

電磁流量計 電池駆動のための低消費化技術

Low Power Consumption Technology for Battery-Driven Electromagnetic Flowmeters

株式会社 山武
アドバンスオートメーションカンパニー Taka Inoue

井上 陽

株式会社 山武
アドバンスオートメーションカンパニー Ichiro Mitsutake

光武 一郎

株式会社 金門製作所
荒木 敏文
Toshifumi Araki

株式会社 金門製作所
小島 剛
Tsuyoshi Kojima

キーワード

電磁流量計, 電池駆動, 低消費電力, 水道メーター

水道メーターの規格を満足するために、電池交換不要で8年間駆動し、より広い計量範囲を持つ電磁方式の水道メーターを開発した。電池という限られた電力の中でより広範囲の計測を可能とした技術について報告する。

To better meet the required specifications for a custody transfer meter used to measure water consumption, an electromagnetic meter which can operate for 8 years without battery replacement, and which has a wider measuring range than conventional meters, has been developed. We report on the technology that has enabled a wider rangeability of measurement in a meter using only battery power.

1. はじめに

取引・証明用の水道メーターに適用される計量法が2005年10月に改定された。この改定で、従来計量法の特定計量器検査規則にて技術要件が規定されていたが、新基準では日本工業規格のJIS B8570へ移行された。それに伴い、2011年4月以降は新基準に適合した水道メーターのみ販売可能となった。

新基準では計量範囲の考え方や定義が大幅に変わり、要求される検定公差の流量範囲の比も変更された。また、許容される圧力損失の規定も厳しくなった。

水道メーター市場では機械式（羽根車式）が主流であるが、より厳しくなった圧力損失の規定および安定した流量特性に対応させることは口径が大きくなるほど難しい。さらに、大口径を使用するユーザからは大流量の連続測定などの期待が大きい。

そのため当社では測定原理に、機械的可動部がないため圧力損失が発生せず大流量測定に適している電磁式を採用した。電磁式は機械式と異なり、流量測定に電源を使用する。そのため、外部からの電源供給なし

でJISの規定にある有効使用期間8年間の駆動を実現する必要がある。

本稿では、電磁式水道メーター（以後、電池電磁TMと呼ぶ）として、電池交換不要で8年間駆動できる低消費電力技術および広範囲の計測を可能にした技術を紹介する。

なお、本製品が対象とするのは、口径50～200mmの主に公共設備や集合住宅の親器に使用される水道メーターである。



図1. 電池電磁の外観

2. 製品要求と仕様

電池電磁の特徴と水道メーター市場に要求される製品の仕様を紹介する。

2.1 口径

azbilグループでは、新基準の水道メーターとして機械式で口径13～100mmを開発している。電磁式は口径50～200mmを製品化しており、口径50～100mmは大流量測定などの使用条件により機械式・電磁式を選択できる。

表1. azbilグループが提供する水道メーターの原理毎の口径

	13	20	25	30	40	50	65	75	100	125	150	200
機械式	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
電磁式						○	○	○	○	○	○	○

2.2 計量特性

水道メーターの計量範囲は大流量域と小流量域とに分かれ、大流量域の検定公差は±2%・小流量域は±5%で規定される。なお、検定公差とは計量法に規定される特定計量器検査におけるメーター器差の許容値である。

従来の計量要件は定格最小流量（旧基準では最小流量と呼ぶ）と定格最大流量（旧基準では使用最大流量と呼ぶ）の比が1:66（以降この比を計量範囲と呼ぶ）である。一方、新基準では計量範囲が任意である。

表2. 流量の定義

定格最小流量 Q1	メーターが検定公差内(±5%)で作動することが要求される最小の流量。
転移流量 Q2	大流量域(検定公差内±2%)と小流量域(検定公差内±5%)との2つの領域に区分する境界の流量。
定格最大流量 Q3	メーターが検定公差内(±2%)で作動することが要求される最大の流量。

本開発では、流量測定を広くするため、計量範囲1:200を目標とした。図2に旧基準と電池電磁の計量範囲の比較を示す。電池電磁は旧基準に比べ計量範囲が広く大流量域が広いことがわかる。

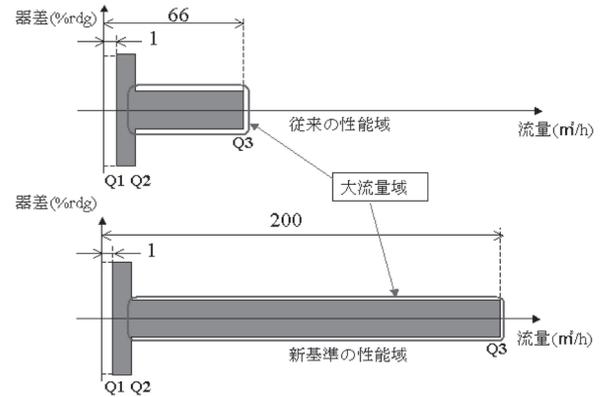


図2. 旧基準と電池電磁の計量範囲の比較

小流量域も、旧基準では定格最小流量と転移流量の比が1:6.6であったが、新基準では定格最小流量と転移流量の比が1:1.6となっている。

図3に示すように、検定公差±2%が要求される下限が広がっており、この仕様も電池電磁で実現する必要がある。

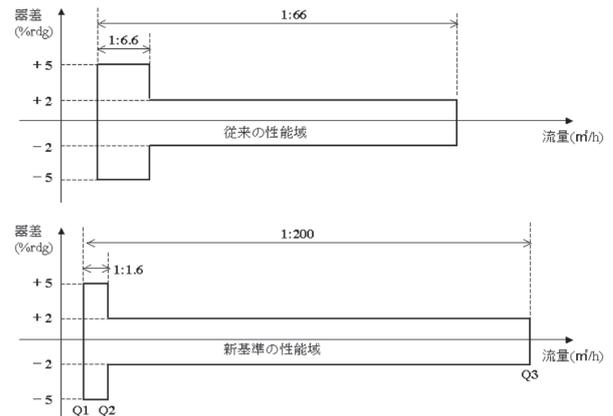


図3. 旧基準と新基準の計量範囲の比較（小流量域）

なお、旧基準と新基準の計量範囲を比較するために図2、図3では旧基準でもQ1・Q2・Q3により、最小流量・転移流量・使用最大流量の範囲を示している。

2.3 電池駆動

水道メーターは従来から機械式が主流であったため、外部からの電源供給は不要である。また、設置場所も電源が供給できるような場所がほとんどないため、電磁式では電池駆動が必要となる。

水道メーターは有効使用期間が8年であり、その有効使用期間よりも少なくとも1年以上メーターが正確に作動するように規定されている。そのため電池寿命として9年を必要とする。

3. 電磁流量計の概要

3.1 電磁流量計の測定原理

電磁流量計は、ファラデーの電磁誘導の法則を応用した流量計である。

ファラデーの電磁誘導の法則とは、「磁界の中を物体が動くと、その物体内に起電力が発生する」というものである。

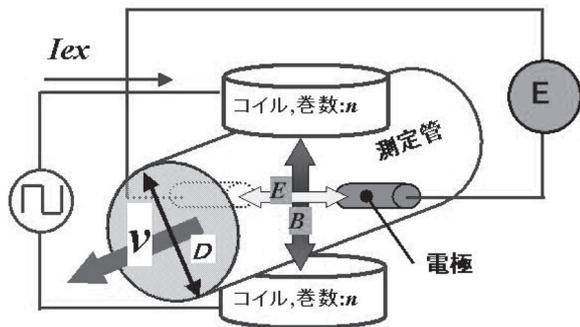


図4. 電磁流量計の測定原理

発生する起電力はファラデーの法則に基づいて、以下のように表せる。

$$B \propto n \cdot I_{ex} \quad \text{式 (1)}$$

$$E = kBDv \quad \text{式 (2)}$$

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} v \quad \text{式 (3)}$$

B : 磁束密度, n : コイルの巻数, I_{ex} : 励磁電流

E : 起電力, k : 定数, D : 内径, v : 流速, Q : 体積流量

(1) 検出器内の巻数 n のコイルに励磁電流 I_{ex} を印加すると、コイルとコアにより、磁束密度 B が測定管内に印加される。

(2) (1) の状態で導電性の液体が流速 v で流れると式 (2) に従い、起電力 E が流体内に発生する。この起電力 E を測定管内壁に磁気回路と直行した位置に設けられている一対の電極にて検出し、変換器内に取り込む。

(3) この E は式 (1) より流速に比例し、式 (3) に基づき、変換器内にて体積流量 Q に変換される。

3.2 電磁流量計の構成

電磁流量計は検出器と変換器から構成される。

検出器は測定する流体を流し、発生した起電力を電極で検出する。

変換器は励磁電流を検出器内のコイルに流し、また電極から得られる起電力の信号処理を行う。

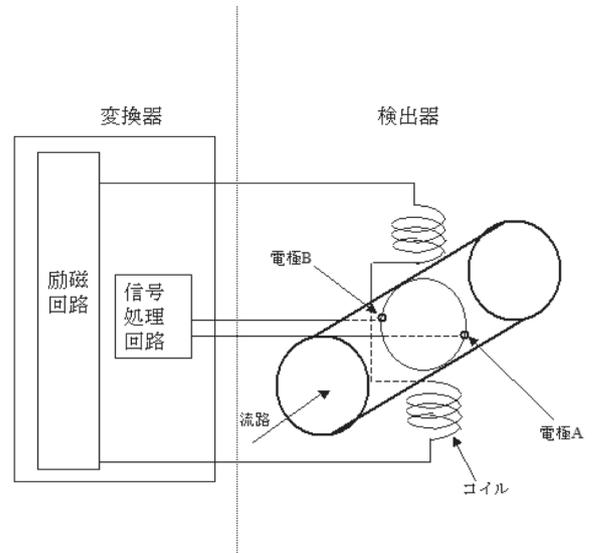


図5. 電磁流量計の構成

変換器では、電極から得られる微小な流量信号を増幅とノイズの除去を繰り返しながら、より S/N 比の高い信号を流量信号として取り出している。その信号処理を図6に示す。

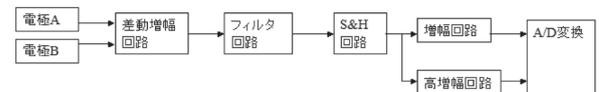


図6. 信号処理回路ブロック図

3.3 電源方式による消費電力の比率

電磁流量計はその原理より安定した出力を得るために、供給する電流を多くするほど、安定した流量計測が可能となる。

電池電磁では、従来機種と比較して約 1/5000 の低消費電力化が必要となってくる。表3に電池電磁の消費電力の比較を示す。

表3. 電磁流量計の消費電力比較

従来機種*	電池電磁
11W	2.4mW

*従来機種は当社 MGG10C

4. 広範囲の流量計測の実現

4.1 広範囲の計測には

電磁流量計は図4に示すように測定管内に配置された一対の電極から起電力を得ている。一方で電極からは様々な種類のノイズも拾い、流量測定に影響を与えてくる。この S/N 比を高くすることで安定した流量計測を可能とする。

また、低流速と高流速では発生するノイズの特徴も

異なり、安定した広範囲の計測にはそれぞれのノイズを除去することが必須である。

S/N 比向上のため、下記の3通りの方法に着目した。

①の励磁電流の増加は消費電力に依存するため5項の低消費電力化で述べる。本項ではノイズ対策について説明する。

- ① 励磁電流増加
- ② 検出器によるノイズ抑制
- ③ 変換器によるノイズ除去

4.2 電池電磁のノイズ

表4に流体から起電力Eに重畳してくるノイズの分類を示す。これらのノイズが重畳してくると、流量測定誤差要因となる。

表4. 電池電磁のノイズ

ノイズ種類	説明
コモンモードノイズ	流体の持つ電位変化により発生するノイズ
フローノイズ	流速、流体導電率に依存したノイズ
商用電源ノイズ	商用電源で動作する機器から発生するノイズ

コモンモードノイズは流体の持つ電位変化により発生するノイズで、全流量範囲に影響してくるノイズである。特に流速が低い時は起電力が小さいため、その影響が顕著に現れる。

フローノイズは流速や流体導電率に依存し、電極にノルマルモードノイズとして発生するノイズである。

商用電源ノイズは商用電源で動作する機器から発生するノイズである。設置される現場によっては、装置の商用電源ノイズが配管から容量結合して流体に重畳してノイズ成分として発生する可能性がある。

4.3 ノイズ対策

4.3.1 コモンモードノイズ

本開発ではコモンモードノイズに対して、検出器では(1)に示す確実な流体基準電位の確保を、変換器では(2)に示す差動増幅回路のコモンモードノイズ除去比(Common-Mode Rejection Ratio, 以下CMRRと省略する)を向上することによりノイズ影響を小さくすることを実現した。

(1) 検出器による測定基準電位の安定

電磁流量計では、流体の持つ電位変動を吸収するため流体電位を基準として取る必要がある。そのため、検出器内部(通常は両端)に導電性のある接液部(以降接液部と呼ぶ)を設け、その接液部の電位を基準電位として扱う。

接液部は接液面積が広い程、確実な基準電位が取れる。しかし、検出器内には起電力を逃さないように絶縁のライニングが必要なため、単純に接液部を増やすことは難しい。



図7. 電池電磁の流体測定部

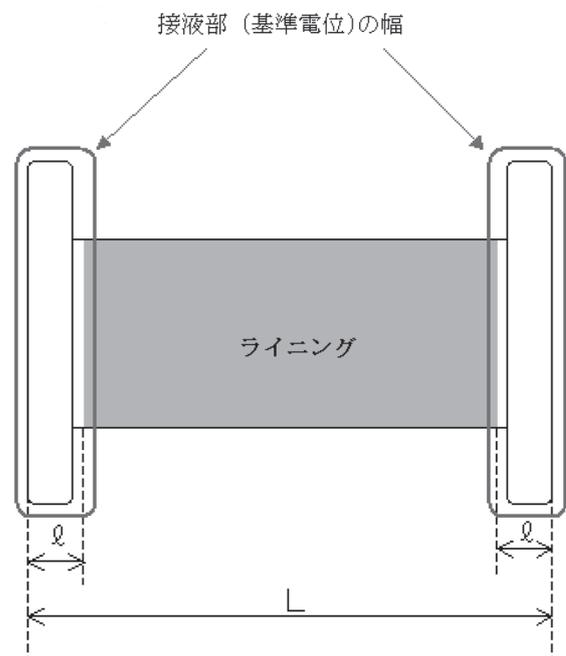


図8. 接液部の幅

図8のように検出器の面間をLとし、接液部の幅を ℓ とする。ライニングの幅は、 $(L - 2\ell)$ で表わされる。 ℓ を増やしていくと、安定した基準電位が確保できるため、S/N比のNが下がる。一方で、ライニング部の幅は狭くなっていくため、Sが下がっていく。

ℓ の幅とS/N比をグラフ化したものが図9となる。本開発では各口径毎に最適な接液幅とすることで、基準電位の安定と起電力の獲得(S/N比向上)を実現している。

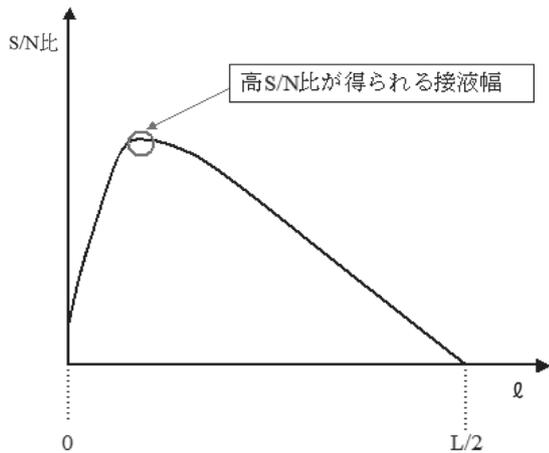


図9. 接液部とS/N比の関係 (イメージ)

(2) 変換器のコモンモードノイズ除去特性

検出器で抑制されたコモンモードノイズはさらに変換器の差動増幅回路により除去する。差動増幅回路は図6に示すように、電極A・Bから得た信号を最初に増幅する回路である。

本開発では差動増幅回路の回路構成を変更することにより、従来の方式と比べてCMRRを向上させている。

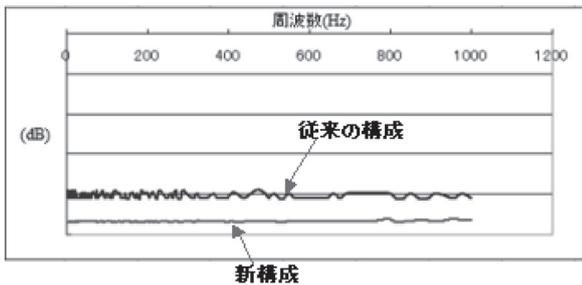


図10. 差動増幅回路の構成によるCMRRの比較

図10は電極A、Bから周波数1Hz～1000Hzの電気信号を入力した時の差動増幅回路での減衰率を示す。新回路構成により、ノイズが約100倍(-40dB)減衰している。

4.3.2 フローノイズ対策

高流速を測定する時には流量信号に図11のようなフローノイズが重畳してくる。本開発は信号起電力の増幅率を増やしているため、フローノイズの増幅も大きいことから、この影響を減らしていくことが必要となってくる。

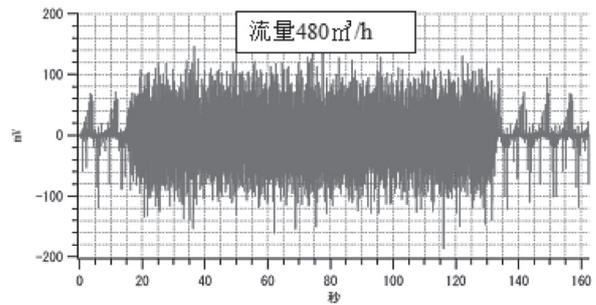


図11. フローノイズ波形

この影響を減らす方法として信号処理回路のサンプル&ホールド回路(以降S&H回路)に着目した。S&H回路は信号を励磁周波数 f_{ex} でサンプリングする回路である。特性は $f_{ex} \cdot 3f_{ex} \cdot 5f_{ex}$ と f_{ex} の奇数倍成分を出力するため、 f_{ex} を高くすることでノイズに反応する帯域を減らしたノイズ除去が可能となる。

フローノイズは図12に示すように0.1Hzから100Hz程度の帯域において発生している。したがって、この帯域のノイズに対する対策を行った。

流量信号は励磁周波数とその高調波により形成されている。そのため、周波数が低い程、その奇数倍の信号がノイズの影響を受けやすくなり、測定誤差が増える(図13参照)。すなわち、励磁周波数は高周波のほうが測定に有利である。

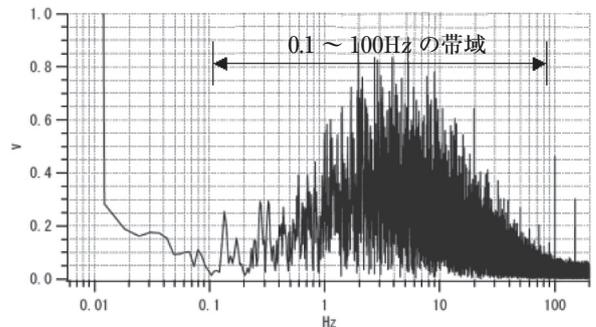


図12. フローノイズの周波数分析

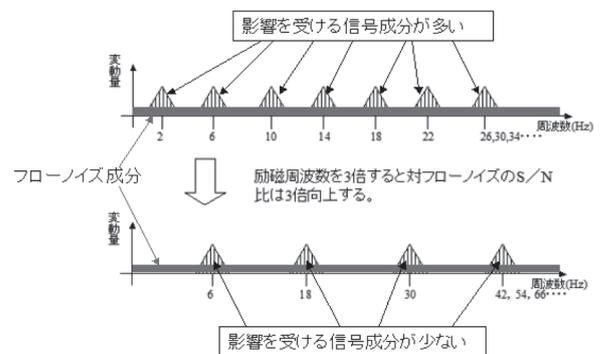


図13. 励磁周波数によるフローノイズの影響度

一方で、励磁周波数を高くすることは、消費電流の増加や5.2項に述べる定常域が短くなってしまいうため、単純に高くはできない。

Q3近傍の高流速での誤差の発生要因はフローノイズが支配的である。本開発では低流速よりも高流速に対してよりフローノイズの影響を受けないようQ3近傍に対して適正となる励磁周波数を選択した。それにより、図14に示すように全流速範囲にてフローノイズの影響を低減できた。

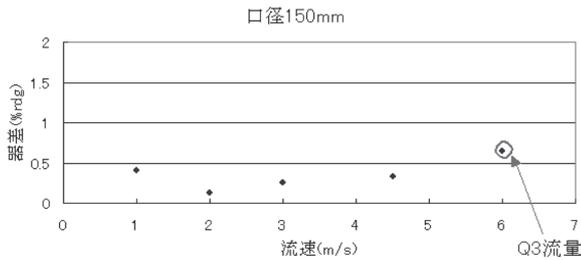


図14. フローノイズによる誤差発生量

4.3.3 商用電源ノイズ対策

装置からの容量結合によって発生する商用電源ノイズは、流量信号に図15のように50Hz（または60Hz）ごとの高周波ノイズを発生させる。

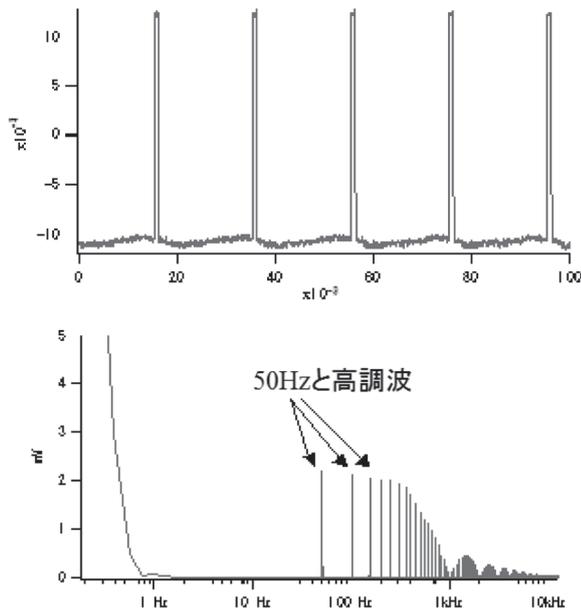


図15. 装置からの商用電源ノイズと周波数分析結果

このノイズは50Hzとその高調波成分で構成されている。このノイズは流量特性に影響を与えるため、本開発では電磁流量計で通常使用されているローパスフィルタに加え、商用ノイズの高調波成分を除去するためバンドエリミネーションフィルタを追加した。

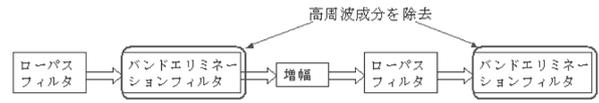


図16. フィルタ回路の構成

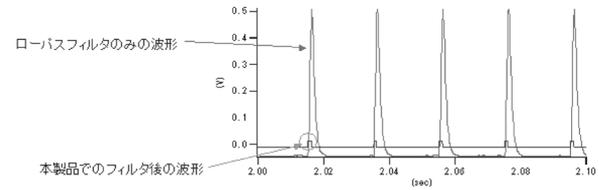


図17. 除去波形

図17にバンドエリミネーションフィルタを追加したときのノイズ波形を示す。新たなフィルタ回路が通常のフィルタ回路に比べノイズ除去の能力が高いことがわかる。

4.3.4 器差結果

4.3.1～4.3.3項で紹介した技術を使用した電池電磁の器差特性を図18に示す。高流量・低流量ともに安定して測定できていることが分かる。

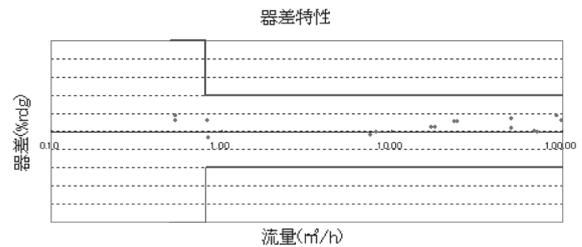


図18. 電池電磁の器差特性

5. 低消費電力化

5.1 電磁流量計の消費電力の割合

電磁流量計は大きく分けて、励磁回路と信号処理回路とそれ以外の回路で構成される。電源方式により若干異なるが、各回路の消費電力の割合を図19に示す。

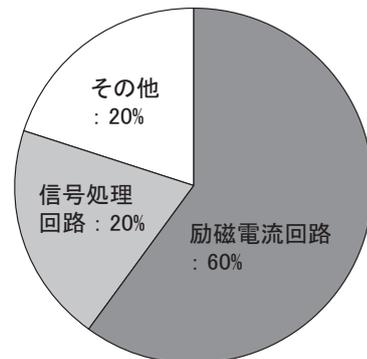


図19. 電磁流量計の消費電力割合

励磁電流回路が占める消費電力の割合が高いため、主にこの回路での電力を削減すれば、機器として低消費電力化にはつながる。しかし、コイルに流す電流を削減することにもなり、S/N比が悪くなる。このため、コイルに流す電流を最大現に確保しながら、低消費電力を実現する必要がある。

5.2 励磁方式

当社では、従来より矩形波励磁方式（図20）を採用している。

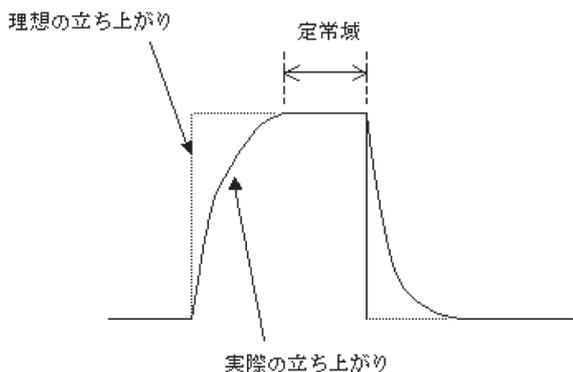


図20. 励磁電流の定常域

式 (1) $B \propto n \cdot I_{ex}$ の式に示すように磁束密度を大きくするにはコイルの巻き数を増やすか、励磁電流を大きくすればよい。

しかしながら、コイルの巻き数を増やすとコイルのインダクタンスが増え、励磁電流の立ち上がりが遅くなる。立ち上がりが遅いと、十分な定常域（励磁電流が一定になる期間）がとれなくなる。そのため、従来は励磁電流の立ち上がり時に高い励磁電圧を印加し、立ち上がりを早くするようにしていた（図21参照）。

また、励磁電流を大きくすることで、より大きな磁束密度を得ることができるが、その反面消費電力は増大する。

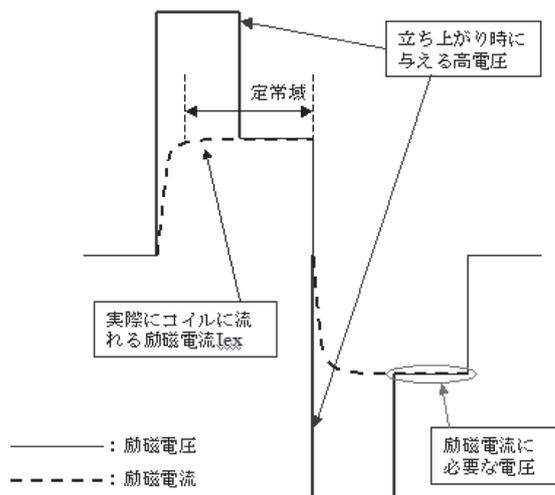


図21. 従来の励磁方式

本開発では、消費電流を削減しながら、十分な定常域を得る方式を確立したので、そのアプローチについて述べる。

(1) 励磁の低消費電力化

コイルに印加する励磁電流の大きさは、コイルのインダクタンスやコイルの巻き数、またコイルの巻き数により増減するコイルスペースなど、いろいろな要素が関わりあって決定される。

電池電磁はアプリケーションが特定されていることもあり、これら各要素の設計自由度が比較的高く、磁場解析、回路解析、構造解析などのシミュレーションを重ねて現時点での最適解を求めた。

これにより、従来より1/70となる低励磁電流を可能とした。

(2) 低電力で早く定常域に達するための電圧印加

定常域の確保のため、従来は図21に示すように励磁電流の立ち上がり時に高電圧を与えることを行っていた。

この方法は定常域に早く到達させるだけではなく、低消費電力化にも有効である。なぜならば、励磁の立ち上がりはコイルのインダクタンスがあるため、立ち上がるまでは高電圧を与えても励磁電流が小さいからである。

本開発では定常電圧に対して与える高電圧の比を従来より2.5倍高くし、より早い定常域の到達を実現した。そのため、高電圧の印加時間を1/5とすることが可能となり、低消費電力と定常域の確保を両立させた。その高電圧印加方法の差を図22に示す。

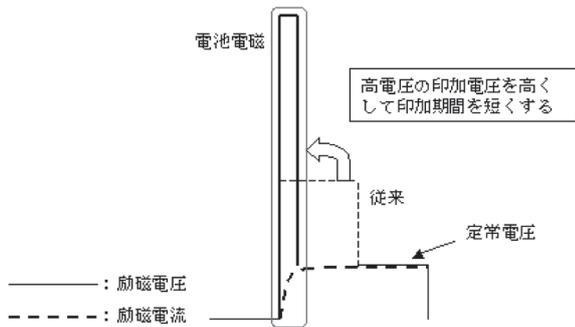


図 22. 低消費励磁回路

(3) サンプリングタイムの見直しと休止期間

電磁流量計では信号処理回路のS&H回路の中で流量信号を定期的にサンプリングすることにより、変化する流量値に対応させている。このサンプリング時間は流量信号が安定している時間、すなわち励磁電流の定常域が確保されている時間が必要となる。そのため、通常は励磁周波数と同じ周波数となっている。

本製品はアプリケーションから適正なサンプリングタイムを決定した。また、(2)により定常域に早く到達することが可能となり、磁場を与える必要のない期間は、励磁電流を印加しない構成とした。

図 23 に励磁の休止期間を示す。1周期の間に休止期間を設けることにより、一層の低消費電力化を達成した。

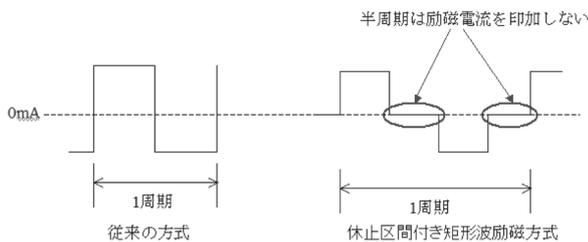


図 23. 休止期間

(1)～(3)の方式を採用することにより、励磁電力の大幅な削減を実現した。

6. 終わりに

本稿にて紹介した低消費化技術、計測技術により、水道メーターの広流量範囲にわたる計測を実現した。

本開発は水道メーターと電磁流量計の技術を保有する金門製作所と山武との共同開発で実現したものであり、互いの長所を活かした製品である。

今後もこのようなユーザの要求に応えられるよう、製品開発を進めていきたい。

<参考文献>

- (1) JIS B8570 水道メーターおよび温水メーター
- (2) 2線式電磁流量計の高S/N比化技術, Savemation Review (2003), pp40-45
- (3) 2011 水道メーター総合カタログ金門製作所, p7

<商標>

電池電磁は、株式会社 山武の登録商標です。

<著者所属>

- | | |
|-------|---------------------------|
| 井上 陽 | アドバンスオートメーションカンパニー
開発部 |
| 光武 一郎 | アドバンスオートメーションカンパニー
開発部 |
| 荒木 敏文 | 株式会社 金門製作所 開発部 |
| 小島 剛 | 株式会社 金門製作所 開発部 |