

拘束下熱応力挙動の解析 ～ 計算シミュレーションとフラクタル次元 ～

1. はじめに

実炉で使用される耐火物の多くは、稼働面側が高温に晒された状態で、互いに拘束し合っている。実験室レベルで行える垂直方向に一軸拘束した場合の耐火物の熱応力挙動は、このような実炉の一端を示している。

当該研究は、**図1**の装置を用いて得られる応力-温度曲線のデータを耐火物特性に結び付け、計算シミュレーションの手法と組織観察にもとづくフラクタル次元解析から説明しようとする研究である。

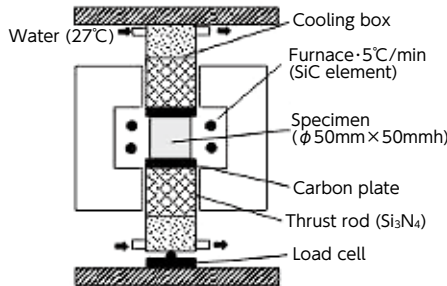


図1 拘束下熱応力測定装置

2. 実験装置

図1の装置は試験片に初期荷重を負荷した後、垂直方向の変位を固定した状態で試験片を加熱し、発生する膨張力を熱応力として測定する装置である。変位は完全固定ではなく、治具の膨脹等の誤差要因があるが、耐火物特性を理解するうえで有効な装置である。

3. れんがの熱応力挙動

図2に90%Al₂O₃と99%MgOの各耐火物の熱応力挙動を示す。初期荷重を変えて得たデータである。ここで、 σ - T の熱応力曲線は、ピークの位置、値、熱応力曲線の昇温時傾きの3つの指標で特徴付けられる。

高アルミナ質は初期荷重が増えるほどピーク値が高くなり、ピーク位置（温度）が低温側にずれるが、熱応力曲線の傾きは初期荷重に依らないほぼ同等の傾きを示す。

一方、高マグネシア質は、ピーク値、ピーク位置（温度）とも初期荷重依存性が小さいが、曲線の傾きは初期荷重が増すにつれ小さくなる傾向を示した。

上記の特徴を満たす条件を計算シミュレーションで探った。これらの傾向はクリープ変形、および降伏応力を適用した粘塑性体モデルにより再現できた。高アルミナ質の挙動は粘性の影響が大きい条件で再現され、応力緩和は材料の液相軟化によると推測された。高マグネシア質は降伏応力の影響が大きい条件で再現され、応力緩和は材料の破壊（微亀裂）によると推測された。

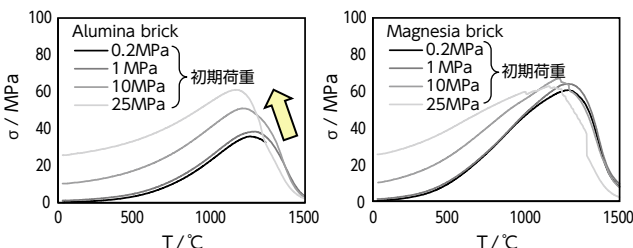


図2 高アルミナ質れんがと高マグネシア質れんがの熱応力挙動

4. モルタルの熱応力挙動

2項で用いたアルミナれんがおよびマグネシアれんがを25mmの高さに2分し、間にそれぞれ80%Al₂O₃、95%MgOのモルタルを施工した系の熱応力挙動を調べた。

図3の一例が示すように、試験後試料は目地の無い一体の試料では樽型の変形と亀裂の発生があったが、目地を含む試料では亀裂はなく応力緩和があった。

図4のアルミナ系モルタルの熱応力挙動は、目地厚みを増すとピーク高さが低下（応力緩和）し、ピーク位置が低温側に变化するが、曲線の傾きは目地厚みに依存しない。一方、マグネシア系は、ピーク高さがの低下は同様だが、ピーク位置は大きくは変化せず、傾きは依存して小さくなった。

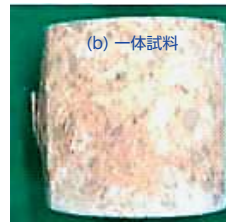
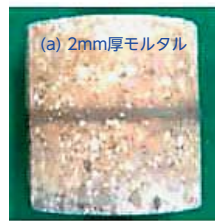


図3 アルミナ系試料の試験後外観

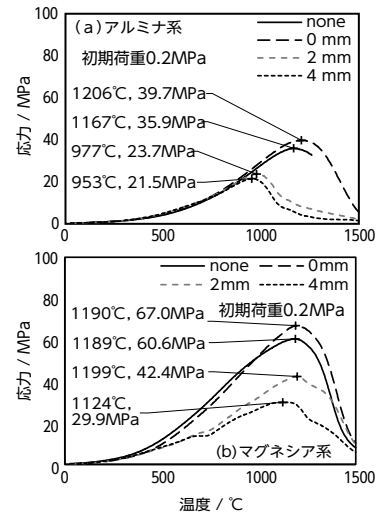


図4 モルタルの熱応力挙動

図4を計算シミュレーションで検討した結果、アルミナ系モルタルは、クリープ特性が支配的であった。一方、マグネシア系はモルタルの弾性率、降伏応力が影響していると推測された。

5. 耐火物組織とフラクタル解析

拘束の有無により、組織の緻密性に差が生じた（**図5**）。この差を定量化するため、フラクタル解析したが、現在、組織観察に整合した結果が得られていない。

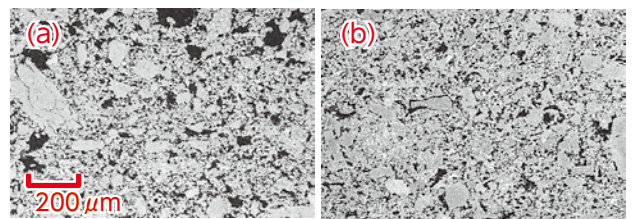


図5 モルタルのSEM像 (a)1500°C焼成後 (b)拘束試験後

6. まとめ

れんがとモルタルの熱応力挙動を計算解析し、耐火物組織との関連性を調べた。フラクタル解析の拡張は今後の課題とする。