

技術報告

高炉鉄皮の余寿命予測

森田喜保*・時政勝行*²

Prediction of Remaining Life of the Steel Shell of a Blast Furnace

Yoshiyasu MORITA and Katsuyuki TOKIMASA

Synopsis :

Thermal fatigue life evaluation is conducted for the steel shell of a blast furnace where hot spots have occurred repeatedly. Thermal elasto-plastic FEM analysis is used and, as a method of thermal fatigue life evaluation, the strain-range partitioning creep-fatigue analysis is adopted.

It is proved to be possible to predict the remaining life of the steel shell successfully based on the following results :

(1) It is the center of a hot spot on the inner surface of the steel shell that undergoes the largest cyclic deformation during a cycle of a hot spot.

(2) Thermal fatigue damages, which are accumulated by repetition of hot spots, consist of those resulted from both the plastic strain range and the ratchetting strain.

(3) A higher hot-spot temperature, a thicker steel shell and a larger hot-spot diameter reduce thermal fatigue life of the steel shell.

(4) Total value of thermal fatigue damages at the notched part of the steel shell can be detected by measuring the increase in shell thickness of its smooth part independent of a hot-spot temperature.

1. 緒 言

昭和 56 年 1 月～2 月に行われた住友金属工業(株)小倉製鉄所第 2 高炉(冷却盤高炉)の改修では、健全な鉄皮を再使用する部分更新により経費の節減と工期の短縮が図られたが、内表面の損傷状態が外部から把握できない鉄皮の健全性をいかに評価し、いかなる基準で鉄皮を更新するかが大きな課題であった。

小倉第 2 高炉は火入れ後 1 年目からホットスポットが発生し、吹き止め時点までのホットスポット発生個所は炉腹からシャフト下部の間の半周以上の範囲にわたり、鉄皮表面まで貫通したクラックは 4 個所、さらに UST(超音波探傷試験)で検知された炉内面クラックは 6 個所を数えた。このようなホットスポットの繰返しによるクラックの発生は熱疲労損傷の蓄積によるものと判断されたが、クラック発生個所のホットスポット温度条件が不明のため、クラックの発生するホットスポット回数を正確に予測することが困難であった。したがって、鉄皮更新基準の設定に際しては、鉄皮が過去の使用期間中に経た温度履歴が不明確であるという事実を克服する必要があった。

そこで、筆者らは、まず簡単な高炉鉄皮ホットスポ

ットモデルを設定し、そのモデルの熱疲労寿命解析を行うことにより、鉄皮の余寿命予測の可能性を検討した。その結果、鉄皮板厚の変化を求めれば、ホットスポット条件のいかにかわららず、余寿命予測が可能であることが明らかとなった。

本報はこのような熱疲労寿命余寿命解析結果とその実高炉への適用結果をとりまとめたものである。

2. 解析方法

高温材料の熱疲労寿命推定手法はこれまでに数多く提案されているが、高炉ホットスポットのようにホットスポット温度が材料のクリープ温度域まで上昇する場合には、MANSON らの提案したひずみ範囲分割法(Strain-range partitioning creep-fatigue analysis, 略して SRP 法)が最も信頼性があると考えられる^{1)~3)}。この手法の特徴は、熱疲労問題を変形解析問題と破壊抵抗性の評価問題に分けて取り扱う点であり、MANSON らは、この手法により、材料の破壊抵抗性が温度に鈍感な材料固有の性質であり、従来より報告されている高温熱疲労寿命の温度依存性は、材料に生じる非弾性ひずみが温度条件に敏感なために生じる現象であることを明らかにした。したがって、材料固有の破壊抵抗性をある一つの温

昭和 59 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 60 年 4 月 15 日受付 (Received Apr. 15, 1985)

* 住友金属工業(株)中央技術研究所 工博 (Central Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

** 住友金属工業(株)中央技術研究所 (Central Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-3 Nishinagasu-hondori Amagasaki 660)

度で求めておけば、熱疲労問題は変形解析問題に帰着することになる。

SRP 法による熱疲労寿命解析を厳密に逐行するためにはホットスポット繰返し時の詳細な非定常温度解析とその結果にもとづく非弾性解析を行う必要があるが、ここでは熱弾塑性解析を基本とした簡便法を採用し、非弾性ひずみすなわちクリープひずみの効果は解析に用いる材料パラメータや寿命推定に用いる破壊抵抗性に含ませることにした。

2.1 ホットスポット部の熱弾塑性解析

Fig. 1 に示す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 $20^{\circ}\text{C} \rightarrow T_{max}$ 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。Fig. 1 (a) は鉄皮平滑部に、Fig. 1(b) は鉄皮応力集中部（実炉のコーミング孔部に相当、円状開口を仮定）にそれぞれホットスポット中心がある場合を想定している。使用した熱荷重条件および材料物性値を Table 1, Table 2, Fig. 2 および Fig. 3 に示す。実炉鉄皮には炉内圧や内容物荷重が作用するが、局部的な加熱による鉄皮熱応力と比較して応力の絶対値が十分小さく、ここでは熱応力だけを検討の対象とした。実際にはホットスポット部の鉄皮外面を圧縮空気で冷却し、また炉内側にはモルタルを注入することが多く、代表的な熱的条件として Table 1 に示す値を用いた。

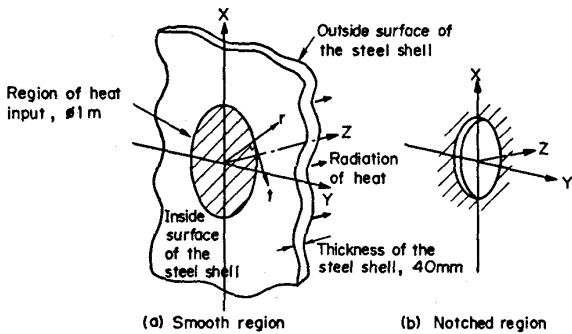


Fig. 1. Hot spot model for life prediction.

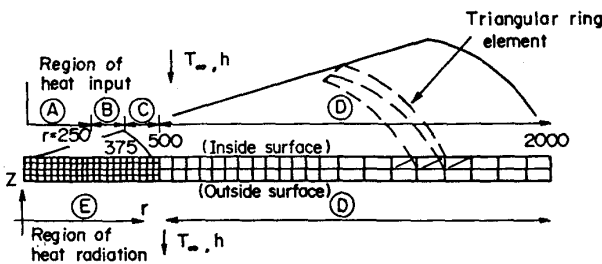


Fig. 2. Finite element model for thermal elasto-plastic analysis. Different values of h and T_{∞} are given at portions A~E as shown in Table 1.

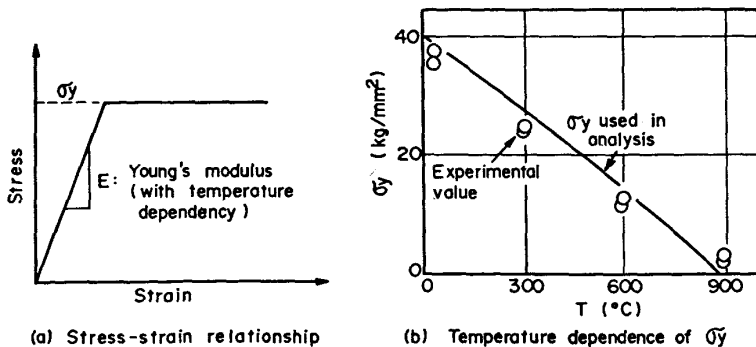


Fig. 3. Yielding properties of the blast furnace shell material, SM50CN.

Fig. 4 はホットスポット外表面中心温度 $T_{max}=700^{\circ}\text{C}$ の場合の温度経時変化解析結果を示す。Fig. 5 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。ただし、内面の温度変化状態については実測データがなく、Fig. 4 の計算結果は内面の温度変化状況に関しては若干の不確かさを有していると考えられる。

Fig. 6~Fig. 9 は Fig. 4 の温度変化に対応する昇温時および冷却時の応力とひずみの分布を示す。また、

Table 1. Heating and cooling conditions ($T_{max}=700^{\circ}\text{C}$). Portions A~E are depicted in Fig. 3.

Portion	Heating				Cooling	
	Heat transfer coefficient	Temperature T_{∞} ($^{\circ}\text{C}$)			Heat transfer coefficient	Temperature
		h (kcal/m ² h $^{\circ}\text{C}$)	0~5 min	5~10 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

Table 2. Physical properties of shell used in the calculation.

Thermal conductivity	(kcal/mh $^{\circ}\text{C}$)	46
Specific heat	(kcal/kg $^{\circ}\text{C}$)	0.11
Specific gravity	(kg/m ³)	7 800
Linear expansion coefficient		0.135×10^{-4}
Poisson's ratio		0.3

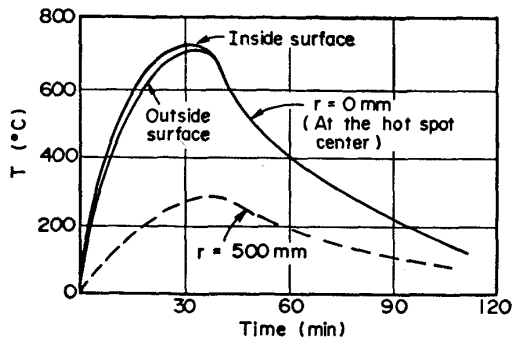


Fig. 4. An example of the analysis of variation of the hot spot temperature with time.

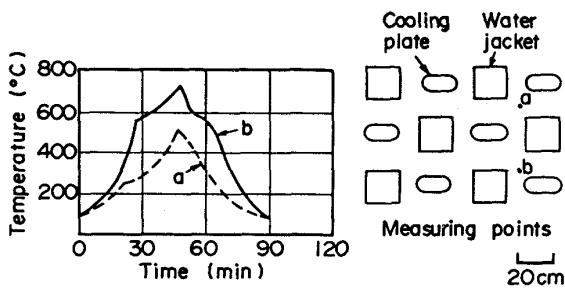


Fig. 5. Variation of the hot spot temperature with time, measured on the blast furnace.

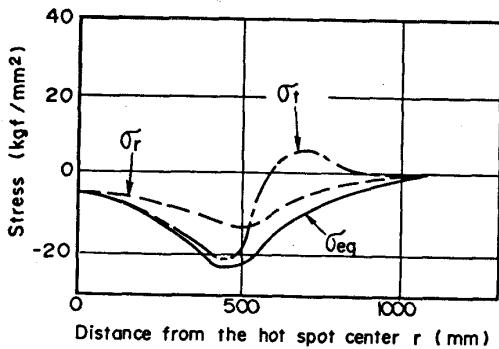


Fig. 6. Thermal stress distribution around a hot spot when the maximum temperature rise is reached (Inside surface).

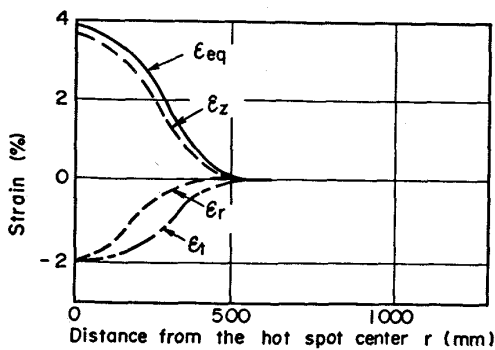


Fig. 7. Thermal strain distribution around a hot spot when the maximum temperature rise is reached (Inside surface).

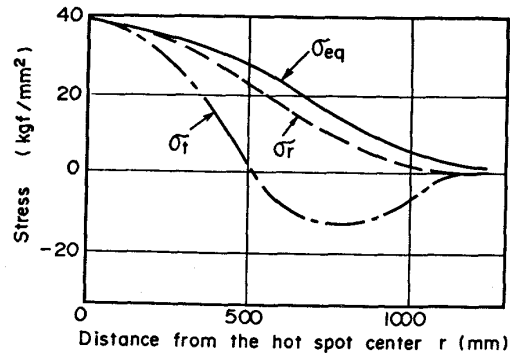


Fig. 8. Residual stress distribution around a hot spot after cooled (Inside surface).

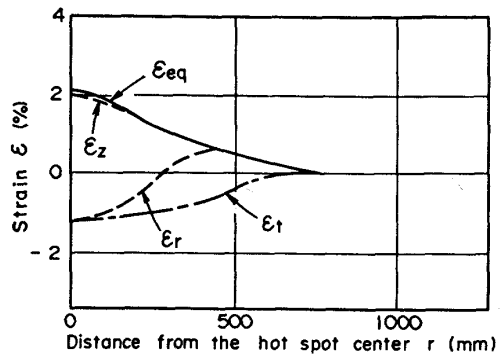


Fig. 9. Residual strain distribution around a hot spot after cooled (Inside surface).

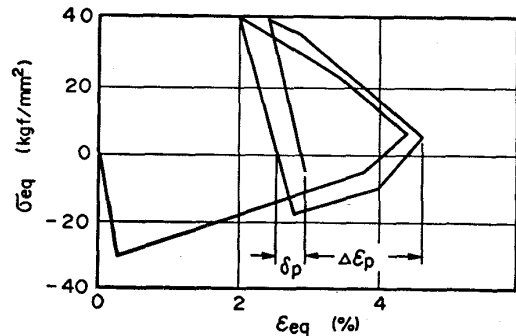


Fig. 10. Effective stress versus effective strain relationship at the hot-spot center on the inside surface during cyclic occurrence of hot spots ($T_{max} = 700^{\circ}\text{C}$).

Fig. 10 はホットスポット中央部での相当応力 σ_{eq} と相当ひずみ ϵ_{eq} の関係を示す。ここで、 σ_{eq} , ϵ_{eq} は次式で表示される量であり、多軸状態にある個所の降伏挙動あるいは変形挙動を単軸状態と対比して記述する場合に使用されている一般的なパラメーターである。

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

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

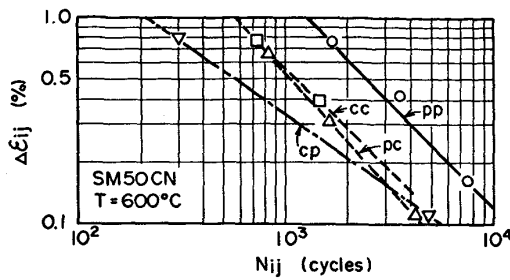


Fig. 11. $\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$ relationships obtained for SM50CN.

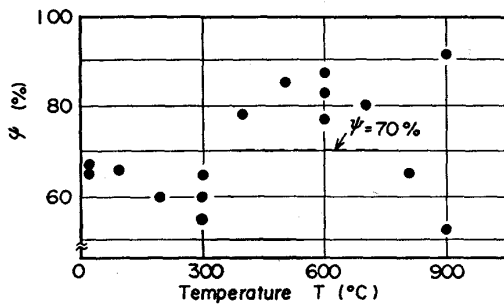


Fig. 12. Temperature dependence of ϕ .

Fig. 10 において σ_{eq} と ϵ_{eq} の関係を図示する場合には、それぞれの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。

Fig. 6~Fig. 10 より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鉄皮材の降伏応力に等しい。
- (3) 板厚はホットスポットの繰返しとともに増加する。
- (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塑性ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_p$ とラチェットひずみ δ_p の二つの変数で記述できる。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 δ_p に等しい。(Fig. 10)

2.2 熱疲労寿命推定式

上述の解析の結果、ホットスポット発生部では、ホットスポット中央部でのホットスポットの発生に伴う高温圧縮塑性変形と温度低下時の引張りの塑性変形という単なる塑性変形の繰返し ($\Delta\epsilon_p$) だけでなく、1サイクルごとに一方向の変形が蓄積 (δ_p) することが明らかとなり、 δ_p を寿命推定時に考慮に入れる必要があることがわかった。

そこで、MANSON and HALFORD⁴⁾ に従い、次式をホットスポット部のクラック発生寿命 N_f の推定式とし

て用いた。

$$\frac{1}{N_p} + \frac{\delta_p}{D_p} = \frac{1}{N_f} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 N_p は $\Delta\epsilon_p$ に対応する寿命、 D_p は引張破断延性であり、 $\Delta\epsilon_p-N_p$ 関係、 D_p はそれぞれ繰返し変形、一方向変形に対する材料の破壊抵抗性である。

2.3 鉄皮材の $\Delta\epsilon_p-N_p$ 関係および D_p 値

温度 600°C において4種類の試験 (PP, PC, CP および CC 試験) を実施し、実験結果を SRP 法で解析することによつて定めた鉄皮材 SM50CN の $\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$, $\Delta\epsilon_{pc}-N_{pc}$, $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$ および $\Delta\epsilon_{cc}-N_{cc}$ 関係を Fig. 11 に示す⁵⁾。Fig. 11 から明らかのように、ひずみの大きい領域 (>0.2%) では、 $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$ 関係が下限寿命を与える。本研究では、2.1 で行つ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、 $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$ 関係を式(3)の寿命推定に用いる $\Delta\epsilon_p-N_p$ 関係として採用した。

$$\Delta\epsilon_p = 49.6 N_p^{-0.721} \dots\dots\dots (4)$$

D_p 値については Fig. 12 に示す引張破断絞り ϕ 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 $\phi=70\%$ 、すなわち $D_p=120\%$ を用いた。実際に生じるラチェット変形にはクリープ変形も含まれており、一方向変形に対する破壊抵抗性としてはクリープ破断延性も考慮する必要があるが、データの収集に時間がかかることやJISにもとづく高温引張試験速度がかなり遅く、600°C以上の温度では D_p 値にもクリープの影響が反映されていると判断し、クリープ破断延性は用いなかつた。

3. 解析結果

3.1 平滑部および応力集中部の $\Delta\epsilon_p$, δ_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} 、鉄皮板厚、ホットスポット直径を選び、それぞれの $\Delta\epsilon_p$, δ_p に及ぼす影響を解析した。

Fig. 13 および Fig. 14 は平滑部と応力集中部それぞれについて $\Delta\epsilon_p$ および δ_p に及ぼすホットスポット温度 T_{max} の影響を図示したものである。これから、 T_{max} が大となるほど $\Delta\epsilon_p$ および δ_p が直線的に増大することがわかる。また、応力集中部の $\Delta\epsilon_p$, δ_p は平滑部と比較し、それぞれ1.8倍、2.0倍である。

Fig. 15 は鉄皮板厚を変化させた時の $\Delta\epsilon_p$, δ_p を求めたものである。板厚が増大すると $\Delta\epsilon_p$, δ_p が増大することがわかる。

Fig. 16 はホットスポット直径 D を変化させた場合

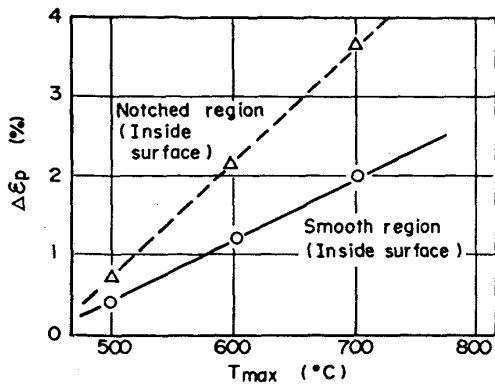


Fig. 13. Effect of T_{max} on $\Delta\epsilon_p$ (Shell thickness 40 mm, hot spot diameter 1 m).

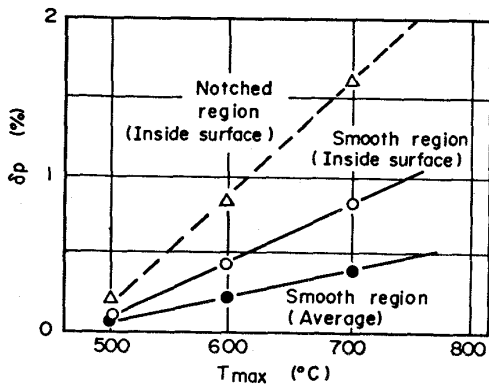


Fig. 14. Effect of T_{max} on δ_p .

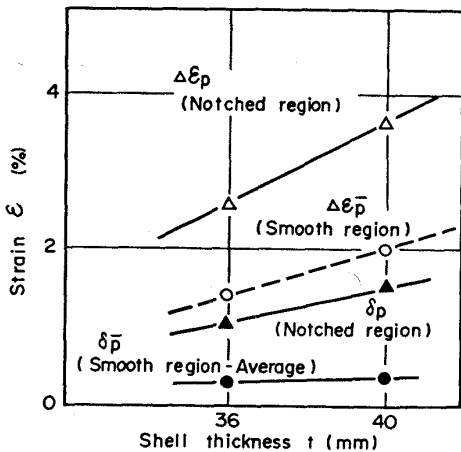


Fig. 15. Effect of shell thickness on $\Delta\epsilon_p$ and δ_p .

の結果であり、直径が増大すると $\Delta\epsilon_p$, δ_p は増大するが、板厚やホットスポット温度の影響に比べるとその影響は小さいことがわかる。

3.2 許容ホットスポット発生回数

Fig. 17 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} との関係を板厚 40 mm, ホットスポット直径 1 m の場合について示したものである。損傷度 α は N/N_f で表示されている。これから、 T_{max} が

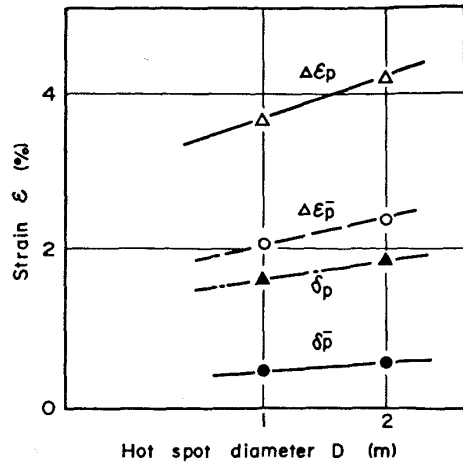


Fig. 16. Effect of hot spot diameter on $\Delta\epsilon_p$ and δ_p .

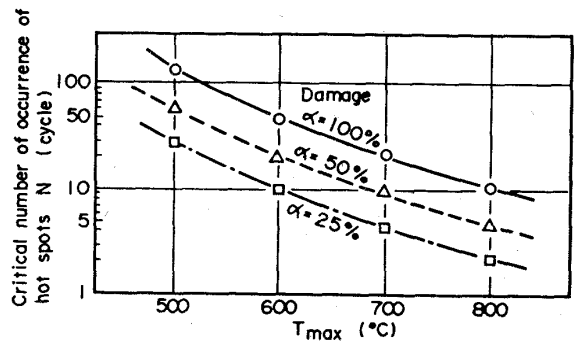


Fig. 17. Effect of T_{max} on the critical number of occurrence of hot spots for the steel shell failure ($t=40$ mm, $D=1$ m) ($\alpha=N/N_f$).

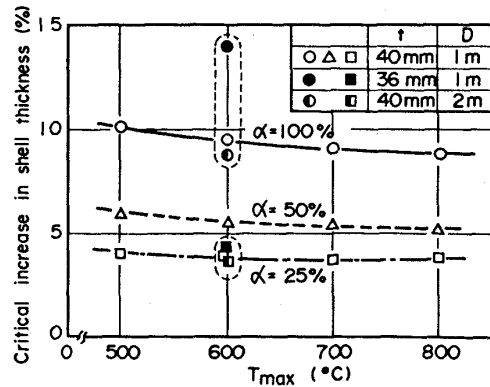


Fig. 18. Effect of T_{max} on the critical increase in shell thickness of smooth region for the steel shell failure ($\alpha=N/N_f$).

大となるほど寿命は短くなることがわかる。

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い増大し、 T_{max} が大となる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} が大となるほど低下する。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 α をパラメータとして求めた。

Fig. 18 は、応力集中部の炉内側表面がある一定の損傷度に達したときの平滑部の板厚増大率（許容板厚増大率）と T_{max} の関係を示す。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、Fig. 18 によれば、ホットスポット条件 (T_{max} や D) が不明でも、ホットスポット条件が寿命の全期間にわたって変動しないと仮定すると、実炉鉄皮の板厚増大率がわかれば損傷度 α を知ることができる。さらに、それまでのホットスポット発生回数がわかれば余寿命 ($=N/\alpha-N$) を知ることができることになる。実炉においては T_{max} の把握が困難であることを考慮すると、Fig. 18 は実用上きわめて有用な知見であると言える。

以下、小倉製鉄所第2高炉への適用結果について述べる。

4.1 小倉第2高炉改修前における鉄皮板厚増大率とホットスポット発生回数

Fig. 19 は、小倉2号高炉（鉄皮板厚 $t=40$ mm）においてホットスポット発生部の板厚増大率とホットスポット発生回数の関係を改修前に求めた結果である。図において、●印は貫通クラック発生部位を示し、実線は Fig. 18 の損傷度 $\alpha=100\%$ となる板厚増大率であり、一点鎖線は損傷度 $\alpha=25\%$ となる板厚増大率を示す。

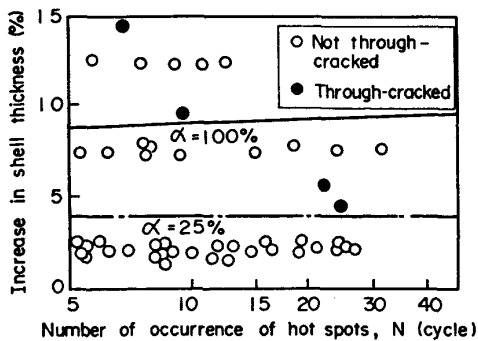


Fig. 19. Relationship between the increase in shell thickness and the number of occurrence of hot spots at through-cracked portions and not through-cracked ones, measured before the replacement.

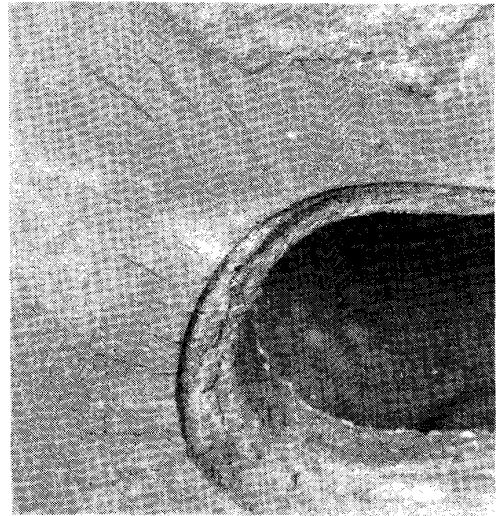


Photo. 1. An example of cracks found on the inner surface of the replaced steel shell.

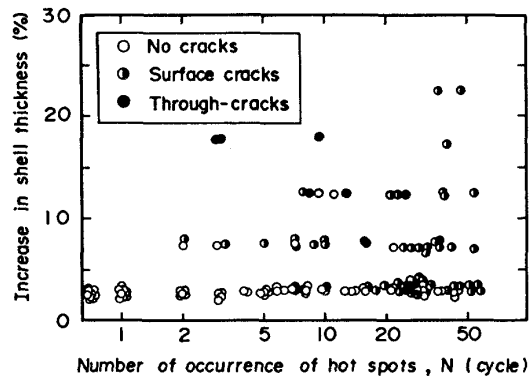


Fig. 20. Relationship between the increase in shell thickness and the number of occurrence of hot spots obtained based on the results of detailed examination of the inside surface of the replaced steel shell.

実炉で見えられた貫通クラックは板厚増大率 4% 以上またはホットスポット発生回数 7 回以上の部位で生じている。

これから、本解析結果は、貫通クラックの数が少ないけれども、実炉データの平均傾向を予測しており、ホットスポット条件 (T_{max} , D) の明確でない小倉第2号高炉ホットスポット部の更新の判断基準の一助となり得ることがわかる。

4.2 小倉第2高炉改修部位の板厚増大率、ホットスポット発生回数および内面クラック発生状況

Photo. 1 は鉄皮改修部位の内表面に認められたクラックの典型例を示す。クラックの大きさ、形状から次のような4種類に分類できると判断された。

- (1) コーミング応力集中部から放射線状に炉内面に広がったクラック（深さ数 mm, 長さ数 100 mm）
- (2) コーミング間のクラック（深さ数 mm 程度）

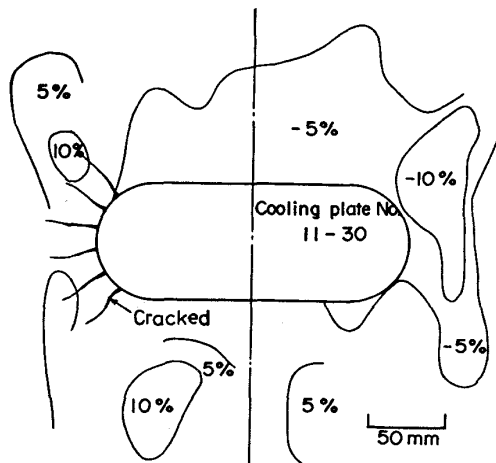


Fig. 21. Change in shell thickness around a cooling plate measured after replacement.

- (3) コーミング間の亀甲状クラック
 (4) 貫通クラック (6カ所)

Fig. 20 は、鉄皮内表面状態を上述(1)~(3)の表面クラック、(4)の貫通クラックおよび健全部に分類して、各部位の板厚増大率とホットスポット発生回数との関係をまとめたものである。また、Fig. 21 はコーミング孔周辺の板厚変化の分布を UST により測定した結果を示す。Fig. 21 から明らかなように、クラック発生部分の板厚の増大率は小さくてもその近傍に 8% 以上の板厚増大率を示す部分が存在することがわかる。Fig. 20 においてホットスポット発生回数が 0 でも板厚に変化が認められるのは板厚測定箇所から離れたところで発生したホットスポットの影響を受けたものと考えられる。Fig. 20 に示す結果はクラック発生場所の板厚増大率とホットスポット回数の関係で示されているので、今回の解析結果と対比するのは厳密には正しくない。むしろ、クラック発生部を中心とする円領域を考え、その領域での最大板厚増大率と最多ホットスポット回数との関係で示した方がよいと思われる。

Fig. 22 は半径 $R=1\text{m}$ および $R=2\text{m}$ の円領域を考えたときの結果である。簡単のため、鉄皮板厚増大率の領域を 0~5%、5~10%、10~15%、15~20% および 20~25% に区分し、調査した全 59 箇所のクラック発生部位に対する結果が一つのデータ点としてプロットされている。この結果から、変形領域から 2m 以内に内表面クラックの発生を想定するときはその変形領域の許容板厚増大率は 10% であることがわかる。この結果は、本解析結果(許容板厚増大率 8%)との比較から、実炉でのホットスポット直径として 4m を選べば、本解析結果がそのまま鉄皮更新基準として使用できることを示唆している。

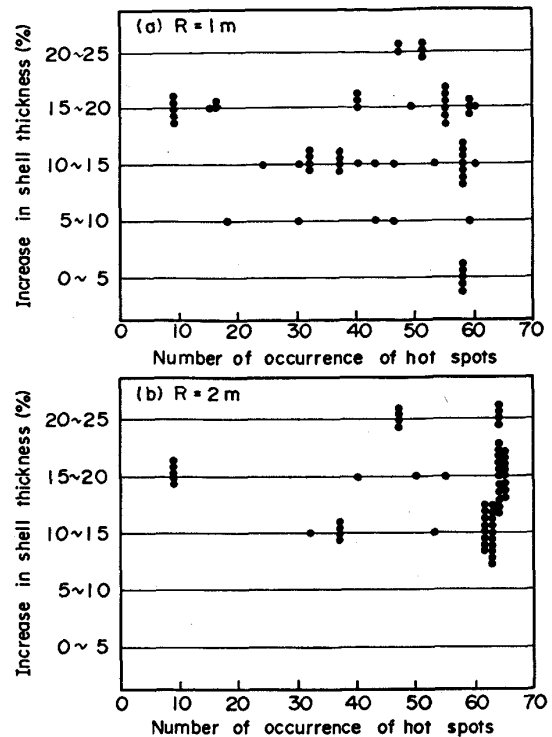


Fig. 22. Relationship between the maximum increase in shell thickness and the maximum number of occurrence of hot spots in circular regions of the radius R of which centers are cracked portions.

5. 結 言

鉄鋼の基幹設備である高炉の鉄皮ホットスポット部の余寿命予測問題に対し、高温材料の高温クリープ疲労寿命推定法として最近有望視されつつあるひずみ範囲分割法の概念を適用し、弾塑性解析を基本とした簡易寿命推定を実施した。その結果、厳密な取扱いに比べ本研究の手法には改善すべき仮定がいくつか含まれているものの、実際の高炉鉄皮の余寿命を実用上十分な精度で予測し得ることがわかった。

本研究で明らかとなった事柄をまとめると次のとおりである。

(1) ホットスポット発生部で最も大きいひずみ履歴を受け熱疲労が問題となるのはホットスポット中心炉内側であり、ホットスポットの繰返しによる鉄皮の損傷は塑性ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_p$ とラチェットひずみ δ_p によるものである。

(2) $\Delta\epsilon_p$ と δ_p を考慮して、かつ $\Delta\epsilon_p$ をすべて $\Delta\epsilon_{cp}$ と仮定して求めた寿命は、ホットスポット温度が高くなるほど、また板厚が大となるほど短くなる。また、ホットスポット直径も大となるほど短くなるが、その程度は温度や板厚の影響に比べて小さい。

(3) 鉄皮開口部のホットスポットの繰返しによる損傷度が一定の値に達するときの平滑部の板厚増大率は、ホットスポット温度によらずほぼ一定となる。鉄皮開口部炉内表面にクラックが発生する許容板厚増大率は、板厚の影響を受け、板厚 40 mm のとき 8%、板厚 36 mm のとき 14% であり、またホットスポット直径が増大するとわずかではあるが減少する傾向にある。

(4) (3) で得られた知見を小倉製鉄所第 2 高炉の短期部分改修に適用し、更新すべき部位を十分な精度で予測できることを確認した。また、改修後の鉄皮内表面調査結果から、板厚 40 mm の場合、実炉ホットスポット直径を 4 m と考えれば、(3) の知見をそのまま鉄皮更新基準として使用できると判断された。

記号

D : ホットスポット直径 (m)
 D_p : $-100 \ln(1-\phi/100)$: δ_p の蓄積により破壊が生ずるときの限界ひずみ量 (%)
 E : ヤング率 (kgf/mm²)
 h : 熱伝達係数 (kcal/m²h°C)
 N : ホットスポット発生回数 (サイクル)
 N_f : ホットスポットによるクラック発生寿命 (サイクル)
 N_p : $\Delta\epsilon_p$ に対応する疲労寿命 (サイクル)
 $N_{pp}, N_{pc}, N_{cp}, N_{cc}$: $\Delta\epsilon_{pp}, \Delta\epsilon_{pc}, \Delta\epsilon_{cp}, \Delta\epsilon_{cc}$ に対応する疲労寿命 (サイクル)
 R : クラック発生部を中心とする円領域の半径 (m)
 t : 鉄皮板厚 (mm)
 T : 鉄皮温度 (°C)
 T_{max} : ホットスポット中心外表面温度 (°C)
 T_{∞} : 鉄皮周辺外気温度 (°C)
 α : N/N_f : 損傷度
 δ_p : 1 サイクルに生ずる塑性ラチェット変形 (%)

$\bar{\delta}_p$: δ_p の板厚方向平均値 (%)
 ϵ_{eq} : 相当ひずみ (%)
 $\epsilon_r, \epsilon_t, \epsilon_z$: 半径方向, 円周方向, 板厚方向ひずみ (%)
 $\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$ 関係: $\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}, \Delta\epsilon_{pc}-N_{pc}, \Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}, \Delta\epsilon_{cc}-N_{cc}$ 関係の略称
 $\Delta\epsilon_p$: 塑性ひずみ範囲 (%)
 $\Delta\bar{\epsilon}_p$: $\Delta\epsilon_p$ の板厚方向平均値 (%)
 $\Delta\epsilon_{pp}$: 引張り, 圧縮ともクリープ変形を含まない塑性変形からなる繰返し変形 (%)
 $\Delta\epsilon_{pc}$: 引張側塑性変形, 圧縮側クリープ変形からなる繰返し変形 (%)
 $\Delta\epsilon_{cp}$: 引張側クリープ変形, 圧縮側塑性変形からなる繰返し変形 (%)
 $\Delta\epsilon_{cc}$: 引張, 圧縮ともクリープ変形からなる繰返し変形 (%)
 σ_{eq} : 相当応力 (kgf/mm²)
 $\sigma_r, \sigma_t, \sigma_z$: 半径方向, 円周方向, 板厚方向応力 (kgf/mm²)
 σ_y : 降伏強度 (kgf/mm²)
 ϕ : 引張試験により得られる破断紋り

文 献

- 1) S. S. MANSON, G. R. HALFORD and M. H. HIRSCHBERG: Design for Elevated Temperature Environment (1971), p. 12 [ASME]
- 2) S. S. MANSON: Fatigue at Elevated Temperatures, ASTM STP 520 (1973), p. 744 [ASTM]
- 3) G. R. HALFORD and S. S. MANSON: Thermal Fatigue of Materials and Components, ASTM STP 612 (1975), p. 239 [ASTM]
- 4) S. S. MANSON and G. R. HALFORD: 1976 ASME-MPC Symposium on Creep-Fatigue Interaction, MPC-3 (1976), p. 299 [ASME]
- 5) K. HIRAKAWA and K. TOKIMASA: The Sumitomo Search No. 26 (1981), p. 118