

入門講座

実験テクニック編（流体計測）
応用とトピックスー1

鉄鋼生産プロセスにおける圧力計測

Pressure Measurement in Iron and Steel Making Process

武石芳明
Yoshiaki Takeishi

住友金属工業（株）総合技術研究所
基盤技術研究部 次長

1 はじめに

圧力計測は、歴史的に見ると真空および大気圧の存在を科学的に証明したトリチェリ（E. Torricelli）の実験（1643年）に始まる。すなわち、水銀を満たしたガラス管を水銀容器に逆さまに立てた時、約760mm一定に保たれる水銀柱が容器の水銀表面に加わる大気圧と釣り合い、ガラス管上部にできる空間が真空であることを示した実験である（実際に水銀で実験を行ったのは、V. Vivianiと言われている¹⁾）。この実験をもとに、B. Pascalは、真空および大気圧に関する追試を繰り返す中で圧力の概念を確立し、圧力の等方性・等伝達性に関するパスカルの原理（1653年）を発見するに至った²⁾。圧力の単位であるTorrおよびPaは、それぞれこの両名にちなんで付けられたものである。

トリチェリの実験以降、圧力測定には液柱型圧力計（マンメータ）が主に用いられてきたが、高圧測定に限界があることから、1830年頃J. Perkinsらが、重錘型圧力計の原型となる自由ピストンを利用した方法を考案した³⁾。ダイヤフラム型圧力計は、1797年にN. J. Conteにより考案され、1844年にはL. Vidieが、波状ダイヤフラムを真空箱に張り付けたアネロイド型気圧計に発展させた。また、弾性型圧力計の代表ともいえるブルドン管圧力計は、1849年にM. SchinzとE. Bourdonによりそれぞれ独立に発明され、蒸気機関の圧力計測に多用された。その後、19世紀後半からの電気工学の発展にともない、ダイヤフラムやブルドン管の弾性変形を電磁氣的に変換することによって、圧力の測定および記録が精度よくできるようになった^{4,5)}。さらに、20世紀に入ってから電子工学の進展および20世紀半ば以降における半導体工学の発達にともない、圧電（ピエゾ）効果あるいは半導体の電気抵抗変化を利用した圧力計測法⁶⁾が開発された。また、最近では、化学反応による発光強度を利用した感圧塗料⁷⁾も開発実用化されている。

圧力計測は、工業計測の基本であり、プロセスの制御および設備・操業管理には必要不可欠である。また、流量、流速、液位等の流体計測手段としても、差圧式流量計、ピトー管流速計、差圧式液位計等に広く応用されている⁸⁾。

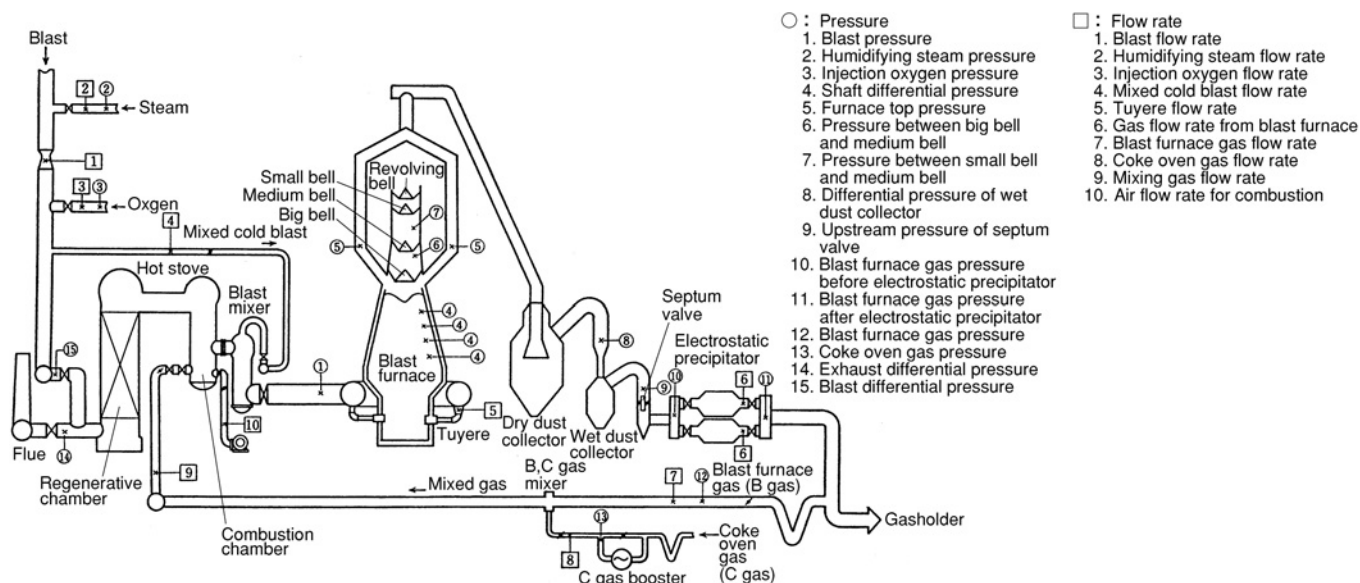
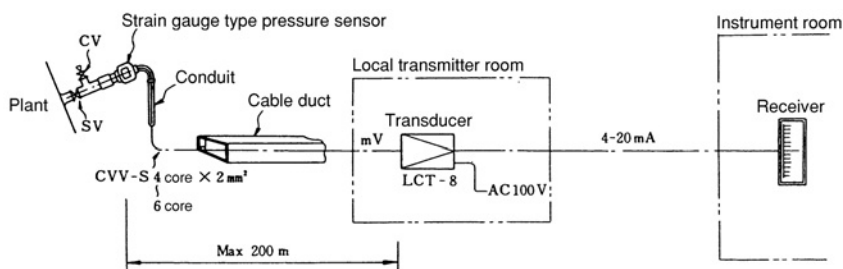
鉄鋼生産プロセスでは、材料あるいは鋼材の加熱、反応、冷却はおもに流体を介して行なわれるため、プロセスの制御・管理には流体計測としての圧力計測が重要であり、圧力計は各プロセスに設置されている。ここでは、鉄鋼生産プロセスにおける圧力計測として、製鉄プロセス、製鋼プロセス、圧延プロセスおよび表面処理プロセスにおける計測例を紹介する。

2 製鉄プロセスにおける圧力計測

製鉄プロセスは、原料である鉄鉱石を溶融還元して銑鉄を抽出するプロセスであり、原料処理、焼結、コークスおよび高炉に分けられるが、ここでは、鉄鋼生産プロセスの心臓部ともいえる高炉における圧力計測例について述べる。

2.1 高炉における圧力計測例

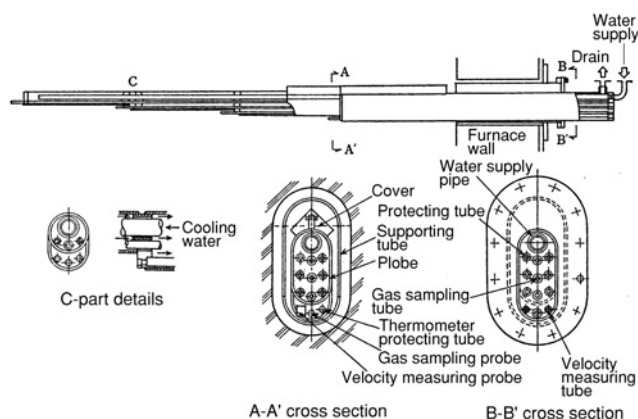
高炉は、内容積が3000～5000m³の巨大な反応容器であるとともに炉内反応は非常に複雑である。一方、製鉄所全体の健全な運営のためには、安定した溶銑の供給が高炉の使命である。したがって、高炉には各種計測機器が取り付けられているとともに炉況判定のための数学モデルが開発され、安定操業のための制御が行われている^{9,10)}。高炉における圧力計測の一例をFig. 1に示す¹¹⁾。高炉本体においては、送風圧力、シャフト圧力、炉頂圧力およびベル間圧力が測定され、おもに炉内の通気性および反応状況の監視に使われる。圧力計としては、一般に歪みゲージ式あるいは半導体抵抗式が用いられ、センサは、Fig. 2に示すように保守および導圧管パージ用のバルブを介して設置される¹²⁾。高温流体の測定にあつ

Fig. 1 Typical pressure and flow rate measurements for blast furnace¹¹⁾Fig. 2 A typical instrumentation of strain gauge type pressure sensor¹²⁾

ては、圧力計保護のために、パイプあるいはタンクサイフォンを介して設置する⁵⁾。エンジンの排気・吸入圧力測定用に開発され、300℃程度の高湿ガスであれば直接測定できる水冷ジャケットを備えた圧力計も市販されている¹³⁾。圧力計からの電圧信号は、ケーブルの抵抗による電圧降下で誤差が大きくなるためケーブル容量の選定および伝送距離には注意を要する。長距離伝送には、電流信号を使うのが一般的であり、工業計器は、4～20mA出力のことが多い。

高炉は、巨大な反応容器であるため、前述したような炉壁からの圧力や温度のみの計測では、炉内部の状況を十分に監視することは難しい。そこで、各種計測器を取り付けたゾンデを挿入し、炉内部の状況を測定する。Fig. 3は、熱電対およびガスサンプリング管を備えたゾンデの一例¹¹⁾を示すが、最近では、多画素イメージファイバを取り付けた画像計測技術⁹⁾も確立されている。炉内圧力は、ガスサンプリング管に取り付けた圧力計により測定される。また、羽口ゾンデを用いた炉内圧力分布測定による高炉炉心活性度検出技術も開発されている¹⁴⁾。

高炉では、上部より装入される鉄鉱石とコークスの制御も、

Fig. 3 A typical water cooling sonde fixed under bell¹¹⁾

安定操業および燃料比低減のための重要な管理ポイントであり、装入原料の層厚および降下速度に関する種々の計測法が開発されている^{15, 16)}。この装入原料の層厚および降下速度計測法の一つに、鉄鉱石とコークスとの通気抵抗差を利用した差圧計測法がある^{17, 18)}。本方法は、炉頂から一定位置に挿入された導圧管間の差圧の経時変化を測定するものである。一般に鉄鉱石の通気抵抗は、コークスのそれに比べて数倍大き

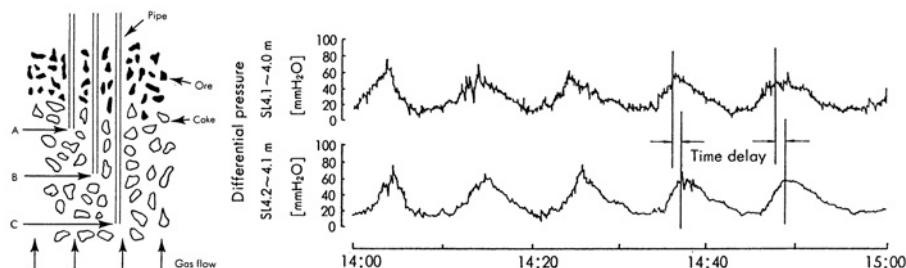


Fig. 4 A method for measuring thickness and descending speed of burdens used gas pressure loss¹⁷⁾

いため、差圧は、Fig. 4に示すように時間変動する。この差圧変動より鉄鉱石とコークス層を弁別するとともにそれぞれの差圧変動の時間遅れを相互相関関数から求め、降下速度および層厚を算出するものである。

3 製鋼プロセスにおける圧力計測

製鋼プロセスは、溶銑から炭素をはじめ珪素、磷、硫黄等の不純物を除去し、必要に応じて合金成分を添加することによって鋼塊半製品を製造するプロセスであり、転炉および連続鑄造に大別される。以下、それぞれにおける圧力計測例について紹介する。

3.1 転炉における圧力計測例

転炉では、ランスから溶鋼面に吹き付けられる高圧酸素ジェットによる激しい攪拌と反応で脱炭が促進されるとともに石灰等の滓化により脱珪、脱磷、脱硫反応が進行する。鋼材の成分および性質は、転炉で最終的に決定されるため、吹錬時間、溶鋼温度、溶鋼成分等に関し、サブランスによる測定値や排ガス分析値をもとにしたリアルタイムな制御が行われる¹⁹⁻²¹⁾。転炉における計測制御例をFig. 5に示す。

ランスには、通常3～6孔の多孔ラバールノズルが使用されるが、ラバールノズルは、その設計圧力を逸脱すると十分な超音速が得られなくなるため、ノズル圧力の制御が重要である。島田ら²²⁾は、ラバールノズルの使用圧力が設計圧力と±20%以上異なると、超音速コアの長さが約15%以上短くなると報告している。したがって、スピittingやスロッピング制御²³⁾のために、同一ノズルで圧力を変えて操作すると、超音速コアが短くなり、ジェットのエネルギー低下により溶鋼の攪拌反応が悪化することもあるので注意を要する。また、酸素の圧力計測に当たっては、油分と反応して危険であるため、油を使用しない圧力センサを選択するか十分な脱脂洗浄を行う必要がある。ダイアフラムシールの封液には、ダイフロイルを用いたものが使用される²⁴⁾。

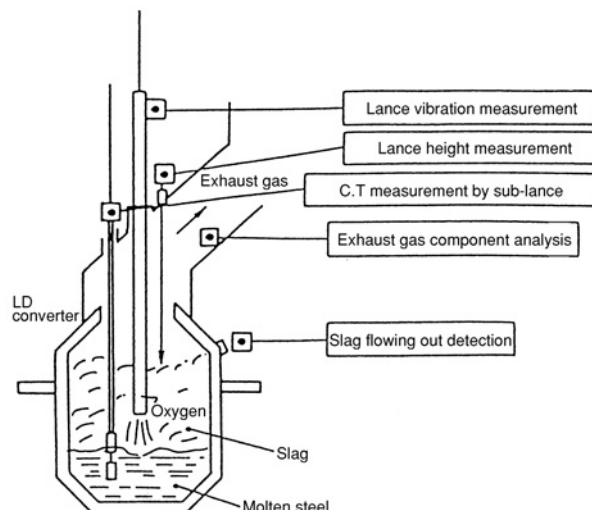


Fig. 5 Typical measurement and control for LD converter²¹⁾

3.2 連続鑄造における圧力計測例

転炉でつくられた鋼は、タンディッシュからモールドを介して連続鑄造機に注入され、冷却凝固過程を経てスラブやブルーム等の鑄片に加工される。連続鑄造においては、モールド湯面レベルの安定化および二次冷却帯における均一冷却が、鑄片の品質に大きく影響をおよぼす。モールド湯面レベルの制御は、スライディングノズルの開度制御により行われる^{10, 25)}が、圧力計測は、その際の油圧制御に用いられる。

二次冷却帯においては、均一冷却のためにスプレーノズルの管理が重要であり、Fig. 6に示すような冷却水流量と圧力との関係を常時監視することによってノズルの閉塞検知が行われる¹²⁾。また、ダミーバーに微圧センサを取り付け、スプレーの噴射圧力を測定することによってノズルを診断する技術も開発されている^{26, 27)}。

4 圧延プロセスにおける圧力計測

圧延プロセスは、熱間圧延と冷間圧延に大別できる。熱間圧延では、加熱炉で1000～1200℃に昇温された鋼材が、圧延機により、厚板、熱延鋼板、鋼管、型钢、条鋼等加工される。冷間圧延は、熱間圧延工程で生成したスケールを酸洗

により除去した後行われる。ここでは、加熱炉における圧力計測例とロールによる圧延圧力計測例について紹介する。

4.1 加熱炉における圧力計測例

連続加熱炉の総合計装の一例²⁸⁾をFig. 7に示す。加熱炉においては、材料を所定の温度まで効率的に昇温するために炉温、バーナ燃焼、排ガス (NO_x) 制御のみならず炉圧制御が重要である。すなわち、炉圧が高すぎると、炉の開閉口や隙間から火炎や高温ガスが吹き出し、熱損失が大きくなるとともに炉体への熱負荷が大きくなり寿命短縮の原因になる。逆に、炉圧が低すぎると、外気が流入し、炉温低下を招き燃料消費量の増加につながる。したがって、炉圧は一般に炉内材

料の下面における圧力が、外気圧とほぼ等しくなるかやや高くなるように制御される。Fig. 8は、炉内圧力の計測例¹¹⁾を示したものであるが、炉内の高温ガスが導圧管内で凝縮水を生じるのでドレン抜きの設置は不可欠である。また、圧力計測にあたっては、炉内圧力が数十Pa (数mmH₂O) と微圧であるため、導圧管内と炉内の温度差に起因するガス密度差が大きく影響する。すなわち、測圧口の圧力と炉内材料下部の圧力および圧力計の指示圧力との関係は次式となる。

$$P_m = P_s - \rho_f g h_s = P_p - \rho_a g h_p \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 P_m ：測圧口の圧力 (Pa)、 P_s ：炉内材料下部の圧力 (Pa)、 P_p ：圧力計の指示圧力 (Pa)、 h_s ：炉内材料下部から測圧口までの高さ (m)、 h_p ：圧力計設置位置から測圧口までの高さ (m)、 ρ_f ：炉内ガス密度 (kg/m³)、 ρ_a ：導圧管内ガス密度 (kg/m³)、 g ：重力加速度 (m/s²)

よって、炉内材料下部での圧力を外気圧と等しくするには、導圧管内と炉内のガス成分が同等とすれば、圧力計の指示値が次式となるように制御すればよい。

$$P_p - P_a = \rho_o g T_o \left(\frac{h_p}{T_a} - \frac{h_f}{T_f} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 P_a ：大気圧 (Pa)、 ρ_o ：炉内ガス (導圧管内ガス) の標準状態密度 (kg/m³)、 T_o ：標準温度

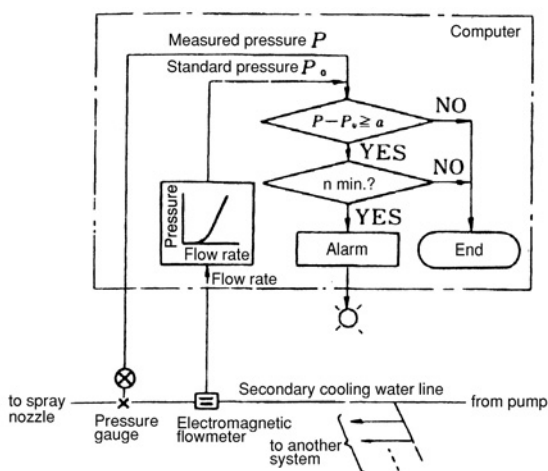


Fig. 6 A clog detector of cooling spray nozzles for continuous caster¹²⁾

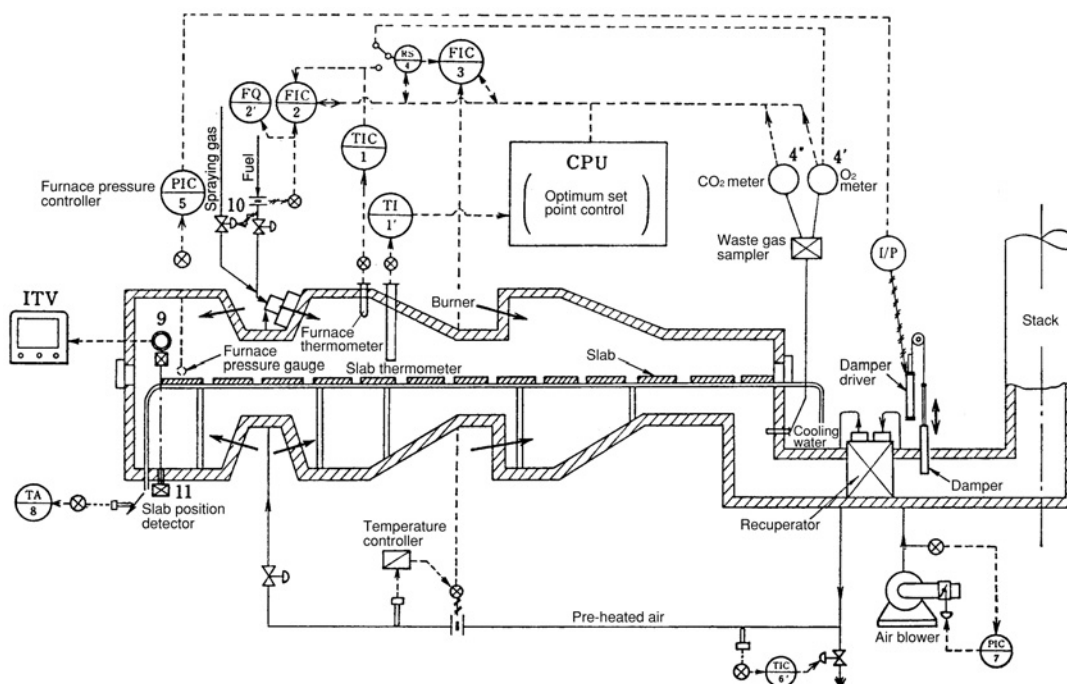
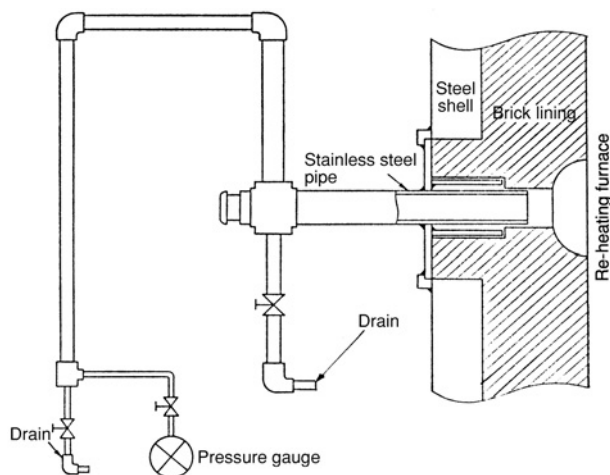


Fig. 7 Typical measurement and control for continuous re-heating furnace²⁸⁾

Fig. 8 A pressure measuring method for re-heating furnace¹¹⁾

(273.15K)、 T_a ：導圧管内ガス温度 (K)、 T_f ：炉内ガス温度 (K)

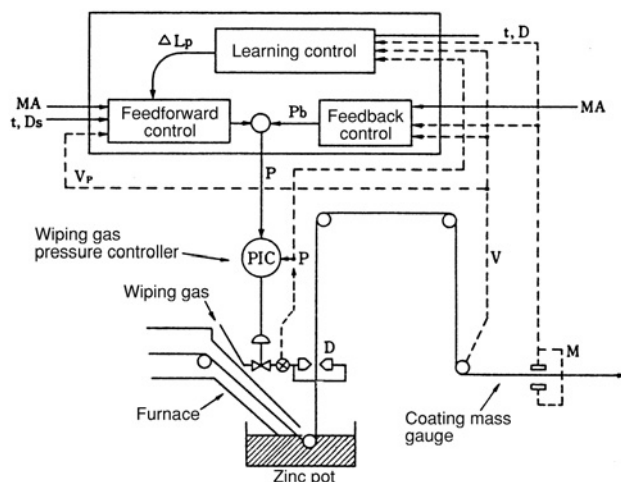
ちなみに、炉内雰囲気ガスが空気で炉内外の温度差が1200Kとすると、圧力計を炉内材料下部と同位置に設置したとしても、測圧口が1m異なれば約10Pa (約1mmH₂O) の圧力差が生じることになる。

4.2 ロールによる圧延圧力計測例

ロールによる圧延圧力は、流体計測ではないが、面圧分布の測定法として、脱スケール用の高圧水ジェットや冷却用スプレーの衝突圧力分布測定への応用も可能であるのでここで紹介する。

ロールによる圧延圧力の分布は、古くは、ロールにあらかじめ埋め込んだピンとロードセルを用いる方法 (測圧ピン法^{29,30)}) で測定されていたが、最近では、感圧フィルムが利用されるようになった。感圧フィルムは、マイクロカプセルに充填された発色剤と顕色剤をそれぞれ塗布したフィルムからなり、これらを重ね合わせて使用する。このフィルムに圧力が加わると、圧力に応じてマイクロカプセルが破壊され、発色剤と顕色剤との化学反応によって発色し、その色濃度を圧力に換算するものである。現在0.2～130MPaの圧力範囲のものが市販されている³¹⁾。長谷川ら³²⁾は、感圧フィルムを用いて、圧延ロール間の接触圧力分布を測定し、圧力指示値の補正が必要な場合もあるが、充分に使用できると述べている。

印刷機のスキージ圧力の測定用に開発されたセンサシート³³⁾も面圧分布の測定に有効である。このシートは、ポリエステルフィルムの上に感圧抵抗物質と導電物質であるシルバーペーストを格子状に印刷し、行電極と列電極を形成したものである。このシートに圧力が加わると、格子交点の感圧抵抗物質の抵抗が変化し、この抵抗変化が、行および列方向の電

Fig. 9 A typical coating mass control system³⁷⁾

流変化として取り出され圧力に変換される。現在、格子間隔1～5.5mmで44行×44列のシートが市販されている³⁴⁾。シート厚さは約0.1mmであるが、公称の測定精度は±10%であり、今後精度が向上すれば用途も広がると思われる。

この他、近年開発された光学的圧力分布測定法である感圧塗料³⁵⁾も面圧分布の測定に有効である。温度感度が低い感圧塗料も開発されつつはあるが、温度依存性が大きく、高精度測定には温度補正が必要である。Shimboら³⁶⁾は、遷音速ロケットの表面圧力分布の測定実験より、温度補正を加えれば±2%程度の誤差で測定できると述べている。

5 表面処理プロセスにける圧力計測

表面処理プロセスは、金属めっきと有機塗覆装に大別でき、金属めっきは、さらに熔融めっきと電気めっきに分類される。ここでは、連続熔融めっき鋼板のガスワイピングにおける圧力計測例について紹介する。

5.1 連続熔融めっきのガスワイピングにおける圧力計測例

連続熔融めっきは、表面活性化処理した鋼板を亜鉛、アルミニウムあるいは錫等の熔融金属浴に浸漬し、鉄との合金層を介してめっき皮膜を形成するものである。鋼板に過剰に付着した熔融金属は、めっき浴直上に鋼板を挟むように設置された一対のガスワイピングノズルからのガスジェットにより払拭される。Fig. 9は、連続熔融亜鉛めっきにおける付着量制御例を示したものである³⁷⁾。めっき付着量は、おもにワイピングノズルの圧力および鋼板とノズルとの距離を変更することによって制御される。

5.2 圧力計測によるワイピングジェットの特性評価

めっき付着量の制御にあたっては、ワイピングジェットの

鋼板への衝突特性を把握する必要がある。筆者ら³⁸⁾は、スリットギャップが1～2mmと非常に狭いワイピングノズルからの衝突ジェットの特性を、0.1mmの測圧孔により測定した。実験装置の概略をFig. 10に示す。0.1mmの測圧孔は、厚さ3mm、幅150mmの模擬鋼板に穿った孔に、外径0.3mm、内径0.1mmのステンレスチューブを通し半田付した後、鋼板面上で切断研磨することによって設けた。導圧管は、鋼板裏面に切削した溝を通し、鋼板上端より圧力計へ接続した。鋼板裏面の溝にはカバーを取り付け平坦に仕上げ、両面ワイピング時における裏面ジェットの乱れを防止した。この模擬鋼板は、読み取り精度10 μ mの三次元微動装置に取り付け、任意位置に移動できるようにした。なお、圧力計は、感圧素子にシリコンストレングージを使用した電子式圧力伝送器³⁹⁾を用いた。測定結果の一例をFig. 11に示す。ワイピングジェットの衝突圧力比 $(P_w - P_a) / (P_{wm} - P_a)$ とノズル中心からの無次元距離 x / b_p (b_p : 圧力の半値幅) との関係は、ノズル形式によらず、二次元自由ジェットの速度分布に関して理論的に求められたGöertlerあるいはTollmienの解⁴⁰⁾にほぼ一致することを確かめた。

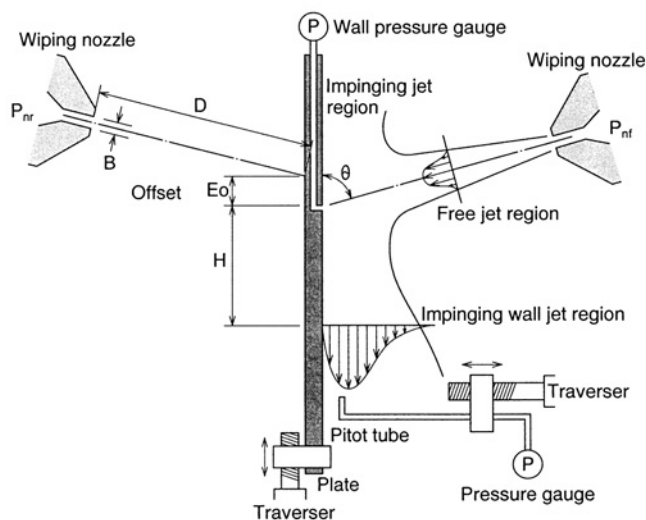


Fig. 10 A pressure measuring method for impinging gas wiping jet³⁸⁾

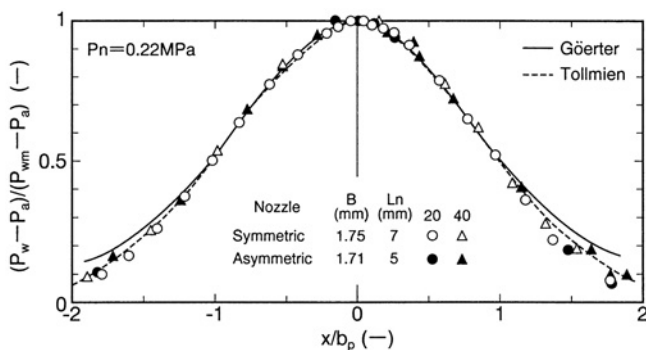


Fig. 11 Impinging pressure distributions of gas wiping jet

このように、0.1mmの測圧孔による衝突圧力の測定は可能であるが、計測にあたっては、測圧孔の応答性を把握しておく必要がある。特に測定流体が気体の場合には、圧力変化により測圧孔および導圧管を通して気体が受圧室に流入するため、圧力計による測定圧力に時間遅れが発生する。導圧管内のガス流れを層流とすると、圧力計の指示圧力 P_p と測定圧力 P_m との関係は、次式で表される一次遅れで近似できる⁴¹⁾。

$$\tau \frac{dP_p}{dt} + P_p = P_m \dots\dots\dots (3)$$

$$\tau = \frac{128}{\pi} \frac{\mu l}{d^4 P_m} \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 P_m : 測定圧力 (Pa)、 P_p : 圧力計の指示圧力 (Pa)、 τ : 時定数 (s)、 t : 時間 (s)、 d : 測圧孔 (導圧管) 径 (m)、 l : 導圧管長 (m)、 μ : 粘度 (Pa $\cdot$ s)、 Q : 受圧室容積 (m³)

ちなみに、上記実験では、 $d=0.1$ mm、 $l=100$ mm、 $Q=3.8$ ccであった。したがって、常温空気の圧力が、大気圧力から50kPa (in gauge) にステップ状に変化した場合の時定数は、約19sと非常に大きくなり、圧力計の指示圧力が十分に安定するには1～2min以上必要である。このように、微細な測圧孔では、静的計測は可能であるが、応答性の面から動的計測は難しく、時定数を小さくするには、受圧室容積をできるだけ小さくしなければならない。

5.3 ワイピングジェットの圧力変動計測例

連続溶融亜鉛めっきのガスワイピングプロセスにおいて発生する表面欠陥の一つに“さざ波”疵 (Ripple mark) がある。この欠陥は、鋼板長手方向にピッチ数mm、振幅数 μ mで発生する亜鉛めっき付着量の変動である。筆者ら⁴²⁾は、この発生原因の究明を目的に、ワイピングジェットの圧力変動を測定した。“さざ波”疵の発生周波数は、発生ピッチとライン速度より算出すると、1～1.5kHzであり、圧力計としては、高応答性の半導体ピエゾ抵抗効果を利用したものを用いた⁴³⁾。圧力トランスデューサは、外径1.63mm (感圧部0.71mm)、長さ9.53mmであり、共振周波数は、500kHzである。圧力変動の計測にあたっては、導圧管や受圧室を設けず圧力計を直接ガス供給配管およびノズルヘッダ壁に取り付けた。なお、高応答性圧力計は、共振周波数付近では感度が高くなり破損の恐れがあるため、共振周波数の1/5以下で使用するのが一般的である。圧力変動の測定結果と周波数解析結果の一例をFig. 12に示す。これより、供給圧力およびワイピングノズル圧力の変動卓越周波数は1kHz以下であり、“さざ波”疵の発生周波数と一致する圧力変動は特定できな

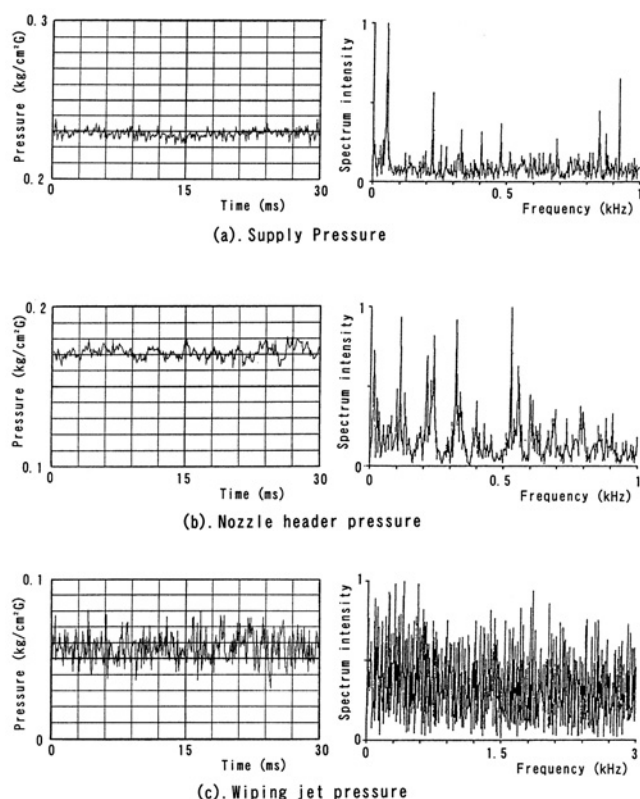


Fig. 12 Pressure fluctuation and spectrum analysis of gas wiping jet

かった。したがって、“さざ波”疵は、ワイピングジェットの圧力変動が直接の原因ではないとの結論に至った。“さざ波”疵の原因は、衝突後、鋼板上を流れるワイピングジェットの境界層内における横渦⁴⁴⁾に起因するのではないかと考えられるが、境界層内における圧力変動の計測等による検証が必要である。

6 おわりに

鉄鋼生産プロセスにおける圧力計測に関し、製鉄プロセス、製鋼プロセス、圧延プロセスおよび表面処理プロセスでの使用例を、文献をもとに概説したが、鉄鋼生産プロセスでは、特徴的なあるいは特殊な圧力計測例は見られない。ただし、使用環境が、高温、多湿、多塵埃、大振動と非常に苛酷であるため、長期信頼性の確保には堅牢な型式を選定するとともに保護対策が必要である。なお、圧力計の選定に当たっては、少し古い文献⁴⁵⁾に型式別メーカーの一覧表があるので参照されたい。

基礎概説でも述べられているように、圧力計測は、境界壁面での測定と流体内部での測定に大別できる。境界壁面での測定に関しては、現在多くの圧力計が市販されており、測定レンジ、精度、応答性等測定目的に応じたものを選択することができる。また、最近では、感圧フィルム、感圧シート、

感圧塗料等が開発され、圧力場も点計測から面計測が可能になってきた。圧力の面計測法に関しては、センサのさらなる精度向上が望まれる。

一方、流体内部の測定においては、導圧管の挿入を余儀なくされ、流れ場が乱されるため、精度よい測定が難しい。今後、このような流体内部の圧力計測法として、非接触法等の新しい測定法が開発されることを期待する。

参考文献

- 1) 細井 豊：教養 流れの力学 (上) —流れの力学史—, 東京電機大学出版局, (1990), 31.
- 2) 巽 友正：パラドックスとしての流体, 培風館, (1996), 159.
- 3) 下村 弘編集：世界大百科事典, 平凡社, (1993), 1.
- 4) 山崎 洋：日経メカニカル, (1989) 291, 106.
- 5) 技術資料 流体計測法, 日本機械学会, (1985), 1.
- 6) 大田英輔, 斎藤正泰：日本機械学会第525回講習会教材, (1981), 13.
- 7) B. G. McLachlan and J. H. Bell : Exp. Thermal and Fluid Sci., 10 (1995), 470.
- 8) 笠木伸英, 木村龍治, 西岡通男, 日野幹雄, 保原 充編集：流体実験ハンドブック, 朝倉書店, (1997), 72.
- 9) 大森豊明監修：普及版センサ技術, フジ・テクノシステム, (2000), 732.
- 10) 的場祥行, 高橋亮一：第150回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, (1993), 15.
- 11) 鉄鋼便覧I基礎, 日本鉄鋼協会, 丸善, (1981), 715.
- 12) 羽田守幸：計量管理, 32 (1983) 9, 568.
- 13) ひずみゲージ式変換器, (株) 共和電業カタログ
- 14) 富田幸雄, 小谷 茂, 高島光一, 田中勝博, 布村征司郎：日新製鋼技報, (1997) 75, 11.
- 15) 田宮稔士：第76・77回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, (1981), 17.
- 16) P. G. May : 2nd European Ironmaking Congress, (1991), 1.
- 17) Nippon Kokan K. K. : Trans. ISIJ, 27 (1987) 10, 831.
- 18) 木村亮介：センサ技術, 9 (1989) 13, 75.
- 19) 田中駿一, 山本倫久：日本鋼管技報, (1977) 73, 11.
- 20) 福味純一, 滝 千尋, 畑中聡男, 小倉英彦：鉄と鋼, 76 (1990) 11, 1956.
- 21) 前田政和：第150回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, (1993), 139.
- 22) 島田道彦, 石橋政衛, 森瀬兵治：製鉄研究, (1969) 266, 75.

- 23) 石川英毅, 溝口庄三, 瀬川 清: 鉄と鋼, 58 (1972) 1, 76.
- 24) 松山 裕: 実用工業計測, 日刊工業新聞社, (1999), 134.
- 25) 高橋亮一, 木村和喜: 日本機械学会誌, 103 (2000) 979, 392.
- 26) 岸野孝信, 木村雅保, 上田 輝, 細谷誠一: 材料とプロセス, 5 (1992), 226.
- 27) 松尾勝良: 第153・154回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, (1995), 189.
- 28) 鉄鋼便覧Ⅲ (2) 条鋼・鋼管・圧延共通設備, 日本鉄鋼協会, 丸善, (1980), 1279.
- 29) 圧延理論とその応用, 日本鉄鋼協会, 誠文堂新光社, (1969), 228.
- 30) 戸澤康壽, 中村雅勇, 加藤 隆, 石川孝司, 井上健次: 塑性と加工, 21 (1980) 238, 999.
- 31) 富士写真フイルム (株) カタログ: 圧力測定システム (プレスケール)
- 32) 長谷川晴久, 小松禎史, 志田 茂: 東海大学紀要工学部, 37 (1997) 2, 161.
- 33) ニューロング精密工業 (株) カタログ: 圧力情報をコンピュータ画面に表示
- 34) 蒲田工業 (株) カタログ: 圧力分布測定装置.
- 35) 浅井圭介: ながれ, 18 (1999), 215.
- 36) Y. Shimbo, K. Asai, H. Kanda, Y. Iijima, N. Komatsu, S. Kita and M. Ishiguro : AIAA-98-2502, (1998).
- 37) 安藤成海, 岩崎清俊, 福田豊史, 前原一雄, 小野泰太郎, 笠井研治: 実務表面技術, 29 (1982) 3, 160.
- 38) 武石芳明, 青木健朗: 鉄と鋼, 81 (1995) 2, 135.
- 39) 大倉電気 (株) カタログ: 電子式圧力伝送器
- 40) N. Rajaratnam 著, 野村安正訳: 噴流, 森北出版, (1981), 1.
- 41) 大島康次郎: 自動制御, 共立出版, (1971), 11.
- 42) 武石芳明, 麻生栄一郎, 岩本英也, 相良睦雄: 材料とプロセス, 10 (1997), 606.
- 43) ティアック (株) カタログ: 半導体圧力トランスデューサ (kulite)
- 44) 種子田定俊: 画像から学ぶ流体力学, 朝倉書店, (1988), 148.
- 45) 特集センサ購入ガイド第4部圧力・差圧センサ, 日経メカニカル, (1989) 291, 117.

(2000年8月8日受付)