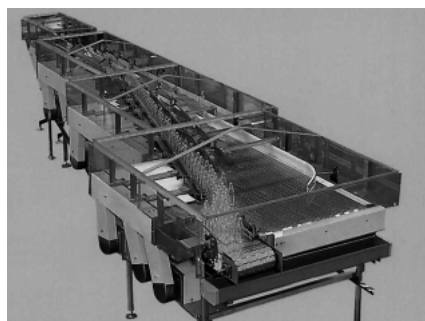


容器搬送シミュレーションに基づく 高速コンバイナ

High Speed Combining Machine based on the
Simulation of Container Conveyance

平 林 正 志 越 智 真 弓 長 山 弘 之



最近の飲料生産プラントでは飲料種類，容器形状の多様化が進み，生産効率に直結する容器安定搬送技術の重要性がさらに増している．そのため当社では，設計段階での容器搬送のリスク評価，施工後の早期立ち上げの検討手段として容器搬送シミュレーション技術を開発し，従来経験則に頼るところが多かった搬送機械の設計手段として実用化した．これを，飲料容器を集合状態から単列化するためのコンバイナの設計へ活用し，ガイド角とチェーン速度の最適化により，従来比20%の機長短縮と炭酸飲料用500 ml PET空びんで毎分900本の高速搬送を達成した．

1. はじめに

飲料充填，キャッピング，ラベリング，検査，箱詰め工程を経て製品となるプロセスは，コンベアによる容器搬送が一般的である．コンバイナはそうしたコンベア装置の1つであり，空容器や飲料充填後の容器を集合状態から単列化する装置である．コンバイナの設計は，ガラスびん主体の時代から築かれてきた容器搬送の経験則によるところが多かったが，容器搬送シミュレーションにより，ガイド形状やコンベア速度を力学的な裏付けの基で合理的に設計できるようになった．

(1) 容器搬送シミュレーションの特徴

PETびんや缶の横断面寸法，重心高さ，反発係数，側面と底面の摩擦特性を反映した準三次元容器モデルにより，数千本オーダの容器挙動予測も可能になり，倒びんリスクや容器ブレッシャの机上検討手段として活用できるようになった．

(2) コンバイナ設計法

容器仕様と単列化の要求性能に応じてガイド形状やコンベアチェーン速度を決定する手順をコード化した．さらにこうして定めた設計案を基に搬送シミュレーションが行えるようにした．

(3) 実機検証

上記手法を適用した新設計のコンバイナにより，従来機対比で20%機長短縮と高速化（空びん毎分600本から900本）を達成した．

2. コンバイナによる容器単列化⁽²⁾

コンバイナは多列の樹脂製チェーンをモータで駆動するコンベア装置であり，図1のような形態を有する．集合状態で供給される容器をガイドにより多列チェーン上へ乗移らせ，さらにガイドの形状とチェーン間の速度差とにより容器間隔を広げながら単列化する機能を有する．容器がチェーンやガイド，

他の容器と干渉，摺動する過程で倒びんを起こすことなく，いかに速やかに単列化させるかがコンバイナ設計における課題となる．特にPET空びんのように軽く不安定な容器では，倒びんのリスクを下げるために，加減速や容器間の干渉を穏やかにすることの一方，高速かつコンパクトな機械への要求にもこたえる必要があり，設計段階で容器搬送の机上検討ができることの意味は大きい．

3. 容器搬送シミュレーションの力学モデル⁽¹⁾

3.1 容器搬送の形態

図2はコンベアによる容器搬送の概念を示す．容器はチェーンと共に移動し，固定ガイドや他の容器から力を受けると，

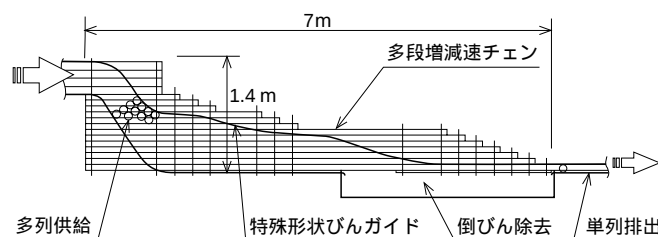


図1 コンバイナの基本形状 相互に速度差のある多列コンベアチェーンとガイドにより容器集合を徐々に単列化する．

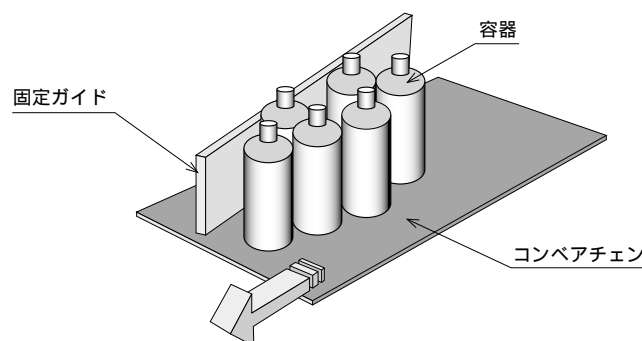


図2 容器のコンベア搬送 コンベアチェーン上の容器は固定ガイドより力を受け，搬送方向に対して横移動する．

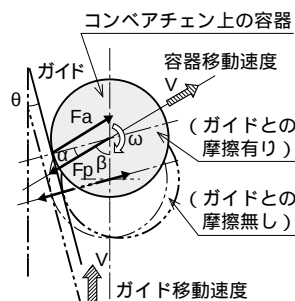


図3 ガイドと容器の接触モデル ガイドと容器の接触荷重が、コンベアチェンとの摺動抵抗と釣り合う。

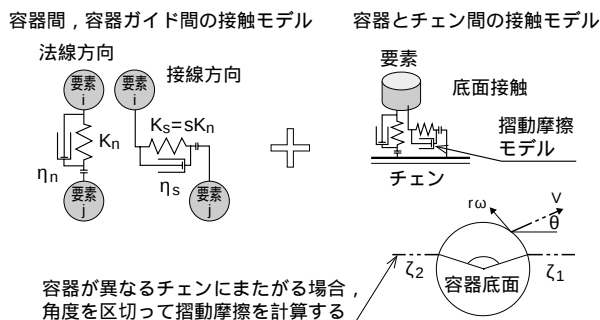


図4 容器挙動シミュレーションのモデル 二次元要素モデルに底面接触の特性を加え、質量、剛性、ダンピングを定めた準三次元モデルとした。

チェン上を摺動する。コンパイナの場合は、速度の異なるチェン間の乗り移りをさせることで集合容器の配列を崩し、ガイド沿いの単列搬送に移行させる。

3.2 搬送容器への力の作用

図3は、コンベアと共に移動する座標系での円筒容器とガイドとの摺動形態を示す。ガイドに接した直後の容器は、自身の慣性力を受けてガイド上で衝突と反発を繰り返すが、時間経過に伴って、ガイドから容器へ加わる力が容器底面のチェンとの摺動力と釣り合い、容器はガイド沿いにチェン上を滑りながら一定速度で移動する状態になる。同時に容器はガイドとの摩擦を受け回転するため、容器底面各部とチェンとの相対速度は回転の影響も受ける。このことを考慮すれば容器底面の全摺動抵抗、全摺動トルクを容器の摺動速度と回転速度の関数として表すことができる。

3.3 容器挙動のシミュレーション

容器がチェン平面上を倒びんせずに二次元運動することを前提に、容器集合体の挙動予測を行う。容器は円筒状の剛体とし、平面内でのガイドや容器相互の接触点には二次元のばね、ダンピング要素を、さらにその底面にも3.2に示したチェンとの摺動摩擦力を表すばね、ダンピング要素を入れた図4のような準三次元モデルとした。シミュレーションでは、これらの運動方程式を時々刻々解き、容器モデル個々の挙動を求めている。

3.4 倒びん判定⁽²⁾

外力により容器重心が持ち上がり、さらに重心が底面角部を乗り越えられるだけの運動エネルギーがあれば倒びんを起こす。本シミュレーションでは、倒びんに至るまでの容器の

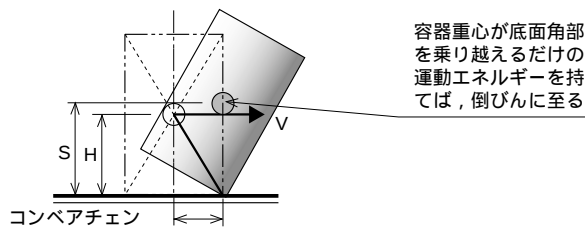


図5 倒びん発生条件 重心が支点を乗り越えるだけの運動エネルギーがあれば、倒びんが発生し得る。

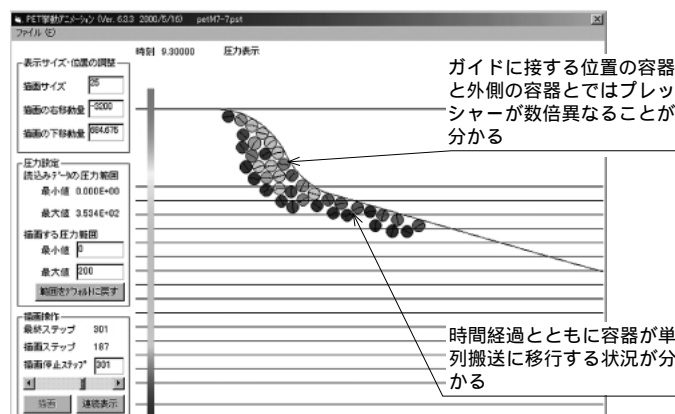


図6 容器搬送アニメーションの例 時間経過に伴う容器配列変化や容器プレッシャの変化をアニメーションで表示できる。

三次元挙動を追うことはできないが、図5に示すモデルにより対象容器の質量、重心高さ、底面の幅から転倒限界モーメントと倒びん限界速度を求め、倒びん判定を行っている。実際には、倒びん限界速度を越える容器に転倒限界モーメントが作用しなければ倒びんしないが、いずれか一方の条件だけでも倒びん可能性有りと、かなり厳しい判定をしている。したがって倒びん判定に掛からないように設計ができれば、結果として容器挙動は二次元解析で十分予測可能となる。

3.5 アニメーションの機能

シミュレーション結果の評価をサポートするため、計算結果を動画表示するアニメーションプログラムを作成した。これは、以下の機能を持つ。

- (1) 搬送領域の平面図を描画し、搬送容器挙動のアニメーションを行う。容器は断面を2分割して色分けし、容器回転もビジュアル化する。
- (2) 各容器に作用する荷重の算術和をポストファイル出力し、時間刻みで平均化した値を“容器プレッシャ”としてカラー表示する。また一度倒びん判定された容器は黒色ないし赤色で表示し、他の容器と区別する。

図6にアニメーションの出力例を示す。容器集合が多列チェンに乗り移る状況にあり、ガイド沿いの容器に圧力が立つ様子が分かる。

4. 搬送シミュレーションに基づくコンパイナ的设计

4.1 設計手順

過去の容器搬送の経験則も考慮したコンパイナの設計手順を図7に示す。

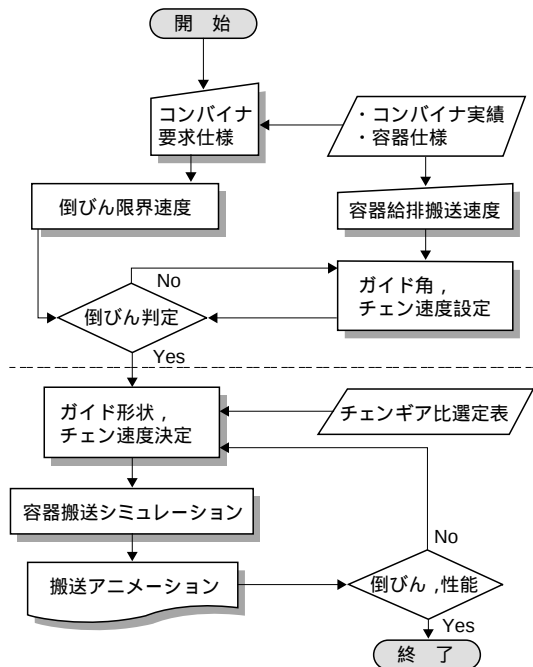


図7 コンバイナの設計手順 簡易コードにより基本仕様を定め、シミュレーションにより詳細設計を行う。

- (1) 実ラインで使われる容器種類，要求性能に基づき，供給容器の列数，搬送速度を決める。
- (2) 容器の倒びん限界速度計算値や摩擦係数計測値からチェン速度差やガイド角の制約条件を定める。
- (3) 上記制約の下でチェン速度，ガイド形状の試案を作成し，シミュレーションにより単列化性能，倒びんリスクの評価を行う。

上記手順は簡易コードに従って進めることができ，入力した容器の特性値は以後の搬送機器設計のデータベースとして活用できる。

4.2 コンバイナの性能評価，倒びんリスクの指標

シミュレーションによる容器挙動，倒びん有無，容器ブレッシャの予測結果から，チェン速度分布やガイド形状のより良い案を選択するために，単列化性能や倒びんリスクを評価する指標を見出した。この指標は実機の評価試験にも活用し，その有効性を確認した。

- (1) 集合容器単列化の所要時間及び倒びん確率

40個程度の容器集合をコンバイナ入口の供給コンベア上に置き，全容器が単列化を完了するまでの時間を求める。また，倒びん判定にかかった容器個数の，全体数に対する割合を倒びん率とする。単列化時間が短いほど単列化の能力が高く，また倒びん率が低い程，安定搬送の信頼度が高いと判断できる。

- (2) 連続搬送容器がコンバイナガイドに接する個数分布

約500個の容器集合を供給コンベア上に長手方向に並べ，コンバイナ上で各容器がガイドと接する多列チェンの位置を求める。供給コンベアガイドから最も離れた列にある容器（5層の千鳥配列であれば最上層5層目の約100個分）がどのチェン位置でガイドに接したかをカウントし，

その個数分布を表示する。個数分布の中心が上流側に近いほど，容器集合の崩壊が速やかであり，単列化の能力が高いと評価できる。

4.3 容器単列化のための設計思想

コンバイナ上の集合容器の崩壊，単列化に至る過程に関してこれまでの解析及び実験結果から，以下の知見を得た。

- (1) 直線ガイド上で前後に密着した容器列には上層の容器は割り込めない。多列チェンの速度差が，ガイドの凸状曲率が必要である。
- (2) 供給コンベア上の最上層の容器は，多列チェンによる摺動力を最初に受け，(1)の理由から容器集合先端に向かって常に加速され，倒びんを起こしやすい。したがってガイド傾斜や多列チェン速度差は小さく採る必要がある。

上記(1)を突き詰めてガイド形状を湾曲させ，速度差を付ければ機長は短縮，単列化の時間短縮となり，より高速化が図れる形になる。供給コンベアガイド沿いの容器が2層程度の場合はこれは成り立ち，かつガイド形状や多列チェンの速度差は合理的に定められる。しかし2層程度では供給コンベア速度が速くなりすぎ，入り口部での倒びんの危険が高いと判断される場合はおのずと4～6層の容器集合が多列チェンに押し出される形となる。その場合は上記(2)の条件を考慮して，容器集合の挙動に対するガイド角度，チェン速度差の実績値を参考に設計を行い，シミュレーションにより倒びんリスクの評価と改良を行いながら設計を進めることができる。

5. 高速化，機長短縮設計と実験検証

5.1 シミュレーションによるコンバイナ設計

対象となる容器の倒びん限界速度からガイド角，チェン速度許容値を算出する。

搬送速度に応じた容器の入口段数と出口速度，チェン速度差を同一としてチェン列数を選び，各チェン速度を決定する（ギア比を考慮する）。

各チェン別ガイド角からガイド形状を決め，基本仕様を決定する。

シミュレーションで最適条件を求める（単列化時間，倒びん率，ガイド接触個数分布）。

今回は従来設計による既存機も参考にして，幾つかのガイド形状，チェン速度分布の案を作成し，高速化，機長短縮につながるものを選定した。

5.2 単列化性能，信頼性の実験検証

ガイド形とチェン速度分布を変えた設計案の数ケースについて単列化性能の指標を実験でも求め，シミュレーション結果を検証するとともに，よりコンパクト，高性能のコンバイナ案を見出した。

図8は，8本×5層の千鳥配列容器がコンバイナ上で単列化が進む状況のビデオ画像の例である。チェン速度分布は連続稼動と同一条件とし，全容器がガイド沿いに単列化する瞬間までの時間と倒びんがあればその本数を記録，これを各仕様毎に複数回実施した。実験した数ケースについて単列化の所要時間を解析と比較した結果を図9に示す。両者は10%

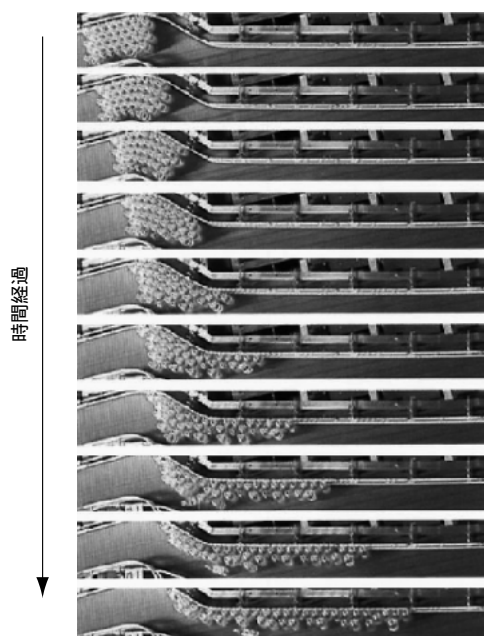


図8 コンバイナによる集合容器単列化の実験
供給された容器集合が時間とともに崩壊し、
単列化が進む状況を示す。

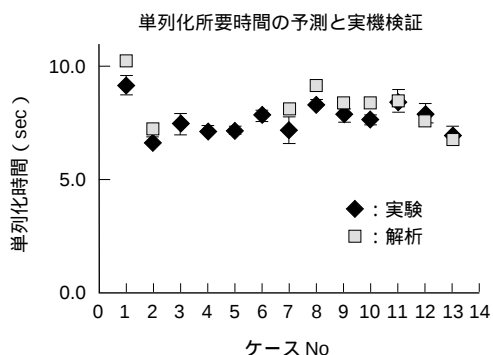


図9 各種コンバイナ単列化時間の比較
ガイド形状とチェーン速度の組合せ数ケースの単
列化所要時間をシミュレーションと実験とで
比較した結果、10%以内の誤差で一致した。

以内の誤差で一致した。

図9中のケース13は単列化時間が最も短く、かつ倒びんはなかった。一方、ケース2～7は、ガイド形状の曲率中心が上流よりの形でチェーン速度差も大きく、単列化は短時間、短距離には出来たものの、倒びんの確率は高かった。解析上もケース13の倒びん率はケース2～7の1/4以下となり、実稼働時の倒びん率に対する解析上の指標値になることを確認した。

図10に連続搬送試験における容器のガイド接触位置の個数分布計測結果と解析との比較例を示す。連続搬送中の容器集合の最上層に印付き容器を挿入し、どのチェーンと接触したかを把握、それを繰り返す、チェーン位置に対する容器接触個数分布を求めた。一方、4～6層千鳥配列で搬送シミュレーションを行い、最上層の容器について同様に個数分布を求めた。最も接触確率の高いチェーンは図中に示すM51であることで解析と実験は一致した。ただし実験した毎分800本及び900本の2条件に対して、毎分800本の結果の方が解析に近

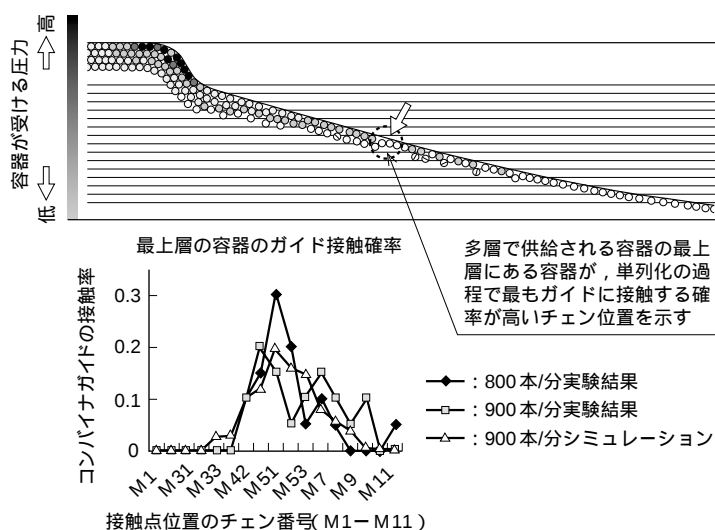


図10 多列チェーンガイドの容器接触個数分布
供給される容器集合の最上層にある容器が、多列チェーンのどのガイドと接触するかを実験とシミュレーションで求め、接触する確率の高いガイド位置について両者はほぼ一致した。

く、毎分900本の条件では単列化位置がM51より下流になる確率が高いことを示唆している。これは毎分900本以上の高速条件ではガイド沿いの容器挙動が不安定となり、容器底面とチェーンが一樣に密着しているとする解析モデルの前提が崩れたためと推定する。

6. ま と め

経験則主体で構築されてきた容器搬送技術を動力学の視点で体系化し、解析コードを整備した。これをコンバイナの設計に活用し、机上での搬送性能やリスク評価手段としての妥当性を実証し、同時に、新規設計コンバイナで従来比20%の機長短縮、0.5 ml 空びん対象で従来仕様毎分600本の能力に対し毎分900本の高速化を達成した。本手法はこうした搬送機械の設計のみならず、より高速化、多様化の進む飲料プラントの搬送ライン設計手段として、個々の顧客の要望にかなった経済性、信頼性の高い飲料生産プラントの開発に活用していく。

参考文献

- (1) 平林ほか、飲料充填ラインにおける搬送容器挙動の予測技術、三菱重工技報 Vol.37 No.4 (2000) p.174
- (2) 平林ほか、飲料生産プラントにおける搬送容器の挙動予測、日本機械学会講演会 Dynamics & Design Conference 2000, No.522



平林正志
技術本部
名古屋研究所
食品機械・エンジン
研究室主席



越智真弓
技術本部
高砂研究所
構造研究室



長山弘之
産業機器事業部
食品包装機械設計課