異常海難と船の安全性

Disastrous Structural Damage and Safety of Ships

山 本 善 之*

Yoshiyuki YAMAMOTO

Key Words: Ship, Safety, Waves, Slamming, Ship Strength, Ship Operation

1. 魔の野島崎沖

昭和41年早春、相ついで起こった大形ジェット機の墜落事故は、その1週間後に渡米をひかえていた著者を恐怖のどん底につき落とした。このような連続事故は、全く異なる原因によるものであるにもかかわらず、その奥底には何かの関連がある。1週間ほどの間に、東京湾で全員133名死亡、羽田で64名死亡、富士山で全員124名死亡と、3機の大形機の事故によって300名をこえる犠牲者を出した。

その3年のち昭和44年1月5日ほりばあ丸(33768総トン)、翌45年2月9日かりふおるにあ丸(34001総トン)という2隻の大形船が、真二つに折れるとか、船首部に大損傷をうけて、いわゆる野島崎沖で沈没した。前者では乗組員33名中31名、後者では29名中7名の犠牲者を出した。この場合の犠牲者は船員といういわゆるプロであるが、失われた命には代わりはない。これに対して、大形船の前部の構造を補強することと、荒れた海域においては、船の速力を減ずるとか、波に対する相対的な方向を変えるといういわゆる運航マニュアルを作成し、実施することにより小康を保っていた。

昭和55年末から翌年初めにかけての8日間に、やはり野島崎沖の海域で5隻もの大形船(ほかに

中形船1隻)が相ついで沈没した。このうちの1隻が我が国の尾道丸(33833総トン)で、昭和55年12月30日遭難し、船首が切断・沈没した。中央部はなお浮いていたため、乗組員29名は全員救助されたが、船体はグアム島へい航中翌年2月11日に沈没した(図1)。

この5隻のうち尾道丸を含む2隻の乗組員は救助されたが、他の3隻の乗組員は船と運命をともにした。損傷報告のあった4隻はすべて船首部に構造上の大損傷を受けたという。

大形船をつぎつぎに沈没させる冬の野島崎沖は異常な波浪の発生する「魔の海域」であろうか。大形ジェット機や大形船のように、高級なシステムは計画時にいろいろな角度から安全性が確認されている。事故は、その安全性の検討からはずれた状況のもとで起こったのであろう。したがって、事故の原因がわかれば、その種の事故の再発を防ぐための方策が得られるはずである。

図1 沈没する尾道丸

* 正員、東京電機大学理工学部(〒350-03 埼玉県比企郡鳩山町大字石坂)。

2. 異常海難

船舶の沈没に関係しそうないわゆる重大事故の原因は多様である。最近における主なものは、衝突、座礁、火災・爆発、舵を含む機関部の損傷による運航不能などが主なもので、構造に関係したものとしては、船側外板の損傷による浸水、出入口のドアやハッチカバーの破損などがあるが、航海中の船が折れるというような事故は極めてまれである。著者が知るかぎりでは、材料に原因のあるものを除くと、ぼりばあ丸の事故以前には、イギリス駆逐艦1隻(明治33年)と日本の駆逐艦2隻(昭和10年)があるだけである。船体は、起こ

図2 尾道丸の波浪中の挙動 ($t = 0$ sに船首にスラミング発生)

りそうな最大の波の中でうける外力に十分耐えるように構造設計がなされているので、真二つに折れるような事故は、駆逐艦のように細長い船をのぞくと、起こらないと考えられてきた。そのため、ぼりばあ丸の事故以来、我が国ではこのような船体の切断を伴う事故を「異常海難」と呼ぶことがある。

この異常海難には波浪の状況と船の構造強度が関係しており、船の構造寸法決定法が適切でなかったのではないかとこの疑問も提出され、大きな社会問題になった。

ぼりばあ丸の生存者には運航を担当する甲板部の船員がいなかったため、同船が遭遇した波の状況を明らかにすることができなかった。尾道丸の場合はその遭遇した波浪に関する詳しい説明が、船長によってなされており、また救助に向かった船からの情報もあり、波に対する信頼すべき資料が得られた。その結果、波高は予想されたより低く、有義波高(目視波高の1/3最大平均に相当)は8~9 mとされ、異常に高い波が発生していたとはいいがたい。従来の理論によると、波によって船に生ずる曲げモーメントはほぼ波高に比例すると考えられていたので、その理論によると、本船が異常に弱かったのではないかという推論が可能になる。

一方、このような事実は、従来の理論の正当性を疑う根拠にもなる。従来、このような大形船が積荷を満載して深い喫水で航海しているときは、その船底が露出することはないと考えられていた。それを否定すると、船首部の船底が露出して水に再突入するとき、水面に船底が衝突し、いわ

図3 破断した断面に生じた曲げモーメントの時刻歴 (時刻は図2と同じ)。

ゆるスラミングによる衝撃圧力が生じ、船体に過渡的な振動が起こり、船に大きな曲げモーメントが発生する可能性があることになる。船長の説明に基づき波の形を仮定して、スラミングの影響を考慮した理論⁽⁵⁾によって計算した波の状況と船の姿勢の関係を図2に、切断した断面に生ずる曲げモーメントを図3に示す。この曲げモーメントではスラミングによって生じた振動成分が大きな部分を占めており、スラミングを考慮しなければ甲板に圧縮応力を生じさせる曲げモーメントの最大値ははるかに小さくなる。

有義波高は、波高の1/3最大平均に相当しその海域の平均的な波高である。従来、波の性質は不規則であるとして、Rice 以来の不規則振動の理論と、多くの観測によって得られた波のエネルギー・スペクトラムに基づいた波浪の統計理論が広く用いられてきた。しかし、船長の説明による事故発生時の波の形は、規則波に近いうねりに支配されたものであった。形状が規則波に近く、波長が船の長さ程度の波の中では、スラミングが起こりやすく、スラミングが生ずると大きな曲げモーメントが発生するのである。

3. うねり

風が吹くとその粘性によって海に波を起こす。このような波は風波、wind sea と呼ばれ不規則で、いろいろな波長の成分波の合成したものと考えられる。海の波には分散性があり、成分波の伝ば速度は波長の平方根に比例するので、風波の中

図4 尾道丸海難時の天気図⁽³⁾

の長波長の成分は風の吹いていない海域に早く出してしまう。この際、この長波長の成分は、短波長の成分のエネルギーを吸収して成長し、うねり、swell といわれる。よく知られている「土用波」は、南方洋上で台風などによって起こされた風波から発達したうねりが伝ばしてきたものである。したがって、海洋で遭遇する波は、その海域の風によって生じた風波と遠方で生じたうねりよりなっており、前者は波長が短く不規則であり、後者は波長が長く、帯域のごく狭い不規則波（したがって規則波に類似している）と考えられている。

さきの尾道丸の場合は、風波の有義波高は3mといわれており、波はほとんどうねりによって支配されていたことになる。このとき、中国中部に居座った高気圧によるいわゆる「大西風」と北方低気圧によって生じたと思われる2系統のうねりがあったことが、図4、図5に示す当時の天気図と気象静止衛星「ひまわり」の写真からも推定できる。図中船印は遭遇位置である⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

「魔の海域」とはうねりが卓越した海域のようである。しかもうねりは遠方の海域の風によって起こり、その山はあまり崩れないので、過小評価しがちである。

4. 座屈による破壊

スラミングが起こると船首部の船底が衝撃的な圧力をうける。このため、船首部の甲板に発生する圧縮応力は引張応力より大きくなる。中立軸の位置が断面の深さの中央より低いことにより、船の断面の支える最大曲げモーメントは甲板の座屈によって支配される。このような事情によって尾道丸の場合、甲板に広範囲に座屈が生じたようで

図5 尾道丸海難時のひまわり写真⁽¹⁾

ある。スラミングが生じ、船首が波に突込み、ふたたび浮上したとき、すでに船首が約 5° 上向きに折れ曲がっていたという。このとき甲板は座屈変形に伴う大きな塑性変形をうけたはずである。相ついでくる波によって船首部が上下にゆれ、引張り・圧縮の大きな塑性変形が繰返され、甲板が切断したと思われる。そのあと船首部が大きく上向きに折れ曲がり、最後はねじれて全断面が切断したという。事実船底部の板はねじ切れたような様子が詳細な写真からうかがえた。最近の研究によると、最初に大きな座屈変形などにより塑性変形をうけた部材に対し、続いて引張り圧縮が繰返されると容易に切断することがわかった。本船の場合がまさにその状態であったと思われる。このことは、平板構造物に座屈が生ずると切断する可能性があることを示している。切断が生ずるのは大きな引張力あるいは繰返し荷重による疲労の場合だけではないことに注意を要する。

5. 危険海域

以上によって異常海難がスラミングに関係した現象であり、スラミングは規則的なうねりによって起こりやすいことがわかった。したがって、大きなうねりの発生する海域をさけて航行するとこのような状況は生じないことになる。大きなうねりの発生するのは日本近海においては⁽³⁾、

(i) 台風・低気圧の通過後の海域、とくに進行方向の右後方。

(ii) 冬期の大西風と北方低気圧による影響。

(iii) 寒冷前線（不連続線）を伴う低気圧の前線上。

2方向以上の方向からうねりや風波がくると、重畳して大きな波高を示すことがある。このようなとき三角波といわれる。(iii)の場合三角波が多発する。このほか、海流などによって波高が著しく増幅されることがある。

異常海難はこのように限られた海域だけに発生

図6 ハリケーンによる険しい高波の時刻歴⁽⁴⁾

するのだから、船の安全のためにはこのような危険海域を避けて航行すればよい。建築物と異なり、船の環境は乗組員の判断で変えることができるのである。

この場合やっかいなのは、低気圧などの移動により危険な海域が速やかに移動することである。しかもその移動速度は船速より早い。いったん危険海域に入り込むと、その海域から離脱できないことがある。しかし、危険海域に入り込まないこと、入ったならば早く離脱することが船の安全のための最善の方法である。このためには海象予報が役立つことはもちろんである。

6. 荒天航法

現在の海象予報システムは、船からの通報に基づいているので、時間的遅れがあり、そのために危険海域に入り込む可能性がある。また、危険海域を回避すべく努力しても、最近の低馬力の省エネルギー船では必要な速力で航行できず、やむを得ず荒天に遭遇することがある。ここで荒天とは、波浪の激しい状況をいうが、多くの場合同時に風も激しい。

図6はアメリカ沿岸警備隊の援助によって実測されたハリケーン中の波高の時系列である⁽⁴⁾。海波は分散性をもつため、この国は波の形状を表すわけではないが、波長=170~330 m、波高=20 mのうねりと推定できる。この波は規則波とはいえないにしても、かなり規則性をもっている。このようなうねりの方向は目視あるいはレーダで確認できる。

荒天時に異常海難が発生しないためにはスラミングが生じないように操船すればよい。スラミングは船が大きなピッチング・ヒービングを行って、船首部の波面に対する相対運動が激しくなるときに起こる。このような状態は船の波に対する出会い周期がピッチングとヒービングの固有周期（両者はほぼ等しい）に近いときに生ずるので、ピッチング・ヒービングが激しく起こるときは、減速するか針路を変えて船と波の出会い周期を変えればスラミングは起こらなくなる。注意しなければならないのは、針路を変えたときローリングが大きくなる可能性のあること

である。たとえば波に向かって航行（逆走）しているときスラミングが起こるならば、針路を反転（順走）して、全速力で航行すればスラミングは起こらないであろう。針路を変えるとき大きなローリングが起こると乗組員の心理に悪いし、実際風向きとの関係で転覆のおそれがないとはいえない。このような処置は慎重かつ果敢に行わなければならない。

このような場合の判断の助けになるのは、スラミングが船のピッチング・ヒービングという剛体運動に関係していることである。したがってピッチングなどを計測しておき、それがあつたとき、適切な処置をとればよい。海象の変化は、津波の場合と異なり、急激に起こることがないのでこれで十分なはずである。いき値をこえる可能性の有無の判断は計算機にやらせてもよい。計算機が最適の操船法を指示してくれるようになることが関係者の目標である⁽³⁾。

7. 構造強度

異常海難は構造強度に関係した事故であるにもかかわらず、以上の議論においては構造強度の重要性を無視しているかにみえる。波の状況を指定すれば、船の構造をその波に耐えるように設計することができる。スラミングは非線形現象なので、波をわずかに変えるとその状況が著しく変わることもあり得る。それゆえ規準的な波に対するスラミングに耐え得るということは実際上意味がない。

したがって、通常の状態すなわち線形的に取扱える範囲内で十分な強度をもつように設計しておき、スラミングのような非線形的な現象が発生しないように船を運航するというのがひとつの解決法であろう。このとき、前述のピッチング、ヒービングに対するいき値の決定には、船の積荷状況などととも、船の形状と強度が重要な関係をもつことは明らかである。したがって船の形状を衝撃力が発生しにくいように選び、かつ強度の水準を高めておけば、操船の自由度が広がる。

8. その他の異常な海難

以上においては船体が波によって真二つに折れ

るという事故を中心に考察した。構造上の大事故にはこのほかの形式もある。

(i) 尾道丸の事故の直後起こった船首部の外板が脱落した事故は新聞にも報じられた。畳4~5枚ぐらいの大きさの防とう材つきの外板が波の衝撃圧力によってつぎつぎに落ちたといわれる。衝撃圧力はスラミングによって発生したと考えられる。板にかなりの腐食が見られたが、その影響もあると思われる。

(ii) スラミングによっては尾道丸のように船首部が上向きに折れ曲がるが、空荷で喫水の浅い状態ではスラミングによる衝撃圧力が中央よりに加わり、へろの字形に折れ曲がった例がある。本船は小形船で、船首部に喫水を深くするためのバラスト水を積んでいたことが関係したものと思われる。

(iii) 船首部の外板にフレアと呼ばれる円弧状の部分があるが、ここに長さ10mものき裂が生じた。同時に本船の船首部全体が異常にねじられた。このような事故を防ぐためには構造部材の寸法を十分に増せばよい。またフレア部の形状を変え、スラミングによって、この部分に発生する衝撃圧力を小さくすることもひとつの方法である。それには船の中心面に対するフレア部の角度を小さくすればよい。

これらの事故も、前に述べた場合と同様にスラミングによる衝撃圧力の発生がなければ起こらないはずである。(i)、(iii)の場合は衝撃圧力の発生範囲が局所的な場合であるため、さきに述べた荒天航法では不十分であることが知られている。(iii)の例では衝撃圧の発生を避ける目的で波を、船の進行方向から30°の向きから受け、この事故が起こった。一般に30°の変針は不十分のように思われる。上の例ではむしろ正面から波をうけたほうが衝撃圧が小さかったとの理論的な結論も得られている。

かりふおるにあ丸は、図7に示す不連続線上で事故を起こした⁽⁴⁾。ここでは2方向からの風波およびうねりを受け、これらが重畳したいわゆる三角波が起こっていたはずである。本船は異常な大波によって船首部が破壊されたといわれているが、船の運動によって衝撃力が格段に増大された可能性もある。

図 7 かりふおるにあ丸海難時の天気図⁽³⁾

9. おわりに——安全のために——

以上、いわゆる異常海難の事例、その発生した状況、それを避けるための方策について述べた。安全の見地からは、不幸にしてこのような事故に遭遇した場合の対策を考えておかなくてはならない。

事故が起こっても沈まなければよいという立場からは、十分な強度をもつ横隔壁によって大規模な浸水を防ぐことが必要である。大形船ではこの対策は一応とられていると考えてよい。

ほりばあ丸、かりふおるにあ丸の例からも知られるように、事故が直ちに沈没につながる可能性がある。このため船員の安全な脱出のための方策として、現状の救命ボートと救命いかだによる方法の検討、改良の必要があるように思われる。

また波浪についての知識、波浪情報の通報システムなど、まだ不十分な面が多いように思われる。近い将来人工衛星による波浪情報が即時に入手できるようになると、危険海域の確認と事前の避航にはひじょうに有力な手段になると思う。そのようになっても、局所的な海域の状況は船と相対的

に判断されなければならないので、その適切な荒天航法のための補助システムが必要である。

波浪について、その発達に関する研究は多いが、船の強度に関係するうねりの成長のような波の衰退期に関する研究が不足のように思われる。これが波浪情報に対する判断に欠かせないはずである。

異常海難は、船の設計と安全に対する装備、波浪情報、危険水域の回避と荒天航法、船の適切な保守、乗組員の訓練と学習によって未然に防ぐことができるのである。海難統計と個々の船の安全とは直接の関係はない。

最後は船長の操船に対する決断と実行である。いろいろな情報は判断の一助にはなるがそれ以上のものでない。船の運航の責任者という立場もある。しかもその決断は短時間で行わなければならないのである。船長の全人格が船の安全を支えているといって過言ではない。

造船関係者が安全性の高い船を供給し、船社が船の保全に万全をつくし、気象関係者が海象に関する正確な情報を早期に提供し、船長をはじめとする乗組員が適切な運航・操船を行うならば船の安全は保たれる。

船の安全が一步前進することを期待して欄筆する。

(原稿受付 昭和60年5月16日)

文 献

- (1) 運輸省船舶局、尾道丸事故に係る技術検討会報告書、(昭56-11)。
- (2) 運輸省、異常海難防止システムの総合研究開発、昭和58年度報告書、(昭59-3)。
- (3) 運輸省、異常海難防止システムの総合研究開発、昭和59年度報告書、(昭60-3)。
- (4) Buckley, W.H., *A Study of Extreme Waves and Their Effects on Ship Structure*, SSC-320, (1983), U.S. Coast Guard Headquarter.
- (5) 山本・ほか9名、日本造船学会論文集、154、(昭58)、516。