菓子供給機に関する研究*

佐伯 暢 人^{*1}, 本間 克 美^{*2}
宮澤 泰 人^{*2}, 高野 英 資^{*3}

Study on Confectionery Feeder

Masato SAEKI^{*4}, Katsumi HONMA,
Yasuhito MIYAZAWA and Eisuke TAKANO

^{*4} Niigata Institute of Technology, Dept. of Mechanical and Control Engineering,
Fujinashi, Kashiwazaki, Niigata, 945-1195 Japan

The vibrotransportation of confectionery is studied both experimentally and analytically. Using two types of the rice cracker and the vibrating plates, experiments were performed. Attention is focused on the vibroimpact system between the rice cracker and vibrating surface. It is shown that the conveying velocity of the rice cracker depends on the frequency and amplitude of the vibratory input as well as various physical parameters. The rice cracker is assumed to be a mass point for simplicity of analysis. By comparing the experimental with calculated results, the conveying velocity obtained by this method appear realistic.

Key Words: Nonlinear Vibration, Frictional Vibration, Materials Handling Equipment, Numerical Analysis, Transport, Vibratory Conveyor, Collision

1. 緒 言

近年、消費者の高級化志向と商品の品質を保持する目的から個々に袋詰めをしたお菓子が好まれるようになってい。一般に、その生産工程においては、仕分け・整列作業に多くの人手を必要とし、人件費等のコスト面で大きな問題を抱えている。そこで、この問題を解決するために、生産工程の自動化が強く望まれるようになり、それを実現する方法のひとつとして、振動輸送が注目されるようになってい。現在、振動輸送は、量産部品や原材料の輸送・供給装置として幅広い分野で利用されており、理論的にも実験的にも古くから研究が行われている^{(1),(2)}。しかしながら、そのほとんどが精密機器部品や電子部品などのように品物を損傷させずに輸送する方式を対象としていることから、振動台との衝突を考慮しないすべり運動のみの解析が行われてきた。それに対して、お菓子などを輸送する場合、輸送速度を増加させる目的から、積極的に輸送

対象を輸送面に対して、飛び跳ねさせながら輸送が行われる。輸送対象と振動台との衝突運動を考慮して、その運動の周期性と安定性を論じた研究も行われている^{(3),(4)}が、輸送速度の解析や実験的な検討は行われていない。そこで、本研究では、お菓子の中でも、特に、せんべいに着目し、その振動輸送に関して、理論的、実験的な研究を行った。実験においては、2種類のせんべいと輸送面を用いて、せんべいと輸送面との摩擦係数や振幅、振動数などの振動を操作する変数がせんべいの輸送速度に与える影響を明らかにした。理論解析においては、既に、佐伯らが粒状体の振動輸送について、粒子の衝撃運動を考慮した解析手法を提案している^{(5),(6),(7)}が、解析が多少複雑であり、粒子モデルの形状も限定されているため、その手法は本研究には不向きである。そこで、本研究では、せんべいを質点とみなし、その輸送速度を簡便に計算する手順を導き、解析結果と実験との比較を行い、解析手法の妥当性について検討した。以下にその結果について報告する。

2. せんべいの振動輸送

振動輸送は振動台上に物体を載せて、一方向に搬送する装置である。図1はそのモデルを示しており、角

* 原稿受付 1999年5月12日。

^{*1} 正員、新潟工科大学(〒945-1195 柏崎市藤橋1719)。

^{*2} 日本精機(株)(〒940-0021 長岡市城岡3-2-16)。

^{*3} 正員、新潟大学工学部(〒950-2181 新潟市五十嵐2の町)。

E-mail: saeki@mce.niit.ac.jp

度 α だけ傾いた振動台は水平に対して角度 β の方向に往復直線振動する。今、振動台の上にせんべいを載せると、せんべいは振動台の上下方向の振動により空中に跳ね上げられる。再び、せんべいが落下して振動台に衝突するとき、物体は振動台から摩擦力を受けて、振動台上を移動する。これが繰り返されることによって、せんべいは振動台上を移動する。ここで、せんべいの質量は振動台に比べて十分に小さく、振動台はせんべいの輸送状態に関わらず、一定の正弦振動をするものと仮定する。図1に示すように x - y 座標系をとれば、時刻 t における振動台の x - y 両軸方向の位置 X , Y は式(1)で表される。

$$\begin{aligned} X &= a \cdot \cos(\beta - \alpha) \sin \omega t \\ Y &= a \cdot \sin(\beta - \alpha) \sin \omega t \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 a , ω はそれぞれ振動台を振動させるときの振幅と角振動数を示す。

Fig. 1 Model of a vibratory conveyor

Fig. 2 Experimental setup and measuring system

Fig. 3 Shape of rice cracker

3. せんべいの輸送実験

3・1 実験装置 図2に実験装置の概略を示す。振動台を角度 β に傾けた振動試験器に取り付け、任意の振幅、振動数で振動を加えて、振動台上のせんべいを輸送する実験を行った。摩擦係数がせんべいの輸送に与える影響を考慮できるように、輸送面は2種類の異なる加工を施したステンレス板(Surface A, B)を使用した。振動台上を動くせんべいの挙動はCCDビデオカメラで撮影し、その画像を1/15秒ごとにパーソナルコンピュータに差し込んだ画像処理ボードにより、デジタル信号に変換し、メモリー内に取り込んだ。さらに、運動解析ソフトを用いて、入力された画像データからせんべいの移動量を計測した。

Fig. 4 Size of rice cracker

Table 1 Size of rice cracker

Type(A)	p	45mm
	q	97mm
	h	15mm
Type(B)	p	30mm
	q	85mm
	h	20mm

Table 2 Coefficients of friction and restitution

Coefficient of friction	Type(A)	Surface A	0.50
		Surface B	0.10
	Type(B)	Surface A	0.34
		Surface B	0.10
Coefficient of restitution			0.53

3・2 せんべいの特性 図3は実験に使用した2種類のせんべいとその質量を示している。また、その大きさを図4及び表1に示す。いずれのせんべいも一つ一つの形や大きさがわずかに異なるが、10個ずつのせんべいの寸法を計測し、その平均値を示した。

3・3 摩擦力と反発係数 せんべいと輸送面との間の摩擦係数や反発係数はせんべいの輸送速度に大きな影響を与えることが予想される。表2は実験に使用したせんべいと輸送面との摩擦係数と反発係数の計測結果を示している。摩擦係数の計測においては、傾斜角を任意に変更できる専用の傾斜台を製作し、せんべいがその傾斜面をすべり出す角度から摩擦係数を算

Fig. 5 Effect of vibrating surface ($\alpha=2^\circ$, $\beta=15^\circ$ and Type (A))

出した。振動輸送を論じる場合、静止摩擦係数と運動摩擦係数の両方を用いるのが妥当であるが、後者の測定が困難なことから、静止摩擦係数のみを使用した。反発係数の測定においては、Type (A) のせんべいと Surface A のステンレス板を用いて自由落下試験を行い、その跳ね具合から反発係数を算出した。ハイスピードカメラを用いて、せんべいが落下から跳ねあがるまでの様子を 1/250 秒毎に撮影し、画像処理装置によって、せんべいの挙動を計測した。反発係数はせんべいや輸送面の種類に影響を受けるものと予想されるが、本研究ではその違いが微小であるとみなし、後述する解析に利用する。

3・4 実験結果 次に、せんべいの輸送を操作する変数などがその輸送速度にどのような影響を与えるかを実験的に検討する。図5は振動台を振動させるときの振幅 a がせんべいの輸送速度に与える影響を調べた図である。せんべいは Type(A)を用い、2つの輸送面を用いて実験を行った。縦軸に示したせんべいの

Fig. 6 Effect of the angle α (Type (A))

Fig. 7 Effect of direction β of vibration (Type (A))

輸送速度については、せんべいが2秒間に振動台上を移動した距離と時間の関係をプロットし、両者の関係を時間に対する一次式で近似し、その傾きから輸送速度を求めた。図中に示す一点鎖線は後述するように、せんべいが輸送中に振動台上を飛び上がるか否かを示す境界値で、それより振幅 a が小さいとせんべいは輸送中に振動台を飛び上がらない範囲である。また、図は上から順に振動台を振動させるときの振動数 f を大きくしている。図から振幅 a を増加すると、輸送速度が単調に増加することがわかる。また、振動数 f を大

Fig. 8 Effect of the type of rice cracker
($\alpha = 2^\circ$, $\beta = 15^\circ$ and Surface A)

きくした場合についてもせんべいの輸送速度が増大する。さらに、摩擦係数の大きい輸送面 Surface A を用いると、振幅 a や振動数 f の値に関わらず、摩擦係数の小さな輸送面 Surface B に比べて、輸送速度が大きくなっていることがわかる。図 6 は振動台の傾斜角 α がせんべいの輸送速度にどのような影響を与えるかを調べた図である。縦横の両軸は図 5 と同様であり、下図が振動数 f を大きくとった場合である。せんべいは Type(A) を用い、輸送面には Surface B を用いた。振動台の傾斜角 α が大きくなると輸送速度は減少する。これは、傾斜がきつくなるほど、せんべいが上りずらくなるということであり、容易に想像できる現象である。また、振動数 f を大きくすると、その傾向が大きく現れている。図 7 は振動角 β がせんべいの輸送速度にどのような影響を与えるかを調べた図である。せんべいは Type(A) を用い、輸送面には Surface A を用いた。図中に示す一点鎖線は $\beta = 15^\circ$ の場合にせんべいが輸送中に振動台を飛び上がるか否かを示す境界値である。 $\beta = 30^\circ$ ではその境界値が $a < 0.3\text{mm}$ であり、常に、せんべいは振動台を跳ねながら輸送される範囲である。図 7 上図から、振動角 β を大きくすると、振動の振幅 a の増大に伴って、増加するせんべいの輸送速度の割合が減少する傾向にあることがわかる。図 7 下図と比べると、振動数 f を大きくすると、振動角 β がせんべいの輸送速度に与える影響が少なくなっていることがわかる。図 8 は Type(A), (B) の 2 つのせんべいを用いて、それらの輸送速度を比較した結果を示している。

輸送面には Surface A を用いた。図中に示す一点鎖線は、せんべいが輸送中に振動台を飛び上がるか否かを示す境界値である。いずれのせんべいについても、振幅 a や振動数 f を増加すると、輸送速度が増加する。また、図示した振幅 a のほぼ全範囲で摩擦係数の大きい Type(A) のせんべいが Type(B) に比べて輸送速度は大きくなっている。さらに、振動数 f を大きくすると、その傾向はわずかに大きくなっている。この傾向は輸送面の違いが輸送速度に与える影響を調べた図 5 と同様である。せんべいの種類による輸送速度への影響は主に摩擦係数によるものと見なして良いようである。以上のことから、振幅、振動数などの振動を操作する変数や摩擦係数などは輸送速度に大きな影響を与えていることが理解できる。

4. 理論解析

4・1 すべり運動 次に、せんべいの振動輸送について、理論的に検討する。本研究では、より簡便にせんべいの輸送速度を算出することを目的として、せんべいを質点とみなして、輸送挙動の解析を行う。図 1 に示した振動輸送のモデル図において、 x , y をせんべいの座標とすると、せんべいの運動方程式は次式となる。

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= -F - mg \sin \alpha \\ m\ddot{y} &= R - mg \cos \alpha \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 m はせんべいの質量、 g は重力加速度、 R はせんべいが振動台から受ける抗力、 F は摩擦力である。ドットは時間 t による微分を示す。

せんべいが振動台から飛び上がらない場合には $y = Y$ が成り立つので、式 (1), (2) より、

$$R = m(\ddot{Y} + g \cos \alpha) \quad (3)$$

したがって、せんべいが振動台上を飛び上がる場合の条件は、 $R \leq 0$ より、

$$K_e \sin \omega t \geq 1 \quad (4)$$

ここで、 K_e は輸送指標と呼ばれ、式 (5) で表される。 K_e は輸送速度を決定づける因子として一般に用いられているもので、これまでの振動輸送に関する多くの研究では輸送対象が輸送面を飛び上がることのない $K_e < 1$ の範囲内で検討が行われてきた。せんべいの輸送の場合、それに比べて、大きな輸送速度が要求されることから、本研究で扱う振動条件はすべて、 $K_e > 1$ を含めた範囲とした。なお、図 5～8 に一点差線で示した境界値は $K_e = 1$ となる値である。

$$K_e = \frac{a\omega^2 \sin(\beta - \alpha)}{g \cos \alpha} \quad (5)$$

せんべいが振動台上をすべることのないときは

$\dot{x} = \dot{X}$ が成り立つので、そのときには、せんべいに働く摩擦力を F_0 とすれば、 F_0 は、式 (1), (2) より、

$$F_0 = -m(\ddot{X} + g \sin \alpha) \quad (6)$$

したがって、摩擦係数を μ とすると、 F と R の間には次の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} F &= \mu R \quad \cdots \dot{x} > \dot{X} \\ F &= F_0 \quad \cdots \dot{x} = \dot{X} \\ F &= -\mu R \quad \cdots \dot{x} < \dot{X} \end{aligned} \quad (7)$$

式 (7) を考慮して、運動方程式 (2) を解くと、せんべいの運動は次の 3 つに分かれる。

(1) $\dot{x} < \dot{X}$ のとき 初期条件を $t = t_A$ で、 $x = x_A$, $\dot{x} = v_A$, $\dot{Y} = \dot{Y}_A$, $Y = Y_A$ とする。

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \mu(\dot{Y} + gt \cos \alpha) - gt \sin \alpha + v_{A0} \\ x &= \mu(Y + gt^2 \cos \alpha / 2) - gt^2 \sin \alpha / 2 + v_{A0}t + x_{A0} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、

$$\begin{aligned} v_{A0} &= v_A - \mu(\dot{Y}_A + gt_A \cos \alpha) + gt_A \sin \alpha \\ x_{A0} &= x_A - v_A t_A - \mu(Y_A - \dot{Y}_A t_A - gt_A^2 \cos \alpha / 2) \\ &\quad - gt_A^2 \sin \alpha / 2 \end{aligned} \quad (9)$$

(2) $\dot{x} > \dot{X}$ のとき 初期条件を $t = t_B$ で、 $x = x_B$, $\dot{x} = v_B$, $\dot{Y} = \dot{Y}_B$, $Y = Y_B$ とする。

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -\mu(\dot{Y} + gt \cos \alpha) - gt \sin \alpha + v_{B0} \\ x &= -\mu(Y + gt^2 \cos \alpha / 2) - gt^2 \sin \alpha / 2 + v_{B0}t + x_{B0} \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、

$$\begin{aligned} v_{B0} &= v_B + \mu(\dot{Y}_B + gt_B \cos \alpha) + gt_B \sin \alpha \\ x_{B0} &= x_B - v_B t_B + \mu(Y_B - \dot{Y}_B t_B - gt_B^2 \cos \alpha / 2) \\ &\quad - gt_B^2 \sin \alpha / 2 \end{aligned} \quad (11)$$

(3) $\dot{x} = \dot{X}$ のとき 初期条件を $t = t_C$ で、 $x = x_C$, $X = \dot{X}_C$ とする。

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \dot{X} \\ x &= X + x_C - X_C \end{aligned} \quad (12)$$

4・2 飛び上がる時の運動と衝撃運動 せんべいが振動台を飛び上がっているときには、せんべいは振動台から力を受けることはないので、 $R=0$ となり、式 (2), (7) から、

Fig. 9 Impact between rice cracker and vibrating surface

Fig. 10 y directional displacement ($a=0.30\text{mm}$)

Fig. 11 y directional displacement ($a=0.35\text{mm}$)

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= -mg \sin \alpha \\ m\ddot{y} &= -mg \cos \alpha \end{aligned} \quad (13)$$

振動台を飛び上がったせんべいは図 9 に示されるように、再び、振動台に衝突する。衝突時におけるせんべいの運動量の変化は次式となる。

$$\begin{aligned} m(\dot{x}_1 - \dot{x}_0) &= -\bar{F}\Delta t \\ m(\dot{y}_1 - \dot{y}_0) &= \bar{R}\Delta t \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、 $\dot{x}_0$, $\dot{x}_1$ はそれぞれ、衝突前後におけるせんべいの x 方向の速度であり、 $\dot{y}_0$, $\dot{y}_1$ は、それぞれ、衝突前後におけるせんべいの y 方向の速度である。また、 $\bar{F}\Delta t$, $\bar{R}\Delta t$ は、それぞれ、せんべいが振動台から受ける摩擦と抗力の力積であり、 Δt は衝突時間を示す。摩擦力の力積 $\bar{F}\Delta t$ は衝突直前におけるせんべいおよび振動台の x 方向の速度 $\dot{x}_0$ と $\dot{X}_0$ の大小関係によって決まるものとすれば、 $\bar{F}$ は次のように表される。

$$\begin{aligned} \bar{F} &= \mu\bar{R} \quad \cdots \dot{x}_0 > \dot{X}_0 \\ \bar{F} &= 0 \quad \cdots \dot{x}_0 = \dot{X}_0 \\ \bar{F} &= -\mu\bar{R} \quad \cdots \dot{x}_0 < \dot{X}_0 \end{aligned} \quad (15)$$

せんべいが振動台に衝突している時間は非常に微小であり、衝突時における振動台の y 方向の速度変化は無視できるものとすれば、 $\dot{y}_0$ と $\dot{y}_1$ の間には次の関係が成り立つ。

Fig. 12 Comparison of experimental and calculated results (Type (A) and Surface A)

$$\dot{y}_1 = -e\dot{y}_0 + \dot{Y}_0(1+e) \quad (16)$$

ここで、 e は反発係数、 $\dot{Y}_0$ はせんべいが振動台に衝突する直前における振動台の y 方向の速度である。

したがって、衝突後の x 方向の速度 $\dot{x}_1$ は、式(14)、(15)から

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \dot{x}_0 - \mu(\dot{Y}_0 - \dot{y}_0)(1+e) \quad \cdots \dot{x}_0 > \dot{X}_0 \\ \dot{x}_1 &= \dot{X}_0 \quad \cdots \dot{x}_0 = \dot{X}_0 \\ \dot{x}_1 &= \dot{x}_0 + \mu(\dot{Y}_0 - \dot{y}_0)(1+e) \quad \cdots \dot{x}_0 < \dot{X}_0 \end{aligned} \quad (17)$$

以上、振動輸送時のせんべいの挙動は、振動台の位置を示す式(1)とせんべいの運動を表す式(8)、(10)、(12)、(13)、さらに、せんべいが振動台に衝突するときの式(16)、(17)を用いることによって、計算することができる。

4・3 解析結果 図10、11は前述の諸式を用いて、せんべいの y 方向の挙動を計算した結果である。横軸には経過時間を取り、図中にはせんべいと振動台の y 座標をそれぞれ、実線と一点鎖線で記した。図10、11は振動の振幅をそれぞれ、 $a = 0.3\text{mm}$ 、 0.35mm とした。この図から、せんべいが振動台上を跳ね上がりながら輸送されること、わずかな振幅の増大で、その跳ね上がりの形態が変化する様子がよくわかる。なお、ここでは振動台上でせんべいの運動が周期的となる例を示した。振動条件によっては、その運動は定常状態となる前に振動台を飛び出すこともあるため、このような場合は周期性に関する検討は行っていない。

図12は2種類の振動数 f を条件として、振幅 a に対するせんべいの輸送速度の変化について、計算と実験との比較を行った結果である。せんべいはType(A)を用い、輸送面にはSurface Aを用いた。図に示すように、

いずれの振動数に関しても計算結果と実験結果は良好な一致を示していることがわかる。以上から、本計算はせんべいの振動輸送速度の予測に十分有効なものであるといえる。

5. 結 言

跳躍運動を積極的に利用するせんべいの振動輸送に関して、実験的、理論的に検討を行った。実験においては、2種類のせんべいと輸送面を用いて輸送実験を行い、理論的には質点による解析を行い、以下の知見を得た。

- ・振動の振幅や振動数の増大と共に輸送速度が増大する。
- ・振動数 f が45Hzの場合、振動の角度 β を大きくすると、輸送速度が減少するが、振動数 f を大きくすると、その傾向はうすれていく。
- ・振動台の傾斜角度を大きくすると、輸送速度は減少する。
- ・せんべいと輸送面との摩擦係数が大きいものほど輸送速度が増大する。
- ・本研究で提案する解析手順はせんべいの振動輸送速度の予測に十分有効なものであるといえる。

文 献

- (1) 谷口・坂田・鈴木・小山内, 機論, 28-188(1962), 485-492.
- (2) 岡部・横山・神保, 精密機械, 35-5(1969), 299-306.
- (3) 井上・宮浦・西山, 機論, 33-250(1967), 915-919.
- (4) Batat, C. N., Sankar, S. and Popplewell, N., Journal of Sound and Vibration, 108-1(1986), 99-115
- (5) 佐伯・皆川・高野, 機論, 63-615C(1997), 3817-3823.
- (6) 佐伯・高野, 機論, 64-625C(1998), 3257-3263.
- (7) 佐伯・皆川・高野, 機論, 64-625C(1998), 3264-3270.