

熱効率の高い過熱水蒸気装置による乾燥と殺菌

今津 秀則*)

*) IMAZU HIDENORI:株式会社思考館 技術顧問

〒231-0015 横浜市中区尾上町 5 丁目 80 番地 神奈川中小企業センタービル 7 階 714 号室

TEL : 045-264-8385

FAX : 045-264-8395

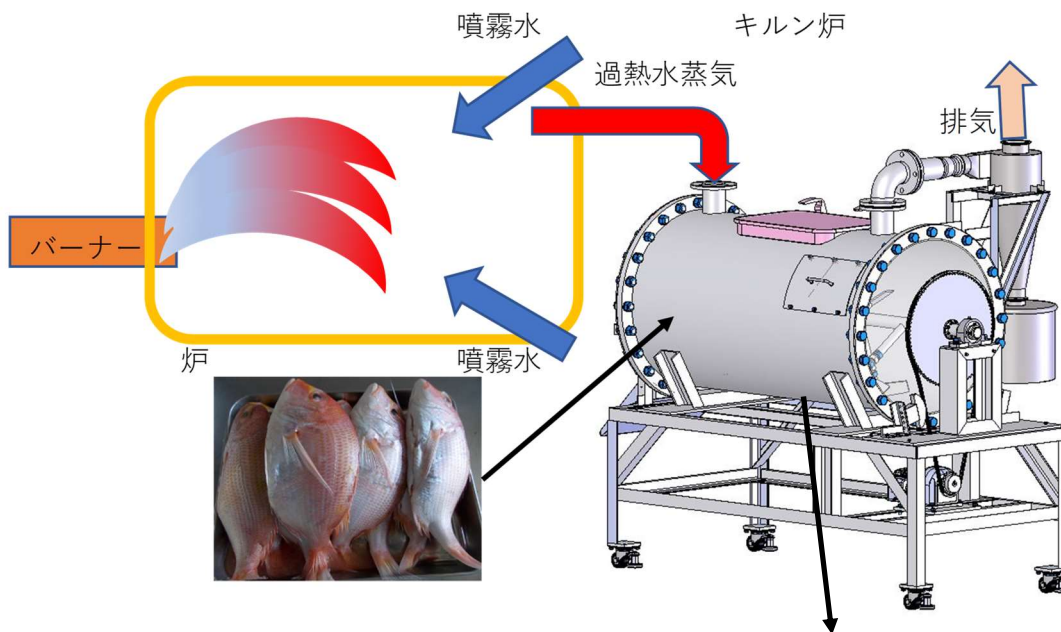
E-mail:himazu@shikoukan.co.jp

過熱水蒸気といえば、一般的には 100% 水からできた高温の水蒸気のことを指す。思考館の過熱水蒸気は、LPG の燃焼ガスに水を噴霧して作るもので、およそ半分が水蒸気、残り半分が燃焼ガス由来の窒素、二酸化炭素で若干の酸素を含む。この過熱水蒸気で食品の殺菌乾燥を行ったところ、良好な性能を示したのでここに報告する。

1 過熱水蒸気による乾燥と殺菌操作の現状

1.1 高含水食品の殺菌乾燥

コーヒーや、お茶、ビール麦芽の搾りかす、おから、魚のあら等は、栄養分や有用成分がたくさん含まれているにもかかわらず、水分を 50~80% 含むため腐敗しやすく廃棄されているものが多い。これらの廃棄物を殺菌乾燥すれば、有用物にアップサイクルできる。これらの高含水食材廃棄物は、過熱水蒸気を充満した攪拌機付キルン炉に投入し殺菌乾燥を行う。図 1 は代表例として、魚あらを殺菌乾燥して、魚パウダーにする工程を示したものである。キルン炉に投入された魚のあらは攪拌機で攪拌される。キルン炉には過熱水蒸気が導入され、殺菌乾燥の役目を終えた過熱水蒸気は排気口から排出される。この時、過熱水蒸気温度は入り口温度で 400~500℃、排気温度は、80~150℃で、魚あらの温度（キルンの下部温度）は仕上がり温度で 80~100℃である。魚の水分が無くなる限り、魚あらの温度は 100℃を超えることはない。



魚パウダー（製品）

← 粉碎（ハイスピードミル）

← キルン炉の中の様子

図 1 魚あらを乾燥殺菌、粉末にする工程

(殺菌乾燥性能)

思考館の過熱水蒸気で処理したノドグロ頭、甘えび粉末の水分と菌数結果を表 1 に示す。

表 1 過熱水蒸気処理した魚パウダーの菌数検査結果

	ノドグロ頭パウダー	甘えびパウダー
水分 (%)	7.2	8.1
一般生菌数 (個/g)	300 未満	300 未満
大腸菌群 (個/g)	検出せず	検出せず
大腸菌 (MPN/100 g)	30 未満 (陰性)	30 未満 (陰性)

いずれの粉末も水分は 10%以下で、細菌は十分殺菌されていた。水分が 20%以下になると多くの菌が増殖できないと言われており、殺菌乾燥した食品は、長期保存が可能となる。

1.2 粉体(米糠)の殺菌乾燥

米糠は殺菌乾燥して微粉碎すれば、栄養価が高くおいしい健康食品にアップサイクルされる。図 2 に示す 400～500℃の過熱水蒸気を充満させた 2mの縦型円筒の中に米糠をパラパラと自然落下(処理時間 0.4 秒)させて殺菌乾燥を行った。この装置は、米粒や大豆などの粒体も殺菌乾燥できるようになっており、粒体は円筒の真下の粒体容器で回収される。米糠のような粉体は、サイクロンで回収(回収温度:90℃)される。

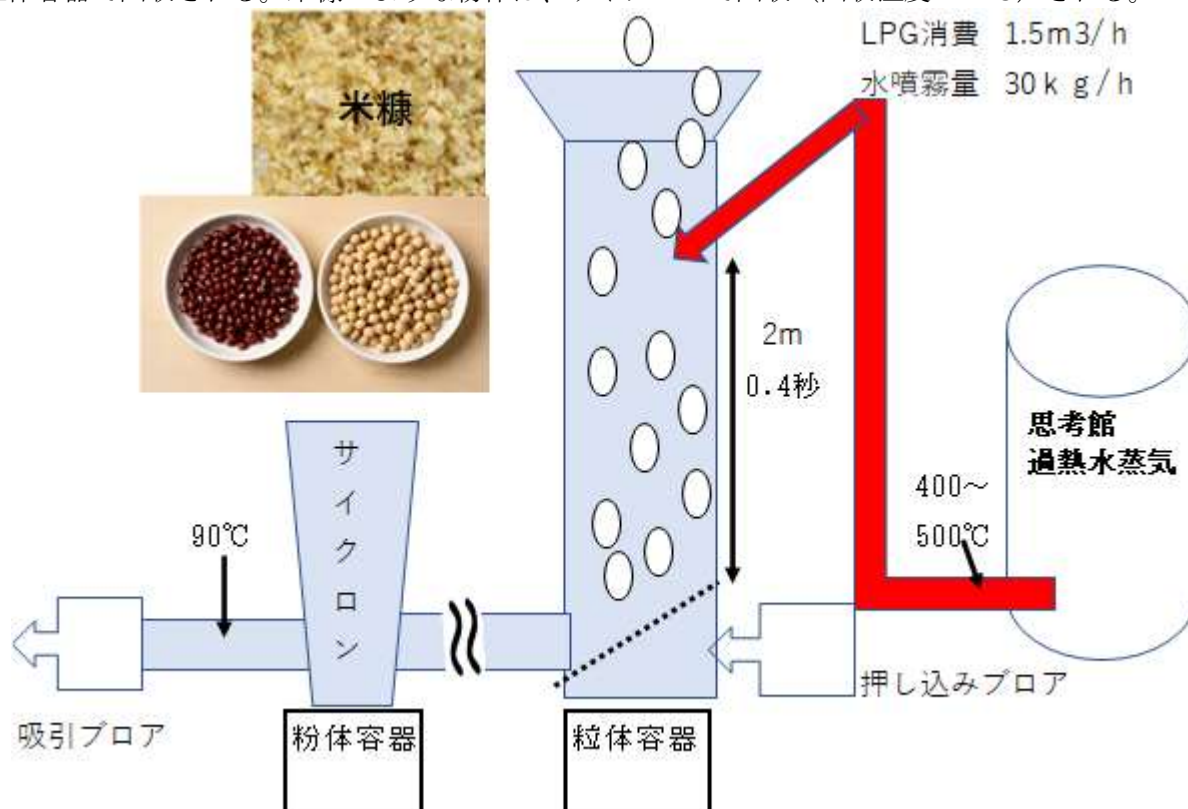


図 2 過熱水蒸気を用いた粒体・粉体の殺菌乾燥システム

(殺菌乾燥性能)

殺菌乾燥結果を、表 2 に示す。米糠の水分は若干減少した。処理前の米糠の一般生菌は 170 万個/g、大腸菌も検出されたが、処理により十分殺菌され食品として使えることが分かった。

表 2 過熱水蒸気処理した米糠の水分と菌数検査結果

	米糠 (未処理)	米糠 (過熱水蒸気処理)
水分 (%)	9.8	7.6
一般生菌 (個/g)	1,700,000	300 未満
大腸菌群 (個/g)	55,000	陰性
大腸菌 (MPN/100 g)	2,400	陰性

2 過熱水蒸気装置の開発背景、原理 (過熱メカニズム)

2.1 開発背景

現在主流となっている過熱水蒸気は、図 3 に示すように水道水をボイラーで 100℃の飽和水蒸気を造り、その蒸気を IH ヒーターで加熱して過熱水蒸気を造る。ボイラーの熱は全量飽和水蒸気製造に使用されるわけでは

なく、ここで熱損失が起きるので熱効率が低い原因となる。

また、ボイラーでのスケール防止のため、給水は軟水化装置を通す必要がある。このため装置が複雑になり、高価なものとなってしまうし、メンテナンスが大変である。この過熱水蒸気は冒頭で述べたように 100%水分の気体である。この気体は、温度が 100℃を切ると、全量凝縮水となる。この凝縮水が乾燥したものに付着するため別途乾燥工程を設けるなどの対策が必要な場合もある。このような背景から、我々はシンプルな構造で熱効率が高く、凝縮水が発生しにくい過熱水蒸気発生装置の開発を目指した。

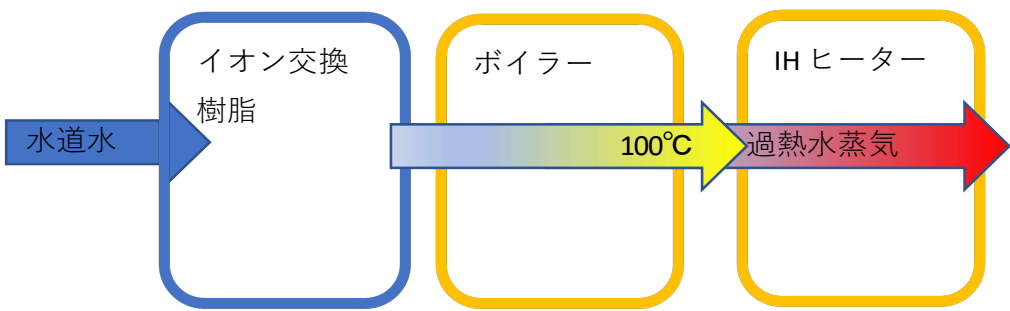


図 3 一般的な過熱水蒸気発生装置

2.2 思考館の過熱水蒸気発生装置

我々の開発した過熱水蒸気発生装置を図 4 に示す。セラミックスでできた燃焼炉にバーナーを取り付け、LPG を完全燃焼させる。その燃焼ガス（約 1000℃）に、水を噴霧すると直ちに蒸発し過熱水蒸気となる。このように、思考館の過熱水蒸気発生器は構造がシンプルで、LPG の燃焼ガスが持っている熱も乾燥殺菌に使われるため、熱効率は高い。

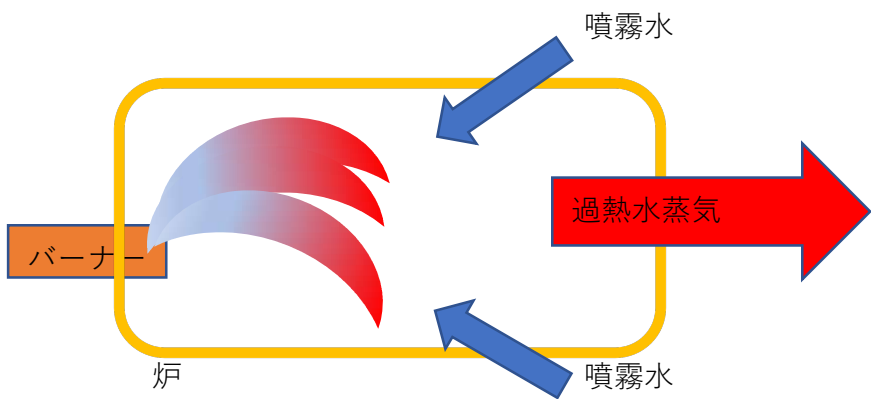


図 4 思考館の過熱水蒸気発生装置

2.3 過熱水蒸気の殺菌乾燥メカニズム

2.3.1 思考館の過熱水蒸気のガス組成（表 3 参照）

一般の過熱水蒸気は、ボイラーで 100℃の飽和水蒸気を発生させその飽和水蒸気を IH ヒーターで過熱して作るの、水分以外の気体は含まない。熱風は空気を加熱したものであるから、成分は空気と同じで酸素を 21%含んでいる。

思考館の過熱水蒸気は、LPG の燃焼ガスに水を噴霧したものなので、過熱水蒸気が 44.9%、残り 55.1%が燃焼ガス由来の気体成分で、若干の酸素を含む。この酸素は LPG を完全燃焼させるため、理論空気量よりやや多めに空気を供給するので、燃焼に与れなかった酸素が残ったものである。

水分以外のガスは非凝縮性気体で水蒸気を含有でき、温度が 100℃以下に下がっても乾燥工程から水分を外に持ち出すキャリアの役割をする。一方 100%水分の一般的な過熱水蒸気は、100℃以下に温度が下がると全量凝縮水になる。図 2 で示した乾燥殺菌システムでは、過熱水蒸気と押し込み空気の混合気がサイクロンに供給され、その凝縮温度は 50℃以下と算定され、粉体の回収温度 90℃を十分下回っている。実際、凝縮水は発生しなかった。

表 3 過熱蒸気成分表（数値は%）

成分	H2O	CO2	N2	O2
思考館	44.9	4.7	46.6	3.9
一般過熱水蒸気	100	0	0	0
熱風（間接方式）	0	0	79	21

2.3.2 過熱水蒸気の熱伝達（図5 参照）

熱風乾燥は、空気を加熱し高温の熱風を作り被乾燥物に伝熱させる。この伝熱を対流伝熱と呼び、対流伝熱の大きさは $0.24 \text{ cal/g/}^\circ\text{C}$ である。また、輻射伝熱は無い。

一方、過熱水蒸気の熱伝達は、対流伝熱、凝縮伝熱、輻射伝熱の3つの方法で行われる。

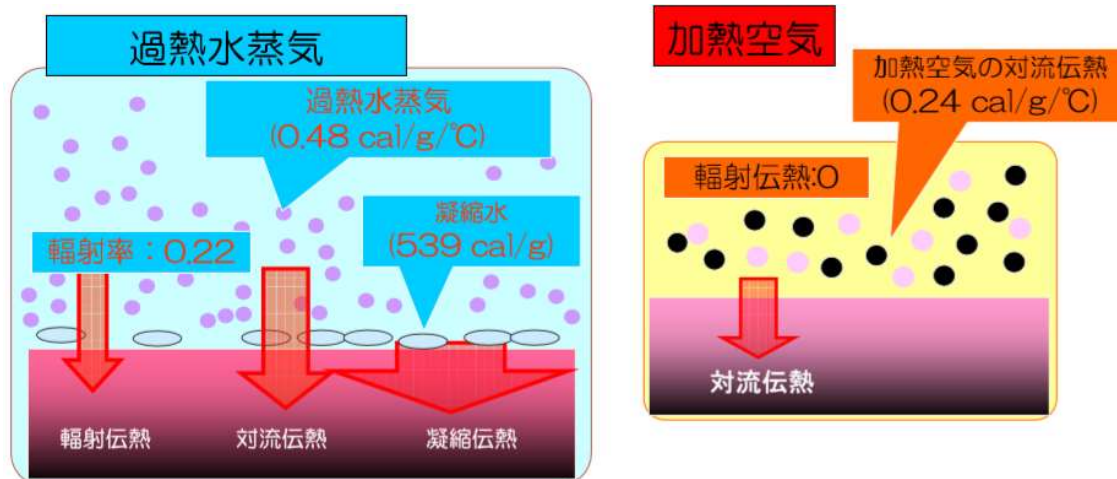


図5 過熱水蒸気と熱風の熱伝達方法¹⁾

（対流伝熱）

高温の過熱水蒸気が被乾燥物の表面に接触した時、物体に熱を伝えるもので、その大きさは $0.48 \text{ cal/g/}^\circ\text{C}$ と熱風の2倍もある。

（凝縮伝熱）

高温の過熱水蒸気が冷たい物体に接触すれば、冷やされて物体の表面に凝縮水を形成する。この時凝縮水は 539 cal/g の非常に大きな熱を物体に与える。これを凝縮伝熱と呼ぶ。

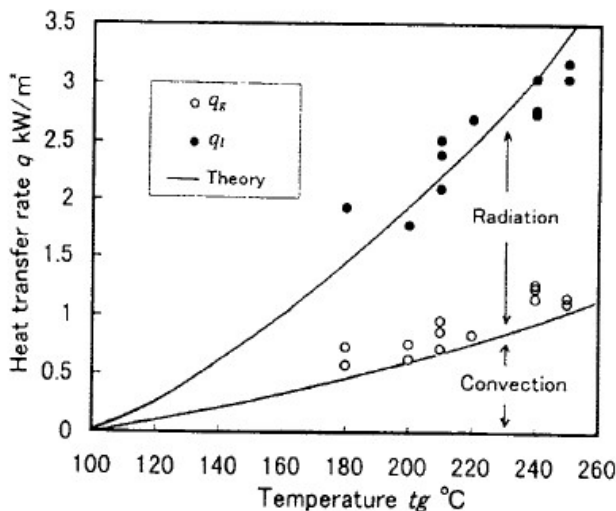


図6 過熱水蒸気の対流伝熱量と輻射伝熱量の比較

（輻射伝熱）

過熱水蒸気は、3原子からなる水分子であり、非対称の伸縮運動により赤外線を輻射する。赤外線の輻射熱量は絶対温度の4乗に比例する。伊與田²⁾らは、過熱水蒸気の対流伝熱量と輻射伝熱量の比較を行っている（図6参照）。温度が高くなればなるほど、両方の伝熱量が増大するが、輻射伝熱の方が、増加率が高い。我々の殺菌乾燥に使用する過熱水蒸気の温度は $400 \sim 500^\circ\text{C}$ なので、この図ではその大きさが分からないので、外挿して、過熱水蒸気の伝熱量を求めた。 400°C 、 500°C の対流伝熱が、それぞれ 2.2 、 3.0 kW/m^2 に対し、同温度における、輻射伝熱+対流伝熱は 10.6 、 16 kW/m^2 と推定され、我々の殺菌乾燥条件は輻射伝熱が圧倒的に大きいことが分かった。

2.3.3 高温過熱水蒸気が放射する電磁波

黒体物質は電磁波を放射する。図7は完全黒体の分光放射輝度と電磁波の波長の関係を示したものである。温度が高くなるにつれ放射輝度は大きくなり、放射する電磁波は短波長側にシフトする。水の放射率は 0.9 で、完全黒体に近いので、分光放射輝度が少し低くなるだけである。我々の殺菌乾燥に用いる過熱水蒸気温度は $400 \sim 500^\circ\text{C}$ ($673 \sim 773 \text{ K}$) なので、この範囲の温度の過熱水蒸気は大部分が赤外線を放射していることが分かる。

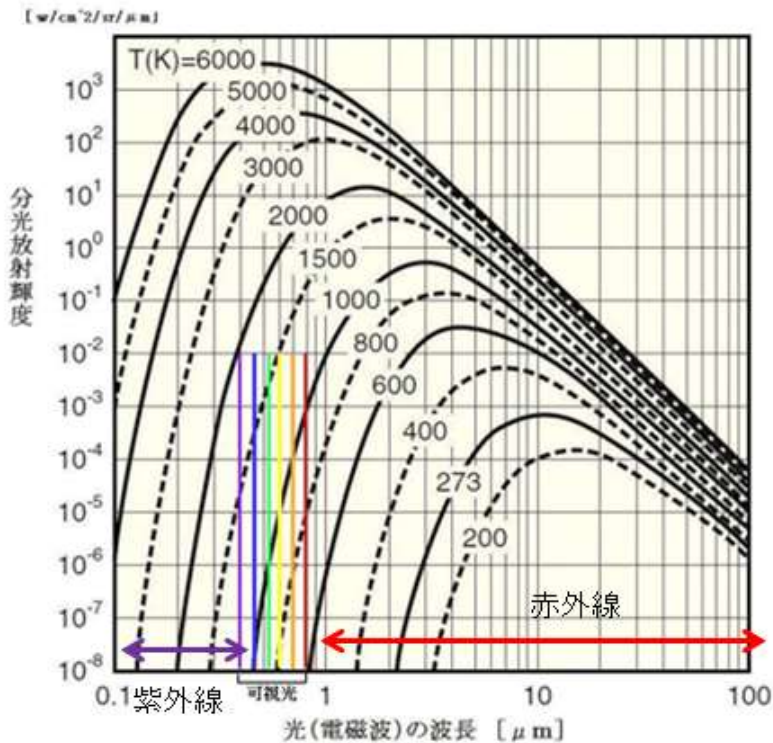


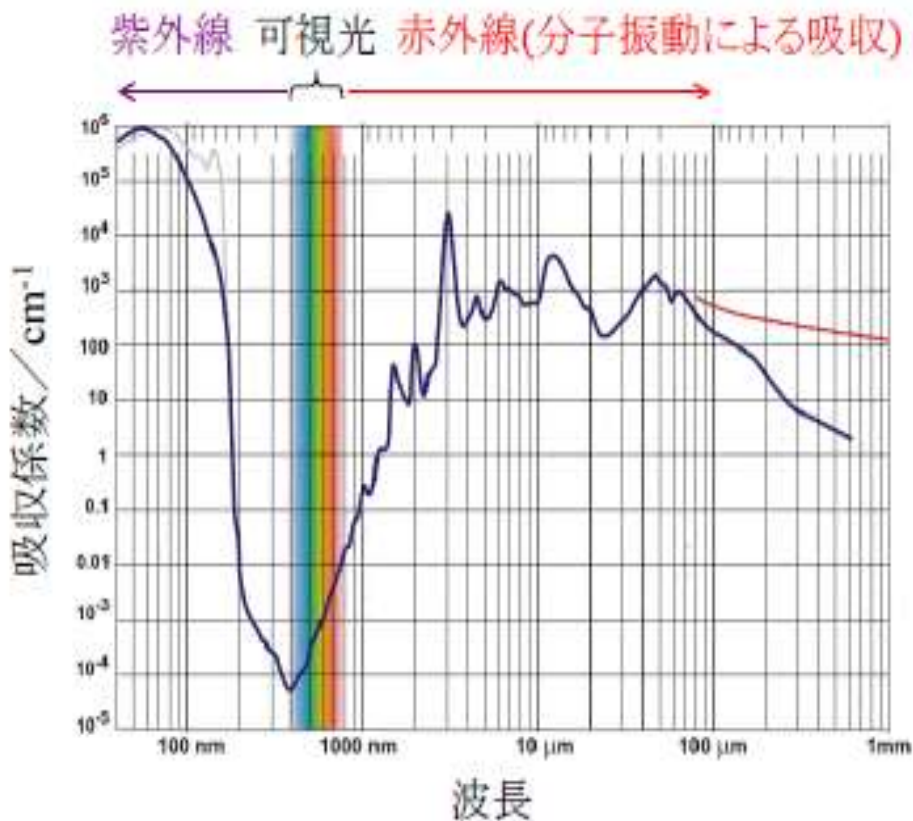
図7 完全黒体が放射する電磁波³⁾

2.3.4 赤外線を吸収する水

前項で述べた高温の過熱水蒸気の赤外線は、どのように、殺菌乾燥に寄与するのだろうか。矢内ら⁴⁾は細菌菌体の約90%は水分であると述べている。菌体の水分が過熱水蒸気の赤外線を吸収すれば、菌体の温度が上昇し死滅するだろう。次に、乾燥とは被乾燥物の水分を蒸発させ除去することである。この水分が過熱水蒸気の赤外線を吸収すれば、乾燥させることができる。

そこで、水の電磁波吸収性能を調べた。図8は水の電磁波吸収係数を表したもので、紫外線と赤外線をよく吸収し、可視光線はあまり吸収しないことが分かる。

1.2項の米糠がわずか0.4秒で殺菌乾燥できたのは「過熱水蒸気が放射する赤外線を、粉体に付着した細菌と、粉体の水分が吸収した」からではないだろうか。



過熱水蒸気で充満された縦型円筒にバラバラに投入された粒子や粉体は、周りを過熱水蒸気の水分子で包囲される。円筒には、 1.4×10^{23} 個/秒の水分子が次々に投入（計算値）される。個々の水分子が赤外線を放射し、その赤外線を細菌や被乾燥物中の水分が吸収したとすれば、短時間に殺菌乾燥した理由が説明できる。

なお、1.1項で示したキルン炉での殺菌は、30分以上80℃以上の高温に被乾燥物がさらされたからである。キルン炉の最上層にある被乾燥物は、過熱水蒸気の赤外線を吸収できるが、下層では上層の被乾燥物が赤外線を遮るので、下層の被乾燥物には赤外線が届かない。下層に存在する細菌は赤外線を直接受けて死滅するのではなく、被乾燥物全体が高温になったため死滅したと思われる。

3 粉体材料における乾燥及び殺菌への適用と今後の課題

3.1 粉体の殺菌乾燥によるアップサイクリングで SDG s に貢献

大部分が家畜飼料や肥料にされている米糠を過熱水蒸気で処理粉碎した米糠パウダーは、甘くて美味しい栄養価の高い食料に変わることが分かり商品化された。この米糠パウダーをヨーグルトに混ぜて食べた人からは、「体調が良くなった」「便秘が治った」などの声が上がっており、愛用者が増えている。米糠パウダーはパンやケーキの素材として使われて始めており、いずれも好評である。また、魚介類の残渣を過熱水蒸気で処理した魚介パウダーのいくつかは商品化されつつある。

我々の過熱水蒸気技術は次の分野のアップサイクリングに貢献すると考える。

- ① 規格外農産物、魚介のパウダー化
- ② 過熱水蒸気で処理すれば、可食となる廃棄農産物、魚介のパウダー化（例：玉ねぎやにんにくの皮や葉、野菜や果物の皮、生姜の根、各種魚介のあら）
- ③ 液体飲料の原料の搾りかすのパウダー化（例：ブドウ、パイナップル、リンゴ、茶葉、コーヒー、酒粕、ビール麦芽の搾りかす）
- ④ 各種食品材料の搾りかすのパウダー化（例：おから、小豆の皮、生姜の搾りかす）

このように農産・魚介廃棄物が、食料や飼料にアップサイクルすることで SDG s に大いに貢献できるものと思われる。

3.2 今後の課題：種子の殺菌と穀物の備蓄

大豆の表面殺菌を行い、発芽試験を行った。未処理の大豆の 20%がかびにより発芽しなかったのに対し、過熱水蒸気処理した大豆は 100%発芽し、しかも発育も良好であった。種子の殺菌に過熱水蒸気が使えそうである。

現在東南アジアでは、穀物の 30%は、備蓄中にカビや細菌によって腐敗したり、害虫に食われたりして失われている。穀物の表面を殺菌乾燥して、直ちにポリ袋に密封すれば、こうしたロスは防止できるものと思われる。もし、これに成功すれば、穀物を 30%増産したことに等しい。今後これらの実証に取り組みたい。

以上紹介したように、思考館の過熱水蒸気技術は魚、農産物の SDG s に貢献できる。全世界に我々の技術が行渡り多くの人を助けることが我々の夢である。

（参考文献）

- 1) 「第 52 回近畿アグリハイテクシンポジウム」 「食品加工の新技术：生産現場のイノベーションに向けて (4)」 公立大学法人大阪府立大学生物資源循環工学
- 2) 伊與田他 2 名、「過熱水蒸気乾燥における凝縮から蒸発への反転過程」、日本機械学会論文集 (B 編) 63 巻 612 号 (1997-8)
- 3) 有限会社フィンテックホームページ、光加熱の物理 <https://www.fintech.co.jp/hikaributuri.htm#3>
- 4) 矢内顕ほか 1 名、「細菌の細胞壁」化学と生物 Vol. 12, No. 10 (1974)
- 5) 吉野治一 (大阪市立大学)、「水に学ぶ物質科学」、平成 27 年