

## 論文の内容の要旨

論文題目 A study on hull shape optimization for TLP by using  
optimization algorithm  
(最適化アルゴリズムを用いたTLP浮体形状最適化に関する研究)

氏 名 杉田 年男

Tension Leg Platform (TLP)は、テンドンにより係留された動揺の少ない浮体式石油生産プラットフォームであり、これまで20基以上のTLPがメキシコ湾や北海などの海域を中心に設置されてきた。近年の南アメリカ、西アフリカ、東南アジアなどの海域における海洋石油の生産の増加に伴い、これまでのメキシコ湾や北海などの厳しい海象条件だけでなく、比較的穏やかな海象条件の地域にもTLPが設置されるようになってきた。またメキシコ湾の海象条件はハリケーン(Rita, Katrina)襲来以降、より厳しいものに変更されることとなった。従来の海洋構造物の設計は、海象条件などの与えられた設計条件に基づいて、構造や性能・復原性などの多分野にわたる設計要件を満たしつつ、経済性や安全性・工作性などが最大化されるような最適な船体形状を設計すべきであるが、限られた時間でこれを実現するのは困難である。実際には過去の経験や、経験的なファクターを用いたり、支配的となる設計条件を推測し問題を簡略化して設計を進めるなどの方法をとることによって、試行錯誤する時間やコストを短縮することが行われる。しかし前述のような設置経験が少ない地域や、新しい海象条件では、こういった過去の経験やデータは必ずしも利用できるとは限らない。

そこで、本研究では最適化アルゴリズムを適用し、TLP船体形状の最適設計を行うシステムを開発し、既存のTLPの船体形状と比較や、様々な海象条件における設計の検討を行った。先行研究として、Claussらは最適化アルゴリズムを用いてTLPのテンダンの張力応答を最小化するような船体形状を求めた[1]。これらの研究のように、従来、海洋構造物の設計において、波浪中での応答を改善することは非常に重要であるが、他の条件が設計を支配している場合は効果が期待できない。また、これらの研究では最適化する際に、初期形状として既存のTLPの船体形状を与えており、機能が船体形状の改善に留まっている。本研究では、海象条件やトップサイド、ライザーなどの設計条件をもとに、TLPの設計で重量な運動性能や構造・復原性などを評価し、重量が最小化された船体を求めるような、実用的なシステムを開発した。

船体の初期設計作業を、複数の制約条件付きの多変数最小値問題としてモデル化を行った。本プログラムは初期設計段階に必要な設計要件を満たす最適解を求め、テンドンの最大張力や、TLPの最大オフセット、運動応答関数など、後の設計を進めるのに必要なデータを提供することができる。変数は、コラムやポンツーンなど船体の主要寸法とテンドンの外径と肉厚とした。海象条件や、トップサイド・ライザーの情報など、設計条件は入力定数として扱った。制約条件としては、効率的に最適解を探すための初期制約条件と、各種解析の後に得られる構造や性能に関する制約条件とがある。これらの制約条件はペナルティ関数法を用いることによって、修正目的関数の中にペナルティ項として組み込まれる。目的関数としては、建造コストを想定して船体とテンドンの重量の荷重和を用いた。

本研究ではTLPの中でも、Conventional TLPを取り扱うことにする。船体の主要寸法を表すパラメータは、コラム径・高さ・間隔、ポンツーン幅・高さ、喫水の6つである。テンドンに関しては、変数は直径と肉厚の2つで、テンドンの設置位置は船体形状に従って変化し、本数はあらかじめ設定された本数を使用する。直径と肉厚は、上端から下端まで一定であると仮定する。

流体計算・構造計算には多くの計算時間を要するので、計算効率改善のために、船体形状に関係が深い次の条件を、他の計算に先立って評価する。(1)Ballastの量は最低でも排水量の5%確保する。(2)据付時のメタセンタ高さが十分ある。(3)建造・輸送時のメタセンタ高さが十分ある。(4)デッキの支持位置がコラム上に位置する。(5)コラム高さがAirgapの条件を満たす。(6)Tendon Pretension Ratioが5%~50%の間に収まる。

メタセンタ高さの制約は今回2m以上とした。また建造・輸送時は喫水が15m以下に制限されると仮定した。TLPには、トップサイドを洋上で搭載するタイプもあるが、今回は造船所岸壁で搭載すると仮定している。最適化の過程のあるステップにおいて、これらの条件が満たされなかった場合、流体計算や構造計算を取りやめて、次のステップに移る。また、各種計算後に評価される性能や構造に関する制約条件は業界標準と船級規則に従って評価される。

波浪中でTLPに働く流体力は、境界要素法を用いて計算を行った。複素速度ポテンシャルを用いて、三次元浮体のディフラクション・ラディエーション問題を解き、付加質量係数、造波減衰係数、波強制力や波漂流力を求める。本研究では、初期設計段階での使用を考えているので、波漂流力以外は一次の流体力のみを扱っている。また水深は入射波の波長より十分長いと仮定し、無限水深を仮定している。これらの流体力係数は、プラットフォームの性能を計算する際の運動方程式に用いられ、また船体外板にかかる流体圧の分布や運動方程式を解くことによって求められた慣性力は構造計算の荷重として利用される。

流体計算のモジュールで求められた流体力係数をもとに、運動方程式を組み立て、プラットフォームの性能として重要な、最大オフセット、最小エアギャップ、最大・最小テ

tendon張力, 最大 tendon 傾斜角を条件ごとに統計的手法を用いて求める. 運動方程式は周波数領域での計算手法を採用し, 定常状態(Mean), 波周期(Wave Frequency), 長周期(Low Frequency)に分けて立式する. TLPのように短い固有周期を持つ海洋構造物では, 高次の流体力による高周波数(High Frequency)の振動現象が起こりうるが, 初期設計で使用するという目的上, ここでは経験的なパラメータを用いて, tendonの張力に対してのみ, その影響を簡易的に考慮に入れる. またエアギャップは, TLPの運動応答と, 流体計算の際に求めた速度ポテンシャルから推測した波面高さを用いて, 最大応答値を統計的に推測する. これらのプラットフォームとしての性能を表す指標(Global Performance Parameter)はAPI2Tの設計要件に従って, 制約条件として評価される.

構造計算には, 船体及びトップサイドを3次元の梁要素でモデル化した骨組モデルを使用した. tendonは等価の剛性を持ったばね境界条件によって, モデル化されており剛性の十分高い梁要素によって船体と接続されている. 各梁要素は流体計算のパネルモデルの要素との対応が設定されており, 外板にかかる流体力と, TLPの運動による慣性力を受け取り, 各波周期で各要素の断面力を算出し, 応力を評価する. 各船体の梁要素の断面性能は, 各部材の板厚と防撓材サイズから計算されている. 各部材の板厚と防撓材サイズはABS MODUによる要求値を初期値とし, 構造計算の結果, 応力が許容値以下に下がるまで増厚を繰り返し, 最終的な部材寸法で構造重量を算出する. ここでは横強度部材や, ブラケットなどの部材は経験的なファクターを用いて構造重量に組み入れた.

本手法を用いて, メキシコ湾(ハリケーン襲来以前・以後)と, 海象条件の比較的穏やかな東南アジア海域を想定し, 最適化の計算実験を行った. 海象条件は, カテゴリーごとにTable 3に示されている. 水深は1,000mを仮定し, トップサイド重量は2万トンを仮定している. ハリケーン襲来以降, API RP 2T 3rd EditionにおいてSurvival Condition (1,000 year return period)の考慮が要求されている.

計算結果として得られた船体の形状と, メキシコ湾に設置され同等のトップサイド重量(21,000MT)を持っているBrutus TLPの形状を比較した. ハリケーン以前の最適化結果とよく一致している. 結果として海象条件が, 穏やかになるほどコラム高さが低くなり, 重量が軽減される結果となった. また計算時間は1ケース平均3時間ほどである.

また, 目的関数の設定による解の違いを考察するために, 海象条件はハリケーン襲来以降のものを用いて, 目的関数を tendonの張力応答値(標準偏差)とし, 同様の最適化計算を行った. この計算では制約条件として, 初期制約条件のみを考慮している. 結果として, 目的関数を重量とした場合よりも, ポンツーンの高さが著しく低くなり, 喫水が深くなった.

最小値・収束の経路と, 一様乱数を使用して調べた制約条件を満たす船体形状の存在する範囲をプロットした. 海象条件が穏やかになるほど制約条件を満たす船体形状の存在する範囲は広がり, 船体重量も小さくなった. これは求められた形状からも分かるように, 主にエアギャップの制約条件が大きく影響しており, エアギャップ制約によりト

ップサイドの重心位置が高くなり、輸送・据付時の復原性や、最大・最小テンドン張力など制約条件との共通部分が狭まっていることが原因と考えられる。また、先行研究などで見られるように、目的関数をテンドンの張力応答とした場合、喫水が深くなり、また、ポンツーン高さが低くなって十分な全体強度が確保できず、また船体重量自体も本手法より大きな結果が得られた。

TLPの最適な船体形状の設計を行う実用的なシステムを開発し、メキシコ湾(ハリケーン襲来以前・以後)と東南アジア海域を想定して、TLP船体形状の最適化を行った。以下の結論が得られた。

- ・ 計算結果と、既存のTLPの船体形状を比較し、大まかに形状が一致することを確認した。
- ・ 海象条件が穏やかな場合ほど、主にコラムの高さが低くなり重量も軽減された。
- ・ 従来は複数の分野の技術者が数週間をかけて行う作業を、プログラムを使用して数時間で最適な船体形状と、そのRAOやテンドン張力、オフセットなどの設計データが得られた。
- ・ 先行研究で行われているように、張力応答を目的関数として最適化を行った場合は必ずしも実用的な結果が得られるわけではなく、本手法のように、より実際の設計に即した制約条件と目的関数を設定する必要がある。

[1] Clauss, G., and Birk, L., 1996. “Hydrodynamic optimization of large offshore structures”. Applied Ocean Research, 18(4), pp.157-171