(昭和 62 年 5 月 日本造船学会春季講演会において講演)

船体損傷データの数量化理論による一解析

正員 岡 実* 正員 湯 浅 通 史**
永 塚 靖 博*** 正員 山 本 規 雄****

A Study on Damage Data of Hull Structure by Quantification Theory

by Minoru Oka, *Member* Michifumi Yuasa, *Member*
Yasuhiro Nagatsuka Norio Yamamoto, *Member*

Summary

Classed ships are repaired according to the degree of damage after class survey. Then the ship conditions inclusive of damage are described in the survey report in detail. However it is difficult to judge objectively the soundness of the ship from the report as it is because of a great number of different conditions. So we arranged statistically the damage data of hull structures from survey reports, and we tried to evaluate the soundness of ships quantitatively by application of quantification theory and multicriteria analysis to the data.

The main conclusions obtained are as follows ;

(1) It is found that ships can be quantitatively classified into two groups depending on the level of soundness where the influential items such as age, ship kind and structural members are represented as quantities by application of quantification theory.

(2) It is possible to evaluate the soundness of ship individually by means of concordance and discordance index which are obtained by the multicriteria analysis on the structural items, in which the weights given by quantification theory are also used.

(3) A ship which indicates a negative value in the discordance index at a survey has a tendency to indicate increasing in its value at the next survey. Reversely, a ship with a positive value in the index at a survey has a tendency to indicate decreasing in it at the next one. In other words, this means that deterioration and effect of maintenance are well reflected in the index. As the result, it is concluded that the index can be an important measure on maintenance to judge ships condition individually.

1 緒 言

船級協会は、船舶の安全を確保するため船級船に対し毎年1度は必ず検査を行い、損傷があれば修理し再度健全船とする業務に携わっている。その時の検査内容は逐一検査報告書に記載され損傷データとして蓄積されてきている。これら損傷データの統計解析は、これまた船級協会の大きな業務の一つであるが、これによって一つのデータでは推測し切れない損傷の原因や傾向などマクロ的に把握することが可能であり、損傷の予測、さらにはその予防対策への大きな役割を果たしている。

また一方では、マクロ的な効用と併わせて、検査報告

書から個々の船舶の検査時の健全度を客観的に把握したい、そうすることによって以後の保守検査に対しよりきめの細かい合理化へつなげられるのではないかという期待がある。そこで本報では、一部土木、橋梁の分野で応用が試みられている^{1),2)}数量化理論および多基準分析を、個々の船舶の健全度の定量化へ応用してみた。

数量化理論と多基準分析はいずれも多変量解析の手法に属するが、取扱う変量は必ずしも量的でなく質的なもので構わず、これらは数量的に変換されて評価対象となる。

数量化理論³⁾は、いくつかの外的基準によって分類されたグループがある場合、分類のベースとなる評価項目にどのように数値をあてはめればグループ分けが可能かを数理的に求める方法である。たとえば医学の分野で、健康診断状況と、その後の疾患の有無との相関を調査することはよく行われる。この場合健康診断項目を同一尺

* (財)日本海事協会技術研究所 材料・艤装研究室

** (財)日本海事協会技術研究所 船体研究室

*** (財)日本海事協会船級管理部

**** (財)日本海事協会開発部

度上に並べ適当に配点してやれば、個人は合計点という形で疾患有無との相関がつけ易くなる。この配点を数理的に行う方法が数量化理論である。

一方多基準分析^{4),5)}は、都市計画を進めるに当って多くの代替案が出された場合、このなかから最も好ましい代替案を選択しようとするための評価方法として生れた。土地区画、人員配置、経済的問題など、多くの評価項目に重要度を加味して総合的に代替案の優劣を判定しようとするものである。

このように二つの手法は、損傷という数量的にとらえにくい項目を取り上げて船舶の健全度を論ずるには格好の手法であるが、それぞれ一長一短がある。数量化理論は、評価項目細部(カテゴリー)にわたっての数量化で、その物理的な意味付けに曖昧さが残る。これに対して多基準分析は、各評価項目に重要度すなわちウェイトをどのように付加するかについての手続きが課題とされている⁶⁾。

そこで本報告では、両者の短所を補うために、数量化理論で評価項目のウェイトを求めることとし、次にこれを用いて多基準分析により、個々の船舶の健全度を論ずることとした。

解析は2段階で行った。まず第1段階では、1981年から1984年までの4年間、日本海事協会によって検査された日本籍船についての検査報告書を対象として、基本となる各評価項目(アイテム)の数量化解析並びに多基準分析を行い、個々の船舶の優越性、劣等性を示す信頼性指標を求めた。

第2段階では、1970年頃入級し現在なお存続して検査をしてきたサンプリング船舶について上記信頼性指標を求め、健全度の推移を観察した。これによって、船舶の健全度の経年変化を具体的にとらえられることが分かりこれらの指標が、個々の船舶の健全度を推定する定量的尺度となり得ることを検証した。

2 数量化解析

本章ではまず数量化手法として用いた数量化理論第II類の考え方、船舶の健全度をどうとらえるか、健全度に影響を及ぼすとみられるアイテムの設定法、および解析結果について述べる。

2.1 数量化理論第II類の方法

数量化理論第II類³⁾は、質的データの判別・予測分析のための方法論と考えられる。現象がある分類の区分(グループ) $G_1, G_2, \dots, G_T$ のどれかに属していることが記述されているとき、これらのグループのどのグループに属しているかを判別するために、グループの判別・予測に関与する m 個の特性アイテム $X_1, X_2, \dots, X_m$ を数量化し、それらを総合した量で判別・予測分析を行う。

Fig.1 Group distribution

さきのグループ G を外的基準と呼び、質的データとしてあらかじめ分類されていることが要件となる。特性アイテムの総合量を Y とすると、 Y は次式で与えられる。

$$\text{全体の総合量 } Y = X_1 + X_2 + \dots + X_m = \sum_{j=1}^m X_j \quad (1)$$

ここに

$$X_j = \sum_{k=1}^{l_j} \delta_{ik} x_{jk}$$

$\delta_{ik} = \begin{cases} 1: \text{アイテム } j \text{ のカテゴリー } k \text{ に該当する場合} \\ 0: \text{アイテム } j \text{ のカテゴリー } k \text{ に該当しない場合} \end{cases}$

l_j : アイテム X_j のカテゴリー数

ここで数量化の対象となるのはアイテム・カテゴリー x_{jk} で、これが与えられれば(1)式より総合量 Y が求まる。数量化に当っては、Fig.1のようにグループ G が Y の密度分布で表わされると考え、(2)式の相関比 η^2 を最大にする条件から求める。

$$\text{相関比 } \eta^2 = \frac{Y \text{ の外分散}}{Y \text{ の全分散}} \quad (2)$$

このことは、Fig.1の各グループごとの密度分布ができるだけ明瞭に分けられるように x_{jk} を決めることで、ラグランジュの未定乗数を導入した固有方程式を解き、固有ベクトルとしてアイテム・カテゴリー数量 x_{jk} が求められる。実際にはコンピュータによるマトリクス演算で簡単に求められる。

2.2 船体損傷データ

冒頭で述べたように、船級船は毎年1度は必ず検査されるが、検査の内容は必ずしも同一ではない。日本籍船についていうと、4年間(4回)で1サイクルとなるような検査方式となっている。すなわち1回は定期検査と称し入渠状態で構造全般にわたる検査を行い、残りの3回は中間検査(一般にそのうち1回は入渠状態で、2回は沖合での検査となる)と称し、主要部についての検査を行う。そこでアイテムのカテゴリー数量を決定するための基本母集団として、1981年から1984年までの4年間に検査された日本籍船舶を取り上げた。外国籍船舶の場合は検査方式が若干異なるため対象外とした。

船舶の種類は主要船舶に絞り、油タンカー、ばら積貨物船、一般貨物船、木材運搬船、自動車運搬船、コンテナ船の6種類とした。以上の条件を満たす基本母集団となった船舶の内訳は、Table 1に示す通りで合計は590

Table 1 Sample population

Kind of ship	
Oil Tanker	268
Bulk Carrier	43
General Cargo	80
Lumber Carrier	54
Vehicle Carrier	89
Container Ship	55
Total	590

Table 2 No. of ship in which damages were detected

Defective Freq of Damage	NO.
1/4	164
2/4	74
3/4	28
4/4	12
Total	278

Table 3 Outside variables

Group NO.	detail of group
Group 1	defective freq. of damage 1/4 and 2/4
Group 2	defective freq. of damage 3/4 and 4/4

隻となる。

さて、これら 590 隻の検査報告書を整理した結果、このうちの 278 隻すなわち約半数について何らかの損傷を生じ補修をしていることが分かった (Table 2 参照)。

そこで、この 278 隻の船体損傷データを用いてアイテム・カテゴリーの設定を行い、アイテム・カテゴリー数量の計算には、さらにこのうち 55 隻をサンプリングして用いた。

2.3 外的基準の設定

数量化理論第Ⅱ類を適用するには、対象サンプルが外的基準としてグループ分けされていなければならない。外的基準は、ここでは船舶の健全度であるから、サンプル船舶が健全度でランク付けされる必要がある。しかしながら船舶の健全度をランク付けすることは極めてむずかしい。1 人の検査員で全船舶を検査できれば自分なりの基準である程度判断できようが、複数の検査員でみた場合同一船舶に対する印象も、個人差がでてくるのは避けられないところである。

そこで、一切主観の入らないランク付けの方法として次によった。4 回検査を受けて何らかの損傷が見つかった 278 隻の損傷発見頻度を 4 を分母とする分数で表わすと、次のようになる。

1/4 ; 164 隻

2/4 ; 74 隻

3/4 ; 28 隻

4/4 ; 12 隻

すなわち 4 回検査して 1 回しか損傷がなかったもの (当然のことながらこれらはほとんど定期検査時のものが多い) が約 60% の 164 隻と圧倒的に多いが、4 回とも損傷があったというものも 12 隻あった。

船舶の健全度ランク付けの尺度として、この損傷発見頻度をとることとした。あまり細かくグループ分けする

ことに意味があるとも思えないので、ここでは簡単のため二つのグループ (2 ランク) に分類することとした。

Table 3 に示すように、一つは発見頻度の低い 1/4 と 2/4 のグループであり、もう一つは発見頻度の高い 3/4 と 4/4 のグループである。イメージとしては、前者のグループ 1 が 1/4 の数字で代表されるように十分検査してはじめて損傷が見つかるグループであり、後者のグループ 2 が 4/4 の数字で代表されるように、検査に行けば必ず何がしかの損傷が見つかるグループということができる。

2.4 アイテムの設定

2.3 で設定した外的基準すなわち健全度ランク、グループ 1 およびグループ 2 に対して、影響を及ぼすであろうアイテムとして船令、船の種類、構造部材の損傷を取り上げた。構造部材の損傷については、すべての部材が網羅される必要があるので、船体構造全般にわたって詳細検査をしている定期検査時の損傷データを対象とした。したがって船令についても、定期検査時の船令ということになる。ここでいう健全度が、就航直後の状態であるだけに、以上のアイテム以外にも航路、载荷の軽重、繰船状況などの影響も考えられるところであるが、今回は除外し今後の課題とした。

次に各アイテムのカテゴリーの設定について述べる。

2.4.1 船令

船令別隻数ヒストグラムを Fig. 2 に示す。4 年周期でピークとなるような分布をしているのは、定期検査の周期と一致するためである。ピークの前後に若干の分布があるが、船舶の就航事情による定期検査時期の繰上げ・延期によるものである。また船令が 12 年を越えると隻

Fig. 2 Ship's number histogram for ship's age

Table 4 Item and category

category	Category NO.			
	1	2	3	4
1. Ship age (yr)	~ 5	6 ~ 9	10 ~ 13	14 ~ 20
2. Kind of ship	G. Cargo Lumber	Bulk Oil	Vehicle Container	—
3. Side Plate	Damage NO. (Same as below)	1 ~ 9	—	—
4. Side Member	0	1 ~ 9	10 ~ 49	50 ~
5. T. L. Plate				
6. T. L. Member				
7. Upper Plate				
8. Upper Member				
9. Bottom Plate				
10. Bottom Member	0	1 ~ 9	10 ~ 49	—
11. Others	0	1 ~ 9	10 ~ 49	50 ~

数が激減しているが、日本船主の保有年数もほぼこの辺りまでで後は売船などにより手放すケースが多いためと思われる。

以上から、船令のアイテム・カテゴリーは、ヒストグラムのピーク値に併わせて四つに分類した (Table 4 参照)。

2.4.2 船舶の種類

船舶の種類は在来船型ということで、一般貨物船と木材運搬船、高速船型ということで、自動運搬船とコンテナ船、両者の中間ということでばら積貨物船と油タンカーをそれぞれ組み合わせ、三つのカテゴリーとした (Table 4 参照)。Fig. 3 に船長別隻数ヒストグラムを示すが、在来船型の一般貨物船と木材運搬船は比較的小型の部類に、ばら積み、油タンカーは大型の部類、自動車運搬船とコンテナ船の高速船型は両者の中間の大きさの部類にそれぞれ属していることが分かる。

2.4.3 構造部材の損傷

船舶の健全度を決めるのは何といっても構造そのものの現状であり、構造部材の損傷程度が健全度を説明するメインアイテムである。構造部材はそれぞれ異なった機能を持つ多くの部材からなり、これらをどのようにアイ

Fig. 3 Ship's number histogram for ship length

- Upper ; plane ① ⑨ ⑫ ④
- Bottom ; plane ② ⑩ ⑪ ③
- Side ; plane ⑨ ⑩ ⑪ ⑫
- Trans & Longi ;
 - plane ① ② ③ ④
 - plane ⑤ ⑥ ⑦ ⑧
 - plane ① ② ⑥ ⑤
 - plane ④ ③ ⑦ ⑧

Fig. 4 Structural item

テム化するかについては、いくつかの考え方ができると思われるが、ここでは検査報告書の記載様式に合わせる形で整理した。それによれば、船体構造を Fig. 4 のように 6 面体構造と考え、各面の機能に応じて、Upper, Bottom, Side, Trans. & Longi. Bulk Head (以下 T. L. と略す) の四つに区分する。Expansion Trunk, F'cle, Super Structure は Upper に含むとした。さらにそれぞれの区分を板部材 (Plate) と骨部材 (Member) とに分類した。またいずれにも属さない Stern-frame, Pillar, Strut など特殊部材はその他 (Others) として区分した。この結果、構造アイテムとしては、九つの区分となる (Table 4 参照)。

次にこれら九つの構造アイテムのそれぞれのカテゴリーは、損傷の程度によって分類されるのは当然としても、実際問題としてこれを厳密に行うことはむずかし

Fig. 5 Damage number histogram

い。一番大きな問題は損傷形態の違いをどう折り込むかということである。損傷形態には、代表的なものに腐食衰耗、変形損傷、き裂損傷とある。このうち腐食衰耗一つとっても構造強度上、考慮しなければならないパラメータはあまりにも多い。孔食か全面腐食か、原厚に対して何 mm 衰耗しているか、どの程度の範囲か、区画との関連は、などすべてを考慮してのグレード分けは簡単

にはいかない。そこで損傷形態に着目した統計解析は次の機会に譲ることにし、ここでは第1近似としての船舶の健全度レベルが論ぜられれば良いということにして、損傷形態は問わず損傷件数のみに着目することとした。

Fig. 5 に部材別損傷件数ヒストグラムの例を示す。構造アイテムのカテゴリーは、Table 4 に示すように全部材とも同一損傷件数区分で分類し、損傷件数の少ない順

Table 5 Input data

Ship NO.	age	Ship Kind	Side Plate	Side Member	T.L. Plate	T.L. Member	Upper Plate	Upper Member	Bottom Plate	Bottom Member	Others	Group NO.
1	3	2	1	4	3	4	1	2	2	4	1	1
2	3	2	1	2	2	4	1	1	1	3	1	1
3	3	2	1	3	1	1	3	1	1	2	1	2
4	3	2	1	1	1	1	2	1	1	1	3	1
5	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1
7	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	4	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	3	3	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2
10	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	2	3	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1
12	2	3	1	1	1	1	1	1	2	3	1	1
13	1	3	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1
14	4	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2
15	3	1	1	2	2	1	2	1	2	1	2	2
16	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
17	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
18	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1
19	4	1	2	3	3	2	2	2	2	2	2	2
20	3	1	1	3	2	2	1	1	2	2	2	2
21	3	1	1	4	2	1	1	1	1	3	3	2
22	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1
23	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
24	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1
25	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
26	3	2	1	2	2	3	1	3	1	2	1	1
27	2	2	1	2	1	2	1	1	1	1	3	1
28	2	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1
29	2	2	1	2	1	3	1	1	2	2	1	1
30	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
31	2	2	1	3	2	3	1	1	2	3	2	2
32	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
33	2	2	1	2	1	4	1	2	1	3	1	1
34	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
35	2	2	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1
36	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1
37	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
38	1	2	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1
39	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1
40	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1
41	1	2	1	3	1	1	1	1	1	2	1	1
42	1	2	1	2	1	1	1	1	1	4	1	1
43	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1
44	4	3	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1
45	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
46	3	3	1	2	1	2	1	2	2	1	1	1
47	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
48	3	3	1	1	1	3	2	1	1	3	1	2
49	2	3	1	2	2	2	2	2	2	2	3	2
50	1	3	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1
51	1	3	1	2	1	2	1	1	1	3	1	1
52	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
53	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
54	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1
55	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

に1～4の категорияとした。したがって損傷件数の少ない範囲で分布する Side Plate のような場合は、category数が少なく、広汎に分布する T. L. Member のような場合は、category数は多くなっている。

2.5 解析サンプル船舶

先に述べた損傷母集団 278 隻のうち、55 隻を解析用として選別した。選別に当っては設定したアイテム・categoryが万遍なく埋まること、並びに船舶の種類に対する母集団の割合を損わないように注意を払った。たとえば Table 1 でばら積貨物船と油タンカーは全体の半数を占めているので、55 隻のサンプルのうち約半数の26 隻をこれらの種類になるようにした。

サンプル船舶のアイテム・category、健全度ランク(外的基準)の一覧を Table 5 に示す。これが数量化解析用のインプットデータとなる。また各アイテム・category

の集計を Table 6 に示す。

Table 6 Tabulation of item category

FREQUENCY OF CATEGORIES IN ITEMS					
ITEM NO.	CATEGORY NO.				
	1	2	3	4	
Age	21	15	15	4	
Kind of ship	11	26	18		
Group	3	43	12		
Str. item	4	53	2		
	5	34	13	6	2
	6	44	10	1	
	7	35	12	5	3
	8	47	7	1	
	9	49	5	1	
	10	45	10		
	11	35	10	8	2
	12	44	7	4	

2.6 数量化理論による解析結果

サンプル船舶 55 隻に対し、数量化理論第Ⅱ類を適用してプログラム計算した結果を Table 7 および Fig. 6 に示す。

Table 7 は、2.1 節で述べたように健全度ランク、グループ 1 およびグループ 2 の相関比が最大になるようにして求めた各アイテム・カテゴリーの数量を示している。

Table 7 のカテゴリー数量を用いることにより、相関比 (η^2) 約 0.89 の精度でグループ 1 とグループ 2 に分類できる。Fig. 6 はその結果を図示したもので、横軸に個船の各アイテムの数量和 Y を、縦軸に頻度 (%) をと

Table 7 Value of item category

item	category	value of category	range
Ship age X1	X11	0.155	0.576
	X12	-0.063	
	X13	-0.242	
	X14	0.334	
Kind of Ship X2	X21	-0.070	0.507
	X22	0.225	
	X23	-0.282	
Side Plate X3	X31	0.077	2.106
	X32	-2.029	
Side Member X4	X41	0.084	1.535
	X42	-0.057	
	X43	0.140	
	X44	-1.478	
T. L. Plate X5	X51	0.152	1.664
	X52	-0.762	
	X53	0.902	
T. L. Member X6	X61	0.074	1.518
	X62	-0.046	
	X63	-0.962	
	X64	0.556	
Upper Plate X7	X71	0.102	2.674
	X72	-0.356	
	X73	-2.318	
Upper Member X8	X81	-0.067	2.296
	X82	0.206	
	X83	2.229	
Bottom Plate X9	X91	-0.057	0.314
	X92	0.257	
Bottom Member X10	X10, 1	0.042	0.200
	X10, 2	-0.105	
	X10, 3	-0.011	
	X10, 4	-0.158	
Others X11	X11, 1	0.114	1.389
	X11, 2	-0.960	
	X11, 3	0.429

Fig. 6 Group distribution (Analysis result)

って表わした各グループ別分布である。各アイテム・カテゴリーの数量比によってグループ 1 とグループ 2 を明瞭に区分できたことは、アイテム・カテゴリーの分類がほぼ妥当であったことを示している。

また Table 7 で、各アイテムにおける個々のカテゴリー数量の物理的な意味については今後の検討課題であるが、少なくともその数量の大小は、船舶の健全度ランクに及ぼす影響の大小に対応している。そこで各アイテムの健全度に及ぼす影響の尺度として、各アイテムのカテゴリー数量の最大値と最小値の差すなわちレンジを取り上げることができる (Table 7 の右欄に示す)。このレンジを比較すると、Upper, Side といった構造アイテムが大きな値を示し、部材の重要度における一般概念と一致している。ただし同じく重要と考えられる Bottom 関連が下位にあるのは、検査方法と密接に関係があり、常時検査対象にできない (Afloat の中間検査時など) ため、この影響が解析結果に表われたためである。

3 多基準分析

ある目的に向けていくつかのプロジェクトがあって、これらからただ一つだけ公正に価値判断して選択したい、当然これらプロジェクトの中には考慮すべき多くの項目が含まれている、このような場合の選択基準として提案されたのが多基準分析手法⁴⁾である。本報では、この手法を個々の船舶の健全度に適用してみた。

多基準分析の基本は、絶対評価ではなく、物の優劣は相手との比較によって決まるとする相対評価である。すなわち考えている船舶の現状 (健全性) は、他船舶に比してどこで劣っているか、またどこで優れているかをそれぞれ評価しようとするものである。前者を Discordance Index (損傷度指標)、後者を Concordance Index (健全度指標) と呼び、これらによりどのように船舶の健全度を評価できるかについて調べてみることにする。

3.1 多基準分析の方法

対象船舶の、考慮の対象とするアイテムに関してインパクト行列 P と、ウェイト W を与える。

$$\text{インパクト行列 } P = \begin{bmatrix} P_{11} & \dots & P_{1I} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{J1} & \dots & P_{JI} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{ウェイト } W = [W_1, \dots, W_J, \dots, W_J] \quad (4)$$

ここに P_{ji} は、船舶 i のアイテム j に対する損傷度ランクで、Table 5 がこのインパクト行列に対応する。ただし Table 5 から健全度ランクを除き、行と列を入れ換えたものに対応する。また損傷度ランクも Table 5 の各値から 1 を差引いたもので、したがって最小値は 0、以下値が大きくなるほど損傷度は大となる。

ウェイト W_j はアイテム j のウェイトで健全度への影響度を示し、ここでは先に数量化解析で得られたレンジを用いている。ただし Table 7 のレンジをそのまま用いることはせず規準化した値とした。

3.1.1 Discordance Index (損傷度指標)

船舶 i が船舶 i' に対して劣っているアイテムについて、その総和 $d_{ii'}$ をウェイト付きで考える。

$$d_{ii'} = \sum_{j \in V_i} W_j \frac{|P_{ji} - P_{ji'}|}{\max_{1 \leq l, l' \leq I} |P_{jl} - P_{jl'}|} \quad (5)$$

ここに、 $V_i = \{j | P_{ji} > P_{ji'}\}$

この $d_{ii'}$ より次の Discordance Matrix が求まる。

$$D = [d_{ii'}] = \begin{bmatrix} - & d_{12} & \cdots & d_{1I} \\ d_{21} & - & \cdots & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{I1} & \cdots & \cdots & - \end{bmatrix} \quad (6)$$

これより各船舶の Discordance Index D_i は、次のように求まる。サンプル数によって D_i の order が変わらないようサンプル数 I で割った値で示す。

$$D_i = \left(\sum_{i'=1}^I d_{ii'} - \sum_{i'=1}^I d_{i'i} \right) \cdot \frac{1}{I} \quad (7)$$

3.1.2 Concordance Index (健全度指標)

3.1.1 の Discordance Index とほぼ Complementary な関係にある。すなわち、船舶 i が船舶 i' に対して優れているアイテムについてその総和 $c_{ii'}$ をウェイト付きで考える。

$$\begin{aligned} c_{ii'} &= \sum_{j \in K_i} W_j \frac{|P_{ji} - P_{ji'}|}{\max_{1 \leq l, l' \leq I} |P_{jl} - P_{jl'}|} \\ &= \sum_{j \in K_i} W_j \frac{P_{ji'}}{\max_{1 \leq l, l' \leq I} |P_{jl} - P_{jl'}|} \end{aligned} \quad (8)$$

ここに、 $K_i = \{j | P_{ji} = 0\}$

$P_{ji} = 0$ は、3.1.1 で述べたように、損傷ランクが最下位、すなわち損傷がないことを意味する。

この $c_{ii'}$ より次の Concordance Matrix が求まる。

$$C = [c_{ii'}] = \begin{bmatrix} - & c_{12} & \cdots & c_{1I} \\ c_{21} & - & \cdots & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{I1} & \cdots & \cdots & - \end{bmatrix} \quad (9)$$

Table 8 Weight

Item	Weight
Side Plate	0.1562
Side Member	0.1199
T.L. Plate	0.1229
T.L. Member	0.1118
Upper Plate	0.1791
Upper Member	0.1695
Bottom Plate	0.0229
Bottom Member	0.0148
Others	0.1029

Fig.7 Aspect of C_i - D_i distribution for ship's age

さらにこれより各船舶の Concordance Index C_i は次のように求められる。この場合もサンプル数 I で割った値として求める。

$$C_i = \left(\sum_{v=1}^I C_{iv} - \sum_{i=1}^I C_{iv} \right) \cdot \frac{1}{I} \quad (10)$$

3.1.3 多基準分析結果

以上の手順に従って、数量化解析に供した 55 隻の船舶について、多基準分析を行った。ただしここでは損傷度のみに着目するため、数量化解析に使用したアイテムのうち船令、船舶の種類は除き、構造アイテムのみに絞った。それらのウェイト W は、Table 7 のレンジを規準化した Table 8 の値を用いた。

求めた結果を、 D_i を縦軸に、 C_i を横軸の 2 元座標上に船令別に表わすと Fig. 7 のようになる。図中の番号

は、Table 5 におけるサンプル No. に対応する。

Fig. 7 から分かるようにサンプル点は、第 2 および第 4 象限に分布し、ほぼ勾配 -1 の直線上に分布している（ただし後述するが稀に例外もある）。このことは当然のことながら、 D_i の値が低いもの（ D_i が低いほど損傷度は小さい）は、 C_i の評価は高く（ C_i が高いほど健全度が高い）、逆に C_i 値の低いものは、 D_i 値も高く損傷度は大きいことを意味する。前者が第 4 象限、後者が第 2 象限にそれぞれ位置することになる。

船令別にみると、船令 4～5 年の若い船はほとんど第 4 象限にあり、船令 6～9 年になると第 4 象限と第 2 象

Table 9 Impact matrix of traced ships

Ship Kind	Sample No.	Structure Item No.									
		[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	
Bulk	56	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
	57	0	3	0	0	1	1	0	0	0	
	58	1	1	1	1	0	0	0	0	0	
	59	0	0	0	1	0	0	0	1	0	
	60	0	2	0	0	1	1	0	0	0	
	61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	62	0	3	0	0	0	0	0	0	0	
	63	0	3	1	1	0	0	0	0	0	
	64	1	0	0	0	0	0	3	1	0	
	65	0	0	2	1	0	0	0	0	0	
Container	66	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
	67	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
	68	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
	69	1	2	0	0	0	0	1	0	0	
	70	0	1	0	0	0	0	0	2	2	
	71	0	1	0	0	0	0	1	0	0	
	72	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	73	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	74	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
	75	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
G. Cargo	76	0	1	2	0	0	0	0	1	0	
	77	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	78	0	2	0	0	0	0	0	0	0	
	79	0	0	0	0	0	0	0	0	3	
	80	0	0	1	1	1	0	1	1	3	
	81	0	0	0	0	0	0	0	2	0	
	82	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
	83	0	0	0	3	0	0	0	0	0	
	84	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
	85	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
Lumber	86	0	2	0	0	0	0	0	0	0	
	87	0	3	1	1	0	0	2	0	2	
	88	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
	89	0	0	0	2	0	0	0	0	0	
	90	0	1	0	2	0	2	1	1	0	
	91	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
	92	0	0	0	2	0	0	0	1	0	
	93	0	0	0	0	0	0	0	1	2	
	94	0	1	1	1	0	0	1	1	2	
	95	0	0	0	1	0	0	0	0	1	
Oil	96	0	0	0	0	0	0	0	2	1	
	97	0	3	1	2	0	0	1	0	0	
	98	0	1	1	2	0	0	0	2	0	
	99	0	0	1	1	0	0	0	1	0	
	100	0	0	0	2	0	0	1	2	0	
	101	0	0	0	2	0	0	0	2	1	
	102	0	1	1	2	0	0	0	1	1	
	103	0	0	1	1	0	0	0	2	0	
	104	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
	105	0	1	1	0	0	0	0	1	0	
Vehicle	106	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
	107	1	0	0	0	0	0	0	2	0	
	108	0	0	0	2	0	0	0	0	0	
	109	0	0	0	2	0	0	0	2	0	
	110	0	0	2	1	0	0	0	2	0	
	111	0	1	1	2	1	0	0	0	0	
	112	0	0	0	0	0	0	0	2	0	
	113	0	0	1	2	1	2	0	0	1	
	114	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	115	0	1	1	0	0	0	0	2	0	
Vehicle	116	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	117	0	0	0	0	0	2	0	0	0	
	118	0	0	1	0	0	0	0	1	0	
	119	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
	120	0	0	1	2	0	0	0	0	0	

限とに均等にばらつくようになり、船令 10 年以上の老令船になると第 4 象限は少なく、第 2 象限に位置する船がいちじるしく多くなっている。すなわち全体的な傾向として、新船から老令船へと移行するにつれての健全度の推移を、 C_i および D_i の値をみることによって具体的に判断することができる。

以上の結果から、 C_i および D_i の指標が船舶の健全度を示す尺度として使えるような目途がたったので、次に個船のこれらの指標が、検査を重ねるごとにどのように推移していくかを、追跡調査で考察することにする。

4 考 察

個船の信頼性指標がどのように推移するかを調べるため、1970～1972 年頃に入級した船舶で、現在もなお存続している船舶を、船舶の各種類ごとに 3～4 隻任意に選別した。これらの船舶について、入級以来これまで行ってきた 3～4 回の定期検査報告書を調べ、多基準分析を行いそれぞれの C_i および D_i の値を求めた。

Table 9 に追跡調査船 (26 隻) のインパクト行列 (サンプル数 65) を示す。船舶ごとの境は表中点線で区切って示す。多基準分析に当っては、これらの行列を、3 章で解析した 55 隻のそれに付加して、合計 120 のサンプルで行ったことになる。

4.1 船舶の種類別傾向

船種別に、追跡船の信頼性指標をプロットすると Fig. 8 のようになる。同図中、同一船は同じ記号 (○, ◎ など) で示し、記号の肩に示す番号 (1～4) は検査の順番を表わす。すなわち 1 が 1 回目の定検、2 が 2 回目の定検のごとくである。したがって番号が古くなるほど、船が年をとっていくことを意味する。なお、⊗印のものはそれまでは無損傷で肩番の定検時に突然損傷がみつかったもので、これについては別に後述する。

Fig. 8 から、種類別傾向をまとめると次のようになる。A グループとして、G. Cargo と Oil, B グループとして Bulk と Lumber, C グループとして Container と Vehicle のように三つのグループに分類して考えられるように思われる。

まず A グループは、経年後もそれほど D_i の値は大きくならず (大よそ $D_i < 0.1$)、原点周りに集中している。この傾向は、3 章で解析した 55 のサンプル値をみても同様であった。ただしこのグループに ⊗ 印の例外がある。これらはいずれも 3 回目の定検時 (12 年目) の値であり、それまでの定検時には、異常なしとされていたものである。すなわち A グループで、それまでは何となくとも老令化して突然示す D_i の高い値には十分注意を払う必要がある。

次に B グループは信頼性指標が広汎にばらつき、とく

に老令化すると確実に D_i 値は高い値を示すグループといえそうである。なお、Fig. 8 の Bulk で第 1 象限に位置するもの (◎²) がある。これは、Table 9 中サンプル No. 65 の値である。このインパクト行列の値をみると、アイテム 5 (T. & L. Plate) の値だけが悪くあとは全く正常である。このように重要部材一つだけボツと悪く、他は正常であるような場合、 D_i も正で C_i も正となる組み合わせとなる。

最後に C グループは高速船型グループであるが、比較的初期段階で高い D_i 値を示すが、その後は A グループ同様低い D_i 値に収まるグループといえる。Fig. 9 に、横軸に船令、縦軸に D_i 値をとって船種別にプロットした図を示す。前述した各グループごとの傾向をより明らかに窺うことができる。

4.2 D_i の区間変動について

Fig. 9 を注意してみると、 D_i が低い値を示した場合、次の検査ではほとんどの場合 D_i はそれよりも高い値を示す。また逆に D_i が高い値を示した場合、次の検査ではほとんど低い値を示す。このことを確認するため、 D_i が負から出発した場合と正から出発した場合とで、次の検査時の D_i がどうなるかを調べた結果が、Table 10 である。同表中最右欄 $\Delta D_i / \Delta T$ が、定検から定検まで (通常 4 年) の D_i 値の区間変動率を示す。

これから、 D_i が負で始まったもの (0 も含む) 32 例中およそ 81% の 26 例が正の変動率となっている。また D_i が正で始まったもの 13 例中、およそ 92% の 12 例が負の変動率となっている。前者の傾向は、経年劣化と運航による資材の消耗とで当然の結果といえるが、後者の場合は損傷がみつかった時点で十分な補修を行った結果が、次の検査に反映されるためと考えられる。Fig. 9 の Lumber で、11 年目で $D_i = 0.36$ といちじるしく高かった船が、次の検査では D_i が負に転じている (⊖ 印) などはその好例である。

以上の事柄が示すように、運航使用による消耗 (自然劣化も含めて) にしろ、保守にしろ、その影響は即座に信頼性指標 (D_i と C_i) に反映されており、これらが個船の保守管理上有用な尺度となる可能性を示す理由となろう。

5 結 論

(財)日本海事協会が、これまで検査を行ってきた日本籍船級船の船体損傷データに対し、数量化理論第 II 類および多基準分析手法を適用し、船舶信頼性の総合評価を行った。その結果をまとめると次のようになる。

(1) 数量化理論第 II 類を適用することにより、船舶の健全度と、それを説明するアイテムとを適切に設定すれば両者の関係を定量評価できる。すなわち前者を損傷

Fig. 8 Aspect of C_i - D_i transition for ship's kind

Fig. 9 Transition of discordance index for ship's kind

発見頻度で分類されたグループとし、後者として船令、船の種類、定検時の損傷件数をベースとした構造部材をとると両者の間には相関があり、前者は後者の数量和によって区分される。

(2) 構造アイテムについて、数量化解析で得た結果を援用し、多基準分析を行い、各船舶の信頼性指標（健全度指標と損傷度指標）を求めると、これにより個船の健全度を総合評価することができる。

(3) 船舶の信頼性指標を新船から老令船になるまで求め、その推移をみると、船舶の種類別に特徴的な傾向を示す。

(4) 損傷度指標 D_i が負のものは、次の検査ではそれよりも大きくなり、逆に正のものは次検査ではそれより小さくなる傾向にある。すなわち前者の場合、自然劣化および稼働による消耗の影響が、後者の場合保守の効果がそれぞれ反映されたためと思われる。

(5) 前(3)、(4)の結果から、本報で述べたような手続きで求めた信頼性指標は、個々の船舶について保守管理上有用な尺度となる可能性がある。

今回の報告では、船体損傷というテーマを取り上げて

いるにもかかわらず、損傷の形態とか機構には一切目をつぶり大所高所から眺めた結論となっている。今後の課題としては、より多くのデータ解析結果を積上げてより確かな情報とすること、結論の物理的背景を明らかにすることである。

最後に本調査研究は、科学技術庁科学技術振興調整費による「構造材料の信頼性評価技術の開発に関する研究」の一環としてとり行われたものであり、このような機会を与えていただいた科学技術庁関係各位並びにご教示いただいた同研究推進委員会各位に対し厚く御礼申し上げます。

また、有益な御意見、御教示をいただいた造船学会溶接・材料研究委員会材料分科会主査町田教授（東大）をはじめ、各委員の方々に厚く御礼申し上げます。

最後に、本調査研究実施に当り、御教示、御援助いただいた日本海事協会榊田(前)副会長、星野常務、田代(前)研究所長、竹内船級管理部長、西村企画部主管、池田釜山事務所長並びに船体研究室船木技師の方々に謝意を表します。

Table 10 (a) Gradient of D_i , $\Delta D_i/\Delta T$ (where D_i is negative in the previous survey)

Kind and No. of ship	age	$D_i(P)$	$D_i(S)$	ΔD_i ($=D_i(S)-D_i(P)$)	ΔT Yrs	$\Delta D_i/\Delta T$ ($\times 10^{-2}$)
G.C. 77	4	-0.115	-0.12	-0.005	4	-0.1
	8	-0.12	-0.04	0.08	4	2.0
	12	-0.04	-0.017	0.023	3	0.8
	4	-0.11	-0.12	-0.01	4	-0.3
	8	-0.12	-0.115	0.05	4	0.1
	4	-0.12	-0.08	0.04	4	1.0
	8	-0.08	0.032	0.112	4	2.8
	85	-0.112	-0.04	0.152	4	1.8
	8	-0.04	0.183	0.223	3	7.4
	89	-0.045	-0.12	-0.075	4	-1.7
Lumb	8	-0.12	0.36	0.48	3	12.0
	93	-0.115	0.10	0.215	4	5.4
	96	-0.076	0.144	0.220	4	5.5
Bulk	4	-0.12	-0.08	0.04	4	1.0
	8	-0.08	0.174	0.254	4	6.4
	59	-0.038	0.134	0.172	4	4.3
	4	-0.078	0	0.078	3	2.6
	7	0	0.098	0.098	5	2.0
Oil	99	-0.017	0.111	0.128	4	3.2
	104	-0.058	-0.013	0.045	4	1.1
	8	-0.013	-0.043	-0.03	4	-0.7
	8	-0.036	-0.036	0	2	0
	10	-0.036	0.05	0.086	4	2.1
Vehicle	112	-0.11	-0.12	-0.01	4	-0.3
	8	-0.12	0.31	0.43	4	10.7
	116	-0.12	0.05	0.17	4	4.3
	4	-0.12	-0.08	0.04	4	1.0
	7	-0.08	0.016	0.064	4	2.4
Container	66	-0.08	-0.045	0.035	4	0.9
	8	-0.045	0.073	0.118	4	3.0
	4	-0.018	-0.12	-0.102	3	-3.4
	7	-0.12	-0.058	0.062	4	1.5

Table 10 (b) Gradient of D_i , $\Delta D_i/\Delta T$ (where D_i is positive in the previous survey)

Kind and No. of ship	age	$D_i(P)$	$D_i(S)$	ΔD_i ($=D_i(S)-D_i(P)$)	ΔT Yrs	$\Delta D_i/\Delta T$ ($\times 10^{-2}$)
Lumber	90	0.361	-0.086	-0.447	4	-11.2
	92	0.002	-0.115	-0.117	4	-2.9
	95	0.013	-0.076	-0.089	4	-2.2
Bulk	58	0.214	-0.038	-0.252	4	-6.3
	64	0.142	-0.12	-0.262	4	-6.5
Oil	98	0.066	-0.017	-0.083	4	-2.1
	101	0.039	0.095	0.056	5	1.1
	8	0.095	-0.012	-0.107	3	-3.6
	107	0.073	-0.036	-0.109	4	-2.7
Vehicle	115	0.063	-0.12	-0.183	3	-6.1
	11	0.05	-0.017	-0.067	4	-1.7
Container	69	0.185	0.036	-0.149	3	-5.0
	8	0.036	-0.038	-0.074	4	-1.9

参 考 文 献

- 1) 白石他：数量化理論の構造物の健全度評価への応用，第29回構造工学シンポジウム（1983）2.
- 2) 白石他：構造健全性評価への総合評価手法の適用の試み，第5回設計における信頼性工学シンポジウム，昭和58年2月.
- 3) 林，駒沢：数量化理論とデータ処理，朝倉書店，（1984）10.
- 4) Nijkamp, P.: Theory and Application of Environmental Economics, Studies in Regional Science and Urban Economics, Vol. 1, North Holland (1977).
- 5) Nijkamp, P., J. B. Vos: A Multicriteria Analysis for Water Resource and Land Use Development, 13巻, 3号 (1977).
- 6) 天野他：多基準分析に基づく計画代替案の評価に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，昭和56年3月.