進化する紙幣の搬送技術とシミュレーション

山縣　遵（やまがた　まもる）　高野　幸裕（たかの　ゆきひろ）　川崎　哲治（かわさき　てつじ）

1　まえがき

富士電機は，券売機用紙幣入出金機として 1996 年に「TB1000」を発売し，発券場での自動化および業務の効率化に貢献してきたが，より高速で，より大容量の収納ができる機種を求める顧客ニーズに応え，前述の TB1000 の後継機として 2001 年に券売機用高速紙幣入出金機「TB 2000」を開発した。

また，海外向け紙幣・封筒入金機「BEDU」を 1998 年に，スペインから展開して，タイ，中国そしてユーロへと各国紙幣の対応を図り，シリーズ化をしてきた。

さらに，スーパーマーケットやガソリンスタンドなどの用途に合わせて POS（Point Of Sales）と連動する硬貨・紙幣一体型の自動つり銭機のシリーズ ECS02，ECS03 を 1999 年から発売した。レジ業務などのスピードアップ，セキュリティアップに貢献し，POS の標準周辺機器として普及してきた。

2　技術の推移

(1)　プッシャ集積方式（TB1000）

いったん収納した紙幣をつり銭としてリサイクルし払い出すため，収納庫に整列集積させる必要がある。そこで，収納紙幣に影響しないように，搬送路から収納庫にプッシャで押し付け整列集積させる方式が「プッシャ集積方式」である。

(2)　各国紙幣の繰出し搬送性（BEDU）

紙幣には国柄があり，紙質や印刷の違いにより官封券の状態でも摩擦係数が異なる。さらに，日常の扱いに国民性があるので，流通券の摩擦係数の違いは繰出し特性に影響する。各国向けを，統一仕様で対応している BEDU では，この点が特に問題となった。スペインのよれ紙幣から官封券，およびタイ・中国の油じみた紙幣など，さまざまな摩擦係数 μ の違う各国紙幣の繰出し搬送性を，シミュレーションを用いて解析し，各国紙幣への対応を可能とした。

(3)　紙幣搬送安定性（ECS02，ECS03）

硬貨紙幣一体型の自動つり銭機は，店舗のレジに置かれるのでコンパクトで静かでなければならない，装置を小型化するには，紙幣は急カーブを切って搬送されなければならない。このような場合，使用済みの紙幣や折れ札がカーブで詰まりやすい。そこで，シミュレーションを用いて折れ紙幣の挙動を解析し，紙幣搬送の安定性を向上させた。

(4)　高速集積（TB2000）

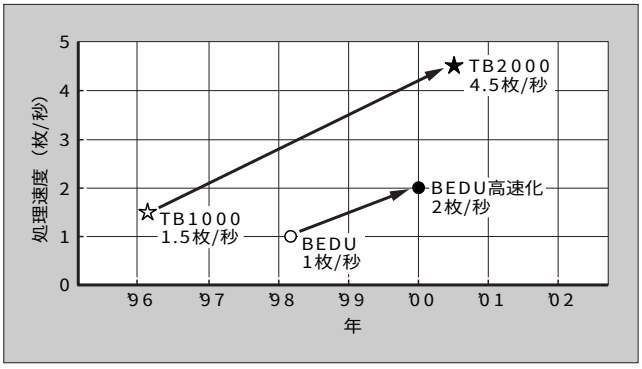
従来の「プッシャ集積方式」では集積時間がネックで入金処理枚数が 1.5 枚/秒と処理時間に限界があった。

今回，高速集積としてオーバラップローラを用いた新規「コシ付け投入れ集積方式」を開発したことで入金処理枚数が 4.5 枚/秒となり，処理スピードを大幅に向上させることができた。この方式は，互いに段違いになっている三つのローラから構成され，中央のフィードローラが紙幣を下に押し付けながら搬送し，両側のオーバラップローラが紙幣の端を持ち上げてコシを付ける。これにより，紙幣は折れ曲がらずに収納庫上に搬送〔飛翔（ひしょう）〕される。その後，落下してすでに集積されている紙幣の影響を受けずに集積収納される。

この集積時の紙幣の挙動を，シミュレーションを用いて解析し，新規「コシ付け投入れ集積方式」を確立した。

処理速度の変遷を**図 1** に，対応紙幣と摩擦係数の変遷を**図 2** に示す。

図 1　処理速度の変遷（長手搬送）



山縣　遵

流通・金融関連機器の開発設計に従事。現在，信州富士電機(株)技術部主任。

高野　幸裕

通貨関連機器の研究開発に従事。現在，(株)富士電機総合研究所機器技術研究所。精密工学会会員，計測自動制御学会会員。

川崎　哲治

通貨関連機器の研究開発に従事。現在，(株)富士電機総合研究所機器技術研究所グループマネージャー。電子情報通信学会会員，精密工学会会員。

3　シミュレーション

紙幣の柔軟性を解析できる大変形弾性体モデルを開発した。以下にモデルリング手法の詳細とシミュレーション適用事例を紹介する。

3.1　紙幣のモデリング方法

紙幣を小さな剛体に分割し，それらを**図3**に示すばねとシェル要素で連結した。**図3**(a)のばねはたわみ変形を，(b)はねじりを，(c)のシェル要素は伸縮と面内せん断を，(d)のばねは面内回転をモデル化したものである。

それぞれのばね定数は次のようになる。

$$K_r = \frac{2EI}{L_0}, \quad K_t = \frac{\alpha b h^3 G}{L_0}, \quad K_{rp} = \frac{2EIy}{L_0}$$

E ：縦弾性係数
I ：断面ニ次モーメント
L_0：隣り合った微小剛体間距離の自然長
G ：横弾性係数
b ：幅
h ：厚さ
$\alpha = 1/3 - 0.21h\,(1 - h^4/12b^4)\,/b$
I_y ：y 軸方向の断面二次モーメント

3.2　シミュレーション適用事例

3.2.1　高速集積

高速集積としてオーバラップローラを用いた新規「コシ付け投入れ集積方式」機構を**図4**に示す。

連続で高速搬送されてくる紙幣同士の干渉をできる限り抑えるため，シミュレーションを用いて集積時の紙幣挙動を定量化した。また，紙幣の飛翔を再現するため，**図5**に示すように空気の動圧抵抗が微小剛体ごとに垂直に作用す

図2　対応紙幣と摩擦係数（長手搬送）

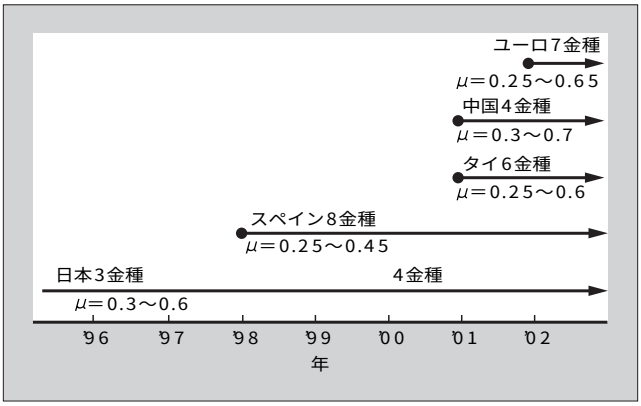


図3　紙幣モデル

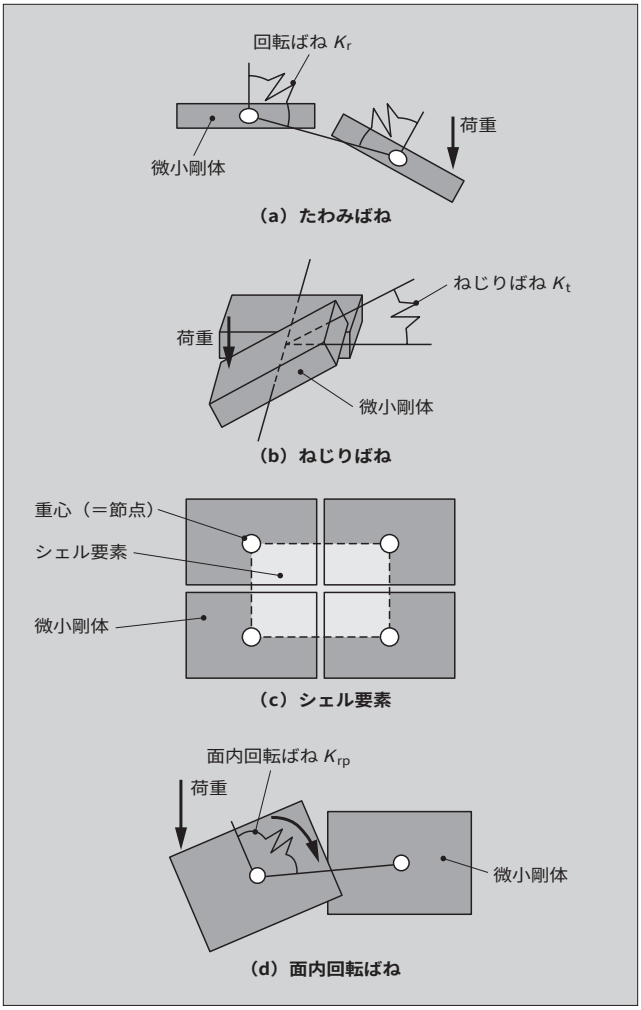


図4　高速集積機構

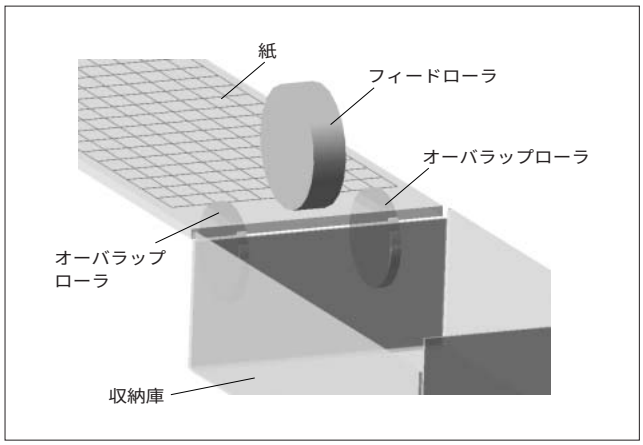
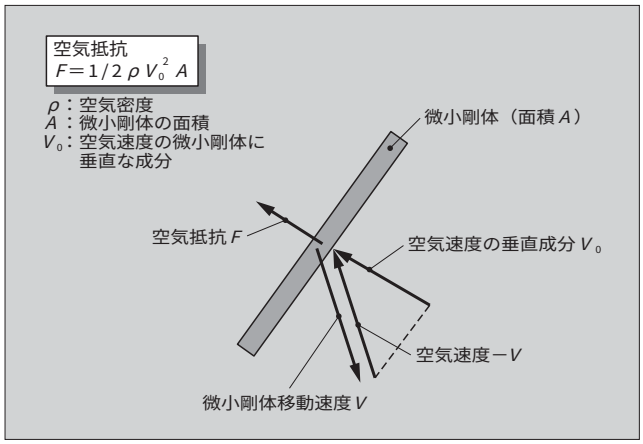


図5　空気抵抗



るようにモデル化した。

その結果，**図 6** に示すように一連の挙動を解析できた。また，搬送途中の紙幣先端の変形量が誤差 16 %（1.4 mm）で一致し，水平な飛翔により上から順序よく集積できた。このモデルを用いて最適な紙幣変形量を検討し，集積の高速化が図れた。

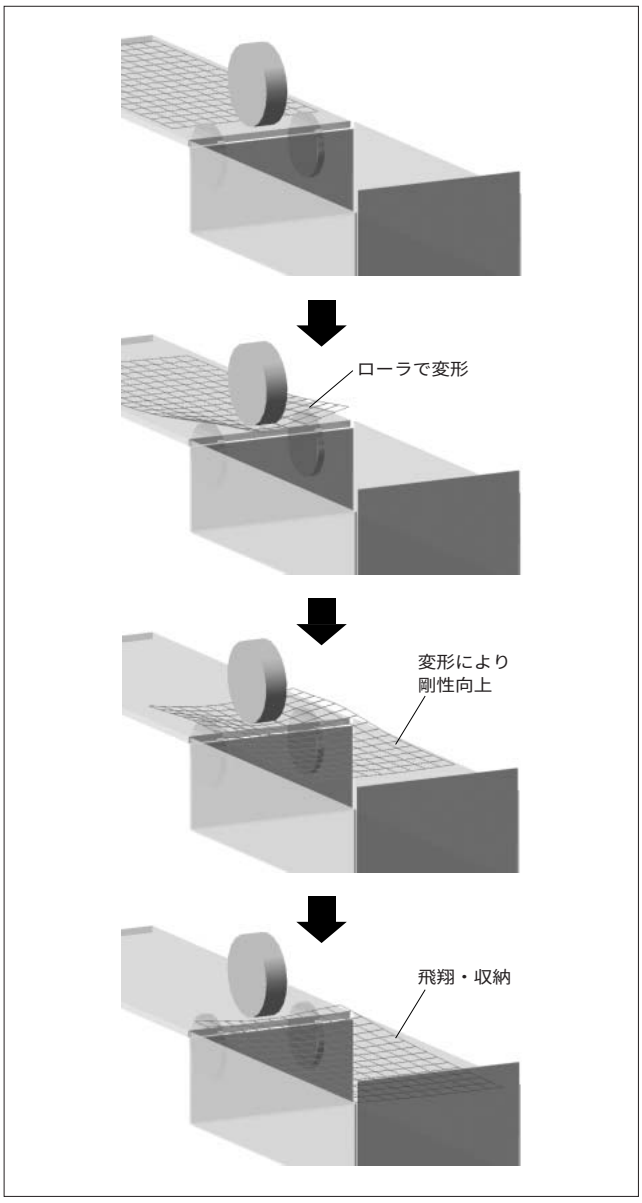
3.2.2　紙幣繰出し搬送性

図 7 に紙幣繰出し搬送機構の構成を示す。集積された紙幣はキックローラで搬送され，阻止ローラ（回転固定）とフィードローラで挟まれた部分で一番下の紙幣 1 枚だけに分離され，引抜ローラで繰り出される。

この機構では紙幣に働く摩擦力の差を利用して分離を行う圧接分離方式を用いている。圧接分離方式では，紙幣と阻止ローラ，フィードローラ間の摩擦係数が次式を満たすように作られている。

紙幣ーフィードローラ μ_f ＞紙幣ー阻止ローラ μ_s ＞紙幣ー紙幣 μ_p

図６　高速集積機構シミュレーション結果



この方式において各国紙幣の摩擦係数に対応し，安定した分離繰出しを実現するため，圧接分離方式による紙幣挙動をシミュレーションを用いて定量化した。

阻止ローラと紙幣との面接触をモデル化するため，**図 8** のように阻止ローラ外周に複数の接触点を配置し，これらをばね支持することで，弾性体モデルを構築した。

また，阻止ローラと紙幣との摩擦係数は接触荷重により変化する。そこで，摩擦係数を荷重の関数として定義し，各接触点に設定した。これにより，荷重が高い接触面中心付近は摩擦係数が低く，荷重が低い接触面端部は摩擦係数が高くなる。

阻止ローラ荷重，搬送速度などをパラメータとして，シミュレーションを行った結果，**図 9** のように分離，重送を再現できた。また，阻止ローラにより繰り出されなかった紙の先端位置は誤差 13 %以下（1.4 mm 以下）で実機と一致した。このモデルを用いて各国紙幣の摩擦係数にて紙幣挙動を検討し，繰出しの安定化が図れた。

3.2.3　紙幣搬送安定性（折れ紙幣搬送）

金銭処理機ではきれいな紙幣だけでなく，流通中のさまざまな紙幣をも扱う。折れ札を搬送してもつまらない搬送路を構成するため，シミュレーションを用いて折れ紙幣の挙動を解析した。**図 10** は金銭処理機内の紙幣搬送路をモデル化したものである。

折り目がついた紙幣の後端を押して 2 枚の円弧状のガイドのすきまを搬送する構成とした。紙幣の折れ癖は**図 11** に示すように，折れ部の回転ばねに初期角度を設定して折れ形状をモデル化した。

図７　分離繰出し機構

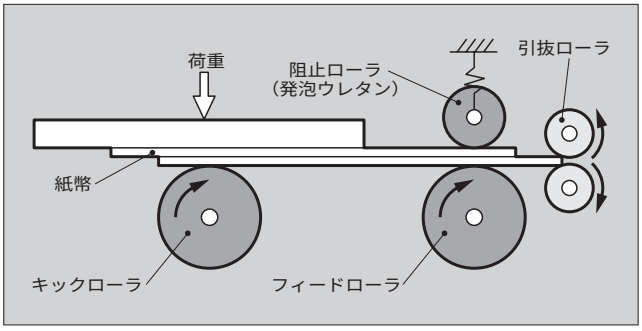


図８　阻止ローラの摩擦分布モデル

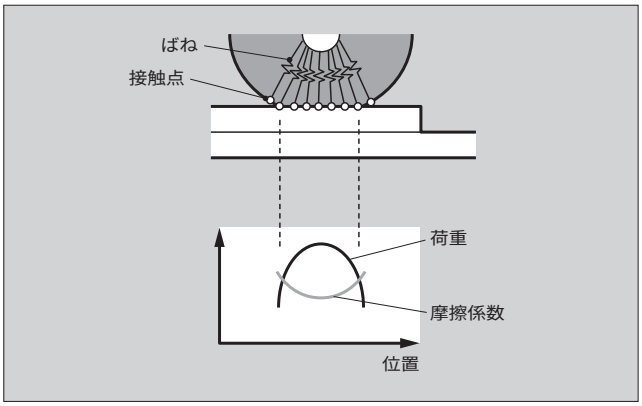


図９　分離繰出し機構シミュレーション結果

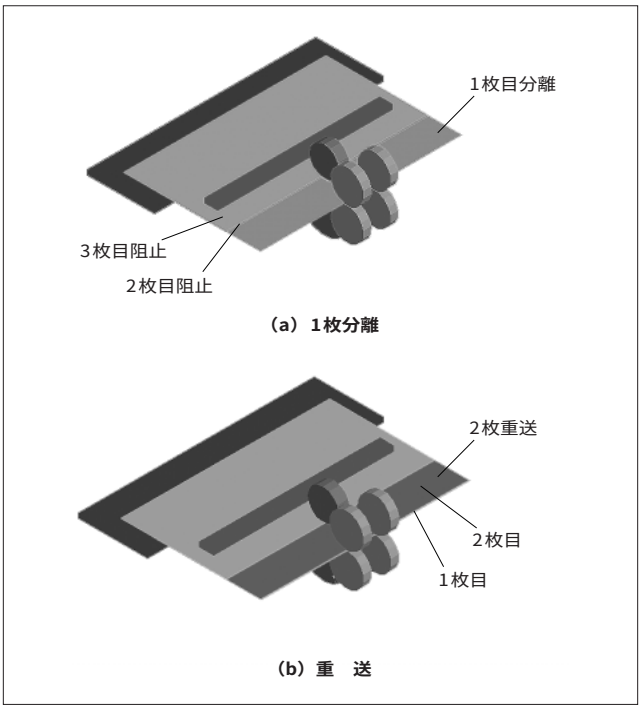


図10　紙幣搬送路モデル

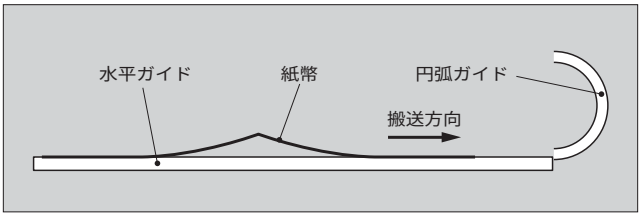
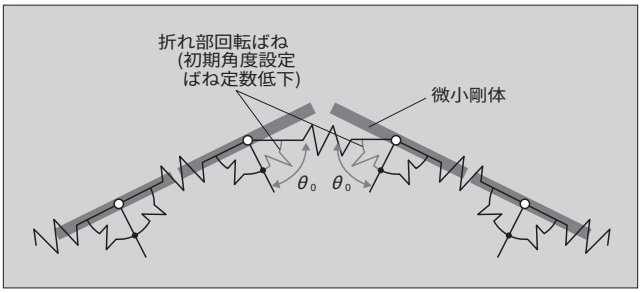


図11　折れ部のモデリング



また，**図12**に示すように折れ部のヤング率は折り曲げ回数に応じて低下するので，この回転ばねのばね定数（$K_r = 2EI/L_0$）も低下したヤング率から求めた。

その結果，**図13**に示すように，ガイドの半径が小さくなると，先端が止まって座屈し，紙幣のつまりを予測することができた。このモデルを用いて最適な搬送路を検討し，小型化，信頼性向上が図れた。

図12　折れ部物性値（実験値）

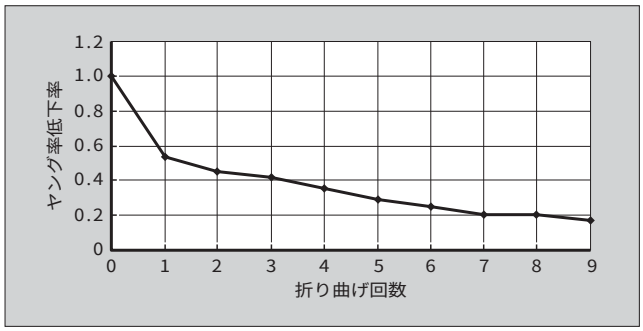
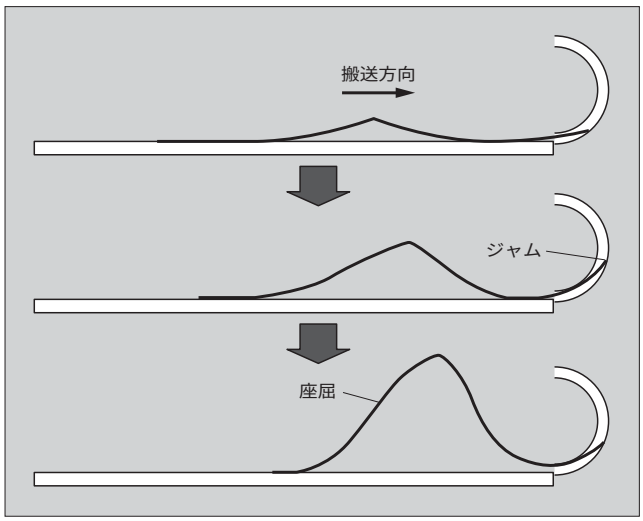


図13　搬送機構シミュレーション結果



4　あとがき

紙幣搬送の究極の形としてよくいわれることの一つに，紙幣は折り畳んだり丸めたまま，硬貨ともども一括して投入するというものがある。また，券売機やレジでの行列を思い起こせば，金銭処理装置のスピードはもう十分ということはない。今後とも紙幣搬送シミュレーション環境の整備を通じて，紙幣の搬送技術の向上に努める所存である。

参考文献

(1)　山本健明ほか．紙の搬送ガイドとの衝突による動的変形解析．日本機械学会第12回計算力学講演会講演論文集．no.99-５，1999，p.311-312.

(2)　山本健明，川崎哲治．紙の３次元動的変形解析．日本機械学会第13回計算力学講演会講演論文集．no.00-17，2000，p.527-528.

(3)　高野幸裕ほか．オーバラップローラを用いた収納機構での紙の３次元動的変形解析．日本機械学会第14回計算力学講演会講演論文集．no.01-10，2001，p.41-42.

e-Front runners

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。