

# 自動はかりに使用されるロードセルおよび その周辺技術に関する調査研究

田中良忠\*

(2018年4月10日受理)

## A survey on load cells and related technologies for automatic weighing instruments

Yoshitada TANAKA

### Abstract

Recently, legal restraint has been imposed on automatic weighing instruments in Japan, namely, automatic catchweighing instruments (ACWIs), automatic gravimetric filling instruments (AGFIs), totalizing hopper weighers, and belt weighers. The number of these instruments is increasing to meet the request of higher producing capacity in industry. In this survey, load cells and related technologies for these instruments, which determine the performance of these scales, were investigated for improving the efficiency of verification and inspection tests. It was found that totalizing hopper weighers and belt weighers are using similar technology as non-automatic weighing instruments, and technical trend for ACWIs and AGFIs is focused on development of signal processing technologies. This survey will lead to efficient verification and inspection tests.

### 1. はじめに

はかりは物体に作用する重力を利用して、その物体の質量を計測するために使用する計量器である。はかりはその操作方法に従って、「自動はかり」または「非自動はかり」に分類される。ここで、自動はかりとは、計量の過程において作業者の介入を必要としないはかりである。一方、非自動はかりは計量の過程において作業者の介入が必要なはかりであり、ゼロ点の確認、表示値安定の判定、計量結果の承認等がこれにあたる。非自動はかりの例として、試薬の計量に使用される電子天びん<sup>1)</sup>、精肉店での量り売りに使用される対面販売用はかり、トラックの積み荷の計量に使用するトラックスケールが挙げられ、家庭内では体重計、キッチンスケールを挙げることができる。自動はかりの例として、食品の生産ライ

ン中で一定量の食品を袋詰めする充填用自動はかり、製鉄所においてベルトコンベヤにより運搬された原料を計量するコンベヤスケールを挙げることができる。自動はかりは通常の運転中には作業者を必要としないため、生産ラインの省力化・高速化に貢献している。また、自動はかりで得られた計量対象の平均値や標準偏差といった統計情報を工場全体の管理システムに反映させることも容易である。さらに、計量結果の履歴は電子的に記録されるため、品質管理上重要な製造のトレーサビリティ確立の観点からも自動はかりの導入が進んでいる。消費者保護の観点からは、袋入り製品の内容量が表示値を大幅に下回することは避けなければならない。一方、生産者の立場からは内容量の過量は材料費が上昇するため製造コストの増加につながる。このため、正確な計量は消費者、生産者どちらの立場からも必要とされている。

我が国では適正な計量の実施の確保を目的とした計量法が運用されており、そのなかで経済産業大臣の諮問機

\*工学計測標準研究部門質量計試験技術グループ

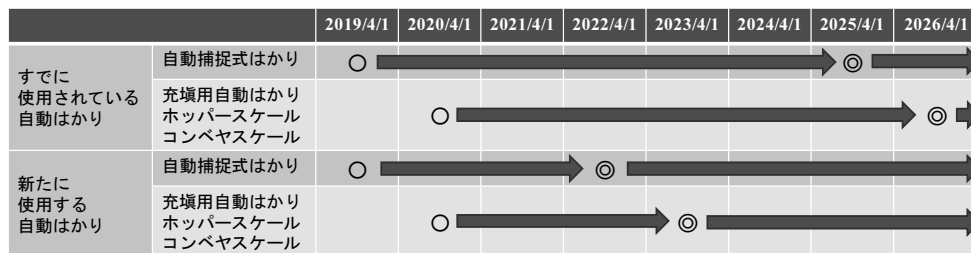


図1 自動はかり検定制度ロードマップ  
○：検定制度の開始，◎：検定制度通常運用の開始。

関として計量行政審議会の設置が規定されている。計量行政審議会は計量技術の進展、計量行政を取り巻く社会環境変化への対応という観点から検討を行い、答申<sup>2)</sup>を2016年11月に取りまとめた。このなかで自動はかりを新たに特定計量器に加えることが示された。この答申の内容を踏まえ、段階的な猶予期間を伴い、2017年10月から自動はかりを規制の対象とする政令<sup>\*1</sup>が施行された。計量性能に関して、今までは自動はかりの製造者に委ねられていたが、取引の安全性、信頼性の確保のため自動はかりを特定計量器に追加し、これを規制することとなった。答申のなかで近年の国内の非自動はかりおよび自動はかりの割合の推移が示され、自動はかりの割合が増加していることが明らかとなった<sup>2)</sup>。海外において自動はかりが規制対象となっている国の例としてイギリス、ドイツ、フランス、アメリカ、カナダ、オーストラリアを挙げることができる<sup>2)</sup>。自動はかり規制化の背景として需要の拡大、計量精度の低い製品の国内流通の防止が考えられる。

計量法では、自動はかりは以下の5種類に分類される。

- 1) 自動捕捉式はかり
- 2) 充填用自動はかり
- 3) ホッパースケール
- 4) コンベヤスケール
- 5) その他の自動はかり

これらの自動はかりのうち、規制の対象となるのは1)から4)の4機種であり、かつ、取引又は証明に使用しているはかりである。この4機種は取引又は証明において頻繁に使用されるとともに、国際法定計量機関(Organisation Internationale de Métrologie Légale, OIML)の国際勧告によって技術基準が整備されている自動はかりである。規制は4機種の自動はかりを検定の対象とすることで行われ、器差を中心としたはかりの性

能が要件を満たしているか否か、全品チェックされる。検定制度の開始にあたっては使用者に過度な負担を強いることがないよう、段階的な猶予期間が設けられている。そのロードマップを図1に示す。図1において「○」は検定制度の開始を示し、「◎」は検定制度通常運用の開始を示す。両者の間の期間は検定制度導入期間となる。「すでに使用されている自動はかり」とは、自動捕捉式はかりでは2022年3月31日までに、その他3機種の自動はかりでは2023年3月31日までに検定証印(検定に合格したことを示す)が付されていない状態で使用を開始していたはかりを対象としている。「すでに使用されている自動はかり」と「新たに使用する自動はかり」は試験の内容が異なる。「すでに使用されている自動はかり」は、はかりの性能要件が現在とは異なる基準で作られているため、適正な計量を担保する上で必要最低限な試験基準としてある。

本稿では、この4機種の自動はかりの検定検査試験の効率化を見据えて、荷重検出器であるロードセルおよびその周辺技術に関する状況を整理するため、これらの動向の調査結果について述べる。なお、本調査研究と検定検査効率化の全体像との位置関係は図2ようになる。近年の自動はかりの需要拡大や取引証明でのさらなる使用拡大が予想されたため、自動はかりの特定計量器への追加が行われた。現在(本稿執筆時点)は検定開始前の期間であり、この段階で荷重センサの評価や調査を行い、検定制度の開始後は試験方法の課題の抽出を行い、試験の信頼性を損なわない範囲で試験の効率化の検討や検査の省略を試みる。その後も検定における課題の抽出・効率化の手順を繰り返し実施し、検定検査試験の効率化を進めていく。

\*1 平成29年6月21日政令第163号

## 2. 自動はかりの概要

### 2.1 自動はかり

規制の対象となる4機種の主な計量対象、特徴、容量の目安を表1に示す。これらの自動はかりの共通点を以下に記す。

1) 自動はかりは産業プラントでの使用を前提としており、はかりの上流側および下流側の被計量物の流れに影響を与えない、すなわち、はかり内部で被計量物の流れが不連続になったとしても、はかり全体で見たとときには被計量物がスムーズに流れるように考慮されている点。

2) 非自動はかりが静止計量をして十分な安定待ち時間があるのに対し、これらの自動はかりは動的計量または非常に短い静止計量を行っている点。

3) 荷重測定に加えて付属機器の動作を制御する必要がある、非自動はかりよりも複雑な制御部を備えている点。

4) ホッパーやコンベヤ等、他の付属機器を備えており、装置全体としてみると一般的な非自動はかりよりも大型化する傾向にある点。

以上が共通項目として挙げられる。

OIMLは各国計量法規の国際的調和を確保するために計量器の国際規格を作成しており、国際勧告として計量器の技術基準が設定されている。我が国はOIML条約に加盟しており、国内法規と国際勧告との整合を求められている。OIMLの国際勧告のうち、はかりに関連する文書を表2に示す。この中で今回規制の対象となる4機種の自動はかりの国際勧告を太字で示した。そのほかに注視すべき勧告として、R106およびR134がある。R106は貨車用の自動はかりであり、レールの一部を荷重受け部として、貨車のはかりの上を移動し、貨車の質量を計量する自動はかりに関する国際勧告である。R134は走行中の自動車の軸重や車両重量を計量する自動はかりに関する国際勧告である。なお、R106およびR134で勧告されているこれらの自動はかりは国内法規において本稿執筆時点では検定の対象外となっている。

### 2.2 自動捕捉式はかり

自動捕捉式はかりの技術基準は国際勧告(OIML R51)として発行されている。自動捕捉式はかりの例として包装済み商品を計量するはかり<sup>7)</sup>が挙げられる。装置の概念図を図3に示す。包装済み商品の生産ラインにおいて、内容量が規定を満たしているか否かを判別するはかりである。また、被計量物の質量値ラベルやその質量に応じ

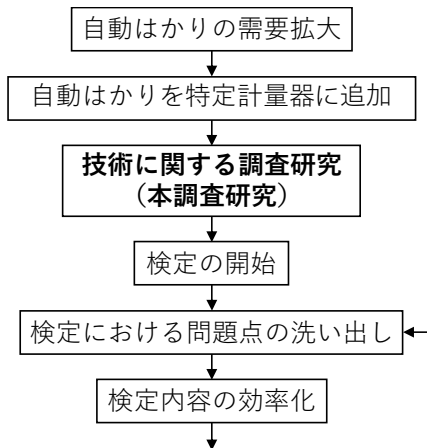


図2 検定検査試験効率化のフローチャート

表1 規制の対象となる4機種の自動はかり

名称	主な計量対象	特徴	容量の目安
自動捕捉式はかり	加工食品, 飲料, 薬品	箱, 袋, 缶の重量を監視する	~10 kg
充填用自動はかり	食品, 粉体, 飼料, 薬品	対象を一定の質量に分割して容器に充填する。または取捨選択して合計を一定質量にする	~10 kg
ホッパースケール	穀物類, 配合飼料	各種原料等を計量し, 所定量に達すると下流に排出する動作を繰り返す	~10 t
コンベヤスケール	鉱物類, 穀物類, 飼料	ベルトコンベヤ上を通過した原料および製品の連続計量をする	~1 t (瞬時荷重)

表2 はかり関連の国際勧告

名称	対象	表題(英語)	発行年
<b>R50<sup>9)</sup></b>	<b>コンベヤスケール</b>	<b>Continuous totalizing automatic weighing instruments (belt weighers)</b>	<b>2014</b>
<b>R51<sup>4)</sup></b>	<b>自動捕捉式はかり</b>	<b>Automatic catchweighing instruments</b>	<b>2006</b>
R60	ロードセル	Metrological regulation for load cells	2017
<b>R61<sup>5)</sup></b>	<b>充填用自動はかり</b>	<b>Automatic gravimetric filling instruments</b>	<b>2017</b>
R76	非自動はかり	Non-automatic weighing instruments	2006
R87	包装商品の内容量	Quantity of product in prepackages	2016
R106	貨車用自動はかり	Automatic rail-weighbridges	2011
<b>R107<sup>6)</sup></b>	<b>ホッパースケール</b>	<b>Discontinuous totalizing automatic weighing instruments (totalizing hopper weighers)</b>	<b>2007</b>
R111	分銅	weights of classes E <sub>1</sub> , E <sub>2</sub> , F <sub>1</sub> , F <sub>2</sub> , M <sub>1</sub> , M <sub>1-2</sub> , M <sub>2</sub> , M <sub>2-3</sub> and M <sub>3</sub>	2004
R129	多次元式測定器	Multi-dimensional measuring instruments	2000
R134	軸重自動はかり	Automatic instruments for weighing road vehicles in motion and measuring axle loads	2006

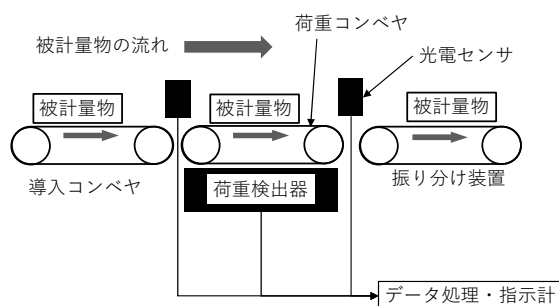


図3 自動捕捉式はかりの概念図

た料金のラベルを貼付するタイプも含まれる。図3の例では計量部がコンベヤ状になっており、被計量物が荷重コンベヤ上に載った状態で質量の測定を行う。荷重コンベヤの前後にはそれぞれ光电センサが設けられ、その信号は荷重検出信号の処理過程で被計量物の供給および搬出信号として使用される。また、被計量物が荷重コンベヤ上に同時に2個以上載ってしまうと、正しい計測ができないため、被計量物の長さをあらかじめ入力し、光电センサの信号と組み合わせることで複数載りの検知を行う。生産ライン上流に充填装置がある場合には内容量を充填装置にフィードバック<sup>8)</sup>することも可能で

ある。あらかじめ設定した内容量の基準値と比較し、不足品および過量品を生産ラインから排出する、振り分け装置を備えている自動捕捉式はかりもある。単位時間あたりの処理数を上げるため、また、生産ライン上流および下流との接続の容易性から、非静止計量（コンベヤを動かし続け、被計量物を搬送中に計量する）をするものが多い。近年、生産ラインの能力向上に伴い、はかりに要求される処理能力すなわち、単位時間あたりの処理数が増加傾向にある。100 g以下の軽い被計量物に対しては毎分660個の処理能力を有する製品も市販されている。

### 2.3 充填用自動はかり

OIML R61にて勧告され、製品の充填量をあらかじめ設定し、その設定値とほぼ等しい質量の製品を容器等に充填する自動はかり<sup>9)</sup>である。また、農作物のように質量にばらつきがある製品を複数個組み合わせ、所望の内容量を実現する組み合わせはかり<sup>10)</sup>(図4)も含まれる。この組み合わせはかりでは、1台のはかりに複数(十数台程度)の計量ホッパーを備えている。各ホッパー内の被計量物の質量値は演算部に送られ、被計量物の質量の合計が目標値に最も近い値となるホッパーの組み合わせ

を選択する。選択されたホッパーのゲートが開き、被計量物を集約し、ライン下流に流す。自動捕捉式はかりと同様、生産ライン効率化の観点から、はかりに要求される単位時間あたりの処理数は今後ますます増えると考えられる。市販品の中には32台の計量ホッパーを備え、毎分420バツクの処理能力をもつ製品が市販されている。

## 2.4 ホッパースケール

OIML R107にて勧告され、荷重検出器を組み込んだ荷受け部（計量ホッパー）をもつ自動はかりである<sup>11)</sup>。貨物船からの原料の荷受け時や製品の出荷時に使用され、以下のような動作を行う（図5）。被計量物は一度供給装置内にため込まれ、その後、計量ホッパー内に移される。計量ホッパー内の被計量物の質量が、あらかじめ設定された所定量に達すると供給ゲートを閉じ、計量ホッパー内の被計量物の質量を計量し、その後排出する。計量ホッパーが空になると、再度ため込み動作に戻り、ため込み→計量→排出を繰り返す。このように不連続計量を行い、各回の計量結果を合算することで、大容量（数t～数百t）の計量を短時間のうちに行う。

## 2.5 コンベヤスケール

コンベヤスケール<sup>12)</sup>はOIML R50にて勧告されている自動はかりである。構造は図6のようにベルトコンベヤの搬送ローラの一部を計量部に置き換えるとともに、ベルト速度の検出装置を備えたものになっている。荷重検出部はベルトを介して被計量物による荷重を検知し、以下の手順で荷重から質量への演算を行う。

- 1) 荷重検出器の出力をもとにベルトの単位長さに積載されている被計量物の質量  $x$  (kg/m) を求める。
- 2) 速度検出装置から得られるベルト速度  $y$  (m/s) との積を求めることで瞬間流量  $xy$  (kg/s) を求める。

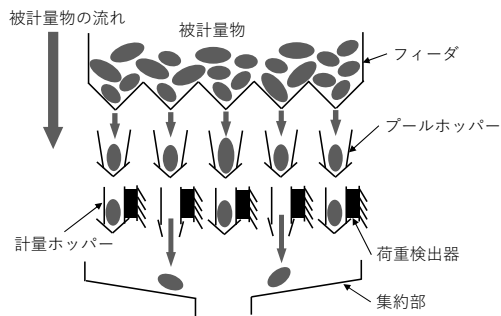


図4 組み合わせはかりの概念図

- 3) この演算を連続して行い、瞬間流量を時間積分することで、コンベヤによって搬送された被計量物の総量を求めている。

コンベヤスケールは上記3機種の自動はかりとは異なり、連続計量を行っているため、その試験方法も他の3機種とは異なっている（後述）。ホッパースケールと同様に荷受け時等に使用され、また、製鉄プラント等の操業にも使用されている<sup>13)</sup>。

## 3. 荷重検出方法

自動はかりの荷重検出方法の調査に先立ち、非自動はかりの荷重検出方法について説明する。荷重の検出方法は数多く提案されている<sup>14), 15)</sup>が、非自動はかりに関しては、1) 電磁平衡式、2) 音叉式<sup>16)</sup>、3) 電気抵抗線式<sup>17)</sup>が主に使用される。これらの検出方式は分解能、コスト、消費電力等にそれぞれ特徴があり、非自動はかりの使用用途によって選択されている。

### 3.1 電磁平衡式荷重センサ

内部に永久磁石およびコイルを備えており、荷重  $mg$  とコイルに生じる電磁気力  $F_{em}$  とを釣り合わせることで荷重の測定を行う（図7）。コイルに働く力  $F_{em}$  は磁束

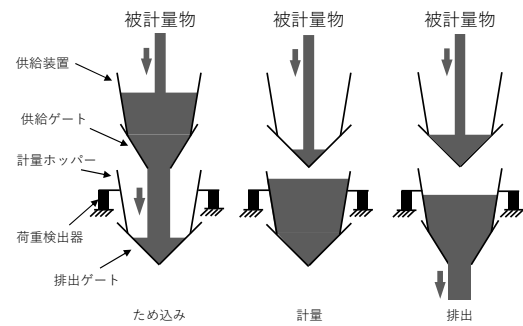


図5 ホッパースケールの概念図

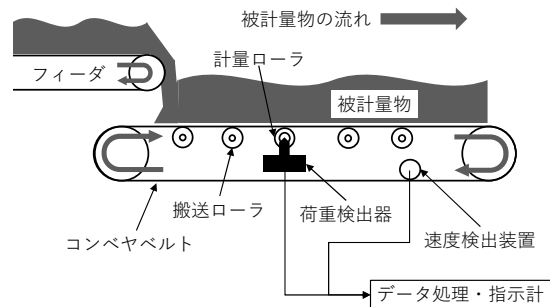


図6 コンベヤスケールの概念図

密度  $B$ 、コイルに流れる電流  $I$ 、コイル導体の有効長さ  $L$  を用いて、 $F_{em} = BIL$  と表すことができる。図7のように荷重を受けた際の遮蔽板の沈み込みを光センサにより検知し、荷重を受ける前と同じ位置に遮蔽板を戻すようにコイル電流をフィードバック制御する。コイル電流と荷重との関係をあらかじめ求めておき、コイル電流をもとに荷重を求める。フィードバック制御により、バランス後は可動部が荷重を受ける前と同じ位置に戻るため、測定の方法は零位法に分類される。零位法は高精度測定が可能であり、本方式の荷重センサは安定性および分解能の点で特に優れている。短所としては、コイルに生じる力には限りがあり、てこを用いても大容量化は難しい点が挙げられる。このため、電子天びん等比較的小容量の非自動はかりに使用されている。また、消費電力はやや多く、発熱を伴うため、ウォームアップ時間が必要となる。

### 3.2 音叉式荷重センサ

金属製の音叉に荷重を加え、その際の共振周波数変化

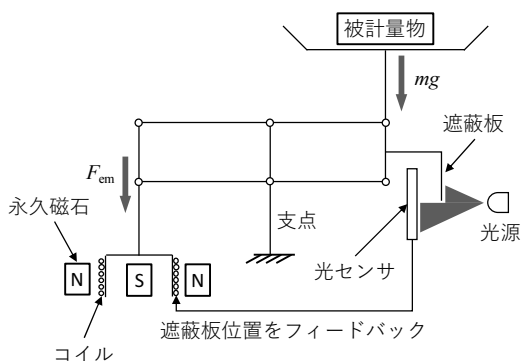


図7 電磁平衡式荷重センサ

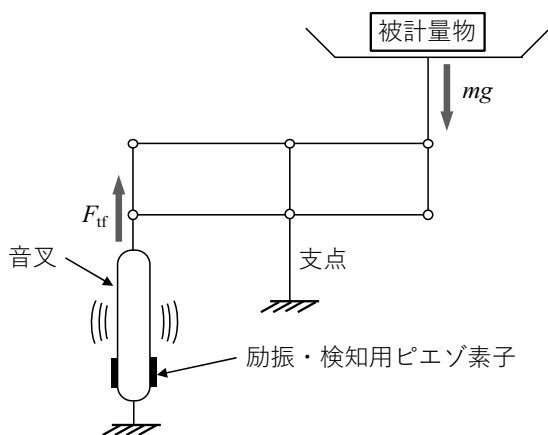


図8 音叉式荷重センサ

を利用して荷重の測定を行う (図8)。音叉の励振および共振検知は音叉下部に設置したピエゾ素子により行う。振動部分を音叉型にすることで、振動に伴う運動量を相殺し、高精度化を実現している。

線密度  $\rho$ 、長さ  $l$ 、張力  $T$  の弦の基本振動の固有振動数  $f$  は

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{T}{\rho}}$$

と表すことができる。図8において無負荷時の共振周波数を  $f_0$ 、音叉にかかる張力を  $F_0$  とすると  $f_0$  は

$$f_0 = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F_0}{\rho}}$$

と表すことができる。荷重  $F_{tt}$  がかったときの共振周波数を  $f_{tt}$  とすると、これらは以下の関係式が成り立つ。

$$f_{tt} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F_{tt} + F_0}{\rho}}$$

$F_0$  を消去し、 $K = 4l^2\rho$  とおくと

$$F_{tt} = K(f_{tt}^2 - f_0^2)$$

が得られ、共振周波数を用いて荷重の測定を行うことができる。

この方式の利点としては、電磁平衡式と比較しても遜色のない高い分解能をもつ点、消費電力が微小であるため、ウォームアップが短時間で済み、かつ防爆仕様やバッテリー駆動への対応が容易な点が挙げられる。測定結果は周波数から直接カウント値として得られるため、AD変換回路が不要な点およびAD変換回路由来の誤差が生じない点も特徴として挙げられる。

### 3.3 電気抵抗線式荷重センサ

金属箔が引っ張り・圧縮力を受けた際の形状変化による抵抗値の増減を利用して荷重を測定する。図9にひずみゲージの模式図を示す。樹脂製のベース上に金属箔を貼り付けた構造をしており、図9の横方向にひずみゲージを伸長すると抵抗値が増加し、反対に圧縮すると抵抗値が減少する。このひずみゲージを金属製の起歪体に張り付け、ひずみゲージ式ロードセル<sup>18), 19)</sup>として使用する

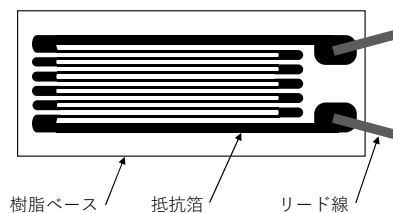


図9 ひずみゲージ

(図10). 国内ではこのひずみゲージ式ロードセルを単に「ロードセル」と呼称することが多い。起歪体には弾性変形を起し易くした肉薄部を設け、ひずみゲージを貼り付ける。ひずみゲージは湿度の影響を受けやすいため、防湿処理を施してある。4枚のひずみゲージを図10 a) のR1からR4の位置に貼り付けた場合、荷重を受けるとb)のように起歪体が変形し、各ひずみゲージに伸長または圧縮の形状変化が起こる。荷重による抵抗値変化は僅かであるため、ブリッジ回路(図11)を用いて荷重の計測を行う<sup>20)</sup>。電圧源による印可電圧を $E$ 、出力電圧を $e$ 、各ひずみゲージの抵抗値を $R_1$ から $R_4$ 、ひずみによる抵抗値の変化量を $\Delta R_1$ から $\Delta R_4$ とするとこれらの関係は以下ようになる。

$$e = \frac{E}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

理想的な条件下 ( $R_1=R_2=R_3=R_4$ ,  $\Delta R_1 = -\Delta R_2 = \Delta R_3 = -\Delta R_4$ ) では

$$e = \frac{\Delta R_1}{R_1} E$$

となる。測定を1枚のひずみゲージのみで行うと、温度

変化に伴う抵抗値の変化により、あたかも荷重が増減したかのように出力されてしまう。4枚のひずみゲージでブリッジ回路を構成することで、温度変化による抵抗値の変化が打ち消しあい、出力の変化を抑えることができる。本方式の荷重センサは高精度化がやや難しい反面、構造が比較的単純であることから、他の方式に比べてコストを抑えることができ、また、起歪体の設計を変更することで高荷重への対応が可能である。起歪体の材質は低荷重用にはアルミ系合金が使用され、高荷重用には鉄系合金が使用される。荷重を負荷した際にコイル電流等のフィードバックを伴わないため、測定の方法は偏位法に分類され、応答は速く数kHzに達することも本方式の特徴の一つである。

以上、非自動はかりの各種センサの長所・短所をまとめると表3のようになる。一方、自動はかりでのこれらのセンサの採用状況は以下のようであった。自動捕捉式はかりのうち、小ひょう量(おおよそ1kg以下)では電磁平衡式荷重センサの製品が見られるものの、1kgを超えるひょう量の自動捕捉式はかりおよび他の3機種は自動はかりではひずみゲージ式ロードセルを用いたは

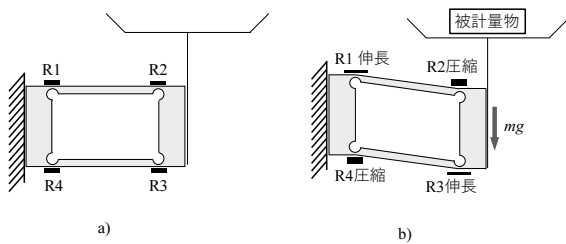


図10 ひずみゲージ式ロードセル  
a) 無負荷時. b) 荷重負荷時.

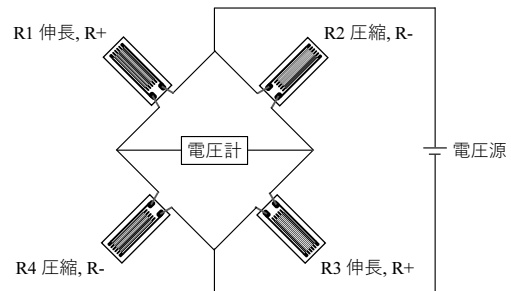


図11 ブリッジ回路

表3 主な荷重センサの特性一覧

方式	分解能の目安	長所	短所
電磁平衡式	1/100万	高安定 高分解能	高コスト 大容量化が難しい
音叉式	1/30万	AD変換不要 低発熱	中容量以上には てこが必要
電気抵抗線式	1/3万	低コスト 高速応答 大容量に対応可能	温湿度影響大 小容量化が難しい

かりが多く見られた。このため、本稿では自動はかりに高頻度で採用されている、ひずみゲージ式ロードセルに注目して調査を行うこととした。ひずみゲージ式ロードセル採用の理由として以下の2点が考えられる。

- 1) 自動捕捉式はかりおよび充填用自動はかりに対しては高速測定およびひょう量の余裕が必要であり、ひずみゲージ式ロードセルの高荷重への対応

性および応答性の速さによる。

- 2) 一方、ホッパースケールおよびコンベヤスケールは屋外を含む過酷な環境で使用されるため、ひずみゲージ式ロードセルの原理の単純さに由来する信頼性の高さや高荷重への対応性による。

4機種自動はかりは、それぞれ対応する国際勧告に最大許容誤差（はかりの表示値と被計量物の質量との

表4 自動捕捉式はかり 計量結果の平均値に対する mpe の例（カテゴリ X, 目量 1g, 精度等級 XIII）

質量 $m$ , g	mpe, g	試験計量回数, 回	参考: 相対誤差, %
$m \leq 500$	$\pm 0.5$	60	0.1~
$500 < m \leq 2\,000$	$\pm 1.0$	1 kg 以下 60 1kg 超 30	0.05~0.2
$2\,000 < m \leq 10\,000$	$\pm 1.5$	30	0.015~0.075

表5 充填用自動はかり 充填結果の平均に対する mpe の例 精度等級 X (1)

設定値 $m_{set}$ , g	mpe	試験充填回数, 回	参考: 相対誤差, %
$m_{set} \leq 50$	2.25 %	60	2.25
$50 < m_{set} \leq 100$	1.13 g	60	1.13~2.26
$100 < m_{set} \leq 200$	1.13 %	60	1.13
$200 < m_{set} \leq 300$	2.25 g	60	0.75~1.13
$300 < m_{set} \leq 500$	0.75 %	60	0.75
$500 < m_{set} \leq 1\,000$	3.75 g	60	0.375~0.75
$1\,000 < m_{set} \leq 10\,000$	0.375 %	30	0.375
$10\,000 < m_{set} \leq 15\,000$	37.5 g	20	0.25~0.375
$15\,000 < m_{set}$	0.25 %	25 kg 以下 20 25 kg 超 10	0.25

表6 ホッパースケールおよびコンベヤスケール mpe の例

精度等級	mpe, %	参考: 相対誤差, %
1	$\pm 0.5$	0.5
2	$\pm 1.0$	1.0



差, mpe) が規定されている。表4から表6にそれぞれの国際勧告に規定されている最大許容誤差の例を示す。なお、これらの最大許容誤差の比較のために、許容差の割合を求め、相対誤差として示した。

相対誤差の比較から、特に厳しい最大許容誤差が設定されているのは自動捕捉式はかりであることがわかる。加えて、自動捕捉式はかりおよび充填用自動はかりは食品製造ラインに対応するため、防塵、防水構造を持たせた密封タイプのロードセルが頻繁に採用されている。このような密封構造は荷重伝達や放熱の点で不利であり、計量性能を満たすためには、より高い技術レベルが要求されることになる。なお、ホッパースケールおよびコンベヤスケールは、気流やベルトの張力変化等の外乱が多いため、高精度化は困難であり、国内で流通している製品の計量性能も0.5%から1%としているものが多い。このため、この2機種の自動はかりは非自動はかりで培われた既存のロードセル計測技術を用いることで許容値を満たすことが可能である。表7に4機種の容量目安、最大許容誤差の目安について示す。

#### 4. 自動はかりの技術上の課題とその対応

ひずみゲージ式ロードセルを用いた非自動はかりでは、器差に影響を与える要因の例として温度や湿度、ヒステリシス、クリープ<sup>21, 22)</sup>、大気圧<sup>23)</sup>を挙げることができる。これらの要因が器差に影響を与える例として最大荷重9.8 kN、使用温度範囲-10℃から40℃の非自動はかり用ロードセルをOIML R60に従い産業技術総合研究所計量標準総合センターで試験した結果を図12および図13に示す。図12は温度試験結果、図13はクリープ試験の結果を示す。図12の実線は各試験荷重におけるmpeである。各温度において荷重の増加側と減少側で器差が変化する、ヒステリシスが見てとれる。また、最大荷重での出力に温度依存性があることも分かる。この例ではロードセルの使用温度範囲が-10℃から40℃であり、一般的な精密機器と比較して広い温度範囲で計量精度を保つ必要がある。これは非自動はかりとして組み上げた際に、屋外で使用されることを考慮しているためである。図13はクリープ試験の結果であり、最大荷重(この場合は9.8 kN)をかけ続け、経過時間による

表7 自動はかりの容量目安および mpe 目安一覧

機種	容量目安	mpe目安
自動捕捉式はかり	～10 kg	～0.1 %
充填用自動はかり	～10 kg	0.75 %
ホッパースケール	～10 t	0.5 %～1 %
コンベヤスケール	～1 t (瞬時荷重)	0.5 %～1 %

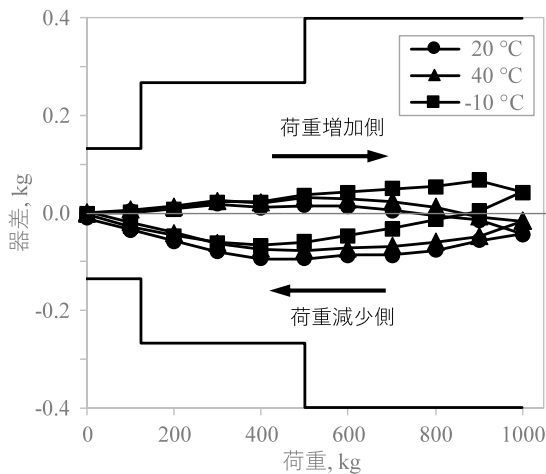


図12 ロードセルの温度試験結果の例

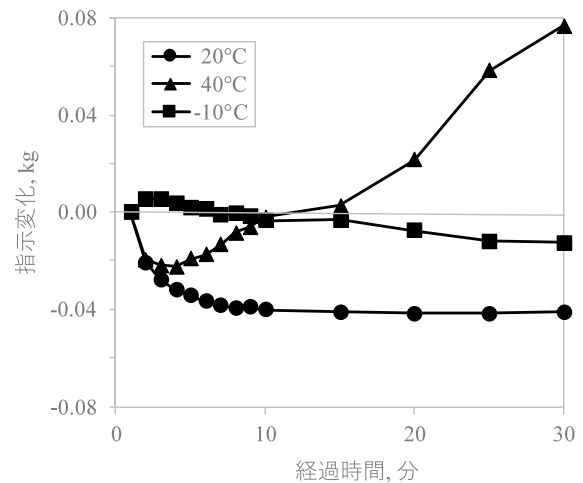


図13 ロードセルのクリープ試験結果の例

出力変化を測定したものである。クリープが起こると、ロードセルに負荷した荷重が一定であるにもかかわらず出力が変化してしまう。そのため、計量性能を確保するためにクリープ特性をチェックする必要がある。図からクリープ特性は温度依存性があることが分かる。この例のように、一般にクリープ特性は温度に依存するため、OIML R60 では各温度においてクリープ特性を試験する方法を採用している。

一方、自動はかりに特有な問題点は、計量値が安定するまでの待ち時間を設けることができない点にある。この問題は特に自動捕捉式はかりおよび充填用自動はかりにおいて顕著である。また、装置自体も自動捕捉式はかりの場合はモータ、ベルト等の駆動部が多く、測定中の振動源となりうる。そのため、仮に計量結果を得るまでの待ち時間を長くしても、振動の問題は常に付きまとう。充填用自動はかりの場合は被計量物の計量ホッパーへの投入によって、組み合わせはかりでは周囲のプールホッパー・計量ホッパーのゲート開閉動作によって振動ノイズが生じる。さらに、床面から伝わる周囲環境からの振動も問題となる。なお、信号ノイズ対策として常用されるローパスフィルタは、システム応答速度の低下を招き、単位時間あたりの処理数低下をもたらすために自動はかりでは限定的に使用されている。このためローパスフィルタ以外にも様々な解決策が提案されている。

この問題に対する自動捕捉式はかりおよび充填用自動はかりの対応として1) ハード的、2) ソフト的、3) 両者の併用例を以下に挙げる。

#### 4.1 ハード面からのアプローチ

ハード面からのアプローチは、ロードセルの高剛性化および流体減衰による過渡応答振動の抑制が提案されている。起歪体の剛性を高めると荷重に対する感度が低くなるものの、荷重を負荷した際の荷重受け部の沈み込みが小さくなるとともにロードセルの固有振動数が高くなる。剛性を高めることで荷重負荷直後の過渡応答振動の収束までの時間を短く、すなわち、計量結果を得るまでの時間を短くすることができる。また、ロードセルはその固有振動数に近づくと誤差が大きくなり、固有振動数の1/10の周波数で-6.5%の誤差が生じた例もある<sup>24)</sup>。そのため、ノイズの振動数とロードセル固有振動数との周波数帯域をより遠ざけるといった観点からも高固有振動化は望ましいといえる。

被計量物が投入される際に衝撃力が生ずる場合には液体等の摩擦による減衰<sup>25)</sup>が有用である。液体により振動減衰定数を大きくし、荷重負荷直後の過渡応答振動を素

早く収束させることができる。副次的効果として、ロードセルの保護も挙げることができる。瞬間的な過荷重は検出が難しいが、ロードセルの限界過負荷を超える荷重の負荷によってロードセルの特性が恒久的に変化することがあり、ロードセルの長期安定性を議論する上で過荷重からの保護は重要である。この瞬時過荷重に対して液体等の摩擦による減衰は有効に働き、ピーク値を低くする効果がある<sup>26), 27)</sup>。

## 4.2 ソフト面からのアプローチ

### 4.2.1 システム同定に基づくもの

Niedźwiecki ら<sup>28)</sup>は自動捕捉式はかりに対してシステム同定と適応フィルタを組み合わせたフィルタを提案している。実際に200 gから700 gの被計量物をベルト速度0.5 m/sから1.3 m/sの種々の組み合わせで計量し、OIML R51のXIIIクラスに適合することを確認している。Richiedi ら<sup>29)</sup>は組み合わせはかりのうち、1台の計量ホッパーと荷重検出器の組み合わせに着目し、ロードセルを2次のばね-質量-ダンパシステムをもとにしてモデル化し、ロードセル信号と複数のインパルス応答との畳み込みでフィルタを構築した。実際に被計量物を測定し、従来のローパスフィルタでの結果と比較している。その結果、素早い応答および過渡振動の効果的な補償を確認している。

### 4.2.2 有限インパルス応答 (Finite-duration impulse response, FIR) フィルタを適用したもの

FIR フィルタはデジタルフィルタの一種である。 $n$ 次のパルス伝達関数のFIRフィルタは応答が $n+1$ 個目のサンプルまで持続する。自動捕捉式はかりのように、被計量物が計量コンベヤ上を通過した後はシグナルがゼロに戻るといった挙動をする対象に適している。野田ら<sup>30)</sup>は42次のパルス伝達関数のFIRフィルタを用いた自動捕捉式はかりに20 kgから75 kgの被計量物を通過させ、FIRフィルタの有効性を示している。

### 4.2.3 ノッチフィルタを適用したもの

梅本ら<sup>31)</sup>は自動捕捉式はかりに対してノッチフィルタの周波数をコンベヤモータの回転、コンベヤプーリの回転、計量コンベヤの固有振動の3周波数にあわせ、3種類の適応ノッチフィルタを使用し、これらの周波数の信号を除去する方法を提案した。このフィルタと移動平均とを組み合わせ、716 gから1950 g、複数のベルト速度で検討を行い、適応ノッチフィルタの有用性を確認している。福田ら<sup>32)</sup>は既知の床振動由来のノイズ対策用にノッチフィルタ、計量コンベヤの固有振動に対処する適応FIRフィルタを組み合わせ適用し、振動ノイズ除

去の様子を例示している。

#### 4.2.4 時間変化型のローパスフィルタを適用したもの

Piskorowski ら<sup>33)</sup>は  $x(t)$  を入力、 $y(t)$  を出力とする 2 次ローパスフィルタ

$$\frac{1}{\omega_n^2(t)} \cdot y''(t) + \frac{2\zeta(t)}{\omega_n(t)} \cdot y'(t) + y(t) = x(t)$$

のうち、減衰係数  $\zeta(t)$  およびカットオフ周波数  $\omega_n(t)$  に時間依存性を持たせたフィルタを提案している。減衰振動するロードセル信号をシミュレーションした波形に対してこのフィルタを適用し、従来のローパスフィルタよりも短時間で振動成分を除去できることを示した。Pietrzak ら<sup>34)</sup>は自動捕捉式はかりにおいて時変ローパスフィルタを適用した。このフィルタは被計量物の乗り入れ検知側の光電センサ信号をトリガとして、カットオフ周波数が指数関数的に減少する特性を持つ。適用例として、300 g から 700 g の被計量物、ベルト速度 0.5 m/s から 1.3 m/s の各組み合わせにおいて OIML R51 クラス XIII(1) の最大許容平均誤差および最大許容標準偏差を満たすことを示している。

#### 4.2.5 信号波形の幾何学的処理

市販の自動はかりでは備え付けの演算装置の能力が限られていることもあり、計算の負荷が軽いフィルタの提案もされている。Kesilmiş ら<sup>35)</sup>は被計量物-ロードセルのシステムをばね-質量-ダンパーシステムに近似した場合、被計量物荷重の負荷にともなうロードセル信号の振動が一様に減衰する特性に着目し、幾何学的に処理する方法を提案している。この手法の長所として、振動的な信号のうち、連続した 3 個のピーク値のみで最終計量値を推定可能な点が挙げられる。短所としては、推定結果がピーク値に大きく依存するため、ノイズに弱く、また、AD 変換の分解能に影響を受けやすい点が挙げられる。150 g から 500 g の被計量物をロードセルに直接負荷し、測定精度 0.7 %、負荷後 100 ms 以下で結果を得ている。

#### 4.3 両者の併用によるアプローチ

自動捕捉式はかりでは、通常、被計量物の長さをあらかじめ設定し、複数載りの検知を行っている。一般的な自動捕捉式はかりでは、計量部にのみロードセルを備えているが、自動捕捉式はかりの中にはロードセルを前後のコンベヤにも配置し、合計 3 台のロードセルからの信号を足し合わせることで、3 台のコンベヤを 1 台の計量部としてみなし、複数の長さの被計量物への対応が可能なタイプも存在する。Tasaki ら<sup>36)</sup>はこのタイプのはかりに対し、ソフト面からパルス伝達関数 42 次の FIR フィ

ルタを適用し、複数の長さの被計量物への対応法を提案している。3 台のコンベヤ機長の合計が 140 cm のはかりに対し、長さ 130 cm の被計量物を導入し、手法の有用性を検証している。

充填用自動はかりでは被計量物の計量ホッパーへの投入や周辺機器の動作によって振動ノイズが生じる。さらに、床面から伝わる周囲環境からの振動も問題となり、その補正方法が提案されている。亀岡ら<sup>37)</sup>は計測用ロードセルとは別のロードセル（補償セル）を基礎面に設置し、補償セルの信号を使用して基礎面振動の影響を補償している。Boschetti ら<sup>38)</sup>は組み合わせはかりの脚部に加速度センサを追加し、周囲の振動および装置自体の振動を検知、補正することで良好な計量結果を得ている。

コンベヤスケールの技術に関しては、その構造や試験方法に関する提案が多く行われている。コンベヤスケールは一度運転を開始すると長期間連続して運転を続けることが多く、運転中の精度確認手法が提案されている。その例として、被計量物の流れを止めずに検査を行うことを目的とした、2 台の計量ローラおよび荷重検出器を備えたコンベヤスケールの提案<sup>39)</sup>が挙げられる。検査方法として、荷重検出器に分銅を直接負荷する方式を採用し、1 台ずつ交互に分銅を負荷することで、被計量物の流れを止めずに検査が行えるようにしている。また、この 2 検出器の構造をさらに発展させ、計量ローラの数を増やすことで、計量精度の向上を目指した、3 台以上の検出部を備えたコンベヤスケールの構造およびその検査方法の提案<sup>40)</sup>がなされている。検査方法は上記 2 検出器のコンベヤスケールと同様に、検査対象の計量ローラ群を 2 台 1 組と考え、交互に分銅の負荷を行うものである。他の例としては、所定の計量精度を達成することを目的とした、計量ローラの前後に必要な搬送ローラ数の考察<sup>41)</sup>、コンスタントフィーダとして使用した際の被計量物由来の強い非線形性を補償するため、ファジー論理と適応コントローラを接続して制御したもの<sup>42)</sup>が挙げられる。コンベヤスケールはベルトの張力、荷重による計量ローラの沈み込み等、計量結果に影響を与える要因が多いため、荷重検出器単体で試験を行うよりもコンベヤスケールとして組み上げた状態で試験を行うことが望ましい。Donis<sup>43)</sup>らは、はかりとして組み上げた状態で実施可能な各種試験方法およびその発展性についての報告を行っている。

以上、計量値が安定するまでの待ち時間を設けることができないという、自動はかりに特有な問題点に対する各種解決法を述べた。この問題点は特に自動捕捉式はかりにおいて顕著であり、ハード面ではロードセルの高剛

表 8 自動捕捉式はかりの検定検査試験内容

試験項目		新たに使用する 自動はかり	すでに使用されて いる自動はかり	
器差		○	○	
構造	表記	○	△	
	性能	個々に定める性能	標準偏差（自動重量選別機のみ）	○
			ゼロ点設定精度	○
			代替動作速度	○
			動補正の範囲	○
			ゼロ点の安定性・自動ゼロ点頻度	○
			風袋引き装置の精度	○
			偏置荷重	○
			平衡安定性（静的計量はかりのみ）	○
			表示装置・印字装置の一致	○
			構成部品等の保護	○
	影響因子（温度、湿度、電源電圧など）	○（型式承認）	-	
	妨害（静電気、電磁波など）	○（型式承認）	-	
	スパン安定性	○（型式承認）	-	

性化や流体減衰による過渡応答振動の抑制が行われ、ソフト面では適応フィルタをはじめとした各種フィルタが提案されていること、また、ソフト、ハード両面からのアプローチも提案されている状況が明らかとなった。

## 5. 試験内容の例

最後に、本稿の最終目的である自動はかりの試験効率化を実施する対象例として、自動捕捉式はかりの検定検査試験内容を簡単に述べる。表 8 に検定検査試験の試験内容を示す。計量法第 71 条により、特定計量器が検定に合格するためには器差および構造が一定の基準を満たす必要がある。試験は自動捕捉式はかりの JIS に従って実施される。型式承認制度は、計量器の検定の効率化に寄与している。量産品に対して同じ結果が期待される性能、または破壊試験となる項目に注目し、供試品の性能を確認することで他の製品も同等の結果を与えるとしている。この制度により、種々の性能項目について試験の省略が可能となっている。表 8 のなかで「すでに使用されている自動はかり」は JIS の試験基準とは異なる基準でつくられている。このため、すでに使用されている自動はかりの試験項目は計量精度を担保するのに最小限なものとなっている。一方、「新たに使用する自動はかり」はすべての試験項目が適用される。すでに使用されてい

る自動はかりは表中の○を付けた項目の試験を行う。△は製造年や製造番号等が不明なはかりへの対応を示し、表記に関して銘板やステッカーでの表記に替えて表記事項を明示することも可能としている。

### 5.1 器差

器差は表 4 のように平均値に対して試験が行われる。器差の試験方法は以下のように行う。荷重搬送システムを最大速度に設定し、ひょう量（最大測定量）、最小測定量、mpe の変わる点を含む 4 ポイントに対して行う。自動捕捉式はかりのうち、被計量物の重量選別を行う「自動重量選別機」に対して、表 4 に示すように試験計量回数が指定されている。測定対象は生産ラインで実際に測定を予定している実材料、または実材料の準備が難しい場合は形状や重心を実材料に似せた擬似材料を使用する。

### 5.2 構造

構造の要件は大きく表記および性能に分けられる。表記は製造年および製造番号、精度等級といった検定に必要な情報が、はかり本体に銘板やステッカーで記載されていることを確認する。性能の試験項目は、全数確認を行う「個々に定める性能」と、型式承認試験において提出された供与品に対して確認を行う「影響因子・妨害・

表9 自動捕捉式はかりの最大許容標準偏差の例

質量 $m$ , g	等級指定係数(x)=1 に対する 最大許容標準偏差	試験計量回数, 回
$m \leq 50$	0.48 %	60
$50 < m \leq 100$	0.24 g	60
$100 < m \leq 200$	0.24 %	60
$200 < m \leq 300$	0.48 g	60
$300 < m \leq 500$	0.16 %	60
$500 < m \leq 1\,000$	0.8 g	60
$1\,000 < m \leq 10\,000$	0.08 %	30
$10\,000 < m \leq 15\,000$	8 g	20
$15\,000 < m$	0.053 %	20 kg 以下 20 20 kg 超 10

スパン安定性」からなる。

### 5.2.1 個々に定める性能

個々に定める性能は型式承認の有無にかかわらず一台ごとに試験が行われる。10種の試験があるが、特に本稿と関係が深い試験項目は標準偏差試験、代替動作速度試験および偏置荷重試験である。以下、この3種の試験について述べる。

- 1) 標準偏差試験は器差試験のデータを用いて、試験荷重ごとに器差の標準偏差を算出する。その標準偏差が表9に示す最大許容標準偏差内であることを確認する。なお、この試験は自動捕捉式はかりの中でも、被計量物の重量選別を行う自動重量選別機にのみ適用される。
- 2) 代替動作速度の試験は器差検定と同様の手順を用い、荷重搬送システムの最大速度および中間速度における最小測定量とひょう量における器差と標準偏差を確認する。
- 3) 偏置試験は荷重搬送システムの中心から片側の縁の間および中心から反対側の縁の間の2か所に、ひょう量の1/3の試験荷重を通過させて計量を行い、器差および標準偏差を確認する試験である。

これら3種類の試験はいずれも荷重検出器から出力される計量波形の変化が予想され、これらの試験に適合することで計量結果の正確性が担保される。

### 5.2.2 影響因子試験、妨害試験、スパン安定性試験

影響因子試験、妨害試験、スパン安定性試験は型式承認の際に行われる。影響因子試験は規定の環境下で、は

かりが意図したとおりの動作をすることを検証する試験である。妨害試験ははかりがさらされる可能性のある環境下において妨害の影響を受けない、または影響を受けた時の対応が規定を満足していることを確認する試験である。スパン安定性試験は長期安定性を試験するもので、型式承認試験の期間中、ひょう量での器差およびその変動が規定を満足していることを確認する試験である。

## 6. 重点的に取り組む課題

本稿で明らかとなった自動はかりの技術動向を踏まえ、今後は自動捕捉式はかりの試験効率化に重点的に取り組んでいく。試験の効率化が実現すれば使用現場において生産ラインの停止時間を短くすることができ、はかり使用者の負担軽減につながる。生産効率を可能な限り向上させるため、ラインの停止時間をできるかぎり短くしたいという使用者の声は多いため、試験の効率化の意義は大きいといえる。

試験効率化への取り組みに先立ち、現状の自動捕捉式はかりの検定検査試験の課題について述べる。1) 器差試験において試験ポイントに最小測定量が含まれている一方で、最小測定量に近接しているゼロ点の設定精度についても試験を行っている点。2) 同じく器差試験において被計量物を計量する回数が多く、さらに試験ポイントも4ポイント必要である点。これらの課題および効率化への検討について以下に述べる。

1) および2) の課題に関してゼロ点の設定精度の試験効率化を目指し、ゼロ点設定精度の試験結果と最小測定量の器差試験結果との相関について検討していく。これら2種類の試験ポイントは近接しており、試験結果に相関があることが期待される。相関が認められた場合には、これら2種類の試験の統合、または新たな試験方法の提案等、効率化の可能性を探っていく。

2) の課題に関しては自動捕捉式はかりの中でも特に自動重量選別機での計量回数が多く(表9参照)、計量回数の低減が望まれている。具体的な問題点としては、複数回の計量を実施するため試験の所要時間が長くなることに加えて、最大60個必要となる被計量物の管理が煩雑となる点が挙げられる。器差算出のため、これらの被計量物は質量が既知である必要がある。試験対象のはかりによっては4つの試験ポイントに対応する被計量物が各々60個必要となる場合もある。加えてその試験ポイントは試験対象のはかりごとに異なり、さらに測定可能な長さや幅といった被計量物の形状もはかりにより異なる。一方、非自動はかりの試験では試験対象に応じて1g、2g、5g、10g・・・といった系列の分銅を組み合わせることで試験が可能である。また、事前に用意する分銅の数も20kg以下であれば1個または2個で対応可能である。以上のように自動捕捉式はかりでは多数の被計量物が必要になる点が課題となっている。

複数回の計量に関連した課題として60個の被計量物をどのように計量するかという点についても検討の余地がある。被計量物を60個用意し、連続して60回計量した場合はゼロ点を補正する機会が少ないため、より厳密にはかりの能力を評価することになる。ここで、連続して10個計量する動作を間欠的に6セット行った場合について、上記の60個連続して計量した場合との差について検討が必要である。この例のように10個といった少数の被計量物で現在の試験手順と同等の評価結果が得られれば、被計量物の管理を効率化することができる。試験ポイントに関しても現状の4ポイントに対する削減の可能性について検討を行っていく。以上のような検討を重ね、試験方法の効率化の探索を行っていく。

## 7. まとめと今後の予定

本稿では新たに特定計量器に追加された自動はかりに着目し、検定検査試験の効率化を見据えて、自動はかりに使用されるロードセルおよびその周辺技術に関する研究についてまとめた。これらの自動はかりは生産の現場において、効率向上の要求に応じて、その需要が今後ま

すますます増えると考えられる。

荷重の検出方法に関しては、非自動はかりが要求に応じて多種類の荷重センサを採用しているのに対し、自動はかりでは電磁平衡式センサおよびひずみゲージ式ロードセルが採用されている。電磁平衡式は小容量の自動捕捉式はかり、それ以外の大多数の自動はかりにはひずみゲージ式ロードセルが採用されていた。これらのセンサの採用理由は電磁平衡式センサについては精度の高さにあり、ひずみゲージ式ロードセルについては応答性の速さ、信頼性の高さならびに高荷重への対応性にあると考えられる。

以下に自動はかりの機種別の調査結果を述べる。

- 1) ホッパースケールおよびコンベヤスケールは要求される精度がそれほど高くなく、非自動はかりと同様の測定技術が適用可能であった。
- 2) 一方、残りの2機種、特に自動捕捉式はかりは要求精度が高く、ロードセルおよびその周辺技術の研究が精力的に行われている。それらの研究の主眼は各種振動に由来するノイズの除去であり、かつ、測定時間の短縮化に対応したものであった。これらは自動はかり本体に駆動部が存在すること、および被計量物の滞在時間が短いことにそれぞれ由来している。今後は自動はかりに搭載される演算装置のさらなる高度化に伴い、より高度な信号処理の実装が必要と考えられる。

以上のように一口に自動はかりといっても要求される技術レベルが異なり、検定検査試験の効率化が特に必要なものは、最も高い計量性能を要求されている自動捕捉式はかりの試験であると考えられる。また、検定制度も自動捕捉式はかりの運用開始が他の3機種よりも1年先行しており、自動捕捉式はかりに注力する意義は大きいといえる。

今後はこの調査結果を踏まえ、ゼロ点関連の試験や器差試験の回数・測定ポイントの効率化の試みといった自動捕捉式はかりの新規試験方法の開発と提案を行い、検定検査試験の効率化に役立てていきたいと考えている。

最後に、この調査研究を実施するにあたり、ご指導・ご助言を頂きました関係者の皆様に深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 渡部新一：質量：電子天びんの動向，計測と制御 44-10 (2005) 668-674.
- 2) 経済産業省 産業技術環境局 計量行政室，今後の

- 計量行政の在り方一次なる 10 年に向けて一答申,  
<http://www.meti.go.jp/report/whitepaper/council35.html>.
- 3) OIML R50-1, Continuous totalizing automatic weighing instruments (belt weighers). Part 1: Metrological and technical requirements, (2014).
  - 4) OIML R51-1, Automatic catchweighing instruments. Part 1: Metrological and technical requirements – Tests, (2006).
  - 5) OIML R 61-1, Automatic gravimetric filling instruments Part 1: Metrological and technical requirements – Tests, (2004).
  - 6) OIML R107-1, Discontinuous totalizing automatic weighing instruments (totalizing hopper weighers) Part 1: Metrological and technical requirements – Tests, (2007).
  - 7) W. Euler and B. Zinke: Automatic checkweighers – Automatic catchweighing instruments in accordance with OIML R 51 Design, function and application, OIML Bulletin LVII-1 (2016) 10–13.
  - 8) R. Oliveira and C. Garcia: Simulator for a packing and weighing system of granulated powders, ISA Transactions 52-5 (2013) 672–683.
  - 9) W. Euler and R. Pottebaum: Basic technical setup and description of the functions of automatic gravimetric filling instruments according to OIML R 61, OIML Bulletin LVI-4 (2015) 10–19.
  - 10) 村上佳広, 倉田純一, 内山寛信, 上野貴史: 組合せ計量方式を用いた袋詰め操作における実行不可能解の特性化, 計測自動制御学会論文集 38-4 (2002) 784–791.
  - 11) W. Euler and W. Braun: Technology for totalizing weighing instruments used for receiving and shipping loose bulk products, OIML Bulletin LV-4 (2014) 15–25.
  - 12) 竹田正俊: 連続輸送される粉体の計測と制御, 計測と制御 7-5 (1968) 7–17.
  - 13) 藤井靖治, 山本倫久, 坪井邦夫: 製鉄所原料ヤードの計算機制御, 計測と制御 17-12 (1978) 43–51.
  - 14) D.M. Ștefănescu and M.A. Anghel: Electrical methods for force measurement – a brief survey, Measurement 46-2 (2013) 949–959.
  - 15) Oliver Mack: Investigations of piezoelectric force measuring devices for use in legal weighing metrology, Measurement 40-(7-8) (2007) 746–753.
  - 16) N. Shinozaki, K. Okamoto, M. Ikeshima, K. Terunura and K. Naito: Development of modularizing technology and its application, OIML Bulletin LVI-1 (2015) 20–27.
  - 17) 島田好昭: ひずみゲージを用いたセンサ, 計測と制御, 45-4 (2006) 329–334.
  - 18) W. Euler and H. Weisser: HISTORY OF SCALES Part 8: Load cells and measuring with strain gauges, OIML Bulletin LIV-2 (2013) 20–23.
  - 19) W. Euler and H. Weisser: HISTORY OF SCALES Part 9: Further details on strain-gauge load cells in the technology of scales and weighing, OIML Bulletin LIV-3 (2013) 24–26.
  - 20) 熊谷常雄: ひずみゲージとブリッジ回路, 計測と制御 45-4 (2006) 323–328.
  - 21) M.I. Mohamed, E.H. Hasan and G. Aggag: Study of creep behavior of load cells, Measurement 42-7 (2009) 1006–1010.
  - 22) T.W. Bartel and S.L. Yaniv: Creep and Creep Recovery Response of Load Cells Tested According to U.S. and International Evaluation Procedures, J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 102-3 (1997) 349–362.
  - 23) T. Hayashi and K. Ueda: Ambient pressure compensation for hermetically sealed force transducers, Measurement 91 (2016) 377–384.
  - 24) 近藤博, 木村修一, 本間重雄, ロードセルの動的応答特性, 計測自動制御学会論文集 41-10 (2005) 783–786.
  - 25) 大杉尚人, 田中賢一: 特開平 11-240526 (1999).
  - 26) 近藤博, 本間重雄, 木村修一: 動的ロードセルの問題点の解明と動的荷重の求め方—ロードセルの出力値は大きさに比例する—, 計測自動制御学会論文集 48-5 (2012) 273–279.
  - 27) 谷口栄作, 見方義孝: 特開 2007-225429 (2007).
  - 28) M. Niedźwiecki, M. Meller and P. Pietrzak: System identification based approach to dynamic weighing revisited, Mech. Syst. Signal Process. 80-1(2016)582–599.
  - 29) D. Richiedi and A. Trevisani: Shaper-Based filters for the compensation of the load cell response in dynamic mass measurement, Mech. Syst. Signal Process. 98-1 (2018) 281–291.
  - 30) 野田善之, 桜井祥晴, 山崎敬則, 大西秀夫, 小林政明, 黒須茂: コンベアライン上での連続秤量における精度の向上, 計測自動制御学会論文集 38-9 (2002) 459–764.
  - 31) 梅本敏孝, 加門守人, 香川洋一郎: 適応ノッチフィルタを用いたコンベアライン上での連続計量における

- 精度の向上 —計量時間内での処理—, 計測自動制御学会論文集 47-10 (2011) 477-484.
- 32) 福田謙吾, 吉田浩治, 衣笠哲也: ノッチフィルタを用いた計量アルゴリズム (自動重量選別機の計量能力向上について), 日本機械学会論文集 82-838 (2016) 1-15.
- 33) J. Piskorowski and T. Barcinski: Dynamic compensation of load cell response: A time-varying approach, *Mech. Syst. Signal Process.* 22-7 (2008) 1694-1704.
- 34) P. Pietrzak, M. Meller and M. Niedzwiecki: Dynamic mass measurement in checkweighers using a discrete time-variant low-pass filter, *Mech. Syst. Signal Process.* 48-(1-2) (2014) 67-76.
- 35) Z. Kesilmiş and T. Baran: A Geometric Approach to Beam Type Load Cell Response for Fast Weighing, *MĀPAN-J. Metrol. Soc. India* 31-2 (2016) 153-158.
- 36) R. Tasaki, T. Yamazaki, H. Ohnishi, M. Kobayashi and S. Kurosu: Continuous weighing on a multi-stage conveyor belt with FIR filter, *Measurement* 40-(7-8) (2007) 791-796.
- 37) 亀岡紘一, 中谷誠, 小松源一, 内藤和文: 質量計測における基礎振動補償法—理論とその検証実験—, 計測自動制御学会論文集 35-5 (1999) 616-622.
- 38) G. Boschetti, R. Caracciolo, D. Richiedei and A. Trevisani: Model-based dynamic compensation of load cell response in weighing machines affected by environmental vibrations, *Mech. Syst. Signal Process.* 34-(1-2) (2013) 116-130.
- 39) I.A. Galin and V.K. Donis: Calibration of continuous conveyor-type weighers using reference weights without stoppage of the production process, *Measure. Techn.* 57-8 (2014) 884-890.
- 40) I.A. Galin: Verification of continuous multichannel belt-conveyor weighers, *Measure. Techn.* 59-1 (2016) 34-40.
- 41) V.K. Donis, A.E. Rachkovskii and V.M. Sin: How the conveyor belt length affects belt weigher accuracy, *Measure. Techn.* 47-2 (2004) 163-167.
- 42) N.P. Mahajan, S.B. Deshpande and S.G. Kadwane: Design and implementation of an advanced controller in plant distributed control system for improving control of non-linear belt weigh feeder, *Journal of process control* 62 (2018) 55-65.
- 43) V.K. Donis, A.E. Rachkovskii and N.Y. Gudovskaya: Methods of Verifying Continuous Automatic Belt Weighers: State and Prospects, *Measure. Techn.* 46-9 (2003) 851-856.