

東京大学大学院
新領域創成科学研究科
海洋技術環境学専攻

平成 25 年度

修士論文

浮体式 CO₂ 分離回収・液化・一時貯蔵・
荷役施設における陸 - 浮体間流体輸送
に関する技術構想研究

2014 年 3 月

47126683

村田直紀

指導教員 尾崎雅彦教授

目次

第1章	序論	8
1.1	はじめに	8
1.2	地球温暖化とは	8
1.3	CCS とは	9
1.3.1	CO ₂ の分離・回収	9
1.3.2	CO ₂ の輸送	10
1.3.2.1	パイプラインによる輸送	10
1.3.2.2	船舶による輸送	11
1.3.3	CO ₂ の貯留	12
1.3.4	日本における CCS の可能性	13
1.3.5	日本における CCS の課題	14
1.4	浮体式 CO ₂ 分離回収・液化・一時貯蔵・荷役施設	15
1.4.1	FCLO の特徴	15
1.4.2	FCLO の課題	16
1.5	研究目的と論文の構成	17
第2章	FCLO の条件設定	18
2.1	浮体サイズ	18
2.2	潮位	19
2.2	波浪	20
2.3	基準風速	21
2.4	風荷重の計算	21
2.5	係留装置の初期計画	24
2.5.1	係留方式	24
2.5.2	FCLO の係留計画	25
2.6	浮体の動揺計算	28
2.6.1	動揺計算手法	28
2.6.2	多方向不規則波中スペクトル解析法	29
2.6.3	動揺計算結果	30
2.7	まとめ	35
第3章	陸・浮体間の連絡手段	37
3.1	輸送手法の検討	37
3.1.1	ローディングアーム	37
3.1.2	パンタグラフ方式ローディングアーム	38
3.1.3	フレキシブルホース	38

3.1.4 考察	39
3.2 パイプの材料の決定	39
3.2.1 鋼管	40
3.2.2 フレキシブルパイプ	40
3.2.3 ダクタイル鋳鉄管	40
3.2.4 まとめ.....	41
3.3 パイプの選定	41
第4章 陸・浮体間の輸送手段の2次元有限要素法解析	44
4.1 検討手法	44
4.2 直線パイプ	45
4.2.1 結果	45
4.2.2 考察	46
4.3 検討の流れ.....	47
4.4 角度自由化.....	47
4.4.1 ジョイントの調査	48
4.4.2 角度自由化	49
4.5 アイデア検討	50
4.5.1 コサイン型以外のまとめ	51
4.5.2 コサイン型	51
4.5.3 まとめ.....	53
第5章 陸・浮体間の輸送手段の3次元有限要素法解析	54
5.1 手法.....	54
5.1.1 Hyperworks とは	54
5.1.2 検討手法	54
5.2 アイデア検討	57
5.2.1 コイル型	58
5.2.1.1 パラメータ：ピッチ	59
5.2.1.2 パラメータ：直径.....	61
5.2.1.3 パラメータ：長さ	62
5.2.1.4 コイル型まとめ	63
5.2.2 クランク型	64
5.2.2.1 パラメータ：Lの長さ	65
5.2.2.2 パラメータ：Rの大きさ	67
5.2.2.3 パラメータ：Dの長さ	69
5.2.2.4 まとめ	70
5.2.3 重力影響軽減策	72

5.2.3.1 支持材について	72
5.2.3.2 直線パイプ	73
5.2.3.3 クランク型への適用	76
5.3 他方向の検討	80
5.4 重力補助材の提案	81
5.5 まとめ	82
第 6 章 結言	83
6.1 結果のまとめ	83
6.2 今後の課題	86
謝辞	87
参考文献	89
付録	92

図表目次

Fig 1.1 IEA Energy Perspective 2010 の温暖化対策のシナリオの 1 つ ^[1.2]	9
Fig 1.2 パイプライン輸送のフロー図.....	10
Fig 1.3 概念図 ^[1.6]	11
Fig 1.4 CO ₂ の状態図 ^[1.7]	11
Fig 1.5 フロー図.....	12
Fig 1.6 背斜構造 ^[1.8]	14
Fig 1.7 層位トラップ ^[1.8]	14
Fig 1.8 FCLO のイメージ図.....	15
Fig 1.9 陸・浮体、浮体・船舶間のもののフロー.....	16
Fig 2.1 FCLO の基本形状.....	18
Fig 2.2 風の向きの定義.....	22
Fig 2.3 係留方法一覧 ^[2.4]	24
Fig 2.4 SUC3000H の寸法 ^[2.5]	25
Fig 2.5 SUC3000H の性能 ^[2.5]	25
Fig 2.6 SUC2500H-RO の寸法 ^[2.5]	26
Fig 2.7 SUC2500H-RO の性能 ^[2.5]	26
Fig 2.8 FCLO の係留計画案.....	27
Fig 2.9 浮体動揺の定義.....	28
Fig 2.10 FCLO の動揺の評価方法.....	29
Fig 2.11 角度の定義.....	30
Fig 2.12 満載時の Surge.....	31
Fig 2.13 満載時の Sway.....	31
Fig 2.14 満載時の Heave.....	31
Fig 2.15 満載時の Roll.....	32
Fig 2.16 満載時の Pitch.....	32
Fig 2.17 満載時の Yaw.....	32
Fig 2.18 軽荷時の Surge.....	33
Fig 2.19 軽荷時の Sway.....	33
Fig 2.20 軽荷時の Heave.....	33
Fig 2.21 軽荷時の Roll.....	34
Fig 2.22 軽荷時の Pitch.....	34
Fig 2.23 軽荷時の Yaw.....	34
Fig 2.24 x、y、z 軸の座標軸設定.....	36
Fig 3.1 ローディングアーム ^[3.1]	37

Fig 3.2 パンタグラフ方式 ^[3.2]	38
Fig 3.3 フレキシブルホース ^[3.2]	39
Fig 3.4 フレキシブルパイプの構造 ^[3.3]	40
Fig 3.5 鋼管種類	42
Fig 3.6 UOE 管製造工程 ^[3.4]	42
Fig 4.1 パイプの解析手法	44
Fig 4.2 直線パイプの自重あり、なしの比較	46
Fig 4.3 角度自由の y 軸方向の垂直応力	50
Fig 4.4 コサイン型モデル	51
Fig 4.5 パラメータ：振幅（高さ）の解析結果	52
Fig 4.6 パラメータ：波長の解析結果	52
Fig 5.1 3 次元の解析手法	54
Fig 5.2 Hyperworks の出力例（ミーゼス応力）	55
Fig 5.3 Hyperworks の出力例（変位）	55
Fig 5.4 コイル型モデル形状	57
Fig 5.5 クランク型モデル形状	57
Fig 5.6 コイルの圧縮	58
Fig 5.7 コイル型のパラメータ	58
Fig 5.8 コイル型のミーゼス応力	58
Fig 5.9 重力のみ作用している場合	59
Fig 5.10 自重・変位・内圧が作用している場合	59
Fig 5.11 重力のみ作用している場合	61
Fig 5.12 自重・変位・内圧が作用している場合	61
Fig 5.13 自重・変位・内圧が作用している場合	62
Fig 5.14 コイル型モデル	63
Fig 5.15 許容応力との比較	63
Fig 5.16 クランク型パラメータ	64
Fig 5.17 クランク型のミーゼス応力出力図	64
Fig 5.18 変位のみ作用する時のミーゼス応力	65
Fig 5.19 変位のみ作用する時のせん断応力	65
Fig 5.20 変位、自重、内圧が作用する時のミーゼス応力	66
Fig 5.21 変位のみ作用する時のミーゼス応力	67
Fig 5.22 変位のみ作用する時のせん断応力	67
Fig 5.23 変位、自重、内圧が作用する時のミーゼス応力	68
Fig 5.24 変位のみ作用する時のミーゼス応力	69
Fig 5.25 変位のみ作用する時のせん断応力	69

Fig 5.26 変位、自重、内圧が作用する時のミーゼス応力	70
Fig 5.27 有望なクランク型モデルの寸法.....	70
Fig 5.28 重力軽減案	72
Fig 5.29 支持材の構造.....	72
Fig 5.30 z 方向変位を示した図.....	73
Fig 5.31 吸収層のミーゼス応力	73
Fig 5.32 変位をかけた際のパイプと吸収材の z 軸方向の変位	74
Fig 5.33 直線パイプの変位.....	75
Fig 5.34 吸収材のミーゼス応力	75
Fig 5.35 L の長さに相当する支持材	76
Fig 5.36 上への強制変位を加えた場合	77
Fig 5.37 クランク型の変位の仕方.....	77
Fig 5.38 パイプ断面図.....	77
Fig 5.39 中心点のみを支える支持材	78
Fig 5.40 パイプと吸収層の接触	78
Fig 5.41 吸収層の接触部分.....	79
Fig 5.42 x 軸方向に変位させた際のクランク型のミーゼス応力	80
Fig 5.43 FCLO・陸間距離を変化させた際のクランク型のミーゼス応力	81
Fig 5.44 自重を下から力を加えることで点で支える重力軽減策	82
Fig 5.45 クランク型＋支持材で許容応力内に収まるモデル	82

Table 2.1 FCLO の基本寸法.....	19
Table 2.2 過去最高潮位	19
Table 2.3 高潮時を除いた最大潮位差の半分（片振幅）	20
Table 2.4 日本周辺の湾内の有義波高、有義波周期データ	21
Table 2.5 高さ補正後の風速	21
Table 2.6 風荷重計算の検討条件.....	22
Table 2.7 軽荷時、満載時の風荷重	23
Table 2.8 SUC3000H-RO の変位特性 ^[2.5]	26
Table 2.9 SUC2500H-RO の変位特性 ^[2.5]	27
Table 2.10 FCLO 係留時の固有周期	28
Table 2.11 $H_{1/3}=1.9\text{m}$ の時の各運動の満載時、軽荷時の最大値	35
Table 2.12 風、波浪、潮汐による変位.....	36
Table 3.1 輸送手段選定まとめ.....	39
Table 3.2 パイプ材料選定まとめ.....	41
Table 3.3 鋼管の最小降伏応力.....	43
Table 4.1 パイプの寸法／材料特性	44
Table 4.2 上下変位時にかかるパイプのせん断応力、縁応力	45
Table 4.3 縁応力とせん断応力の比較	46
Table 4.4 ジョイントの評価基準.....	48
Table 4.5 ジョイント検討結果.....	49
Table 4.6 フレキシベンダー寸法、性能.....	49
Table 4.7 角度自由と端部固定の比較.....	50
Table 5.1 鋼管の寸法	56
Table 5.2 重力、変位による応力の比較	63
Table 5.3 有望なねじれモデルの結果.....	71
Table 5.4 変位による作用、変位含めたすべての要素の作用の比較	71
Table 5.5 直線パイプにおける支持材の効果.....	74
Table 5.6 クランク型における支持材の効果.....	79
Table 5.7 z 方向以外の支持材の効果.....	80
Table 5.8 FCLO ・ 港間距離 36m の時の各軸方向の変位に対するミーゼス応力	81

第1章 序論

1.1 はじめに

2011年3月11日、日本を襲った東日本大震災は日本中に悲しみと衝撃を与えた出来事であった。地震による日本国内の被害は、地震そのものによる被害だけではなく、津波・火災・液状化現象・福島第一原子力発電所事故・大規模停電など多岐に渡った。さらに、二次被害の一つであった福島第一原子力発電所事故は今後の日本の地球温暖化対策に大きな影響を与える結果となった。日本にとって、原子力発電は今後の化石燃料を用いた火力発電に代わる主要エネルギー源として注目されていたが、別の方向へシフトせざるを得ない状況になっている。

原子力に依存しない温暖化対策の一つとして CCS (Carbon Dioxide Capture and Storage) が注目されている。本研究は、日本が CCS を温暖化対策の一つとして実施していく上で、実現可能性の向上に寄与する技術について検討するものである。

1.2 地球温暖化とは

現在、問題視されている地球温暖化とは、人間活動によって発生する温室効果ガスの増加を主な原因として起きる地球規模の気温の上昇のことである。気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の 2007 年度レポートにも「温暖化には疑う余地がない」と断定されており、その対策が早急に求められている。地球温暖化は、平均的な気温の上昇のみならず、異常高温(熱波)や大雨・干ばつの増加などのさまざまな気候変化をともなっている^[1,1]。現在の地球の気温は過去 1,300 年の歴史の中で最も高く、この気温上昇は今後も続くと予想され、海面上昇、豪雨の増加、生態系の変化、疫病の発生など深刻な影響が生じると考えられている。日本国内では気候の変化以外にも、米の収穫量の変化、ブナ林の減少、渇水・洪水のリスクの増大が予想されている。

現在、世界中で温暖化を食い止めるため多くの対策が実行に移されようとしており、気候変動枠組条約締約国会議においては 2005 年 2 月に発効された京都議定書の今後について激しい議論が繰り返されている。Fig.1.1 は International Energy Agency (IEA) の Energy Technology Perspectives 2010 に記載されている温暖化対策のシナリオの一つであり、2050 年に世界の CO₂ 排出量を半減する時に期待される対策の貢献度を示すものである。今後の温暖化対策のキーとなってくるのはエネルギー面では、石炭から天然ガスへの移行、再生可能エネルギー・原子力発電といった CO₂ フリーのエネルギーの推進、エネルギー効率の向上に加え、CCS も重要な役割を占めることが分かる。

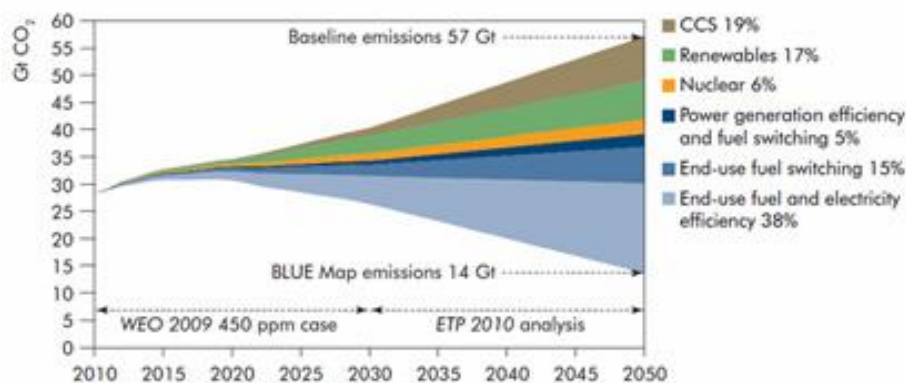


Fig 1.1 IEA Energy Perspective 2010 の温暖化対策のシナリオの 1 つ^[1.2]

1.3 CCS とは

二酸化炭素回収・貯留（CCS）は、大規模発生源の排ガス中の CO₂ を分離・回収し、それを地中もしくは海洋に長期間にわたり貯留・隔離することにより、大気中への CO₂ 放出を抑制し、地球温暖化を抑制する技術である^[1.3]。CCS は、火力発電所や油田・ガス田、製鉄所、化学プラントといった大規模集中排出源から発生する CO₂ をまとめて封じ込める有効な手段といわれている^[1.4]。

CCS は CO₂ の分離・回収、輸送、圧入、貯留の 4 つのプロセスで構成されている。

1.3.1 CO₂ の分離・回収

火力発電所における CO₂ の分離・回収には主に燃焼後回収と燃焼前回収がある。燃焼後回収は既設火力発電システムからの排ガス中の CO₂ を下流のプロセスで分離回収するもので、現在多くの発電所で適用の計画がある。この手法で回収の対象とされる排ガス内の CO₂ の濃度は低く、石炭火力発電所で約 15%、石油火力発電所で約 12%、天然ガス発電所で約 10%である。一方燃焼前回収は、化石燃料をガス化し、ガス中の CO₂ を除去した後、可燃成分ガスを燃焼させて発電などに利用する仕組みとなっている^[1.5]。この手法は前者より高濃度の CO₂ を分離するので、回収効率は高くなるのが特徴である。

CO₂ の分離・回収は、CCS の全工程の中で最もエネルギーコストのかかるプロセスであり、そのコストは回収前の濃度、回収プロセスの種類によってある程度の幅はあるが、2,400～4,000 円/t-CO₂ の範囲にあるといわれている^[1.5]。

1.3.2 CO₂ の輸送

CO₂ の輸送は主にパイプライン方式と船舶輸送方式という 2 つの手段がある。陸上ではパイプライン、海では海底パイプラインまたは船舶で輸送される。以下に各輸送手段に関する詳細を述べる。

1.3.2.1 パイプラインによる輸送

Fig.1.2 と Fig.1.3 に CO₂ パイプライン輸送方式のフロー図と概念図を示す。CO₂ はまず火力発電所などの大規模発生源から発生する排ガスより分離・回収され、輸送効率を高めるために大気圧の状態から昇圧される。一般に気相でパイプラインを通じて輸送されるが、輸送中の温度を高く維持できる場合には超臨界状態、低く維持できる場合には液相で輸送される。

Fig.1.4 は二酸化炭素の状態図である。長距離輸送の場合には、途中数か所のポンプサイトにおいて昇圧されながら、圧入サイトまで輸送されていく。

パイプライン輸送のコストは輸送距離に比例して上昇すると考えられているが、流量や設置場所によって異なる。海外では 100km あたり 500～1,000[¥/t-CO₂]とされている^[1.5]。日本の場合は海外とは違い、公道の地下などが設置場所の主体となるため、工事制約が大きい上に、工事時間が長くなってしまうことから、費用は海外の数倍以上になると推定されている^[1.5]。

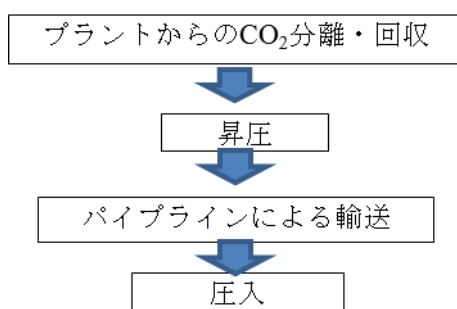


Fig 1.2 パイプライン輸送のフロー図

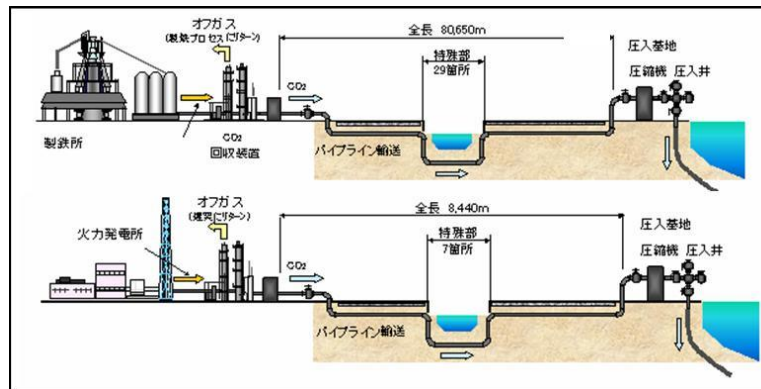


Fig 1.3 概念図^[1.6]

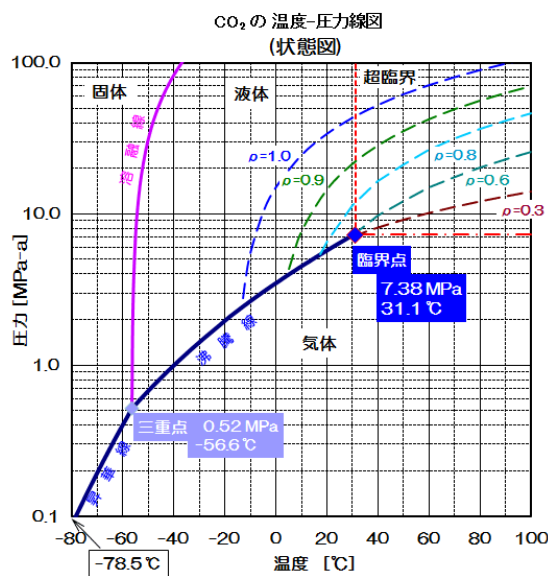


Fig 1.4 CO₂ の状態図^[1.7]

1.3.2.2 船舶による輸送

Fig.1.5 に CO₂ 船舶輸送方式によるフロー図を示す。CO₂ は火力発電所などの大規模発生源から発生する排ガスより分離・回収、不純物除去、昇圧された後、パイプライン方式と違い、船舶輸送方式では液化される。液化後は、一時 CO₂ 専用タンクに貯蔵され、そこよりローディングアームやホースによって CO₂ 輸送船に移され、サイトに輸送される。

現在存在する液化 CO₂ 輸送船は CO₂ の温度・圧力が -20°C、2.0MPa 前後で有効積載量が 1,000～1,500t と小型である。大型の船での輸送はこの圧力条件では難しいと言われ、液化 CO₂ を三重点付近で輸送するシステムが各種提案されている。CO₂ の三重点は、(温度、圧力) = (-56.6°C、0.518MPa) であり、三重点付近を想定した輸送船は 10,000～

100,000ton のサイズでの試設計例が公表されている。

経済的観点からはパイプライン輸送方式が比較的近距離輸送に適しているのに対し、船舶輸送方式は長距離輸送に適していると考えられている。CCS を実施する場合は貯留サイトの候補地を近距離で探すことを前提として、パイプライン輸送方式を選択することが多いが、近年、船舶輸送方式のメリットが見直されている。

CO₂ 船舶輸送方式の特徴はプロジェクトの融通性が高いこと、社会的受容がされやすいことである。パイプラインはほとんどの場合が回収サイトと貯留サイトが 1 対 1 対応であるのに対し、船舶輸送の場合は回収サイトと貯留サイトが 1 対 1 対応でなくても可能であるのに加え、回収・貯留サイトが変わった際に適応しやすいという利点がある。また、船舶輸送の場合計画途中でのルート変更にも対応できる。さらに、日本のような漁業国の場合、パイプライン建設は一般に地域の理解を得ることに困難さを伴うと言われている。

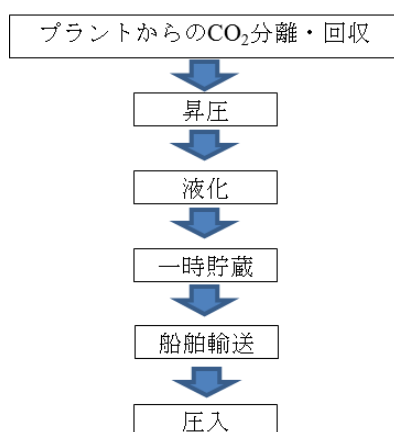


Fig 1.5 フロー図

1.3.3 CO₂ の貯留

CO₂ の貯留方法は大きく地中貯留と海洋隔離に分類される。地中貯留は、シール性の高い地層の下に CO₂ を封入して、大気から隔離する貯留方法である。地層としては、石油層、天然ガス層、石炭層、塩水層、帯水層などが対象となる。地層の選定にあたっては、

1. ある程度の貯留可能量と CO₂ 注入性を有すること
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

の 3 つの条件が挙げられる。^[1.5]

現在日本で最も有望とされているのが帯水層貯留である。帯水層貯留とは、地下

1,000m 以深の砂や礫によって形成される地下水で飽和状態になっている隙間の多い地層（帯水層）に超臨界状態の CO₂ を貯留するものである。帯水層貯留はノルウェーのスライプナーガス田においてすでに商業ベースで実現されており、貯留可能量が大きいと期待されている。財団法人地球環境産業技術研究機構（RITE）によると、日本国内のみで約 1,450 億 ton の CO₂ を貯留できるとされており、この量は日本が約 110 年かけて排出する CO₂ 量に相当する^[1.8]。

海洋隔離は、分離・回収された CO₂ を海洋に溶かししたり、深海底に貯留したりすることで隔離するものである^[1.8]。海洋隔離のうち溶解希釈は、水深 1,500m から 2,500m の海中に広く CO₂ 分散放出し、生物影響を極力抑えるように希釈・溶解させる方法である。深海底貯留隔離は、水深 3,000m 以深の海底に CO₂ を送り込み、深海の低温・高圧という環境下で生成されるシャーベット状の膜（CO₂ ハイドレート）により、周囲への拡散を抑えつつ CO₂ を貯留する方法である。

1.3.4 日本における CCS の可能性

日本近海における帯水層への CO₂ 貯留は背斜構造への貯留（Fig.1.6）と層位トラップなどを有する地質構造への貯留（Fig.1.7）の二つのカテゴリーに分類されている。RITE の計算結果によると日本近海での貯留可能量は背斜構造への貯留は合計 301 億 t-CO₂、層位トラップなどを有する地質構造への貯留は合計 1,160 億 t-CO₂ とされている^[1.8]。ちなみに、アメリカは合計で 3 兆 6,000 億～12 兆 9,000 億 ton の CO₂ が貯留可能とされ、年間排出量は 58 億 1,400 万 ton である。

日本では、スケールは小さいが、すでに CCS 実証プロジェクトが実施されている。新潟県長岡市において 2003 年から 2005 年の期間、RITE を中心に実施された CO₂ 圧入実証試験では、地下 1,100m の枯渇ガス層に CO₂ を圧入し、CO₂ の地中挙動のモニタリングを通じた挙動の理解を目的とし、実施された。試験期間 18 か月の間に CO₂ は累計 10,405ton 圧入され、現在も CO₂ の挙動を観測するモニタリングは継続中である。また、2012 年より苫小牧における実証プロジェクトも開始され、現在、CO₂ 圧入孔が掘削されているところである。苫小牧では、年間 10 万 ton の CO₂ を貯留し、CO₂ の貯留層内の挙動、自然現象による漏洩、地震による影響がないかをモニタリングする予定である。

RITE の CCS の有効性評価では、日本近海で CCS をした場合のコストが掲載されている。日本の現状技術による地中貯留では、新設石炭火力発電所から帯水層への貯留を想定し、分離・回収から圧入までのトータルコストが 7,000～15,000[¥/t-CO₂]の範囲であると考えられている^[1.9]。コストの内訳は、分離・回収で 4,200[¥/t-CO₂]、輸送で 800[¥/t-CO₂]、圧入で 2,300[¥/t-CO₂]であり、設定条件は回収・隔離量は年間 100 万 ton、輸送距離 20km、昇圧 10MPa、坑井一本当たり圧入量年間 10 万 ton である^[1.9]。現状では、全コストの約 6 割が分離・回収のステップにかかっており、経済産業省は 2015 年

までに CO₂ の分離・回収コストを 2000 円台に、2020 年までに 1000 円台に削減するという目標を掲げている。

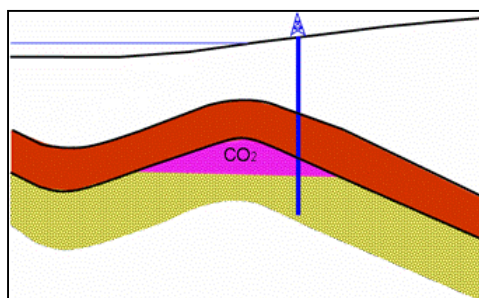


Fig 1.6 背斜構造^[1.8]

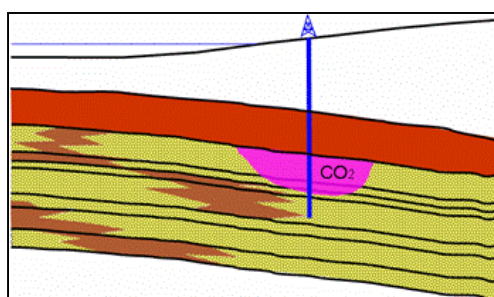


Fig 1.7 層位トラップ^[1.8]

1.3.5 日本における CCS の課題

日本国内での CCS の実現には課題がなお多く存在すると考えられる。主なものとしては、

- ① CO₂ 大規模発生源付近の陸上や沿岸地域に地中貯留を行うサイトの適地が少ない。
- ② 地震が多いため貯留サイトの選定には特に綿密な調査が必要
- ③ パイプライン敷設や地層評価など、石油開発産業に関する業務の経験が乏しい。
- ④ インフラや経験者が不足しており、パイプラインや圧入井の建設コストが高い
- ⑤ 発電所への分離回収プラント付設用の土地の確保が困難

日本に十分な CO₂ 貯留ポテンシャルを活かして、CCS を実現させるためには、上記のような課題の解決が重要である。そこで、尾崎研究室では船舶輸送方式を用いた沖合 CCS を提案している^[1.10]。船舶輸送方式にすることで CO₂ 発生源近くにおける貯留サイトの適地の欠如、パイプライン敷設に伴う問題やコストといった課題を解決することができる。日本で CCS を実現する上で船舶輸送方式は有効な手段であるとの認知が進みつつあり、平成 26 年度からは環境省が従来より広い海域での適地調査と船舶輸送方式による CCS の技術開発の事業を開始することになっている。

一方、船舶輸送方式を用いることでパイプライン輸送方式には必要のない液化施設、一時貯蔵タンクなどが必要になる。分離回収プラントに加えて液化施設・一時貯蔵タンクも必要になると土地の確保の問題はさらに増大する。そこで、日本で船舶輸送方式を用いた CCS を実現するために CO₂ の分離回収・液化・一時貯蔵・荷役施設を搭載した浮体式プラントが有望になる。

1.4 浮体式 CO₂ 分離回収・液化・一時貯蔵・荷役施設

資源輸入国である日本は発電所や製鉄所などの大規模 CO₂ 発生源のほとんどが港湾付近に立地しており、発電所自体に匹敵するほどの面積の土地が必要なプラントを隣接した陸地に建設するのは難しいと考えられる。

本研究では、この浮体式 CO₂ 分離回収・液化・一時貯蔵・荷役施設 (Floating CO₂ Capture, Liquefaction, Storage and Offloading Plant、以下 FCLO と称する) について取り扱う。本研究で考える FCLO のイメージ図を以下に示す。

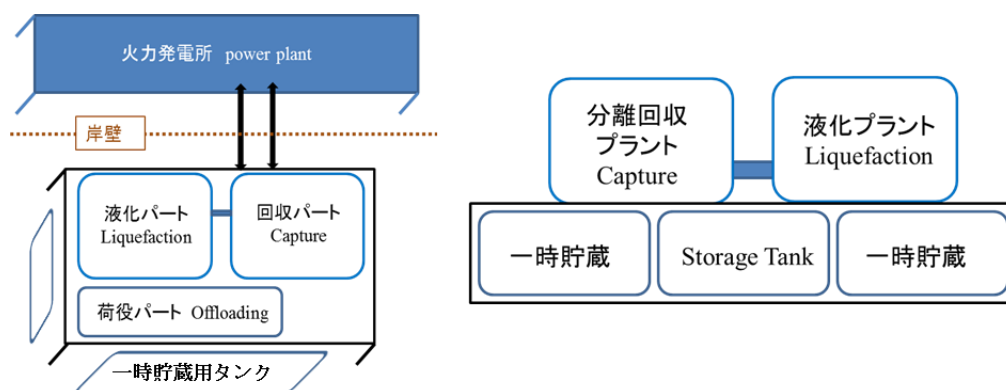


Fig 1.8 FCLO のイメージ図

1.4.1 FCLO の特徴

FCLO は船舶輸送方式を想定し、火力発電所から排出されるガスから CO₂ を分離回収するプラント、回収された CO₂ を液化するプラント、液化 CO₂ を船舶が到着するまで一時貯蔵する一時貯蔵用 CO₂ 液化タンク、液化 CO₂ を船舶に積み込む荷役施設から構成されている。ここでは単純に箱型浮体の上に分離回収プラントと液化プラントを搭載し、箱型浮体内に一時貯蔵用タンクを内蔵すると考えている。FCLO には主に3つのメリットがある。

- ① 火力発電所付近での CO₂ の回収・液化・貯蔵用スペースの確保
- ② プラント・貯蔵・荷役間の短距離化による効率向上
- ③ 曳航移設による再利用の可能性

1.4.2 FCLO の課題

FCLO 建造に必要な要素技術を以下に示す。

- ・ CO₂ の分離回収・液化・一時貯蔵・荷役技術
- ・ 大型浮体の製造技術
- ・ 大型浮体の係留技術
- ・ 陸・浮体間の流体輸送技術

CO₂ の分離回収や液化に関する要素技術は既に確立しつつある。浮体と輸送船の間の液化ガスの荷役については LNG や LPG の実績・経験を活かすことができるであろう。また、大型浮体の製造や係留に関しても洋上石油備蓄基地などで実績がある。しかし、FCLO における陸 - 浮体間の流体輸送については参考にできる前例があまりなく、今後検討すべき課題である。

Fig 1.9 に陸 - FCLO 間、FCLO - 船舶間で輸送される代表的なもののフローを示す。FCLO では、排気ガスからの CO₂ の分離・回収、CO₂ の液化、輸送前の一時貯蔵、荷役作業を行うことを想定しているため、陸から FCLO に向けて、排気ガス以外にも様々な物を輸送する必要がある。例えば、CO₂ の分離・回収には電力・加熱用蒸気、液化には電気・冷却水、一時貯蔵・荷役には電力が必要であり、一方 FCLO から陸は、CO₂ 分離後のガス（窒素、酸素、水）や温排水を送り返すことが要求される。このうち電力用のケーブルは比較的変形しやすく大きな課題にはならないと考えられる。他に車や人の移動は、栈橋を港・浮体間にかけることで解決できる。FCLO を技術的に成立させるには大量の排ガス、蒸気、水といった流体を固定された陸と移動しうる浮体間で輸送する手段の検討が必要である。

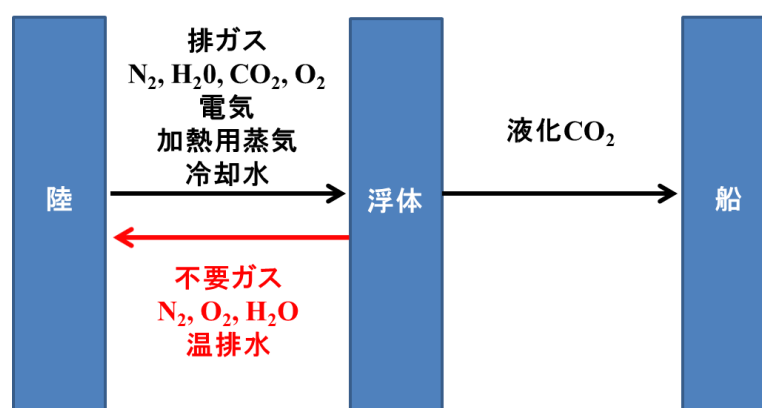


Fig 1.9 陸・浮体、浮体・船舶間のもののフロー

1.5 研究目的と論文の構成

以上より本研究では、陸 - 浮体間の流体輸送手段の技術的成立性を検討することで、日本における船舶輸送方式を用いた CCS システムの構築に貢献することを目的とする。

以下、次の構成で研究内容について述べる。

第 2 章では、浮体の規模、風・波・潮位などの条件を設定し、係留の初期計画を行う。その結果に基づき、陸に対する FCLO の水平・鉛直方向の変位の程度を把握する。

第 3 章では、陸 - FCLO 間の流体輸送に使用可能な輸送手段の調査・検討を行う。

第 4・5 章では、陸 - FCLO 間の輸送手段として鋼管を使用する場合、浮体の変位に対する強度の解析を行いながら、鋼管ルート等の工夫を試していく。

第 6 章で結論と今後の課題について述べる。

第2章 FCLO の条件設定

FCLO は、比較的静穏な港湾内に建設することを想定している。FCLO の水平方向の変位は係留によりある程度抑えることができるが、潮汐などによる鉛直方向の変位は頻繁なバラスト調整以外では抑えることができないと考えられる。本章ではまず浮体の規模、風・波・潮位などの条件を設定し、係留の初期計画を行うことで、浮体の変位の程度を検討する。

2.1 浮体サイズ

本研究で検討する FCLO であるが、公表された FCLO に関する先行研究は過去にほとんど見当たらないため、某所で検討中で未公開の FCLO の基本計画案を参考にさせていただいて、大まかに設定した。元々対象としている CO₂ の排出源は石炭ガス化複合発電所（IGCC）であるため、陸と浮体間でやりとりする流体の種類や量が本研究の想定とは異なるが、規模の参考になる。なお、IGCC とは石炭を一度ガス化し、ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせて発電するコンバインドサイクル発電の一種である。IGCC ガス化した石炭を燃焼ガスとし、ガスタービンを回し、その際排出される高温排ガスから蒸気を抽出し、蒸気タービンを回すことで発電効率を上げている。IGCC を使用することで従来の石炭火力発電より 20% 効率が上がるとされている。

Fig 2.1、Table 2.1 に FCLO の形状と寸法を示す。

なお、FCLO の軽荷時、満載時のバラスト水の調整は基本的に行わない。ただし、異常な高潮などで鉛直方向上向きに大きな変位が生じると予想される場合には、満載時の喫水になるようバラスト調整するものとする。

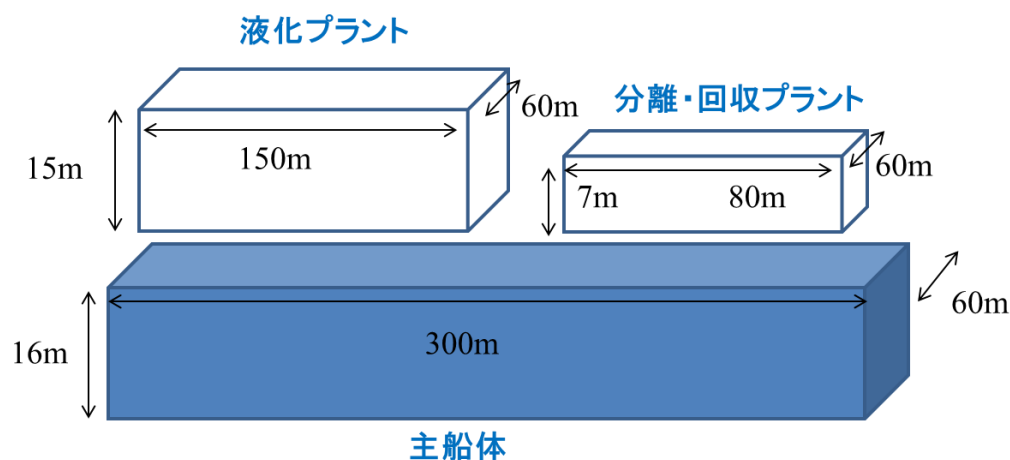


Fig 2.1 FCLO の基本形状

Table 2.1 FCLO の基本寸法

浮体寸法			単位 [m]
	主船体	分離・回収プラント	液化プラント
全長	300	80	150
幅	60	60	60
高さ	16	7	15
軽荷喫水	10		
満載喫水	11		

2.2 潮位

FCLO のような大型浮体は潮汐などによる上下変位を係留などで拘束することができないと考えられる。本節では、日本の既存の石炭火力発電所・天然ガス火力発電所付近の潮位を調査し、FCLO の上下方向の変位検討に供する。

Table 2.2 に、気象庁 HP^[2.1]に掲載されている過去 50 年の最高潮位を示す。これらはいずれも台風などによる高潮発生時のものである。中でも、1959 年に多大な被害をもたらした伊勢湾台風による名古屋の 389cm は突出して大きな値になっている。本研究では名古屋のそれを除いて最大潮位を 2.3m として検討を進める。

Table 2.2 過去最高潮位

観測地点名	潮位 [標高] (cm)
小樽	85
深浦	102
小名浜	117
銚子漁港	145
赤羽根	185
富山	97
能登	118
舞鶴	93
浜田	112
対馬比田勝	99
苓北	225
那覇	174
鮎川	119
佐渡	69
東京	203
小田原	90
神戸	230
佐伯	123
名古屋	389

次に、バラスト調整を行わないときの潮位変化を評価するために 2006 年～2011 年の月ごとの最高潮位、最低潮位のデータ（除く高潮時）を気象庁 HP^[2.1]より調査した。各地点における各月の最大潮位差の半分を片振幅とみなし Table 2.3 に示す。その結果、突出して大きな値になっている佐伯などを除いて、高潮を除いての最大潮位変動量を本研究では 1.5m として検討することにした。

Table 2.3 高潮時を除いた最大潮位差の半分（片振幅）

観測地点名	通常時の 潮位差の 片振幅 [cm]
小樽	42
深浦	41
小名浜	90
銚子漁港	94
赤羽根	114
富山	39
能登	66
舞鶴	41
浜田	50
対馬比田勝	71
苓北	168
那覇	126
鮎川	98
佐渡	45
東京	129
小田原	91
神戸	99
佐伯	248
名古屋	150

2.2 波浪

FCLOはCO₂の大規模発生源である発電所や製鉄所が多く立地する陸地に近い湾内に設置することを想定する。東北近辺を代表して青森港、太平洋に面する地域を代表して清水港・伊勢湾、日本海に面する地域を代表して柴山港、九州地域を代表して熊本港・鹿児島港の波周期、波高データを全国港湾海洋波浪情報網（ナウファス）^[2.2]を参照して調べた。Table 2.4 に各地点の最大有義波高、最大有義波周期を示す。

本研究では、FCLO の設置位置が火力発電所の港内にあって、うねりの影響が十分に抑えられることを想定して、有義波周期は 12 秒までの範囲で検討する。有義波高に関しては台風など高潮が警戒される場合に 1.9m、それ以外では 1.0m として検討する。

Table 2.4 日本周辺の湾内の有義波高、有義波周期データ

地名	max波高	max周期	代表地域
青森	1.33	6.9	東北
清水	1.02	7.3	太平洋
伊勢湾	1.78	10.7	太平洋
柴山 港内	1.83	16	日本海
熊本	0.99	12.5	九州地域
鹿児島	1.1	5.7	九州地域

2.3 基準風速

基準風速とは、建築基準法施行令第 87 条第 2 項関連に記されているように、日本の各地域における過去の台風の記録に基づき風害の程度その他の風の性状に応じて 30～46 [m/s] の範囲内において国土交通大臣が定める風速のことを言う^[2.2]。この基準風速は各地域ごとに平均的な地形の地上の高さ 10m における 50 年に 1 度の確率で発生する年最大風速である^[2.3]。

本研究では、日本の大半の地域が 32～36 [m/s] に基準風速を設定していることから、その最大値である 36 [m/s] を基準風速とする。

2.4 風荷重の計算

FCLO の風荷重を計算する。風荷重を計算する際は基準風速の高さ補正が必要となる。高さ補正の式を (2.1) に示す。

$$V = V_0 \left(\frac{z}{z_0} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2.1)$$

なお、 V_0 : 基準風速 z_0 : 基準高さ V : 高さ補正後の風速 z : 高さ n : 地表状態によるべき指数である。基準風速高さ補正は主船体、分離・回収施設、液化施設それぞれに対して実施するものとする。Table 2.5 に軽荷時と満載時の各施設の投影面中心の高さを示す。

Table 2.5 高さ補正後の風速

風速高さ補正

軽荷	m	m/s		満載	m	m/s
	z	V			z	V
主船体	3	31		主船体	2.5	30
液化P	13.5	37		液化P	12.5	37
分・回P	9.5	36		分・回P	8.5	35

FCLO にかかる風荷重は (2.2) 式で計算する。風荷重を計算する際の検討条件を Table 2.6 に示す。また、Fig 2.2 のように側面を 0°方向とし、正面を 90°として扱う。

$$P = \frac{1}{2} \rho C_d V^2 A_n \quad (2.2)$$

なお、 A_n : 面積 [m²]、 ρ : 空気密度 [kg/m³]、 C_d : 抵抗係数、 V : 高さ補正後の風速 [m/s] である。

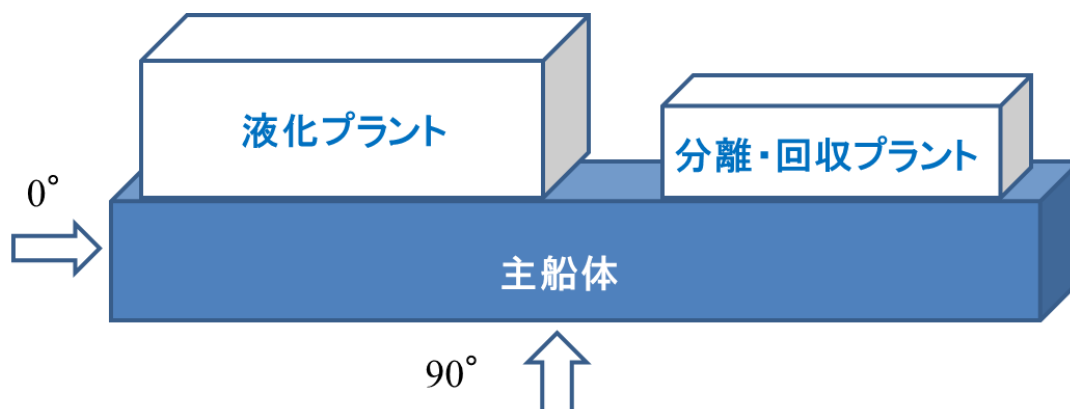


Fig 2.2 風の向きの定義

Table 2.6 風荷重計算の検討条件

基準風速	m/s	36
抵抗係数		1.8
気温	°C	20
空気密度	kg/m ³	1.204

Table 2.7 軽荷時、満載時の風荷重

軽荷のとき	90 degree				
	m	m	m2	m/s	kN
	L	h	面積	風速	風荷重
主船体	300	6	1800	31	1871
分離プラント	80	7	560	37	848
液化プラント	150	15	2250	36	3120
total					5838.0215

満載の時	90 degree				
	m	m	m2	m/s	kN
	L	h	面積	風速	風荷重
主船体	300	5	1500	30	1490
分離プラント	80	7	560	37	832
液化プラント	150	15	2250	35	3034
total					5355.0554

軽荷のとき	側面 0 degree				
	m	m	m2	m/s	kN
	B	h	面積	風速	風荷重
主船体	60	6	360	31	374
分離プラント	60	7	420	37	636
液化プラント	60	15	900	36	1248
total					1621.9665

満載の時	側面 0 degree				
	m	m	m2	m/s	kN
	B	h	面積	風速	風荷重
主船体	60	5	300	30	298
分離プラント	60	7	420	37	624
液化プラント	60	15	900	35	1214
total					1511.4946

Table 2.7 に風荷重の結果を示す。風向きが 0°の場合に、風荷重を計算する際、高さの大きい液化プラントに分離・回収プラントにかかる風が遮蔽されるとし、主船体と液化プラントにかかる風荷重のみを考慮する。Table 2.7 より係留計画をする際考慮する風荷重を、0°方向の場合 1622kN、90°方向の場合 5838kN とする。

2.5 係留装置の初期計画

2.5.1 係留方式

Fig 2.3 に示すように係留にはスラック係留、トート係留、緊張係留、ドルフィン係留などが考えられている。

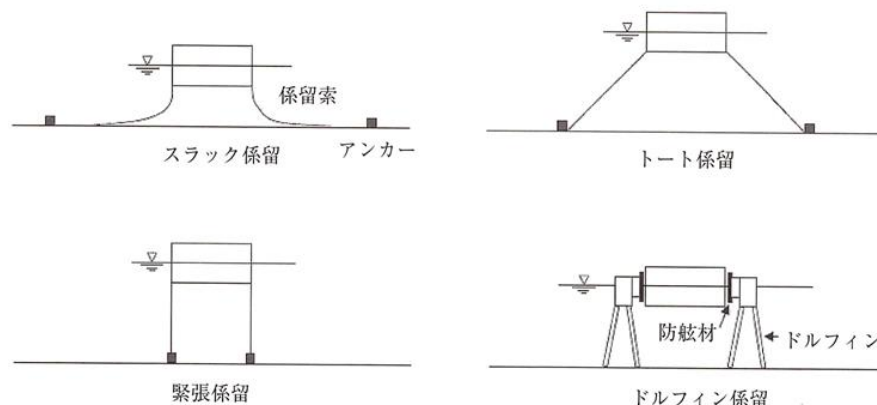


Fig 2.3 係留方法一覧^[2.4]

① スラック係留

索のカテナリー一部分の自重が復原力となり係留索に作用するのが特徴で、索には重いチェーンが用いられる。弱点は拘束力が少なく、浮体が比較的自由なので、風による移動量が大きいことである。

② トート係留

初期張力を調整して、常に緊張状態にある係留ラインの伸縮によって復原力を得る係留方法である。軽量でかつ伸びやすい合成繊維ロープを使用され、伸縮によって浮体の変位を吸収するために大水深での係留に適している。港内のような浅水域には不向きであり、さらにアンカーに鉛直方向の力が作用するため、特殊なアンカーが必要となる。また、係留による海底占有面積が広く、港内設置が難しい。

③ 緊張係留

TLP (Tension Leg Platform) が代表例であり、浮体重量に比べ、排水量を大きくし、係留索に初期張力を与えることで水平方向の復原力を得る係留方法である^[2.4]。しかし、この係留方法は浮力の変化が係留索の張力の変動と直結するので、今回のような水線面積の広い浮体を潮位変動の大きな水域に設置するのには不向きである。

④ ドルフィン係留

杭式または重力式のドルフィン（係船杭）によって係留し、防舷材（フェンダー）の圧縮性を利用した係留方法である。浮体の水平方向の運動を抑えることができ、潮位による鉛直方向の運動の影響を受けないのが特徴である。

本研究では、FCLO の設置場所が水深が 20m 以下の港内であることから洋上石油備蓄基地にも使用実績のあるドルフィン係留を採用する。

2.5.2 FCLO の係留計画

本研究では、ドルフィン用フェンダーとして定反力型防舷材を使用することを考える。まず、風荷重による静的なフェンダーの圧縮量（変位量 [%]）がフェンダー高さの 10% 以内に収まるようにサイズと個数を計画する必要がある。

風向き 0°と 90°の時の風荷重がそれぞれ 1622kN、5838kN であるので、側面には SUC2500H-RO を 1 個ずつ、正面には SUC3000H-RO を押す側、引く側にそれぞれ 2 個ずつ設置するものとした。

フェンダー配置の鳥瞰図を Fig 2.8 に示す。SUC2500H-RO、SUC3000H-RO の外形寸法・性能を Fig 2.4~2.7、Table 2.8、Table 2.9 に示す。

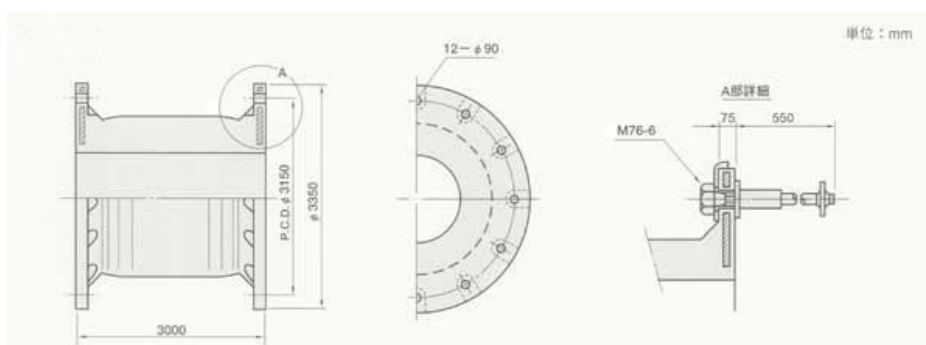


Fig 2.4 SUC3000H の寸法^[2.5]

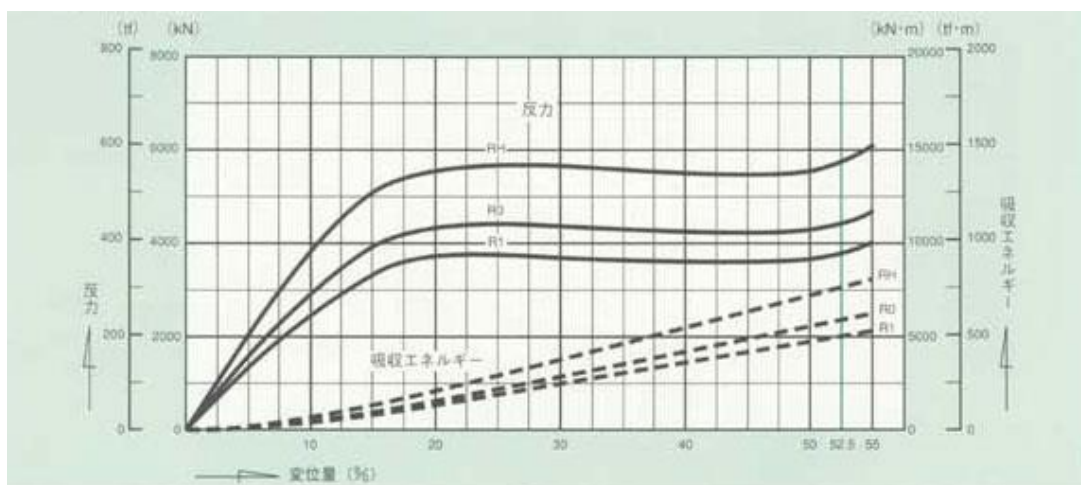


Fig 2.5 SUC3000H の性能^[2.5]

Table 2.8 SUC3000H-RO の変位特性^[2.5]

SUC3000H-RO		
変位量	52.50%	1.58m
反力	4370kN	
変位量	55%	1.65m
反力	4640kN	
係留計画変位量	10%	0.3m
反力	3000kN	

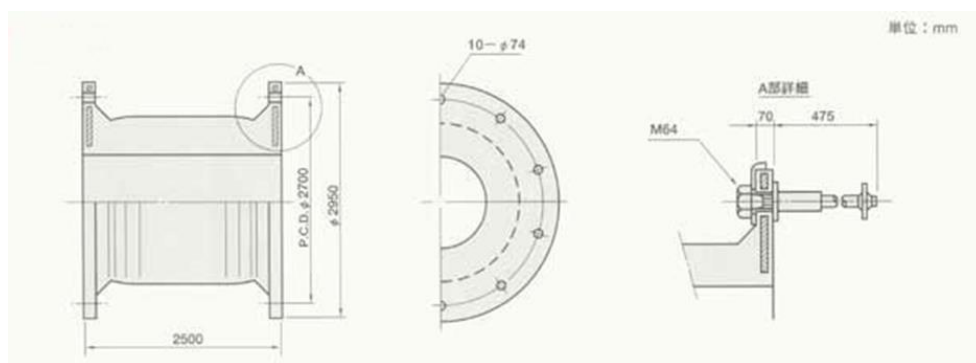


Fig 2.6 SUC2500H-RO の寸法^[2.5]

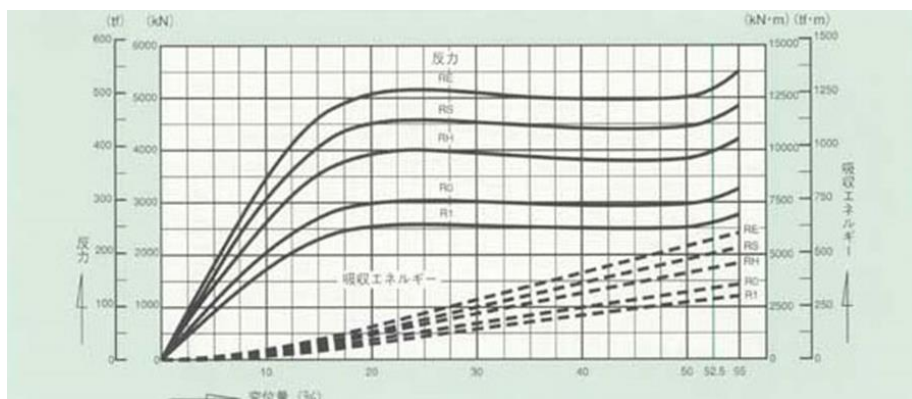


Fig 2.7 SUC2500H-RO の性能^[2.5]

Table 2.9 SUC2500H-RO の変位特性^[2.5]

変位量	52.50%	1.31m
反力	3030kN	
変位量	55%	1.37m
反力	3220kN	
係留計画変位量	10%	0.3m
反力	2000kN	

このような係留方法による surge、sway、yaw 運動の固有周期の計算式を (2.3) 式～ (2.5) 式に示す。

$$T_{surge} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_{surge}}} \quad (2.3)$$

$$T_{sway} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_{sway}}} \quad (2.4)$$

$$T_{yaw} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{2l^2 k_{yaw}}} \quad (2.5)$$

なお、 m : 浮体のみかけ質量 [kg] k : フェンダーのバネ係数 [N/m]

T : 固有周期 [sec] I : 浮体のみかけ慣性モーメント [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$] l : フェンダー間の距離 [m] である。

ここで、付加質量を FCLO の質量の 1 割とし、慣動半径を浮体長さの 0.3 倍とし、フェンダー間の距離 l を 180m とすると、固有周期は Table 2.10 のようになる。

鳥瞰図

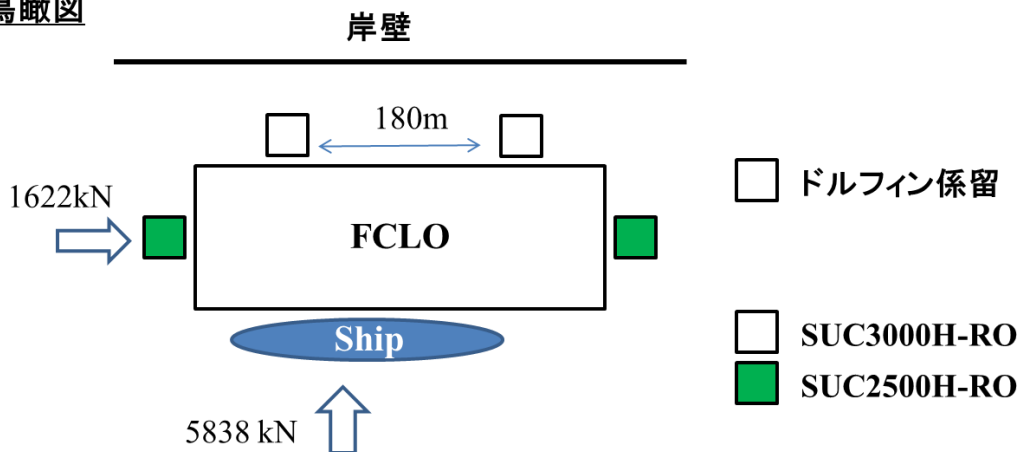


Fig 2.8 FCLO の係留計画案

Table 2.10 FCLO 係留時の固有周期

m	満載	2.23E+08			T
[kg]	軽荷	2.03E+08			sec
k	SUC3000H-RO	1.00E+07		surge	満載
[N/m]	SUC2500H-RO	8.00E+06			軽荷
ρ	海水密度	1.03E+03		sway	満載
kg/m ³					軽荷
				yaw	満載
				(l=90m)	軽荷

2.6 浮体の動揺計算

FCLO は波浪中において剛体運動として Fig 2.9 に示すような 6 自由度の動揺をする。本研究では、FCLO の波浪中の動揺計算を行い、浮体の水平方向、鉛直方向の変位量評価を行う。

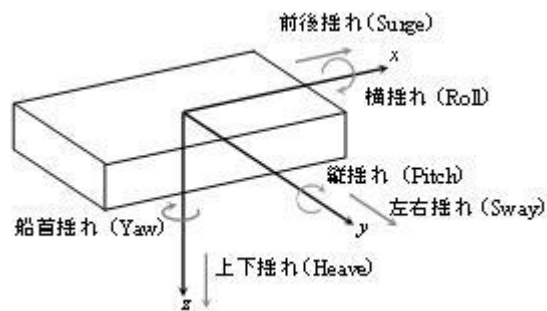


Fig 2.9 浮体動揺の定義

2.6.1 動揺計算手法

FCLO の動揺特性分析の手法を Fig 2.10 に示す。FCLO の運動応答は、まず既存の 3 次元境界要素法 BEM (Boundary Element Method) プログラム^[2.6]を用いて、波入射角ごとの応答関数 RAO (Response Amplitude Operator) を求め、多方向不規則波中の動揺量を短期予測手法にて評価する。

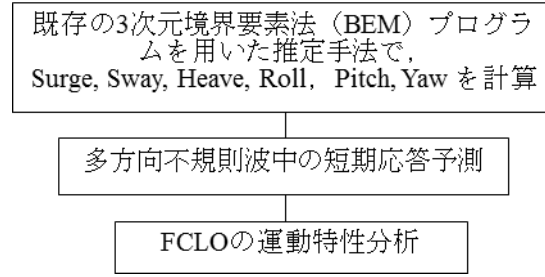


Fig 2.10 FCLO の動揺の評価方法

2.6.2 多方向不規則波中スペクトル解析法

不規則波の波スペクトルは、次式のブレットシュナイダー光易型スペクトルを用いる。

$$S_{\eta}(\omega) = 0.257 H_{1/3}^2 \left(\frac{T_{1/3}}{2\pi} \right)^{-4} (\omega)^{-5} \exp[-1.03(T_{1/3} \frac{\omega}{2\pi})^{-4}] \quad (2.6)$$

なお、 ω ：波周波数、 $H_{1/3}$ ：有義波高、 $T_{1/3}$ ：有義波周期である。

RAO_x を浮体の x 方向運動モードの RAO とし、浮体の x 方向運動モードの応答スペクトルを次のように求める。

$$S_x(\omega) = |RAO_x|^2 \cdot S_{\eta}(\omega) \quad (2.7)$$

なお、 $x=1\sim6$ 、($x=1$: surge、 $x=2$:sway、 $x=3$:heave、 $x=4$:roll、 $x=5$:pitch、 $x=6$:yaw) である。

次に考慮する周波数範囲を $\omega = \omega_1 \sim \omega_2$ と定義し、応答の総エネルギーを以下の(2.8)式で求める。(2.8)式の結果を使用し、運動モード両振幅の有義値を(2.9)式で計算する。

$$m_o = \int_{\omega_1}^{\omega_2} S_x(\omega) d\omega \quad (2.8)$$

$$x_{1/3} = 4.004 \sqrt{m_o} \quad (2.9)$$

また、多方向からの入射波を考慮するために、各方向の応答の総エネルギーを次の方向分布関数に従って重み付けして求めた。なお、 θ は波主方向 χ からのなす角度である。(Fig 2.11)

$$f(\theta) = \frac{2}{\pi} \cos^2 \theta \quad (2.10)$$

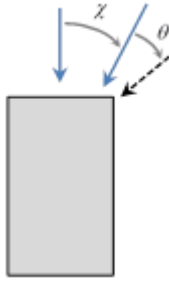


Fig 2.11 角度の定義

2.6.3 動揺計算結果

有義波高 1.9m、有義波周期 12 秒までで FCLO の運動解析を実施した。軽荷時、満載時の surge、sway、heave、roll、pitch、yaw を Fig 2.12 ~ 2.23 に示す。

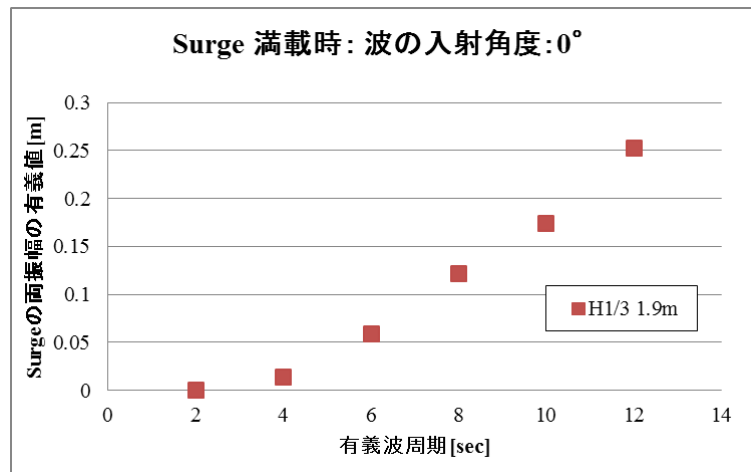


Fig 2.12 満載時の Surge

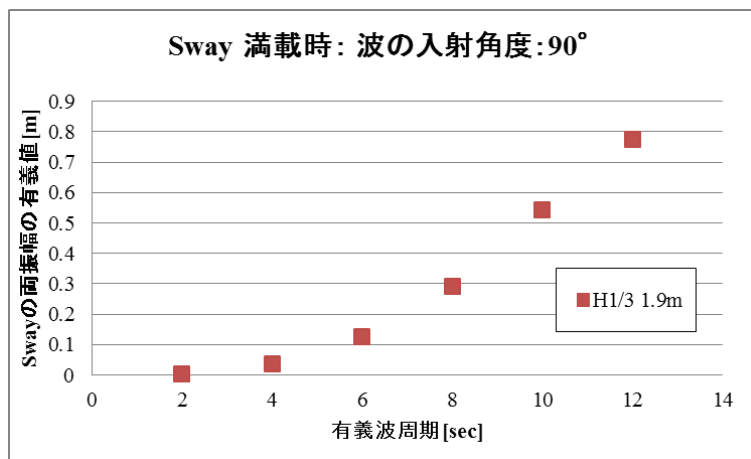


Fig 2.13 満載時の Sway

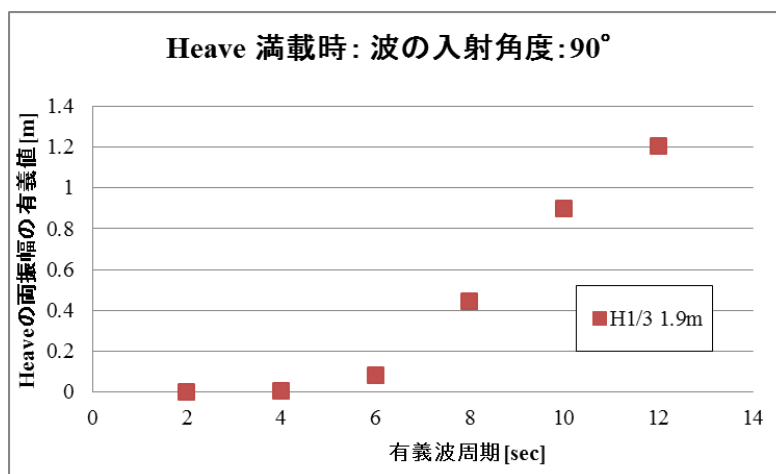


Fig 2.14 満載時の Heave

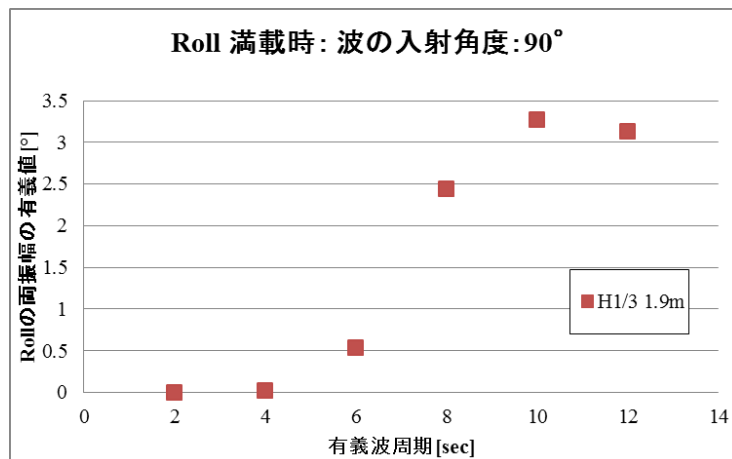


Fig 2.15 満載時の Roll

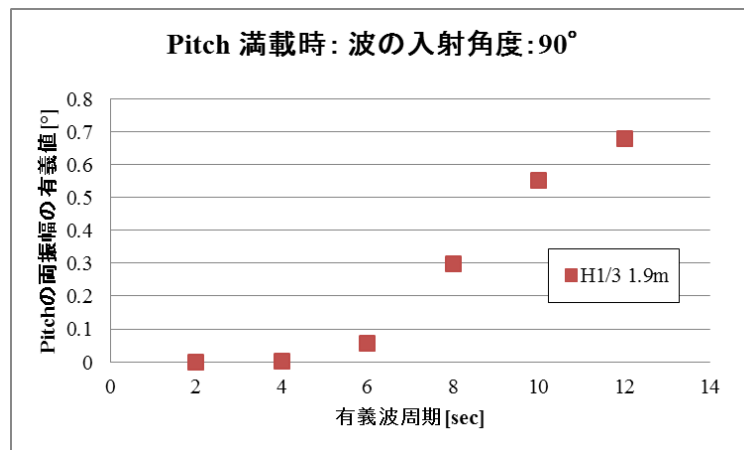


Fig 2.16 満載時の Pitch

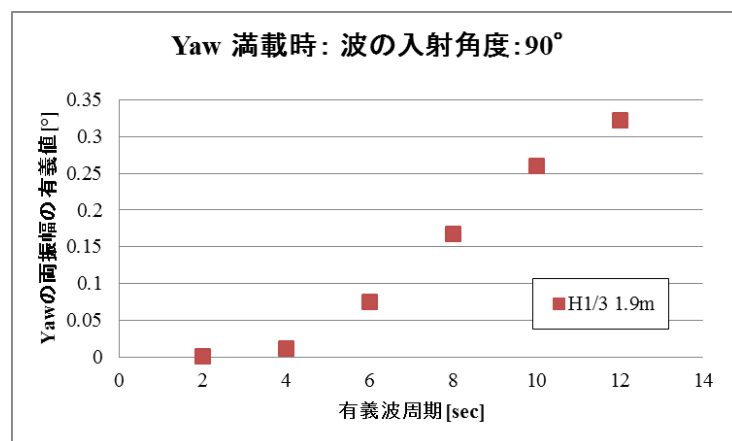


Fig 2.17 満載時の Yaw

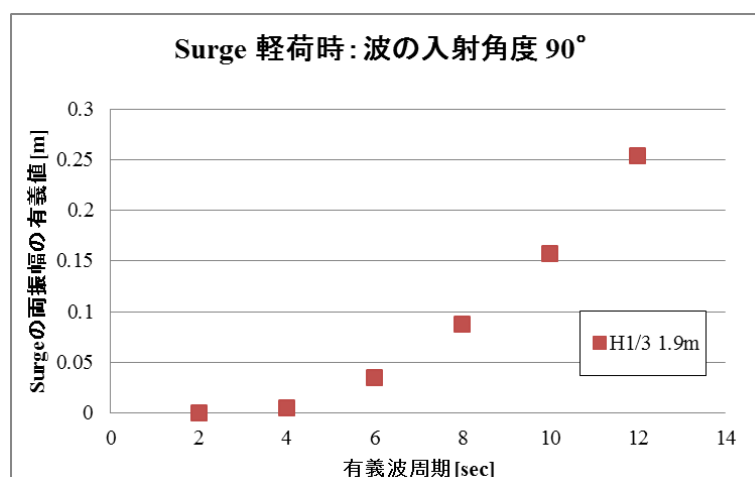


Fig 2.18 軽荷時の Surge

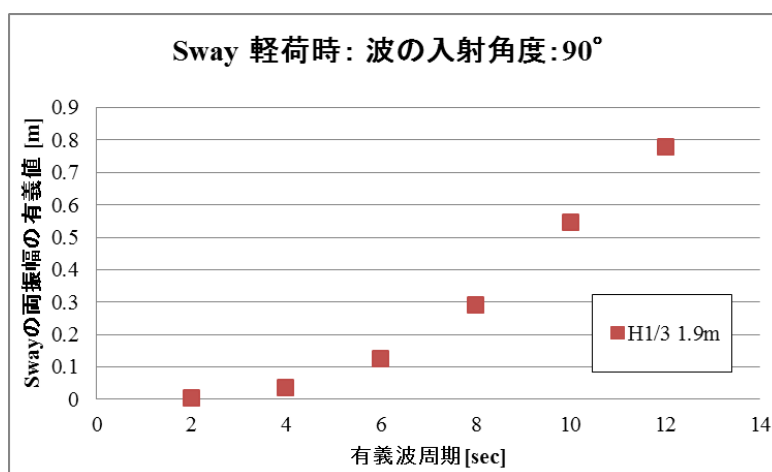


Fig 2.19 軽荷時の Sway

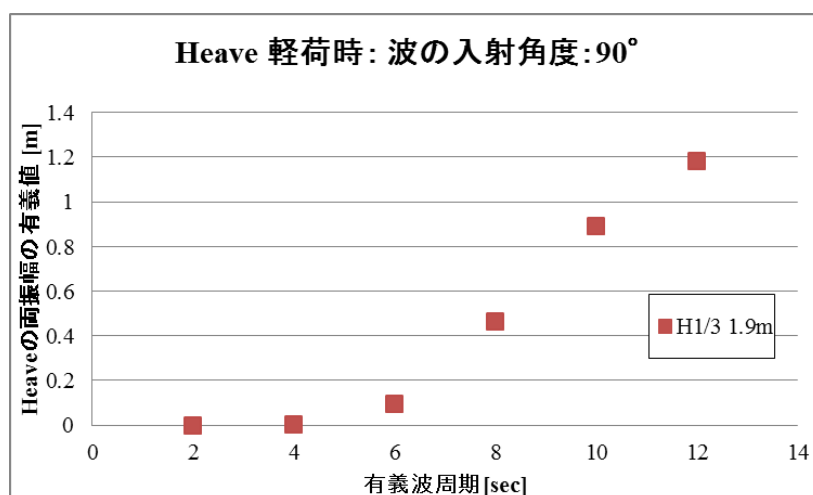


Fig 2.20 軽荷時の Heave

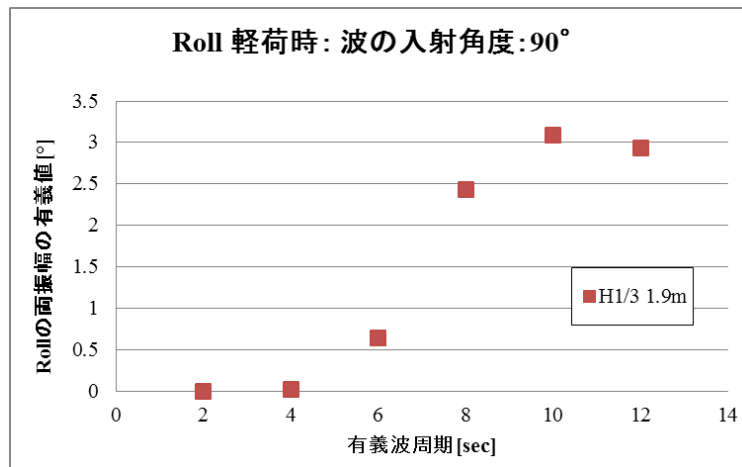


Fig 2.21 軽荷時の Roll

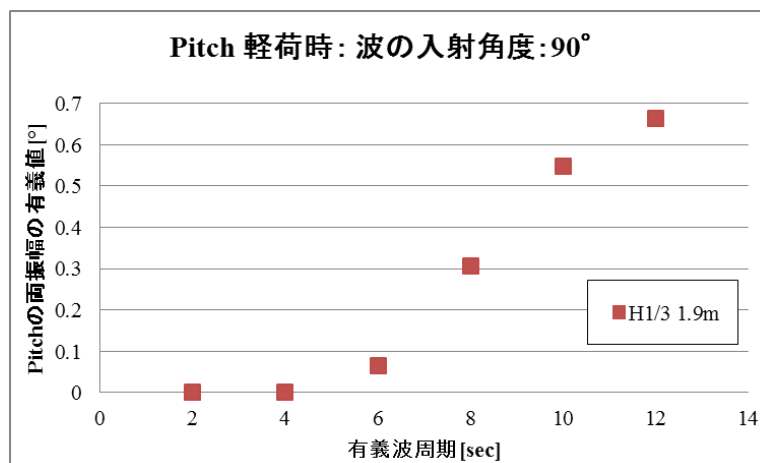


Fig 2.22 軽荷時の Pitch

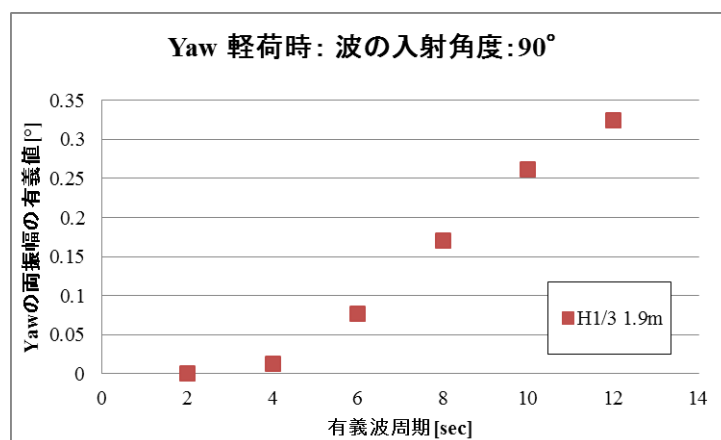


Fig 2.23 軽荷時の Yaw

各運動応答の最大値(片振幅の有義値の 2 倍を最大値とみなす)を Table 2.11 に示す。

Table 2.11 $H_{1/3}=1.9\text{m}$ の時の各運動の満載時、軽荷時の最大値

	満載	軽荷
[m]		
surge	0.25	0.25
sway	0.77	0.77
heave	1.2	1.18
[°]		
roll	3.27	3.08
pitch	0.67	0.66
yaw	0.32	0.32

2.7 まとめ

有義波高 1.9m、有義波周期 12 秒、最大潮位上昇 2.3m の異常気象条件下と有義波高 1.0m、有義波周期 12 秒、最大潮位上昇 1.5m、浮体の喫水差 1.0m の通常時条件下で風、波浪、潮汐、喫水差によって生じる x、y、z 方向の変位は Table 2.12 のようになる。また、x、y、z 軸の座標軸を Fig 2.23 に示す。なお、z 軸方向の変位に関しては浮体の喫水変化を考慮するかどうかで異常時と通常時に分けて議論する。

浮体は潮位の影響を受け z 軸方向に変位する。潮位による z 軸方向の変位は高潮などの異常時における潮位は最大 2.3m、高潮を除いた通常時の最大潮位変動量を 1.5m とした。

浮体は風の影響を受け、x 方向と y 方向に変位する。基準風速 36 [m/s] に対し、x 方向は最大 1662kN の風荷重を受け、最大 0.2m 変位する。y 方向は最大 5838kN の風荷重を受け、最大 0.3m 変位する。

浮体は有義波高 1.9m、有義波周期 12 秒という台風や高潮などの異常時を想定した時の港内条件下で、surge 方向に最大 0.25m、sway 方向に 0.77m、heave 方向に 1.2m 動揺することが分かった。また、平常時を想定した有義波高 1.0m、有義波周期 12 秒の条件下では、heave 方向に 0.6m 動揺することが分かった。

風・波・潮汐・FCLO の喫水差による変位を合計して、x、y、z 軸の最大変位とした。その結果、x 軸方向に 0.45m、y 軸方向に 1.2m、z 軸方向に 3.5m 変位する。なお、z 軸方向の変位に関しては異常時の変位が平常時より厳しいことから異常時の変位を取り扱うものである。

以上より、x、y、z 軸方向の中で特に z 軸方向の変位が大きいことが分かる。中でも最大潮位上昇の 2.3m の影響が大きく、潮位差による変位は係留によっても抑えること

ができない。そこで、次章では、特に厳しい鉛直方向の変位に耐久可能な陸・FCLO 間の輸送手段の検討を次章以降行う。

Table 2.12 風、波浪、潮汐による変位

平常時					
	風	潮汐	波浪	喫水差	total
x方向	0.2	0	0.13	0	0.33
	風	潮汐	波浪	喫水差	
y方向	0.3	0	0.41	0	0.71
	風	潮汐	波浪	喫水差	
z方向	0	1.5	0.6	1	3.1
異常時					
	風	潮汐	波浪	喫水差	total
x方向	0.2	0	0.25	0	0.45
	風	潮汐	波浪	喫水差	
y方向	0.3	0	0.77	0	1.1
	風	潮汐	波浪	喫水差	
z方向	0	2.3	1.2	0	3.5
単位:m					



Fig 2.24 x、y、z 軸の座標軸設定

第3章 陸・浮体間の連絡手段

本章では、陸・FCLO間の流体輸送手段についての調査・検討結果を述べる。

3.1 輸送手法の検討

港における船舶への荷役技術あるいは洋上の浮体間での荷役技術は既に発達している。実例としては、液化天然ガスの船舶から陸への荷役、洋上の石油荷役などが挙げられる。その際、使用されているのはローディングアーム、パンタグラフ方式ローディングアーム、フレキシブルホース、フローティングホースなどである。以下にローディングアーム、パンタグラフ方式ローディングアーム、フレキシブルホースについて概要を示す。

3.1.1 ローディングアーム

ローディングアーム (Fig 3.1) とは、タンカーから LNG 等を荷揚げするための船舶や陸上に取付ける設備である。低温から高温まで輸送可能で、接続が容易な安全かつ迅速に流体を輸送することのできる荷役方式である。ローディングアームは通常受け取り側、送り出し側が平行に位置する side by side 方式で用いられ、同時に何本か使用する形で設置されている。ローディングアームの欠点はアームの変位に制限があるため、動揺に対する追随性が悪く、使用は比較的海気象が穏やかな海域に限られてしまう。さらに、受入側、送り出し側の距離が近いことからガス爆発などの事故が起きた際は被害が甚大となる恐れがある。そして、最大の難点はコストが高額であるため、何本も並べて使用すると、初期コストで莫大な金額になってしまう。LNG の荷役方法として実績を有するローディングアームは最大内圧が 2MPa で最大口径が 508mm のものまで開発されている。



Fig 3.1 ローディングアーム^[3.1]

3.1.2 パンタグラフ方式ローディングアーム

パンタグラフ方式ローディングアーム（Fig 3.2）は沖合など波浪条件の厳しい場所でも作業可能な荷役方式として開発されたものである。ローディングアーム同様接続が容易であり、緊急時の離脱性が高いのが特徴である。パンタグラフ方式ローディングアームは陸上での実績があり、海象の荒い沖合でも使用できるように工夫されているため、今後 FLNG（浮体式天然ガスプラント）や FPSO での利用が見込まれている。欠点は荷役システムが他の荷役方式に比べ、大規模になってしまうことと通常のローディングアーム同様コストが高額になってしまうことである。



Fig 3.2 パンタグラフ方式^[3,2]

3.1.3 フレキシブルホース

フレキシブルホース（フローティングホース）（Fig 3.3）はローディングアーム、パンタグラフ方式のもつ欠点の解決策として、提案された荷役方式である。ホースが可撓性を持つため、受入、送り出し側が相互に与える作用が弱くなるため、両者の相對運動を考慮する必要がなくなる。つまり、厳しい海象条件下でも作業ができるということである。フレキシブルホースは低温、高圧にも耐久性を持ち、口径も 8~16 インチのものが開発されている。また、フレキシブルホースはローディングアームの side by side 方式とは異なり、縦に送り出し側と受け取り側が並ぶタンデム方式が採用でき、衝突やガス漏洩に対する危険性が下がるというメリットもある。



Fig 3.3 フレキシブルホース^[3,2]

3.1.4 考察

上記で陸→浮体、浮体→浮体への荷役方式の代表例を紹介した。本研究では、高温、低温、高圧の流体を大量に送ることが可能な荷役方式が必要とされている。ローディングアーム、パンタグラフ方式ローディングアームでは、基数が多くなった場合に初期コストのみでとても高価なものになってしまう。フレキシブルホースは厳しい海象条件下で使用でき、ホース自体が柔軟な作りになっていることから有望であると言えるが、口径が小さいことから本数が多くなってしまいうというデメリットがある。

そこで、本研究では、高圧ガス、低温流体の輸送方法として最も一般的かつ安価と考えられる鋼製パイプでの利用の可能性を追求してみることとした。

Table 3.1 輸送手段選定まとめ

	口径	高圧	高温	強度	離脱性	柔軟性	コスト
ローディングアーム	×	○	○	○	○	×	×
パンタグラフ方式	×	○	○	○	○	△	×
フレキシブルホース	×	○	△	○	○	○	△
パイプ	○	○	○	○	×	×	○

3.2 パイプの材料の決定

本研究で対象とするパイプは大口径、高温・高圧への耐久性、強度の大きいものである必要がある。様々な材料のパイプについて検討を行い、FCLO・港間の輸送手段として適していると考えられるものを検討する。そこで、本節では、鋼管、フレキシブルパイプ、ダクタイル鋳鉄管について概説する。

3.2.1 鋼管

鋼管とは鋼を材料として製造されたパイプである。鋼管は配管用、構造用、熱交換用など様々なシチュエーションで使用されている。以下のような特徴がある。

- ・強度が大きく、耐久性がある
- ・強靱性に富み、衝撃に強い
- ・極低温環境下で使用可能
- ・高温強度や耐食性に優れる
- ・材料組成によっては腐食しやすい

3.2.2 フレキシブルパイプ

フレキシブルパイプ (Fig 3.4) とは海底油田開発における新技術の一つとして開発され、現在使用されているパイプである。このパイプはプラスチックパイプ、金属などの補強材との複合パイプとなっており、可撓性に優れているのが特徴である。性能としては高温、35MPa の高圧下、水深 300～500m まで使用可能であり、内径 20 インチまで製造可能である。ゴム材料がベースであるため、パイプ内に高速度の流体を送って長期間の仕様、ガス漏れに対する対策が今後の課題として挙げられている。

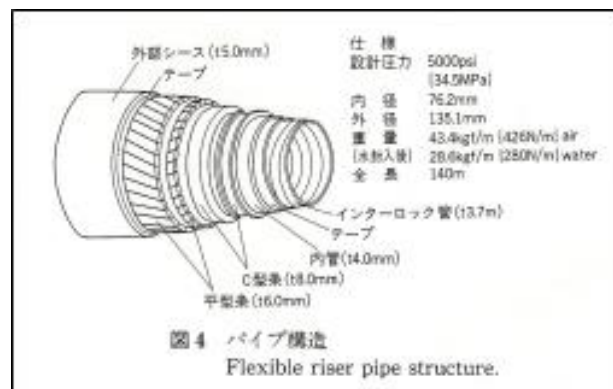


Fig 3.4 フレキシブルパイプの構造^[3.3]

3.2.3 ダクタイル鋳鉄管

ダクタイル鋳鉄管とは鋳鉄を材料として作られたパイプである。ダクタイル鋳鉄管は従来の鋳鉄管より弾性を持っており、衝撃に強いのが特徴である。このパイプは強度が大きく、靱性に優れることから自動車部品、水道管に使用される。

3.2.4 まとめ

本研究が輸送手段のパイプとして必要としている性能は高温、高圧への耐久性、高強度、大口径である。これらに対して、各パイプの性能をまとめたのが Table 3.2 である。上記で紹介した三つの種類以外に塩化ビニル管、ポリエチレン管、銅管についても検討した。口径に関しては 1m 以上、温度は 100℃以上、圧力は内圧が 1MPa 以上のものを有望とし、○と判断した。その結果、口径、温度、圧力、強度の面から鋼管が FCLO の輸送手段として適していると考えられる。フレキシブルパイプは口径、温度性能面から除外する結果となった。ダクタイル鋳鉄管は微振動に弱いこと、用途が配管ではなく、水道管など埋設管に多いことから、除外した。銅管は口径、温度、圧力、強度で条件を満たしたのに加え、石油・天然ガスの輸送に使用されている実績もあることから、有望と判断した。そこで、本研究では、港・FCLO 間のものの輸送手段として鋼管を使用する。

Table 3.2 パイプ材料選定まとめ

	口径	温度	高圧	強度	重量	耐食性	耐熱性	コスト	配管経験
鋼管	○	○	○	○	×	×	○	○	○
ダクタイル鋳鉄管	○	△	○	○	×	△	△	△	×
硬質塩化ビニル管	△	×	△	×	○	○	×	○	△
ポリエチレン管	△	×	△	×	○	○	△	○	○
銅管	△	△	△	×	○	△	△	×	△
フレキシブルパイプ	×	△	○	○	×	△	△	×	○

3.3 パイプの選定

Fig 3.5 のように鋼管にも様々な種類があり、製造方法によって分類されている。本研究は流体の輸送を想定していることからラインパイプに使用される UOE 鋼管を使用する。ラインパイプとは石油・天然ガス・水などを輸送するパイプの総称である。UOE 鋼管とは Fig 3.6 のような手法で製造される鋼管のことを言う。主な用途は配管用、建築構造物、ラインパイプとして使用されている。UOE 管は大口径、厚肉、長尺鋼管が製造可能であり、高性能、高グレード、高品質のものがすでに実在しており、強度に関しても最大 X120 まで開発されている。UOE 管は本研究が必要としている口径、温度・圧力条件、強度全てを満たしていると言える。強度のグレードについてまとめた表が Table 3.3 である。X の後の数字は最小の降伏応力（単位は psi）である。

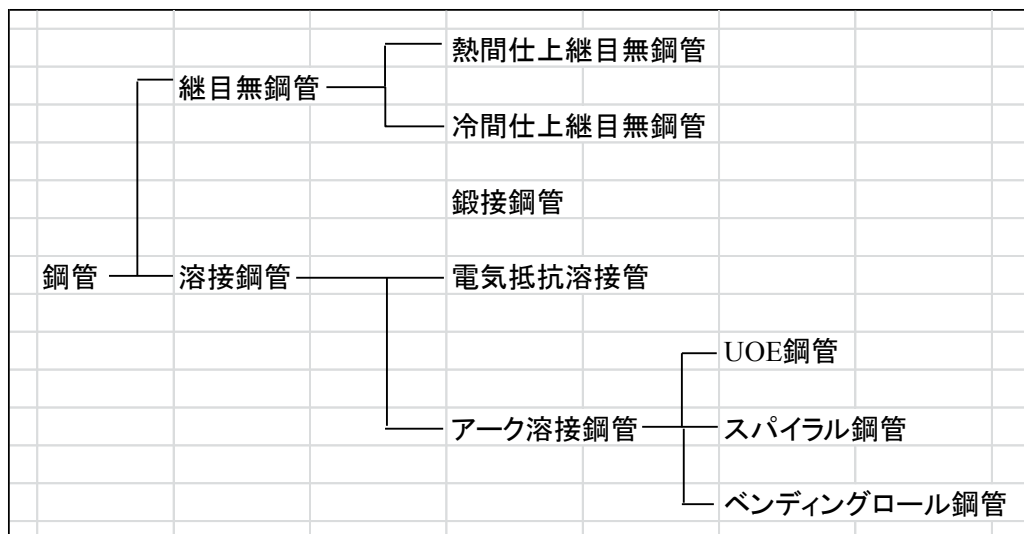


Fig 3.5 鋼管種類

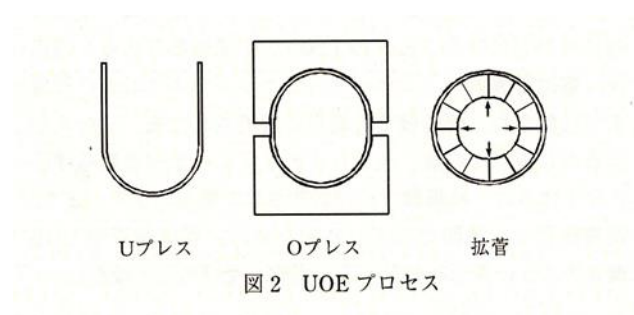


Fig 3.6 UOE 管製造工程^[3,4]

Table 3.3 鋼管の最小降伏応力

API 5L Grade	Yield Strength	Mpa
	min.	
	(ksi)	
A	30	207
B	35	241
X42	42	290
X46	46	317
X52	52	359
X56	56	386
X60	60	414
X65	65	448
X70	70	483
X80	80	552
X90	90	621
X100	100	690
X120	120	827
psi=	約6894.757 293 168 361 Pa	
ksi=	1000 psi	

現在、UOE 鋼管は陸上では X100 のグレードまで実用化されている。本研究では、潮汐・波浪による 3.5m という大きな変位をパイプの両端で受けることから、実用化されている UOE 鋼管の中で強度のグレードが高い X100 グレードのパイプを使用することを考える。

第4章 陸・浮体間の輸送手段の2次元有限要素法解析

本研究では、ケーススタディとして、FCLO・陸間の輸送手段が上への変位 3.5m に耐久性を持つかを検討する。その検討のツールとして有限要素法解析を実施する。有限要素法解析（FEM: Finite Element Method）は強度解析や構造解析に利用される解析方法であるため、本研究でも使用する。

4.1 検討手法

パイプの強度解析手法を Fig 4.1 に示す。既存の2次元平面ラメン有限要素法解析プログラム^[4.1]を用いて、パイプにかかる応力を計算する。FEM プログラム^[4.1]では、各要素をはりとして扱い、はり理論で計算が実行されており、各節点の変位、軸力、せん断力、曲げモーメントが出力される。

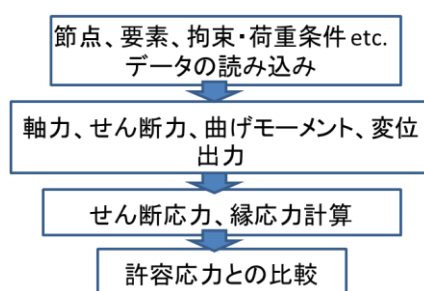


Fig 4.1 パイプの解析手法

本研究で強度解析を実施するパイプの詳細を Table 4.1 に示す。解析方法としては、港側のパイプの端部を固定し、FCLO 側のパイプの端部を上へ 3.5m 変位させることで検証する。端部の断面は角度の自由度はなく、固定されていると考える。この際、自重も加える（Table 4.1）。

Table 4.1 パイプの寸法／材料特性

UOE鋼管 グレードX100			鋼の物性		
	単位	値			
			ヤング率	Pa	2.06×10^{11}
外径	m	1.016	ポアソン比		0.3
肉厚	mm	30.2	密度	kg/m ³	7870
最小降伏応力	MPa	690	安全係数		2

本章では出力される曲げモーメント、せん断力がパイプを破断させないかを分析する。破断の指標として許容応力を使用する。許容応力とは降伏応力を安全係数は割った値のことである。安全係数とは、構造物が破断する最大の応力に対し、許容応力をどの程度見ておく必要があるかを示した指標である。この許容応力と曲げモーメントを断面計数で割った値、せん断力をパイプの断面積で割った値とを比較することで輸送手段としての成立性を検証する。断面計数は(4.1)式で計算する。

$$Z = \frac{\pi(d_2^4 - d_1^4)}{32d_2} \quad (4.1)$$

なお、 d_2 ：外径、 d_1 ：内径（単位：m）である。

4.2 直線パイプ

浮体側の 3.5m の上への変位のパイプへの影響を見るため、はじめに最もシンプルな直線パイプで強度解析を実施する。陸・浮体間の距離を比較的近い 30m から伸ばしていき、距離をパラメータとした時の直線パイプの端部応力を分析する。

4.2.1 結果

30m～250m まで直線パイプを伸ばした際の結果が Table 4.2 のようになる。結果はせん断力、せん断応力、曲げモーメント、縁応力（曲げモーメントを断面計数で割った値）を表示している。せん断力、曲げモーメントは系の中で最大の値を使用する。

曲げモーメントは上限変位を与える端部に、せん断力は端部とは限らないが、端部付近に最も大きい負荷がかかっていることが分かった。せん断応力と縁応力を比較すると縁応力がオーダーが一つ大きい。また、距離を伸ばすと 100m 付近まではせん断応力、縁応力共に減少するが、100m 以降は増加傾向にある。

Table 4.2 上下変位時にかかるパイプのせん断応力、縁応力

長さ m	せん断力 N	せん断応力 MPa	曲げモーメント N・m	縁応力 MPa
30	2.90E+06	4.63E+01	4.29E+07	2.80E+03
40	1.30E+06	2.08E+01	2.47E+07	1.61E+03
60	4.89E+05	7.81E+00	1.21E+07	7.91E+02
80	3.42E+05	5.46E+00	8.56E+06	5.59E+02
100	3.09E+05	4.94E+00	7.86E+06	5.14E+02
115	3.26E+05	5.21E+00	8.22E+06	5.37E+02
130	3.51E+05	5.61E+00	9.07E+06	5.93E+02
200	4.84E+05	7.73E+00	1.70E+07	1.11E+03
250	6.00E+05	9.58E+00	2.57E+07	1.68E+03

4.2.2 考察

直線パイプの場合、せん断応力と縁応力を比較すると Table 4.3 のようになる。Table 4.3 より直線パイプの場合、曲げモーメントの方がせん断応力よりも負荷が大きいことが分かる。これは端部が固定（断面が変化しない角度固定の状態）されていることで、端部に非常に大きい曲げ効果が発生するからだと考えられる。

Table 4.3 縁応力とせん断応力の比較

長さ [m]	20	30	40	60	80	100	115	130	200	250
縁応力/せん断応力	41	61	78	101	102	104	103	106	144	175

また、Fig 4.2 より自重を考慮しない場合は長さに反比例して縁応力が減少するのに対し、自重を考慮する場合は距離を伸ばすと自重の影響が増大するようになる。仮に自重の影響を打ち消す策があったとしてもパイプ長さ（岸壁と浮体の距離）は 100m を越えることが分かった。また、直線パイプでは浮体の幅方向変位に耐えられない。

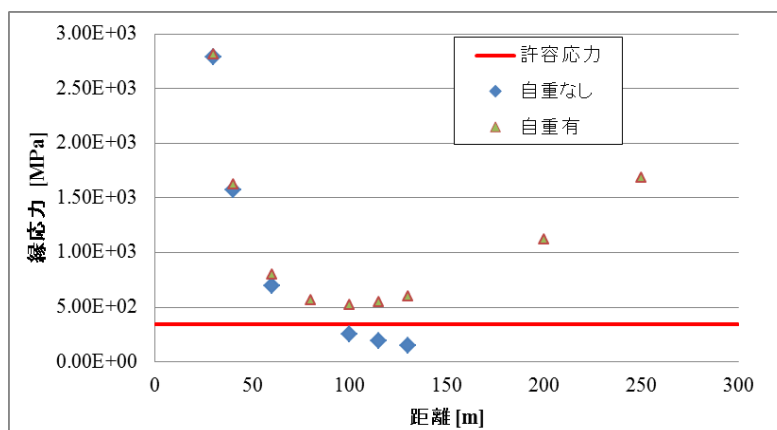


Fig 4.2 直線パイプの自重あり、なしの比較

4.3 検討の流れ

直線パイプの強度解析より、パイプの端部の曲げによる応力がパイプの破断に大きく影響していることが分かった。端部の曲げによる影響を軽減する方法として以下の2つの手法が考えられる。

① 端部の工夫

端部の変位、角度拘束という条件を緩和

② 形状工夫

パイプの形状を直線から他の形状に変更

そこで、①、②の二つの方向性で検討を実施する。

① 端部の工夫

両端固定端で片方は強制変位が上方向に 3.5m を加えている。そのため、端部応力が非常に大きくなる。しかし、端部の角度が自由であれば、応力は大きく軽減されることが考えられる。そこで、本研究が対象としているような大口径のパイプにおいて、端部の角度方向の拘束を自由にできるかを検討する。

② 形状工夫

直線パイプの解析結果より、曲げによる端部応力が非常に大きいことがわかった。そこで、曲げによる応力を形状工夫によって軽減することを目指す。

4.4 角度自由化

端部の角度拘束を自由にする際、重要になってくるのがパイプのつなぎ目となるジョイントである。端部が変位、角度共に拘束された状態はジョイントがパイプを固定し、動かないようにしているためである。そこで本節では、本研究で対象としている大口径のパイプに対応できかつ角度に自由度を持たせることが可能なジョイントが実在するかを確認する。

4.4.1 ジョイントの調査

パイプの端部のジョイントの調査をした。大口径、用途が配管用、材料が鋼のみならず、小口径、用途が配管用以外のもの、材料が鋼以外のものを調査した。調査したジョイントに対し、Table 4.4 の評価基準で評価を行った。

Table 4.4 ジョイントの評価基準

評価基準					
圧力	○	1.0MPa以上	呼び径	○	1.0m以上
	△	0.5MPa以上		△	0.5m以上
	×			×	
温度	○	184℃	角度の自由度	○	角度に自由度有
	×			△	角度の調節が可能
				×	

評価を行った結果を Table 4.5 に示す。口径、圧力、温度、角度の自由度という 4 項目において、最も有望だったのがフレキシベンダーである。

フレキシベンダーとは株式会社水研が開発したダクタイル鋳鉄製ボール型可撓伸縮管である。フレキシベンダーは免震ジョイントであり、日本やアメリカで使用実績がある。フレキシベンダーの寸法、性能を Table 4.6 に示す。本研究が想定する口径約 1m のパイプに対応するフレキシベンダーは上下左右に 7°の自由度を持つことが分かった。


しかし、フレキシベンダーは地下に埋設されている管を想定しているため、本研究が想定する FCLO・陸間をつなぐジョイントとしては強度に不安がある。特に、上下に変位した際、ジョイントに大きい応力がかかることから、課題である。水平方向に関しては、フレキシベンダーには伸縮性があり、自重の影響も受けなため、使用が可能であると考えられる。

次節では、このフレキシベンダーが上方向の変位に耐久可能であると仮定し、フレキシベンダーを両方の端部に接続するとして、検討を行う。

Table 4.5 ジョイント検討結果

	呼び径	圧力	温度	角度の自由度
TUJ (TOA universal joint)	○	○	○	△
カシーン	○	○	○	×
スペーサージョイント	△	×	×	○
オールフィッツジョイント	△	△	×	○
フレキシベンダー	○	○	○	○
カトーくん	△	△	△	○
スイベルジョイント	×	○	×	○
フレキシブルジョイント	×	△	△	○
マルチエルボ	×	×	△	○

Table 4.6 フレキシベンダー寸法、性能

	材料	ダクタイル鋳鉄
	呼び径、サイズ	50～1500mm
	許容圧力	1.75MPaで試験実施済み
	角度の自由度の有無	○ 5～15°
	用途	免震用

4.4.2 角度自由化

フレキシベンダーが端部に設置し、端部の角度に7度の自由度があると想定する。角度自由の検討には50mの直線パイプを用いる。

Table 4.7 に片端に3.5mの変位を与えた際の結果を示す。端部が固定されている場合と比較すると、端部に自由度がある時の方が応力は低い。端部の角度に自由度があると、強制変位による曲げが発生しないため、応力が小さくなっている。

y方向の垂直応力の出力図をFig 4.3に示す。端部が固定された直線パイプが端部応力が非常に大きかったのに対し、端部に角度に自由度のある場合、曲げによる負荷が小さく、重力の影響が大半であるため、空中に浮いているパイプの中心部に大きな負荷がかかっている。

以上よりフレキシベンダーを使用し、角度に自由度を設けると直線パイプでも3.5mの上への変位に耐久可能であることが分かった。しかし、フレキシベンダーは地下に埋設することを想定しているジョイントであることから、強度に不安が残る。Fig 4.3のように

y 方向に引っ張りが発生すると、それに伴い、フレキシベンダーが破断してしまう可能性がある。そのため、フレキシベンダーを FCLO のパイプのジョイントとして使用するのであれば、地下埋設のみならず、地上でも使用できるような仕様にする必要がある。

Table 4.7 角度自由と端部固定の比較

角度自由化		
	free	kotei
von mises	102.3	966.9
		単位 : MPa

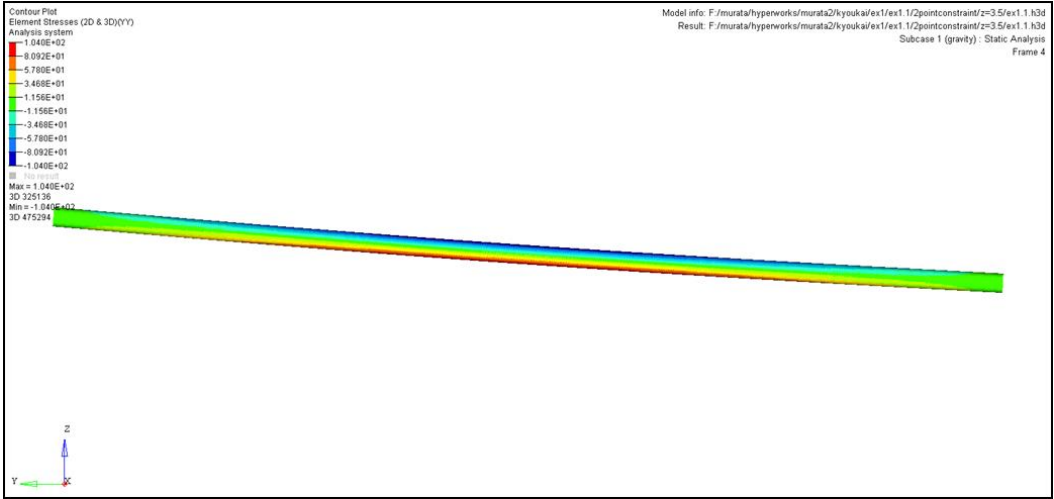


Fig 4.3 角度自由の y 軸方向の垂直応力

4.5 アイデア検討

前節で検討したように直線パイプでは、波浪・潮汐の影響を免れることができないことが分かった。直線パイプの場合、せん断応力（せん断力）・縁応力（曲げモーメント）の両方による負荷で破断してしまう。そこで、直線パイプというシンプルな形ではなく、形状に工夫を凝らすことで、パイプにかかる応力を軽減することを期待する。本節では、2次元解析で形状工夫の代表例としてコサイン型（Fig 4.4）を紹介する。その他検討したモデルに関しては付録に載せることとする。

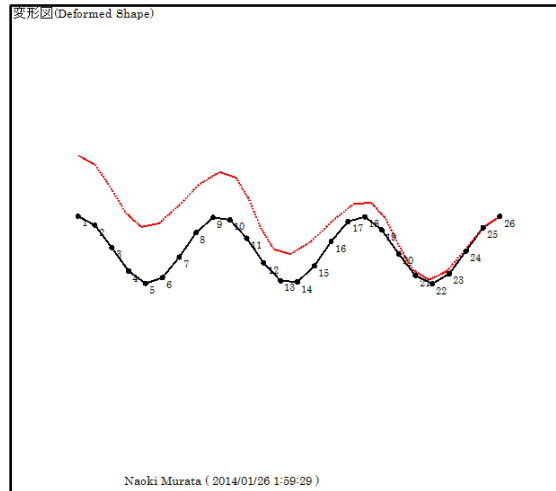


Fig 4.4 コサイン型モデル

4.5.1 コサイン型以外のまとめ

コサイン型以外の解析より以下の知見を得られた。

- ・ 端部の曲げモーメントが破断に大きな影響を及ぼしている
- ・ 端部周辺をクリップ型に似た形状にすることで曲げではなく、圧縮するようにすることで、応力軽減効果がある
- ・ 曲げを別の力に変えることで応力軽減効果有
- ・ 端部に上下差を設けることにメリットはない
- ・ 系をカーブ（弧型）させること応力軽減効果がある
- ・ 端部のみならず、系全体で変位するようなモデルにすることにメリット有
- ・ サイズが全体的に大きい方が変位しやすいため、応力は小さい

これらの知見を利用し、コサイン型で検討を実施した。

4.5.2 コサイン型

コサイン型に関し、詳しい検討を実施した。また、せん断力以上に曲げモーメントによる負荷が大きいことから、コサイン型は曲げモーメント（縁応力）を分析する。コサインの振幅、波長をパラメータとし、曲げモーメントによる破断を分析した。

Fig 4.5、Fig 4.6 に振幅（高さ）と波長をパラメータにした際の結果を示す。図は横軸を FCLO・港間の距離、縦軸を曲げモーメントを断面計数で割った縁応力としている。また、形状工夫の効果を分析するために自重を入れずに分析する。

・パラメータ:振幅（高さ）

高さをパラメータとした場合、高さが高い方がパイプの総長が長くなり、端部応力が軽減されていた。直線パイプと比較しても、全ての場合で応力軽減効果が見られた。しかし、自重を含めずに形状の工夫のみで破断せずに済む距離が 75m 以上と非常に長かった。

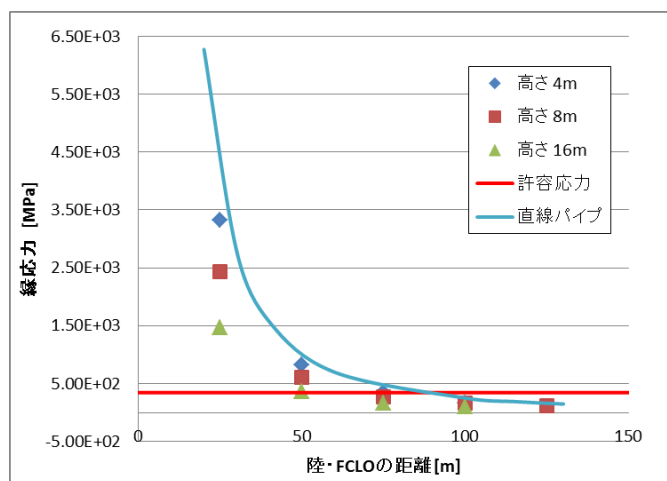


Fig 4.5 パラメータ：振幅（高さ）の解析結果

・パラメータ：波長

波長が短い方がパイプの総長が長くなるため、端部応力が軽減されている。直線パイプと比較しても、全ての場合で応力軽減効果が見られた。しかし、自重を含めずに形状の工夫のみで破断せずに済む距離が 100m 以上と非常に長かった。

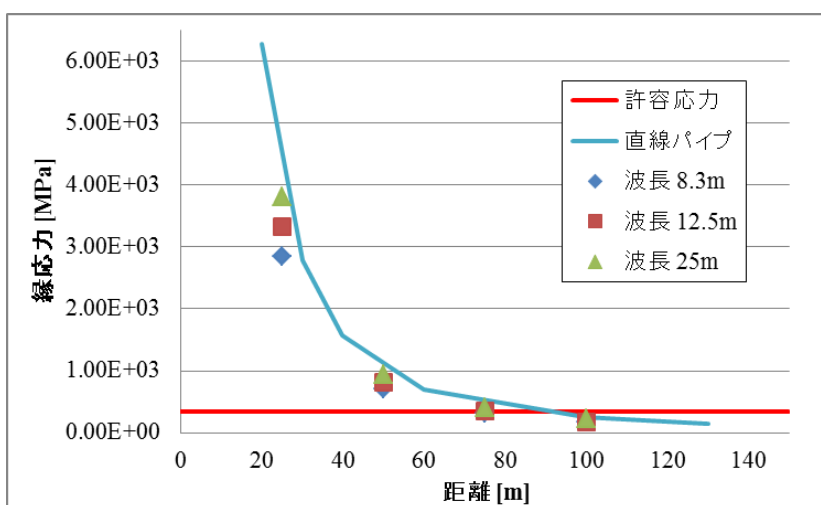


Fig 4.6 パラメータ：波長の解析結果

4.5.3 まとめ

端部の角度に自由度を設けることで端部応力を軽減することができた。しかし、端部の角度を自由にするジョイントが地下に埋設された状態で使用することを想定していることから、引張強度が低いと考えられる。そのため、陸・FCLO間の輸送手段としてはジョイントの信頼性が低いため、今後のジョイントの開発状況次第と言える。

2次元の形状工夫には効果があった。直線パイプと比較すると、形状工夫を行った方が端部の曲げ応力を軽減できていることが分かった。2次元という検討範囲が制限された中でも自重を含まない上ではあるが、形状工夫によって3.5mの強制変位による破断を防ぐことはできた。形状の工夫によって、直線パイプに比べると最大応力を低減する可能性を示せたが、鉛直変位のみを吸収させようとするだけでも陸・浮体間距離が75m以上と長いため、3次元の形状工夫を実施する。

第5章 陸・浮体間の輸送手段の3次元有限要素法解析

5.1 手法

陸・FCLO 間の輸送手段の形状評価を行うために、本研究では Hyperworks という既存ソフトウェアを使用する。

5.1.1 Hyperworks とは

Hyperworks とはアルテアエンジニアリング株式会社が提供する線形・非線形解析、マルチボディダイナミクス解析（多体動力学解析）、流体解析（CFD）、構造最適化のための CAE（computer aided engineering）ソフトウェアである。Hyperworks を使用することで、以下のようなことが可能である。

- ・ 流体解析（CFD）
- ・ 疲労解析
- ・ 有限要素解析
- ・ 衝突解析
- ・ 熱解析
- ・ 衝撃解析
- ・ マルチボディダイナミクス解析

本研究では、hyperworks を使用し、第4章同様有限要素法を用い、パイプの強度解析を実施する。

5.1.2 検討手法

3次元有限要素法解析の手法を Fig 5.1 に示す。

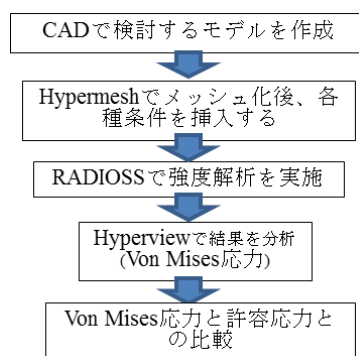


Fig 5.1 3次元の解析手法

はじめに Auto Inventor (CAD) を使用して、検討モデルのモデル化を行う。この際、パイプの寸法、形状を設定する。次に、Hyperworks 内の CAE モデリングソフトウェア Hypermesh を使用し、メッシュ化を行う。この際、パイプの物性、拘束条件、力の条件、数値解析条件などを設定する。次に、Hyperworks 内の非線形、衝撃解析、マルチフィジックスソルバーの RADIOSS で強度解析を実施。RADIOSS は、静的な問題から非線形性の強い高速な動的問題、さらには大変形の構造解析、流体解析、構造流体連成解析が可能な汎用有限要素ソルバーである。RADIOSS を使用することで、Hypermesh 内で設定した各種条件を解析し、結果として、各種変位・応力が出力される。最後に、Hyperworks 内の可視化ツールである Hyperview を使用し、RADIOSS で出力される結果の分析を実施する。出力結果の一例を Fig 5.2 と Fig 5.3 に示す。

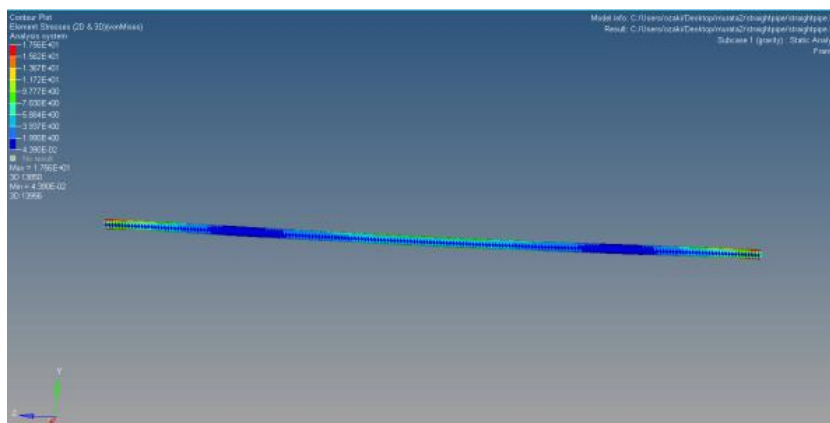


Fig 5.2 Hyperworks の出力例（ミーゼス応力）

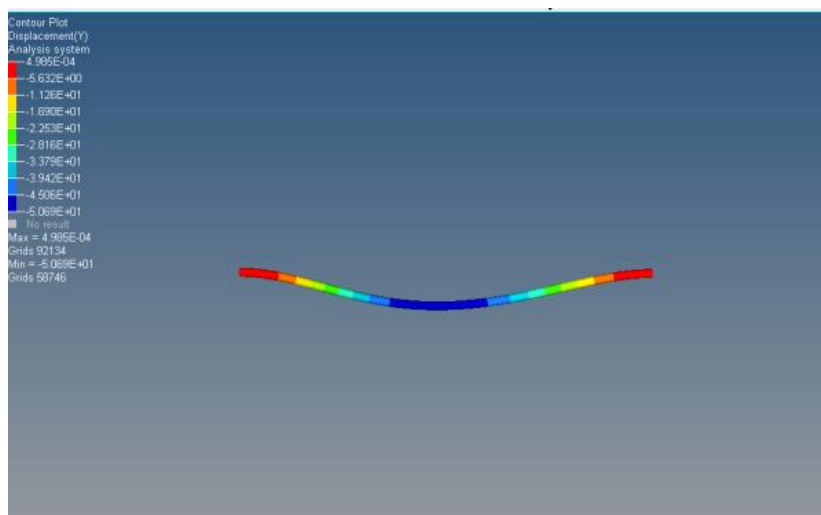


Fig 5.3 Hyperworks の出力例（変位）

本研究の強度解析で使用するパイプの詳細を Table 5.1 に示す。解析方法としては、第 4 章の 2 次元解析同様、港側のパイプの端部を固定し、FCLO 側のパイプの端部を上へ 3.5m 変位させることで検証する。端部の断面は角度の自由度はなく、固定されていると考える。この際、自重も加える。

Table 5.1 鋼管の寸法

パイプの寸法		材質			
	mm		単位		
外径	1016	ヤング率	MPa		2.1E+05
肉厚	30.1	ポアソン比			0.3
		密度	kg/mm ³		7.9E-09
		降伏応力	MPa		6.9E+02

また、3 次元解析の際、応力の 6 成分を検討に入れ、降伏条件を考える必要がある。そこで、本研究では、ミーゼス応力（von mises 応力）を分析する。ミーゼス応力とは多方向から複合的に荷重が加わる場合に一軸の応力に投影したスカラー値であり、延性材料の破壊基準、および塑性変形に関する力の基準としてよく用いられる。ミーゼス応力は (5.1) 式のように計算される。

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{1}{2}\{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\}} \quad (5.1)$$

なお、 σ_1 : 最大主応力、 σ_2 : 中間主応力、 σ_3 : 最小主応力である

5.2 アイデア検討

パイプの端部が両端変位、角度共に拘束されている場合、形状工夫によりパイプの破断を防ぐことを目指す。本節では、2次元では検討できない3次元の形状を用い、強度解析を実施する。

そこで、形状工夫に効果があると期待されるコイル型、クランク型モデルを分析する。

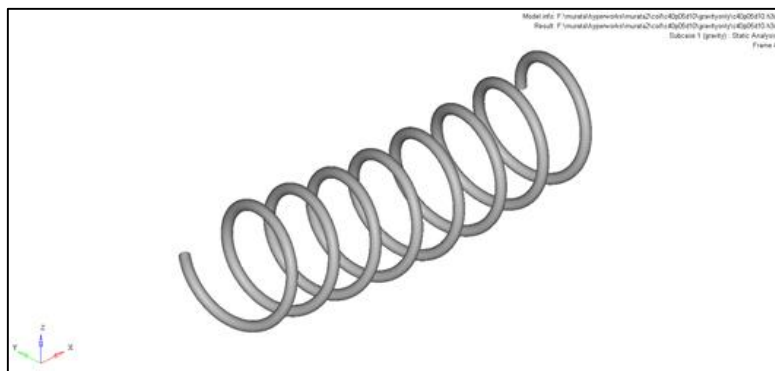


Fig 5.4 コイル型モデル形状

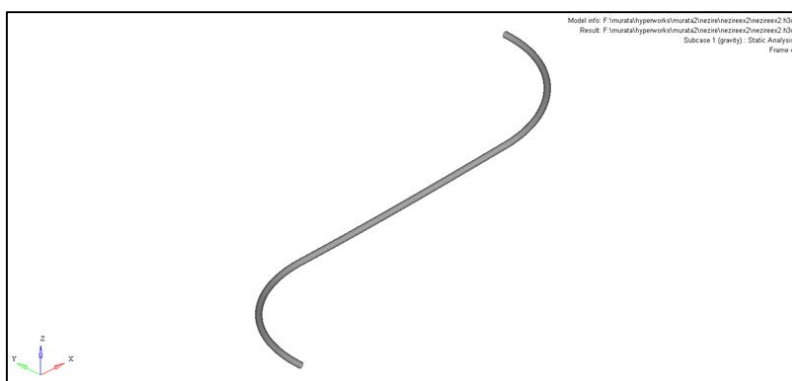


Fig 5.5 クランク型モデル形状

5.2.1 コイル型

コイル型はバネをイメージしたアイデアである。コイル型は片端が上下に変位することで、中心部が圧縮される (Fig 5.6)。直線パイプの場合、曲げによる応力が大きかったが、コイル型では、その曲げによる応力を引っ張りや圧縮方向へ分散させることで、パイプにかかる最大応力を軽減させることを目的とする。コイルのピッチ (P)、直径 (D)、長さ (L) をパラメータとし、ミーゼス応力を分析する (Fig 5.7)。

コイル型は Fig 5.8 に示すように強制変位を加えた側の端部に大きな応力がかかるため、端部付近のミーゼス応力を分析する。

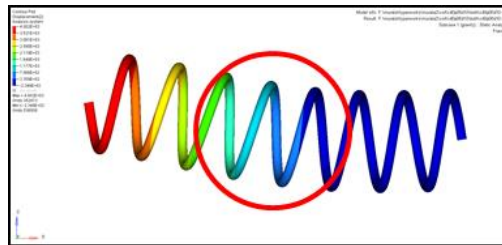


Fig 5.6 コイルの圧縮

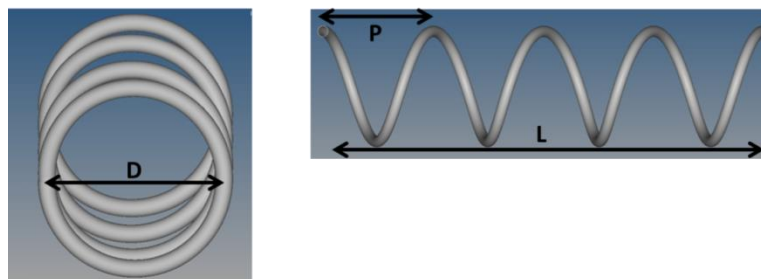


Fig 5.7 コイル型のパラメータ

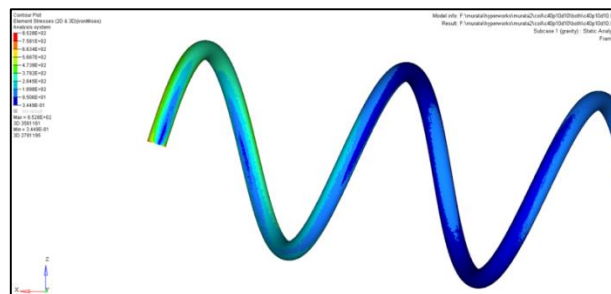


Fig 5.8 コイル型のミーゼス応力

5.2.1.1 パラメータ：ピッチ

コイルの直径（D）を 10m、長さ（L）を 40m とし、ピッチをパラメータとして、強度解析を実施する。コイルに重力のみ加わった際の応力を Fig 5.9 に示す。ピッチが大きくなるとパイプのトータル長さが短くなるため、パイプにかかる応力が小さくなっていることが分かる。次に、強制変位、内圧、自重全てを含めた解析結果を Fig 5.10 に示す。ピッチを長くすると、応力が大きくなっていることが読み取れる。

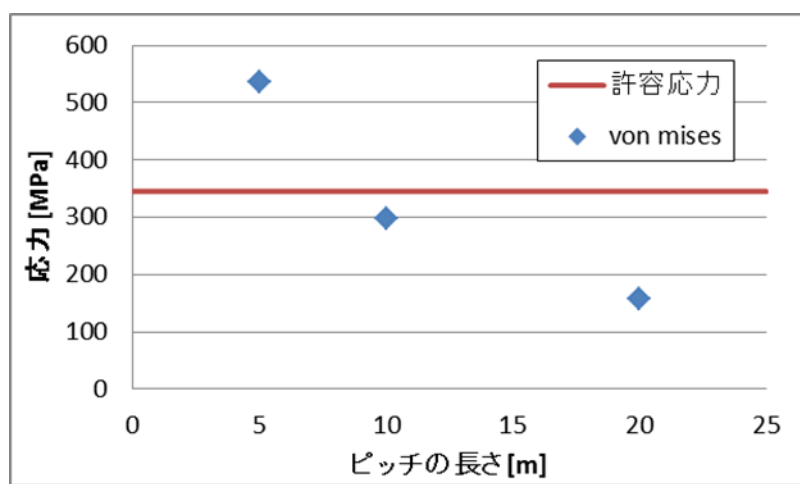


Fig 5.9 重力のみ作用している場合

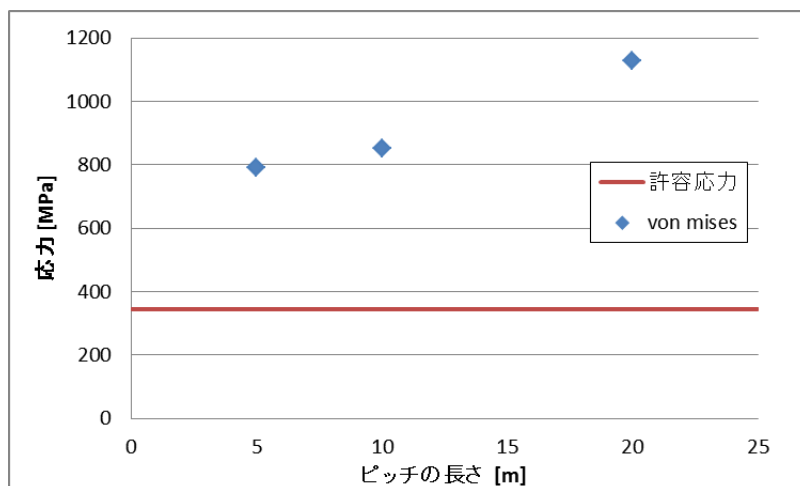


Fig 5.10 自重・変位・内圧が作用している場合

○考察

本研究で扱っているコイル型をバネと仮定し、考察する。(5.2) 式に圧縮コイルバネの場合のばね係数とばねの寸法の関係式を示す。

$$k = \frac{Gd^4}{8N_aD^3} \quad (5.2)$$

なお、k:バネ係数[N/mm]、G:バネの横弾性係数 [MPa]、d:バネの線径[mm]、Na:有効巻数、D:平均コイル径[mm] である。

ピッチをパラメータとすると、自重による影響はピッチが長い方が少ないが、変位による応力はピッチが短い方が小さくなっている。2次元のアイデア検討の際に述べたように、自重はパイプのトータルの長さに依存する部分が大きいためピッチが短い方が応力が大きくなる。

変位に関しては、(5.2) 式のバネ係数とバネの寸法の式を用いて考える。ピッチをパラメータとして実施した解析は同じコイルの長さ、コイルの直径下で実施したものである。つまり、ピッチが短いということは有効巻数 N_a が大きくなるということであり、バネ定数が小さくなる。バネ定数が小さい場合やわらかいバネになり、大きい場合は硬いバネとなる。ピッチが小さいほうがバネとしてやわらかく、変位が硬いバネより無理なく変位することができると考えられる。逆に、ピッチが長いとバネ係数が大きくなってしまい、コイルが硬いバネになってしまい、ピッチが短いものに比べ、柔軟でなくなると考えられる。そのため、ピッチが短い方がコイルがバネとして柔らかく、強制変位による応力が小さくなっていると考えられる。

5.2.1.2 パラメータ：直径

コイルのピッチ (P) を 25m、長さ (L) を 50m とし、コイルの直径をパラメータとして、強度解析を実施する。コイルに重力のみ加わった際の応力を Fig 5.11 に示す。直径が大きくなるとパイプのトータル長さが長くなるため、パイプにかかる応力が大きくなっていることが分かる。次に、強制変位、内圧、自重全てを含めた解析結果を Fig 5.12 に示す。直径を長くすると、応力が小さくなっていることが読み取れる。

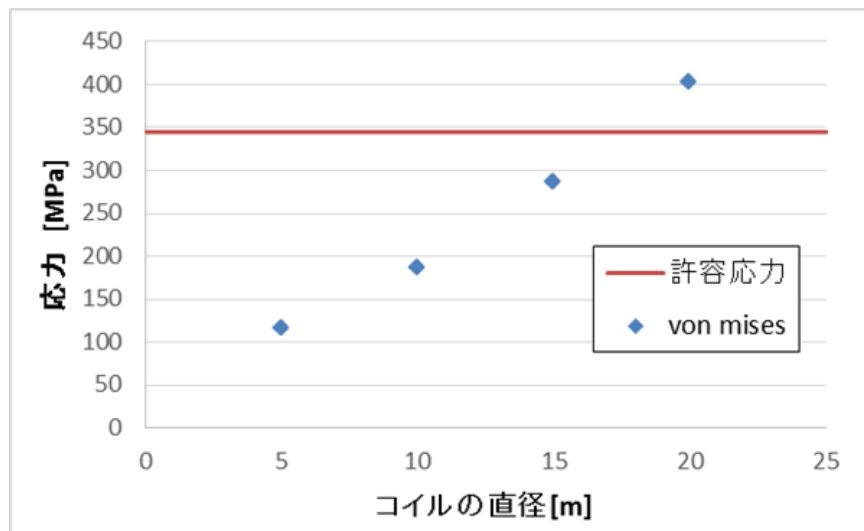


Fig 5.11 重力のみ作用している場合

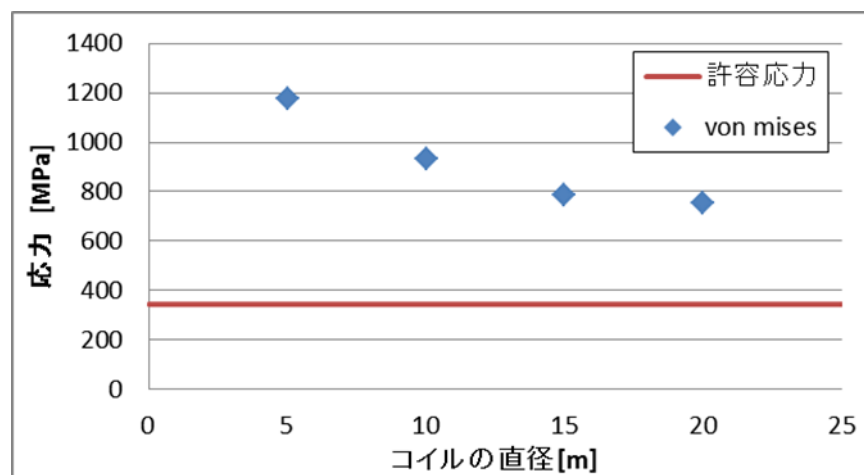


Fig 5.12 自重・変位・内圧が作用している場合

○考察

直径をパラメータとすると、自重による影響は直径が大きい方が大きいですが、変位による応力は直径が小さい方が応力が小さくなっている。自重に関しては、ピッチ同様パイプのトータル長さに依存するからである。自重、内圧、変位を全て含んだ場合、(5.2)式よりバネ係数は直径が大きくなると小さくなる。同じ長さ、同じピッチで直径のみを変化させると直径が大きい場合、バネ係数が小さく、直径が小さい場合バネ定数が大きくなる。コイルの直径が大きくなると、応力が下がっているのはこれが要因であると考えられる。

5.2.1.3 パラメータ：長さ

コイルのピッチ (P) を 10m、直径を (D) を 15m とし、コイルの長さ (L) をパラメータとして、強度解析を実施する。コイルに重力のみ加わった場合は、距離に自重による応力が依存するため、省略する。強制変位、内圧、自重全てを含めた解析結果を Fig 5.13 に示す。コイルを長くすると、応力が小さくなっていることが読み取れる。

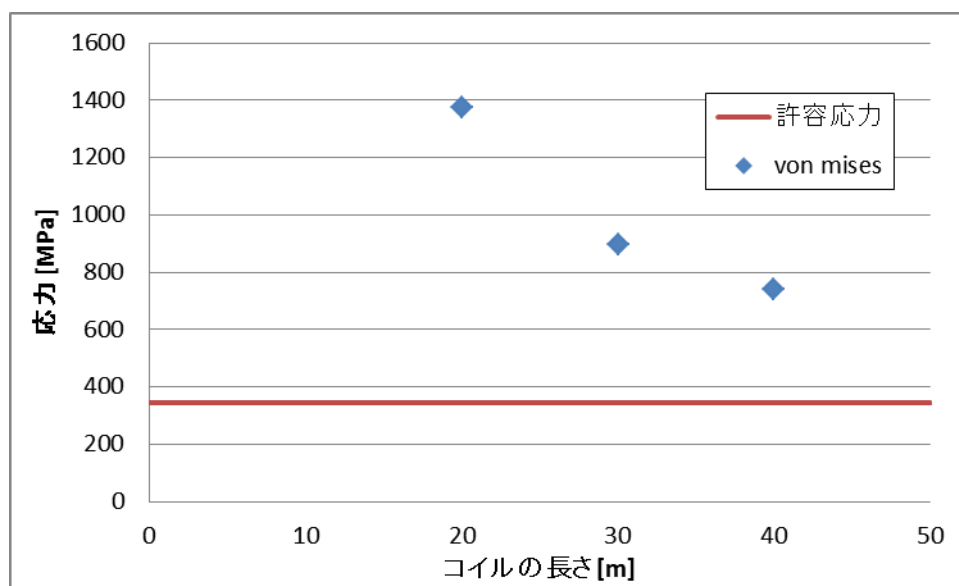


Fig 5.13 自重・変位・内圧が作用している場合

○考察

コイルの長さ (L) をパラメータとすると、Lが大きくなると、応力が下がる。ピッチ (P)、直径 (D) 一定で、Lを変化させると有効巻数 (Na) に影響を及ぼす。Lが長くなると、巻数も増えるため、(5.2)式よりバネ係数 k は下がる。つまり、コイルの長さが長いほうがコイルとして柔軟なため、応力が小さくなっていると考えられる。

5.2.1.4 コイル型まとめ

ピッチ、直径、長さをパラメータに強度解析を実施した。しかし、全体的にミーゼス応力が許容応力を大きく超えてしまっている。そこで、 $P=10m$ 、 $D=15m$ 、 $L=40m$ というモデルに対し、影響が大きいと考えられる強制変位、重力による影響を分割して分析する。Fig 5.14 に検討するコイル型のモデル、Table 5.2 に各応力の値、Fig 5.15 に許容応力との比較図を示す。Table 5.2 より重力ですでに許容応力を超えていることが分かる。さらに、変位による影響も大きく、許容応力とほぼ同値である。コイル型で許容応力を下回することは難しいと考えられる。

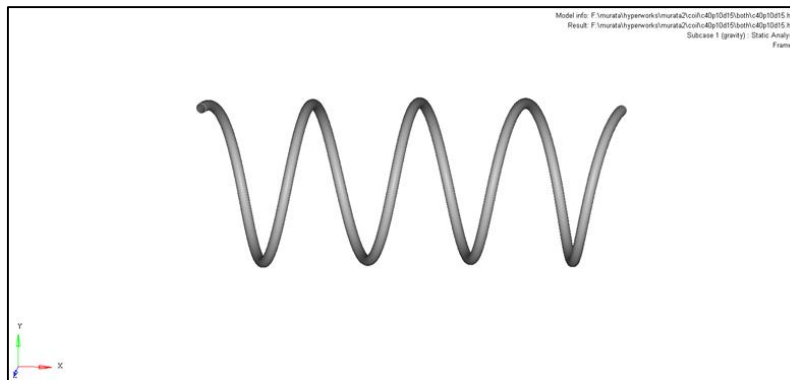


Fig 5.14 コイル型モデル

Table 5.2 重力、変位による応力の比較

	gravity	displacement	all
von mises	445.5	343.6	740.8
単位: MPa			

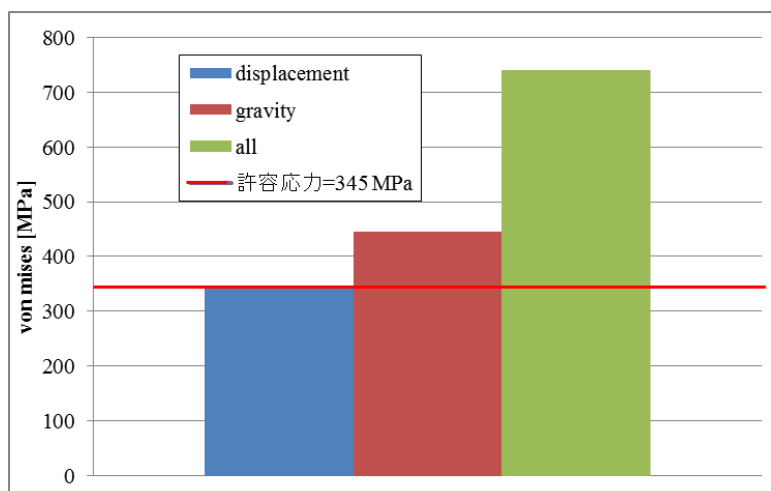


Fig 5.15 許容応力との比較

5.2.2 クランク型

クランク型は変位による曲げの応力をねじれに分散させることでパイプにかかる最大応力を軽減することを目指す。クランク型では、 L の長さ、円弧の半径 R の長さ、 $D \cdot A$ の長さをパラメータとして、分析する (Fig 5.16)。また、 θ 、 D と A の長さを変えた場合の検討に関しては、付録に掲載する。

Fig 5.17 にクランク型にかかるミーゼス応力を示す。クランク型は強制変位がかかる端部の上部に最も大きな応力がかかるため、そのミーゼス応力を比較していく。

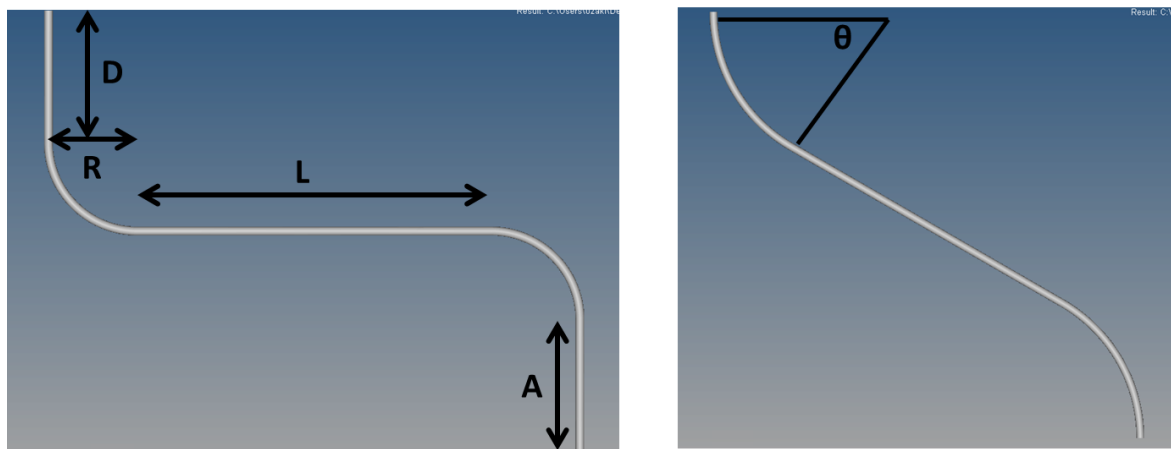


Fig 5.16 クランク型パラメータ

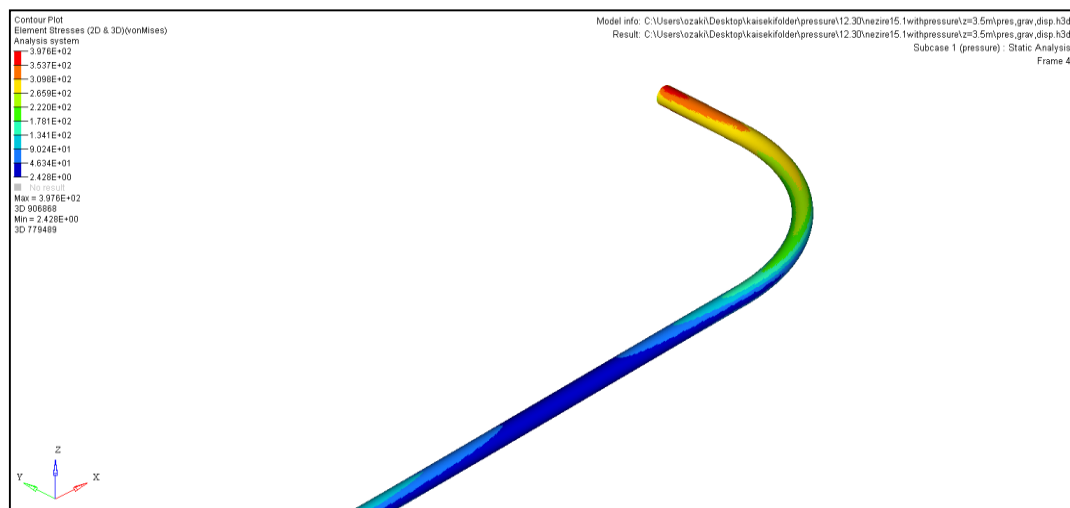


Fig 5.17 クランク型のミーゼス応力出力図

5.2.2.1 パラメータ：L の長さ

円弧 R の半径を 20m とし、L の長さをパラメータとして、強度解析を実施する。重力のみ加わった場合は、距離に自重による応力が依存する。変位のみをパイプに加えた際のミーゼス応力を Fig 5.18、せん断応力を Fig 5.19 に示す。また、強制変位、内圧、自重全てを含めた解析結果を Fig 5.20 に示す。

Fig 5.18、Fig 5.19 より変位のみ作用している場合、L の長さが長いほどミーゼス応力、せん断応力は小さくなっている。しかし、自重、内圧を含めた Fig 5.20 の場合、応力がミーゼス応力は一度下がってまた上がるという傾向を示す。

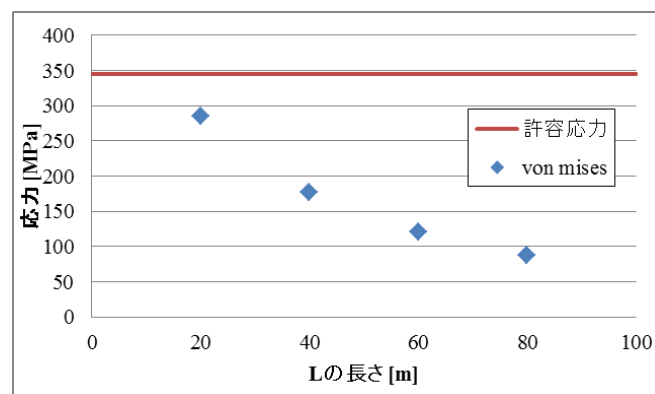


Fig 5.18 変位のみ作用する時のミーゼス応力

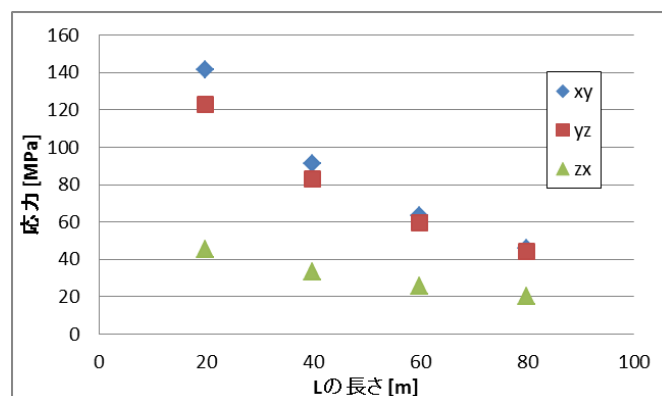


Fig 5.19 変位のみ作用する時のせん断応力

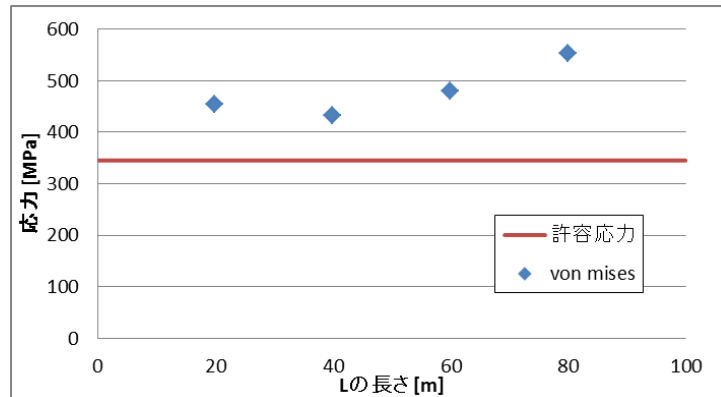


Fig 5.20 変位、自重、内圧が作用する時のミーゼス応力

○考察

変位による応力が L を長くすると小さくなるのは、ねじれをパイプ全体で吸収するようになるからである。 L が短い方がパイプの一部分が受けるねじれによる応力は大きい。 L が長くなることで、その局所的な応力を長くなった部分に分散させることができる。

また、自重・内圧も含めた場合の応力を見ると、一度応力が下がって、また上がる。それは、 L が短い場合はパイプのトータル長さが短いため自重の影響は小さいが、 L が長くなるにつれ自重の影響が大きくなり、ミーゼス応力に占める割合が多くなるからである。 $L=40\text{m}$ の場合は、自重の応力を増加効果がせん断応力の減少効果を上回るポイントであると考えられる。つまり、 40m 以降はせん断応力より自重の影響が大きくなるということである。

5.2.2.2 パラメータ：R の大きさ

L の長さを 40m とし、円弧の半径の長さ R をパラメータとして、強度解析を実施する。重力のみ加わった場合は、距離に自重による応力が依存する。変位のみをパイプに加えた際のミーゼス応力を Fig 5.21、せん断応力を Fig 5.22 に示す。また、強制変位、内圧、自重全てを含めた解析結果を Fig 5.23 に示す。

Fig 5.21、Fig 5.22 より変位のみ作用している場合、L の長さが長いほどミーゼス応力、せん断応力は小さくなっている。しかし、自重、内圧を含めた Fig 5.23 の場合、応力がミーゼス応力は一度下がりてまた上がるという傾向を示す

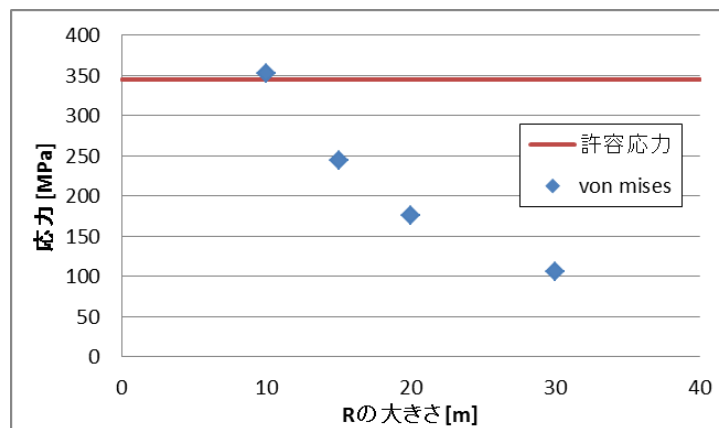


Fig 5.21 変位のみ作用する時のミーゼス応力

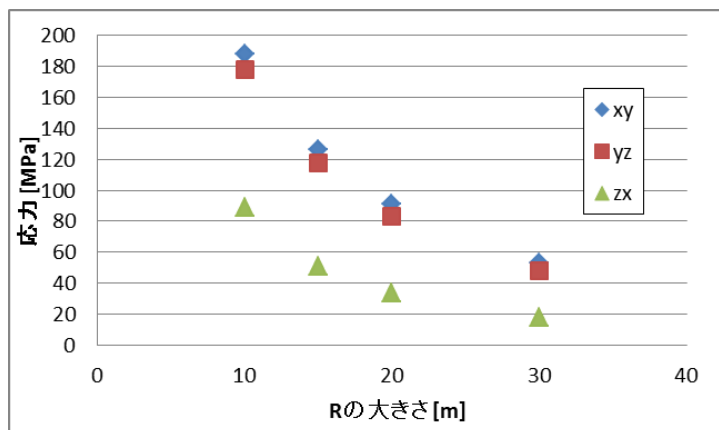


Fig 5.22 変位のみ作用する時のせん断応力

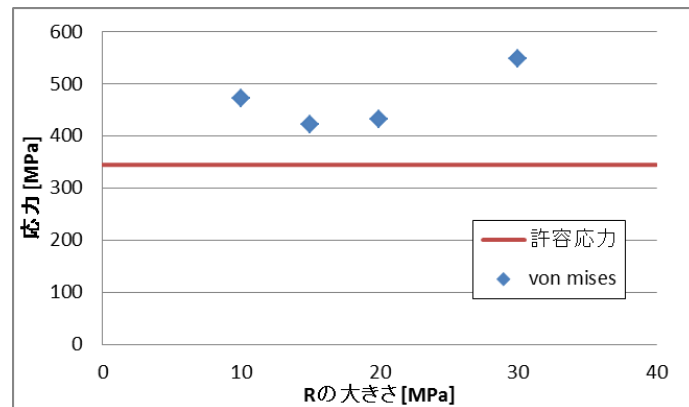


Fig 5.23 変位、自重、内圧が作用する時のミーゼス応力

○考察

変位による応力が R を長くすると小さくなるのは、ねじれをパイプ全体で吸収するようになるからである。これは L が長くなる場合と同様の傾向であると言える。 R が長くなることで、ねじれによる局所的な応力を長くなった部分に分散させることができる。

また、自重・内圧も含めた場合の応力を見ると、一度応力が下がって、また上がる。これも L をパラメータとした場合と同様、 R が小さい場合はパイプのトータル長さが短いため自重の影響は小さいが、 R が長くなるにつれ自重の影響が大きくなり、ミーゼス応力に占める割合が多くなるからである。 $R=10, 15, 20\text{m}$ 付近がせん断応力より自重の影響が大きくなるポイントであると考えられる。

5.2.2.3 パラメータ：D の長さ

L の長さを 40m、R を 10m とし、D の長さをパラメータとして、強度解析を実施する。変位のみをパイプに加えた際のミーゼス応力を Fig 5.24、せん断応力を Fig 5.25 に示す。また、強制変位、内圧、自重全てを含めた解析結果を Fig 5.26 に示す。

Fig 5.24、Fig 5.25 より 変位のみ作用している場合、D の長さが長いほどミーゼス応力、せん断応力は小さくなっている。しかし、自重、内圧を含めた Fig 5.26 の場合、応力がミーゼス応力は一度下がりてまた上がるという傾向を示す

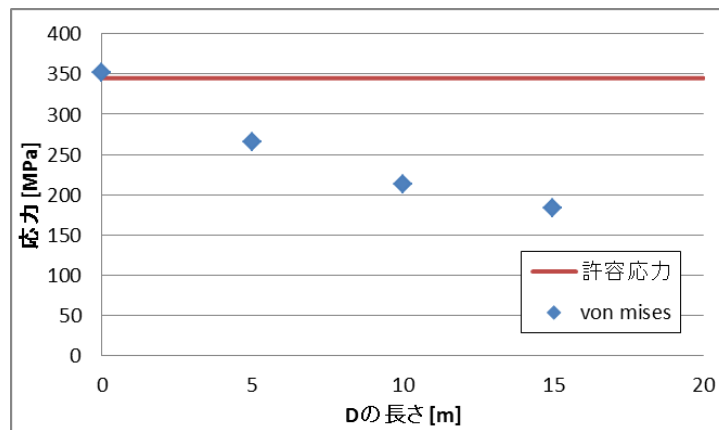


Fig 5.24 変位のみ作用する時のミーゼス応力

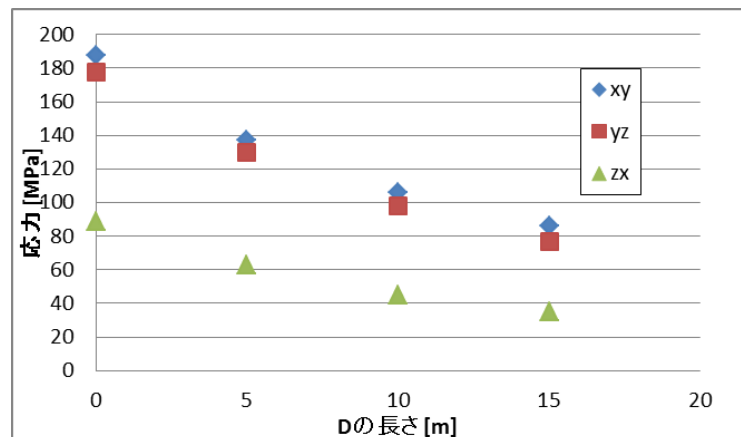


Fig 5.25 変位のみ作用する時のせん断応力

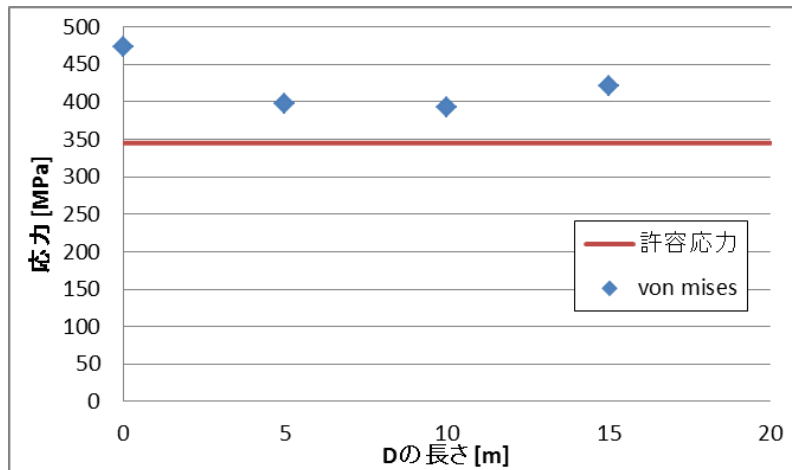


Fig 5.26 変位、自重、内圧が作用する時のミーゼス応力

○考察

変位のみの影響、自重・内圧・変位の全てを含んだ際のパイプの応力を分析すると、 $L \cdot R$ をパラメータとした場合と傾向は変わらない。 D があることによって、パイプのトータルの長さが伸びるため、ねじれを長くなった部分に分散させることができる。自重による影響も他のパラメータと同様の傾向を示す。 D が 5、10m 付近においてせん断応力より自重の影響が大きくなるポイントが存在すると考えられる。

5.2.2.4 まとめ

L の長さ、円弧 R の半径の大きさ、 D の長さをパラメータとし、パイプの強度解析を行った結果、Fig 5.25 の二つのモデルのミーゼス応力が許容応力に最も近付いた。①は FCLO・陸間の距離を 30m、横の距離を 60m としている。②は FCLO・陸間の距離を 40m、横の距離を 60m としている。Fig 5.27 のモデルの結果を Table 5.3 に示す。

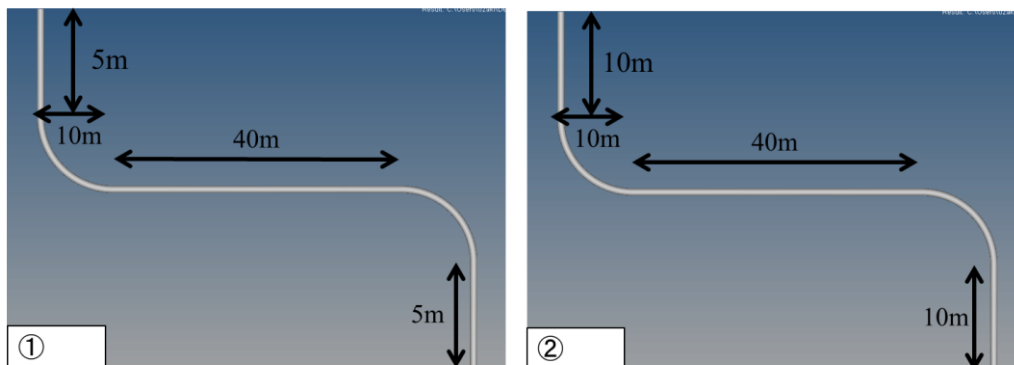


Fig 5.27 有望なクランク型モデルの寸法

Table 5.3 有望なねじれモデルの結果

	①	②
von mises	397.6	392.7
	単位: MPa	

Table 5.3 よりミーゼス応力は許容応力の 345MPa に近づいているが、現状ではまだ破断してしまう。Table 5.4 に変位のみ作用している場合と変位・自重・内圧が作用している場合の各応力値を示す。Table 5.4 より変位による応力は形状工夫によって抑えられていることが分かる。さらに、FCLO・陸間の距離が 30~40m と比較的短い距離でミーゼス応力を抑えられている。しかし、自重の影響が大きく、全体で見るとまだ許容応力の 345MPa を超えて、破断してしまう。

ここで、視点を変える。今まで変位によるパイプの端部への応力、特に強制変位による応力を形状工夫によって軽減させることを目指してきた。しかし、形状を工夫しても自重の影響が大きく、許容応力の 345MPa を下回ることが難しいことが分かった。そこで、変位による応力を軽減できていたクランク型モデルの自重による影響を取り除く方法を検討する。

Table 5.4 変位による作用、変位含めたすべての要素の作用の比較

	変位のみ	全て	変位のみ	全て
	①		②	
von mises	265.3	397.6	183.3	392.7
			単位: MPa	

5.2.3 重力影響軽減策

自重による影響を軽減するため、Fig 5.28 に示すような対策を実施した。

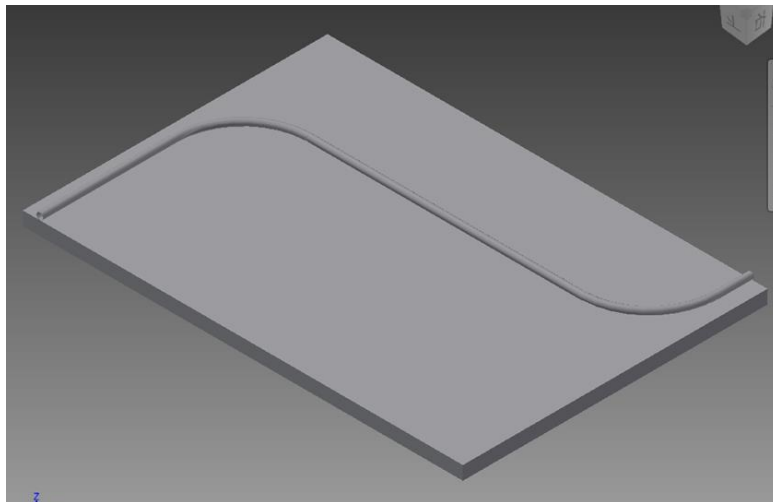


Fig 5.28 重力軽減案

Fig 5.28 は、パイプを岸壁と船の間に両端が曲げ自在で剛な渡橋をかけ、その上の変形しやすいパッドの上にパイプを置く案である。下からパイプを支えることで重力の影響を軽減することをねらいとしている。この方策の効果を見るべく、まず直線パイプで検討する。

5.2.3.1 支持材について

支持材の構造を Fig 5.29 に示す。支持材は二重構造になっている。パイプの変形を吸収する層(吸収層)とその吸収層を下から支える剛性の大きい剛体層で形成されている。

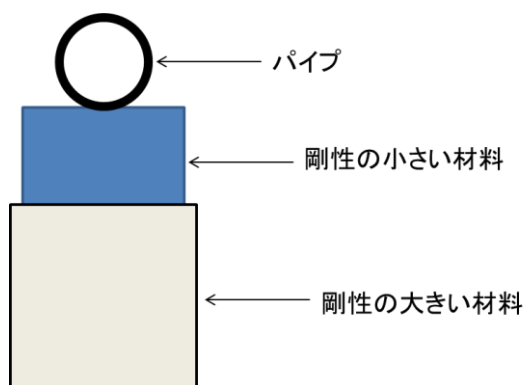


Fig 5.29 支持材の構造

5.2.3.2 直線パイプ

50m の直線パイプに対し、支持材を適用した。50m パイプの両端を変位しないよう固定し、自重のみが加わるようにし、支持材の効果を検証した。Fig 5.30 に z 方向の変位図、Fig 5.31 に吸収層にかかる応力、Table 5.5 に検討結果を示す。Fig 5.30 よりパイプには重力しかかかっていないため、中心部分の変位が大きいことが分かる。

また、Table 5.5、Fig 5.31 より支持材がパイプの自重を支えていることが分かる。Fig 5.31 より吸収層の上面にパイプの部分に応力がかかっていることが分かる。つまり、パイプの重力による負荷を吸収層が分布的に支えることで軽減していると言える。

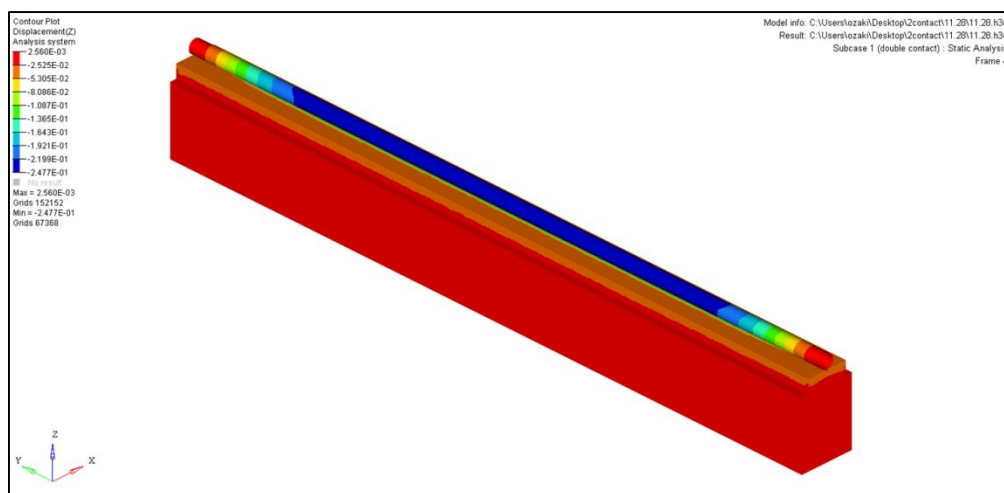


Fig 5.30 z 方向変位を示した図

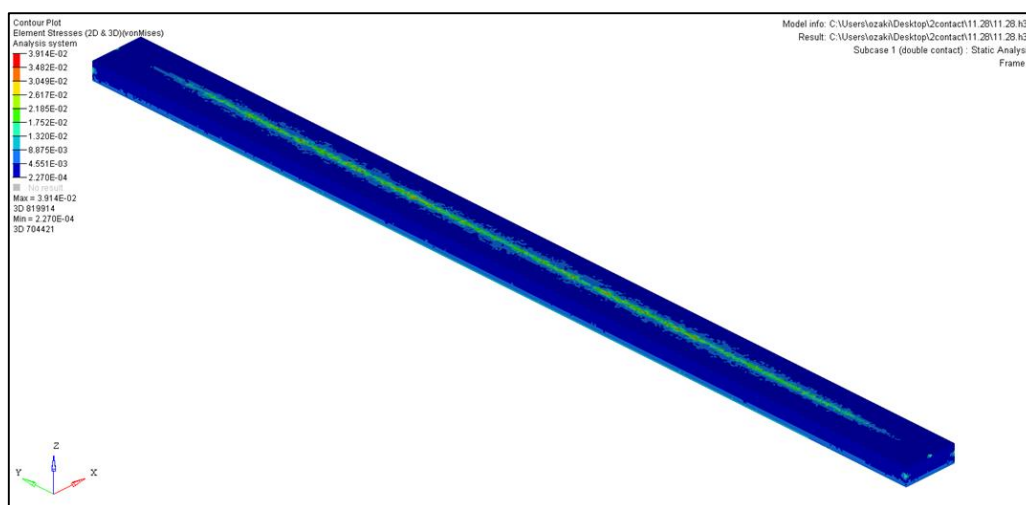


Fig 5.31 吸収層のミーゼス応力

Table 5.5 直線パイプにおける支持材の効果

normal 50m pipe		
重力吸収剤	無	有
von mises	69	2.9
		単位:MPa

次に、パイプと支持材に上への強制変位を加えた場合を考える。パイプの端部を固定、支持材の端部を回転自由にし、変位させると、Fig 5.32 のように支持材に触れず中に浮いてしまう部分がある。一度中に浮いたパイプは再度支持材に触れ、吸収材に食い込む形になっている。Fig 5.30 のように吸収材の断面に垂直な方向に重力がかかると重力を吸収してくれる。しかし、Fig 5.32 のように重力方向が吸収材の面と垂直にならない場合、吸収材の下部にパイプが食い込んでしまい、食い込んでしまう時に発生する反力(y 軸方向の垂直応力)がパイプに大きく作用している。つまり、強制変位をかけた際、支持材は効果を発揮しないと言える。

Fig 5.33 支持材がない場合の直線パイプの変位を示した図、Fig 5.34 は支持材にかかる応力を示した図である。Fig 5.33 の赤丸部分が Fig 5.34 の赤丸部分にのっていることになるが、パイプの端部に強制変位を加えるとパイプの片端を支持材が無理矢理上に持ち上げることになる。その結果、重力による応力を軽減するのではなく、逆にパイプにかかる負荷を大きくしてしまっている。

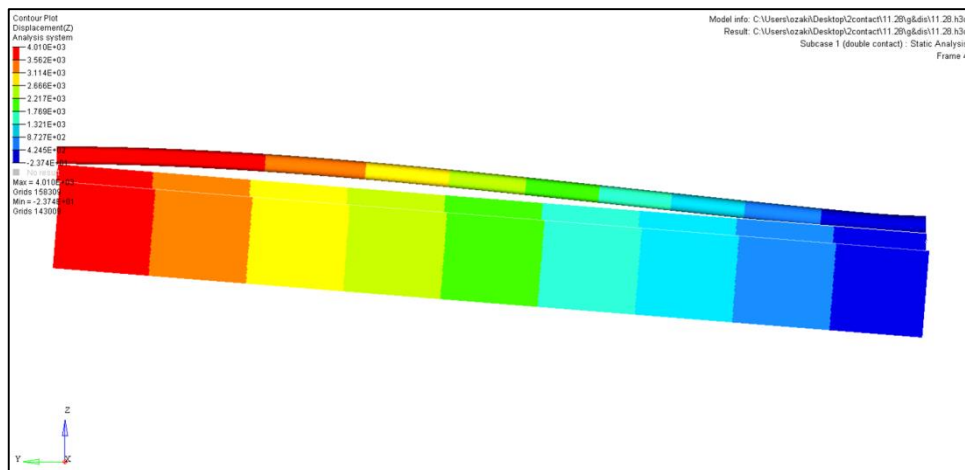


Fig 5.32 変位をかけた際のパイプと吸収材の z 軸方向の変位

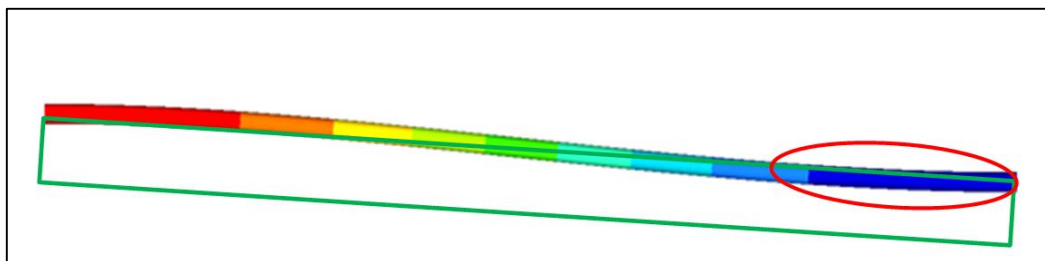


Fig 5.33 直線パイプの変位

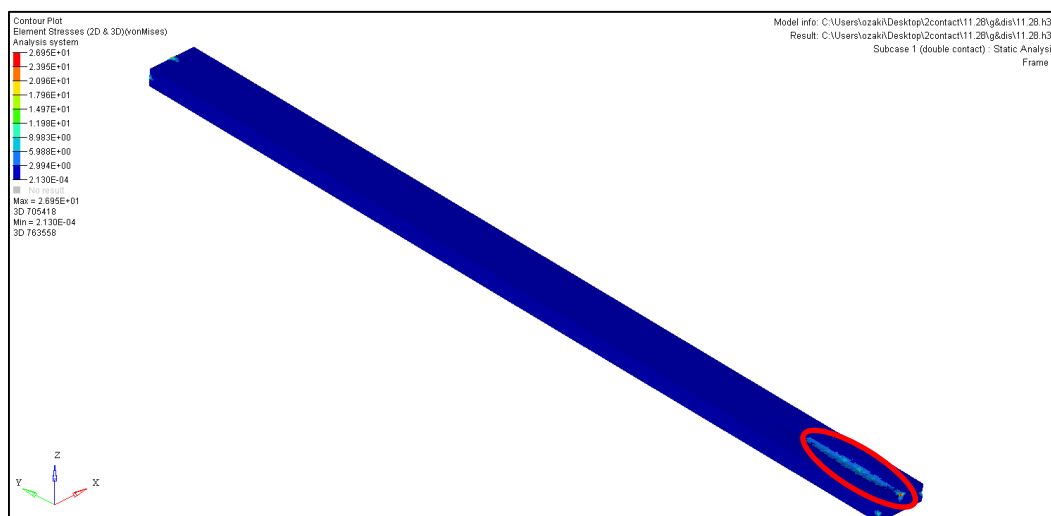


Fig 5.34 吸収材のミーゼス応力

○まとめ

浮体の変位がない場合の自重の影響を緩和するのに支持材の効果があつた。長さに沿って均等かつ分布的にパイプの重力を支えることできている場合、重力を軽減できていた。しかし、強制変位を一端にかけた際、パイプ全体を支えるようにするとパイプが支持材により無理矢理変位させられ、パイプのミーゼス応力を上げてしまっている。パイプが上下に変位してしまうとパイプの長さに沿って、分布的に支えることが難しくなる。

5.2.3.3 クランク型への適用

支持材をクランク型に適用するにあたり、端部から最も遠い中点を支えることを考える。

(i) L の長さに相当する支持材

クランク型に支持材を適用する際、パイプの中心点を支える形をとるよう、Fig 5.35 のようにクランク型の L の長さを支える吸収材を設けた。端部に上への強制変位を与えた結果を Fig 5.36 に示す。Fig 5.36 のように吸収材の端にパイプがのるような形になり、パイプの下部の端部に大きな負荷がかかるようになる。もともとクランク型は Fig 5.37 のように変位する。支持材がない状態でパイプが変位する点より支持材の端の点が高いため、パイプを強制的に上へ持ち上げることになる。そのため、持ち上げたパイプの端部付近の Fig 5.38 の断面の赤丸部分に y 軸方向に大きな力が発生する。このモデルの場合、支持材と接する点を持ち上げすぎていることから負荷が大きくなっていると考えられる。

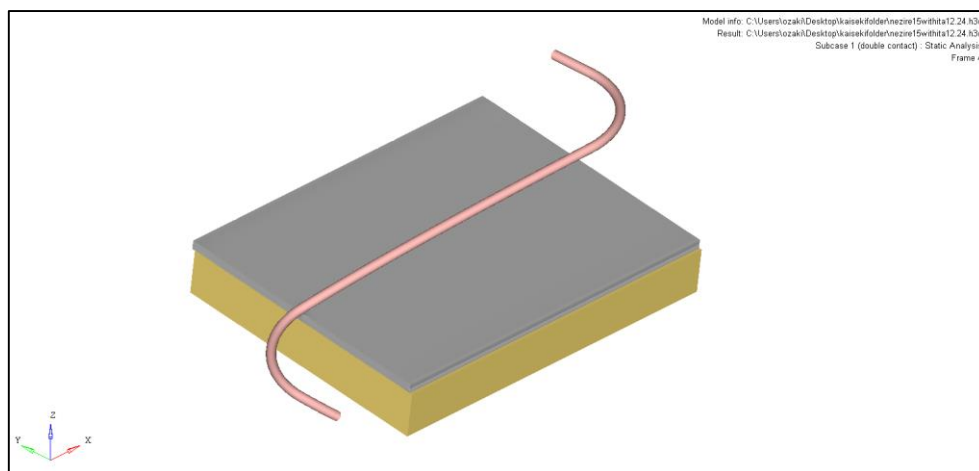


Fig 5.35 L の長さに相当する支持材

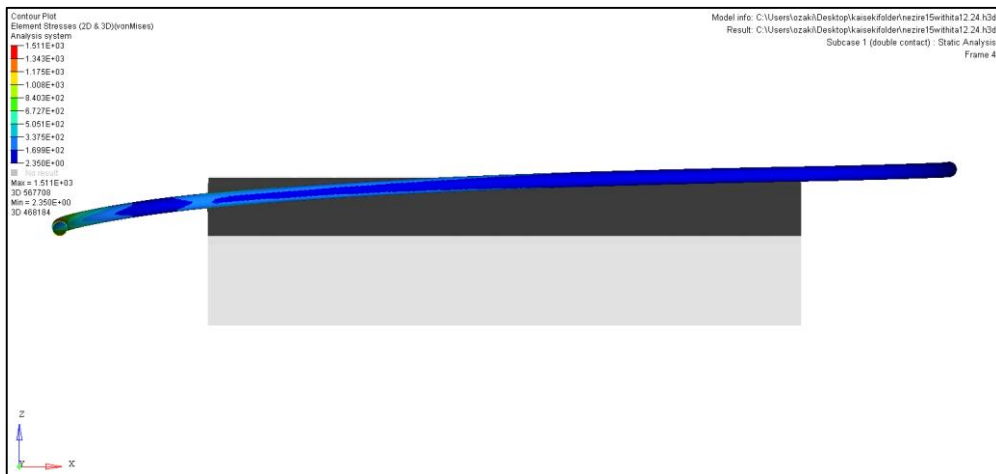


Fig 5.36 上への強制変位を加えた場合

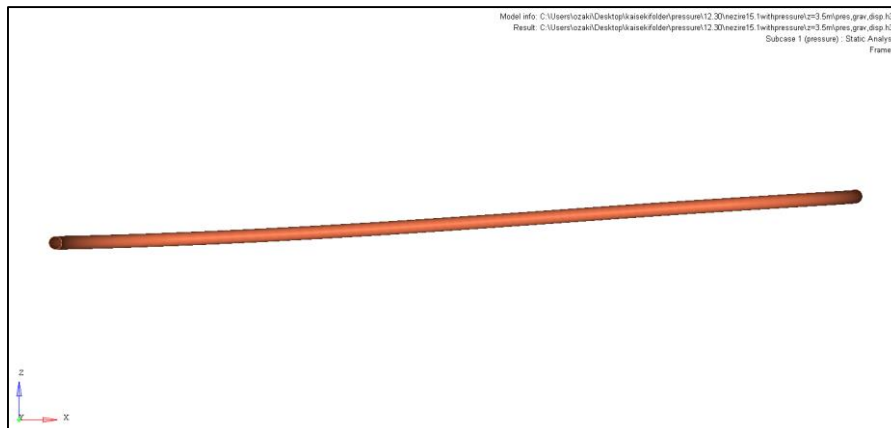


Fig 5.37 クランク型の変位の仕方

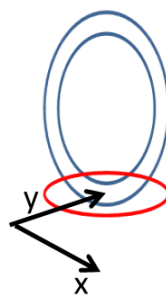


Fig 5.38 パイプ断面図

(ii) 中心点のみを支える支持材

次に、Fig 5.39 のようなモデルを検討する。パイプの中心付近のみを支えることで、(i) のように上へ支持材がパイプを無理矢理押し上げる事態を防ぎつつ、重力による負荷を吸収すると想定される。

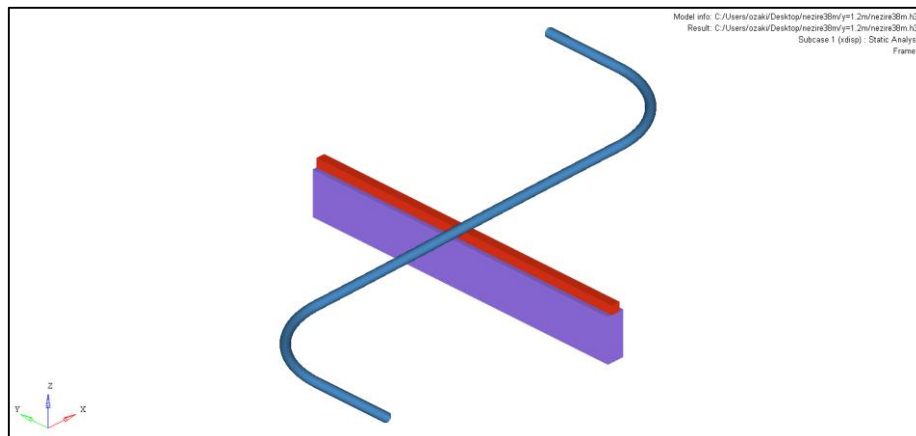


Fig 5.39 中心点のみを支える支持材

強制変位をかけた結果、重力吸収効果が見られた。吸収層の剛性が大きいと吸収層とパイプとの接触によりパイプの側面を損傷させてしまい、断面が変形してしまう。逆に剛性が小さすぎる場合は直線パイプに強制変位をかけた場合と同様にパイプが吸収材をひきずってしまう現象が見られた。そんな中、吸収層の材料のヤング率 E が $E=8.0 \text{ [MPa/mm}^2\text{]}$ の時、重力吸収効果が有効に働いた。この場合、Fig 5.40、Fig 5.41 のようにパイプが吸収層に若干接している状態であると言える。Table 5.6 に出力された結果を示す。

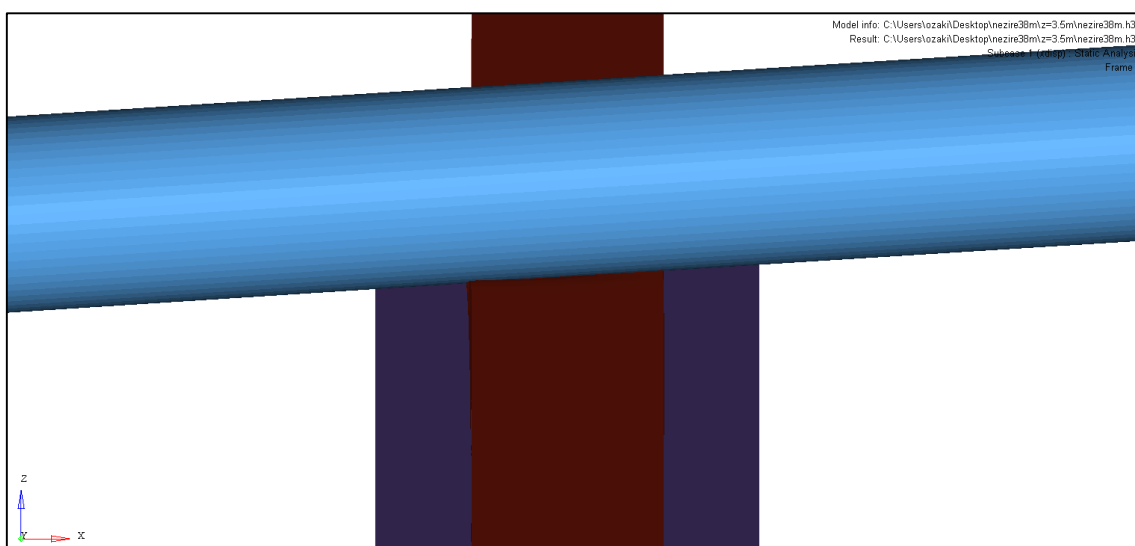


Fig 5.40 パイプと吸収層の接触

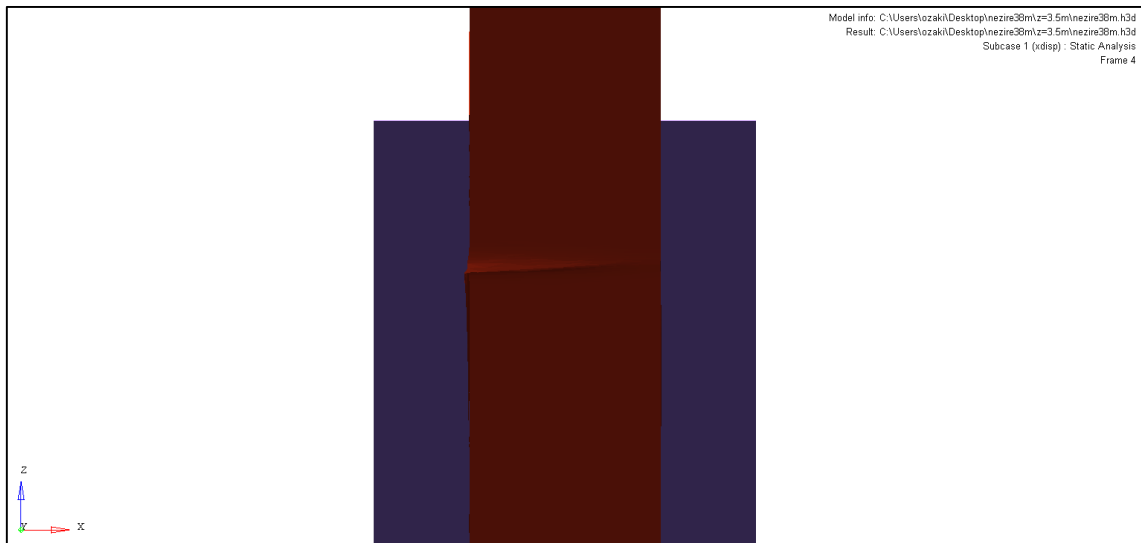


Fig 5.41 吸収層の接触部分

Table 5.6からも分かるように支持材を設けない場合と比較しても応力が軽減されていることが読み取れる。支持材の両端でパイプの高さが異なる場合、吸収材の上に完全にのるよりも接するくらいが良いと考えられる。片端のみ支持材に完全に乗ってしまうと（i）と同じ状況が発生すると考えられるからである。

Table 5.6 クランク型における支持材の効果

	FCLO・陸間距離 30m	
von mises	397.6	308.7
		単位: MPa

5.3 他方向の検討

支持材のついたクランク型モデルの他方向への影響を検討する。

支持材は z 方向の変位のみならず、 x 、 y 軸方向の変位にも効果を発揮する。Table 5.7 に FCLO・陸間が 30m の時の支持材の有無の比較を行った図を示す。Table 5.7 より支持材がないときに許容応力の 345MPa を超えてしまうモデルが重力を吸収することで許容応力以内に収まり、破断を免れることが分かる。変位をかける方向によって、かかる応力は異なるが、常に自重はかかり、パイプに大きな負荷を加えていることから、支持材を設けることのメリットは非常に大きいと言える。

Table 5.7 z 方向以外の支持材の効果

x=0.45m	FCLO・陸間距離 30m		y=1.2m	FCLO・陸間距離 30m	
	無	有		無	有
von mises	478.9	454.5		207	199.1
					単位: MPa

しかし、陸・FCLO 間の距離が 30m の際、 x 軸方向の変位がパイプに大きな負荷をかけることが分かった。Fig 5.42 に支持材がある状態のクランク型モデルを示す。 x 軸方向に変位をかけるとパイプの端部の側面の外側に大きな応力がかかっていることが読み取れる。この応力を軽減するには D の長さを伸ばすことで可能になると考えられる。

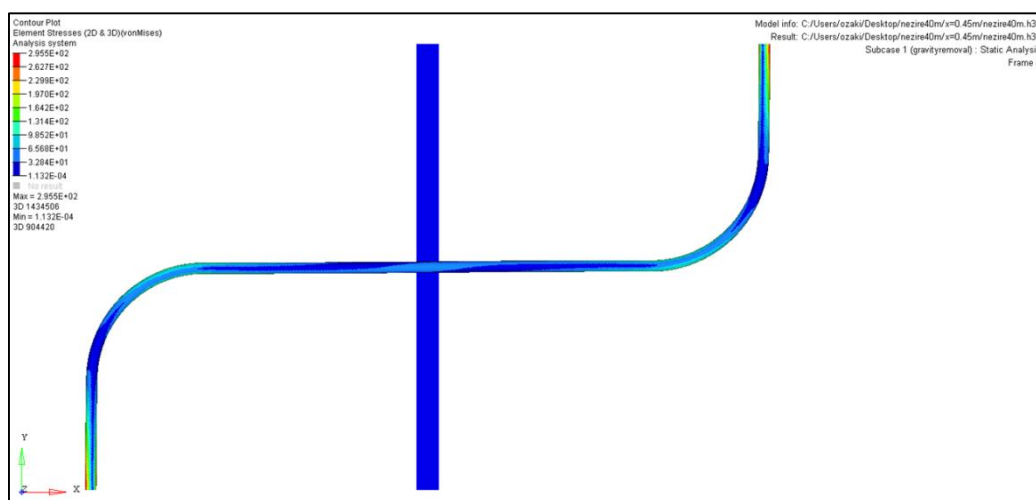


Fig 5.42 x 軸方向に変位させた際のクランク型のミーゼス応力

D を伸ばした際の結果を Fig 5.43 に示す。D を伸ばし、陸・FCLO 間の距離を伸ばすことで x 軸方向の変位による応力は緩和されることが分かった。x 軸方向の変位による応力が許容応力内に入る陸・FCLO 間の距離は 35m~36m の間であった。

そこで、陸・FCLO 間の距離が 36m のクランク型モデルに対し、x、y、z 軸方向に強制変位をそれぞれ加えた結果を Table 5.8 に示す。Table 5.8 より x、y、z 軸方向の強制変位に対し、全方向で許容応力内に収まることが読み取れる。

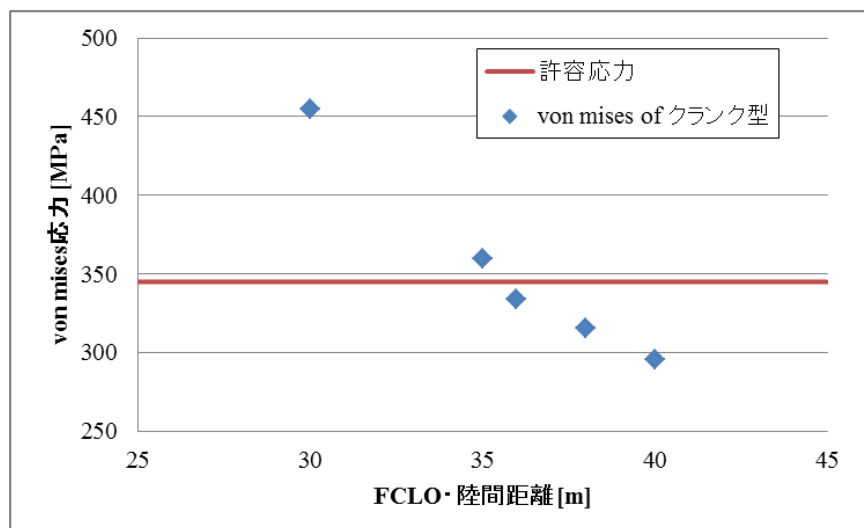


Fig 5.43 FCLO・陸間距離を変化させた際のクランク型のミーゼス応力

Table 5.8 FCLO・港間距離 36m の時の各軸方向の変位に対するミーゼス応力

	FCLO・陸間距離 36m		
	x=0.45m	y=1.2m	z=3.5m
von mises	285.9	334	181.1
許容応力: 345MPa			
単位: MPa			

5.4 重力補助材の提案

本研究では、パイプの変形を下から支えることで重力による影響を軽減してきた。重力による影響を軽減する別の方法として、下の変形を支えるのではなく、パイプの下から力をかけることで支える方法を提案する。Fig 5.44 のようにパイプを下から支え、その支えを滑車を通した重りで引張り、一定の力をかけ続ける方法である。Fig 5.44 では中点の一点で支えているが、実際は何点かに一定の力をかけ、支えることを想定している。この方法でも支持材のような重力軽減策になると考える。

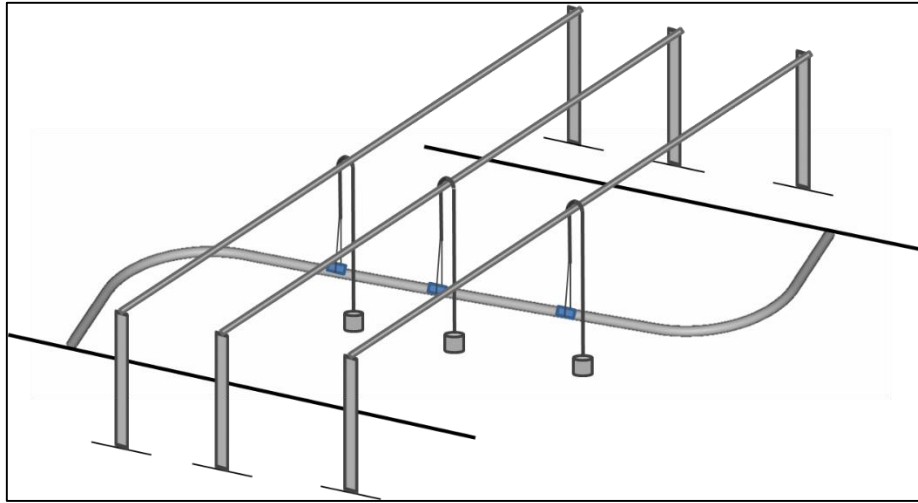


Fig 5.44 自重を下から力を加えることで点で支える重力軽減策

5.5 まとめ

クランク型は支持材を設けることで波浪、風、潮汐による強制変位が作用しても破断しないことが分かった。そのモデルを Fig 5.45 に示す。Fig 5.45 は FCLO・陸間の距離が 36m、横方向が 60m、総長が 88m になっている。

2次元の検討範囲では FCLO・陸間距離が 50m 以上にならない限り、自重・内圧含めない状態で 3.5m の上方向への強制変位によって破断してしまっていたが、3 次元的形状工夫をすることで 40m 以内に FCLO・陸間距離を抑えることができた。このモデルでは、自重、内圧、変位全てを含めて、許容応力の 345MPa に対し、余裕を持っている状態のため、FCLO・陸間のモノの輸送手段として、成立すると考えられる。

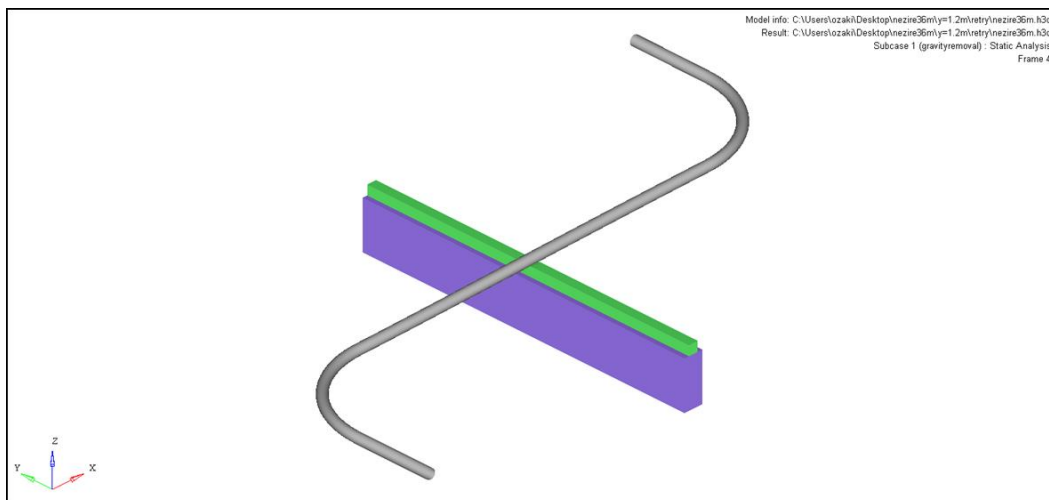


Fig 5.45 クランク型+支持材で許容応力内に収まるモデル

第6章 結言

6.1 結果のまとめ

本研究は、日本国内における CCS の早期実現のため浮体式 CCS プラント（CO₂ 分離回収、液化、一時貯蔵、荷役施設 FCLO : Floating CO₂ Capture, Liquefaction, Storage and Offloading）に関する検討を行った。FCLO は陸から浮体へ高温・高圧の流体が大量に輸送されることを想定しているが、その輸送手段の検討が未着手であった。本研究では陸・FCLO 間の流体の輸送手段の技術的成立性を検討した。

i. FCLO の係留の初期計画による水平・鉛直変位の推定

FCLO の規模の決定、係留の初期計画を行った。また、波浪、風、潮汐の FCLO への影響を分析し、水平・鉛直方向の変位の推定を行った。波浪条件はうねりの影響が抑えられた港を想定し、最大有義波高 1.9 m、最大有義波周期 12 秒で検討した。基準風速は 36[m/s]とし、風荷重の計算を行った。潮汐は日本の発電所付近の過去最大潮位を調査し、最大潮位を 2.3m とした。その結果、

- ・ x 軸（surge 方向）に 0.45m（風：0.15m、波浪：0.3m）
- ・ y 軸（sway 方向）に 1.1m（風：0.3m、波浪：0.8m）
- ・ z 軸（heave 方向）に 3.5m（波浪：1.2m、潮汐：2.3m）

最大で変位するという結果となった。

ii. 陸・FCLO 間の流体輸送に使用する輸送手段の検討

陸・FCLO 間の流体輸送に使用する輸送手段の検討を行った。輸送手段には大口径、高温・高圧への耐久性、強度が必要であり、この項目で輸送手段の選定を行った。その結果、鋼管（UOE 鋼管）に輸送手段を決定した。X100（降伏応力：690MPa）グレードの口径が 1.0m、肉厚 30mm の UOE 鋼管を使用することに決定した。

iii. 陸・FCLO 間の輸送手段の形状評価

i の検討より、特に z 軸方向の変位が大きいことからパイプが上へ 3.5m 変位した際のパイプの強度解析を行った。本研究では、上への 3.5m の強制変位に直線パイプが耐えられないため、パイプの形状工夫により変位による応力を吸収できるモデルを探索していった。

降伏応力を 690MPa、安全係数を 2、許容応力を 345MPa とし、形状評価を 2 次元・3 次元で実施した。

2次元 FEM 解析により得られた結果を以下に示す。

- ・ 端部の曲げが破断に大きく寄与している
- ・ 形状工夫による応力の軽減が可能
- ・ コサイン型が有望であり、自重を入れない状態であれば、強制変位による破断は曲げモーメント、せん断力の両方で起きなかった
- ・ 自重の作用が非常に大きく、自重を含めて解析するとパイプは破断する
- ・ 鉛直変位のみを吸収させようとするだけでも陸・浮体間距離は 50m 以上と大きい

端部応力がパイプの破断に起因していることから端部の固定端という条件を緩和することを検討した。端部の角度を自由化するため、パイプのジョイントを調査した。その結果、株式会社水研が開発したダクタイル鋳鉄製ボール型可撓伸縮管のフレキシベンダーが有望であると分かった。フレキシベンダーは7°の角度自由度を持っているため、解析の際左右上下7°の自由度を許すこととした。

角度自由にして直線パイプを解析した結果、破断せずに陸・FCLO 間が接続可能であると分かった。しかし、フレキシベンダーは地下に埋設されることを想定しているためジョイントの強度に不安がある。変位した際ジョイントにパイプの軸方向に引張が発生するため、ジョイントが応力に耐えられず壊れる可能性がある。

3 次元的工夫をパイプ形状に行った。その結果、クランク型が z 軸方向の強制変位による応力を軽減できることが分かった。クランク型が自重・内圧・変位を加えた場合、最も許容応力に近づいたが、自重の影響が大きく、パイプは結局破断してしまうという結果となった。そこで、重力による影響を軽減する対策をとった。

重力軽減策として、パイプの下に剛性の小さい支持材を設置し、重力による影響を軽減した。しかし、パイプの長さに沿って、分布的に支えようとすると、支持材がパイプを変形させてしまうという事態が発生し、パイプにかかる負荷が大きくなってしまった。そこで、パイプ全体を支えるのではなく、点で重力を支える策をとった。

クランク型に対し、両端から最も遠い中点付近のみを支持材で支えた結果、上へ強制変位を与えた際の重力の軽減に成功した。このクランク型モデルは陸・FCLO 間の距離が 30m、水平距離が 60m、総長が 81m のパイプであった。

このクランク型モデルに対し、x 軸方向、y 軸方向の変位を適用した。適用した結果、x 軸方向の変位による端部への影響が大きく、陸・FCLO 間が 30m のクランク型では許容できないことが分かった。x 軸方向の応力を軽減する策として、陸・FCLO 間の距離を伸ばした。その結果、陸・FCLO 間の距離が 36m、水平距離が 60m、総長が 88m のモデルが x、y、z すべての方向の変位に耐久可能であることが分かった。

以上の検討によって、直径 1m の鋼管で陸・FCLO 間の距離を 36m、パイプの両端を固定端とし、x、y、z 方向に風・波浪・潮汐による変位を加えても安全率 2 の許容応力内に収まることが分かった。

x、y、z 軸方向に大きな変位がかかる場合、鋼管ではなく、フレキシブルな輸送手段が検討されるが、本研究ではコスト、口径、温度・圧力条件から安価かつ強靱な鋼管を使用した。また、鋼管を用いて、多方向への変位に適応可能な形状を見出すことに成功した。

本研究では、船舶輸送方式を用いた日本国内における CCS の実現の課題であった発電所用の土地の確保を FCLO で解決することを目指し、FCLO の課題になると予想される陸・浮体間の流体輸送手段として鋼管を使用して、その形状工夫によって解決できる目処を得たものである。

6.2 今後の課題

本研究は係留計画、陸・FCLO間の流体輸送手段の形状評価をオーダー的に実施したため、各要素の詳細な検討はされていない。今後はその詳細な検討を実施する必要がある。以下に今後の課題を記す。

- 波浪条件・風・潮汐の地域を指定
 - 詳細のケーススタディの場合は場所も具体的に決め、波浪条件、風、潮汐の影響を検討する必要がある。
- FCLOの浮体サイズ、形状の詳細な検討
 - 本研究では、分離・回収施設、液化施設に関する検討を行っていないため、浮体サイズをエリアで決定し、形状は箱型浮体としている。また、建屋のサイズは分離・回収施設と液化施設に高さの差があり、風荷重に影響している。今後は、建屋の高さ調整、プラントの角を丸める等の風荷重軽減策を実施するのに加え、FCLOのサイズ、形状に関する詳細な検討を行う必要がある。
- 係留計画の詳細検討
 - 本研究では、係留の初期計画を実施した。その中で、固有周期が波の卓越周期から十分離れるようにしたが、具体的な海域、海象データに対しての評価が必要となる。他にも、フェンダーの選定、配置の具体的な検討、ドルフィンの詳細設計など具体的に成立性検討を実施する必要がある。
- x、y、z方向の複合的な変位の考慮
- 傾斜の考慮
 - 本研究では、上下左右に変位した際の検討はしているが、傾いた際の検討ができていないため、今後実施する必要がある。
- 疲労強度の評価
 - FCLOは波浪・風・潮汐の影響を絶えず受け変位している。絶えず力を受けるFCLOの詳細設計の際には、輸送手段となるパイプの疲労強度は重要な検討項目となるため、分析する必要がある。
- 緊急時のパイプの離脱方法の検討
 - 津波や大きな地震といった緊急時の際にパイプの離脱方法を検討する必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの人に本当にお世話になりました。ここで感謝の意を述べたいと思います。

本研究を行うにあたり、東京大学学部時代から3年間にわたりご指導いただきました尾崎雅彦教授に心より感謝いたします。この2年間で取り組んだテーマは探索型の研究で、何も知識のない状態から試行錯誤を繰り返し、非常に苦勞しましたが、0から自分の思うように作り上げるこのチャレンジングなテーマを頂き、本当に有意義な二年間を送ることができました。また、様々な分野の知識を要した本研究において、常に親切に、そして真剣に私の質問や相談にのっていただき、本当に感謝しています。3年間ありがとうございました。そして、これからもよろしくお願いいたします。

副指導員の山口一教授にも御礼を申し上げます。面談・中間審査において、客観的な視点から意見を頂いたのに加え、私が見落としていた部分について鋭い視点でご指摘くださり、研究を進める上で非常に参考になりました。心から感謝申し上げます。

尾崎研究室の先輩、同期、後輩、そして尾崎教授秘書の小河原千織さんには本当にお世話になりました。

尾崎研究室OBの岡崎さん、松原さん、横山さんは私が学部4年生の時に院生の偉大さを感じさせてくれる存在でした。私が先輩方に質問をするとすぐに答えが返ってくる底なしの知識量、そしてどれだけ修士研究で忙しくても私の相談に親身にのっていただき、優しさ、そして人としてのカッコよさを感じていました。先輩方が私の院生としての理想像です。

ウォンさんは昨年度在籍した唯一の直属の先輩で1年間隣の机で研究に励んでくれました。ウォンさんはどれだけ自分が追い込まれていても、研究・就職活動・私生活などの話に付き合っていていただき、感謝しております。

小河原さんは常に底なしの明るさで私を元気づけてくれました。小河原さんの優しさや明るさが研究生生活の心の支えの一つでした。小河原さんと話している時間は他の事を忘れて純粋に心を安らげることができました。心から感謝申し上げます。

同期の新井君とは互いに切磋琢磨し、研究に励んでくれました。新井君の最初のゼミでの発表技術、その場をうまく切り抜けることのできる頭のキレに感動しつつ、この人に負けたくないと思い、2年間すごしてきました。非常に適当でたまに何考えているか分からない新井君でしたが、一緒に頑張ることのできる素晴らしい同期をもてたことに感謝しています。陽介ありがとう。

そして、後輩の廬君には本当にお世話になりました。研究の手伝い、相談、そして私が追い込みの時期で栄養が偏りがちなときに料理を作ってきていただき、本当に感謝しています。

また張さん、山本君には精神的に支えられる部分が多くありました。感謝しております。

また鈴木研究室 OB の柴田さん、木村さん、菊池さん、早稲田研究室 OB の戸田さん、和田さんには研究のアドバイス、就職活動の相談、昼・夜ごはんをご一緒させていただき、楽しい時間を過ごさせていただきました。感謝しています。

また、ルームメイトの高木研の五之治、佐藤研の清水には 3 年間一緒に卒業論文、就職活動、修士論文と苦楽を共にしてきて、その都度相談し合ったり、一緒に飲んだり、三人で家で過ごす時間が本当に楽しかったです。二人との思い出たちは柏生活の宝物です。

榎野君と石原君は筋トレや日本代表戦観戦など様々なイベントで共に過ごし、そして、研究でも互いに鼓舞・励まし合いここまで頑張ることができました。本当に感謝しています。

またここに挙げた以外にも海洋技術環境学専攻の方々、同期、東大バスケ部の同期、渋谷教育学園の同期、アルバイト先の仲間など多くの方にサポートしていただき、研究をやりとげることができました。本当にありがとうございました。

最後に、いつも支えてくれている両親、弟の浩紀、祐紀、祖父母への感謝の念をもって、謝辞を締めくくりたいと思います。本当にありがとうございました。

参考文献

第1章 序論

- 1.1. 気象庁 HP、http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/portal/chishiki_ondanka/p02.html
- 1.2. IEA Energy Perspective 2010
- 1.3. 二酸化炭素回収・貯留（CCS）研究会（2007）「CCS 研究会中間取りまとめ 地球温暖化対策としての CCS の推進について」 pp.1
- 1.4. 花井圭一（2009）「二酸化炭素回収貯留は地球温暖化の抑止力となり得るか」 pp.7
- 1.5. 山田興一、藤岡祐一、佐藤光三 et.al.（2009）『温室効果ガス貯留・固定と社会システム』. コロナ社
- 1.6. 地球環境産業技術研究機構 HP、
<http://www.rite.or.jp/Japanese/project/tityu/system.html>
- 1.7. 神鋼エアテック株式会社 HP、http://shinko-airtech.com/gasliquid_CO2.html
- 1.8. 地球環境産業技術研究機構 HP、<http://www.rite.or.jp/Japanese/project/tityu/fuzon.html>
- 1.9. 地球環境産業技術研究機構 HP、<http://www.rite.or.jp/Japanese/project/tityu/yuko.html>
- 1.10. M. Ozaki, T. Ohsumi (2011) CCS from Multiple Sources to Offshore Storage Site Complex via Ship Transport, Energy Procedia 4.

第2章 FCLO の係留の初期計画

- 2.1. 気象庁 HP、<http://www.jma.go.jp/jp/choi/>
- 2.2. 独立行政法人港湾空港技術研究所：ナウファス、
<http://nowphas.mlit.go.jp/nowphasdata/sub300.htm>
- 2.3. 株式会社協和 HP、<http://www.kyowa-kb.co.jp/documents/doc/06.php>
- 2.4. 日本船舶海洋工学会監修（2013）『船舶海洋工学シリーズ⑫海洋構造物』. 成山堂書店
- 2.5. Bridgestone HP、
http://www.bridgestone.co.jp/business/dp/construction/fender_beam/supercell/suc3000h.html
- 2.6. 海洋工学委員会編（2003）『実践浮体の流体力学. 前篇—動揺問題の数値計算法』. 成山堂書店

第3章 陸・浮体間の連絡手段

3.1. Niigata Loading System HP、

http://www.niigata-ls.co.jp/jp/products/loading_arm/index.html

3.2. 浅沼貴之（2009）「LNG 出荷用フローティングホースの開発」『海技研ニュース 船と海のサイエンス』. pp11-14. 独立行政法人海上技術安全研究所

3.3. 梅原満夫（1991）「フレキシブルライザー実海域実験について」『古河電工時報』. no.88, pp.86-91

3.4. 正村克身（2007）「鋼管の基礎知識」『 JFE 技報 No.17』. pp7-13

第4章

4.1. 堀辺忠志（2008）『Visual Basics でわかる やさしい有限要素法の基礎』. 森北出版株式会社

付録

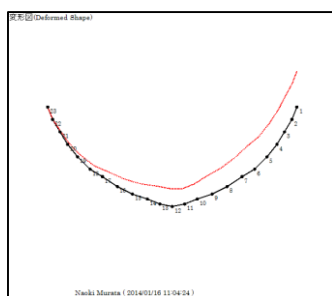
2次元アイデア検討詳細

2次元の形状評価において、コサイン型以外のモデルについて紹介する。その検討したモデルは円弧型・クリップ型・洋上給油型の3つの形状である。

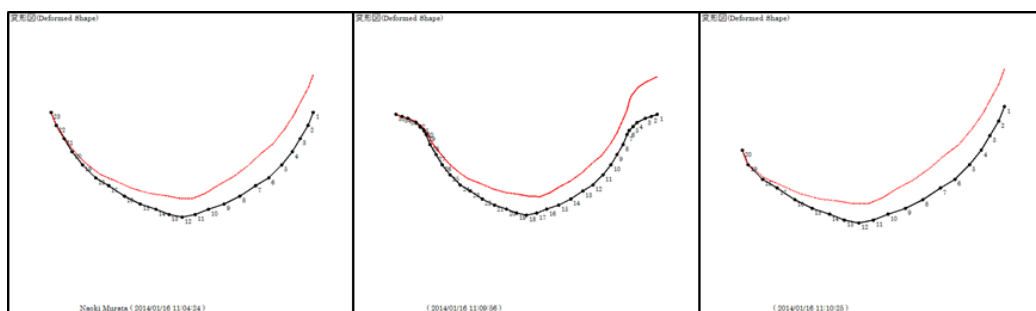
円弧型

直線パイプの場合、曲げモーメントの影響が破断に大きく働いていることが分かった。その曲げを軽減する方法として考案したのが円弧型モデルである。パイプの形状を円弧にすることで曲げの影響を引張に負荷に分散させることで全系にかかる負荷を小さくすることを期待する。円弧型モデルは以下の図のように変位する。端部が鉛直方向に引っ張られることにより、パイプが鉛直方向に伸びると考え、曲げではなく、引張が作用すると予想される。

この円弧型の比較対象として、水平長さが同じの直線パイプを使用する。また、左図は通常の円弧型、中央は端部を直線ではなく、弧にしたモデル、右は円弧の端部に上下差を設けたモデルである。



円弧型モデルの変位の仕方



円弧型モデル形状

○結果

通常の円弧の場合、せん断力、曲げモーメントの両方に効果があった。しかし、上下差を設けると両方数値が大きくなってしまい、逆効果となってしまう。せん断力は約3倍、曲げモーメントは約2倍となっている。端部をカーブさせたモデルでは、曲げモーメント以上にせん断力が軽減されていることが読み取れる。以下の表に同じ長さの直線パイプ、円弧型3つのモデルの比較を行った結果を載せる。

直線パイプと円弧型モデルとの比較

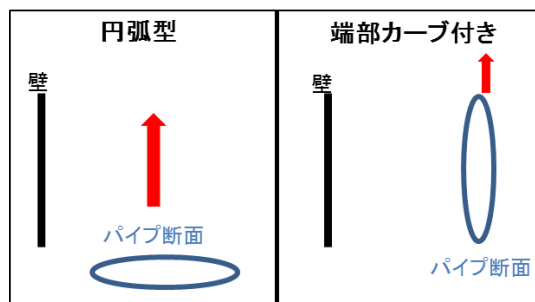
	直線パイプ	円弧型モデル	端部カーブ付き	上下差モデル
せん断力	7.67E+07	4.49E+07	2.82E+07	1.44E+08
曲げモーメント	3.83E+08	2.20E+08	1.77E+08	4.61E+08

○考察

パイプの形状を円弧型にすることで、せん断力、曲げモーメントの両方に応力軽減効果が見られた。それは曲げモーメントの負荷を引張に一部分散させたからだと考えられ、結果として最大約半分の数値までモーメントを軽減できている。

また、カーブ付きモデルと円弧型モデルを比較するとせん断力、モーメントともに軽減されていることが分かる。円弧型と端部カーブ付き型の壁（FCLO・港との接続部）とパイプの断面の関係を以下の図に示す。円弧型の場合、断面と壁が垂直になっているため、フランジなどのジョイントをつける形になる。変位の仕方も断面がそのまま上に延びる形になる。端部カーブ付き型の場合、壁とパイプ断面が平行になっているため、直線パイプ同様曲げが大きく全系に作用することになる。しかし、せん断力・曲げモーメント共に端部カーブ付き型の方が軽減できていることから、円弧型よりも端部カーブ付き型の方が端部にかかる大きな負担を全系で吸収できていると考えられる。

また、端部に上下差を設けることにメリットがないと判明したため、今後の知見として生かす。

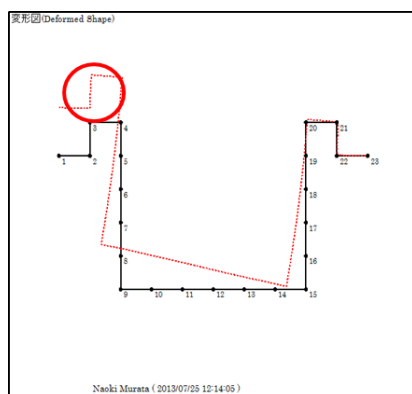


円弧型、端部カーブ付き型の断面・壁の関係／変位方向（赤矢印）

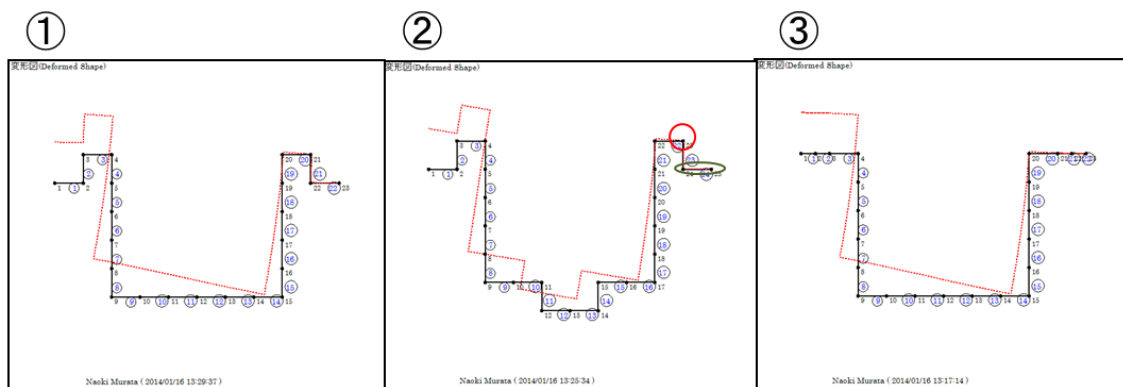
クリップ型

クリップ型はクリップの開く動作をイメージしたアイデアである。クリップは両端を内側に押すと仕組みになっており、その原理をパイプの形状に適用することを考える。クリップ型では、直線パイプの時に問題となっていた曲げモーメントを図の赤丸部分の圧縮で軽減すること期待する。

本節では①～③のモデルを紹介する。比較対象は水平方向の長さが同じの直線パイプを使用する。



クリップ型の応力軽減効果が見込まれる箇所



クリップ型形状

○結果

直線パイプとクリップ型を比較するとどのモデルもせん断力、曲げモーメント共に軽減できていることが分かる。特に、②のモデルで応力軽減効果が大きいと言える。各モデルについて分析する。

直線パイプとクリップ型の比較

	直線パイプ	①	②	③
せん断力	7.67E+07	3.10E+07	1.39E+07	2.13E+07
曲げモーメント	3.83E+08	1.55E+08	1.21E+08	1.82E+08

①はクリップに最も形状を似せたモデルである。①は鉛直方向の強制変位がそのまま鉛直方向の力となって、系に作用しており、**x** 軸方向の変位も小さい。その結果、壁と垂直なパイプの部分のせん断力が大きくなっている。

②は3つの中で各節点の変位が最も大きいモデルとなっている。また、せん断力、曲げモーメント共に最も小さいモデルとなっている。鉛直方向に **4 m** 変位させているが、**x** 軸方向の運動も大きいため、壁に平行のパイプ部分のせん断力が大きくなっている。曲げモーメントは赤丸の節点が最大となっている。

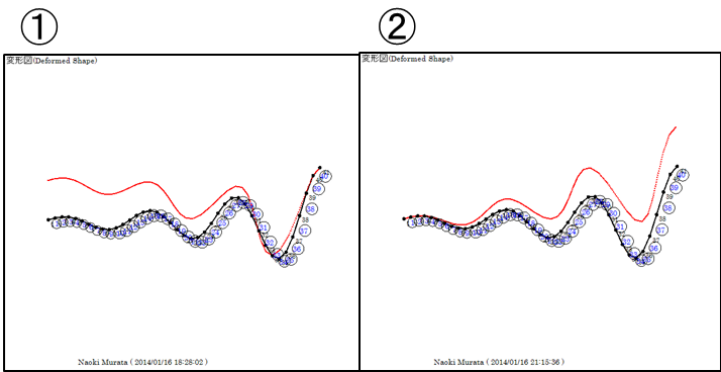
③は最もシンプルな形状である。せん断力は②同様の傾向を示し、壁に平行のパイプ部分が最も大きい。曲げモーメントは固定されている端部が最も大きい。また、3つのモデルの中で最も柔軟性が低い傾向になる。

○考察

クリップ型の形状にすることで、曲げモーメント、せん断力の両方を軽減できていることが分かる。特に②のモデルは柔軟に変位する形状であったため、軽減効果が最も顕著であった。しかし、図の赤丸の要素が **x** 軸方向にまったく変位しないことから、その上の節点に大きな負荷がかかり、曲げモーメントが大きくなってしまっている。曲がり梁のようにカーブ型にすることで、この影響は緩和することができると考えられる（円弧型の知見より）。クリップ型の検討より全系が柔軟に変位することができるモデルは曲げ、せん断共に応力軽減効果が大きいと言える。

洋上給油型

洋上給油型は船舶の洋上給油方法を参考にしたアイデアである。洋上給油装置は、補給艦と受給艦との間に1本のスパンワイヤを張り、それにつりさげた滑車にホースを吊るし、ホースを両端に連結後、補給艦からポンプにより送油され、①、②のような形状をしている。強度解析を実施する。



洋上給油型（①、②）

○結果

以下の表に直線パイプとの比較を示す。直線パイプより曲げモーメント、せん断力共に軽減されていることが分かる。

Table 洋上給油型・三角関数型と直線パイプの比較

	直線パイプ	①	②
せん断力	9.65E+06	6.44E+06	6.43E+06
曲げモーメント	9.62E+07	7.49E+07	7.14E+07

○考察

高さがある側に変位をかけた場合、変位をかけた部分の形状の規模がもう片端より大きいいため、全体的に変位し、応力が軽減されていると考えられる。しかし、円弧型の知見より、端部に上下差を設けることにメリットがないことから、このモデルは適当ではないと言える。