

# 全幅せきに関する国際規格の現状と ISO/TC113/SC2 ロンドン会議

大 嶋 政 夫\* 石 堂 徹\*\*

## Present Situation of International Standard on Full Width Weirs and ISO/TC113/SC2 Meeting in London

by Masao OSHIMA, & Toru ISHIDO

The ISO/TC113/SC2 meeting was held in London on April 27 and 28, 2006. In this meeting a draft international standard (ISO/DIS 1438-1) on flow measurement in open channels using thin plate weirs was discussed, specifying only the Rehbock formula for determining the flow with full width weirs which are applied widely for measuring the discharge flow of large size pumps. Other formulae, including the JIS formula, specified in a previous edition were not considered. The Rehbock formula shows much deviation when used for weir plates higher than 1 m. The authors proposed at the said meeting an amendment in Rehbock formula, for application in the range of weir plate height of over 1 m, referring to the effect of the weir plate boundary layer on the flow coefficient. This paper reports how the meeting proceeded, along with some background regarding the authors' proposal.

**Keywords:** ISO, Weir, ISO 1438-1, JIS B 8302, Flow measurement, Thin plate weir, JIS formula, Rehbock formula, Flow coefficient, Boundary layer

### 1. ま え が き

大形ポンプの流量測定に使用されるせきに関する国際規格を取り扱っているISO/TC113「開水路による流量測定」/SC2「流量測定用構造体」についての国際会議が2006年4月27日、28日の二日間ロンドンの英国規格協会(BSI)において開催された。

ポンプ性能試験に関係する全幅せきによる流量測定法を規定する規格ISO1438が改定作業中で、今回の会議で国際規格案(DIS)が審議予定となっており、可決されれば、次の段階、すなわち最終国際規格案(FDIS)として各国に回付されて、ほとんど自動的に国際規格(ISO)となる状態に入っていた。

現行のISO1438/1 Amendment 1-1998ではJIS B 8302に示された全幅せきに関するJIS式及び整流装置を利用した短縮上流水路長さについての規定が採用されていて、我が国ポンプ製造各社の保有するせき及び水路をそのまま使って、かつこれまでJIS規格で得られたものと

同じ性能結果を得ることができた。しかし今度の改定案では、JIS式及び整流装置を用いたときの水路長短縮規定の両方が削除されており、日本のポンプ業界にとってはこのことは非常に大きな問題であり、これらの規定を復活させるよう、著者ら2名が会議に出席し、流量公式の問題点を説明し、前記2点の復活要求を行った。以下に現行規格の内容、改定案の問題点、ロンドン会議での議論内容などについて述べる。

### 2. ISO 1438-1 : 1980 及び同 Amendment 1 : 1998 の概要

「せき及びベンチュリ水路を使った開水路での流量の測定 - 第1部：薄板せき」と題するこの規格は、薄刃三角せき及び四角せきによる流量測定方法について規定している。

この規格は1975年に第1版が発行され、その中では四角せきの一般式としてKindsvater-Cater公式を、またその代替式としてSIA(スイス工学会)式、更に全幅せき用としてRehbock-1929式(1929年発表)が示されていた。

1980年発行の第2版では、近年のフランス・ツールーズ大学流体力学研究所(IMFT)での研究成果に基づいて導かれた全幅せき用のIMFT式が追加して規定された。

第2版見直しの際に、大形ポンプ用の大流量測定のた

\* 元神奈川工科大学 工学博士

\*\* 株荏原由倉ハイドロテック

ターボ機械 第35巻, 第4号, pp.193-198 (2007年4月10日)に掲載されたものを一部加筆, 修正した。

めに日本が提案して発行された Amendment (1998 年発行) では JIS 式も加えられ、大形ポンプの流量測定に広く用いられている全幅せきについては、結局五つの公式が規定されていた。

ISO 1438-1 に規定されている Rehbock-1929 式は以下のように示される。

$$Q = C_e \frac{2}{3} \sqrt{2g} b h_e^{3/2} \dots\dots\dots (1)$$

- ここで  $Q$  : 流量 [m<sup>3</sup>/s]
- $g$  : 自由落下の加速度 [m/s<sup>2</sup>]
- $b$  : 水路の幅 [m]
- $h_e$  : 有効ヘッド [m] (=  $h + 0.0012$ )
- $h$  : 測定ヘッド [m]
- $C_e$  : 流量係数

$$C = 0.602 + 0.083 \frac{h}{p} \dots\dots\dots (2)$$

ここで  $p$  : せき板高さ [m]

Rehbock-1929 式は、発表時は適用範囲はせき板高さ 1 m までとなっており、その範囲で多くの実験結果と比較して非常に一致が得られたことが報告されている<sup>1)</sup>。しかしせき板高さ 1 m 以上では、Rehbock-1929 式がせき板高さとともに実測値と大きな差を示していたこと、及びせき板高さ 1 m 以上の場合が土木関係ではほとんどないこともあって、当時はせき板高さにより流量係数が変化することが理解されず、適用範囲をせき板高さ 1 m 以下として、1 m 以上に対しての適用は無視されていた。

大形ポンプでの大流量の測定では通常せき板高さ 1 m を超えるものを使用するので、Rehbock-1929 式は使用できない。そこで JIS 式がこの範囲での使用を考慮して、Rehbock 式の適用範囲を広げてせき板高さ 1 m 以上にも適用できるよう、Schoder らの実測データ<sup>2)</sup> に基づいて Rehbock 式 (1913 年発表の Rehbock-1913 が用いられた) に修正項  $(1 + \varepsilon)$  を加えた形で導かれた<sup>3)</sup>。すなわち

$$Q = C \frac{2}{3} \sqrt{2g} b h^{3/2} \dots\dots\dots (3)$$

$$C = 0.605 + \left( \frac{1}{1000h} + 0.08 \frac{h}{p} \right) (1 + \varepsilon) \dots\dots\dots (4)$$

- ここで  $\varepsilon = 0$  :  $p \leq 1$  [m] のとき
- $\varepsilon = 0.55(p - 1)$  :  $p > 1$  [m] のとき

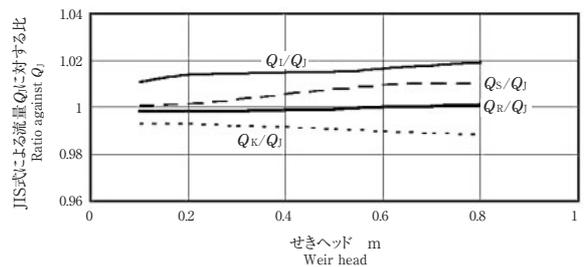
で表される。

注) JIS B 8302 に示される JIS 式の流量係数  $K$  は式 (4) に係数  $60 \times \frac{2}{3} \sqrt{2g}$  を乗じて示されている。

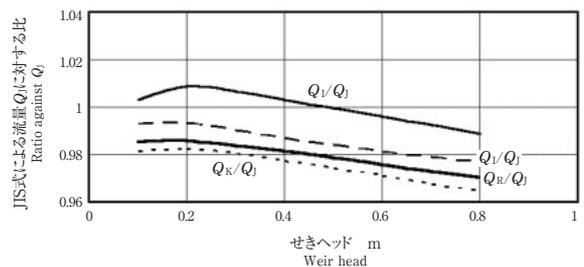
本来前記五つの公式はそれぞれ異なった適用範囲、あるいは最適範囲をもつものと考えられるが、そのような制限は示されていない。したがって当然それらは同じせきヘッドに対し異なる流量を示すわけで、例としてせき板高さ 0.8 及び 2.0 m の場合の計算結果を図 1 に示す。

各流量公式によって計算される流量は同じではなく、せき板高さによっても異なるが、図 1 に示されるように、それらの間で約 3% もの差がある。更にせき板高さが 0.8 m では、JIS 式による流量に対してあるものは + の偏差、またあるものは - の偏差を示しているのに対して、せき板高さが 2 m の場合には一部を除いて JIS 式以下の流量を示している。

せき板高さ 0.8 m では Rehbock-1929 式による流量  $Q_R$  がヘッドの全範囲で JIS 式による流量  $Q_J$  にほぼ等しいのは、JIS 式が Rehbock-1913 式 (Rehbock-1929 式に非常に近似) を基礎にしているからであるが、一方せき板高さが 2 m の場合は、Rehbock-1929 式でも JIS 式より小さい値を示し、せきヘッドの増加とともにその差は増加している。



(a) せき板高さ 0.8 m の場合  
For weir plate height of 0.8 m



(b) せき板高さ 2 m の場合  
For weir plate height of 2 m

- $Q_I$  : IMFT 公式による流量  
Flow rate calculated by IMFT formula
- $Q_S$  : SIA 公式による流量  
Flow rate calculated by SIA formula
- $Q_R$  : Rehbock 公式による流量  
Flow rate calculated by Rehbock formula
- $Q_K$  : Kindsvater-Carter 公式による流量  
Flow rate calculated by Kindsvater-Carter formula
- $Q_J$  : JIS 公式による流量  
Flow rate calculated by JIS formula

図 1 ISO 1438/1-1980 に規定の各公式で求められる流量の比較  
Fig. 1 Comparison of flow rate calculated by each formula

発表当時すでにせき板高さ1 m以上で、せき板高さとともに実測値との差が大きくなることからRehbock-1929式の適用範囲をせき板高さ1m以下とした事実を全く無視して、ISO規格ではせき板高さの適用範囲限界を取り除いたために、図1 (b) に示されるような結果となっている。

### 3. ISO/DIS 1438-1 : 2005

「流量測定－薄刃せきによる開水路流量測定」と表題を変えたISO1438-1 : 1980規格の改定案は2004年5月18日につくばで行われた前回のISO/TC113/SC2会議での審議結果を取り入れてDIS(国際規格案)として2005年2月1日に提案された。

このなかでは流量式は各形式のせきに対し、それぞれ一つの式を示すことに変更された。これは、ISO中央事務局に寄せられた多くの意見により同事務局が測定式を一本化するよう要求してきたためとの説明がなされている。

四角せき及び全幅せきに関しては、まず全幅せきを含む四角せき全般に対する一般式としてKindsvater-Carter式を規定し、次いで全幅せき用としてRehbock-1929式を規定している。

この規格案で特に問題とされた点は、全幅せき用として規定されたRehbock-1929式が、当初せき板高さ1 m以下とされた適用範囲を、何らの検討もなしにせき高さ無制限に拡張した点である。大形ポンプの精確な流量測定には、管径1 mまでしか使用できないオリフィスを用いることはできず、せきを用いるほかない。管径1 mのオリフィスを複数本用い、かつオリフィスの前後で場合によっては直径の30倍もの長さの直管を用意することは実際上不可能であり、また一方修正なしのRehbock-1929式をせき板高さ1 m以上に対し適用させられることになっては、流量、更には効率が実際より数%も小さく表示されてしまって、我が国のポンプ業界にとっては非常に大きな問題となる。

つくば会議での、このDIS(国際規格案)の前段のCD(委員会案)の審議の際にも、せき板高さ1 m以上に対する修正項をRehbock-1929式に導入するようSchoderらの実測データ<sup>2)</sup>及びKurokawaらの実験結果<sup>4)</sup>を示して提案したが、認められなかった。今度のロンドン会議では、修正項が必要な原因はせき板上の境界層の厚さがせき板高さに比例して変化しないためであると説明して、再度修正提案をすることとした。

加えて、整流装置を設置することにより上流水路長さを短縮することができるという規定がこのDISでは削除

されており、これも測定設備上非常に大きな問題であり、復活要求することとした。つくばで審議されたCDでは現行規定どおり規定されていて、それは何ら議論もなく承認されていたものである。

### 4. 大形せきによる実験結果

図2はRehbock-1929式で示される流量係数(太実線で表示)とSchoderらの実測データから得られた流量係数<sup>2)</sup>との比較を示しており、(a)はせき板高さ0.5, 1.0及び1.5 ftの場合のもので、また(b)は5.5 ftの場合のものを示す。

Rehbock-1929式による流量係数はせき板高さ1 m以下では図2(a)に見られるように、実測値と非常に一致を示すが、せき板高さ1 m以上では、せき板高さが増すほど、及びヘッド比 $h/p$ が大きくなるほど実測値はRehbock-1929式より大きい値を示しており、例として示した図2(b)のせき板高さ5.5 ftの場合では $h/p = 0.4$ で差は3.5%にも達する。図2(b)で細実線はRehbock-1929式による流量係数を、また太実線はSC2議長Boiten氏提案の以下に示す修正式による流量係数を示している。

$$C = 0.602 + 0.083 h_e/p : p \leq 1 \text{ m のとき} \dots\dots\dots (5)$$

$$C = 0.608 + 0.138 h_e/p : p = 2.5 \text{ m のとき}$$

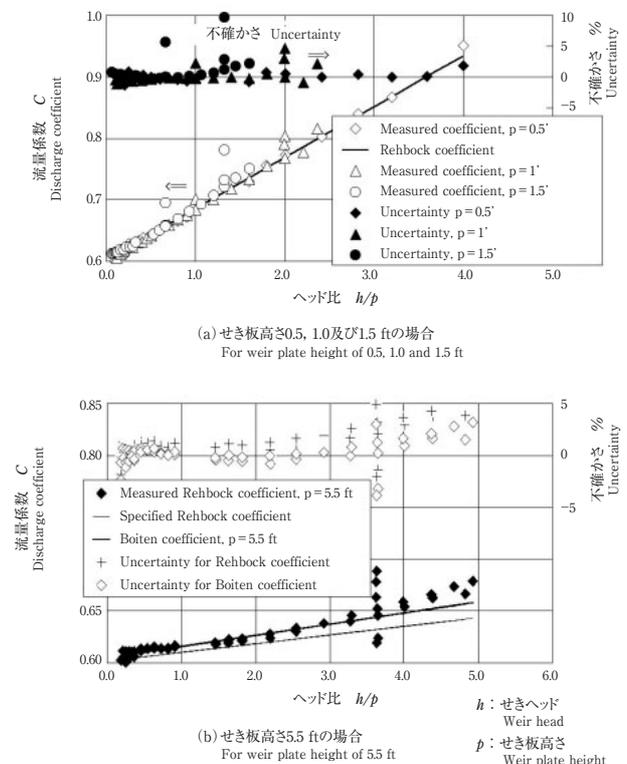


図2 せきヘッド比 $h/p$ に対する流量係数の変化  
Fig. 2 Weir discharge coefficient plotted against  $h/p$

$$h_e = h + 0.0012$$

ここに  $C$  : 流量係数

$p$  : せき板高さ [m]

$h$  : せきヘッド [m]

$p = 1 \sim 2.5$  m については右辺第1項及び第2項の定数を線形内挿して求める。

式(5)はSC2議長提案による式で、それは、JIS式がRehbock-1913式にせき板高さ1 m以上に対する修正項を加えたものであるため、有次元項をもつが、ISO式は無次元式でなければならないとしてJIS公式に近似させた無次元式が提案された。

更にKurokawaら<sup>4)</sup>は、Schoderらの実測に対する追試験という意味も込めて、せき板高さ0.8, 1.4及び2 mのせきを用い、JIS式の有効性を確認する実験を行っているが、それによってもせき板高さ1 m以上ではRehbock-1929式の不確かさが増大し、修正が必要なことが確認されている。

### 5. せき板高さの寸法効果：境界層の影響

前節で示したように、せき板高さ1 m以上では流量係数実測値はRehbock-1929式より大きな値を示すが、これはせき板高さによる寸法効果によると考えられる。具体的にはせき板上に生じる境界層厚さがせき板高さに比例しないことによると考えられる。

せき水路を流れてきた流れはせき板上では上向きにせき上縁に向かうが(図3)、このときせき板上では、板表面近傍で水の粘性により流速が小さくなっている領域、すなわち境界層が生じ、上縁ではその厚さは最も厚くなる。厚さは、近似的に平板上の境界層の式

$$\text{境界層厚さ } \delta(x) = 0.37x \left( \frac{U_\infty x}{\nu} \right)^{-1/5} \dots\dots\dots(6)$$

ここで  $x$  : 平板上流端からの距離

$U_\infty$  : 平板上の流速

$\nu$  : 動粘性係数

を用いて求めると、

せき板高さ  $p = 0.6$  m

せきヘッド  $h = 0.24$  m では

$$\delta(p) = 0.0202 \text{ m}$$

となる。ただし、ここでは簡単のために $U_\infty$ はせき水路の平均流速に等しく、また平板長さとしてせき板高さ $p$ を用いて計算している。このとき

$$\delta(p)/h = 0.0842$$

となる。

同一 $h/p$ 比では

$$U_\infty \propto p^{1/2} \dots\dots\dots(7)$$

であるから、式(2)から、

$$\delta(p)/h \propto p^{-3/10} \dots\dots\dots(8)$$

となり、せき板高さ2mに対し同一 $h/p$ 比、すなわちせきヘッド0.8 mでは

$$\begin{aligned} \delta(p)/h &= 0.0842 \cdot (2/0.6)^{-3/10} \\ &= 0.0587 \end{aligned}$$

となる。

このように同一 $h/p$ 比では、せき板高さが高くなるほど相対的にせき板上の境界層厚さは薄くなる。図3にせき板を越えて下表面が最もせり上がった断面での流れの水平速度成分を示したが、この断面では下側ほど流速が大きい。せき板上で発達した境界層がこの流速の最も大きい領域に流入するわけで、このことがせき板高さの流量係数に及ぼす影響が意外に大きく現れる原因となっている。境界層厚さがせき板高さに比例していないため、前記越流部の流速分布がせき板高さによらず常に相似というわけではなく、それがせき板高さによる流量係数の変化をもたらしていると考えられる。すなわち、せき板高さによらず流量係数は一定と考えることは不当と判断される。

もちろんせき板高さ1 m以上でだけ、その影響が現れるということではなく、1 m以下では影響が少なく、それより高くなって影響が顕著になるものと考えられる。Schoderらのせき板高さ3 ftでの実験では、すでにこのことを示唆する結果となっていて<sup>2)</sup>、せき板高さ3 ft以下の場合よりRehbock-1929式との差が大きくなっている。

### 6. ISO/TC113/SC2 ロンドン会議

2006年4月27日、28日の両日ロンドンの英国規格協会(BSI)でISO/TC113/SC2会議が開かれ(写真)、日本からは著者ら2名が出席した。

初日は午後からで開会後出席者の自己紹介の後、議事録確認委員の指名、議事予定の確認が行われて審議に入った。この日はせき国際規格案ISO/DIS 1438-1の審議に

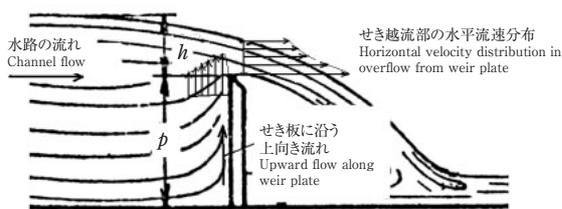


図3 せき板を越える流れ  
Fig. 3 Flow over weir plate



07-66 01/216

写真 英国規格協会で行われたISO/TC113/SC2会議

Photo ISO/TC113/SC2 meeting at BSI

費やされた。

筆者らの一人大嶋がまず上流短縮水路規定について、「この規定は研究成果に基づいて短縮規定を取り入れたのであって、これを排除するのは技術の発展を無視することになるから、同規定を復活させることを強く要求する」と主張して復活提案を行った。これに対し、これは単なる編集上のミスで規格案から削除されてしまったもので、FDISでは附属書（Annex）に載せる予定との編集担当の英国委員の説明で、このことは承認された。

続いて問題のRehbock-1929式の審議に入った。同式はせき板高さ1 m以下で有効なことが確認されて<sup>1)</sup>、当初は適用範囲がせき板高さ1 m以下であったこと、Schoderらの実験結果<sup>2)</sup>及びKurokawaらの実験結果<sup>4)</sup>によりせき板高さ1 m以上では同式は実測値と大きな差を示すこと、及びその原因はせき板上の境界層によるものであることを図を用いて説明し、Rehbock-1929式はせき板高さ1 m以上では修正式を導入すべきことを主張し、式(5)に示す修正式を提案した。

実はこのDISは投票締め切りが2006年3月20日で、投票が済んでおり、その結果は残念ながらPメンバ12箇国及びOメンバ12箇国のうち、反対は日本1箇国だけ、ほかはすべて賛成で、FDIS手続きに入ることが決定されていた。そこでこの会議でRehbock-1929式の実態を説明して改善の方向にもっていこうと努力を行った。

Rehbockも引用しているように<sup>1)</sup>、せき板高さ0.5、1.0及び1.5 ftでのSchoderらの実験結果は十分信頼できるもので、同じ実験装置による、更に高いせき板高さでの結果がRehbock-1929式と差を見せることから、それは寸法効果によるものと考え、せき板高さ1 m以上では同式を修正すべきだと、図を示しながら詳細に説明した。

しかしながら、英国委員（DIS作成担当）は「Schoderらの論文を読んだ限りでは実験装置に問題があり、木の板で作られた水路からの漏れによる精度低下の疑いが拭いきれない」との一点張りで、Kurokawaらの実験結果からも彼らの実験結果の信頼性は裏づけられているとの日本の主張は聞こうともしない態度であった。

そのため議長Boiten氏もここで「いや、彼らの実験結果は十分信頼できる」とも言いきれず、Rehbock-1929式発表時のとおり、適用範囲をせき高さ1 m以下とすることで決議してはどうかとの仲裁案が提示された。

「英国が同式の変更は全く考えられないとするなら、同式は実験式であり彼が式作成時に検討したせき高さ $p \leq 1$  mに適用範囲を狭めるのでなければ、それは不当なことで、英国の主張は受け入れられない」と日本が強く主張した。これに対し $p \leq 1$  mに適用範囲を制限するのは受け入れることができるとの英国委員White氏の発言があって、それで収めることとなった。

別の委員からは、せき板の上の境界層を平板の境界層で近似するには無理があるのではないかと、圧力こう配、速度こう配など平板とかなり異なった状況にあるのではないかと指摘があったが、これに対しては、ここでは簡単のためにこのように考えて検討を行ったもので、流れ状態は平板上とは異なっており、くわしくは流れ解析を行わなければ議論できないことは十分承知のうえであると答えた。

White氏は、このほかに表面張力の影響もあると指摘をしていたが、これに対してはせき高さ $p > 1$  mでは補正ヘッドを0.0012 mより大きくせねばならないことから、表面張力より、むしろ境界層の問題ではないかと述べておいた。

このほか、各国から種々のコメント、多くは編集上のミスに関するものが出ており、逐一検討が行われた。そのなかで大きな問題としては、せきヘッド/せき板高さ比 $h/p=4$ まで適用範囲を広げる必要があるのか、そのときはFroude数が非常に大きくなって水路の流れ表面が穏やかではないのでは、という発言があった（オランダ）。種々やり取りがあったが、Froude数は0.6程度で問題がないとのWhite氏の説明で $h/p$ に関する適用範囲の変更は行われなかった。

## 7. あとがき

大形ポンプの流量測定に欠かせない大形全幅せきに関する国際規格に示された流量公式は小形装置での実験結果だけを考慮していて、大形装置での結果が寸法効果に

より小形装置での結果と差を示すことにあまり注意が払われていない。現国際規格では、流量係数はせきヘッド/せき板高さの比のみの関数としているが、流体装置では粘性のため、大なり小なり寸法効果があるため、流量係数にもそれが現れる。今後は流れ解析結果も引用しながら流量公式の修正に向けて努力を続けたいと考えている。

なお、ここに報告したISOに対する活動は、(財)日本規格協会から委託を受けて、(社)日本産業機械工業会に設置されたポンプ国際規格審議会（委員長八戸工業高専教授浦西和夫氏）が国内引き受け団体となって行っている。ご協力頂いた関係各機関、団体の方々に深く感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) Rehbock, Th., "Wassermessung mit scharfkantigen Ueberfallwehren", Z. VDI, Bd. 73 (1929), Nr.27, S. 817.
- 2) Schoder, E. W. and Turner, K. B., "Precise Weir Measurements", Trans. ASCE, Paper No. 1711, Vol. 93 (1927), pp.999-1190.
- 3) Ishihara, T. and Ida, T., "Supplemented Formula for Rectangular Weirs without End Contractions", Proc. 1st Japan National Congress for Applied Mech. (1951), pp.381-384.
- 4) Kurokawa, J. et al. "Flow Measurement Using Full Width Weir, Comparison of ISO, JIS and HIS Formulae", Trans. Flucom '91 (San Franc.), 1991-09, pp.669-675.

