

## 音響共鳴法による多孔質食品の物性評価

西津貴久<sup>†</sup>, 勝野那嘉子

岐阜大学応用生物科学部

## 1. はじめに

食品・食材には、内部に void のある構造をもつものが多い。パンやスポンジ、ホイップクリームのような多孔質食品では、「かさ」や「きめ」のような多孔質特性が品質を左右する。しかし、その定量法はあまり知られていない。

筆者らの研究室では、これまでヘルムホルツ音響共鳴現象を利用した体積と多孔質特性の測定方法を提案してきた。本講演では、後者の多孔質特性の定量評価法に関する試みについて紹介する。

## 2. ヘルムホルツ共鳴とその利用 [1]

丸底フラスコのように、円筒状のネックチューブをもつ壺形の容器の管口から内部に向けて音波を放射すると、円筒管と球体部分の接合境界面で音波の一部が反射され、ある周波数成分の音だけが管口より再び放射される。これがヘルムホルツ共鳴とよばれる現象である。フラスコの中に体積  $V$  の物体が入っているときの共鳴周波数  $f$  は次式で表される。

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{(W-V)(l+l_c)}}$$

ここで、 $c$ : 空気中の音速、 $S$ : ネックチューブ断面積、 $l$ : ネックチューブ長さ、 $l_c$ : 開口端補正量、 $W$ : 空洞部容積。

$S$ ,  $l$ ,  $W$ ,  $l_c$  は共鳴器形状により定まる定数であり、空気中の音速  $c$  も既知であることから、共鳴周波数  $f$  を測定することで物体体積  $V$  を決定することができる。

## 3. 共鳴周波数による含泡食品のテクスチャー評価 [2]

泡を含ませて作るホイップクリームのヘルムホルツ共鳴測定について述べる。クリームなどの液体を試料とした場合、その音響インピーダンスが空気比べて十分大きいので、共鳴器内部での吸音、すなわちエネルギー損失がほとんどなく、音響共鳴時の共鳴器空洞部は断熱変化をしていると考えられる。ホイップの進行により、クリームが泡を含むようになると、泡沫部分での吸音、すなわち泡膜の振動によるエネルギー損失が生ずる。共鳴器空気層部では、みかけ上、ポリトロープ変化が起こっていると考えると、次式が成立する。

$$f^2/f_c^2 = n/\kappa$$

ただし、 $f$ ,  $f_c$ ,  $n$ ,  $\kappa$  はそれぞれ、共鳴周波数、ホイップクリームと同体積のクリームの共鳴周波数、ポリトロープ指数、空気の比熱比。

熱力学的に考察すると、第1法則よりホイップ開始前は系外と熱のやり取りがなく、ホイップ後は系外への放熱量が増加する。系の仕事はスピーカーコーンが空洞部になす仕事で一定、内部エネルギー変化は音圧変化により生ずる空洞部の弾性エネルギーと考えて、熱力学の第1基礎式を整理すると、音圧の2乗値とポリトロープ指数には比例関係が成立する式が得られる。これより、ポリトロープ指数の低下は吸音の大きさを表すと考えられる。

ポリトロープ指数とホイップ時間との関係を Fig. 2 に示す。ホイップが進行するにつれて、ポリトロープ指数が低下、すなわち吸音が大きくなり、180 秒を境にポリトロープ指数が増加、すなわち吸音が減少に転じ

## 著者略歴

西津貴久 Takahisa NISHIZU

岐阜大学応用生物科学部 応用生命科学課程

1990年3月 京都大学大学院農学研究科修士課程 中途退学

1990年4月 京都大学農学部 助手

2008年4月 岐阜大学応用生物科学部 准教授

2014年3月 岐阜大学応用生物科学部 教授、現在に至る

〒501-1193 岐阜市柳戸1-1

† Fax: 058-293-2888, E-mail: nishizu@gifu-u.ac.jp

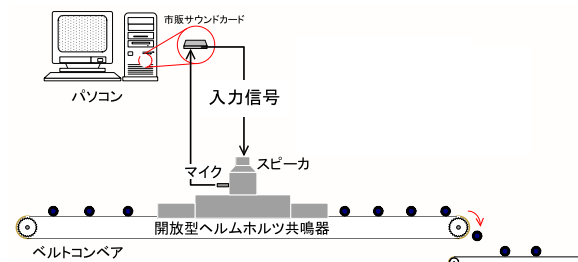


Fig. 1 オンライン型体積計測システム

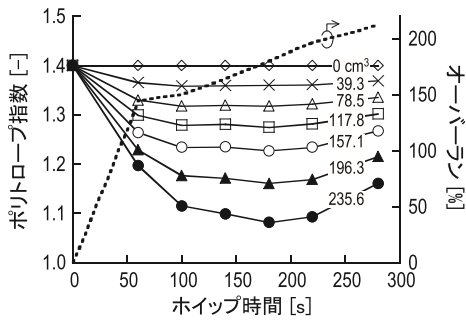


Fig. 2 ホイップ中のポリトロープ指数の変化

ていることがわかる。同時に油分の分離やクリーム硬度が増加しはじめることが確認された。このことからホイップ進行に伴い泡沫が増加し、オーバーランは増加するものの、やがて脂肪球同士のネットワーク形成および泡サイズの減少が泡内圧を増加させることによって、クリームが硬化し、エネルギー損失が減少、ポリトロープ指数が増加するものと考えられる。これはビール泡の品質評価にも適用できる。

#### 4. 共鳴周波数による多孔質食材の連通性評価 [3]

粒体堆積物を共鳴器の中に入れるのではなく、Fig. 3 に示すように、共鳴器のネックチューブをふさぐように設置する。共鳴時には、ネックチューブの内側の空気柱が振動するため、ネックチューブを孔隙のない物体で完全にふさぐと、この空気柱が振動できず、共鳴しない。連通した多孔質体でふさいだ場合には、抵抗を受けながらも、孔隙に空気柱の一部が進入することで、Fig. 3 に示すように振動が発生する。このときの抵抗は空気柱の一部が空隙を通り抜ける際に受ける抵抗で、粒体層中を通気させたときの抵抗（圧力損失）と等価であると考えられる。一般に、ヘルムホルツ共鳴は、ネックチューブ内の空気柱を質量、共鳴器空洞部の空気をばねとする、質量-ばねの機械振動系を等価モデル

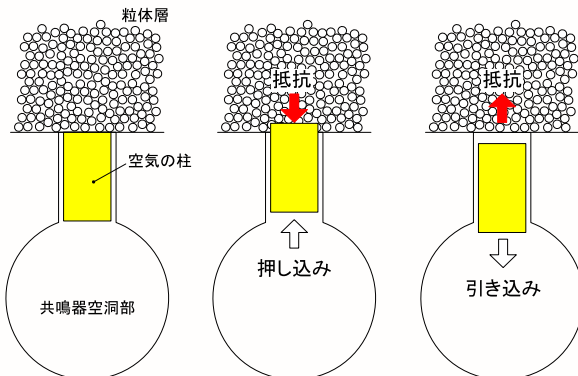


Fig. 3 ホイップ中のポリトロープ指数の変化

ルとして考える。Fig. 4 に示すように、抵抗としてダッシュポットを直列に入れたものが、等価振動系となる。孔隙のサイズが小さいほど抵抗が大きくなり、ダッシュポットの減衰係数が大きくなる。この等価モデルから、共鳴周波数と減衰係数の関係は次式で示される。

$$f_d = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{V} \times \frac{S}{l} \times \sqrt{1 - 4 \times \alpha^2}}$$

ここで  $c$ ,  $V$ ,  $S$ ,  $l$ ,  $\alpha$ ,  $A$  は空気中の音速、共鳴器空洞部体積、ネックチューブ断面積、同長さ、減衰係数、定数を表す。この式から、堆積層の厚さが一定の場合、減衰係数が大きくなるほど、つまり抵抗が大きくなるほど周波数が減少することがわかる。

直径 1, 2, 3, 5, 7 mm のガラスビーズ、大豆、小豆、玄米、コーンを用いて、堆積層の厚みを変えながら共鳴周波数を計測するとともに、試料を充填した試料容器を通気用パイプに取り付けて、流速 0.04 m/s の乾燥窒素を流し、充填層前後での圧力損失を計測した。

Fig. 5 に流れ抵抗係数と共鳴周波数の関係を示す。上式で予測したように、抵抗が増加するにつれて共鳴周波数が減少する傾向がみられ、また粒体の種類の影響がみられない。このことから、共鳴周波数から、通気抵抗と関連のある空隙情報を得ることができるものと考えられる。

ここでは粒体層の例を示したが、連通した空隙構造をもつパンに適用した場合、きめの細かい内相ほど、

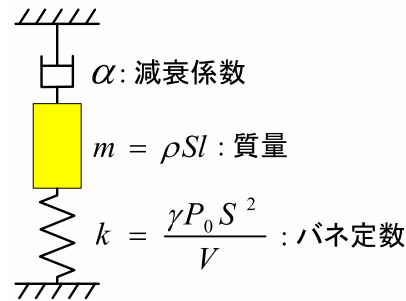


Fig. 4 粒体堆積試料計測時の等価振動系

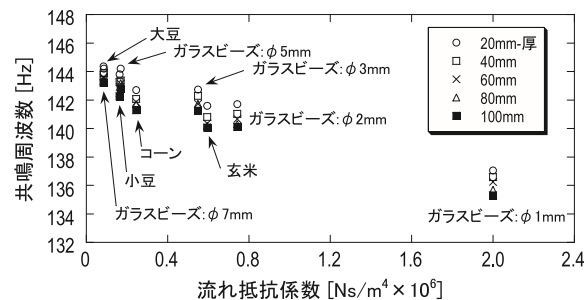


Fig. 5 流れ抵抗係数と共鳴周波数

共鳴周波数は高く，逆にきめの粗い内相では共鳴周波数は低くなり，きめ評価に有効である。

## 5. お わ り に

ヘルムホルツ共鳴現象を用いて多孔質食材のテクスチャーおよび連通性評価の試みについて述べた。本方式が，多孔質食品のテクスチャー研究の1つのツールとなるようにさらに検討を重ねていきたいと考えている。

## References

- 1) 西津貴久，ヘルムホルツ共鳴による食品体積のオンライン計測，*実用産業情報*, **24**, 57 (2001).
- 2) 西津貴久，“音で測る”発酵過程におけるパン生地の気孔成長モニタリング，*FOOMA2006AP 要旨集*, **13** (2006).
- 3) T. Nishizu, E. Tomatsu, N. Katsuno, Airflow resistance measurement for a layer of granular material based on the Helmholtz resonance phenomenon, *Biosci. Biotechnol Biochem.*, **81**, 823 (2017).