

小型アクアメータWEの開発



矢倉 裕士
Yuji Yagura
制御システム事業部

1. はじめに

制御システム事業部の主力製品である流量計は、高い精度と優れた品質で船舶業界や食品・薬品プラント等、世界中の様々な分野で活用されている。当社の強みは、ユーザの計測ニーズ（液種・用途・コスト）に対応することが可能な豊富な製品ラインナップにある。ユーザ目線では流量計メーカーの統一が可能となり、機器操作の容易さや修理・メンテナンス面に掛かるランニングコスト削減の価値を提供することができる。

本稿では、製品ラインナップの更なる拡充を目指した「小型アクアメータWE」の開発について報告する。

2. 開発の経緯

我々にとって最も身近な液体である水は、流量計を用いた計測対象としても一般的な存在である。当社にとっても、ボイラ給水用途や農地取水用途等、多数の実績を持つ得意分野である。しかしながら、小型の流量計においては、水の持つ以下の特性から比較的難度の高い計測技術が必要となる。

- ①流体自体に潤滑性が乏しい。
 - ・液中で物体を摺動させた際の滑りが少なく、抵抗が大きい。
 - ・摩耗促進度が高く、長期の使用において計測精度の維持が難しい。
- ②液体の粘度が低い。
 - ・液体がリーク（計量漏れ）しやすく、計測精度が悪化しやすい。

現有製品においては、電子計数部による補正と厳しい加工公差により、これらの問題をクリアした高性能製品があるが、低価格で水の小流量を計測したいというユーザの要望も根強く、これに応えるべく、製品開発を開始することとした。

3. 小型アクアメータ WE

「小型アクアメータWE」の外観・仕様を図-1に示す。



計測流体	水、水道水
計測精度	±2.0%以内
流量範囲	20~200L/h
液体圧力	0.7MPa以下
液体温度	0~55℃
表示量	999999.99L
電池寿命	7年以上

図-1 小型アクアメータWE

本製品の最大の特徴は、金属・樹脂成型による製造コストの削減と小型流量計専用特殊機構の開発とにより、「安価な水の小流量計測」を実現したことにある。

4. 従来技術の課題

4.1 回転子の傾きによる影響

本製品に採用したロータリピストン式は、流れこむ流体圧力によって計量室内で回転子を回転させ、その回転数と内容積の積によって流量をカウントする計測方式である。流体は環状の回転子内外に流れ込む必要があるため、図-2に示す青矢印のとおり、流入口の下から上に流れ込み、計量室を一周した後、流出口の上から下に吐出していく構造をとる。

従来は、この液体の流入のタイミングで、回転子の流入口側が押し上げられることで図-2の白矢印の方向に回転子の傾きが発生し、流出口側は計量室の底に押しつけられる形となる。この時、回転子は図-3に示すような摺動痕が残るほど計量室の底に押しつけられるため、潤滑性に乏しい水の計測においては、回転子の回転運動に強い抵抗が生じて計測精度が悪化する。

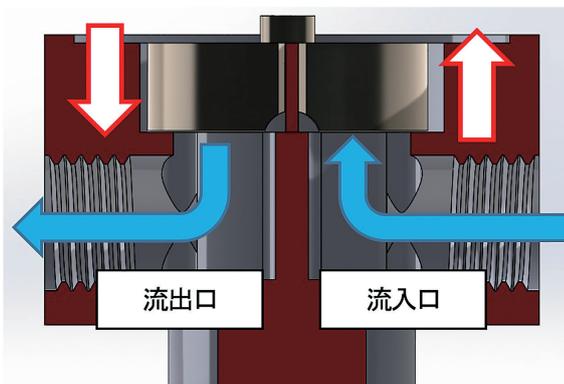
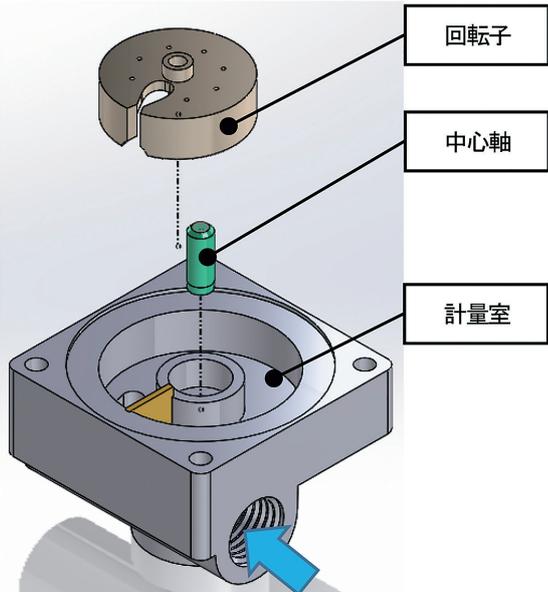


図-2 ロータリピストン式による流体の動き

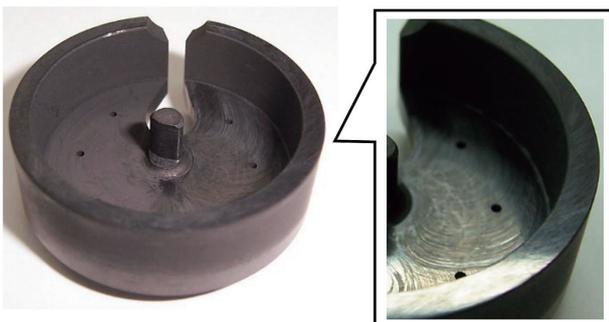


図-3 回転子流出側の摺動痕

また、ロータリピストン式は回転子のスムーズな回転を確保するため、各部品間に微小なクリアランス(隙間)を必要とする。ロータリピストン式における代表的なクリアランスに回転子外円筒と計量室外壁面との間に生じるものがあるが、上述の回転子の傾きによって、このクリアランス形状が変化することも精度不良の原因となる。図-4の断面図は、回転子の回動位置が変化することで生じるクリアランス形状の変化を示した図である。

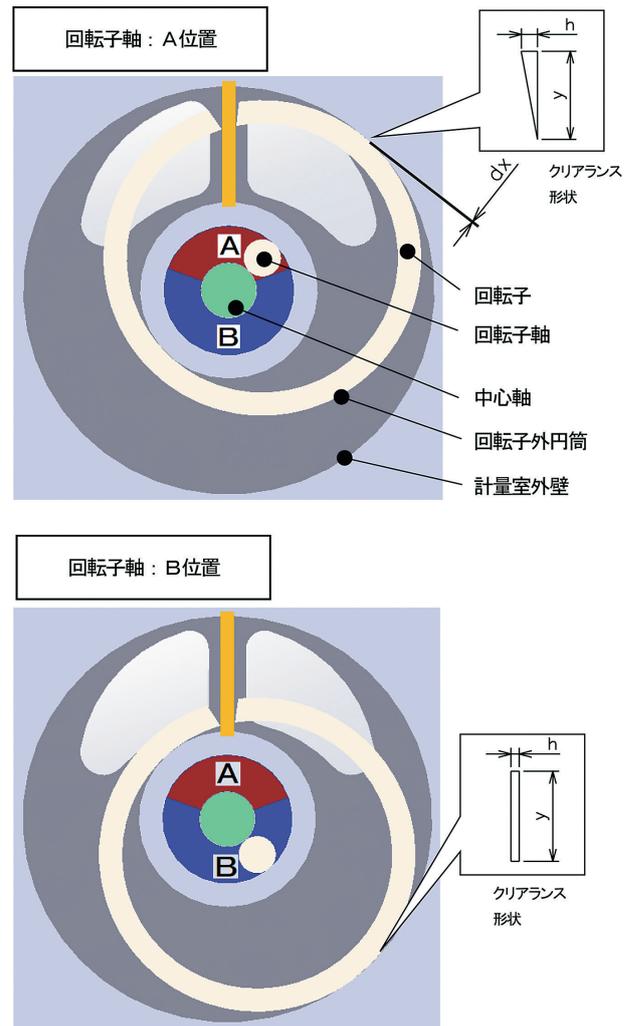


図-4 回転角によるクリアランス形状の変化

回転子は、流入口と重なるA位置で流体の圧力を受けて傾きを生じるが、流入口と重ならないB位置では傾きが発生しない。これは回転子の回動位置によって、傾きの角度が変化することを意味しており、回転子一回転中にクリアランス形状が変化することで、それに伴ってリーク量も増減することになる。以下の式(1)(2)は、部品間に流体を流した際のリーク量の算

出に用いる平行平板間の流速・流量式である¹⁾。式 (2) に示すように、クリアランス幅hがリーク量に大きく影響を与え、幅が最大となるA位置のリーク量が増大する。加えて、流体がリークしやすい低粘度になればなるほどその影響は大きいものとなる。

$$u = -\frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} (hy - y^2) \quad \dots (1)$$

$$q = \int_0^h u dy = -\frac{1}{12\mu} \frac{dp}{dx} h^3 \quad \dots (2)$$

- u : クリアランス間を流れる流体の速度
- q : 流量 (速度uの積分式)
- μ : 流体粘度
- dp : 圧力差
- dx : クリアランス長さ
- y : クリアランス高さ
- h : クリアランス幅

また、このクリアランス形状の変化によって生まれるせん断応力の変化も計測精度の悪化に繋がる要因の一つである。図-5は、間隔Hの平行平板間を流体で満たし、板Aを固定した状態で、板Bを平行に動かした際に生じるクエット流れの概略図である²⁾。

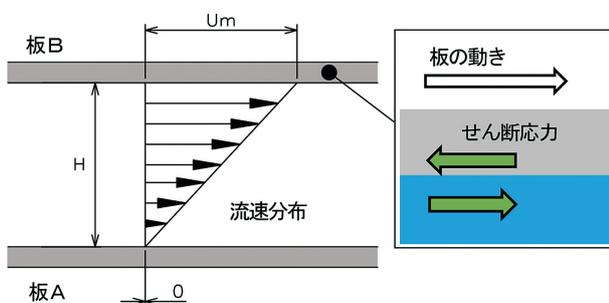


図-5 クエット流れ

$$\tau = \mu \frac{U_m}{H} \quad \dots (3)$$

- τ : せん断応力
- μ : 流体粘度
- U_m : 流体の速度
- H : 板同士の間隔

板Bを右向きに動かしたとき、板Bには流体の粘性によって左向きの力が作用する。板Bに面した流体は、板の動きに追従して右向きの力が作用し、板と流体間にせん断応力が発生することになる。式 (3) に示す

ように間隔Hの変化によってせん断応力の変化が生じていることが分かる。

これを流量計に置き換えると、板A=計量室外壁、板B=回転子外円筒、板同士の間隔=クリアランス幅とみなすことができる。回転子の一回転中にせん断応力の変化が発生し、回転に必要なエネルギーが失われることで精度に影響を与えることになる。

4.2 回転子の摩耗

潤滑性に乏しい流体中で部品を摺動させるため、部品の摩耗が著しい。特に、小型流量計は強度(肉厚)を確保するためスペースに余裕が少なく、軸受を搭載することができない。そのため、中心軸と回転子軸が図-6に示すとおり、各軸の軸方向に線接触して荷重を受けることとなり、回転子軸の摩耗が促進する。軸の摩耗によって、回転子軸の回転の軌跡がより中心軸側になり、回転子外円筒と計量室外壁に生じるクリアランスは更に大きなものとなる。

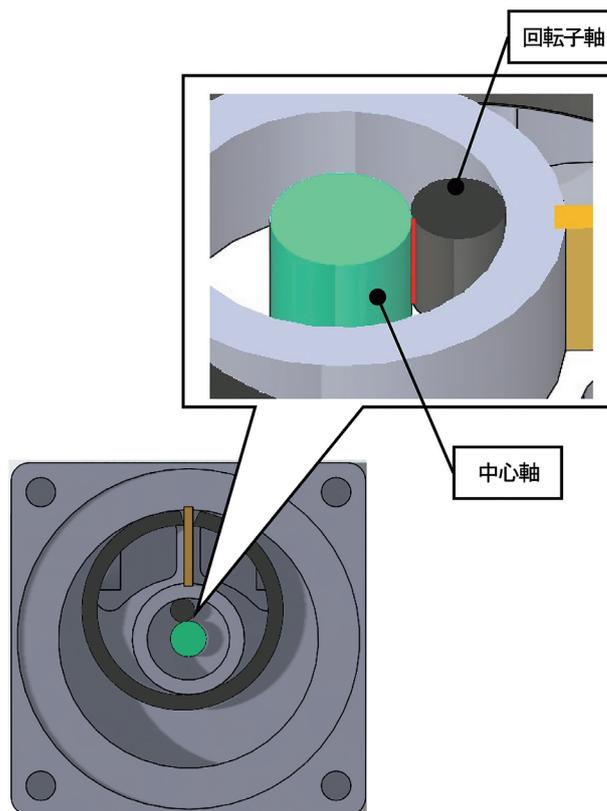


図-6 中心軸・回転子軸の線接触

5. 技術的課題の解決

5.1 特殊偏心軸受の開発

回転子を傾けさせないための施策として、「特殊偏心軸受」(図-7)の開発を行った。

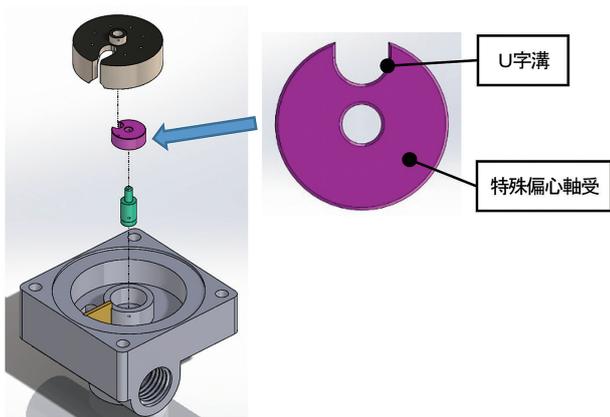


図-7 特殊偏心軸受搭載の様子

本軸受はU字溝を持つ小型流量計専用の部品であり、次のような効果が得られる。

①小サイズ流量計に設置可能

U字溝に回転子軸が収まる構造をとり、回転子軸の全てを包み込まない形状であるため、軸受外周側に肉厚を確保する必要がない。設置スペースに余裕ができるため、強度（軸径）を確保したまま軸受を搭載することが可能である。

②計測精度の向上、圧力損失の低下

計量室内壁が軸受の一部として機能するため、図-8に示すように、回転子の回転角がどの角度でも回転子の傾きを抑制することが可能となる。これにより、回転子が計量室へ押し付けられるのを軽減し、回転子のスムーズな回転運動を実現することができる。また、回転子が一回転する間、どの回転角においてもクリアランス形状が一定となるため、計量中におけるリーク量とせん断応力の変化を抑えることができる。

③製品寿命の向上

線接触で受けていた荷重を、面で受けることが可能となり、製品寿命の向上に繋がる。また、軸受外周側が開放形状となるため、計量中に砥粒となりえる摩耗粉や液中異物が回転子軸と軸受のU字溝との間に滞留しにくくなる。

5.2 PPS 材質「APS300M」の採用

優れた自己潤滑性と耐摩耗性を有するPPS材質「APS300M」を回転子材質・特殊偏心軸受材質に採用することで、機構の摺動性・耐久性向上を図った。

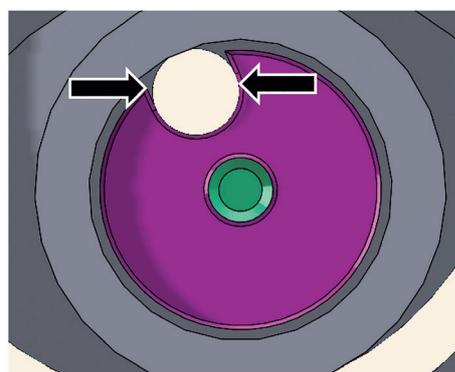
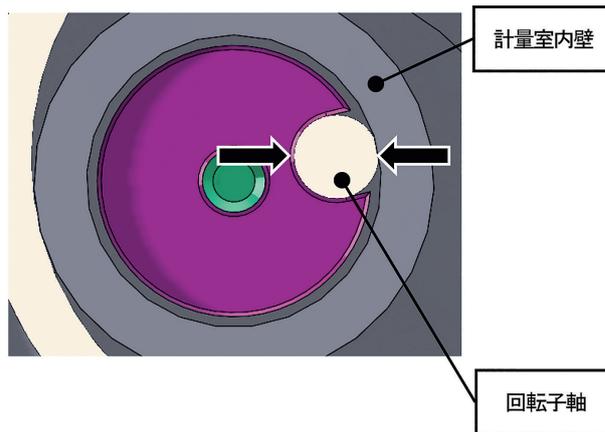


図-8 回転子軸保持の様子

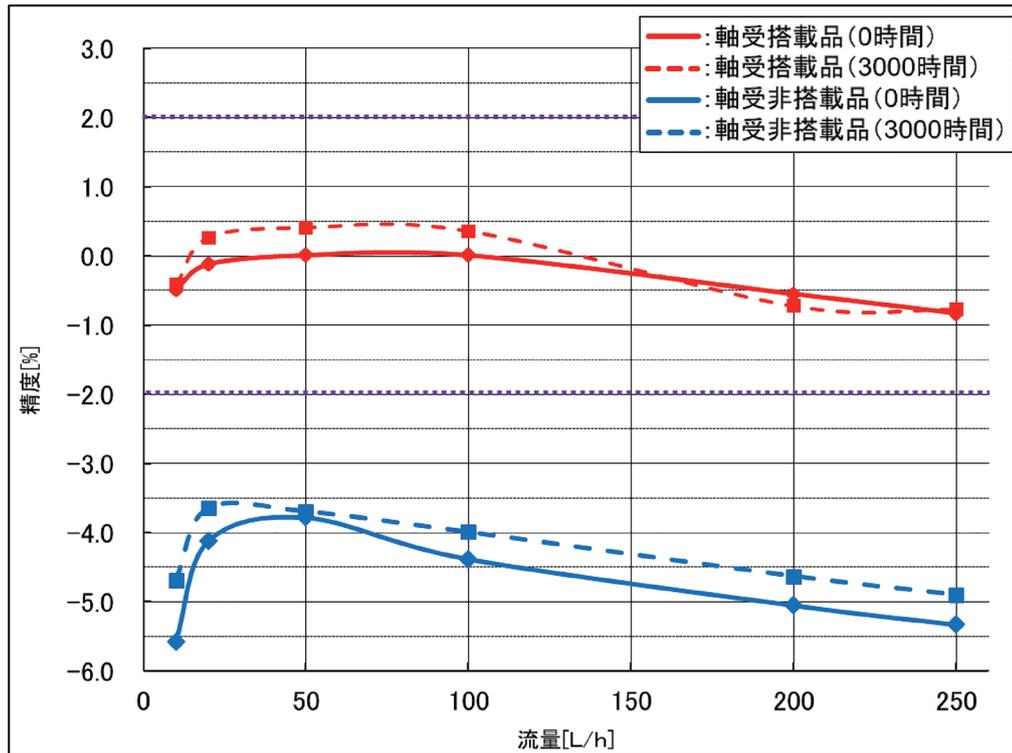
6. 性能評価試験

6.1 精度確認試験

当社の流量計製品は、全製品1年間の品質保証を行うため、精度と耐久性の両方を評価している。小型アクアメータWEについても、以下の一連の試験を実施し、図-1に示す仕様精度を保つことができるか確認した。

- ①初期精度試験：新品の状態での精度を確認する。
- ②連続耐久試験：流量計の最大仕様流量200L/hにて、3000時間（8時間×365日）の連続運転を実施する。
- ③最終精度試験：連続耐久試験による精度への影響を確認する。

また、「特殊偏心軸受」の効果を確認するため、同軸受の搭載品と非搭載品の性能比較を同時に行った。試験結果を図-9に示す。



軸受搭載品: 精度試験結果

単位[%]

流量[L/h]	10	20	50	100	200	250
0時間	-0.49	-0.12	0.01	0.01	-0.55	-0.83
3000時間	-0.41	0.27	0.41	0.36	-0.72	-0.77

軸受非搭載品: 精度試験結果

単位[%]

流量[L/h]	10	20	50	100	200	250
0時間	-5.58	-4.12	-3.78	-4.38	-5.05	-5.33
3000時間	-4.69	-3.64	-3.69	-3.99	-4.63	-4.90

図-9 精度試験結果と精度曲線

軸受搭載品については、精度レベル・幅共に図-1に示す製品仕様を満たす良好な結果が得られた。耐久試験による精度変化も少なく、今回の施策によって計測精度・製品寿命向上の効果が得られたと考える。非搭載品については、精度レベルが-5.0%付近と大きくマイナスの傾向にあった。また、下限流量域[10~20L/h]において、精度曲線の急な悪化が見られることから、リーク量が多くなっているものと推察する。

6.2 摩耗確認試験

連続耐久試験による回転子の摩耗量について、回転子高さ(45°間隔)と中心軸径の計測結果を図-10に示す。

特殊偏心軸受搭載品、非搭載品共に摩耗量は0.01mm以下の微量に収まっており、何れの位置においても大きな摩耗は見られない。位置②-④において偏摩耗の軽減が見られるが、3000時間の耐久試験においては

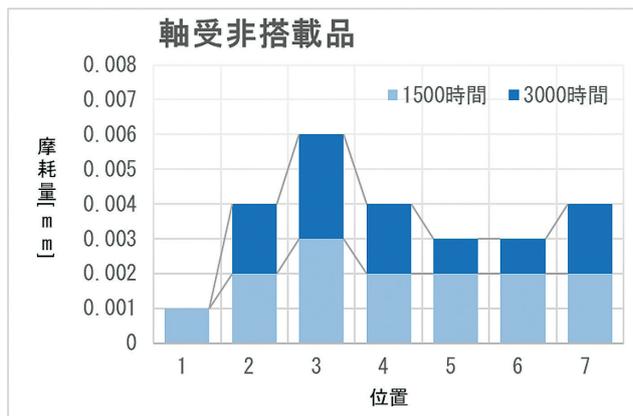
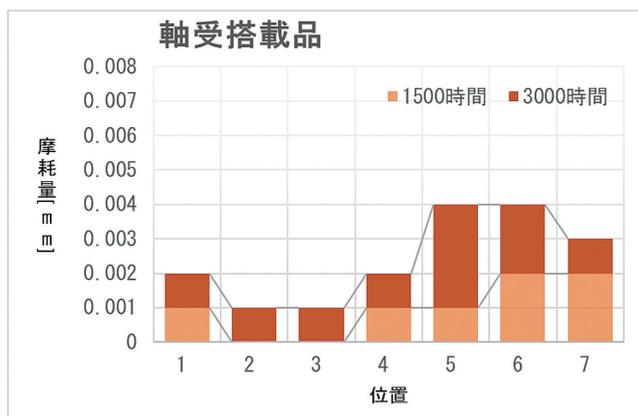
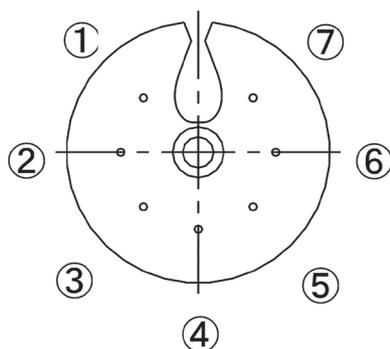
微少な差に留まる結果となった。

また、中心軸径の摩耗量は0mmで搭載品、非搭載品共に摩耗は見られなかった。

7. まとめ

試験結果より、各技術的課題に対する施策の効果をまとめる。

「特殊偏心軸受」の搭載によって、水の小流量を精度よく計測することが可能となった。搭載品の性能が非搭載品を大きく上回ったことから、特殊偏心軸受によって、前述の回転子の傾きを抑制することができたと考える。また、耐久試験後の精度変化と摩耗量が微量にとどまったことから、PPS材質「APS300M」の自己潤滑性と耐摩耗性が効果を発揮し、水の潤滑性の乏しさによる摩耗促進を抑制することができたと考える。本施策により、1年間の品質保証が可能となった。



No.	0時間	1500時間	摩耗量	3000時間	摩耗量	総摩耗量
①	10.861	10.860	0.001	10.859	0.001	0.002
②	10.861	10.861	0.000	10.860	0.001	0.001
③	10.862	10.862	0.000	10.861	0.001	0.001
④	10.863	10.862	0.001	10.861	0.001	0.002
⑤	10.866	10.865	0.001	10.862	0.003	0.004
⑥	10.864	10.862	0.002	10.860	0.002	0.004
⑦	10.864	10.862	0.002	10.861	0.001	0.003
軸径	3.960	3.960	0.000	3.960	0.000	0.000

No.	0時間	1500時間	摩耗量	3000時間	摩耗量	総摩耗量
①	10.865	10.864	0.001	10.863	0.001	0.002
②	10.867	10.865	0.002	10.863	0.002	0.004
③	10.871	10.868	0.003	10.865	0.003	0.006
④	10.870	10.868	0.002	10.866	0.002	0.004
⑤	10.870	10.868	0.002	10.867	0.001	0.003
⑥	10.870	10.868	0.002	10.867	0.001	0.003
⑦	10.865	10.863	0.002	10.861	0.002	0.004
軸径	3.960	3.960	0.000	3.960	0.000	0.000

図－10 回転子の摩耗量

8. 今後について

「特殊偏心軸受」を活用した次の展開として、現行製品「微小流量計NH」への搭載を考えている。「微小流量計NH」は、回転子の傾きによる計測精度の悪化を電子計数部による補正と厳しい加工公差によって解決し、高精度を実現している製品である。本製品に「特殊偏心軸受」を搭載することで更なる高精度化・微小流量計測を実現できる可能性がある。

9. おわりに

新製品「小型アクアメータWE」は2022年4月に市場投入を完了した。今回取り組んだ内容は技術的には単純なものであるが、発生した課題に対し、技術者のアイデアでもって早期に解決、成果を得られた事例として紹介した。

本開発で得られた成果のひとつである「特殊偏心軸受」は、今後の小サイズ流量計開発における共有のコア技術となりえる。自身の発明が、制御システム事業部における流量計測技術の発展に資することができたことは嬉しく思う。

小型アクアメータが属するロータリピストン式による計測機構は、これまで完成されたものとして考えられてきたが、今回の取組みによってまだまだ技術開発の余地があることがわかった。今後も、新たな技術開発に取り組み、諸先輩方の残した技術を更に発展させ、よりよい製品作りに邁進していく所存である。

〈参考文献〉

- 1) 松岡 祥浩, 青山 邑里, 児島 忠倫, 應和 靖浩, 山本 全男「流れの力学」, 2001.5, p.119-121
- 2) 松尾 一泰「圧縮性流体力学」, 1994.10, p.39