実船における YP40 鋼の使用状況とその実績評価

材料艤装部　福井　努，北田博重

1. は　じ　め　に

日本の造船所が高い技術力を駆使して建造する高張力鋼使用船舶は，軽量化と高性能化による運行コストの低減を実現し，当該船舶を保有・運行している船主あるいは用船者の競争力確保に大きく貢献している。同時に，韓国や中国などの新しい造船国に対して優位性を確保する手段として，船体構造への同鋼の有効利用が不可欠となっている。このような環境を背景に，更なる船主・造船所ニーズに沿うべく，構造部材の板厚増大を抑制できる，より強度の高い高張力鋼として TMCP 型 YP40 鋼が開発・実用化された[1) 2)]。YP40 鋼は，その実用化以来，主に大型船の重要な縦強度部材に多用され，上記ニーズを満たす不可欠な鋼材として，また厳しい設計要件に対応可能な鋼材として定着している[2)]。特に，最近では，YP40 鋼を多用する大型のバルクキャリアや，従来に比べてより厚板の同鋼を使用する大型のコンテナ船の建造が多数見込まれている。

本稿では，YP40 鋼に係わる NK 規則制定状況に引き続き，実船適用開始から現在までの約 15 年間に建造された NK 船級大型船を対象として，同鋼の使用状況とその実績評価について報告する。

2. 実船における船体構造の高張力鋼化

2.1 TMCP 鋼の有効利用

船舶の大型化への対応として，船体構造の高張力鋼化が“TMCP 鋼”の実用で定着したのは 1980 年代である。この時期に船殻重量に占める高張力鋼の使用重量比（HT 化率）が急上昇し，TMCP 鋼の有効利用を背景に，設計及び施工・工作の両面から競争力のある船舶の建造手段となった。Fig.1 に，TMCP 鋼の実用化に合わせて，大型油タンカーを例に HT 化率の推移を示す。1970 年代では従来型 YP32 鋼使用による HT 化率は 20%程度に過ぎなかったが，TMCP 型 YP32/36 鋼の実用化で，1980 年代中頃には同率が 70%にまで達した。その結果，高張力鋼を使用した船舶は，軟鋼使用船に比べて 20～25%の軽量化が達成できた。

同図に示したように，TMCP 型の YP40 鋼（規格降伏点 40kgf/mm^2 級鋼）が新たに開発・実用されたのは，1980 年代後半である。その後，同鋼に対応した溶接材料，溶接施工方法及び工作法の開発・改良が加わり，それらの実施工への適用が大型船建造コストの削減に寄与している。

（注）　本稿は，西部造船会々報第 102 号（平成 13 年 8 月）に掲載した内容に，本研究発表会用として加筆したものである.

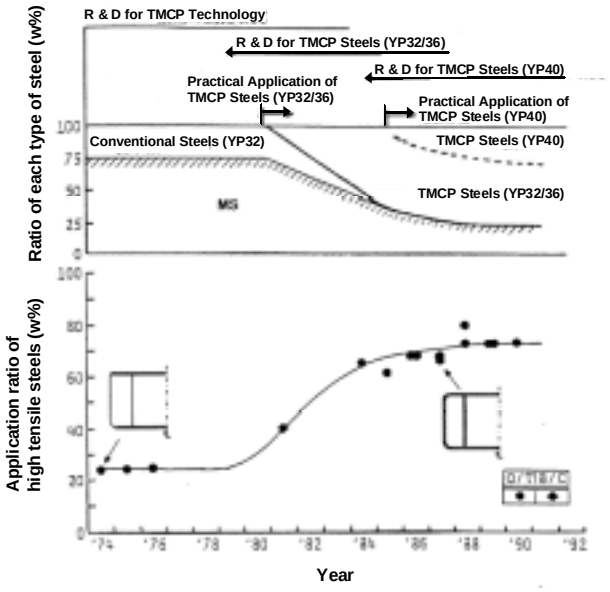

Fig.1 Practical application of TMCP steels and transition of application ratio of high tensile steels

2.2 YP40 鋼に係わる NK 規則制定状況

NK 鋼船規則では，船体用鋼材に対して，強度，靱性，溶接・加工性などの各種要求性能を規定している。YP40 鋼については，同鋼の鋼材規格を新たに「K 編 材料」[3] に導入した 1987 年を皮切りに，「M 編 溶接」（溶接材料，溶接施工法承認試験及び溶接工事関連）[4] の改正を 1994 年及び 1998 年に行った。さらに，1998 年から 1999 年にかけて，「C 編 船体構造及び船体艤装」（鋼材の使用区分関連）[5] を検討し，材料・溶接に係わる要件の規則改正は，ほぼ完了した。これら一連の要件は，IACS WP/MW（材料・溶接作業部会）で NK が他船級に先がけて提案し，IACS 規則の UR（統一規則）でその導入を実現している。同時に，IACS の動きは，YP40 鋼の実用化に，波及効果をもたらしたと評価できる。船体構造関連の分野では，YP40 鋼使用船のさらなる安全性確保を図るべく，これまでの建造実績を基に，構造や各種寸法の決定に必要な基準［材料定数（K 値）や座屈・疲労強度の評価基準など］を規則で具体化すべく鋭意検討中である。

当然のことながら，万が一これらの船舶に損傷が発生した場合には，NK にてその原因を究明すべく調査・解析を行った上，迅速かつ有効な対策を講ずることは言うまでもない。また，必要に応じてこれらの知見を規則に採り入れ，かつその後の検査や図面承認にフィードバックを行い，同種の損傷の再発防止に最善をつくすところである。

3. YP40 鋼を使用した大型船の実績

YP40 鋼の実船適用開始年（1986 年）以降に建造された NK 船級船のうち，下記条件を満たす同鋼使用大型船の実績を調査した。なお，YP40 鋼使用船の比較対象として，同条件を満たす YP32/36 鋼使用船についても同様に調査を行った。Fig.2 に調査概要を取りまとめて示す。

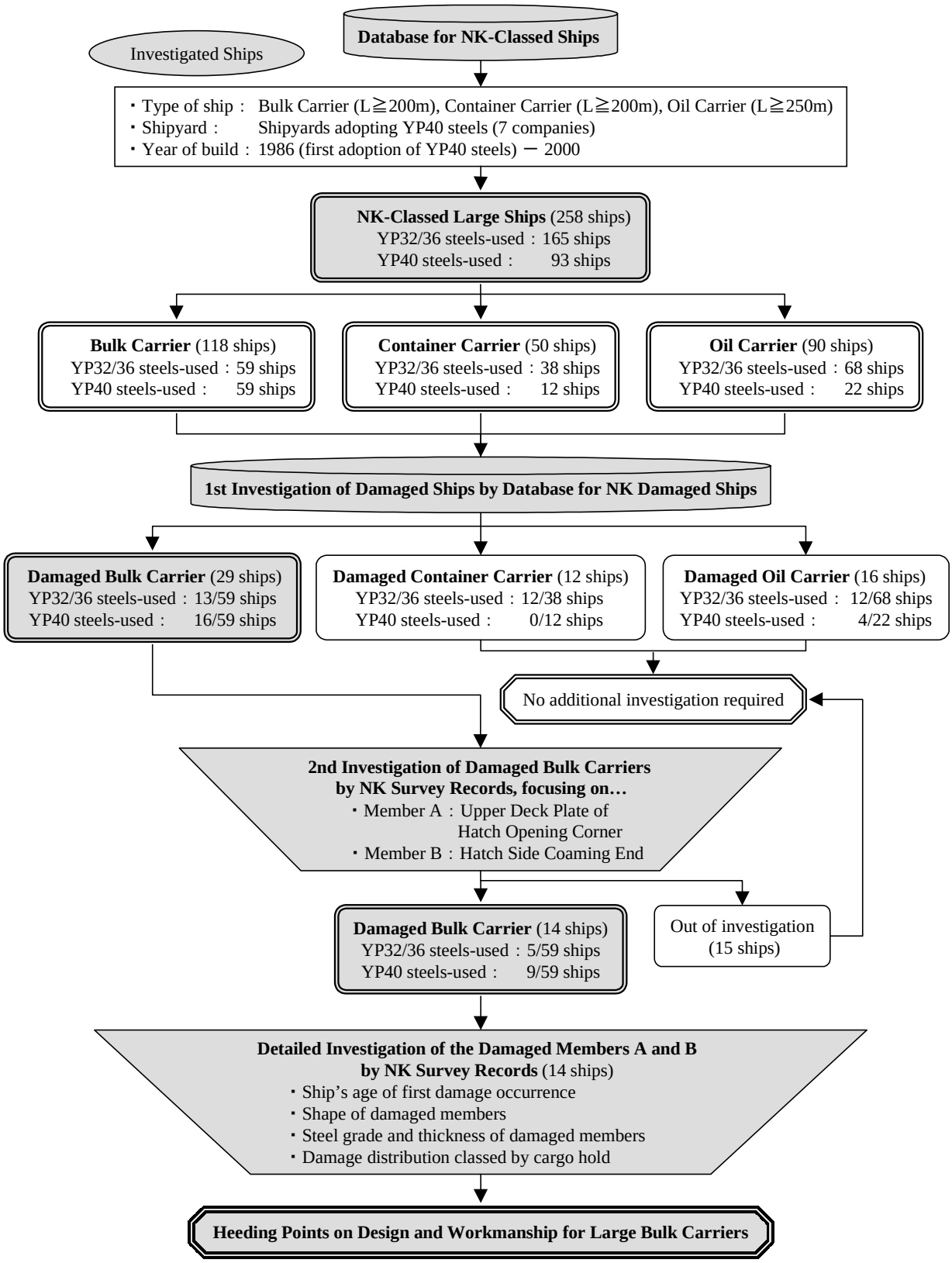

Fig.2 Flowchart of investigation on actual construction results and damages of large ships

（1） 船種：バルクキャリア（L≧200m），コンテナ船（L≧200m），油タンカー（L≧250m）

（2） 造船所：YP40 鋼を採用する造船所
（国内造船所 7 社）

（3） 建造年：1986 年（実船適用開始年）～
2000 年（1999 年末までの図面承認分）

Fig.3 及び Fig.4 は，大型船の建造実績を建造年別と船種別にそれぞれ整理した結果である。Fig.3 では，YP40 鋼の実船適用が開始された 1986 年以降，大型船における同鋼の使用が定着している。さらに，Fig.4 からは，対象造船所が建造した大型船 258 隻のうち，100 隻弱に YP40 鋼が使用されていることや，バルクキャリアにおける同鋼の使用船（隻数ベース）が 50%にまで達していることがわかる。Fig.5 は，当該バルクキャリアの実績を造船所別に整理した結果である。YP40 鋼の使用船（隻数ベース）は造船所によりかなり異なるが，建造する大部分のバルクキャリアに同鋼を使用している例も見受けられる。

前述したように，大型のバルクキャリアやコンテナ船の建造が多数見込まれていることから，今後ともこれらの船種において YP40 鋼使用船の増加が予測できる。

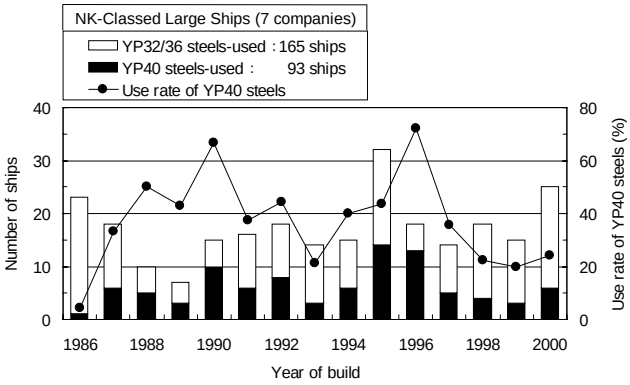

Fig.3 Actual construction results of large ships classed by year of build

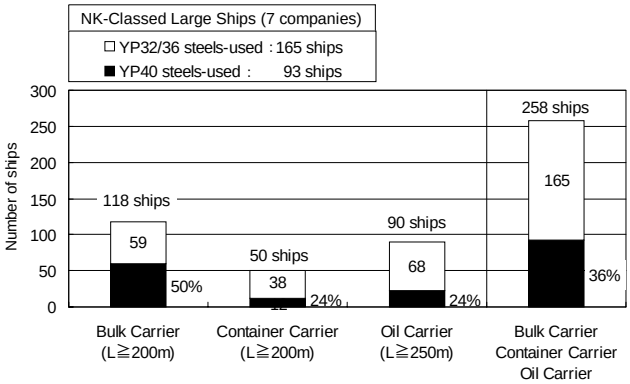

Fig.4 Actual construction results of large ships classed by type of ship

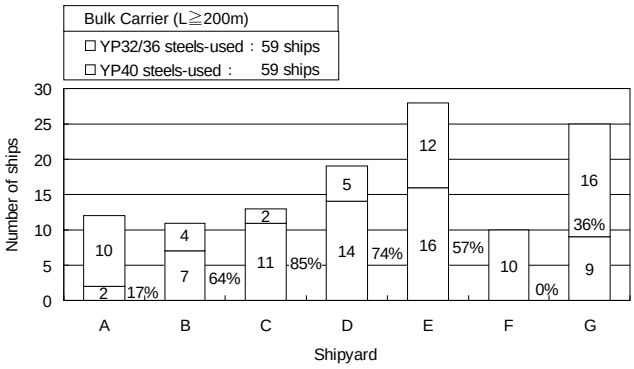

Fig.5 Actual construction results of bulk carriers classed by shipyard

4. YP40 鋼を使用した大型船の評価

前 3.に示したバルクキャリア，コンテナ船及び油タンカーについて，その実績評価として就航中の損傷状況を調査した。その調査要領は Fig.2 に示した通りである。まず，第 1 次損傷調査として，NK 損傷船データベースを用い，下記条件に該当する損傷船の隻数や損傷の概要を調査した。

（1） 検査時期：1999 年末まで

（2） 検査区画：貨物区域

（3） 対象部材：YP40 鋼の使用が見込まれる縦強度部材及びその周辺部材（Table 1 参照）

（4） 損傷原因：設計・工作不良と推察できるもの（衰耗及び接触・衝突等の海難が直接的な原因である損傷は除く）

第 1 次損傷調査結果を示したのが，Fig.6 である。この調査結果から，下記の知見が得られた。ここで，ある調査対象部材に 1 ヶ所でも損傷がデータベース上記録されている場合には，本調査でいう損傷船とした。

（1） バルクキャリア：YP32/36 鋼使用船と YP40 鋼使用船の損傷率（隻数ベース）は，同程度（20%台）である。

（2） コンテナ船：YP32/36 鋼使用船の損傷率は 30%強であるが，YP40 鋼使用船には損傷が発生していない。

（3） 油タンカー：1980 年代後半に多発したサイドロンジの損傷（設計改善済み）を除けば，YP32/36 鋼使用船と YP40 鋼使用船の損傷率は同程度（10%台）である。

結論として，コンテナ船（YP40 鋼使用部材に損傷なし）や油タンカー（MARPOL 条約の適用でダブルハル化が強制要件となった結果，YP40 鋼使用の必要性が減少）については，これ以上の調査は必要ないと判断した。

Table 1 Members investigated by NK database for damaged ships (1st damage investigation)

Type of Member	Code	Example of Members
Upper Member	UP	Upper Deck Plate, Deep Tank Top Plate, etc.
	UG	Deck Girder, etc.
	UW	Web Beam attached to Upper Deck Plate
	US	Deck Longl., Deck Beam, Stiffener/Carling/Bkt. attached to Upper Deck Plate, etc.
Shell Member	SP	Side Shell Plate
	ST	Side Trans.
	SS	Side Longl., Trans. Frame, Stiffener/Carling/Bkt. attached to Side Shell Plate, etc.
Longl. Member	LP	L. BHD Plate, Deep Tank Side Wall
	LS	Longl. Frame, Stiffener/Carling/Bkt. attached to BHD Plate
Special Member	HC	Hatch Coaming, etc.

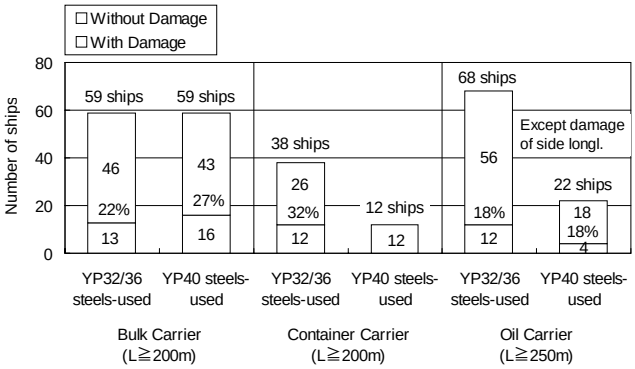

Fig.6 Results of 1st damage investigation by NK database for damaged ships

次に，バルクキャリア（損傷率 20%台）について，損傷状況の詳細を把握するために，引き続き第 2 次損傷調査を実施した。この調査では，第 1 次調査で損傷が発見されたバルクキャリア 29 隻（YP32/36 鋼使用船：13 隻，YP40 鋼使用船：16 隻）を対象に，当該船舶の検査記録を用いて個船別に損傷状況を調査した。その調査対象部材は，Fig.7 に例示するように，YP40 鋼の多用実績がある船体上部構造の縦強度部材とその周辺部材とした。

これらの構造の主要縦強度部材である強力甲板，梁上側板及び玄側厚板，並びにそれらの内部材（板

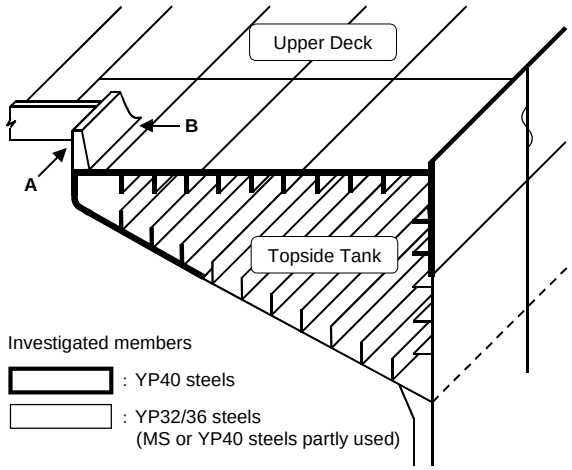

Fig.7 Investigated members of large bulk carrier (2nd damage investigation)

Table 2 Non-damaged members of large bulk carrier (2nd damage investigation)

Type of Member		Non-damaged Members
Deck & Shell Plate	Deck Plating	Stringer Plate in Strength Deck
		Strength Deck other than mentioned above
		Deck Plating exposed to weather, in general
	Shell Plating	Sheer Strake at Strength Deck
		Side Plating
Internals	Bottom Plating	Bottom Plating of TST
	Longitudinals	Longitudinals attached to Plating mentioned above
		Upper Strake in Sloping Plate of TST adjoining to Strength Deck

材，骨材の縦通材）には，構造の大破壊に直結する恐れのある，脆性・疲労・座屈などの損傷や，海水の流入・バラスト水の漏洩を引き起こす貫通亀裂発生の報告（ただし，周辺 2 次部材にごくわずか発生していた軽微な損傷を除く）がなく，いずれの部材も安全に使用されていた。これらの部材について，まとめて Table 2 に示す。

一方，強力甲板ハッチコーナー部とハッチサイドコーミング端部においては，Fig.8 に例示（部材 A 及び部材 B 参照）するように，ある程度の長さを有しかつ板厚を貫通した亀裂損傷が発生していた。これらは，いずれも従来からバルクキャリアに発生する特有の損傷タイプである。そこで，調査対象部材を部材 A 及び部材 B に絞り込んで，詳細調査を行うことにした。

以上により，大型バルクキャリアの実績評価として，第 2 次損傷調査結果を部材別にまとめて，Fig.9 に示す。

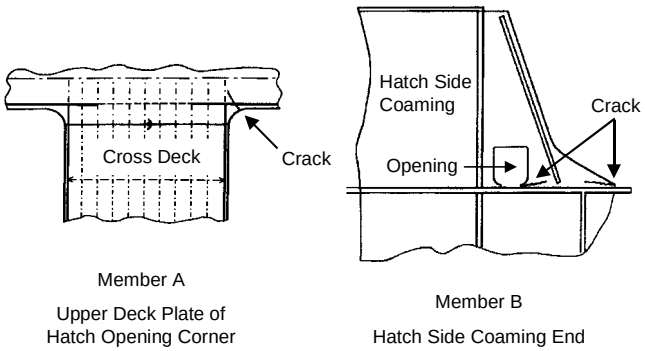

Fig.8 Cracked members of large bulk carrier (2nd damage investigation)

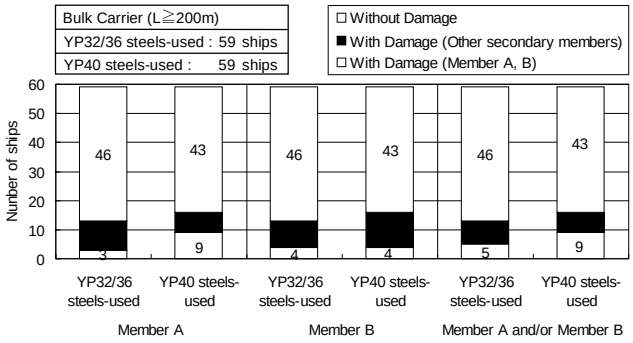

Fig.9 Results of 2nd damage investigation on bulk carriers

5. YP40 鋼を使用した大型バルクキャリアの損傷詳細と設計・工作上の留意点

5.1 強力甲板ハッチコーナー部（部材 A）の亀裂損傷

大型バルクキャリアにおいては，設計上，船幅に対して倉口を大きくとると，捩り剛性が十分にとれない，あるいは，捩り中心が下がり横方向の力による大きなトルクを受けるという構造上の特徴がある[6)]。しかも，強力甲板ハッチコーナー部は，必然的に応力集中を受ける箇所であることから，設計・工作上

の配慮が不充分であると亀裂損傷が早期に生じることがある。

この当該部材に亀裂が生じた損傷船の隻数について，船の長さ別に整理して，Fig.10 に示す。損傷船は，長さ 250m 以上のケープサイズバルクキャリア（通常 9 つの貨物倉を有する載荷重量 14 万トン以上の大型船）に集中していることが明らかとなった。そこで，さらに詳細調査を行うにあたり，その対象船を長さ 250m 以上の大型船に限定した。

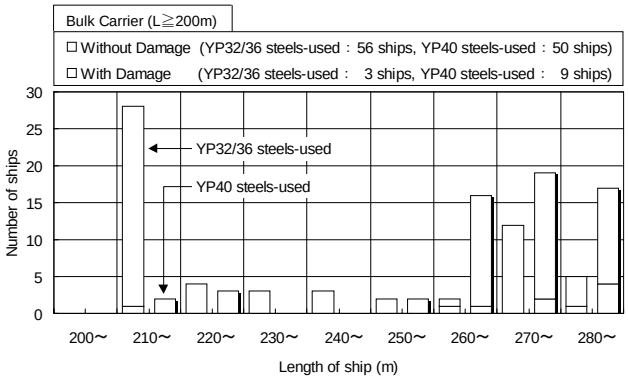

Fig.10 Damage distribution classed by length of ship (Member A)

ところで, YP40 鋼を使用した大型バルクキャリアでは，中央部 0.4L 間の縦強度部材（Fig.7 参照）に YP40 鋼を使用し，その前後では YP32/36 鋼とするのが一般であるが，造船所によっては YP40 鋼の使用範囲をさらに拡げた設計も見受けられる。これら設計条件の相違が損傷に与える影響を貨物倉別に示したのが，Fig.11 である。同図から，YP40 鋼使用船におけるハッチコーナー部の亀裂損傷は，中央部 0.4L 間の貨物倉よりむしろ，船首尾側（2 番，3 番，8 番の貨物倉）で発生する傾向が認められた。これは，曲げ捩りによるせん断応力（そり応力）の影響が大きくなる船首尾側[7) 8)]での疲労強度不足に起因すると推察できる。Fig.12 に，NK 検査

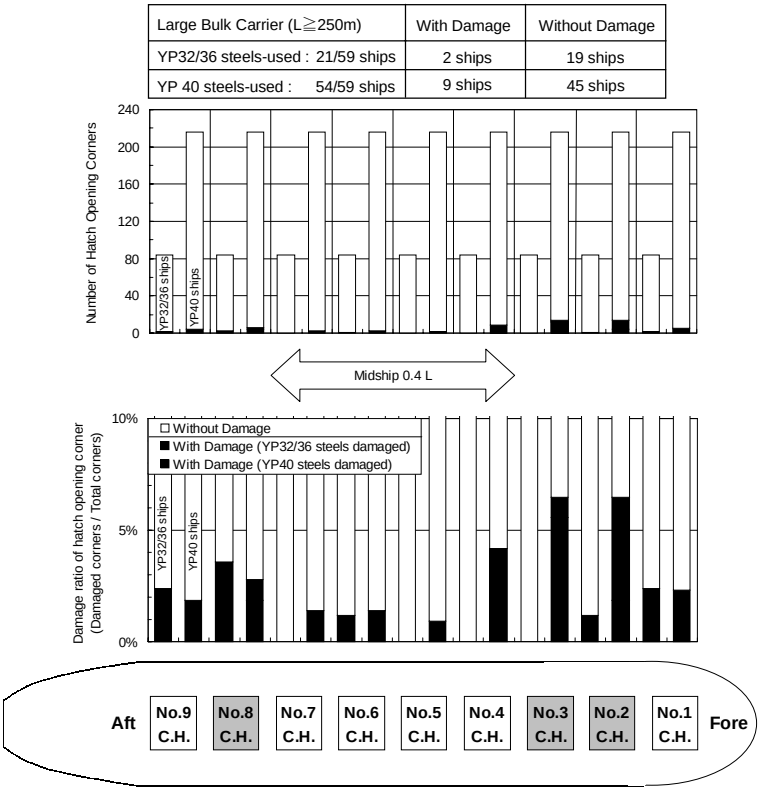

Fig.11 Damage distribution classed by cargo hold (Member A)

で当該部材の亀裂を初めて発見した時の船齢（初回損傷発生船齢）について，損傷頻度（ある船齢における初回損傷発生船の隻数と同船齢に達している船の総隻数との比の値）と併せて示す。同図から明らかなように，詳細調査の結果，YP40 鋼使用船では建造後 6 年～8 年をピークに，早い例では建造後 4 年で亀裂損傷が発生していた。

次に，ハッチコーナー部の形状，応力集中係数，局部増厚などの観点から考察する。

Fig.13 は，調査対象船の当該部の応力集中係数を文献 [9] の近似式を用いて形状別に算出し，亀裂損傷の有無と併せて示した結果である。損傷船と非損傷船との応力集中係数には有意差が認められず，大部分の大型船には，放物線あるいは楕円の形状が採用されていた。ここで，同図に示した全ての形状について調査した結果，NK 規則 [5] 上，局部増厚を不要とする形状であった。船体中央部 0.4L 間における局部増厚の状況を示したのが，Fig.14 である。同図からは，局部増厚が損傷の発生防止に有効とはいい難いといえる。すなわち，調査対象船の使用板厚比（増厚による板厚と強力甲板の板厚との比の値）1.10～1.26 程度では，既報 [10] によると，応力集中率を高々10%程度低減させるにすぎず，損傷防止に対する効果が小さいと推察できる。

上述の疲労強度に係る知見や過去の損傷例 [11] から，ハッチコーナー部に係わる設計・工作上の留意点を，Fig.15 にまとめて示す。まず，設計上の留意点として，可能な限り応力集中の低減を図りつつ，船体中央部の疲労強度のみならず，船首尾側での曲げ捩りによるせん断応力（そり応力）の影響を考慮した疲労強度の確保が重要である。次に，工作上の施工品質については，フリーエッジ部におけるグ

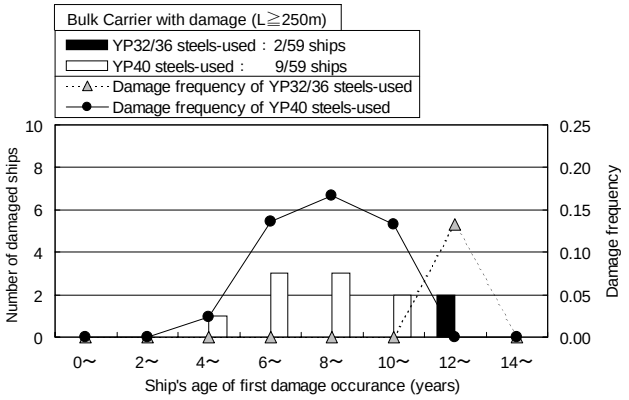

Fig.12 Ship's age of first damage occurrence (Member A)

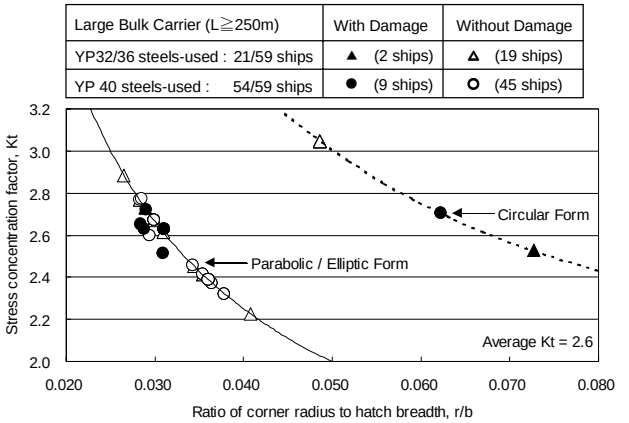

Fig.13 Stress concentration factor of hatch opening corner (Member A)

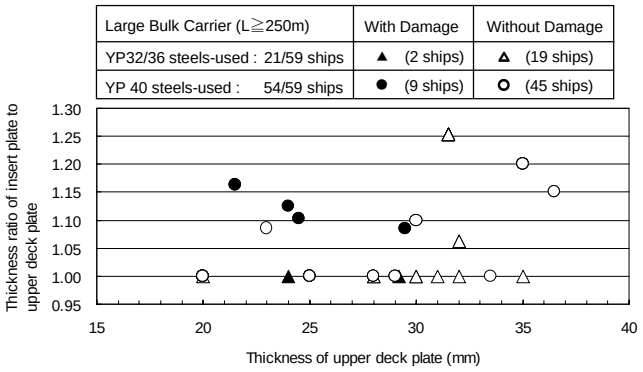

Fig.14 Locally increased thickness within midship 0.4L (Member A)

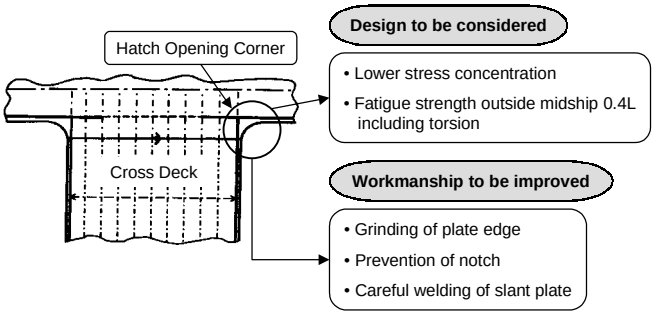

Fig.15 Heeding points on design and workmanship for hatch opening corner

ラインダ処理やノッチの防止による局部的な応力集中源の除去が必要である。さらに，スラントプレートの取付け施工に留意し，場合によっては溶接部を強力甲板上に設けないことも損傷防止に効果的である。

5.2 ハッチサイドコーミング端部（部材 B）の亀裂損傷

ハッチサイドコーミングは，通常，船体の縦強度部材として算入されないが，実際には縦曲げ応力が流入する。特に，その端部では，形状が急激に変化するため応力集中が避けられず，これに不適切な設計・工作が重畳して亀裂損傷の原因となることがある。また，当該部における亀裂損傷は，同部材の寸法・形状に大きく影響を受けることもよく知られている[6) 11)]。しかし，損傷船と非損傷船について同部材の寸法・形状を調査した結果では，両者に有意差は認められなかった。さらに，Fig.16 に示すように，亀裂損傷が生じた損傷船を船の長さ別に整理したが，同部材の損傷は部材 A の場合とは異なり，船の長さによる影響も見受けられなかった。

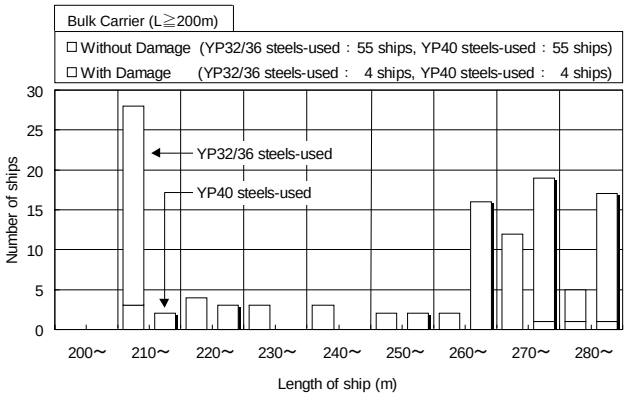

Fig.16 Damage distribution classed by length of ship (Member B)

次に，同部材の損傷を貨物倉別に整理した Fig.17 においては，当該損傷は船首尾部に比べて中央部 0.4L 間でやや多いことがわかった。Fig.18 に，初回損傷発生船齢と，損傷頻度（ある船齢における初回損傷発生船の隻数と同船齢に達している船の総隻数との比の値）を示す。この詳細調査では，強力甲板まで亀裂が進展していなかったが，早い例で建造後 2 年

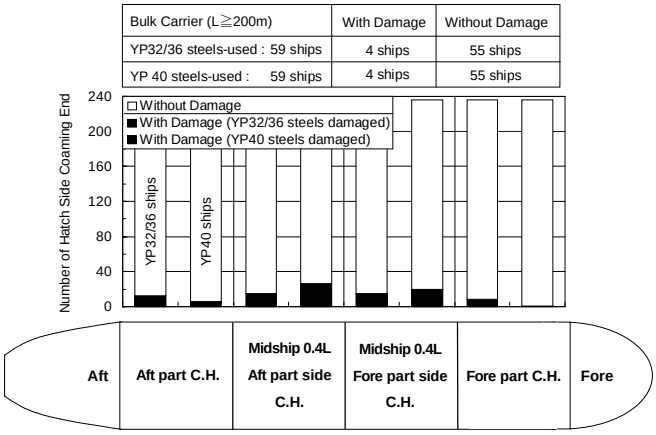

Fig.17 Damage distribution classed by cargo hold (Member B)

から 6 年にかけて損傷が発生していた。しかも，全ての損傷船には同部材に開口が設けられており，亀裂は当該開口部あるいはトウ部（溶接止端部）から発生していた。このことから，当該損傷の発生原因は，開口による応力集中・剛性低下やトウ部の応力集中にあると推察できる。なお，10 年から 12 年にかけて発生した亀裂については，腐食衰耗が少なからずその主原因であるといえよう。

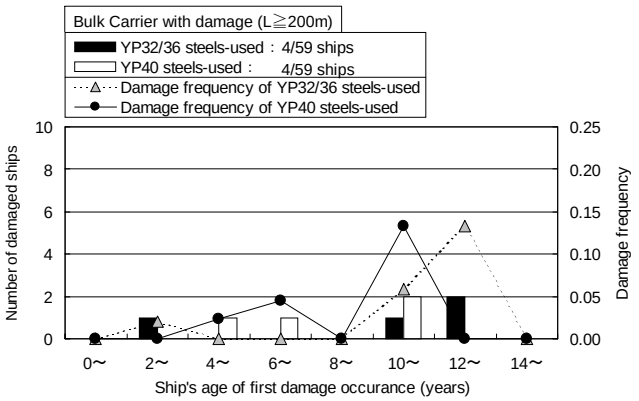

Fig.18 Ship's age of first damage occurrence (Member B)

上述の知見や過去の損傷例[11]から，ハッチサイドコーミング端部に係わる設計・工作上の留意点を，Fig.19 にまとめて示す。

設計上の留意点として，開口部において可能な限り応力集中が低い形状・寸法の採用と，適切な補強による剛性の確保が重要である。また，トウ部においても，ソフト化形状が望まれる。次に，工作上の施工品質については，トウ部でのグラインダ処理や，開口フリーエッジ部でのグラインダ処理・ノッチ防止が局部的な応力集中源の除去として必要である。

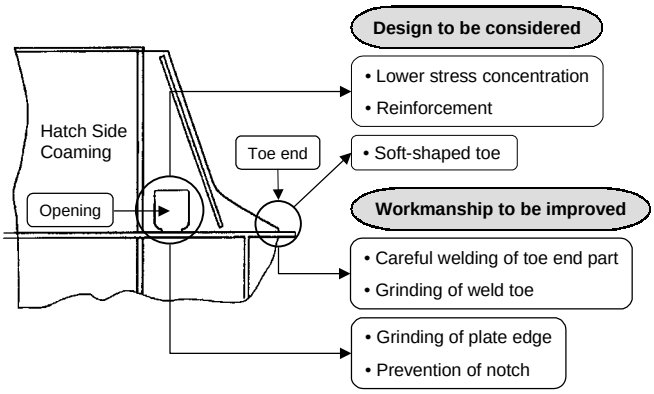

Fig.19 Heeding points on design and workmanship for hatch side coaming end

結論として，調査対象とした大型バルクキャリアの重量比（軽荷重量と載荷重量との比の値）の視点から, 部材 A と部材 B の亀裂損傷の有無を建造年別に整理して, Fig.20 に示す。図中の直線は, YP32/36 鋼使用船と YP40 鋼使用船それぞれの重量比の推移を示した平均線である。同図から，重量比の大小と損傷の有無との間に明確な関係は認められないが，損傷船は YP40 鋼の実船適用当初(1986 年から 1988 年までのわずか 3 年間）に建造された大型船に集中していたといえ，その後同種の損傷は発生していない。これは，その後の大型バルクキャリアの建造において，当該部材の局部強度確保とその損傷防止が重要との認識の下に，前述した留意点が設計・工作面で有効に活用された結果であるといえる。

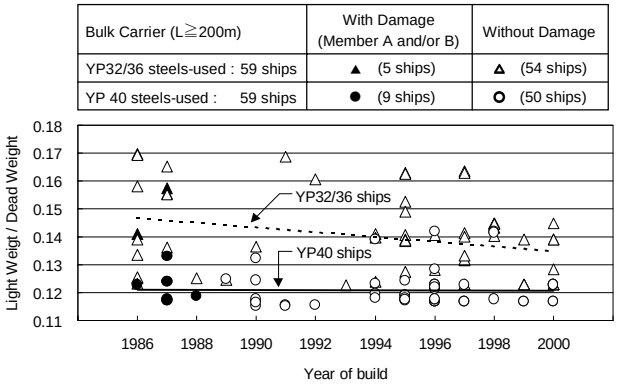

Fig.20 Weight ratio of bulk carrier with/without damage classed by year of build (Member A and/or B)

6. ま と め

YP40 鋼の実船適用開始から現在までの約 15 年間における同鋼の使用状況について, 国内主要造船所が建造した NK 船級大型船での使用実績から評価した結果，以下の結論を得た。

（1） NK 船級大型船に YP40 鋼が多用されていた。特に大型バルクキャリアでは，同鋼の使用船（隻数ベース）が 50%に達している。

（2） バルクキャリア，コンテナ船，油タンカーのいずれの船種とも，YP40 鋼の使用部材には重大事故に結びつく損傷は見受けられず，YP32/36 鋼使用の当該部材と同等の安全使用実績を有している。

（3） 大型バルクキャリア（YP32/36 鋼使用船を含む）の損傷詳細から，強力甲板ハッチコーナー部やハッチサイドコーミング端部における設計・工作上の留意点を得た。

今後とも各位のニーズを踏まえつつ NK は，YP40 鋼を含め各種の高性能鋼の実用化を通じて，船体構造の安全確保を前提にその有効利用に積極的に取り組む所存である。

参 考 文 献

1） 北田博重：TMCP による降伏点 40kgf/mm^2 級鋼板の実船適用にあたっての靭性要求基準に関する研究，東京大学 工学部 学位論文 (1990).

2） 北田博重：船級規則における鋼材の要求性能，日本造船学会誌，第 837 号 (1999)，pp.32-39.

3）（財）日本海事協会：鋼船規則及び同検査要領 K 編 材料 (1987).

4）（財）日本海事協会：鋼船規則及び同検査要領 M 編 溶接 (1994, 1998).

5）（財）日本海事協会：鋼船規則及び同検査要領 C 編 船体構造及び船体艤装 (1999).

6） 船のメンテナンス研究会：船のメンテナンス技術，（株）成山堂書店 (1996).

7） 寺沢一雄：船体構造力学，海文堂出版（株）(1981)，pp.499-537.

8） 三菱重工業（株）：斜め波中の全船一体解析例，日本造船学会 船体構造委員会 関東地区部会 第 146 回資料，関東 126-1/1 (1998).

9） 関西造船協会：造船設計便覧（第 4 版），海文堂出版（株）（1983），pp.549-550.

10）福田順子：船体構造の不連続部における応力集中とインサートプレートによる補強の効果について，西部造船会々報，第 73 号（1987），pp.162-173.

11）今井史彦：船体損傷の典型的事例とその対策，日本海事協会会誌，No.210 (1990).