

# 自動車用冷延ハイテンの開発に道を拓いた 連続焼鈍誕生から半世紀



細谷 佳弘\*

## 1. はじめに

半世紀前、その後の自動車用薄鋼板製造に変革をもたらす連続焼鈍プロセスが誕生した。軟質冷延鋼板用連続焼鈍ラインの稼働である。(旧)日本鋼管(NKK)が1971年にブリキ用連続焼鈍ラインに水冷機構(WQ)と過時効処理(OA: Over Aging)炉を増設したNK-No.1 CAL (Continuous Annealing Line)<sup>1)</sup>を稼働させ、続いて(旧)新日本製鐵(NSC)が1972年に絞り用冷延鋼板専用ラインとして急冷機構にガスジェット冷却(GJC)を採用したC. A. P. L. (Continuous Annealing and Processing Line)<sup>2)</sup>を稼働させた。NKKは、No.1 CALの操業実績を踏まえて1976年に絞り用冷延鋼板専用ラインとしてNo.2 CALを稼働させた。その後、(旧)川崎製鉄による1980年のブリキ用と絞り鋼板用の複合型連続焼鈍ライン(KM-CAL)<sup>3)</sup>の稼働など、1982年までの10年で8基の連続焼鈍ラインが国内で稼働し、自動車用冷延鋼板の開発・製造体制が整った。

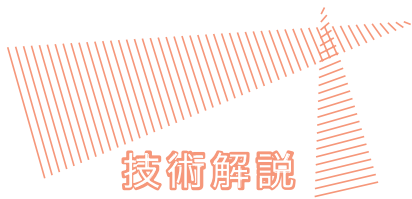
連続焼鈍は、箱型焼鈍炉での焼きなまし工程とその前後工程を含めて10日近くを要していた冷延鋼板の焼鈍工程を10分以下まで短縮した画期

的なラインであった<sup>4)</sup>。コア技術である均熱温度からの急冷処理でいったん鋼中炭素(C)を過飽和固溶状態とした後に短時間の過時効処理で遅時効レベルまで低減させる処理は、焼入れ処理と焼戻し処理に適していたことから変態強化型高強度鋼板(ハイテン)の製造にも道が拓かれた<sup>4)</sup>。連続焼鈍炉でのオンライン組織制御技術はその後の連続溶融亜鉛メッキライン(CGL: Continuous Galvanizing Line)にも引き継がれ、自動車用合金化溶融亜鉛メッキ(GA)鋼板のハイテン化を可能にした。

そこで、本技術解説では半世紀前の連続焼鈍プロセス誕生の経緯を振り返った上で、その後の自動車用冷延ハイテン開発のエピソードの一端を紹介する。

<本稿は、(一社)日本工業炉協会の依頼により(株)アグネ技術センター刊:「金属」92巻に掲載された“自動車用ハイテン材料の開発秘話”Vol.92(2023), No.11, p.1139-1146を本誌で紹介するにあたり、冷延ハイテンの製造に道を拓いた連続焼鈍ライン誕生50年の節目に、プロセスイノベーションについて加筆・再構成した。>

\* 細谷技術士事務所 Y. Hosoya 連絡先E-Mailアドレス: peo-hosoya@ct.em-net.ne.jp



# 燃焼数値シミュレーションの現状と展望



黒瀬 良一\*

## 1. はじめに

我が国は、温室効果ガスの排出を2030年度に13年度比で46%削減、2050年までに実質ゼロとすること（すなわち、カーボンフリー社会の実現）を宣言した。温室効果ガスとして最も寄与が大きいのは二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）であり、その排出量の大部分が化石燃料（石炭、石油、天然ガス）の燃焼によるものであることから、対策が急務とされている。このような状況の下、様々な燃焼器や火炉の改良・設計、最適操作条件の選定が不可欠となっており、その試行錯誤の検討が比較的容易で、且つ現象理解の助けになるとの理由から、数値シミュレーションへの期待が益々高まっている。その背景には、近年のスーパーコンピュータ「富岳」をはじめとする計算機性能の飛躍的な向上があるのは明らかである<sup>1, 2)</sup>。しかし、燃焼は極めて複雑な現象であるため、その素過程についての数理モデルや、燃焼反応に伴う急激な密度変化に適用可能な安定スキームに関する理解や選定が容易でないこと、また、概して計算負荷が高いため並列計算等、効率的な計算実施に関するノウハウが不可欠であること等の理由から、燃焼の数値シミュレーションは未だ敷居が高いと思われがちである（実際、そうかもしれない）。

本稿では、ガス、噴霧、石炭など、様々な燃料を対象とした燃焼数値シミュレーション例を紹介するとともに、今後の展開について述べる。燃焼数値シミュレーションを少しでも身近に感じていただき、その将来性を感じていただければ幸いである。

## 2. 燃焼数値シミュレーションの基礎

燃焼とは、可燃性燃料が発熱を伴いながら酸素と反応する現象であるが、反応過程においては数多くの化学種が関与するため、その数値解析は極めて複雑であり、膨大な計算資源を必要とするばかりでなく、安定計算のための高い知識と経験が要求される。例えば、燃料としてよく用いられる天然ガスの主成分であるメタンと空気の燃焼では約50化学種・300ステップ反応、ケロシンと空気の燃焼では約300化学種・2000ステップ反応からなる反応機構を考慮する必要があり、これは流れ場の支配方程式（質量に関する保存式1つと運動量に関する保存式3つ）とエネルギーの方程式（1つ）に加えて、それぞれ50化学種及び300化学種の物質の保存式を連立して解く必要があることを意味する。従って、このような数十～数百化学種の数十～数千ステップ反応から成る詳細反

\* 京都大学大学院工学研究科 教授 R. Kurose 連絡先 E-Mail アドレス : kurose@mech.kyoto-u.ac.jp



## 多孔質炭素材料の高温強度評価と材料特性予測



齋藤 泰洋\*

### 1. 緒言

化学プロセスには物質や熱がさまざまな形で移動する熱物質輸送現象が存在する。当研究室では、実験とコンピュータを利用した数値シミュレーションの両面から化学プロセスを評価し、Carbon (石炭やコークス)、Coating (自動車塗装) 及び Carbon Neutral (CO<sub>2</sub> 回収) に関する研究を行っている。今回は、これらの研究のうち、炉内において高温で機能を発現する多孔質炭素材料であるコークスを取り上げる。

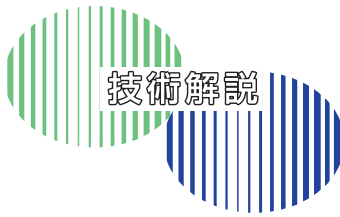
コークスは石炭を乾留(蒸し焼き)して得られる脆性材料の一つであり、気孔率が50%程度の多孔質材料である。コークスは冶金用コークス及び鋳物用コークスとして製鉄及び鋳造に利用される。冶金用コークスは高炉コークスとも呼ばれ、酸化鉄から鉄を還元するプロセス(鉄鉱石から銑鉄を取り出す製銑プロセス)において高炉内の高温条件下で利用されるため、常温及び高温条件下での強度特性を把握することが重要である。そこで本論文では、多孔質炭素材料であるコークスを対象に、常温・高温・高温反応時における強度特性に関する実験<sup>1,2)</sup>及び高温時における材料特性の数値解析<sup>3)</sup>に関する研究について概説する。

### 2. 高炉内におけるコークスの役割

石炭とコークスの関係は、薪と木炭の関係と同じである。薪の場合は、十分に乾燥されていないと燃焼時に水分及び揮発分が煙となって目にしみる。その一方で、木炭の場合は、ほとんどが炭素であるため、揮発分は放出されにくく、燃料として有用である。石炭には硫黄や揮発分が多く含まれるうえ、石炭そのものの強度が低い。それに対し、冶金用コークスの製造に適した石炭(原料炭)を約1000℃から1200℃程度で乾留すると、石炭粒子同士が粘結し、炭素結晶構造が発達し、高発熱量で塊状の高強度なコークスが得られる。

鉄を製造するためには、鉄鉱石(酸化鉄)を溶鉱炉(高炉)で還元して銑鉄(炭素分が4%以上含まれる鉄)を得る高炉法が一般的である。高炉法では、直径約20m×高さ約50mの反応器内に鉄鉱石(焼結鉱)とコークスを層状に投入し、高炉の下部から1300℃以上の熱風を吹き込むことで、同時に投入される微粉炭やコークスが燃焼し、一酸化炭素や水素などの高温ガス(還元ガス)が生じ、酸化鉄の酸素を奪う還元反応が進行する。高炉内におけるコークスの役割は還元材や熱源としての利用もさることながら、高炉下部からの還元ガスの吹き昇りと熔融した金属の流下のための

\* 九州工業大学 大学院工学研究院物質工学研究系 准教授 Y.Saito  
連絡先 E-Mail アドレス : saito.yasuhiro827@mail.kyutech.jp



# 非定常熱伝導の計算の簡易化 — ハイスラー線図の適用 —

(最終回) 平板の両面の熱伝達率が異なる場合の計算方法

酒井 逸朗\*

## 7. 演習問題

当連載を振り返れば、ハイスラー線図の内容と、その誕生に関連する理論的な経緯を含めて説明を行った。従来はハイスラー線図での取り扱いは平板の場合、両面が同一の熱伝達率のときの内部の温度変化を求めることが主題であった。筆者が強調したことは、平板の両表面の熱伝達率が異なった場合においても、ハイスラー線図が適用できることを示した。

この連載の最後に、記載された内容の理解を深めてもらうため、種々なタイプの演習問題を作成した。

ハイスラー線図をよく見ると、大部分のところは、 $m$  値 ( $=1/Bi$ ) が大きい範囲が示されている。すなわち、炉内の加熱または放熱のための流体と、平板表面の間の熱抵抗に対し、平板内部の熱伝導の熱抵抗が十分に、小さいことに対応する。(初回の図4 Vol. 60, No. 4 の p29 参照)  $Bi$  値が小さいことの物理的意味は、内部温度は均一と見なされることから、集中系、すなわち、一次遅れ系として近似される。加えて、 $Bi$  が小さいことは、一次遅れの時定数が大きいことを意味する。

(注1) ハイスラー線図、前述の一時遅れ現象からも理解できるように、断熱温度が加熱温度に一致するには無限大の時間が必要となる。それを避ける方法として、工学的には99%の温度で近似することで処理している。

## 問題1. 基本事項確認

鋼材  $2l=40$  mm,  $h=200$  W/(m<sup>2</sup>K), 熱源温度  $T_\infty=700^\circ\text{C}$ , 初期温度  $T_i=50^\circ\text{C}$  で加熱する場合の10分後の断熱面温度  $T_0$  及び、 $T_0$  が  $693.5^\circ\text{C}$  に達する時間を求めよ。ただし、 $k=56$  W/(mK),  $\alpha=1.5 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s とする。

## 問題2. 平板における熱伝達率 $h$ が経過時間で変化する場合

無限平板上の2種類の鋼材の加熱において、両面の熱伝達率  $h$  が異なる場合の、加熱開始後15分後の両面の表面温度を求めよ。

鋼材	温度拡散率 $\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	熱伝導率 $k$ (W/mK)	厚み $2l$ (mm)
鋼板	$1.5 \times 10^{-5}$	56	50
SUS304	$3.5 \times 10^{-6}$	16.3	50

加熱条件は下記のとおり。

熱伝達率 :  $h_1=200$  W/m<sup>2</sup>K,  $h_2=120$  W/m<sup>2</sup>K,  
熱源温度  $T_\infty=650^\circ\text{C}$ , 初期温度  $T_i=50^\circ\text{C}$

## 問題3. <sup>スイカ</sup>西瓜の冷却

西瓜を  $-15^\circ\text{C}$  の冷蔵庫内で冷却する場合、西瓜の表面の凍結を避けるためには、経過時間に注目する必要がある。西瓜のサイズは外形20cmとし、それぞれの熱伝達係数  $h$ , 及び熱特性は次のとおり。冷蔵庫内の自然対流とし、 $h=40$  W/m<sup>2</sup>K,

\* 工学博士 I. Sakai



# 当社の真空処理炉のご紹介



前田 裕貴\*

## 1. はじめに

真空炉は、真空で加熱する炉のことである。真空技術は、我々の生活と密接に関係しており、インスタント食品、包装、レンズのコーティング、CD、半導体、フラットパネルディスプレイ製造、核融合などの幅広い分野に適用されている。本稿では、真空技術の基礎及び当社の真空炉製品を紹介する。

## 2. 真空技術の概要と熱処理への適用

### 2.1 真空技術の概要

真空技術とは、大気圧との圧力差を利用する技術である。真空には、以下のような性質や効用がある。

- ① 真空技術の適用先の例として、真空パックがあげられる。真空パックは、柔軟なプラスチックフィルムを使用して食品の形のままでフィルムが密着する方法や布団を袋に入れて掃除機で排気し、袋ごとつぶす商品も真空と大気圧の圧力差を利用する方法等が一般的である。
- ② 真空状態は圧力が低いため、蒸発を邪魔する気体分子が少なく、乾燥しやすい。加熱処理すると組成が壊れやすいビタミン油などの成分を低い温度で蒸発させて精製する方法として真空蒸留や、真空凍結乾燥により試料を一旦

冷却し、氷から液相を経ずに昇華によって細胞を壊さずに乾燥させる技術等がある。

- ③ 真空熱処理技術では、真空中では酸素分子の数が少ない状態で加熱するため、材料を酸化させないように窒素やアルゴン等の不活性ガスを封入して材料を酸化させない処理を行うことにより、寿命を延ばす。
- ④ 真空中の伝熱は、<sup>ふくしや</sup>輻射伝熱がほとんどであり、熱が伝わりにくい。魔法瓶、冷蔵庫の真空断熱材、省エネ住宅用の真空断熱窓ガラス等はこの性質を利用している。
- ⑤ 真空中では気体分子が少ないため、真空蒸着やスパッタリング、イオンプレーティング等を用いて成膜する場合も真空中における粒子の直進性を利用して効率よく堆積させている。

### 2.2 真空を利用した熱処理

金属（セラミックスは、金属の酸化物や窒化物、炭化物他と考える）の熱処理に対する真空技術の応用は広範囲に及ぶ。用途別に大別すると次のようになる。

- (a) 改質または表面改質：焼入れ、焼戻し、焼き鈍し、溶体化処理（固溶化熱処理）、浸炭、窒化等

\* 中日本炉工業株式会社 営業技術部 主任 Y. Maeda 連絡先 E-Mail アドレス：info@nakanihon-ro.co.jp

# 振動・温度センサを利用した浸炭炉の 攪拌ファンや各種ポンプの予知保全

小川 真吾\*

## 1. はじめに

私の主な業務は、ファクトリーオートメーション分野にて、アズビル製品や国内／海外のあらゆるメーカーのセンサやコントローラを組み合わせ、お客様にソリューション提案をする仕事である。

今回は弊社の取り扱い製品である振動・温度センサの提案について予知保全の観点からご紹介させて頂く。

ファクトリーオートメーション分野において、ドイツ発の産業政策であるインダストリー4.0により、IoT技術を取り入れ、AIを駆使して改革をする機運が高まってきている。その中で、生産の要となる大型モータや大型ポンプ、大型ファンや工場にあるコンプレッサー等の安定した稼働は生産を持続する上で重要なポイントとなる。そこでニーズとして出てきたのが、このような産業機械の故障予知の手助けをするセンサである。その故障予知として最も有効とされるのが今回紹介する振動・温度センサとなる。

もちろん、工業炉にも過酷な場所に攪拌ファンや各種ポンプ等が使用されており、同様なニーズがあらゆる工業炉で課題とされているのではない

かと考え、本機関誌に、寄稿した背景がある。今回紹介する内容は、実際に適用された事例で、予知保全として活用されている内容である。同様の課題を検討している現場にて参考として頂ければ幸いである。

## 2. 予知保全

ファクトリーオートメーションでは、従来からTBM(時間基準保全)が行われ、故障の有無に関係なく、定期メンテナンスが実施されてきた。ところが、昨今のIoT技術によるセンシング技術の向上で、小型センサにより設備の状態を監視し、予兆を察知して、故障や異常が起きる前に修繕や対策を実施するCBM(状態基準保全)が簡単・安価に実現できるようになってきた。これによるメリットは、図1にあるように「属人化の廃止」「コスト削減」「ドカ停撤廃」である。

「属人化の廃止」とは熟練者に頼った設備メンテナンスの廃止である。昨今の人手不足により、設備を熟知する人が減少してきた背景もあり従来の経験や勘・コツを数値的に管理して、設備の善し悪しの基準を定めて管理してゆくことである。

次に「コスト削減」とは、状態監視により不必

\* アズビルトレーディング株式会社 コンポーネント・プロダクト部