海洋と繊維特集

海洋での膜構造の応用

南 宏 和

1. 膜構造とは

膜とは、一般にシート状の形を成し、その面内の方向に作用する圧縮や面外に作用する曲げには無抵抗であるが、その面内に作用する引張やせん断には抵抗する物であると言える。この膜を使用して形成する膜構造とはどのようなものか。著者は膜構造を次のように定義して、広い分野でのその具体例を紹介したことがある¹⁾。

- 1) 膜を一つあるいはそれ以上の構造要素として有する構造。
- 2) 膜は力学的作用(圧力・集中力・強制的変形など)を受ける。

このような膜構造には具体的にどのようなものがあるか。まず、海洋以外の領域について少し考えておこう。

陸では建築・土木・輸送媒体の分野の膜構造がある。

建築分野では、空気膜構造物・博覧会のパビリオンとして見る機会の多い大型テントの類を中心とした張力膜構造物や倉庫用テントの類の骨組構造物など、いわゆる膜構造建築物である。空気膜構造物の巨大な例には、昭和63年春に完成する後楽園新球場の直径約200mのドームがある。建築分野での膜構造用膜材料としては、主としてコーティングされた平織物が使われる。

土木分野の膜構造物には、広く平面状に仕上げた織布の袋にコンクリートを流し込んで、斜面表土砂の流出防止のために使用する布製型枠がある。さらに、切り立った斜面を安定に形成する工法の一つとして布擁壁がある。

輸送用媒体の分野の膜構造物はいわゆるフレキシブルコンテナである。この種のコンテナは昭和59年には、約240万個も生産された。この膜材料は主としてコーティングされた平織物である。

さらに、空での膜構造がある。気球や飛行船、それにパラシュートなどである。

膜構造はよく考えてみると、古くから我々の生活の場にもある。和傘やコウモリ傘、それに提灯もそうだし、空には凧がある。紀元前700年頃の絵には、チグリス川を渡るための皮舟が描かれているという。木の枝で粗く骨組を編んで獣皮を張った軽量な舟で、今もチベットで使用されているという。膜構造の歴史はけっこう長くて広いのである。

2. 海上の膜構造物

帆は帆面とそれを支持する材料とから成る膜構造物である。

紀元前3400～3000年のエジプトには、船員が操帆をする立派な帆船があった。紀元前1500～800年に活躍したフェニキア人の帆船、紀元8世紀頃から活躍したバイキングの帆船、1492年に出航したコロンブスのサンタマリア号など、歴史に残る帆船には枚挙のいとまがない。その後、造船技術の発達、内燃機関の発達によって、商船・客船・漁船といった主な船の表舞台から帆船はほぼ完全に姿を消してしまった。

しかし1974年以降の省エネ時代に入り、帆船は再び船の歴史の表舞台に現れた。世界にさがけて先ず1980年、2本の層流型硬帆を設けた省エネタンカー新愛徳丸が進水した。その後現在まで、この種の帆を備えた省エネ船(図1)は国内で15隻にのぼり、その中で最大のものは載荷重量30900トンの貨物船で350m²の帆を2本備えている。これらの省エネ帆船の帆面用膜材料にはPVCコーティングされた平織のポリエステル布が使われている。その他、ヨットの三角帆の型式の帆を備えた省エネ漁船も着々と数を増している。

ヨットやウインドサーフィンの帆もちろん膜構造物である。

没水式の巨大なコンテナをタグボートが曳航する海上

Application of Membrane Structures in the Ocean

筆者紹介 HIROKAZU MINAMI, TAIYO KOGYO CORPORATION, 太陽工業(株) 技術開発部 応用技術室長

筆者は、船舶工学科出身で、主として膜材料を対象にした研究をされており、二軸特性、クラック伝播、せん断変形特性、膜面変形解析法、ケーブル・ネットワーク構造解析法など内外学界での発表が多数ある。本稿では“膜構造”の意味するところの広さ、今後のその発展の可能性の大きさについて紹介していただいた。

図1 省エネ帆装船

淡水輸送システム案²⁾がある(図2)。コンテナはフレキシブルで、多層のポリエステルシートで作り、長さ約1100m、幅約66m、高さ約100mで体積が約500万m³である。このコンテナに淡水を満たし、これを215万ワットのエンジン2基を持つ半没水式のタグボートがケーブルで曳航する。輸送コストは1000kmあたり2.78セント/トンと試算されている。このような、海のフレキシブルな袋、コンテナもまた膜構造物である。

石油の海上備蓄設備の周囲には大型のオイルブロックが災害時用対策として設置されるであろう。ブロックは波浪により動揺するから、その連結部にはフレキシブルなフェンスが用いられるだろう。このフェンスも、波浪や潮流による流体圧を受けるので、やはり膜構造物といえる。膜材料としては当然不燃性のもの、たとえばコーティングされたガラス繊維布が検討の対象となるだろう。

3. 海中の膜構造物

海中にも膜構造物がある。実用中のものもあれば、研究中あるいはアイデアの段階のものもある。先ず、理解しやすくするために、その機能の分類をしてみよう。分類の結果を表1に示す。

3.1 流れ制御

表1に示したように、膜構造物を利用した海の流れ制御は大きく二つのタイプに分けられる。水平方向の流れ制御と垂直方向の流れ制御である。

海洋汚濁拡散防止膜は、実用されている流れ制御用膜構造物である。主として水平流れ制御をするタイプと、水平と垂直の流れ制御の両方をするタイプがある。このような流れ制御機能により、埋立て工事や浚渫工事にもなう汚濁が漁業海域など汚れてはならない海域に泥土が拡散するのを抑えることができる。それは、汚濁発生源の海域に汚濁拡散防止膜をうまく設置することにより、その発生源付近の流れを遅ませたり、流れの方向を望ま

表1 海中の膜構造物の機能と応用

機 能	応 用
流れ制御 (水平流れ制御, 垂直流れ制御)	海水の人工的な導流・分散・混合・淀みの利用。人工湧昇流・人工下降流の利用。
波浪制御	消波
貯蔵	淡水・石油・粉粒体等の貯蔵
集魚・養魚	人工魚礁, 人工浅瀬。人工湧昇流, 人工海流の利用。
その他	船舶用シーアンカー, ハイドロクレーン

図2 海上淡水輸送システム案

図3 海洋汚濁拡散防止膜

しい方向に変えたりできるからである。また、膜体そのものが海中の仕切り膜として汚濁粒子の通過を止めてしまうからである。

図3は3タイプの汚濁拡散防止膜を示す。図3(a)の垂下式と図3(b)の自立式のものはおよそ水深10 m程度までの海域で使用されており、主に水平方向の流れ制御に関係する。図3(c)の垂下・自立組合せ式のものは、およそ10 m以上の水深の海域で使用されており、水平と垂直方向の流れ制御に関係する。なお、図3(b)の浮沈式のものは、フロートが注排水されるようになっており、注水されると膜体とともに海底に沈止する。

以上の汚濁拡散防止膜の膜材にはポリエステルやナイロンの平織布が使用されている。現状のこの織布の織目開口率はほぼ0とみなすことができるので、従って設計上は、波にともなう水粒子運動や、海流や潮流の流れに対しては、直立板のようにふるまう不透水膜と扱われている。このように、膜は波や流れによる流体圧力を受ける。従って、設置海域の水深が大きくなって膜面の面積が大きくなったり、流れの速度が大きくなると、膜面全体がうける流体圧は非常に大きくなり、アンカーワイヤーなど他の構造要素の必要寸法も大変大きなものになる。汚濁防止膜が適用可能な水深や流れ速度には、こうして制限ができてくる。汚濁を通過させずに上記の流体圧力を軽減させられるような透水性の機能がこの膜材にももしも与えられたら、このような制限も緩和され得るのであるが。

膜構造物を使って湧昇流を人工的に起そうとする一連の研究が続ら³⁾によって行われている。この研究は、環境条件が厳しいためにこれまで有効に利用されていない海域をより効率的な利用しやすい海域に変換すること、また、汚染が進行した内湾や内海海域の環境保全や浄化といったニーズに応えることを目的として行われている。

シート模型を使った水槽試験の結果が先ず報告され、そこでは、剛模型に比べてシート模型の後流部では頻繁に大きな渦が発生するということが述べられている。つ

づいて、高さ4 m、長さ25 mのシート型構造物が、その上部にはフロート、下部にはアンカーチェーンを取付けて、山形県由良港沖3 km、水深40 mの地点に実際に設置され実験された。シートはPVCコーティングの合成繊維布と思われる。設置された状況の概念は、図7に示した人工湧昇流を起こす膜構造物と同様である。シート型構造物の前後では流向・流速・水温・塩分が測定された。多くの場合夏期の海水には水温および塩分に起因する鉛直密度成層が形成されるとのことであり、この状況下で流速の差が大きい場合はシート後流域で鉛直混合がみられたとの報告である。

この例のように、膜構造物を湧昇流の発生に役立たせ、その一つの流れ制御機能として、上昇・下降流の発生や海水混合を生じさせたり促進させたりすることができるであろう。

図4のスケッチは、養殖を長年続けたために汚染が進んだ内湾の海水をリフレッシュするための導流膜構造物の案を示す。湾外の汚染されていない海水を湾内に導くように流れ制御をするには、1枚の導流膜だけでは無理があると考えられる。多段に導流膜を設置し、おのおの導流膜にはごくわずかの流れ制御をさせるようにすれば実現可能かと思われる。いずれにしても、このような膜構造物を用いた流れ制御を行うことができれば、大規模で固定的な築堤工事を行う場合に比べて安価にかつ確実な導流効果を短期のうちに実現することができるだろう。膜材料としては合成繊維布、あるいはPVCコーティングの合成繊維布が利用できる。

3.2 波浪制御

消波はコンクリート構造物や鋼製浮消波堤でやろうというのが主流だと思われる。これに対し、消波を海中の空気袋つまり膜構造でやろうという井島らの研究^{4,6)}がある。

図5は、空気連通管でつながれた潜袋を示す。上部に來る波による水面の上下動に応じて潜袋に作用する水圧が変動するので、潜袋の形状は図5の実線と破線の形の

図4 内湾をリフレッシュする導流膜構造物

図5 空気潜袋消波堤

ように変化する。潜袋からは、その形状つまり体積の変化により放射波が発生する。これと、通過しようとする波とが相殺し、消波ができる原理である。また連通管内での空気流の乱れによるエネルギー消失による消波も同時に起こる。浮消波堤は一般に長波長の波に対して消波効果が良くないが、この空気潜袋消波堤は長波長の波に対して十分な消波性能を持つ、と説明されている。

膜材料としては、繊維補強ゴムが採用され得るのではないか。

3.3 貯蔵

膜材料で巨大な袋を作り、原油や粗製ガソリンなどの石油資源、飲料水のほか、食糧などの粉粒体を海中や海上に備蓄する方法の研究やアイデアが報告されている。備蓄する内容物の重さによって、袋は海中に設置されると表現した方が適切な場合もあるし、海上に設置されると表現した方が適切な場合もある。本稿では一応、海洋でのこの種の袋を海中の膜構造物として考えることとする。

工業技術院製品科学研究所では昭和53年以来、石油資源や飲料水の海中備蓄のための柔構造材料の適正化のための研究が続けられて来た⁶⁾。柔構造材料すなわち膜材料には、海水・油・紫外線、そのほかバクテリアに対する耐久性が要求される。また力学的性能の要求としては、膜材料の引張強度やクリープ強度のほかに、膜材料の接合部の強度や、金属と膜材料との結合部の強度がある。さらに内容物の浸透に対する膜材料の抵抗性能も要求される。膜材料の電気的特性も調べられなければならない。膜材料には海水と内容物による圧力が作用して、海中あるいは海上での適正なタンク形状が決まる。製品科学研究所による上記の研究では、以上のような項目についての研究がなされている。とりあげられた膜材料は、ポリエステルやナイロンの基布に各種の合成ゴムや合成樹脂をコーティングしたものである。

海中での膜構造物による貯蔵に関する上記の研究は主として膜材料に関する研究といえる。これに対し、主として膜構造物に関する研究も民間企業の共同により、上記研究に関係して進められている⁷⁾。この研究の一環として、海中の柔構造石油貯蔵タンクの形状解析が行われ、海中で液体を包み込む適正なタンク形状が数値計算により与えられている⁸⁾。

津村は、真水と海水の比重差を利用した自然給水・自然排水が可能な海中貯水タンクを提案した⁹⁾。

図6に示すように、海面下にはネットを組み合わせたフレキシブルな袋があり、海面上にはフロートがあって、この中央部に比重差でできる水頭を保持する部分がある。この水頭以上の高さからであれば給水パイプを通じての

図6 比重差を利用する海中貯水タンクの案

自然給水が可能であるし、またこの水頭以下の位置に対しては排水パイプを通じて自然排水が可能である。海面下の袋はフレキシブルだから、貯水量の増減に応じて袋は変形して水頭を作り出す。

この貯水タンクの利用途としては、水不足解消のための飲料水の貯蔵、海上での淡水魚の養殖、揚水発電用下部調整池などがあると考えられている。

このような海中貯水タンクも膜構造物である。海中のフレキシブルな袋には、膜材料としてポリエステルなどの合成繊維に合成ゴムや合成樹脂がコーティングされたものが使用されるだろう。

3.4 集魚・養魚

流れ制御の所で前述したように、フレキシブルなシート型構造物を流れのある海底に設置することにより、湧昇流を生起させて海水の混合を促進できる。そこで図7のスケッチに示すように、人工湧昇流を起こさせる膜構造物を沖合の適当な深さの海底に設置して、リン酸塩やケイ酸塩などの栄養塩を含んだ海水をその後流域で上昇、

混合させるという案ができる。

さらに図7に示したような人工藻場を、合成繊維布を膜材料としてその床部に使用して製作し設置する。ここで孵化した小魚は、上記の栄養塩で繁殖したプランクトンを食べて育つことができる。有用魚類がこの小魚を求めて集まり、図7に示した膜構造方式の浮魚礁周辺に集集する。

以上は、海の牧場化、海の畑づくりとしても膜構造物がいろいろな形態で利用できることを案として説明したものである。ただし、図7の浮魚礁は実際に製作され設置され、その効果も確認されている¹⁰⁾。

3.5 その他

本稿のはじめに、空のパラシュートも膜構造物だと述べた。小型漁船などが荒天に遭遇した場合に船首を風上に立てて海難を防止したり、遭難現場からの漂流を抑えたりするために有用なシーアンカーも¹¹⁾、やはり海中の膜構造物である。

ハイドロクレーンは合成ゴムコーティングの合成繊維で作られた水中バルーンである。空気を送りこんで、海底からの重量物の引上げや水中での移動・位置設定に使われる。これも海中の膜構造物である。

4. おわりに

こうしてまとめてみると、海洋での膜構造の利用途は建設・土木・輸送・水産・石油化学・水利など、実に様々な産業分野にまたがっているし、利用形態もまた様々

図7 膜構造物による集魚・養魚

である。

本文にはとりあげなかったが、海洋の境界部での膜構造あるいは膜もある。砂浜の流砂防止に関連した土木工法の中でも、合成繊維布を使った膜構造がいろいろな形態で応用されている。さらに、膜構造とは言えないが、ケーソン防波堤基部の護岸用捨石の下面の海底面に流砂防止として大規模に合成繊維布のシートが敷設された例が多くある。

膜構造の特徴は、その膜材料が薄くて軽くてフレキシブルで大面積も可能であるという点だろう。従って膜構造物は、一般にその製作に大規模な設備を必要とすることもないし、製作されたものの輸送や設置に要する費用や機材は小さくてすむし所要時間も短かくてすむ。設置されたものの場所の変更や撤去も容易である。製作できる膜構造の形態は様々で、巨大化も可能である。風速毎秒 60 m に耐える帆布、何 km の長さも可能な海洋汚濁防止膜、長大なチューブ状袋、何百万 m³ の貯水も可能な巨大タンクなどである。著者の勤務する会社の能村会長はかつて、膜構造で黒潮の流れを変えて九州付近に大漁場を作れる、と海洋での膜構造の将来の夢を語ったことがある。連なる南西諸島の島々は、そのための巨大長大な導流膜構造をつなぎとめる杭である、という発想であった。

我国の漁業は昭和 30～40 年代、沿岸から沖合、沖合から遠洋へと発展した。さらに昭和 50 年代に入って 200 海里体制が定着し、沿岸漁業整備開発事業が長期計画で開始されて、海の畑づくりや海洋牧場を目指した調査研究が続けられている。そして昨今のハイテク環境の中で昨年 10 月、マリノフォーラム 21 が結成されており、200 海里漁業の開発は増々活発化し始めた感がある。沿岸での漁業の開発のためのこうした調査研究が今後進展して行くと、エレクトロニクスやコンピュータなど高度化した他分野の技術とのシステム化がはかられ、本文の集魚・養魚のところで述べた膜構造物の利用も近い将来に実現することだろう。そしてさらにその後、人類の飽くことなき技術への挑戦の歴史からみて著者は、黒潮の流

れを変える上述の巨大膜構造物も夢物語ではなくて現実のものになるのではないかと考えるのである。

海洋での膜構造は、陸・空・宇宙などその他の空間での膜構造と同じく、エレクトロニクス コンピュータ 通信・新素材・バイオテクノロジー、そしてエネルギーの各分野のハイテクノロジーの発達と同調しながら今後、大いに発展するだろうと著者は考えている。

参考文献

- 1) 南 宏和, “膜構造とは何だろう”, はぐるま, 日刊工業新聞社, 1985, 6 月号
- 2) R. M. Dunlap “Fresh-water Transport by Sea” J. of Hydrology, 51 (1981), 313-318
- 3) 続 辰之介ほか, “流れ制御に関する実海域実験 (第 3 報)”, 海洋科学技術センター試験研究報告 12 (1984)
- 4) 上床隆彦ほか, “空気潜袋群による波の遮断機構”, 第 31 回海岸工学講演会論文集 (土木学会), 517-521, 1984
- 5) 下村嘉平衛ほか, “空気潜袋消波堤の消波効果に関する実験的研究”, 第 32 回海岸工学講演会論文集, 510-514, 1985
- 6) 高橋教司ほか, “海中備蓄用柔構造材料について (第 4 報)”, 製品科学研究所研究報告, 100, 1984
- 7) 柔構造貯蔵施設研究会, “フローティング方式による柔構造石油貯蔵施設 第 1 次基本構想報告書”, 昭和 53 年 7 月
- 8) K. Ishii “The Form of an Oil-filled Axisymmetric Membrane Tank Floating on the Sea” Bulletin of the Facu. of Eng. of Yokohama N. Univ., 34, 1985, 63-73
- 9) 津村俊弘, “海中貯水槽とその応用”, エネルギー・資源研究会 第 4 回発表会講演論文集, 1985
- 10) 山下晋平, 宮崎俊三, “魚群集中装置とドーム型アワビ魚礁について”, OCEAN AGE 1973, 3 月号
- 11) 山本徳太郎ほか, “シーアンカーの性能基準に関する水槽実験”, 船舶技術研究所報告, 第 21 巻, 第 6 号, 1984

(昭和 61 年 1 月 23 日受理)