びんフィラーの充填精度測定

正 員 溝 口 正 信 (三菱重工業株式会社)

非会員 伊 藤 浩 文 (三菱重工業株式会社)

正 員 福 田 敏 男 (名古屋大学)

Measuring the precision of each filling valve of a bottle filler
Masanobu Mizoguchi, Member (Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)
Hirofumi Ito, Non-Member (Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.) ,
Toshio Fukuda , Member (Nagoya University)

It is essential, in beer bottling plants, to reduce the ratio of defective products. One of the best ways to realize it is to detect the abnormally filled bottles as faster as they are filled, and find out which filling valve caused them. There have been a couple of technologies proposed to inspect products at the last of the manufacturing process; however, there is none that can actualize the above requirement.

We propose, in this paper, a new method, which enables measuring the filling precision of each valve. It employs computer vision to gauge the filled level, and sensors to relate each bottle to the valve that has filled it. The problems of gauging are the frothed bubbles and the rough surface caused by jolts of the conveyer. In order to decrease the turbulent influences, we propose to apply statistical procedures to the measured data.

Through experiments at a test plant and an actual one, we confirmed that the distribution of measured data was approximately normal as we had hypothesized, and the mean value was quite stable. In addition, we verified that the measurement was accurate. As a result, we conclude that our proposed technique is quite effective.

キーワード：食品機械，画像処理，計測，統計，充填精度

1. まえがき

製品検査の目的は、第一義的には、製造した製品の品質を保証し、欠陥品を外部に出さないことである。しかし、近年では、製品の最終的な品質を保証するだけではなく、製造歩留まり（製造した製品における良品の割合）を向上させるため、検査技術が重要な役割を果たすようになってきた。この場合、検査システムは製造工程の中間段階で導入され、中間製品の品質レベルをチェックする。そして、不良品が後の工程に流れないように、その段階でストップさせる。⁽¹⁾

ビールびん詰め製造工程においても製品検査は非常に重要である。びん詰プラントでは、びん・栓の部品供給機、洗びん機、びんに飲料を充填するびんフィラー、栓を嵌め込む打栓機、加熱殺菌機、ラベル貼機、ケーサなどの機器が製造ラインを形成し、自動化による高速生産が行われている。そしておのこの工程で検査が実施さ

れており、上記のように中間段階で不良品を排除できるよう配慮がなされている。しかし充填量の検査に関しては、びん詰された製品の出荷検査が、最終工程に近いラ

図1 びんフィラーの構成図（上図面）
Fig.1 Structure of a bottle filler (Top view)

ベル貼直前で行われるのみである。^{(2)~(4)} そのため、びんフィラーでの充填異常が早期に発見できず、不良品が発見された時点ですでに大量の不良品が製造されている。それは製造歩留まりを大きく低下させる問題である。

ここで充填について詳細を述べる。びんフィラーは図1に示すように円形をしており、その円周上には数十から数百の充填バルブが装着されている。びんフィラーは回転しながら空びんを装填し、飲料を充填し、充填されたびんを打栓機へ送出する。その充填本数は充填バルブ数が100本のフィラーで毎分約800本に達する。⁽⁵⁾

ビールの充填では高い精度が要求される。^{(3)~(4)}

一般的に充填量は充填された飲料の液面高さで表現される。また充填精度は基準液面高さに対する誤差範囲で表される。その許容誤差範囲に明確な規格はないが、基準に対して $\pm 3\text{mm}$ ~ $\pm 8\text{mm}$ の範囲で良否判定を行う検査システムの例が報告されている。⁽⁶⁾ この充填精度を決定する最大の要因は、充填バルブの充填精度である。充填バルブは、びんに基準量を充填するよう機械的に調整されるが、その調整不良は飲料の充填量不良を引き起こす。ここで、充填バルブにはピストン式、液面式などさまざまな方式が採用されている。⁽⁷⁾ しかし、従来のびんフィラーに採用されている充填バルブのほとんどがオープンループ制御方式である。そのため、充填バルブの精度調整には多大な時間と労力を必要とする問題がある。またフィラー運転中に充填バルブの機械調整がずれて再調整が必要となった場合でも、その充填バルブを容易に特定することができない問題もある。これらの問題に対して、従来の検査方式は不十分である。すなわち従来方式は単に充填不良製品を検出するだけで、充填不良を発生している充填バルブを特定することはできないからである。^{(2)~(4), (8), (9)}

われわれが提案する方法は、充填バルブの充填精度を測定することで、上記の問題を解決しようとする新しい試みである。その方法では、びんフィラーの直後でびんの充填量を測定し、かつそれぞれのびんがどの充填バルブで充填されたかの対応付けを行い、充填バルブ毎の充填精度を計測する。これにより、充填不良を発生しているバルブを早期に検出することのみならず、充填バルブ精度の自動調整も可能とする。しかしその実現のためには、びん内部に気泡が存在し、かつ搬送ラインの揺れによる液面の乱れが生ずる状態で液面計測を行わなければならない。これに対し、従来技術は泡が存在せず、搬送ラインの揺れない状態で計測を行うものばかりであった。そこでわれわれは画像処理により液面計測を行い、その計測結果を統計処理する方法を用いて、泡の影響、液面乱れの影響を軽減する新しい方法を提案する。

本論文では気泡の問題、それに対するわれわれの解決策を述べる。さらに、実験によりそれが有効に作用することを示す。

2. 気泡の問題

びんフィラーでは、充填時に多量の気泡が発生する。そして、その気泡が消滅するのは、びんフィラーから20m以上の下流である。(図2)

図2 びん内部の気泡量の変化
Fig.2 Height of bubble inside a bottle

ここで、びんフィラー下流の搬送ラインは、最初の数メートル間はびん一本分のライン幅であるが、その後ライン幅が広がる。すなわち、この最初の数メートル間では、搬送ラインを流れるびんの順番と充填バルブの順番が一致しているため、びんがどの充填バルブで充填されたかを特定することができる。しかし、ライン幅が広がった後は、この特定は極めて困難となる。

われわれは、新設、既設それぞれのプラントで適用可能な充填計測方法の開発を狙うものである。そこで、われわれの提案では、搬送ラインの最初で液面高さの測定を行うが、この間での気泡の高さは20mm以上である。しかもその高さは一定しておらず、一部の気泡はビールの液体内部を上昇し続けている状態にある。(図3)

図3 充填直後の気泡の状態
Fig.3 Bubble just after filling process

3. 充填バルブの精度計測方法

われわれの提案する方法では、気泡が存在する状態で、液面高さを画像処理により計測する。そしてその計測結果を統計的に処理することで、気泡の影響を軽減し、各充填バルブ毎の充填精度を推定するものである。以下に液面計測方法、充填バルブ特定方法、統計処理方法を述べる。

<3.1> 液面計測方法 われわれは液面高さを測定する方式としては画像処理方式を選定した。これは、画像処理方式がX線方式、超音波方式などに比べ生産現場で

扱いやすく精度が高いためである。⁽¹⁰⁾ 計測方法を示す構成図を図4に示す。

図4 画像処理による液面計測方法
Fig.4 Filling level measurement method based on computer vision

搬送ラインを進行するびんは光電スイッチで検出され、CCDカメラがその画像を撮影する。その際、びんの側面から、乳白色のアクリル板を通して拡散した照明を照射する。ここで、上述のように、計測地点では充填時に発生した泡が消えていない。したがって、その画像は図5に示すように、液体は透明であるので明るく、一方泡は照明を遮蔽するので暗く写る。この画像を二値化し、明るい部分と暗い部分の境界を液面とし、その液面高さを算出する。

図5 びんの画像
Fig.5 An image of a filled bottle

＜3・2＞ 充填バルブの特定方法 びんの特定は、図6に示すように、検びんセンサー、破びんセンサー、ロータリーエンコーダを用いて行う。

びんフィラーにびんが送入されると、検びんセンサーがそれを検知し、制御装置に検知信号を送信する。制御装置は、そのタイミングでびんフィラーの回転軸に装着されたロータリーエンコーダからびんフィラーの回転角度を読み出す。ここで、びんフィラーの円周上に装着されている充填バルブは、回転角度が判明すれば特定可能である。すなわち、検びんセンサーにより検知されたびんは、どの充填バルブで充填されるかが把握できるわけである。

しかし、びんフィラーにおいては破びんと呼ばれるびんの破損がしばしば発生する。これはフィラーの充填時にびんに大きな内圧が加わるためである。われわれは破びんセンサーを設け、この破びんを検知することとした。これらの方法により、びんフィラーから送出される全

図6 充填バルブの特定方法
Fig.6 Method to relate each bottle to the valve, which filled it

てのびんは、びんが一系列で搬送される区間において、どの充填バルブで充填されたかが特定される。したがって上記の液面計測は、びんの液面を計測することで、間接的に充填バルブの充填精度を計測していることになる。

＜3・3＞ 統計処理方法 上記で得られた液面計測結果には誤差が含まれる。しかし計測を繰り返し実施しても、その誤差を分離して真の液面高さを得ることはできない。⁽¹¹⁾ したがって、われわれは統計処理を適用することで、真の液面高さを推定する手法を提案する。

まず誤差の特性を考える。誤差には、ビールの気泡化による液面降下誤差、搬送ラインの揺れによる液面の計測誤差、画像処理そのものの計測誤差などが挙げられる。これらの誤差は互いに独立である。また、 N 回の繰り返し計測を行う場合、毎回の計測は独立である。そこで、われわれは誤差の特性を正規分布であると仮定する。加えて、計測モデルが線形であると仮定する。

われわれが導入する計測モデルを(1)式に示す。

$$y_{ni} = \mu_{ni} - \beta_{ni} + \tau_{ni} + \varepsilon_{ni} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 y_{ni} : 計測された液面高さ、 μ_{ni} : 真の充填量、 β_{ni} : 気泡による液面降下量、 τ_{ni} : 搬送ラインの揺れによる液面計測誤差、 ε_{ni} : 画像処理やその他の原因による計測誤差、 n : 充填バルブ番号、 i : 充填バルブ番号 n に対する i 回目の計測

(1)式では、真の充填量を下げる項を一、真の充填量を変動させる項を+とした。

ここで、 β_{ni} , τ_{ni} , ε_{ni} は、おのこの正規分布を有する確率変数であり、(2), (3), (4) 式で表される。

$$\beta_{ni} = N(\bar{\beta}_n, \sigma_\beta^2) \dots \dots \dots (2)$$

$$\tau_{ni} = N(0, \sigma_\tau^2) \dots \dots \dots (3)$$

$$\varepsilon_{ni} = N(0, \sigma_\varepsilon^2) \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 $N(\mu, \sigma^2)$: 平均 μ , 分散 σ^2 の正規分布、 $\bar{\beta}_n$: 気泡による液面降下量の平均値、 σ_β^2 : 気泡による液面降下の分散、 σ_τ^2 : 搬送路揺れによる液面計測誤差の分散、 σ_ε^2 : 画像処理やその他の原因による計測誤差の分散

したがって、充填バルブ n に対する充填精度の計測を、十分大きな回数である N 回実行することにより、(2), (3), (4) 式より、それぞれの平均である $\bar{\beta}_n$, 0, 0 が求められる。その結果、(1) 式は、

$$\bar{y}_n = \mu_n - \bar{\beta}_n \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 $\bar{y}_n$: 計測された液面高さの平均値

に収束する。すなわち、計測値 $\bar{y}_n$ および $\bar{\beta}_n$ から、充填バルブ n の充填精度である μ_n が推定できる。ここで、上記の計測回数 N は、実用上、有限回である必要がある。また計測の高速化のためには、 N を最小化することが望ましい。そこで、われわれは有限の標本データから正規分布の平均値を推定するための t -分布を適用する。 t -分布で正規分布を正確に近似するためには標本数を 30 以上とする必要がある。^{(11)~(14)} よって、われわれは N をその最低数である 30 回とした。なお、 μ_n は時間的に変化するが、機械的な調整の経時変化であるため、計測速度に比べその変動は緩やかであると仮定している。

次におのこの計測データの有効性とその採択/棄却について述べる。(1) 式の誤差項 β_{ni} , τ_{ni} , ε_{ni} はそれぞれが正規分布であるため、(1) 式右辺全体が、平均値 $\mu_n - \bar{\beta}_n$, 分散 $\sigma_\beta^2 + \sigma_\tau^2 + \sigma_\varepsilon^2$ の正規形分布であると置き換えられ⁽¹²⁾, (6) 式で表される。

$$y_{ni} = N(\mu_n - \bar{\beta}_n, \sigma_\beta^2 + \sigma_\tau^2 + \sigma_\varepsilon^2) \dots \dots \dots (6)$$

$$= N(\mu_s, \sigma_s^2) \dots \dots \dots (6')$$

ここに、 μ_s : 計測したデータの平均値、

σ_s^2 : 計測したデータの分散

ここで、搬送ラインの揺れが大きい場合、びんが傾いて、(1) 式の計測誤差 τ_{ni} が著しく大きくなることがある。これらのデータは統計処理に含めないことが妥当である。そこでわれわれは、有意水準 5% のトンプソン棄却検定⁽¹⁴⁾を行い、信頼性の高い計測データのみを採択することとした。有意水準 5% はトンプソン棄却検定の標準値であり、上記データの棄却に有効に作用する。

4. 実証試験と評価

図7 試験装置

Fig.7 Test equipment

われわれの提案する方法の有効性を確認するため、試作システムを構築し(図7)、試験プラントおよび実プラントでの実証試験を行った。以下にその内容、結果および評価を述べる。

4・1> 実証試験の内容 実証試験として以下に示す試験を実施した。

- (i) (試験1) 計測データの特性把握試験
- (ii) (試験2) 液面高さ測定精度の計測試験

試験1の目的は、われわれが仮定する計測データの正規形分布性とその安定性を検証することである。さらに、試験2の目的は、上記仮定が確認できた上で、われわれが提案する計測方法が正確に動作することを確認するものである。それぞれの試験内容を表1および表2に示す。

表1 (試験1) 計測データの特性把握試験

Table 1. (Test 1) Test for grasping the statistical characteristics of the measured data

試験の手法・手順	実プラントにおいて、フィラーから排出されるびんの全数計測を行い、充填バルブ毎の充填精度を求める。
プラント	実プラント(ビール工場)
びん種	生ビール中びん(500ml)
充填バルブ数	100本
充填速度	605(本/分)
搬送路速度	53.5m/分
設置場所	フィラーの下流3mの地点(現場の制約から)
計測回数	160回/充填バルブ(延べ4時間計測)

表2 (試験2) 液面高さ測定精度の計測試験

Table 2. (Test 2) Test for verifying the efficiency of measuring precision

試験の手法・手順	あらかじめ液面高さを測定したびんビールに気泡を発生させ、搬送ラインに流し、試験装置で液面高さを計測する。
プラント	試験プラント
びん種	生ビール大びん(633ml)
ビール本数	30本
充填速度	660(本/分)相当
搬送路速度	56.1m/分
計測回数	30回/本

4・2> 試験結果と評価

4・2・1> 計測データの特性把握試験 われわれの提案では、(6)式に示すように、計測データが正規形分布

であることを仮定している．まずこの仮定の有効性を検証する．

フィラーの第1番充填バルブの計測結果を図8に示す．計測データの分布は正規性歪度が0.04であり，ほぼ正規形に分布していることが判明した．ここで正規性歪度とは(7)式で算出される正規性の検定値である．⁽¹¹⁾ 正規性歪度が0に近いほど，左右対称の正規分布に近い．

$$\beta_1 = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - \bar{y}}{\sigma} \right)^3 \dots\dots\dots (7)$$

ここに， β_1 ：正規性歪度， n ：計測回数，
 y_i ： i 番目の計測データ， $\bar{y}$ ：計測データ平均値
 σ ：計測データの標準偏差

図8 計測データの分布

Fig.8 Distribution of measured data

また，全充填バルブの正規性歪度の平均値も-0.2であり，高い正規性が確認できた．

次に，第1番充填バルブの計測データについて，30回分の平均値の推移(移動平均値)を図9に示す．この結果からも，計測データの平均値の変動が少なく(標準偏差0.305)，充填精度が安定して得られていることが確認できた．

図9 計測データの移動平均値

Fig.9 Running average of the measured data

<4.2.2> 液面高さ測定精度の計測試験 30本のびんに対し，それぞれを30回計測した計測平均値と，真の液面高さのとの比較を図10に示す．

図10から，計測した液面高さの平均値と真の液面高

さとの間には，相関係数⁽¹⁴⁾ 0.906という強い正の相関が確認できた．

さらに図11に，真の液面高さと計測誤差との関係を

図10 液面高さの計測精度

Fig.10 Accuracy of measuring filled level

回帰分析した結果を示す．この計測誤差は(5)式より気泡による液面降下と考えられる．ここから，びんの液面高さと気泡による液面降下量とは，比例(比例係数は負)する傾向にあることがわかった．すなわち液面が低いほど泡立ち量が多い．その残差の分散は0.948である．

図11 びん液面高さと計測誤差

Fig.11 Relations between filled level and measuring error

5. 考察

実証試験から，計測データがほぼ正規形に分布していることが確認でき，(5)式の前提条件が正しいことが実証された．また，計測された液面高さの平均値 $\bar{y}_n$ から真の液面高さ，すなわち充填精度 μ_n が推定可能であると確認された．これは，(5)式の $\bar{y}_n$ および β_n がともに，真の液面高さ μ_n の線形関数で近似可能であるためと考えられる．

この成果を，フィラーの充填バルブの調整に適用する方法について考察する．まず，充填精度の計測精度を考える．図10において，予測値に対する計測値の誤差の範囲をt分布を用いて求める．誤差は平均0，分散0.600，標本数30のt分布となるので，その95%の存在範囲は 0 ± 1.610 ，また99%の存在範囲は 0 ± 2.169 となる．すなわち，計測により得られた充填精度 μ_n は，95%の確度

で $\pm 1.610\text{mm}$ の精度であると換言できる。(11)~(14)

われわれが提案する方式を用いて充填バルブ精度 μ_n を計測した場合の計測精度は、第1章で述べた従来の計測精度である $\pm 3\text{mm} \sim \pm 8\text{mm}$ を上回る。したがってわれわれの提案する方法は実用化可能であると考えられる。さらに、計測値が規定の液面高さに一致するように充填バルブをフィードバック制御することで、フィラーの充填量を95%の確度で誤差範囲 $\pm 1.610\text{mm}$ に制御できるものと考えられる。

6. まとめ

本論文で、われわれはびんフィラーの充填バルブの充填精度を計測する手法を提案した。この手法は、フィラーで充填されたびんの液面高さを画像処理により計測し、同時にそのびんがどの充填バルブで充填されたかを特定することで、充填バルブ毎の精度を測定するものである。その際、びん内部に発生する気泡と、搬送ラインの揺れに起因する液面の不安定さの計測誤差を統計処理で軽減する。実証試験を通して、われわれの提案する方法により充填精度が、95%の確度で $\pm 1.610\text{mm}$ の精度を有することを示した。

この技術は、びんフィラーの充填精度調整の自動化、および充填バルブ不良の早期発見に大いに役立つものと期待される。

(平成11年5月21日受付,平成11年9月28日再受付)

文 献

- (1) 原 靖彦:「検査技術の手法と動向」, 自動化技術, 第30巻, 第8号, p.10-16, (1998.8)
- (2) 大仲周次, 石井敏行:「ビール壺用実壺検査機」, NEC 技報, Vol.49, No.8, p.91-97, (1996)
- (3) 竹本秀明, 高嶋章行:「ビールびん詰製造工程における検査の自動化について」, ジョイテック, 1992年2月号, p.28-32, (1992.2)
- (4) 菊地一裕:「充てん後総合検査機(仕上検査機)」, ファクトリ・オートメーション, 1991年8月号, p.45-48, (1991.8)
- (5) 三菱重工業:「三菱ボトルフィラー FF SERIES カタログ」, (1998.8)
- (6) 工藤祐司:「不透明容器内の液量検査システム」, 自動化技術, 第29巻, 第2号, p.54-56, (1997.2)
- (7) 町田富雄:「缶・びん詰充填機の最新の傾向」, 包装技術, 平成4年4月号, p.47-50, (1992.4)
- (8) 酒向 淳:「目視検査自動化のための計測機器」, オートメーション, 第35巻, 第5号, p.18-24, (1990.4)
- (9) 谷川 清:「薬瓶の液量検査」, 省力と自動化, p.76-78, (1986.3)
- (10) 石井 明:「次世代生産システムのためのビジョンセンシング技術」, 日本ロボット学会誌, 第15巻, 第

6号, (1997.9)

- (11) 東京大学教養学部統計学教室:「自然科学の統計学」, 東京大学出版会, (1992.8)
- (12) L. Maisel:「確率・統計・ランダム過程」, 森北出版, (1980.7)
- (13) M.R.Spiegel: "Probability and Statistics", McGraw-Hill, (1991)
- (14) 石村貞夫:「統計解析のはなし」, 東京図書, (1989.4)

溝口 正信 (正員) 1958年6月29日生まれ。1982年3月早稲田大学電気工学科卒業。同年三菱重工業(株)入社, 現在に至る。1992年12月米国バドュー大学電気工学科修士課程修了, 1999年4月名古屋大学工学研究科博士後期課程入学。主に産業機械, 原動機計装システムの

制御に関する研究に従事。電気学会会員。

伊藤 浩文 (非会員) 1945年6月18日生まれ。1964年3月豊橋工業高校電気工学科卒業。同年三菱重工業(株)入社, 現在に至る。主として, 食品機械の制御システムの開発に関わる。

福田 敏男 (正員) 1948年12月12日生まれ。1971年早稲田大学機械工学科卒業。1977年東京大学大学院博士課程修了。同年通産省工業技術院機械技術研究所。1982年東京理科大学機械学科講師, 1983年助教授。1989年4月名古屋大学工学部機械工学第2学科教授, 1997年4月同大学先端技術共同研究センター教授。IEEE Robotics & Automation Society 会長。1995年IEEE フェロー, SICE フェロー。工学博士。