

技 術 論 文

CPC 特殊鋼ロールの耐熱衝撃特性についての評価 Evaluation on Thermal Shock Resistance Characteristics of CPC Special Steel Roll



技術開発センター係長

園田 晃大

Akio Sonoda

技術開発センター室長

博士(工学) 姜 孝京

Hyo-Gyoung Kang

技術開発センター主任

木村 健治

Kenji Kimura

技術開発センター主任

博士(工学) 牟用煥

Yong-Hwan Mo

要 旨

当社は新しい CPC プロセスを適用し、棒鋼・線材の熱間粗圧延に適用できる高い耐摩耗性と高靱性を兼備した CPC 特殊鋼ロールを開発した。熱間圧延ロールでは熱衝撃によるヒートクラックが問題となる場合があるが、本研究では、熱衝撃によるヒートクラックの発生条件を切欠き材の引張試験によって評価する方法を提案し、開発材と既存のハイス材とを比較して評価した。材料に発生する熱応力と応力勾配を FEM によって解析し、解析結果と、切欠き材が引張応力を受けた際に発生する最大応力とを応力勾配で対応させた。これにより、材料のヒートクラックの発生条件に関して定量的な評価を行うことができた。また、その妥当性についても確認を行った。その結果、開発材は既存ハイス材に比べ高い耐熱衝撃特性を持つことを実証した。

Synopsis:

FUJICO has developed the special steel work roll with high wear resistance and high toughness for the roughing mill of steel bar and wire rod by applying the new CPC process. When using as hot rolling rolls, there is a problem of heat crack initiation by thermal shock. In this paper, we have proposed an evaluation method for the initiation conditions of heat crack under thermal shock by using the tensile test of a notched specimen. The developed special steel and conventional high-speed steel were used as test materials. The thermal stress and stress gradient occurred in each material were analyzed by the finite element method (FEM). The maximum stress when tensile stress was applied to the material with a notch was compared to the stress gradient of thermal stress. As a result, the quantitative evaluation in regard to the initiation conditions of a heat crack for materials was possible, and also the verification was confirmed. As the result, it was confirmed that the thermal shock resistance of the developed special steel was higher than that of the conventional high-speed steel.

1. 緒言

棒鋼、線材の熱間圧延ロールにおいて、耐摩耗性に優れた当社の CPC (Continuous Pouring process for Cladding) ハイスロールは国内外で広く適用されている。圧延ロールのような大きな熱負荷が加わる使用環境下では、ロール表面には熱衝撃によるヒートクラックの発生と成長、微小欠け落ちに起因した肌荒れの発生が起り、その結果ロール改削量の増加と圧延量の制限が必要となってしまう場合がある。

熱衝撃とは、物体が急激な加熱または冷却をうけることによって衝撃的な熱応力を受ける現象をいう。熱衝撃では温度分布に大きな勾配が生じ、部材の内部自体でひずみが拘束されているため大きな熱応力と内部方向への応力勾配が局所的に生じる。高温で使用される機械部品やダイカスト用金型などにも、熱衝撃により発生するヒートクラックの問題がある^{2)~4)}。

試験片を用いた様々なヒートクラック試験によりヒートクラックの発生条件の評価が行われている⁵⁾⁶⁾が、

試験片では実際の使用形状や熱応力の応力分布を再現することが難しく、耐ヒートクラック性の評価が困難であった。

そこで、本研究では熱衝撃時に発生する熱応力の FEM (有限要素法: Finite Element Method) 解析と、切欠き材料の引張試験を行い、得られた結果を対応させ、ヒートクラックの発生抵抗についての評価を行った。評価する材料には、当社の既存ハイス材と開発材である高じん性特殊鋼材の 2 種類を用いた。

2. 熱衝撃時に材料に負荷される応力

2.1 熱衝撃試験

熱衝撃によって発生する熱応力を解析するために、下記の方法で行った。1)浸漬による熱衝撃試験、2)結果 1)を用いた FEM による熱伝達係数の逆解析、3)FEM による熱応力解析。

2.1.1 材料および実験方法

供試材には、既存材と開発材 (高じん性材) の 2 種類のハイス材を用いた (以下、それぞれを A 材、B 材と記す)。供試材を $\phi 90\text{mm}$ の円筒金型にそれぞれ鋳造し、Fig.1 のような $\phi 9\text{mm}$ の試験片形状に加工した。また、温度測定のための試験片には熱電対を差し込むための穴 ($\phi 0.5\text{mm}$ 、深さ 25mm) を試験片の中心部まで加工し、焼入れ、焼戻しの熱処理を行った。Table 1 にそれぞれの材料の合金成分と機械的性質を示す。

試験は、予め加熱した電気炉に試験片を入れた後 5 分間保持させた後水中に浸漬させる熱衝撃を与えた。加熱温度は 400°C から 800°C まで 100°C 刻みで行った。

また、熱伝達係数逆解析のための試験片中心部の温度測定は、同様の方法で試験片中心部の温度が 600°C になった時点で水中に浸漬させて行った。

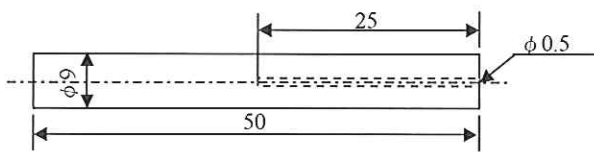


Fig.1 Configuration of specimen

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of test materials

Material	Composition	HV	σ_B
A	C-7.5%V-others	769	764
B	C-6%V-others	539	836

HV : Vickers Hardness(kgf/mm²)

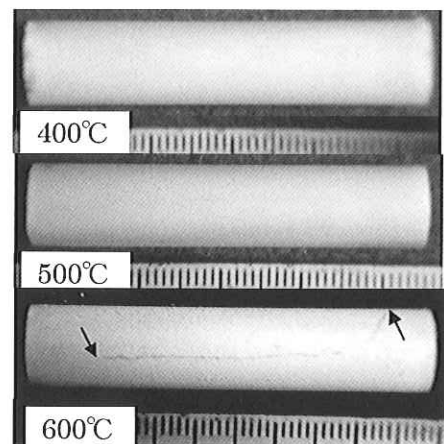
σ_B : Ultimate Tensile Strength(MPa)

2.1.2 試験結果

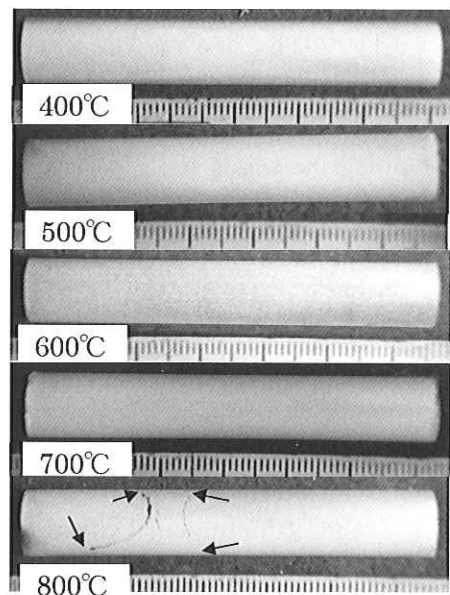
(1) ヒートクラックの発生

熱衝撃試験後の試験片におけるヒートクラックの観察結果を Fig.2 に示す。A 材では加熱温度が 400°C および 500°C ではヒートクラックは発生しなかったが、 600°C でヒートクラックが観察された。一方、高じん性材の B 材では 400°C ~ 700°C まではヒートクラックは発生せず、 800°C でヒートクラックが観察され、A 材よりも良好な結果であった。

クラックの発生状態を詳細に観察すると、試験片の加工時に生じた放電痕から発生していた。Fig.3 が放電痕とクラックである。放電痕の形状から藤田ら⁸⁾の方法を用いて応力集中係数を算出すると、約 1.7 であった。



(a) Material A (after test at 400°C ~ 600°C)



(b) Material B (after test at 400°C ~ 800°C)

Fig. 2 Heat cracks after thermal shock test :(arrow shows crack tip)

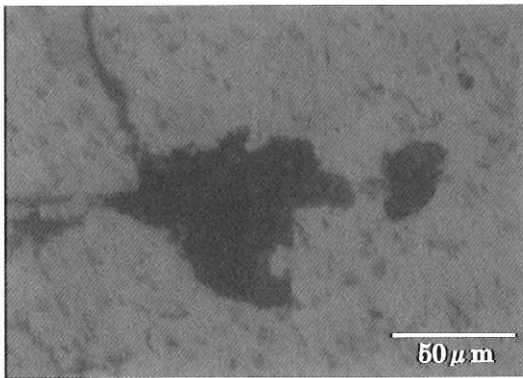


Fig. 3 Discharged pit of material B before test)

(2) 試験片の温度変化

試験片を水中に浸漬時したとき試験片中心部の温度変化を測定した結果を Fig.4 に示す。冷却開始から 2 秒ほどの間に試験片は 150℃付近まで急速に冷却され、その後はゆるやかに冷却されていることがわかる。

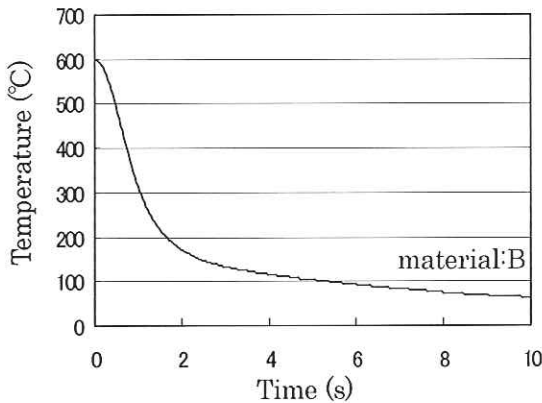


Fig.4 Temperature change of specimen during thermal shock test

2. 2. 2 熱伝達係数の逆解析

本研究では、熱伝達係数を求めるために、熱衝撃試験における試験片の温度変化を FEM 解析結果と対応させた。熱伝達係数 h を 4000~16000(W/m² · K) に変化させ、モデルを 600℃から水温 (25℃) まで冷却させたとき試験片中心部における温度変化の解析結果を Fig.5 に示す。Fig.5 から、熱衝撃試験と最もよく一致するの熱伝達係数 h が 14000(W/m² · K) のときであることがわかる。

ここで、FEM 解析結果の一例として、Fig.6 に h が 14000(W/m² · K) のとき、冷却から 0.2 秒後のコンタ一図を示す。

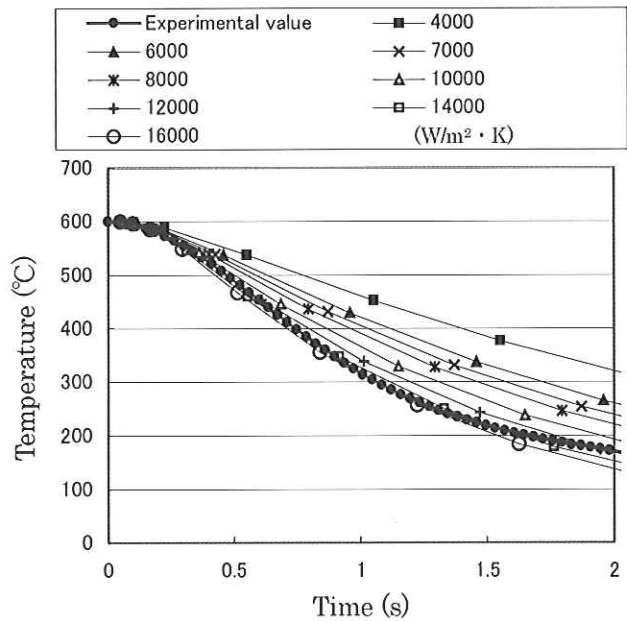


Fig.5 Temperature change of specimen during thermal shock test

2. 2 FEM 解析

2. 2. 1 解析方法

FEM 解析で用いた材料の機械的性質を Table 2 に示す。解析は汎用有限要素法プログラム(ANSYS Ver.10)を用いて行った。また、試験片は 3 次元ソリッド要素によりモデル化 (1/8 モデル) した。

Table 2 Mechanical properties and physical properties used for FEM analysis

material	E	ν	α	c	λ	r
A	225	0.291	11.3	448	21.4	7620
B	235	0.269	11.3	450	26.6	7590

E : Young's Modulus(GPa)

ν : Poisson's ratio

α : Coefficient of expansion(10⁻⁶/K)

c : Specific heat(J/kg · K)

λ : Thermal conductivity(W/m · K), r : Density(kg/m³)

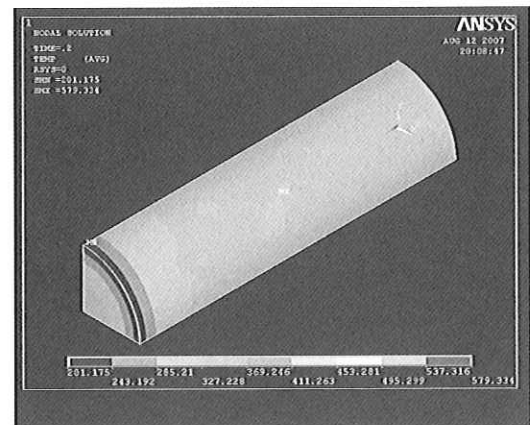
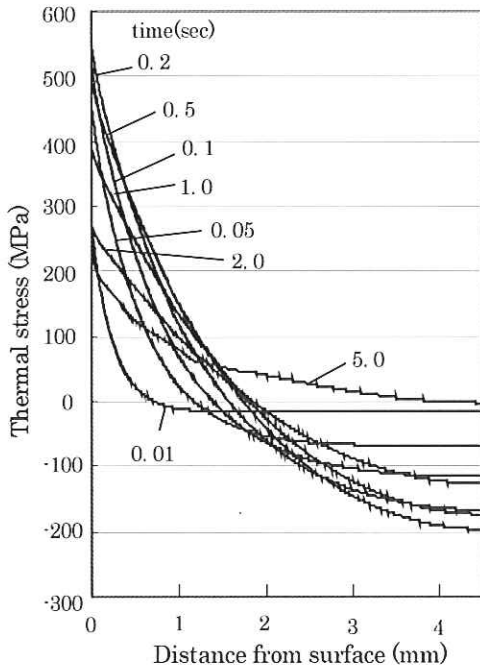


Fig.6 FEM analytical result of specimen temperature: (h :14000 (W/m² · K) , Time:0.2s)

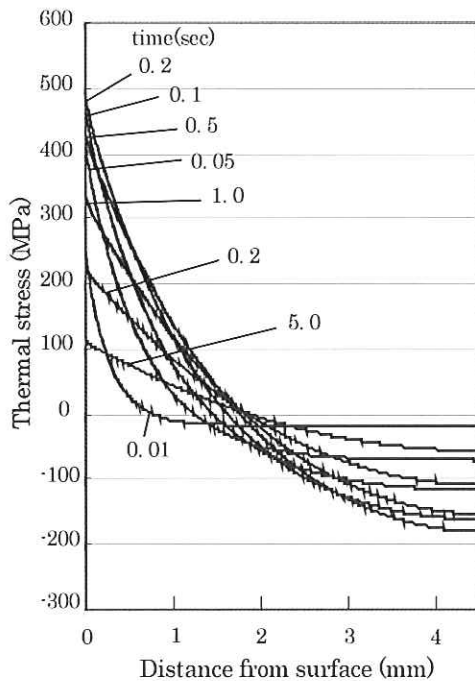
2. 2. 3 熱応力解析

熱伝達係数 h が 14000(W/m² · K) の場合、600℃からの冷却で試験片に発生する熱応力の FEM 解析を A

材およびB材について行った。試験片表面から中心部までの距離と熱応力との関係について、冷却時間ごとに表したものが Fig.7 である。熱応力はいずれの時間においても試験片表面で最大となるが、冷却から 0.2 秒後に最も大きな熱応力が発生している。なお、Fig.7 に示す熱応力は円周方向の第一主応力であるが、軸方向応力もほぼ同じ大きさであった。



a) Material A



b) Material B

Fig.7 FEM analytical result of thermal stress

試験片は浸漬された時に、表面は瞬時に冷却され収縮するが、表面の下層は収縮されないため、表面の熱収縮が抑制され試験片表面には引張応力が発生する。表面と表面下層の温度勾配があるため、同時に内部方向へ応力勾配が生じる。温度勾配が大きいと試験片表面の引張応力も大きくなるが、時間の経過とともに表面層から内部への熱伝達が起こり、温度勾配も小さくなるため引張応力も小さくなる。Fig.8 はそれぞれの冷却時間における試験片表面に発生する熱応力の応力勾配と最大応力との関係を表したものである。

ここで、試験片に発生した応力勾配 χ は $\chi = 1 / \sigma_{\max} (d\sigma/dx)$ で定義した。また、応力勾配 χ を次章で述べる切欠き材の引張における切欠き半径 ρ ($1/\rho$ は応力勾配に対応する) を用いて $\chi = 2/\rho$ で近似した⁹⁾。

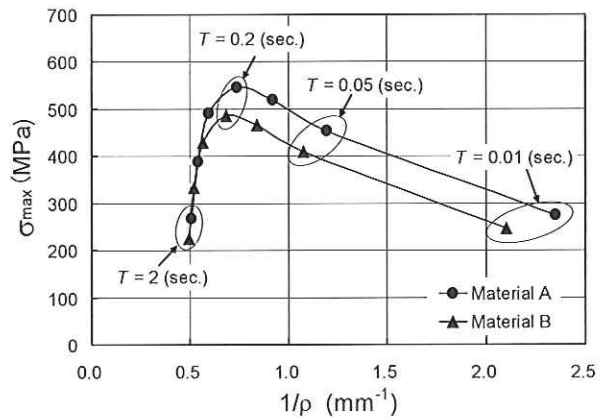


Fig.8 Relationship between σ_{\max} and $1/\rho$

3. 切欠き材の強度

3.1 試験方法

供試材には前章と同じ A、B 材を用いた。Fig.9 に引張試験に用いた試験片形状を示す。切欠き深さ、切欠き底の試験片直径および平行部の試験片直径を一定にし、切欠き半径 ρ のみを変化させた。

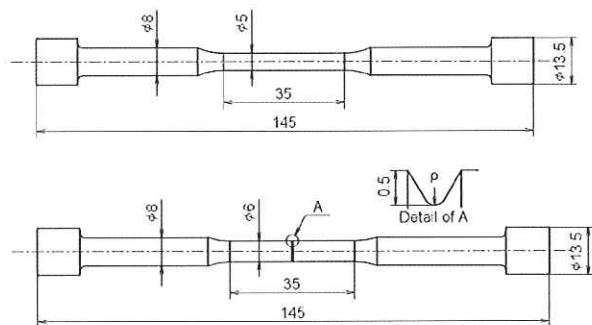


Fig.9 Configuration of specimen

3.2 試験結果

Fig.10 は切欠き材の引張試験における最大応力 σ_{max} と切欠き半径の逆数 $1/\rho$ で整理したものである¹⁰⁾。いずれの領域でもA材よりもB材の方が高い最大応力を示している。

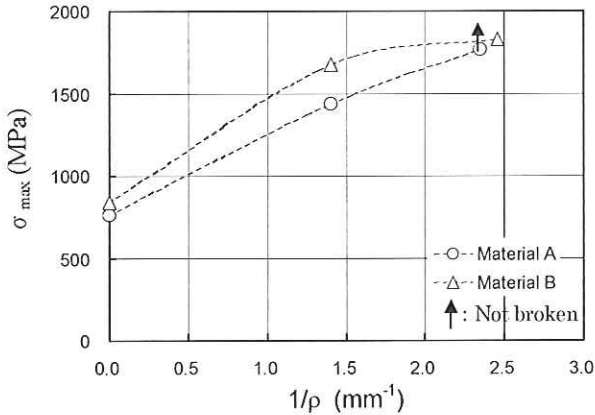


Fig.10 Relationship between σ_{max} and $1/\rho$

4. ヒートクラック発生条件の考察

4.1 ヒートクラック発生条件の定量的予測

A材では600°Cから冷却の熱衝撃試験において、B材では800°Cからにおいてヒートクラックが発生した。そこで、Fig.11にA材では600°Cの試験条件、B材では800°Cの試験条件において、FEM解析により得られた熱応力にヒートクラック部に観察された放電痕による応力集中係数1.7を考慮した $1/\rho$ と σ_{max} (以下 σ_c と記す) との関係、および切欠き材の引張試験から得られた $1/\rho$ と σ_{max} (以下 σ_e と記す) との関係をまとめて示す。

ヒートクラックが発生するとき、 $\sigma_c > \sigma_e$ なる領域が存在し、これら2つの曲線が交わる点で破断が起きるものと予測される。Fig.11においても $\sigma_{cA} > \sigma_{eA}$ および $\sigma_{cB} > \sigma_{eB}$ となる領域が確認され、ヒートクラックが発生すると予測される。

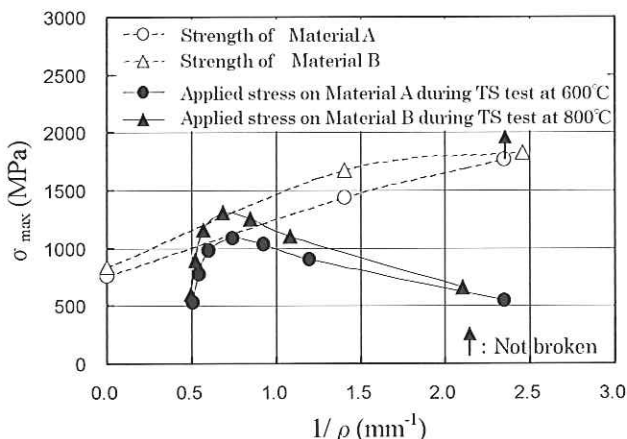


Fig.11 Relationship between σ_{max} and $1/\rho$

また、材料の表層が熱衝撃により破壊されヒートクラックが発生するとき、材料表層の温度は常温ではない。そこで、どのくらいの温度での切欠き材の引張試験が適切か、という問題がある。0.2秒後で熱衝撃により発生する熱応力が最も高く破壊が起こると考えられるが、FEM解析からこのときの試験片最表層の温度は約300°Cであった。

ここで、A材、B材ともに300°C付近までの機械的特性は常温とほとんど変化がない(硬さ変化がない)ため、本研究では切欠き材の引張試験を常温で行った。

4.2 ヒートクラック発生の予測の確認

熱伝達係数が同じ条件のとき、熱衝撃試験温度が変わっても、最大の熱応力が発生する冷却からの時間は同じと考えられる¹¹⁾。そこで、冷却から0.2秒後における温度ごとの最大熱応力をFig.12に示す。FEM解析から0.2秒後における $1/\rho_{0.2s}$ は、 $1/\rho_{A,0.2s}=0.74$ 、 $1/\rho_{B,0.2s}=0.68$ と求められた。そこで、 $1/\rho_{0.2s}$ における切欠き材の引張試験の最大応力 σ_e をA材とB材についてFig.11から求めてFig.12に示す。Fig.12により、ヒートクラックの発生しない最大の熱衝撃試験温度 T_{max} は、材料Aでは595°C、材料Bでは780°Cであることがわかり熱衝撃試験の結果とよく対応した。

A材よりも高靱性材であるB材の方が、より高い温度からの熱衝撃に耐えるということを確認した。

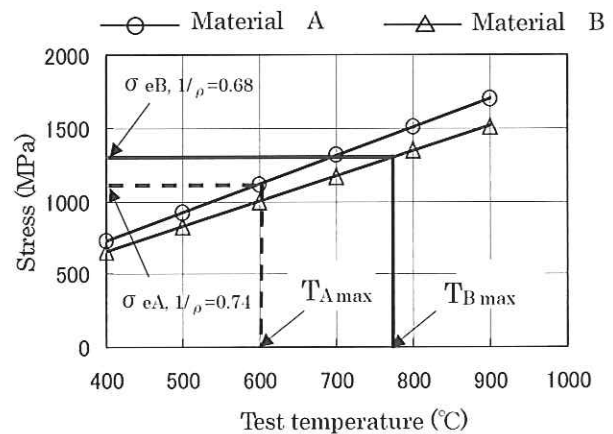


Fig.12 Relationship between thermal stress and test temperature

5. 結言

開発材と既存のハイス材を用いて熱衝撃試験とFEM解析、および切欠き材の引張り試験を行って得られた結果を以下に示す。

- 1) 熱衝撃時に発生する熱応力のFEM解析と、切欠き材料の引張試験を行い、得られた結果を応力勾配で対応させた。
- 2) 熱伝達係数の逆解析を行い、熱衝撃試験での熱伝達係数は $h=14000(W/m^2 \cdot K)$ であることを求めた。

- 3) 熱衝撃で発生する熱応力は、条件によって異なるが、本実験では 0.2 秒後に最大の熱応力が発生することを明らかにした。
- 4) 本結果によって、ヒートクラック発生条件の定量的評価方法を提案した。様々な形状の材料についても、FEM 解析を用いれば本手法を使用できる。
- 5) 熱衝撃試験により材料にヒートクラックが発生する温度を予測し、妥当性を確認した。
- 6) ヒートクラック発生条件の評価から、既存ハイス材 (A 材) よりも、高靱性の開発材 (B 材) の方が、より高い温度からの熱衝撃に耐えることを明らかにした。

参考文献

- 1) 姜孝京、園田晃大、木村健治、永吉英昭：フジコー技報 No.15,(2007)38-46
- 2) 木原諄二、銅屋公一、中村一元、吉原達夫、佐野義一：鉄と鋼 7, (1983)62-69
- 3) 大谷直道、田中雄一：機論 A 64 , (1998)112-118
- 4) 遠藤誠一、高橋純一、原伊砂夫：自動車技術会論文集 33, (2002)105-109
- 5) S. S. Manson : MACHINE DESIGN, 12, (1958) 114-120
- 6) S. S. Manson :MACHINE DESIGN, 26, (1958)99-103
- 7) 平修二：熱応力と熱疲労，日刊工業新聞社，(1974)149
- 8) 藤田輝昭、土田栄一郎：機論 A 46, (1980)525-533
- 9) 日本金属学会集委員会：金属材料の強度と破壊，(1964)327-328
- 10) 佐野義一、西谷弘信：機論 A 51, (1985)189-192
- 11) 機械設計便覧編集委員会：機械設計便覧，丸善 (1973)