技術論文

斜め回転ドラム型マイクロ波加熱・攪拌装置の改良

Improvement of a Microwave Heating Mixer, Diagonal Drum Type

武藤 彰男
Akio Muto

ミクロ電子株式会社
〒350-0833 埼玉県川越市芳野台 2-8-25

Micro Denshi Co., Ltd., 2-8-25, Yoshinodai, Kawagoe, Saitama
350-0833, Japan

e-mail address : muto@microdenshi.co.jp

キーワード: マイクロ波加熱、攪拌、均一加熱、サイクロイド曲線
Keywords: microwave heating, mix up, uniform heating, cycloid curve

Abstract

When we heat materials such as coffee beans or sesame over a fire, we usually stir them to get uniform heating. But it is not easy to do it in microwave applicator. If there is a stirring mechanism, unexpected sparks or discharges caused by microwave energy are generated around the mechanism. They are the loss of the energy and may damage both materials and applicator.

This is a new microwave heating mixer without stirring mechanism, and it can heat materials uniformly and efficiently with no sparks or discharges.

1. 緒言

コーヒー豆や胡麻などを火力で焙煎するとき、均一に加熱されるよう、品物を攪拌しながら行うのが普通である。

これらの食品をマイクロ波で加熱処理すれば、急速加熱による省エネが期待でき、またマイクロ波加熱でしか得られない特有の風味を与えられる可能性もある。

2. 攪拌式マイクロ波加熱装置の構造

攪拌しながら加熱するマイクロ波装置を設計製作するとき、考えられる構造の一つは Fig. 1 の様な形である。固定した金属製ドラム容器の底部に金属製アジテーターを設け、これをドラムの外に設けた駆動モーターで回して品物をかき混ぜる。マイクロ波漏洩防止のため駆動軸まわりにチョーク構造を設け、ドラムに

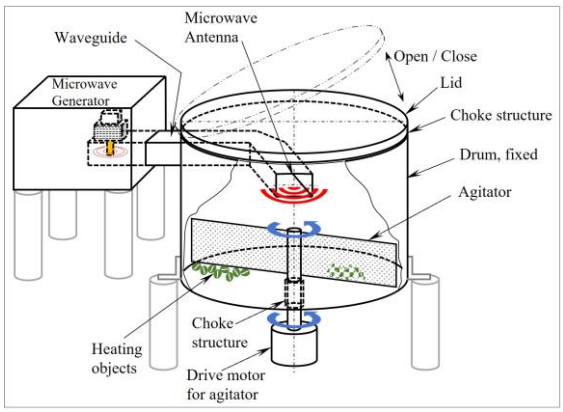

Fig. 1: Microwave heating mixer with agitator.

金属蓋を被せてマイクロ波を照射する方式である。

このとき、アジテーターとドラム円筒面との間、および アジテーターとドラム底面との間に隙間があると、品物は十分に攪拌されない。 (Fig. 2)

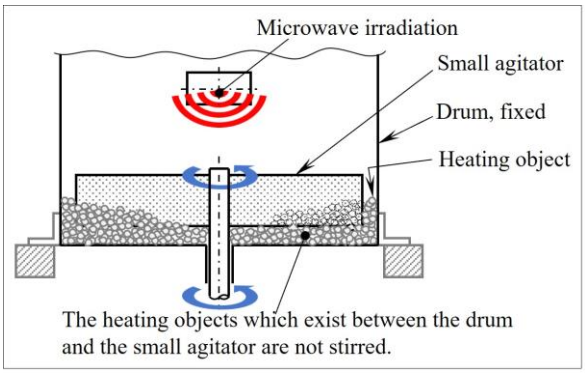

Fig. 2: Small agitator makes insufficient stirring.

攪拌性を上げるためにはアジテーターを大きくし、ドラム容器とアジテーターの隙間を小さくする必要がある。ところが、この小さな隙間でマイクロ波エネルギーによる放電やスパークが発生してしまう。(Fig. 3)

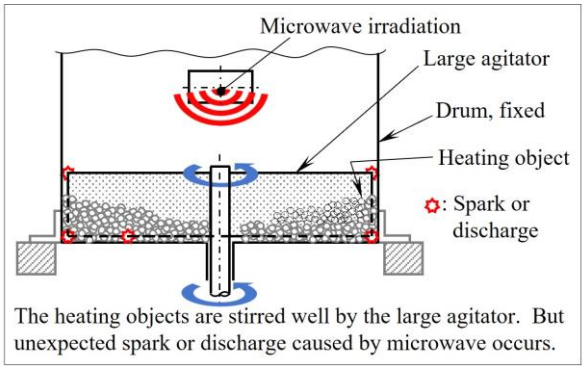

Fig. 3: Large agitator makes unexpected sparks at the gap.

実際の放電の様子を説明すると、例えば実験用マイクロ波加熱装置上で行ったものが Fig. 4 である。

[A] マイクロ波加熱室内に金属板(アルミニウム)と針金を 0.5mm 程度の距離を空けて設置する。

[B] 加熱室扉を閉じてマイクロ波を照射し、徐々にマイクロ波パワーを上げていくと、やがて針金先端と金属板の間で放電が発生する。
(安全のため、マイクロ波は直ちにオフにする。)

[C] 放電発生箇所は焦げる。

放電やスパークが起き続けると、やがて部材が破壊され、穴が開いてマイクロ波が漏洩する危険性もある。

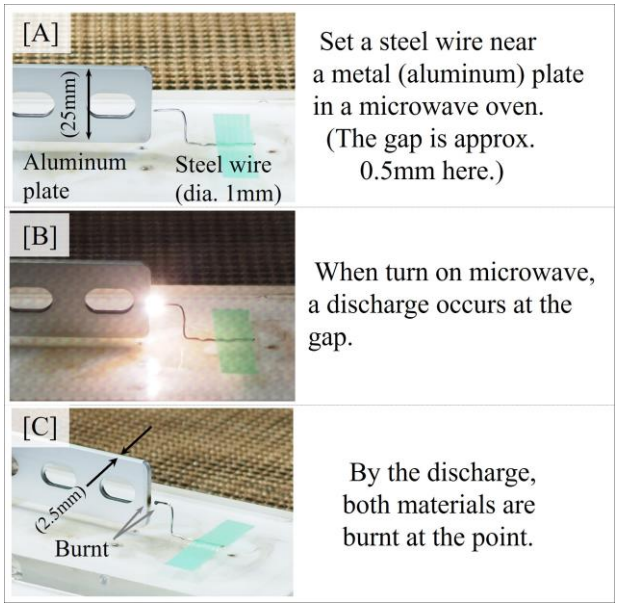

Fig. 4: A discharge occurs at the gap between metal parts.

また、加熱目的に生成されたマイクロ波エネルギーが放電やスパークに費やされてしまうのは、そもそも無駄である。 このように 安全と性能の両面から、マイクロ波加熱装置は、これらの発生を未然に防ぐ構造となるように設計する必要がある。 Fig. 1 のようなマイクロ波加熱装置で 攪拌性を確保し、かつ放電等が発生しないように成立させるのは、簡単ではない。

このような理由で、当社の実験用 攪拌式マイクロ波加熱装置は、 放電等の発生を防ぐために アジテーターを排除し、ドラムの円筒内面に金属板を複数枚 溶接するだけの、単純な構造にしている。(Fig. 5, Fig. 6)

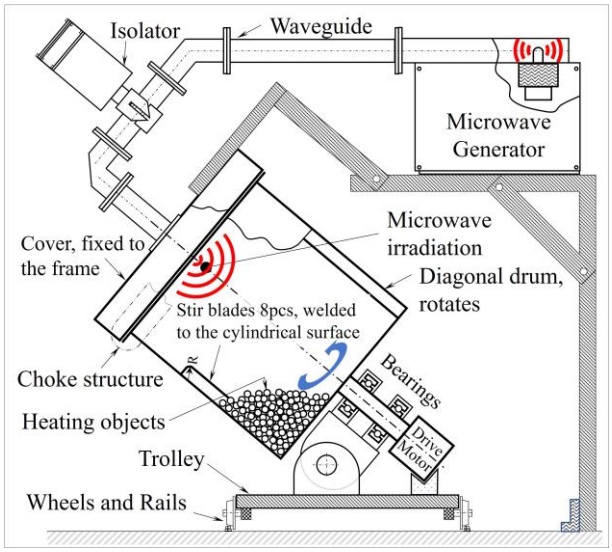

Fig. 5: Microwave heating mixer without agitator.

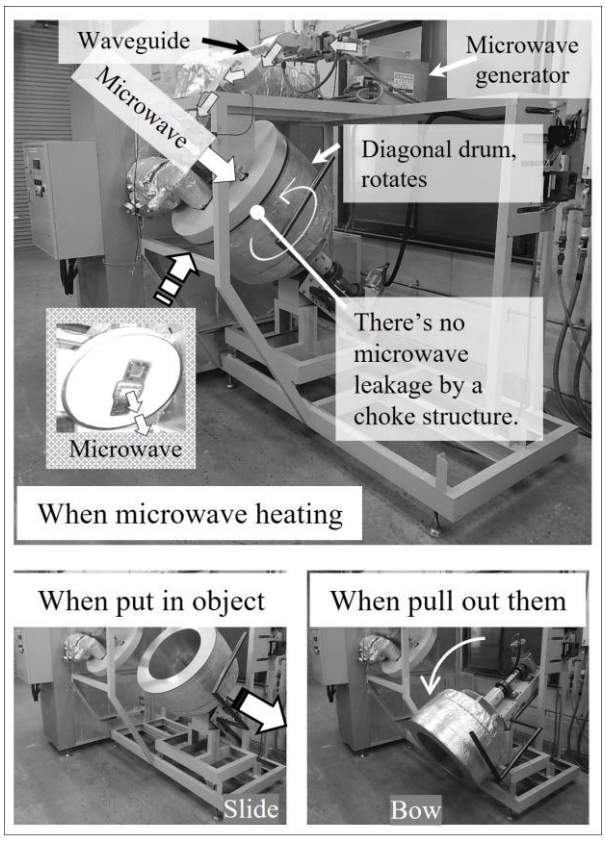

Fig. 6: How to operate the microwave heating mixer.

攪拌はドラムに直結したモーターによりドラムごと回転させ、ドラム中の品物を転がすことで行う。

一方、ドラムの蓋は架台に固定されており、回転しない。 マイクロ波は発振器から導波管を通じて固定蓋の下面へ導かれ、回転ドラム内へ照射される。

固定ドラム蓋と回転ドラム本体の間は 1cm 程度の隙間がある。 ここからマイクロ波が漏洩しないよう、 蓋とドラム本体との間に チョーク構造 と呼ばれるマイクロ波フィルターを設け、安全性を確保している。

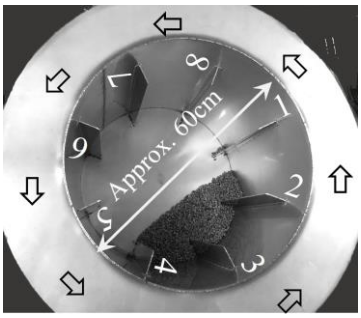

Fig. 7: Drum inside shape at the first

当初の攪拌は、Fig. 7 のように、円筒内面に溶接した掬い板8枚により行うものだった。ドラムの回転により品物は掬い上げられ、頂上手前に達すると重力によりドラム底板の斜面を滑り落ちる・・・この連続動作で攪拌させるのみである。

ドラム内は、他の部品が全く無いため、金属部品間の小さな隙間も無く、 放電・スパークの発生を防止できる。 それでも、尖った金属部分があると放電・スパークを誘発する場合があるので、8 枚の金属製掬い板は全て、コーナー部に丸みを持たせてある。 (Fig. 8)

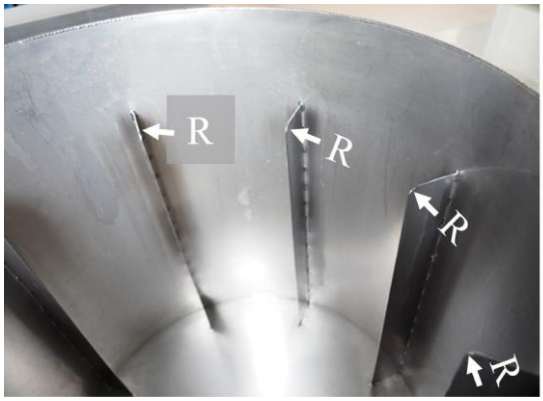

Fig. 8: All corners have a round shape to prevent sparks.

3. 性能上の問題

この装置に興味を持たれたユーザーに、コーヒー豆のマイクロ波焙煎試験を行って貰った。 勿論スパーク等は発生しなかったが、残念ながら出来た品物の評価は全然良くなかった。 ユーザーとしては、豆が均一にマイクロ波加熱されることが前提であり、最低でもそうなるように改良して欲しい、と強く要望された。

4. 対症的な対策

均一に加熱するには ドラム回転速度を上げれば攪拌性が上がり 解決すると考え、ドラム最高回転速度を 9 [rpm] ➡ 22 [rpm] に上げたが、 それでも足らず 22 [rpm] ➡ 35 [rpm] にアップさせた。

これらは駆動モーターの減速機を交換して対応した。

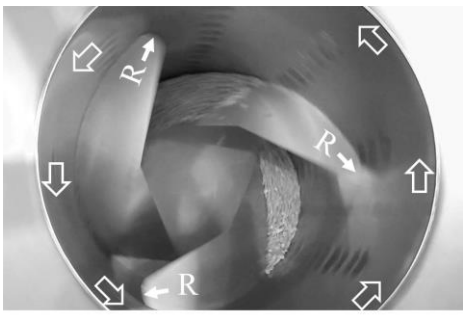

Fig. 9: Boomerang blades are welded, and having no sharp edge

しかし速度アップだけでは改善しなかったので、掬い板 8 枚ではなく Fig. 9 のようにブーメラン羽根 3 枚を溶接する方式に変え、テストした。 この場合も羽根のコーナー部に丸みを持たせたので放電・スパーク問題は起きなかったが、焙煎品質の向上も起きなかった。

ドラム回転速度に関しては、これ以上 速くすると、遠心分離機に近づいていくことが明らかだった。

そこで、ドラムの高速回転化はここまでとし、ドラムの内部構造を改めて考えることにした。

5. 根本的な問題

5-1. 加熱対象物は 金属との距離が必要

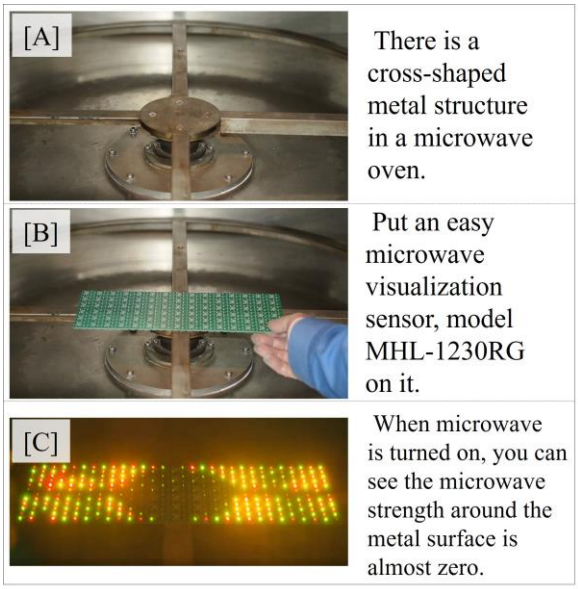

Fig. 10: Microwave strength at the metal surface.

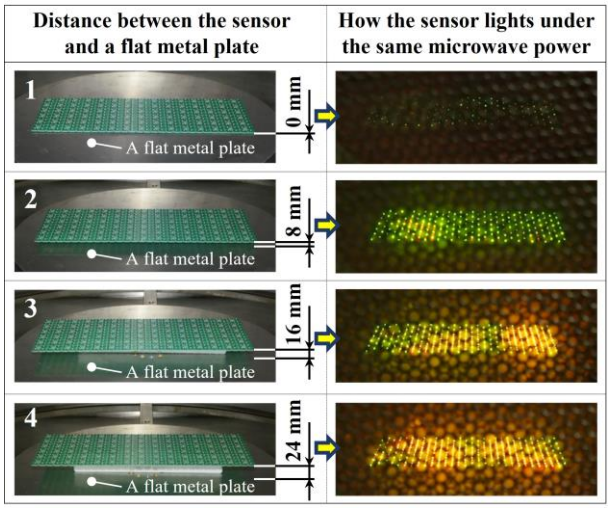

Fig. 11: Microwave strength and the distance from a flat metal plate.

この装置が当社の他のマイクロ波加熱装置と違う所は、金属容器と加熱対象物が直接接触するところであり、このような仕様に応じた設計が必要となる。

簡易マイクロ波空間分布可視化センサ『ほたる』、型式 『MHL-1230RG』は、マイクロ波の強度・分布を視覚的に把握できる便利な道具である。 これを使って加熱室内の金属物からの距離が、マイクロ波の強さにどう影響するかを まず確認しておきたい。

Fig. 10 の実験では、金属表面ではマイクロ波強度が殆どゼロになっていることがわかる。

また、Fig. 11 の実験では、センサが金属面から離れるにつれ、マイクロ波強度が増大することがわかる。

この装置上で加熱する品物が、この現象の影響を常に受け続けていることを、社内関係者は認識していたが、解決策を見つけ出せずにいたのが実情である。

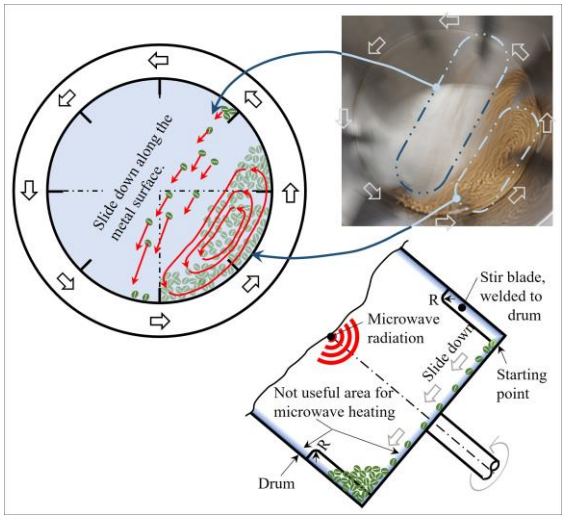

Fig. 12: Movement of heating object of Fig. 7

最初に製作した Fig. 7 の 8 枚羽根ドラムでは、 豆は Fig. 12 のように動く。 ドラムがこの図の方向に回転する場合、よく観察すると 豆は 6 時の位置から 2 時の位置へ掬い上げられる迄に大部分が落下し、それらがまた同じ様に掬い上げられ、これを繰り返すので品物は 6 時の位置から 2 時の位置の間で渦を成し、同じ領域に漂い続けているように見える。 一方、2 時の位置で落下しなかった豆は、更に上方の 1 時の位置へ到達する迄に落下し、ドラム底面を滑り落ちる。これらの豆全てが、ドラムの金属面から合理的に離れた場所に位置して マイクロ波加熱されては、いないようである。

5-2. マイクロ波の死角を無くす

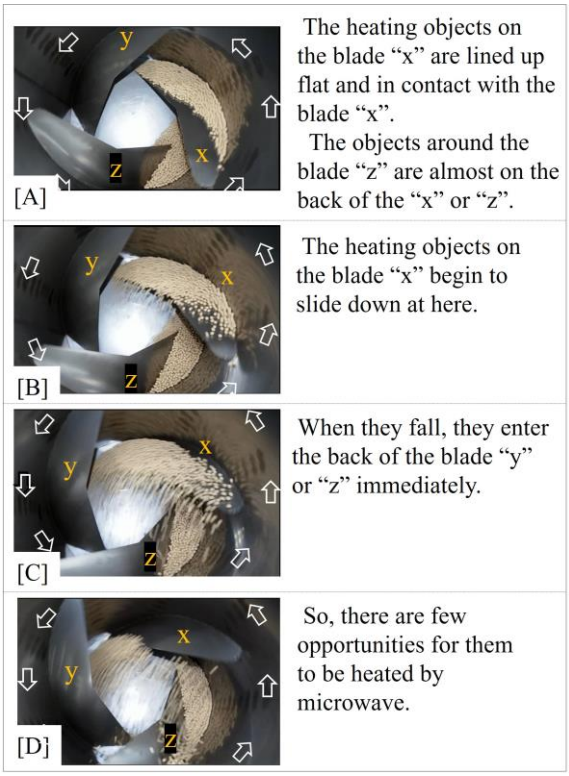

Fig. 13: Movement of heating object of Fig. 9

次に製作した、Fig. 9 のブーメラン羽根 3 枚タイプでは、豆は Fig. 13 のように動く。この図の [A], [B] では、金属羽根「x」上の豆が平らに広がっている様子が観察できる。これらはマイクロ波加熱されにくい状況に身を置いている。続く [C], [D] を見ると、落下中の豆は金属面から離れるので、合理的にマイクロ波加熱可能なエリアを通過しているようである。ただ、このドラムでは、隣どうしの羽根が重なり合って、底面外周部を覆い隠し、底面全体を見渡すことができない。ということは、マイクロ波は底面外周部に届いていない可能性がある。従ってそこに位置する品物がマイクロ波加熱されていることを 保証できないのである。

ブーメラン羽根 3 枚式は、焙煎試験で良い成果が得られなかったこともあり、その後 使用を中止した。

6. 模型製作と目視評価

新たなドラム構造を模索することにした。ここからは実物を製作する前に、厚紙や段ボール等で製作した模型ドラムの中で豆を転がし、その動きを目視で主観的に評価するという方法で検討を行った。

6-1. 第 1 案

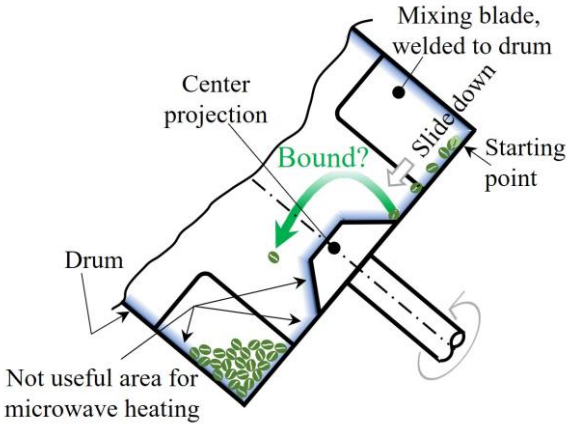

Fig. 14: Idea #1

Fig. 14 の様に回転ドラム底面の中心部に突起物を設け、そこに向かって豆を落とせば、豆が弾んで宙に浮き、課題 **5-1.** は解決できるのではないかと考えた。また、羽根は回転中心から放射状に配置し、真っ直ぐに戻すことで課題 **5-2.** に対処することにした。

Fig. 15 の様に、 [#1-1] 円錐台(小)、 [#1-2] 円錐台

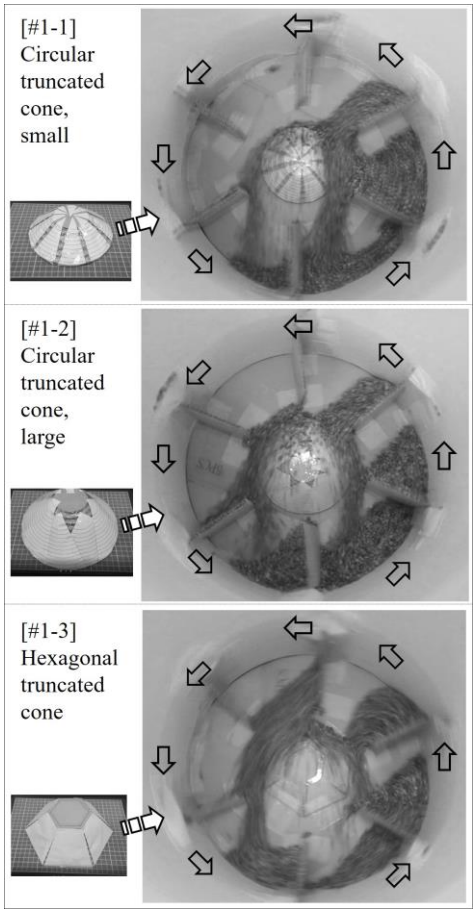

Fig. 15: Failure variations of Idea #1

(大)、[#1-3] 六角錐台の模型突起物を続けて順番に作り、豆を投入して試したが、いずれの形状でも、豆が弾んで宙に浮くことは 全く無かった。

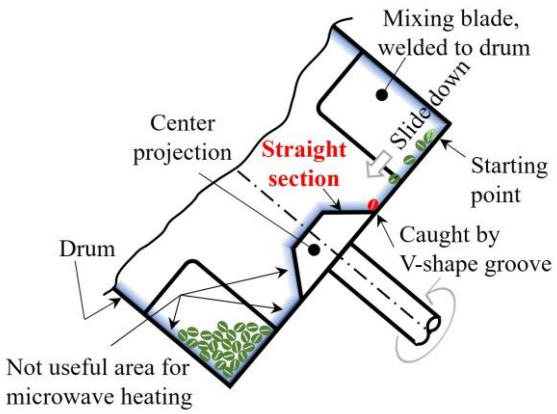

Fig. 16: V-shape groove

これらの形状では、Fig. 16 に示すように、出発点から滑り落ちた豆が ドラム底面と、突起物との境界の V 字溝に嵌り、動きが滞ることがわかった。

6-2. 第 2 案

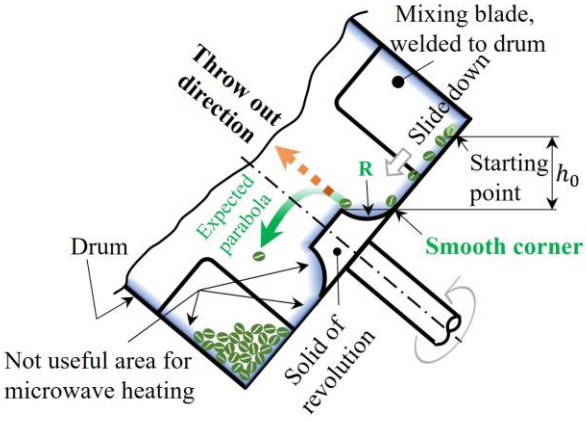

Fig. 17: Idea #2, smooth corner

Fig. 17 の様に中心突起物を円弧の回転体に変更し、V 字溝を無くして滑らかにした。 続く回転体の曲面の頂上で豆が斜め上向きの方向に投げ出され、放物線を描いて落下する、と想定した。

しかし、Fig. 18 の様に 豆は回転体の曲面の登り勾配を上がり切ることが出来ず、滞留した。 豆と容器との間には、想定以上の摩擦制動力がかかっていることがわかった。

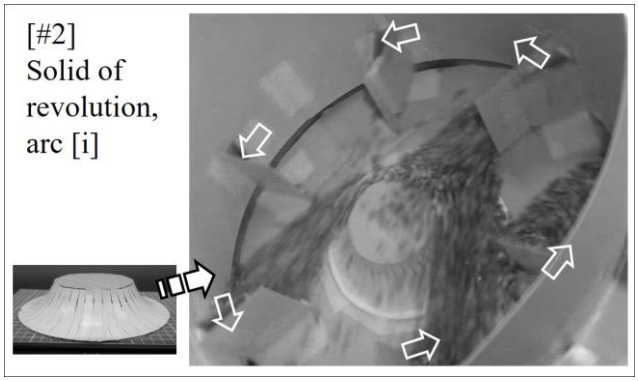

Fig. 18: Idea #2, the beans stay at the top

6-3. 第 3 案

今度は 豆の放出方向を 斜め上向きから、水平方向に変更することにした。 第 2 案の突起物の頂上部分を適切に省いて Fig. 19 の様にした。

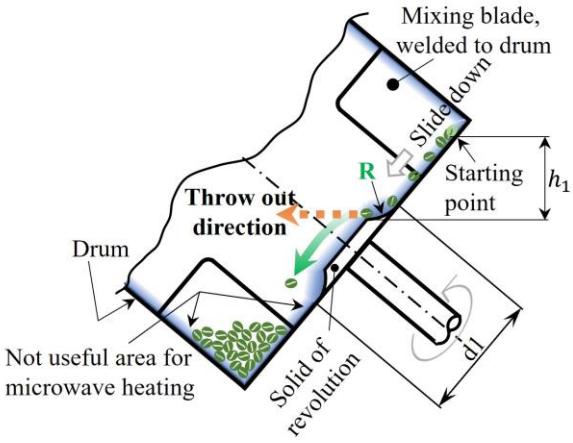

Fig. 19: Idea #3, cut the top part of #2

すると、Fig. 20 のように、豆は滞りなく流れ落ちるようになり、 突起物曲面を超えた豆の一部が突起物から離れる動きも観察できるようになった。

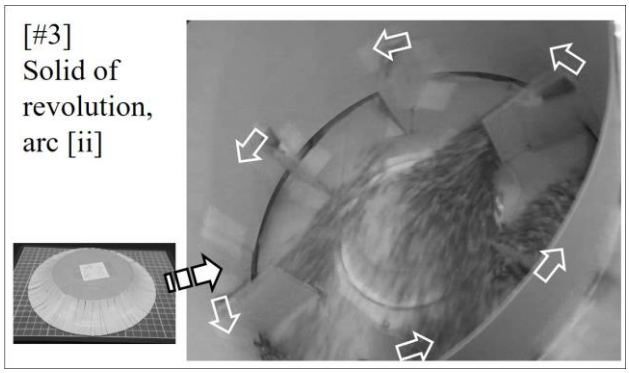

Fig. 20: Flowing the beans, Idea #3

6-4. 第 4 案

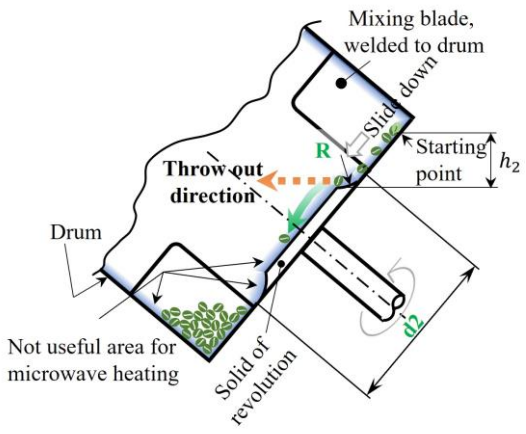

Fig. 21: Idea #4, large diameter d2

Fig. 21 のように突起物の最大径を d2 に大きくしてみたが、Fig. 22 のように突起物を通過した豆がすぐに落ち、第 3 案よりも劣っていると判断した。 出発点と放出点との落差が Fig. 19 の h_1 だったものが Fig. 21 の h_2 に小さくなった為と考えられる。

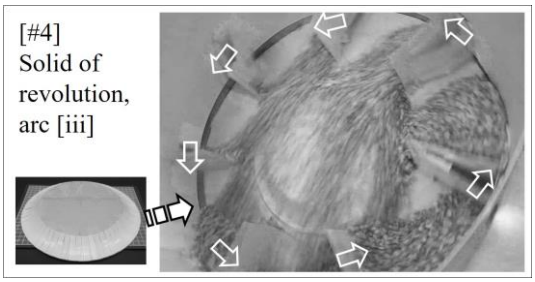

Fig. 22: The beans fall on the saucer

6-5. 第 5 案（最終案）

更に良い斜面形状が無いか考えたところ、ある物理法則を想い出し、試すことにした。

高低差のある 点 P1 から点 P2 へ球を転がすとき、最短時間で到着するのはサイクロイド曲線である、という法則がある。 (Fig. 23)

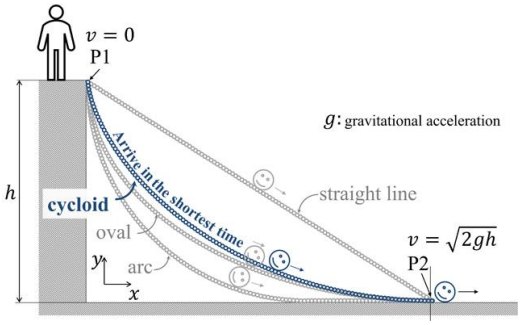

Fig. 23: Cycloid (1)

サイクロイド曲線は、直線に沿って円を転がすとき、円周上の点が描く軌跡である。 (Fig.24)

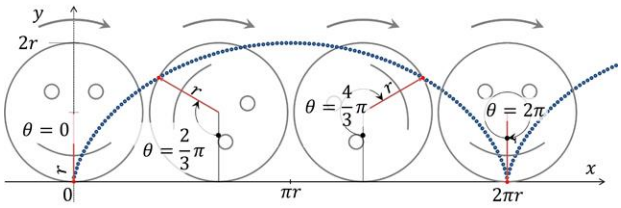

Fig. 24: The trajectory of the rolling circle

円の半径が r, 円の転がり角が θ [rad] のとき、サイクロイド曲線上の点の座標を (x, y) とすると、Fig. 25 のように 円の転がり長さは円弧長さ $r\theta$ に等しく x, y はそれぞれ半径 r と回転角 θ の関数となる。

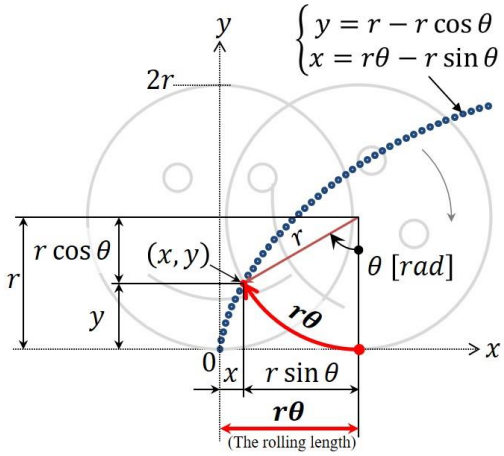

Fig. 25: Cycloid curve formula

Fig. 24 の曲線を上下逆にしたものが最速降下曲線である。 (Fig. 26)

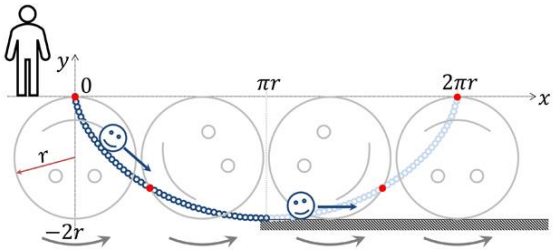

Fig. 26: Cycloid (2)

この曲線を回転体にした突起物を使えば、 コーヒー豆の運動は Fig. 27 および Fig. 28 の様になると想定した。

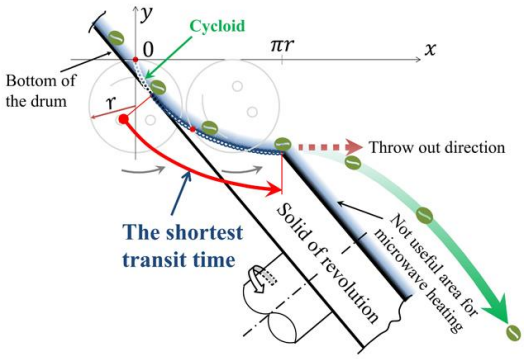

Fig.27: Detail of the cycloid drum

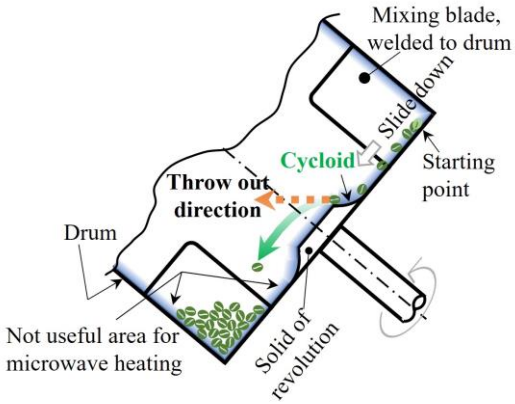

Fig. 28: Idea #5, cycloid

模型で豆の動きを観察したところ、 想定通り豆が滞りなく流れ、しかも豆の多くが突起物を超えてドラムの最下部へ落下する様になった。 (Fig. 29)

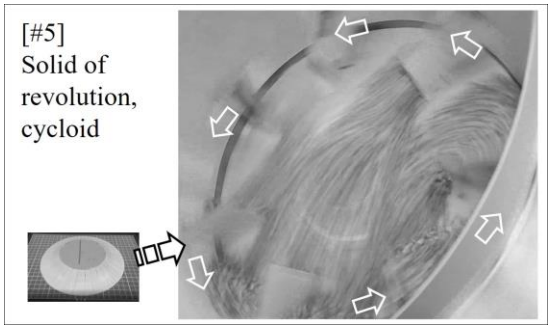

Fig. 29: The flow of the beans on model, #5

7. 実機製作と性能評価

7-1. ユーザーの評価

この突起物を採用した金属製ドラム(Fig. 30)を製作し、焙煎試験を行った所、ユーザーの評価は良く、特に加熱の均一性が高評価となったのは意外だった。 このドラムも同様に、スパーク等は発生しなかった。

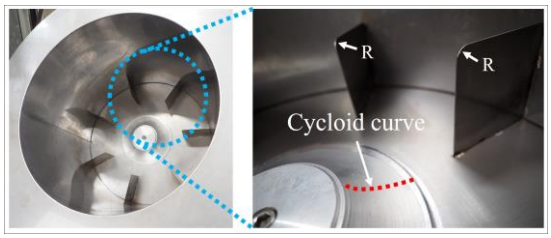

Fig. 30: Cycloid drum, prototype

7-2. 改良前後のドラムの加熱特性比較

Table 1: Test condition

Item	Contents
Heating object	Soybeans
Quantity	1 [kg]
Microwave power	1.5 [kW]
Heating time	120 [sec]

改良前後のドラム計 3 個に対して、Table 1 の様な共通の条件でマイクロ波加熱テストを行った。

それらの加熱前後の熱画像を Fig. 31 に、 温度上昇グラフを Fig. 32 に示す。

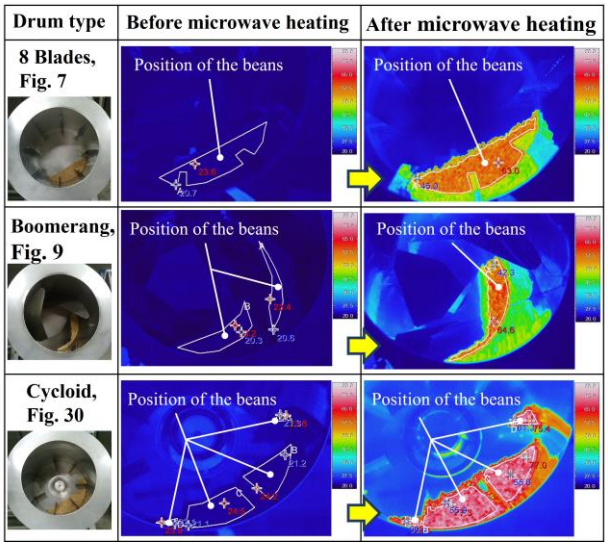

Fig. 31: Comparison of heating performance by thermal images

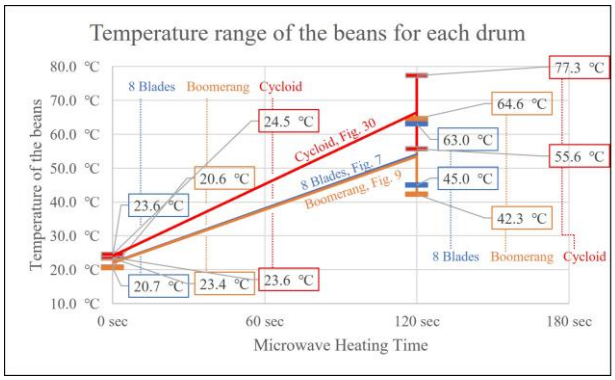

Fig. 32: Comparison of heating performance

熱画像解析ソフトを使うと、オペレーターが熱画像上に描いた多角形内での最高温度とその場所、および最低温度とその場所を 表示させることが出来る。

Fig. 32 は、このツールを使って Fig. 31 の 6 枚の熱画像から、加熱対象物である大豆の最高温度・最低温度をそれぞれ調べ、グラフ化したものである。

サイクロイド曲線を応用した改良ドラム (Fig. 30) は、改良前の 8 枚羽根式 (Fig. 7) および ブーメラン 3 枚式 (Fig. 9) と比べて 加熱後の品温が高いことがわかる。

8. 考察

8-1. マイクロ波加熱効率の向上

改良後のドラムでは、品物が短時間で温度上昇するようになった。 その理由は

・豆と金属容器が接触する時間が減少した

・豆が金属容器と距離を置く時間が増えた

の二つにより、マイクロ波加熱効率が上がったためと考えられる。

8-2. マイクロ波加熱均一性

加熱の均一性に関して、ユーザーから高い評価を得ることが出来たが、その理由は次の様に考えられる。

コーヒー豆が容器表面を滑り落ちる間、豆は斜面から摩擦抵抗を受け続け、やがて豆の速度は頭打ちとなる。 改良後は豆が容器表面と接触する距離が短くなったので制動時間が減り、より速いスピードまで 到達できるようになった(Fig. 33)。 その結果、攪拌性が上がったのではないかと考えられる。

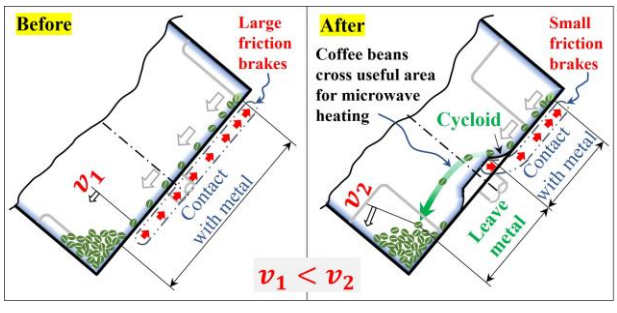

Fig. 33: Before and After

例えば **6-3.** 円弧型と **6-5.** サイクロイド型とを Fig. 34 で比較してみても、後者のほうが豆の速度が速い。

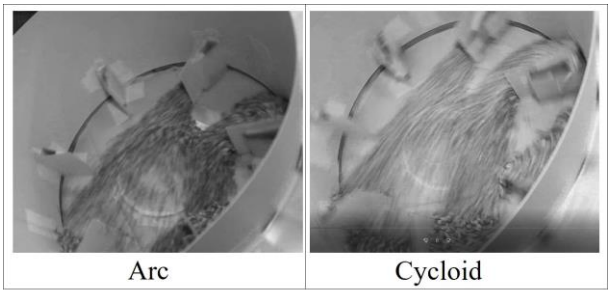

Fig. 34: Speed difference between Arc and Cycloid

9. 結論

この改良型マイクロ波加熱ドラムは、アジテーターのような、機械的な攪拌機構を装備していないため、構造的にマイクロ波放電やスパークが発生しにくい。

この様な単純な構造でありながら、高いマイクロ波加熱効率、高い攪拌性能を有しているのが特長である。

Fig. 35 に 最大マイクロ波出力 1,500W、熱風発生装置付きの装置例を示す。 (特許取得済 第 6215498 号 および 第 6336667 号)

Fig. 35: Max. 1,500W microwave heating mixer with hot air generator

10. 謝辞

コーヒー焙煎に求められる品質について、キーコーヒー株式会社 開発研究所様から 丁寧にご教示を頂き大変勉強になりました。 何より 今回の改良は同研究所様の多くの助言により考案出来たものです。 この場をお借りして謝辞を表します。

参考文献

1. 「MICROWAVE ENGINEERING」
BY A. F. HARVEY
2. 「電子レンジ・マイクロ波食品利用ハンドブック」
肥後 温子編
3. 「最新 マイクロ波エネルギーと応用技術」
最新 マイクロ波エネルギーと応用技術 編集委員会

Manuscript received: Jul 14, 2021
Revised: Aug. 10, 2021
Accepted: Sep. 27, 2021