ナホトカ号は何故折損したか？*

大 坪 英 臣**

What caused the break-up of the Nahotoka ?*

by Hideomi OHTSUBO**

キーワード：Oil spill, Tanker, the Nahotoka, Break-up of hull, Buckling, Fracture

1997 年 1 月 2 日隠岐島沖の日本海でロシア船、「ナホトカ」号の船体が 2 つに折損するという事故が発生した。後半部は 2500 m の海底に沈没し、船首部は福井県安島岬沿岸に漂着した。このため積載していた C 重油の一部 6240 kl が流出して日本海沿岸に深刻な海洋汚染をもたらした。なお、船首部には推定 2,800 kl の重油が残っていた。公海上の外国船籍の船舶の事故であるから本来は我が国が事故原因調査を行う責任はないが、事故の結果もたらされた被害の大きさに鑑み、運輸省では、「ナホトカ号事故原因調査委員会」(委員長 大坪英臣 東京大学工学部教授)を 1 月 24 日に設置し調査を進め、7 月 31 日、事故原因に関し結論を得るに至った。ここでは、この概略を述べることにする。

事故の原因としていくつかの可能性が検討された。主としてロシアから主張されたものであるが、爆発あるいは浮遊物体との衝突による外力が働いたとする説があった。また、比較的厳しい海象であるので、当然、波浪外力によって折損したことが考えられた。事故解析の過程ではこれらの説について慎重な検討が加えられた。その結果、爆発や衝突説は、委員会の採用するところとならなかった。何故ならばそれを支持する証拠や乗組員の証言が無い上に、そのような事故の生ずる確率は天文学的に小さいものと考えられたからである。委員会の検討からは波浪による外力により船体が破損したとするのが最も論理的なシナリオであるという見解が導き出された。ここでは、波浪中の荷重をいかに推定したか、また船体強度はどの程度であったかを検討する。

1. 調査の経過

1 月 24 日以来 14 回の委員会が開催されたが、それ以外の主な調査項目は以下のようになる。

- (1) 2 月 9 日・10 日および 2 月 18 日・19 日に海洋科学技術センターのドルフィン-3 k による潜航調査。
- (2) 3 月 18 日に船首部の水中調査を実施。
- (3) 5 月 8 日、9 日に船首部引き上げ後の詳細調査を実施。

なお、日露間で 5 回の専門家会合を開催し、情報及び意見の交換を実施した。残念ながら日露の間で事故原因については一致した結論を得ることはできなかった。

2. 事故の概要

事故の概要を以下に示す。

(1) 事故発生日時・場所

1997 年 1 月 2 日午前 2 時 40 分 (日本時間)
島根県隠岐島北北東約 106 km (37° 10' N, 133° 52' E)

(2) 事故当時の気象・海象

事故発生場所から約 100 km の離れた気象庁のブイ・ロボットの計測値によると、このときの気象・海象は以下のとおりである。

西の風 42 ノット (秒速 22 m)
有義波高 8 m (気象庁ブイ・ロボット計測値)
平均波周期 9 秒 (同上)

(3) ナホトカ号の概要

総トン数	13,157 t	載荷重量	20,000 t 未満
全長	177.25 m	垂線間長	L 165.98 m
型幅	B 22.4 m	型深さ	D 12.32 m
喫水	d 9.53 m	速力	16.2 kt

*原稿受付 平成 10 年 1 月 13 日

** 東京大学 University of Tokyo

主機関 ディーゼル 9,600 馬力 1 基
 建造国・年 ポーランド 1970 年 (船令 27 年)
 船級 ロシア船級協会 (RS)

船令 25 年以上であると、国際海事機関 (IMO) の規則により、二重船殻に大改造するか、廃船することが要求される。ただし、これは載荷重量が 20,000 t 未満ならば、これを免れる。ナホトカ号は積載能力を減少させて 20,000 t 未満としていた。

(4) 航行状態

事故に至る航行状態の乗組員の証言によると以下のとおりである。

- 1 月 2 日 0 時 40 分 針路不安定のため、反転して向波状態とする。
- 1 時 00 分 速力を 3.5 ノットに減速。
- 2 時 40 分 2 番右舷タンク付近に右舷からの向波の直撃を受け、激しい衝撃が感じられた。タンクの破裂が判明、船首部を失った。

3. 調査結果

(1) 事故当時の海象

事故当時の海象は、冬の日本海の家象の中でも年に 1 回程度発生する厳しいものであったが、過去にもこれ以上の厳しい海象も観測されており、異常な海象とは言えず、また、ナホトカ号クラスの大きさの船舶にとって危機的な海象ではなかった。

(2) 船体の折損状況

船首部は事故後しばらく正立していたが、1 月 7 日に福井県三国町の海岸に漂着した船首部は、転覆した状態となっており、海底との接触により船体の損傷が進み沈下した。特に事故解析上重要な甲板部分は殆ど損傷していた。船尾部は 2500 m の海底に沈んでおり、図 1 にドルフィン-3 K のよる潜航調査で撮影されたビデオから再現された船首の破断部の状況を示す。この図から船底

図 1 船尾破断部の状況

部はかなりきれいに輪切状に切断されていることが分かる。甲板部分は損傷が船底部より広範囲にわたっている。この損傷状況は、他の事故解析の知見から、船底が引張りによる破断、甲板は圧縮による座屈が生じた可能性が高いことを示唆する。なお、船体においては横強度部材のフレームの番号が横断面を表示する。例えば、図 1 で船底切断部の Fr. 153 はフレーム番号 153 の横断面を指す。図 2 に船体前部と後部との損傷部分を合わせて示す。斜線部が欠損部分である。図 1 と図 2 から判断すると図 3 に示すようにナホトカ号は、3 番中央タンクと 4 番中央タンク間の隔壁の船首よりの箇所 (船首から約 51 m の箇所) で最初の構造破壊が生じ、その後折損に至った可能性が高いと考えられる。なお、図 2 の欠落部分が大きいことから、ロシア側は当初爆発説を唱えていたが、事故直後の航空写真により船首部の欠落の大部分は海底との接触によることが判明すると爆発説を取り下げた。また、C 重油によって爆発することは殆ど考えられない。

なお、残存船体の陸揚げ後の調査で以下のことがわかっている。船底部切断面の船首部よりの近傍で船底の縦骨 (船底縦通材) が継手溶接されているが、その部分で縦通材は切断していた。溶接はとけ込みもほとんどなく、溶接以前に行われたガス切断の状態がそのまま残っていた。引き張りに対してほとんど効果のない溶接状態であった。

(3) 事故時にナホトカ号に作用した荷重

波浪によってどのような力が船体に生じるであろうか？観測データに基づいて有義波高 8 m の波浪中の非線形解析シミュレーション解析を実施した。この結果、ナホトカ号が向い波状態で航行していた約 2 時間の間に遭遇した最大の波浪により、事故時のナホトカ号の折損

図 2 船尾及び漂着直後の船首破断面の状況

図 3 ナホトカ号の折損位置

断面には約 109 万 kN・m の船体を縦に曲げるモーメントが作用したものと推定される。このモーメントは甲板を圧縮、船底を引張りにするモーメントで、船舶工学ではこれをサギングモーメントと呼ぶ。図 4 に折損推定箇所のサギングモーメントが最大となる時点でのモーメントの分布図を示す。図 5 にこのモーメントを生じさせた波浪と船体運動の相対的關係の時系列①から⑧を示す。なお、事故当時のナホトカ号は標準的な貨物の積載方法を示したローディング・マニュアルと異なる貨物の積載が行われていた。標準的な方法に従って貨物の積載が行われていた場合の波浪中の推定切断断面におけるサギングモーメントは約 51 万 kN・m であり、標準と異なる貨物の積み付け状態により当該断面に作用した荷重が 2 倍以上に増加している（表 1 参照）。

(4) 船体の強度

船首部調査の結果、船体は元の鋼板の厚さから、表 2

に示すように外板や甲板で 20 から 35% 程度衰耗しており、腐食衰耗が激しいことが判明した。構造強度を検討するため Smith の方法による簡易解析と FEM による詳細な解析を行った^{1,3)}。図 6 にその解析結果を示す。建造時の状態がそのまま維持されていたとするとナホトカ号は、船体折損部で約 207 万 kN・m の縦曲げ荷重に耐える強度を有していたが、構造部材の腐食衰耗及びこれに伴う縦通材と板材の溶接部の不良により建造時の強度のほぼ半分の約 104~107 万 kN・m まで強度が低下していたことが構造解析の結果明らかとなった。なお、溶接部の不良部分の位置の仮定により、最終強度は多少の違いが出る。

同時に FEM による動的シミュレーションを行った。図 7 が有限要素モデルであり、図 8 が甲板の座屈崩壊を示す。図 9 が甲板崩壊後に起こった船底部の切断である。なお、船底の縦通材の 1 部に溶接不良が船首部引き

図 4 ナホトカ号に作用した縦曲げモーメントの分布

表 1 船体の破断部付近での最大縦曲げモーメント及びその際の前断力の期待値

	縦曲げモーメント (静水中モーメント：内数)	剪断力
事故時の積載状態 SS 6.9 (Fr. 153)	1,089,000 kN・m (サギング) (412,000 kN・m サギング)	22,600 kN
標準的積載方法 SS 6.9 (Fr. 153)	510,000 kN・m (サギング) (18,600 kN・m ホギング)	—

図 5 最大荷重発生時近くの船体運動

表 2 板厚衰残の計測結果

Structural member	Original thickness	Thickness reduction	Remarks
Bottom plate	20 mm	6 mm	based on the average of measured data around Fr. 157
Side shell	17 mm	6 mm	measured data are limited, and considered to be the same as bottom plating
Deck plate of center tank	20-24 mm	4 mm	based on the measured data in 1993
Deck plate of side tank	20-24 mm	7.5 mm	based on the average of measured data
Deck longitudinal	14 mm	5.5 mm	based on the average of measured data
Other members	11-14 mm	3 mm	measured data are scattering between 2 mm and 4 mm

図 6 サギングモーメントによる船体の反力

図 7 有限要素モデル

上げ後の調査により判明しており、これが船底外板の切断を早めることになっている。

図 8 甲板の座屈崩壊 (Fr. 153 付近)

図 9 船底外板破断の状況

(5) 損傷のメカニズム

以上の知見と切断断面の観察によって得られた損傷の過程は要約すると以下ようになる。Fr. 153 の断面においては、先ず、工作不良に起因した船底縦通材の継手の破断と縦通材の船底外板からの剥離が発生する。次いで、甲板が座屈崩壊する。それとともに、応力の再配分により船底外板の引張応力が高くなり延性破壊が数カ所で発生し、延性き裂の進展による大規模破壊が生じた。船体は波浪外力によって甲板崩壊後も繰り返し曲げモーメン

図10 ナホトカ号に作用した荷重と船体強度

トを受け、座屈変形したものが引っ張られ、また、圧縮されることが交互に続き、甲板部の損傷は図1に見られるように大きく拡大したものと考えられる。

4. 結 論

結論は以下のとおりである（図10参照）。

- (1) ナホトカ号は建造時の状態が維持されていれば、十分な強度を有していたが、構造部材の腐食衰耗により、強度が約半分に低下していた。
- (2) その結果、日本海における年間最大級の波浪による外力が船体強度を上回り、折損に至った。

(3) また、標準的方法によらない貨物の積載により船体に作用した荷重が大きくなったことも副次的な要因であった。

5. ロシア側の結論

なお、ロシア側の結論を参考のために示す。

- (1) ナホトカ号は、十分な船体強度を有しており、技術的に問題はなかった。
- (2) 折損原因として、異常な波や爆発の可能性についても検討したが、その可能性はないことが確認された。
- (3) したがって、考え得る唯一の原因は、浮遊物体との衝突である。この説は、船首部の凹損により、間接的に確認された。

なお、船首部の凹損は高々20数mmであり、日本側は通常航行で生じる程度としている。

参 考 文 献

- 1) ナホトカ号事故原因調査報告（ナホトカ号事故原因調査委員会），運輸省，1997年7月
- 2) 渡辺 巖，大坪英臣「ナホトカ号事故時の波浪外力の推定」，日本造船学会論文集183号（投稿中）
- 3) 矢尾哲也他「ナホトカ号事故時の構造強度の推定」，日本造船学会論文集183号（投稿中）

溶 接 ・ 接 合 便 覧

溶接学会編

B 5/1,520頁 定価50,470円（本体49,000円）

主要内容

- < 第Ⅰ編 > 溶接・接合の力学・設計
概論／熱伝導／溶接残留応力と変形／延性強度／座屈・最終強度／脆性破壊／疲労強度／高温強度／環境強度／異材接合部の強度／溶接事後処理／溶接・接合部の信頼性と品質管理／設計・生産のシステム化・総合化
- < 第Ⅱ編 > 溶接・接合法および機器
概論／溶接・接合法の基本原則と分類／アーク溶接法の基礎／各種アーク溶接法および機器／エレクトロスラグ溶接法および機器／電子ビーム溶接法および機器／レーザ溶接法および機器／ガス溶接法および機器／テルミット溶接法および機器／重ね抵抗溶接法および機器／突合せ抵抗溶接法および機器／ろう接法および機器／固相接合法および機器／マイクロ接合法および機器／接着・ウェルドボンド法・溶着法および接着剤／ロボット技術とその応用
- < 第Ⅲ編 > 熱加工法および熱源の新応用
概論／熱弾塑性加工法／熱切断法／肉盛り溶接法／溶射法／表面改質法／熱源の新応用
- < 第Ⅳ編 > 各種材料の溶接・接合
概論／鉄・炭素鋼／鋳鉄および鋳鋼／高張力鋼および超高張力鋼／耐熱鋼／低温用鋼／ステンレス鋼／クラッド材／超耐熱合金／軽金属およびその合金／活性金属（Ti, Zr）およびその合金／高融点金属（Mn, W, Nb, Ta）その他の金属および合金／セラミック／金属系複合材料／金属系新素材／プラスチック材料
- < 第Ⅴ編 > 施工および管理システム
概論／施工システム／管理システム／安全・衛生／認定・検定および教育／訓練
- < 第Ⅵ編 > 試験・検査
概論／溶接性試験方法／継手の性能試験方法／各種非破壊試験方法／各種接合部の試験方法
- < 第Ⅶ編 > 溶接・接合技術の適用
概論／適用各論