

大水深用石油掘削・生産プラットフォームとしての Tension Leg Platform (TLP) について

(その 1 開発研究の概要と展望)

米家 卓也*

1. はじめに

従来、海底石油の生産にはジャケット、タワーなどの固定式構造物や重力式プラットフォームが用いられているが、これらは水深の増加に敏感であり大水深域では技術的・経済的問題が大きく、近年、これらに代わるべき新しい海底石油生産技術の開発が進められている。

Tension Leg Platform (TLP と略称される) は、現在開発されつつある新しい型式の大水深域石油生産用海洋構造物の一つであり (図 2 (a) 参照)、従来の半潜水式プラットフォームを上部構造とし、複数本の鋼索ないしは鋼管により上部構造を鉛直下方に引き込み、海底にパイル打ちあるいは重力式によりアンカリングする緊張係留方式のプラットフォームである。従来のカテナリー (懸垂線) 係留方式の半潜水式プラットフォームと比べて動揺が相当に小さく石油生産用として可能であり、一方、固定式プラットフォームと比べて水深影響が小さく大水深域において有利である。

TLP は英国では Tethered Buoyant Platform (TBP) と呼ばれ、また各開発会社独自の呼称もあるが、ここでは Tension Leg Platform (TLP) が最も一般的なものとみなしこれを用いる。

今回は TLP の研究開発の背景、基本的な特性及びこれまで公表された開発研究の概要について述べる。

2. 研究開発の背景

現在、エネルギー資源問題は世界的に重大な関心事の一つに挙げられ、エネルギー資源の中で最も依存度の高い石油・天然ガスの需給問題は切実である。石油の供給は政治的要素に大きく影響され需給予測は難しいが、いずれにしても今世紀末に枯渇傾向に陥ることは避け難い。このためにエネルギー資源の節約、代替エネルギーの開発が叫ばれているが、一方で残り数十年程度といわ

れる石油の可採年数を引き延ばすために未発見の石油の探査・掘削・生産の努力が必要である。世界の石油の究極可採埋蔵量は 3,180 億キロリットル (2 兆バレル) ともいわれ、図 1 に示すように陸域に 72.5%、海域に

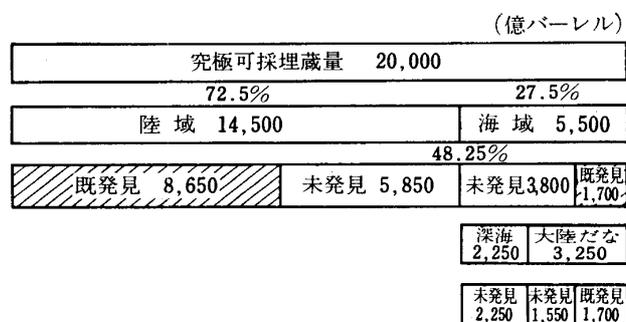


図 1 世界の石油究極可採埋蔵量¹⁾

27.5% が存在するとされる¹⁾。陸域では既に 60% が発見されているのに対して海域では 31% しか発見されておらず、全体では究極可採埋蔵量のおよそ半分が未発見となっている。海域では既発見量はすべて大陸棚に在り、大陸棚斜面以深においては全く発見されていないが、海域の究極可採埋蔵量は水深 200 m 以深に 30~45% も存在するといわれる。日本周辺にも未発見の石油・ガス田がかなり存在すると推定され、日韓大陸棚、渤海、東シナ海、南シナ海など西南方海域には存在の可能性が高い。この海域にも大水深の部分があり今後大水深域の開発に対応しうる技術開発は重要である。

海洋掘削技術は、半潜水式プラットフォームの開発などにより水深 500 m を超え 1,000 m 近くまで可能という段階まで進んでいる。しかしながら、経済的採算に合う海底油田の発見率は高々数パーセントと低く、折角石油を発見しても小規模な貯留層 (reservoir) は放置されることが多い。従来の石油生産が固定式プラットフォームに頼っており、水深増加に対して極めて敏感であることや移動不可能であることが経済性の低い原因となっている。また、水深 300 m 以上になると著しく大重量と

* 技術研究所

なり、えい航・設置が難しくなるほか、プラットフォームの基本固有周期が波エネルギーの高い領域に接近して構造強度上の問題も生ずるようになる。従来の固定式プラットフォームによる生産技術は、北海のような荒天海域では水深 150~220 m、比較的平穏なメキシコ湾のような海域では水深 220~275 m が实际的限界といわれた³³⁾。現在、水深 300 m を超えるただ一つの例としてメキシコ湾 Cognac 油田において水深 312 m の所に設置されたジャケット式の固定式プラットフォームの成功例があり²⁾、平穏海域における限界水深は 400 m 程度にまで増大したともいわれる¹⁴⁾。しかし、この建造・設置の工費は莫大であり、相当に大規模な貯留層がない限りこのような大型ジャケットの使用は採算に合わないと考えられる。

こうした大水深域に大量に埋蔵される海底石油の開発への評価の高まりと、掘削水深と生産水深の差の広がりとを背景として、1960 年代に入ってから固定式プラットフォームに代わるべき新しい生産技術の構想が次々と発表され、開発研究が一斉に開始された。現在有望視されているものに TLP, Guyed Tower^{3),4)} 及び SPS^{5),6),7)} (Subsea Production System あるいは Submerged Production System) があり、引き続き積極的に開発研究が進められている。

Guyed Tower は図 2 (b) に示すように基本的に固定式プラットフォームの構造を引き継いだものであるが、ジャケットのように海底にパイル打ちによる固定をせ

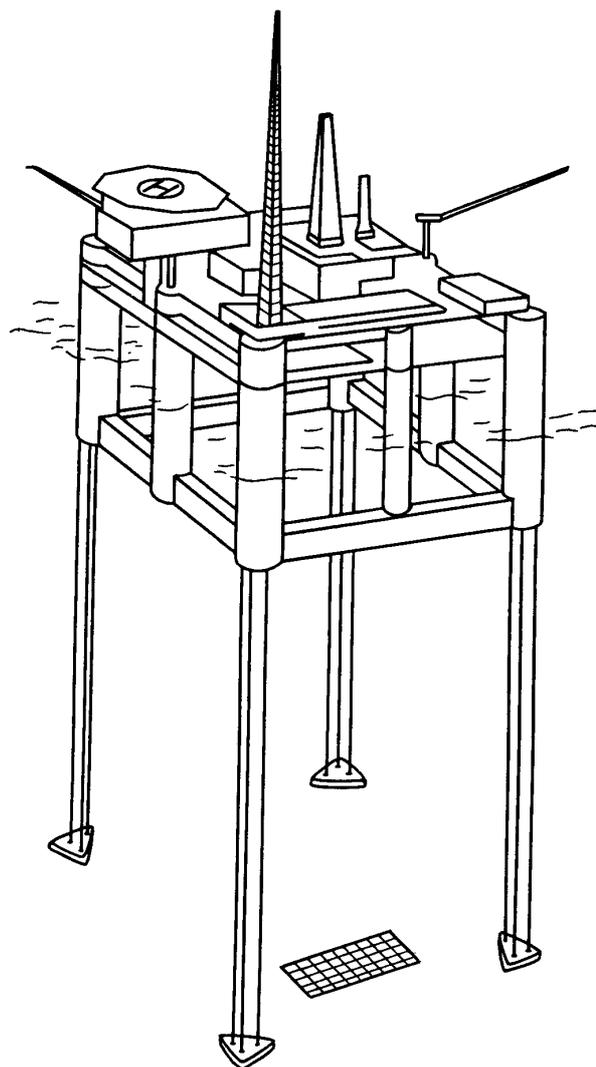


図 2 (a) Tension Leg Platform⁸⁾ (CONOCO)

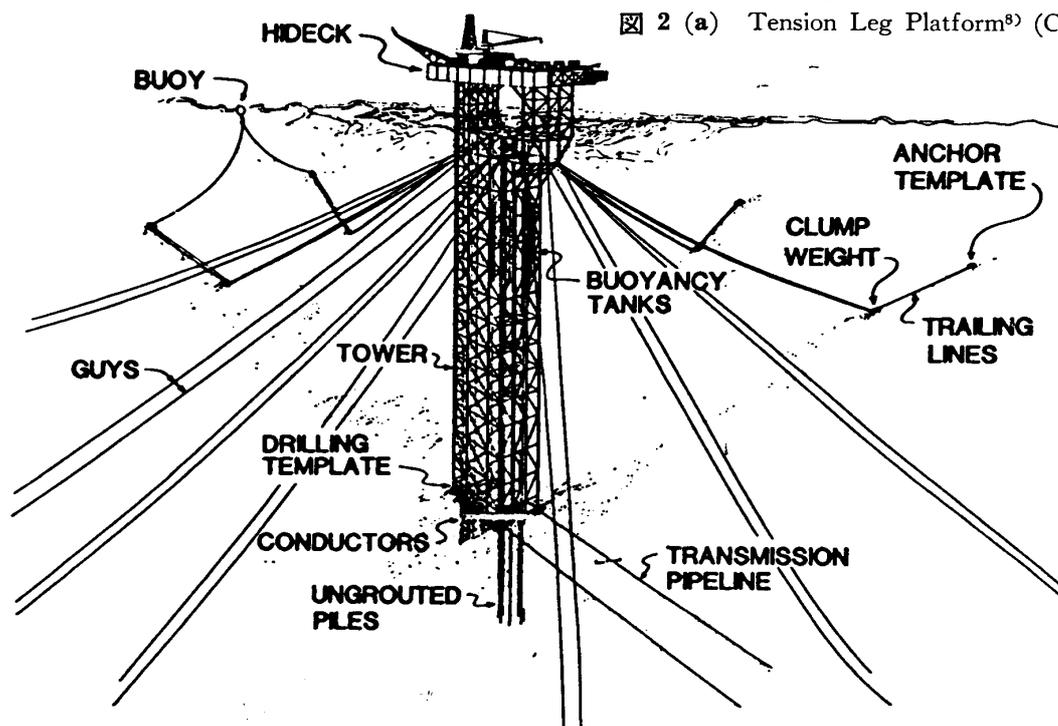
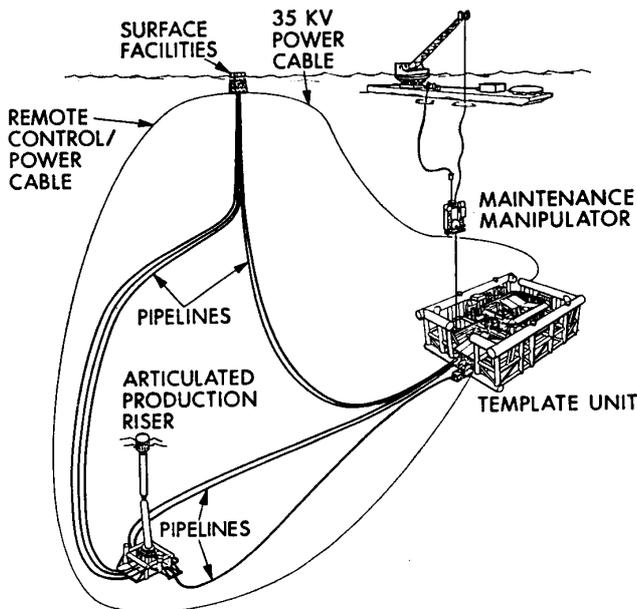


図 2 (b) Guyed Tower (Exxon)

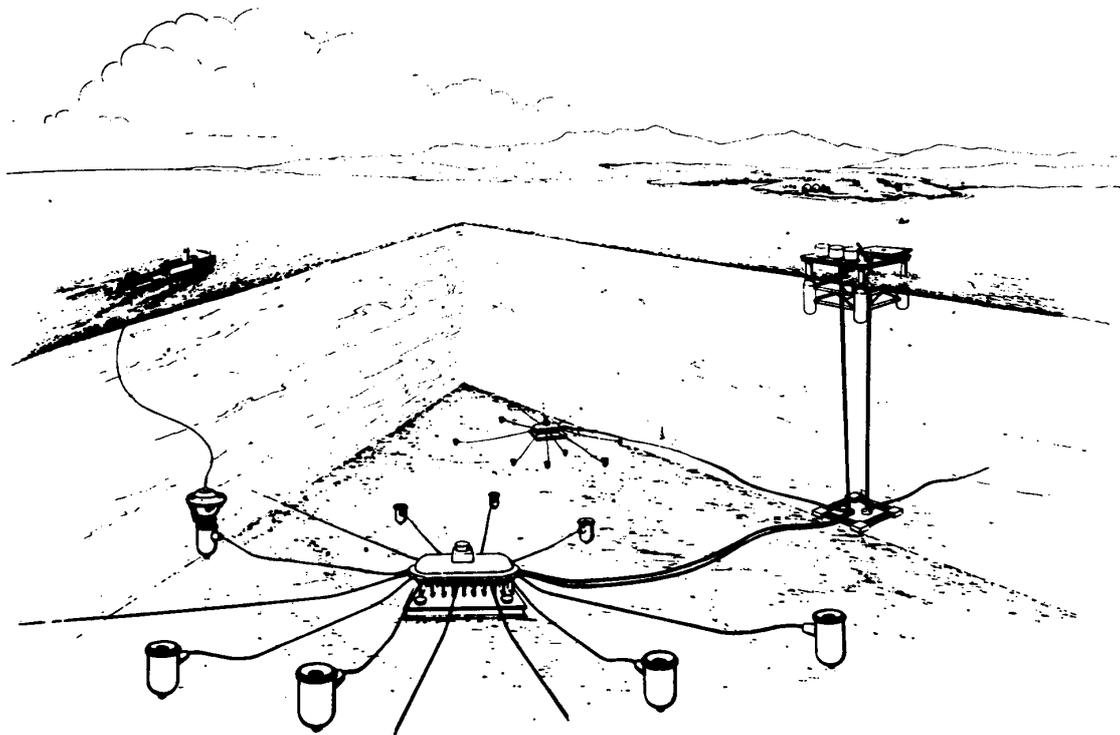
ず、自重で海底地盤にのめり込ませるだけとし回転支持に近い状態で横揺れを許すもので、復元力を支持索 (guy line) によって確保する。この動揺の許容により、大水深において固定式プラットフォームの基本固有周期が波周期領域に短い側から接近する問題を、逆に基本固有周期を波周期の長い側に避けて解決しようというものである。ジャケットの場合、水深 300 m では基本固有周期

が 4~6 秒程度となり、暴風時条件では波エネルギーの分布する領域の限界という所であるが、作業時条件では完全に波エネルギー領域に入る。これに対して Guyed Tower の基本固有周期は 30 秒程度 (水深 350 m) となり波周期より長く、動的増幅率は 1 以下になる。このように基本固有周期を波周期領域の長い側に避けて、ある程度の動揺は許容するものの動的増幅率は 1 以下として、構造に加わる波エネルギーを運動エネルギーで吸収し、構造強度上の設計限界を楽にするという考え方は、作業性能上等から要求される動揺の許容限にもよるが、大水深、荒天域において利用価値がある。TLP についても同様の事がいえ、この種のプラットフォームを Compliant Platform (可揺型プラットフォーム) と呼ぶようになった。余剰浮力による復元力のみを用いている Articulated Tower (あるいは Buoyant Tower) もこれに属する。

SPS (海底石油生産システム) は、プラットフォームによる石油生産という考え方自体を捨てて、生産設備を海底に設置し水深影響を小さくするシステムである (図 2 (c) 参照)。このシステムの研究は欧米において各石油会社を中心に早くから実施継続され、SEAL 方式、ロッキード方式⁵⁾、エクソン方式⁶⁾など様々の概念が提案されている。我が国においても通産省工業技術院の大型プロジェクト「海底石油生産システムの研究開発」が 1978



1) Exxon's pilot test system⁶⁾



2) Lockheed's concept⁵⁾

図 2 (c) Subsea Production System

年（昭和 53 年度）より 7 か年計画で発足し、石油開発・製鉄・造船・重機及び電気会社 16 社で構成される技術研究組合に委託され、研究開発が進められている⁷⁾。

これまでに SPS の海洋実験は数多く成功してきており、TLP, Guyed Tower に比して水深影響が最も小さいと考えられることから、水深 500 m 以深の深海域の石油生産にとって最も有力な方法となろう。ただし、現段階ではとりあえず水深 300 m~500 m 程度の油田開発に力点が置かれ、その程度の水深に対しては TLP に早期実現の可能性が高い。TLP に関しても後述するように欧米の各石油開発会社、国・公立研究機関などにより、これまでに相当量の研究開発の成果が蓄積され、幾つかの海洋実験も行われた。そして現在、Guyed Tower や SPS に先んじて、北海の Hutton 油田に総排水量 51,700 トンの実機が建造設置されようとしている⁸⁾。設置水深が 147 m ではあるが北海の荒天海象を考えれば、この TLP 実機建設の成否が今後の大水深域石油生産技術に与える影響は大きいといえよう。

3. TLP の基本的特性及び他のプラットフォームとの比較

表 1 に各種の海洋プラットフォーム（石油開発用）の特性比較を示す。

従来の浮遊式掘削装置（船型、バージ、半潜水式）は索鎖によるカタナリー係留あるいは DPS (Dynamic Positioning System: 自動位置保持装置) により位置保持を行うが、生産用には使用するには動揺が大きすぎる。半潜水式掘削装置の開発により動揺性能が改良されて稼働率、掘削可能水深はかなり増大し、生産可能水深との差が大きくなっている。甲板昇降型掘削装置（ジャッキアップリグ）は着底式であり、掘削機器に加わる上下動の問題がなく、機器設計上有利であるため水深 100 m 以下において広く用いられている。

これら掘削装置と従来の生産用プラットフォームとの大きな違いは移動性と水深影響にある。ジャケット、タワーなどの有脚式固定プラットフォームや重力式着底プラットフォームは、設置された油田が予想以上に早く枯

表 1 各種の石油開発用プラットフォームの特性比較

型式 特性	浮遊式		固定・着底式			可揺型	
	バージ・船型	半潜水式	甲板昇降型	有脚式	重力式	Guyed Tower	TLP
波力	大	比較的小	小	小	比較的小	小	比較的小
上下動	大	比較的小	なし	なし	なし	なし	ほとんどなし
水平動	比較的大	比較的小	ほとんどなし	ほとんどなし	ほとんどなし	小	比較的小
設置	容易	容易	容易	やや難	難	やや難	比較的容易
稼働率	小	中	大	大	大	比較的大	比較的大
撤去	容易	容易	容易	不可能	不可能	可能	比較的容易
水深増加に伴う問題	位置保持	位置保持	脚重量の増加 移動時安定性	重量増加 えい航設置 技術・工費	重量莫大 設置技術・ 工費	重量増加 えい航設置 技術	設置技術 上下動増加
適用可能水深	中水深 (DP 付水深)	大水深 (~1,000 m)	浅海域 (~100 m)	中水深 (200~400 m)	中水深 (~200 m)	大水深 (~500 m)	大水深 (300~700 m)
用途	掘削	掘削	掘削	掘削・生産	掘削・生産	掘削・生産	掘削・生産
利点	貯蔵能力大	動揺小	安価・稼働率大	固定性	氷海・荒天海域に適	動揺・応力小	安価・移動性有

濁した場合経済的損失が大きい。また水深増大に敏感であり、建設費用は指数関数的に増大し技術的にも厳しくなる。したがって小規模に散在する油田は見過ごされることが多く、大水深になれば経済的採算に合う油田開発の成功は一層困難となっている。

TLP は固定式あるいは着底式プラットフォームの持つ水深影響の問題を緩和し、浮遊式プラットフォームにおける動揺、特にライザー管等に加わる上下動の問題を除去し、かつ移動性も有するものであり、従来見過ごされてきた小油田の開発や水深 200~300 m 以上の海域の石油生産に有望視される。

TLP の構造は図 2 (a) に示したように、通常半潜水式構造である上部浮遊体を係留脚により海底に強く緊張係留したものであり、全体応答特性、構造強度の信頼性に占める係留脚の割合は大きい。外荷重のほとんどは上部浮遊構造に加わり、そのエネルギーの大部分は、係留脚のひずみエネルギーと上部浮遊構造の運動エネルギーに吸収される。カテナリー係留の浮遊式プラットフォームの場合には、それは浮遊構造の運動エネルギーとひずみエネルギーで吸収され、係留索鎖の寄与は通常小さい。固定式あるいは着底式プラットフォームの場合、外荷重は深さ方向全体に加わり、それを骨組構造ないしケーソン構造の変形によるひずみエネルギーでほとんど受け持つ。このように TLP は多くの点で浮遊式と固定式の利点を兼備した概念といえる。

TLP の上部構造の運動応答特性は、係留脚の軸剛性と初期張力に強く依存している。上下揺れ・横揺れ・縦揺れが軸剛性に、前後揺れ・左右揺れ・船首揺れが初期張力によって抑制され、固有周期は水深 300 m として前者が 2~4 秒、後者が 60~100 秒である。これは波エネルギーの分布領域の両側に巧みに同調を避けたことになっている。上下揺れ・横揺れ・縦揺れは問題とならないほどに小さく、前後揺れ・左右揺れについても、動的応答の増幅率が波周期領域 (4~20 秒程度) で 1 よりもかなり小さいので、ほぼ問題がない。

しかし一方で、上下揺れ・縦揺れ・横揺れを強く抑制しているために、これらにかかわる変動外力がそのまま係留脚に伝えられ、高い変動軸力を生ずる結果となっている。係留脚に緩みを生じさせないために、少なくともこの変動軸力の振幅以上の初期張力を発生させる必要があり、最低でも変動軸力範囲分の張力が脚に生じる。変動軸力の最大値の目安は上部浮遊体に加わる変動浮力であり、これは最大波高と水線面積できまる。ただし上部浮遊体を半潜水式とすれば、変動浮力と没水部に加わる波力の相殺が利用でき、変動軸力を軽減することができ

る。

また、通常の波周期に対しては前後揺れ・左右揺れ・船首揺れなどの動揺は問題ない程度の大きさであるが、潮流・風などによる静的な水平外力あるいは長周期の波浪漂流力に対する水平動の大きさは、初期張力及び水平動に伴う付加的な張力増加の大きさにかかっており、一般に無視できない。水平動の許容限は、ライザー管など海底坑口と上部浮遊構造の間を結ぶ生産機器の機能・強度上の限界で与えられ、大きくて水深の 10% (係留脚の傾斜角で約 6°, 上端沈下量で水深の 0.5%) 以内が普通である。これは最大静的水平外力の 10 倍以上の初期張力が必要であることを意味する。

更に、搭載荷重による初期張力の減少分をあらかじめ確保しておく必要もあり、安全率を掛けると全体としてかなりの大きさの初期張力を要することになる。係留脚の断面積の増加にも重量・製造・操作などの点から制限があり、静水中における係留脚の軸応力は小さくない。現在建造計画中の TLP の設計ではこの静的軸応力は約 26 kgf/mm² にもなる。この大きさは材料強度上係留脚の設計に大きな負担を与えるものである。

このように、TLP において係留脚に関するパラメータは応答特性、信頼性に大きく影響しており、非常に重要な設計変数であり、係留脚の設計・製造及び検査保守方法が信頼に足ることは、TLP 実現の必須条件といえる。加えて、大水深域に設置する際の位置決め・アンカリングの方法・手順も大事な要素である。これらの条件が満足されるならば、将来において海底石油生産システムが実現されるまでは、有力な大水深用生産設備となる。

TLP の利点・問題点をまとめると次のようになる。

- (1) 経済的・技術的に水深影響が小さい。
- (2) 移動可能である。したがって小規模な油田の開発が採算に合う。
- (3) (1), (2) により、従来と比べて海底石油の経済性が良くなる。
- (4) 鉛直面内の動揺はほとんどない。水平面内の動揺も波に対してはかなり小さい。
- (5) 長周期の変動外力、静的外力に対して水平動の大きさが問題となる。
- (6) 係留脚に発生する静的及び動的軸応力が小さくない。
- (7) したがって係留脚の材料・形状・寸法・初期張力の決定に十分な検討を要する。またその製造・検査・保守の技術も信頼に足る必要がある。

次章以下には、これまでの TLP の実際の設計・開発と

基礎的な研究について、とりまとめて概略を紹介する。

4. 現在までの TLP の実機概念設計と開発

深海海洋観測ブイシステムなどに見られるように、緊張係留方式自体は早くから使用されており、最近では海洋石油生産基地や沿岸貯油基地の沖合での巨大タンカーのターミナルとして、大型の緊張係留システム (SPM: Single Point Mooring) が広く用いられている。浮遊構造物の緊張係留方式としては、我が国では本四架橋のための地質調査用作業台として「創成二号」¹⁰⁾ が建造され (1973年)、明石海峡でボーリング作業に用いられた例がある。この作業台はコラム・フーティング型の半潜水式であり、8本の斜め係留鎖 (95mm ϕ) と4本の鉛直係留鎖 (54mm ϕ) とによる複合緊張係留方式をとっている (図3参照)。設計使用水深は15~55mであった。

欧米においては、大水深域の海底石油開発を背景として大型石油掘削生産プラットフォームとしてのいわゆる TLP の実機開発研究が精力的に進められてきた。1950

年代に米国で TLP の基本的概念が発表され、1963年には英国において排水量124トンの試作機 (TRITON)¹¹⁾ の海洋実験がスコットランド沖 (水深30m) で開始された。この試作機はコラム・ローハル型半潜水式プラットフォームを斜め索のみを用いて緊張係留したものである (図4(a)参照)。コラムの水線面積が極端に小さく波力は相当に軽減されるものの、搭載許容荷重が小さいことや復元性に乏しいことなどの欠点を有し、現在ではこの型式の TLP の設計概念は見当たらない。ただし、この大がかりな実験の成果は、その後の開発研究の貴重な基礎知識となったものと思われる。

1960年代後半から米国の DOT 社 (Deep Oil Technology Inc.) が一連の研究開発活動を開始し、長年の基礎的研究成果に基づき、17の石油会社の参加・出資により、1975年に排水量約650トンの試作機 “Deep Oil X-1”¹²⁾ を建造し、カリフォルニア沖合水深約60mの地点で海洋実験を行った。この試作機は3本の主コラム (3m ϕ) とローハル (1.5m ϕ , 0.9m ϕ) 及び鉛直・斜

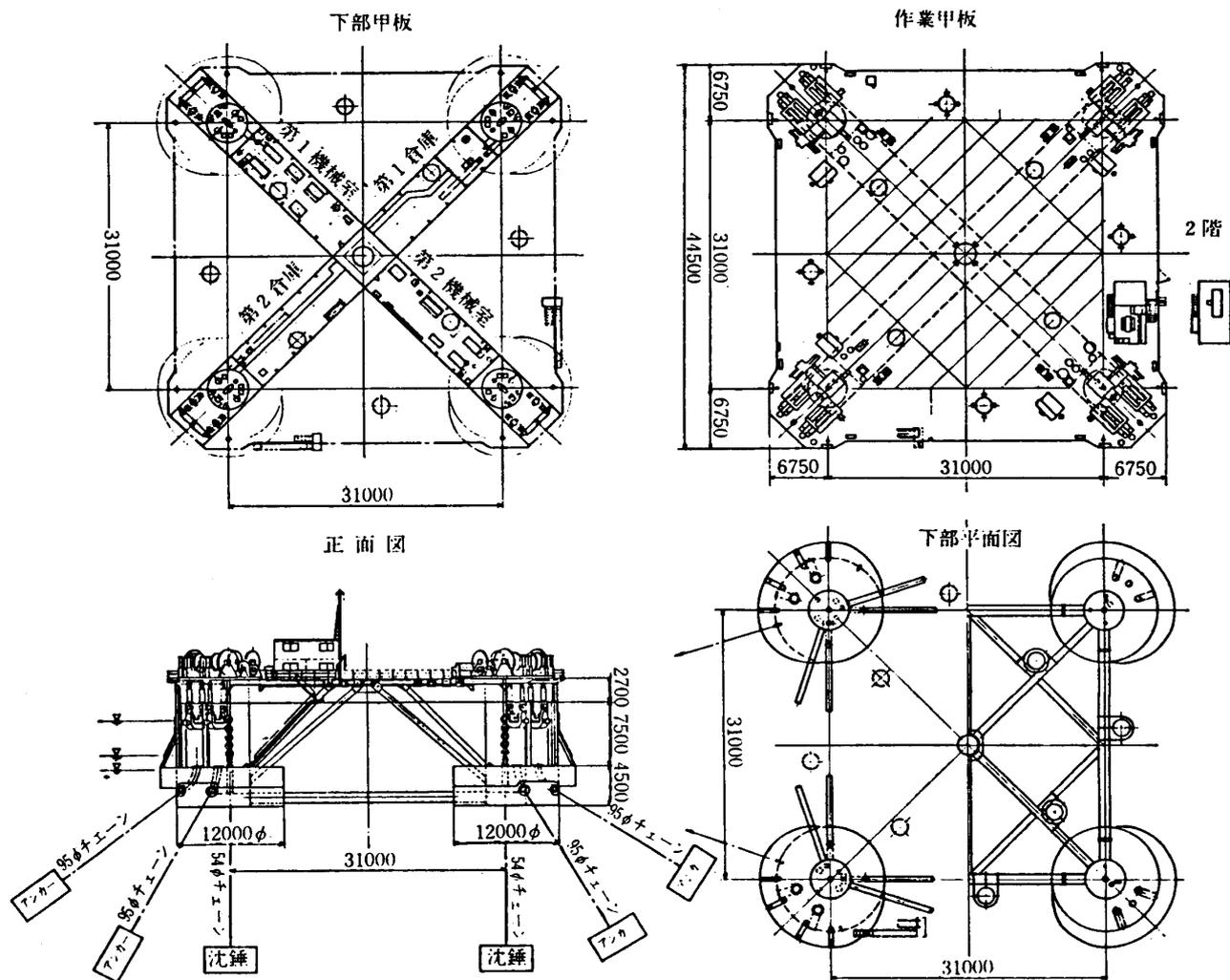
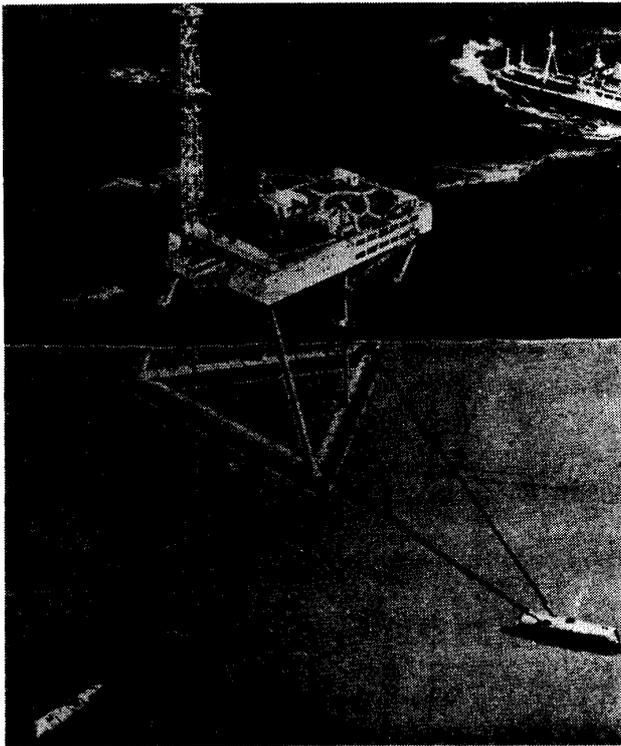


図3 創成二号¹⁰⁾ (本四連絡橋公団)

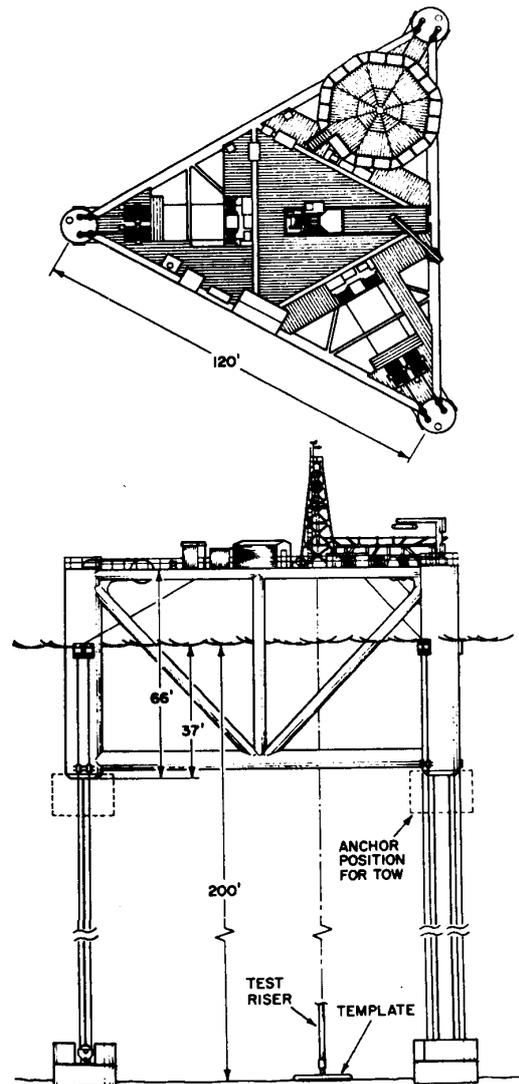
図 4 (a) 'TRITON'¹¹⁾

めの結合部材 (0.9 mφ) から成る半潜水式の上浮遊構造を、各コラム当たり 2 本のポリエチレン被覆した鋼索 (73 mmφ) により鉛直係留したものである (図 4 (b) 参照)。この試作機の特徴は、初めて完全鉛直係留方式としアンカーは重力式でバラストタンクを有し、スラリーの注排により設置・撤去作業を容易にしていること、コラムとローハルの排水体積比が波力最小化を図って決定されていることなどである。現在、アンカーには重力式、あるいはパイル打込式、係留には鋼索あるいは鋼管と、それぞれ二通りの概念があるが、鉛直係留方式の概念は一般的に定着の傾向にある。また、この海洋実験に参加した石油会社はそれぞれ独自のグループにおいて、ここで得られた各種の貴重なデータを基に個々に開発を進めているようである。

1970 年代に入ると DOT 社の外にも幾つかの独特な TLP の概念設計が公表されるようになった。

AMOCO 社は、VMP (Vertically Moored Platform)¹³⁾ なる名称で係留脚にライザー兼用の鋼管を用いるという TLP の着想をし、1970 年に特許申請を行っている。上部浮遊構造はコラムフーティング型であり、アンカーを骨組構造としている点が特徴である (図 5 (a) 参照)。

ノルウェーの Aker グループは、TPP (Tethered Production Platform) という名称の TLP の概念設計を発表した。この上部構造はコラム・ローハル型で 2 本の箱型主ローハルを有し、アンカーはパイル打ちによるも

図 4 (b) DOT 'Deep Oil X-1'¹²⁾

のである (図 5 (b) 参照)。この型式は現在実機建造計画中の CONOCO 社の TLP に近い。

その他、ドイツでは箱型上部構造で貯油槽を目的とした ARGE TLP²³⁾、英国では多数本の斜索を用いた CASUB (Cable Stayed Submerged Buoyant) Production Platform など数多くの概念設計が発表されたが、いずれについてもまだ実機実現の報告は見られない。

英国石油 (British Petroleum Ltd.) は 1970 年代初めから TLP の開発に関心を寄せ、Magnus 油田の開発と関連して 1975 年より Vickers Offshore 社を主請負会社として BP プロジェクトを開始し、開発計画を 4 段階に分け現在第 3 段階までが終了し、基本的な設計仕様はでき上がっているようである¹⁴⁾。

現在、実機建造・設置の予定に入っているただ一つの例は、前述した CONOCO 社 (米国) の TLP であり、北海の Hutton 油田に 1984 年までに世界初の TLP が

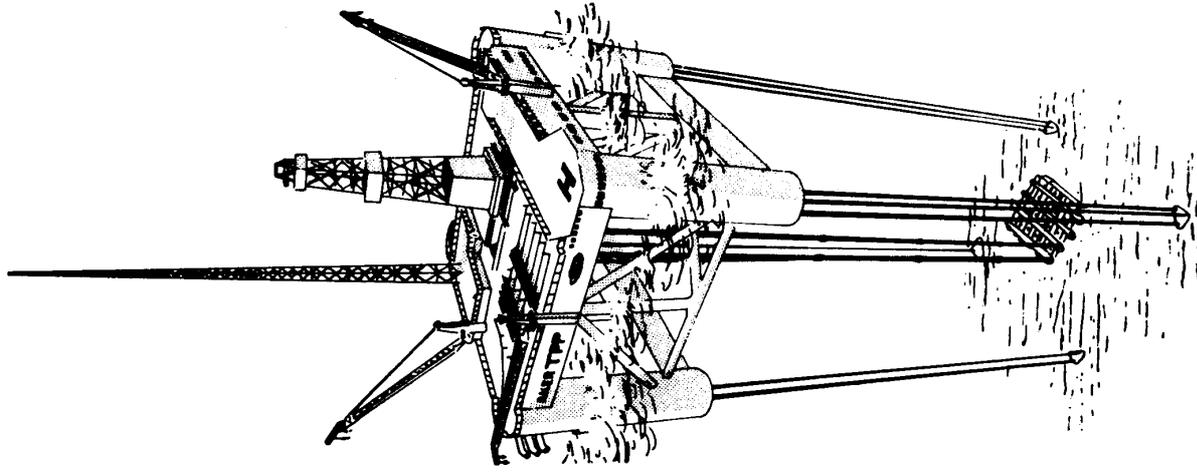


図 5 (b) Aker TPP

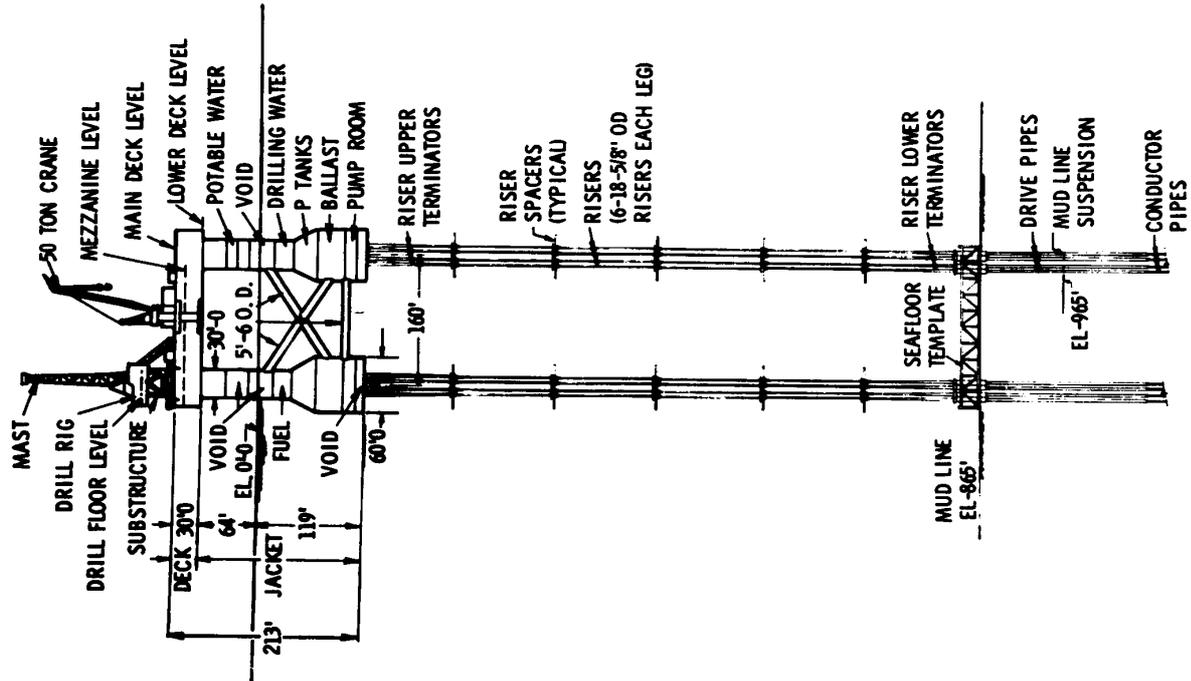
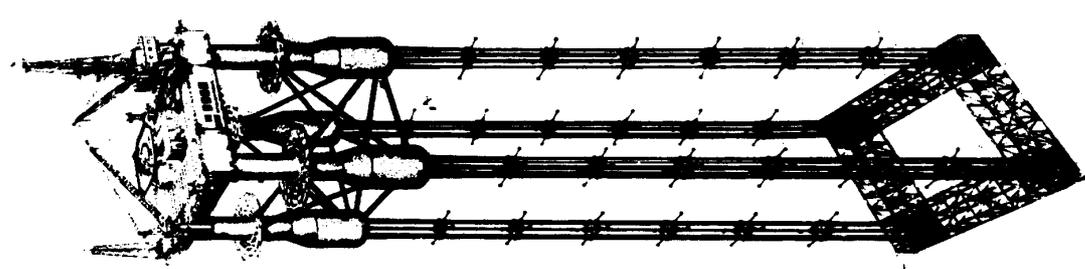


図 5 (a) AMOCO VMP



誕生する運びになっている⁸⁾。この TLP の上部構造は斜め結合部材を省略し 6 本の主コラム (14.6 mφ)、2 本の副コラム (6.5 mφ) と 4 本の箱型ローハル (高さ 11.5 m×幅 7.5 m) から成る 4 角型であり、各隅のコラムにそれぞれ 3 本、計 12 本の鋼管 (外径 23 cm, 内径 7.5 cm) を係留脚として配している (図 2 (a) 参照)。

このような活発な TLP 開発の動きに伴い、ロイド船級協会 (LR: Lloyd's Register of Shipping) の Offshore Services Group は、TLP に関する予備的なガイダンス規則を作成した。TLP 開発の動きは他の大水深用生産設備の開発と併行して、ここ当分の間は活発化こそすれ停滞することはないだろう。

表 2 に、現在までに公表されている幾つかの TLP の概念設計、試作機の主要データの比較を示しておく。

5. 現在までの TLP に関する基礎的研究

我が国でも既に 1960 年代初めに浮遊建造物の緊張係留方式が畑敏男氏 (元海軍技術大佐) により、水中浮力基礎 (SBB: Submerged Buoyant Basement) なる名称で提案されている。しかし試作機の建造は失敗に終わった。後にこの理論は故渡辺恵弘博士 (元九州大学名誉教授) により発展させられた¹⁵⁾が、以来それが実機開発に結びつくには至っていない。

現在のいわゆる TLP の草分け的な研究は、Pauling

表 2 TLP の試作機・実機設計例の主要目・特性値

特性	設計例 DOT Deep Oil X-1 ¹²⁾ 試作機	Aker TPP ²⁶⁾ 概念設計	AMOCO VMP ¹³⁾ 概念設計	CONOCO TLP ⁸⁾ 実機
上部構造型式	3 角型コラム・ローハル	4 角型コラム・ローハル	4 角型コラム・フーディング	4 角型コラム・ローハル
係留方式	鋼索・重力式アンカー	鋼索・パイル打込式アンカー	ライザー兼用鋼管・骨組一体構造重力式アンカー	鋼管・パイル打込式アンカー
総排水量 (tonnes)	(650)	31,000	—	51,700
上部構造重量 (tonnes)	435	20,000	(16,950)	35,000
総初期張力 (tonnes)	—	8,000	—	11,500
甲板寸法 (m)	一辺 36.6	67.2×64.0	48.8×48.8	78.0×74.0
上部構造全高 (m)	20.1	63.5	64.9	64.5
作業時喫水 (m)	—	31.0	36.3	30.0
設置水深 (m)	71	(300/1,000)	(230~910)	147
コラム数	3	4 (主)+2 (副)=6	4	6 (主)+2 (副)=8
主コラム外径 (m)	3.0	14.0	9.1	14.6
没水浮力体数	3 (主)+3 (副) =6 (水平円型)	2 (水平箱型)	4 (鉛直円型)	4 (水平箱型)
没水浮力体寸法 (m)	1.5 φ (主), 0.9 φ (副)	11.0 (高)×8.5 (幅)	18.2 φ	11.5 (高)×7.5 (幅)
係留脚総数	2×3=6	5×4=20 (3×4=12)	—	3×4=12
係留脚種類	IWRC (鋼索)	PWS (鋼索)	円管	厚肉円管
係留脚寸法	索外径 7.3 cm	素線径 7 mm 素線本数 360 (400)	外径 47.3 cm	23.0 cm (外径) 7.5 cm (内径)
係留脚総軸剛性 (tonnes)	—	1.45×10 ⁹	—	9.36×10 ⁹
総初期張力/上部構造重量	—	0.26	—	0.29
総軸剛性/上部構造重量	—	187	—	232

(カリフォルニア大学バークレー校)らによるものである。Paulling は DOT 社の TLP 開発における理論的研究面の支柱であり、コラムとローハルの排水体積比の異なる 2 種類の小型模型を用いた波浪揺動実験(規則波及び不規則波)を行い、線形計算と比較しほぼ良好な結果を得ると共に、計算の信頼性を高めるために流体力の算定精度を上げることが必要であると指摘した¹⁶⁾(1970年)。更に波力を最小化すコラムとローハルとの排水体積比についての計算を行い¹⁷⁾、比較・確認のための模型実験も行って¹⁸⁾最適なローハル寸法・形状を求めにに至ったようである。コラムに加わる変動浮力とローハルに働く波力(主に付加質量力)の相殺は、それぞれの振幅に依存してある特定の周波数近傍で顕著となる。これは Ursell によって理論的に推論され(1949年)、元良教授(東京大学)らにより実験的にも確認された(1965年)、いわゆる波なし船型と同じ原理である。この波力最小化の周波数は一つしか存在しないが、多数本のコラムで構成される半潜水式浮遊構造の場合には、各コラム間での波力の位相差による相殺があり、その周波数は複数個存在するのでこの相殺現象も見逃せない。

Paulling は後に浮体の有限回転に伴う運動学的非線形性、非線形流体力、非線形係留力を採り入れた非線形時刻歴応答計算法を開発し計算例を示した¹⁹⁾(1977年)。ここで流体力の非線形性については物体の位置・傾きによる変化、波面上昇による没水部の変化及び相対速度 2 乗に比例する抗力という形で簡易評価したものであり、係留索は伸びのない剛なものとしている。ここに採り入れた非線形性が応答にどのように影響するかについては、物体と波との相対運動による非線形波力により、応答にドリフトが生じることを示しているものの実験による確証はなされていない。また基本的に Paulling による線形及び非線形解析法に基づき、更に上部構造の内力解析による強度評価を加えた TLP の全体応答解析プログラムが、米国船級協会(ABS: American Bureau of Shipping)によって開発され、それによる実機相当モデルの計算例が報告されている²⁰⁾(1980年)。

国内では 1970 年代中ごろになって TLP の開発に関心が持たれるに至ったようである。三井造船(株)は模型実験と抗力、非線形係留力を考慮した理論計算との比較を行い、また係留角の影響や定常水平外力を受けるときの張力変化などについて計算し、第 8 回 OTC(Offshore Technology Conference)に報告した²¹⁾(1976年)。これはいわゆる TLP の動的応答に関する国内で最初の研究にあたる。三井造船(株)は 1977 年には DOT 社と技術提携し⁹⁾、DOT 社の蓄積された技術を導入する一方、

自社水槽において更に模型実験を行い、別途に NK と共同開発した浮遊式海洋構造物の解析プログラムを用いて比較計算などを行った。その結果と係留脚の疲労強度に関する検討²²⁾が第 4 回海洋工学シンポジウムに報告された。このほか、三菱重工業(株)においても TLP の研究開発が進行しているようであり、石油生産プラットフォームではないが、複数本の索による緊張係留方式の比較的大型の潜水型海象観測ブイを博多湾に設置した(1980年)。近々、これまでの TLP に関する研究成果が公表されるものと思われる。

欧米においては Paulling と DOT 社の一連の研究開発に触発されたように、1970 年代後半から各石油開発会社や国・公立研究機関から次々と研究論文が公表されている。

Albrecht ら²³⁾(ARGE TLP)は自社で考案した箱型 TLP について非線形動的解析法を展開し、抗力及び非線形係留力を等価線形化した解析及び通常の線形解析を用いた結果と比較すると共に、計算機を用いた設計システムを検討した(1978年)。ここでは係留索の挙動に力点が置かれ、有限要素法を用い索自体の大変位動的応答解析を試みている。ただし、流体力の非線形性については抗力にしか触れていない。

Beynet ら²⁴⁾(AMOCO)はライザー管兼係留脚の AMOCO VMP について、抗力を考慮した時刻歴応答計算プログラムによる運動応答及びライザー管の応力の計算を行い模型実験との比較を示すと共に、強度上最適なライザー管端部の形状を決定し、また、疲労及び静的破壊の信頼性について波、潮流、風を考慮した決定論的及び確率論的解析を行った結果、疲労による破壊確率が静的破壊のそれよりも高い事、通常の固定式プラットフォームと比べて TLP は全体に信頼が高い事を挙げている(1978年)。

Natvig (Aker) ら²⁵⁾は、流体力の非線形性に関して Paulling¹⁹⁾と同様の簡便な採り入れ方を行い、非線形運動方程式の解法として通常の時間積分法(ここではニューマーク法)を用いるほかに、ニュートン・ラフソン法を応用した反復法を計算時間を節約する方法として提案し、線形化解析とも合わせて自社概念設計の Aker TPP 及び通常の半潜水式プラットフォームである Aker H-3 を計算モデルに選び比較計算を行った(1977年)。

Røren ら²⁶⁾(Aker)は、Aker TPP をモデルとして水深が非常に大きくなる(1,000 m 程度の場合)場合には、索の伸びにより上下揺れなどの固有周期が波周期の領域に入ってくるため、同調による疲労寿命の減少が無視できなくなることを示した(1979年)。確かにこの指摘は正しい

と思われるが、現段階ではとりあえず水深 300~500 m の油田開発への利用が可能となることで十分価値があり、これはその先の問題といえよう。1,000 m 以上の水深になると係留脚自体の動的挙動も無視できなくなると思われる。

Kirk ら²⁷⁾ (Cranfield Institute of Technology, UK) は、Aker TPP を計算モデルとして JONSWAP スペクトルを用いた不規則波中の応答計算を行い、短期予測の結果を示した (1979 年)。この線形解析では 6 自由度の運動モードがすべて互いに独立であるという仮定がなされているが、縦揺れ・横揺れの前後揺れ・左右揺れとの連成影響の無視は張力評価に際して問題である。また不規則波中における長周期波浪漂流力による水平動の計算を行っており、その結果では風・潮流による漂流量に比べて波によるそれは小さい。

英国石油の BP プロジェクトに関連して、NMI (National Maritime Institute) では TLP の解析的・実験的研究を 1975 年に開始し、応答解析のほかにも実際の TLP システムにおけるハードウェアに関連する様々な技術的問題を検討し、BP プロジェクトの推進に貢献している。Rowe ら²⁸⁾ (NMI) は、2 種類の TLP 模型 (3 角型と 4 角型) 及びライザー管について行った水槽実験結果と計算結果との比較を中心に、TLP 及びライザーの設計について概要を示している (1978 年)。実験は相当量行われたようであり貴重なデータといえる。

Denise ら²⁹⁾ (AF Marine) は、コラムが 8 本の 4 角型 TLP を計算モデルにして、有限要素法により 3 次元流体力を計算し線形応答計算を行い、索張力に対する前後揺れと縦揺れ、あるいは左右揺れと横揺れとの連成影響が無視できないことを示した (1979 年)。同時に自由表面影響・抗力・非線形係留力などの非線形効果を考慮した時刻歴応答計算を行い、大波高に対して高調波応答が現れることを示し、それが主に係留索の幾何学的非線形性によるものであり、流体力の非線形影響は小さいとしている。ただし、筆者らの得た実験事実と照合すると、この種の高調波応答は長周期大波高の波に対して水平変位が相当大きくなる場合に現れるものであり、比較的波長の短い波に対しては、波高が小さくても高次流体力による同調のために、特定の波周期近傍において発生する高調波応答がより顕著である。

以上の研究は応答全般を対象としたものであるが、TLP には幾つかの特殊な非線形応答が発生する可能性あり、その一つに分数調和振動がある。分数調和振動は非線形振動の一つであり、外力の周波数よりも低次 (1/2

倍、1/3 倍、...) の周波数で応答が発生する現象をいう。

Rainey³⁰⁾ (Y-ARD, UK) は、索張力の周期的変動が水平面内の運動 (前後揺れ、左右揺れ、船首揺れ) の復元力係数に周期性をもたらし、これらの運動がいわゆるマシユ型方程式 (Mathieu's equation) に支配される結果、固有周期の 1/2 倍の波周期に対して、係数励起により固有周期と同じ周期をもつ不安定動揺が発生することを指摘した (1976 年)。この係数励起による不安定動揺は 1/2 次の分数調波共振現象といえ、これはブランコをこぐときの原理と同じものである。また、二つの異なる周波数をもつ波が、互いに直交する方向から入射する際にも分数調和振動が発生しうることを示した。

西原ら³¹⁾ (三井造船) も、TLP の係数励起振動について単一ブイ模型による基礎的な水槽実験を行い、不安定領域と不安定振幅について、マシユ型方程式の近似解及び時刻歴応答解と比較した (1979 年)。

さて、上述の応答解析に関する研究のほかに、設計的観点からの研究も発表されている。

Godfrey³²⁾ は、従来の剛構造型式の生産プラットフォームに代わるべき種々の型式の可撓性を有する構造物 (Compliant Structure) について、TLP も含めてその外力に対する撓性あるいは復元性が、構造設計のパラメータに及ぼす影響について比較検討した (1976 年)。ここでは Compliant Structure として卓越波周期よりも長い基本固有周期をもつ構造を定義しており、ケーソン・ジャケットなどの固定式構造物も 'stiff structure' としてこれに含んでいる。TLP は 'soft structure' となっている。

Capanoglu³³⁾ (Earl and Wright) は、TLP の実設計への基本的アプローチの方法を示した (1979 年)。ここでは基本的に設計変数を幾何学的形状及び寸法、係留、環境及び荷重の 4 種類に分けて、それぞれについて概説すると共に、甲板積載荷重から決まる上部構造の形状・寸法、建造方法に依存した解析・設計及びそれと併行して検討すべきえい航・設置などについて概要を述べている。

Chou ら³⁴⁾ (Brown & Root) は、TLP の設計のためのソフトウェア (波浪応答解析、復元性解析、最適化手法) について概説している (1980 年)。

ところで、東京大学吉田助教らは筆者も含めて、ここ 4 年間 TLP に関する実験的及び解析的研究を続けてきており、以下にまとめてその概要を示す。まず最初の研究として、緊張係留システムにおいて係留索に緩み (slackening) が生じる程に波浪応答が大きくなった時の応答に焦点をあて、小型模型による波浪実験と線形解析解を用いた非線形時刻歴応答解析法により、この異常応

答の定性的及び定量的把握を試みた^{35),42)}(1978年). 索に緩みが生じた後, 引き続く再張力化に際して衝撃的張力が発生するが, この異常張力をスナップ荷重あるいはスナップ張力と呼ぶ. スナップ荷重に関しての実験及び計算結果はほぼ良好な一致を示し, 緩みの発生は主に波高の大きさに依存し, その限界波高は線形計算で得られる索の張力振幅が初期張力に等しくなる値でほぼ与えられること, スナップ荷重の大きさは索の軸剛性に依存するが, 波高の増大に対して通常状態での張力と比べ相当に大となることを示し, 索の緩みの発生が非常に危険であり, その回避は不可欠であるとした. 続いて, 周波数応答特性, 固有周波数特性などについて係留角による影響を調べ, 1次同調の十分な回避や動揺・張力の最小化などの点から, 鉛直係留方式が斜め索のみを用いた斜め係留方式より優れていることを見出すと共に, 全般的な周波数特性を明らかにした^{36),44)}(1979年). また, 実験的に鉛直係留の場合, ある特定の周波数近傍で高調波応答が顕著となることを確認し⁴³⁾, この応答が縦揺れあるいは上下揺れの固有周期の2倍あるいは3倍の波周期に対して発生するものであり, いわゆる倍数調波共振現象であると推論し, その原因を主に流体力の高次成分と考えた. この考えに基づき, 波面上昇による没水部の変化と物体の運動に従って波力評価を変更するという, 簡単な流体力の非線形性の導入により, 実験的に最も顕著である縦揺れの2次の倍数調波共振をほぼ説明できた^{37),45)}(1980年). このように, 鉛直係留方式は一般的な周波数応答特性は優れているものの, 高周波数の固有周波数を持つ運動モードについて高次同調が発生する傾向を有する. 一方, 低周波数の固有周波数を有する運動モード(前後揺れ, 左右揺れ, 船首揺れ)については, 係数励起による1/2次の分数調波共振が発生する可能性があるが, この不安定動揺についても, 単一ブイモデルとTLPモデルを用いた水槽実験及び近似解析解・時刻歴応答解を用いて, 不安定領域, 不安定振幅について調べた^{37),45)}. ただし, この1/2次の分数調波共振の発生する波周期は, 実機で30~50秒程度であるので通常の波に対しては十分回避されうる. また, 倍数調波共振, 分数調波共振ともに同調現象であるため, その定量的推定には流体減衰力特に抗力の大きさの精度が強く影響する.

文献38)には, 以上の研究における計算法の展開を中心に要約してあり, 文献39)では, 応答特性の記述を中心にそれまでの研究結果をまとめると共に, 実機モデルについて不規則波中の応答計算及び短期予測の結果を示している. この短期予測の結果によれば, 有義波高23

mの波が2時間継続するという厳しい状態においても, 運動応答の最大期待値は十分許容できる範囲内であり, 張力のそれも初期張力を超えるには至っていない. 文献40)では, 実機モデルについて更に係留脚の疲労寿命の予測を行い, その予測に際して多くの未解決の問題があることを指摘するとともに, 最も単純な仮定を設けて推算すると, 係留脚の疲労寿命は高い静的張力と変動張力のために設計上かなり厳しい結果となることを示した. 文献41)には, 入射角を変えた3次元模型実験と線形計算の結果が比較されている. このほか, 係留脚に鋼管を用いることを想定して, 規則波における基礎的な実験・計算が行われ, 渦励振による入射波と直交方向の振動が無視できないことを確認し⁴⁶⁾, この流力弾性現象に関しての基礎的研究が継続されている. この問題はむしろライザー管において一層重要である. 不規則波中における係留管やライザー管に生ずる曲げ応力の解析も行われ, 初期張力の低いライザー管においては曲げ応力が問題となる大きさであり, また固有振動数が波周波数領域に比較的近いことから高次同調の可能性があること, 係留管に関しては曲げ振動はほとんど問題とならないことなどが示されている⁴⁷⁾.

以上に示した現在までの基礎的研究を概観すると, 次のような点が指摘できる.

- (1) 解析的研究はかなり蓄積されている.
- (2) ただし, 風・波・潮流による静的大変位, 長周期変動や渦励振についての詳細な解析が未公表である.
- (3) 全般に公表されている実験的研究が少ないが, 非線形解析については実験的検証が必要と考えられる.
- (4) 規則波中の線形応答特性はほぼ明らかになったといえる. しかし実海象に対する統計的予測, 特に係留脚の疲労寿命に関しての十分な検討結果が公表されていない.
- (5) 非線形同調現象の定量的把握に関して, 実機に対する流体力特に抗力の信頼ある評価が重要である.
- (6) 水深1,000m級の深海域における応答の諸問題も検討しておく必要がある.

6. おわりに

海底石油開発, 特に今後大水深域の開発への風潮は当分続くものと予想され, 経済的採算に合う大水深石油生産設備の開発は必然的といえる. その中で移動性, 水深影響, 設置費用などに利点を有するTLPの早期実現の可能性は高い. TLPの技術的な問題は高応力を生ず

る係留脚の信頼性の確保にあり、解析・設計・製造・検査・保守に十分な検討を要する。ここ数年間、TLPの開発研究は特に盛んとなっている。本年度の第13回OTCには筆者らの論文も含めて多くの研究報告⁴⁸⁾がなされる予定であり、欧米の各石油開発グループの独自の開発が、他の大水深用石油生産設備の開発と併行して積極的に進められているようである。近い将来において、これらの成果が現れることは間違いないと思われる。

次回には、TLPを中心として半潜水式海洋構造物の応答解析法及びTLPの具体的な応答特性について、概説する予定である。

参 考 文 献

- 1) 資源問題研究会: '81 海洋開発——今後の政策と開発技術, 政府関係資料, 産業技術会議 (1980)
- 2) Sterling, G. H. et al.: Construction of the Cognac Platform, 1025 Feet of Water, Gulf of Mexico, OTC 3493 (1979)
- 3) Finn, L. D.: A New Deepwater Offshore Platform—The Guyed Tower, OTC 2688 (1976)
- 4) 片山正敏, 宇ノ木賢一, 是松雅雄: 大水深向け石油掘削・生産設備 “ガイドタワープラットフォーム”の波浪応答解析, 三菱重工技報, Vol. 17, No. 3 (1980)
- 5) Hopkins, J. W., Dixon, B. R. and Weiss, F. H.: A Subsea System for Deep Water Completion and Production, OTC 1013 (1969)
- 6) Burkarut, J. A.: Submerged Production System a Final Report, OTC 3450 (1979)
- 7) 技術研究組合海底石油生産システム研究所: Subsea Production System (1979)
- 8) Taylor, D. M.: CONOCO's Tension Leg Platform will Double Water Depth Capability, Ocean Industry, Feb. (1980)
- 9) 安東重美: テンションレグプラットフォームの概要と展望, 石油技術協会誌, Vol. 43, No. 5 (1978)
- 10) 大島光義: 「創成二号」, 作業船, 第89号 (1973)
- 11) McDonald, R. D.: The Design and Field Testing of the 'TRITON' Tension-Leg Fixed Platform and Its Future Application for Petroleum Production and Processing in Deep Water, OTC 2104 (1974)
- 12) Horton, E. E.: Tension Leg Platform Prototype Completes Pacific Coast Test, Ocean Industry, Sept. (1975)
- 13) Berman, M. Y., Blenkarn, K. A. and Dixon, D. A.: The Vertically Moored Platform for Deepwater Drilling and Production, OTC 3049 (1978)
- 14) Perret, G. R. and Webb, R. M.: Tethered Buoyant Production System, OTC 3881 (1980)
- 15) 渡辺恵弘: 水中浮力基礎 (S.B.B.) の理論, 渡辺恵弘先生遺稿集 (1972)
- 16) Paulling, J. R. and Horton, E. E.: Analysis of the Tension Leg Stable Platform, OTC 1263 (1970)
- 17) Horton, E. E., McCammon, L. B., Murtha, J. P. and Paulling, J. R.: Optimization of Stable Platform Characteristics, OTC 1553 (1972)
- 18) Brewer, J. H. and Shrum, S. J.: Tension-leg Platform will get At-Sea Test Next Year, Oil and Gas Journal, Oct. (1973)
- 19) Paulling, J. R.: Time Domain Simulation of Semisubmersible Platform Motion with Application to the Tension-Leg Platform, STAR Symp., San Francisco, SNAME (1977)
- 20) Liu, D., Chen, Y.-N., Shin, Y. S. and Chen, P. C.: Integrated Computational Procedure for Hydrodynamic Loads and Structural Response of a Tension Leg Platform, Proc. of the Symp. on the Computational Methods for Offshore Structures, AMD, Vol. 37, ASME (1980)
- 21) Yashima, N.: The Experimental and Theoretical Study of a Tension Leg Platform in Deep Water, OTC 2690 (1976)
- 22) 金綱正夫, 田中 修, 小林正典: テンションレグプラットフォームについて, 第4回海洋工学シンポジウム, 日本造船学会 (1979)
- 23) Albrecht, H. G., Koenig, D. and Kokkinowrachos, K.: Non-linear Dynamic Analysis of Tension-Leg Platforms for Medium and Greater Depths, OTC 3044 (1978)
- 24) Beynet, P. A., Berman, M. Y. and von Ashwege, J. T.: Motion, Fatigue, and the Reliability Characteristics of a Vertically Moored Platform, OTC 3304 (1978)
- 25) Natvig, B. J. and Pendered, J. W.: Nonlinear Motion Response of Floating Structures to Wave Excitation, OTC 2796 (1977)
- 26) Røren, E. M. Q. and Steinvik, B.: Deep Water Resonance Problems in the Mooring System of the Tethered Platform, “Offshore Structures Engineering”—Proc. of the Int. Conf. on Offshore Structures—, Pentech Press, London (1979)
- 27) Kirk, C. L. and Etok, E. U.: Dynamic Response of Tethered Production Platform in a Random Sea State, BOSS '79, paper 57, 2nd Int. Conf. on Behavior of Off-Shore Structures (1979)
- 28) Rowe, S. J., Fletcher, R. H. and Hedley, C.: The Model Testing of a Tethered Buoyant Platform and Its Riser System, Proc. of a Seminar on Models and Their Use as Design Aids in Offshore Operations, Society of Underwater Technology, May (1978)
- 29) Denise, J.-P. F. and Heaf, N. J.: A Comparison between Linear and Non-linear Response of a Proposed Tension Leg Platform, OTC 3555 (1979)
- 30) Rainey, R. C. T.: The Dynamics of Tethered Platforms, paper No. 6, Spring Meetings, RINA (1977)

- 31) 西原誠一郎, 今北明彦: Tension Leg Platform の係数励起振動, 日本造船学会論文集, 第 145 号 (1979)
- 32) Godfrey, P. S.: Compliant Drilling and Production Platforms, Design and Construction of Offshore Structures, paper 17, ICE (1976)
- 33) Capanoglu, C.: Tension-Leg Platform Design; Interaction of Naval Architectural and Structural Design Considerations, Marine Technology, Vol. 16, No. 4 (1979)
- 34) Chou, F. S. F. and Kypke, D. A.: Analytical Approach to the Design of a Tension Leg Platform, OTC 3883 (1980)
- 35) 吉田宏一郎, 米家卓也, 岡 徳昭: 緊張繫留プラットフォームのスナップ荷重, 日本造船学会論文集, 第 144 号 (1978)
- 36) 吉田宏一郎, 米家卓也, 岡 徳昭: 緊張繫留プラットフォームの動的応答特性, 日本造船学会論文集, 第 146 号 (1979)
- 37) 吉田宏一郎, 米家卓也, 岡 徳昭, 尾崎雅彦: 緊張繫留プラットフォームの動的応答特性 (続報), 日本造船学会論文集, 第 147 号 (1980)
- 38) Yoshida, K., Yoneya, T. and Oka, N.: Response Analysis of Tension Leg Platforms, Proc. of the Symp. on Computational Methods for Offshore Structures, AMD, Vol. 37, ASME (1980)
- 39) Yoneya, T. and Yoshida, K.: The Dynamics of Tension Leg Platforms in Waves, the Energy-sources Technology Conference and Exhibition, Houston, ASME, paper 81-Pet-27 (1981)
- 40) 米家卓也, 吉田宏一郎: 緊張繫留プラットフォームの運動とレグの強度, 第 5 回海洋工学シンポジウム, 日本造船学会 (1981)
- 41) Yoshida, K., Yoneya, T., Oka, N. and Ozaki, M.: Motions and Leg Tensions of Tension Leg Platforms, to be presented at the 13th Annual OTC in Houston, paper OTC 4073 (1981)
- 42) 尾崎雅彦, 齋藤利二: 直線繫留された浮体と索の動的応答, 東京大学船舶工学科卒業論文 (1978)
- 43) 伊藤 博, 高橋健二: 緊張繫留プラットフォームの非線形挙動, 東京大学船舶工学科卒業論文 (1979)
- 44) 米家卓也: 可撓性海洋構造物の動特性に関する研究, (第 II 部, 緊張繫留作業台の波浪応答特性), 東京大学船舶工学科博士論文 (1980)
- 45) 尾崎雅彦: 緊張繫留浮体の非線形同調, 東京大学船舶工学科修士論文 (1980)
- 46) 呉 文雄, 中村喜昭: パイプを用いたテンションレグ構造の動的応答, 東京大学船舶工学科卒業論文 (1980)
- 47) 高橋健二: 不規則波中における柱状構造物の応答解析法, 東京大学船舶工学科修士論文 (1981)
- 48) OTC 4070 (Battele), OTC 4071 (Chevron Oil), OTC 4072 (Brown & Root), OTC 4074 (NSMB), OTC 4075 (UC)