

第40回 日本ロボット学会学術講演会

オープンフォーラム「食品評価サンプル規格標準化 ～食品ピック&プレイスロボットの技術向上を目指して～」

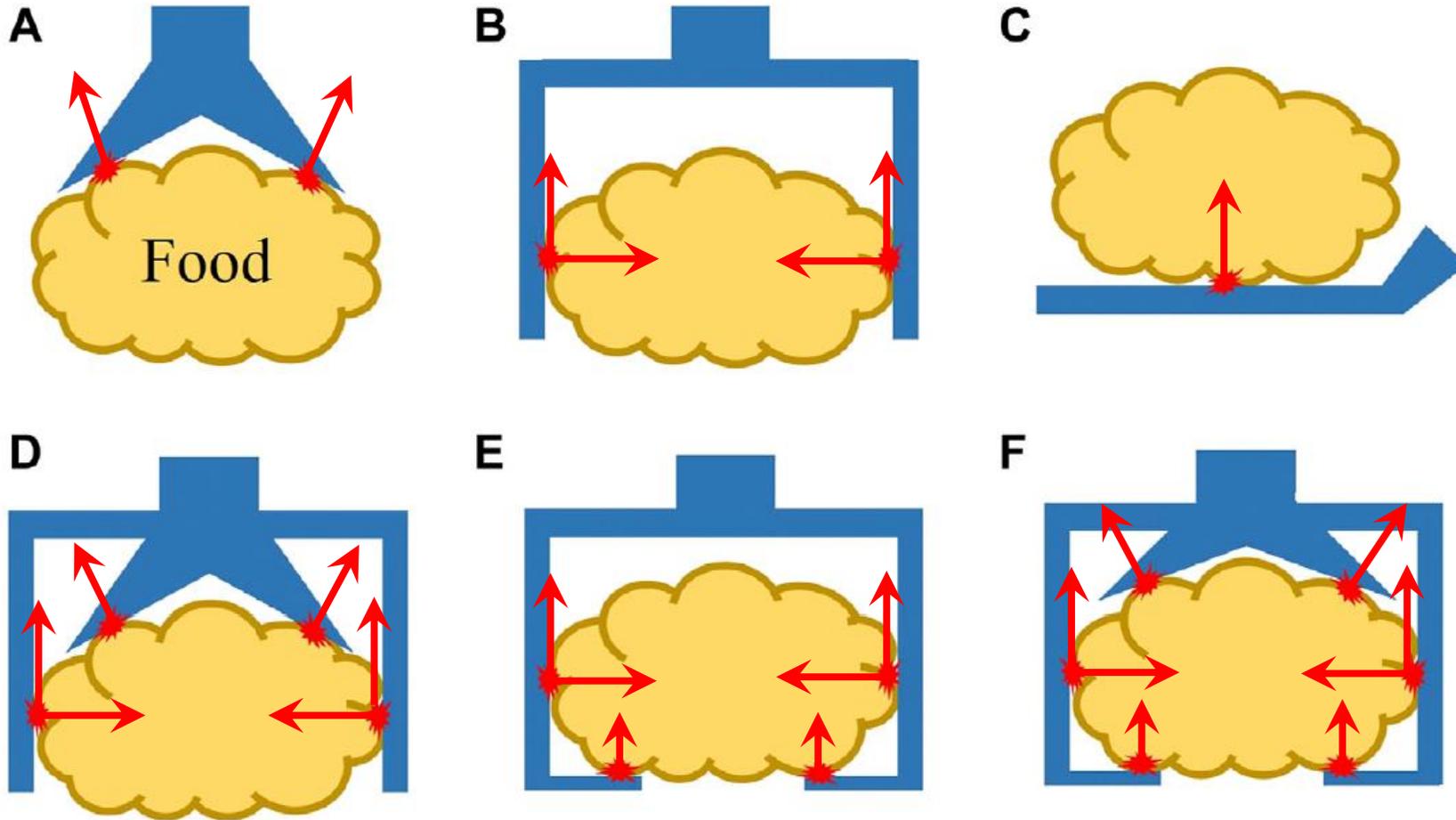
食品サンプルに求められる特性 物理パラメータと計測法

王忠奎，平井 慎一

立命館大学

2022年9月9日

ロボットハンドリングの視点から



必要となる特性

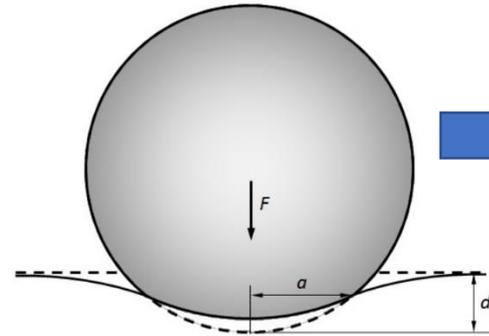
- 弾性 (ヤング率)
- 摩擦係数
- 3D形状
- 比重 (密度)
- 破断
- 粘弾性
- 付着性
- レオロジー

接触位置 (力) での把持方法分類

弾性（ヤング率）の計測

- F --- 力
- E --- ヤング率
- R --- 球体半径
- δ --- 球体の変位
- γ --- ポアソン比

ヘルツの接触理論



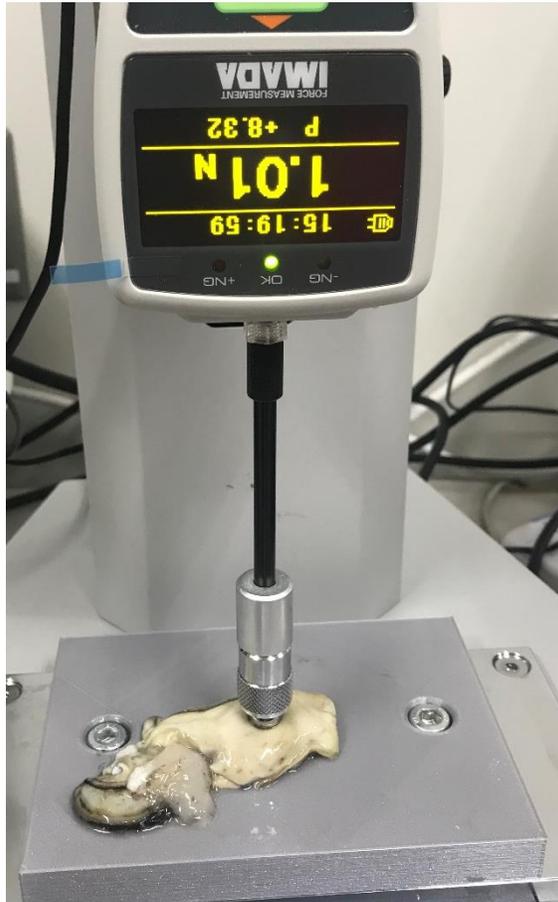
$$F = \frac{4}{3} E^* R^{\frac{1}{2}} d^{\frac{3}{2}}$$

where

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}$$

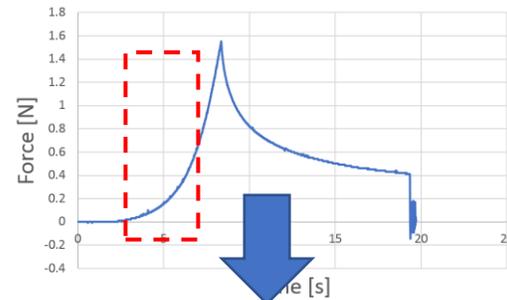
$$F = \frac{4}{3} \frac{E}{1 - \gamma^2} R^{\frac{1}{2}} \delta^{\frac{3}{2}}$$

形状複雑な対象物のヤング率を推定可能

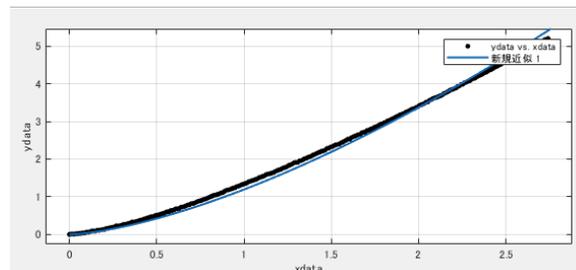


生牡蠣の弾性計測

https://en.wikipedia.org/wiki/Contact_mechanics



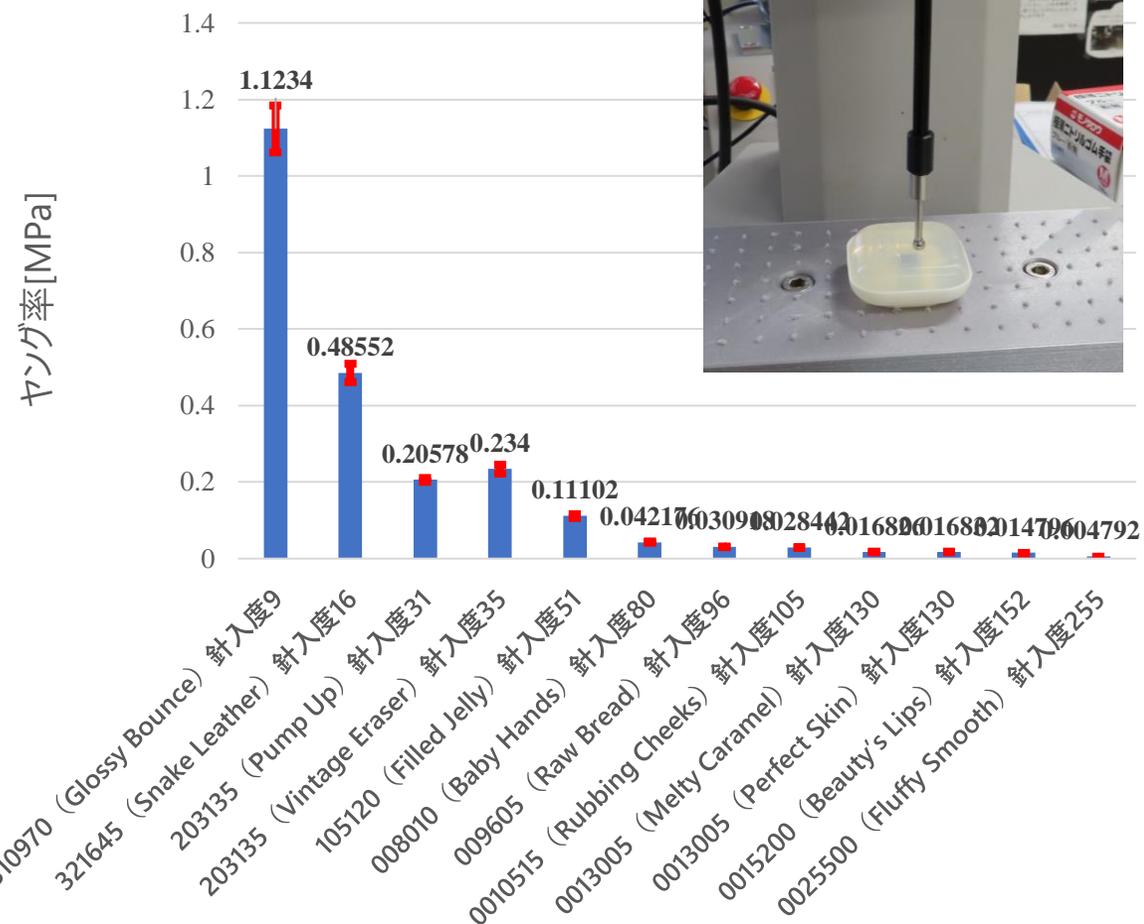
線形領域の近似



ヤング率
 $E = 10.66 \text{ kPa}$

参考： 木綿豆腐のヤング率 $E = 7.86 \text{ kPa}$
 絹ごし豆腐のヤング率 $E = 4.08 \text{ kPa}$
 出典： 堀川ら, 平成 15 年度電気関係学会東北支部連合大会

ヤング率を用いた弾性の標準化



HAPTICS OF WONDER 12触αGEL見本帖
<https://taica.co.jp/gel/collection/haptics/>

計測したヤング率

計測例

きゅうり



かまぼこ



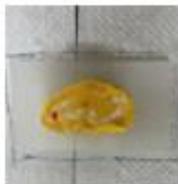
大福



ミニトマト



卵焼き



穴子寿司



ピーマン



ゆで卵



6Pチーズ



えび寄せフライ



ゆで卵半身



あじ



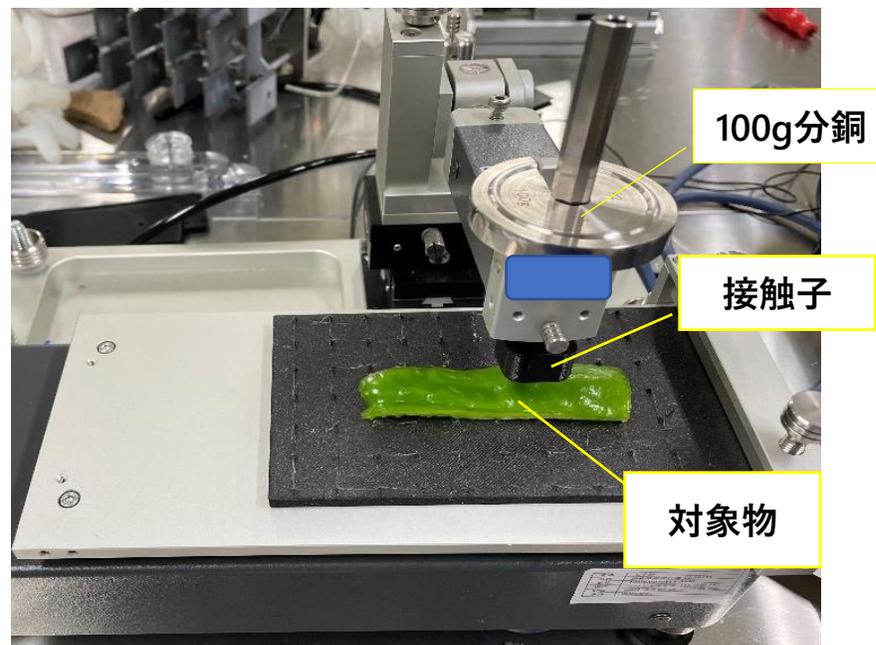
唐揚げ



食品名	ヤング率 [MPa]
大福	0.01
ゆで卵	0.05
ゆで卵半身	0.04
あじ	0.14
6Pチーズ	0.08
穴子寿司	0.01
エビ寄せフライ	0.38
かまぼこ	0.05
唐揚げ	0.02
きゅうり	0.99
ミニトマト	0.41
ピーマン	0.17
卵焼き	0.03

摩擦係数の測定

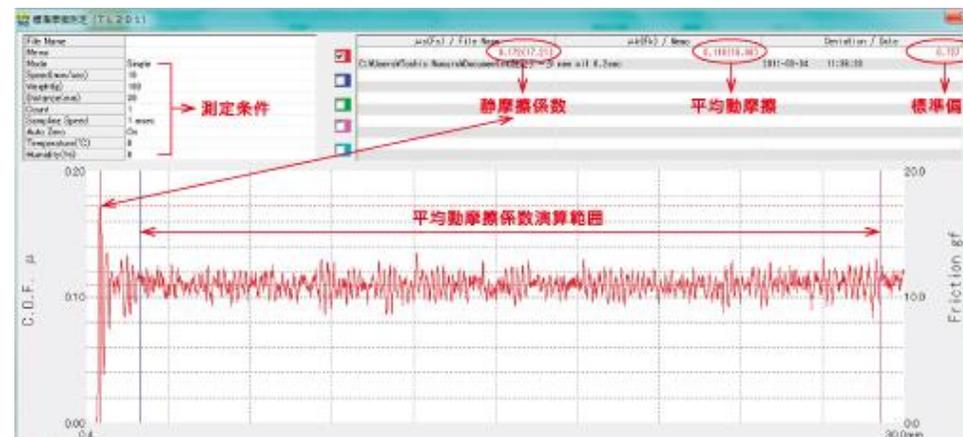
TL201Tt 静・動摩擦測定



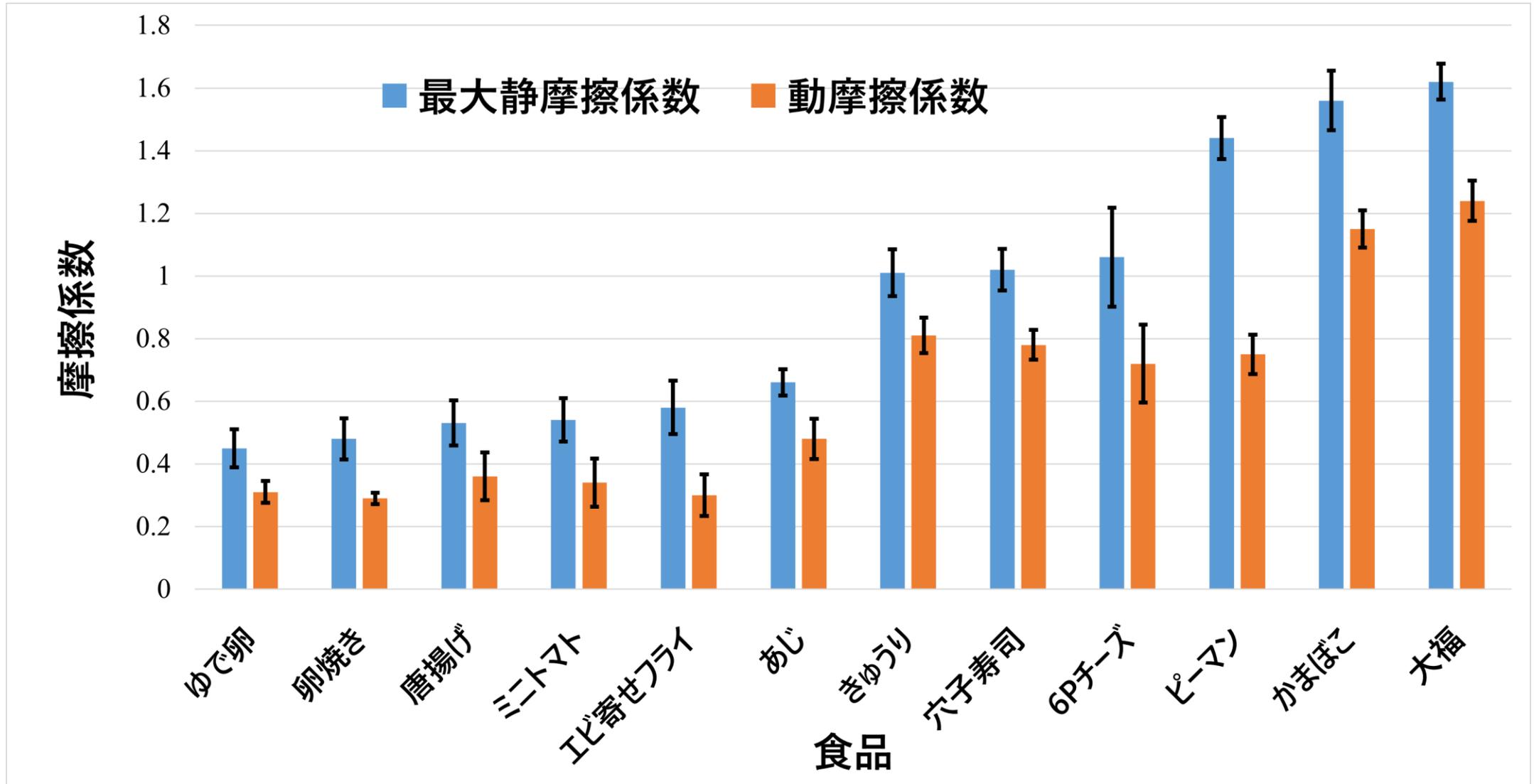
食品計測の様子

計測設定

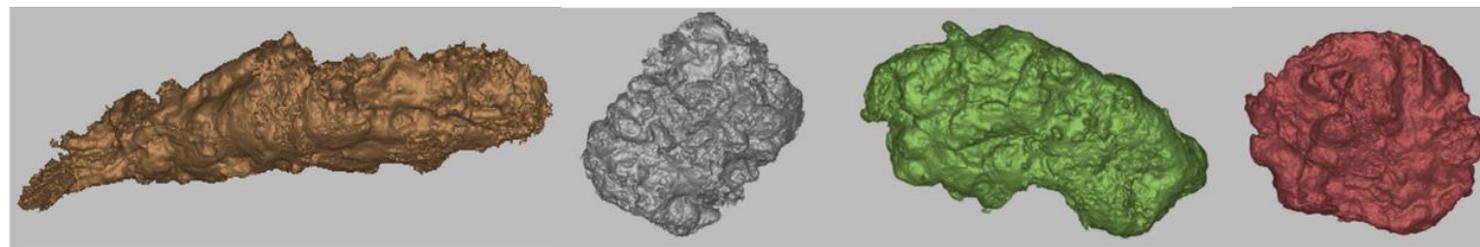
往復回数	SINGLE START
速度	10 [mm/sec]
移動距離	20 [mm]
分銅	100 [g]



食品の計測例



3D形状の計測

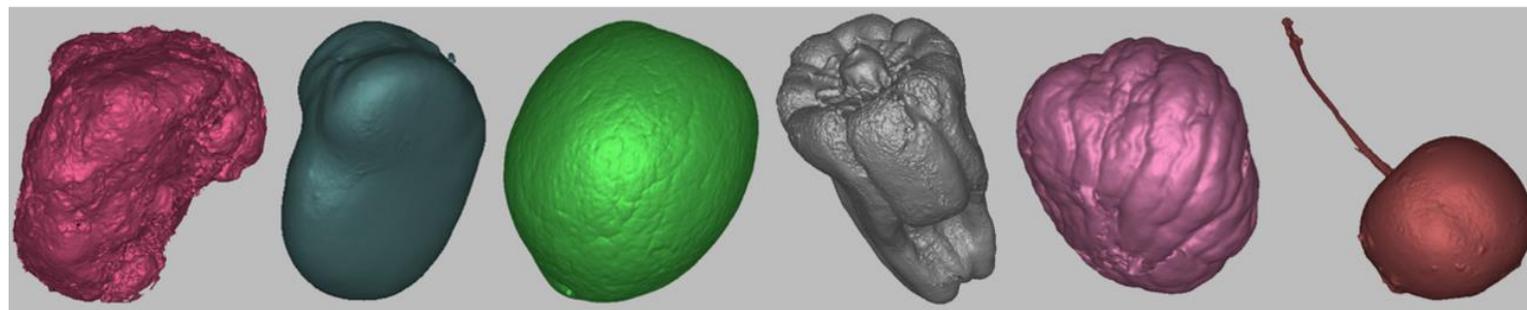


エビ天ぷら

ナス天ぷら

カボチャ天ぷら

サツマイモ天ぷら



唐揚げ

空豆

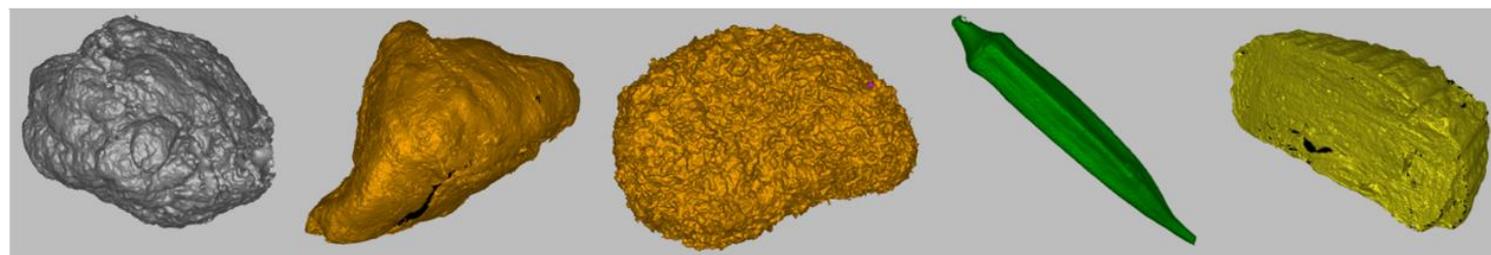
梅

ピーマン

栗

さくらんぼ

Artec Micro 3Dスキャナ



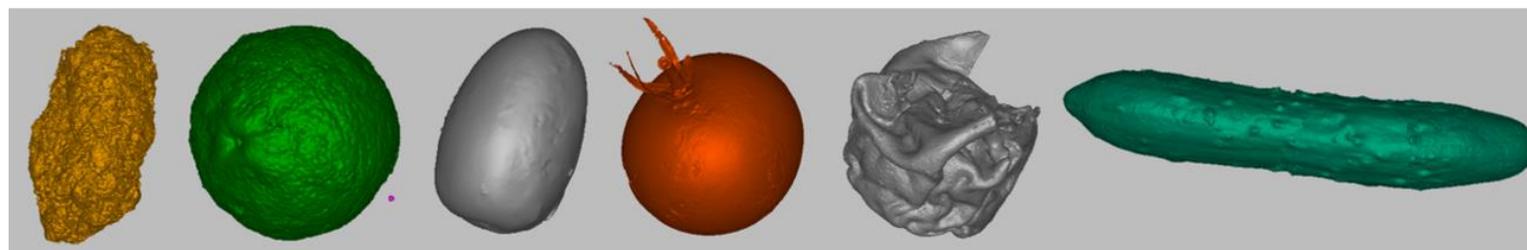
LAWSON唐揚

いなり寿司

エビ寄せフライ

オクラ

玉子巻き



カキフライ

カボス

ミニトマト 2種類

シュウマイ

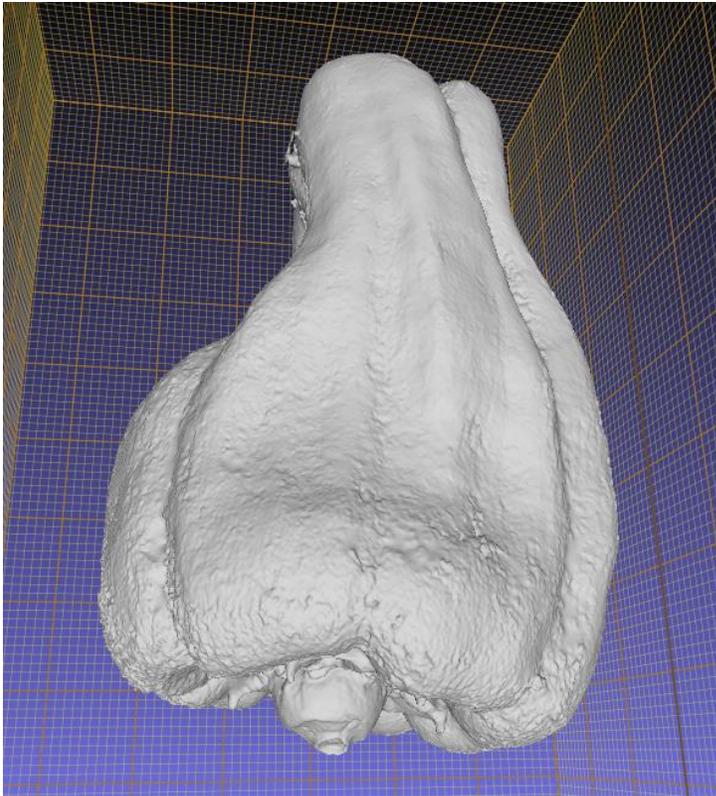
キュウリ

比重の計測

$$\text{比重} = \frac{\text{重量}}{\text{体積}}$$

重量がはかりで計測する

体積
計測

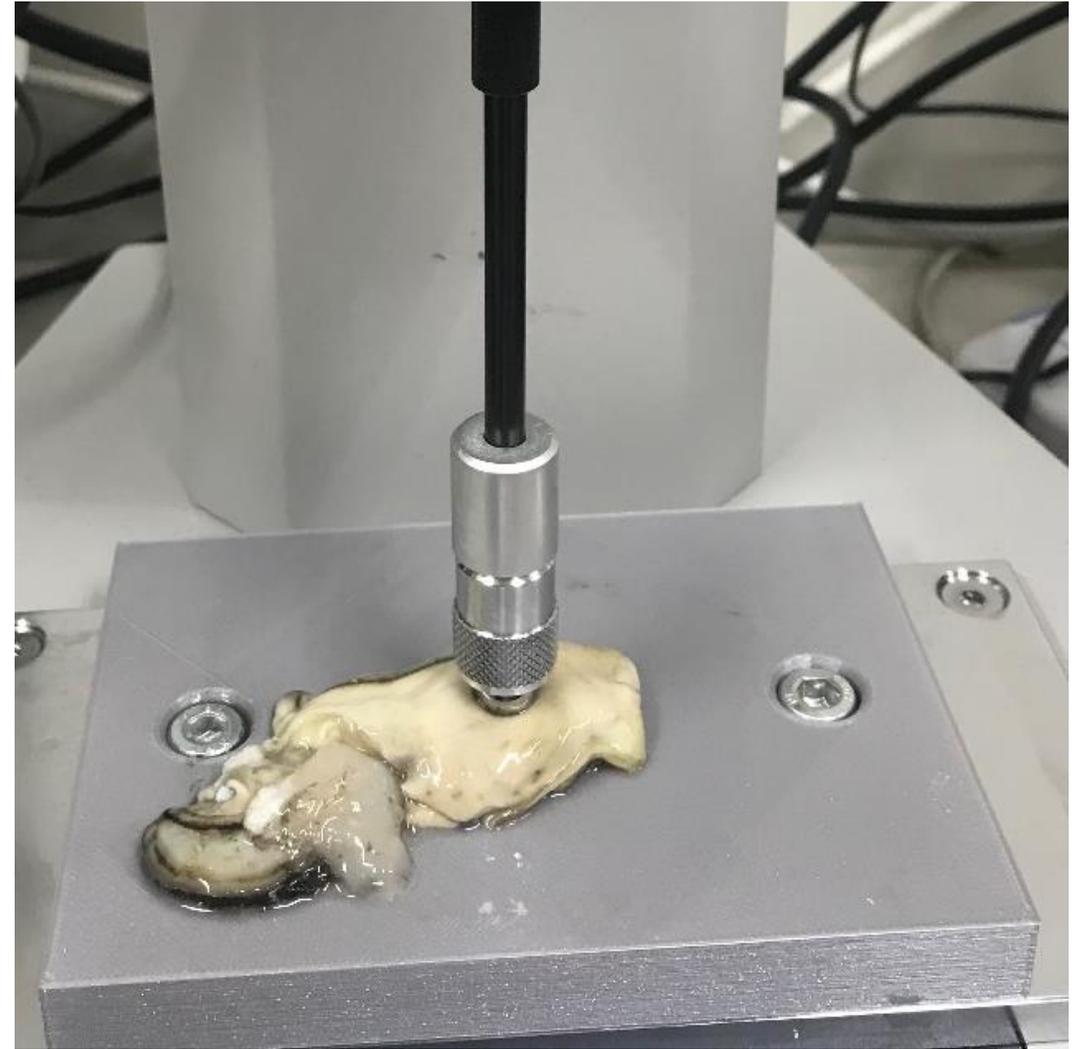


MeshLabで
体積の計算



49725 mm³

破断の計測



応力-ひずみ曲線

出典：三浦靖,「食品レオロジーの面白さ 第5回 食品の破断」,
日本レオロジー学会誌、vol.43, no.5, pp.181-183, 2015

圧縮試験を用いて「**力-変位曲線**」
を取得し、破断点を計測できる

粘弾性の計測 1



FSA-1KE-50N (イマダ社製)

変位を与え荷重を計測

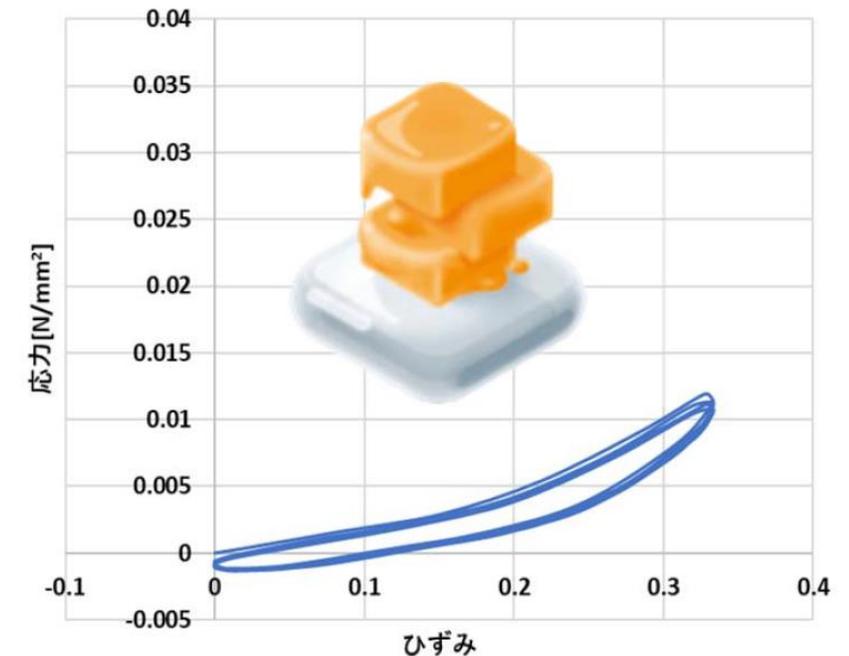
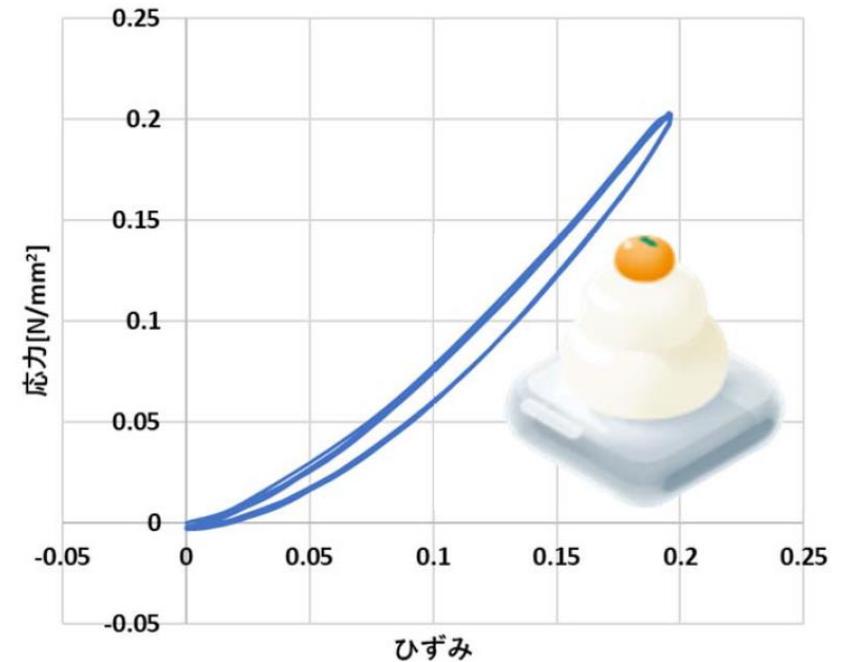
接触を保つ

往復運動

ひずみと応力に換算

ひずみのパラメータ表現

$$\varepsilon = A \sin(\omega t + \phi) + b$$



粘弾性モデリングと再現

応力ひずみ関係

$$\sigma(t) = E \operatorname{sgn}(\varepsilon) |\varepsilon|^{E_p} + c \operatorname{sgn}(\dot{\varepsilon}) |\dot{\varepsilon}|^{c_p}$$

支配方程式

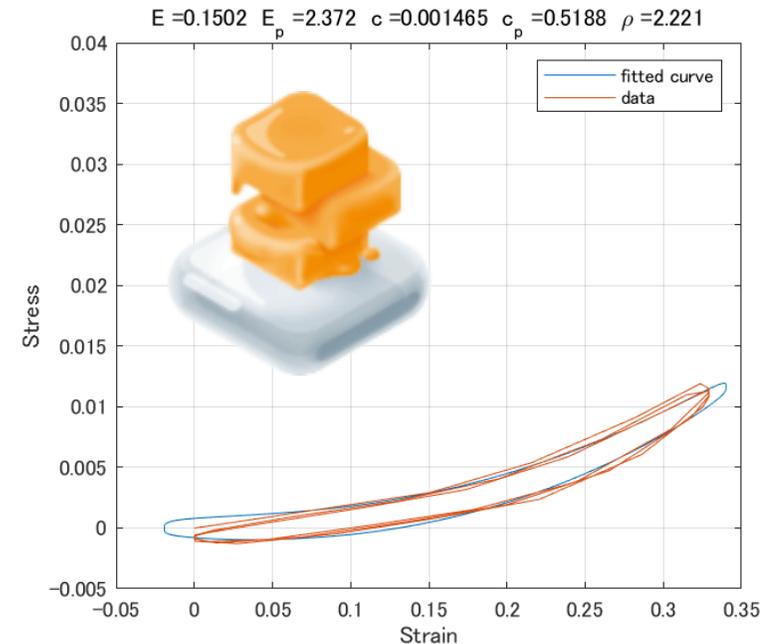
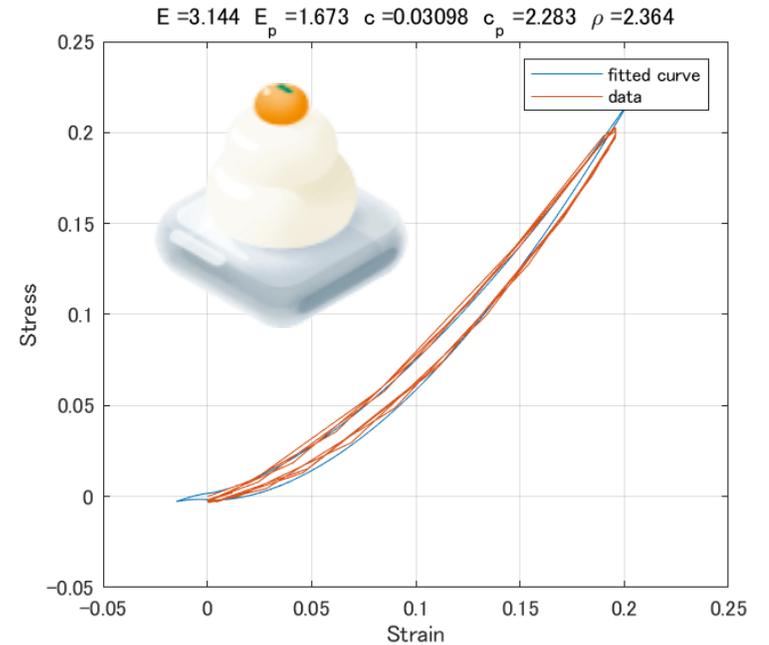
$$E \operatorname{sgn}(\varepsilon) |\varepsilon|^{E_p} + c \operatorname{sgn}(\dot{\varepsilon}) |\dot{\varepsilon}|^{c_p} + \rho \ddot{\varepsilon} = \sigma(t)$$

モデル値と計測値の誤差

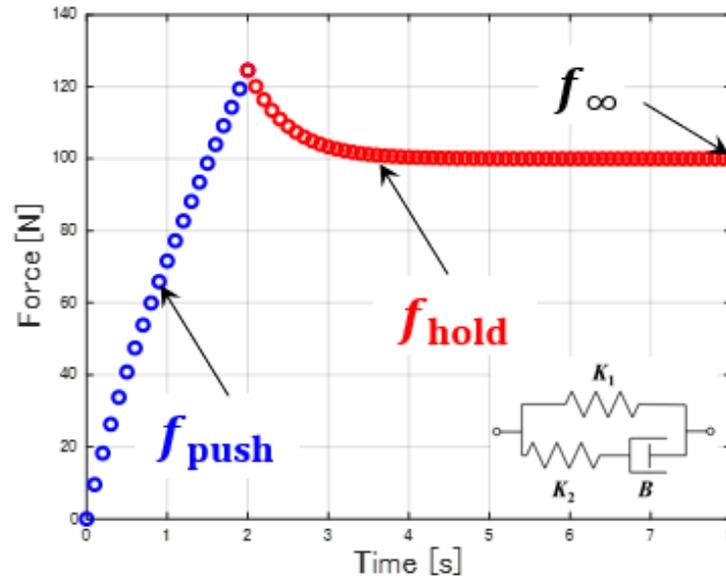
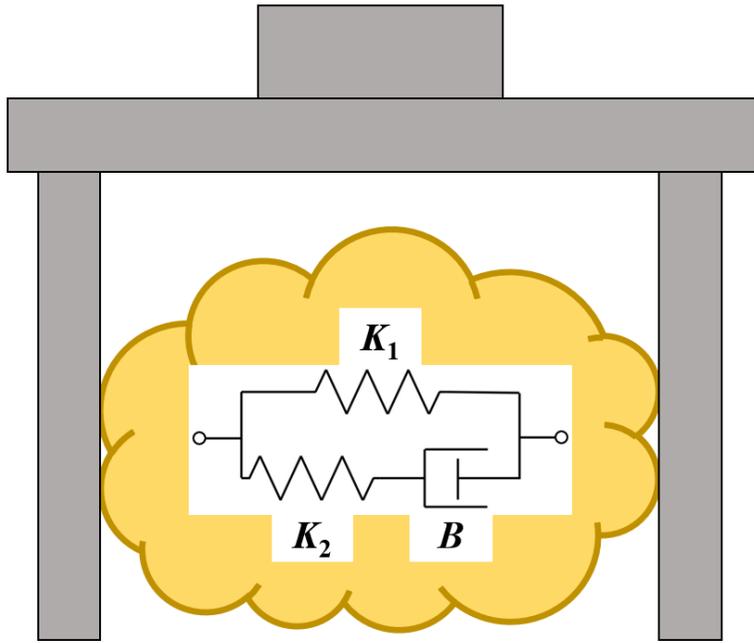
$$D(E, E_p, c, c_p, \rho) = \int_0^T \{\sigma(t) - \sigma_m(t)\}^2 dt$$

モデルパラメータの推定

$$\text{minimize } D(E, E_p, c, c_p, \rho)$$



粘弾性計測 2



$$K_1 = \frac{f_\infty}{d}$$

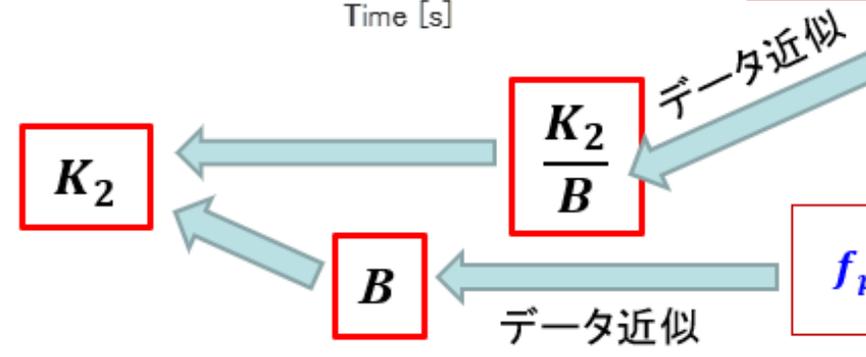
静的な弾性係数と相当

$$\dot{f} + \frac{K_2}{B} f = (K_1 + K_2)\dot{x} + \frac{K_1 K_2}{B} x$$

$$x = d$$

$$f_{hold} = K_1 d - [K_1 d - f(t_d)] e^{-\frac{K_2}{B}(t_d - t)}$$

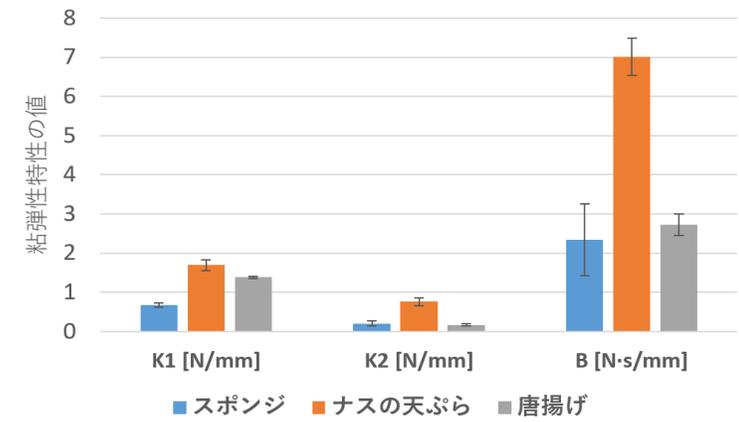
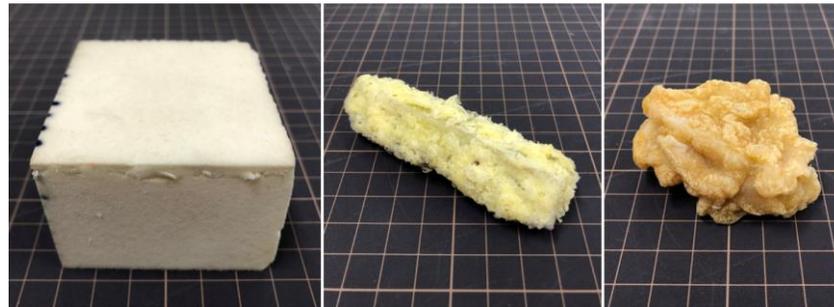
$$x = \frac{d}{t_d} t$$



$$f_{push} = \left(B + K_1 t - B e^{-\frac{K_2}{B} t} \right) \frac{d}{t_d}$$

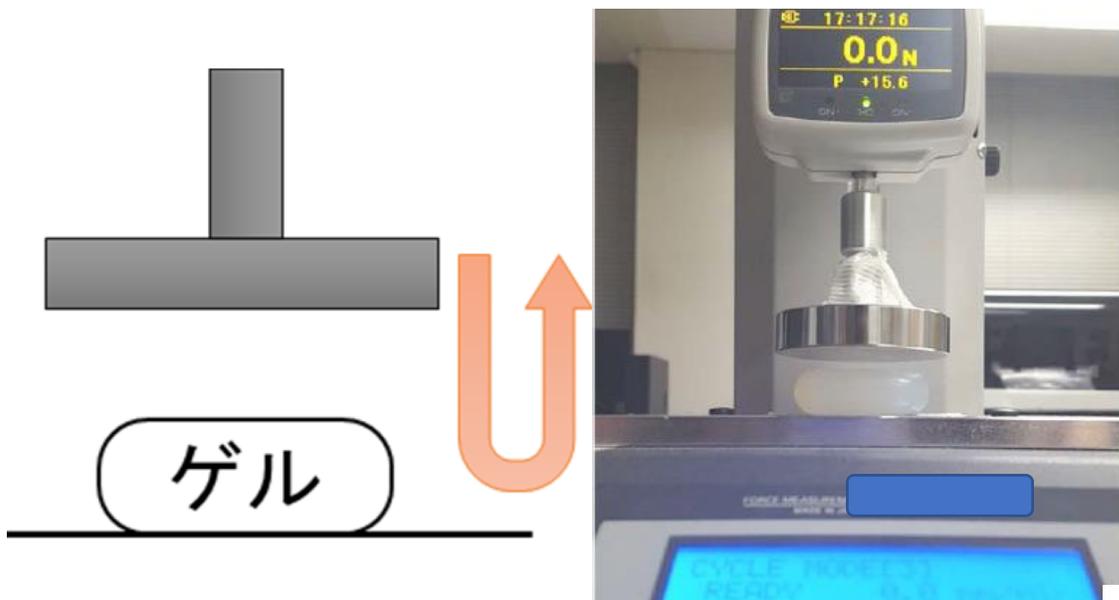
3要素粘弾性モデル：

$$\dot{f} + \frac{K_2}{B} f = (K_1 + K_2)\dot{x} + \frac{K_1 K_2}{B} x$$



付着性の計測

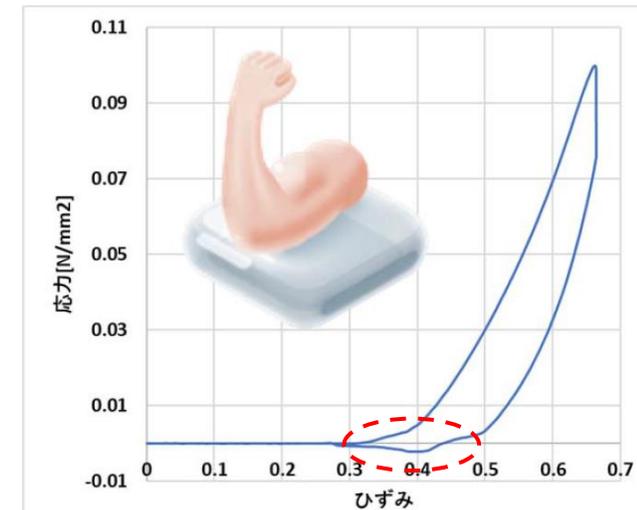
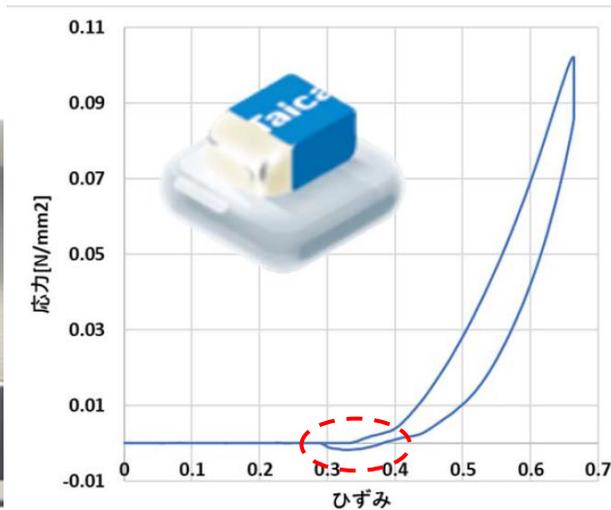
同じ材料：異なる表面特性



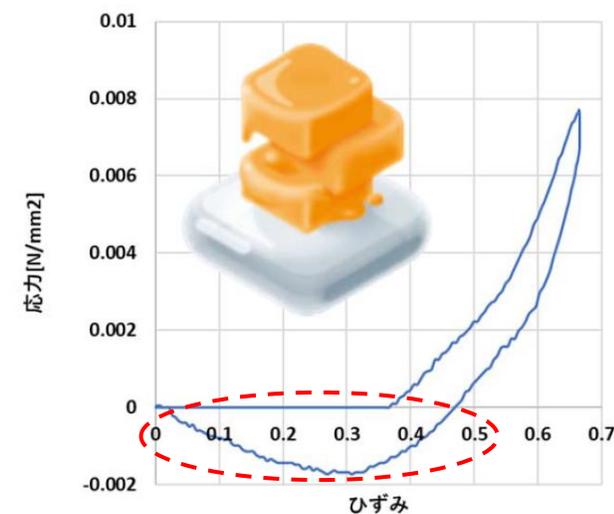
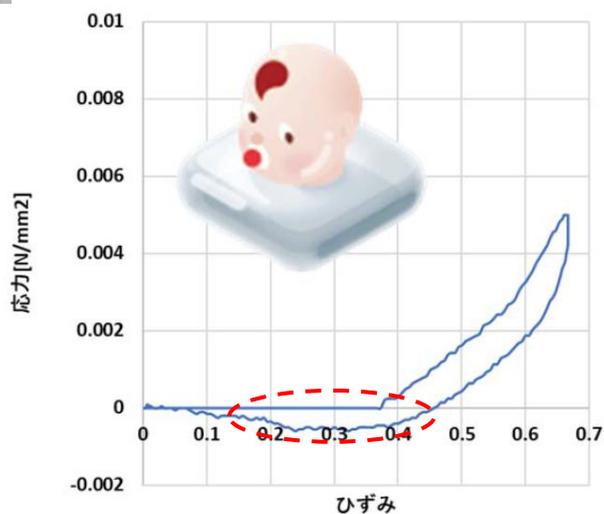
計測イメージ

計測様子

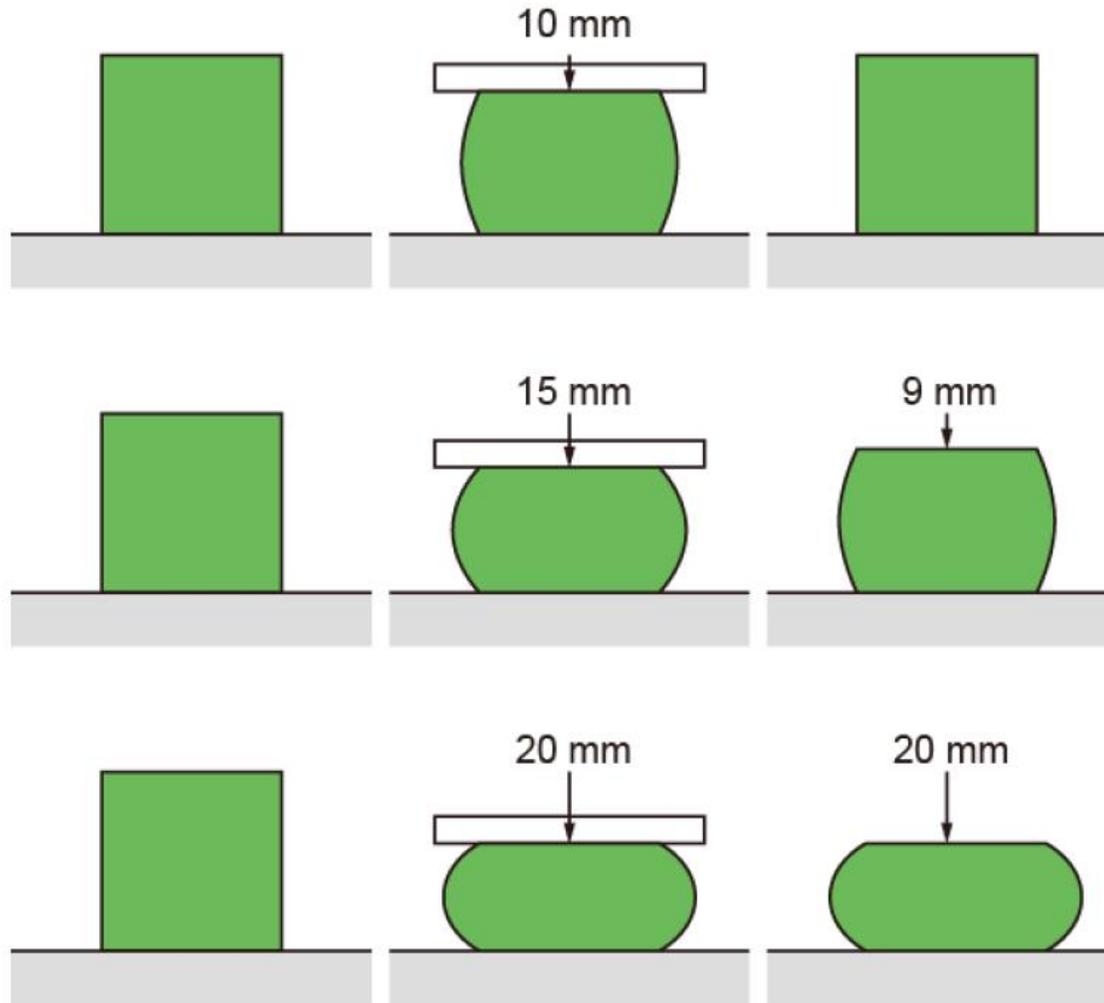
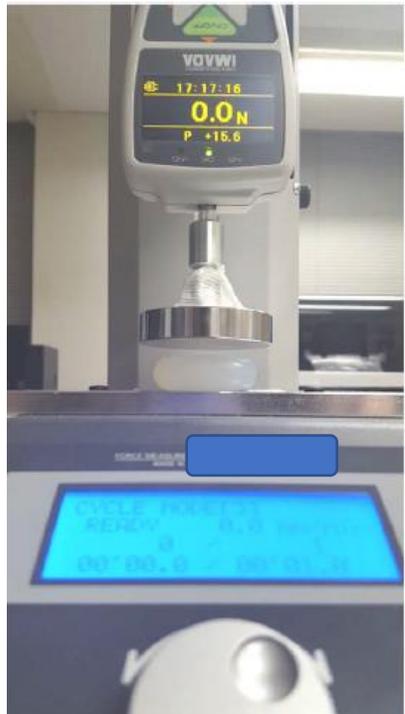
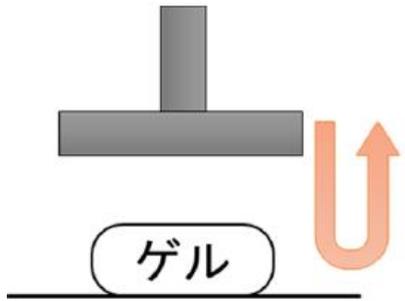
正の力：押し付け力
負の力：付着力



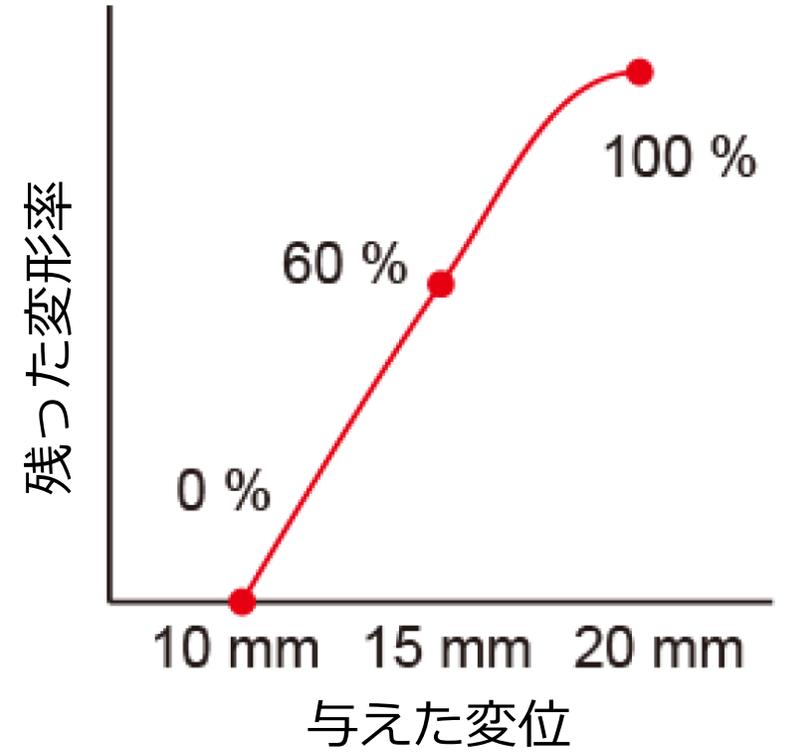
滑 ←→ 粘



レオロジーの計測



レオロジー



まとめ

- ロボットハンドリングのための食品特性の計測を紹介した
- 食品サンプルを製作する際に、利用状況に応じて必要特性を再現すればよいだろう
- 食品の種類が多いため、グルーピングが必要と思う
- 食品特性データベースを構築し、活用具体例を検討する

ご清聴ありがとうございます