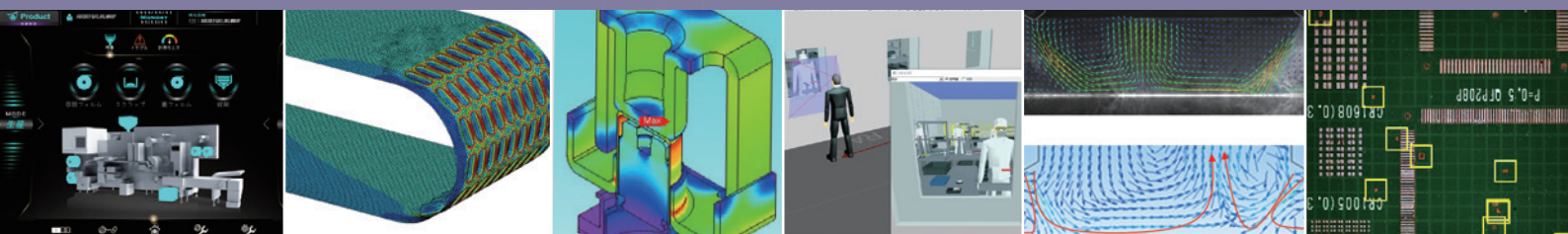


CKD技報

CKD TECHNICAL JOURNAL

Vol.9



企業理念・経営理念・行動規準

Corporate Philosophy, Corporate Commitment, Standards of Conduct

企業理念には、当社グループの進むべき方向を明確にするため「流体制御と自動化の革新」を明記し、社会に貢献することを宣言しております。

経営理念は、企業理念を実現するために全社員が守らなければならない約束ごとを5項目に分け、全社員が責任を持って実行できる体制を目指しています。

行動規準は、企業理念および経営理念に基づき、全社員が順守し実践すべき具体的な事項を定めたものです。



企業理念

Corporate Philosophy

私達は創造的な知恵と技術で
流体制御と自動化を革新し
豊かな社会づくりに貢献します。

With creative knowledge and technology,
We shall innovate fluid control and automation,
Thus contribute to build rich society.

経営理念

Corporate Commitment

1.社会的責任の自覚

社員全員が社会的責任を自覚し、法を順守し、
情報を開示し、社会の信頼が得られるよう誠実に
行動します。

1.Recognition of Corporate Social Responsibility

Each corporate member recognizes Corporate Social Responsibility, complies with all laws and regulations, discloses information, and honestly conducts oneself to gain social entrustment.

2.地球環境への配慮

地球環境に配慮した環境にやさしい商品の
提供と、企業活動を通じて環境保全につとめます。

2.Care for Global Environment

We shall propose eco-friendly products, and strive for environmental conservation through corporate activities.

3.顧客志向の徹底

常に顧客志向の精神と謙虚な心で対応し、
お客様に満足いただける製品とサービスを
提供します。

3.Thorough Customer Orientation

We shall always correspond with a customer oriented and modest mind, offering products and services to promote customer satisfaction.

4.技術革新への挑戦

世の中のトレンドを見極め、技術革新につとめ、
魅力あふれる商品をタイムリーに提供し、
業界のリーダーシップをとります。

4.Challenge to Technology Innovation

We shall take a leadership role in the industry by identifying global trends, striving for technology innovation, and offering effective products in a timely fashion.

5.人材重視の企業風土

一人ひとりの可能性と働きがい大切にし、
失敗を怖れることなく業務改革に取り組み、
組織の強みを最大限に発揮できる企業風土を
つくります。

5.Corporate Culture with Faith in Human Resource

We shall build corporate culture with faith in human potential and satisfaction upon achievement of each member, courageously challenge innovation in operation, and capability to demonstrate maximum strength of organization.

目次

ごあいさつ	1
-------------	---

巻内特集 テーマ「DX」

 遠隔ソリューション	2
--	---

 デジタル技術による生産ライン立ち上げの効率化	6
--	---

 PTP包装機における搬送ローラを通過する 成形フィルムの非線形有限要素解析	12
--	----

 基板の異物検査技術	17
---	----

 はんだ印刷検査機「VP-01G」	21
--	----

 自己復帰機能付きラッチバルブの開発	25
---	----

 ソレノイドの高効率磁気回路設計	29
---	----

 噴流のシミュレーションと可視化	34
---	----

 バイオプロセスへの取り組み	39
---	----

Table of Contents

Greetings	1
-----------------	---

Special Report on "DX"

 Remote Solution	2
--	---

 Streamlining Production Line Start-Up Through Digital Technology	6
--	---

 Non-linear FEM analysis about formed film going through transport rollers on the blister packaging machines	12
---	----

 Technology for Foreign Material Inspection	17
--	----

 Solder Paste Inspection Machine "VP-01G"	21
--	----

 Development of a Latch Valve with Self-Returning Function	25
---	----

 High-Efficiency Magnetic Circuit Design for Solenoids	29
---	----

 Simulation and Visualization of Jet Flows	34
---	----

 Approach to Bioprocess	39
--	----

DX社会におけるモノづくりを見据えて

“Anticipating manufacturing in a DX society”

林田 勝憲 Katsunori Hayashida

CKD株式会社

常務執行役員

コーポレート役員

CKD Corporation

Managing Executive Officer

Corporate Officer



3年にわたって世界的な規模で影響を及ぼしていた新型コロナウイルスもやっと沈静化が見えてきました。欧米、アセアンにおいてはほぼコロナ禍前の状態に戻っておりますが、中国に限ってはゼロコロナ政策が強力に継続されておりサプライチェーンは未だ完全には戻っておりません。半導体、電子部品、樹脂材料などの調達に関しても暫くは厳しい状況が続くと見られます。一方で設備投資意欲が非常に高い業種もあり、製造業における先の見通しは非常に不透明となっています。

このような状況の中でモノづくりにおいても従来の手段が通用しなくなっています。リアルでのコミュニケーションよりWEBでの効率的なコミュニケーションが重要視されるようになりました。製造現場においても要員不足により従来の生産ラインでは対応できない状況になっています。アフターコロナの状況を見据えたデジタル化は必要不可欠です。

今回お届けするCKD技報Vol.9の巻内特集は「DX（デジタルトランスフォーメーション）」です。「遠隔ソリューション」「デジタル技術による生産ライン立ち上げの効率化」など今のモノづくりに求められる技術テーマを掲載しました。皆様の活動に少しでもご参考になれば幸いです。

CKDグループは持続可能な社会の実現に向けてお客様と共に歩んでまいります。

引き続き皆様からのご指導、ご鞭撻をよろしくお願い申し上げます。

It appears that COVID-19, which has affected the world for three years, is finally beginning to subside. In Europe, the United States and ASEAN countries, the situation has returned virtually to what it was before the pandemic, but just in China, the zero COVID-19 policy has been maintained strongly and the supply chain has not yet recovered completely. Procurement of semiconductors, electronic parts and resin materials is expected to remain difficult for some time. On the other hand, there are some industries that are highly motivated towards capital investment, and the outlook for manufacturing industry is very uncertain.

In such circumstances, conventional manufacturing methods are no longer effective. Efficient communication on the web has become more important than real communication. Due to staff shortages at manufacturing sites, it is not possible to respond with conventional production lines. Digitalization anticipating the post-COVID-19 situation is essential.

The special report in this CKD Technical Journal Vol. 9 is about DX (digital transformation). It describes some of the technical themes required for manufacturing today, including remote solutions and increasing the efficiency of production line start-up using digital technology. We hope that this will be of reference to you all in your activities.

The CKD Group will move forwards with our customers towards the realization of a sustainable society.

We thank you for your continued support and welcome your guidance and suggestions.

遠隔ソリューション Remote Solution

澤田 英明 Hideaki Sawada

日本の製造業が抱える問題の一つに、少子高齢化による労働人口の減少がある。

近年、その影響は加速度的に増加しており、企業は生産性向上等の取り組みについて、優先度を上げ、積極的に推し進めている。

当社においても、人手不足によるサービス低下や機会損失を未然に防ぐべく、「遠隔ソリューション」と題し、顧客企業と当社双方の生産性向上に寄与する、新たなサービス体制を構築した。

本サービスは、当社の顧客企業に導入されている薬品包装ラインと、当社小牧工場のサポートセンタを、インターネットを介して接続し、遠隔にて生産をサポートするものであり、トラブル復旧からバリデーション支援までサポート内容は多岐にわたる。

本稿では、当社のDXの一例として遠隔ソリューションの内容について紹介する。

One of the problems faced by Japanese manufacturing industry is the declining working population due to the declining birthrate and aging population.

In recent years, the impact has been increasing at an accelerating pace, and companies are raising priority to their efforts to improve productivity and promoting them actively.

In our company as well, in order to prevent service degradation and opportunity loss due to labor shortages, we have built a new service system entitled "Remote Solution" that contributes to the productivity improvement of both our client companies and our company.

This service connects our pharmaceutical packaging lines delivered to our client companies with the support center at our Komaki Factory via internet to provide remote support for production, and covers a wide range of support contents, from trouble recovery to validation support.

This article introduces the content of the remote solution as an example of CKD's DX.

1 はじめに

当社はこれまでにプリスタ包装技術を用いて医療・医薬品業界向けの包装機械や食品包装機械を開発してきた。

その中でも医療業界向けの、PTPシートを製造するPTP包装機は国内トップシェアを持ち、海外への販売も年々増加している(Fig.1)。



Fig. 1 PTP 包装機及びPTPシート

多くの顧客に当社の機械をご使用いただく中で、生産性及びサービスの向上を目的とし、2019年よりICTを用いた付加価値製品の開発や新しいサービス体制の構築を推進しており、現在複数のソリューションの提供を開始している(Fig.2)。



Fig. 2 当社のICT 製品一例

それらの取り組みの中で、2021年より遠隔ソリューションと題した、新しいサービスである遠隔サポートの提供を開始している。遠隔サポートを導入することで、以下5点のメリットによって顧客の生産性向上を目指している。

- ・ダウンタイム削減
- ・コスト削減
- ・属人化の解消
- ・オペレータトレーニング
- ・スムーズな品目追加のスケジュールリング

2 背景

新型コロナウイルス感染症(COVID-19)による世界規模でのパンデミックの結果、国内では非常事態宣言、

海外ではロックダウンと、簡単に顧客工場へ訪問することができなくなった。規制が緩和された現在においても抗原検査や人数制限など継続的な感染対策は必須であり、以前と比較して迅速な対応ができていたとは言えない状況が続いている。

このような状況から、多くの顧客でダウンタイムの増加が大きな課題となっており、労働人口減少による慢性的な人手不足や属人化も相まって、生産性低下を防ぐために様々な取り組みを行わざるを得ない状況となっている。当社としても、顧客増加に伴う人員派遣の増加や多能工化が難しい専門性、属人化などが課題となっており、新たなサービス体制を構築することによる顧客企業と当社双方での生産性向上を目標として、遠隔ソリューションによるサービス体制の構築に着手した。

3 システム概要

今までのサービス体制は電話や訪問を基本としており、機械のメンテナンスやトラブル復旧支援について、電話では伝わらずにすぐに訪問といった流れとなっていた。

遠隔サポートでは、機械に対してゲートウェイと呼ばれる通信端末を搭載することで、インターネットを介して当社小牧工場より機械へのアクセスが可能となる(Fig.3)。

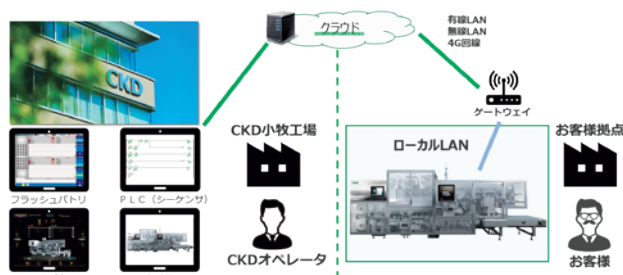


Fig. 3 システム構成図

これにより、機械のタッチパネルやコントローラであるPLC、検査機であるフラッシュパトリを当社作業員が現地にいる際と同様に操作することができるため、即時復旧が容易となった。

3-1 導入方法

遠隔サポートを導入するには、ゲートウェイを搭載した中継BOXを機械に設置し、遠隔対象機器に対してLANケーブルを接続するのみであり、装置側のソフト変更も必要ない。

なお、BOXサイズは300×300×200mmである(Fig.4)。



Fig. 4 中継BOX

4 対象機器

遠隔での即時復旧を目的としているため、当社作業員が現地調整時に操作する後述の主要機器を網羅している。

4-1 各機械のタッチパネル

各機械のHMI(※1)であるタッチパネルに対して、遠隔監視及び遠隔操作が可能であり、各種設定の確認・変更が行える。また、設定により機能を制限し遠隔監視のみとすることも可能となる(Fig.5)。



Fig. 5 各機械タッチパネル

4-2 各機械のコントローラ

各機械のコントローラであるPLCに対して遠隔操作が可能であり、ソフトウェアのモニタリングや変更が行える。また、遠隔より機械の駆動源であるサーボモータ等の波形データ取得も可能となる(Fig.6)。

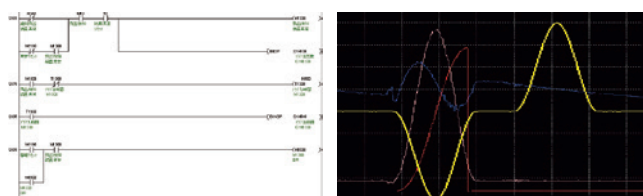


Fig. 6 PLCソフト及び波形データ

4-3 フラッシュパトリ

PTP包装機の各工程で、錠剤や包材などの検査を行っている検査装置であるフラッシュパトリに対して、遠隔監視及び遠隔操作が可能であり、各種設定の確認・変更が行える。

また、設定により機能を制限し遠隔監視のみとすることも可能となる(Fig.7)。



Fig. 7 フラッシュパトリ画面

4-4 ネットワークカメラ

本システムのネットワークに、ネットワークカメラを設置することで、遠隔での視野共有が可能となる (Fig.8)。



Fig. 8 ネットワークカメラ

5 サポート内容

遠隔サポートでは、トラブル復旧以外にも様々なサポートを提供しており、内容としては以下のものがある。

5-1 トラブル原因調査・復旧支援

生産中にトラブルが発生した場合に、電話ではすぐに伝わらない内容でも、遠隔で

- ・パラメータ
- ・検査画像
- ・エラー内容
- ・カメラ映像

を直接確認できることで、最短での原因究明・解決が可能となる。

5-2 フラッシュパトリバリデーション支援

フラッシュパトリの設定変更及びバリデーション支援作業を遠隔にて実施可能であり、現地での作業と同様に作業完了後にバリデーション書類を提出する。

なお、安全のため当社作業員が現地にいない場合、機械の駆動及び不良サンプルの設置は顧客に依頼する形となる。

5-3 データのバックアップ

生産パラメータの定期的なバックアップを遠隔で実施し、当社より記憶媒体に格納して提出する。

5-4 日常の問い合わせサポート

日常点検・交換部品等に関する、作業手順・操作方法の説明・助言による、簡易的なオペレータ教育が可能となる。

6 セキュリティ

遠隔サポートを導入することで、対象機のタッチパネル等を、インターネットを介して当社小牧工場から直接監視が可能となり、設定により遠隔操作も可能となる。

顧客が安心して遠隔サポートを受けられるよう本システムには以下三つのセキュリティを設けている。

6-1 ハードセキュリティ

中継BOXにはキースイッチが搭載されており、遠隔サポートを使用する時以外はゲートウェイに電源が供給されず、ネットワークには接続されない仕組みとなっている。

6-2 ソフトウェアセキュリティ

当社の機械にはData integrity対応などのセキュリティオプションを用意している。

Data integrityは、データの完全性とも呼ばれ、データがライフサイクルを通じて一貫性を保ち、欠損がないこととされており、要件としてはALCOA原則もしくはALCOA+であるといわれている (Fig.9)。

ALCOA原則			ALCOA+		
A	Attributable (帰属性)	データの生産者が明確であること	Complete (完全性)	必要な情報がすべて欠損なく完全にそろっていること	
L	Legible (判読性)	見読性があり恒久的であること	Consistent (一貫性)	一連の記録に矛盾がないこと	
C	Contemporaneous (同時性)	即時に記録すること	Enduring (永続性)	記録が必要な期間、閲覧できる形で保存されていること	
O	Original (原本性)	原本あるいは正確なコピーであること	Available (可用性)	記録に対して必要なタイミングで閲覧できること	
A	Accurate (正確性)	正確であること			

Fig. 9 Data integrity 要件

本オプションを搭載することで、包装ライン全体でのアカウント管理・監査証跡などが可能となり、Data integrityの要件を網羅できるため、遠隔サポートでの作業においても正しくデータを管理できる。

6-3 ネットワークセキュリティ

遠隔サポートを導入することで、当社からのアクセスが可能となるが、システムの特徴として、ゲートウェイ配下の機器は全てクローズドネットワークとなり、

インターネットへの接続及び外部からのアクセスは行われない。

また、当社からのアクセスについても、認証キーとパスワードを用いてクラウドサーバーにログインし、予め登録された機器に対して認証を行うことで、初めて対象機器に対して暗号化された通信が確立される。

7 使用例

ここで、遠隔サポートの使用事例を紹介する。

7-1 フラッシュパトリの良品巻き込み

生產品種が同じでもロットが変わることで錠剤に微小な変化があり、良品の範囲内であるのに判定値が厳しく不良になってしまう場合がある(Fig.10)。

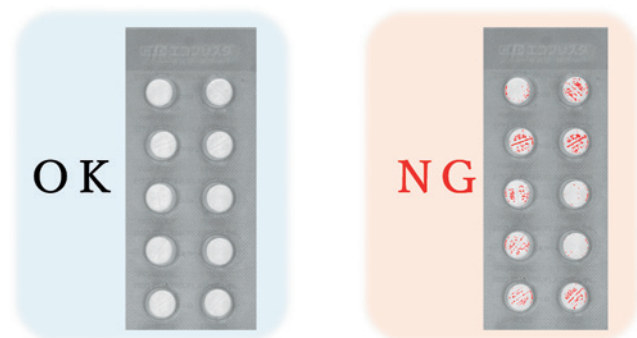


Fig. 10 良品巻き込み

この際に設定値を変更し、不良を削減したいが、フラッシュパトリの操作に慣れていない人では容易に修正ができない。遠隔サポートを活用することで、新オペレータが対応していたとしても当社の作業員が迅速に対応し、即時復旧が可能となる。

7-2 PTPシートのポケットつぶれ

PTPシートのポケットつぶれが発見された際に、発生源の特定など経験が浅いオペレータでは原因がすぐに掴めない。遠隔サポートを用いることで、カメラによる視野共有で発生箇所を特定し、遠隔操作によって関連するパラメータをすぐに確認できる。復旧後についても視野共有にて改善効果を当社作業員と一緒に確認し最短で生産の再開が可能となる。

7-3 スムーズな品目追加工事

生產品目を追加する場合、今までは機械・電気・検査と3名の派遣が必要であったが、遠隔サポートを活用することで、電気・検査は遠隔での対応が可能のため、機械1名さえ確保できれば工事が実施できる。

8 おわりに

本稿では、当社の新しいサービスである遠隔ソリューションの概要と活用シーンを述べた。

近年、デジタル庁が発足するなど、国を挙げてデジタル社会の実現に取り組みされており、各企業としてもDXを進めることが当たり前といった時代の潮流となっている。当社では、生産性向上・省人化・サポートなど様々なICTソリューションを用意している。それらを活用することが、顧客のDX推進への第一歩としていただけるようこれからもICTソリューションの開発を継続し、顧客企業と当社双方での社会問題解消に貢献していく。

※1 Human Machine Interfaceの略であり、人間と機械が情報をやり取りするための手段や装置、ソフトウェアなどの総称。

執筆者プロフィール



澤田 英明 Hideaki Sawada

自動機械事業本部

Automatic Machinery Business Division



デジタル技術による生産ライン立ち上げの効率化

Streamlining Production Line Start-Up Through Digital Technology

谷口 剛一 Koichi Taniguchi

当社は電動とエアによる制御技術を保有し、多様な自動化の用途に対応するための豊富な製品を販売している。そして、30年にわたってその製品群を活用し社内自動生産ラインを内製し、製品開発にフィードバックすることで、お客様によりよい製品を提供することに繋げてきた。

近年は少子高齢化による生産年齢人口が減少し、さらに製品販売数の増加による設備投資が増えている。このような状況において、安全性・機能性・品質などを向上しつつ生産準備期間の短縮が必要となっている。

この課題に対し、デジタル技術を活用した事例について紹介する。

We possess both electric and pneumatic control technologies and sell a wide variety of products to meet a wide range of automation applications. For 30 years, we have been providing our customers with better products by utilizing these products to build in-house automated production lines and feeding them back into product development.

In recent years, the working-age population has been decreasing due to the falling birthrate and aging population, and capital investment has been increasing due to the increase in the number of products sold. Under these circumstances, it is necessary to shorten production preparation time while improving safety, functionality, and quality.

This presentation will introduce examples of the use of digital technology to address this issue.

1 はじめに

市況の悪化により減少していた設備投資は回復基調にある。人手不足、働き方改革を背景とした労働時間の適正化に向けた省力化投資や、老朽化した設備の更新投資などにより、設備投資は今後も増加すると見込んでいる。また、デジタル化の進展に伴う技術革新や顧客ニーズの変化の加速に伴い、製品のライフサイクルは短縮の一途をたどっている。世界経済はめまぐるしく変化し、不透明な状況が続く中、短期間で生産能力を向上させ、生産体制を構築していかなければならない。改革に挑戦し、生産ライン立ち上げの品質向上とスピードアップを同時に果たす必要がある。

2 デジタル技術導入の背景

新製品発売や、既存製品の増産を行うには生産ラインの導入、改造が必要となる。①生産企画→②工程設計→③生産レイアウト検討→④設備導入→⑤量産試作という流れで企画は進む。この中で②から④は生産技術が主体となり開発を行う生産ライン立ち上げの工程である。これら各工程が何をどのように行っているか現状把握を行い、それぞれの工程で問題の洗い出しに取り組んだ(Fig.1)。

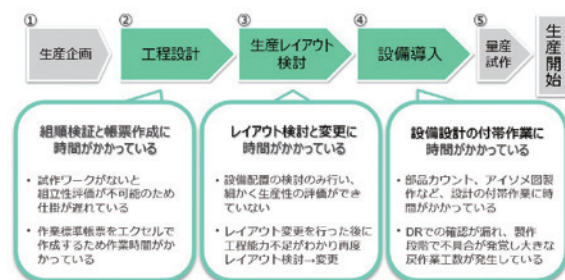


Fig. 1 生産ライン立ち上げの現状

②工程設計では、組順検証と帳票作成に時間がかかっていることが分かった。これは試作ワークがなく、組立性評価ができずに仕掛りが遅れること、作業標準帳票をエクセルで手入力作成するため作業時間がかかることが原因となっている。

③生産レイアウト検討では、レイアウト配置検討と変更の問題があることが分かった。これは設備配置の検討のみ行うことにより細かく生産性の評価ができておらず、実際にレイアウト変更を行った後に、工程能力不足が露呈し、再度レイアウト検討からやり直すということが原因となっている。

④設備導入では、設備設計の付帯作業に時間がかかっていた。構成部品のリストアップやアイソメ図(立体を斜めから見た図)作成など、設計の付帯作業に時間がかかることや、デザインレビューでの確認が漏れ、製作段階で不具合が発覚し大きな戻作業工数が発生していることが原因となっている。

各工程は共通して、2D図面データや、エクセル帳票を用いており、それによる非効率な作業と、不具合による戻作業により作業時間がかかっている。この問題を解決するため、作業の補助となるデジタルツールの新規導入検討を開始した。

3 デジタルツールの選定

ツール導入に当たり、以下の項目を重視し導入前検討を行った。

- a.現状把握で洗い出した問題を解決できるための機能を備えていること
 - b.国内シェアが大きく継続的なバージョンアップを期待できること
 - c.保守内容に講習と補助機能の開発サポートがあること
- a.はツールを導入するための主目的であり、b.とc.は導入後速やかに定着し、定着後長期にわたり運用を行うための要件である。

3-1 工程設計工程のツール

この工程は製品の組順検討やFMEA(故障モード影響解析)などを行い、それにより生産ラインの構成と設備を決定する。現状は試作ワークや2D図面を元に検討を行い、その結果をエクセルの帳票や2D図面に保存していた。もし試作ワークが無い状態で3D製品データを活用し、ツール内で組立性評価と業務帳票作成が可能ならば、製品設計の段階から生産準備に取り掛かることができる。このため、詳細要件は製品図面を元に製造フローを作成し、これに基づいて、組立手順、工数算出、工程設計、FMEAを検討が可能なこと。そして、検討結果を一括保存し、作成済の製造フローより作業標準書、QC工程表、FMEAを自動出力できるとし、この機能を満たすソフトウェアを選定した(Fig.2)。

しかし、3D製品データが未整備であったため、今回は導入を見送った。

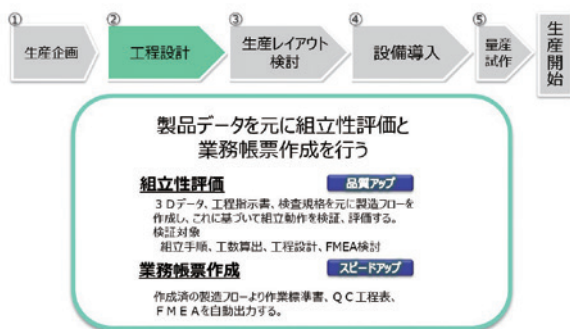


Fig. 2 工程設計ツールの要件

3-2 生産レイアウト検討工程のツール

この工程では、決定した生産ラインの各設備をフロアに配置し、その生産性とラインに配属される作業者の作業動線を検討している。現状は2Dで書かれた工場フロアに各設備を配置し、エリアに収まるかどうかを検討している。人の手作業動線を考慮することや、複数の案を同時に比較検討し最適な案を出すことは行えていない。

この為、仮想3D生産ラインを作成し、作業動線長の計算や作業者の負荷、作業人数の増減による作業バランスの平準化などを複数案同時に行える機能を備えていることを導入要件とした(Fig.3)。

人間系を中心とする工程設計が可能であり、工程、レイアウトを入力するだけで人の動作や機械の同期を半自動生成できるソフトウェア「GP4」を導入した。

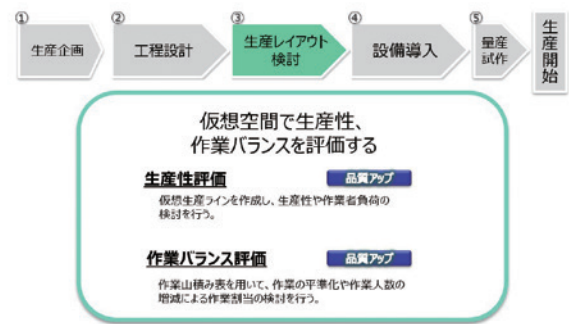


Fig. 3 生産レイアウト検討ツールの要件

3-3 設備導入工程のツール

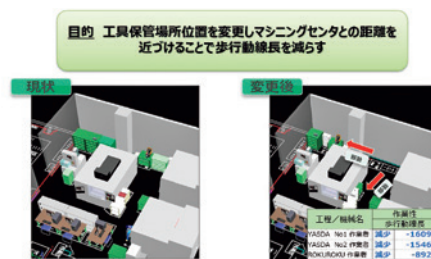
この工程では決定した各設備の要件をもとに設備設計、製造を行う。設備設計、設計後のデザインレビューは2D CADを用いている。デザインレビューでは設計の妥当性や部品同士の干渉の確認、安全性、保守性の検証を行っているが、レビュー者全員に設計の意図が伝わりにくく見落としが発生している。さらにデザインレビュー後の図面出図作業にて部品カウントや3Dアイソメ図の作成など付帯業務に時間が多くとられている。

このため3D作図により動作や形状の検討や、デザインレビューの効率化ができ、付帯業務の自動化を行えることを導入要件とした(Fig.4)。

複雑な機械でも軽快に動作し、視認性がよく、付帯作業の自動作成機能が搭載された3D CADソフトウェア「iCAD」を導入した。



Fig. 4 設備導入ツールの要件



検討の結果 作業者の歩行動線が減少
現状より改善する為、改善案2は実施する

Fig. 7 案2

4 導入事例

ここからは事例を紹介する。

4-1 GP4を使用した生産レイアウト検討

事例1 既存生産ラインレイアウト改善

作業動線に歩行の無駄が生じている既存生産ラインにおいて、3つの改善案を精度よく検討するためにラインを3D化し、それぞれの改善案の実施可否判定を行った(Fig.5)。

既存ラインの変更なしで事前に精度よく検討することができ、高品質な現場改善ができた。



Fig. 5 製作した3D生産ライン

「案1」は、マシニングセンタの向きの変更である。比較結果では事前予想と異なり歩行動線は約7メートル増加したため、実施しないことにした。実際に実施すると約60万円の損失が発生していた(Fig.6)。

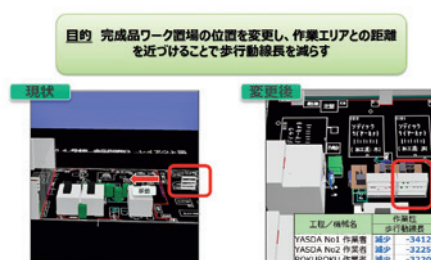


検討の結果 作業者の歩行動線が増加
現状より悪化する為、改善案1は実施しない

Fig. 6 案1

「案2」は、工具保管位置の変更である。位置を変更しマシニングセンタとの距離を近づけることで作業者の歩行動線が減少した。そのため案2は実際に現場改善を実施した(Fig.7)。

「案3」は完成品ワーク棚位置の変更である。検証により歩行動線を減らすことができたため、案3も現場改善を行った(Fig.8)。



検討の結果 作業者の歩行動線が減少
現状より改善する為、改善案3は実施する

Fig. 8 案3

4-2 GP4を使用した生産レイアウト検討

事例2 遠隔工場の生産ライン立ち上げ

遠隔地での工場立ち上げにおいて、現物なしでも具体的なイメージを共有する目的で仮想3D工場を製作し、製品動線、作業者動線、見学者動線を検証し効率的なレイアウト、機器の配置を行った(Fig.9)。

現地出張なしでも複数案の比較検討を分かりやすく行えたため、活発なコミュニケーションが取れ、効率的な進め方ができた。



Fig. 9 製作した仮想3D工場

「製品動線」の検討では搬入エリアでの長物材料の搬入向きの決定に活用した。6メートルもの長さの材料を縦で搬入するか、横向きで搬入するかを3Dで再現し動かすことにより、スペースの占有状況や、動線に無

理がないか把握することができた。検討の結果フォークリフト作業が可能となった縦搬入を採用した(Fig.10)。

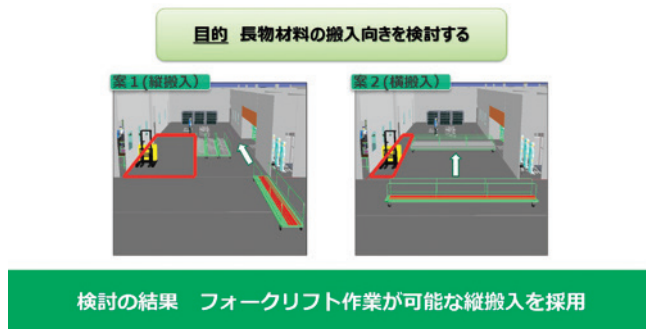


Fig. 10 製品動線の検討

「作業員動線」の検討では更衣室備品の配置向きの決定に活用した。作業員収容数を最大化しつつ、備品倉庫を備えるために、縦と横の3D図を作成し検討した。検討の結果動線がスムーズで備品倉庫が確保可能な横配置を採用した(Fig.11)。

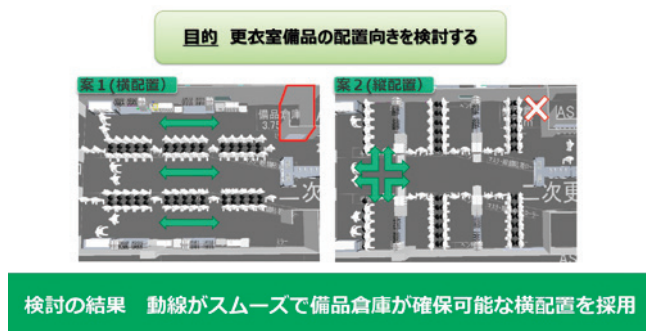


Fig. 11 作業員動線の検討

最後は「見学者動線」の検討である。見学者目線から見やすい窓位置の配置を検討した。ツールに備わる作業員視野機能を活用し、目線を意識した窓配置を採用することができた(Fig.12)。



Fig. 12 見学者動線の検討

4-3 iCADを使用した設備導入事例1 バルブ組立ライン導入

バルブの組立ラインを自動化し、生産従事者を40%削減、生産能力を2倍とした事例である(Fig.13)。

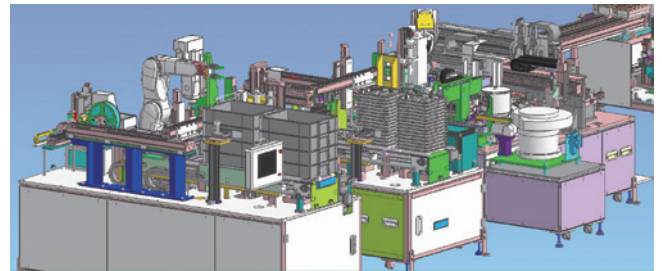


Fig. 13 製作した組立ライン

全体で14工程あるこの生産ラインにおいて、特に難度の高かった2つの工程について紹介する。

「チューブ供給」工程では自動販売機をヒントにしたからくりを設計し、従来から使用されている部品供給用パーツフィーダをやめ、スペース1/3、コスト1/2で実現した(Fig.14)。

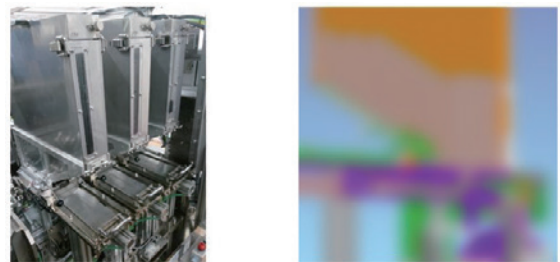


Fig. 14 チューブ供給工程

「清掃」工程では外周の清掃作業を自動化した。機構の構造検討で3Dツールの視認性の良さが活躍した(Fig.15)。

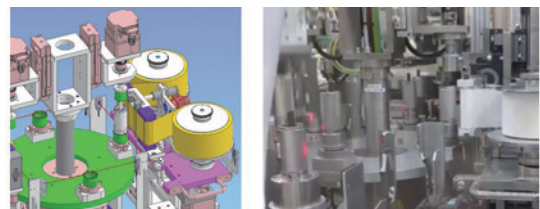


Fig. 15 清掃工程

4-4 iCADを使用した設備導入事例2 小型バルブ自動組立ライン導入

最後は小型バルブ自動組立ライン全設備11台の導入事例である(Fig.16)。

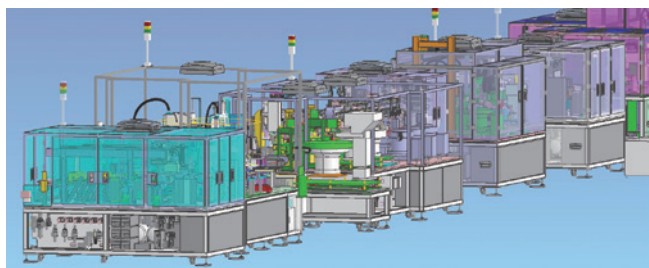


Fig. 16 製作したバルブ組立ライン

製品の需要が急激に増加しており、既存ラインでは生産能力が不足することが分かっていた。そのため短期間で生産能力を増強する必要があった。

この問題に対応するため、設計プロセス全体でデジタルツールを積極的に使用した。

その結果、Fig.17に示すように従来同規模設備では10か月かかった設計期間を3か月へと7か月短縮することに成功した。

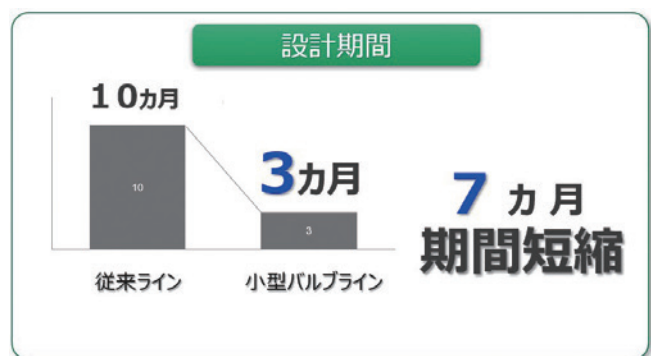


Fig. 17 設計期間比較

2D CADによる設計から3D CADにシフトしたことで、オンラインミーティングツールを使用したことにより、まず高効率のデザインレビューを実施することができた(Fig.18)。



Fig. 18 3Dを活用したデザインレビュー

2D検討では見逃していた不具合を製作前に多く発見でき、後工程での戻作業を削減できた。さらに、オン

ラインミーティングツールを用いた設備メーカーとの積極的な連携で、開発時の仕様、図面、不具合リストなどデータの一元管理と情報の即時共有ができた。

開発中の調整トラブルが発生した際には、別の場所の生産技術担当、製品開発担当、設備メーカーが画面を共有し、設備を映像で確認しながら解決に当たった(Fig.19)。



Fig. 19 現場でのオンラインミーティング

続いては付帯作業時間の短縮である。設備フレーム設計においては、2D CADで4時間かかっていた使用部品のリストアップ作業がたったの5分となり、アイソメ図制作での4時間の作業が、ボタンを1クリックするだけになるなど劇的な効果を得ることができた(Fig.20)。

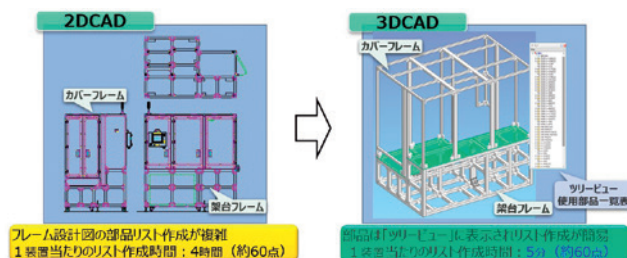


Fig. 20 設備フレーム設計の効果

5 導入後、定着までの施策

デジタルツールは2020年度に導入し3年で定着できるように計画を立てて運用を行った(Fig.21)。

導入初年度は少人数のチームでソフトウェアの機能理解とモデルラインを用いての効果の実証活動を行った。その効果を確認した2年目は、そのソフトウェアの活用場を広げるために、教育活動を開始した。

GP4は社内教育カリキュラム「生産技術講座」にて「すぐに活かせるデジタルツール」という題名で実践形式の操作教育を行った。この講座では受講生が業務に活用しやすいように、初年度に製作した過去のデータなどを講座内で解説し、データを共有している。iCADは外部専任講師により週1回で3か月間の教育を実施。過去の2D図面資産を3D化した。これらの教育を行う

ことで、最後の3年目はソフトを使える設計者を増やし、定着を狙った(Fig.22)。

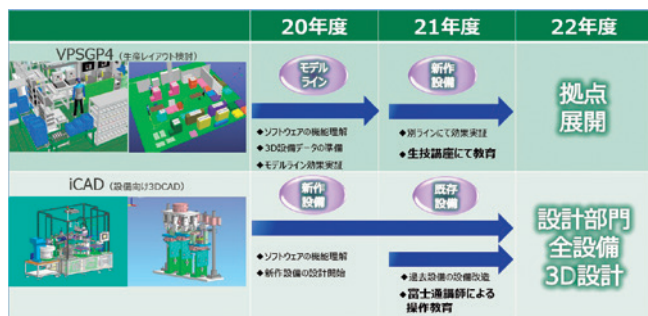


Fig. 21 ツールの導入計画



Fig. 22 ツールの定着施策

6 まとめ

生産レイアウト検討では3Dシミュレーションを実施することにより以下が可能となった。

- ・現物無しで設備/備品/動線の効率的なレイアウト検討と共有が可能
- ・生産現場の作業動線改善で高精度かつ効率的な検証により、複数案の実施可否判断が可能

設備導入では設備開発の3D化とオンラインミーティングによる設計業務の効率化により以下が可能となった。

- ・スペース増加無で省人化、生産能力倍増を達成
- ・戻作業や付帯作業の短縮により従来同規模設備では10か月かかった設計期間を3か月へと7か月短縮

デジタル技術を活用した施策により生産ライン立ち上げの品質向上とスピードアップを果たすことができた。

7 今後の展望

今後はツールの定着施策を引き続き行い、生産ライン立ち上げ事例のデータを共有することでより効率化を目指していく。デジタルによる業務効率化は今後も重要な課題である。今回導入を見送った工程設計での導入検討を含めて取り組みを加速させる。

8 おわりに

デジタル技術による生産ライン立ち上げの効率化に取り組んだ事例を紹介した。ものづくりの基本である現場をおろそかにすることなく、安定した品質を追求し、お客様により良い製品を提供できるように日々努力をしていく。

執筆者プロフィール



谷口 剛一 Koichi Taniguchi
機器事業本部
Components Business Division



PTP包装機における搬送ローラを通過する成形フィルムの非線形有限要素解析

Non-linear FEM analysis about formed film going through transport rollers on the blister packaging machines

鴻谷 英志 Hideshi Kohtani 金子 龍一 Ryuichi Kaneko

PTP包装機では成形フィルムの搬送手段として成形ポケットを搬送ローラのポケット穴に引っ掛けて搬送する方式が用いられている。

成形ポケット部はフィルム原反部に比べて変形し難いという特徴がある。この成形ポケット部の影響によってフィルムがロール外周に上手く馴染まず、搬送不良やポケット潰れなどを生じさせる要因のひとつとなっている。

この馴染み具合は、成形ポケットの形状、搬送ローラの曲率半径、及びフィルムの物理的特性などに代表される複数の要素が影響しているが、この事象を定量的に捉えることが難しい。そこで、非線形有限要素解析を用いて成形フィルムが搬送ローラを通過する際の変形について定量化を試みた。

本稿では、搬送ローラの外周面と成形フィルムの間に生じる隙間を浮遊量と定義し、浮遊量の解析結果からPTP包装機におけるロール搬送適性を評価した事例について紹介する。

Pharmaceutical packaging machines apply transporting method of formed film by hooking formed pockets to pocket cavity of transport roller.

Formed pocket portion is characterized by not easily deformed compared to original film portion. Due to the influence of formed pocket portion, formed film does not fit well around the outer periphery of the roll, which is one of the factors causing transport defect and formed pocket crushing.

This familiarity is influenced by a number of factors represented by shape of formed pocket, curvature radius of transport roller, physical properties of web film, but it is difficult to capture this phenomenon quantitatively. Therefore, we attempted to quantify the deformation of formed film when it passed through transport rollers using nonlinear finite element analysis.

In this article, we define the gap between outer peripheral surface of transport roller and formed film as floating volume, and from the analysis results of floating volume we introduce an example of evaluation of suitability for roll transport on pharmaceutical blister packaging machines.

1 はじめに

当社は、これまでブリスタ包装技術を用いて食品包装機械や医療・医薬品業界向けの包装機械を開発してきた。その中でも、PTP包装機は国内トップシェアを持ち、海外への事業展開も積極的に進めている主力商品群のひとつである(Fig.1)。

これまで、当社のPTP包装機は多くの国内製薬会社に採用され、実績を蓄積しながら技術ノウハウを成熟させてきた。一方で、海外向けの包装仕様では過去に実績の無い自由度の高い包装仕様が流通しており、従来の経験的な知見のみを頼りにした技術検討では判断が難しく、客観的で定量的な評価による判断基準が必要とされている。

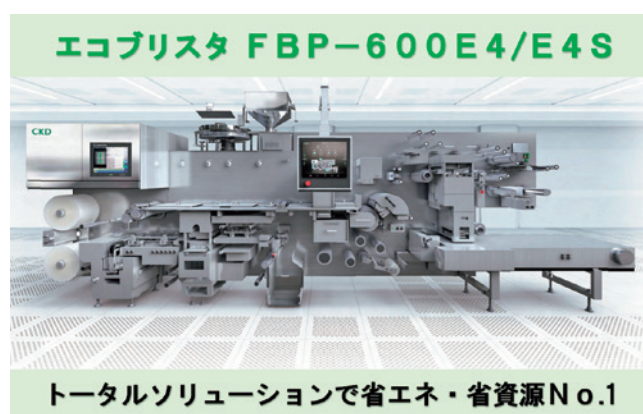


Fig. 1 PTP 包装機

2 PTP 包装について

PTP包装とは、錠剤やカプセル剤などの固形製剤を包装する用途として、広く採用されている包装形態のひとつである。PTPとはPress Through Packの略称で、内容物を指で押し出して取り出すことに由来し

ている(Fig.2)。

PTP包装機では、原反ロールから展開した容器フィルムにポケットを成形し、様々な工程を経て一般的に知られているシート状にトリミングされる。また、各工程間における成形フィルムの搬送手段は用途に合わせて適切な方式を採用している。

成形後は主に包装仕様に対応した専用の搬送ローラを用いる。また、専用ロール部品は成形ポケットの形状及び配置に対応した穴を外周に加工し、この穴に成形ポケットを引っ掛けて搬送している。

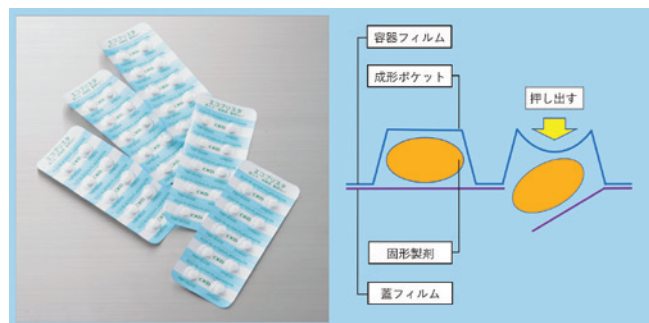


Fig. 2 PTP 包装

3 専用ロール部品の種類

3-1 シール下ロール

シール下ロールにはヒートシール工程における受けローラとしての役割がある。ヒートシール工程では成形フィルムに蓋フィルムを被せて、シールドイロールで熱間圧接することにより貼り合わせている(Fig.3)。

また、シール下ロールは他の専用ロール部品と比較して直径が大きい。

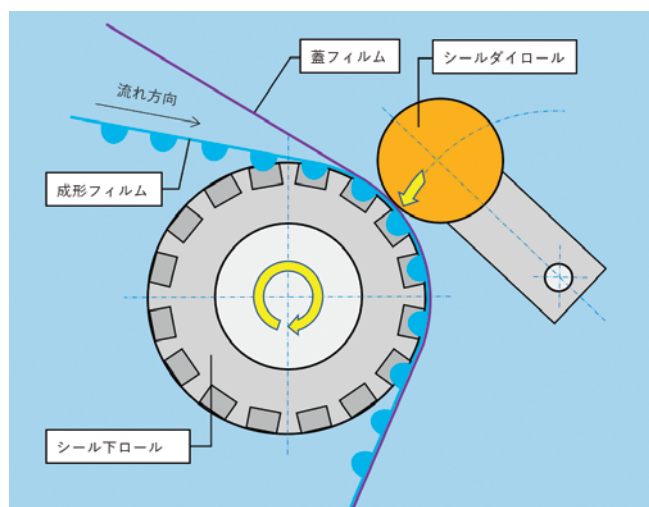


Fig. 3 シール下ロール説明図

3-2 ロッキングドラム

ロッキングドラムにはシール下ロールとの間にフィルム張力を維持させる役割がある。

フィルム張力を維持させる目的としては、機械停止時に充填ゾーンの成形ポケット位置が収縮により変化することを防止し、かつシール下ロールにおける成形ポケットの乗り上げを防止することが挙げられる(Fig.4)。

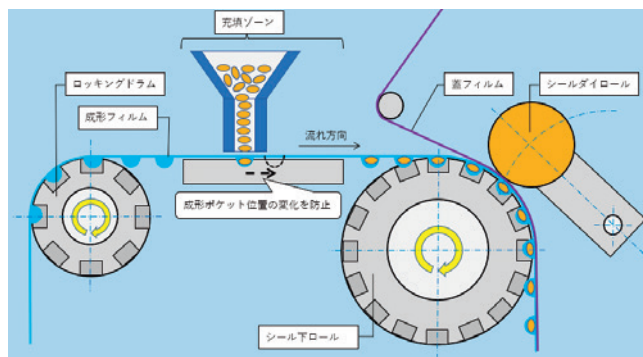


Fig. 4 ロッキングドラム説明図

3-3 ポケット送りロール

ポケット送りロールにはスリッタ、刻印、及び打抜き工程に成形フィルムを安定して搬送する役割がある。また、他の専用ロール部品と異なり、送りと停止を繰り返す間欠搬送により動作する(Fig.5)。

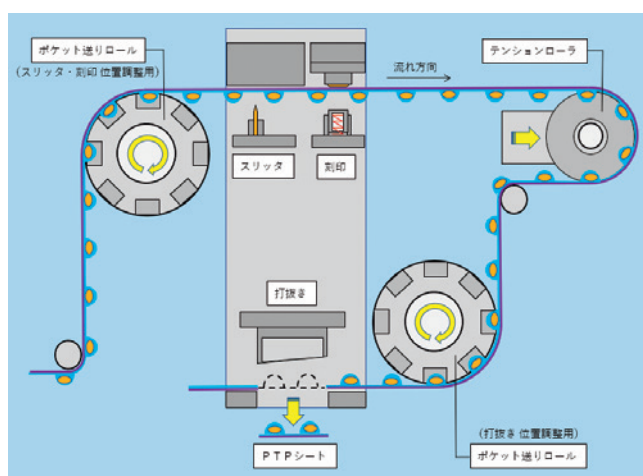


Fig. 5 ポケット送りロール説明図

4 搬送不良の要因分析

搬送不良として代表的な不具合現象を抽出し、これらを1次要因、2次要因に展開して要因分析を実施した。

包装仕様に依存しているものが含まれる2次要因群の中で最も多岐にわたって影響し、設計都合の変更が可能であるものとして“搬送ローラの直径が小さい”という2次要因に着目した(Fig.6)。

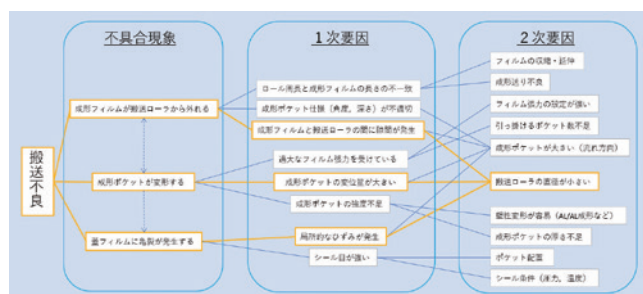


Fig. 6 搬送不良の要因分析

5 非線形有限要素解析

5-1 解析概要

成形フィルムが搬送ローラを通過する現象を模して、非線形有限要素解析によるシミュレーションを実施した。解析対象は錠剤向け包装仕様(Fig.7)とカプセル剤向け包装仕様(Fig.8)の2通りを用いる。また、錠剤向け包装仕様は標準的で搬送不良のリスクが低い事例を想定しており、カプセル剤向け包装仕様はポケットサイズが大きく、搬送不良のリスクが高い事例を想定している。

解析モデルの基本は搬送ローラと成形フィルムから構成される。また、包装仕様が対称となる場合にはミラー面を追加する。

成形フィルムには流れ方向に3枚のシートを配置しており、解析結果を評価する範囲は、1枚目及び3枚目のシートから2枚目に最も近い成形ポケットを含めた2枚目の中央シート領域を対象とする(Fig.9)。

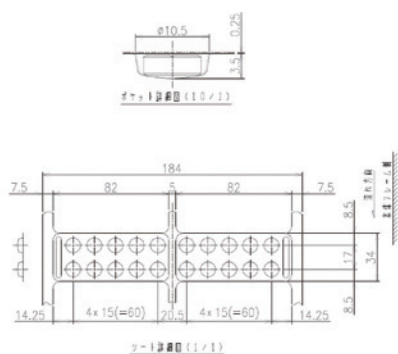


Fig. 7 錠剤向け包装仕様

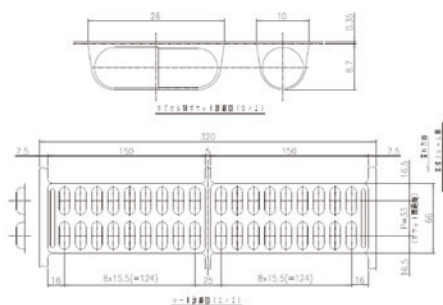


Fig. 8 カプセル剤向け包装仕様

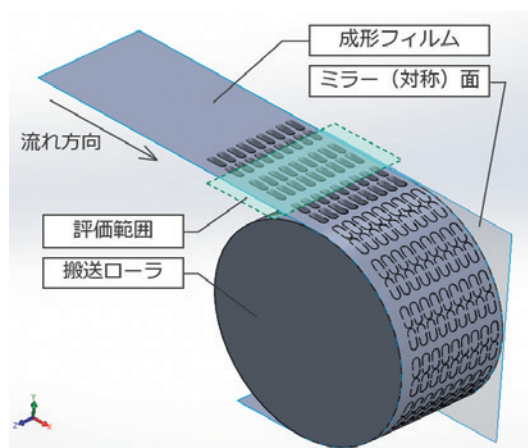


Fig. 9 解析モデル

5-2 ミーゼス応力

ミーゼス応力とは方向性を持つベクトル量である各応力成分を合成して、方向性を持たないスカラー量に換算したものである。対象物に生じた内力を数値の大小でのみ評価することが可能で、ミーゼス応力が降伏応力に到達すると塑性が生じ始めたと判断する。

そこで、ミーゼス応力を出力とするシミュレーションを実施した。また、搬送ローラの直径と最大ミーゼス応力の関係をグラフ化した(Fig.10) (Fig.11)。

グラフの傾向より、ロール直径が大きくなる程、最大ミーゼス応力は低下することが確認できる。

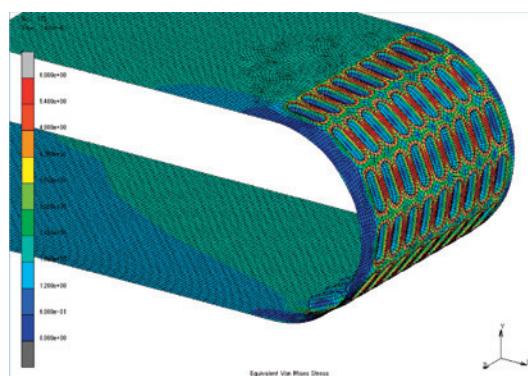


Fig. 10 ミーゼス応力解析の様子

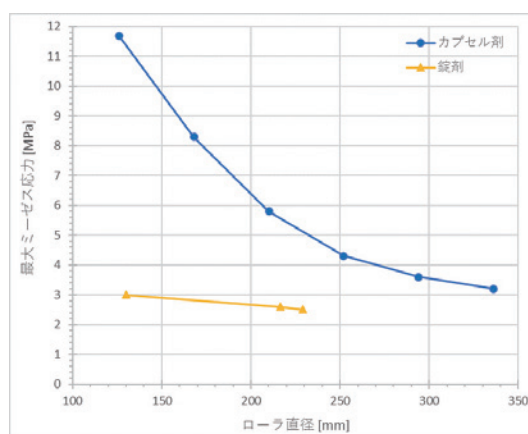


Fig. 11 ローラ直径と最大ミーゼス応力の関係

5-3 浮遊量

本稿では、搬送ローラの外周面と成形フィルムとの間に生じた隙間を浮遊量と呼称する。

浮遊量解析では成形フィルムを展開した流れ方向位置と浮遊量の関係をグラフ化する。

浮遊量の解析結果は解析モデルのZ軸方向を合算しているため、上下に大きく振れたデータになる。そのままの状態では、他の条件と比較することが難しいためn点移動最大処理、及びn点移動最小処理を行い、比較しやすく変換したデータを用いる(Fig.12)。

n点数は解析精度により異なり、解析結果の特徴を残す適切な値を用いる必要がある。

グラフにおいて、最大浮遊量の推移を移動最大、最小浮遊量の推移を移動最小と定義する。移動最大グラフは最大値を比較評価することに適しており、移動最小グラフは通常では限りなく0に近い値で一定となる。

移動最小グラフにおける最大値が0ではない状態とは、ローラ外周と成形フィルムに完全な浮きが発生していることを意味し、この最大値を全浮遊量と呼称する。

この全浮遊量と移動最大グラフにおける成形ポケット間の非成形部に生じる最大浮遊量、及び成形ポケット部に生じる最大浮遊量を対象に、ローラ直径との関係をグラフ化した(Fig.13)。

解析結果より、カプセル剤向けの包装仕様を錠剤向けと同等にすることは困難であり、成形ポケット仕様は浮遊量の結果に大きく依存していることが確認できる。

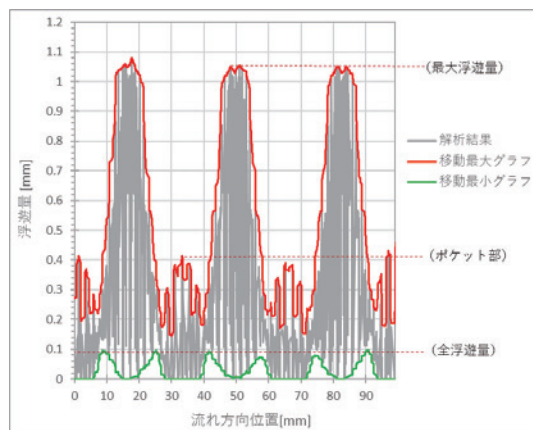


Fig. 12 浮遊量グラフ解説図

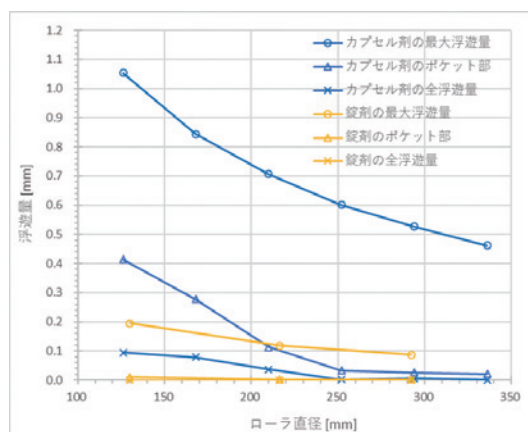


Fig. 13 ローラ直径と浮遊量の関係

5-4 搬送ローラ大径化のデメリット

非線形有限要素解析の結果から、大きな成形ポケットに対する搬送不良のリスクを低減させるために、搬送ローラ大径化の有効性は明白である。一方で、搬送ローラ大径化によるデメリットも存在する。

- 1) 慣性モーメントの増大=エネルギー浪費大
- 2) コンパクトな機械にならない
- 3) 重量の増大=人にやさしくない
- 4) 温度的安定稼働に時間を必要とする

上記の理由により、単純にローラ直径を大きくしても実用的な方策とは言えない。そこで、搬送ローラ大径化を回避する手段として、当社の特許技術のひとつである多角形ロールを紹介する。

6 多角形ロール

6-1 多角形ロール(特許第5159835号)

「成形ポケット部が曲がり難いならば、ポケット受け部のみを曲げることなく平面にすれば解決する」という着眼点から発明されたのが多角形ロール技術である。

この技術により、搬送ローラ大径化を回避しながら、成形ポケットを変形から保護することに十分な効果を発揮した(Fig.14)。

しかし、多角形ロールにおける特有の課題として、PTPシートに良好なカールを癖付けることが難しいことが挙げられる。搬送ローラのポケット受け部を平面にしたことにより正Xカール方向の変形が抑制されて、逆Yカールなどの望ましくないカール状態が発生する傾向があった(Fig.15)。

そこで、多角形ロールを更に改良した特殊多角形ロールを開発した。

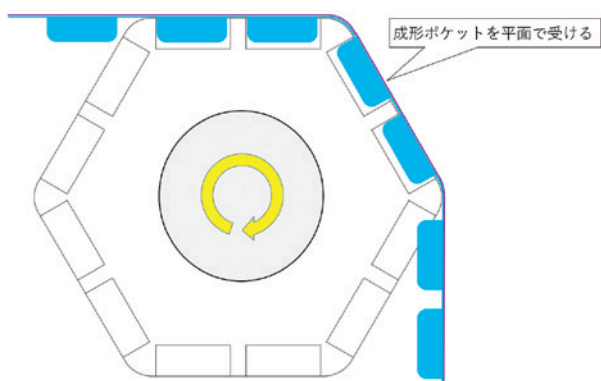


Fig. 14 多角形ロール

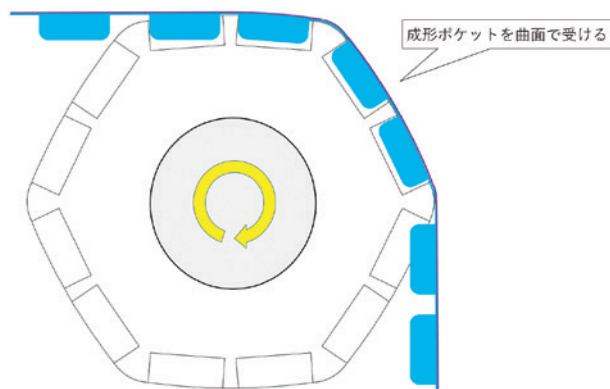


Fig. 16 特殊多角形ロール

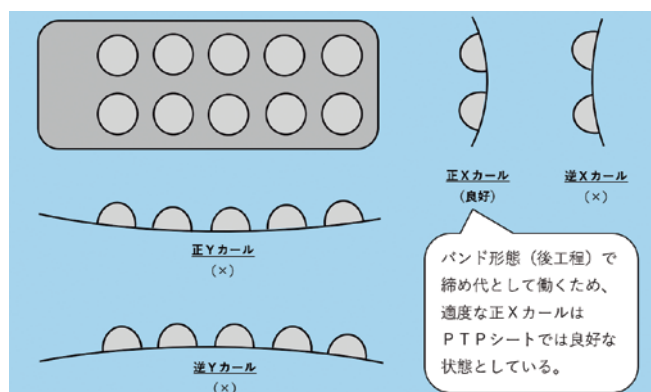


Fig. 15 カールの種類

6-2 特殊多角形ロール(特許第7122292号)

本稿では、従来の多角形ロールと区別するため、成形ポケット受け部を平面から任意の曲率面に改良したものを特殊多角形ロールと呼称する。

特殊多角形ロールは成形ポケット受け部に大きなローラ直径と同等の曲率半径を再現することにより、搬送ローラへの馴染み具合を改善し、PTPシートに適度な正Xカールの癖付けを可能とする技術である (Fig.16)。

また、円筒形状と多角形ロールの中間的な形状を再現したことによって、両者のメリットを実現した新技術とも言える。

7 おわりに

本稿で紹介した解析手法は、搬送トラブルのリスク低減策を担うデジタルツールとして活用することを想定している。また、解析結果は浮遊量解析、応力解析の他にも、ひずみ解析、接触解析などの多様な項目に対応することが可能であり、今後も様々な課題に対する応用が期待できる。

課題解決を図る上で、三現主義(現場、現物、現実)を基礎としながらシミュレーション技術を活用することにより、様々な物理的事象を定量的に評価することが可能であると考えている。シミュレーション技術の進歩は技術者として目下の現象を認識する上で、観察や計測だけでは認識できない新たな視点を与えてくれるものとなった。

今後も技術の発展と共に、時代の変化を追い風に成長を続け、技術開発を通して様々な課題に果敢に取り組む所存である。

出願特許

1) PTPシート製造装置

特許第5159835号(特開2012-20774)

2) PTPシート製造装置

特許第7122292号(特開2021-20682)

執筆者プロフィール



鴻谷 英志 Hideshi Kohtani
自動機械事業本部
Automatic Machinery Business Division



金子 龍一 Ryuichi Kaneko
自動機械事業本部
Automatic Machinery Business Division



基板の異物検査技術

Technology for Foreign Material Inspection

菊池 和義 Kazuyoshi Kikuchi

表面実装工程において、基板に付着した異物は、印刷不良や部品搭載不良を起こす原因となり、製品不良に直結する恐れがあり問題になっている。

特に、部品搭載前に付着した異物は、部品搭載不良やBGA^{*1}等のパッケージ裏に隠れた異物によって引き起こされるショート等の問題があるため、部品搭載の前工程である、はんだ印刷後に異物を検出することが求められている。

当社では、これらの問題に対して、はんだ印刷検査機による異物検査機能を提供している。はんだ検査時に異物検査が可能で、基板かすやほこり等の白色異物の検出ができる。今回、新たに髪の毛等の黒色異物も検出を可能とした。

本稿では、はんだ印刷検査機(VP9000)による異物検査技術について紹介する。

In the surface mounting process, adhesion of foreign matter to PCB surface is a problem because it can cause printing failures and component mounting failures, which may directly lead to product failures.

Foreign matter adhering to PCB surface before component mounting, in particular, is a problem because it can cause component mounting failures and short circuits caused by foreign matter hidden behind electronic packages such as BGA, so there is a need to detect foreign matter after solder printing, which is a process before component mounting.

In response to these problems, we provide foreign matter inspection function on our solder paste inspection machine. Foreign matter inspection is possible during solder paste inspection. Foreign matter in white color such as substrate scum, dust etc. can be detected. Now it is also possible to detect foreign matter in black color such as hair.

This article introduces foreign matter inspection technology on our solder paste inspection machine (VP9000).

1 はじめに

表面実装工程において、部品搭載前に基板へ付着した異物は部品搭載不良やBGAなどのパッケージ裏に隠れた異物によって引き起こされるショートなどの問題があり、製品不良に直結する恐れがある。

これらの問題に対して、はんだ印刷検査機の異物検査機能で異物を検出することにより、未然に部品搭載不良やショートなどの問題を防止できる。本稿では、当社の異物検査技術を紹介する。

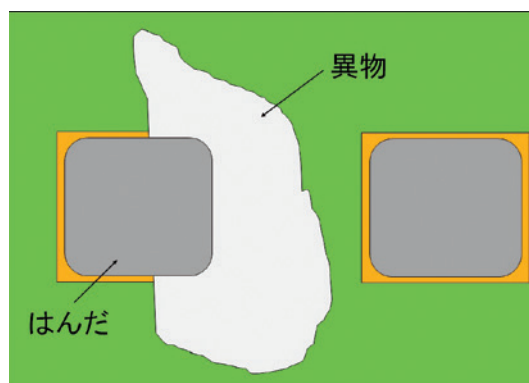


Fig. 1 異物付着(部品搭載前)

2 異物の問題点

2-1 部品搭載不良

部品搭載前に付着した異物により(Fig.1)、部品が傾いて搭載されたり(Fig.2)、リフロー^{*2}後に部品の浮きなどの問題が発生する(Fig.3)。

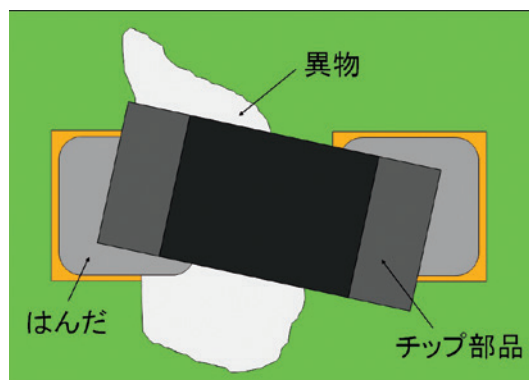


Fig. 2 部品の傾き(部品搭載後)

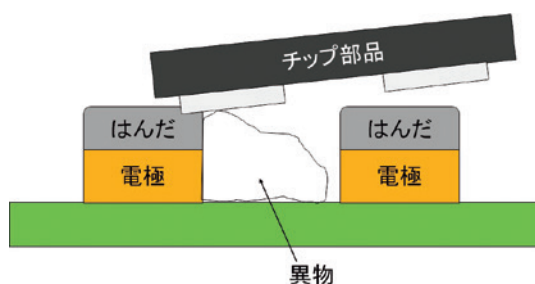


Fig. 3 部品の浮き（リフロー後）

2-2 ショート

部品搭載前にBGAなどの部品内に付着した異物 (Fig.4)は、リフロー後にショートなどを引き起こす。部品実装後では異物が部品のパッケージ裏に隠れるため、実装後検査装置では異物を検出することができない (Fig.5)。X線検査装置で異物を検出することは可能だが導入コストが高い。

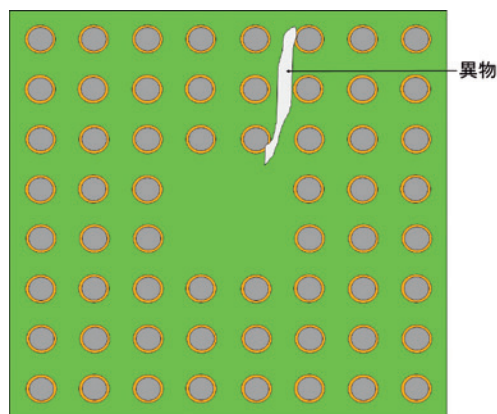


Fig. 4 BGA（部品搭載前）

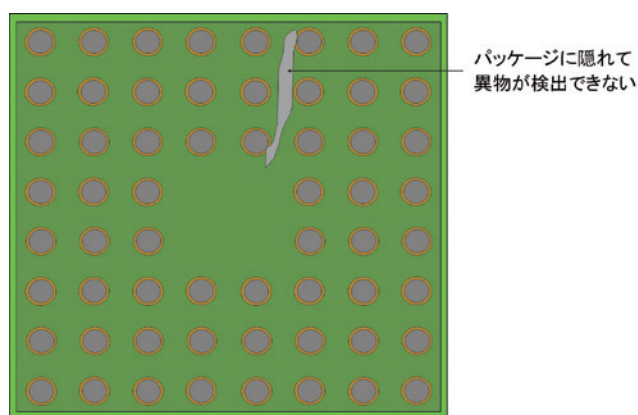


Fig. 5 BGA（部品搭載後）

3 解決方法

3-1 異物検出

部品搭載後における異物の問題は、部品搭載前工程のはんだ印刷検査機で異物を検出し、基板取出しコンベアで異物を除去することで解決できる。

3-2 検出方法

当社はんだ印刷検査機 (VP9000) による異物を検出する方式は、3D方式とマスタ比較方式がある。

3D方式は、3次元計測により異物の高さ、XYサイズを求め (Fig.6)、事前に設定した検出サイズに該当する異物を検出する。ただし、基板かすなどの白色異物に限定される (Fig.7)。

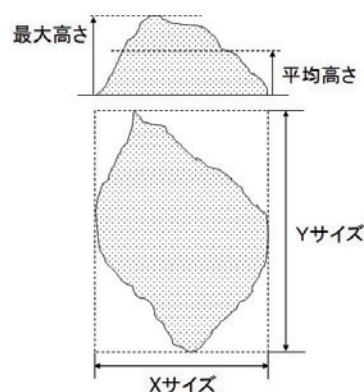


Fig. 6 異物の高さ、XYサイズ

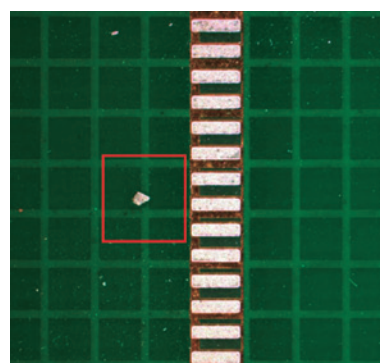


Fig. 7 基板かす検出

新たに開発したマスタ比較方式は、事前に未印刷のマスタ基板の画像を取得し、検査時にマスタ基板と対象基板との差分 (Fig.8) を取る事で、設定した検出サイズの異物を検出することができる。3D方式では検出できなかった髪の毛などの黒色異物も検出可能になる (Fig.9)。

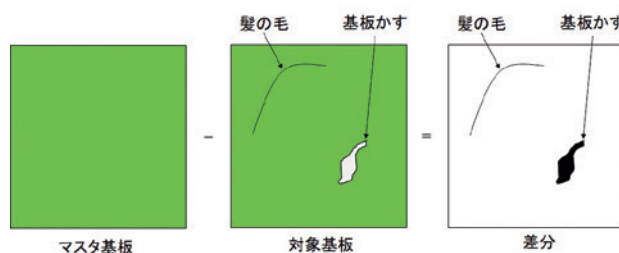


Fig. 8 差分による検出

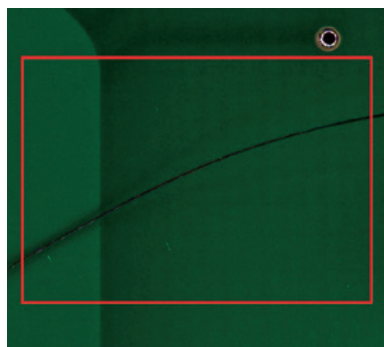


Fig. 9 髪の毛検出

4 異物検査機能

はんだ印刷検査機の異物検査機能について紹介する。
最初に異物の検出サイズの上限值、下限値を設定する
(Fig.10)。



Fig. 10 検出サイズ設定画面

その後、マスタ比較方式の場合は、未印刷のマスタ
基板を搬入し、マスタ基板画像を取得する(Fig.11)。

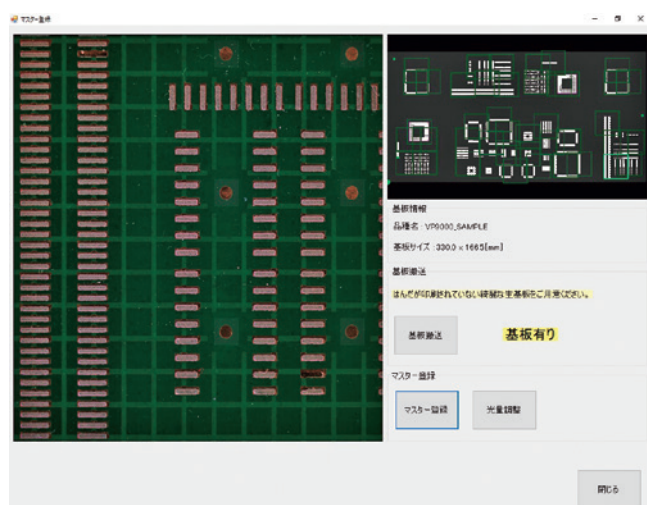


Fig. 11 マスタ基板の画像保存画面

検査を開始すると、はんだ検査と同時に異物検査を
行う。検出された異物は画面で確認することができる
(Fig.12)。

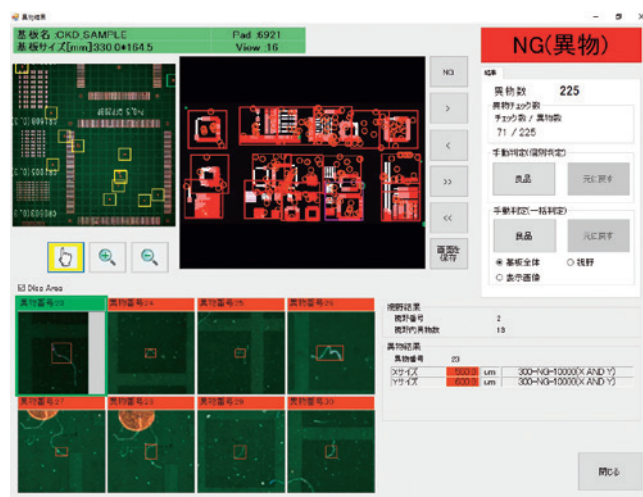


Fig. 12 異物確認画面

異物の検出履歴は、統計機能ソフトを用いて確認す
ることができる。指定した日時、品種で検索すること
で異物の結果、画像が参照でき(Fig.13)、HTML形式
によるレポート出力も可能である(Fig.14)。

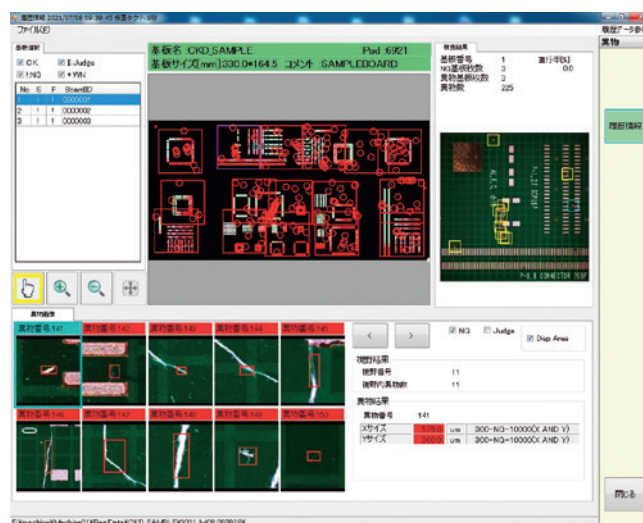


Fig. 13 履歴参照画面

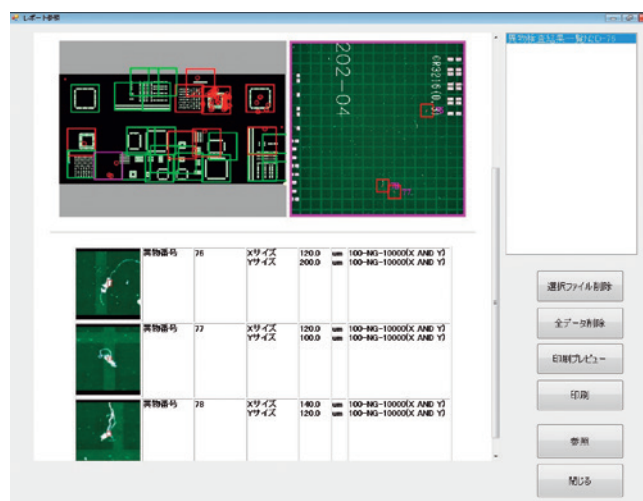


Fig. 14 レポート出力画面

5 おわりに

本稿では、部品搭載前に基板へ付着した異物による問題点を述べ、はんだ印刷検査機による異物検査での解決方法を紹介した。今後は、異物検査の機能拡張、使い勝手の向上を目指す。

- ※1 Ball Grid Arrayの略称。表面実装における半導体パッケージの一種でマイクロプロセッサのような高性能な半導体に使われる。
- ※2 基板上にペースト状のはんだを印刷し、その上に部品を載せてから炉で加熱して接合すること。

執筆者プロフィール



菊池 和義 Kazuyoshi Kikuchi
自動機械事業本部
Automatic Machinery Business Division



はんだ印刷検査機「VP-01G」※海外限定モデル

Solder Paste Inspection Machine “VP-01G”

濱崎 公輔 Kosuke Hamazaki 高村 健介 Kensuke Takamura

近年、中国・ASEAN市場において、はんだ印刷検査機に対するリードタイム短縮とコストダウン要求は増々厳しくなっている。加えて機能面でも、グローバル市場での多様な要求に応えられる機能の追加・改善が求められている。

こうした背景を受け、当社では中国・ASEAN市場向けの機種について、基本性能を維持したまま中国工場での生産に特化すべく、設計から見直しを行った。また機能面でも、後工程機との通信仕様の拡張や工程の予兆管理など、海外の実運用目線でのニーズを盛り込んだ機能を追加した。

本稿では、こうして開発したはんだ印刷検査機VPシリーズの海外限定新機種「VP-01G」について述べる。

In recent years, in Chinese and ASEAN markets, the demand for shorter lead time and lower costs for solder paste inspection machines has become more and more stringent.

In addition, in terms of functionality, there is a demand for addition and improvement of functions which can meet diverse demands of the global market.

In response to this background, we have reviewed the current model for Chinese and ASEAN markets from the design stage, in order to make it more suit for production at the Chinese factory, keeping its basic performance.

In terms of functionality, we have added functions that meet the needs from the viewpoints of actual operations overseas, such as expansion of communication specifications with post-process machines, predictive management of processes etc.

This article describes the new model of the solder paste inspection machine VP series "VP-01G" developed in this way.

1 はじめに

当社では電子基板の表面実装におけるクリームはんだ印刷の重要性にいち早く着目し、3次元計測法によるはんだ印刷検査機VPシリーズを世界中にリリースしてきた。

その中で中国・ASEAN市場は低価格、短納期の厳しい要求があり、拡販を進めるためには検査精度、検査速度などの基本性能を維持しつつ、価格競争力の向上、リードタイムの短縮、海外ニーズに合わせた機能追加が必要である。

こうした背景に応えるべく、中国・ASEAN市場の要求に合わせた新機種VP-01Gを開発し、海外限定での販売を開始した(Fig.1)。



Fig. 1 VP-01G

2 装置仕様の見直し

受注後の装置改造によるリードタイムを短縮するため、VP-01G ではお客様の幅広いニーズに対応可能な仕様とした。主な変更点は以下の通りである。

2-1 検査分解能

従来オプションにて対応していた検査分解能10μmを標準選択仕様とし、近年の実装部品の微細化による高分解能要望に標準的に対応可能とした。

2-2 検査可能基板

従来機種(Lサイズ基板対応機)では検査可能な最大基板サイズは510x460mm、搬送可能な基板重量は3kgであったが、本機種では510x510mm、5kgとし、様々な品種の基板を1機種で検査可能にした。本仕様を達成するための取り組みは後述する。

また、中国・ASEAN市場で優先度の低い仕様(検査奥基準)やオプション(基板取出コンベア)を本機種では採用を見送り、設計の簡素化に繋げた。

3 設計の見直し

中国で安定した生産を行うことと、基本性能の維持を

目標に設計の見直しを行った。その際、装置のつくりやすさや中国での部品の調達性に主眼を置いて取り組んだ。

3-1 本体フレーム

本機種の本機フレームは製缶構造になっている。従来は鋳物フレームを採用したこともあったが、大型で薄肉、複雑な形状であったため製作難易度が高かった。そのため生産の安定化及び装置の軽量化を目的に、現在は製缶構造としている。

本機種では中国でさらに安定的に生産するため、構造の簡素化、中国で入手性のよい材料への変更を行った。

構造の簡素化は構造解析(固有値解析、静解析)を行い、剛性を保ちながら柱やリブの削除、溶接量の削減を進めた。溶接量削減のため、剛性が不要な箇所は開口形状とし板金カバーを取り付ける構造とした(Fig.2)。

結果、従来機と比較し本体フレームの溶接量を約17%削減、重量を約7%削減しつつ、剛性は約40%向上した。

フレーム構成材料は、協力企業と情報共有しながら、協力企業が入手しやすい材料を採用した。

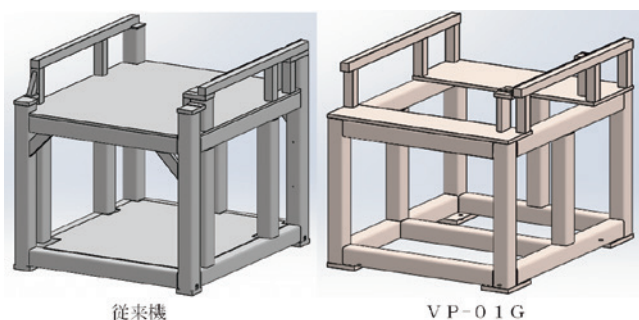


Fig. 2 本体フレームモデル

3-2 最大基板サイズ対応

①検査ヘッドユニットの軽量化

2-2に記載した最大基板サイズに対応するためには、検査ヘッドの可動範囲を拡大する必要がある。その上で検査速度を維持するためには、検査ヘッドの移動速度を維持することが必要である。本機種では検査ヘッドの移動速度を維持するため、モータの容量アップと駆動ねじのリード拡大に併せて、検査ヘッドユニットの軽量化を行った。

VPシリーズの検査ヘッドは、カメラ、レンズ、3次元計測照明、2次元計測照明、基板反り検出照明、ピント補正機構、ベースユニットで構成されている。このうち、重量はベースユニットの占める割合が大きい。そこで本機種ではベースユニットの軽量化に取り組んだ。

ベースユニットのメイン部品は、形状の自由度の高さから従来はアルミ鋳物を採用している。本機種においても従来と同様に形状の自由度の高さを活用するためアルミ鋳物を採用した。

軽量化において、メイン部品を鋳物のみの構成から

鋳物と板金部品の構成に変更し、構造解析を用いて必要強度を保ちつつ、形状の変更を行った(Fig.3)。

これにより、ベースユニットの重量を約25%削減し、従来機と同等の移動速度を達成した。

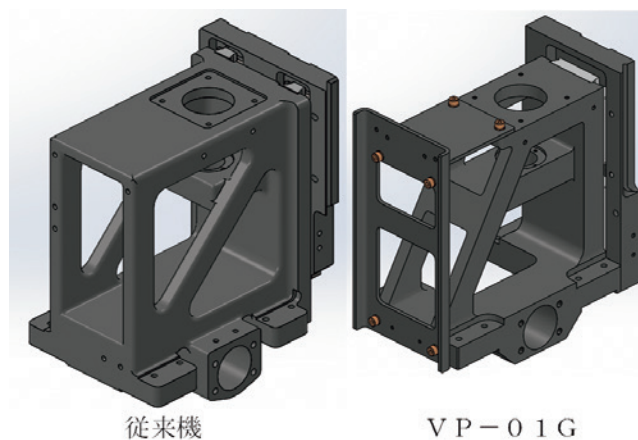


Fig. 3 ベースユニット

②重量基板搬送モードの追加

搬送可能な基板重量を5kgまで対応可能とするために、基板重量に応じて搬送速度を調整する「重量基板搬送モード」を追加した。これにより、コストアップを伴わず重量基板の搬送を実現した。

3-3 中国製部品の選定

本機種では従来実施していなかった重要な構成部品についても、中国生産品を採用している。選定にあたり、品質面の評価は全て日本で実施し、調達性・コストの確認は日本と中国で連携を密にとることで、QCD全てに妥協のない部品を採用した。

4 VP-01Gの新機能

VP-01Gではグローバルなニーズに合わせて様々な機能を追加している。本節では、こうして追加した機能の中から3つの機能について説明する。

4-1 Xbar管理機能

はんだ印刷検査機には、対象の良品・不良品の判断のみならず、生産ラインの目として生産性向上に寄与する役割がある。本機種では、工程監視による生産性向上を目的として「Xbar管理機能」を追加した。

Xbarとは一般的に平均値を表し、Xbar管理機能では、体積・面積等の各検査項目のワーク毎の平均値を監視する。生産中に平均値のばらつきが一定以上に大きくなった場合、装置を一時停止し、オペレータに対して印刷機の調整を促す機能である。本機能を活用することで、印刷不良を未然に防止し、歩留まりの向上、廃棄部材の削減に寄与できる(Fig.4)。

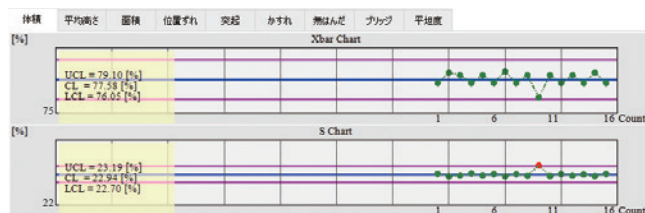


Fig. 4 Xbar 管理図

Xbar管理においては、ばらつきを判断する管理境界のルールが重要である。管理境界の考え方は何を重要視するかによって様々であるが、本機能ではシューハート管理図に定められた8つのルール全てに対応し、ユーザの目的に合わせて管理境界を設定できる(Fig.5)。



Fig. 5 シューハート管理図8つのルール

4-2 基準オフセット機能

本機種では、はんだ印刷量の管理を柔軟に行うことを目的として「基準オフセット機能」を追加した。VPシリーズでははんだの高さ検査において、基板上のどこを基準面とするかをいくつかのモードから選択できる。例として、周辺基準検査と電極基準検査について紹介する。

周辺基準検査は、パッド周辺の平均の高さを高さ基準面とするモードで、ユーザは設定の手間が少なくかつ安定した検査が可能である(Fig.6)。一方で、パッド周辺のレイアウトに若干の影響を受けるため、高さ基準面を明確に管理したい場合には不向きである。

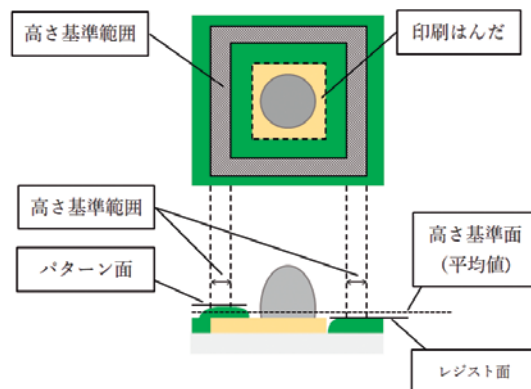


Fig. 6 周辺基準検査

電極基準検査は、事前に未印刷基板をティーチングすることで電極面を基準とするモードであり、周辺のレイアウトに依らず電極面が基準となる(Fig.7)。

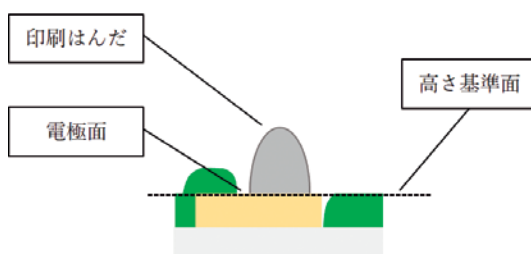


Fig. 7 電極基準検査

周辺のレイアウトに依存しないため、基準面を明確に管理したい場合にはこちらを推奨している。これ以外にもいくつかのモードから選択可能であり、ユーザーははんだ印刷量の管理基準に合わせて高さ基準面を選択できる。

本機種ではさらに「基準オフセット機能」を追加した。本機能は、高さ基準面に任意のオフセット量を加算する機能である。例えば、前述の電極基準検査と併用し、レジストの厚み分のオフセットをかけることで、周辺にパターンが少ないパッドであってもパターン上面を基準にできるなど、高さ基準面を任意に調整できるメリットがある(Fig.8)。

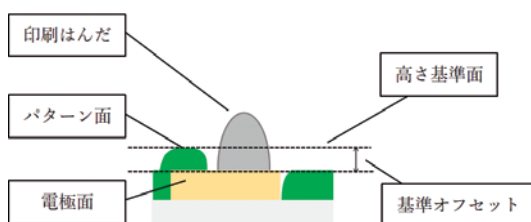


Fig. 8 基準オフセット

このように、高さ基準面をユーザーが任意に調整することで、はんだ印刷量を柔軟に管理できる。

4-3 後工程信号切替え機能

グローバルに対応していくためには、海外製の前後工程設備との連携が不可欠である。本機種では、様々なメーカー製の後工程設備との垂直立ち上げを目的として「後工程信号切替え機能」を追加した。

基板実装ラインの工程間の通信仕様はSMEMA規格により定められているが、解釈の違いやメーカー間の考え方の差により、ワークの受け渡しがスムーズにいかないケースがある。中でも、ワークの有無を表すBA信号と、不良ワークを表すNG信号の出力タイミングに差が出やすい。そこで、本機種ではこれまでの実績を体系的に整理し、後工程機への信号出力仕様を任意に切替えられる機能を追加した。例として切替え可能なパターンを2種類紹介する。

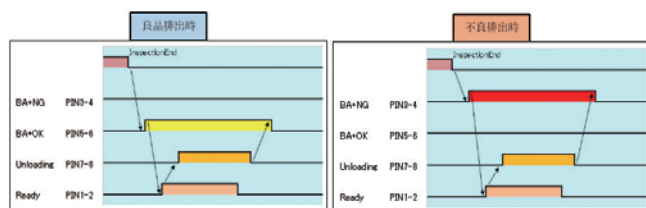


Fig. 9 後工程信号出力 (パターンA)

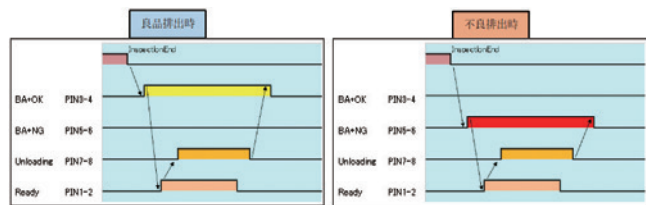


Fig. 10. 後工程信号出力 (パターンB)

パターンAでは、良品基板の場合はBA信号と良品信号を同時に出力し、不良基板の場合はBA信号のみ出力する(Fig.9)。パターンBでは、良品基板の場合に良品BA信号のみ出力し、不良基板の場合は不良BA信号のみ出力する(Fig.10)。パターンAとパターンBを比較すると、パターンAの不良排出時とパターンBの良品排出時の出力信号が同一であることがわかる。このように、後工程設備の仕様によって良否の判断が異なるなどのトラブルに繋がりがやすい。このような多様なメーカーが混在する生産ラインであっても垂直立ち上げに対応できるよう、柔軟性のある機能追加が必要である。

5 おわりに

本開発では、販売エリアに合わせた仕様の見直しと生産場所に合わせた設計を行うことの重要性を再認識した。また、グローバルに拡販していくためには、多様なメーカー、多様なニーズを意識した柔軟に対応できる機能追加を継続していく必要がある。

当社は今後もこうした活動を通じ、はんだ印刷検査機の拡販と実装業界の発展に貢献していく。

執筆者プロフィール



濱崎 公輔 Kosuke Hamazaki
自動機械事業本部
Automatic Machinery Business Division



高村 健介 Kensuke Takamura
自動機械事業本部
Automatic Machinery Business Division



自己復帰機能付きラッチバルブの開発

Development of a Latch Valve with Self-Returning Function

伊藤 新治 Shinji Itoh

空気圧を制御する空圧バルブにはラッチタイプのバルブがある。ラッチタイプはソレノイド内に設けられた永久磁石を利用し、通電なしで可動鉄心の位置を保持できる磁気回路機構を有した自己保持型のバルブである。そのためコイルからの発熱量がなく、消費電力がほぼ必要ないという大きな省エネ効果がある。しかし可動鉄心を永久磁石で保持するため、振動・衝撃などの外力により可動鉄心が位置を保持できず、誤動作してしまうデメリットも存在する。今回の開発ではラッチバルブの大きな課題である外力による誤動作を、コイルの特性である逆起電力の発生を利用し、検出する技術を開発した。そして大きな外力が発生した際には、外力によるコイルの逆起電力変化を検出し、可動鉄心の誤動作前に保持電圧を印加できる制御回路を開発した。本稿では事例を交えて、どのような環境においてもラッチバルブが誤動作しない検出、制御回路について紹介する。

One type of pneumatic valve that controls air pressure is the latch valve. The latch valve is a self-holding type valve having a magnetic circuit mechanism capable of holding the position of the movable iron core without being energized by using a permanent magnet provided in the solenoid. Consequently, no heat is generated from the coil, and there is a significant energy-saving effect in that virtually no power consumption is required. However, there is a downside in holding the movable iron core in place with a permanent magnet: The movable iron core cannot hold its position when external forces such as vibration and shock are applied, and the valve may malfunction. To address this major issue concerning latch valves, we have developed a technology that utilizes the generation of back electromotive force, which is a characteristic of coils, to detect malfunctions caused by external forces. Furthermore, we have developed a control circuit that, in the event of large external forces, can detect changes in the back electromotive force of the coil due to external forces and apply a holding voltage before the movable iron core malfunctions. In this paper, we will introduce the detection and control circuit that prevents the latch valve from malfunctioning in any environment using examples.

1 ラッチバルブの構造と問題点

ラッチバルブは構造中に永久磁石を用い、弁の切換え位置を保持するバルブである。Fig.1に示す通り、ラッチバルブの構造では、大きく弁部、コイル部に分けられる。弁部は流路を構成し、内部に弁を有する。弁は弁棒、弁シート、弁座で構成され、可動鉄心に作用する可動鉄心バネ力と弁バネ力により切換え動作を行い、ポート流路をシールする。コイル部は通電信号により、可動鉄心を固定鉄心に吸着・離脱させる。可動鉄心を吸着・離脱させることで弁棒に作用するバネ力を切換え、弁の切換えを行う。コイル内には永久磁石が設置されており、通電して可動鉄心を吸着させた後に、通電を遮断しても磁石の吸引力で弁位置が保持できる。そのため、弁を切換えた後に可動鉄心を保持する電力を必要とせず、大きな省電力を実現できる特長がある。しかしラッチタイプは通電による起磁力を与えず最低限の保持力しか与えていないため、外力によっては可動鉄心が固定鉄心より離脱し、誤動作してしまうという大きな課題がある。

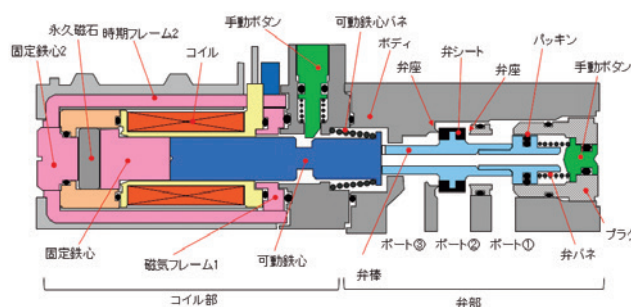
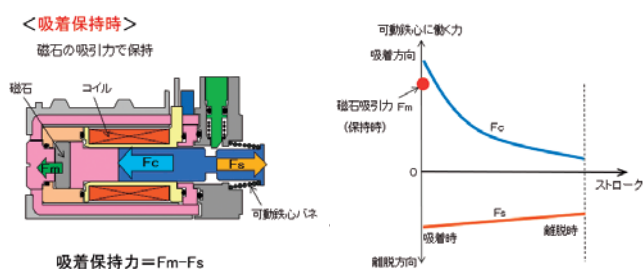


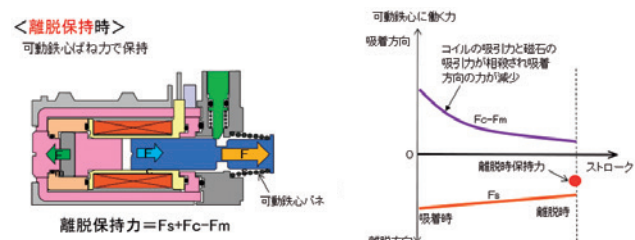
Fig. 1 ラッチバルブ断面図

2 自己保持の原理

ラッチバルブは切換え位置により永久磁石と可動鉄心バネ力で弁の位置を保持する。可動鉄心が固定鉄心に吸着する場合は永久磁石で保持し、固定鉄心より離脱保持する場合は可動鉄心バネ力で可動鉄心の位置を保持する。Fig.2、Fig.3に示すように通電時はコイルの吸引力 F_c と磁石の吸引力 F_m が作用し、可動鉄心を固定鉄心に吸着させる。その後通電をOFFすると永久磁石の吸引力 F_m のみが作用し、可動鉄心バネ F_s の吸着時荷重の差分で保持力が発生する。



またFig.4、Fig.5に示すように離脱保持時は、コイルへの逆電圧を印加させることで、コイルから発生する吸引力 F_c を離脱方向に作用させる。その結果、永久磁石の吸引力 F_m と F_c が相殺されるため、可動鉄心バネが可動鉄心に作用し、固定鉄心から離脱する。そして可動鉄心はバネ力で離脱位置を保持する。



3 ラッチバルブの誤動作検出のメカニズム

ラッチバルブの誤動作は、可動鉄心に作用する保持力を越えた外力(衝撃・振動)が加わった時に発生する。例えば固定鉄心に永久磁石の吸引力で保持されている可動鉄心の誤動作について説明する。外力により可動鉄心が固定鉄心より離脱する場合、Fig.6に示すようにストローク X までは磁石の吸引力が可動鉄心バネ力より大きい、 X を超えた時、バネ力が吸引力より大きくなり、可動鉄心が固定鉄心より離脱し、誤動作が発生してしまう。

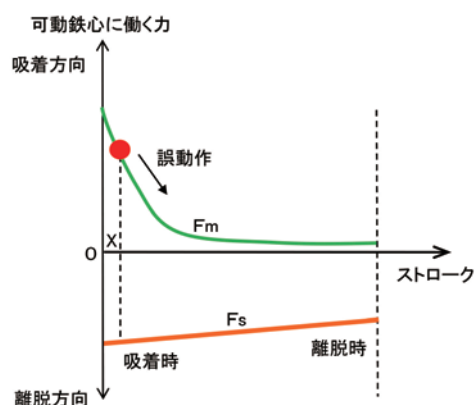


Fig. 6 カとプランジャストローク (誤動作発生時)

離脱保持時も同様にバネ力に対して永久磁石の吸引力が大きくなるストロークまで外力が作用すると誤動作が発生する。そしてこの時、可動鉄心が保持位置からわずかに移動することでコイルには逆起電力が発生している。Fig.7に示すようにコイルの逆起電力は可動鉄心の動作方向によって磁束の流れが変わるため、吸着保持時、離脱保持時で電圧の方向が異なる。また移動量が大きいほど逆起電力の電位も大きくなる。

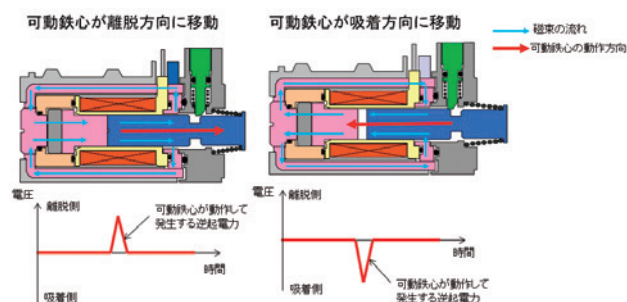


Fig. 7 コイルに発生する逆起電力

誤動作の検出は、この可動鉄心の位置の変化をコイルに発生する逆起電力で捉え、誤動作する前に保持電圧を印加し、可動鉄心の位置を保持できるようにする。

4 問題の把握

市販製品のラッチバルブで振動、衝撃に対する誤動作と逆起電力の関係を把握する。

4-1 振動に対する誤動作と逆起電力

振動に対する誤動作と逆起電力の関係を試験にて確認する。Table1とFig.8に示す振動をサンプルに加え、可動鉄心が誤動作し、弁漏れや切替え不良が発生する逆起電力を把握した。

Table 1 振動条件

項目	設定値
全振幅	0.5mm
周波数	55~290Hz
(加速度)	(30~825m/s ²)
周囲温度	室温
給気圧力	0.1MPa

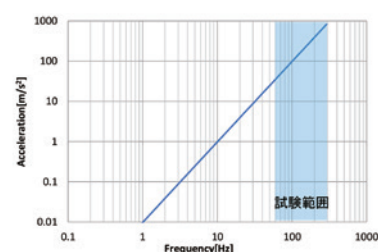


Fig. 8 vibration conditions

Fig.9に弁漏れと振動加速度の特性を示す。この結果が示すようにある振動加速度 X m/s²で弁が漏れ始め、誤動作が発生した。またFig.10に振動加速度とコイルに発生している逆起電力を示す。

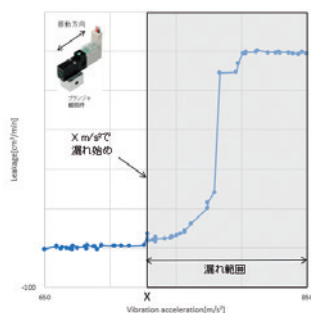


Fig. 9

Leakage-Vibration acceleration
(X direction, Plunger release)

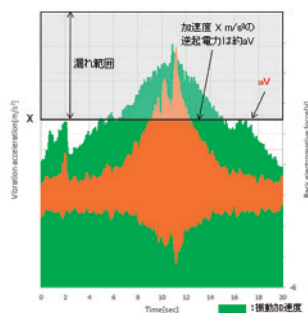


Fig. 10

Vibration acceleration and
Back electromotive force
(X direction, Plunger release)

これによれば、振動加速度と逆起電力には相関関係が確認できる。また弁漏れが発生する振動加速度 $X \text{ m/s}^2$ 時に発生する逆起電力はおよそ $a\text{V}$ であることがわかる。

4-2 衝撃に対する誤動作と逆起電力

衝撃に対する誤動作と逆起電力の関係を試験にて確認する。Table 2 に示す衝撃をサンプルに加え、可動鉄心が誤動作し、弁漏れや切替え不良が発生する逆起電力を把握した。

Table 2 衝撃条件

項目	設定値
衝撃加速度	$1000 \sim 4500 \text{ m/s}^2$
給気圧力	0.1 MPa
周囲温度	R.T

Fig. 11 と Fig. 12 に弁漏れ、誤動作と衝撃加速度の測定結果について示す。可動鉄心の離脱保持時は衝撃加速度と弁漏れには相関関係がみられる。吸着保持時は強い相関は見られないが、逆起電力 $a\text{V}$ 以上では、誤動作が発生しないことが確認できる。

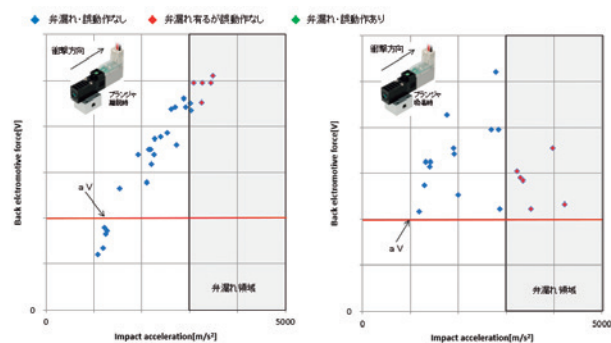


Fig. 11

Impact acceleration-back
electromotive force characteristic
(X direction, Plunger release)

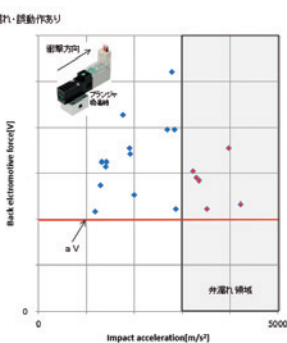


Fig. 12

Impact acceleration-back
electromotive force characteristic
(X direction, Plunger suction)

振動、衝撃試験の結果よりコイルの逆起電力 $a\text{V}$ 以下であれば、誤動作が発生しないことからしきい値電圧は $a\text{V}$ に設定し、検出回路を構成することとした。

5 制御回路の構成

外力によりコイルに発生する逆起電力を検出し、MPU から保持電圧を 1 秒印加する制御回路を Fig. 13 に示す。制御回路は大きく制御部、駆動部、検出部の 3 つの機能で構成される。

制御部は、PLC からの入力信号を受信し、ラッチバルブのコイルに印加する電圧の方向を切換え、可動鉄心の吸着・保持を制御する。また検出部からの信号を受け、コイルへの保持電圧の制御も行う。駆動部はラッチバルブのコイルに電圧を印加する回路で、Hブリッジ回路で構成される。制御部からの信号電圧でスイッチング素子であるフォトカプラ U1、U4 または U2、U3 に通電し、コイルへの印加電圧の方向を制御し、可動鉄心の吸着・保持を制御する。

検出部は R8 と R9 の分圧回路でしきい値電圧を設定する。しきい値電圧は IC (コンパレータ) の一入力端子に接続される。また外力でコイルに発生する逆起電力は、整流素子 DB1 で整流化し、IC (コンパレータ) の + 入力端子に接続する。そして IC は、+ 入力端子の電圧を比較し、+ 入力端子が - 入力端子の電圧を超えた時、IC より Vout2 に電圧が出力される。つまり逆起電力がしきい値電圧を超えたとき IC から Vout2 に電圧が出力されることとなる。Vout2 に出力された電圧は制御回路部の FET のゲートに印加され、MPU の入力端子の電位が下がる。そして MPU は電位が下がったことでしきい値電圧以上の逆起電力が発生したと判断し、出力端子から U1、U4 または U2、U3 に電圧を印加し、可動鉄心が誤動作する前に保持電圧を印加する。

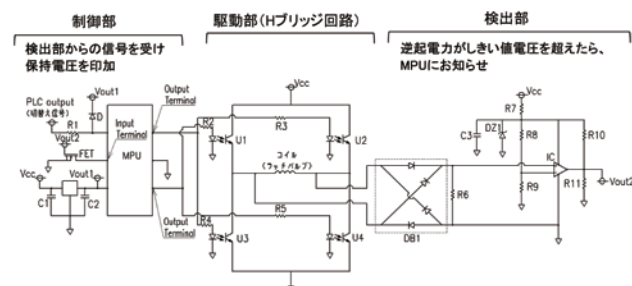


Fig. 13 制御回路図

6 効果確認試験

今回検討した制御回路の試作品 Fig. 14 を製作し、振動・衝撃試験を実施して効果を確認する。



Fig. 14 誤動作検出機能付きラッチバルブ

6-1 振動試験での効果確認

4-1で実施した振動条件で、効果を確認したのがFig.15である。コイルの電圧を観察すると逆起電力がしきい値電圧を超えると保持電圧が印加されることがわかる。これにより振動が一定以上加わった時、保持電圧がコイルに印加され、可動鉄心の位置を保持していることが確認できる。

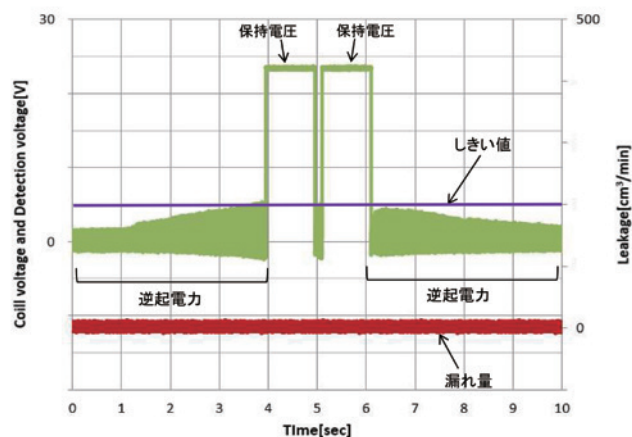


Fig. 15 Vibration test result (X direction,plunger release)

6-2 衝撃試験での効果確認

4-2で実施した衝撃条件で、制御回路の効果を確認したのがFig.16である。衝撃がコイルに作用した際に、発生する逆起電力を捉え、保持電圧がコイルに印加されている。衝撃荷重が加わった瞬間は、可動鉄心が保持位置から動き出し、大きな逆起電力が発生してしまうが、検出のサンプリング周期を適切に設定することで、出力ポートの圧力変動が生じないレベルで復帰電圧を印加できている。これは出力ポートに設けた圧力センサでも効果を確認ができた。これにより瞬間的に発生する衝撃加速度による逆起電力についても適切に検出でき、誤動作を防止できることが確認できた。

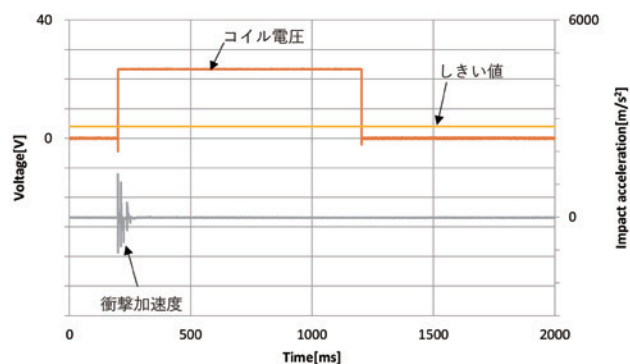


Fig. 16 Impact test result (X direction,plunger release)

7 おわりに

今回の開発では、特別なセンサを設けずとも可動鉄心の位置変化をコイルに発生する逆起電力で捉えることができた。これにより制御回路に搭載する電子部品を大幅に削減することができ、小形コイルにも適用できる見通しが確認できた。そして可動鉄心が外力により誤動作する前に、的確に保持電圧を印加することで誤動作を防止することができた。これによりラッチバルブの課題であった外力による誤動作を解決することができた。

今後も当社のコア技術であるコイル技術を活用し、バルブの小形化、省エネ化を追求し、カーボンニュートラルに貢献していきたい。

参考文献、資料

特許6854267

特許7025369

執筆者プロフィール



伊藤 新治 Shinji Itoh

機器事業本部

Components Business Division



ソレノイドの高効率磁気回路設計

High-Efficiency Magnetic Circuit Design for Solenoids

吉野 航平 Kohei Yoshino

加藤 敦史 Atsushi Katoh

近年、地球環境の保護を意識したSDGs、カーボンニュートラルへの取り組みが世界的に加速している。当社においても重要課題と位置付けて取り組んでおり、その一環として消費電力を当社比で最大60%削減した新しい汎用ソレノイドバルブを開発した。

本稿では、その新しい汎用ソレノイドバルブに搭載した高効率磁気回路について紹介する。

In recent years, efforts toward protecting the global environment, such as achieving the SDGs and carbon neutrality, have accelerated worldwide. CKD also considers it to be an important issue. As part of our efforts to address this issue, we have developed a new general-purpose solenoid valve that consumes up to 60% less power than our conventional solenoid valves.

This paper presents the high-efficiency magnetic circuit installed in the new general-purpose solenoid valve.

1 はじめに

ソレノイドとは電磁力を利用して電気エネルギーを機械的な直線運動に変換する機能部品を指す。ソレノイドはその応用範囲が広く、自動車、家電、産業機械等に利用されているが、その要素として組み込まれることが多いので、その時々で用途に適した形になっている。

当社でも長年にわたりこのソレノイドを用いたソレノイドバルブ(電磁弁)を生産しているが、今回省エネルギー、省資源に対応する新しいソレノイドバルブを開発した。このバルブに搭載している高効率磁気回路について紹介する。

近年のソレノイドバルブは、コイルの焼損等安全面からコイルの直流化が主流となっている。そのため、交流電源用のコイルは全て全波整流回路を搭載しており、高効率磁気回路は直流回路をベースに設計している。

2 ソレノイドの磁気吸引力

ソレノイドの磁気吸引力は、可動鉄心を動かすための力となる要素である。可動鉄心の駆動に必要な磁気吸引力を低い電流で発生させることができれば、消費電力の低いソレノイドバルブの設計が可能となる。

吸引力は、コイルに電流を流して発生させる起磁力を磁気抵抗で割った磁束が基となる。起磁力はコイル設計で決まる定数のため、磁気抵抗を小さくする磁気回路設計が効率の高い回路となる。

ソレノイドの磁束は(1)式によって表される。

$$\Phi = F / R \quad (1)$$

(Φ :磁束[Wb]、 F :起磁力[AT]、 R :磁気抵抗[1/H])

実際の磁気回路計算において、磁気抵抗 R はあまり

用いられず、磁気抵抗 R の逆数であるパーミアンス P を用いる。すなわち(1)式は

$$\Phi = F \times P \quad (2)$$

(P :パーミアンス[H])で表される。

このパーミアンス P は(3)式で表される。

$$P = \mu \cdot S / \ell \quad (3)$$

(μ :透磁率[H/m]、 S :磁路断面積[m²]、 ℓ :磁路長[m])

磁路長が短く、磁路断面積と透磁率が大きいほどパーミアンス P は大きくなる。

パーミアンス P が大きくなると磁気抵抗が小さくなり磁束が大きくなるため、本開発では省電力化を狙いパーミアンス P を大きくする設計を目指した。

磁気回路全体のパーミアンス P は、空隙パーミアンス P_g と漏れ磁束によるパーミアンス P_f の和、すなわち(4)式で表される。

$$P = P_g + P_f \quad (4)$$

さらに空隙の影響度を把握したい場合、ソレノイドのセクションを直列に分けて個別の P_{g1} 、 P_{g2} 、 $P_{g3} \dots$ を求め、それを総和として(5)式で表すことができる。

$$P = P_g + P_f = P_{g1} + P_{g2} + P_{g3} \dots + P_f \quad (5)$$

3 磁性による物質の分類

ソレノイドのコイルに電流を流して起磁力を発生させた時、コイルの周りに配置をした固定鉄心の材質によって磁気的な状態は大きく変わる。一般的なソレノイドは、この固定鉄心の材質に強磁性体である鉄系材料を採用している。例えばこの固定鉄心をアルミニウ

ムにすると、コイルに流す電流を増加させても吸引力は上がらない。これはアルミニウムが常磁性体であるためである。一般的に、物質はその磁気的特性によって常磁性体、強磁性体、反磁性体に分類される。

常磁性体: 磁界を加えた時、同じ方向にわずかに磁化する物質。空気、アルミニウム等。

強磁性体: 磁界を加えた時、同じ方向に強く磁化する物質。強磁性体は強く磁化されるため、磁石に吸着する。鉄、ニッケル、コバルト等。

反磁性体: 磁界を加えた時、反対方向にわずかに磁化する物質。水、銅等。

常磁性体と反磁性体は強磁性体と比べるとほとんど磁化しないため、これらを非磁性体ともいう。この物質の分類は、比透磁率の大きさによって分類される。

4 透磁率と比透磁率について

パーミアンスPを求めるには、(3)式より、透磁率 μ を算出する必要がある。

1A/mの磁界の強さのもとで真空中に1m²当たり $4\pi \times 10^{-7}$ [Wb]の磁束が通ると定め、それを真空中の透磁率と呼ぶ。

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [\text{H/m}]$$

比透磁率とは物質の透磁率を真空の透磁率で割ったものであり、(6)式で表される。

$$\mu_r = \mu / \mu_0 \quad (6)$$

(μ_r : 物質の比透磁率、 μ : 物質の透磁率、 μ_0 : 真空中の透磁率 $4\pi \times 10^{-7}$ [H/m])

常磁性体、強磁性体、反磁性体の比透磁率をTable 1に示す。

Table 1 磁性体の分類ごとの比透磁率

	物質	比透磁率
常磁性体	空気	1.000000
	木材	1.000000
	アルミニウム	1.000022
強磁性体	鉄系材料	150~5000
反磁性体	銅	0.9999
	水	0.9999

比透磁率が1に近い物質は非磁性体に分類される。

ソレノイドの構成の中にある銅、アルミニウム等は比透磁率がほぼ1に近いため、空隙とみなすことができる。

空隙の透磁率は、近似値として真空中の透磁率と同等とみなして計算する。

Table1の強磁性体鉄系材料の比透磁率に数値の幅があるのは、素材の持つ磁気特性と与えられる磁界の強さによって変化するためである。

コイルに流す電流I[A]と磁界の強さH[A/m]は比例関係にあるため、コイルに流す電流Iを大きくすると磁界の強さHが大きくなる。この磁界Hによって磁性体は磁気を帯びる。この時単位面積当たりの磁界の流れを磁束密度B[T]といい、磁力の強さを表す。

この磁界の強さHと磁束密度Bは比例関係にあり、透磁率 μ を用いると(7)式で表すことができる。

$$B = \mu H \quad (7)$$

つまり電流Iが大きくなる(磁界の強さHが大きくなる)と磁束密度Bも大きくなる。

ただし透磁率 μ は必ずしも一定の値ではなく、磁界の強さHによって変化する。

透磁率 μ は、Fig.1に示す初磁化曲線を測定して求めることができる。

磁性体が磁化されておらず、加えられている磁界Hもない状態では、磁束密度は0なので原点0の位置にある。この状態において磁性体に磁界Hを印加すると磁性体が磁化するため、磁束密度Bが増加する。その磁気特性を表すのに、横軸に磁界の強さH、縦軸に磁束密度Bをとってグラフ化したものを初磁化曲線という。

この曲線と(7)式より透磁率 μ を求めることができる。初磁化曲線とその時の透磁率を示す μ 曲線をFig.1に示す。

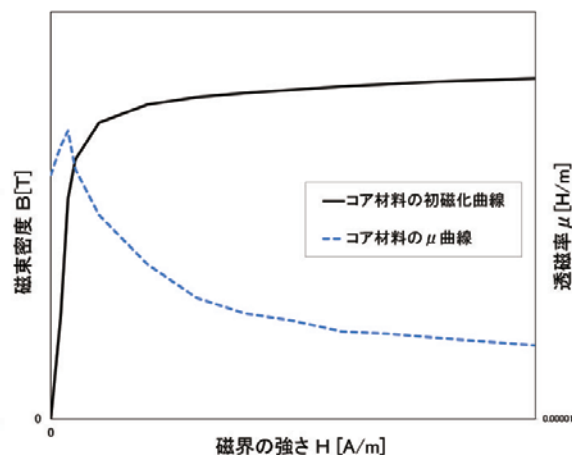


Fig. 1 初磁化曲線と μ 曲線

(3)式より、透磁率 μ が高い方がパーミアンスPは大きくなり、その結果ソレノイドの効率は高まる。電流を多く流し磁界の強さHが大きくなると磁束密度は増加するが、やがて飽和しそれ以上磁束密度Bが増加しない状態となる。この状態を磁気飽和と呼び、磁気飽和に近づくにつれて透磁率 μ は低下するため、パーミアンスPが小さくなる。

ソレノイドはこの透磁率の高いポイントを使う設計が高効率につながる。

高効率磁気回路を設計するにあたり、実際に使用する

る材料を使ってB-Hカーブを測定し透磁率を算出している。

5 高効率磁気回路について

5-1 ソレノイド断面構造

今回開発した高効率磁気回路に関わる構成部品の断面図をFig.2に示す。

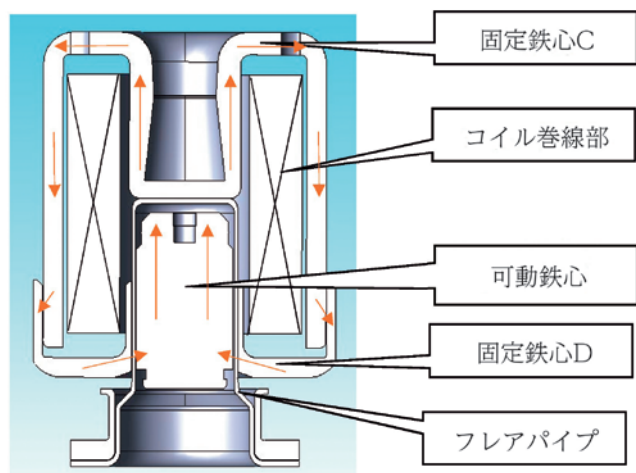


Fig. 2 ソレノイド部断面図

銅線を巻いたコイルに通電をすると、磁力が発生する。この磁力は通常周囲に放散してしまうが、巻き線部の周りに固定鉄心と呼ばれる強磁性体部品を配置すると、その固定鉄心に磁力が集まり可動鉄心と呼ばれる可動鉄心を吸着させる力を生み出すことができる。

Fig.2の赤矢印は磁力の流れを示す。

5-2 高効率磁気回路の特徴

新しく開発した高効率磁気回路は、次の2つの設計ポイントがある。

■フレアパイプの磁性体化

フレアパイプの材質にフェライト系ステンレス（強磁性体）を採用して空隙を縮小させ、パーミッツを大きくした。従来機種のパイプ部にはオーステナイト系ステンレス（常磁性体）を使用しており空隙と同じ状態であったが、効率化のためにこの部分の材質を強磁性体に変更している（Fig. 3）。

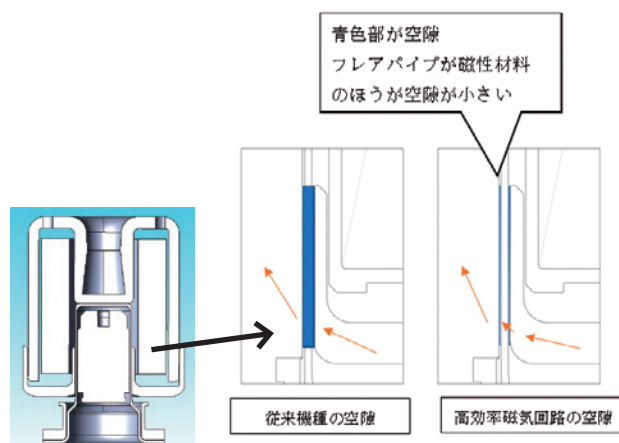


Fig. 3 磁性材料使用時の空隙

ただしフレアパイプに強磁性体材料を使用すると不利な点もある。それはフレアパイプ自身に磁気が流れてしまい、可動鉄心への磁気が減少する損失が生じる。この磁気損失を抑えるためにフレアパイプを絞り成型で薄肉化した設計としている。薄肉化することでフレアパイプに流れる磁気を少ない量で飽和させ、可動鉄心により多くの磁気が流れる構造とした。Fig.4にCAE解析の結果を示す。フレアパイプ上部で磁気飽和していることが分かる。

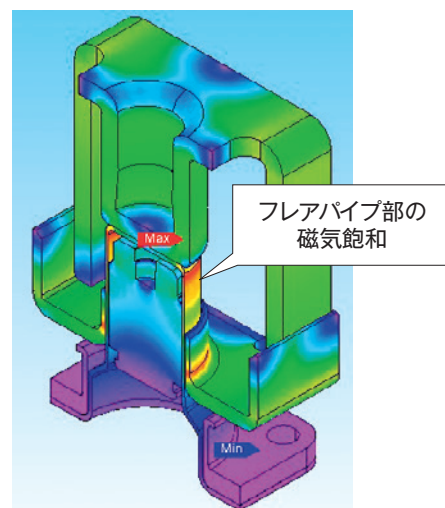


Fig. 4 高効率磁気回路CAE解析結果

■固定鉄心C凸部の一体成型化

固定鉄心Cの成型に特殊プレス成型を採用して部品の一体化を図り空隙箇所を削減した。通常固定鉄心Cの凸部をプレス加工で行うとバーリング形状（Fig.5）になってしまい、凸形状に成型することが困難である。通常はこの凸部分を別部品で製作して磁気回路を構成するが、特殊プレス成型に取り組み一体化に成功した。凸断面をFig.6に示す。

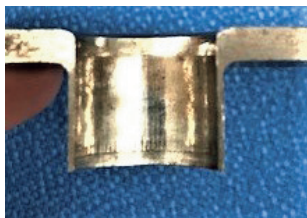


Fig. 5 通常断面（バーリング形状）

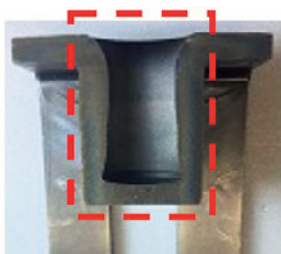


Fig. 6 特殊プレス成型断面

この特殊プレス成型の重要なポイントは凸部分内部に十分な肉厚を確保していることである。この部分が薄肉になると磁気が絞られてしまい、磁気回路の効率が下がる。特殊プレス工程で製作した固定鉄心CはFig.4のCAE解析結果に示すように、磁気を十分に流すことができる肉厚を確保した凸部が形成されている。

5-3 高効率磁気回路の磁気抵抗

高効率磁気回路と従来の可動鉄心ストローク部とそれ以外のパーミアンスを算出した結果から磁気抵抗を求め、それを比較した結果をTable2に示す。可動鉄心ストローク部の磁気抵抗(空隙)が実際の仕事をする部分となるため、この部分以外の磁気抵抗が小さいほど効率の高いソレノイドと言える。

Table 2 高効率磁気回路と従来機種種の磁気抵抗

	磁気抵抗 [1/H×10 ⁻³]			ストローク部以外の 磁気抵抗削減率
	ブランジャ ストローク部	ストローク部 以外	合計	
高効率 磁気回路	7,230	730	7,960	48%
従来 (形状同じ)	7,230	1,410	8,640	

高効率磁気回路は、フレアパイプの磁性体化、固定鉄心C凸部の一体成型化により、ストローク部以外の磁気抵抗を48%削減している。

実際の従来機種は起磁力やコイル形状、固定鉄心材質が異なるため、全てのセクションの磁気抵抗が高効率磁気回路とは異なる。設計ポイントの効果を表すため、起磁力、形状、材質を高効率磁気回路と同じ条件で比較計算している。

Table2に示した磁気抵抗を各セクションに分割し

てパレート図として示す。Fig.7は高効率磁気回路、Fig.8は従来のパレート図である。

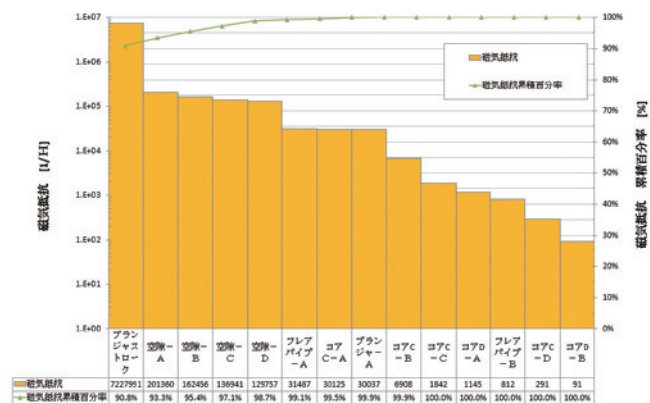


Fig. 7 高効率磁気回路－磁気抵抗パレート図

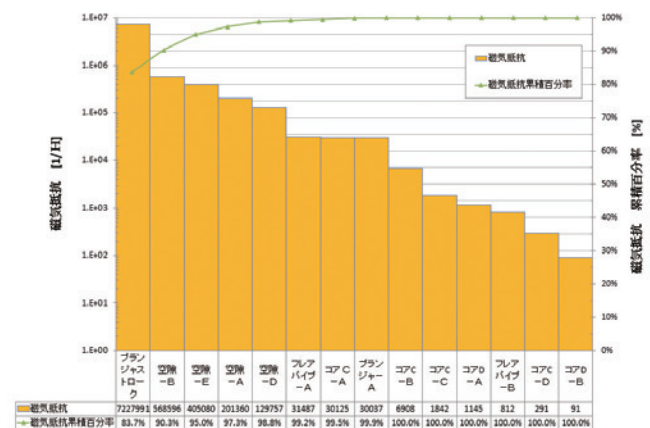


Fig. 8 従来磁気回路－磁気抵抗パレート図

高効率磁気回路では、起磁力の約91%を可動鉄心部の空隙で使っているが、従来では約84%に留まる。高効率磁気回路は仕事をしない部分の磁気抵抗を抑えることでソレノイドの効率化を実現している。

6 おわりに

本稿で紹介した高効率磁気回路は、当社の汎用ソレノイドバルブ「マルチフィットバルブ」シリーズに採用している。汎用ソレノイドバルブの用途は幅広く、今後も産業の様々な分野で利用されていくであろう。当社は電磁弁メーカーとして磁気回路技術をさらに極め、省電力化を追求して環境負荷低減商品の提案を継続し持続可能な社会に貢献していく。

参考文献、資料
特開2018-162867

執筆者プロフィール



吉野 航平 Kohei Yoshino
機器事業本部
Components Business Division



加藤 敦史 Atsushi Katoh
機器事業本部
Components Business Division



噴流のシミュレーションと可視化

Simulation and Visualization of Jet Flows

伊藤 秀治 Hideharu Ito

近年、製品開発やクリーンルームの設立等を目的に様々な分野において流体の可視化技術が多く用いられるようになってきている。可視化とは流体現象を見える化してカメラで撮影する計測手法である。流体現象の解明には主にシミュレーションが利用されてきたが、可視化技術を取り入れることで実際の流れを評価することができ、より信頼性の高い結果を得ることができる。また、定性的に流体の流れを確認できるだけでなく、撮影した映像を解析することで流速を算出することも可能となっている。

そこで、当社でもシミュレーションだけでなく可視化技術を取り入れてノズルの開発を行った。その事例を交えて流体の可視化技術について紹介する。

Over the past few years, fluid visualization technology has been widely used in various fields for such purposes as product development and establishment of clean rooms. Visualization is a measurement technique in which fluid phenomena are made visible and then photographed with a camera. Although the elucidation of fluid flow phenomena has been primarily done using simulation, incorporating visualization technology will enable evaluation of actual flow rates and provide more reliable results. Furthermore, not only can the fluid flow be checked qualitatively, but also the flow velocity can be calculated by analyzing the captured video images.

Therefore, we decided to use visualization technology as well as simulation in our nozzle development process. This paper describes the fluid visualization technology with examples.

1 はじめに

当社では、空気圧制御機器、流体制御機器、薬液用機器などの開発及び設計を行っている。これら流体を扱う機器類の開発・設計を行う中で性能・信頼性向上のために用いる評価手法として流体のシミュレーションが挙げられる。

流体のシミュレーションは以下の流れで行われる。

- ①コンピューター上で対象となる流路をモデル化する。
- ②モデル化した流路に流体の圧力・流量等の条件を設定する。
- ③流路モデルを要素に分割し、有限要素法を用いて解析を実施する。
- ④各断面での解析結果を表示し、分析する。

この手法により設計の妥当性確認が試作の前に可能となり開発期間の短縮につながる。

しかし、流体は主に機器内部を流れているため、実際の流れを確認することは困難であり、流体のシミュレーションの結果の是非は当社では確認することが難しかった。

そこで、シミュレーション結果の是非を確認しながら当社でノズルの開発を行ったので、その事例を交えて流体の可視化について紹介する。

2 シミュレーション・可視化対象について

本稿にて流れのシミュレーションと可視化を行ったノズルについて紹介する。

本ノズルは水平なガラス面上に付着したパーティクルを除去することを目的としている。ノズルから大流速のエアをガラス表面へ吹き付けながらダクトから排気を行うことで、ガラス上のパーティクルを取り除いている(Fig.1)。このノズルは大きく分けて(1)ノズル本体、(2)ノズルボディ、(3)ダクトの3つのパーツで構成されている。このパーツごとの役割及び構造について説明する。

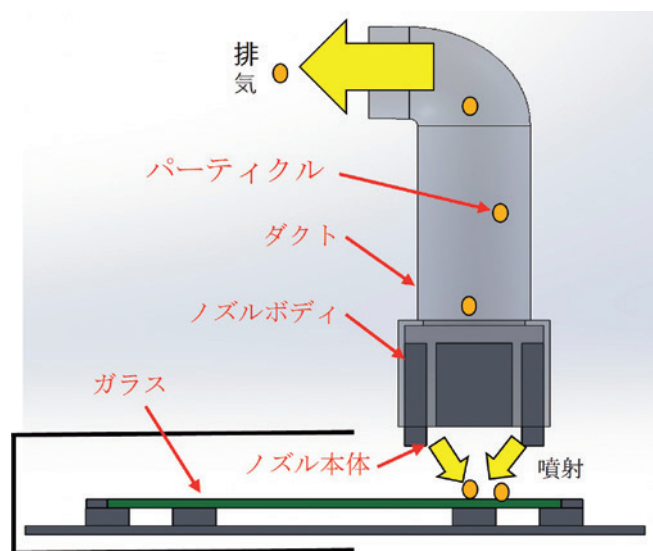


Fig. 1 洗浄の様子

ノズル本体はFig.2のように3枚のSUSプレートで接合することで作製されている。このノズルの流入口から供給されたエアがノズル内の流路を通り、中心の厚み0.1mmのプレートの櫛刃の隙間からエアが噴き出す構造となっている(Fig.3)。

この噴射エアは0.1mmという非常に狭い流路を通して出てくるため、流速は非常に大きな値が得られる。

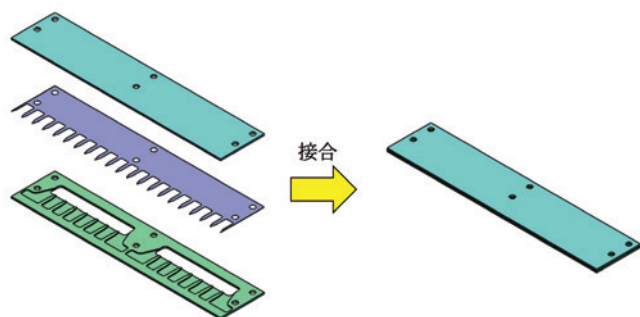


Fig. 2 ノズル本体

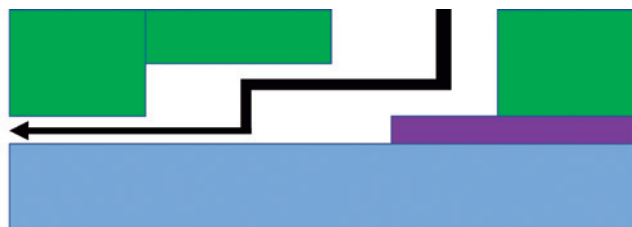


Fig. 3 ノズル本体内部の流路イメージ

このノズル本体にエアを供給する流路がノズルボディである。ノズル本体をノズルボディの下部にねじで固定し、供給されてきたエアがノズルボディ内部の流路A→B→Cを通りノズル本体の流入口へエアを送る構造となっている(Fig.4)。

また、このノズルボディは連結構造となっており、使用時にはこのノズルボディ同士をOリングでシールし、連結していくことで様々な長さの長ノズルとしての運用が可能となっている(Fig.5)。この際、流路Aは下流に対して十分大きな容積を有しているので連結しても全てのノズルボディ内で圧力が一定になりやすく、ノズルの連結位置によって流量が変動しない。

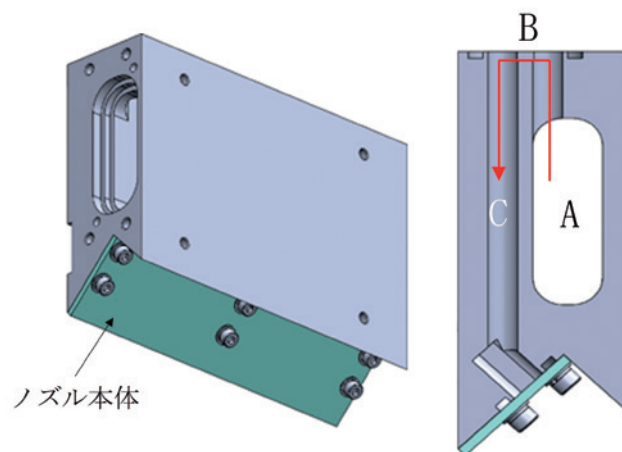


Fig. 4 ノズルボディと内部流路

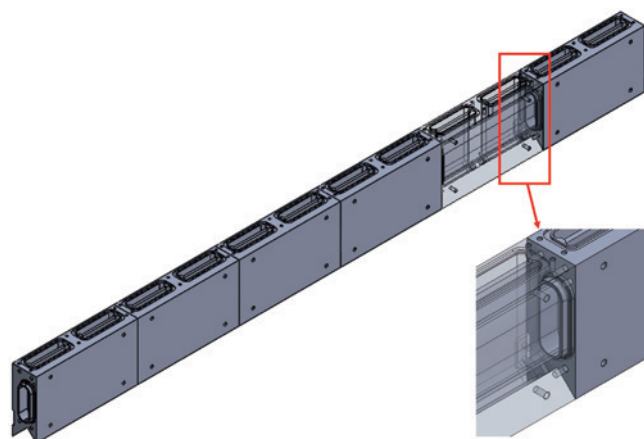


Fig. 5 ノズルの連結構造

実用時にはこの連結したノズル2本を対向する形でダクトに組付けた状態で使用する(Fig.6)。両側のノズルからエアを噴射することで両ノズルの中心点でエアがぶつかり合い、ダクト上部から排気しやすくなっている。ダクト上部には排気口につながるポートが設けられており、ダクト内部全体を均一に排気しやすいよう上部に向かってテーパがついた形状となっている。

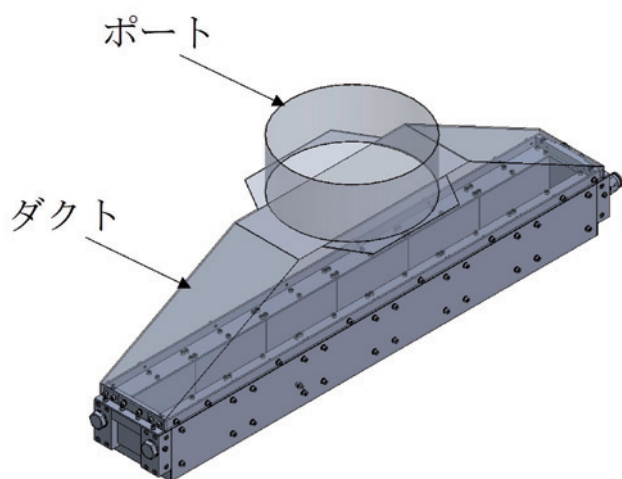


Fig. 6 ノズル完成形

3 噴流のシミュレーション

ガラス表面についたパーティクルを綺麗に取り除く性能を満足するには、まずどのように流体が流れるべきかを推測する必要がある。

その条件として以下の2つの条件A・Bが推測される (Fig.7)。

- A. ガラス表面にノズルの噴流が衝突すること
- B. ガラス表面に衝突したエアがダクトの外側へ流出しないこと

条件Aの理由はパーティクルがガラス表面に静電気により付着している場合、これを取り除くにはまず噴流を吹き付けてガラス面からパーティクルを引き離さなければならないためである。そのため、噴流がガラス表面に衝突しない流れでは全てのパーティクルは取り除くことはできないと推測される。

条件Bの理由は噴流をガラス面に吹き付けた際に引き離されたパーティクルがダクト外部へ飛散するのを防止するためである。噴流はガラス表面に衝突した後、ダクト内側とダクト外側の方向に分かれて流れることが推測されるため、ダクトの外側に流れていかないエアの流入流量と排気流量のバランス、さらにノズルとガラスの位置関係が重要となると考えられる。

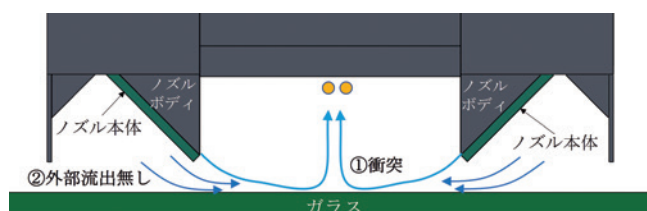


Fig. 7 洗浄時の理想の流れ

これらの条件をクリアする流路モデルの作製及び流量条件の設定をして、シミュレーションを行う。

Table 1に改善前後のモデルの構造及び流量条件を、Fig.9・Fig.10にそれぞれのシミュレーション結果を示す。またノズル角度・ノズル高さはFig.8に示す箇所のパラメータに相当する。

Table 1 シミュレーション条件

	流入流量(L/min)	排気流量(L/min)	ノズル高さ(mm)	ノズル角度(°)	結果
条件1 (改善前)	3000	8700	20	60	Fig. 9
条件2 (改善後)	3000	8700	7	45	Fig. 10

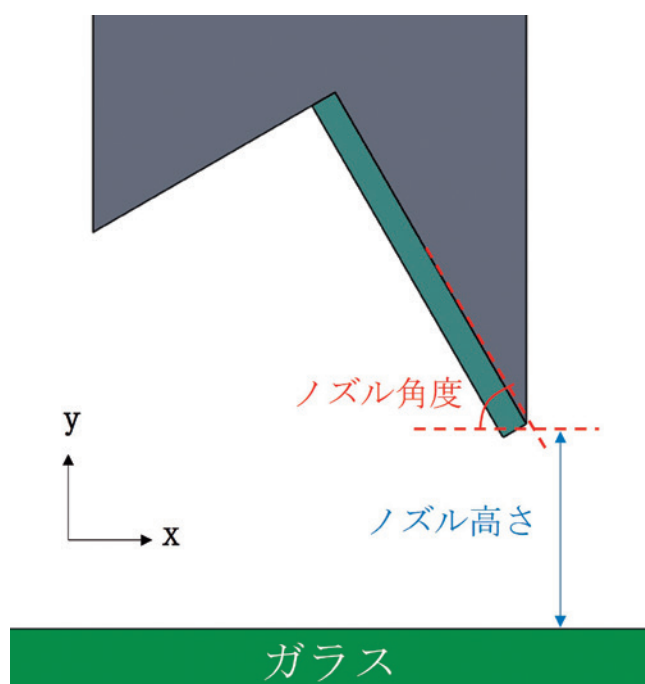


Fig. 8 ノズル角度・ノズル高さ

改善前であるFig.9ではノズルから出た噴流がガラス面に衝突するが、その後エアがダクトの外へと流出している様子が確認できる。これはノズルの角度に起因すると推察される。ノズルの角度がガラス表面に対して60°と急であるため、ダクト内部へと向かうx軸方向のエアの流速ベクトルがy軸方向の流速ベクトルに比べて小さい。そのため、エアがガラス面に衝突したのちにダクト外部へと流れ出るエアの割合が大きくなっていると推測される。

この結果を受けて、ノズルの角度を改善した。改善後のFig.10ではガラス面に噴流が衝突した後、ダクト外へとエアは流出せずに内部へと引き込んでいる様子が確認できた。しかし、ノズル角度を60°から45°へと浅くすることによって排気によって噴流が上方へ吸い上げられてしまい、ガラス表面へと噴流が届かなくなってしまう。この問題はノズルをガラス面へ近づけることで噴流が当たりやすくなり対処できた。

本シミュレーション結果より、条件2のモデル条件・流量条件がパーティクル除去に最適であると判断した。

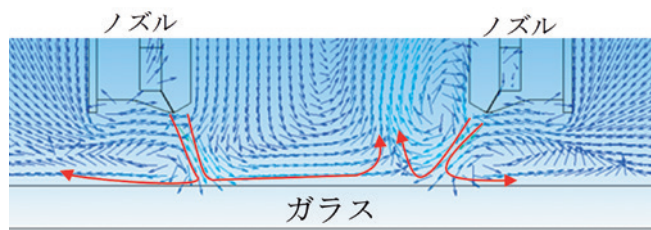


Fig. 9 条件1の流体シミュレーション結果

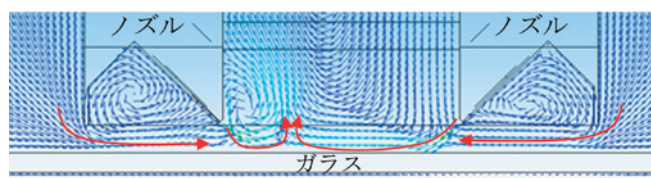


Fig. 10 条件2の流体シミュレーション結果

4 流体の可視化技術について

流体の可視化とは通常目に見えない流体现象を見える化して、カメラで撮影できるようにする計測手法であり、流体のシミュレーション結果が実状に則しているか確認する最も分かりやすい手法である。

しかし、その手法は流体の種類や確認したい現象によって様々であり必要に応じて選択しなければならない。例えば可視化対象が気体であれば空気の流れに追従して挙動するスモークを散布し、対象が液体であればその液体に比重を合わせた粒子を混入させて、その挙動をカメラで撮影する必要がある。本稿では、実際に当社で実施したPIVについて紹介する。

PIV(粒子画像流速測定法)とは流れ場における多点の瞬時速度を非接触で得ることができる流速計測法である。

流れに追従する多数の微粒子を散布し、可視化用のレーザーシートを照射することで2次元断面として、照射面の流れ場の細かな挙動変化の情報を得られるようになる。そしてカメラでその粒子の挙動を露光時間を延ばして撮影するだけで粒子が時系列で流れる様子を追跡することができる。得られた映像を用いてフレーム間の微小時間 Δt における粒子の変位ベクトル Δx を画像処理により求めることで、流体の局所速度ベクトル $v = \Delta x / \Delta t$ を算出する。これにより流速分布の定量評価が可能となる。ただし、流速の遅い所と速い所での差が大きい場合には計測精度に誤差が生じる可能性がある。

当社でPIVによる可視化試験を実施した時の様子をFig.11に示す。

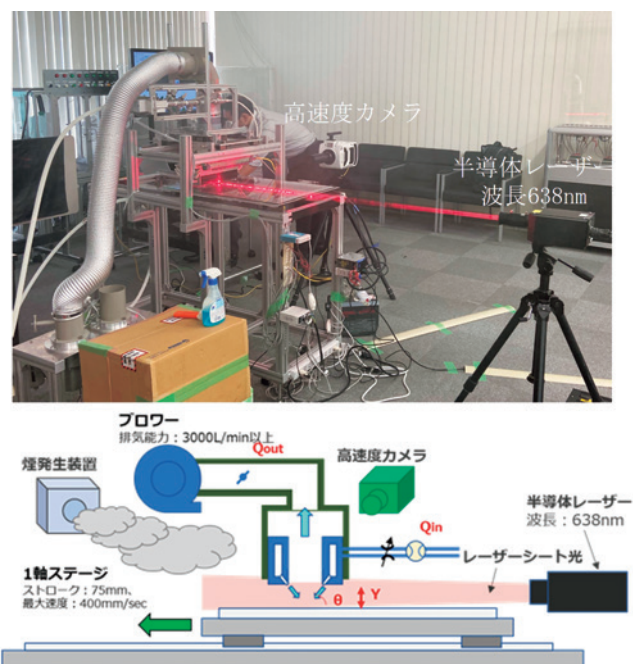


Fig. 11 可視化試験の様子

この試験は試験装置を簡易化するために本来のシミュレーションモデルの1/3サイズのモデルで行い、流量も1/3の値を用いて、下記の手順で行った。

- ①可視化したい断面に対して平行にレーザーシート光を照射する。
- ②照射面に対して高速度カメラを垂直方向に設置し、ピントを合わせる。
- ③ワーク周辺にスモークを散布した状態でノズルからエア噴射、ダクトから排気を行い、その様子を高速度カメラで撮影する。

このとき、計測対象が噴流のように流速が大きいほど短時間における粒子の挙動を捉えなければならないため、カメラのフレームレートを上げる必要がある。しかし、高フレームレートで撮影するにはそれが可能なカメラ及び高エネルギーを照射可能なレーザー源が必要となる。そのため、可視化する対象・現象によって、カメラやレーザーを選択する必要がある。

可視化試験で撮影された映像からPIVにより解析して求めた流体の平均流速ベクトルをFig.12、Fig.13に示す。

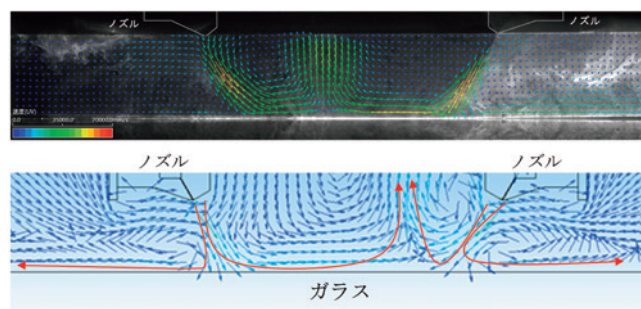


Fig. 12 可視化とシミュレーションの流速ベクトル比較 (条件1)

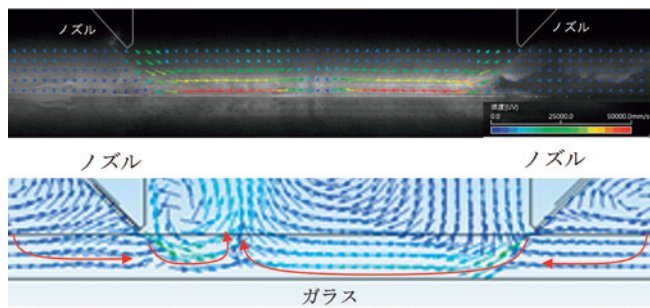


Fig. 13 可視化とシミュレーションの流速ベクトル比較（条件2）

条件1、2ともにシミュレーションと同様の流れが可視化試験からも確認された（Table 2）。条件1ではガラスに噴流が衝突した後にダクトの外側へとエアが流れ出しており、条件2ではダクト内部へとエアを吸い込む流れとなっている。また流速もシミュレーションと可視化で3～7m/secの誤差に収まっており流速計測の精度も高いことが分かった。この可視化結果から噴流のシミュレーションでは実状に則した結果が得られていることが確認できた。

Table 2 シミュレーションと可視化結果比較

		ダクト外側への流出の有無	エア衝突点の流速(m/sec)	結果
条件1	シミュレーション	有り	48	Fig. 9
	可視化	有り	41	Fig. 12
条件2	シミュレーション	無し	53	Fig. 10
	可視化	無し	50	Fig. 13

5 おわりに

今回はノズル開発の事例を用いて可視化技術の紹介をしたが、空圧機器の性能評価以外にも当社で様々な用途で活用することができる。例えばレーザー溶接を可視化することで溶接欠陥の原因究明が可能となり、クリーンルーム内部を可視化することで防塵対策などにも活用することができる。今後も可視化技術を活用し更なる技術力向上を目指す。

執筆者プロフィール



伊藤 秀治 Hideharu Ito
機器事業本部
Components Business Division



バイオプロセスへの取り組み

Approach to Bioprocess

伊藤 雅 Masashi Ito

従来、医薬品がヒトに与える影響はヒトや動物の細胞、動物により評価されてきたが、昨今、その結果を疑問視する声やより良い評価系を求める声が出てきており、ヒト細胞を用いた三次元培養研究が活発になっている。

三次元培養のバイオプロセスは流体制御と自動化技術が多く使われるので当社が社会に貢献するよい機会と考えている。

そこで本稿では、バイオプロセスで必須となるバイオリアクターに焦点を当て、三次元培養でニーズがある“かん流バイオリアクター”を紹介する。細胞が生きるために重要な指標であるpHと溶存酸素の制御方法を述べたのち、“かん流バイオリアクター”の実証実験機を用いて得られた三次元組織を観察した結果を報告する。

Conventionally, the effects of pharmaceuticals on humans have been evaluated using human and animal cells and animals. Three-dimensional culture research has become active. The three-dimensional culture bioprocess uses a lot of fluid control and automation technology, so we think it is a good opportunity for us to contribute to society. Therefore, in this paper, we will focus on bioreactors that are essential for bioprocesses, and introduce "perfusion bioreactors" that are in demand for three-dimensional culture. After describing the method of controlling pH and dissolved oxygen, which are important indicators for cell survival, we will report the results of observing three-dimensional tissues obtained using a "perfusion bioreactor" demonstration experiment.

1 はじめに

近年、社会ニーズや社会問題を解決し、持続可能な社会を実現するために“SDGs”が話題になっている。当社においても社会の課題解決に貢献すべく、商品・サービスの技術革新を追求している。そこで本稿ではバイオプロセスへの取り組み事例を報告する。

昨今の世界的なトピックではコロナウイルス流行による行動制限や生活様式の変容による経済ダメージなどが頭に浮かぶ。この未知の病気に対してアメリカの企業が世界で初めてmRNAワクチンを開発し、早期臨床試験を経て上市したことにより、状況が好転したことは記憶に新しい。これは生物学とテクノロジーが融合した一つの事例であり、今後もパンデミック等により従来と異なる医薬品デザインや医薬品開発手法のパラダイムシフトが起こる可能性を示唆している。

また、医薬品開発では以前より動物実験が問題になっている。欧州では2009年に化粧品の評価における動物実験が禁止となり、動物で試験した化粧品の最終製品や原料はEU内で使えなくなっている。このような流れを受けて医薬品開発においても同様の措置が取られると言われており、近年、ヒトの細胞を用いた研究が盛んになっている。

未来に目を向けると、爆発的な人口増加や人類が宇宙へ進出すると言われており、これらを見据えて食料確保に向けた取り組みが始まっている。その一つに動物細胞を使った培養肉研究が挙げられる。この他にも

人々が求める社会のニーズとそれらに応える生物化学工学の事例(Fig.1)を示す。

社会のニーズ	生物化学工学の適用例
環境負荷の少ない化学工業	バイオリアクターによる化学品の生産
健康な生活	動物細胞によるバイオ医薬品の開発と生産 酵素反応による機能性食品の生産
安全で美味しい食品	食品加工での酵素の利用 植物工場での野菜生産
エネルギー問題	バイオ燃料の開発と生産

Fig. 1 社会のニーズと生物科学工学¹⁾

このように生物学や生物化学工学といったバイオ分野は社会の課題解決を進める上で有効かつ、有望な事業領域になる可能性を秘めている。

2 培養方法とバイオリアクター

一般にバイオ分野で使われる技術をバイオテクノロジー、微生物や細胞、酵素を用いたモノづくりをバイオプロセスという。バイオプロセスで細胞を育てることを培養と呼び、平面容器で培養したり、容器内を浮遊させて培養したり、ゲル等の構造支持体上で培養したりと、細胞の性状や実験目的によって様々な方法が実施されている。以下に代表的な方法を示す。²⁾

2-1 静置培養(単層培養)

細胞を培養容器に接着させ、単層の状態で培養する

方法。基本的には正常細胞を培養系に移すと単層状に伸展・増殖する。
単層上に伸展するのでMonolayer Culture(単層培養)と呼ばれ、培養容器の培養面積を覆い尽くすと、過増殖状態となり、形態の変化や死滅の原因となる。

2-2 浮遊培養

細胞を培地に浮遊させた状態で増殖させる培養方法。血球由来の細胞は、培養容器に接着せずに浮遊した状態で増殖する。血球由来の細胞以外にも、癌化した細胞や意図的に浮遊状態での培養を可能にした細胞などがある。
浮遊系細胞の培養は培養容器の接着可能面積に依存しないため、大量培養に有利な細胞として利用され、省スペースでの生産レベルの大量培養に適する。

2-3 回転培養(ローラー培養)

ローラーボトルと呼ばれる回転培養専用の培養容器を緩やかに回転させながら、そのボトルの内壁に細胞を接着させて培養する方法。培養方法の基本としては、単層培養と同じであり培養条件の検討が比較的容易で少量の培地で、効率的なガス交換が可能である。

2-4 旋回培養(振とう培養)

浮遊系細胞の培養方法として利用され、主に菌体や植物細胞の培養等に利用される。リンパ球由来細胞の培養や、スフェロイド形成(細胞集塊)に用いられることも多く、後者については、適切な回転速度で水平に旋回させると浮遊物が中央に集まる性質を利用している。近年、動物細胞の培養にも広く利用される培養方法となっている。

2-5 担体を使用した培養

小さなキャリアー(ビーズなどの担体)の表面に細胞を生着させて、そのキャリアーを攪拌することで、あたかも浮遊培養のような手法で行う接着性細胞の培養方法。大きな培養面積と培養容量が確保できるので、大量培養が可能である。

2-6 三次元培養(多孔性ゲル、微重力 etc)

単層培養などの二次元(平面)での培養とは異なり、高さ方向(厚み)でも細胞を増殖させる立体的な培養方法。細胞の接着及び増殖を支え、立体的三次元構造を維持するための担体をスキャフォールド(足場)と呼び、その足場が作り出す培養環境はより生体内の状態に近く得られた結果も生体内の反応との相関性が高いと考えられる。再生医学研究を進める上で生体内に近い環境での培養は非常に重要である。

各種培養方法を実現するため培養に用いられるタンクやその周辺機器を含む装置はバイオリアクターと呼

ばれ、細胞に栄養や酸素を与え、細胞が育ちやすい環境をつくる機能を有している。バイオリアクターの概略と特徴をTable 1に示す。

Table 1 動物細胞培養用バイオリアクターの概略³⁾

特徴	型式	攪拌器形式	エアリフト式	ホローファイバー式	セラムックマトリックス式	セルリフト式	重力沈降式	水平円筒回転式
スケールアップ性能	○	○	×	×	×	×	×	△
付着性細胞	○	○	○	○	○	×	×	○
浮遊性細胞	○	○	○	○	○	○	○	○
ずり応力	△	×	○	○	△	△	△	○
培地交換	△	×	○	○	○	○	○	△
酸素供給	△	○	○	○	○	○	○	△
サンプリング	○	○	×	×	○	○	○	○

バイオ分野においてバイオリアクターは極めて重要な装置であり、国内外のメーカーが開発に取り組んでいる。近年注目されているのが三次元培養で、その培養環境は生体内に近く、得られる結果も生体内の反応と相関性が高いと考えられており、ヒトへの影響や効果の測定に適していると言われている。しかし、三次元培養で得られる三次元組織は立体形状となるため中心部の細胞に栄養や酸素が届かずに細胞死(ネクロシス)する問題がある。
そこで、我々は三次元培養に適したかん流バイオリアクターに着目し、開発に取り組んでいるので次の章より紹介する。

3 かん流バイオリアクター

“かん流”とは「注ぎ、流すこと。また、その流れ」、あるいは「体内または臓器・組織・細胞に薬液などが入った液体を流し込むこと」の意味を持ち、「灌流」と表記される。つまり、かん流バイオリアクターとは三次元細胞に培養液を流して培養する装置になる。一般的にヒト細胞を培養する環境条件は37℃、pH7.4と言われている。これは人間の体温と血液のpH正常値から導かれる値である。人間の体内では血液及び血管が酸素、栄養、温度を体の隅々まで届けて体内を安定させる役割をしているので三次元培養でも液体の流れが重要になる。その液体の流れを実現するのが再生医学研究における培養法として用いられてきたかん流バイオリアクターである。

かん流バイオリアクターの機能は大きく4つに区分することができる。

- ①送液制御部
- ②調質部
- ③培養部
- ④温調部

それぞれに求められる技術は次のようになる。

- ①血流を模倣する微圧・微流量送液技術
- ②血液の物性を模倣した液中の溶存酸素(以降DO)とpHの調質技術

③三次元組織が適正な圧力下でコンタミネーションせずに長期培養できる技術

④培養部及び周辺部を適温に保つ技術

これらの機能の備えたかん流バイオリアクターの構成をFig.2、制御項目と特性値をTable 2に示す。

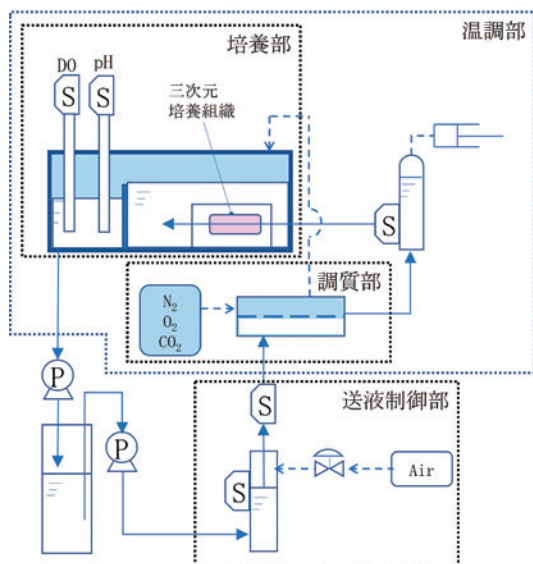


Fig. 2 かん流バイオリアクターの構成⁴⁾

Table 2 かん流バイオリアクターの制御項目と特性値

項目	特性値
培地容量	200~1000mL
送液量 (※)	100~500 μ L/min
送液圧 (※)	~10mmHg
組織圧	~1mmg
pH値	6.9~7.9
DO値	1~8mg/L
培養温度	室温~40℃

※選択式で片方のみ制御対象(他方は従属して変化する)

この中でバイオリアクターの調質部で使われるDO・pH制御技術について述べる。

4 培養液の調質技術

繰り返しになるが培養では細胞を生体環境下に置くことが重要である。一般的に体温は37℃、体内のpH代表値は7.4、酸素濃度は5~7%程度と言われている。そこで細胞培養ではこのような環境を人工的に作り出すためにインキュベータを用いて37℃の温度と内部空間の二酸化炭素濃度、酸素濃度が制御、維持される。インキュベータに収容する細胞を培養する容器は培養液の表面から酸素と二酸化炭素を取り込むことに適した間口が広く底が浅い形状のディッシュが使われる。培養液には二酸化炭素濃度が5%の気体が溶け

込むことでpH7.4になるガス緩衝液を使っており、培養液を容器に注液する際には細胞がダメージを受ける原因となる気泡が発生しないように注意深く作業しなければならない。同様に、かん流培養においても、かん流する培養液に二酸化炭素ガス(以降CO₂)と酸素ガス(以降O₂)を供給しつつ気泡を発生させない培養液のpHとDOの調質方法及び監視が必要になる。

はじめに培養液のpHが決まる仕組みについて述べる。pHとはH⁺(プロトン)の数より求まる。例えばpH7の場合、 $\text{pH} = -\log(10^{-7})$ で表され、プロトンのモル濃度は 10^{-7}mol/L になるのでpHを変えるにはプロトンのモル濃度を制御すればよいことがわかる。

培養液はバッファー液が主でそこに培養に必要な栄養素、成長因子などが添加される。バッファー液は主にCO₂/バッファーが使われる。多くの動物細胞培養における培養液のpH調整にはFig.3に示す緩衝系が用いられる。この反応式で注目するのはCO₂とH⁺(プロトン)の存在である。

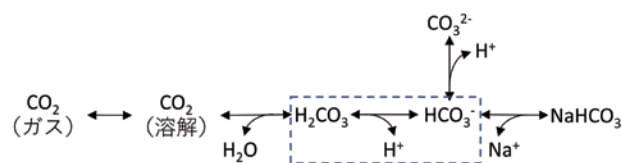


Fig. 3 NaHCO₃-CO₂ガス緩衝系によるpH調節⁵⁾

炭酸水素ナトリウム(NaHCO₃)水溶液の培養液中ではHCO₃⁻とH₂CO₃との間の平衡が支配的である。H₂CO₃モル濃度は気相部から溶解したCO₂モル濃度に等しくなるのでCO₂モル濃度が高い場合、H₂CO₃モル濃度を高くしようとして左方向の反応が進むとプロトンのモル濃度が下がりpHは小さくなる。CO₂モル濃度が低い場合、H₂CO₃モル濃度を低くしようとして右方向の反応が進むとプロトンのモル濃度が上がり、pHは大きくなる。

DOは次のように考える。例えば水中に大気を送気してバブリングしたまましばらく放置すると水はその温度における酸素飽和状態になる。よって水溶液中のO₂モル濃度が高いとDOは大きくなり、水溶液中のO₂モル濃度が低いとDOは小さくなるのが分かる。

そしてCO₂とO₂は相互作用で変化したり、生成物を作ったりしない独立した関係にある。

以上より、CO₂とO₂のモル濃度をコントロールすることで水溶液のpHとDOの同時制御の可能性が見えてきた。

しかし、供給するモル濃度をCO₂とO₂のみにするとトレードオフの関係になるためpHとDOを同時に制御することができない。そこでトレードオフを解消するためにバッファーとなる物質が必要と考えた。バッファー物質は細胞や培養液、CO₂とO₂に反応しない不

活性ガスが望ましいので大気中に多く含まれる窒素ガス(以降N₂)を選択した。つまりCO₂、O₂、N₂から成る混合ガス全体の体積(モル濃度の分母)を一定にし、そこからpHとDOの設定値に応じたCO₂とO₂のモル数を引き、残りをN₂のモル数で補えばよいと考えた。

気体のモル数を直接制御するのは難しいので制御しやすい他のパラメータへの置き換えを検討するためにAmagatの法則を用いた。

『理想気体において、気体Aと気体Bの混合気体の体積Vは同温・同圧下の気体Aの体積V_Aと気体Bの体積V_Bの和に等しい』ことより、同温・同圧下に置いて混合気体の体積Vは気体A、Bの体積V_A、V_Bを用いると

$$V=V_A+V_B$$

となる。

また、モル数は、『0℃、1atmにおいて気体1molは分子数 6.02×10^{23} 個、22.4Lの体積となる』ことより、CO₂、O₂、N₂、その他ガスにおいても成立する。

これらを前提として混合気体の全体積、各気体の分体積、モル数の関係を気体の状態方程式 $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$ より考えてみる。

気体Aの体積V_Aとモル数n_A、気体Bの体積V_Bとモル数n_Bとし、同温・同圧下とすると

$$P \cdot V_A = n_A \cdot R \cdot T$$

$$P \cdot V_B = n_B \cdot R \cdot T$$

$$n = n_A + n_B$$

より

$$P/(R \cdot T) = V_A/n_A = V_B/n_B = V/n$$

となるから

$$n_A = V_A/V \cdot n$$

$$n_B = V_B/V \cdot n$$

よって気体A、Bのモル数は混合気体の体積とそれぞれの気体体積の比で表せる。

以上より、モル濃度を制御するには同温、同圧のCO₂、O₂、N₂による混合気体の体積を固定し、各気体の体積を制御すればよいことが分かった。

次より狙いのモル濃度になった混合気体を流れる培養液に溶け込ませる方法について述べる。

気体を水溶液に溶かすにはバブリングが手っ取り早いですが培養においてはバブリングで発生する気泡が細胞近くで破裂すると細胞がダメージを受けるため好ましくない。また、静置培養で使われる気液界面から気体供給する方法は溶存速度が遅く、送液中の培養液にそのまま適用することは困難である。

これらを踏まえて着目したのが気体透過膜を用いる方法である。気体透過膜は気体のみ透過する網目状になった三次元構造の撥水素材であり、液体と気体の間に置くことで液体は気体側に流出せず、気体のみが液体側に流入することが期待できる。ただし、液体に大きな力を加えると液体が気体側に流出する懸念があるが、今回は細胞組織が破壊しないようにかかる圧力は

10mmHg以下と微圧なので手段としては好適である。そこで培養液と混合気体が気体透過膜により隔壁される培養液調質器(Fig.4)を開発した。10mmHg以下で微圧送された培養液はFig.5に示す流路を流れる。気体透過膜を介した反対側の空間にはマスフローで流量をコントロールしたCO₂、O₂、N₂の混合気体を供給する。流れる培養液に溶けやすくするために培養液と気体透過膜が接する気体を広く、培養液の流れによって攪拌が進むように流路深さは浅くなるように設計している。⁶⁾

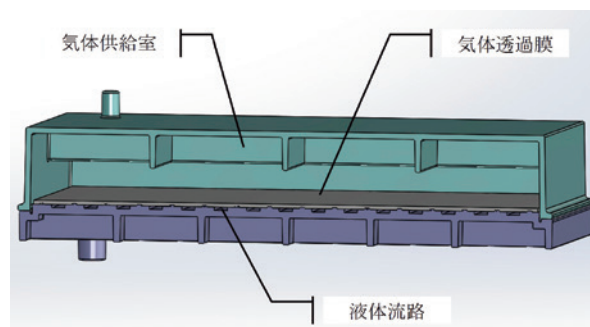


Fig. 4 培養液調質器の断面

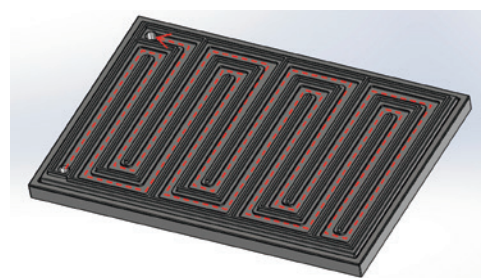
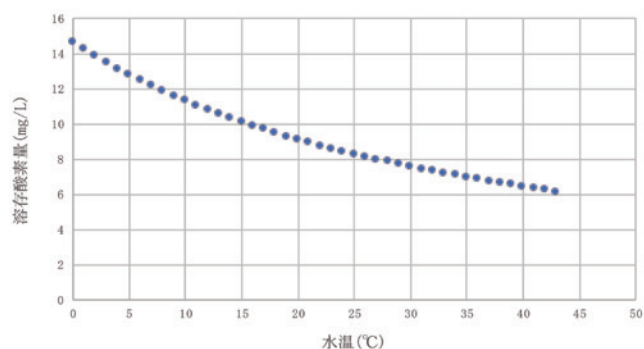


Fig. 5 培養液流路

混合気体を供給する際には液体の温度に注意が必要である。水中の飽和溶存酸素量のプロットデータ(Table 3)に示されるように例えば水温が25℃のDOは8 mg/L(読み値)、35℃のDOは7mg/L(読み値)となり、10℃の差でDOは12~13%ほど変化する。O₂ほどではないが、CO₂も同様であり液温に合わせてO₂とCO₂の供給量を変えることが望ましいことが分かる。

Table 3 水中の飽和溶存酸素量



培養中の温度環境は所定温度で一定になるが、培養液を供給し始めた段階や、培養液を交換した直後などでは所定温度に達していないことや、実験内容により所定温度が変わることが考えられるため、温度と供給気体流量のテーブルを作り、液体の温度に対して気体流量を制御している。

Table 4は、培養液のDOが平衡した場合のDOと混合ガスにおけるO₂の各流量と各温度Tとの関係を規定した酸素流量テーブルを示している。例えば、温度T₁においてDO₁(例えば1ppm)で平衡する場合の酸素流量は流量RO₁₁であり、温度T_mにおいてDO_n(例えば10ppm)で平衡する場合の酸素流量は流量RO_{nm}である。流量RO₁₁から流量RO_{nm}へ順に大きくなっており、流量RO₁₁から流量RO_{1m}へ順に大きくなっている。そして、流量RO_{nm}が最も大きくなっている。⁶⁾

Table 4 酸素流量-温度テーブル

温度 [°C]		O ₂ 流量 [mL/min]			
		T ₁	T ₂	...	T _m
DO [ppm]	DO ₁	RO ₁₁	RO ₁₂		RO _{1m}
	DO ₂		RO ₂₁		
	...				
	...				
	DO _n		RO _{n1}		RO _{nm}

Table 5は培養液のpHが平衡した場合の各pHと混合ガスにおけるCO₂の各流量と各温度Tとの関係を規定した二酸化炭素流量テーブルを示している。例えば、温度T₁においてpH₁(所定のpH値、例えば6.9)で平衡する場合の二酸化炭素流量は流量RC₁₁であり、温度T_mにおいてpH_n(所定のpH値、例えば7.9)で平衡する場合の二酸化炭素流量は流量RC_{nm}である。流量RC₁₁から流量RC_{nm}へ順に小さくなっており、流量RC₁₁から流量RC_{1m}へ順に大きくなっている。そして、流量RC_{1m}が最も大きくなっている。⁶⁾

Table 5 二酸化炭素流量-温度テーブル

温度 [°C]		CO ₂ 流量 [mL/min]			
		T ₁	T ₂	...	T _m
pH	pH ₁	RC ₁₁	RC ₁₂		RC _{1m}
	pH ₂		RC ₂₁		
	...				
	...				
	pH _n		RC _{n1}		RC _{nm}

以上の手段により送液中の培養液に混合気体を供給して調質する方法を開発した。

5 実証実験

DO・pHの調質制御以外にも送液制御や温調制御、細菌汚染対策を施した培養部などを開発してかん流バイオリアクター(Fig.6)と制御コントローラ(Fig.7)の実証実験機を製作した。



Fig. 6 かん流バイオリアクター外観 (加工済み)



Fig. 7 制御コントローラ外観 (加工済み)

この実験機が実際に数値制御できることを確認したのち、共同研究先の東京女子医科大学 清水達也教授と早稲田大学 坂口勝久准教授の協力により三次元組織が培養できることを確認した。培養する三次元組織は心筋細胞と血管内皮細胞を共培養した細胞シートを複数枚積層したもので樹脂製のハウジングに血管内皮細胞を含むコラーゲンを充填した上に設置する。コラーゲン内部は貫通穴を施しており、かん流バイオリアクターにハウジングを接続して送液することによりコラーゲン内部を培養液が流れる筈になっている。実際にかん流バイオリアクターに接続して一週間培養した血管付心筋組織の外観と墨汁を使った血管の観察結果をFig.8に示す。心筋組織内部を墨汁が網目状に広がっており、血管ができていること、血管が物質輸送で機能していることが確認できた。⁷⁾

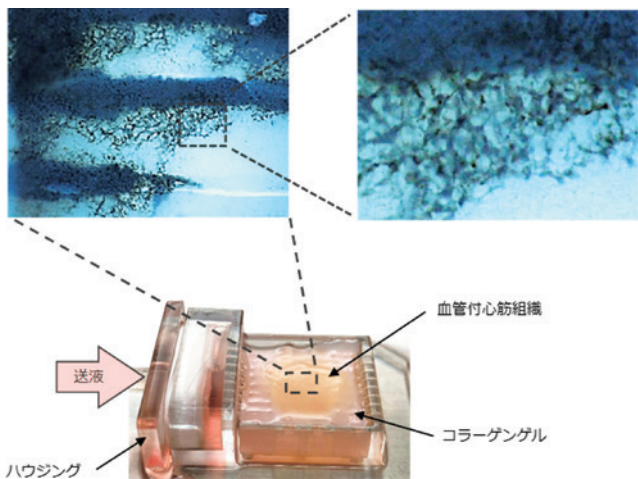


Fig. 8 血管付心筋組織と血管⁷⁾

6 結言

今回、バイオプロセスへの取り組みとしてかん流バイオリアクターについて報告した。初めて経験する分野のため知見が乏しい状態でスタートしたが、多くの人の支援を受けながら活動を推進した結果、実証実験機を製作し、実際に三次元組織を培養できるところまでたどり着くことができた。商品化さらには事業化に至るまでには多くの困難が予想されるが、この成果を早期に社会実装して人々の幸せな社会生活に貢献できることを目標に日々精進していく。

7 おわりに

本稿には東京女子医科大学の清水達也教授、早稲田大学の坂口勝久准教授との共同研究開発の成果を含む。ここに記して謝意を表す。

- 1) 松井徹ほか, 生物化学工学の基礎, コロナ社, 2p (2018)
- 2) 培養技術者必見! 学生さんにもお勧めしたい細胞培養ガイド | ワケンビーテックWebサイト (wakenbtech.co.jp) より引用し一部改変
- 3) 海野肇ほか, 生物化学工学, 第3版, 講談社, 210p (2011) より引用し一部改変
- 4) CKD株式会社, 堀邦聡, 伊藤雅, 鈴木仁也, 細胞培養システム, 特開2022-108647 (2022-07-02) より引用し一部改変
- 5) 高木睦, セルプロセッシング工学, コロナ社, 34p (2007)
- 6) CKD株式会社, 伊藤雅, 培養液調整装置、及びその製造方法, 特開2021-154201 (2021-10-07)
- 7) 坂口勝久ほか, 圧力・流量制御灌流バイオリアクタを用いた血管網付組織の構築, 再生医療学会総会 (web), 21st, ROMBUNNO.SP-03-6 (WEB ONLY) (2022) より引用し一部改変

執筆者プロフィール



伊藤 雅 Masashi Ito
新規事業開発室
New Business Development Office

■ 会社概要

設 立	1943年4月
資 本 金	110億16百万円
株 式 上 場	東京証券取引所プライム市場、名古屋証券取引所プレミアム市場
事 業 内 容	自動機械装置、駆動機器、空気圧制御機器、 空気圧関連機器、流体制御機器など 機能機器の開発・製造・販売・輸出

CKD技報 Vol.9

発 行	2023年 1 月 1 日
発行責任者	宮田 章
監修責任者	井口 謙彦 菊池 宏 佐藤 正義 伊藤 彰浩
発行事務局	諫山 洋子

印 刷 所	株式会社アイワット
発 行 所	CKD株式会社 〒485-8551 愛知県小牧市応時二丁目250番地 0568-77-1111（代表電話）

※本誌に掲載されている論文は、下記URLより閲覧が可能です。

<https://www.ckd.co.jp/company/giho/>

※本誌に掲載されている製品名は、当社が所有する商標または登録商標である場合があります。



CKD