中といわれる。

また、この高性能 FRP をドア・インパクトビーム、ラジエタ・サポート、プロペラシャフトなどの用途に今後応用していくことも検討中といわれている¹⁹⁾。

3.5 CFRP 製部品

フォードは 1977 年末に CFRP をボデー、シャシ、パワー・トレーンに多用し、従来車に比べて約 560 kg (約 31%) 軽量化することをねらった軽量実験車の開発を発表した²⁰⁾。1979 年の SAE 大会で、フォードはその結果について発表している²¹⁾。それによると、表 4 に示すように、鉄板を CFRP に代替することにより 320 kg/台軽量化でき、軽量化率は約 52% であった。材料変換以外の二次的効果も含めて計算すると、'79 年モデル車 1,700 kg に対し、この軽量実験車は 1,135 kg であり、565 kg (約 33%) 軽量化されている。この軽量化を主体に開発された車の燃費は、'79 年モデル車の 17 MPG に対し 24.7 MPG であり、かなり向上している (約 45%)。問題点としては、(1)炭素繊維の価格が高いこと、(2)生産性が悪いこと、(3)うまい接合方法がないこと、などが考えられる。なおフォードは経験の蓄積をはかるために、'80 年モデル車約千台に CFRP 製のエアコン・ブラケットを採用する予定であったが²²⁾、技術的問題 (クリープ) と経済的問題とで、'80 年春以降に延期されるようである²³⁾。

4. おわりに

自動車を軽量化していくうえで、複合材料に寄せる期待は大きい。しかしこれまで述べてきたように、日米間で違いはあるものの、コスト面や使用技術面を考えると簡単に増加していくとは考えられない。軽量化を進めていくうえで重要なことは、たんに材料だけに頼った軽量

化は効果が少なく、適切な設計ならびに生産技術と相まって初めて効率的な軽量化がなされるという点である。今後、さらに軽量化を進めていくには、自動車メーカーのみならず、材料メーカーのなおいっそうのご協力をお願いしたい。

参 考 文 献

- 1) Ward's Auto World (1979-1), pp. 25-28.
- 2) Automotive Industries (1978-12), p. 44.
- 3) Ward's Automotive Reports (1977-10).
- 4) Plastics Engineering (1979-10).
- 5) Impact of Material Substitution in Automobile Manufacture on Resource Recovery, EPA-600/5-76-007a (1976-7).
- 6) American Metal Market-Metalworking News Edition (1979-3-12).
- 7) H.E. Burst & E.W. Strehler: SAE Paper, 780178 (1978).
- 8) Plastics Engineering (1979-10).
- 9) 島村昭治: 工業材料, 27, 10 (1979), 18.
- 10) 三浦維四: 金属複合材料, 共立出版 (1973), p. 3.
- 11) G.Y. Yee: SAE Paper, 790170 (1979).
- 12) Ward's Auto World (1979-9).
- 13) Bussiness Week (1979-5).
- 14) Automotive Industries (1978-3).
- 15) Modern Plastics International (1979-12).
- 16) Ward's Automotive Report (1979-4-2).
- 17) *ibid.* (1979-4-30).
- 18) *ibid.* (1980-1).
- 19) American Metal Market-Metalworking News Edition (1979-11).
- 20) Automotive Industries (1977-12).
- 21) Ward's Auto World (1979-5).
- 22) Chemical & Engineering News (1979-2).
- 23) American Metal Market-Metalworking News Edition (1979-12).

解 説

船舶における軽量化

渡 辺 修 治*

1. 造船材料の変遷

人類の歴史にとって、「船」は特別の意味をもつ乗り

物である。有史以来、民族の拡散、移動、新天地の発見、戦争、物資の運搬等、人類の歴史の進展は「船」抜きには考えられない。もちろん、「船」は人類の知恵が進歩するにつれて改良され、より速く、より多くの物を運ぶために、強度/重量比の高い材料、構造法が追求さ

* Shuji WATANABE: 日産自動車㈱マリン部 (104 東京都中央区銀座 6-17-1)

れてきた。

15 世紀に入ると、ポルトガル、スペインは航洋帆船によって人類未踏の外洋への挑戦を開始した。そしてついにアフリカ南端の喜望峯を回ること成功してインドに達し、また、西航してインドに向かったグループは、アメリカ新大陸を発見した。

当時の航洋帆船は 100 トン足らずの木造船であったが、行く手には強風、激浪はもちろん、どんな危険が待ち伏せているか、何日かかるのかも予想できない未知の外洋に出ていくのであるから、「船」として完全な自立能力 (self-sufficiency) が要求された。これは「船」がもたなければならない特性で、航空機や鉄道、自動車等の乗り物と違う点であり、このプリンスは現代の外航船の設計にも生きている。

日本が鎖国を続けている間、ヨーロッパ諸国やアメリカは、木造の航洋帆船で世界の外洋を走り回って植民地の開発や経営、通商活動を行っていたが、アメリカ東洋艦隊の黒船が浦賀水道に進入して日本に開国を迫った 1850 年代には 750~1,000 トンのクリッパーと呼ばれる快速帆船が 20 ノットの高速で航海していたのである。

このころ、ベッセマーやシーメンスが開発した製鋼法によって圧延鋼材ができるようになると、「船」の鋼船化、大型化が急速に進んだ。木造船の大型化は部材同士の結合の困難さ (継手効率の宿命的な悪さ) と、木材資源の枯渇から限度があり、1,000 トンを超すのがむずかしかったが、強度/重量比の高い鋼構造法の出現によって、早くも 1858 年には、全長 210 メートル、18,900 トン、4,000 人乗りの巨大なスチームシップ、「グレートイースタン」号が出現した。

また、このころ開発された蒸気タービンや内燃機関はその後めざましい発達をとげ、商船の巨大化、高速化、軍艦の戦闘能力の増強が進み、太平洋戦争前には排水量 6 万 9 千トンの戦艦「大和」が生まれ、現在では載荷重量 50 万トンのタンカーまでできるようになった。鋼材の溶接技術の進歩によって結合の信頼性が向上し、コンピュータを使った応力予測の技術とあいまって「船」の巨大化の可能性はとどまるところを知らない。

一方、「船」の仲間には、必ずしも完全な自立能力を必要としない、「舟艇」と呼ばれるグループがある。港内、沿岸航路の小型船、小型漁船や、魚雷艇、バトロールボート等の高速艇、それからプレジャー用のヨット、モーターボート等がそれに属する。最近、航空機と「船」の合の子のハイドロfoil艇やホバークラフトも、もう一つのグループとして実用期に入った。

「舟艇」は、外航船の補助的の意義をもつ「船」で、一般的にいて小型で高速である。戦前は手工芸的な技術による木造艇が主体で、木鉄合成や、アルミ合金による造艇は先駆的と見なされたが、発展はしなかった。

太平洋戦争中、アメリカ海軍は軍艦の搭載艇の艇体に FRP を試用して成功し、戦後本格的に取り組んで 1951 年には 17 メートルの掃海艇を建造し、FRP 艇建造のマニュアルを作成した。

戦後、平和になったヨーロッパ、アメリカではプレジャーボートが急速に大衆化した。アメリカ海軍が FRP 舟艇の実用化に成功すると、小型のヨット、モーターボート用の造艇材料としての FRP は、従来の木材、鋼、アルミ合金のもっていなかった長所、すなわち軽く、成形が楽で、中規模の量産に適していることがわかってきて、ハンドレイアップ法による FRP は、プレジャーボート界を席捲してしまった。

わが国では、1960 年に FRP の原材料であるガラス繊維とレジンが国産されるようになり、経済成長に伴って国民の関心がプレジャーボートに向かうと、FRP によるヨット、モーターボートの生産が始まった。しかし、海のスポーツに関して、欧米とは歴史、社会通念が違うためか、日本のプレジャーボートの需要は意外に伸びず、総生産金額で 1968 年に 20 億円、1978 年にやっと 80 億円に達した程度である。

しかし、日本の水産界では、FRP を小型漁船に適用すると従来の木材、鋼にくらべて船体重量が軽くでき、高速が出て、魚獲能力が大きくなることがわかってきたため、FRP 漁船ブームが全国的に巻き起こった。現在では 20 トン以下の新造漁船のほとんどが FRP で建造されているが、99 トンの大型 FRP 船まで現われるようになった。

現在、全国的に普及している FRP 造船は、ほとんど従来の小型木造船所で行なわれている。FRP は慣れると誰にでも扱いやすい材料であるが、在来木材、鋼とは本質の異なる造艇材料であるから、甘く見ると欠陥成品が生まれやすい。

次に、最近の文献 (1) ほか) と重複する面も多いが、木造、鋼船と違う FRP 船の構造設計の特徴について述べる。

2. FRP 船の構造設計

FRP 船の構造は、木、鋼、アルミ合金構造とはまったく異なった見方をしなければならない。

ハンドレイアップによる FRP 船の構造は、造船所の

技術、生産管理の水準、作業者の成形技術力に対応したデザインを考える必要がある。

FRP の強さは、木、鋼、アルミ合金の強さとは異質の強さである。FRP は鋼にくらべ、比重は 1/5、引張り強さは 1/3、ヤング率は 1/20 と、強さの割に変形しやすい材料であるから、設計を間違えると部材内の応力が上がらないままに座屈によって破壊する。また、局部的に硬い構造を作ると応力集中によって破壊する。層間剪断強さは元来あまり強くないので、そのうえ積層作業が悪いと層間剪断疲労強さが低下し、クラックが発生しやすくなる。

FRP 積層板は破断直前まで永久変形はきわめて少なく、かなり大きく変形しても外力を除けばもとの形に復元してしまう。この性質は、高速艇のように波浪衝撃によってきわめて短時間に大きな外力を受ける場合、適度に変形して衝撃エネルギーを吸収し、外力が去れば復元するので具合がよく、理想的である。

現在、FRP 高速艇の船体構造は、外板にハットセクションの縦肋骨を前後に入れ、横メンバーとしては隔壁以外のものは設けないのが常識となっている。この構造方式は、数多くの試作、強度試験、耐久力試験を繰り返した結果、到達したものである。

FRP 高速艇の船体は、アルミ合金艇よりやや重く、高級木造艇とはほぼ同等である。高張力鋼艇にくらべると長さ 20 メートルではほぼ同重量となる。今日の FRP 漁船は在来の木造、鋼船にくらべ船体重量は軽く、小型高速ディーゼルの採用とあいまって、多少の波浪中は高速で突っ走るの、高速艇なみの波浪衝撃を受ける。このような漁船では、在来の鋼船のような変形を制限するデザイン思想を捨てて、ある程度の弾性座屈を許すデザインに転換しないと軽い船体を作ることはできない。

鋼と FRP による構造を比較すると、強度を抑え、変形を許した設計では鋼の 3/5 の重量でできるが、変形量を等しく抑えると、鋼の 4 倍の重量になる。すなわち、鋼船構造をそのまま FRP に置き換えたのでは、とうていバランスのとれたデザインは成立しない。

主要造艇材料である、木材、鋼、アルミ合金、FRP の機械的性質の比較は表 1 のとおりである。

表 1 主要造艇材の機械的性質

	引張り強さ (kg/mm ²)	ヤング率 (kg/mm ²)	比 重
ひ の き	12	900	0.44
け や き	13	1,200	0.69
鋼	41	21,000	7.85
アルミ合金	27	7,200	2.75
FRP (高)	15	1,100	1.6
(低)	12	988	1.6

を設定し、管理することになってから、外洋ヨットは国際的の拡がりをもつ大きなスポーツのグループに発展した。

プレジャーボートとはいえ、外洋ヨットは昔の航洋帆船の特性であった自立能力をもつことが原則で、レースは救助の手段のない遠い外洋上で行なわれることが多い。外洋ヨットの大きさは 9 メートルから 21 メートルくらいが普通であるが、強風、激浪によって転覆しても十分な自己復原力を持ち、船体がこわされたり、水密が破れたりしないことが要求される。また、外航船としての安全、救命設備を完備しなければならないことはもちろんである。

ORC のレーティングルールはさまざまなデザイン、大きさの異なる外洋ヨットに対して、それぞれのスピードポテンシャルのインデックスとなる公正なレーティングを与え、レーティングをベースとしたハンディキャップシステムによって公平なレースを行なうのがねらいである。

外洋ヨットのオーナーや設計者達は、低いレーティングでなるべくスピードが出るデザインを追求するが、最近では、宇宙開発や軍用に開発された、新しい工業材料を取り入れてヨットの性能向上をはかるようになった。その新材料は、カーボンファイバー、ケブラー、ボロン、チタニウム等で、在来の造艇材料にくらべて高価ではあるが、強度／重量比が高く、画期的の性能をもっている。ヨットの世界ではこれらを exotic materials と呼んでいる。

1979 年 8 月、イギリスでアドミラルズカップレースと呼ばれる外洋ヨットの国際レースが行なわれた。各国ごとに 3 隻のチームを出すのがルールで、参加艇数は日本を含めた 18 カ国からの 57 隻であった。参加艇の大きさは 12 メートルから 15 メートルくらいであるが、いずれも設計、建造技術の粋をつくした世界のトップレベ

3. exotic materials

プレジャーボートのなかの外洋ヨットは、欧米では永い歴史と伝統をもつ海のスポーツである。1971 年に ORC (Offshore Racing Council) と呼ばれる外洋ヨットの国際組織が誕生して世界共通のレーティングルール

ルのヨットで、大部分が船体、帆装に exotic material を使用していた。

アドミラルズカップレースは、長、中、短距離レースからなるシリーズレースである。最後の長距離レースは RORC (Royal Ocean Racing Club) の主催する、605 哩の Fastnet レースであった。

Fastnet レースは、54 年の伝統をもつレースで、今年はアドミラルズカップ艇を含めて 302 隻がスタートを切った。ところが 3 日目の夜半、急激かつ異常に発達した低気圧がレースフリートの中心を直撃し、風速 60 ノット以上の暴風の通過に伴って波高 12~15 メートルの急峻な三角波が立つ危険な海面が出現し、参加艇の半数が横倒しにされ、真逆様に転覆した艇もかなり出る空前の事態となった。結果、18 隻が船体を放棄して乗員はライフラフト等で脱出をはかったが、15 名が死亡する悲劇が出た。完走できたのはわずか 85 隻にすぎなかった。

1979 年の Fastnet レースは、外洋ヨットとヨットマンにとって史上最悪の試練となったが、exotic materials にとっても、きびしいテストマシンであった。RORC の機関誌「Seahorse」²⁾ に Hugh Marriott 氏が、アドミラルズカップ艇の exotic materials が、この試練にいかに応えたか興味深い記事を書いておられたので、「Seahorse」のご好意により内容のあらましを紹介する。

『イギリスの代表艇の 1 隻「エクリプス」は 11.9 メートルとアドミラルズカップ艇では最小寸法であったが、Fastnet レースを 1 位で走り切った。「エクリプス」の船体はケブラーで積層され、舵はカーボンファイバーが使われていた。舵にカーボンファイバーを使った他のヨットは多くが舵を折損し、レースを棄権したり船体を放棄したりしたのに「エクリプス」は健在であった。新しい外洋ヨットにとって、ケブラーとカーボンファイバーは最も注目され、使われている exotic material である。両方とも、アルミ合板や FRP にくらべてかなり高価であるが、軽量化をねらうトップレベルの外洋ヨットを目指すオーナーと設計者にとっては魅力的な材料である。』

3.1 重量軽減

「エクリプス」の船体はフォームコアの両側に 4 層のケブラーを積層したものである。積層の構成は、ゲルコート、0.2mm のケブラークロス、0.7mm のフィラメントグラスファイバー、0.2mm のケブラークロスで、合計 1.1mm の厚さしかないが、インパクトに対しては

表2 ハニカムコアにエポキシで積層した板の衝撃値

	厚	さ
	0.25 mm	0.50 mm
ケブラー	55	75
E-ガラス	25	50

スタイル	重 量 (g/m ²)		引張り強さ (kg/cm) (幅)	
	ケブラー	ガラス	ケブラー	ガラス
120	61	107	45	22
180	170	302	180	61

きわめて強い。「エクリプス」の船体重量 (外板、デッキ、コックピット、コーチルーフ) はわずか 1,000 kg である。

ケブラーを使用する最大の利点は、重量増加なしに強度を向上しうることである。ケブラーの比重は FRP と同程度で、積層法も同じであるが、出来上がった積層材の強度は金属材料に匹敵する。

Fothergill & Harvey (イギリスのケブラーファイバーのメーカー) によれば、ケブラー 49 を適切に用いれば FRP にくらべて 30%、アルミ合金にくらべて 50% 重量軽減できるという。現在の FRP の積層技術をケブラー 49 の積層に応用できることがケブラーの利用価値を高めている。そしてレジンマトリックスに組み込まれば、ケブラー繊維の引張り強さとヤング率を 100% 発揮させることができる。

現在のようにヨットの重量軽減が要望されるときは、船体に生じる応力の大きさや方向は場所によって違うので、ケブラー繊維の方向を変えて積層することによって合理的な構造とすることができる。ヨットの中央部では横方向の応力が主役であるが、前後では縦方向の応力が大きい。金属材料の強度は方向性がないので応力の方向に応じて使い分けることはできないが、複合材料では積層作業中に繊維の方向をコントロールして、応力の方向に合わせることもできる。必要のない部分には材料を用いる必要はないわけである。

ケブラーとガラスクロスの強度の比較は表 2 に示すとおりである。

3.2 カーボンファイバー

Fastnet レース参加艇中、カーボンファイバーの舵を折損した艇が 13 隻出たが、大部分は Ron Holland の

設計になるヨットであった。元イギリス首相ヒース氏の「モーニングクラウド」も Holland の設計で、Fastnet の前の中距離レースでカーボンファイバーの舵を折損している。Holland 自身も、自分の乗ったアイルランド代表艇の「ゴールデンアップル」がカーボンファイバーの舵を折損したため船体を放棄し、乗員はヘリコプターによって救出された。

レース後 Holland は、「カーボンファイバーの舵を採用したねらいは二つある。一つは船体の重量を集中して慣性モーメントを小さくし、ピッチング性能を良好にすることで、二つ目は船尾を軽く浮かせ、レーティングのメリットを得ることである。この目的のためにできるだけ軽い舵を設計した。今度の舵の折損事故はカーボンファイバーの本質、特性に対する認識、理解の不足によるものと思う」と述べている。

前出の Fothergill & Harvey 社はカーボンファイバークロスの最大メーカーでもあるが、彼らも Holland のコメントに同意しつつ、「関係者のカーボンファイバーの特性と応用に関する知識の不足が原因と思われる。この材料の強度の限度に対する正しい認識があるか否かで結果に大きな差が出たものである。この問題はどちらかといえば、設計者より造船所のほうが責任が重い」といっている。

造船所が新しい材料と技術を導入する場合は、応力や歪に対し細心の注意を払う必要がある。昔ながらの斧で木材を削ったり、バケツの中でレジンを混合させるような気持ちで新しい材料にすることが失敗の原因となる。しかし、新しい材料を正しく使った場合は、目ざましい成果を得ることができる。

アドミラルズカップレースの参観者の一般的な意見は、「軽量化の行き過ぎではないか」ということである。カーボンファイバーの舵を折損した 12 メートルのヨットの舵の重量は、在来舵の半分の 20 kg であったが、もう 5 kg 増せば強度は 2 倍になったはずである。

ある専門家は、「安全率を大きくとることが問題の鍵ではなく、新しい材料についてもっと深い経験を積むこ

とが大切である」といっている。経験が最も必要とされているのは、新しい材料の強さの実際の数値をいくらに決めるかということである。メーカーが発表する仕様上の数値は、ベストの値を用いることが多い。生産状況も使用状態も理想的で、操縦者の技量も最高と見るわけである。しかし艇を実際建造している造船所の環境は、新材料を開発したメーカーの研究室とはまったく違うので、そこで作られたカーボンファイバーの舵は、設計者の望むほど強いものではない。設計者は、ゴミや湿気に満ちた造船所の現場が作る製品の、現実的のデータをつかむ必要がある。

3.3 exotic materials の将来

6 隻のケブラーヨットが Fastnet レースに参加したが、構造上の欠陥は出ていない。ケブラーは将来もっとヨットに使われるようになるだろう。

カーボンファイバーは問題が多かった。Holland はイギリスの航空研究所の材料専門家と協議しながら、カーボンファイバーへの理解を深めているが、応用面でのさらに突っ込んだ理解を得るまで使用を見合わせる、といっている。

外洋ヨットの歴史を振り返ってみると、新しい材料の採用はオーナー、設計者、造船所の意志と責任にゆだねられてきた。出現した当座、欠陥を生じて、改良されて次の機会には成功した例はいくらでもあった。

現在、ヨットに使われている exotic material は、元来、金に糸目をつけない宇宙開発や軍用の技術の世界で生まれたものであり、ヨットの世界で必ずしも基本的に必要なとされている材料ではない。しかし、外洋ヨットレースで勝利を収めようとするヨットマンの不断の努力は、強度/重量比の高い、新しい材料を求めてやまないものである。

参 考 文 献

- 1) 丹羽誠一：船舶，42，2 (1976)，97-103.
- 2) H. Marriott : *Seahorse*, 55, Nov./Dec. (1979), 69-71.

第 7 回工業材料利用技術シンポジウム開催のお知らせ

主 催：(社)日本能率協会
後 援：日本複合材料学会，ほか
期 日：昭和55年6月11日(水)～13日(金)
会 場：(社)日本能率協会 (東京都港区芝公園3-1-22)
申込先：〒105 東京都港区芝公園 3-1-22 (社)日本能率協会材
料利用技術推進センター TEL. 03-434-6211

日本光弾性学会第 2 回研究発表講演会開催のお知らせ

日 時：昭和55年6月26日(木)，27日(金) (10:00～16:00)
場 所：学士会館本館 (東京・神田)
参加費：無料
連絡先：〒113 東京都文京区弥生2-4-16
学会センタービル内 日本光弾性学会
TEL. 03-815-1903