

# 討25

## 高炉鉄皮の余寿命予測

住友金属工業(株) 中央技術研究所 森田喜保 °時政勝行

### 1. 緒言

高温で繰返しのひずみあるいは温度変動に伴う熱ひずみを受ける高温構造物の余寿命予測を正確に行なうためには、問題となる部分が受けたひずみ履歴の正確な把握と信頼できる高温疲労あるいは熱疲労寿命推定法の使用が不可欠である。しかしながら、現実の状況をみると、使用温度条件が不明であったり、使用温度条件が明確であってもひずみ履歴の正確な把握ができない場合がほとんどであり、高温疲労あるいは熱疲労寿命推定法も確立されているとは言い難い。したがって、現時点における高温構造物の寿命余寿命予測にはある程度のあいまいさを許容する必要がある。

本報は、小倉製鉄所第2高炉の2次改修(昭和56年1月~2月)に関連して、高炉ホットスポット発生部の更新基準の確立を目的として実施した、簡単なホットスポットモデルに基く高炉鉄皮の寿命余寿命解析結果をとりまとめたものである。解析方法は必ずしも完全でなく、将来多くの改善が必要であると考えているが、実炉改修に際して有効な知見が得られており、今後の高温構造物の寿命余寿命予測の基本的な方向を示唆する一例として紹介する。

### 2. 解析方法

2-1. 鉄皮損傷要因： 実炉状況および室内ホットスポット再現実験からホットスポット部に発生するクラックはホットスポットの繰返しによる鉄皮の熱疲労クラックであると判断された。図1はこの場合の鉄皮損傷要因とクラック発生までの鉄皮寿命推定方法を示したものである。これから、ホットスポットに対する寿命を予測するためには次の点を明確にする必要がある。

(1)ホットスポット部の温度分布と応力、ひずみの関係

(2)鉄皮材の高温熱疲労強度特性

2-2. ホットスポット部の温度解析および応力・ひずみ解析： 図2に示すような円形のホットスポットモデルを考え、外表面中心の温度が $20^{\circ}\text{C} \rightleftharpoons T_{\text{max}}$ と変化する熱サイクル条件下の応力・ひずみ挙動を熱弾塑性有限要素法により求めた。ここで使用した熱荷重条件および材料物性値を表1, 2および図3, 4に示す。なお、図2(a)は鉄皮平滑部に、(b)は鉄皮応力集中部にそれぞれホットスポット中心を想定している。

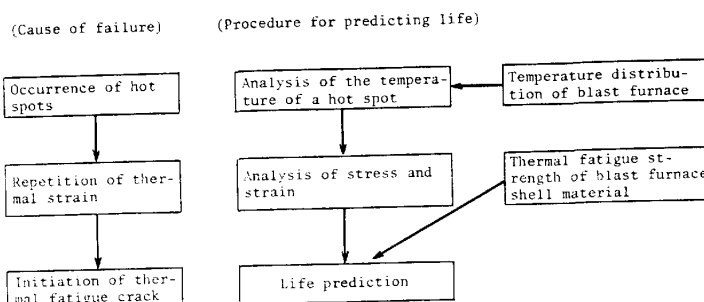


Fig.1 Cause of failure of the steel shell of blast furnace and the procedure for predicting its life

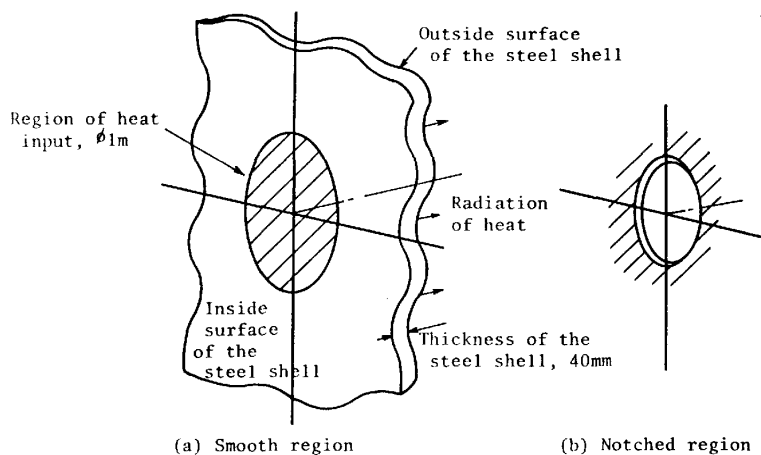


Fig.2 Hot spot model for life prediction

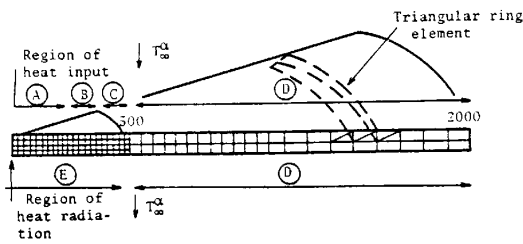


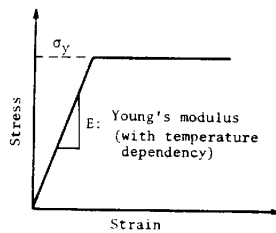
Fig.3 Boundary conditions

Table 2 Physical properties used

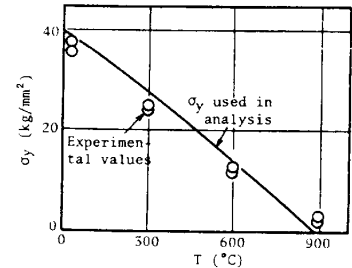
Thermal conductivity	(kcal/mh°C)	46
Specific heat	(kcal/kg°C)	0.11
Specific gravity	(kg/m³)	7300
Linear expansion coefficient		$0.135 \times 10^{-4}$
Poisson's ratio		0.3

Table 1 Heating and cooling conditions ( $T_{max} = 700^\circ\text{C}$ )

Portion	Heating				Cooling	
	Heat transfer coefficient $\alpha$ (kcal/m²h°C)	Temperature $T_{\infty}$ (°C)			Heat transfer coefficient $\alpha$ (kcal/m²h°C)	Temperature $T_{\infty}$ (°C)
		0 ~ 5 min	5 ~ 10 min	10 ~ 40 min		
A	500				20	
B	300	600	700	800	20	20
C	100				20	
D	20	20	20	20	20	20
E	100	20	20	20	100	20



(a) Stress-strain relationship



(b) Temperature dependence of  $\sigma_y$

Fig.4 Yielding properties of the blast furnace shell material, SM50CN

図5に主要部の温度の経時変化を解析した一例を、図6に最高昇温時(昇温開始から40分後)の半径方向の温度分布を示す。図7に示す実炉の温度パターンとの比較から、今回採用した解析条件は実炉の温度条件とほぼ一致していると言える。また、図5より、最高温度時点ではホットスポット中心の炉内面と炉外面の温度差は50°Cと考えることができる。

図8~図11は図5の  $T_{max} = 700^\circ\text{C}$  時の温度分布に対する昇温時および冷却時の応力とひずみの分布を、図12はホットスポット中央部での相当応力  $\sigma_{eq}$  と相当ひずみ  $\epsilon_{eq}$  の関係を示す。ここで、

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_r - \sigma_t)^2 + (\sigma_t - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2}$$

$$\epsilon_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_r - \epsilon_t)^2 + (\epsilon_t - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_r)^2}$$

..... (1)

であり、 $\sigma_{eq}$  と  $\epsilon_{eq}$  との関係を図示する場合には符号を絶対値が最大となる応力とひずみの符号に合わせた。

図8~図12から以下のことが明らかとなった。

- (1) 最も大きなひずみ履歴を受け、熱疲労強度が問題となるのはホットスポットの中心炉内側である。
- (2) ホットスポット中心部の残留応力はほぼ降伏応力に等しい。
- (3) 板厚はホットスポットの繰返し

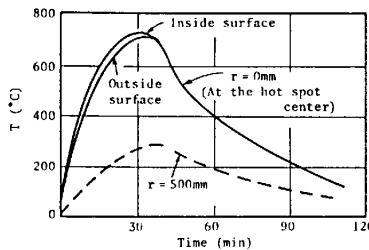


Fig.5 An example of the analysis of variation of the hot stop temperature with time

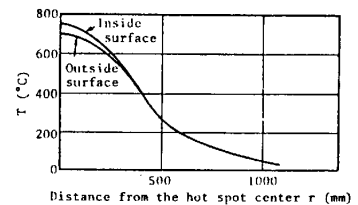


Fig.6 An example of analysis of temperature distribution around a hot spot ( $T_{max} = 700^\circ\text{C}$ )

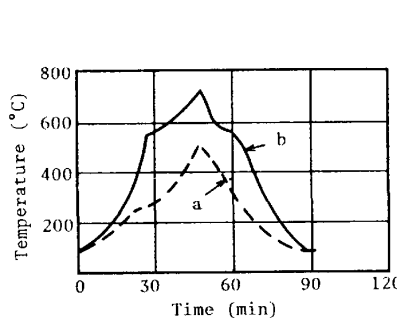
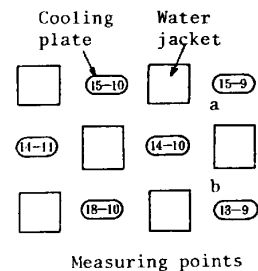


Fig.7 Variation of the hot spot temperature with time, measured on the blast furnace



とともに増加する。

(4)相当応力と相当ひずみの関係 (ヒステリシスループ)は閉じず、繰返しひずみ状態は次の2つの変数で記述できる。

塑性ひずみ範囲  $\Delta \epsilon_p$

ラチェットひずみ  $\delta_p$

ラチェット変形は1サイクル目がとくに大きく、2サイクル目以降は  $\delta_p$  に等しい。

2-3. 熱疲労寿命推定式: ヒステリシスループの閉じない場合のクリープ領域での多軸条件下の低サイクル疲労寿命推定についてはManson and Halford の提案した方法がある<sup>(1)</sup>。その場合には、

詳細な弾塑性クリープ解析が前提となっており、今回の場合にはそのままでは適用できない。そこで、今回実施した弾塑性解析がクリープ温度域の変形を求めていることを考慮して、 $\Delta \epsilon_p$  に対する疲労寿命  $N_p$  としては、鉄皮材の  $\Delta \epsilon_{ij} - N_{ij}$  特性の最下限特性を用いて求めることにし、 $\Delta \epsilon_p$  に  $\delta_p$  が重畳した場合の寿命  $N_f$  を次式で求めた。

$$\frac{1}{N_p} + \frac{\delta_p}{D_p} = \frac{1}{N_f} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $D_p = -\ln(1 - \Psi)$ ,  $\Psi$ : 引張破断絞り, である。

2-4. 鉄皮材の  $\Delta \epsilon_{ij} - N_{ij}$  特性と  $D_p$  値:  $600^\circ\text{C}$  において4種類の試験 (PP, PC, CP および CC 試験) を実施して求めた鉄皮材 SM50CN の  $\Delta \epsilon_{ij} - N_{ij}$  特性を図13に示す。これから、ひずみの大きい領域 ( $>0.2\%$ ) では  $\Delta \epsilon_{cp} - N_{cp}$  特性が  $\Delta \epsilon_{ij} - N_{ij}$  特性の最下限疲労寿命を与えることがわかる。 $\Delta \epsilon_{cp} - N_{cp}$  特性の温度依存性については実験データがなく、今回は無視することにした。次に、 $D_p$  値については、図14に示す破断絞り  $\Psi$  の温度依存性データより、 $T = 500 \sim 750^\circ\text{C}$  の温度域での下限値として  $\Psi = 0.7$ , したがって  $D_p = 1.2$  を用いた。

3. 解析結果

3-1. 平滑部および応力集中部の  $\Delta \epsilon_p$ ,  $\delta_p$  に及ぼすホットスポット条件の影響: ホットスポット条件として、 $T_{max}$ , 板厚, ホットスポット直径を選び、それぞれの  $\Delta \epsilon_p$ ,  $\delta_p$  に及ぼす影響を求めた。結果を図15~18に示す。 $T_{max}$ , 板厚およびホットスポット直径が大きい程  $\Delta \epsilon_p$ ,  $\delta_p$  が増大する。

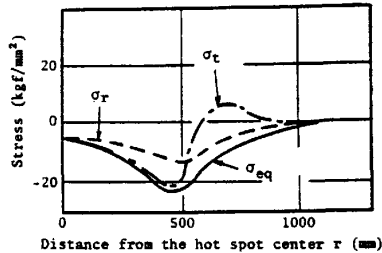


Fig.8 Thermal stress distribution around a hot spot ( Inside surface )

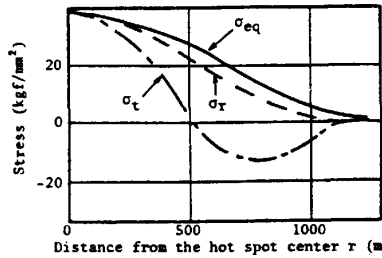


Fig.10 Residual stress distribution around a hot spot after cooled ( Inside surface )

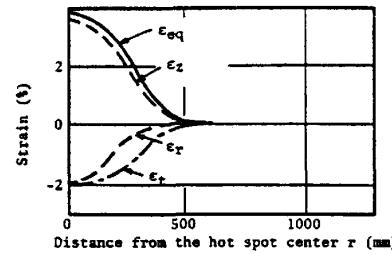


Fig.9 Thermal strain distribution around a hot spot ( Inside surface )

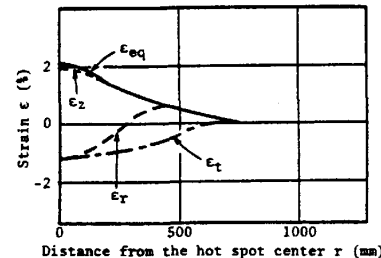


Fig.11 Residual strain distribution around a hot spot after cooled ( Inside surface )

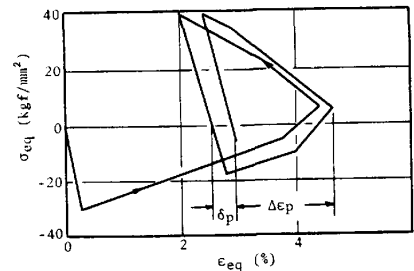


Fig.12 Effective stress versus effective strain relationship during cyclic occurrence of hot spots ( $T_{max} = 700^\circ\text{C}$ )

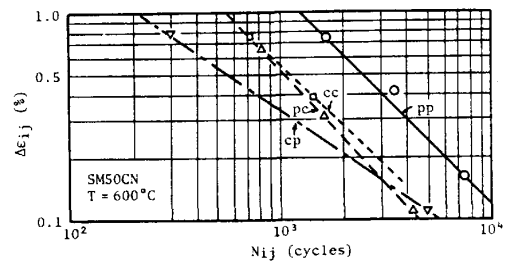


Fig.13  $\Delta \epsilon_{ij} - N_{ij}$  relationship obtained for SM50CN

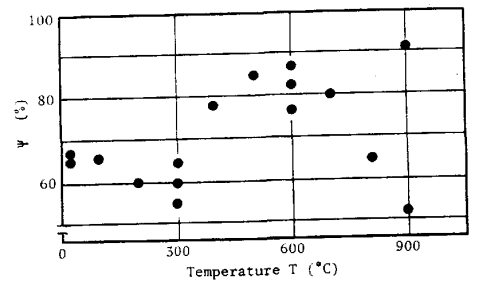


Fig.14 Temperature dependence of  $\Psi$

また、応力集中部の $\Delta\epsilon_p$ 、 $\delta_p$ は平滑部に比較し、それぞれ1.8、2.0倍である。

3-2. 許容ホットスポット発生回数： 図19は応力集中部の炉内側表面がある一定の損傷に達するホットスポットの許容発生回数とホットスポット中心温度 $T_{max}$ との関係を示す。本図より $T_{max}$ が大きいほど寿命が短くなることわかる。

3-3. 許容板厚増大率： 2-2で示したようにホットスポット部の板厚はホットスポットの繰返しに伴ない増大し、 $T_{max}$ が大きいほどその傾向は著しい。一方、ホットスポット部の寿命は $T_{max}$ が大きくなるほど低下する。そこで、ホットスポット部が一定の損傷度に達する許容板厚増大率はホットスポット温度に対して鈍感となるのではないかと考え、許容板厚増大率と $T_{max}$ の関係を損傷度をパラメータとして求めた。その結果を図20に示す。これから次のことが明らかである。

- (1)許容板厚増大率はホットスポット外径Dと $T_{max}$ が変化してもあまり変化しない。
- (2)許容板厚増大率は板厚によって大きく異なり、板厚が大きくなるほど小さくなる傾向にある。

4. 実炉への適用

ホットスポットが発生した鉄皮の余寿命を操業条件との関連で評価する場合、図20によれば $T_{max}$ やDが不明でも板厚増大率がわかれば損傷度 $\alpha$ を知ることができ、Nがわかれば余寿命(=  $N_f - N$ )を知ることが出来ることになる。実炉では $T_{max}$ の把握が困難であることを考えると図20は実用上きわめて有用な知見である。

小倉製鉄所第2高炉の改修に際しては、図20の知見を実炉の経験で修正した結果を用いて余寿命予測を行ない良好な結果を得た。

5. 結 言

上述の結果から、高温構造物の熱疲労問題では強度問題よりも熱変形解析問題の占めるウェイトが大きいと言える。適切な熱疲労破壊のクライテリアの選択とそれを完全に実行可能な熱応力・熱ひずみ解析法の確立が今後我々の目指すべき基本的方向であろう。

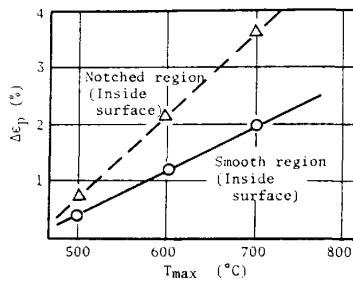


Fig.15 Effect of  $T_{max}$  on  $\Delta\epsilon_p$  (Shell thickness 40mm, Hot spot diameter 1m)

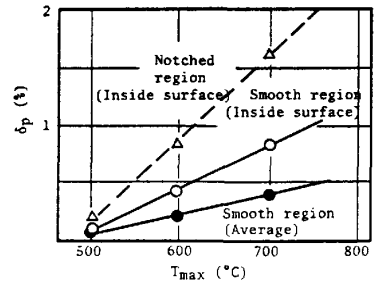


Fig.16 Effect of  $T_{max}$  on  $\delta_p$

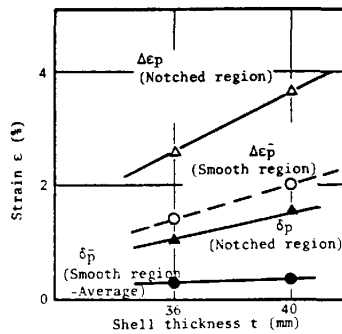


Fig.17 Effect of shell thickness on  $\Delta\epsilon_p$  and  $\delta_p$

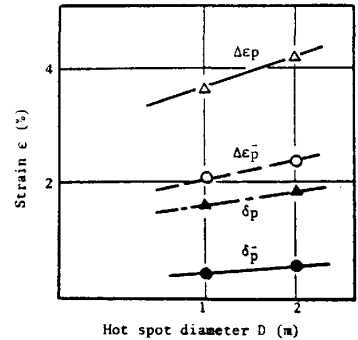


Fig.18 Effect of hot spot diameter on  $\Delta\epsilon_p$  and  $\delta_p$

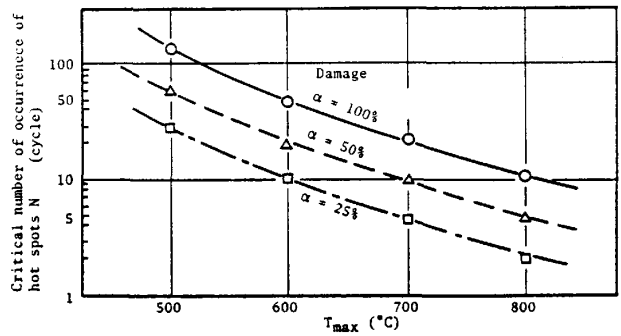


Fig.19 Effect of  $T_{max}$  on the critical number of occurrence of hot spots for the steel shell failure ( $t=40mm$ ,  $D=1m$ ) ( $\alpha=N/N_f$ )

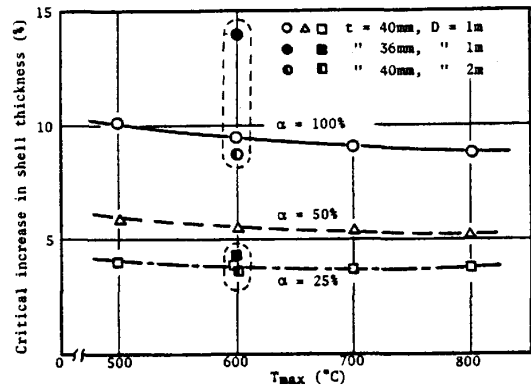


Fig.20 Effect of  $T_{max}$  on the critical increase in shell thickness of smooth region for the steel shell failure ( $\alpha=N/N_f$ )