



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

鉄鋼上工程計測への挑戦

Challenge in Measuring Process in Iron and Steel Making

迫田尚和

Naokazu Sakoda

(株)神戸製鋼所 技術開発本部
生産システム研究所 計測技術研究室
主任研究員

1 はじめに

私は2004年に(株)神戸製鋼所入社し、以来一貫して計測技術の研究開発を行っている。自らの経歴を振り返ってみると、旧所属(～2010年)の電子技術研究所においては、当社素材系以外の事業分野における研究開発が主で、半導体検査装置¹⁾やタイヤ表面形状測定装置²⁾、鉄道会社向けの線路障害物検出装置³⁾などに携わってきた。現所属(2010年～)の生産システム研究所では社内のプロセス計測にシフトし、現在は鉄鋼上工程の計測技術の開発に尽力している。本稿ではこれまでの開発内容を簡単に紹介させて頂いた後、今後鉄鋼上工程計測に取り組むあたりその抱負を述べさせて頂きたい。

2 薄膜半導体結晶性評価装置の開発

半導体に光を照射すると過剰キャリア(電子・正孔)が生成され、再結合して消滅する(図1)。消滅するまでの平均

的寿命はライフタイム(τ)と呼ばれ、試料の物理的特性によって決まる時間である。過剰キャリアの生成は抵抗率を減少させるため、同位置に照射しているマイクロ波の反射率は過剰キャリアの密度に比例して変化する。 μ -PCD(μ wave-Photo Conductivity Decay)法は、マイクロ波の反射率の時間変化から、試料の結晶状態を反映するライフタイムを非接触・非破壊で測定する方法である。

当社グループのコベルコ科研では μ -PCD法を応用したシリコンウエハ向けのライフタイム測定装置を製品化していたが、同装置事業の拡大に向け、当時成長著しかった携帯情報端末のディスプレイ分野への展開を狙い、薄膜半導体評価向けのライフタイム測定装置の開発を行っていた¹⁾。しかしながら薄膜半導体の光励起キャリア信号強度は非常に微弱であり、量産ラインへの適用には10倍以上の高感度化が必要であった。

私は薄膜半導体における光キャリア励起現象およびマイクロ波—光励起キャリア相互作用の物理現象をモデル化し、電

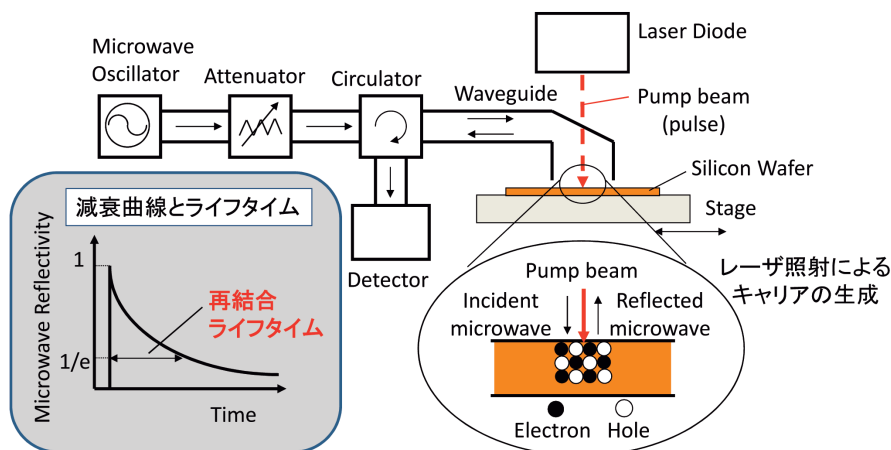
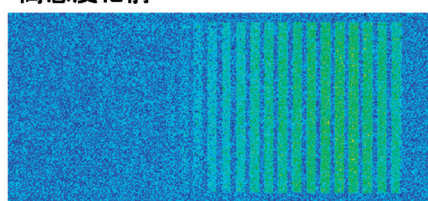


図1 測定原理(μ -PCD法)

高感度化前



高感度化後

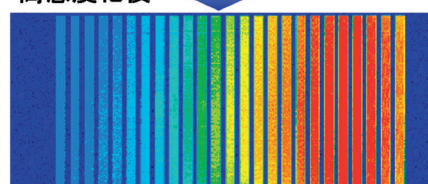


図2 薄膜半導体評価例

磁界シミュレーションと実験による検証を通して、マイクロ波プローブアンテナー金属ステージ間に形成されるマイクロ波定在波の性質を効果的かつ積極的に利用することで高感度化できることを見出した。適切な厚み・素材の誘電体を薄膜半導体サンプル下に挿入し、電界強度が最大となる腹の位置へ測定対象の薄膜半導体を配置することで、従来比10倍以上の高感度化を実現し、インライン評価装置の開発・上市へ結びつけた。高感度化前後の薄膜半導体サンプルの評価結果を図2に示す。各短冊領域は製造条件が異なっており、最適な製造条件の抽出が可能である。また従来は評価できなかった低い結晶性サンプルに対しても感度を有していることも確認できる。

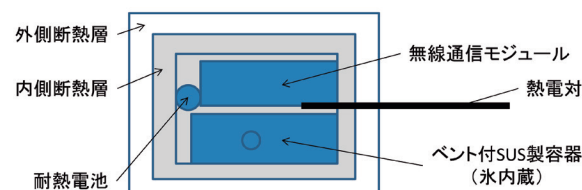
実は高感度化のアイデアは測定不安定性の解消に取り組む中で得たものである。この経験から学んだことは、一見問題視している事象の中にも、その背後のメカニズムを注意深く紐解けば、新たな着想が得られる可能性があるということである。この点には常に留意して今後の研究開発に臨みたい。

3 高温場遠隔温度測定センサの開発

最近の鉄鋼上工程における開発事例として遠隔温度測定センサの開発を紹介する。

製鉄プロセスにおいて温度管理は重要であり、とくに加熱炉・反応炉等では $1,300^{\circ}\text{C}$ を超えるような高温下の温度計測ニーズは多い。一般に、高温域の温度計測には熱電対や放射温度計を用いるが、炉内で測定対象が移動する場合、離散的な場所をスポット的には測温できるが、プロセス内の連続的な温度変化を得ることは難しい。そこでプロセス解析ツールとして、測定対象の傍に配置し、高温下で数十分の間、無線通信により遠隔で測定可能なセンサ(図3)を開発した^{4,5)}。

設備制約により、相反するセンサ小型化と耐熱性能を両立



(a) 内部構造(水平断面図)

(b) 外観写真

図3 センサ内部構造と外観

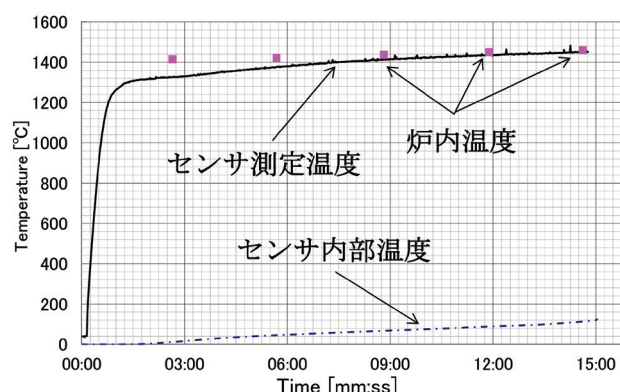


図4 センサ性能評価実験結果

させる必要があったため、断熱構造を多層化し材質・厚みを最適設計するとともに、比熱が大きく、電子機器動作温度域に2つの潜熱(相転移)がある水を、ベント付SUS製容器の中に氷の状態内で内蔵させることで熱容量を確保し内部の温度上昇速度を抑制した。

測温・耐熱性能評価のため加熱炉に本センサを挿入し、炉内(設定温度 $1,600^{\circ}\text{C}$)の温度を約15分間連続で測定した結果を図4に示す。 $1,400^{\circ}\text{C}$ 超の高温環境下においてもセンサ内部は動作温度(150°C)以下を維持し、無線通信によって炉外から熱電対出力を測定できることを確認した。測温値は最終到達温度 $1,460^{\circ}\text{C}$ に対し誤差 20°C 以内で安定していた。

開発センサは、測定対象と共に移動しながら測温することで、プロセスに追従して時間・空間的に連続した温度履歴・分布を得ることができる。ITmk3商用プラントの回転炉炉床⁶⁾等へ適用し、実プロセスの温度履歴と炉内温度分布の実測に成功し、操業条件の改良に活用している。

開発初期の基礎特性評価では設計通りの断熱性能が得ら

れないなど失敗も多く、不可能だと思えることが何度かあったが、他分野の研究者との議論を通じて不足技術・知見を補うことで何とか開発にありつけた。事業領域が多岐に渡る当社のメリットの一つだと考えているので、それを最大限活かしていきたい。また、製鉄プロセス全般に言えることではあるが、高温かつ粉塵・水蒸気等計測には過酷な環境が多いため、この開発を通して得た高温プロセス計測技術の経験は今後の鉄鋼上工程での計測技術の開発に活かしていきたい。

4 終わりに

先に紹介させて頂いた通り、私は鉄鋼以外の分野において計測技術研究者としての経験を積んできており、鉄鋼上工程分野のプロセス計測はまだ駆け出しの状態である。当該分野においては、未だ完全には可視化・定量化されていないプロセスおよび計測課題は多く残っており、やりがいのある分野と感じている。他分野での開発経験をもとに、異なる視点からのアプローチを通して鉄鋼業界の発展、ひいては社会に貢献できるように日々の研究開発に精進したい。

最後に、本稿で紹介した事例は社内外の多くの方々のご助言やご指導、議論を通じてなし得たものである。この場を借りて暑く御礼申し上げ、筆を置くことにする。

参考文献

- 1) 住江伸吾, 山下圭三, 尾嶋太, 高松弘行: R & D 神戸製鋼技報, 57 (2007) 1, 8.
- 2) 高橋英二, 迫田尚和, 森本勉, 野中俊克, 堀口史郎, 松下康広: R & D 神戸製鋼技報, 58 (2008) 2, 62.
- 3) 高橋英二, 迫田尚和, 朝日賢一, 福本陽: 三計測自動制御学会論文集, 48 (2012) 12, 863.
- 4) 迫田尚和, 毛笠光容, 丸山政克: R & D 神戸製鋼技報, 64 (2014) 1, 99.
- 5) 迫田尚和, 毛笠光容, 丸山政克, 真鍋知多佳, 朴海洋: CAMP-ISIJ, 27 (2014), 329.
- 6) 菊池晶一, 伊東修三, 小林勲, 津下修, 徳田耕治: R & D 神戸製鋼技報, 60 (2010) 1, 29.

(2016年5月13日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

神戸大学 名誉教授・東北大学 末倒エネルギー研究センター 客員教授

小島 史男

今回の鉄鋼上工程計測への挑戦についての迫田さんの記事、大変興味深く拝見いたしました。同氏とは共同研究を通じて、先端計測にもとづく非破壊評価に関する研究討論を続けてまいりましたが、その議論を通じて専門領域にとらわれず周辺技術にも精通しておられることを常々感じておりましたが、本文を通じてもともと異分野の研究者であったこと納得することができました。

神戸製鋼に入社されてはじめて取り組まれたのは薄膜半導体向けのライフタイム測定装置の開発でした。マイクロ波の反射率の緩和時間を計測することで半導体の非破壊評価を実現することに取り組まれたのですが、薄膜半導体の光キャリア信号強度に課題があることから高感度化をめざされます。興味深いのは、マイクロ波と光励起キャリアの相互作用をモデル化することで、電磁現象場の環境を模擬したシミュレーションと実験による検証を組み合わせ、実用化にこぎつけられたことだとも思います。計測技術は本質的に逆問題解析であり、そのことを具現化された事例がこのようなところにあったのかと改めて感銘いたしました。

記事後半の鉄鋼上工程計測への挑戦ですが、こちらはプロセス制御の高度化を図るうえでも、最後に残された重要な計測技術といえるでしょう。一般的に温度・流量・

湿度等プロセス制御で活用できる計測情報はあまり多くありません。生産工程での過度的な現象を精密に把握するには、どこまで計測装置がアクセスできるか、またセンサの個数はどの程度必要かなど多くの制約のなかで計測のシステム化が課題となってきます。迫田さんが開発中の温度測定センサはプロセス内の連続的な温度変化を無線通信により遠隔的に監視できる装置ということですが、このような温度情報が得られると、高温超音波計測とのセンサ統融合により、生産上工程での過度的な製鋼プロセスを精密に把握することが可能となるでしょう。

非破壊検査技術としては記事の前半と後半は全く別の対象ですが、計測という観点からそのアプローチには本質的に変わらない部分があります。いずれの対象においても、場の状態のシミュレーションを利用して仮想的な環境を実現し、可視化・定量化のためのデバイスの最適設計を行い、研究室での実験を通じて、さらなる精度向上を行う、シミュレーションと実験の相互作用が肝心だとも思います。迫田さんは物理(現象)に深い造詣があり、計測技術をシステム思考の立場で推進しておられると感じました。鉄鋼上工程のインライン計測の開発の今後の展開に大いに期待しております。

新日鐵住金(株) 技術開発本部 プロセス研究所 計測・制御研究部 上席主幹研究員

今野 雄介

同じく鉄鋼プロセスにおいて計測分野の研究開発を行っている立場から、迫田君に応援のエールを送らせていただきます。

計測という分野では、個別の測定対象の物理についてよく理解することがより良い計測につながります。ここでより良いとは、広い測定範囲を持つ・再現性が高い・ノイズが少ないなどの意味です。開発の過程で意図した結果が得られなかった場合には、理論通りに実験は行かないものだと自分を慰めてしまいがちですが、迫田君は、結晶性評価装置の開発においてなぜ違いが生じるかをシミュレーションと実験により明らかにし、より良い計測を実現しました。シミュレーションは、現象を単純化・理想化するためには大変有効な武器で、シミュレーションと実験との違いを考察することで対象の物理の理解が進み、思考実験のみの場合よりも遥かに速く真の答えにたどり着くことが可能です。しかし、シミュレーションには限界があり、使用したコードの不得意な領域では真の物理と違った結果が出る場合があります。この点には気をつけて、今後もシミュレーションと実験の両輪を活用して研究開発を進めて頂きたいと思います。

下工程の計測は、製品管理のために精密さを求められ

るため、どちらかというと既存の装置の原理に沿った改善や改良が主となるのに対して、上工程では、これまで計る方法が無かったが何とかして計って欲しいというニーズが主になります。つまり、今まで誰も作ったことの無い装置を新たに開発しなければなりません。このような新しい計測装置を開発する場合は、鉄鋼分野の技術だけでは解が無い場合があり、大学での最先端の研究あるいは他の業界の知識も総動員して取り組む必要があります。炉内温度センサの開発においても、容器形状や容量の選定、断熱材の選定等に苦労されたかと思いますが、他分野の研究者との議論を通じて解決されたということで、自身の経験値や仕事の幅も大きくステップアップしたのではないのでしょうか。

私が20代(つまり20世紀)の時に、大先輩から「高炉の中を見るのは、月の裏側を見るよりも難しい」と言われました。しかし、現在は21世紀となり月周回衛星がハイビジョンで月の裏側の映像を送ってくる時代です。ある意味究極の上工程計測である、高炉炉内の計測も迫田君の研究によりきっと可能になるに違いありません。今後も数少ない上工程計測のスペシャリストとしてご活躍下さい。