

## カーボンニュートラル推進に貢献する MSCに基づく熱処理工程の適正化技術

MSC-Based Heat Treatment Process Optimization Technology Contributing to Promotion of Carbon Neutrality

平塚 大祐 HIRATSUKA Daisuke 星野 ともか HOSHINO Tomoka 井岡 久美子 IOKA Kumiko

金属やセラミックスの焼結や樹脂の硬化など熱処理工程での電力消費量は、製造業における全消費量の25%を占め、最大である。熱処理条件は、経験則に基づいて温度と処理時間に大幅なマージンを付加して設定される場合が多く、これを適正化して電力消費量を削減する技術が求められている。

そこで東芝は、熱処理工程の適正化技術を開発した。化学反応の進捗を定式化するマスターカーブ(MSC)を用いて、反応進捗を可視化し、更に、熱流体解析と連成させて適正な条件を導出する。窒化ケイ素(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)ベアリングボール製品に適用した結果、熱処理時間を32%、電力消費量を25%低減できた。

The amount of energy consumed in heat treatment processing, such as metal and ceramic sintering and resin hardening, is the highest in the manufacturing industry, accounting for 25% of all energy. In many cases, heat treatment conditions are established with large margins for temperature and processing times based on empirical rules, requiring technology that optimizes such variables to reduce power consumption.

To address this issue, Toshiba Corporation has developed heat treatment process optimization technology. Using a master curve (MSC) that formulates the progress of chemical reactions allows them to be visualized, and furthermore, linked to thermo-fluid analysis to derive appropriate conditions. When applied to silicon nitride (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) bearing ball products, we successfully reduced heat treatment time by 32% and power consumption by 25%.

### 1. まえがき

近年、気候変動やエネルギー・資源の枯渇など様々な環境問題が深刻化し、世界的にカーボンニュートラル(CN)やサーキュラーエコノミー(CE)の動きが加速している。

東芝グループでは、CNやCEへの対応などグローバルな視点に立った新たな長期ビジョンとして、環境未来ビジョン2050<sup>(1)</sup>を策定している。気候変動への対応では、2050年度までに東芝グループのバリューチェーン全体でCNを目指すとともに、その通過点として、2030年度までに温室効果ガス(GHG)排出量を70%削減(2019年度比)することを目標としている。自社グループの事業活動によるGHG排出量を削減する主な施策には、省エネプロセスの開発や、省エネ設備への投資、再生可能エネルギー設備の導入、再生可能エネルギー由来電力の調達がある。特に、大きな投資を伴わない省エネプロセス開発は、第一に取り組むべき施策である。

一方、産業施設における機器別の電力消費量では、電気炉・加熱設備が最大であり、全消費量の25%を占める<sup>(2)</sup>。これらの機器は、金属・セラミックスの焼結や樹脂の硬化・熱分解など、製造業において一般的な熱処理工程に用いられる。そのため、熱処理工程を効率化することによって、電

力消費量の大幅な削減が期待できる。

特に、従来の熱処理条件は、経験則に基づき、温度と処理時間に大幅なマージンを付加して設定される場合が多い。そのため、熱処理条件を適正に設計する技術が求められている。ここでは、熱処理工程の適正化技術の概要と、適用事例について述べる。

### 2. 熱処理工程の適正化技術の開発

熱処理条件が経験則に基づいて検討されている主な理由は、どれだけ加熱すれば、どこまで反応が進むかといった反応進捗が不明なことである。この問題を解決するため、焼結などの反応進捗を定式化したMSC<sup>(3)-(6)</sup>を用いて、適正な条件を導出する技術を開発した。MSCに基づいた熱処理条件の導出は、反応進捗の定式化、適正化の方針策定、及び適正条件の導出の3ステップである(図1)。

#### 2.1 反応進捗の定式化

MSCの理論は、焼結や有機物の熱分解について提唱されている<sup>(3)-(6)</sup>。例えば、有機物の熱分解現象は、式(1)で反応進捗のMSCが得られることが報告されている。

$$\Phi(f) = \theta(t, T) \quad (1)$$

式(1)の左辺の $\Phi$ は、反応進捗の指標となる反応進行度を

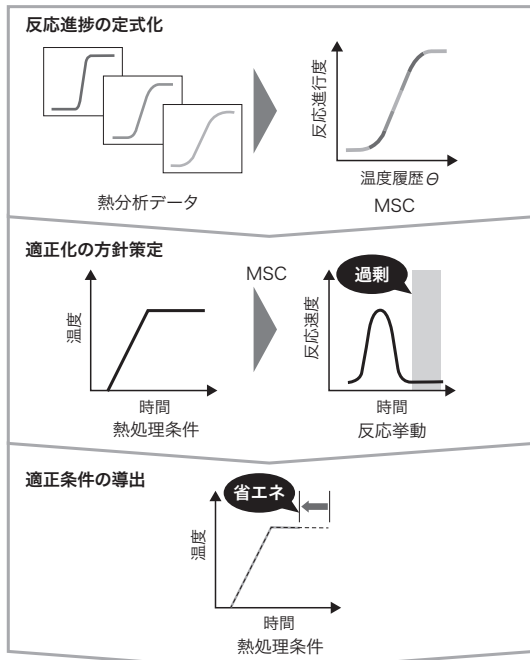


図1. 適正な熱処理条件の導出フロー

熱処理条件の導出フローは、MSC作成による反応進捗の定式化、MSCに基づく反応進捗の可視化による適正化の方針策定、及び適正条件の導出、の3ステップである。

Process of deriving appropriate heat treatment conditions

表し、式(2)のとおり、熱分解に伴う質量変化率 $f$ の関数として与えられる。

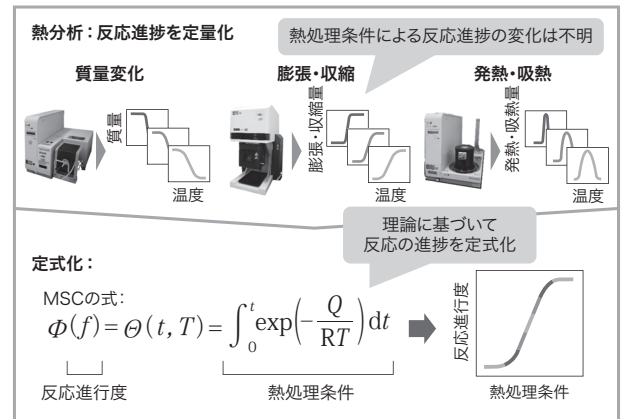
$$\Phi(f) \equiv \frac{1}{k_0 m_0^{n-1}} \int_0^f \frac{1}{(1-f)^n} df \quad (2)$$

一方、式(1)の右辺の $\theta$ は、式(3)に示すような時間 $t$ と絶対温度 $T$ の関数で、熱処理条件を積算し定量化した温度履歴を表している。

$$\theta(t, T) \equiv \int_0^t \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) dt \quad (3)$$

そのため、式(1)を用いて、 $f$ と熱処理条件をひも付けできる。ここで、 $k_0$ は頻度因子、 $m_0$ はサンプルの初期質量、 $n$ は反応次数、 $Q$ は質量変化の活性化エネルギー、 $R$ は気体定数である。

反応進捗のデータは、熱処理を施す部材の熱分析により取得する。例えば、熱重量分析(TGA: Thermogravimetric Analysis)、熱機械分析(TMA: Thermomechanical Analysis)、及び示差走査熱量測定(DSC: Differential Scanning Calorimetry)により、反応に伴う質量変化量、熱膨張量、又は発熱量の変化を測定する。これらの熱分析は反



$t$ : 時間  $T$ : 絶対温度  $Q$ : 化学反応における見かけの活性化エネルギー  $R$ : 気体定数

図2. 反応進捗の定式化の概要

熱分析により、反応に伴う質量変化量、熱膨張量、又は発熱量を指標として、反応進捗を定量化する。これらのデータを用いて、反応進捗を定式化したMSCを得る。

Overview of reaction progress formulation

応の進捗を定量化するものである。

しかし、熱処理条件により、反応の進捗がどのように変化するかは不明であった。そこで、得られたデータと式(1)から、反応進捗を定式化したMSCを作成する技術を実用化した(図2)。

## 2.2 適正化の方針策定

適正化の方針を策定するには、熱処理中の製品温度と反応進捗の把握が必要である。熱処理中の製品温度は、実測のほか、熱流体解析により取得できる。反応進捗は、MSCを用いることで、製品温度の履歴から算出し、可視化した。

図2に示すように、反応進捗の可視化により、反応が終了した後の過剰な加熱が明らかになることから、適正化の方針として、その削減を検討できる。また、反応速度が急峻(きゅうしゅん)に上昇し、製品の品質が損なわれる場合は、適正化の方針を反応速度の平準化とすることも可能である(図3)。

## 2.3 適正条件の導出

策定した方針に基づき、適正な条件を導出する。しかし、式(1)は製品の寸法や形状、オープンや電気炉内の配置の影響を考慮できない。そこで、熱流体解析技術を組み合わせてこれらを補正した。MSCに基づいて新たに考案した反応速度解析と汎用の熱流体解析を連成し、電気炉内の場所ごとの反応進捗を可視化することで、炉内で最適な熱処理条件を導出する技術を開発した(図4)。この開発は、東芝マテリアル(株)とのコラボレーションによるものである。

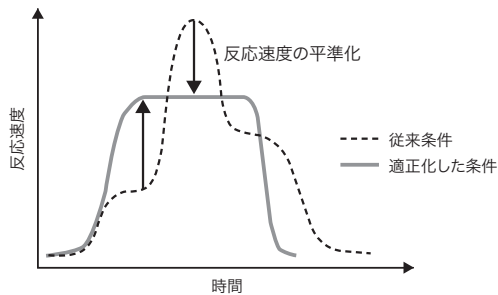


図3. 反応進捗の可視化と適正化の例

反応進捗を可視化することで、不良の原因となる反応速度の急上昇、又は反応終了後の過剰な加熱を明らかにし、これらの削減を適正化の方針として策定できるようになった。

Example of visualization and optimization of reaction progress

解析技術により寸法・形状・配置の影響を補正

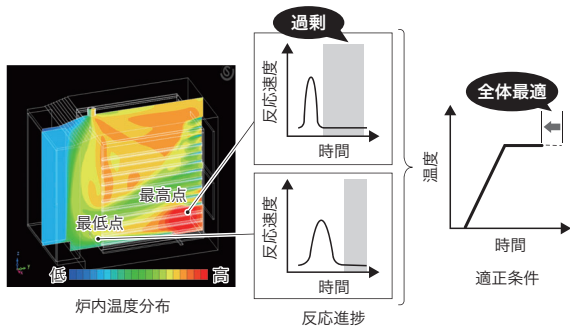


図4. 反応速度-熱流体連成解析による適正条件の導出

MSCに基づいて新たに考案した反応速度解析と汎用の熱流体解析の連成により、電気炉内の場所ごとの反応進捗を可視化することで、炉内で最適な熱処理条件を導出する技術を開発した。

Derivation of appropriate conditions by coupled analysis of chemical reaction rate and thermal fluid

この技術を用いることで、熱処理工程における温度プログラムや製品の形状・投入量・レイアウトなどを入力すれば、必要な生産時間、及び電力消費量を算出できる。そのため、省エネと生産性向上を両立する条件を導出し、熱処理工程を適正化できる。

### 3. SiN ボール製品の脱脂工程への適用

我々の生活を取り巻く製品は、主に金属、プラスチック、及びセラミックスといった材料を組み合わせられて作られている。この中で、セラミックスは、半製品である成形体を加熱し、有機バインダーを熱分解する脱脂工程や、脱脂後の成形体を焼き締める焼成工程といった熱処理工程が、電気炉を用いて500℃以上の高い温度で行われる。更に、これらの工程は、製品を投入してから取り出すまでが数～数十時間の長い稼働時間であり、多くの電力を必要とする。そのため、

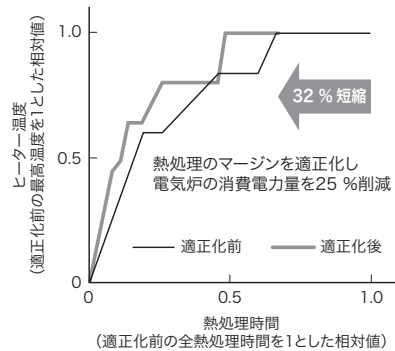


図5. 熱処理工程の適正化による効果

SiN ボールの脱脂工程に熱処理工程の適正化技術を適用した結果、品質を維持しながら、適正化前に比べて、熱処理時間を32%削減、電気炉の電力消費量を25%削減できた。

Effects of optimizing heat treatment process

脱脂、及び焼成工程の適正化が求められている。

東芝グループ内では、東芝マテリアル(株)がセラミックスをはじめとした機能材料・部品の開発、製造を行っている。中でもSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>セラミックス製品は、電動車(xEV<sup>(注1)</sup>)向けに年々事業規模の拡大が続いている。そこで、xEVの車載モーター用途として注目されているSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>ベアリングボール(以下、SiNボールと略記)の脱脂工程に、開発した適正化技術を適用した<sup>(7)</sup>(図5)。電気炉の従来条件では、マージンが大きく取られていたが、MSCに基づいて反応進捗を可視化することにより、これを必要最小限まで縮小できた。更に、反応速度解析により、製品品質を損なわない範囲で、昇温速度を従来条件よりも最大1.5倍程度に上げることが可能なことを見だし、熱処理時間を32%削減できた。これにより、電気炉の消費電力も従来に比べて25%の削減を実現した。

### 4. あとがき

CN推進に向けて、製造業の電力消費量のうち、熱処理工程での電力消費量が最大であることから、効率化のために熱処理工程の適正化技術を開発した。熱処理に伴う反応を理解し、熱分析により得た実データと理論に基づいた定式化、及び汎用の熱流体解析を組み合わせる。この技術の適用により、設備の変更なく省エネを実現できる。特に、高温かつ長時間の熱処理工程が必要なセラミックス製品に適用した場合、熱処理条件の変更だけで、省エネを実現できることを示した。

開発した技術は、熱活性化過程の現象であれば、材料

(注1) 電気自動車(EV)、プラグインハイブリッド自動車(PHEV)、ハイブリッド自動車(HEV)、燃料電池自動車(FCEV)の総称。

の制約はなく、樹脂、金属、セラミックスなど幅広い製品に適用できる。その上、品質を損なわずに省エネ化するだけでなく、生産性の向上も可能である。更なるCN推進に向けて、今後は、他製品、他工程にこの技術を展開していく。

## 文 献

- (1) 東芝. “環境未来ビジョン2050”. 東芝ホームページ. <<https://www.global.toshiba/jp/environment/corporate/vision/vision2050.html>>, (参照 2023-09-01).
- (2) 富士経済. 産業施設におけるエネルギー消費の実態総調査 2022. 2022, 237p.
- (3) Su, H.; Johnson, D. L. Master Sintering Curve: A Practical Approach to Sintering. J. Am. Ceram. Soc. 1996, **79**, 12, p.3211-3217.
- (4) 平塚大祐, ほか. “粘性流動焼結系への新規マスターシンタリングカーブ理論の提案”. 日本セラミックス協会 2007年年会講演予稿集. 東京, 2007-03, 公益社団法人 日本セラミックス協会, 2007, p.209.
- (5) Tatami, J. et al. Analysis of sintering behavior of silicon nitride based on master sintering curve theory of liquid phase sintering. J. Ceram. Soc. Jpn. 2016, **124**, 4, p.375-380.
- (6) DiAntonio, C. B. et al. Extension of Master Sintering Curve Theory to Organic Decomposition. J. Am. Ceram. Soc. 2005, **88**, 10, p.2722-2728.
- (7) 那波隆之, ほか. 自動車の電動化を支える窒化ケイ素セラミックス製品. 東芝レビュー. 2023, **78**, 1, p.41-45.



平塚 大祐 HIRATSUKA Daisuke, Ph.D.  
生産技術センター  
電子機器・実装・制御技術領域 実装技術研究部  
博士(工学) スマートプロセス学会・エレクトロニクス実装学会会員  
Electronics Parts Assembly Technology Research Dept.



星野 ともか HOSHINO Tomoka  
生産技術センター  
電子機器・実装・制御技術領域 実装技術研究部  
Electronics Parts Assembly Technology Research Dept.



井岡 久美子 IOKA Kumiko  
生産技術センター  
電子機器・実装・制御技術領域 実装技術研究部  
エレクトロニクス実装学会会員  
Electronics Parts Assembly Technology Research Dept.