

ヘルムホルツ共鳴による粉層の体積推定法

誌名	農業食料工学会誌 = Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery and Food Engineers
ISSN	2188224X
著者名	平井,康丸 藤井,美来 井上,真大朗 稲垣,紫緒 西津,貴久 井上,英二 岡安,崇史 光岡,宗司
発行元	農業食料工学会
巻/号	85巻3号
巻号補足	
掲載ページ	p. 162-169
発行年月	2023年5月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター

Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



ヘルムホルツ共鳴による籾層の体積推定法*

平井康丸^{*1†}・藤井美来^{*2}・井上真大朗^{*3}・稲垣紫緒^{*4}・
西津貴久^{*5}・井上英二^{*1}・岡安崇史^{*1}・光岡宗司^{*6}

要 旨

コメの登熟歩合を推定するためには、コンバイングレンタンク内の籾層の質量に加えて、体積の計測が必要である。ヘルムホルツ共鳴は農産物の体積計測に用いられる。しかし、籾層に対しては粒子間の空隙により音圧が減衰し、計測精度が低下する。本研究では、減衰を考慮した体積推定式における粘性減衰係数 α の性質を明らかにし、体積推定精度を評価した。その結果、 α は空隙量と高い直線関係で表された($R^2 \geq 0.975$)。また、 α は籾層の質量を説明変数とする直線式で表された($R^2=0.988$)。体積の推定値の相対誤差は概ね $\pm 5\%$ 未満であり、減衰を考慮しない推定式の -20% から大幅に改善した。

[キーワード] 共鳴, 空隙率, グレンタンク, コメ, コンバイン, 収量, スマート農業, 登熟歩合, 粘性減衰係数, 粒子層

Volume Estimation Method of a Rough Rice Layer Using Helmholtz Resonance*

Yasumaru HIRAI^{*1†}, Miku Fujii^{*2}, Shintarou INOUE^{*3}, Shio INAGAKI^{*4},
Takahisa NISHIZU^{*5}, Eiji INOUE^{*1}, Takashi OKAYASU^{*1}, Muneshi MITSUOKA^{*6}

Abstract

An estimation of the percentage of ripened grains requires measuring the volume and the mass of a rough rice layer in a combine grain tank. Helmholtz resonance can be used to measure the volume. However, its measurement accuracy lowers because the sound pressure attenuates through pores in a rough rice layer. This study clarified the characteristics of viscous damping coefficients α used in the volume estimation equation considering the attenuation and evaluated the volume estimation accuracy. Coefficient α , which had a strong liner relationship with the pore volume ($R^2 \geq 0.975$), was estimated using rough rice mass ($R^2=0.988$). The relative error of volume estimates was generally within $\pm 5\%$, greatly improving from -20% using the conventional equation without considering the attenuation.

[Keywords] combine harvester, grain tank, particle layer, percentage of ripened grain, porosity, resonance, smart agriculture, rice, viscous damping coefficient, yield

I 緒 言

我が国のコメ生産は、近年、不安定な気象条件や地力

低下などによる収量・品質の低下・不安定化が顕在化している(森田 2011; 松江 2012; 高橋ら 2015)。また、価格・品質面での競争力強化の課題にも直面している。

* 2022 年 9 月第 80 回農業食料工学会年次大会(オンライン)にて一部講演

*1 会員, 九州大学大学院農学研究院(〒819-0395 福岡市西区元岡 744), Faculty of Agriculture, Kyushu University, 744, Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan

*2 九州大学農学部(〒819-0395 福岡市西区元岡 744), School of Agriculture, Kyushu University, 744, Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan

*3 九州大学大学院生物資源環境科学府(〒819-0395 福岡市西区元岡 744), Graduate School of Bioresources and Bioenvironmental Sciences, Kyushu University, 744, Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan, 現在: (株)クボタ

*4 九州大学大学院理学研究院(〒819-0395 福岡市西区元岡 744), Faculty of Science, Kyushu University, 744, Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan

*5 会員, 岐阜大学応用生物科学部(〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1), Faculty of Applied Biological Sciences, 1-1, Yanagido, Gifu 501-1193, Japan

*6 会員, 琉球大学農学部(〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1), Faculty of Agriculture, University of the RYUKYUS, 1, Sembaru, Nakagami-gun, Nishihara-cho, Okinawa 903-0213, Japan

† Corresponding author: hirai@bpes.kyushu-u.ac.jp

そのような状況下、スマート農機を活用した生産コストの低減、データ駆動型農業による収量・品質改善が取り組まれている（大鷲，2021）。

コメ生産に関しては、粗粍重量、含水率およびタンパク質含量を計測できるコンバインが開発されている。また、同コンバインを活用した施肥量調整による収量の安定化・改善効果が実証されている（宮地ら，2014）。一方、収量・品質は、肥培管理以外にも気象条件、地力、水管理および病虫害の発生等の様々な因子の影響を受ける。したがって、粗粍重量やタンパク質含量のデータのみから収量・品質の決定要因を特定するのは容易ではない。他方、作物研究では、収量改善の情報を比較的容易に得ることができる収量構成要素を、収量の成立過程の解析に用いる場合が多い（丸山，2007）。

収量構成要素の一つである登熟歩合は、全籾数のうち一定粒厚以上に登熟した精玄米数の割合である。登熟歩合の計測ができれば、生産者の収入に直結する精玄米重量の計測が可能になる。また、登熟歩合は籾殻内のデンプンの充実度を反映することから、玄米品質の成立過程の解析にも利用できる（星川 1985；松江 2012）。現在の登熟歩合の計測は、サンプルの収穫、脱穀、籾摺り、粒厚選別、粗粍重、籾数、精玄米重および千粒重の計測を伴う、時間と労力を要するものである（楠田，1995）。

そこで著者らは、コンバインのグレンタンクに堆積した籾層のかさ密度により、登熟歩合の指標となる粒子密度を計測することを検討した（Yoshizaki et al., 2018）。現在、グレンタンク内に堆積した籾層の質量を計測できるコンバインが市販されている。したがって、籾層の見かけの体積が計測できれば、かさ密度を算定できる。しかし、籾層のかさ密度と粒子密度の線形関係は、籾層の充填程度によって変化する（Yoshizaki et al., 2018）。そのため、収穫時の籾層の充填程度（空隙率）の推定にグレンタンク底面の圧力を用いることを検討したが、明確な指針は得られていない（吉寄ら，2019）。そこで、籾の粒子密度を直接推定するために、籾層の真体積（以下、体積）を計測することを検討した。籾の粒子密度は籾層の質量を体積で除することで算定される。

農産物の体積計測では、一般に液体置換法や気体置換法が用いられるが（西津ら，1995）、グレンタンク内の籾層の体積計測に適用するのは困難である。そこで本研究ではヘルムホルツ共鳴を用いた体積推定法に着目した。この方法は、対象物の形状を問わず体積が計測できるため（西津ら，2005）、籾層の堆積形状の影響を受けないと考えられる。また、共鳴周波数の測定にスピーカのボイスコイルの電気インピーダンスを用いる方法は耐騒音性に優れることから（西津ら，2005）、コンバイン作業時の騒音環境においても利用できる可能性がある。

これまでの研究により、籾層のように空隙が存在する粒体層にヘルムホルツ共鳴を適用した場合、体積が過小推定されることが報告されている（Nishizu et al., 2017；

Inoue et al., 2021）。また、この過小推定は粒体層における音響エネルギーの吸収によるものと考えられている（Nishizu et al., 2017）。これは、従来のヘルムホルツ共鳴による体積推定式がばね-質点系の力学モデルから導出されているため（西津ら，1995）、音圧の減衰の影響が考慮されず推定精度に限界があることを意味する。したがって、粒体層の体積計測系においては、音圧の減衰の影響を考慮した体積推定式を適用する必要がある。

そこで本研究の目的は、減衰を考慮した体積推定式を籾層に適用するために、1) 系の減衰能を表す指標である粘性減衰係数 α の性質を明らかにすること、2) α の推定式を作成すること、3) 体積推定精度を評価することである。さらに、本研究の体積推定法をコンバインに適用する際の留意点と課題を整理する。

II 材料および方法

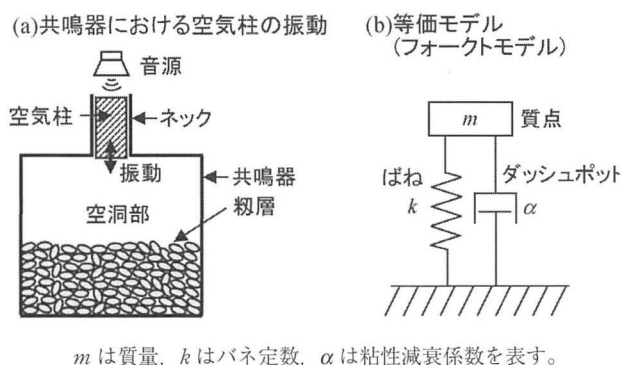
1. 容器内の籾層の体積推定式

円筒状の首（ネック）を持つ壺形の容器をヘルムホルツ共鳴器と呼ぶ（西津，1997）。また、ヘルムホルツ共鳴は、共鳴器の管口から内部に向けて音波を放射するとき、器の形状によって決まる周波数成分の音が増幅されて、再び管口から放射される現象である（西津ら，1995）。西津ら（1995）は、ヘルムホルツ共鳴を用いて、下式（1）により小豆、リンゴおよびブドウの体積を高精度に推定できることを明らかにした。

$$V = V_0 \left\{ 1 - \left(\frac{f_0}{f} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

ここで、 V ：物体の体積、 V_0 ：共鳴器空洞部の体積、 f_0 ：共鳴器が空の時の共鳴周波数、 f ：共鳴器に物体を入れた時の共鳴周波数である。

一方、本研究が対象とする共鳴器内に籾が堆積する条



m は質量、 k はバネ定数、 α は粘性減衰係数を表す。

図1 籾が堆積した共鳴器における空気柱の振動と等価モデル（フォークトモデル）

Fig. 1 Vibration of an air column in a resonator where rough rice is piled up and its equivalent model (Voigt model)

件では、粉粒子間に空隙が存在するため、音波が伝搬する際に抵抗を受けて減衰を伴う (Nishizu et al., 2017)。そこで、ヘルムホルツ共鳴器内に粉が堆積するときのネック部の空気柱の振動を図1のフォークトモデルにより表現した。

このフォークトモデルの共振周波数 f_d は下式(2)で表される(末岡ら, 1997)。

$$f_d = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k}{m}} \times \sqrt{1 - \frac{\alpha^2}{4mk}} \quad (2)$$

ここで、 k :ばね定数、 m :ネック部の空気柱の質量、 α :粘性減衰係数である。さらに、(2)式において、減衰を伴わないばね-質点系の共振周波数の式(3)を考慮し、減衰を伴う系における共振周波数 f_d を(1)式に導入すると、(4)式が導出される。

$$f = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3)$$

$$V = V_0 \left\{ 1 - \left(\frac{f_0}{f_d} \right)^2 \left(1 - \frac{\alpha^2}{4mk} \right) \right\} \quad (4)$$

また、 k および m は、以下の(5)式、(6)式で表される(Nishizu et al., 2017)。

$$k = \frac{\gamma P S^2}{V_0 - V} \quad (5)$$

$$m = \rho S(l + l_s) \quad (6)$$

ここで、 γ :比熱比、 P :大気圧、 S :ネックの断面積、 ρ :空気の密度、 l :ネックの長さ、 l_s :開口端補正量である。さらに、(5)式、(6)式を考慮して(4)式を推定対象の物体の体積 V について整理すると、下式(7)が導出される。

$$V = V_0 \left\{ 1 - \frac{B}{\alpha^2 V_0 + B \left(\frac{f_d}{f_0} \right)^2} \right\} \quad (7)$$

ただし、 $B = \rho \gamma P(l + l_s)S^3$ である。(7)式中の V_0 は共鳴器空洞部の体積であり、スピーカコーンの凹部の体積を含む。また、 B 中の計測困難な開口端補正量 l_s を相殺する形で V_0 は校正される。校正の手順は、体積が既知の物体、本研究では水を用いて、メスシリンダにより計量して体積 V を変えながら共鳴周波数 f を計測する。続いて、計測結果を用いて式(1)中の V と $1 - (f/f_0)^2$ の関係を求め、回帰係数を算定することにより V_0 を得る。ここで、 f_0 は共鳴器が空の時の共鳴周波数を計測することにより得られる。 B は共鳴器のネックの寸法と物理定数から得られる。したがって、共鳴器内に粉が堆積した系の粘性減衰係数 α を決定できれば、共鳴周波数 f_d の計測値から粉層の体積が推定できる。

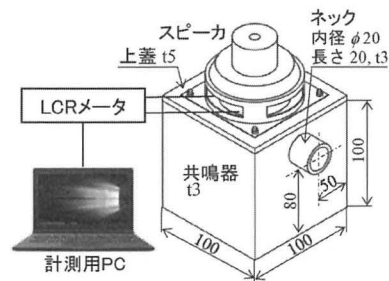
2. 共鳴器内に粒状体が堆積した系における共鳴周波数の計測

式(7)の V 、 α 、および f_d の関係を明らかにするために、共鳴器内に粒状体を堆積させた時の共鳴周波数を計測した。実験には、材料、サイズ、形状および粒子層の空隙率の影響を調べるために、次の3種類の材料を用いた。ガラスビーズ(以下、GB)(GB-1, ケニス)は、粒径が $\phi = 0.991 \sim 1.397$ mm、粒子密度が 2.48 g/cm³であった。ガラスフリット(以下、GF)は、ガラスビーズを粉砕した異方形の粒状体である。粒径が $\phi = 0.2 \sim 1.2$ mmの粒度01-フリット(Bullseye Glass Co.)を、0.7 mmの篩で選別した $\phi > 0.7$ mmの粒子を使用した。粒子密度は 2.55 g/cm³であった。粉は2020年産にこまるであり、含水率は11.5%であった。短径×長径×厚みが、10粒子の平均値で 3.3 mm× 7.5 mm× 2.3 mmであった。粒子密度は 1.28 g/cm³であった。なお、密度はピクノメータ法(八幡ら, 1967)により各材料を5回計測した平均値である。

計測システムは、共鳴器、動電型スピーカ(NS3-193-8A, AURASOUND)、LCRメータ(IM3536, HIOKI)、計測用PCおよび計測用ソフトウェア(LCR Meter Sample Application, HIOKI)により構成される(図2)。スピーカの共振周波数は80 Hz、出力音圧レベルは1 kHz時で80 dBである。試料を投入するため、共鳴器上面は取り外し可能な蓋(上蓋)で閉じた。上蓋の中央には直径76 mmの穴をあけ、スピーカの振動板が穴の内側に収まるように固定した。共鳴器の寸法は図2に示した。

ここで本実験の計測システムは、音波の放射方向とネック部の空気柱の振動方向が、西津ら(2005)の計測装置と同様に直交している。これは、図1の模式図とは異なり、スピーカの振動板とネック部の空気塊の振動の位相が半周期ずれることを意味する。一方、本システムでもヘルムホルツ共鳴が生じることが、電気インピーダンスのピークから確認された。

粒子層の異なる空隙率における粘性減衰係数を調べる



数値の単位はmm。tは厚さを表す。

図2 計測システムおよび共鳴器の寸法

Fig. 2 The measurement system and dimensions of a resonator

ため、GB は自由落下、GF と粉については、疎、自由落下、密の 3 つの充填条件で実験を行った。自由落下の条件では試料を 10 cm の高さから共鳴器に投入し、筆を使って堆積高さを均平化した。そして、堆積高さを共鳴器の各側面 3 か所の計 12 か所で計測し、平均高さを求めた。さらに平均高さから、見かけの体積、空隙率および空隙量を求めた。試料は粒子密度に基づき電子天秤で測り取り、約 50 mL 刻みで約 300 mL まで投入した。

疎の条件は、試料を投入後、共鳴器の底から金網を上方向にゆっくり引き上げて粒子間の空隙を増加させた。金網のメッシュサイズは、GF が 5 mm、粉が 10 mm を用いた。密の条件は、試料を投入後、金属製の平板の重し（縦横 9.7 cm、厚み 1.6 cm、重さ約 450 g）を粒子層の表面に置いた。さらに、共鳴器を振とう器（SHAKER SA-31, YAMATO）に固定して 270 rpm で 5 分間横振とうした。なお、疎と密の条件における、試料投入後の粒子層の均平化および高さ計測の手順、試料の投入量は自由落下と同様であった。

試料を充填後、上蓋で共鳴器を閉じ、ビニールテープにより密閉した。続いて、LCR メータを 0.4 V で定電圧駆動し、周波数を 150 ～ 250 Hz まで 0.1 Hz 刻みで変化させた。このとき、スピーカのボイスコイルの電気インピーダンスの周波数応答を 3 回計測した。共鳴周波数は電気インピーダンスが最大値を取った周波数とした。ここで、最大値が連続する場合には該当の周波数区間の中央値を共鳴周波数とした。最後に、3 回の計測から得られた共鳴周波数の平均値を求めた。計測時の室温は約 25 °C であった。また、各実験条件における一連の計測は 3 回繰り返した。

3. 粘性減衰係数の算定

式 (7) から、粘性減衰係数 α の算定式 (8) が得られる。

$$\alpha = \sqrt{B \left\{ \frac{1}{V_0 - V} - \frac{1}{V_0} \left(\frac{f_d}{f_0} \right)^2 \right\}} \quad (8)$$

式 (8) に前節 2 の実験で計測した共鳴周波数 f_d を代

入することで、粒子層の各体積 V に対する α を算定した。 α の算定に用いた式 (8) 中の B を求める際に用いた各定数の値を表 1 にまとめた。開口端補正量 l_0 は計測が困難であるため、前述の通り V_0 の値を実測値から校正することにより相殺している。したがって、 l_0 はゼロとして B を算定した。

4. 粘性減衰係数の推定式の作成

本研究で提案する粉層の体積推定法をコンバインのグレンタンクに適用するためには、前節 3 で各体積について算定した α を、体積を用いずに推定する必要がある。 α の推定式を作成するために、まず、 α の決定因子と考えられる粒子層の空隙量と α の線形関係を解析した。続いて、空隙量をグレンタンクで計測することが困難であることを踏まえ、 α の推定式の説明変数として代替できる指標を検討した。すなわち、提案手法で計測できる共鳴時のボイスコイルの電気インピーダンスと収量コンバインで計測できる粉の質量について、空隙量との直線関係を解析した。さらに、解析結果を踏まえ、電気インピーダンスあるいは粉の質量を説明変数とする α の推定式を作成した。

5. 粉層の体積推定精度の評価

前節 4 で作成した α の推定式を式 (7) に導入し、共鳴周波数 f_d を計測値として、粉層の体積 V を推定した。また、減衰を考慮しない従来の体積推定式 (1) を用いて粉層の体積を推定した。下式 (9) により推定値の相対誤差 (%) を算定し、両推定式の推定精度を比較した。

$$\text{相対誤差} = \frac{V_E - V_T}{V_T} \times 100 \quad (9)$$

ここで、 V_E ：粉層の体積の推定値、 V_T ：粉層の体積の実測値ある。

III 結 果

1. 試料の堆積状態

図 3 に材料および充填条件別の粒子層の堆積高さと空隙率を示す。堆積高さは投入した試料の体積の増加とともに線形的に高くなった。体積と高さの直線関係は疎の条件ほど傾きが大きかった。その結果、空隙率の平均値は GF の疎が 56.3 %、自由落下が 54 %、密が 47.9 % となった。粉は、GF に比べて若干値が小さく疎が 52.2 %、自由落下が 49.9 %、密が 45.8 % であった。GB の空隙率の平均値は 36.5 % と全ての材料および充填条件の中で最小であった。

2. ボイスコイルの電気インピーダンスの周波数応答

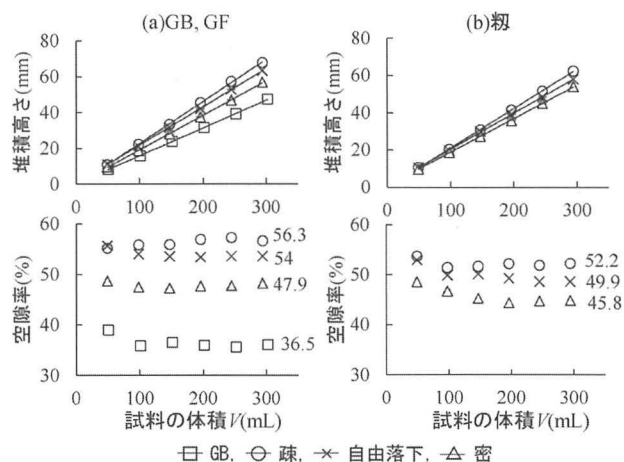
図 4 に自由落下の充填条件におけるボイスコイルの電気インピーダンスの周波数応答を示す。GB については、共鳴周波数の範囲は 182.4 Hz ～ 211.8 Hz であり、体積が大きくなるにつれて高周波側に移動した（図 4 (a)）。共鳴時の電気インピーダンスの値は、0 mL 時に 39.9 Ω であったが、体積の増加とともに減少し、302.4 mL 時

表 1 粘性減衰係数 α を求める際に用いた定数値

Table 1 Constant values used for calculating viscous damping coefficients α

定数	値
共鳴器空洞部の体積 V_0 (mL)	1159.1
空気密度 ρ (kg/m ³)	1.184 ¹⁾
比熱比 γ	1.399 ²⁾
大気圧 P (Pa)	101325 ¹⁾
ネック長 l (m)	0.02
ネックの断面積 S (m ²)	3.14159 $\times 10^{-4}$

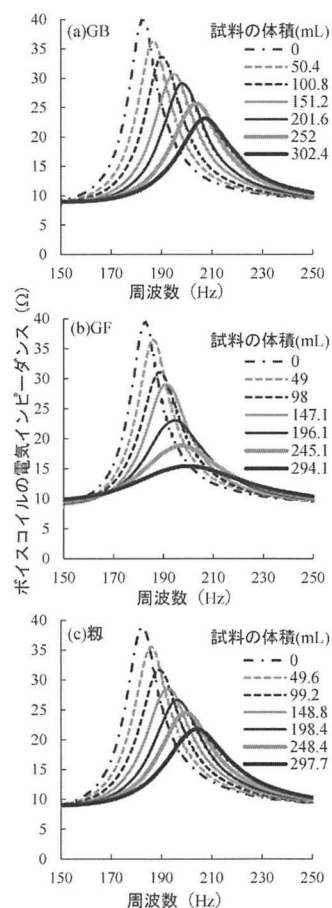
¹⁾ 国立天文台 (2008), ²⁾ 日本機械学会 (2002)。
 空気密度と比熱比は 25 °C における値である。



GBはガラスビーズ, GFはガラスフリットを意味する。3回の実験の平均値を示した。エラーバーは標準偏差が小さかったため省略した。グラフ中の数値は各充填条件における平均の空隙率である。

図3 材料および充填条件別の粒子層の高さと空隙率

Fig. 3 Height of particle layers and porosity for each material and filling condition



GBはガラスビーズ, GFはガラスフリットを意味する。

図4 ボイスコイルの電気インピーダンスの周波数応答 (自由落下)

Fig. 4 Frequency response of electrical impedance of the voice coil (Free fall)

には 23.1Ω となった。また、電気インピーダンスのピークは体積の増加とともに平坦になった。GF および 粉における周波数応答も概ね GB と同様の傾向を示した。一方、共鳴周波数の範囲は GF が $182.7 \text{ Hz} \sim 199.4 \text{ Hz}$ と最も小さくなり (図 4 (b)), 粉も $182.3 \text{ Hz} \sim 204.2 \text{ Hz}$ と GB に比べて小さかった (図 4 (c))。また、GF において共鳴時の電気インピーダンスは 0 mL 時の 39.3Ω から 294.1 mL 時の 15.4Ω に大きく低下し、ピークが GB および 粉に比べて平坦になった。GF と 粉の充填条件による違いとしては、密の条件で周波数応答のピークが鋭くなり、疎と自由落下は同様のピーク形状を示した (グラフ省略)。

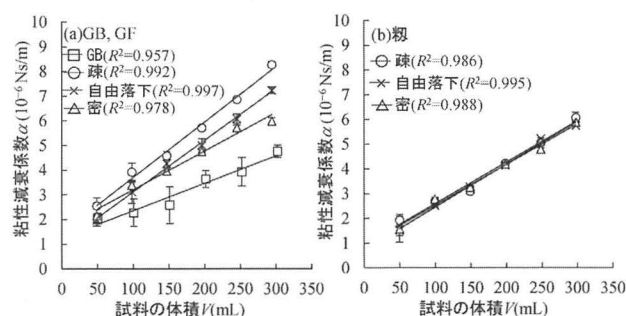
3. 粘性減衰係数

粒子層の各体積 V に対して式 (8) により算定した粘性減衰係数 α を図 5 に示した。ここで、式 (8) 中の平方根内が負となり α が算定できない場合があったので結果から除外した。 α が算定できなかったのは、粒子層の体積が最小 (約 50 mL) の時の GB および GF の疎と自由落下の各 1 回の計測であった。

全材料および充填条件において V の増加とともに α は大きくなり、両者は $R^2=0.957$ 以上の高い直線関係で表された。 α の値の範囲は GB が $2.1 \sim 4.8 \times 10^{-6} \text{ Ns/m}$ と若干小さかった。GF は $2.0 \sim 8.3 \times 10^{-6} \text{ Ns/m}$ であり、自由落下、疎と空隙率が大きくなる条件で α の範囲が大きくなった。粉は $1.5 \sim 6.1 \times 10^{-6} \text{ Ns/m}$ であり、充填条件による差異は見られなかった。

4. 粘性減衰係数の決定因子と推定式

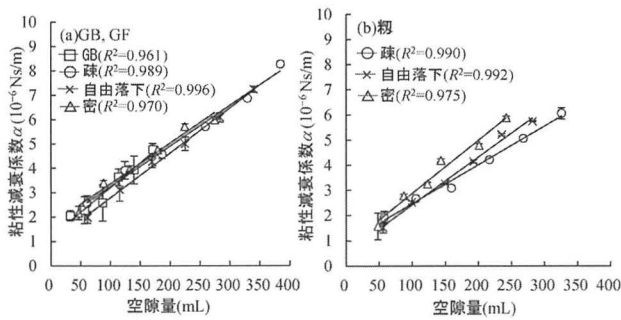
空隙量と α は $R^2=0.961$ 以上の高い直線関係であった (図 6)。両者の関係は、GB と GF の全充填条件、粉の密の条件がほぼ同一の直線上であった。一方、粉については、自由落下、疎と空隙率が大きくなるにつれて直線関係が空隙量の大きい側に移動する傾向であった。これ



GBはガラスビーズ, GFはガラスフリットを意味する。エラーバーは標準偏差 ($n=3$) を示す。ただし、試料の体積が最小 (約 50 mL) の時の GB および GF の疎と自由落下の各 1 回の計測において、粘性減衰係数 α が算定できなかった ($n=2$)。 R^2 は回帰直線の決定係数を示す。

図5 粒子層の各体積に対して算定された粘性減衰係数

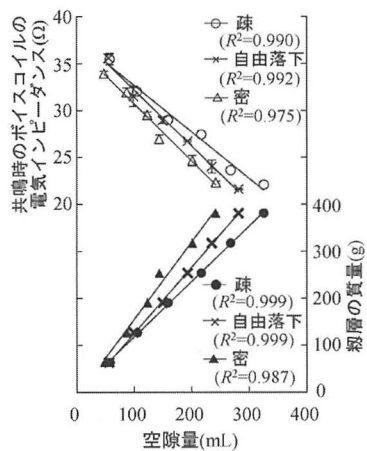
Fig. 5 Viscous damping coefficients calculated for each volume of a particle layer



GBはガラスビーズ、GFはガラスフリットを意味する。エラーバーは標準偏差 ($n=3$) を示す。ただし、試料の体積が最小 (約 50 mL) の時のGBおよびGFの疎と自由落下の各1回の計測において、粘性減衰係数 α が算定できなかった ($n=2$)。 R^2 は回帰直線の決定係数を示す。

図6 粒子層の空隙量と粘性減衰係数の関係

Fig. 6 Relationships between the amounts of pore volume in a particle layer and viscous damping coefficients



エラーバーは標準偏差 ($n=3$) を示す。

図7 粉層の空隙量と共鳴時のボイスコイルの電気インピーダンスもしくは粉層の質量の関係

Fig. 7 Relationships between the amounts of pore volume in a rough rice layer and electrical impedance of the voice coil at resonances/mass of a rough rice layer

により、同じ空隙量に対する α が減少した。

図7に空隙量と共鳴時のボイスコイルの電気インピーダンスもしくは粉層の質量の関係を示す。質量の方が $R^2=0.987\sim0.999$ あり、インピーダンスの $R^2=0.975\sim0.992$ に比べて直線式への当てはまりが良好であった。同程度の空隙量では充填条件が疎になるにつれてインピーダンスは大きく、質量は小さくなった。その結果、充填条件が密から疎へ空隙率が大きくなるにつれて、直線関係の傾きが小さくなった。

以上の結果から、インピーダンスと質量が空隙量を代替する α の説明変数になり得ることが示された。そこで、各指標を説明変数とする粉層の粘性減衰係数 α (Ns/m)

の推定式を下式 (10), (11) の通り作成した。

$$\alpha = -3.192 \times 10^{-7} Z + 1.277 \times 10^{-5}, R^2 = 0.972 \quad (10)$$

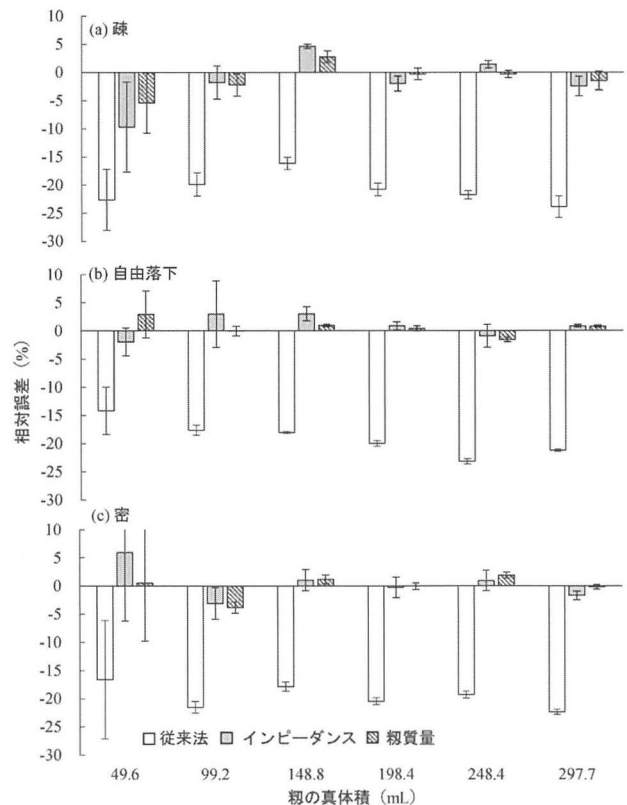
$$\alpha = 1.314 \times 10^{-8} m + 8.542 \times 10^{-7}, R^2 = 0.988 \quad (11)$$

ここで、 Z は共鳴時のボイスコイルの電気インピーダンス (Ω)、 m は共鳴器内の粉層の質量 (g) である。なお、作成した α の推定式は全充填条件込みの式である。 R^2 が高い値であったため、充填条件別に作成する必要性は低いと判断した。

3. 粉層の体積推定精度

図8に粉層の体積推定値の平均相対誤差を示す。減衰を考慮しない従来法では、いずれの充填条件においても平均相対誤差が -20% 前後と過小推定された。一方、減衰を考慮した推定式を用いた場合は、大幅に平均相対誤差が減少した。

式 (10) を用いてインピーダンスにより粘性減衰係数を推定した場合は、疎の条件の 49.6 mL において平均相対誤差が -9.7% 、標準偏差が 8.0 mL と大きかった。ま



エラーバーは標準偏差 ($n=3$) を示す。(c) 密の 49.6 mL のエラーバーの上限は省略した。従来法は式 (1) による推定結果である。インピーダンスおよび粉質量は、それぞれ、式 (10) および (11) を用いて式 (7) から推定した結果である。

図8 粉層の体積推定値の平均相対誤差

Fig. 8 Average relative error of estimates of the rough rice volume

た、密の条件の49.6 mLでは標準偏差が12.1 mLと推定精度のばらつきが大きかった。99.2 mL～297.7 mLにおける平均相対誤差(標準偏差)は、疎の条件で-2.5 %～4.6 % (0.4 %～3.0 %), 自由落下の条件で-0.9 %～3.0 % (0.2 %～5.9 %), 密の条件で-3.1 %～1.1 % (0.8 %～2.8 %)であった。

式(11)を用いて初層の質量により粘性減衰係数を推定した場合は、疎の条件の49.6 mLにおいて平均相対誤差が-5.4 %と最大であった。また、密の条件の49.6 mLでは標準偏差が10.3 mLと推定精度のばらつきが大きかった。99.2 mL～297.7 mLにおける平均相対誤差(標準偏差)は、疎の条件で-2.2 %～2.8 % (0.7 %～2.0 %), 自由落下の条件で-1.6 %～1.0 % (0.2 %～0.9 %), 密の条件で-3.8 %～1.9 % (0.4 %～1.0 %)であった。

減衰を考慮した推定式を用いた場合は、自由落下における推定精度が高かった。また、初層の質量を用いて粘性減衰係数を推定した場合の方が、若干推定精度が高かった。

IV 考 察

1. 粘性減衰係数

共鳴器内に粒子層が存在する系における粘性減衰係数 α は、空隙量の増加とともに線形的に大きくなることが示された(図6)。Nishizu et al. (2017)は、一定流速の窒素ガスを粒子層に通過させる実験において、粒子層の厚さとともに圧力低下量が線形的に増加することを明らかにした。この圧力の低下は、窒素ガスが粒子層の空隙を通過するときに受ける抵抗によるものである。本研究の計測系においても同様に、スピーカから放射された音波が初層の粒子間の空隙に伝わるときに抵抗を受ける。したがって、空隙量が粘性減衰係数の主要な影響因子と判断される。

空隙量と α の関係はGBおよびGFにおいてほぼ同一の直線で表されたのに対し、粉は疎になるにつれて同程度の空隙量に対する α の値が低下した。この結果は、粒子径の大きい初において、空隙率を大きくした際に音波が伝わる際の抵抗が減少することを示唆するものである。一方、粒子径が小さいGB、GFでは空隙率が抵抗に及ぼす影響が小さかったと考えられる。池田ら(1995)は、1.0 mm以下の小さい粒子径のGBは堆積高さの増加に対して音圧の減少が大きいことを報告している。すなわち、小さな粒子は音波が伝わる際の抵抗が大きく、減衰が十分に大きい状態にあると考えられる。このため、空隙率が音波伝搬時の抵抗にほとんど影響しなかったと推察される。

また、空隙量は共鳴時のボイスコイルのインピーダンスおよび初層の質量と強い直線関係があった(図7)。このことから、各指標を説明変数として粘性減衰係数 α の推定式を作成した(式(10): $R^2=0.972$, 式(11): $R^2=0.988$)。ここで、共鳴時のボイスコイルのインピー

ダンスは、空隙量が増加し音圧の減衰が大きくなった時のボイスコイルの振動の減衰を反映する。このことが α と良好な線形関係が得られた理由である。また、初層の質量は見かけの体積と線形関係にあり、見かけの体積に空隙率を乗じたものが空隙量である。すなわち、質量は空隙量を間接的に反映する指標であるため、 α と良好な線形関係が得られた。また、以上の結果は、初層の体積 V と共鳴周波数 f_d を計測する実験を事前に実施して、同時に共鳴時のインピーダンス Z もしくは初層の質量 m を計測すれば、推定精度の高い α の校正式が作成できることを示すものである。

2. 初層の体積推定精度

従来の体積推定式の平均相対誤差が-20 %前後であった。これに対し、減衰を考慮した推定式は初層の体積が99.2 mL～297.7 mLにおいては ± 5 %未満と大幅に精度が向上した。充填条件別では、自由落下の条件で推定精度が高かった(図8)。これは、空隙量と粘性減衰係数 α の関係が、自由落下は疎と密の間であり(図6)、全充填条件込みの α の推定式が自由落下の α に近似したためである。

ヘルムホルツ共鳴を用いた体積計測では、被検体体積が共鳴器に占める割合が大きいほど推定精度は向上する(西津ら, 1995)。本研究でも同様の傾向が確認され、初層の体積が49.6 mLと小さいときに誤差が大きかった(図8)。

3. 提案体積推定法のコンバインへの適用

本研究では、容積約1 Lの共鳴器により、ヘルムホルツ共鳴を用いた初層の体積推定の可能性を示した。一方、提案手法をコンバインのグレンタンクに適用するに当たっては、留意する点やさらに検討を要する事項がある。

まず、グレンタンクの容積は6条刈りコンバインで2000 Lと本研究の共鳴器に比べて極めて大きい。この場合、計測系のばね定数が小さくなるため、式(3)より共鳴周波数が低くなる。したがって、スピーカの選定に当たっては、低周波音を出力すること、共振周波数がヘルムホルツ共鳴の周波数帯と重ならないことに留意する必要がある。また、初層が高く堆積するため音圧の減衰が大きくなる。そのため、インピーダンスのピークを検出できる、音圧レベルを検討する必要がある。さらに、計測系の構築に当たってはネックを備えた気密性の高いグレンタンク(共鳴器)の設計・製作が必要である。グレンタンクは揚穀・排出オーガと接続しているので、気密性を確保するためには、接続部を仕切り板などで開閉できる構造を検討する必要がある。

続いて製作した共鳴器を用いて、ボイスコイルのインピーダンスあるいは初層の質量を説明変数とする粘性減衰係数 α の校正式を作成する必要がある。決定係数が高い α の校正式が作成できれば、本研究で示した程度の推定精度が確保できるものと考ええる。一方、粉の含水率が α に及ぼす影響については未検討である。値が大

きく異なるようであれば、含水率別に α の校正式を作成する必要がある。

温度は共鳴周波数に影響を与えるが、式(7)中の共鳴器が空の時の共鳴周波数 f_0 と粉が堆積した時の共鳴周波数 f_d が同じ温度で計測されていれば、体積の推定結果には影響しない。一方、収穫時の計測において同一温度を保証することが難しい場合は、 f_0 と温度の関係を予め明らかにし、計測時の温度に対応した f_0 を代入する必要がある。

提案法を収穫現場で用いる際には、エンジンあるいは各駆動部からの騒音が体積推定に影響する可能性がある。騒音が問題になる場合は、収穫物を搬送トラックに移すタイミングでエンジンを一旦停止して計測するなどの対応が必要となる。

V 結 論

本研究の目的は、1) ヘルムホルツ共鳴を用いた粉層の体積推定式における粘性減衰係数 α の性質を明らかにすること、2) α の推定式を作成すること、3) 推定式の精度評価を行うことであった。得られた結論は以下の通りである。

- 1) 空隙量と α は $R^2=0.961$ 以上の高い直線関係で表された。両者の関係は、GBとGFの全充填条件、粉の密の条件がほぼ同一の直線上であった。一方、粉については、自由落下、疎と空隙率が大きくなるにつれて、同じ空隙量に対する α が減少した。
- 2) 共鳴時のボイスコイルの電気インピーダンス、粉層の質量を説明変数とする粉層の α の推定式は、全充填条件込みで、それぞれ $R^2=0.972$ 、 $R^2=0.988$ と直線式で良好に作成された。
- 3) 粉層の体積が49.6 mLと小さいときに体積推定式の相対誤差が $\pm 5\%$ を超える場合があり、相対誤差の標準偏差も大きい傾向にあった。
- 4) 粉層の体積が99.2 mL～297.7 mLにおける体積推定式の相対誤差は $\pm 5\%$ 未満であり、従来の体積推定式の -20% から大幅に改善した。また、自由落下の条件で推定精度が高く、粉層の質量を α の推定式の説明変数とした場合に相対誤差は -1.6% ～ 1.0% であった。

謝 辞

実験の遂行に当たり九州大学大学院農学研究院農産食

料流通工学研究室よりLCRメータを貸与頂きました。本研究はJSPS科研費JP18H02306の助成を受けたものです。ここに記して感謝の意を表します。

References

- 星川清親, 1985. 新編 食用作物. 養賢堂, 東京, 91-95.
- 池田善郎, 西津貴久, 飯野勝則, 1995. 農産物の音響的体積測定法. 農業機械学会関西支部報, 78, 145-146.
- Inoue, S., Hirai, Y., Inagaki, S., Inoue, E., Okayasu, T., Mitsuoka, M., 2021. Volume measurement of particle layers in a container by using Helmholtz resonance. Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University, 66 (1), 91-95.
- 国立天文台, 2008. 空気の密度, 慣用の計量単位. 国立天文台編, 理科年表. 丸善, 東京, 376, 1016.
- 楠田 幸, 1995. 水稻の収量及び収量構成要素の調査方法について. 植調, 29, 138-143.
- 丸山幸夫, 2007. 収量および収量構成要素. 日本作物学会紀事, 76 (4), 601-603.
- 松江勇次, 2012. 作物生産からみた米の食味学. 養賢堂, 東京, 序 1, 53-56.
- 宮地克嘉, 長網宏尚, 京田成博, 2014. 営農支援システム「クボタスマートアグリシステム (KSAS)」の開発. 農業食料工学会誌, 76 (4), 284-288.
- 森田 敏, 2011. イネの高温障害と対策—登熟不良の仕組みと防ぎ方—. 農山漁村文化協会, 東京, 1-2.
- 日本機械学会, 2002. 熱力学. 丸善, 東京, 34.
- 西津貴久, 池田善郎, 1995. 農産物の音響的体積測定法(第1報). 農業機械学会誌, 57 (5), 47-54.
- 西津貴久, 1997. 音の計測とその応用 (2). 農業機械学会誌, 59 (4), 109-118.
- 西津貴久, 鳥湯康雄, 吉岡宣明, 池田善郎, 2005. 音響による農産物・食品体積計測法の耐騒音性向上に関する研究. 農業機械学会誌, 67 (3), 49-57.
- Nishizu, T., Tomatsu, E., Katsuno, N., 2017. Airflow resistance measurement for a layer of granular material based on the Helmholtz resonance phenomenon. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 81 (4), 823-830.
- 大鷲高志, 2021. 輸出に対応できる「超低コスト米」生産体制. 機械化農業, 12月号, 6-10.
- 末岡淳男, 綾部 隆, 1997. 機械力学. 森北出版, 東京, 127.
- 高橋彩子, 佐藤久美, 梅本英之, 堂本晶子, 松森 信, 金田吉弘, 伊藤豊彰, 藤井弘志, 2015. 水田土壌の地力低下の実態とその対策. 日本土壌肥科学雑誌, 86 (4), 332-338.
- 八幡敏雄, 田淵俊雄, 中野政詩, 1967. 土壌物理実験. 東京大学出版会, 東京, 32-34.
- Yoshizaki, R., Hirai, Y., Inoue, E., Okayasu, T., Mitsuoka, M., 2018. Relationships between bulk density and particle density of rough rice piled in a vertical cylinder. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 80 (5), 280-288.
- 吉寄隆一, 平井康丸, 井上真大朗, 稲垣紫緒, 井上英二, 岡安崇史, 光岡宗司, 2019. 四角柱容器に堆積した粉層の底面圧力と空隙率. 農業食料工学会誌, 81 (6), 383-391.
- (受付: 2022年8月29日・受理: 2023年2月15日・質問期限: 2023年7月31日)