

## 1445 過渡的な温度条件下の熱応力に及ぼす材料微視組織の影響

Effects of the Microstructures in a Material on the Thermal Stress under Transient Temperature Changes

○正 柴田 博司 (富山商船高専) 正 石原 外美 (富山大)  
正 五嶋 孝仁 (富山大)

Hiroshi SHIBATA\*, Sotomi ISHIHARA\*\*, Takahito GOSHIMA\*\*

\*Toyama National College of Maritime Technology, Toyama 933, Japan

\*\*Faculty of Engineering, Toyama University, Toyama 930, Japan

Effects of microstructures and a transient temperature change on the microcracking of both cemented carbides and cermets were analyzed using a simulation method with a triangular elastic spring-lattice model. The transient temperature change was determined to fit the results of the improved thermal shock test which was proposed by Ishihara et al. The simulation results show that the initiations of a microcrack were observed at earlier stages of the transient temperature change for the models of both cemented carbides and cermets. Then, the successive occurrences of the microcracking were strongly affected by the microstructures. In the case of the large number of microcracks, the final number of microcracks for the transient calculation was different from one of a single step calculation.

**Key Words** : Thermal Shock, Simulation, Thermal stresses, Microstructure

## 1. 緒言

硬脆材料の熱衝撃破壊においては、その初期段階に発生する微小き裂が材料の最終破壊挙動に大きく影響することが予測される。著者らは、繰返し熱衝撃実験を超硬合金とサーメットに対して行い、それらの微視組織構造に基づいた解析モデルによる計算機シミュレーション結果と比較検討した。その結果、熱衝撃下における微小き裂の発生挙動を明らかにするとともに、簡便な2次元弾性バネによるシミュレーション手法が熱衝撃下の微小き裂の発生評価に対して有効であることを示した<sup>(1)</sup>。

本研究では、熱衝撃実験において測定された試験片表面の過渡的な温度変化を、弾性バネによるシミュレーション手法に対して適用した。熱衝撃下の熱応力状態として発生した微小き裂数を評価することにより、過渡的な温度条件下における熱応力に対する微視組織構造の影響について検討を行った。微視組織構造としては、超硬合金およびサーメットをそれぞれモデル化して比較検討した。

## 2. 熱衝撃シミュレーション

2.1 2次元多相多結晶微視組織モデル 多相多結晶材料に対する熱衝撃シミュレーションモデルとして、Fig.1に示すような弾性バネからなる三角格子モデルを用いた<sup>(1)(2)</sup>。微視組織構造の影響を調べるため、超硬合金およびサーメットのSEM写真に対して、三角格子モデルをそれぞれ適用して解析モデルとした。各計算シミュレーションにおいて、各格子点を連結している弾性バネに熱収縮を与えることによって熱衝撃が負荷される。この際、弾性バネに蓄えられる弾性エネルギーは、引張りと曲げエネルギーの和として定義され、シミュレーションモデルの全弾性エネルギーの総和が最小となるように各格子点を移動させて決定される。全弾性エネルギーの収束後に各弾性バネのエネルギーを評価し、破壊条件に適合する弾性バネを切断することにより微小き裂とした。本研究では、これらの計算手順を時間分割された温度条件下で繰返すことにより過渡的な温度変化の影響を検討した。

2.2 熱衝撃下における過渡的な温度変化 著者らによって開発された一面冷却型熱衝撃実験において、試験

片表面の過渡的な温度変化が報告されている<sup>(3)</sup>。その実験結果に基づき、単一の熱衝撃における熱衝撃温度差の変化を時間分割し、過渡的な温度変化としてシミュレーション計算に適用した。Fig.2は実験結果に適合するように最終温度差に対して規格化した温度差の時間変化を求めたものである。図における時間ステップ毎の温度差を熱衝撃シミュレーションの負荷条件として、時間ステップ毎に計算を繰返し行った。試験表面温度の測定結果の収束状況から、本研究では過渡的な時間間隔を3秒間とし、時間ステップを0.1秒として30ステップに等分割した。

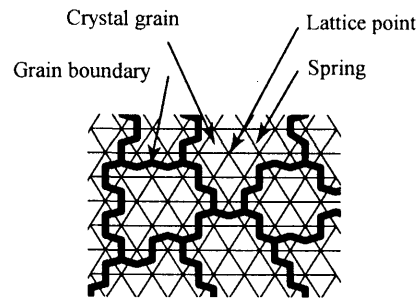


Fig.1 Microstructure mapped onto a triangular lattice of brittle, linear elastic springs.

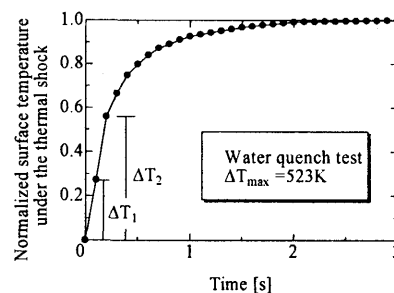


Fig.2 Normalized surface temperature changes under a thermal shock.

### 3. シミュレーション結果と考察

超硬合金およびサーメットの微視組織構造モデルに対して、時間ステップ毎に変化する熱衝撃温度差を負荷した場合の、き裂発生数の変化を Fig.3 に示す。本シミュレーションにおいては、最終的な熱衝撃温度差として  $\Delta T=380\text{K}$  とした。図によると、超硬合金とサーメットではき裂の最終発生数に大きな差が見られ、サーメットの耐熱衝撃性の高さを示している。また、最終温度差への温度差の収束に対応して、き裂の発生数の増加率も低下することがわかる。また、図の白抜き記号は、時間分割を行わず最終温度差  $\Delta T$  によって単一ステップの熱衝撃を加えた場合の結果を示している。図によるとき裂発生数の少ないサーメットでは、過渡的なき裂発生を考慮しても単一ステップの結果とほとんど差が見られないことがわかる。一方、き裂発生数の多い超硬合金においては、過渡的なき裂発生を考慮した場合にき裂発生数が若干多くなっていることがわかる。

一方、Fig.4 はき裂の発生数を各微視組織構造モデルにおける最終き裂数で規格化した結果を示している。図によると、き裂の発生数の多い超硬合金の方がき裂数は最終値に

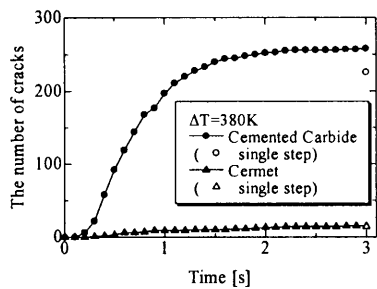


Fig.3 Relation between the number of surface cracks and time under a thermal shock.

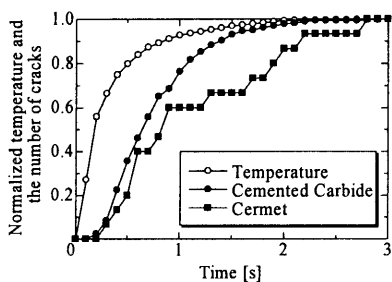


Fig.4 Relation between the normalized number of surface cracks and time under a thermal shock.

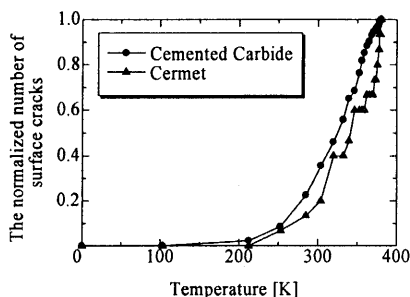


Fig.5 Relation between the normalized number of surface cracks and temperature change under a thermal shock.

急速に収束していくのに対して、き裂の発生数の少ないサーメットの場合には、き裂数の増加は最終値までゆるやかな傾向にあることがわかる。また、き裂の初期発生は温度の急増する時間ステップの初期に見られ、各初期発生時刻には微視組織構造によって大きな差はなく、その後のき裂の増加挙動が微視組織構造に大きく影響を受けていることがわかる。

Fig.5 は、横軸を温度差として、き裂の発生数を示したものである。図によると初期き裂の発生温度は、超硬合金とサーメットで大きな差が見られるが、温度差とき裂数の最終値への収束挙動にはいずれの微視組織構造においても類似の傾向が見られることがわかる。

本シミュレーションにおいては、過渡的な温度変化によるき裂発生挙動の評価として、熱衝撃温度差が時間とともに変化する弾性的な繰返し熱衝撃現象とした。したがって、本計算原理には時間応答を示すような粘性効果や応力-ひずみ関係等の材料特性が含まれていない。本シミュレーション手法における過渡的な時間応答としては、各ステップにおいてエネルギーの収束が完了せず次のステップに移行する場合が考えられる。Fig.6 は、サーメットの微視組織構造に対して、エネルギーの収束判定条件を変化させた場合のき裂の発生数の変化を示している。図によると収束条件を緩やかにして計算を中断した場合には、平衡状態の判定エネルギーが高くなるため、き裂の発生数は多くなる。また、図中の白抜き記号は Fig.3 と同じく単一ステップによるき裂の発生数を示している。これより、過渡的な温度変化を考慮した場合には、き裂の発生数が多くなる場合に限り、逐次的なき裂の発生による過渡的な影響が生じることがわかる。

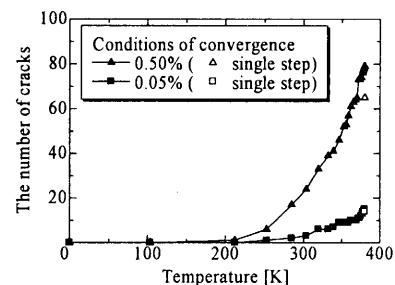


Fig.6 Effects of the condition of convergence on the number of surface cracks under a thermal shock.

### 4. 結言

弾性バネの三角格子モデルを用いて過渡的な温度変化を考慮した熱衝撃シミュレーションを行い、超硬合金およびサーメットの微視構造モデルに対するき裂の発生挙動について評価した。その結果、過渡的な温度変化を考慮した場合において、微小き裂の発生は初期の段階に発生し、その後の増加挙動は微視組織構造に大きく影響される。また、き裂発生数が多くなると、最終き裂数に過渡的な影響が見られる。

### 参考文献

- (1) Ishihara, S., Shibata, H., Goshima, T., and McEvily, A.J., *Scripta Materialia*, 52, pp.559-563, 2005.
- (2) Sridhar N., Yang W., Srolovitz D.J. and Fuller E.R., *J Am Ceram Soc*, 77, pp.1123-1138, 1994.
- (3) Yoshimoto T. Ishihara, S., Goshima, T., McEvily, A.J. and Ishizaki T., *Scripta Materialia*, 41 pp.553-559, 1999.