

食品ハイドロコロイドの構造と物性

共立女子大学家政学部 熊谷 仁

ハイドロコロイド

直径10～1000 nmの粒子が水を連続相に分散している状態
(コロイド状態を制御するために使用される多糖類やタンパク質)

ハイドロコロイドの機能

増粘, ゲル化, 保水, 分散, 安定, 皮膜形成, 起泡, 乳化

ハイドロコロイドの用途

分離担体, 固定化担体

テクスチャーモディファイヤー

マヨネーズ, ドレッシング, デザートゼリー, アイスクリームなど

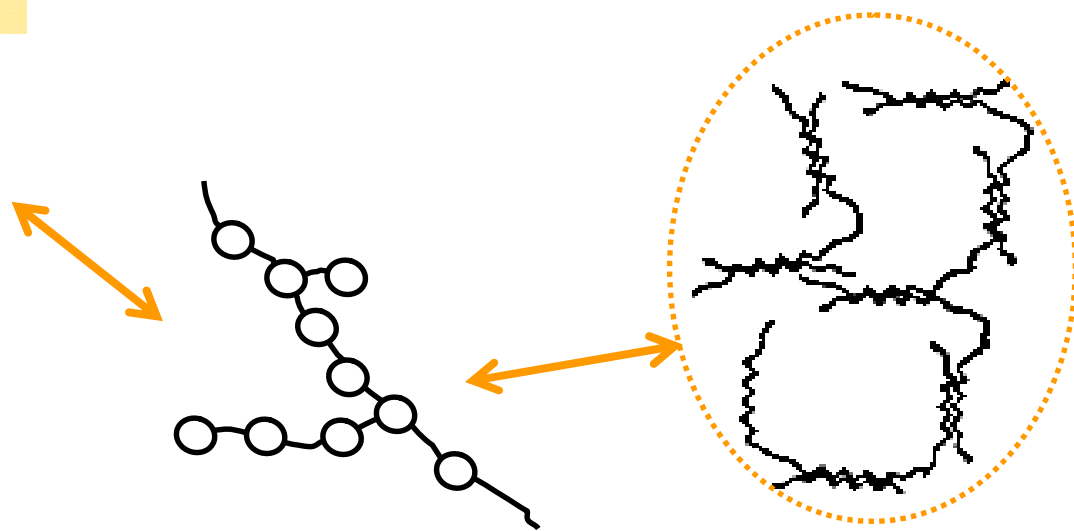
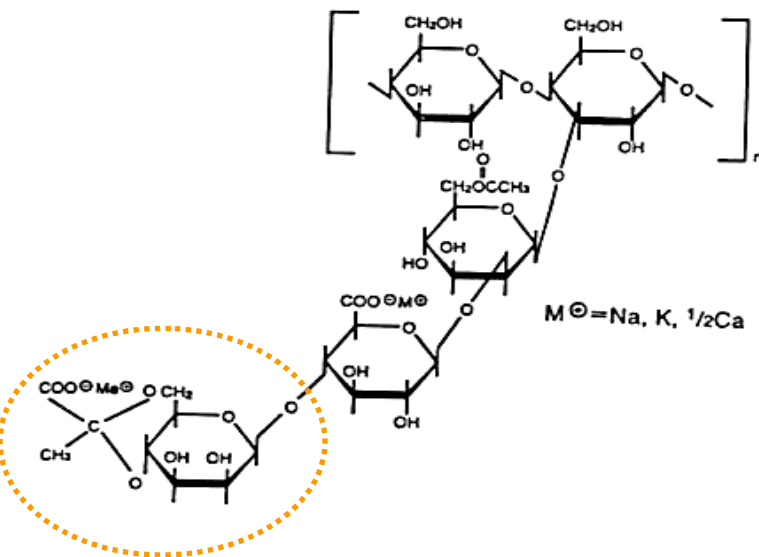
近年

超高齢社会 咀嚼や嚥下機能に障害を持つ人の増加

咀嚼・嚥下障害用介護食: ゲル化剤, 増粘剤

増粘剤・ゲル化剤中の高分子の 絡み合い構造 (ハイドロコロイド)

キサンタンガムの化学構造 (繰り返し単位)



○ : 単糖単位

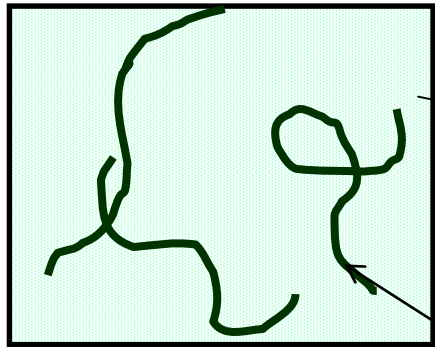
キサンタンガムの
高分子絡まりあい構造

粘性・弾性

ゾルとゲルの高分子分散構造

Sol

粘性的（液体）



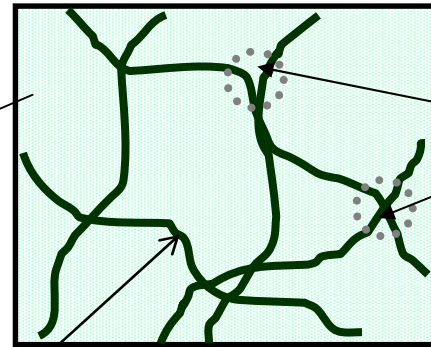
分散媒
水

高分子鎖

高分子は独立に存在
絡まりあい etc.

Gel

弾性的（固体）



架橋点

3次元ネットワーク構造

ゾル・ゲル転移 $\Leftrightarrow$ 濃度・温度変化 etc.

物性とは？

基礎科学における物性

試料の内部構造

工学的モデル中の物性

プロセスの最適化

品質管理

テクスチャー評価のための物性

食品の二次機能, 官能評価・おいしさ

咀嚼・嚥下特性

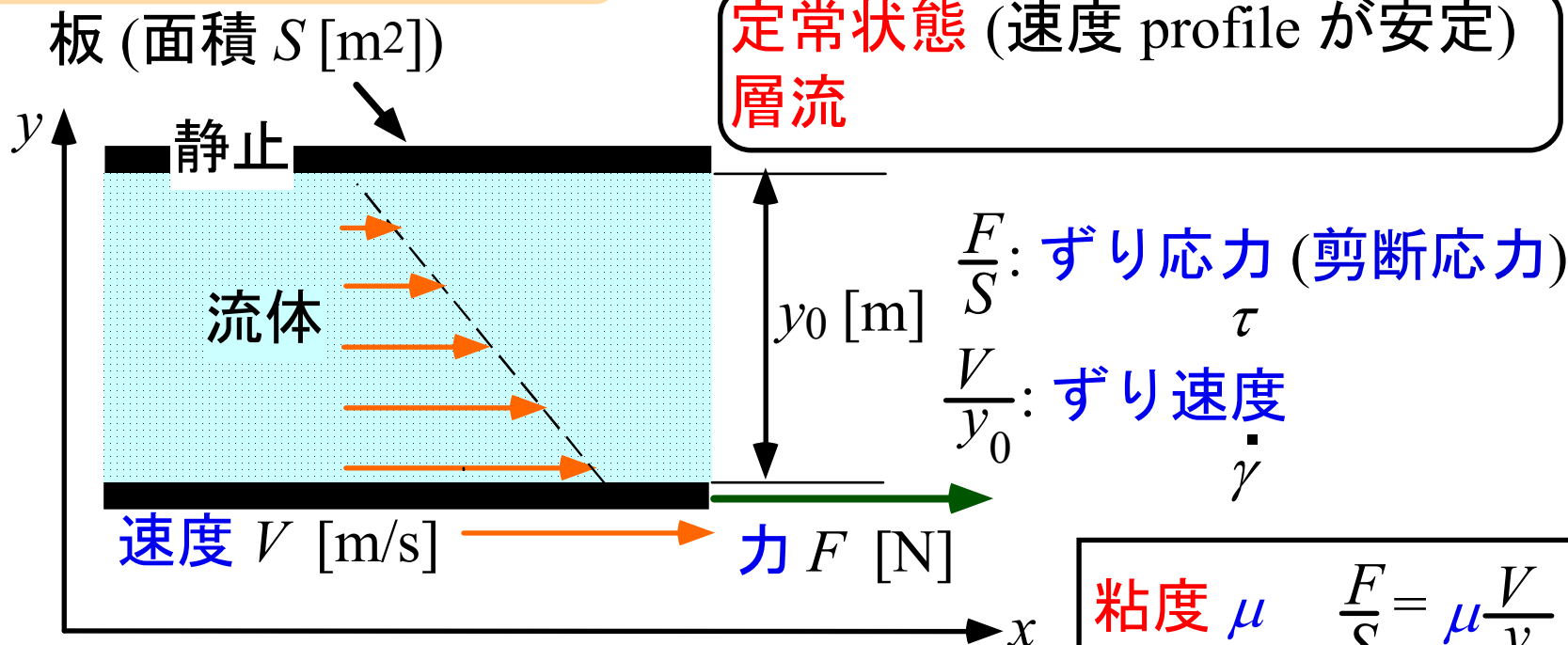
大変形下での測定

試料の大きさ, 形状に依存

粘度 (粘性率, viscosity)

物性値

定常状態 (速度 profile が安定)
層流



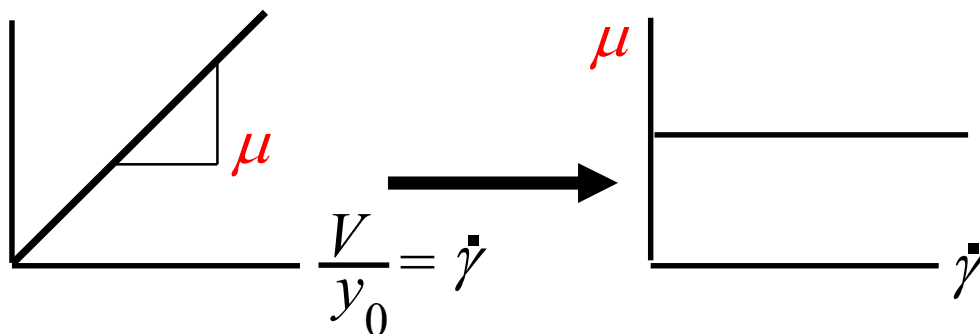
粘度 μ [Pa·s]

$$\frac{F}{S} = \mu \frac{V}{y_0}$$
$$\tau = \mu \dot{\gamma}$$

粘度 μ : 流体の流動性の尺度
→ μ が大きいほど流れにくい

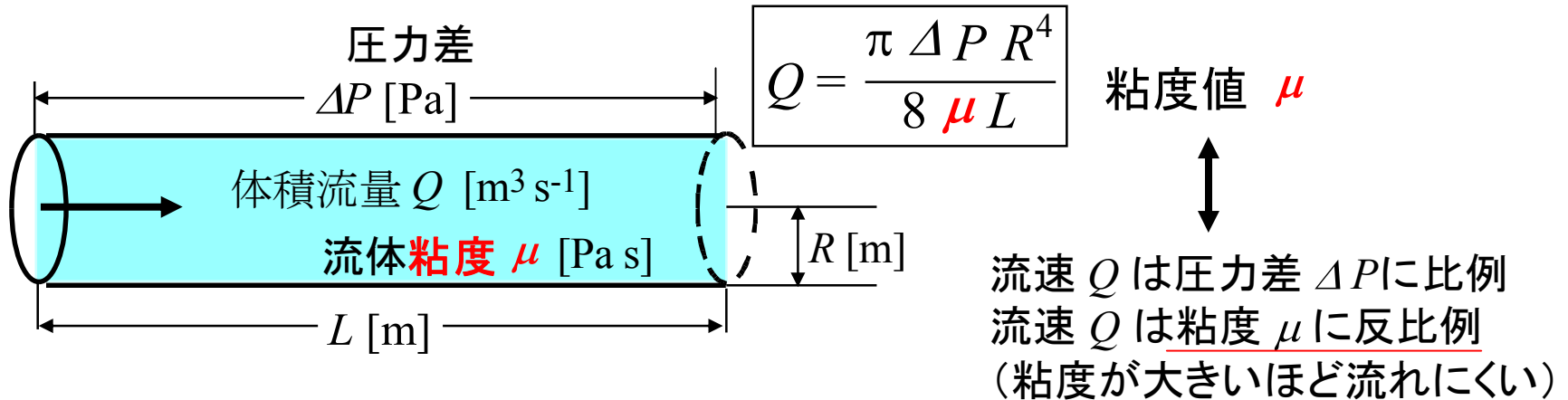
ニュートン流体

$$\frac{F}{S} = \tau$$

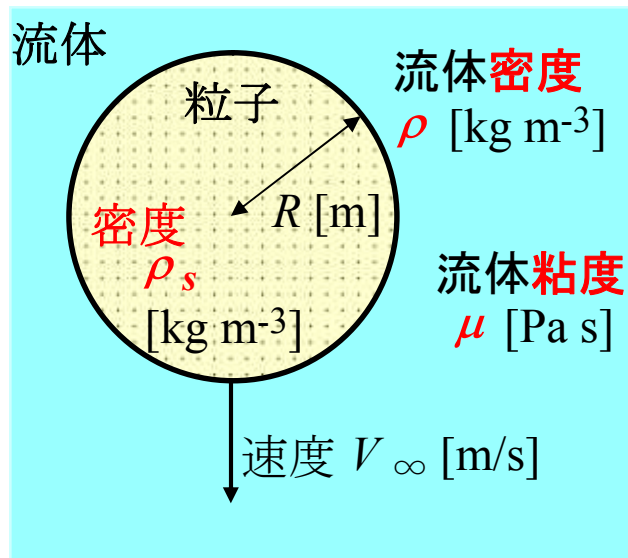


物性値を含む工学モデル・理論の例（Newton 流体に関して）

(a) 円管内流動（層流）に関する **Hagen-Poiseuille** の法則



(b) 流体中の球状粒子の沈降（または浮上）速度式



$$V_\infty = \frac{2 R^2 (\rho_s - \rho) g}{9 \mu} \quad (\text{層流})$$

速度 V_∞ は 粘度 μ に反比例
(粘度が大きいほど動きにくい)

応用例)

エマルションの安定性（クリーミング）

必要な均質化サイズ

粒子径が1/100なら速度は1/10000

溶液の比粘度，還元粘度，極限粘度

比粘度 $\eta_{sp} = (\eta - \eta_s)/\eta_s = \eta_{rel} - 1$

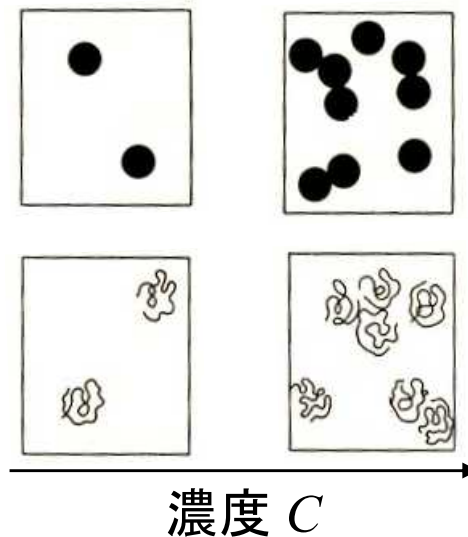
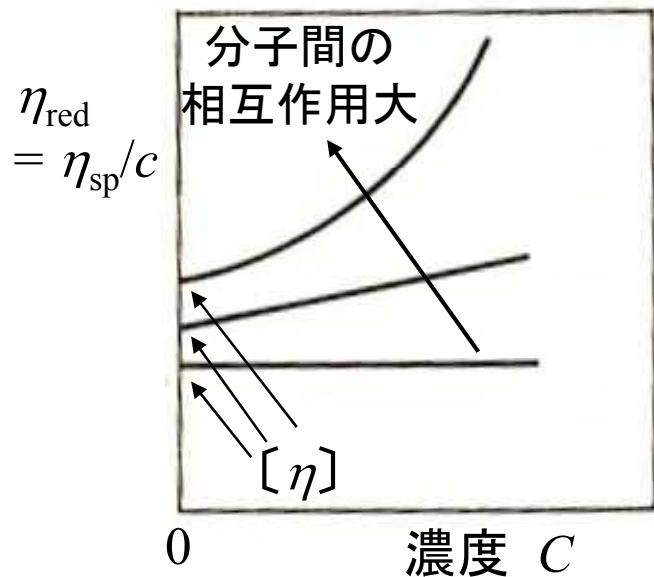
相対粘度 $\eta_{rel} = \eta/\eta_s$

還元粘度 $\eta_{red} = \eta_{sp}/C$

極限粘度 $[\eta]$

$= [\eta_{sp}/C]_{C \rightarrow 0}$

C : 濃度
 η_s : 溶媒粘度
 η : 溶液粘度



アインシュタインの粘度式

剛体球のサスペンションの粘度

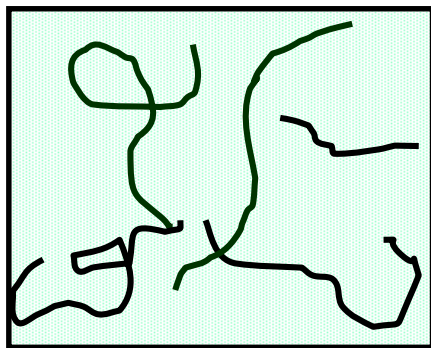
$\eta_{sp} = 2.5 \phi$ ϕ : 粒子の体積分率

c : 粒子の濃度 $[\text{g}/\text{cm}^3\text{-溶液}]$, ρ : 粒子密度 $[\text{g}/\text{cm}^3\text{-粒子}]$ として, $\phi = c/\rho$

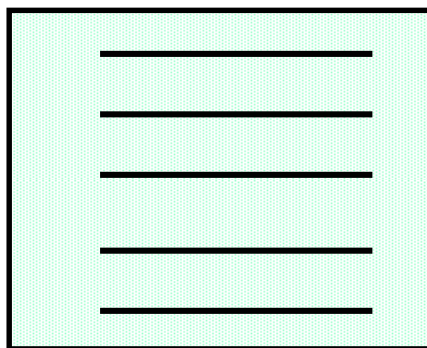
$\therefore \eta_{red} = \eta_{sp}/c = 2.5/\rho$ *i. e.* 還元粘度 η_{red} が濃度によらず一定

溶液（ゾル）の非ニュートン流動

ずり速度 $\dot{\gamma}$ 小



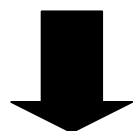
ずり速度 $\dot{\gamma}$ 大



流れ方向（層流）

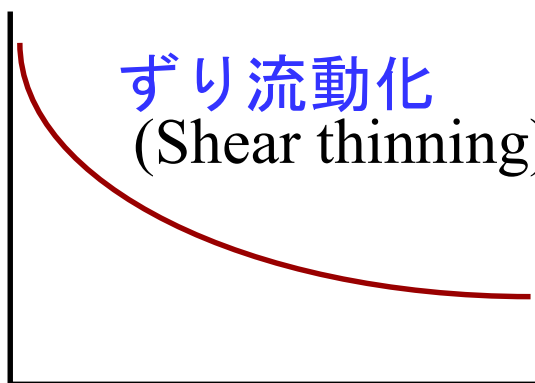


分散構造



粘度

ずり流動化
(Shear thinning)



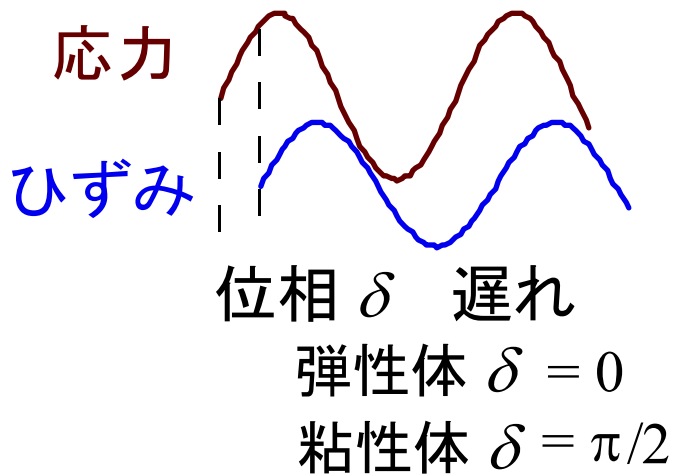
ずり速度 $\dot{\gamma}$

巨視的な物性

動的粘弾性測定

ω : 角周波数 [rad/s]

粘弾性体 (G' , η')



$$\tan \delta = \frac{\omega \eta'}{G'}$$

G' : 貯蔵弾性率 [Pa]

η' : 動的粘性率 [Pa·s]

変数変換

損失弾性率 G'' : ($\equiv \omega \eta'$) [Pa]

複素弾性率 $G^* = G' + i G''$ [Pa]

複素粘性率 $\eta^* \equiv G^*/(i \omega) = \eta' - i \eta''$ [Pa·s]

$$\eta'' \equiv G''/\omega$$

食品ハイドロコロイドのレオロジー挙動

一般に

観測時間が短い
(角周波数 ω 大)



固体的 G'

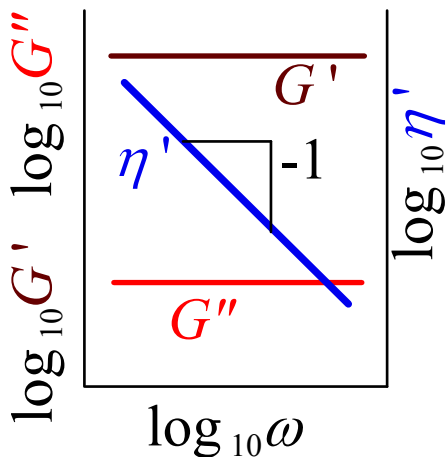
観測時間が長い
(角周波数 ω 小)



液体的 (流動) G''

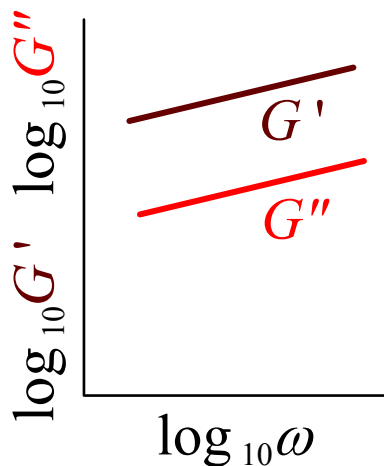
真のゲル

(弾性的ゲル)



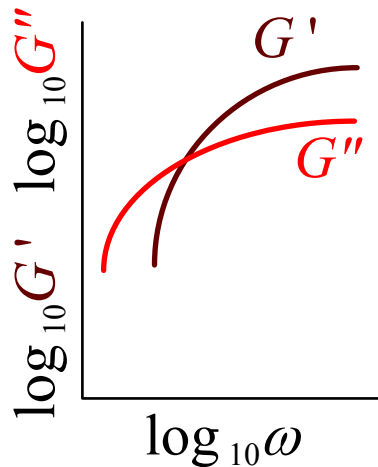
弱いゲル

(構造化した液体)

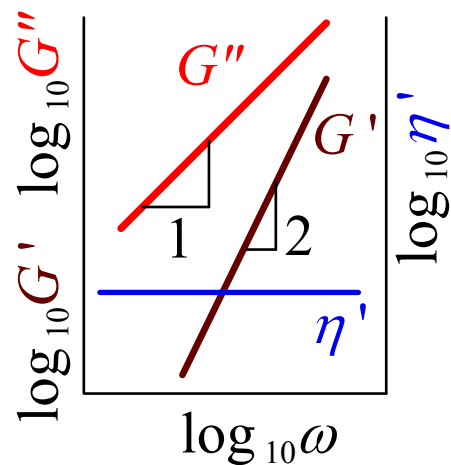


真の高分子溶液

(濃厚高分子溶液)



希薄な高分子溶液



ハイドロコロイドの物性

基礎研究

- ・ 内部の高分子の絡み合い・分散構造
- ・ 分子のダイナミックス
- ・ 構造物性相関

応用上

- ・ ハイドロコロイド内の構造
 - ・ マクロに発現する物性挙動
- の有効活用

講演内容

基礎

1. パーコレーション理論によるゾルーゲル転移点近傍における食品の力学物性の解析
2. 誘電緩和法によるハイドロコロイド中の高分子の分散構造の解析

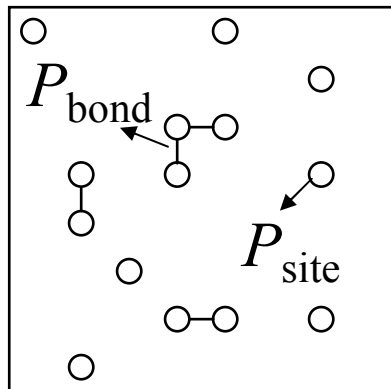
応用

3. 嚥下困難者用介護食の物性に関する研究

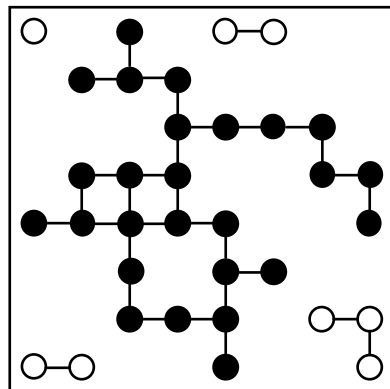
1. パーコレーション理論によるゾルーゲル転移点近傍における食品の力学物性の解析

格子モデルとゾルーゲル転移の類似性

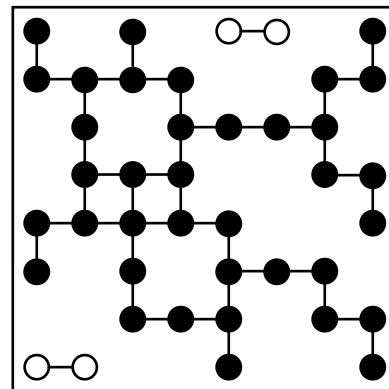
パーコレーション (Percolation) モデル



$$P < P_c$$



$$P = P_c$$



$$P > P_c$$

○-○ : 有限クラスター
●-● : 無限クラスター

図では

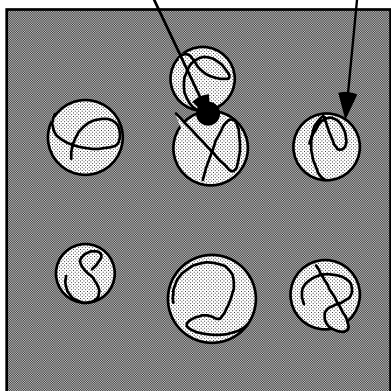
$$P = P_{\text{site}} \text{ and } P_{\text{bond}} = 1$$

(パーコレーション転移点)

高分子網目構造

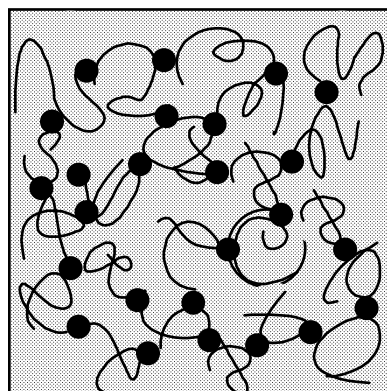
高分子鎖間の結合

水和した高分子



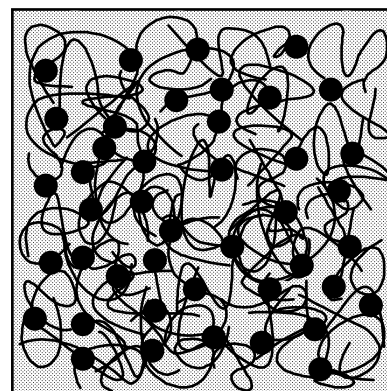
$$C < C_g$$

(ゾル)



$$C = C_g$$

(ゾル-ゲル転移点)

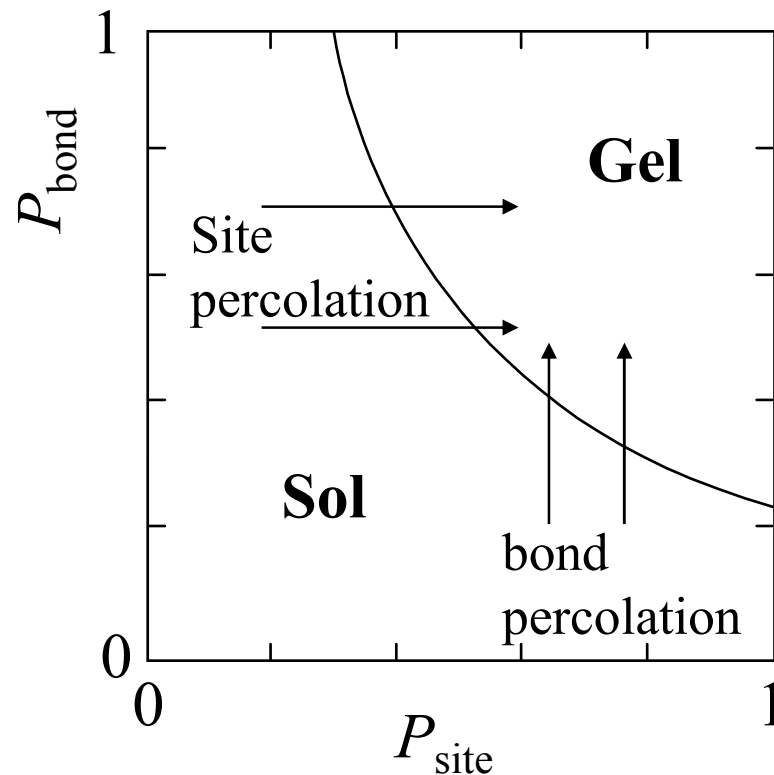


$$C > C_g$$

(ゲル)

$$P \propto C$$

Percolation model and Sol-Gel Transition



P_{site} $\longleftrightarrow$ Polymer concentration

P_{bond} $\longleftrightarrow$ Aging time ?
Temperature

スケーリング則 (Scaling law)

$\eta \propto |P - P_c|^{-s}$ η : ゼルの粘度 s : 粘度 η の臨界指数

$G \propto |P - P_c|^t$ G : ゼルのずり弾性率 t : 弾性率 G の臨界指数

スケーリング則の濃度による表現

$\eta \propto |P - P_c|^{-s} \propto |C - C_g|^{-s}$ C : 高分子濃度

$G \propto |C - C_g|^t$ C_g : ゼルーゲル転移 (ゲル化) 点濃度

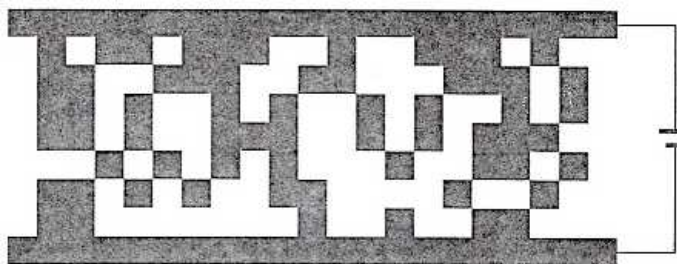
パーコレーションモデルによる臨界指数 s, t の計算値

$$s = 0.7 \sim 0.8$$

(常電導体と超電導体の混合系のコンダクタンスから)

$$t = 1.7 \sim 2.0$$

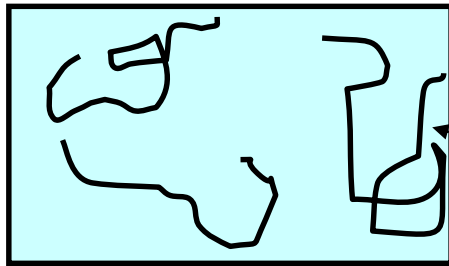
(常電導体と不導体のコンダクタンスから)



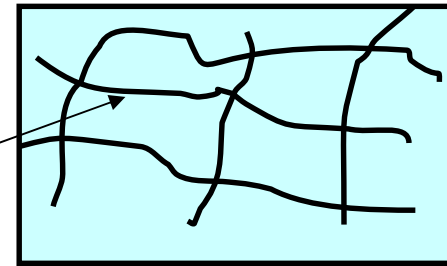
ランダムレジスターネットワーク

濃度変化によるゾル-ゲル転移とスケーリング則

ゾル



ゲル



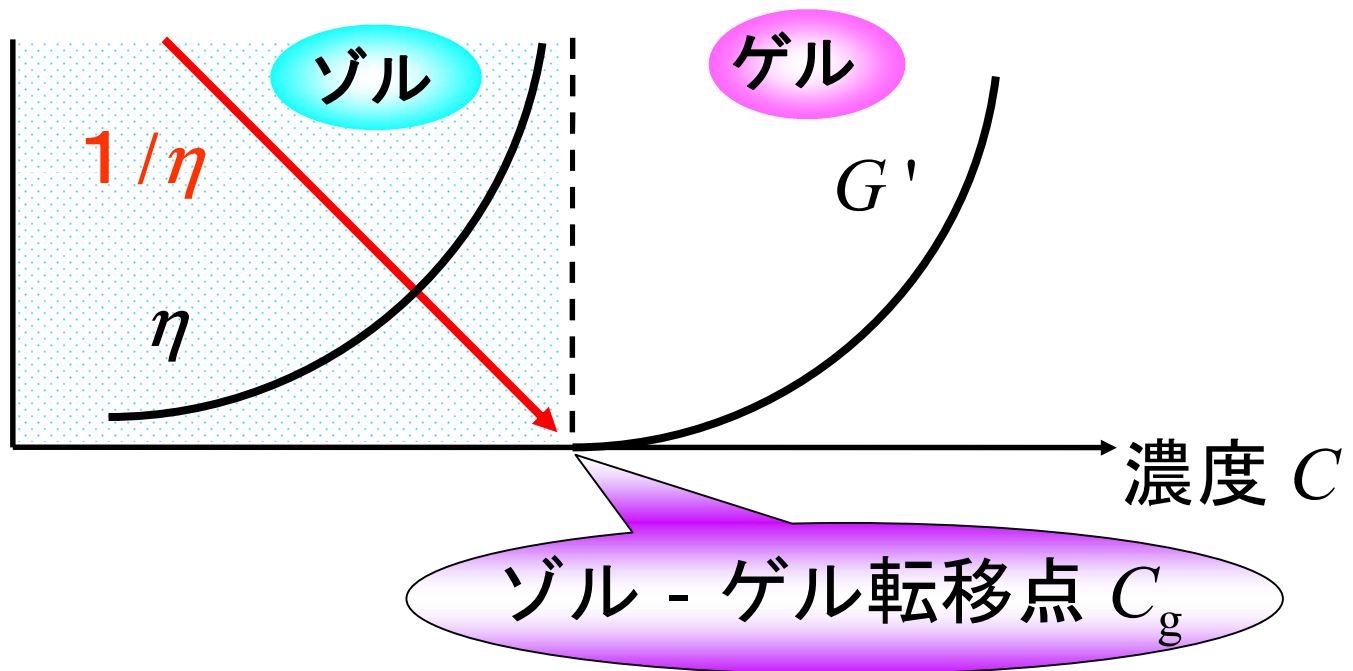
高分子

$$\eta \propto |C_g - C|^{-s}$$

$s = 0.7 \sim 0.8$

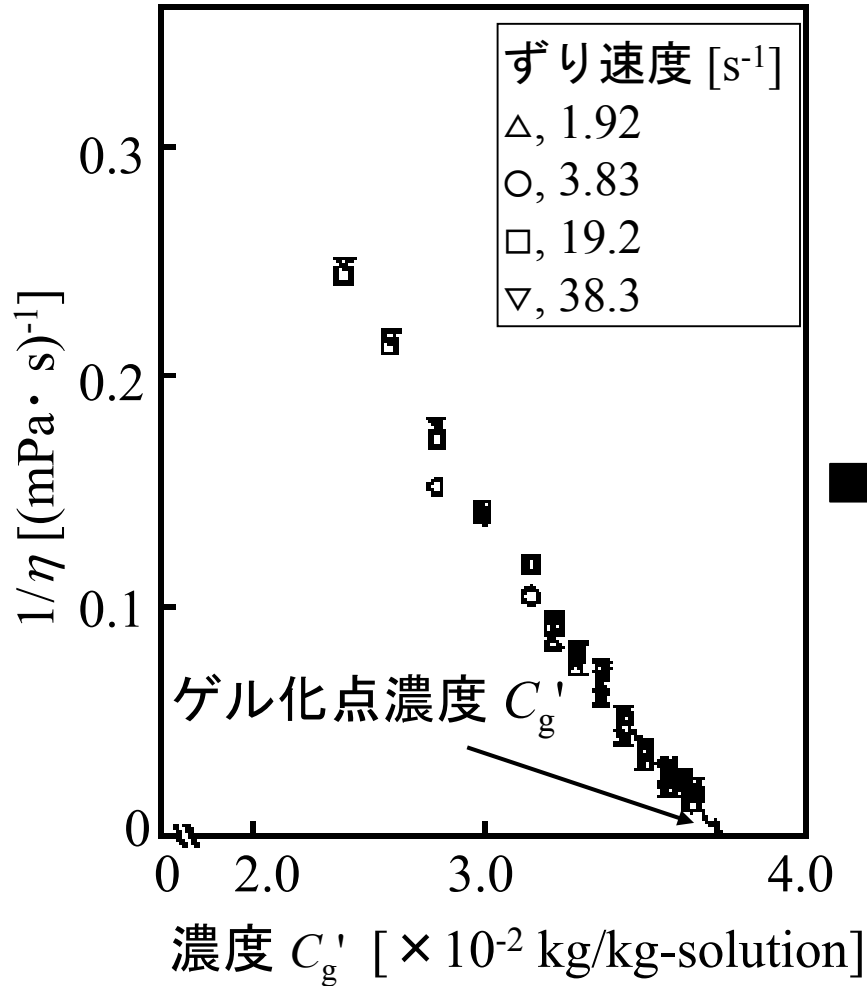
$$G \propto |C - C_g|^t$$

$t = 1.7 \sim 2.0$

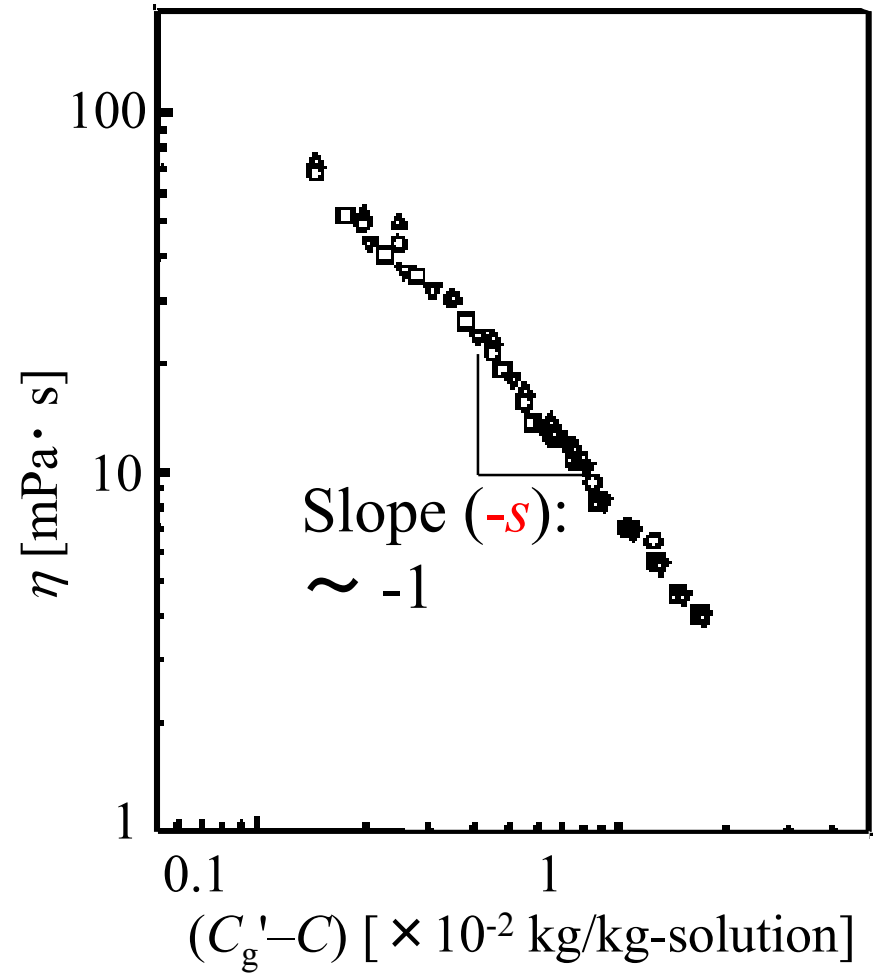


Percolationモデルによるゼラチンゾルの粘度 η の解析

$1/\eta$ の濃度依存性



粘度の臨界指数 s の算出

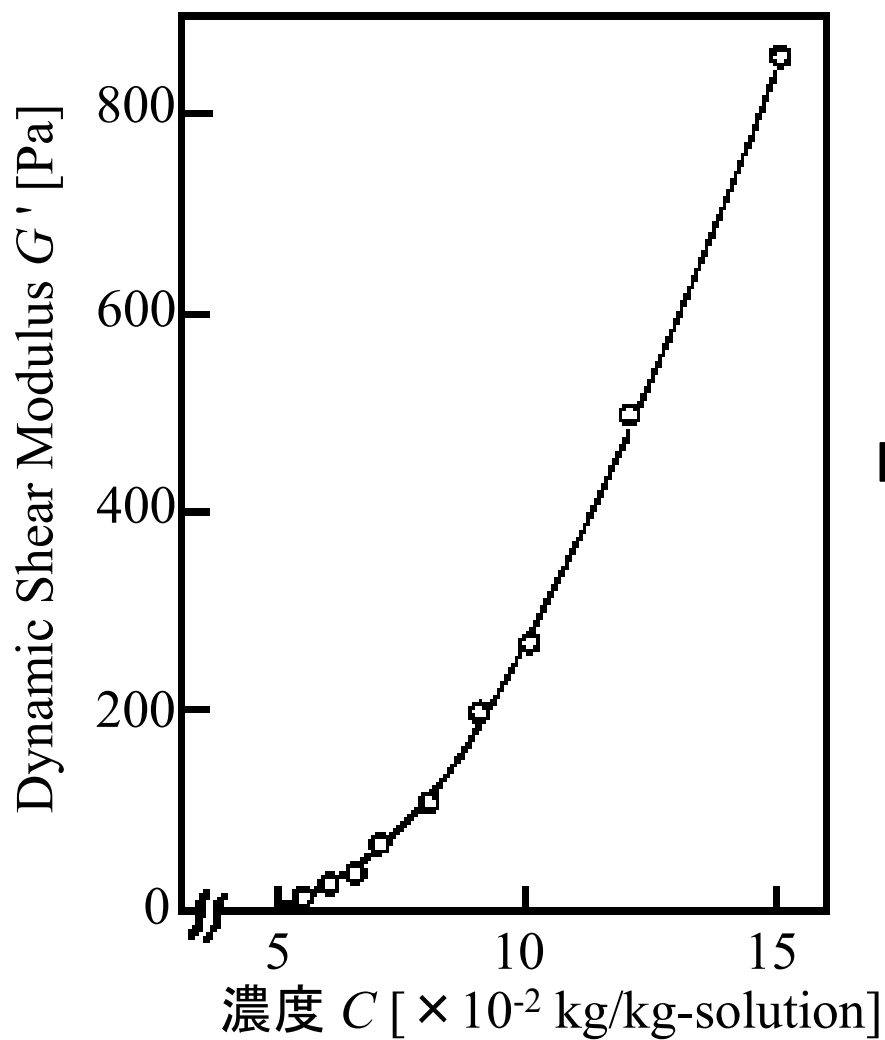


温度 : 20 °C

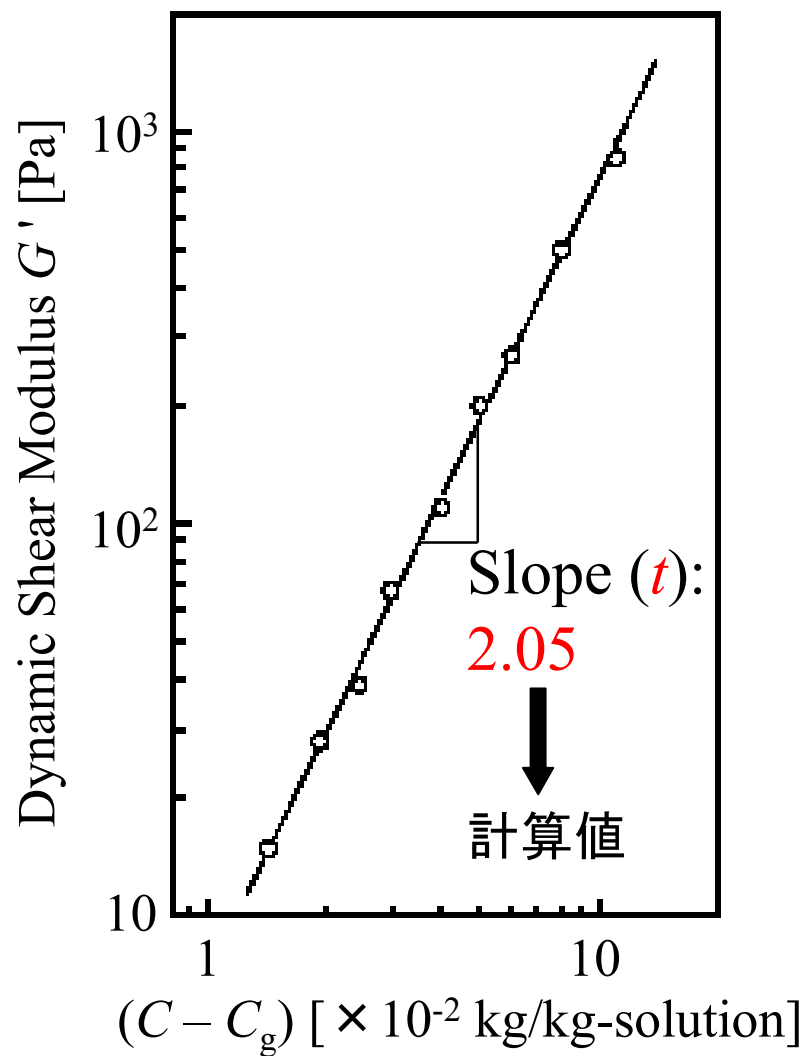
ゲル化点濃度 C_g'

Percolationモデルによるゼラチンゲルの弾性率 G' の解析

弾性率 G' の濃度依存性

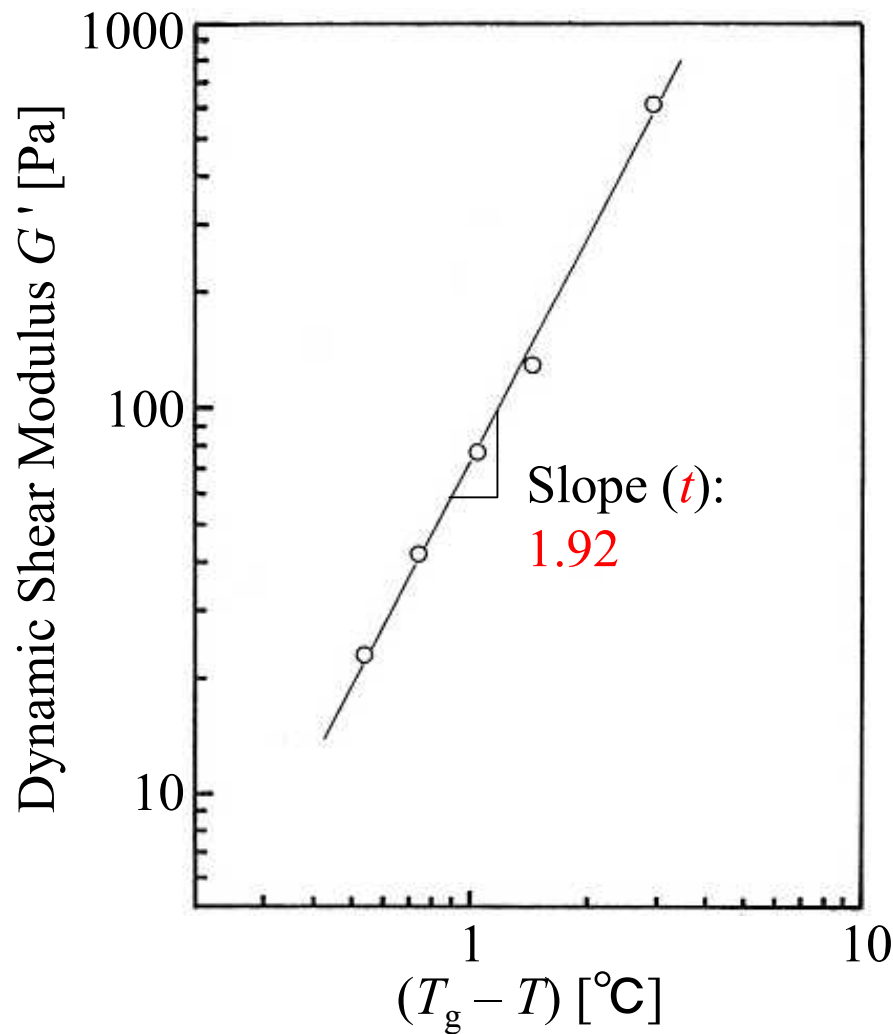


弾性率の臨界指数 t の算出



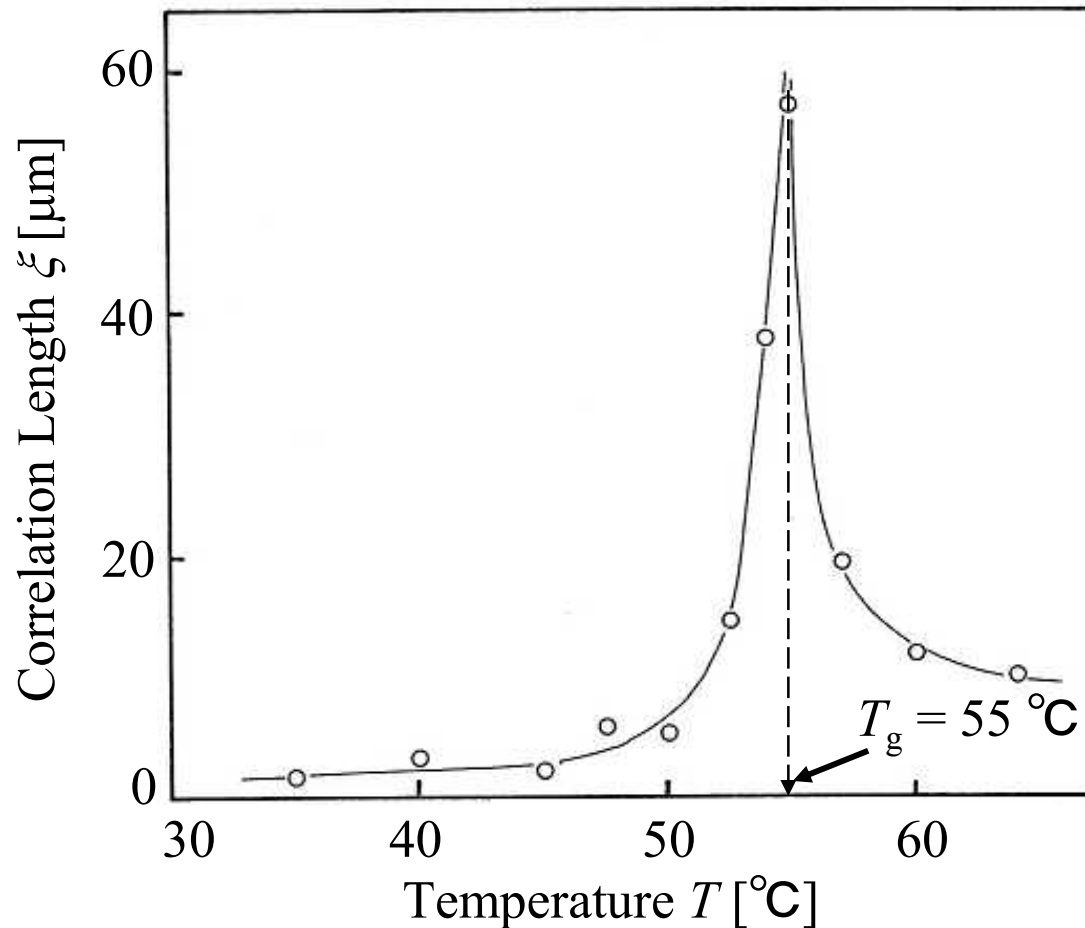
温度 : 20 °C 測定周波数: 2 Hz.

ゼラチンゲルの弾性率 G' の臨界挙動（温度変化）



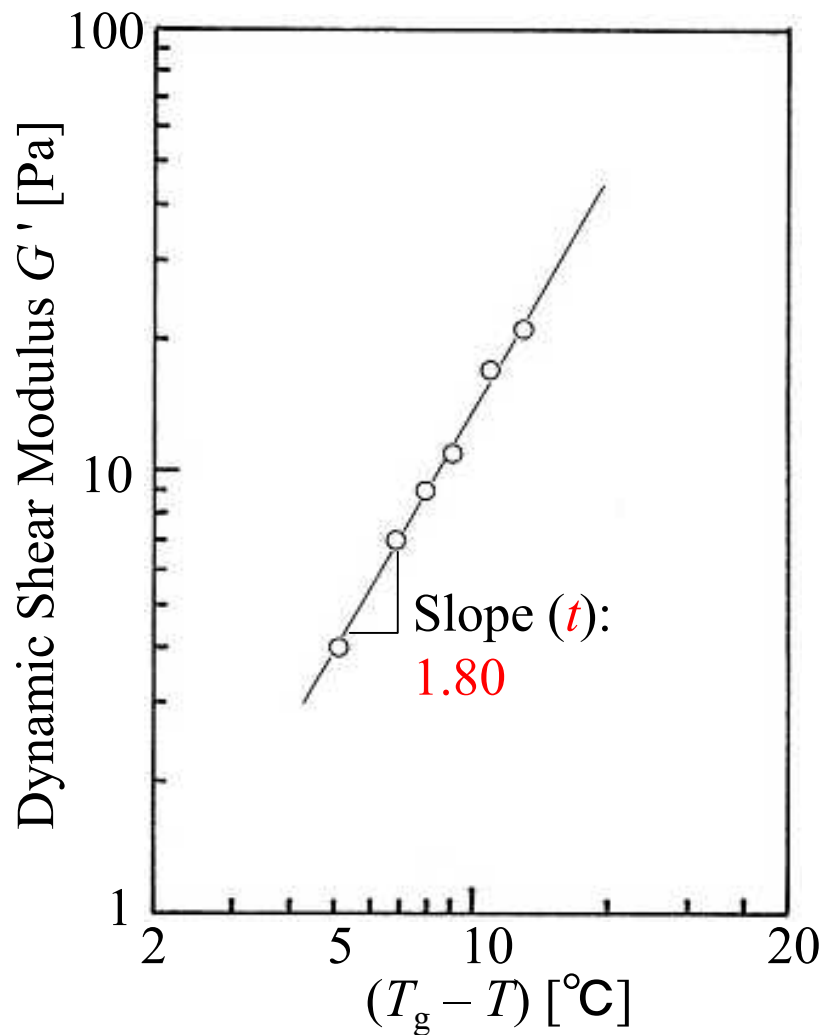
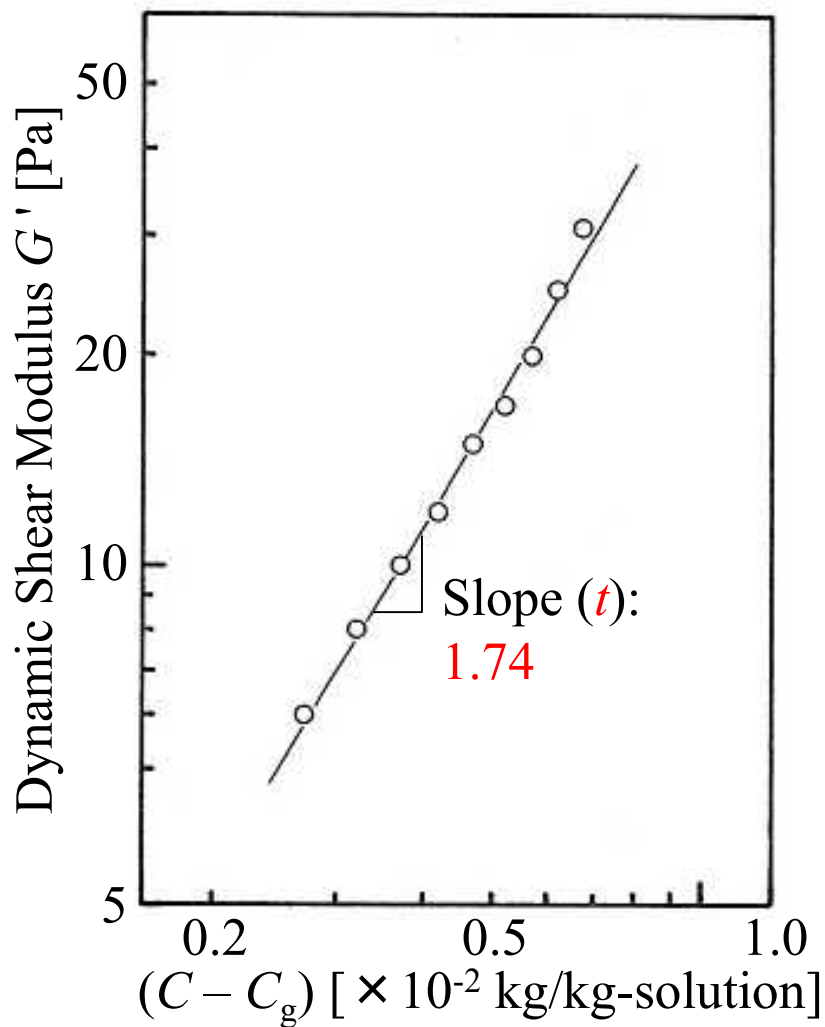
Concentration:
0.100 kg/kg-solution

κ -カラギーナンの動的光散乱測定（温度依存性）

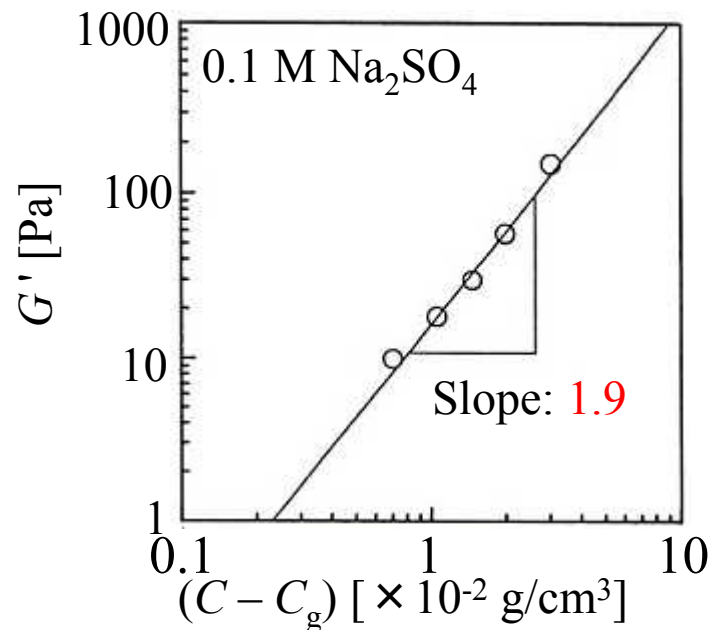
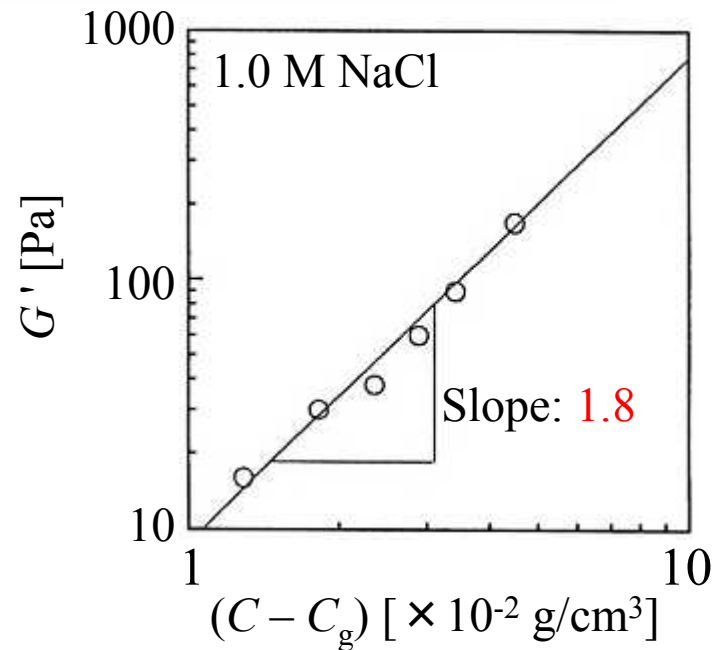
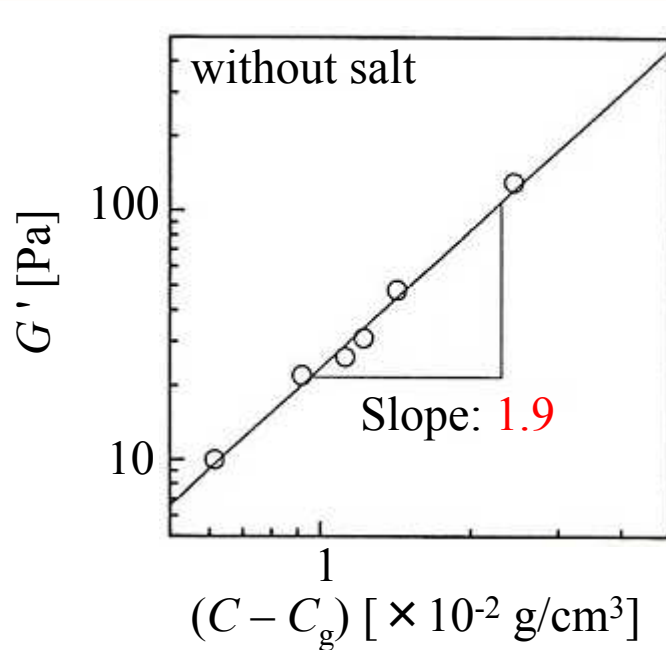


Conc. of κ -carrageenan: 1×10^{-2} kg/kg-solution
 K^+ ion: 2.58×10^{-3} kg/kg-solution

κ -カラギーナンゲルの弾性率 G' の臨界挙動



塩添加ゼラチンゲルの弾性率 G' の臨界挙動



スケーリング則に関する補足

スケーリング仮説：系に特徴的な長さのスケールを変えたときに、系を記述する式の関数系が変わらない。

べき乗関数 $y = kx^p$ (k : 定数) あるいは $y \propto x^p$

スケーリング則 粗視化した見方

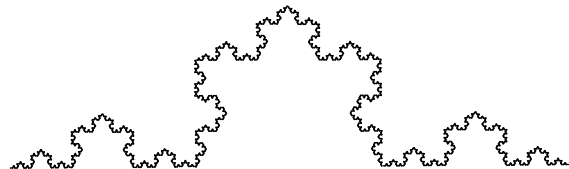
$$x \rightarrow \lambda x \text{ のとき } y = k(\lambda x)^p = k'x^p \text{ (} k' = k\lambda^p \text{)}$$

一種の自己相似性

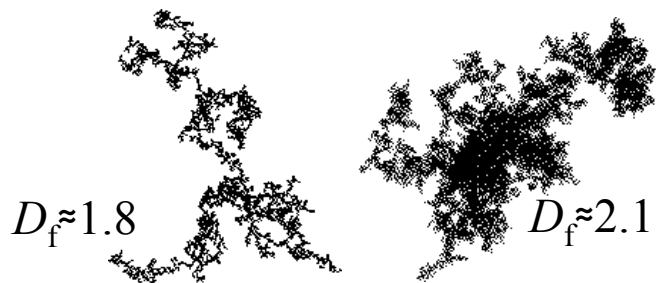
[参考] フラクタル (fractal)

(a) コッホ曲線 (Koch curve)

フラクタル次元 $D_f = 1.2618\dots$

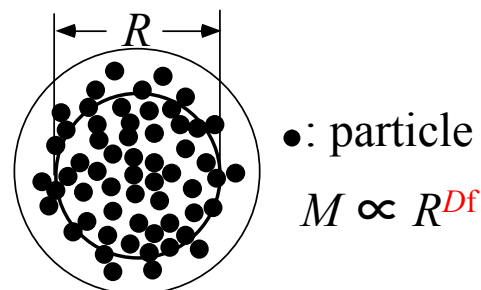


(c) Computer simulation で得られた凝集体のフラクタル



自己相似性の物体

(b) 凝集体のフラクタル次元 D_f の算出



(a) コッホ曲線 (Koch curve)

フラクタル次元 $D_f = 1.2618\dots$

加熱凝集ゲルの弾性率の挙動は内部の μm オーダーの凝集体のフラクタル構造の反映。

2. 誘電緩和法によるハイドロコロイド中の 高分子の分散構造の解析

電気物性 $\Leftrightarrow$ 高分子の分散構造

① BSA（球状タンパク質）

Debyeの理論

② ゼラチン

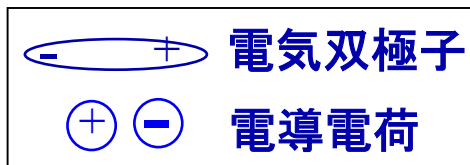
分子の絡み合い構造

③ 電解質高分子（アルギン酸）

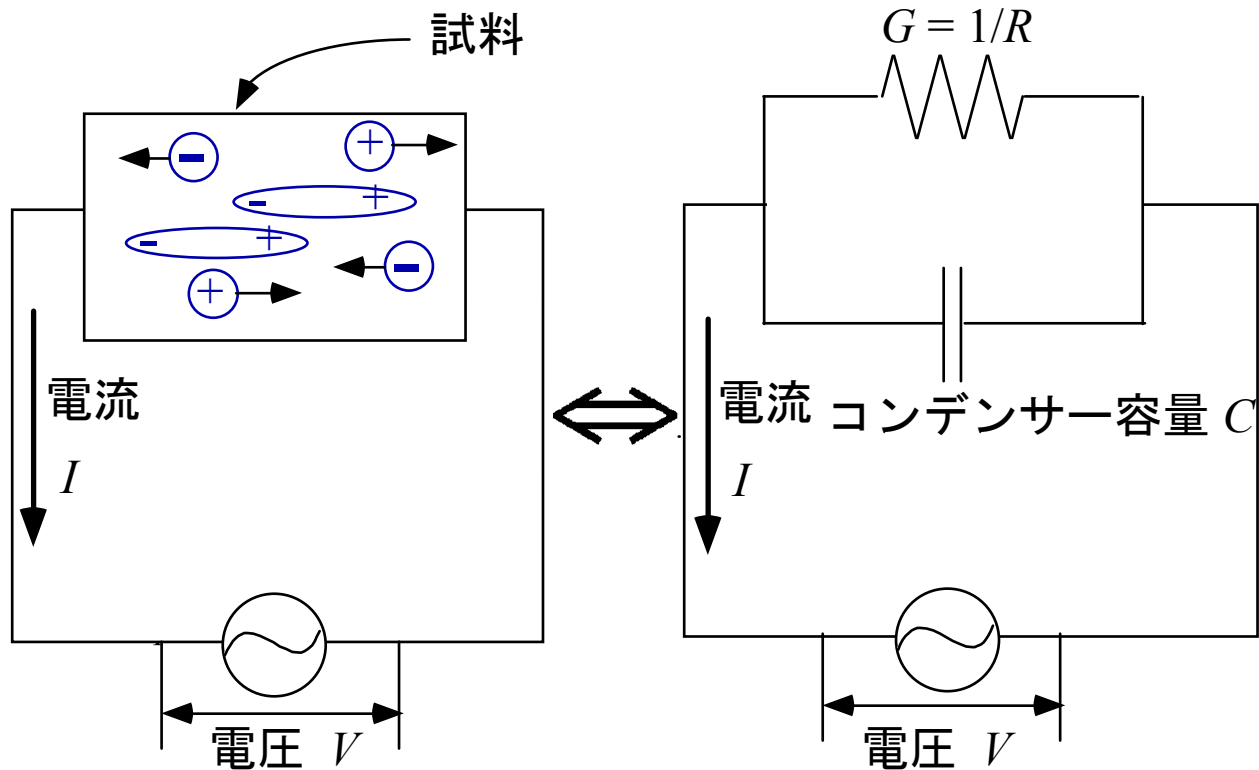
希薄溶液・準希薄溶液の概念

絡み合いの閾値濃度 C^*

スケーリング則



G : コンダクタンス
 R : 電気抵抗



誘電率 $\varepsilon = C \frac{d}{S}$

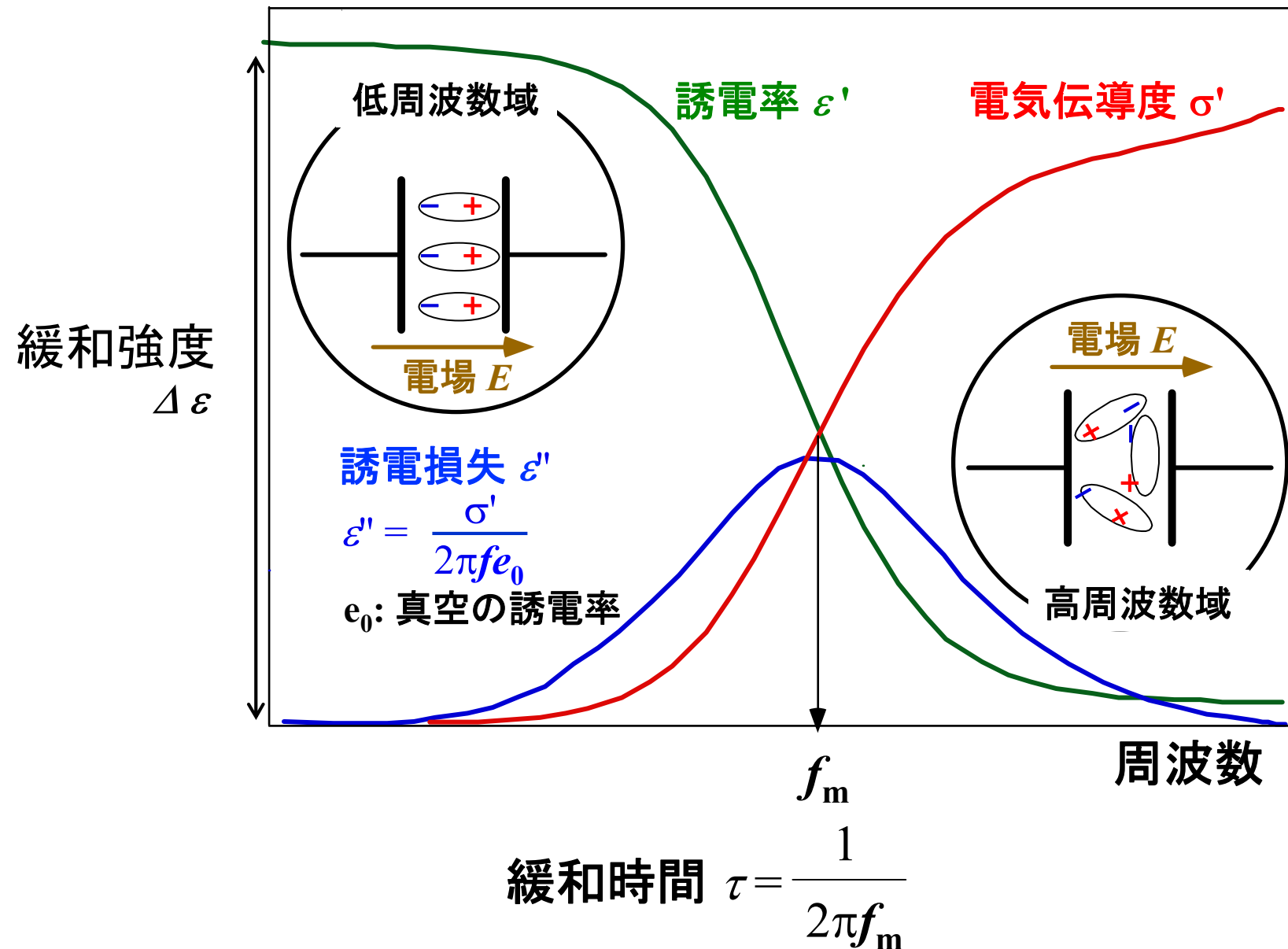
比誘電率 (誘電率): $\varepsilon' = \frac{\varepsilon}{e_0}$

電気伝導度: $\sigma' = G \frac{d}{S}$

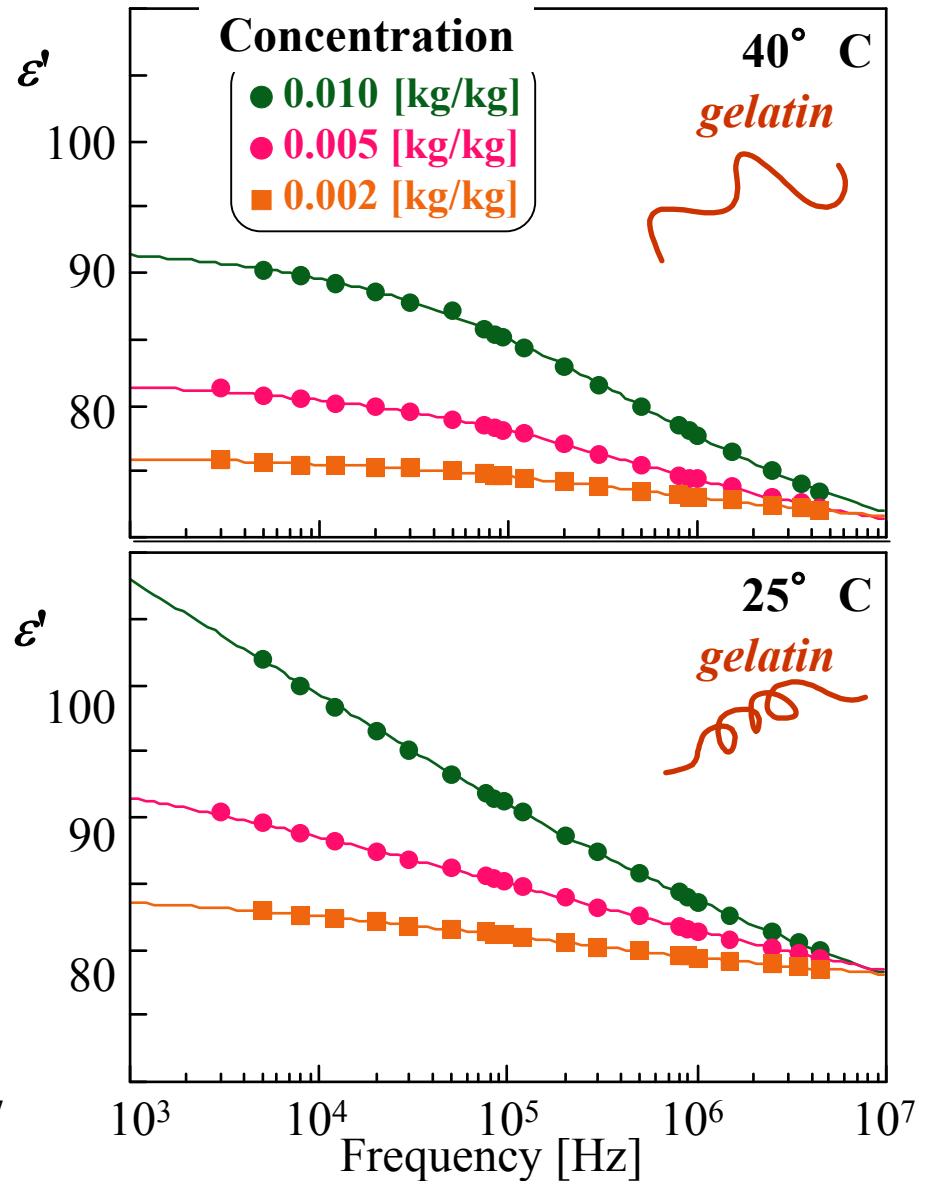
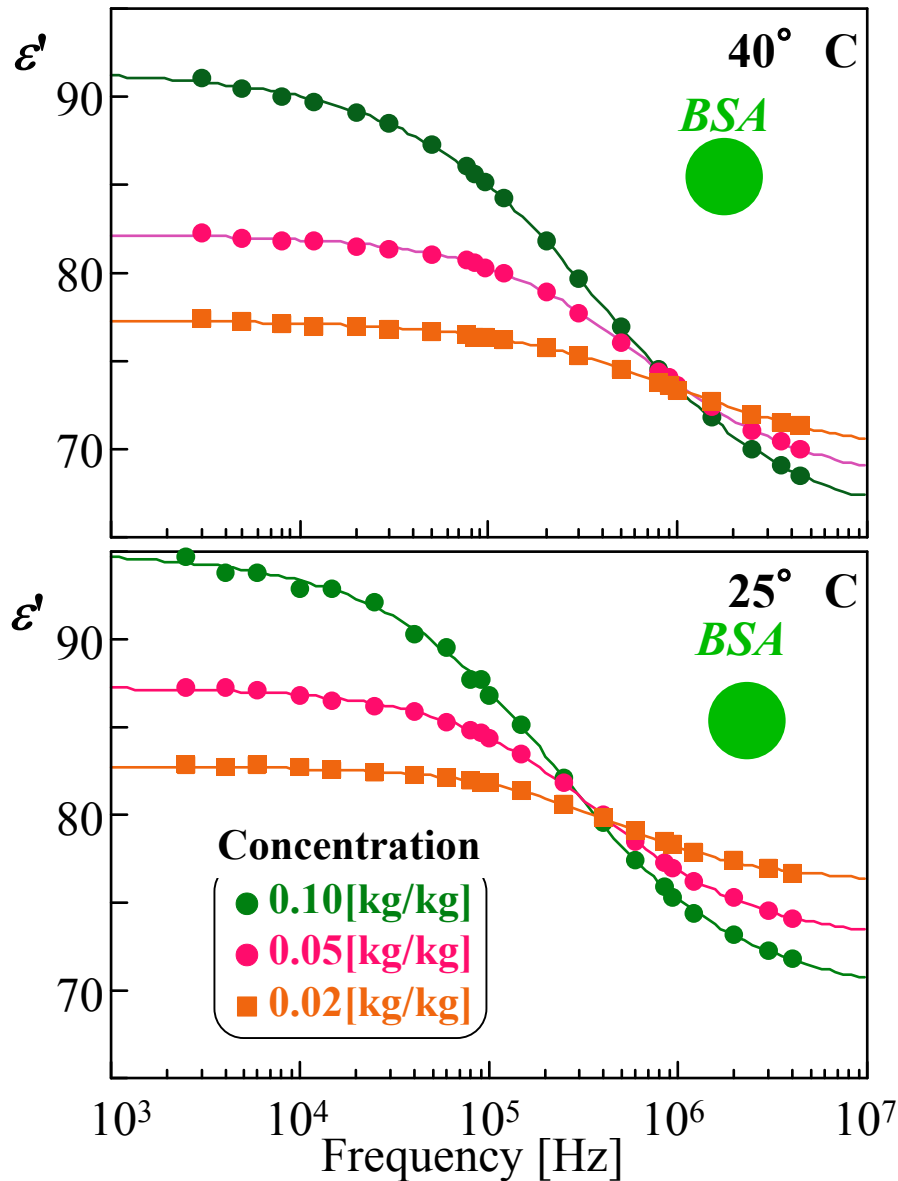
d : 電極板間距離
 S : 電極板面積
 e_0 : 真空の誘電率

誘電緩和現象

 電気双極子

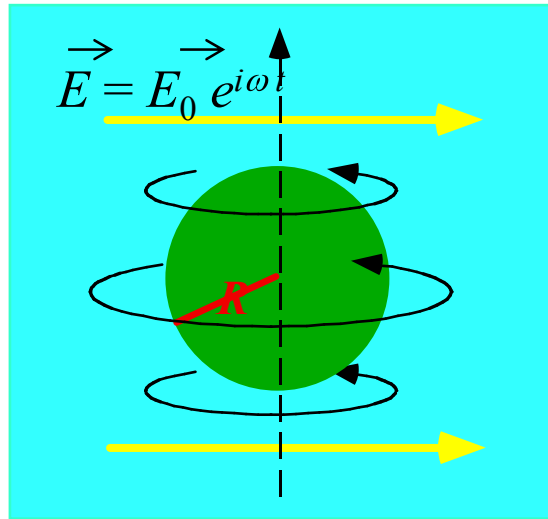


BSA (球状タンパク質) およびゼラチンの誘電緩和



BSA（球状タンパク質）溶液の誘電緩和

Debyeの理論



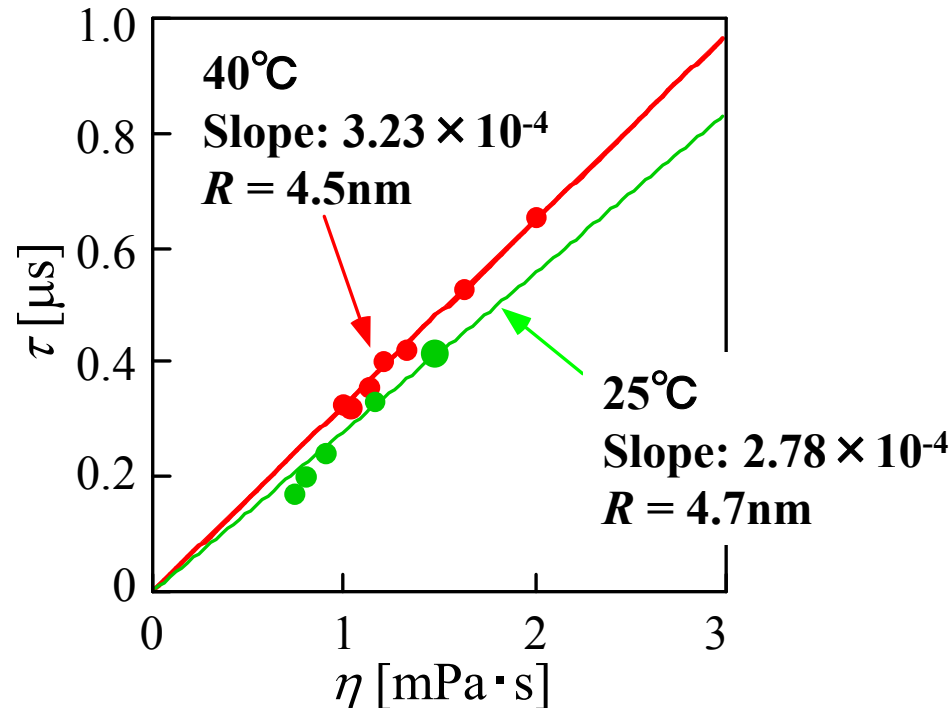
$$\tau = \frac{4\pi R^3}{k_B T} \eta$$

R : 粒子の半径

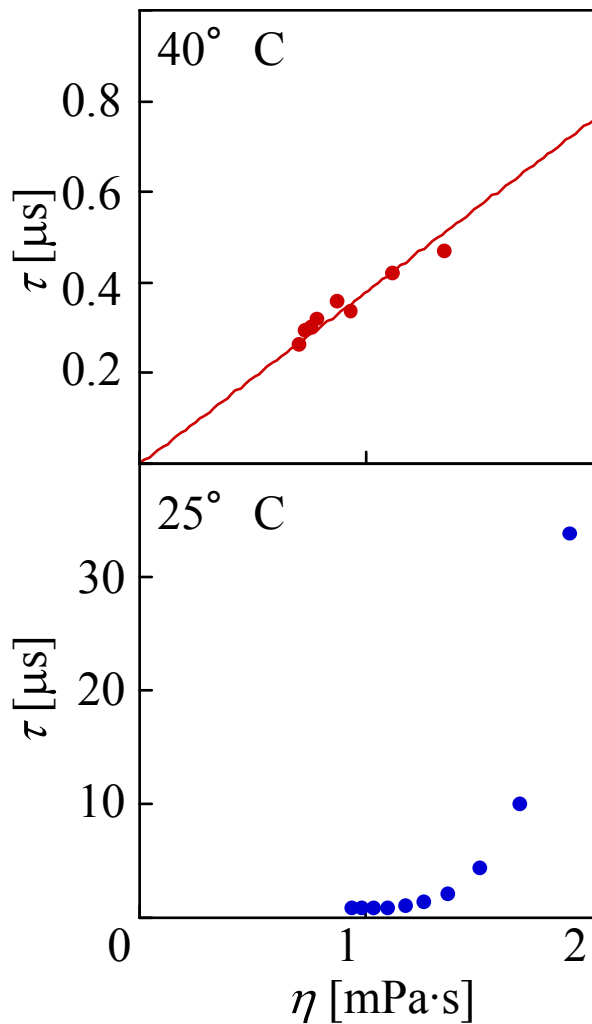
k_B : ボルツマン定数

T : 絶対温度

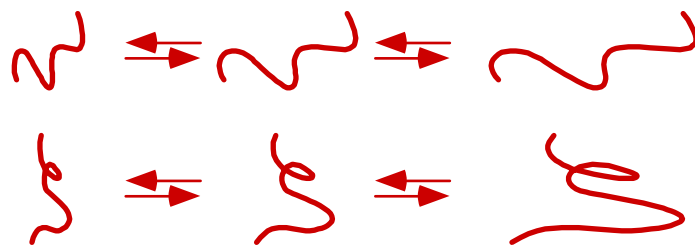
η : 系の粘度



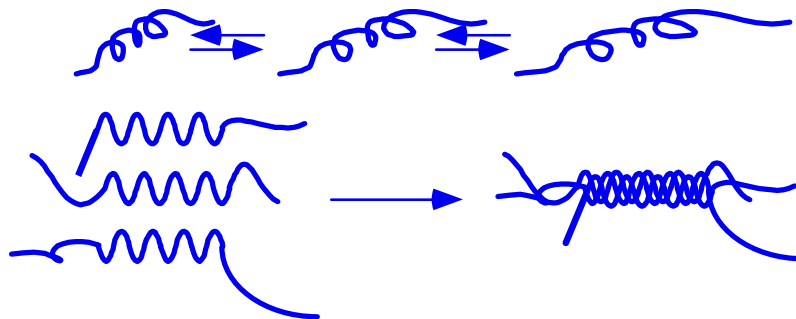
ゼラチン溶液の緩和時間 τ と溶液粘度 η



Coil



Helix



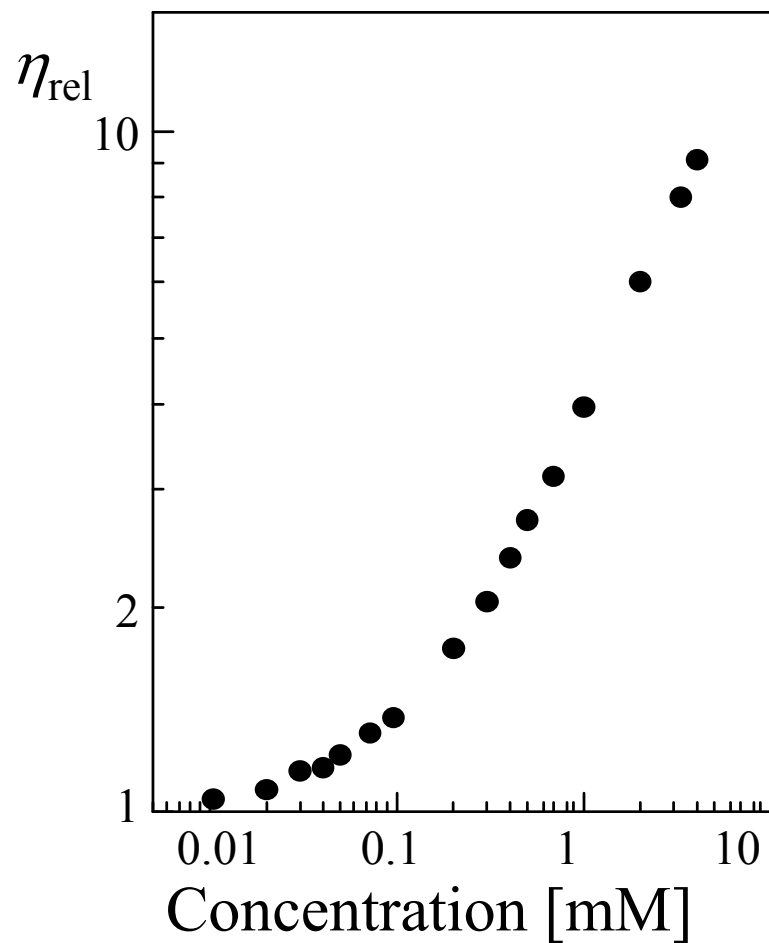
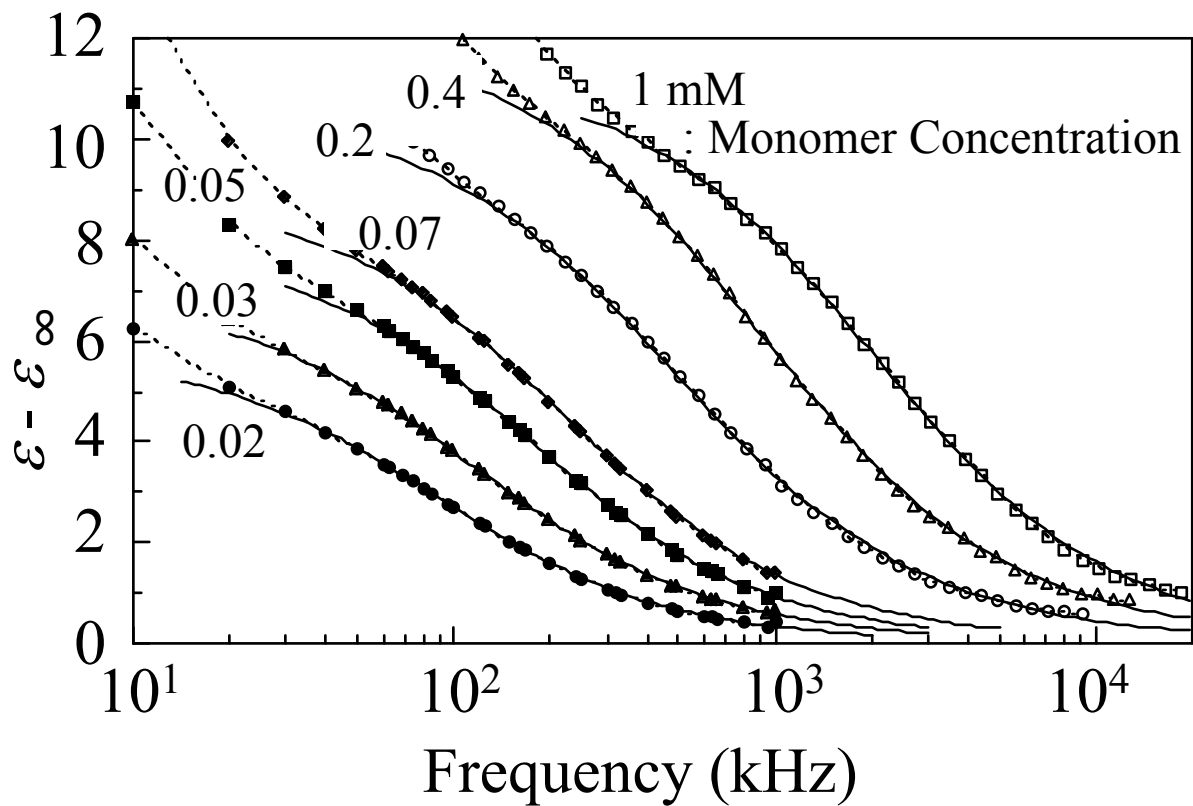


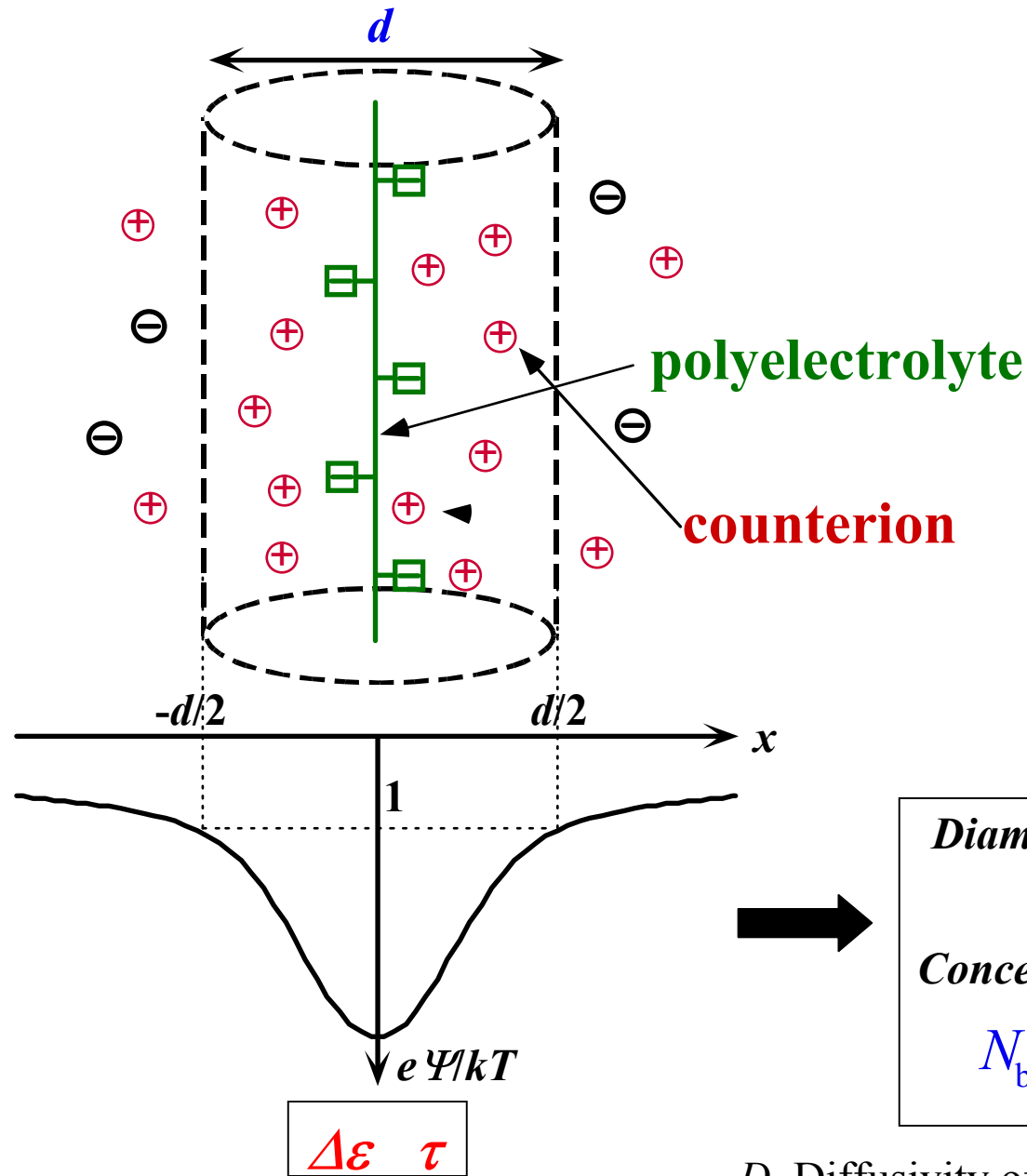
Fig. アルギン酸ナトリウムの相対粘度 η_{rel} の濃度依存性

$$\eta_{\text{rel}} = \eta / \eta_s$$

η : 溶液粘度
 η_s : 溶媒粘度

アルギン酸ナトリウムの誘電緩和





Diameter of the bound region

$$d = \sqrt{2D\tau}$$

Concentration of the bound counterion

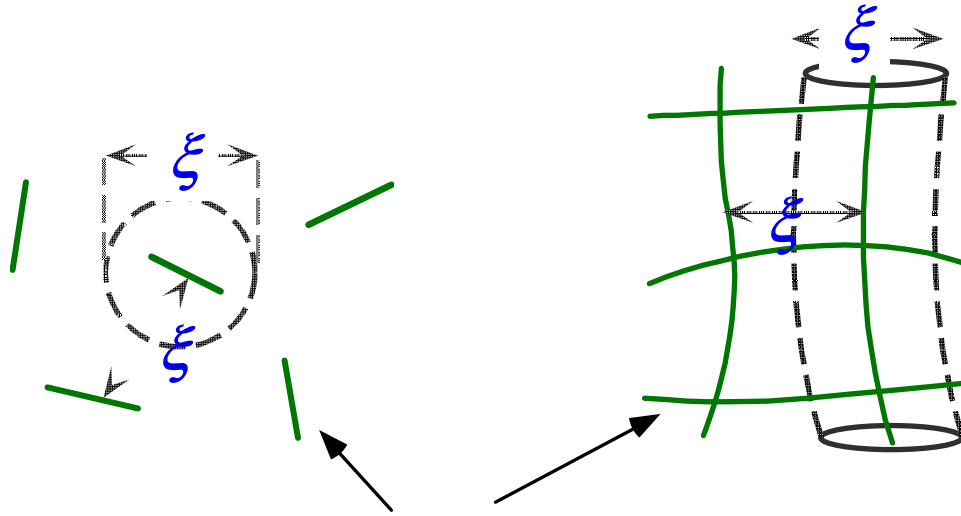
$$N_b = \frac{\varepsilon_0 \Delta\varepsilon}{\tau} \times \frac{3kT}{2D N_{AV} q^2}$$

D , Diffusivity of the counterion; k , Boltzmann constant;
 N_{AV} , Avogadro's number; q , Charge of the counterion;
 T , Absolute temperature

線状高分子電解質溶液の希薄・準希薄溶液

希薄 (Dilute) 溶液

準希薄 (Semi-dilute) 溶液



高分子電解質

ξ : 相関長

自由体積 V と相関長 ξ

(**希薄溶液**)

$$V \propto \xi^3$$

$$\xi \propto C^{-1/3}$$

(**準希薄溶液**)

$$V \propto \xi^2$$

$$\xi \propto C^{-1/2}$$

高分子の重なり合いのしきい値 (濃度): C^*



希薄溶液と準希薄溶液の境界

$\Delta\varepsilon$ および τ に関するスケーリング則

(希薄溶液)

$$V \propto \xi^3$$

$$\xi \propto C^{-1/3}$$

(準希薄溶液)

$$V \propto \xi^2$$

$$\xi \propto C^{-1/2}$$

$$\xi \sim d$$



(希薄溶液)

$$\Delta\varepsilon \propto C^{1/3}$$

$$\tau \propto C^{-2/3}$$

(準希薄溶液)

$$\Delta\varepsilon \propto C^0$$

$$\tau \propto C^{-1}$$

粘度に関するスケーリング則

(希薄溶液) $\eta_{sp} = (\eta - \eta_s)/\eta_s \propto C^1$

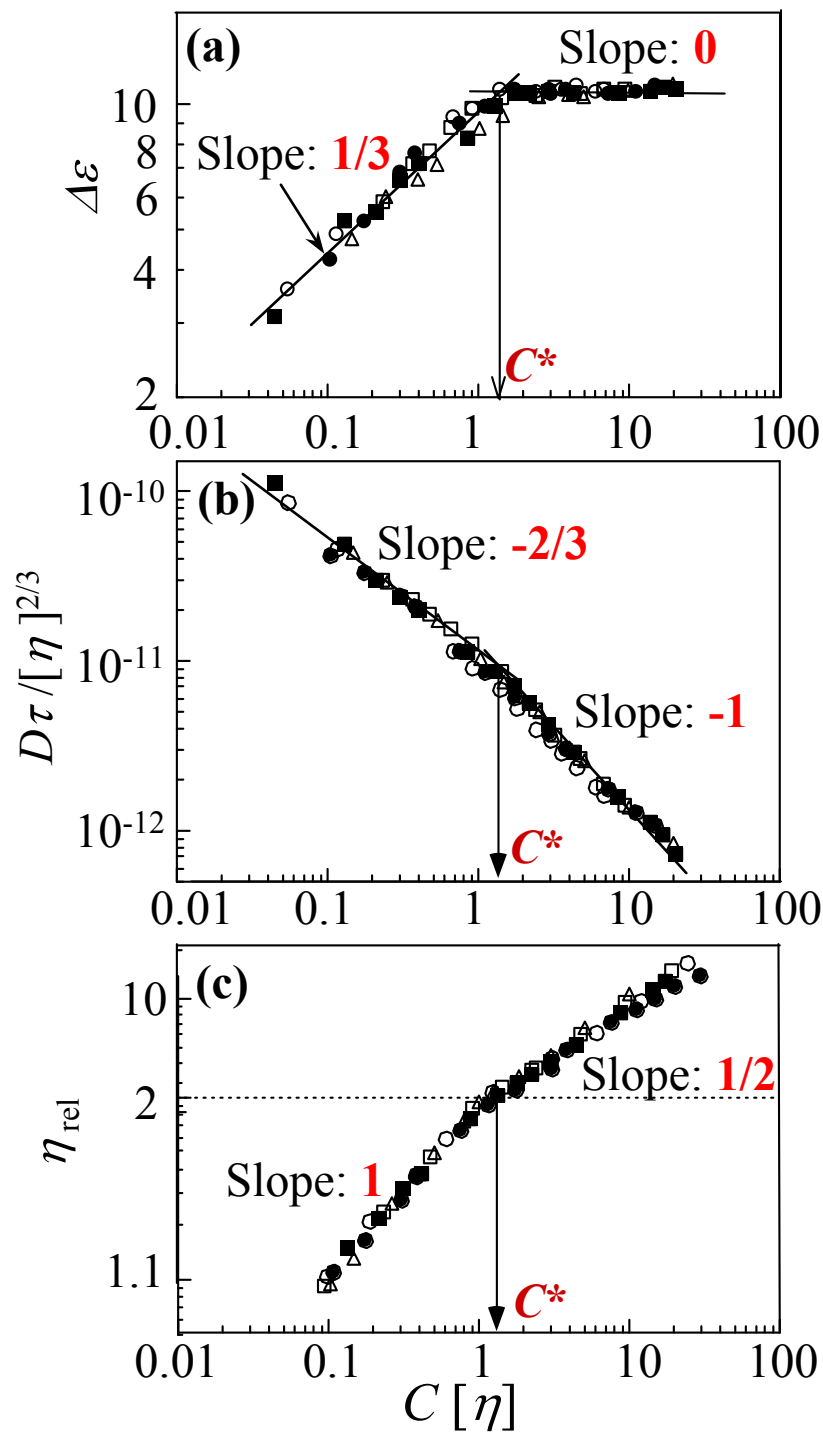
(準希薄溶液) $\eta_{rel} = \eta/\eta_s \propto C^{1/2}$

η : 溶液粘度

η_{rel} : 相対粘度

η_s : 溶媒粘度

η_{sp} : 比粘度



電解質高分子

- ①誘電緩和 and/or 粘度測定から
重なり合いのしきい値濃度 C^* が求まる
- ②粘度が, スケーリング則に従った挙動

高分子の分散・絡み合い構造



巨視的な物性 (電気物性, 粘度)

嚥下困難者用介護食の物性

生体計測（超音波パルスドプラー法）と機器測定との併用

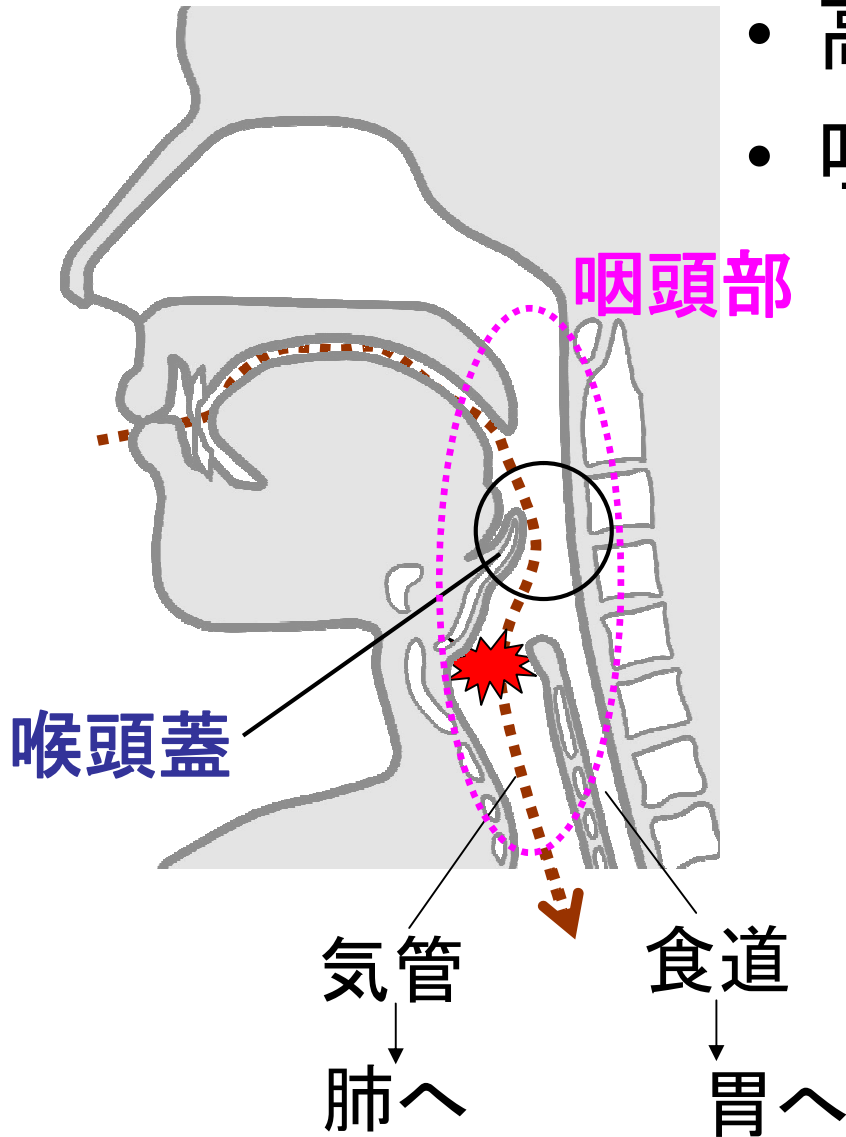
- 高齢社会
- 咀嚼・嚥下困難な高齢者増加

誤嚥

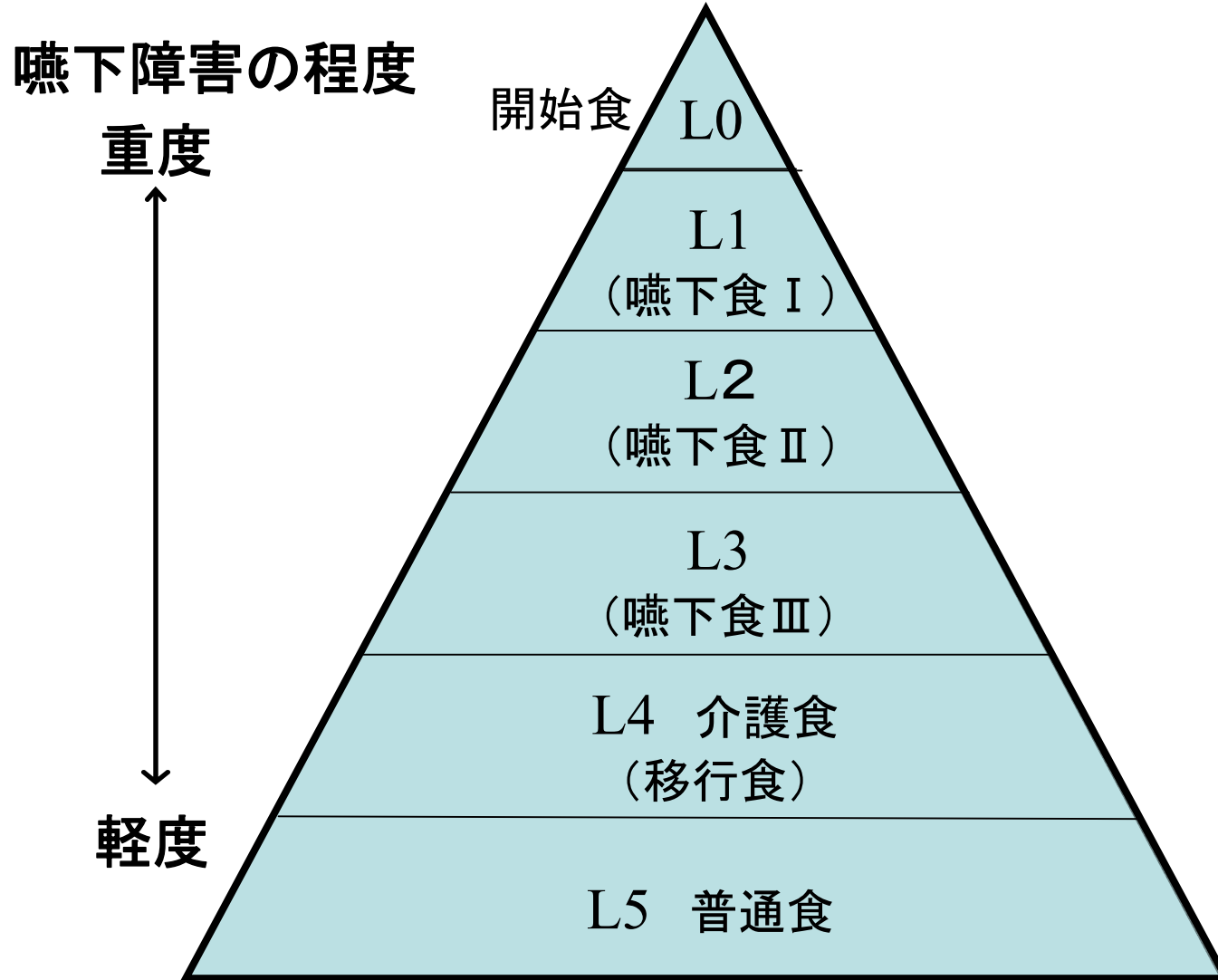
窒息・誤嚥性肺炎などの原因



介護食
(誤嚥しにくい)



嚥下食ピラミッド(金谷節子)



栢下淳 編, “嚥下食ピラミッドによる---嚥下食レシピ250”,
医歯薬出版株式会社 (2008)より.

食物の“飲み込みやすさ”とは？

飲み込みにくい食物

ばらばらになりやすい食物
“パサパサ”している食物
例) 粉, 砕いた煎餅, ビスケット
水(?), 低粘性の液体(?)

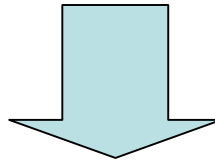


誤嚥しやすい

べたつく食物
例) もち

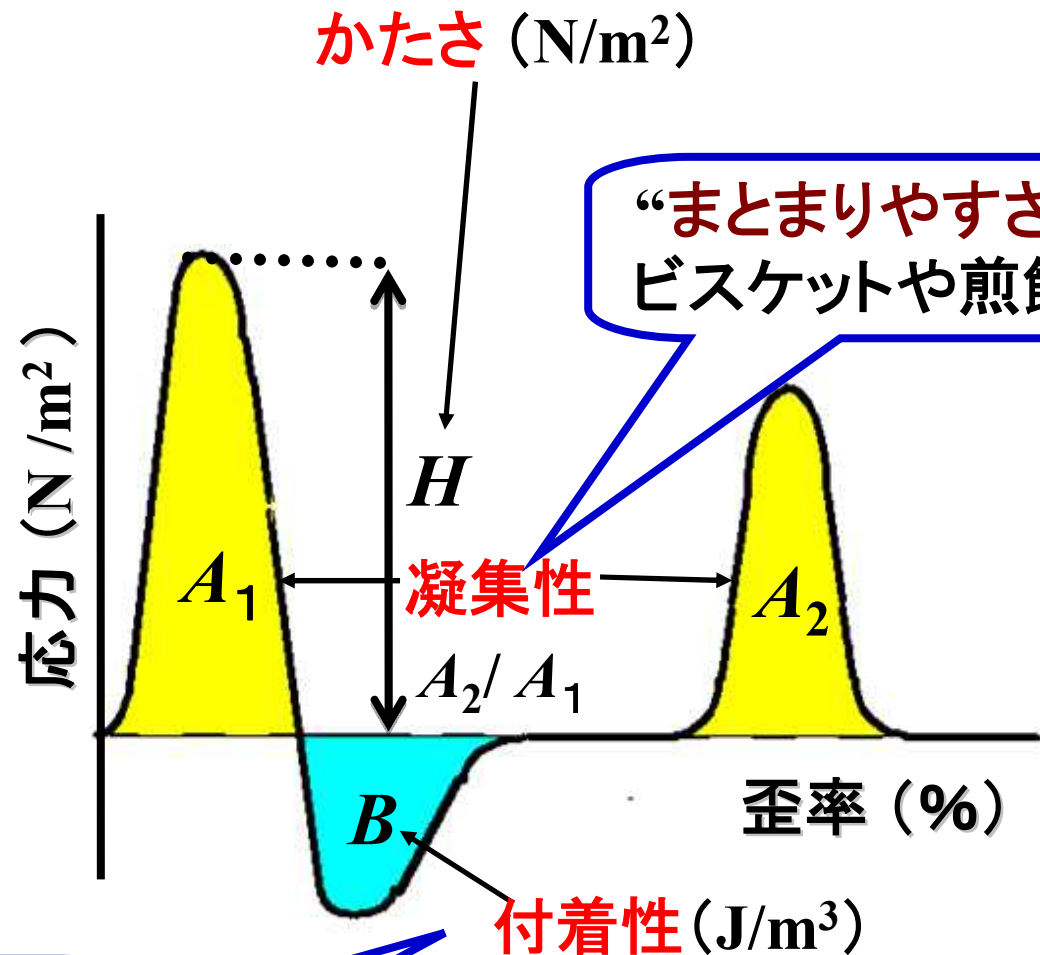
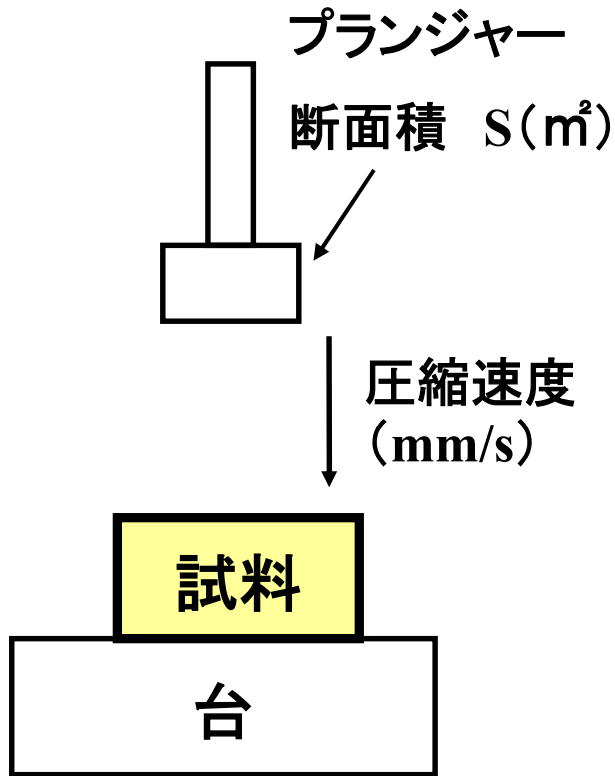


のどに詰まりやすい



“まとまりやすく”, “べたつかない”食物
が飲み込みやすい

TPA (Texture Profile Analysis)



“まとまりやすさ”??
ビスケットや煎餅??

“べたつき”
試料とプランジャー間の付着
⇒面積 B 大

厚生労働省による高齢者用食品の物性規格 (1994年)

食品群		規格			
種別	形状	堅さ (N/m ²)	固形物の比率[重量%]	ゾルの粘度 (mPa・s)	備考 [堅さ、食べやすさの目安]
そしゃく・えん下 困難者用食品	<u>ゾル</u>	$5 \times 10^2 \text{ N/m}^2$ 以下			
	ゾル中に固形物	固形物を含む全体を測定して $5 \times 10^3 \text{ N/m}^2$ 以下	50 % 以下	$1.5 \times 10^3 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 以上	かまなくてもよい
	<u>ゲル</u>	$1 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ 以下			舌でつぶせる
	ゲル中に固形物	固形物を含む全体を測定して $5 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ 以下	50 % 以下		歯ぐきでつぶせる

B型粘度計を用いて

ロータ回転数12rpm における粘度 $1.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 以上

厚生労働省えん下困難者用食品 許可基準(2009/4/1～):2010年消費者庁に移管

嚥下障害の程度

重度



軽度

	許可基準Ⅰ	許可基準Ⅱ	許可基準Ⅲ
<u>硬さ (N/m²)</u>	$2.5 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4$	$1 \times 10^3 \sim 1.5 \times 10^4$	$3 \times 10^2 \sim 2 \times 10^4$
<u>付着性 (J/m³)</u>	4×10^2 以下	1×10^3 以下	1.5×10^3 以下
<u>凝集性</u>	0.2～0.6	0.2～0.9	—

TPA(テクスチャー)測定 of 3つのパラメータ

超音波パルスドプラー法による 咽頭部における食塊の流速測定

“飲み込みやすさ”とは？

- ・咀嚼・嚥下過程では、食物の**物性**が大きく変化し、その感覚は舌、口蓋、咽頭部、鼻など様々な器官によって総合的に“**評価**”される。
- ・感覚を表現する用語には複数の物理的・化学的な因子が絡む
→ “官能評価”の意味



機器測定から得られる物理量や化学分析値のみでの評価困難



生体計測（Videofluorographyその他）

機器測定とヒトの感覚とのギャップを埋める

咽頭部における流速測定

測定機器：医療用超音波診断装置

測定周波数：6MHz

被験者：健常女性

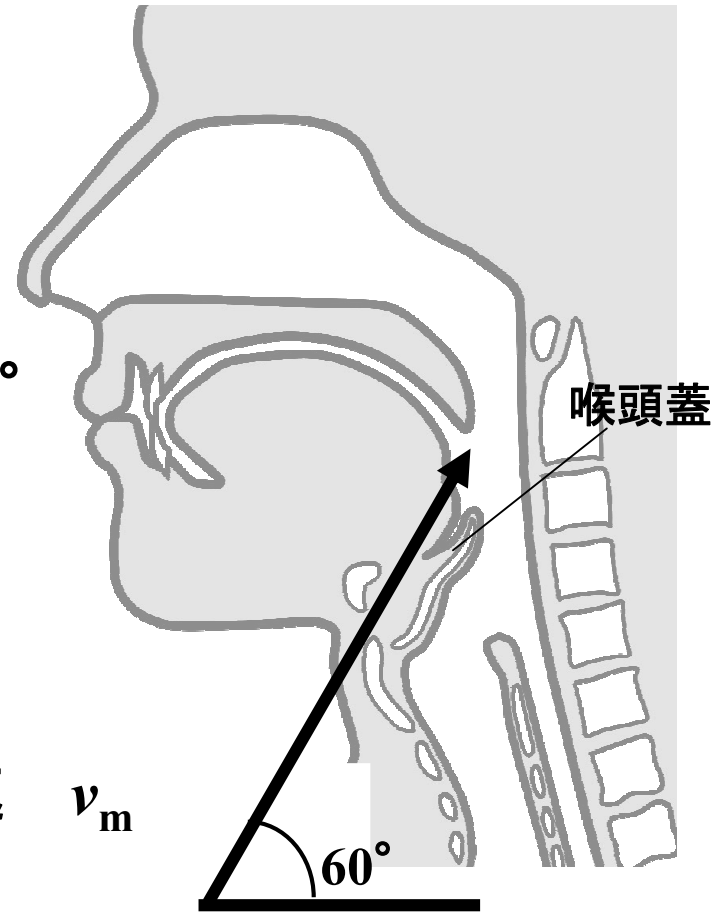
測定部位：咽頭部

水平に対して上向きに 60°
喉頭蓋を通過する直前の流速

測定項目：流速スペクトル

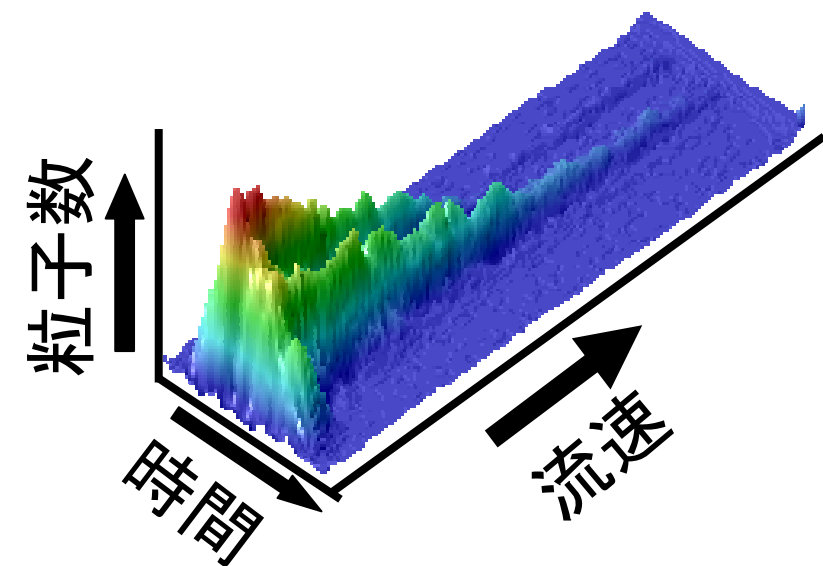
粒子密度

最大流速 $V_{\max}$, 平均流速 v_m

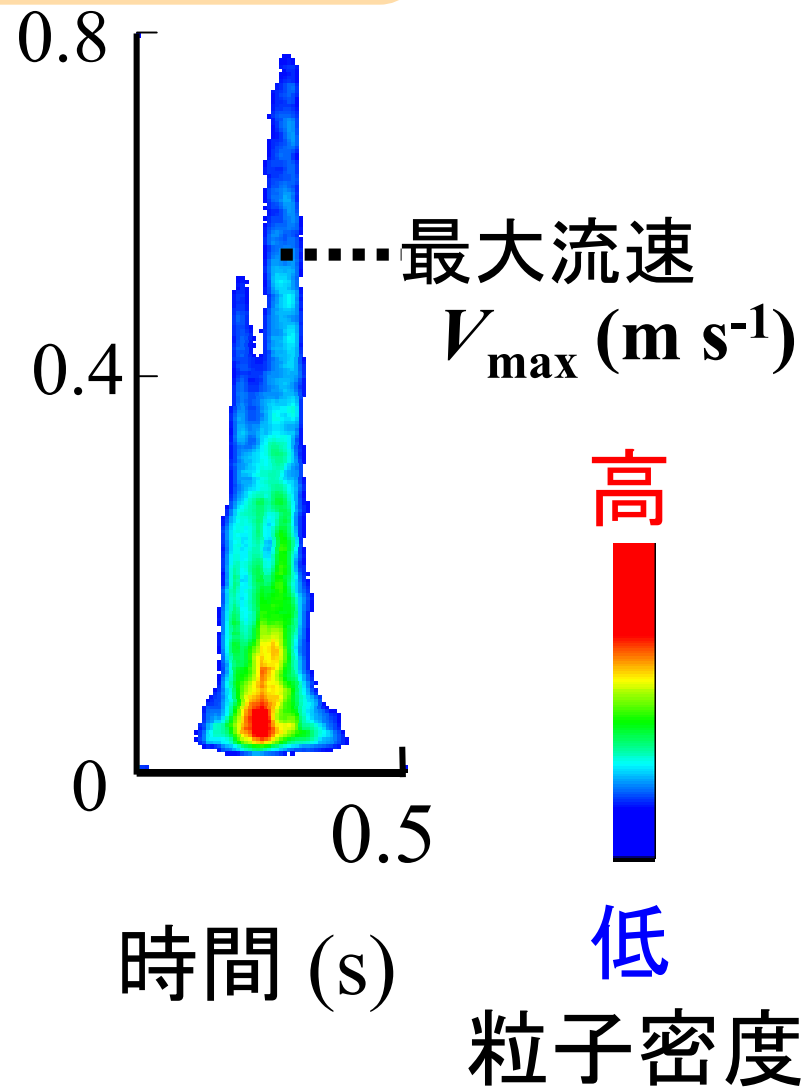


流速スペクトルの解析 (超音波パルスドプラー法)

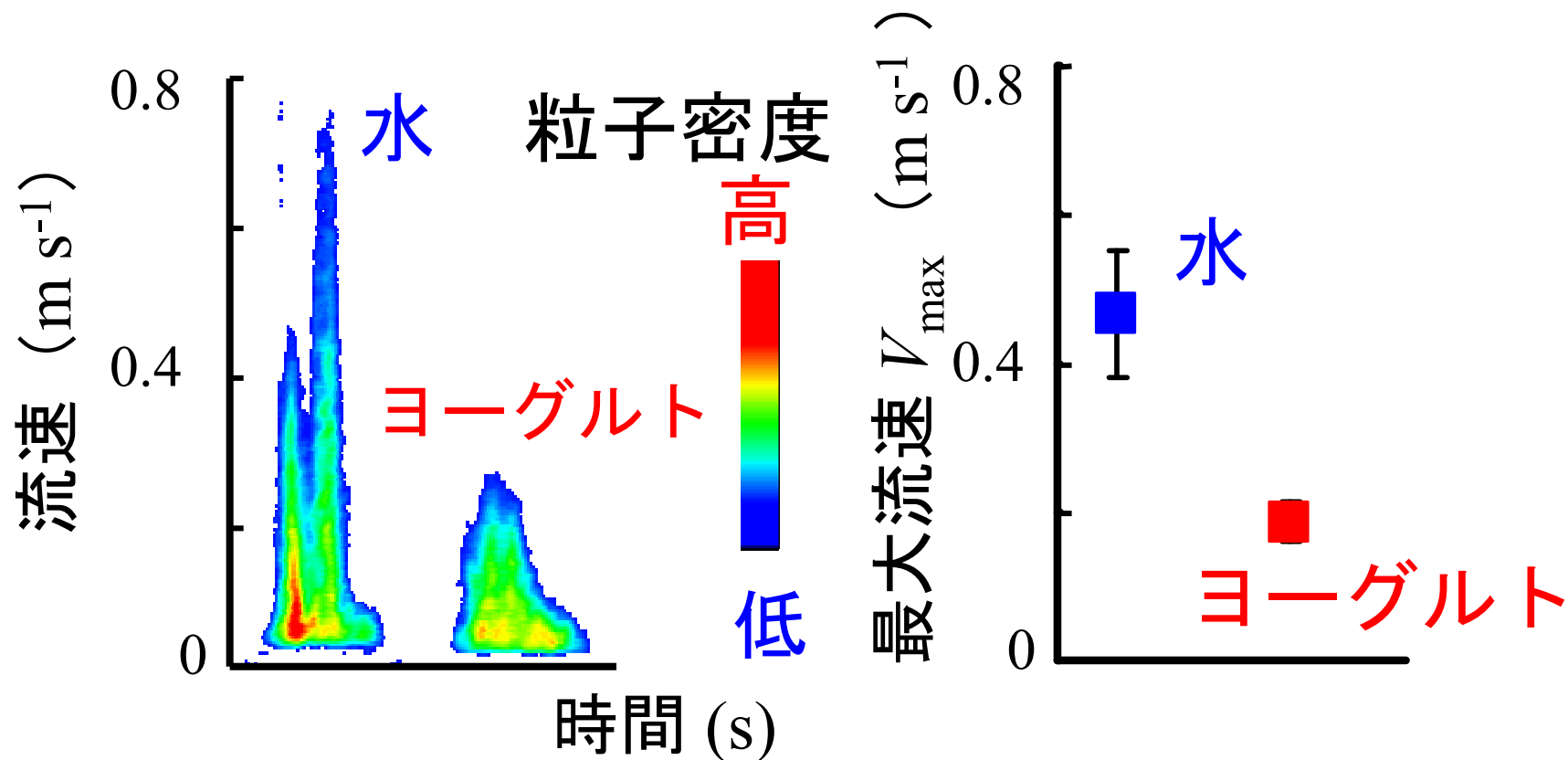
(試料：水 6 g)



流速 (m s^{-1})



誤嚥しやすい水と誤嚥しにくいヨーグルト
の流速スペクトルの差異

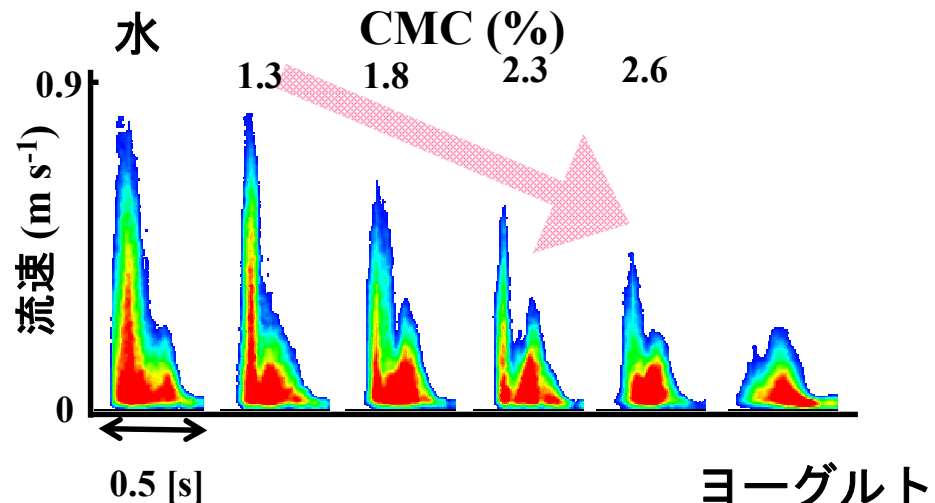
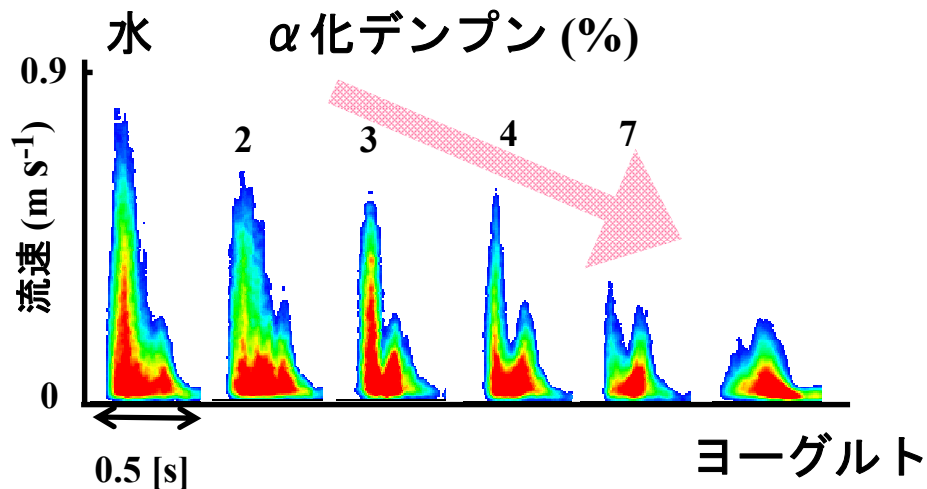
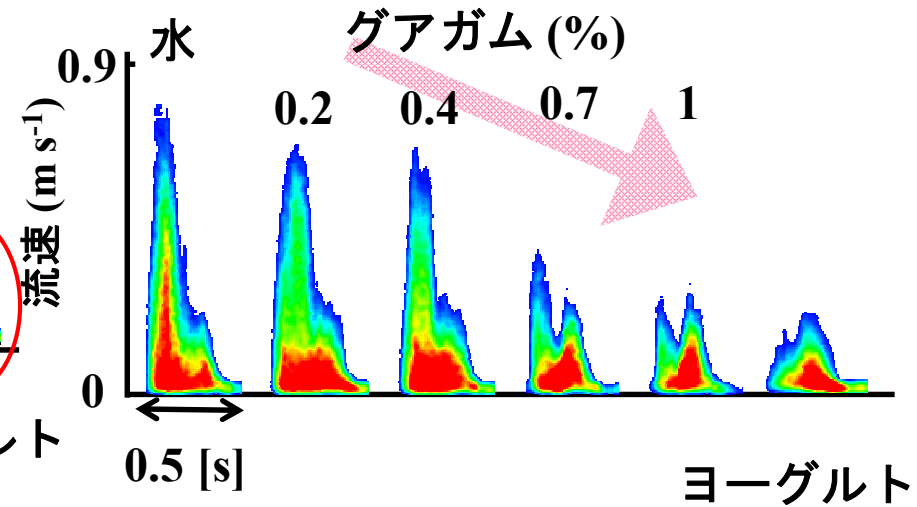
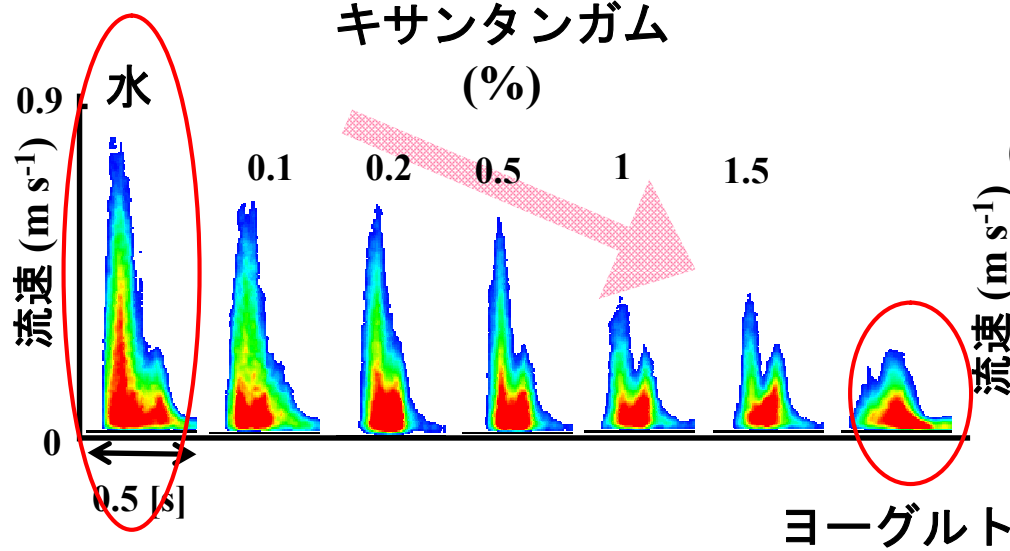


誤嚥しやすさ $\longleftrightarrow$ 最大流速 V_{max}

超音波による流速分布測定

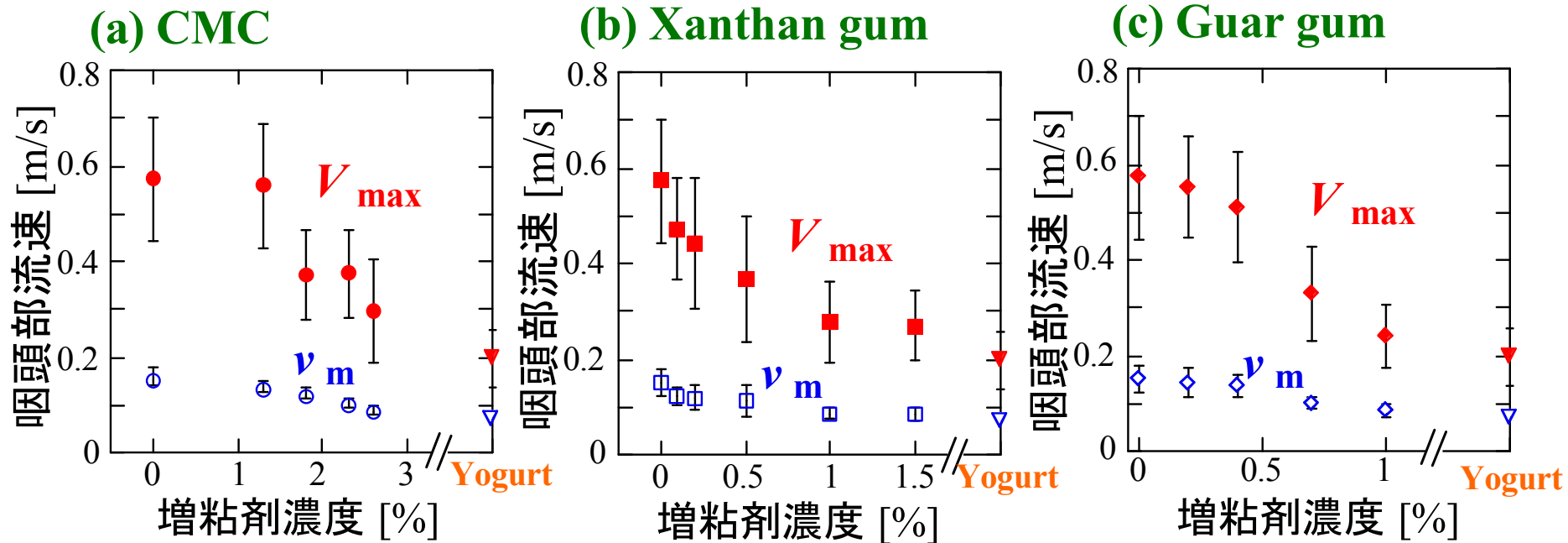
粒子密度

低 高

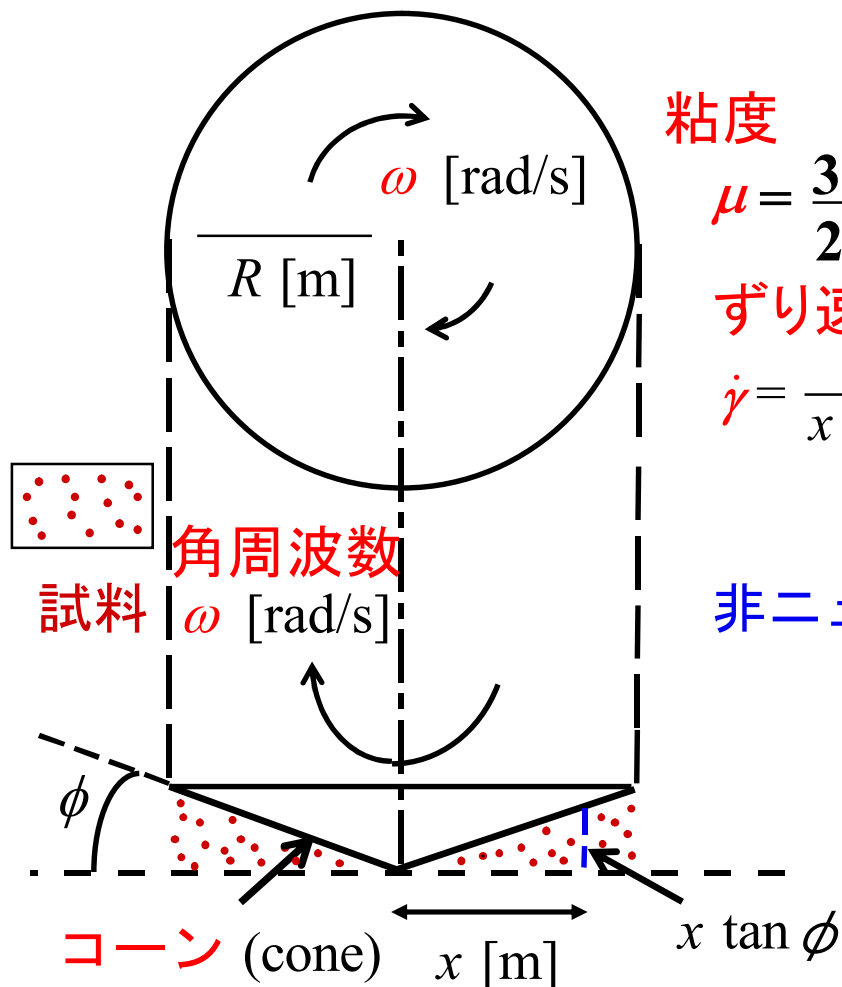


増粘剤溶液の咽頭部流速の濃度依存性

$V_{\max}$: 最大流速 v_m : 平均流速



コーンプレート型粘度計



粘度

$$\mu = \frac{3 M \omega \phi}{2 \pi R^3 \dot{\gamma}} \quad M: \text{トルク [N} \cdot \text{m]}$$

ずり速度

$$\dot{\gamma} = \frac{x \omega}{x \tan \phi} = \frac{\omega}{\tan \phi} \approx \frac{\omega}{\phi} \quad \text{場所 (x) によらず一定}$$



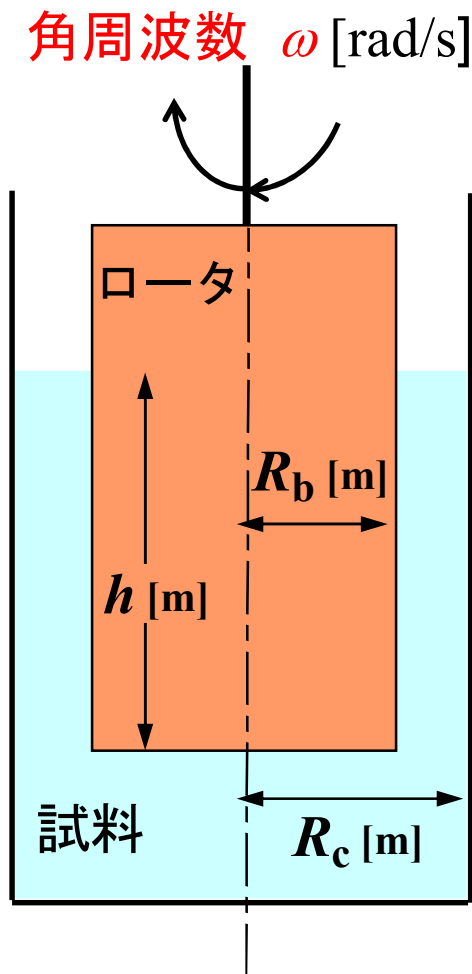
非ニュートン流体でも物理的に明確な粘度

μ vs. $\dot{\gamma}$ 流動特性

- ・ サンプル少量 (数ml)
- ・ スリップする試料は不可
- ・ 大きい粒子を含む試料は不可

回転円筒型粘度計(B型粘度計)

Brookfield-type 粘度計



粘度
 $\mu = \frac{M}{4 \pi \omega h} \left(\frac{1}{R_b^2} - \frac{1}{R_c^2} \right)$ M : トルク [N・m]

ニュートン流体に関する式

- ・ 安価で取り扱いが容易
- ・ ずり速度 $\dot{\gamma}$ の近似値は得られる (実験式使用)

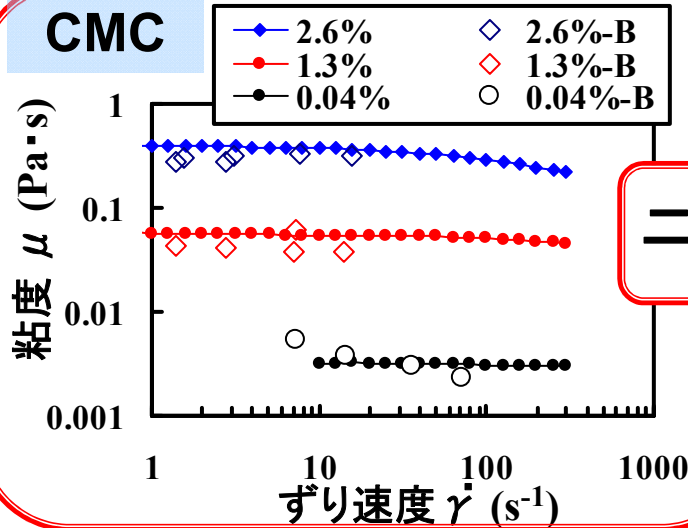


非ニュートン流体でも近似的な流動特性 μ vs. $\dot{\gamma}$

- ・ サンプル大量 (~500ml)
- ・ 多少不均一な試料でも粘度の概略値が得られる

増粘剤溶液の粘度

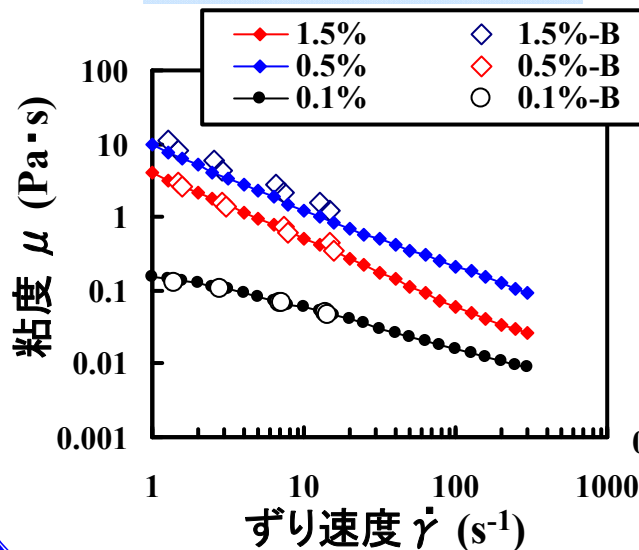
コーンプレート型
B型



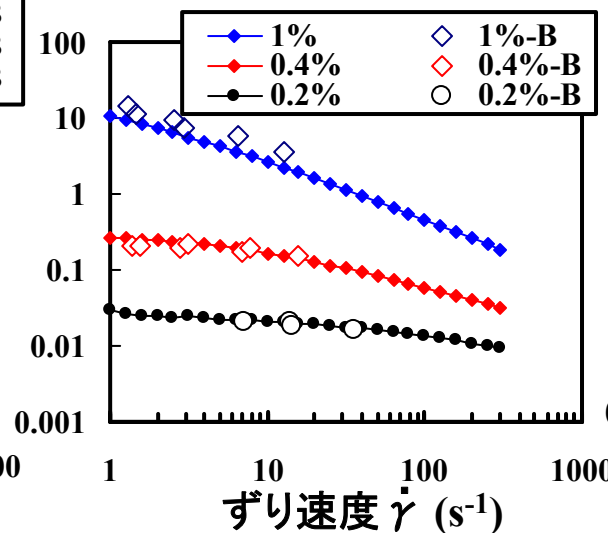
ニュートン流体に近い

非ニュートン流体(ずり流動化)

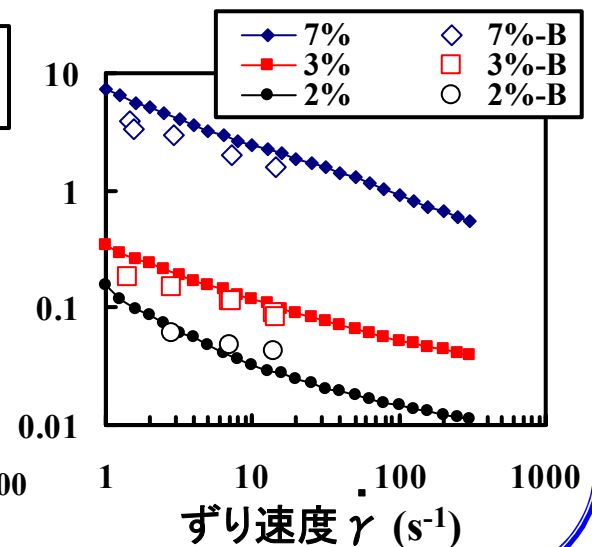
キサンタンガム



グアガム

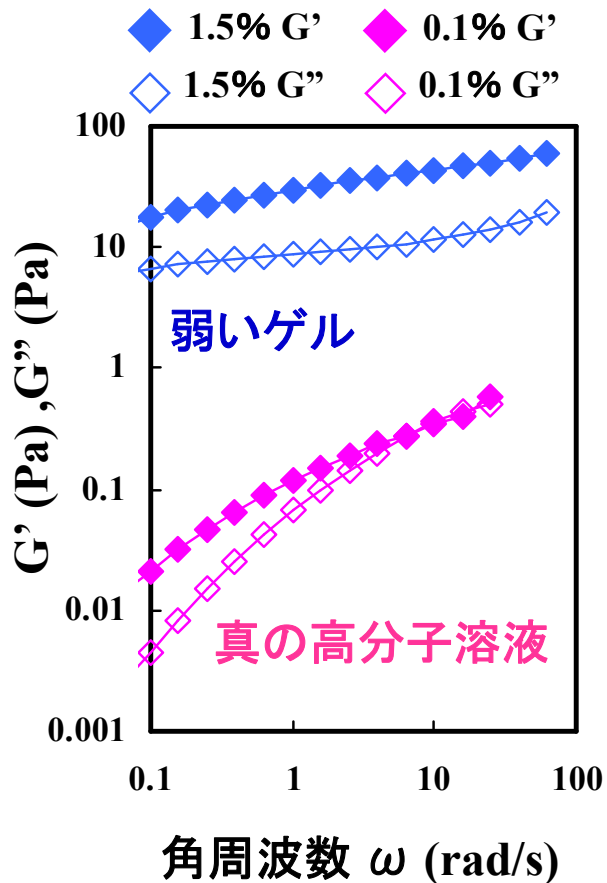


α 化デンプン

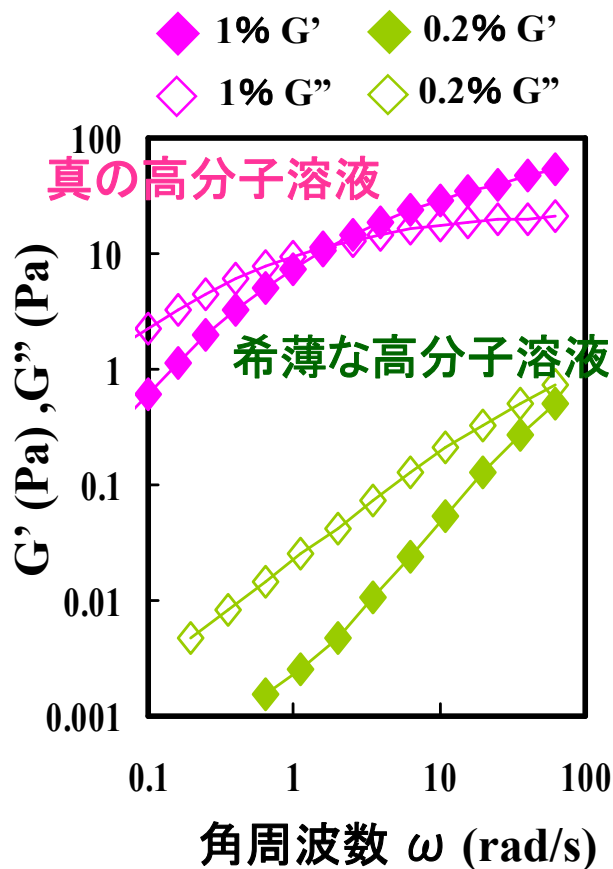


増粘剤溶液の動的粘弾性測定の結果

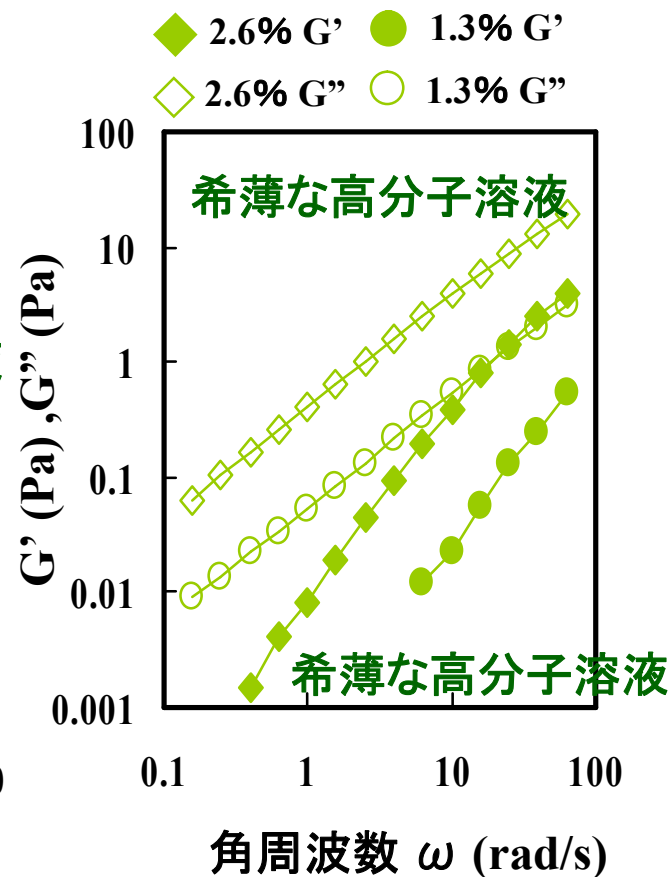
キサンタンガム



グアガム

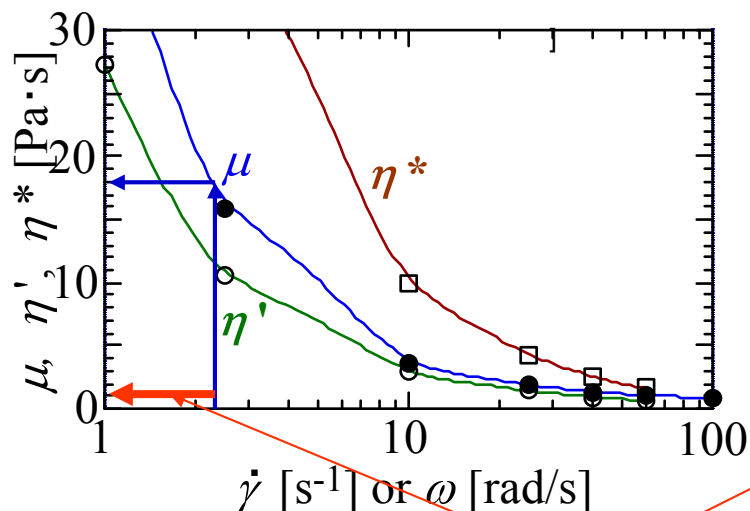


CMC

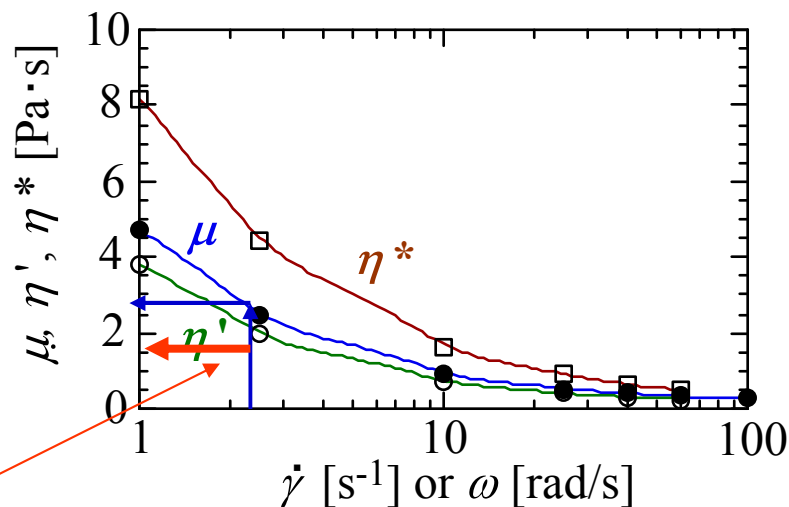


液状の介護食として必要な μ , η' , η^* の値の推定

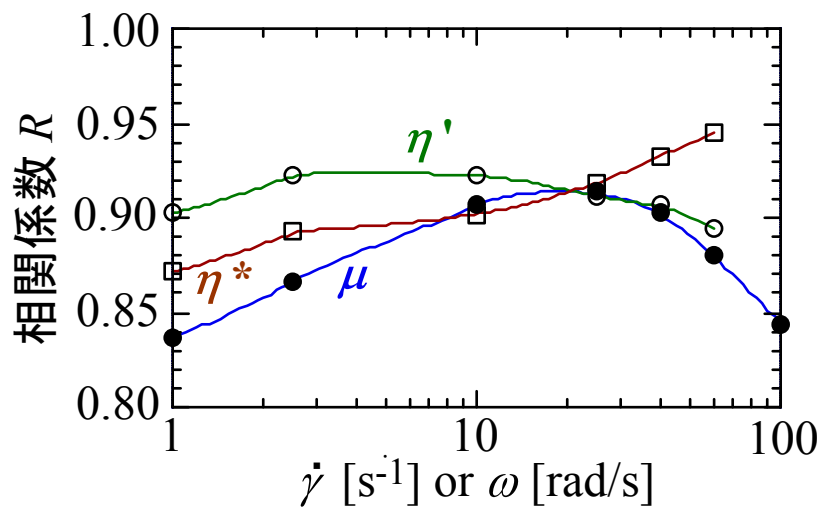
最大流速 $V_{\max} = 0.2$ m/s
(ヨーグルト程度)



最大流速 $V_{\max} = 0.3$ m/s
(やや妥協した値)



1994年厚労省基準値 1.5 Pa·s

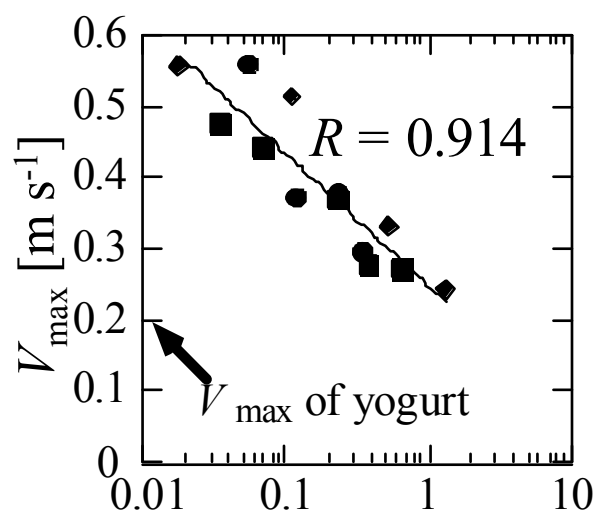


咽頭部サイズ

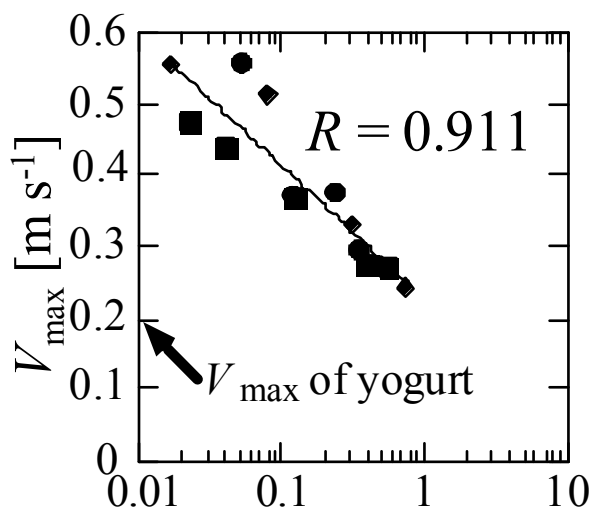


ずり速度: 数十 s⁻¹程度

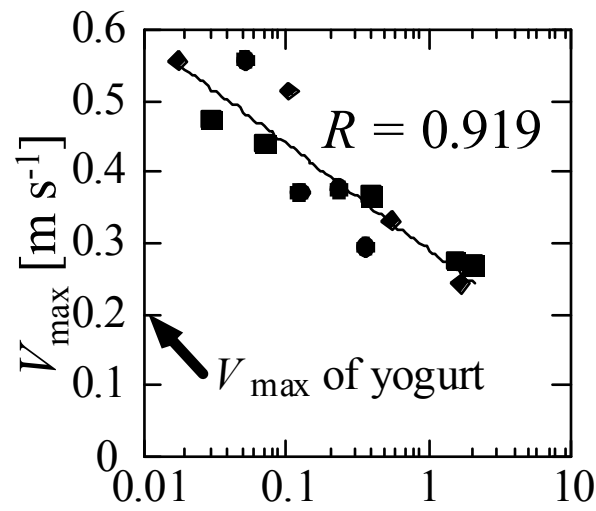
増粘剤溶液の粘度 μ , 動的粘性率 η' , 複素粘性率 η^* と最大流速 $V_{\max}$ との相関 ($\dot{\gamma}$ or $\omega = 25$ [s^{-1}] or [rad/s])



粘度 μ [Pa·s]



動的粘性率 η' [Pa·s]



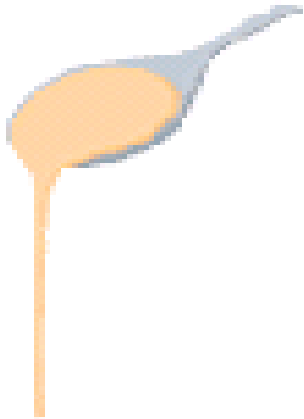
複素粘性率 η^* [Pa·s]

粘度 μ , 動的粘性率 η' , 複素粘性率 η^* ($\dot{\gamma}$ or $\omega = 10 \sim$ 数十 s^{-1})
液状介護食の物性指標

市販のトロミ剤

増粘多糖類

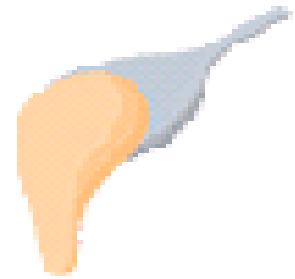
ポタージュ状



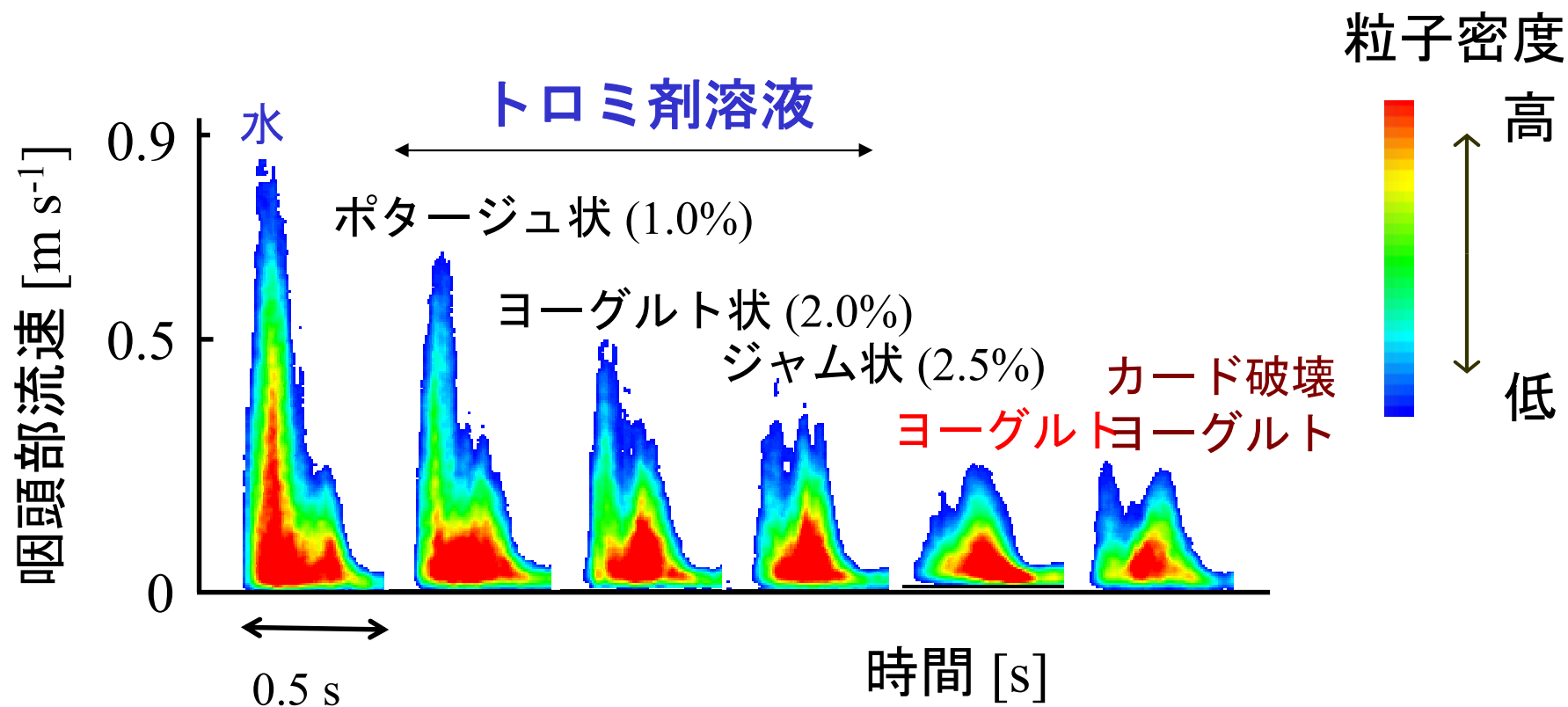
ヨーグルト状



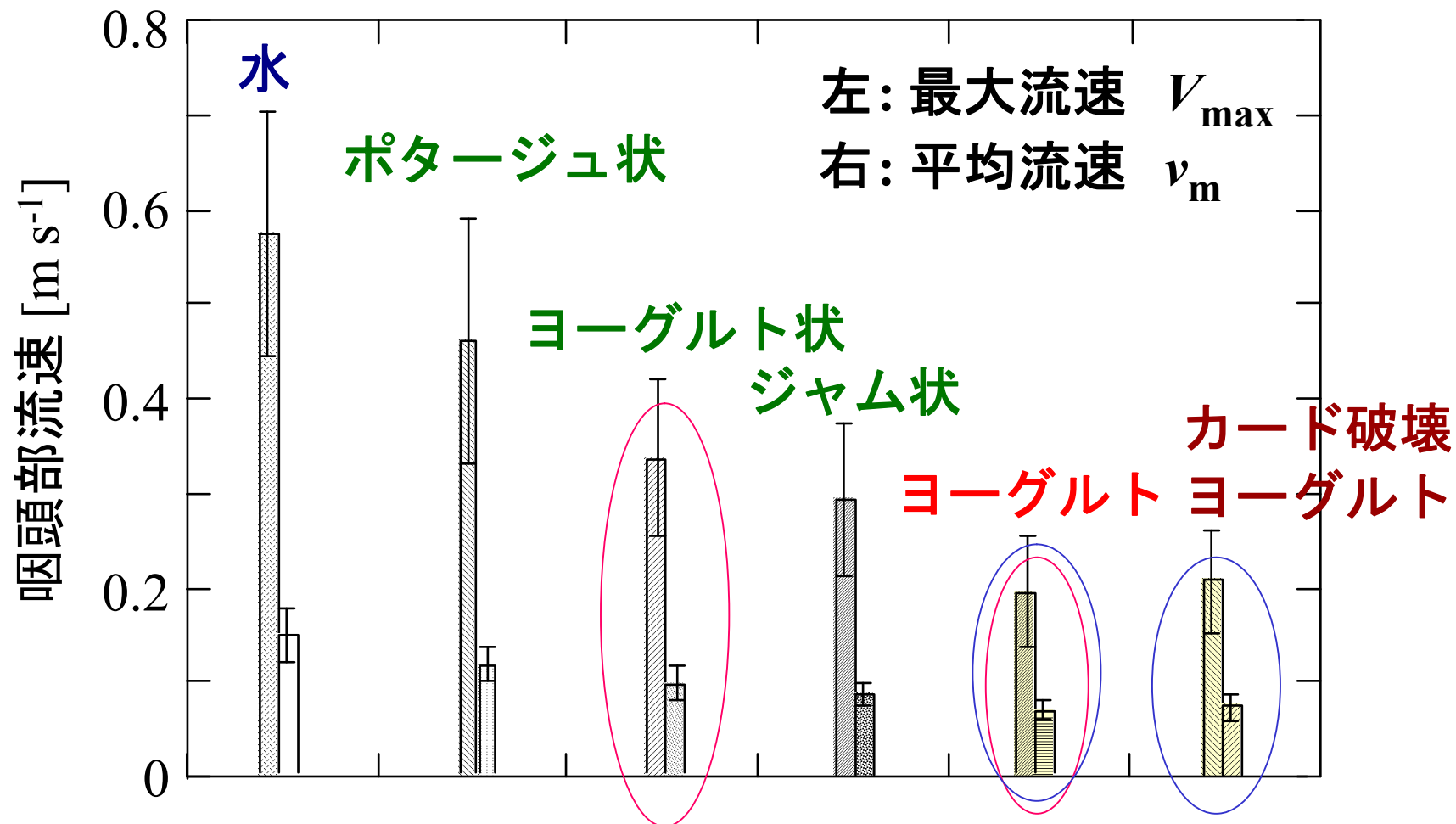
ジャム状



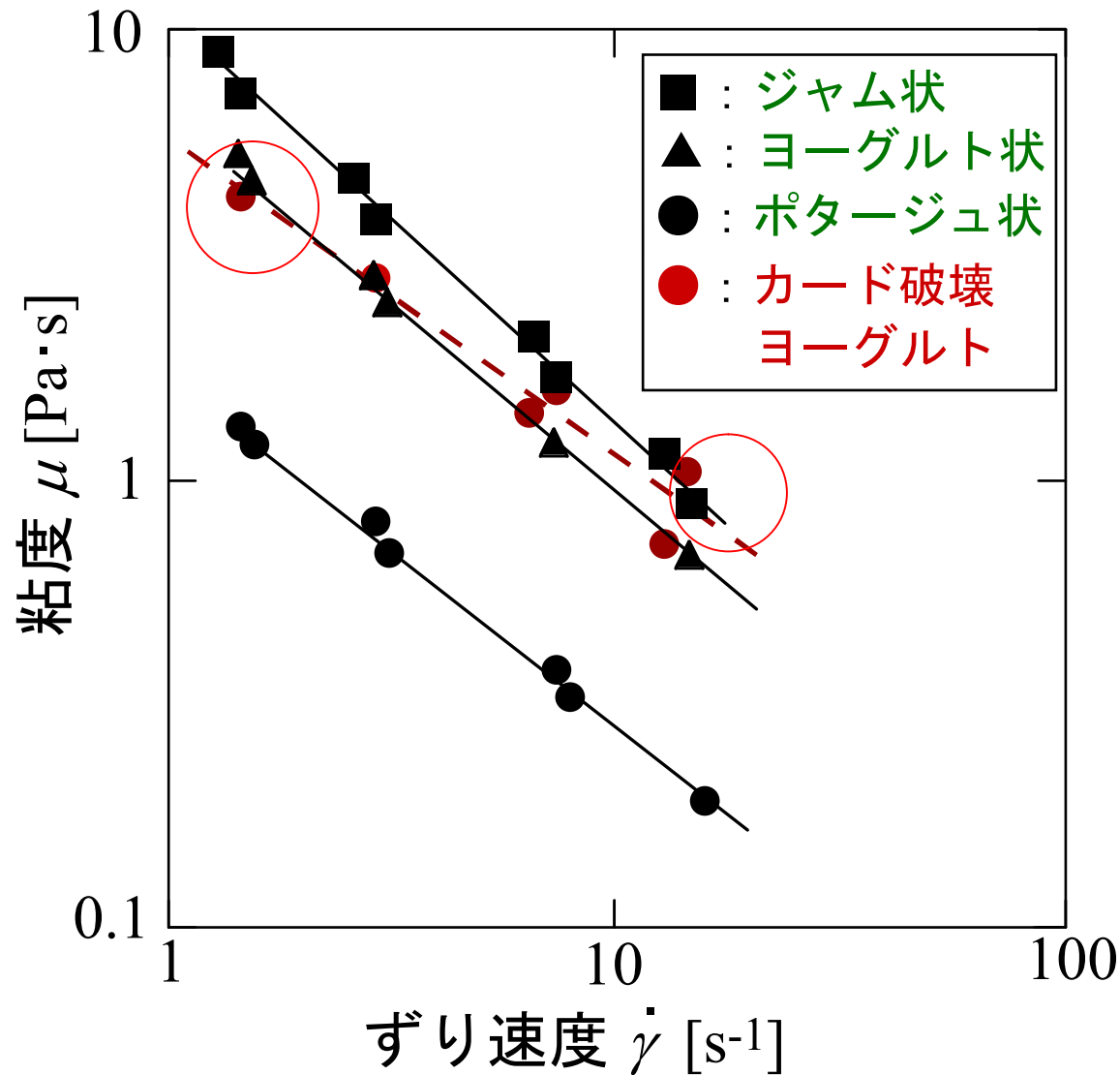
トロミ剤溶液, ヨーグルト・カード破壊ヨーグルト の流速スペクトル



トロミ剤溶液, ヨーグルト, カード破壊ヨーグルト の咽頭部流速



トロミ剤(トロメイク)溶液とカード破壊ヨーグルトの流動特性



液状食品(増粘剤溶液)のまとめ

介護食の物性指標

η' , η^*

(動的粘弾性測定)

粘度 μ

(流動特性測定)

$\dot{\gamma}$ or ω : 10～数十 s^{-1} or rad/s

1994年の厚生労働省の旧基準における粘度

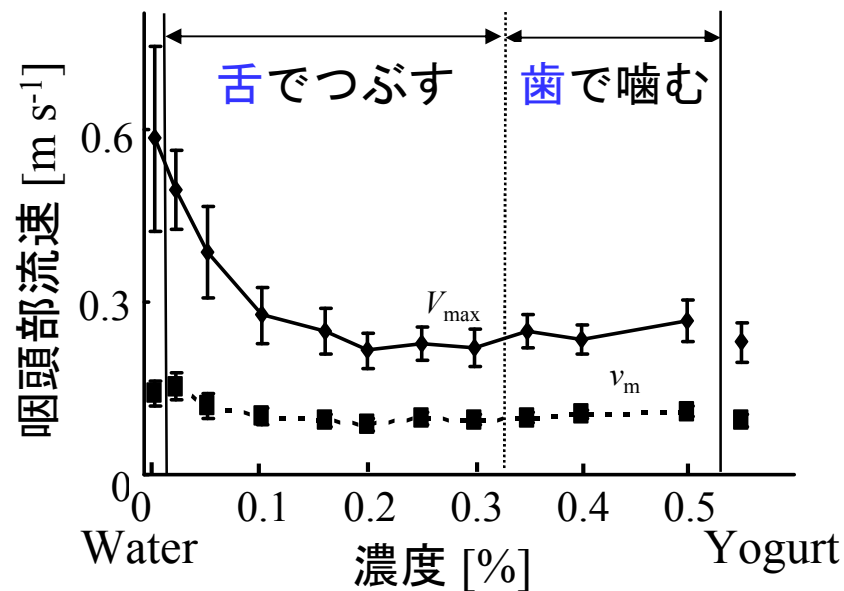
ずり速度(ロータ回転数): $2\text{--}3 \text{ s}^{-1}$ (12 rpm)

粘度の閾値: $1.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

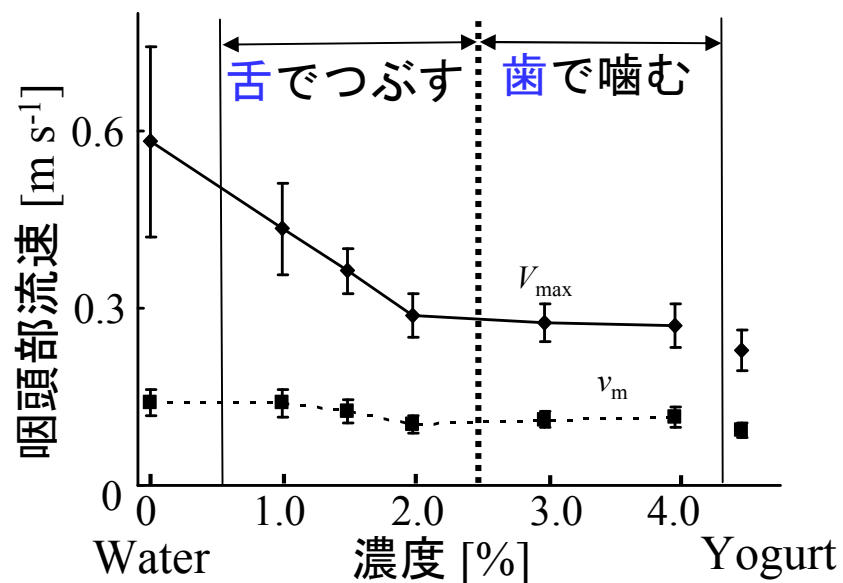
いずれも不適切で現実に合わない

ジェランおよびゼラチンの咽頭部流速

(a) ジェラン



(b) ゼラチン



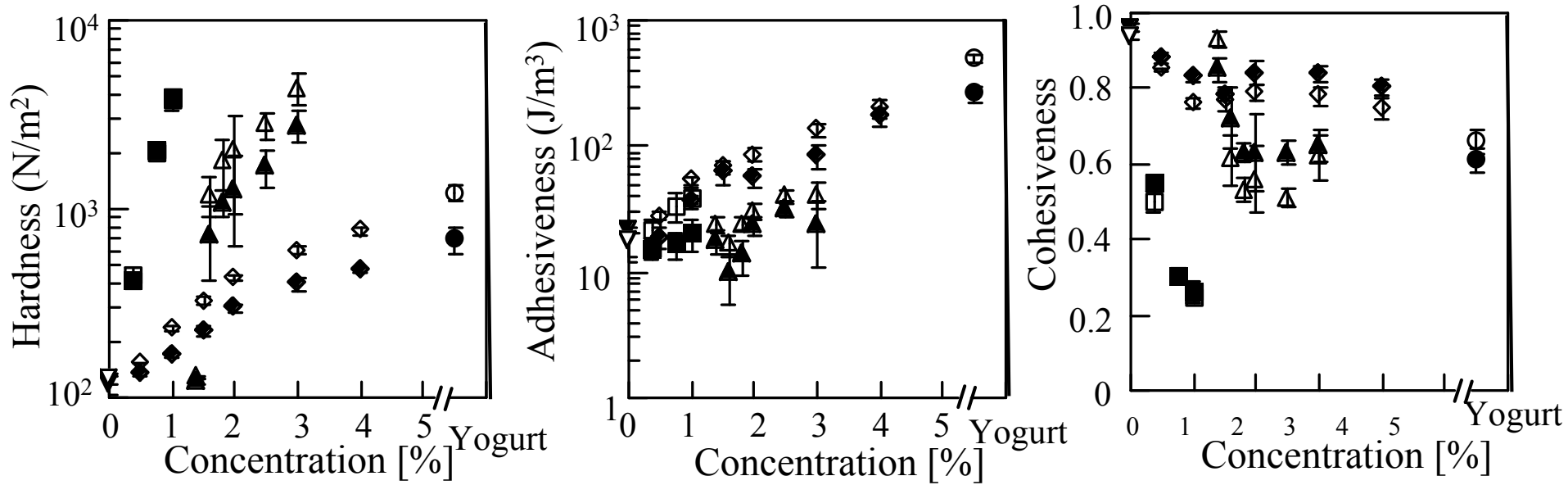


Fig. Concentration Dependence of the Parameters obtained from TPA Test.

◆◇, a Thickening agent;

▲△, CA (a Commercial Gelling Agent containing κ -Carrageenan);

■□, MC (CA with Milk and Sucrose); ●○, Yogurt; ▼▽, Water

Test speed: ◆▲■●▼, 1 mm/s; ◇△□○▽, 10 mm/s

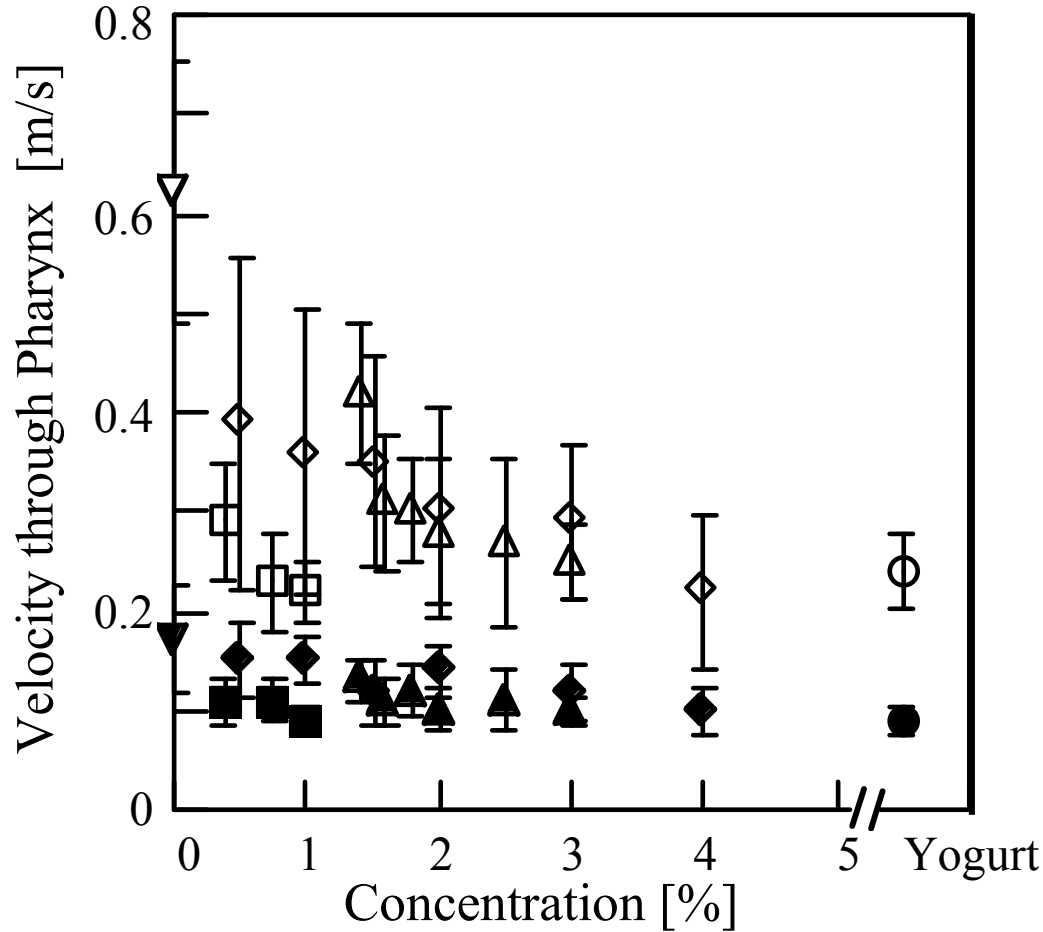


Fig. Concentration Dependence of the Parameters obtained from TPA Test.

◆◇, a Thickening agent;

▲△, CA (a Commercial Gelling Agent containing κ -Carrageenan);

■□, MC (CA with Milk and Sucrose); ●○, Yogurt; ▼▽, Water

Test speed: ◆▲■●▼, 1 mm/s; ◇△□○▽, 10 mm/s

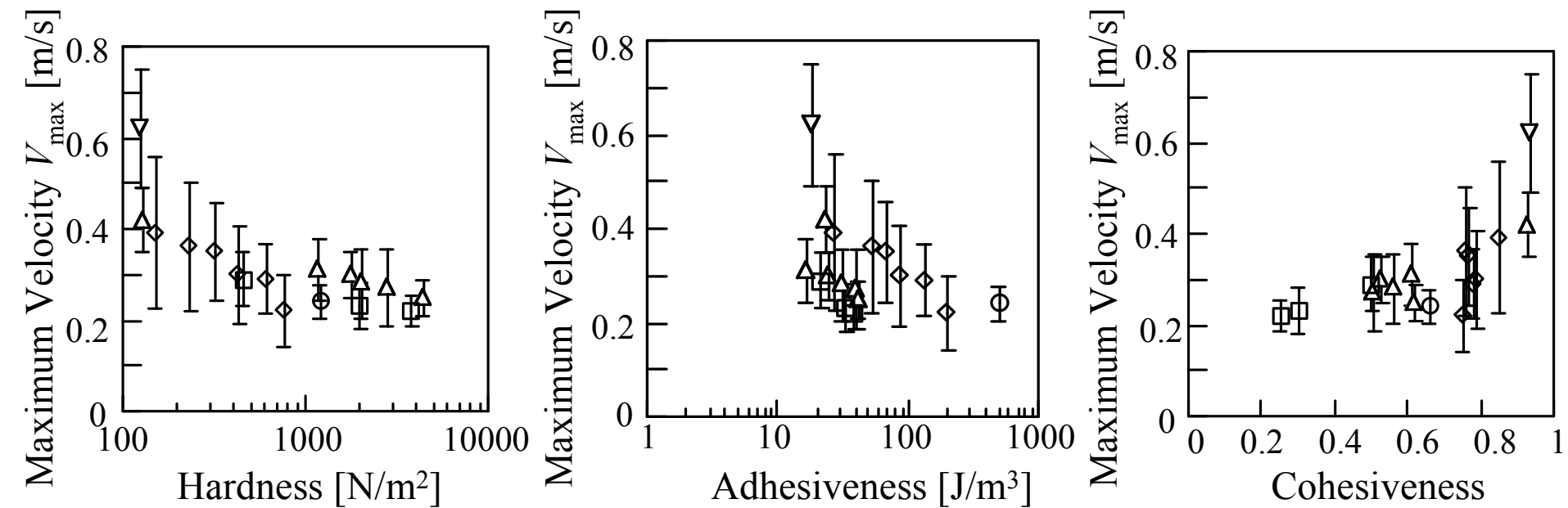


Fig. Relation between the Parameters from TPA Tests and $V_{\max}$
 $\diamond$, T; $\triangle$, CA; $\square$, MC; $\circ$, Yogurt; ∇ , Water
 Test speed: 10 mm/s

ゲル状食品の物性と咽頭部流速について

食塊のまとまりやすさの指標とされている“凝集性”は咽頭部流速との相関がみられなかった.

硬さ”の値が1000 N/m²以上で咽頭部の最大流速 $V_{\max}$ の値はヨーグルト程度まで低下した.

このことから、TPA測定から得られるパラメータでは“硬さ”が誤嚥の危険性の尺度として適していると考えられた.

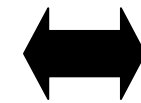
まとめ

食品ハイドロコロイドの構造と物性

高分子物理学的理論・レオロジー

機器による物性測定・解析

生体計測



官能評価
臨床試験



実用

テクスチャーデザインなど

[参考文献]

[パーコレーション, フラクタル]

原著論文

- (1-1) T. Yano, H. Kumagai, T. Fujii, and T. Inukai, *Biosci. Biotech. Biochem.*, **57**, 528-531 (1993).
- (1-2) H. Kumagai, T. Fujii, T. Inukai, and T. Yano, *Biosci. Biotech. Biochem.*, **57**, 532-535 (1993).
- (1-3) T. Hagiwara, H. Kumagai, and K. Nakamura, *Biosci. Biotech. Biochem.*, **60**, 1757-1763 (1996).
- (1-4) T. Hagiwara, H. Kumagai, T. Matsunaga, and K. Nakamura, *Biosci. Biotech. Biochem.*, **61**, 1663-1667 (1997).
- (1-5) T. Hagiwara, H. Kumagai, and T. Matsunaga, *J. Agric. Food Chem.*, **45**, 3807-3812 (1997).
- (1-6) T. Hagiwara, H. Kumagai, and K. Nakamura, *Food Hydrocolloids*, **12**, 29-36 (1998).
- (1-7) H. Kumagai, T. Matsunaga, and T. Hagiwara, *Biosci. Biotech. Biochem.*, **63** (1), 223-225 (1999).

総説・解説論文

- (1-8) “食品のゾル-ゲル転移点近傍における力学物性”, 熊谷仁, *New Food Industry*, **38**, 19-26 (1996).
- (1-9) “牛血清アルブミンゲルのフラクタル解析”, 熊谷仁, *日本バイオレオロジー学会誌*, **13**, 1-8 (1999).

[誘電緩和]

原著論文

- (2-1) S. Ikeda, H. Kumagai, and K. Nakamura, *Carbohydrate Research*, **301** (2), 51-59 (1997).
- (2-2) S. Ikeda, H. Kumagai, and K. Nakamura, *Food Hydrocolloids*, **11** (3), 303-310 (1997).
- (2-3) S. Iwamoto and H. Kumagai, *Biosci. Biotech. Biochem.*, **62** (7), 1381-1387 (1998).
- (2-4) S. Ikeda and H. Kumagai, *J. Agric. Food Chem.*, **45** (9), 3452-3458 (1997).
- (2-5) S. Ikeda and H. Kumagai, *J. Agric. Food Chem.*, **46** (9), 3687-3693 (1998).
- (2-6) S. Iwamoto, H. Kumagai, Y. Hayashi and O. Miyawaki, *Int. J. Biol. Macromolecules*, **26**, 345-351 (1999).
- (2-7) H. Kumagai, T. Sugiyama, and S. Iwamoto, *J. Agric. Food Chem.*, **48** (6), 2260-2265 (2000).

総説・解説論文

- (2-8) "Dielectric Analysis of the Inner Structure of Food Polyelectrolyte Solutions and Gels",
H. Kumagai and S. Ikeda, *Recent Research Developments in Agricultural & Biological Chemistry*, **2**, 133-141 (1998).
- (2-9) “Analysis of Molecular or Ion Mobility in Glassy and Rubbery Foods by Electric and Proton-NMR Measurements”,
H. Kumagai and H. Kumagai, *Food Sci. Technol. Res.*, **8** (2), 95-105, 2002.
- (2-10) “食品の物性そして水 II 電気物性と誘電緩和”, 熊谷仁, *日本食品工学会誌*, **9**, 123-134 (2008).
- (2-11) “食品の物性そして水 III 電気物性測定およびパルスNMRを用いたガラス・ラバー状食品中分子の運動性に関する解析”, 熊谷仁, 熊谷日登美, *日本食品工学会誌*, **9**, 197-206 (2008).

[嚥下関係]

原著論文

- (3-1) 長谷川温子, 乙黒明子, 熊谷仁, 中沢文子, 日本食品科学工学会誌, **52**, 441-447 (2005).
- (3-2) 長谷川温子, 中澤文子, 熊谷仁, 日本食品科学工学会誌, **55**, 330-337 (2008).
- (3-3) 長谷川温子, 中澤文子, 熊谷仁, 日本食品科学工学会誌, **55**, 541-548 (2008)
- (3-4) H. Kumagai, A.Tashiro, A. Hasegawa, K. Kohyama and H. Kumagai,
Food Science and Technology, Research, **15**, 203-210 (2009).
- (3-5) A.Tashiro, A. Hasegawa, K. Kohyama, H. Kumagai, and H. Kumagai,
Biosci. Biotech. Biochem., **74** (8), 1598-1605 (2010).
- (3-6) A.Tashiro, K. Ono, A. Hasegawa-Tanigome, H. Kumagai, and H. Kumagai, *Japan J. Food Eng.*, **11**, 177-185 (2010).
- (3-7) 谷米 (長谷川) 温子, 小倉聖美, 秋間彩香, 神山かおる, 熊谷日登美, 熊谷仁,
日本食品工学会誌, **14** (2), 87-96 (2013).

総説・解説論文

- (3-8) “食品の物性そして水 V レオロジーと食品工学-嚥下障害者用介護食の物性を中心として”,
熊谷仁, 熊谷日登美, 日本食品工学会誌, **10**, 137-148 (2009).
- (3-9) “高齢者が誤嚥しにくい食品の物性”, 熊谷仁, 谷米 (長谷川) 温子, 田代晃子, 熊谷日登美,
New Food Industry, **53**, 29-40 (2011).
- (3-10) “超音波による咽頭部流速測定に基づく食物の嚥下特性評価”, 熊谷仁, 谷米 (長谷川) 温子, 熊谷日登美,
Food & Food Ingredients J. Jpn (FFI Journal), **216** (3), 194-206 (2011).
- (3-11) “高齢者が誤嚥しにくい介護食の物性”, 熊谷仁, 谷米 (長谷川) 温子, 田代晃子, 熊谷日登美,
化学と生物, **49**, 610-619 (2011).
- (3-12) “超音波パルスドプラー法による咽頭部における食物の流速測定”,
熊谷仁, 谷米 (長谷川) 温子, 冷凍, **87** (1018), 534-540 (2012).
- (3-13) 「進化する食品のテクスチャー研究」, 株式会社エヌ・ティー・エス,
山野善正監修, 第4章 咀嚼と嚥下, 6. 嚥下障害用介護食のテクスチャー・物性,
熊谷仁, 谷米 (長谷川) 温子(2011).

[食品物性全般]

- (1) “食品の物性そして水 I 食品工学における物性そして水”, 熊谷仁, 熊谷日登美, 萩原知明,
日本食品工学会誌, **9**, 79-89 (2008).
- (2) “食品ハイドロコロイドの物性に関する研究”, 熊谷仁, 日本食品工学会誌, **13**, 79-90 (2012).