



入門講座

実験テクニック編(流体計測)基礎概説-3

速度測定

Velocity Measurement

井口 学
Manabu Iguchi

北海道大学 大学院工学研究科
物質工学専攻 教授

佐々木康
Yasushi Sasaki

同上 助手

1 はじめに

速度はベクトル量である。流れの速度すなわち流速を測定することは、その大きさ(速さ)と方向を求めることを意味する。流れの方向が決まっているときに速さを求めることは比較的容易であるが、そうでないときの測定は複雑でやっかいである¹⁻⁴⁾。特に速度が時間とともに変化する非定常流れの測定には注意を要する⁵⁻⁷⁾。本稿では今までに開発されている流速計の特徴と適用範囲を概観したのち、鉄鋼業で現在用いられているか、あるいは今後用いられるであろう高温溶融金属用流速計について詳しく述べる。

2 各種流速計の特徴と用途

2.1 ピトー管

風が強い日に手の平を風の向きに垂直にかざしたときと平行にかざしたときとは、手の平に働く力が異なることはどなたも経験されたことであろう。この力の差が速さの自乗に比例することを利用して、18世紀初頭に川の流れの速さをはじめて計ったのがPitotであり、Fig. 1 に示すような流速計をピトー管と呼ぶようになった¹⁾。

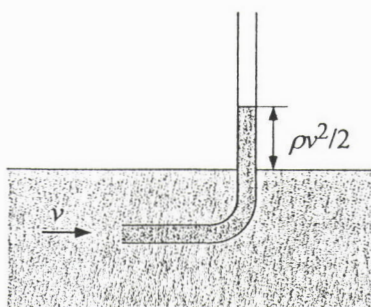


Fig. 1 Pitot tube

ピトー管は速さ v を直接計るのではなく、総圧 p_t と静圧 p_s との差として定義される動圧 p_d を測定して v を求める方法である。

$$p_d = p_t - p_s = \rho v^2 / 2 \dots\dots\dots (1)$$

ここで ρ は流体の密度である。

ピトー管で超音速流の流速測定も可能である¹⁾。2次元流れの測定には、円筒形、球形、半球形、クロー形、コブラ形などの3孔ピトー管が、3次元流れに対しては5孔ピトー管が開発されている。なお、ピトー管の取圧部に小型圧力変換器を組み込むことによって脈動流をはじめとする非定常流速の測定も可能になっている⁵⁾。

ピトー管は定常流の流速測定に関しては最も正確な流速計の一つであるが、取鍋や転炉のように循環流と液面波動が存在するような流れ場の測定には適さない。これは、ピトー管自身が流れ場を乱してしまうだけでなく、液面変動があると静圧が大きく変動し、結果的に動圧が正しく求められないためである。

2.2 熱線／熱膜流速計

風が吹くと体感温度が下がることはよく知られている。これは風によって体の表面から熱が奪われるためである。このような熱の伝達形態は強制対流熱伝達と呼ばれており、奪われる熱量と風の速度との間には密接な関係がある^{1,8-10)}。熱線／熱膜流速計は強制対流熱伝達を利用して流速を求める方法であり、とりわけ熱線の歴史は1909年にまで遡るが¹⁰⁾、現在使われている形式がほぼ完成したのは1950年代である。Fig. 2 に示すように、熱線は直径が $1\mu\text{m}$ から $5\mu\text{m}$ 、長さが直径の300倍ほどのタングステン線や白金線で作られており、指示棒の先端にスポット溶接されている。筆者の一人も30年ほど前に溶接を試みたが、かなり苦労したことを覚えている。熱膜は厚さ $0.1\mu\text{m}$ から $1\mu\text{m}$ の白金膜を楔円錐、あるいは円柱状の石英製の基材に付着

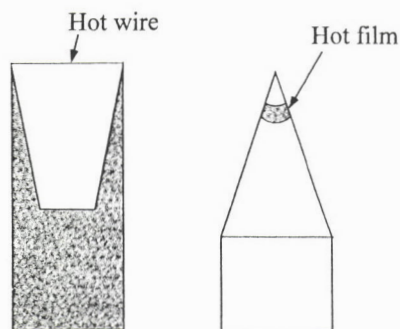


Fig.2 Hot wire and hot film

させて用いる。熱線や熱膜の加熱温度(K)と流体の温度(K)との比を加熱度というが、一般に気体の場合は約1.8、液体の場合は1.05程度である。1本の熱線であれば1次元流れの速さしか測定できないが、2本の熱線をX字形やV字形に配置することによって、2次元流れの流速を求めることができる。また、やや煩雑であるが、2本の熱線を回転させることによって3次元流れの流速を求めることもできる。

熱線／熱膜流速計の特徴をまとめると以下のようになる。

- (1) 測定原理が簡単
- (2) 信号処理が比較的容易
- (3) 時間的、空間的分解能が極めて高い。流れ場の完全な時系列情報が得られる。

熱線／熱膜流速計を用いる際に最も留意すべき点は、流体の温度変動である。上述の加熱度の値から容易に推察されるように、熱膜の場合に特に問題となる。温度が変化すると、流速計は流速が変化したものと見なししてしまう。この対策として、流れ場の温度変動による流速信号の補正を行う2線式の方法が開発されている。熱線や熱膜は時間とともにその表面が汚れるため、感度すなわち速さと熱伝達との関係は徐々にではあるが変化していく。使用前後の検定を怠ってはならない。新しいものの使用は出来るだけ避け、あらかじめ十分になじませてから使うことをお奨めする。また、流れの方向が時間的に左右に変化するような振動流れでは、熱線の感度が左右で異なるため、検定は両側について行わねばならない。熱線／熱膜流速計に関しては今までに膨大な成果が蓄積されている。詳細については諸家の解説を参照されたい^{1,8-10)}。

材料工学の分野では、取鍋や転炉の水銀モデル実験において、熱膜流速計がよく用いられていた。ただし、熱膜は一度大気中へ取り出すと感度が変化しやすいので検定が容易ではなく、現在ではほとんど使われていないようである。なお、熱線／熱膜流速計と同じ原理、すなわち熱伝達と流速との関係を利用して、600℃以上の高炉炉内ガス流速を測

定可能な流速計が開発されている¹¹⁾。

2.3 レーザードップラー流速計

レーザードップラー流速計(LDV)は流体とともに動いている微小な粒子によって散乱されたレーザー光周波数のドップラーシフト量を検出して粒子の速度を求める方法である^{1,2-18)}。流体そのものの速度を求める方式ではないために、粒子が流れに完全に追従して動いていなければならない。この条件を満たすためには、粒子を球形とし、粒子の密度をできるだけ流体の密度に近づけるとともに、粒子の寸法をできるだけ小さくする必要がある。

LDVはその測定原理が1960年代のはじめに提案されて以来、長足の進歩を遂げており、工学はもとより医学の分野においても活発に用いられている。LDVの特徴をまとめると以下のようになる。

- (1) 流れ場にプローブを挿入する必要がないため、流れ場を乱すことがない。
- (2) 応答性と空間的分解能がよい。
- (3) 1 mm/s程度から1,000 m/s程度の広い範囲にわたる測定が可能である。
- (4) 気液二相流や固液二相流などの混相流の測定も可能である。
- (5) 流体は透明あるいはそれに近いものでなければならない。したがって、水モデル実験には使用できるが、溶融金属の流速測定には不向きである。
- (6) 散乱粒子が必要である。流体が液体の場合には粒子の選択は比較的容易であるが、気体の場合には選択肢が限られる。
- (7) 光学系の調整がやっかいである。

最近では粒子からの散乱光を異なる位置に置いた複数の検出器を用いて解析し、速度だけでなく、粒径も求めることが可能な位相ドップラー流速計や速度、粒径のほかに形状も測定できるシャドウドップラー流速計も開発されている。

2.4 超音波流速計

本流速計には2種類ある。一つは前述のレーザー光の代わりに超音波を用いて微小粒子からのドップラー周波数を検知して流速を求める方法である。他の一つは以下の原理に基づいている¹¹⁾。

ご年輩の方は幼い頃に川流れ算というものを学ばれたことであろう。船で川の上流から下流へ向かうときと、下流から上流へ向かうときとでは所用時間が異なる。これを利用すれば川の流速を求めることができる。船の代わりに超音波を用いたのがこの流速計である。低速の平均速度の測定に用いられる。

2.5 プロペラ流速計

流れの中においたプロペラの回転数を測定して流速を求める方法である¹⁾。回転数と流速との関係はあらかじめ検定しておく必要がある。プロペラ流速計は土木工学の分野で河川の流速測定に古くから用いられており、プロペラの大きさは米粒大のものも用いられている。材料工学の分野では、連続鋳造鋳型の水モデル装置の測定に供されている¹⁹⁾。おもに定常流の流速測定に用いられる。

2.6 磁石流速計

磁石流速計は、伝導体が磁場の中を移動するとき、その伝導体には磁場の強さと伝導体の速度にはほぼ比例する電磁力を生じるというFaradayの法則を利用して溶融金属の流速を求める計器である^{20,21)}。この流速計はVivesによって開発されたので、Vivesプローブとも呼ばれる。

磁石流速計は、原理的には永久磁石のキュリー点よりも溶融金属の温度が低ければ適用可能である。従来のウッドメタル実験ではおもに150℃よりも低い温度で用いられている^{22,23)}。最近の研究によると、溶融アルミニウムの流速測定も可能であるといわれている²⁴⁾。

本流速計のもともとの出力は50μV程度と非常に小さく、増幅が不可欠である。雑音の除去に格段の配慮が望まれる。空間分解能を高めようとすれば、永久磁石の寸法をできるだけ小さくしなければならないが、そうすると出力がさらに小さくなる。永久磁石には円柱状のものが使用されているが、現在用いられているのは直径が3mm程度である。

2.7 粒子画像流速計

最近のコンピュータの高性能化と急速な普及に伴い、流れの中に分散させた粒子画像を用いて流れ場の全体像を捕らえることの可能な粒子画像流速計はめざましい進歩を遂げており²⁵⁾、標準化の試みが可視化情報学会で進められている。この流速計の内容は多岐に渉るので、本シリーズの第6回目「画像計測」でそれらの詳細について述べたい。

2.8 流動抵抗流速計

流れの中に円柱や球などの物体を挿入すると、次式で表される流動抵抗 F_D が働く。

$$F_D = C_D A_n \rho \bar{v}^2 / 2 \quad (2)$$

ここで C_D は抵抗係数、 A_n は流れの方向に垂直な平面への物体の投影面積、 ρ は流体の密度、 $\bar{v}$ は速さ v の時間平均値である。例えば直径 D の球に対しては

$$A_n = \pi D^2 / 4 \quad (3)$$

となる。式(2)より、流動抵抗を測定すれば速さ $\bar{v}$ が求められる²⁶⁾。本流速計の測定原理は非常に簡単であるが、材料製

造プロセスに特徴的な乱流場で使用するに際しては、解決しておかなければならない問題が幾つかある。最も重要な問題は抵抗係数 C_D の評価である。特にガスの吹き込みを伴うような激しい乱流場における球の抵抗係数はよく知られていない。

以下、球を用いた流速計について述べる。抵抗係数 C_D は一般的に次式で与えられる^{27,28)}。

$$C_D = f(Re, Tu, \lambda/D) \quad (4)$$

$$Re = \bar{v} D / \nu \quad (5)$$

$$Tu = \bar{v}' r_{rms} / \bar{v} \quad (6)$$

$$\bar{v}'_{rms} = (\overline{v'^2})^{1/2} \quad (7)$$

ここで Re はレイノルズ数、 Tu は乱れ強さ、 λ は乱れのスケール、 ν は流体の動粘度、 $\bar{v}'_{rms}$ は乱れ成分 v' の自乗平均の平方根値(rms値)を表す。

抵抗係数 C_D はFig. 3に示すように、乱れ強さ Tu の増加とともに小さくなる。図中の実線はCliftらによって推奨されている球の標準抵抗係数 C_{Ds} である²⁷⁾。Fig. 4は乱れ強さ $Tu = 5\%$ のときの抵抗係数 C_D を、乱れの相対的なスケール λ/D をパラメーターにとって示している。抵抗係数 C_D は乱れの相対的なスケール λ/D にほとんど依存しないことが分かる。

抵抗係数 C_D が標準抵抗係数 C_{Ds} からずれ始めるときのレイノルズ数を臨界レイノルズ数 Re_d と定義する。Fig. 5は Re_d と Tu との関係を示している。ハッチングをほどこした領域では抵抗係数 C_D は標準抵抗係数 C_{Ds} に従う。

球流速計の球直径を選ぶ際に注意すべき点を列挙すると以下のようになる²⁹⁾。

- (1) 球の直径 D は乱れのスケール λ よりもできるだけ大きくしなければならない。
- (2) 局所流速を精度良く測定するためには、流動抵抗係数が精度良く検出される範囲において、直径 D をできるだけ小さくしなければならない。

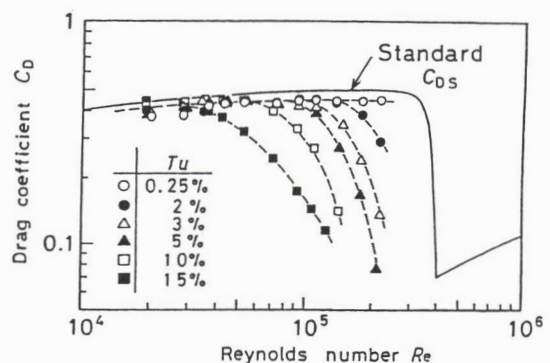


Fig.3 Drag coefficient of sphere as a function of Re and Tu

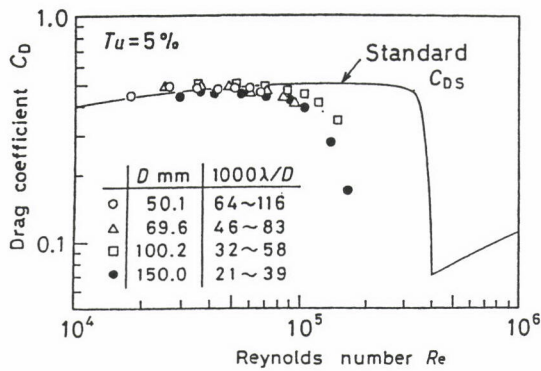


Fig. 4 Drag coefficient of sphere as a function of Re and λ/D

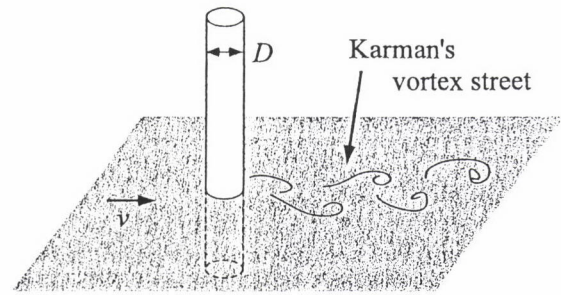


Fig. 6 Karman's vortex street

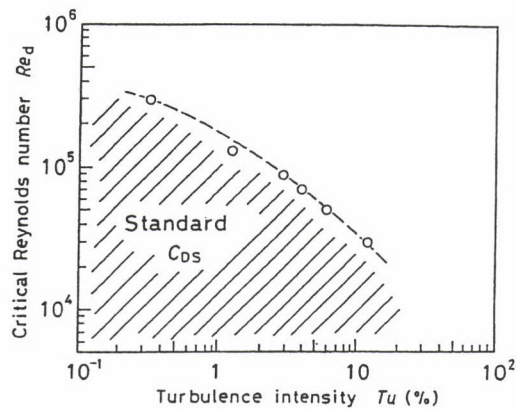


Fig. 5 Relation between Red and Tu

(3) 抵抗係数が標準抵抗係数に従う範囲に入るように D を選ばなければならない。

球や支持棒の材料は1600℃の高温において熱衝撃と溶損に強い材料を選ぶべきである。本流速計は熔融金属の表面近傍の静かな流れの測定に適している。深いところの流れを計ろうとすれば、支持棒に働く流動抵抗が大きくなり、球の部分に働く流動抵抗を正しく検知できなくなる。また、液面に波があると支持棒に働く流動抵抗が激しく変動し、やはり測定は難しくなる。球の代わりに円柱を用いれば、支持棒を付ける必要はなくなるが、波やメニスカス変動の影響を受けることには変わりない。

2.9 カルマン渦流速計

Fig. 6 に示すように、長い円柱が流れの中に垂直に浸漬されたとき、円柱周りの流れ場は式 (5) で定義したレイノルズ数によって規定される。レイノルズ数が約40よりも大きければ円柱から渦が周期的に放出されて、円柱の背後にはカルマン渦列と呼ばれる渦列が形成される。カルマン渦の放出に伴って流れの方向に垂直な方向の周期的な力が円柱

に働き、円柱はカルマン渦の周波数と同じ周波数で振動する。

カルマン渦の放出周波数 f は次式で示すストローハル数によって整理できる。

$$St = fD/\bar{v} \dots\dots\dots (8)$$

ストローハル数はレイノルズ数 Re が300から 2×10^5 に渉る広い範囲においてほぼ一定値を取ることが知られている。レイノルズ数がこの範囲に入れば、円柱の振動数を求めることによって速さ v の時間平均値 $\bar{v}$ が分かる^{30,31)}。現在のところ、1600℃を超える連続鋳造容器内メニスカス溶銅流速を測定するための円柱の材質としてはサイアロンが最も適している。サイアロンの密度は3.25g/cm³であり、熱衝撃特性にはすばらしいものがある。通常、放出周波数はひずみゲージを用いて測定しているが、ホール素子を用いたほうが精度がよいとの報告もある。本流速計の時定数は0.1秒程度であり、変動が比較的ゆっくりとしておれば、非定常流の測定も可能である。

2.10 磁石を用いた相関流速計

Juliusらは連続鋳造モールドの壁に2つの電磁石センサーを流れの方向の間隔が L となるように埋め込み、壁近傍の溶銅流速を測定した³²⁾。各センサーの起電力は磁石流速計と同様にFaradayの法則に従っているが、磁石流速計が起電力の絶対値に着目したのに対して、この場合には両センサー間の出力の相関をとって遅れ時間 τ を求め、 L を τ で除すことによって流速を求めている。当然のことながら流れの方向は既知でなければならない。これによく似た方法でモールド内の溶銅表面流速を非接触で測定する試みがなされているが、詳細については応用とトピックス編で述べる。

2.11 溶融流速計

Mikrovas と Argyropoulosは熔融金属と同じ組成の金属球を溶融金属中に浸漬し、その溶解速度から流速を求め

る非常にユニークな方法を開発した³³⁾。この流速計を用いて、電気炉中の温度が750°Cの溶融アルミニウムの流速を測定し、数値計算で求めた結果と比較して良好な一致が得られたと報告している。しかしながらこの流速計は熱線/熱膜流速計と同様に温度変動の影響を強く受けるので、流速測定の前あるいは測定中に温度変動を測定しておく必要がある。また激しい乱流場では、乱れ強さが熱伝達率に及ぼす影響を明らかにしておかねばならない。

2.12 変位流速計

溶融金属の流れ場の表面から細い針を挿入すると針には流動抵抗が働き、少し撓む。この撓みを例えば光学的に検知してやれば流速が求まる³⁴⁾。この方式は厳密に言えば流動抵抗流速計の一種であり、表面流に波動が存在すれば測定精度は落ちる。

2.13 核磁気共鳴を利用した流速計

1958年頃から核磁気共鳴現象を管内流れの計測に利用しようとする研究が始められたが、非接触で計測できること、骨を通して内部の計測ができること、生体の機能に悪影響を与えないなどの利点を持つために、医用工学分野の計測と医療面の診断に取り入れられている⁷⁾。

2.14 レーザー誘起蛍光法

ヨウ素分子をシーディング分子として用いれば、回転スペクトルの中心波長シフト量から流速を求めることができる³⁵⁾。

3 終わりに

各種材料製造プロセスの高性能化や新しいプロセスの開発に際して、溶融金属の流動現象の正確な把握がますます重要な課題の一つとなっている。最近では数値計算の精度も飛躍的に向上し、上記目的に広く用いられているが、それらの予測精度を確認する上でも、1000°Cを超える高温溶融金属に対する精度のよい流速計の開発は急務である。残念ながら、いまのところこのような過酷な条件下の速度を乱れ成分まで含めて測定可能な流速計は存在しない。地味な分野であるが、若い人の積極的な関与が待たれる。

参考文献

- 1) 日本機械学会：技術資料 流体計測法，日本機械学会，(1985)，76.
- 2) B. Lewis, R. N. Pease, and H. S. Taylor : Physical Measurements in Gas Dynamics and

Combustion, Princeton University Press, (1954)

- 3) B. J. Clark and M. Gardner : Measurement Systems Application and Design, McGraw-Hill, New York, (1975)
- 4) O. D. Ernest : Measurement Systems, Application and Design, McGraw-Hill, New York, (1975)
- 5) 松永成徳ほか：日本機械学会論文集，31-231，(1965)，1653.
- 6) 西 道広：日本機械学会関西支部大112回講習会教材，(1983)，1.
- 7) 近江宗一：日本機械学会関西支部大129回講習会教材，(1985)，1.
- 8) 西岡通男：日本機械学会関西支部大112回講習会教材，(1983)，11.
- 9) 田中栄一：日本機械学会関西支部大129回講習会教材，(1985)，33.
- 10) 蒔田秀治：流れの計測，12-16(1995)，3.
- 11) 宮崎孝雄：日本機械学会論文集B編，62-602，(1996)，3614.
- 12) F. Durst, A. Melling, and J. H. Whitelaw : Principles and Practice of Laser Doppler Velocimetry, Academic Press, London, (1976)
- 13) 流れの計測懇談会：LDVの基礎と応用，日刊工業新聞，(1980)
- 14) 中谷 登：日本機械学会関西支部大129回講習会教材，(1985)，43.
- 15) 大場謙吉：日本機械学会関西支部大129回講習会教材，(1985)，53.
- 16) 堀井 久：日本機械学会関西支部大129回講習会教材，(1985)，115.
- 17) 大場謙吉，森口健司，中尾知史：流れの計測，11-15(1993)，12.
- 18) 前田昌信，森北博巳，菱田公一：流れの計測，12-17(1995)，61.
- 19) K. Tozawa, S. Idogawa, S. Nakata, and K. Sorimachi : CAMP-ISIJ, 9 (1996)，604.
- 20) R. Ricou and C. Vives : Int. J. Heat Mass Transfer, 25(1982)，1579.
- 21) T. von Weissenflue : Int. J. Heat Mass Transfer, 28(1985)，1563.
- 22) Y. Xie, S. Orsten, and F. Oeters : ISIJ Int., 32(1992)，66.
- 23) M. Iguchi, H. Tokunaga, and H. Tatemichi : Metall Mater. Trans. B, 18(1997)，1053.
- 24) E. Baake and A. Muehlbauer : Proc. Int.

- Workshop on Measurement Technique for Liquid Metals, Dresden, (1999-10)
- 25) R. J. Adrian : Annu. Rev. Fluid Mech., 23(1991), 261.
 - 26) T. C. Hsiao, T. Lehner, and B. Kjellberg, Scand. J. Metall., 9, (1980), 105.
 - 27) R. Clift, J. R. Grace, and M. E. Weber : Bubbles, Drops and Particles, Academic Press, (1978), 112.
 - 28) 日本流体力学会：流体力学ハンドブック，丸善，2nd. ed., (1998), 1171.
 - 29) M. Iguchi, H. Kawabata, Y. Demoto, and Z. Morita : ISIJ Int., 34(1994), 461.
 - 30) M. Iguchi, M. Takeuchi, H. Kawabata, K. Ebina, and Z. Morita : Trans. JIM, 35(1994), 716.
 - 31) M. Iguchi, H. Kawabata, T. Ogura, A. Hayashi, and Y. Terauchi : ISIJ Int., 36-Suppl., (1996), 190.
 - 32) E. Julius, H. Haubrich, P. Andrzejewski, and D. Gotthelf, Proc. Int. Cong. Electromagnetic Processing of Materilas, Paris-Lu-Defense, (1997), 5-67.
 - 33) A. C. Mikrovas and S. A. Argyropoulos : Metall. Trans. B, 24(1993), 1009.
 - 34) S. Eckert, W. Witke, L. Pisseloup, and G. Gerbeth : Proc. Int. Workshop on Measurement Technique for Liquid Metals, Dresden, (1999-10)
 - 35) 平井悦郎, 手島光司, 栗田耕一, 高原 茂 : 日本機械学会論文集B編, 62(1996), 2596.

(2000年4月27日受付)