

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4

流量計測

Flow Rate Measurement

飯田 修
Osamu Iida

川崎製鉄(株) 水島製鉄所
制御技術部 制御技術室 室長

1 はじめに

鉄鋼製品は製銑、製鋼、圧延、表面処理などの様々な製造プロセスを経て作り出されるが、高品質な製品を安定的に製造するためには、各製造工程において、温度、圧力、レベルなどの多様なプロセス量を正しく測定することが不可欠である。流量についても、非常に重要でかつ基本的な測定対象のひとつであり、鉄鋼製造プロセスには数多くの流量計が設置され、工程的な測定が行われている。その測定対象は気体、液体、固体(粉体)と多岐にわたっており、また高温、悪環境、大流量などの特殊な条件の下での測定が必要となる場合が多いため、一般の製造業で用いられている流量測定方法だけでなく、特殊な流量測定方法が用いられることも多い。

本稿では、基礎概説で解説された流量測定方法を中心に、鉄鋼製造プロセスにおける流量測定の応用例について説明する。

2 鉄鋼製造プロセスにおける流量測定対象

流量とは単位時間にある地点を通過する物質の量であり、製造プロセスにおいて物質が移動する場合には、必ず把握しなければならないプロセス量である。鉄鋼製造プロセスでも、気体、液体、固体を問わず様々な物質が移動しているため、流量を測定すべき対象は数多く存在する。Table 1に、測定対象別に分類した一貫製鉄所における計装ループ数を示す。流量ループの数は温度に次いで多く、鉄鋼製造プロセスの中で流量が主要な測定対象のひとつとなっていることがわかる。

またFig. 1は鉄鋼製造プロセスのなかの代表的な設備である溶銑炉(高炉)のプロセスフローである。流量測定の対象には、ガス、空気などの気体や水などの液体だけではなく、固気二相流によって搬送される粉体などもあることがわかる¹⁾。

高炉に限らず、鉄鋼製造プロセスでは多様な状態の物質の流れを測定している。Table 2に鉄鋼プロセスにおける主な流量測定対象を示す。

Table 1 Classification of measurement loop in a steel works	
objects of measurement	number of measurement loop
temperature	7296
flow rate	5389
pressure	4650
velocity, rpm	2936
level	2306
electric value	1253
component	1249
others	5035
total	30114

Table 2 Main objects of flow rate measurement in iron and steel making process	
phase	main objects of measurement
gas	combustion gas (BFG, COG etc.) air, oxygen, nitrogen, argon etc. exhaust gas
liquid	water, acid liquid, alkaline liquid etc. tar, pitch liquid oxygen, liquid nitrogen
solid (powder)	iron ore, coal, coke etc. (transported by a conveyor)
two phase flow of gas and solid	pulverized coal, pulverized ore

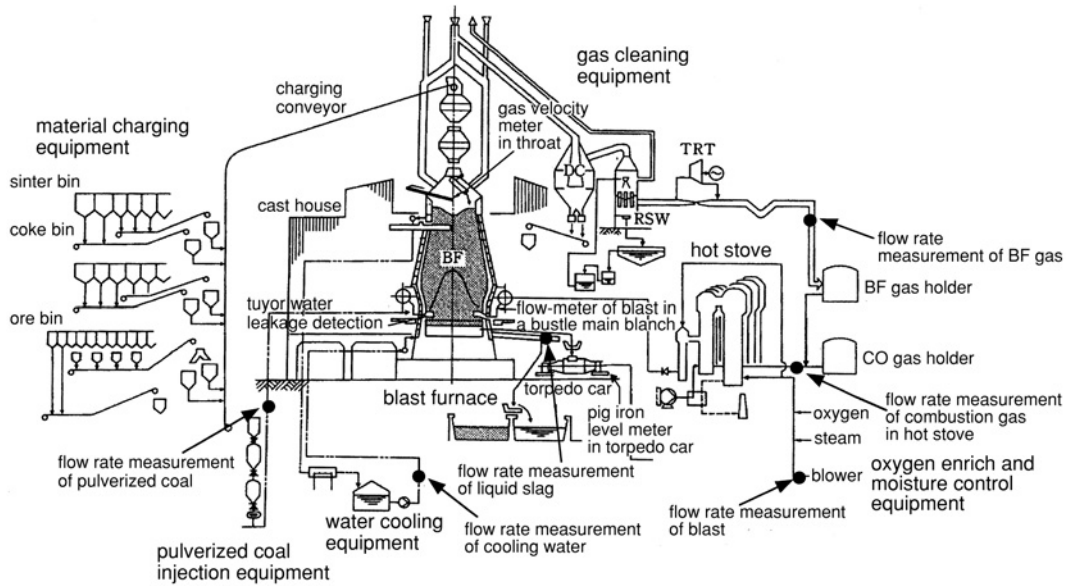


Fig.1 Flow rate measurement loop in a blast furnace

3 気体の流量測定

3.1 測定対象

鉄鋼製造プロセスでは、鋼材を加熱したりするための熱源として燃料用ガスが使用される。これらのガスは、鉄鋼製造の過程でコークス炉や高炉、転炉などからの副生物として発生するものであり、その流量は発生元、分配元および使用側でそれぞれ測定され、管理されている。

また、鉄鋼製造プロセスでは空気や窒素、酸素などのユーティリティガスや蒸気も大量に必要となるため、これらについても発生元、分配元および使用側での流量測定が行われている。

さらに燃焼や冶金反応の結果発生する排ガスについても、公害防止の観点から総排出量管理のために流量測定が行われている。

このように、鉄鋼製造プロセスで測定される気体はごく一般的なものが大部分であり、きわめて特殊な測定対象は存在しない。しかし、発生元での燃料用ガス測定の場合には、粉塵を多量に含むガスが測定対象であり、また排ガス測定の場合には、大口径配管のなかを低流速で流れる大量のガスを測定したりする必要がある。これら特殊な環境条件での測定には、一般的な方法とは異なる測定方法が適用される場合がある。

3.2 一般的な気体流量測定方法

一般の製造プロセスの場合と同様に、鉄鋼製造プロセスにおいても、気体の流量測定には差圧式流量計（オリフィス等の差圧発生機構＋差圧発信器）が最も広く使用されている。差圧式流量計はFig. 2に示すように、可動部がなく、配管中

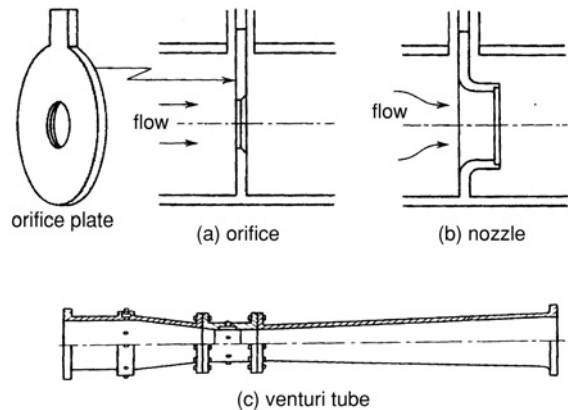


Fig.2 Differential pressure flow-meter²⁾

にオリフィスプレートなどを装入して前後の差圧を測定するだけで、簡便にかつ安定的に体積流量を測定でき、またその規格もJISによって規定されているため、安心して使用できるといった利点がある。また差圧を測定するための差圧発信器についても、近年性能が非常に向上しており、低ドリフトで安定性が高くなってきているため、ほとんどメンテナンスフリーで使用できる。さらに差圧測定のレンジアビリティが広がってきているため、1台の差圧発信器で、大部分の差圧測定レンジがカバーできるようになっている。

その反面、精度のよい測定を行うためには、オリフィス等の前後に長い直管部が必要であること（現実のプラントでは、十分な直管部が取れることは少ない）、原理的に大きな圧力損失が測定によって発生すること、流量－差圧の関係がルート特性であるため低流量域での精度が低下することなどから、測定対象によっては他の方式の流量計を使用するケースもある。

保全面では、差圧発信器の精度管理と導圧管の詰まりやド

レンの対策を行っておけば、長期間にわたって安定的に使用できるが、粉塵を含む気体の測定に使用するような場合には、粉塵によってオリフィスエッジが摩耗したり、極端な場合にはオリフィスプレートに孔が空いたりして測定値に誤差が生じる場合がある。このような異常は、配管からオリフィスをはずして点検しなければ発見することができず、保全面で問題となることがある。

差圧式流量計としては、オリフィス以外にもフローノズルやベンチュリー管、多孔ピトー管なども使用されている。

差圧式以外では、カルマン流量計 (Fig. 3) や透過型超音波流量計 (Fig. 4) などが使用される。前者は、そのレンジアビリティの広さを生かして、小口径配管中のユーティリティガスを精度よく測定するために用いられる例が増加してい

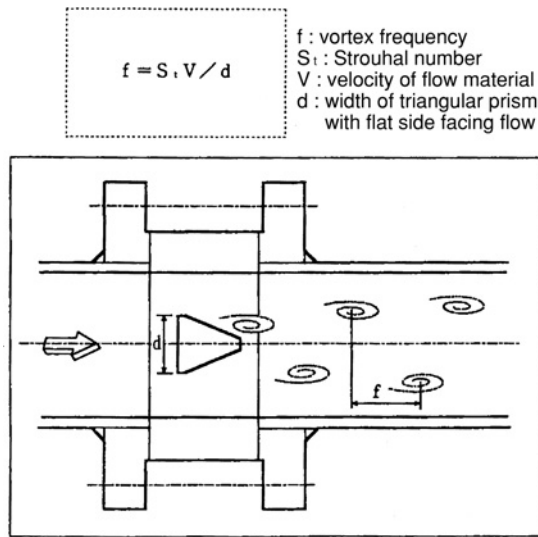


Fig.3 Vortex flow-meter³⁾

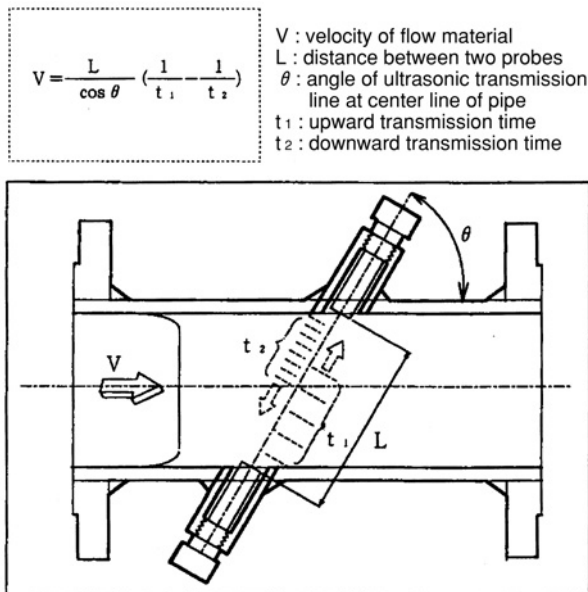


Fig.4 Transmission type ultrasonic flow meter³⁾

る。後者はレンジアビリティがカルマン流量計より更に広く、極低流速の気体の流量が測定可能である点と、測定のための圧力損失がゼロである点を生かして、後述するように省エネルギーの目的で使用されることが多い。

3.3 大口径配管中の気体流量測定

鉄鋼製造プロセスには、気体用の大口径配管 (口径が数m以上の配管) が使用されているケースがある。Fig. 5は高炉の原料となる焼結鉱を製造するプロセスであるが、ここでは焼結鉱を製造する際に発生する大量の排ガスを通すための、直径が5mを超えるような配管がある。焼結製造プロセスから発生する排ガス中には硫黄酸化物や、窒素酸化物が含まれているため、これらの排出量を正しく管理するために、大口径配管中を流れる排ガスの流量測定が行われている。

しかし、配管が大口径であることに加えて管内の流速が遅く、非常に測定しにくいプロセスのひとつである。このような大口径配管の気体流量測定には次のような方法が用いられている。

(1) 多孔ピトー管

多孔ピトー管は、鉄鋼製造プロセスに限らず発電所などの大口径煙道での排ガス測定が必要となるプロセスで最も多く適用されている流量測定方法である。測定原理は、一般的なピトー管と同様に配管中の流体の動圧と静圧を測定して流速を求め、流速と配管断面積から流量を求めるものである。ただし、一般的なピトー管が、配管断面中の1点の流速を測定するのに対して、多孔ピトー管はFig. 6に示すように、圧力検出用二重パイプ中に複数個の導圧孔が設けられており、配管半径方向の流速分布による圧力の違いを平均化して検出するようになっている。導圧孔の位置は配管断面を等面積に分割する位置に設けられている。

測定管の形状や孔の大きさなどは、製作するメーカーによって種々異なるが、原理的には大変シンプルなものであるため、オリフィスと同様にユーザーが設計、製作する場合も多い。

多孔ピトー管を用いて正しい測定を行うためには、ピトー管係数を定める必要があるが、ユーザーが実験的に求めるの

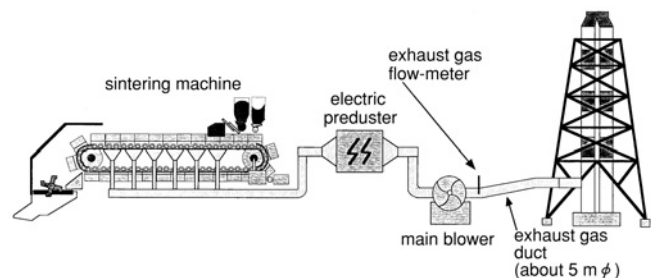


Fig.5 Sintering process

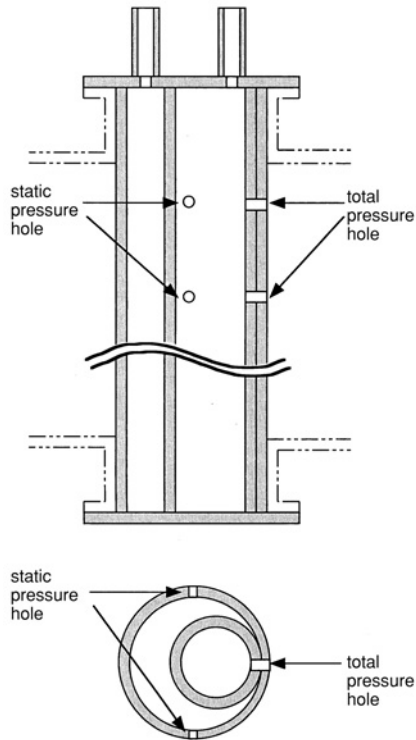


Fig.6 Pitot tube with multi-hole

は難しく、十分な精度を保証することは困難である。また保全面では導圧孔のつまりに十分注意する必要がある、特に煙道排ガス測定に使用する場合は、ガス中の硫黄酸化物による腐食や穴明きに対する対策が必要となる。

(2) 挿入型カルマン流量計

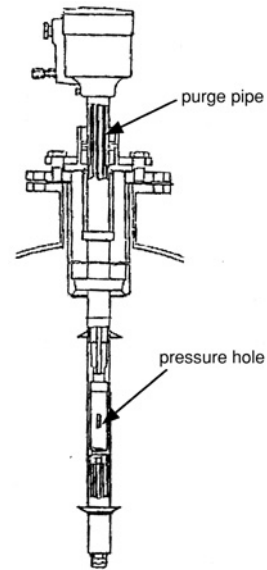
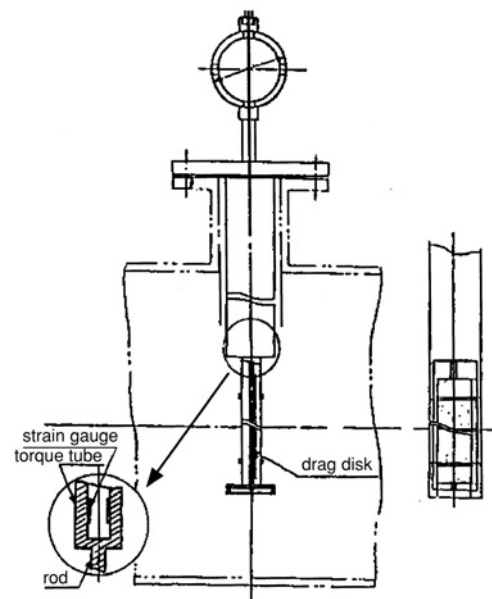
挿入型カルマン流量計は、原理的には通常のカルマン流量計と同じであり、Fig. 7に示すように渦発生体を配管中央部まで挿入し、中央の流れによって発生する渦の発生周期を検出して流量を測定するものである。Fig. 7の例では、導圧孔からパージガスを噴出させ、渦の影響によるパージガスの背圧変化から渦の発生を検出しその発生周期を求めている。この流量計も保全上はパージ孔の詰まりに注意する必要がある。渦検出の方式に圧電素子を使用したものなどもある⁴⁾。

(3) 超音波流量計

大口径配管用の透過型超音波流量計である。気体中の超音波の伝播特性を高めるために、一般用の気体用超音波流量計に比べて発振周波数を低くしている。配管内流速の遅い煙道ガス流量の測定や、圧力バランスによって流れ方向が変化する煙道ガスの測定などには有効な方法である。しかし配管径が5m近くになると、透過特性が悪くなりS/N (Signal to Noise ratio) が低下するため、超音波送受信ヘッドの汚れなどの影響を受けやすくなる。

(4) ドラッグディスク

ドラッグディスクとは、Fig. 8に示すように配管中央部に

Fig.7 Insert type vortex flow meter
(Yokogawa Electric Corporation)Fig.8 Drag disk⁵⁾

流体からの動圧を受けるディスクを挿入し、ディスクに受ける力を連結されたトルクチューブで検出し、流速、流量を測定するものである。トルクチューブにはひずみゲージが貼られており、動圧によって生じるチューブのひずみを検出している。比較的安価であり、10mを超える煙道にも設置可能である。保全上は繰り返し応力によるトルクチューブの劣化に注意する必要がある。

3.4 圧力損失のない気体流量測定

製鉄所のユーティリティガス送給配管は総延長が数十Kmにもわたり、需要先での必要圧力を確保するために、配管内

での圧損をカバーするだけの必要圧力にブローで昇圧されている。ガス流量の計測には一般的にオリフィスを使用されているが、オリフィスによって発生する圧力損失をなくせば、ブローの省電力につながる。そのため、これらの流量測定に圧力損失のない透過型超音波流量計が使用されるようになってきた。

その設置例をFig. 9に示す。ユーティリティガスを外販しているところでは、超音波流量計の測定値が取り引き用として使用されるために、高い測定精度と信頼性が要求される。そのためこのような用途の場合には、2測線式の超音波流量計を使用して精度と信頼性を確保している。

測定対象のガスが水分を含む場合、超音波の送受信子のところにドレンがたまり測定不能となることがあるため、送受信子は必ず斜めに取り付けられる。さらに保全面から、ドレン排出用の配管を設ける必要がある。

超音波流量計の場合、全体の精度検査は行うことができないが(超音波流量計に限らず、どの方式の流量計もオンサイトでのトータルな精度検査は困難である)、受信パルスの遅れ時間から流量を求める演算を行う変換器部分については、模擬パルス遅延回路による検査装置を用いた精度検査が可能である。

3.5 微量流量の測定

鉄鋼製造プラントでは大流量の測定が主体であるが、耐火物の乾燥などに使用されるオフラインの燃焼設備などでは、直径10mm程度の小配管中を流れる気体の測定も行われている。このような微量流量の測定にはサーマルフローメータが使用されることが多い。これはFig. 10に示すように、流体が流れる配管の2箇所に定電流制御されたヒータを巻き、その温度差から配管中を流れる気体の流量を測定するものである。非常にコンパクトなものであるため、流量コントローラと流量調節弁とを一体化したものが使用されている。

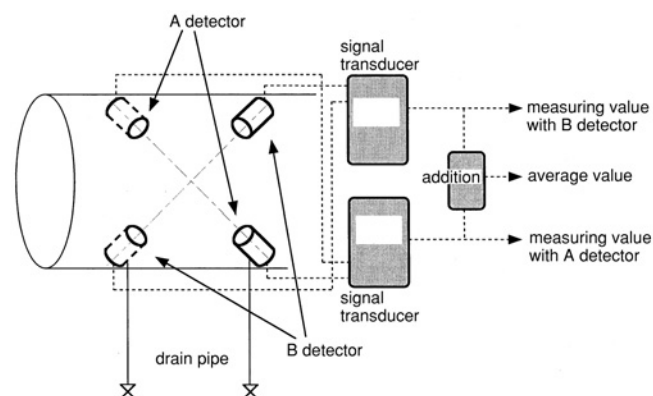


Fig.9 Installation of an ultra sonic gas flow-meter

3.6 直管部が取れない場合の流量測定

どのような原理の流量計であっても、精度の良い測定を行うためには、配管中の流速分布を理論的な分布にできるだけ近づけることが重要であり、そのためには流量計の上流側、下流側に直管部を設ける必要がある。しかし実際のプラントでは十分な直管部を取れない場合の方が多い。このような条件下で精度の良い測定を行うために、流量計の上流側に流速分布を整えるために整流装置を設置することがある⁷⁾。

Fig. 11に整流装置の例と、整流装置を設置した場合の流速分布の変化を示す。整流装置を用いることによって、かなりの効果が得られることがわかる。ただし整流装置自身に圧力損失があるため、使用する場合にはその影響を考慮に入れる必要がある。

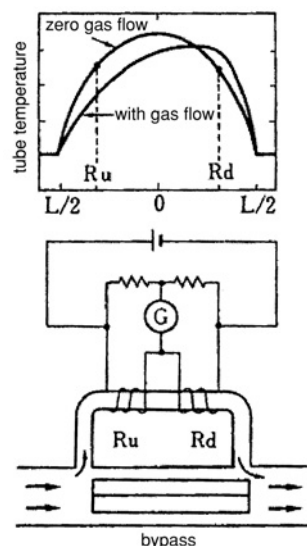


Fig.10 Thermal flow-meter⁶⁾

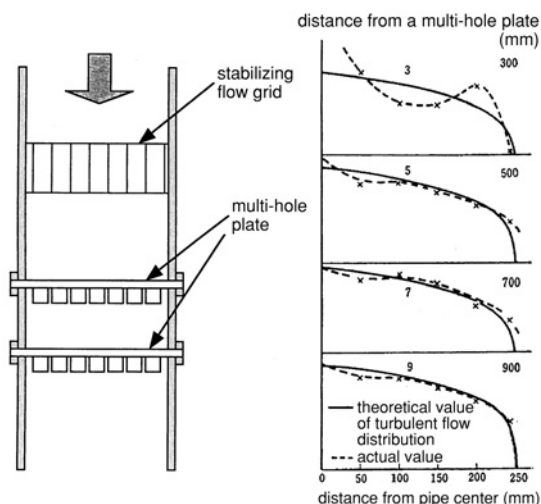


Fig.11 Effect of stabilizing flow equipment

4 液体の流量測定

4.1 測定対象

鉄鋼製造プロセスでは高温の溶融金属や加熱された鋼材を扱うために、製造設備や鋼材の冷却のために大量の水を使用する。さらにそれらの水は大部分が循環再使用されるために、水の供給側、使用側での管理を行うための流量測定が必要となる。

一口に水といっても、一般的な工業用水から冷却に使用されたあとの大量の固形成分を含むスラリー状の水、特殊な設備を冷却するための高純度の純水など様々な形態のものがあり、対象に応じた流量測定方法が適用されている。

水以外にも、冷間圧延や表面処理のプロセスでは、鋼板の処理に使用する酸やアルカリの溶液の流量を測定している。またコークス炉から出る副生ガスから化成品を製造するプラントでは、タールなどの油分を含む液体の測定が行われている。

そのほか、鉄鋼製造プロセスにおける液体流量測定対象の特殊な例として、溶鋼や溶融スラグのような高温溶融物、また液体酸素や液体窒素などの極低温流体がある。

4.2 一般的な液体流量測定方法

液体の流量測定の場合も、気体と同様に差圧式流量計（オリフィス等の差圧発生機構＋差圧発信器）を使用することが多い。特に水の測定の場合は大部分が差圧式である。その長所、短所は気体流量測定に使用する場合と同様であるが、液体の場合は特に、導圧管内および差圧発信器周辺の受圧部までの配管内の液体を凍結させない保温処置を取ることが保全上重要である。

また水の流量測定には、カルマン流量計が使われることも多い。これは最近のカルマン流量計は2線式でかつ検出部と変換器が一体型になっているため、小配管の流量測定の場合は、差圧式よりも施工が簡単で、費用も安くなることによる。カルマン流量計は、一般的な液体の測定以外に、液体窒素や液体酸素などの極低温流体の測定にも使用される。

酸やアルカリなどの腐食性を有する液体の場合は、電磁流量計（Fig. 12）が使用されることが多い。これらの測定対象の場合、電磁流量計のライニングには耐食性のテフロンやセラミックスが使用される⁸⁾。電磁流量計も最近のものは一体型で非常にコンパクトになってきており、また導電率のかなり低い高純度の水の測定にも適用可能となってきている。保全上は、流体の清浄度が低い測定対象については、定期的に電極の清掃を行うことが重要である。また常時水が流量計内部を満たしている場所に流量計を設置する必要がある。

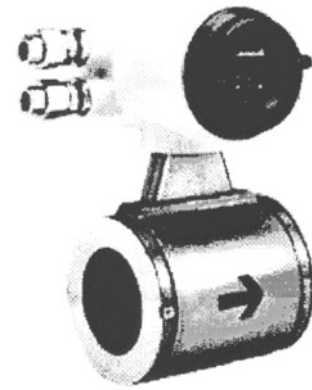


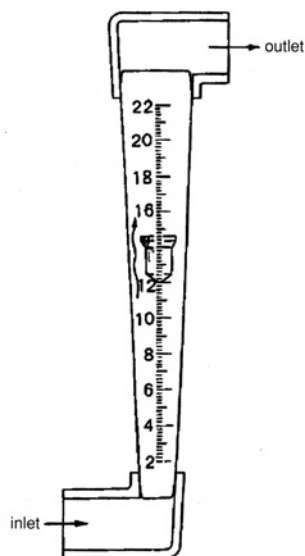
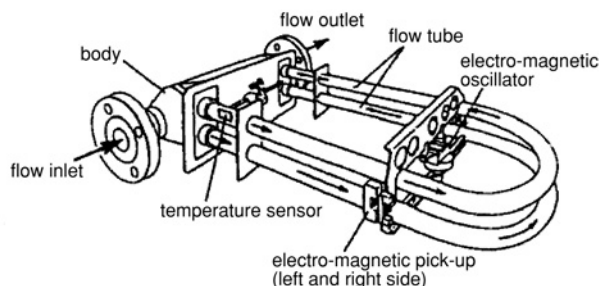
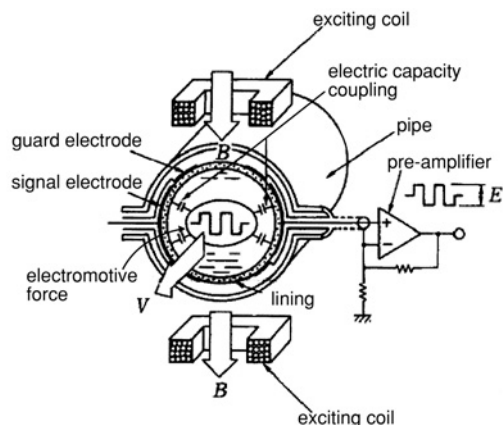
Fig. 12 Electro-magnetic flow-meter
(Yokogawa Electric Corporation)

4.3 スラリー状の液体、油分の多い液体の流量測定方法

鉄鋼製造プロセスで流量測定の対象となる液体には、排煙脱硫設備に使用される石灰乳や圧延工程から発生する圧延スケールを含んだ排水などのようなスラリー状の液体がある。このような固形分の含まれるスラリー状の流体の流量測定に差圧式流量計を使用すると、配管内への固形分の堆積や導圧孔、導圧管への固形分の詰まりが発生し、安定した測定を行うことができなくなることがある。またカルマン流量計の場合も、渦発生体に固形分が付着し測定不能となる場合がある。そのため最近では、特殊な形状をした渦発生体を使用し、汚れの付着を少なくしたカルマン流量計が開発されている⁹⁾。ただし一般的には、このような性状の液体の流量を測定する場合には、流体を遮るもののない構造をもつ電磁流量計が使用される場合が多い。また粘度の高い液体の流量測定にも電磁流量計が使用される。しかし被測定流体に油分が含まれる場合、電磁流量計を使用すると、電極に油膜が付着し測定不能となることがある。そのため重油やタールなどの油分が多いものの測定には面積式流量計（Fig. 13）が使用される場合が多い。また、粘度の比較的小さい油脂系の液体については、コリオリ流量計（Fig. 14）が使用される場合もある。面積式流量計にはフロートという稼動部があり、またフロートが流路を妨げる構造となっているため、固形分を含む液体や固着性の強い液体の場合は、フロートの動作不良や詰まりが発生することがあり、定期的な点検、洗浄が必要となる。また、最近、電極が被測定流体に接液しない無電極電磁流量計（Fig. 15）が開発されており、油分を含む液体の流量測定にも適用できるようになってきた。

4.4 高温溶融物の流量測定

鉄鋼製造プロセスで扱われる高温の溶融物には、溶銑（約1,500℃）、溶鋼（約1,600℃）、溶融スラグ（約1,500℃）や


Fig.13 Area flow-meter¹⁰⁾

Fig.14 Colioliis flow-meter¹¹⁾

Fig.15 Electro-magnetic flow-meter without electrode facing liquid¹²⁾

銅板のめっきに使用される溶融亜鉛（約400℃）などがある。これらの溶融物の流量を、一般的な流量測定法で測定することは不可能であり、全く異なった方法が用いられている。最も簡単な方法は、高温溶融物を耐火物容器で受け、その容器へ流入する、あるいは容器から流出する際の耐火物容器の重量変化を測定して、その変化から高温溶融物の流量を求めるものである。Fig. 16は高炉からの溶銑の流出量を、受銑容器であるトビードカーの重量を測定して求める方法である。

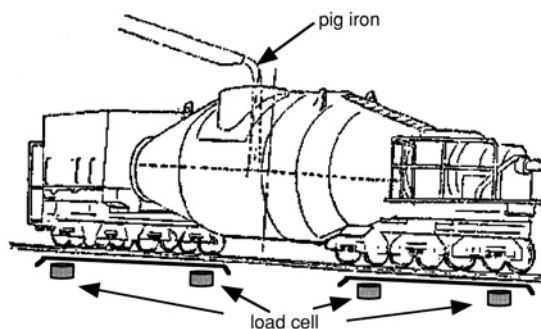


Fig.16 Pig iron weigher

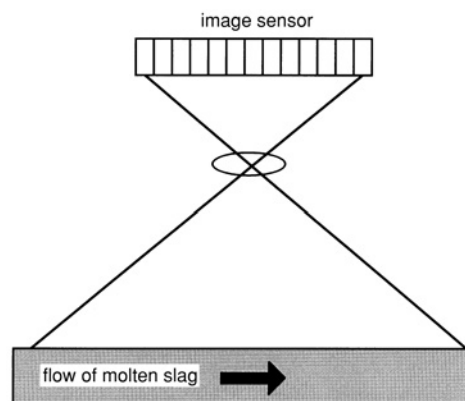


Fig.17 Correlation slag flow-meter

重量測定ではなく、別の原理で流量測定を行う方法も試みられてはいるが、実用化されているものはない。Fig. 17は溶融スラグの流量を求めるための相関式流量計である。溶融スラグ表面の複数点の輝度を測定し、それらの輝度変化の相関から流速を求め、さらに流路の断面積を考慮して流量を推定しようとするものである。また原子力発電所の冷却用液体ナトリウムの流量測定に用いられている渦電流式流量計の適用も試みられてはいるが、実用化には至っていない¹³⁾。

5 固体（粉体）の流量測定

5.1 測定対象

粒状や粉状の鉄鉱石や原料炭などは、一般にベルトコンベアを用いて連続的に搬送される。また高炉に設置されている微粉炭吹き込み設備や精錬工程の溶銑予備処理設備などのように、石炭粉や鉄鉱石粉などの粉状の固体が連続的に気体搬送される場合もある。これらの固体の流量（搬送量）の測定も様々な方法で行われている。

5.2 固体（粉体）の一般的な流量測定方法

ベルトコンベアで搬送される固体の搬送量は、いわば開路を流れる物質の流量に相当し、一般的にはベルトコンベアに

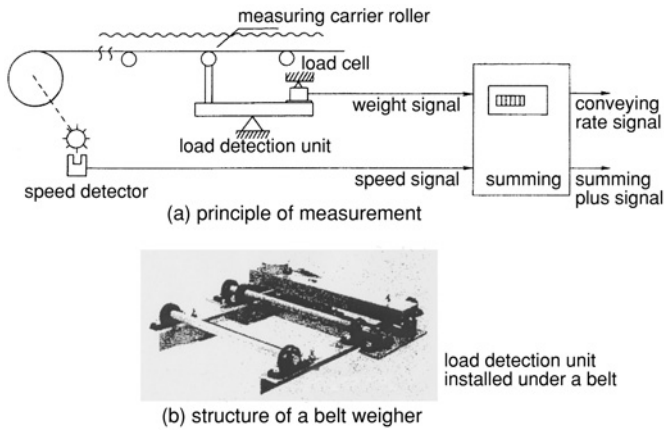


Fig.18 Belt weigher (Kawatetsu Advantec)

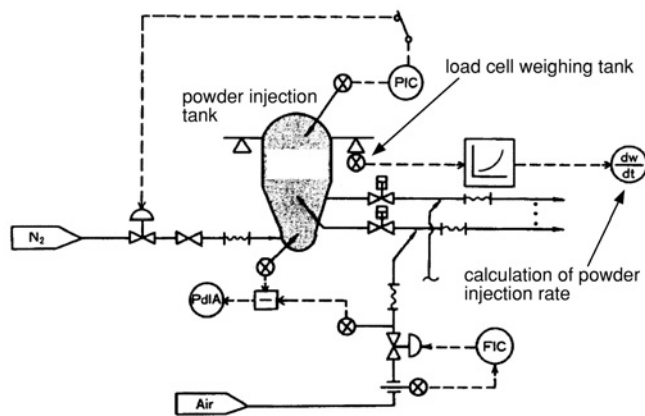


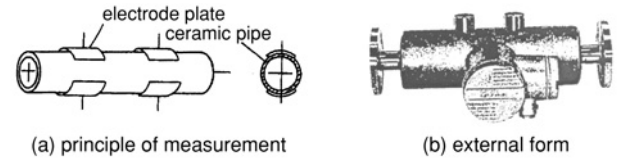
Fig.19 Powder flow rate measurement using detection of weight change

設置したベルトスケールで測定される。Fig. 18にベルトスケールの構成を示す。ベルト上の物質の単位荷重にベルトの移動速度（被測定物の流速）をかけて流量（搬送量）を求めるものである。

また、微粉炭吹き込みの石炭粉のように気体搬送を行う場合は、Fig. 19のように搬送する側またはされる側のホッパーの重量を測定し、その重量変化から搬送される粉体の流量を求める方法が一般的である¹⁴⁾。ただし気体搬送を行うためにホッパーが加圧される場合は、加圧による重量への影響を補正することが必要となる。

5.3 特殊な粉体流量測定

気体搬送で粉体を輸送する場合に、固気二相流中の粉体流量を直接測定する方法が開発されている。Fig. 20は静電容量式粉体流量計と呼ばれるものである。配管中の固気二相流の静電容量を測定するセンサーを2式設置し、静電容量の値

Fig.20 Electro capacity powder flow-meter¹⁵⁾

から配管中を流れる固体の密度を求め、2つのセンサー出力の相関から固体の移動速度を求めて、両者の積から固体流量を求めようとするものである。粉体吹き込みのラインに設置された例はあるが、まだ完全に実用化されたものはない。

6 おわりに

鉄鋼製造プロセスでは、これまで述べてきたように多くの流量測定対象があり、種々の流量測定機器・測定方法が適用されている。これらの中には鉄鋼プロセス独特のものもあり、専用に開発された流量計も数多く存在する。また流量測定のニーズがあっても、実現の困難な測定対象も存在する。今後は、既存の流量測定機器の精度や保全性を一層向上させるとともに、測定困難なプロセスに対して、新しいシーズ技術を利用した新たな測定方法を開発していくことが課題となる。

参考文献

- 1) 真忠達明：センサー技術，13（1993）3，34.
- 2) 山崎弘郎：センサ工学の基礎，昭晃堂，（1985）
- 3) 市原達也：計測技術，27（1999）13，28.
- 4) 谷本 淳：計測技術，27（1999）13，6.
- 5) 山田真由美：計測技術，27（1999）2，27.
- 6) 岩本三千範：センサー技術，12（1992）3，38.
- 7) 岩村忠昭，崎村 博，田宮稔士，瀬川佑二郎：川崎製鉄技報，13（1981）4，129.
- 8) 和田一郎，網中四郎：センサー技術，12（1992）3，17.
- 9) 谷本 淳：計測技術，25（1997）2，23.
- 10) 眞島正市，磯部孝編：計測法通論，東京大学出版会，（1974）
- 11) 山下雄康：計測技術，27（1999）4，66.
- 12) 斎藤 達，植松郁雄：センサー技術，12（1992）3，28.
- 13) 中本香一郎：センサー技術，13（1993）3，22.
- 14) 才野光男，芹沢保文，阪口泰彦，中井歳一，渡辺洋一，牧勇之輔：川崎製鉄技報，17（1985）4，343.
- 15) 松下重忠，毎床辰次：富士時報，54（1981）8，530.

（2000年10月4日受付）