



## 溶接構造用鋼の低サイクル疲労特性

## Low Cycle Fatigue Properties of Structural Steels

田中 康浩\*

松本 重人\*\*

Tokushima Univ. Tokushima

Osaka Univ. Osaka

船越 督已\*\*\*

西山 昇\*\*\*\*

Tokushi Funakoshi

Noboru Nishiyama

## Synopsis :

Low cycle fatigue properties are described on various structural steel plates used for ship hulls, pressure

vessels, etc. A modified Manson-Coffin relation,  $\epsilon \cdot N^k = C$  was established for strain

controlled fatigue tests. The correlation between material constants  $k$  and  $C$  and tensile properties are discussed. Cyclic hardening and softening during the strain controlled tests are observed. Also, a

relationship between  $k$  and  $C$  is established. All materials used in this experiment clearly

Table 1 Chemical composition of the materials used (wt%)

Steel	Plate thickness (mm)	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B	Ceq.
K5E	35	0.15	0.35	1.36	0.019	0.009	—	—	—	—	—	—	0.39

K5E	35	0.15	0.35	1.36	0.019	0.009	—	—	—	—	—	—	0.39
RIVER ACE 60 (HW 50)	35	0.14	0.41	1.20	0.020	0.009	0.01	0.38	0.04	0.07	0.039	—	0.40
RIVER ACE 70 (HW 63)	50	0.11	0.25	0.82	0.012	0.010	0.20	1.03	0.42	0.34	0.029	0.003	0.45
RIVER ACE K O (HW 70)	35	0.14	0.30	0.85	0.005	0.006	0.24	1.18	0.44	0.49	0.044	0.004	0.51
SA533	240	0.18	0.26	1.37	0.011	0.006	0.01	0.67	0.11	0.54	—	—	0.59
KLN9 <sup>3)</sup>	30	0.05	0.21	0.50	0.007	0.007	—	9.02	—	—	—	—	0.37

2.2 試験片

低サイクル疲労試験片の形状、寸法を Fig. 1



## 2.3 試験方法

の観察を行い、はじめて疲労亀裂（可視亀裂）を  
検出した繰返し数（ $N_f$ ）および破断した繰返し数

静的引張試験は、JIS 4号サブサイズ型試験片  
については10tインストロン試験機を用い、また、  
砂時計型低サイクル疲労試験片については50t万  
能材料試験機を用いて行なった。疲労試験は±50%

( $N_f$ )を記録した。破断後の試験片の破面と外観  
を観察し、一部の破面については走査型電子顕微  
鏡による観察を行った。

$$\epsilon_{ca}^{(d)} = \nu \cdot \sigma_R / 2E \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに,  $\epsilon_{ca}^{(d)}$  : 径方向対数弾性ひずみ振幅

$$\epsilon_{ta} = \epsilon_{pa} + \epsilon_{ca} = 2\epsilon_{ca}^{(d)} + (\frac{1}{2} - \nu)\sigma_R / E \quad \dots\dots\dots(6)$$

約 200 回以上, 溶接継手については約 70 回以上になると  $\epsilon_{pa}$  はしだいに小さくなり, 直線関係が成り立たなくなるが, 直線関係を示している部分に

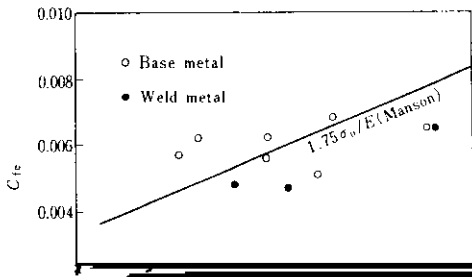
$$\epsilon_{ea} \cdot N_c^{k_e} = C_e \quad \dots\dots\dots(8)$$

したがって  $\epsilon_{ta}$  は,

$$\epsilon_{ta} = C_p \cdot N_c^{-k_p} + C_e \cdot N_c^{-k_e} \quad \dots\dots\dots(9)$$

Table 4 Material constants of Manson-Coffin's equation  $\epsilon \cdot N^k = C$  for various steels

Steel	Exponent $k$						Constant $C$						$\epsilon_f$	
	$k_{ft}$	$k_{ct}$	$k_{fp}$	$k_{cp}$	$k_{fe}$	$k_{ce}$	$C_{ft}$	$C_{ct}$	$C_{fp}$	$C_{cp}$	$C_{fe}$	$C_{ce}$		
K5D	B. M.	0.509	0.489	0.537	0.514	0.120	0.115	0.385	0.316	0.398	0.320	0.0057	0.0055	1.071
	W. M.	0.505	0.621	0.580	0.665	0.090	0.111	0.318	0.198	0.391	0.200	0.0048	0.0044	1.075



だし、それぞれ  $0.5\epsilon_r^{0.6}$ ,  $0.25\epsilon_r$ ,  $1/2\sqrt{2}\epsilon_r$  なる値与えている。本実験の結果をこれらの関係直線とともに Fig. 11 に示す。図よりわかるように、母材については  $C_{rp}$  は  $0.424\epsilon_r$  となり、Manson, Martin の結果の中間に位置している。また塑性ひずみ振幅  $\epsilon_{pa}$  と亀裂発生寿命  $N_c$  との関係における  $C_{cp}$  を静破壊延性  $\epsilon_f$  に対して表示すれば

$\sigma_a$  (kg/mm<sup>2</sup>)

一方,  $c_{ea}-N_c$  あるいは  $N_f$  の直線の勾配  $k_{ee}$  あ



強度が大きくなるにつれて指数  $k_{re}$  は小さくなっている。Manson は鋼種に関係なく  $k_{re}$  は平均的

と  $N_c$  に関する指数  $k_{cp}$  と  $k_{rp}$  との関係を Fig. 16 に示す。Fig. 14 に示した弾性ひずみ振幅に関す

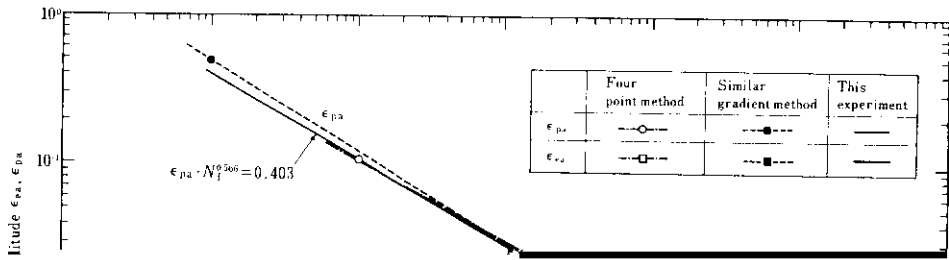
$N_f = 1/4$  に対し  $\epsilon_{on} = 1.25\sigma_f/E$ , また,  $N_f = 10^5$  に対して同じく  $0.45\sigma_u/E$  を通る直線を引き, この直線の  $N_f = 10^4$  における  $\epsilon_{on}^*$  の値を読みとり,  $0.5 (0.0132 - \epsilon_{on}^*/1.91)$  を求め, この値をその点での  $\epsilon_{pa}$  とし, さらに  $N_f = 10$  に対する  $\epsilon_{pa}$  を  $1/8 \epsilon_f^*$  として求め, この両点を通る直線を塑性ひ

ずみ成分に関する推定直線とする手法である。

本実験結果についてその妥当性を検討してみた。まず, 共通勾配法または4点法に必要な定数を **Table 5** に示す。このようにして求めた RIVER ACE 60 と RIVER ACE K-O の  $\epsilon-N$  線図の例を **Fig. 17**, **Fig. 18** に示す。母材につ

**Table 5** Material constants of  $\epsilon-N$  curve estimated by similar gradient and 4 points method for various materials

Material constant for Manson

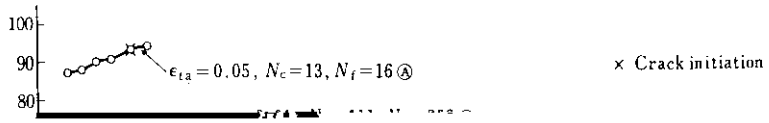


Number of cycles to failure  $N_f$

Fig. 18 Estimated  $\epsilon-N_f$  curves of RIVER ACE K-O (Base metal)

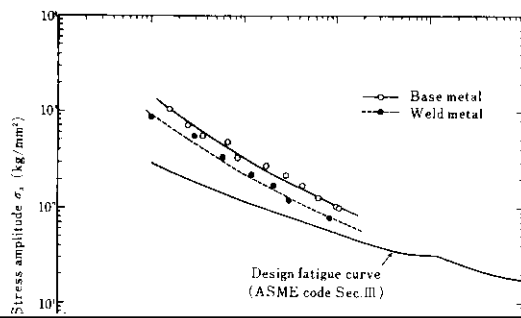
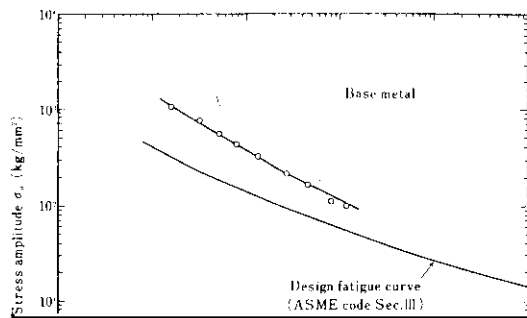
いての共通勾配法による  $\epsilon_{pa}-N_f$  推定曲線は実測値による曲線と同等か、いくぶん長寿命側に位置しているが、ほとんど差はみられない。このことは他鋼種についても同様である。図18に示す

料の特性ならびに加えられたひずみ振幅値によって変化する。本実験でえられた軸方向真応力の繰返し数にもなり変化を Fig. 19, Fig. 20 に示



関連するものが考えられるが明確でない。なお、  
添付表( )には鋼鉄のL, S, C, B, M, T, H, K, L, J, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z, AA, AB, AC, AD, AE, AF, AG, AH, AI, AJ, AK, AL, AM, AN, AO, AP, AQ, AR, AS, AT, AU, AV, AW, AX, AY, AZ, BA, BB, BC, BD, BE, BF, BG, BH, BI, BJ, BK, BL, BM, BN, BO, BP, BQ, BR, BS, BT, BU, BV, BW, BX, BY, BZ, CA, CB, CC, CD, CE, CF, CG, CH, CI, CJ, CK, CL, CM, CN, CO, CP, CQ, CR, CS, CT, CU, CV, CW, CX, CY, CZ, DA, DB, DC, DD, DE, DF, DG, DH, DI, DJ, DK, DL, DM, DN, DO, DP, DQ, DR, DS, DT, DU, DV, DW, DX, DY, DZ, EA, EB, EC, ED, EE, EF, EG, EH, EI, EJ, EK, EL, EM, EN, EO, EP, EQ, ER, ES, ET, EU, EV, EW, EX, EY, EZ, FA, FB, FC, FD, FE, FF, FG, FH, FI, FJ, FK, FL, FM, FN, FO, FP, FQ, FR, FS, FT, FU, FV, FW, FX, FY, FZ, GA, GB, GC, GD, GE, GF, GG, GH, GI, GJ, GK, GL, GM, GN, GO, GP, GQ, GR, GS, GT, GU, GV, GW, GX, GY, GZ, HA, HB, HC, HD, HE, HF, HG, HH, HI, HJ, HK, HL, HM, HN, HO, HP, HQ, HR, HS, HT, HU, HV, HW, HX, HY, HZ, IA, IB, IC, ID, IE, IF, IG, IH, II, IJ, IK, IL, IM, IN, IO, IP, IQ, IR, IS, IT, IU, IV, IW, IX, IY, IZ, JA, JB, JC, JD, JE, JF, JG, JH, JI, JJ, JK, JL, JM, JN, JO, JP, JQ, JR, JS, JT, JU, JV, JW, JX, JY, JZ, KA, KB, KC, KD, KE, KF, KG, KH, KI, KJ, KK, KL, KM, KN, KO, KP, KQ, KR, KS, KT, KU, KV, KW, KX, KY, KZ, LA, LB, LC, LD, LE, LF, LG, LH, LI, LJ, LK, LL, LM, LN, LO, LP, LQ, LR, LS, LT, LU, LV, LW, LX, LY, LZ, MA, MB, MC, MD, ME, MF, MG, MH, MI, MJ, MK, ML, MM, MN, MO, MP, MQ, MR, MS, MT, MU, MV, MW, MX, MY, MZ, NA, NB, NC, ND, NE, NF, NG, NH, NI, NJ, NK, NL, NM, NN, NO, NP, NQ, NR, NS, NT, NU, NV, NW, NX, NY, NZ, OA, OB, OC, OD, OE, OF, OG, OH, OI, OJ, OK, OL, OM, ON, OO, OP, OQ, OR, OS, OT, OU, OV, OW, OX, OY, OZ, PA, PB, PC, PD, PE, PF, PG, PH, PI, PJ, PK, PL, PM, PN, PO, PP, PQ, PR, PS, PT, PU, PV, PW, PX, PY, PZ, QA, QB, QC, QD, QE, QF, QG, QH, QI, QJ, QK, QL, QM, QN, QO, QP, QQ, QR, QS, QT, QU, QV, QW, QX, QY, QZ, RA, RB, RC, RD, RE, RF, RG, RH, RI, RJ, RK, RL, RM, RN, RO, RP, RQ, RR, RS, RT, RU, RV, RW, RX, RY, RZ, SA, SB, SC, SD, SE, SF, SG, SH, SI, SJ, SK, SL, SM, SN, SO, SP, SQ, SR, SS, ST, SU, SV, SW, SX, SY, SZ, TA, TB, TC, TD, TE, TF, TG, TH, TI, TJ, TK, TL, TM, TN, TO, TP, TQ, TR, TS, TT, TU, TV, TW, TX, TY, TZ, UA, UB, UC, UD, UE, UF, UG, UH, UI, UJ, UK, UL, UM, UN, UO, UP, UQ, UR, US, UT, UY, UZ, VA, VB, VC, VD, VE, VF, VG, VH, VI, VJ, VK, VL, VM, VN, VO, VP, VQ, VR, VS, VT, VU, VV, VW, VX, VY, VZ, WA, WB, WC, WD, WE, WF, WG, WH, WI, WJ, WK, WL, WM, WN, WO, WP, WQ, WR, WS, WT, WY, WZ, XA, XB, XC, XD, XE, XF, XG, XH, XI, XJ, XK, XL, XM, XN, XO, XP, XQ, XR, XS, XT, XU, XV, XW, XX, XY, XZ, YA, YB, YC, YD, YE, YF, YG, YH, YI, YJ, YK, YL, YM, YN, YO, YP, YQ, YR, YS, YT, YU, YV, YW, YX, YY, YZ, ZA, ZB, ZC, ZD, ZE, ZF, ZG, ZH, ZI, ZJ, ZK, ZL, ZM, ZN, ZO, ZP, ZQ, ZR, ZS, ZT, ZU, ZV, ZW, ZX, ZY, ZZ

**Table 6** Material constants of equation  
 $N_c = N_c - A_e / (N_c \cdot B)$  for various materials



1

Number of cycles to failure  $N_f$

Number of cycles to failure  $N_f$

り、 $N < 10^3$  回強度についてみると、母材で規格  
 特有のパターンであり、特にタイヤートラック様  
 値の50~70%、溶接継手で20~60%高いことがあ  
 り、ひずみ振幅  $\epsilon_a$  が 0.02 以下の長寿命であ

かる。

た破面についてみられる。また、これよりひずみ  
 振幅の大きく短寿命のものでは静的引張破面に近

ひずみ制御低サイクル疲労試験片の破断状況の  
 例を RIVER ACE 60 と RIVER ACE K-O につ  
 いて **Photo. 1** に示す。疲労亀裂の発生個所はほ  
 とんど試験片の最小断面部であったが、なかには  
 それ以外の個所から発生することもあった。それ  
 らの亀裂は田田方向に数個発生し、下と準同

## 5. 総 括

50kg/mm<sup>2</sup> 級造船用鋼から 80kg/mm<sup>2</sup> 調質高  
 張力鋼にいたる 7 種の鋼材の母材および溶接継手  
 について、静的引張試験および低サイクル疲労

No. 1

No. 4

No. 7





(3) ひずみ制御低サイクル疲労試験において、 $B$  はおよそ1であるが、 $A$  は鋼材によりき

を、また小さい鋼材は繰返し硬化挙動を示す。

(4) 亀裂伝播寿命 ( $N_f - N_c$ ) と破断寿命 ( $N_f$ ) との間には  $N_f - N_c = A \cdot (N_f)^B$  の関係が成り立

(5) 供試材7種の母材および溶接継手の疲労曲線は、ASME code Sec. III ボイラーおよび圧力容器規則に対していずれも十分安全側にある。

#### 参考文献

1. 鋼材の疲労強度 (1969) C. 519