion process," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 84, pp. 8-19, 2012.
- [13] 松倉 洋史, 角田 浩平, 大和 裕幸, "海上輸送システムにおける意思決定の確率論的評価 : フィードバック方式による動的イベントツリー生成手法の提案," *日本船舶海洋工学会論文集*, vol. 13, pp. 193-203, 2011.
- [14] Nathalia da Silva Sena Hermeto, Virgilio Jose Martins Ferreira Filho, and Laura Bahiense, "Logistics network planning for offshore air transport of oil rig crews," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 75, pp. 41-54, 2014.
- [15] Gerard Sierksma and Gert A. Tijssen, "Routing helicopters for crew exchanges on off-shore locations," *Annals of Operations Research*, vol. 76, pp. 261-286, 1998.
- [16] Qian Fubin, Gribkovskaia Irina, and Lapor Gilbert, "Passenger and pilot risk minimization in offshore helicopter transportation," *Omega*, vol. 40, no. 5, pp. 584-593, 2012.
- [17] Menezes Fernanda et al., "Optimizing helicopter transport of oil rig crews at Petrobras," *Interfaces*, vol. 40, no. 5, pp. 408-416, 2010.
- [18] Martin Romero, Leonid Sheremetov, and Angel Soriano, "A genetic algorithm for the pickup and delivery problem: an application to the helicopter offshore transportation," *Theoretical Advances and Applications of Fuzzy Logic and Soft Computing*, pp. 435-444, 2007.
- [19] Tam Bassy, Ehrgott Matthias, Ryan David, and Zakeri Golbon, "A comparison of stochastic programming and bi-objective optimisation approaches to robust airline crew scheduling," *OR Spectrum*, vol. 33, no. 1,
-

- 
- pp. 49-75, 2011.
- [20] Yan Shangyao and Tu Yu-Ping, "A network model for airline cabin crew scheduling," *European Journal of Operational Research*, vol. 140, no. 3, pp. 531-540, 2002.
- [21] 森 雅夫, 松井 知己, *オペレーションズ・リサーチ*, 6th ed.: 朝倉書店, pp. 8-10, 2004.
- [22] Jijun Lin, "Exploring Flexible Strategies in Engineering Systems Using Screening Models Applications to Offshore Petroleum Projects," Massachusetts Institute of Technology, Doctoral Thesis 2009.
- [23] Nelder A. John and Mead Roger, "A simplex method for function minimization," *The computer journal*, vol. 7, no. 4, pp. 308-313, 1965.
- [24] Jakub Konka. (2013, Oct.) Unconstrained nonlinear programming: Nelder-Mead Simplex algorithm. [Online].  
<http://www.jakubkonka.com/2013/10/22/nelder-mead-simplex.html> Accessed on: Jan 15th 2015.
- [25] SciPy developers. (2014) SciPy.org. [Online]. <http://www.scipy.org/> Accessed on: Jan 15th 2015.
- [26] Louis Bachelier, "Théorie de la Speculation," Gauthier-Villars, Paris, 1900.
- [27] Albert Einstein, "On the motion of small particles suspended in liquids at rest required by the molecular-kinetic theory of heat," *Annalen der Physik*, 1905.
- [28] Jean Perrin, *ATOMS*. London, England: Constable & Company Ltd., p. 115, 1916.
- [29] Margaret E Slade, "Trends in natural-resource commodity prices: an analysis of the time domain," *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 9, no. 2, pp. 122-137, 1982.
- [30] Eduardo S Schwartz, "The stochastic behavior of commodity prices: Implications for valuation and hedging," *The Journal of Finance*, vol. 52, no. 3, pp. 923-973, 1997.
-

- 
- [31] C. Helgese, A.N. Nystad S.W. Wallace, "Production Profiles for Oil Fields," Chr. Michelsen Institute, 852310-8, 1985.
- [32] Stein-Erik Fleten, Vidar Gunnerud, Dahl Øystein Hem, and Alexander Svendsen, "Real option valuation of offshore petroleum field tie-ins," *Journal of Real Options*, vol. 1, pp. 1-17, 2011.
- [33] Airbus Helicopters. (2014) Civil Helicopter - EC225 - Airbus Helicopters. [Online]. [https://www.airbushelicopters.com/site/en/ref/Overview\\_116.html](https://www.airbushelicopters.com/site/en/ref/Overview_116.html) Accessed on: Jan 15th 2015.
- [34] PreSalt.com - Pre-Salt Oil & Gas News. (2011, Aug.) SBM and Petrobras - Letter of intent of the FPSO to the pre-salt area of Guara Norte. [Online]. <http://www.presalt.com/en/brazil-pre-salt/2101-sbm-and-petrobras-letter-of-intent-of-the-fpso-to-the-pre-salt-area-of-guara-norte.html> Accessed on: Jan 15th 2015.
- [35] JOGMEC. (2010, Aug.) 海底油田の世界的現状. [Online]. [http://oilgas-info.jogmec.go.jp/pdf/3/3652/1008\\_out\\_offshore\\_oilfield\\_trend.pdf](http://oilgas-info.jogmec.go.jp/pdf/3/3652/1008_out_offshore_oilfield_trend.pdf) Accessed on: Jan 15th 2015.
- [36] U.S. Department of the Interior Minerals Management Service. (2009, May) Deepwater Gulf of Mexico 2009: Interim Report of 2008 Highlights. [Online]. <http://www.bsee.gov/Exploration-and-Production/Development-and-Production/Gulf/2009-016-pdf/> Accessed on: Jan 15th 2015.
- [37] PennWell Corporation. (1999, July) Angola awards deepwater PSAs. [Online]. <http://www.ogj.com/articles/print/volume-97/issue-23/in-this-issue/exploration/angola-awards-deepwater-psas.html> Accessed on: Jan 15th 2015.
- [38] Deloitte LLP. (2015, Jan.) North West Europe End of Year Oil & Gas Review 2014. [Online]. [http://www.psg.deloitte.com/ResourcesOilGasReportsNWEuropeEndYearReview2014\\_20150114.asp](http://www.psg.deloitte.com/ResourcesOilGasReportsNWEuropeEndYearReview2014_20150114.asp) Accessed on: Jan 15th 2015.
- [39] Stuart R Haszeldine, "Carbon capture and storage: how green can black
-

---

be?," *Science*, vol. 325, no. 5948, pp. 1647-1652, 2009.

- [40] Rystad Energy. (2014, June) GLOBAL LIQUIDS COST CURVE: SHALE IS PUSHING OUT OIL SANDS AND ARCTIC, OFFSHORE IS STILL IN THE RACE. [Online].

<http://www.rystadenergy.com/AboutUs/NewsCenter/PressReleases/global-liquids-cost-curve> Accessed on: Jan 15th 2015.