新しい手法の塩水濃度法による流量測定†

切 田 篤*・小 宮 勤 一**

Flow Measurement by the Reformed Salt Dilution Method

Atsushi KIRITA* and Kin-ichi KOMIYA**

The salt dilution method is suitable for measurement of flow in open channel. However, the customary method is based on the temporary and inaccurate data obtained by some preparatory measurements, and accordingly the method is unreliable in spite of the complicated procedures.

We present in this paper fine conductivity data of brine, useful for the salt dilution method.

Utilising the data, the salt dilution method becomes more reasonable and simpler, without the preliminary experiments and the procedure of calibration, which are necessary for the customary method.

Moreover, these conductivity data improve the accuracy and reproduction of flow measurements.

Some practical ideas to achieve uniform distribution of injected brine are proposed.

Key Words: flow measurement, salt dilution method, conductivity, dilution, vortex sheet injection

1. はじめに

現在考えられている、さまざまな流量測定法の中で、希釈法 (dilution method) は他の多くの測定法と異なり、流路断面形状や直管長、流速分布等の流れの状態に影響されずに流量測定が行えるという特長を持っており、特に開水路の流量測定法として優れた特質をもっている。

本論文では、希釈法の中で、試薬として食塩を用い

る塩水濃度法の実施手法の改良を図るために、食塩水の導電率特性を広範囲の濃度と温度に適用できる実験式の形で提示した。この実験式に基いた新しい手法による流量測定実験を行った結果、塩水濃度法による測定手順の著しい簡素化と再現性の向上を図れることが確認できた。またこの実験を通じて、食塩水の注入方法の比較検討を行い、流量測定精度の向上を図った。

なお本論文では、塩化ナトリウム、およびその水溶液も、便宜上、食塩あるいは食塩水と表記した。また実験には専売公社発売の食塩を使用し、食塩 1 mol を 58.450 g として測定を行っている。

2. 塩水濃度法

2.1 塩水濃度法の原理

ある定常流の流量“ Q ”を測定する場合、その流れが自然の状態でもっている食塩の濃度 (導電率を食塩に換算した濃度) を“ C_0 ”とする。この流れに試薬として濃度“ C_1 ”が既知である濃食塩水を一定の流量“ q ”で注入する。そしてこの濃食塩水が十分に拡散し、濃度分布が均一になった下流で、流れの食塩濃度が“ C_2 ”に上昇しているとき、注入前後の食塩の量の関係より (2.1) 式が導かれる (Fig. 1)。

$$C_0 \cdot Q + C_1 \cdot q = C_2 \cdot (Q + q) \quad (2.1)$$

$$Q = q \cdot \frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_0} = q \cdot \frac{C_1}{\Delta C} \quad (2.2)$$

ただし、 $\Delta C = C_2 - C_0$, $C_1 \gg C_2, C_0$

したがって求める流量は (2.2) 式で表わされ、濃食塩

Fig. 1 The principal of dilution method

† 第 22 回計測自動制御学会学術講演会で発表 (昭 58・7)

* 計量研究所 茨城県新治郡桜村梅園 1-1-4

** 九州工業大学 北九州市戸畑区仙水町 1-1

* National Research Laboratory of Metrology, Niihari-gun, Ibaraki

** Kyushu Institute of Technology, Kitakyushu

(Received June 15, 1984)

(Revised January 17, 1985)

水の濃度と注入量及び流れの濃度変化量より流量が求められる。この方法では、これらの量を精度良く求めることと、注入した濃度食塩水が十分均一に拡散されることが、安定した流量測定を行うための必要条件となる。

2.2 従来の塩水濃度法

(2.2)式に基づいて塩水濃度法による流量測定を行う場合、食塩水の電解導電率は濃度にほぼ比例して変化するので、原理的にはその電解導電率を測定することにより濃度(2.2)式の $C_0, C_1, C_2, \Delta C$ など)が求められる。しかし現実には食塩水の電解導電率は温度によって大きく変化する上、食塩水の導電率に関するデータ(特に温度特性)が十分に得られないことにより、任意の食塩水の濃度を、その電解導電率と温度より求めることはかなり難しい。

このため従来は、流量測定を行う直前に、注入用に調製した濃食塩水と、測定流より採取した水を用いて現場で希釈実験を行い、電解導電率またはコンダクタンスの変化量と希釈率の関係をデータにとり、このデータを基準に用いて濃度の値を介さずに直接に電解導電率またはコンダクタンスの変化量より流量を算出していた。このように従来の手法による食塩水濃度法は測定の度に異なったデータに基づいて行われ、しかもそのデータは、現場での不確実な希釈実験により得ているので、手間のかかる割には不確実で再現性にも乏しい流量測定方法であった^{1)~3)}。

今まで塩水濃度法に合理的な取り組みが行われなかった理由として、従来は溶液の電解導電率を現場で精度良く求めることが難しかったため、コンダクタンスの測定で代用する場合が多かったことと、食塩水の導電率に関するデータが十分に得られなかったこと、の二つが考えられる。しかし前者については測定技術の進歩により、現場でも容易に $\pm 0.5\%$ 程度の精度で電解導電率の測定が行えるようになっている。したがって食塩水の詳細な導電率データを揃えることにより、塩水濃度法をより合理的な形で行えるようになる。

3. 食塩水の導電率特性

3.1 塩水濃度法と導電率データ

塩水濃度法を実施する場合、試薬として調製する濃食塩水は、流れの状態によっても異なるが、通常数十 l ~数 m^3 程度の量を使用するので、その濃度や温度を一定の値に調製することは難しい。したがって、大まかに調製した濃食塩水の電解導電率と温度より、その濃度を正しく求め直す必要があり、しかもその測定精度は(2.2)式が示すように、そのまま流量測定精度につながる。また、試薬注入前後の測定流の食塩濃度を電解導電率と温度より求める場合、電解導電率の温

Fig. 2 Equivalent conductivity of brine

Fig. 3 Temperature coefficient of brine (1st order)

Fig. 4 Temperature coefficient of brine (2nd order)

度補正量がかなり大きくなることが考えられる。例えば 10°C で測定された電解導電率を 25°C の基準状態に換算する場合の補正量は、測定値の 40% 強となる。

これらに比べ、電気化学便覧等^{4), 5)} より得られる食塩水の導電率データは、特に 2 mol/l より濃い濃度でのデータが粗いことと、温度変化に対する特性が十分に得られていないことにより、塩水濃度法にそのまま利用することはできない。

そこで、0.1 mol/l ~ 5 mol/l の濃度範囲の食塩水の電解導電率を、10°C ~ 40°C の温度範囲で詳細に測定し、(2.2)式に基づいた合理的な手法で塩水濃度法を実施するために必要な食塩水の導電率データの補填、拡充を行った。

3.2 食塩水の導電率特性⁶⁾

電解質の導電性は電解導電率 $\chi (=1/\rho, \rho$ は抵抗率) により表われ、単位は S/m が用いられる。また当量導電率 Λ (S·m²/mol) は溶液の濃度を c (mol/l) とすると

$$\Lambda = \frac{\chi}{c} \cdot 10^{-3} \quad (3.1)$$

Table 1 Equivalent conductivity and temperature coefficient of brine

- (1) measured
(2) by empirical formulae (presented, table 2)
(3) Data from Chemical Hand Book^{4), 5)}

Concentration C(mol/l)	Equivalent Conductivity Λ (mS·m ² /mol)			Temperature Coef K_t (%/°C)	
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)
0	—	12.645	12.645	—	—
0.0001	12.783	12.557	12.559	2.068	2.059
0.0002	12.701	12.522	—	2.051	2.059
0.0005	12.564	12.452	12.450	2.047	2.057
0.001	12.379	12.375	12.374	2.051	2.056
0.002	12.287	12.268	—	2.059	2.054
0.005	12.047	12.066	12.065	2.046	2.050
0.01	11.803	11.853	11.851	2.042	2.046
0.02	11.580	11.576	11.576	2.042	2.040
0.05	11.092	11.105	11.106	2.026	2.029
0.1	10.684	10.674	10.674	2.018	2.017
0.2	10.156	10.173	10.171	2.004	2.002
0.25	9.959	9.980	—	1.993	1.995
0.5	9.367	9.365	9.362	1.968	1.972
1.0	8.575	8.581	8.576	1.926	1.932
1.5	7.980	7.976	7.986	1.901	1.907
2.0	7.459	7.455	7.471	1.895	1.895
2.5	6.983	6.989	—	1.904	1.894
3.0	6.544	6.545	6.557	1.903	1.903
3.5	6.131	6.127	—	1.918	1.919
4.0	5.725	5.724	5.723	1.932	1.941
4.5	5.323	5.332	—	1.969	1.967
5.0	4.946	4.947	4.946	2.001	1.997

で与えられ、電気化学便覧等には各濃度における食塩水の当量導電率が記載されている。

また電解導電率の温度特性としては、食塩水に限らず一般に温度に対して線形に変化すると考えられ、

$$\chi_t = \chi_{25} \cdot (1 + K_t \cdot \Delta t) \quad (3.2)$$

ただし、 χ_t : t °C における電解導電率

χ_{25} : 25°C における電解導電率

K_t : 電解導電率の温度係数

Δt : 25°C からの温度差 ($=t-25$)

t : 溶液の温度

としている。 K_t としては 2%/°C の値が広く用いられているが電解導電率の温度による変化を詳細に測定すると、10°C ~ 40°C の温度範囲で 2% 程度の非線形な変化が観測され、(3.2)式に Δt の二次項を加えた

$$\chi_t = \chi_{25} \cdot (1 + K_t \cdot \Delta t + K_t' \cdot \Delta t^2) \quad (3.3)$$

ただし、 K_t' : 電解導電率の二次温度係数

によりその変化を良く表現できることがわかった。

今回測定した電解導電率より求めた食塩水の当量導電率 Λ と温度係数 K_t, K_t' の値を **Fig. 2~4** および **Table 1** に示す。またこれらの測定値より求めた Λ, K_t, K_t' を近似する実験式及びその係数を **Table 2**

Table 2 Empirical formulae for the conductivity of brine

- (1) conductivity of brine at 25°C
 $\chi_t = \chi_{25} \cdot (1 + K_t \cdot \Delta t + K_t' \cdot \Delta t^2)$
 where χ_t : conductivity of brine at t °C (S/m)
 χ_{25} : conductivity of brine at 25°C (S/m)
 $\Delta t = t - 25$ (°C)
 K_t : temperature coefficient (°C⁻¹)
 K_t' : 2nd order temp coefficient (°C⁻²)
 $\chi_{25} = A \cdot C \cdot 10^{-3}$
 where A : equivalent conductivity of brine at 25°C (S·m²/mol)
 C : concentration of brine (mol/l)
- (2) empirical formulae for Λ, K_t, K_t'
- i) $0 < C \leq 0.3$
 $\Lambda = (A_1 + A_2 \cdot C^{1/2} + A_3 \cdot C + A_4 \cdot C^{3/2} + A_5 \cdot C^2 + A_6 \cdot C^{5/2}) \cdot 10^{-4}$
 $K_t = B_1 + B_2 \cdot C^{1/2} + B_3 \cdot C$
 $K_t' = C_1 + C_2 \cdot C$
- ii) $0.3 < C \leq 5$
 $\Lambda = (D_1 + D_2 \cdot C^{1/2} + D_3 \cdot C + D_4 \cdot C^{3/2}) \cdot 10^{-4}$
 $K_t = E_1 + E_2 \cdot C + E_3 \cdot C^2 + E_4 \cdot C^3 + E_5 \cdot C^4$
 $0.3 < C \leq 1$ では $K_t' = C_1 + C_2 \cdot C$
 $1 < C \leq 5$ では $K_t' = C_3$
- (3) coefficient for the formulae

	A	B	C	D	E
1	126.45	0.020606	0.00006	113.55	0.020345
2	-88.52	-0.001487	-0.00001	-30.094	-0.0016685
3	95.79	0.000377	0.00005	3.7372	0.00071837
4	-21.77			-1.3840	-0.000134714
5	-65.29				0.000011019
6	14.84				

に示す。A の測定値のばらつきは $1 \text{ mol/l} \sim 5 \text{ mol/l}$ の濃度範囲で $\pm 0.2\%$ 程度であり、電気化学便覧の値とは $\pm 0.4\%$ 以内の偏差があった。

Table 2 に示した実験式は、それぞれ濃度“C”の高次式で表されており、食塩水の電解導電率と温度の測定値より簡単な反復計算でその濃度を求めることができるので、塩水濃度法の基礎データとしてそのまま利用することができる。

4. 流量測定実験

4.1 実験方法

Table 2 に示した食塩水の導電率データを基準にして、何も準備実験を行わない新しい手法による流量測定実験を行った。この実験では、試薬の濃食塩水の濃度と測定流の食塩濃度の変化を、それぞれの電解導電率と温度より算出し、(2.2)式に基づいた方法で流量を算出しており、希釈実験等の複雑な準備実験は全く行っていない。

実験は Fig. 5 に示す回流式開水路で行った。Fig. 6 に示す 3 種類の注入管を用いて濃食塩水を注入し、注入点の 6m 下流に設けた測定点 (Fig. 5) で濃度分布の違いを測定した。さらに回流式である利点を生かし、ポンプ部分を通して完全に均一に混合された流体部分が再び測定点に戻って来た時点で流量測定を行い、本方法の究極的な測定精度の検討を行った。

4.2 流量測定精度

実験記録の一例を Fig. 7 に示す。横軸に時間経過を取り、下側よりそれぞれ、食塩水の注入量、流路断面中央での食塩濃度の変化及び流量の計算結果を示している。この実験例では、濃食塩水を約 14 cc/s で約 8 分間注入する (注入管は (3)) ことにより、流路中の約 1 mol/l の食塩濃度が約 3.5 mol/l に上昇しており、この変化量とあらかじめ測定しておいた食塩濃度 (約 2 mol/l) より計算される流量が約 $40 \text{ m}^3/\text{h}$ になっていることが記録されている。食塩水が完全に混合された第 2 回目の測定時には、約 1 分間の定常的濃度変化が得られ、測定値は図中に破線で示した超音波流量計の平均流量とほぼ一致していることがわかる。

$20 \text{ m}^3/\text{h} \sim 50 \text{ m}^3/\text{h}$ の流量範囲で 23 例の流量測定実験を行い、超音波流量計の値と比較を行った結果、誤差の度数分布図 Fig. 8 が得られた。各流量毎の測定値のかたよりとばらつきを Table 3 に示す。測定例は少ないが、23 例中 16 例が、 $\pm 2\%$ 以内の誤差であった。

このように、今回提示した食塩水の導電率データを基準に用いれば、従来測定現場で行っていた複雑で不確実な希釈実験等の準備実験を全く行わずに、塩水濃

Fig. 5 Plan of the circulating channel

Fig. 6 Injection method

Fig. 7 Typical records of flow measurement

度法による流量測定を行えることが確認できた。また、この新しい手法による塩水濃度法は、開水路流量の測定法として十分な精度と再現性、安定性をもっていることも確認できた。

4.3 食塩水注入方法の考察

塩水濃度法を精度良く実施するには、注入された食塩水が均一に測定流中に拡散することが重要な条件となる。しかし試薬として用いる $1 \sim 3 \text{ mol/l}$ の濃食塩水の比重は $1.04 \sim 1.11$ 程度あり、乱れの少ない流れに不用意に注入すると密度差により直ぐに水路底に沈んでしまい、均一な拡散は行われにくい⁷⁾、Fig. 9 は

Fig. 8 Histogram of deviation of measured flowrates from those obtained by supersonic method

Table 3 Bias and dispersion of flow measurement

Q (m ³ /h)	20	30	40	50	20/50
q/Q	1/723~ 1/1358	1/795~ 1/2038	1/767~ 1/2864	1/640~ 1/4348	1/640~ 1/4348
number of measurements (times)	6	5	7	7	23
average of error (%)	+1.14	+1.82	+1.20	+1.37	+1.37
standard deviation (%)	2.68	1.18	1.24	1.07	1.59

Fig. 6 に示した 3 種類の注入管による、注入後 6 m 地点での水深方向の食塩濃度分布の比較である。図中、縦軸に水深、横軸には各実験毎に注入食塩水が完全に均一に拡散した場合の濃度変化量 (ΔC) で無次元化した濃度変化をとった。測定条件は 3 例ともほぼ同一で、約 20 m³/h の流量に対し約 2 mol/l の食塩水を約 7.5 cc/s で注入している。

(1) の水面付近で下向きに開口した注入管を用いた場合は、水面付近ではほとんど濃度変化が見られず、注入した食塩水は水路底に集中している。(2) の水路断面中央上半分に垂直に配置したパイプの両側に、各 10 点の注入口を持つ注入管を用いると、(1) に比べて拡散の範囲は多少広がっているが、依然として濃度の偏りが激しく、単純な多点注入では均一な拡散は得られず、正確な流量測定は難しい。

これらに比べて (3) の注入管を用いた場合は注入食塩水が広い範囲に拡散し、ほぼ均一な濃度分布が得られていることがわかる。この今回考案した渦層拡散式注入管は、水面直下に水平に配置した注入管の下流側に 20 点の注入口をもち、注入管自身の発生する安定した渦層の効果により、注入食塩水のゆっくりとした沈降

Fig. 9 Virtual distribution of injected brine, 6 m down stream

をもたらすもので、特に拡散促進を行わなくとも均一な濃度分布が得られている。流量測定現場で、十分な拡散区間が得られず均一な濃度分布が得にくい場合には、このような拡散効果の高い注入方法を選ぶことも、測定精度の向上に効果がある。

5. おわりに

本研究で示した食塩水の導電率データによって、任意の食塩水の濃度をその電解導電率と温度より簡単に求めることが可能となった。これらの実験式は 0~5 mol/l の濃度範囲で 10℃~40℃ の温度範囲に適用できる。

この食塩水の導電率データを基準に用いることにより、塩水濃度法に必要であった測定現場での繁雑で不確実な希釈実験等の準備手続きが、全て不要となった。この新しい手法による塩水濃度法は測定の安定性、再現性にも優れており、容易に ±3% 程度の精度で流量測定が行えることが確認できた。

塩水濃度法を実施する際に、注入試薬の水路底部への偏りが生じ易く、精度の良い流量測定を行うためには何らかの拡散促進が必要であることが判明したが、今回考案した渦層拡散式注入法も乱れの少ない水路での拡散の均一化に効果のあることがわかった。

おわりに、本研究は工業技術院試験研究所産業公害防止技術研究の一環として行われ、実験の一部は中国工業技術試験所の協力のもとに実施された。ここに記して関係された諸氏に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 板谷, 服部, 竹中: 日本機械学会誌, **67**-543, 535/541 (1964)
- 2) D. S. Woffinden, and C. G. Clyde: Flow **1**, I. S. A., 787/792 (1974)
- 3) I. S. O. 555 (1973), I. S. O. 2975/I (1974), I. S. O. 2975/II (1975)
- 4) 電気化学会編: 電気化学便覧・新版(丸善)116/117(1964)
- 5) 日本化学会編: 化学便覧改訂 2 版(丸善), 1184 (1964)
- 6) 切田: 計量研究所報告, **33**, 1 (1984)
- 7) 小宮, 内海, 渡辺, 切田: 工業技術院特別研究報告集 58 年度版 (1983)