

## 磁気バイアス型磁力線方式によるアルミ包装食品検査用 金属検出機の開発

Development of a metal detector that inspects aluminum-wrapped foods by the magnetic bias type magnetic field line method

牧野 良保\*

Yoshiyasu Makino

Many food processing machines are composed of a combination of metal parts, and there is always a risk that metal foreign objects will be mixed into food during various processing steps, so metal detectors are necessary for food processing.

In this article, we will explain the principle and device implementation of the magnetic bias type magnetic force line method. In addition, to evaluate the response, we measured the output voltage across the sensor's coils, which correlates with the change in magnetic flux, which is the sensor's measurement parameter. The magnetic flux increased exponentially as the size of the metal sample and the distance between the sensors increased. Also, the magnetic flux increased in proportion to the feed rate of the metal sample. And, by comparing the eddy current magnetic field on the surface of the aluminum packaging material and the magnetic field generated by the metal sample, it was confirmed that the developed detection method can detect the metal sample inside the aluminum packaging material.

KEY WORDS: Metal detector, Foreign matter inspection, Magnetic sensor, Magnetic force line, Magnetic bias, Electromagnetic induction, Metallic foreign matter, Aluminum packaging, Search coil method, Eddy current, Food processing machine

### 1. はじめに

食品素材を加工する機械類の多くは金属部品の組合せで構成されており、切る、つぶす、練る、攪拌するといった様々な加工工程で、刃こぼれ、摩耗、欠け、むしれ、脱落などによって粉状、粒子状あるいは針（線）状の不定形な金属異物が素材中に混入する恐れが常にある。

国内では2021年6月にHACCPの導入及び運用が全ての食品等関連事業者を対象として完全義務化された。食品の安全性は、HACCPをはじめとする企業の危害防止努力により従来にも増して一段と向上しているが、製造には機械調理などの工程を経なければならぬため、食品への金属異物混入リスクが存在する。このため、身体的危害リスクが大きい金属異物を検出する目的で、国内外に関わらず金属検出機が数多く使用されている。

従来から国内外で広く普及している金属検出機は、サーチコイル方式と呼ばれる電磁波を用いた方式である。このサーチコイル方式の金属検出機は、アルミ包装食品や高濃度塩分食品に対しては感度を大幅に落とさないと誤検知が発生するため、検査に使えないという課題がある。そのため、アルミ包装食品などにはX線異物検出装置や磁化方式と呼ばれる金属検出機が用いられてきた。しかし、それらは導入コストが高く、大型で設置スペースが必要な上、取り扱いが難しいという課題がある。更にX線異物検出装置に限ってはメンテナンスコストが必要となるため、中小規模の企業をはじめとする食品製造の現場にとっては導入のハードルが高かった。

また、近年はSDGsやリサイクル法改正などの社会的背景や食品の保存性の観点から、アルミ蒸着包装やアルミ箔、アルミ容器などの「アルミ包

\*テクノアイプロジェクトチーム

装」の採用が増えており、包装後の金属異物検査を希望する顧客要求が一層高まってきている。

これらの要求から「①コンパクトな機体②一般包装だけでなく、アルミ包装食品や高濃度塩分食品の金属異物も精度良く検出する③誰にでも扱いやすい」の3点を特長とした磁気バイアス型磁力線方式による新しい検出方式の金属検出機の装置開発を行った。

本稿では開発した金属検出機の検出方式の原理とその装置化を解説する。また、金属検出機はユーザー導入前に食品サンプルごとに異物サイズの検出テストが必要となる。このため、サンプルの検査条件によってどのようにセンサが反応するかについて、反応要因とその反応傾向を把握しておくことはテスト条件の事前予測する上で非常に重要である。このためセンサの測定パラメーターである磁力線つまり磁束の変化について、検査条件を予め予測し磁束の傾向を分析したので合わせて報告する。

## 2. 原理

### 2.1 従来の金属検出機の特徴

従来方式である「サーチコイル方式」(Fig. 1)は、送信コイルを用いて高周波の交流磁界を食品内の金属異物へ照射し、「渦電流」と呼ばれる電流を間接的に金属異物へ流すことで、その電流を受信コイルにて間接的に捉え、食品内の金属異物を検出する原理である。食品がアルミ包装食品や高濃度塩分食品であった場合、包装や食材に対しても渦電流が流れてしまうため、高感度での検査は困難である。

また、これまでアルミ包装食品や高濃度塩分食品への金属異物検査にて適用されていた「磁化方式」と呼ばれる金属検出機は、Fig. 2のように磁石を備えた着磁装置により金属異物を磁化させ、その後の検出装置にて磁化された金属異物からの磁界を検出する原理である。このため、原理上、着磁装置と検出装置に一定の間隔が必要となり、装置が大型になってしまうことから設置スペースが限られる食品加工現場においてその使用が困難

となっている。また、金属異物を着磁後、検出装置での磁界検出となるため設置方法が限られることから様々な製品種を生産する上での多くのレイアウト変更に対応できないなど課題が多いのが現状である。

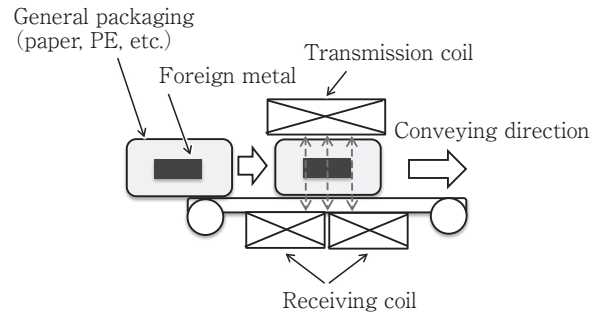


Fig. 1 Detection principle of search coil method.

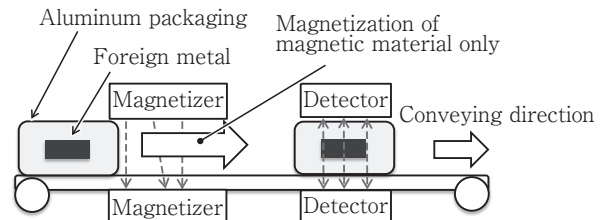


Fig. 2 Detection principle of magnetization method.

### 2.2 磁気バイアス型磁力線方式の検出原理とそ の特徴

「磁気バイアス型磁力線方式」(以降、本方式) Fig. 3の検出原理について説明する。本方式の構造としては上下に対向させた1対の磁気バイアスセンサと称すセンサモジュールが配置されており、ベルトコンベヤなどで上下センサ間に被検査物を搬送し、金属異物の検出を行う。センサモジュールの構造としては、多数回巻回されたコイルの片面に特殊な永久磁石(以降、バイアス磁石)を取り付け、磁氣的バイアス(励磁)を行っている。

バイアス磁石により形成された磁場空間に金属異物(強磁性体)が通過すると、コイルの直下で金属異物が強く磁化され、その磁化された異物磁界とコイルを通過しているバイアス磁界の磁力線が鎖交する。これにより、コイル内の磁界が大きく揺動し、コイル間の電圧の変化としてセンサが反応することで食品内の金属異物を検出する。また、本方式は金属固有の比透磁率を積極的に活

用した手法であり、アルミ包装内でも磁性体である金属異物の検出を可能とした。比透磁率とは、その物質内に磁力線が通りやすいか通りにくいかの目安で、真空（または空気）の透磁率に対する比を言う。アルミは約1で、鉄は種類によって1,000～200,000の値である。このためアルミ包装などの非磁性の包材はバイアス磁石からの直流磁界に対して反応し難い為、アルミ包装内の金属異物の検出が可能である。

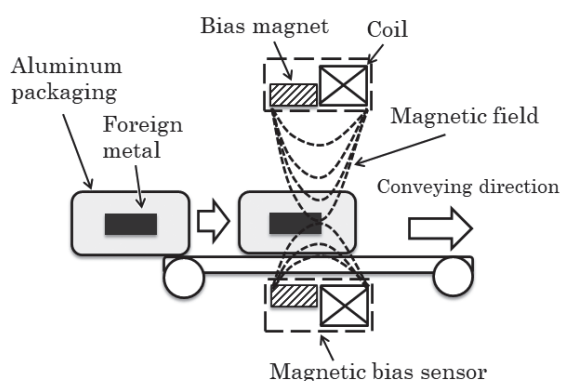


Fig. 3 Detection principle of the magnetic bias type magnetic field line method.

また、本方式によるセンサではバイアス磁石からの直流磁界が常時、同センサ内に設置されたコイルと鎖交している。このためコイル内の磁界の変化は殆ど無く、コイル間電圧も変化しない。ただ、検査時にはコンベヤによる搬送手段にて金属異物などの強磁性体が上下センサ間を通過することで磁化した金属異物による磁束変化によりコイル内の磁界が変化する。この際、式(1)のレンツの法則において、

$$V = N \frac{d\Phi}{dt} \quad \dots (1)$$

[V: 誘導起電力 (コイル間電圧)、  
N: コイル巻き数、 $\Phi$ : コイルと鎖交した磁束]  
単位時間あたりにコイルと鎖交する磁束の変化によってコイル間に電圧が発生する。本方式における金属異物の検出はこのプロセスによって発生する電圧信号を検出することで、食品サンプル内の金属異物の検出を行っている。

### 3. 測定条件によるコイル内の磁束変化の評価

#### 3.1 磁束変化評価の目的

磁気による異物検査は食品サンプルの条件によってコイル内の磁束変化が異なるため、磁束変化により発生する電圧信号の強弱が異なる。このため装置導入前には食品サンプルごとに検出性能テストを行う必要があり、磁化した金属異物による磁束変化が機器の設定条件によってどのように変化するか、その変化要因と傾向を把握しておくことはテスト条件の事前予測による工数低減などの面で非常に重要である。

そこで、コイル内の磁束変化要因として予め想定される測定に関するパラメーターとして、金属異物のサイズ、センサ間を通過するサンプルの搬送速度、金属異物とバイアス磁石間の距離、についてセンサ出力による磁束変化の評価を行った。

また、アルミ包材が上下センサ間を通過する際にはアルミ包材表面を鎖交する磁束が変化することで包材表面には渦電流が流れる。これによる磁界（以降、渦電流磁界）がコイル内の磁界へ混入することで、アルミ包材での検査におけるノイズ信号となりS/N比を悪くする原因となる。このため、アルミ包材などの導電性素材における渦電流磁界による金属異物検出への影響と、アルミ包材のような非磁性で導電性を持った素材における本方式の検出効果、についても次章にて評価を行った。

#### 3.2 電圧測定の基本条件とその評価方法

評価用テストサンプルとして金属球サンプル（以降、金属球）は、Fe (SUJ2材)  $\Phi$  0.7mm,  $\Phi$  1.0mm,  $\Phi$  1.5mm,  $\Phi$  2.0mm,  $\Phi$  2.5mm,  $\Phi$  3.0mmの6種類を準備した。また、評価用アルミ (Al) アルミ包材サンプルとしては、大きさ(180mm×265mm×20±5mm)、Al層:7um、フィルム層:7umのアルミ包材を準備した。測定方法としては、Fig. 3の機器構造においてコンベヤのベルト上へサンプルを置き、任意の速度にてサンプルを上下センサ間へ送った際のセンサからの出力信号を測定した。また、出力電圧の測定にはオシロスコープ (Tektronix製 型式:

MSO 4104) を用いており、上下センサ間を通過した際の最大電圧値の測定/記録を行った。オシロスコープの設定は、レコード長: 10 K Sample、サンプル速度: 1msec/Sampleにて行っている。

コイルを鎖交する磁束の評価方法としてはコイル間の電圧信号つまりセンサからの出力電圧が大きくなることで、短時間あたりの磁束が増加し、結果として磁界が大きくなったことを理解することができる。このことから、磁束変化要因に対する出力電圧値の大小や傾向にて磁束の変化を評価した。

### 3.3 結果と考察

#### i) 金属球サイズと磁束変化の関係

Fig. 4 に金属球の直径サイズごとに測定した出力電圧の結果を示す。結果内のエラーバーは同じ条件にて10回繰返し測定した結果から算出した $\pm 3\sigma$ である。本測定ではコンベヤのベルト面上へ金属球のみを置き、センサ間距離: 60mm、搬送速度: 30m/minにて金属球をセンサ間へ搬送した際に発生する出力電圧を測定した。結果より、金属球の直径サイズが大きくなると出力電圧が増加することがわかる。これは、上下センサを通過する金属球の直径サイズが大きくなることでコイル直下の磁束密度が増加し、センサ内のコイルと

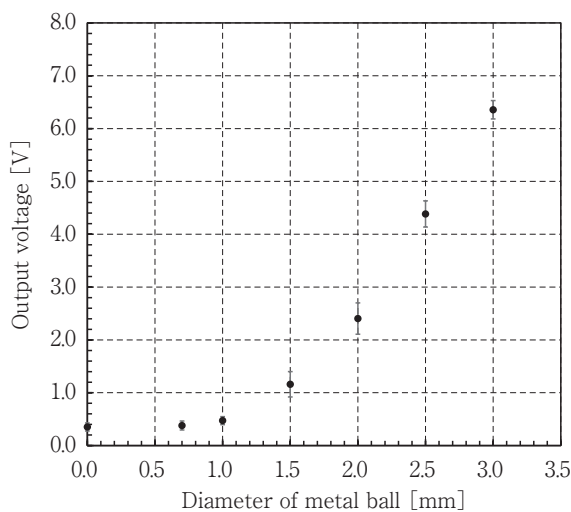


Fig. 4 Relationship between metal ball size and output voltage.

鎖交する磁束が増えることで出力電圧が増加したと考えている。またその増加傾向としては金属球の直径が $\phi 1.0\text{mm}$ 付近から急激な増加傾向を示している一方で、 $\phi 1.0\text{mm}$ より金属球サイズが小さくなるほど出力電圧の変化がないことがわかる。磁界についてのクーロンの法則からすると、磁界が磁極の強さ(本測定では金属球サイズ)の積に比例する。このことを考えると、金属異物サイズが $\phi 1.0\text{mm}$ 以下では、コイルと鎖交する磁束の変化が小さいため、電子回路などの電気ノイズと区別がつかなくなってしまったと考えられる。

#### ii) サンプル搬送速度と磁束変化の関係

Fig. 5 に金属球の搬送速度と出力電圧の関係のグラフを示す。この時に使用した金属球サイズは $\phi 1.5\text{mm}$ とし、金属球を搬送する高さをベルト面上から10mmの条件にて搬送速度における出力電圧を測定した。結果内のエラーバーは同じ条件にて10回繰返し測定した結果から算出した $\pm 3\sigma$ である。Fig. 5より、搬送速度が速くなるほど、出力電圧が増加することがわかる。一方で、30m/minから60m/minにかけて出力電圧が飽和傾向を示しており、40m/min以降の速度では出力電圧がほぼ変化せず、速度と出力電圧との相関関係が無いことがわかる。これはバイアス磁石からの磁束

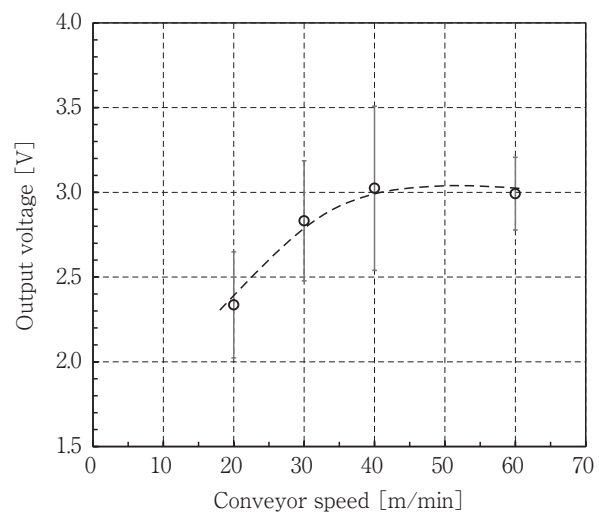


Fig. 5 Relationship between conveying speed and output voltage.



量は一定であり、金属球によって磁束が変化する際の時間が短縮しても、出力電圧増加の効果は限られてくることを示している。このため、出力の飽和に近い40m/min以降にて搬送速度を速くすることはユーザーの生産性に合せる上で必要ではあるが、検査感度を向上する上ではそれほど必要性が無いと本結果から考えることができる。

### iii) センサ間距離と磁束変化の関係

次にセンサ間距離と出力電圧の関係について評価を行う。評価に使用した金属球サイズは $\Phi$  1.5mm、搬送速度は30m/minである。センサ間距離は80mm、60mmの2条件にて評価した。ベルト面上をゼロ点とし、その位置から樹脂製の治具を使い10mm刻みにて金属球の位置を高くしていき測定を行った。Fig. 6にその結果を示す。結果より、センサ間距離：80mm、60mmの2条件において、上下センサの中間位置付近、つまり上下センサから最も離れた位置の出力電圧が最も低いことがわかる。一方で、上下センサ付近では最も出力電圧が高い。また、センサ付近からセンサ間中央にかけて指数関数傾向で出力電圧が低下するのは前述の電磁波発生源と距離との関係による傾向であり、センサから離れるほど磁束密度が低下するため金属球を通る磁力線自体が減少したためであると考えている。ここで注意が必要なのは、センサ間距離が広がるとセンサ間中央付近の

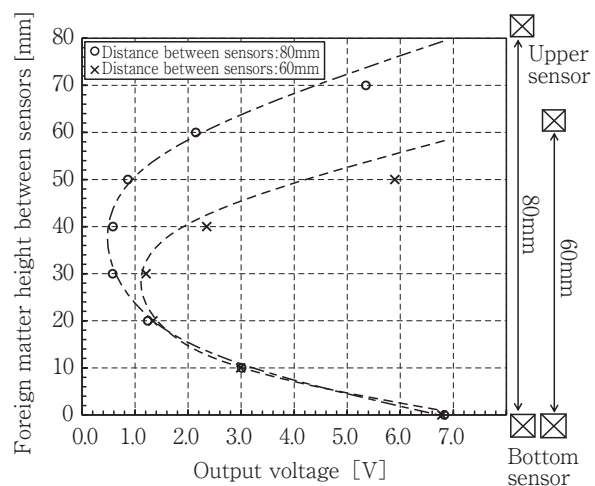


Fig. 6 Relationship between sensor distance and output voltage.

磁束密度が希薄になることである。これを示すように、センサ間距離が60mmより80mmの方がセンサ間中央付近の出力電圧が低いことがわかる。このため、より高さのあるサンプルにセンサ間距離を合わせてしまうことでセンサ間中央付近の検出感度が低下し、検出可能な金属異物サイズが大きくなってしまふ恐れがある。センサ付近では感度の低下は少ないので、薄いサンプルをトライテストでは評価し金属異物サイズを規定後、実は厚いサンプルを検査運用した際には、センサ間中央付近では規定した金属異物サイズを検出できない事態が起きかねない。このことから、検査運用のサンプル高さの確認とそれに合ったセンサ間距離の設定は異物検査する上で非常に重要な測定パラメーターであると意識する必要がある。

### iv) アルミ包材に対する磁気バイアス型の効果

次にアルミ包材表面に発生する渦電流磁界の影響とその影響に対する本方式の有効性について評価する。評価に使用した金属球はFe $\Phi$  0.7mm $\sim$  $\Phi$  3.0mmの6種類を用いた。搬送速度は、金属球のみの測定で実施した条件と同じ30m/min、上下センサ間距離は60mmである。

Fig. 7にその結果を示す。結果には、金属球のみとアルミ包材のみを測定した結果を併わせてグラフ表記している。結果より、金属球のみと同様にアルミ包材と金属球合わせて測定した結果も金属球の直径サイズが大きくなるほど、出力電圧が増加していることがわかる。ただ、アルミ包材を含んだ出力電圧の場合、 $\Phi$  2.0mmまでは緩やかに増加し、 $\Phi$  2.0mm以降では急激に出力電圧が増加しており、その上 $\Phi$  3.0mmでは金属球： $\Phi$  3.0mm単体での出力電圧とほぼ一致する結果となった。また、アルミ包材の有無による出力電圧の違いとしては、金属球： $\Phi$  3.0mm以下の金属球サイズにて、アルミ包材を含んだ出力電圧の方が高いことがわかる。これは、アルミ包材表面に発生した渦電流による磁界がコイル内へ混入しオフセット電圧として出力電圧へ加算した結果と考えている。一方で、アルミ包材のみを測定した

点線の結果においては、その出力電圧は金属球： $\phi$  1.5mmとほぼ同じ出力電圧である。しかし、アルミ包材よりも透磁率の高い金属球がアルミ包材へ混入した場合、アルミ包材によるオフセット電圧はあるものの、金属球サイズによる磁束変化が支配的となることがFig. 7のグラフから確認することができる。

これらのことから、本方式はアルミ包材における渦電流磁界の影響をオフセット電圧として検出はするが、大きくはサンプルの透磁率による磁束変化が支配的となり、センサの出力電圧が変化していることが推察される。よって、本方式がアルミ包材などの非磁性素材で且つ導電性素材であっても、その素材内の磁性金属異物を検出するための有効な方式であることを本測定にて確認することができた。

ただし、本結果は測定条件としたアルミ包材のAl層の厚みにて発生した渦電流磁界の影響を評価した結果である。このため、アルミ包材の表面積やAl層の厚みによってFig. 7のアルミ包材と金属球の結果はより渦電流磁界によるオフセット電圧量は変わることが予測される。今後は、Al層の厚みによる渦電流磁界の影響の評価が必要と考える。

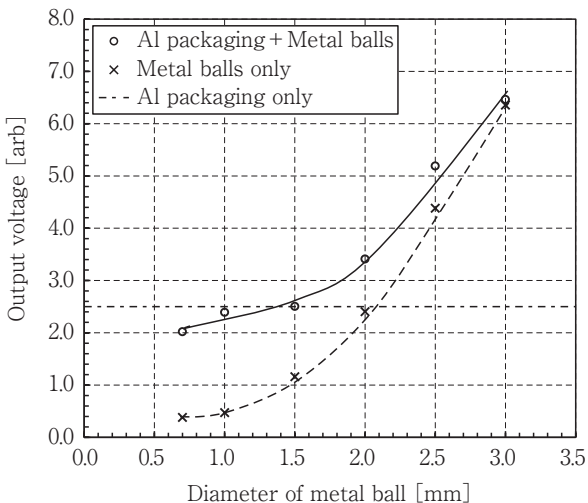


Fig. 7 Effect of aluminum packaging on metal ball detection.

#### 4. 磁気バイアス型磁力線方式の装置化

最後に磁気バイアスセンサを組み込んだ金属検出機について機器構成と機体の特長について解

説する。

Fig. 8に機器構成図を示す。機器構成としては、磁気バイアスセンサを組み込んだ検出ユニット、上下センサ間のゲートへ被検査体を搬送するベルトコンベヤ、コンベヤの駆動と磁気バイアスセンサを制御する制御機器や電源が入った制御・電源ユニット、金属検出機の自立とコンベヤパスラインの高さ調整を行う調整脚の4つの部品から構成される。前述したように、検出ユニットに磁気バイアスセンサを組み込むことで、これまでにアルミ包装食品の専用機として対応している磁化方式金属検出機の約2/3のコンベヤ機長となっている。検出領域に関しては、着磁装置から検出装置までの距離が約300mmの磁化方式に対して、本方式では検出ユニット幅に相当する140mmと、半分以下まで小型化を実現した。また、センサのコンパクト性を活かすため、センサをカバーする筐体構造は無駄となるスペースを極力そぎ落とし、シンプルな構造としている。これにより、サーチコイル方式の金属検出機と比べても検出ユニットの高さが低く、非常にスリムでコンパクトな仕上がりとなった。また、センサモジュールは「永久磁石」による励磁方式のため、センサ自体の消費電力はゼロである。制御電源全体の消費電力も100W程度のため制御盤も小さく収まり、検出機の機体全体が一層コンパクトになることで、限られた工場内の設置スペースの取り回しや製品種の変更による生産ラインの工程変更も比較的簡単に対応が可能となる金属検出機の開発に至った。

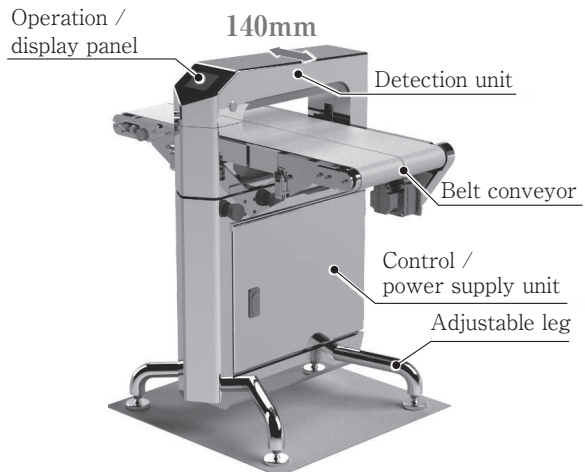


Fig. 8 Equipment configuration diagram.

## 5. おわりに

本稿では、磁気バイアス型磁力線方式を採用した金属検出機について、その検出方式の原理と特徴、検出方式の磁気評価結果について報告した。本評価にて得た結果は以下の通りである。

### i) 金属球サイズと磁束変化の関係

金属球サイズが大きくなるほどコイル間電圧である出力電圧が大きくなった。これは金属球が大きくなることにより磁束密度が高くなることで、コイルを鎖交する磁束が増加し、コイル間電圧の増加に繋がった。

### ii) サンプル搬送速度と磁束変化の関係

サンプルの搬送速度が速くなるほど出力電圧が増加するが、40m/min以上の速度では出力電圧が飽和し、速度との相関関係は確認できなかった。

### iii) センサ間距離と磁束変化の関係

センサ間中央が出力電圧は最も低く、センサ付近に近いほど出力電圧は高い。また、センサ付近からセンサ間中央に至るまでは指数関数傾向にて出力電圧が変化しており、センサからの距離依存性による磁束密度の粗密による変化と考えられる。

### iv) アルミ包材に対する磁気バイアス型の効果

アルミ包材へ金属球を混入したサンプルを測定した結果、金属球のサイズが大きくなるにつれて出力電圧が増加傾向となった。更に、 $\phi$  3.0mm サイズでは金属球単体での電圧値と同じ値となり、アルミ包材内の金属異物を検出する有効な方式であることを確認することができた。

本方式においてはバイアス磁石からの磁力線が異物判定に使用する電圧信号の発生源となっており、磁力線は半永久的に磁石から出力される。一方で磁力線の強弱を制御することは非常に困難であるため、異物判定信号の強弱を制御する上では搬送速度、上下センサ間距離をユーザー提供のサンプルごとに設定することが重要である。そのためには、サイズの検出限界を見極めるトライテストが必須であることから、今回の評価結果をサンプルテスト前の検査条件出しの指標として活用

いただければ幸いである。

本方式は、アルミ包装食品や高濃度塩分食品など導電性の包装形態・食材における渦電流磁界によるノイズ信号に対してS/N比が高く、汎用的な金属検出方式である。国内市場の大半を占めるサーチコイル方式をご使用のユーザーの中にはアルミ包装後の検査が難しいことを理由に、アルミ包装後の検査を無検査としてしまう、あえて感度を下げて運用してしまうなど、食品加工の現場では食品安全に不安を抱えた状態が続いている。今後もアルミ包装は食品ロス削減やプラスチック包装廃止の観点から使用され続けていくと考えられる。消費者の手に渡る直前のアルミ包装食品の全数検査を行い、少しでも安心・安全な商品が消費者に届くことを切に願うばかりである。

## 参考文献

- 1) 近藤信一：次世代無菌包装のテクノロジー、第1版、(サイエンスフォーラム) (2004年) 103-111