破壊力学手法の設計への適用

正員 阪 井 大 輔*

A Practical Application of Fracture Mechanics to Designs

by Daisuke Sakai, Member

Summary

In order to apply fracture mechanics to hull designs, a new design method using unique models is proposed.

This method has following characteristics.

- 1) Ordinary hull designers, who have no special knowledge in fracture mechanics, can estimate,
- 2) both crack initiation life N_c and crack propagation life N_p ,
- 3) using only the stress distribution in the condition without cracks,
- 4) without troublesome analysis of K Value,
- 5) without a computer,
- 6) with enough accuracy.

This paper represents the theoretical background of the new method, verification of the accuracy of K Values estimated by the method and application examples.

1 緒 言

船殻の設計者にとって、破壊力学的手法は、B タイプの LPGC および LNGC のようなガス・キャリアーの安全性検討に使われるだけではなく、一般船の就航時損傷対策および船殻構造様式、寸法決定等の際に対しても必要不可欠の技術となりつつある。

しかし、破壊力学手法を設計に適用するためには、

- 1) 破壊力学に関する専門的知識を必要とすること
- 2) コンピューター等による煩雑な計算とかなりの検討期間を要すること

の二点が障害となり、実際には限られた一部の設計に対し限られた一部の設計者のみを使用しているのが現状である。

本報告は、上記障害を取り除くため、独特のモデル化により、設計的には十分な精度を有し、かつ非常に簡便なため、専門的知識を持たない一般設計者でも十分に使いこなせる「破壊力学設計手法」を作成したものである。

本手法の特徴は、

- 1) 疲労亀裂がない状態における応力分布のみから
- 2) 煩雑、難解な応力拡大係数 K 値の解析なしに、直接伝播寿命を推定できることである。

さらに、疲労亀裂発生寿命の検討にも適用可能と考えられる。

2 「破壊力学設計手法」の誘導と考察

2.1 理論的誘導

疲労亀裂伝播速度は Paris 則を用いて次式で表わされる。

$$\frac{da}{dN} = c(\Delta K)^m \quad (1)$$

$\frac{da}{dN}$: 疲労亀裂伝播速度 (mm/荷重 1 回, 1 サイクル), c, m : 材料定数で次式で求める¹⁾。

$$c = 5.53 \times 10^{-5} / 59.2^m \quad (2)$$

$$m = 4 - 0.0327 \sigma_Y \quad (3)$$

σ_Y : 降伏応力 (kg/mm²)

K 値の表示式としては次式を用いる。

$$\Delta K = f(a) \times \Delta \sigma_n \times \sqrt{\pi a} \quad (4)$$

ΔK : 応力拡大係数 K 値の範囲 (kg·mm^{-3/2})

$f(a)$: 応力分布、境界条件により決定する亀裂長 a の関数

$\Delta \sigma_n$: 作用公称応力範囲 (kg/mm²)

a : 亀裂長 (mm)

(1), (4) 式より

$$\int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{(f(a)\sqrt{a})^m} = c \times N_p \times \sqrt{\pi}^m \times \Delta \sigma_n^m$$

* 三菱重工業(株)長崎造船所

$$\equiv [F(a)]_{a_0}^{a_f} \quad (5)$$

$$N_p = \frac{[F(a)]_{a_0}^{a_f}}{c\sqrt{\pi}^m} \Delta\sigma_n^{-m} \quad (6)$$

N_p : 亀裂長 a_0 が a_f に達するまでに要する荷重繰返し数 (回) (Fig.1 参照)

また、船の寿命を 20 年, 200 航海と仮定すると、伝播寿命 V_p (航海) は (7) 式で求められる。

$$V_p = N_p \times \frac{200}{n_e} \quad (7)$$

Fig. 1 Initial crack length; a_0

Fig. 3(a) G function (MS)

Fig. 3(b) G function (HT 50)

Fig. 2 n_e - m curve

n_e : 等価荷重頻度(回)(等価荷重頻度とは、寿命計算を容易にするために、片対数直線の応力頻度分布を持つ船の一生での総荷重頻度 10^8 回の応力による伝播寿命と、 $Q=10^{-8}$ の最大公称応力範囲 $\Delta\sigma_n$ だけが n_e 回作用した時の伝播寿命が等しくなるように定めた等価荷重頻度で次式で求めることができる。)

$$n_e = \sum_{i=1}^j 10^{\frac{8}{j} \cdot i} \times (1 - 10^{-\frac{8}{j}}) \left(\frac{j + 0.5 - i}{j} \right)^m \quad (8)$$

j は応力頻度の分割数で NV は $j=8$ としているが本報告では $j=100$ とする。 n_e を材料定数 m に対してグラフ化したものを Fig. 2 に示す。

2.2 K 値表示式の設計的取扱い

(4) 式における $f(a)$ は本来、各亀裂の応力条件および境界条件により異なる性格のものであるが、これを近似的に次のように取扱う。

$$f(a) = 1.1215 \{ 1.0 + (K_t - 1) \exp(-0.9388 \times a/l_g) \} \quad (9)$$

(9) 式の誘導およびその精度については 3.1 で述べる。

(5) 式より

$$[F(a)]_{a_0}^{a_f} = \int_0^{a_f} \frac{da}{(f(a)\sqrt{a})^m} - \int_0^{a_0} \frac{da}{(f(a)\sqrt{a})^m} \quad (10)$$

Table 1 (a) G Function (MS)

a/l	kt	Kt										
		1	1.5	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	2.901 ¹⁴	2.901 ¹⁴	2.901 ¹⁴	2.901 ¹⁴	2.901 ¹⁴	2.901 ¹⁴	2.901 ¹⁴	2.901 ¹⁴	2.901 ¹⁴	2.901 ¹⁴	2.901 ¹⁴	2.901 ¹⁴
9	3.090 ¹⁴	3.090 ¹⁴	3.090 ¹⁴	3.090 ¹⁴	3.090 ¹⁴	3.090 ¹⁴	3.090 ¹⁴	3.090 ¹⁴	3.090 ¹⁴	3.090 ¹⁴	3.090 ¹⁴	3.090 ¹⁴
8	3.317 ¹⁴	3.316 ¹⁴	3.316 ¹⁴	3.316 ¹⁴	3.316 ¹⁴	3.315 ¹⁴	3.315 ¹⁴	3.315 ¹⁴	3.315 ¹⁴	3.314 ¹⁴	3.314 ¹⁴	3.314 ¹⁴
7	3.593 ¹⁴	3.593 ¹⁴	3.592 ¹⁴	3.592 ¹⁴	3.592 ¹⁴	3.589 ¹⁴	3.589 ¹⁴	3.587 ¹⁴	3.585 ¹⁴	3.584 ¹⁴	3.583 ¹⁴	3.583 ¹⁴
6	3.941 ¹⁴	3.939 ¹⁴	3.938 ¹⁴	3.939 ¹⁴	3.939 ¹⁴	3.926 ¹⁴	3.923 ¹⁴	3.919 ¹⁴	3.915 ¹⁴	3.912 ¹⁴	3.908 ¹⁴	3.908 ¹⁴
5	4.397 ¹⁴	4.391 ¹⁴	4.384 ¹⁴	4.372 ¹⁴	4.360 ¹⁴	4.348 ¹⁴	4.337 ¹⁴	4.326 ¹⁴	4.315 ¹⁴	4.304 ¹⁴	4.293 ¹⁴	4.293 ¹⁴
4	5.027 ¹⁴	5.005 ¹⁴	4.984 ¹⁴	4.943 ¹⁴	4.905 ¹⁴	4.868 ¹⁴	4.833 ¹⁴	4.800 ¹⁴	4.769 ¹⁴	4.739 ¹⁴	4.710 ¹⁴	4.710 ¹⁴
3	5.974 ¹⁴	5.894 ¹⁴	5.819 ¹⁴	5.685 ¹⁴	5.566 ¹⁴	5.461 ¹⁴	5.367 ¹⁴	5.283 ¹⁴	5.207 ¹⁴	5.137 ¹⁴	5.074 ¹⁴	5.074 ¹⁴
2	7.619 ¹⁴	7.294 ¹⁴	7.022 ¹⁴	6.594 ¹⁴	6.273 ¹⁴	6.022 ¹⁴	5.821 ¹⁴	5.655 ¹⁴	5.516 ¹⁴	5.397 ¹⁴	5.294 ¹⁴	5.294 ¹⁴
1	1.155 ¹⁴	9.918 ¹⁴	8.861 ¹⁴	7.612 ¹⁴	6.898 ¹⁴	6.433 ¹⁴	6.105 ¹⁴	5.869 ¹⁴	5.699 ¹⁴	5.514 ¹⁴	5.369 ¹⁴	5.369 ¹⁴
0.9	1.230 ¹⁴	1.032 ¹⁴	9.112 ¹⁴	7.723 ¹⁴	6.955 ¹⁴	6.467 ¹⁴	6.127 ¹⁴	5.875 ¹⁴	5.679 ¹⁴	5.521 ¹⁴	5.391 ¹⁴	5.391 ¹⁴
0.8	1.320 ¹⁴	1.079 ¹⁴	9.385 ¹⁴	7.838 ¹⁴	7.014 ¹⁴	6.500 ¹⁴	6.148 ¹⁴	5.888 ¹⁴	5.686 ¹⁴	5.528 ¹⁴	5.396 ¹⁴	5.396 ¹⁴
0.7	1.430 ¹⁴	1.144 ¹⁴	9.689 ¹⁴	7.960 ¹⁴	7.073 ¹⁴	6.533 ¹⁴	6.168 ¹⁴	5.902 ¹⁴	5.697 ¹⁴	5.535 ¹⁴	5.401 ¹⁴	5.401 ¹⁴
0.6	1.568 ¹⁴	1.198 ¹⁴	1.003 ¹⁴	8.021 ¹⁴	7.136 ¹⁴	6.596 ¹⁴	6.189 ¹⁴	5.915 ¹⁴	5.708 ¹⁴	5.541 ¹⁴	5.406 ¹⁴	5.406 ¹⁴
0.5	1.750 ¹⁴	1.275 ¹⁴	1.044 ¹⁴	8.288 ¹⁴	7.244 ¹⁴	6.503 ¹⁴	6.210 ¹⁴	5.929 ¹⁴	5.716 ¹⁴	5.548 ¹⁴	5.410 ¹⁴	5.410 ¹⁴
0.4	2.000 ¹⁴	1.377 ¹⁴	1.094 ¹⁴	8.409 ¹⁴	7.281 ¹⁴	6.545 ¹⁴	6.234 ¹⁴	5.944 ¹⁴	5.726 ¹⁴	5.555 ¹⁴	5.416 ¹⁴	5.416 ¹⁴
0.3	2.378 ¹⁴	1.515 ¹⁴	1.150 ¹⁴	8.625 ¹⁴	7.375 ¹⁴	6.594 ¹⁴	6.265 ¹⁴	5.962 ¹⁴	5.738 ¹⁴	5.563 ¹⁴	5.422 ¹⁴	5.422 ¹⁴
0.2	3.033 ¹⁴	1.712 ¹⁴	1.261 ¹⁴	8.937 ¹⁴	7.508 ¹⁴	6.761 ¹⁴	6.301 ¹⁴	5.986 ¹⁴	5.754 ¹⁴	5.574 ¹⁴	5.431 ¹⁴	5.431 ¹⁴
0.1	4.597 ¹⁴	2.231 ¹⁴	9.470 ¹⁴	9.550 ¹⁴	7.757 ¹⁴	6.888 ¹⁴	6.373 ¹⁴	6.030 ¹⁴	5.783 ¹⁴	5.591 ¹⁴	5.444 ¹⁴	5.444 ¹⁴
0.05	4.897 ¹⁴	2.571 ¹⁴	1.508 ¹⁴	9.658 ¹⁴	7.805 ¹⁴	6.910 ¹⁴	6.386 ¹⁴	6.038 ¹⁴	5.788 ¹⁴	5.598 ¹⁴	5.446 ¹⁴	5.446 ¹⁴
0.02	5.255 ¹⁴	2.427 ¹⁴	1.552 ¹⁴	9.784 ¹⁴	7.856 ¹⁴	6.935 ¹⁴	6.400 ¹⁴	6.047 ¹⁴	5.794 ¹⁴	5.602 ¹⁴	5.441 ¹⁴	5.441 ¹⁴
0.01	5.554 ¹⁴	2.554 ¹⁴	1.605 ¹⁴	9.935 ¹⁴	7.918 ¹⁴	6.965 ¹⁴	6.417 ¹⁴	6.057 ¹⁴	5.801 ¹⁴	5.606 ¹⁴	5.451 ¹⁴	5.451 ¹⁴
0.001	6.245 ¹⁴	2.717 ¹⁴	1.671 ¹⁴	1.012 ¹⁴	7.993 ¹⁴	7.003 ¹⁴	6.438 ¹⁴	6.070 ¹⁴	5.809 ¹⁴	5.612 ¹⁴	5.457 ¹⁴	5.457 ¹⁴
0.0001	6.962 ¹⁴	2.925 ¹⁴	1.756 ¹⁴	1.030 ¹⁴	8.090 ¹⁴	7.057 ¹⁴	6.465 ¹⁴	6.095 ¹⁴	5.820 ¹⁴	5.619 ¹⁴	5.462 ¹⁴	5.462 ¹⁴
0.00001	7.966 ¹⁴	3.210 ¹⁴	1.872 ¹⁴	1.068 ¹⁴	8.221 ¹⁴	7.115 ¹⁴	6.501 ¹⁴	6.109 ¹⁴	5.834 ¹⁴	5.629 ¹⁴	5.468 ¹⁴	5.468 ¹⁴
0.000001	9.468 ¹⁴	3.635 ¹⁴	2.041 ¹⁴	1.116 ¹⁴	8.413 ¹⁴	7.210 ¹⁴	6.554 ¹⁴	6.141 ¹⁴	5.855 ¹⁴	5.644 ¹⁴	5.490 ¹⁴	5.490 ¹⁴
0.0000001	1.207 ¹⁴	4.264 ¹⁴	2.339 ¹⁴	1.198 ¹⁴	8.739 ¹⁴	7.370 ¹⁴	6.643 ¹⁴	6.195 ¹⁴	5.861 ¹⁴	5.649 ¹⁴	5.497 ¹⁴	5.497 ¹⁴
0.01	1.940 ¹⁴	6.084 ¹⁴	3.031 ¹⁴	1.388 ¹⁴	9.500 ¹⁴	7.744 ¹⁴	6.852 ¹⁴	6.323 ¹⁴	5.974 ¹⁴	5.726 ¹⁴	5.538 ¹⁴	5.538 ¹⁴
0.009	1.940 ¹⁴	6.419 ¹⁴	3.162 ¹⁴	1.424 ¹⁴	9.644 ¹⁴	7.816 ¹⁴	6.892 ¹⁴	6.348 ¹⁴	5.990 ¹⁴	5.737 ¹⁴	5.549 ¹⁴	5.549 ¹⁴
0.008	2.092 ¹⁴	6.812 ¹⁴	3.320 ¹⁴	1.457 ¹⁴	9.817 ¹⁴	7.890 ¹⁴	6.938 ¹⁴	6.376 ¹⁴	6.009 ¹⁴	5.749 ¹⁴	5.551 ¹⁴	5.551 ¹⁴
0.007	2.267 ¹⁴	7.243 ¹⁴	3.512 ¹⁴	1.520 ¹⁴	1.003 ¹⁴	8.002 ¹⁴	6.996 ¹⁴	6.411 ¹⁴	6.032 ¹⁴	5.765 ¹⁴	5.566 ¹⁴	5.566 ¹⁴
0.006	2.486 ¹⁴	7.857 ¹⁴	3.733 ¹⁴	1.586 ¹⁴	1.029 ¹⁴	8.131 ¹⁴	7.093 ¹⁴	6.456 ¹⁴	6.061 ¹⁴	5.785 ¹⁴	5.580 ¹⁴	5.580 ¹⁴
0.005	2.774 ¹⁴	8.685 ¹⁴	4.069 ¹⁴	1.67 ¹⁴	1.064 ¹⁴	8.300 ¹⁴	7.163 ¹⁴	6.513 ¹⁴	6.098 ¹⁴	5.811 ¹⁴	5.599 ¹⁴	5.599 ¹⁴
0.004	3.171 ¹⁴	9.777 ¹⁴	4.504 ¹⁴	1.792 ¹⁴	1.111 ¹⁴	8.533 ¹⁴	7.293 ¹⁴	6.593 ¹⁴	6.150 ¹⁴	5.848 ¹⁴	5.624 ¹⁴	5.624 ¹⁴
0.003	3.769 ¹⁴	1.147 ¹⁴	5.157 ¹⁴	1.971 ¹⁴	1.187 ¹⁴	8.890 ¹⁴	7.486 ¹⁴	6.712 ¹⁴	6.228 ¹⁴	5.900 ¹⁴	5.692 ¹⁴	5.692 ¹⁴
0.002	4.897 ¹⁴	1.426 ¹⁴	5.891 ¹⁴	2.218 ¹⁴	1.306 ¹⁴	9.468 ¹⁴	7.825 ¹⁴	6.918 ¹⁴	6.392 ¹⁴	5.992 ¹⁴	5.728 ¹⁴	5.728 ¹⁴
0.001	7.285 ¹⁴	2.104 ¹⁴	8.994 ¹⁴	3.020 ¹⁴	1.600 ¹⁴	1.093 ¹⁴	8.630 ¹⁴	7.499 ¹⁴	6.683 ¹⁴	6.212 ¹⁴	5.885 ¹⁴	5.885 ¹⁴
0.0009	7.761 ¹⁴	2.234 ¹⁴	9.512 ¹⁴	3.161 ¹⁴	1.657 ¹⁴	1.121 ¹⁴	8.785 ¹⁴	7.504 ¹⁴	6.744 ¹⁴	6.254 ¹⁴	5.915 ¹⁴	5.915 ¹⁴
0.008	8.329 ¹⁴	2.383 ¹⁴	1.013 ¹⁴	3.331 ¹⁴	1.724 ¹⁴	1.154 ¹⁴	8.969 ¹⁴	7.616 ¹⁴	6.818 ¹⁴	6.301 ¹⁴	5.951 ¹⁴	5.951 ¹⁴
0.007	9.024 ¹⁴	2.579 ¹⁴	1.089 ¹⁴	3.538 ¹⁴	1.807 ¹⁴	1.194 ¹⁴	9.194 ¹⁴	7.754 ¹⁴	6.908 ¹⁴	6.366 ¹⁴	5.995 ¹⁴	5.995 ¹⁴
0.006	9.898 ¹⁴	2.818 ¹⁴	1.184 ¹⁴	3.798 ¹⁴	1.910 ¹⁴	1.245 ¹⁴	9.478 ¹⁴	7.927 ¹⁴	7.020 ¹⁴	6.443 ¹⁴	6.050 ¹⁴	6.050 ¹⁴
0.005	1.104 ¹⁴	3.131 ¹⁴	1.309 ¹⁴	4.138 ¹⁴	2.046 ¹⁴	1.311 ¹⁴	9.868 ¹⁴	8.153 ¹⁴	7.168 ¹⁴	6.545 ¹⁴	6.120 ¹⁴	6.120 ¹⁴
0.004	1.263 ¹⁴	3.561 ¹⁴	1.481 ¹⁴	4.609 ¹⁴	2.233 ¹⁴	1.403 ¹⁴	1.036 ¹⁴	8.466 ¹⁴	7.372 ¹⁴	6.685 ¹⁴	6.232 ¹⁴	6.232 ¹⁴
0.003	1.500 ¹⁴	4.214 ¹⁴	1.760 ¹⁴	5.317 ¹⁴	2.515 ¹⁴	1.541 ¹⁴	1.113 ¹⁴	8.936 ¹⁴	7.679 ¹⁴	6.895 ¹⁴	6.373 ¹⁴	6.373 ¹⁴
0.002	2.914 ¹⁴	5.343 ¹⁴	2.190 ¹⁴	6.547 ¹⁴	3.005 ¹⁴	1.781 ¹⁴	1.247 ¹⁴	9.753 ¹⁴	8.212 ¹⁴	7.261 ¹⁴	6.634 ¹⁴	6.634 ¹⁴
0.0001	2.900 ¹⁴	8.039 ¹⁴	3.264 ¹⁴	9.480 ¹⁴	4.174 ¹⁴	3.353 ¹⁴	1.566 ¹⁴	1.170 ¹⁴	9.494 ¹⁴	8.133 ¹⁴	7.256 ¹⁴	7.256 ¹⁴

Table 1 (b) G Function (HT50)

a/l	Kt					Kt					Kt				
	1	1.5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
10	4.484 ¹⁴	4.484 ¹⁴	1.484 ¹⁴	1.484 ¹⁴	1.484 ¹⁴	4.484 ¹⁴	4.484 ¹⁴	4.484 ¹⁴	4.484 ¹⁴	4.484 ¹⁴	4.484 ¹⁴	4.484 ¹⁴	4.484 ¹⁴		
9	4.727 ¹⁴	4.727 ¹⁴	4.726 ¹⁴	4.726 ¹⁴	4.726 ¹⁴	4.726 ¹⁴	4.726 ¹⁴	4.726 ¹⁴	4.726 ¹⁴	4.726 ¹⁴	4.726 ¹⁴	4.726 ¹⁴	4.726 ¹⁴		
8	5.013 ¹⁴	5.013 ¹⁴	5.013 ¹⁴	5.012 ¹⁴	5.012 ¹⁴	5.012 ¹⁴	5.012 ¹⁴	5.011 ¹⁴	5.010 ¹⁴	5.009 ¹⁴	5.009 ¹⁴	5.010 ¹⁴	5.010 ¹⁴		
7	5.359 ¹⁴	5.359 ¹⁴	5.358 ¹⁴	5.355 ¹⁴	5.355 ¹⁴	5.354 ¹⁴	5.353 ¹⁴	5.351 ¹⁴	5.350 ¹⁴	5.349 ¹⁴	5.349 ¹⁴	5.349 ¹⁴	5.349 ¹⁴		
6	5.789 ¹⁴	5.787 ¹⁴	5.784 ¹⁴	5.780 ¹⁴	5.776 ¹⁴	5.771 ¹⁴	5.767 ¹⁴	5.763 ¹⁴	5.760 ¹⁴	5.755 ¹⁴	5.755 ¹⁴	5.755 ¹⁴	5.755 ¹⁴		
5	6.341 ¹⁴	6.354 ¹⁴	6.327 ¹⁴	6.313 ¹⁴	6.299 ¹⁴	6.286 ¹⁴	6.273 ¹⁴	6.257 ¹⁴	6.242 ¹⁴	6.234 ¹⁴	6.234 ¹⁴	6.234 ¹⁴	6.234 ¹⁴		
4	7.090 ¹⁴	7.055 ¹⁴	7.061 ¹⁴	6.956 ¹⁴	6.952 ¹⁴	6.911 ¹⁴	6.811 ¹⁴	6.834 ¹⁴	7.030 ¹⁴	7.033 ¹⁴	7.033 ¹⁴	7.033 ¹⁴	7.033 ¹⁴		
3	8.196 ¹⁴	8.068 ¹⁴	8.017 ¹⁴	7.868 ¹⁴	7.736 ¹⁴	7.618 ¹⁴	7.513 ¹⁴	7.417 ¹⁴	7.300 ¹⁴	7.251 ¹⁴	7.251 ¹⁴	7.251 ¹⁴	7.251 ¹⁴		
2	1.003 ¹⁴	9.631 ¹⁴	9.369 ¹⁴	8.925 ¹⁴	8.570 ¹⁴	8.290 ¹⁴	8.062 ¹⁴	7.873 ¹⁴	7.714 ¹⁴	7.577 ¹⁴	7.457 ¹⁴	7.347 ¹⁴	7.247 ¹⁴		
1	1.418 ¹⁴	1.255 ¹⁴	1.147 ¹⁴	1.010 ¹⁴	9.313 ¹⁴	8.792 ¹⁴	8.418 ¹⁴	8.135 ¹⁴	7.912 ¹⁴	7.731 ¹⁴	7.580 ¹⁴	7.457 ¹⁴	7.347 ¹⁴		
0.9	1.494 ¹⁴	1.295 ¹⁴	1.171 ¹⁴	1.023 ¹⁴	9.382 ¹⁴	8.833 ¹⁴	8.445 ¹⁴	8.154 ¹⁴	7.926 ¹⁴	7.741 ¹⁴	7.587 ¹⁴	7.457 ¹⁴	7.347 ¹⁴		
0.8	1.565 ¹⁴	1.315 ¹⁴	1.201 ¹⁴	1.036 ¹⁴	9.452 ¹⁴	8.875 ¹⁴	8.478 ¹⁴	8.173 ¹⁴	7.936 ¹⁴	7.750 ¹⁴	7.594 ¹⁴	7.457 ¹⁴	7.347 ¹⁴		
0.7	1.694 ¹⁴	1.401 ¹⁴	1.243 ¹⁴	1.050 ¹⁴	9.523 ¹⁴	8.919 ¹⁴	8.498 ¹⁴	8.180 ¹⁴	7.951 ¹⁴	7.759 ¹⁴	7.601 ¹⁴	7.457 ¹⁴	7.347 ¹⁴		
0.6	1.830 ¹⁴	1.467 ¹⁴	1.270 ¹⁴	1.065 ¹⁴	9.577 ¹⁴	8.958 ¹⁴	8.524 ¹⁴	8.206 ¹⁴	7.963 ¹⁴	7.768 ¹⁴	7.617 ¹⁴	7.457 ¹⁴	7.347 ¹⁴		
0.5	2.005 ¹⁴	1.547 ¹⁴	1.313 ¹⁴	1.104 ¹⁴	9.678 ¹⁴	9.003 ¹⁴	8.555 ¹⁴	8.235 ¹⁴	7.975 ¹⁴	7.777 ¹⁴	7.617 ¹⁴	7.457 ¹⁴	7.347 ¹⁴		
0.4	2.241 ¹⁴	1.748 ¹⁴	1.365 ¹⁴	1.110 ¹⁴	9.768 ¹⁴	9.053 ¹⁴	8.582 ¹⁴	8.244 ¹⁴	7.993 ¹⁴	7.787 ¹⁴	7.621 ¹⁴	7.457 ¹⁴	7.347 ¹⁴		
0.3	2.586 ¹⁴	1.918 ¹⁴	1.453 ¹⁴	1.140 ¹⁴	9.877 ¹⁴	9.112 ¹⁴	8.617 ¹⁴	8.267 ¹⁴	8.005 ¹⁴	7.798 ¹⁴	7.633 ¹⁴	7.457 ¹⁴	7.347 ¹⁴		
0.2	3.170 ¹⁴	1.938 ¹⁴	1.533 ¹⁴	1.128 ¹⁴	1.003 ¹⁴	9.132 ¹⁴	8.695 ¹⁴	8.279 ¹⁴	8.025 ¹⁴	7.812 ¹⁴	7.647 ¹⁴	7.457 ¹⁴	7.347 ¹⁴		
0.1	4.483 ¹⁴	2.404 ¹⁴	1.732 ¹⁴	1.221 ¹⁴	1.030 ¹⁴	9.396 ¹⁴	8.749 ¹⁴	8.351 ¹⁴	8.061 ¹⁴	7.838 ¹⁴	7.659 ¹⁴	7.457 ¹⁴	7.347 ¹⁴		
0.05	7.725 ¹⁴	2.515 ¹⁴	1.667 ¹⁴	1.241 ¹⁴	1.035 ¹⁴	9.360 ¹⁴	8.773 ¹⁴	8.303 ¹⁴	8.067 ¹⁴	7.842 ¹⁴	7.662 ¹⁴	7.457 ¹⁴	7.347 ¹⁴		
0.01	8.512 ¹⁴	2.616 ¹⁴	1.867 ¹⁴	1.244 ¹⁴	1.040 ¹⁴	9.385 ¹⁴	8.779 ¹⁴	8.350 ¹⁴	8.071 ¹⁴	7.847 ¹⁴	7.667 ¹⁴	7.457 ¹⁴	7.347 ¹⁴		
0.005	9.330 ¹⁴	2.722 ¹⁴	2.013 ¹⁴	1.259 ¹⁴	1.045 ¹⁴	9.408 ¹⁴	8.783 ¹⁴	8.354 ¹⁴	8.072 ¹⁴	7.849 ¹⁴	7.670 ¹⁴	7.457 ¹⁴	7.347 ¹⁴		
0.001	1.003 ¹⁴	1.255 ¹⁴	1.147 ¹⁴	1.010 ¹⁴	9.313 ¹⁴	8.792 ¹⁴	8.418 ¹⁴	8.135 ¹⁴	7.912 ¹⁴	7.731 ¹⁴	7.580 ¹⁴	7.457 ¹⁴	7.347 ¹⁴		
0.0001	1.418 ¹⁴	1.255 ¹⁴	1.147 ¹⁴	1.010 ¹⁴	9.313 ¹⁴	8.792 ¹⁴	8.418 ¹⁴	8.135 ¹⁴	7.912 ¹⁴	7.731 ¹⁴	7.580 ¹⁴	7.457 ¹⁴	7.347 ¹⁴		
0.00001	1.494 ¹⁴	1.295 ¹⁴	1.171 ¹⁴	1.023 ¹⁴	9.382 ¹⁴	8.833 ¹⁴	8.445 ¹⁴	8.154 ¹⁴	7.926 ¹⁴	7.741 ¹⁴	7.587 ¹⁴	7.457 ¹⁴	7.347 ¹⁴		

$$\times \left(\frac{100}{l_g}\right)^{\frac{m}{2}-1} \\ = f_{mN} \times f_{Kt} \times f_{\Delta\sigma_n} \times f_{l_g} \quad (14)$$

$$V_p = \frac{200 \times 24^{-m} \times 100^{\left(1-\frac{m}{2}\right)}}{n_e \times c \sqrt{\pi}^m} \times [G(x)]_{x_f}^{x_0} \\ \times \left(\frac{24}{\Delta\sigma_n}\right)^m \times \left(\frac{100}{l_g}\right)^{\frac{m}{2}-1} \\ = f_{mV} \times f_{Kt} \times f_{\Delta\sigma_n} \times f_{l_g} \quad (15)$$

ただし

$$f_{mN} = \frac{24^{-m} \times 100^{\left(1-\frac{m}{2}\right)}}{c \sqrt{\pi}^m} \quad (\text{Fig. 4}) \quad (16)$$

Fig. 4 $f_{mN} - m$ curve

Fig. 5 $f_{mV} - m$ curve

$$f_{mV} = \frac{200 \times 24^{-m} \times 100^{\left(1-\frac{m}{2}\right)}}{n_e \times c \sqrt{\pi}^m} \quad (\text{Fig. 5}) \quad (17)$$

$$f_{Kt} = [G(x)]_{x_f}^{x_0} \quad (18)$$

$$f_{\Delta\sigma_n} = \left(\frac{24}{\Delta\sigma_n}\right)^m \quad (\text{Fig. 6}) \quad (19)$$

$$f_{l_g} = \left(\frac{100}{l_g}\right)^{\frac{m}{2}-1} \quad (\text{Fig. 7}) \quad (20)$$

2.4 疲労亀裂発生寿命推定への応用

疲労亀裂発生寿命推定は、造船設計者にとっては疲労亀裂伝播寿命推定以上に必要性の高い技術分野であり、

Fig. 6 $f_{\Delta\sigma_n} - \Delta\sigma_n$ curve

Fig. 7 $f_{l_g} - l_g$ curve

推定精度向上のために種々の試みがなされている。

ただし、疲労亀裂発生と伝播に関してはまだ明確な境界はなく、疲労亀裂の発生に対応する亀裂長についても確立されたものはない現状である。

本報告では疲労亀裂発生に対応する亀裂長として 0.5 mm を仮定し²⁾、(表面亀裂の場合は亀裂深さを 0.5 mm とする) 母材、突合せ継手および十字継手の S-N 線図から逆算される等価な初期欠陥長 a_i を用いることにより、近似的に疲労亀裂発生寿命 V_c (航海)、発生荷重繰返数 N_c (回) を求めるものである。(的場³⁾は表面亀裂長 10 mm をもって疲労亀裂発生と定義しており、これに対応する亀裂深さは約 1 mm であると報告している。)

2.4.1 等価初期欠陥長 a_i について

等価初期欠陥長を仮定して S-N 線図と対応させる、または S-N 線図より a_i を逆算する試み²⁾は数多くなされている。

本報告では砂本²⁾の考え方に基づき応力集中を構造的な応力集中係数 (= 二次応力係数 K_s) とブード止端部の局所的なピーク応力集中 (K_p) に分解する。

この K_s が本報告中の K_t と同性格のものであり、伝播寿命を支配し、 K_p は疲労亀裂発生に対してのみ寄与すると仮定する。(H. P. Lieurade⁴⁾も余盛影響は亀裂深さが 0.5 mm 以上ではほとんどないと報告している。) さらに「応力 $K_p \times \Delta\sigma_n$ が N_c 回働いた時 $a_c = 0.5$ mm の深さの亀裂が生じる現象と、応力集中がない応力場 ($K_t = K_p = 1$) で公称応力範囲 $\Delta\sigma_n$ が N_c 回作用した時、初期欠陥長 a が $a_c = 0.5$ mm まで進展する現象とを等価であると仮定する。」

上記仮定により定まる初期欠陥長を等価初期欠陥長 a_i と呼ぶことにすると a_i は次式で表わせる。

$$a_i = \left\{ a_c \left(1 - \frac{m}{2} \right) + N_c \times \Delta\sigma_n^m \times c \times 1.1215^m \right. \\ \left. \times \pi^{(m/2)} \times \left(\frac{m}{2} - 1 \right) \right\}^{1/(1 - \frac{m}{2})} \quad (21)$$

また、突合せ継手および十字継手の平均的な疲労強度として次の値を用いる²⁾。

$$\text{突合せ継手; } \Delta\sigma_n = 15 (\text{kg/mm}^2) \text{ at } N = 2 \times 10^6 \quad (22)$$

$$\text{十字継手; } \Delta\sigma_n = 12 (\text{kg/mm}^2) \text{ at } N = 2 \times 10^6 \quad (23)$$

母材に対しても同様の手法を用いると、

$$\text{母材; } \Delta\sigma_n = 25 (\text{kg/mm}^2) \text{ at } N = 2 \times 10^6 \quad (24)$$

(22)~(24) 式は軟鋼 (MS) に対する値であるが、通常疲労亀裂発生が問題となるような応力集中部においては、高張力鋼 (HT 50) の優位性はあまり認められないことから暫定的に、HT 50 に対しても、同じ値を用い

ることにする。

材料定数 c, m と (21)~(24) 式から MS と HT 50 に対応する a_i を求めたものを Appendix (12)~(17) 式にまとめている。

これらの a_i と a_c を用いれば、任意の応力集中部に対する疲労強度発生寿命を簡単に求めることができ、さらに連続して疲労亀裂伝播の検討も行なえる。

2.4.2 材料定数 m の影響および疲労許容応力について

疲労亀裂寿命を発生から伝播まで連続して考える際に問題となるのが S- N_c 線図と S- N_p 線図との傾斜の相違すなわち m の差であり、一般的には、発生に対応する $m = m_c$ と伝播の $m = m_p$ を比較すると、

$$m_p < m_c \quad (25)$$

であるため、 $m = m_p$ を一貫して用いると誤差を生じる。

例えば突合せ継手の S- N_c 線図から求められる m_c はほぼ 4 であるので、 $m = 3.2$ と $m = 4$ を比較する。

船の一生、20 年後に亀裂が発生するような応力を許容応力 σ_{all} を呼べば $K_t = 1$ に対する σ_{all} は次式で与えられる。

$$\sigma_{all} = \left\{ \frac{a_i \left(1 - \frac{m}{2} \right) - a_c \left(1 - \frac{m}{2} \right)}{c \times 1.1215^m \times \pi^{m/2} \times \left(\frac{m}{2} - 1 \right) \times n_e} \right\}^{1/m} \quad (26)$$

突合せ継手において

$m = 4$ と 3.2 に対し各々 σ_{all} を求めると、

$$(\sigma_{all})_{m=4} = 46.9 (\text{kg/mm}^2) \quad (27)$$

$$(\sigma_{all})_{m=3.2} = 42.9 (\text{kg/mm}^2) \quad (28)$$

すなわち、小さな m を用いると安全側の検討となり、 $m = 4$ に対しては応力安全率約 1.1 を考慮したことになる。

このため、本報告では安全側の値として $m = m_p$ を一貫して用いることとする。

2.5 「破壊力学設計手法」のまとめ

2.1~2.4 で述べた手法を、設計者に使いやすい形にまとめたものを Appendix に示す。

対象材料は最も使用頻度の高い MS と HT 50 とし、 c, m, n_e として (29), (30) 式を用いている。

$$\text{MS; } m = 3.2, c = 1.18 \times 10^{-10}, n_e = 6.94 \times 10^4 \quad (29)$$

$$\text{HT 50; } m = 3.0, c = 2.67 \times 10^{-10}, n_e = 1.01 \times 10^5 \quad (30)$$

また、短期航海での安全性判定の際には、船の一生で最悪の海象に遭遇することを考慮して Fig. 8 に示すように応力安全率 1.5 を採用した。

Fig. 8 Safety factor for a short voyage

3 提案手法の近似 K 値の精度について

3.1 $f(a)$ ((9) 式) の設定根拠

応力拡大係数 K 値の一般的表示式 (4), (9) 式は次の 4 点より設定した。

- 1) 緑亀裂では $a \rightarrow 0$ において理論的に

$$f(a) = 1.1215 K_t \quad (31)$$

- 2) 亀裂長が十分長くなると初期切欠の応力集中の影響は無視できることから、緑亀裂を想定すれば、

$$f(a) = 1.1215 \quad (32)$$

- 3) 応力集中の減衰の度合は指数分布に似ていること。

- 4) 指数分布の減衰係数は、標準的応力分布 Fig. 9 において、直線 PI の応力分布に対する理論解 K 値と $a = l_g$ にて一致するように定める。

すなわち、応力集中部の標準的応力分布 (Fig. 9) に対しては $a \rightarrow 0$, $a \rightarrow \infty$ の 2 箇所について正解を、また、 $a = l_g$ においてはほぼ正解を与え、応力集中の減衰についてもかなり良い近似を得ることができるため、設計的には十分な精度を持っていると考えられる。

3.2 円孔まわりの亀裂での精度と他の切欠への応用

円孔まわりの亀裂に関し、理論解と本手法の近似解の

Fig. 9 Stress gradient factor; l_g Fig. 10 $f(a)$ for cracks around a hole

比較を Fig. 10 に示すが、全領域にわたり $\pm 10\%$ 以内の推定精度が得られている。

円孔については応力分布から応力傾斜係数 l_g は約 $0.5R$ (R : 半径) であることがわかるが、円孔以外の切欠の場合における近似的な l_g の求め方について考えてみることにする。

切欠先端での応力傾斜については西田⁵⁾が無次元化した応力傾斜 I を次のように与えている。

$$I = \frac{\rho}{\sigma_{\max}} \times \frac{d\sigma}{dx} = 2 : \text{双曲線両側ノッチ} \quad (33)$$

$$= \frac{4a+3b}{2a+b} : \text{楕円孔 (長辺 } 2a, \text{ 短辺 } 2b) \quad (34)$$

$$= \frac{7}{3} : \text{円孔} \quad (35)$$

ただし ρ : 切欠半径, $\sigma_{\max}$: 最大応力, $\frac{d\sigma}{dx}$: 切欠先端の応力傾斜

書き直すと

$$\frac{d\sigma}{dx} = \frac{\sigma_{\max}}{\rho/I} = \frac{K_t \sigma_n}{\rho/I} \quad (36)$$

すなわち、Fig. 11 でいえば、切欠先端の応力傾斜に対応する底辺の長さ ($\overline{OC}$) が ρ/I であることを示しており、一方、本報告における l_g は (37) 式に示すよう

Fig. 11 Comparison between l_g and ρ/I

に、応力集中部の平均的な応力傾斜 $\frac{d\sigma}{dx}$ に対応するものである。

$$\frac{d\sigma}{dx} = \frac{(K_t - 1)\sigma_n}{l_g} \quad (37)$$

このように、応力傾斜自身は異なるものであり ρ/I に対応する応力傾斜は疲労亀裂発生に対応し、 l_g は疲労亀裂伝播に対応するとも見ることができるが、底辺の長さに関しては円孔の対応から考えて、設計的には漸次的に

$$l_g \doteq 1.2 \times \rho/I \quad (38)$$

(ただし I は (33)～(35) 式による)

と近似することにする。

(38) 式を使うことにより、 K_t と ρ の既知なる切欠⁵⁾からの亀裂発生伝播寿命は非常に容易に検討することができる。

3.3 多項式近似応力分布における精度

Fig. 12 に示すような多項式近似の応力分布 に対し理論解と近似解を比較したが、同図中に示すように良好な一致を得た。

逆にいうと、本手法の近似解は Fig. 12 のような応力減衰を想定していることになり、Fig. 12 に似た応力分布に対し精度が高い。

3.4 直線応力分布に対する精度

縁亀裂に対する K 値解は次式で表わせる。

$$\sigma(x) = \sigma_0 \sum_{n=0}^4 c_n x^n \quad (39)$$

$$K = \sigma_0 \sum_{n=0}^4 k_n c_n a^n \sqrt{\pi a} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} k_0 &= 1.1215, \quad k_1 = 0.6829, \quad k_2 = 0.5255, \\ k_3 &= 0.4410, \quad k_4 = 0.3868 \end{aligned} \quad (41)$$

(39)～(41) 式を直線応力分布に適用すると (42) 式を得る。

$$\begin{aligned} \Delta K &= \Delta \sigma_n \sqrt{\pi a} \\ &\times \{1.1215 K_t - 0.6829 (K_t - 1) \times (a/l_g)\} \end{aligned} \quad (42)$$

Fig. 12 $f(a)$ for a crack in $\sigma = c_2 x^2 + c_1 x + c_0$

Table 2 $f(a)$ in case $\sigma = c_1 x + c_0$

a/l_g	$K_t = 3$			$K_t = 5$			$K_t = 7$			$K_t = 10$		
	$f(a)_T$	$f(a)_E$	$f(a)_F$	$f(a)_T$	$f(a)_E$	$f(a)_F$	$f(a)_T$	$f(a)_E$	$f(a)_F$	$f(a)_T$	$f(a)_E$	$f(a)_F$
0	3.36	3.36	100	5.61	5.61	100	7.85	7.85	100	11.2	11.2	100
0.1	3.23	3.16	98	5.34	5.20	97	7.44	7.24	97	10.6	10.3	97
0.2	3.10	2.98	96	5.06	4.84	96	7.03	6.70	95	9.98	9.49	95
0.3	2.95	2.81	95	4.79	4.51	94	6.62	6.20	94	9.38	8.74	93
0.4	2.81	2.66	94	4.52	4.21	93	6.21	5.74	92	8.76	8.05	92
0.5	2.68	2.52	94	4.24	3.93	93	5.80	5.33	92	8.14	7.44	91
0.6	2.55	2.40	94	3.97	3.68	93	5.39	4.96	92	7.53	6.86	91
0.7	2.41	2.29	95	3.70	3.44	93	4.98	4.61	93	6.91	6.35	92
0.8	2.28	2.18	96	3.42	3.24	95	4.58	4.30	94	6.30	5.89	93
0.9	2.13	2.09	98	3.15	3.05	97	4.16	4.01	96	5.69	5.46	96
1.0	2.00	2.00	100	2.87	2.87	100	3.76	3.76	100	5.07	5.07	100
1.1	1.86	1.92	100	2.60	2.71	104	3.34	3.52	105	4.45	4.71	106

$f(a)_T$; $f(a)$ Theoretical

$f(a)_E$; $f(a)$ by the Proposed Method

Fig. 13 K Value of a crack at a deck beam end bracket in a car carrier

近似解 (9) 式による値と比較したのが Table 2 である。

3.1 より明らかなように $a \rightarrow 0$ と $a/l_g = 1$ の2点では、両者は完全に一致し、 $0 < a/l_g < 1$ においても $\pm 10\%$ 以内の精度であることがわかる。($a_f \doteq l_g$ となるように $\Delta \sigma_n$ を設定する)

3.5 Car Carrier 損傷部への適用例

SR 169 “船体構造の破壊管理制御設計に関する研究”¹⁾で報告されている、Car Carrier 損傷部解析例に対して適用 K 値表示で比較したのが Fig. 13 で良好な一致をみている。

4 「破壊力学設計手法」の適用例

4.1 就航時に発見された疲労亀裂の伝播速度推定

例；直径 450 mm の円孔の縁から両側 2 箇所に 30 mm

の長さの亀裂が発見され、100mm に達するまでの寿命を知りたい時；($\Delta\sigma_n=10\text{ kg/mm}^2$ とする。)

Appendix の推定手順に沿って検討すると

- 1) $a_0=30(\text{mm})$
- 2) $K_t=3$ (円孔の応力集中係数)
- 3) $l_g=0.5 \times \frac{450}{2}=112.5(\text{mm})$
- 4) $\Delta\sigma_n=10(\text{kg/mm}^2)$ ($Q=10^{-8}$)
- 5) $f_{mV}=9.47$
- 6) $x_0=a_0/l_g=0.267$, $x_f=a_f/l_g=0.889$
- 7) $f_{Kt}=0.10$
- 8) $f_{\Delta\sigma_n}=16.5$
- 9) $f_{l_g}=0.932$
- 10) $V_p=f_{mV} \times f_{Kt} \times f_{\Delta\sigma_n} \times f_{l_g}=14.6$ (航海)
- 11) 10) で求めた寿命 V_p は平均的な海象を想定した場合の推定値であり短期海象での安全率 1.5 を考慮した場合は $f_{\Delta\sigma_n}$ が 4.50 となり、 V_p も 4.0 (航海) となる。したがって、亀裂 30mm が 100mm までの伝播寿命はおおよそ 4.0~14.6 航海と推定される。

4.2 表面亀裂への適用例

表面亀裂の伝播速度については、正確には A. S. Kobayashi⁵⁾ の解等を用いて計算することができるが、本手法を用いても設計的には十分な精度で推定することができる。

Fig. 14 に示すような初期表面亀裂が板厚を貫通するまでの寿命を推定するには

$$a_0=b_I(\text{=亀裂深さ}) \quad (43)$$

$$a_f=t \quad (44)$$

Fig. 14 Crack propagation life N_p of a surface crack

Table 3 N_c and N_p in butt joint and cross joint

	$\frac{Q_g}{\Delta\sigma_n}$	$N_c (a_c \approx 0.5\text{mm})$				$N_p (a=0.5 \Rightarrow 10\text{mm})$			
		Experiment	Calculation	Cal	Exp	Experiment	Calculation	Cal	Exp
BUTT JOINT	14.4	1.9×10^6	2.3×10^6	1.2		5.1×10^5	3.9×10^5	0.76	
	16.1	8.8×10^5	1.6×10^6	1.8		4.9×10^5	2.7×10^5	0.55	
	17.5	1.2×10^6	1.2×10^6	1.0		7.8×10^5	2.1×10^5	0.27	
	19.5	5.5×10^5	8.7×10^5	1.6		3.3×10^5	1.5×10^5	0.45	
	21.7	3.9×10^5	6.2×10^5	1.6		2.0×10^5	1.0×10^5	0.50	
	26.1	2.0×10^5	3.4×10^5	1.7		6.3×10^4	5.8×10^4	0.92	
CROSS JOINT	14.4	1.5×10^6	1.1×10^6	0.73		8.8×10^5	4.0×10^5	0.45	
	17.3	5.2×10^5	6.2×10^5	1.2		4.3×10^5	2.2×10^5	0.51	
	21.9	1.4×10^6	2.9×10^5	2.1		1.3×10^5	1.0×10^5	0.77	
	26.3	7.0×10^4	1.6×10^5	2.3		8.7×10^4	5.8×10^4	0.67	
	27.9	5.3×10^4	1.3×10^5	2.5		5.8×10^4	4.8×10^4	0.83	

として寿命を求めれば良い。(この際、 l_g は任意の値で良いが $l_g=1\text{mm}$ としておけば読みとりやすい。)

本手法による推定値を Fig. 14 に示すが、精密解に比べ常に安全側であり、かつ設計的には十分な精度であると考えられる。また、板厚貫通時に $a=t$ の貫通亀裂になると考えれば板厚貫通後も連続的に伝播速度を追跡できる。

4.3 疲労亀裂発生と伝播の連続追跡例

従来、疲労亀裂発生または伝播に関する寿命検討は数多くなされているが、発生と伝播を連続的に追跡した研究⁷⁾は少ないようである。

ここでは、突合せ継手および十字継手に関し、疲労亀裂発生および伝播寿命を推定し、疲労試験結果⁸⁾と比較した。

結果を Table 3 に示すが、疲労試験のパラツキを考慮すれば、設計的には、本手法による発生、伝播連続追跡も使用可能な範囲にあると考えられる。

4.4 直交交叉部材がある場合および荷重分担率が変化する場合の適用法

本手法は半無限板中の縁亀裂に任意の応力分布が加わった場合を基本的境界条件として想定しているため、有限幅の部材に亀裂を生じ、その荷重分担率が変化する場合(例えばスロット部ウェブスチフナーでは亀裂進展と共に荷重分担率は大幅に減少する⁷⁾)、および亀裂の前方に直交部材が存在する場合には、非常に安全側の寿命推定となる。

そこで、両ケース共に、実質的には荷重分担率の変化すなわち $\Delta\sigma_n$ の変化として捕えることができることに着目すれば、寿命検討範囲 $a_0 \sim a_f$ を適当に分割することによって、手計算にて荷重分担率変化影響を考慮する

ことができる。

荷重分担率変化を $\eta(a/l_g)$ で表わせば、

$$f_{K_i} = \sum_{i=1}^j \{G(a_i/l_g) - G(a_{i-1}/l_g)\} \times \{\eta(a_{i-1}/l_g)\}^{-m} \quad (45)$$

$$\text{ただし} \quad a_i = a_0 + (a_f - a_0) \times i/j \quad (46)$$

j : 分割数 (任意であるが5程度で十分)

となる。

したがって $\eta(a/l_g)$ さえ与えられれば、(45) 式より明かなように、分担率変化が無い場合は亀裂の始点 a_0, a_f の2点の G 関数の差として与えられた f_{K_i} が、今度は $(j+1)$ 個の G 関数で求められる (45) 式の f_{K_i} に代るだけの簡単な作業で分担率変化影響または直交部材影響を考慮することができる。

直交部材影響による $\eta(a/l_g)$ は (47) 式で求められる¹⁾。

$$\eta(a/l_g) = 1 + 0.14 \times (a/l_g) \times (l_g/d) - 0.58 \times (a/l_g)^2 \times (l_g/d)^2 \quad (47)$$

ただし、 d : 亀裂始点から直交部材までの亀裂に沿ったガス長さ (mm) (亀裂は最大主応力に直交する方向に進展するとして求める。)

5 結 言

破壊力学手法の設計への適用を検討し下記成果を得た。

1) 破壊力学解析の最大の難関である K 値の推定に関し、応力集中部における応力分布の特性および、 K 値理論解の特性を組み合わせるにより、汎用的な K 値表示式を作成した。

2) K 値の亀裂長変化に伴う追跡解析に関しては、 G 関数と称する亀裂の残余寿命に対応する新しい概念を導入し図表化しておくことにより、簡略推定を可能とした。

3) 疲労亀裂発生寿命推定に関しても、等価初期欠陥長 a_i を既知 $S-N$ 線図から逆算して定めておくことにより伝播寿命と同様の手法の適用を可能とした。

4) 1)~3) より、破壊力学の知見を持たない一般設計者でも容易に疲労亀裂発生寿命、伝播寿命を推定できる「破壊力学設計手法」を作成し、適用例を示した。

5) 提案した簡略手法による K 値の推定精度を種々のケースでチェックし設計的に十分な精度であることを確認した。

6) 提案手法は表面亀裂解析にも設計的には十分な精度で適用可能である。

7) 亀裂の前方に直交交叉部材がある場合、 K 値の減少効果が知られているが、この影響を考慮するための手

法を示した。また、この手法はスロット部ウェブスチフナーのように亀裂進展と共に荷重分担率が変化する部材の亀裂解析にも用いることができる。

8) 応力集中部の応力傾斜に関し考察し、西田が提案している無次元化応力傾斜と本手法で提案した亀裂伝播に効く応力傾斜を比較した。

本報告は SR 169「船体構造の破壊管理制御設計に関する研究」において三菱分担作業として実施したものであり、金沢部会長、町田主査、渡辺主査、各社委員の方々および三菱重工(株)長崎研究所船体強度研究室の方々、同社造船設計部永元次長、船殻設計課牛島課長からは有益なる御助言、御指導を戴きました。ここに厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 日本造船研究協会第 169 研究部会: “船体構造の破壊管理制御設計に関する研究報告書, 昭和 55 年 3 月”。
- 2) 砂本, 山内, 的場: “溶接継手の疲れ強さに関する新しい評価法の検討” 三菱重工技報 Vol.16, No.3 (昭和 54 年 5 月)。
- 3) 的場正明: “模型疲労試験と基礎継手疲労試験の関連についての考察”, 日本造船学会論文集第 138 号 (昭和 50 年 12 月)。
- 4) H. P. Lieurade: “Utilisation de la Mecanique de la Rupture Pour le Calcul de la Resistance a la Fatigue des Assemblages Soudes”, IIW-XIII-840-77, 1977.
- 5) 西田正孝: “応力集中”, 森北出版。
- 6) A. S. Kobayashi: “Crack Opening Displacement in Surface Flawed Plate Subjected to Tension or Plate Bending”, Proc. of the 2nd Int. Conf. on Mechanical Behavior of Materials, Boston, Aug. 16-20, 1976.
- 7) 牛島, 阪井: “横桁スロット部の疲労強度について” 西部造船会会報, 第 47 号 (昭和 49 年 2 月)。
- 8) 山本, 矢島, 井上: “溶接継手止端部からの疲労亀裂発生寿命について”, 社内報告 (未発表)。

Appendix「破壊力学設計手法」

1. 適用範囲

初期亀裂長 a_0 (mm) の亀裂が、任意の亀裂長 a_f (mm) に達するまでの疲労亀裂伝播寿命 V_p (航海) または伝播繰返数 N_p (回) を求める。

表面亀裂の伝播に関しても設計的には十分な精度で適用可能である。(本文 4.2 参照)

さらに、疲労亀裂発生寿命推定にも近似的に用いることができる。(本文 2.4 参照)

ただし、本手法では荷重分担の再配分は考慮していないため、荷重再配分の激しい部材 (例えばスロット部ウェブスチフナー) の場合には本文 4.4 の方法を用いて寿命を推定する。(この方法は亀裂の前方に直交交叉部材がある場合の検討にも使用できる。)

2. 検討に必要なデータ

1) 初期亀裂長 a_0 (mm) (Fig.1 参照)表面亀裂の場合は亀裂深さを a_0 とする。2) 亀裂が無い状態における、該部の発生確率 $Q=10^{-8}$ の応力分布；FEM 解析または応力集中係数と応力傾斜に関するデータ (Fig.9 参照)。

3. 伝播寿命の推定手順

3.1 応力分布から次の三つのパラメータを求める。

1) 応力集中係数 $K_t (= \Delta\sigma_{\max}/\Delta\sigma_n)$ 2) 応力傾斜係数 l_g (mm)3) 公称応力範囲 $\Delta\sigma_n$ (kg/mm²) l_g は応力傾斜のパラメータであり、応力集中部における標準的な応力分布 Fig.9 において、切欠部の傾斜の底辺の長さ OQ として定義する。この際、直線 $\overline{PI}$ は応力分布曲線との間に形成される凹凸部面積 (斜線部) がほぼ等しくなるように引かれるものとする。

3.2 伝播寿命を求める。

伝播荷重繰返数 N_p (回) および伝播寿命 V_p (航海) は次式により求めることができる。

$$N_p = f_{mN} \times f_{Kt} \times f_{\Delta\sigma_n} \times f_{l_g} \quad (1)$$

$$V_p = f_{mV} \times f_{Kt} \times f_{\Delta\sigma_n} \times f_{l_g} \quad (2)$$

 f_{mN} および f_{mV} ；材料定数 c, m により決定する定数

$$f_{mN} = 3.29 \times 10^3 ; \text{軟鋼 (MS)} \quad (3)$$

$$f_{mN} = 4.87 \times 10^3 ; \text{高張力鋼 (HT 50)} \quad (4)$$

$$f_{mV} = 9.47 ; \text{MS} \quad (5)$$

$$f_{mV} = 10.1 ; \text{HT 50} \quad (6)$$

 f_{Kt} ；応力集中係数の影響を表わす係数で K_t および $x_0 \equiv a_0/l$, $x_L \equiv a_L/l$ より次式を用いて求める。

$$f_{Kt} = G(x_0) - G(x_f) = [G(x)]_{x_f}^{x_0} \quad (7)$$

 $G(x_0), G(x_f)$ ；各々、初期亀裂長 a_0 および任意の到達亀裂長 a_f に対応する関数で Fig.3 または Table 1 より読み取る。 $f_{\Delta\sigma_n}$ ；公称応力範囲 $\Delta\sigma_n$ の影響を表わす係数で (8) 式または Fig.6 より求める。

$$f_{\Delta\sigma_n} = (24/\Delta\sigma_n)^m \quad (8)$$

 $\Delta\sigma_n$ ； $Q=10^{-8}$ 相当の公称応力範囲

短期航海での伝播速度を検討する際は安全率 1.5 を乗じる。

 f_{l_g} ；応力傾斜の影響を表わす係数で (9) 式または Fig.7 より求める。

$$f_{l_g} = (100/l_g)^{\frac{m}{2}-1} \quad (9)$$

4. 疲労亀裂発生寿命の推定手順

疲労亀裂発生荷重繰返数 N_c (回) および発生寿命 V_c (航海) は次式より求める。

$$N_c = f_{mN} \times f_{Kt} \times f_{\Delta\sigma_n} \times f_{l_g} \quad (10)$$

$$V_c = f_{mV} \times f_{Kt} \times f_{\Delta\sigma_n} \times f_{l_g} \quad (11)$$

 N_c, V_c は (1) (2) 式と同一の右辺を持つ。ただし、 f_{Kt} を求める際の a_0, a_f として亀裂の発生場所に応じて次の値を用いる。

$$a_0 = 0.0261(\text{mm}) ; \text{MS 突合せ継手止端部} \quad (12)$$

$$a_0 = 0.0653(\text{mm}) ; \text{MS 隅肉溶接止端部} \quad (13)$$

$$a_0 = 0.00219(\text{mm}) ; \text{MS 母材} \quad (14)$$

$$a_0 = 0.0139(\text{mm}) ; \text{HT 50 突合せ継手止端部} \quad (15)$$

$$a_0 = 0.0395(\text{mm}) ; \text{HT 50 隅肉溶接止端部} \quad (16)$$

$$a_0 = 8.59 \times 10^{-4}(\text{mm}) ; \text{HT 50 母材} \quad (17)$$

また a_f としては共通に

$$a_f = 0.5(\text{mm}) \quad (18)$$

を使用する。