

Polymer Science for Soft Robotics

ソフトロボティクスのための高分子科学

Hidemitsu Furukawa

古川 英光

SWEL Lab, Yamagata University

October 16, 2026



Today's question

今日の問い

How can molecular chains help us design a soft robot?

分子鎖の理解は、ソフトロボットの設計にどう役立つでしょうか？

Our shared worksheet

共同ワークシート

Name, laboratory and research topic

氏名・研究室・研究テーマを1行で記入

Your first prediction stays on the page

最初の予想を残し、講義後の説明を追記

[Open the lecture worksheet](#)

The 90-minute session

90 分の進め方

0–25 min Applications and introductions

応用例と自己紹介

25–55 min Rubber elasticity and a calculation

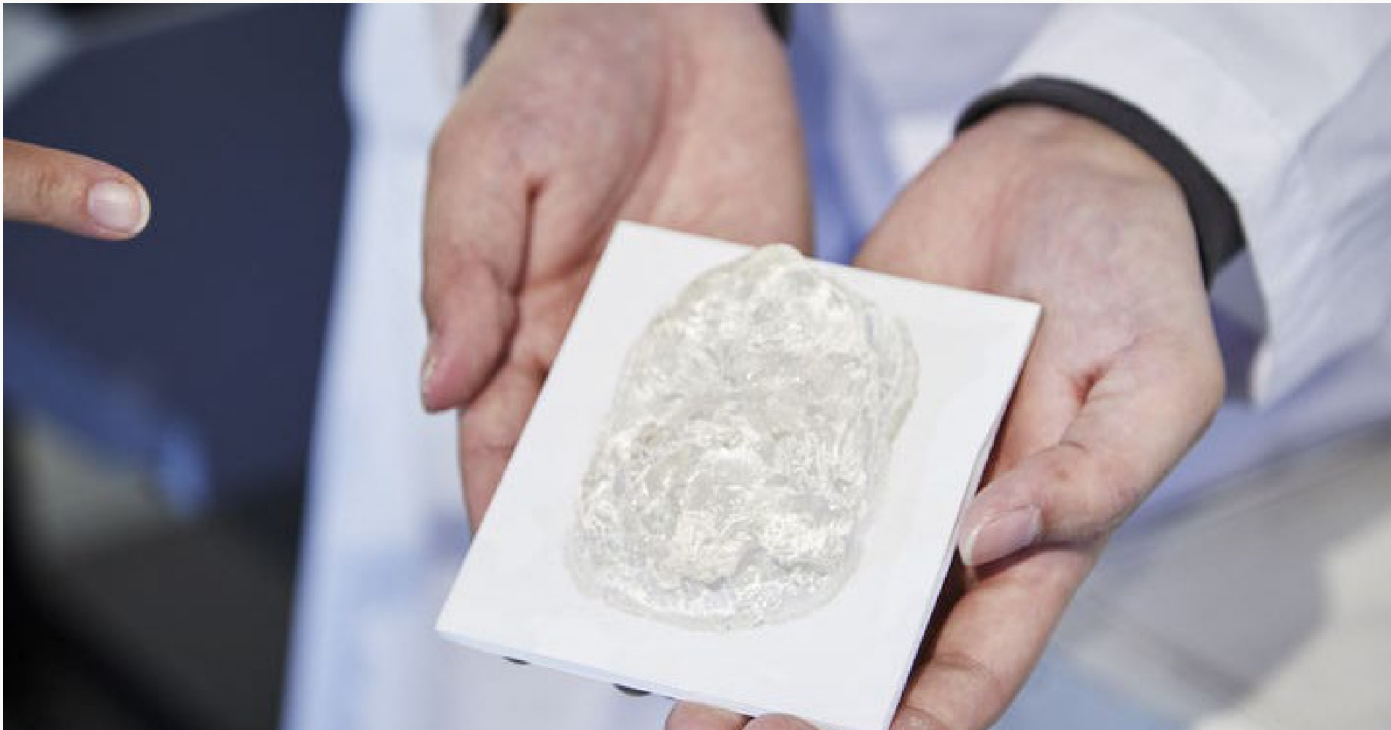
ゴム弾性と計算

55–90 min Experiments, planning and reflection

実験の説明・計画・振り返り

A printed object can be soft

印刷したのも、柔らかくできる



Shape comes from fabrication

造形が形を与える

Response comes from material

材料が変形の仕方を決める

What makes a hydrogel?

ハイドロゲルとは

A polymer network holds a large amount of water

高分子網目が多量の水を含む

Network structure controls deformation

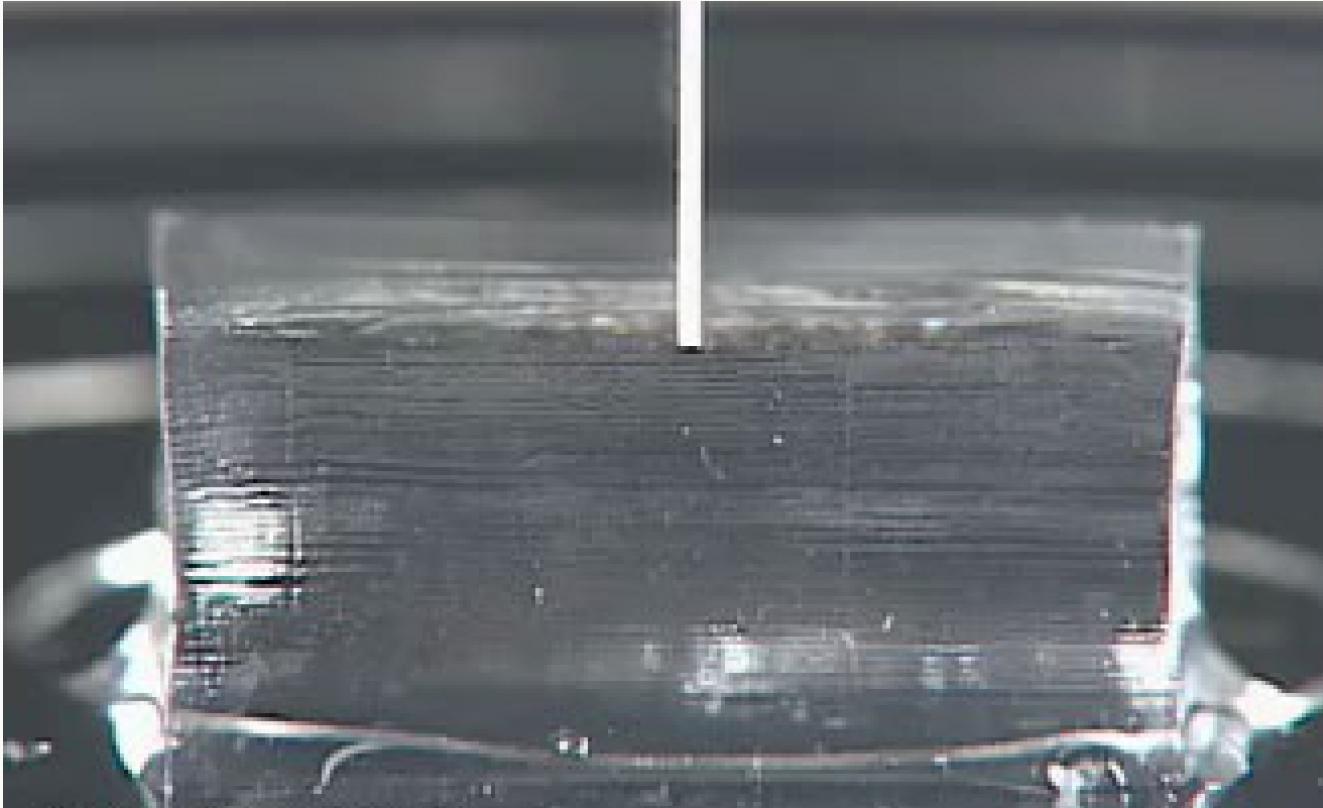
網目構造が変形の応答を左右する

Water also affects transport and time dependence

水は物質輸送や時間依存性にも関わる

Softness and toughness

柔らかさと、壊れにくさ



Stiffness: resistance to deformation

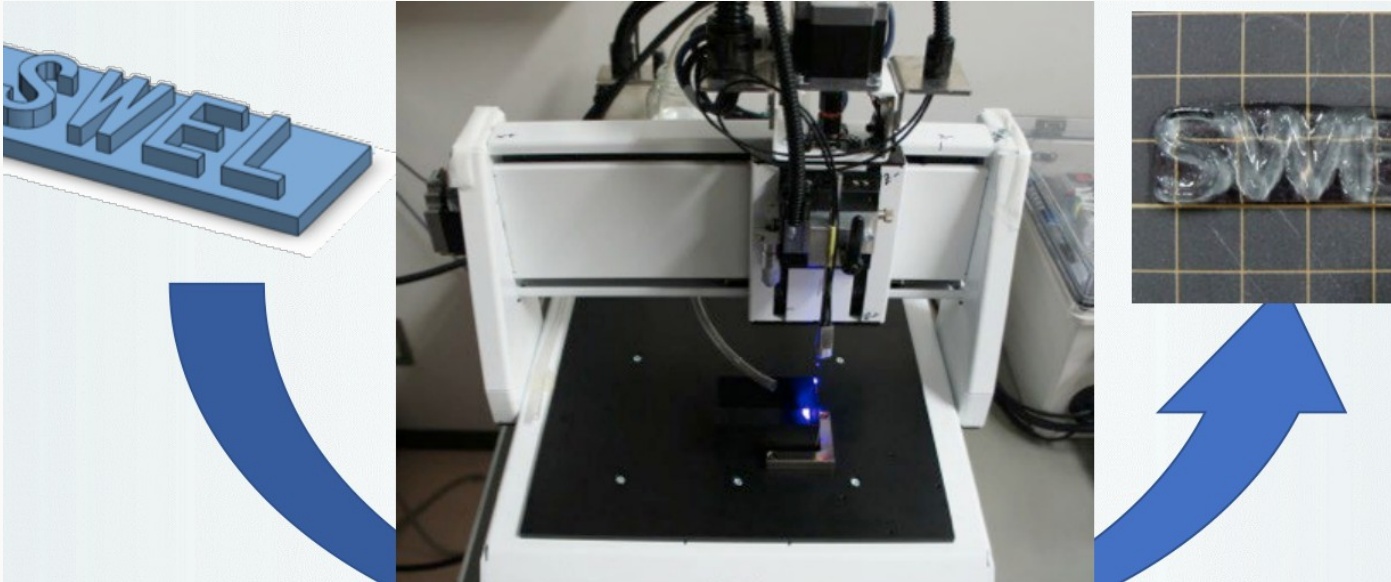
弾性率: 変形しにくさ

Toughness: resistance to fracture

靱性: 破壊への抵抗

3D printing a gel

ゲルの 3D プリンティング



Local curing builds the shape

局所的な硬化で形をつくる

Chemistry constrains
printability

材料の化学が造形条件を決める

4D printing

時間とともに形が変わる造形

Printed structure + a programmed response

造形構造と、設計した応答

A stimulus changes shape over time

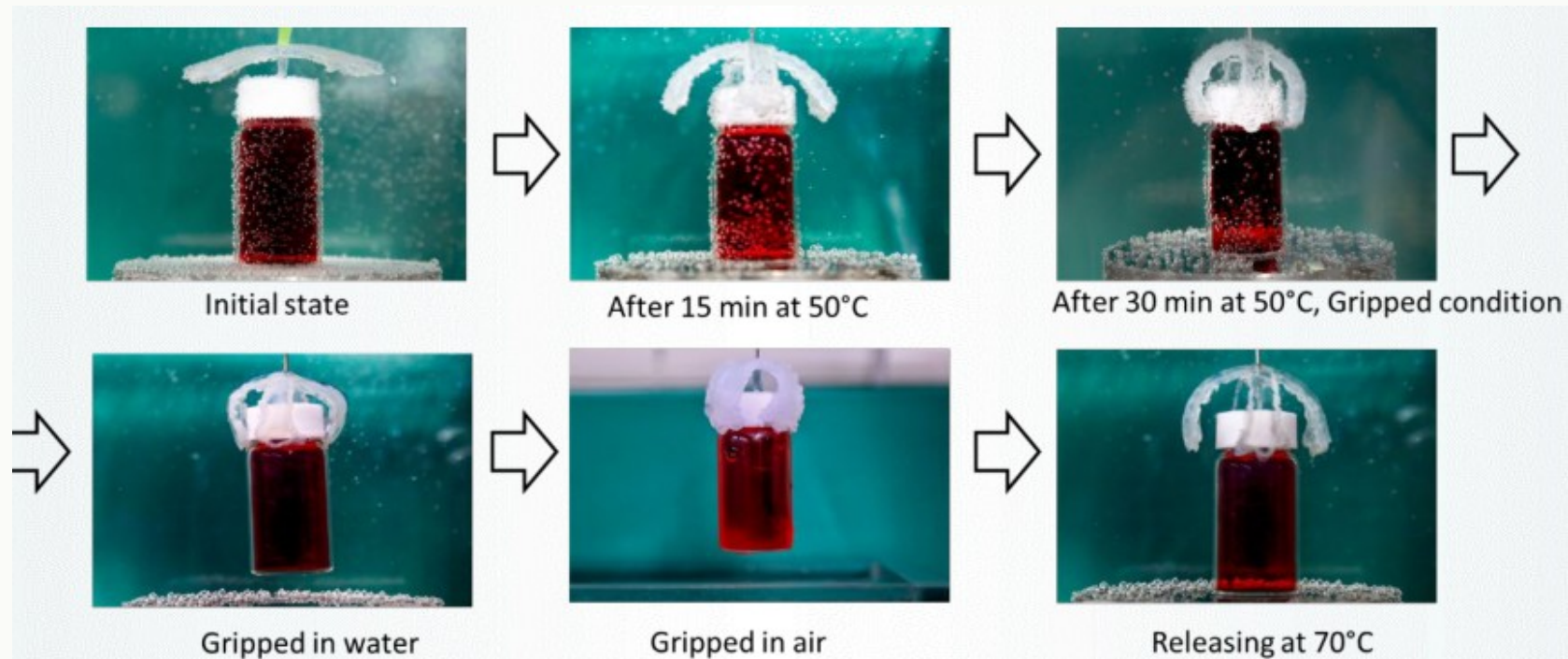
刺激によって、時間とともに形が変わる

Material distribution can determine motion

材料の配置で動きを設計する

A gel gripper in action

ゲルグリッパーの動作

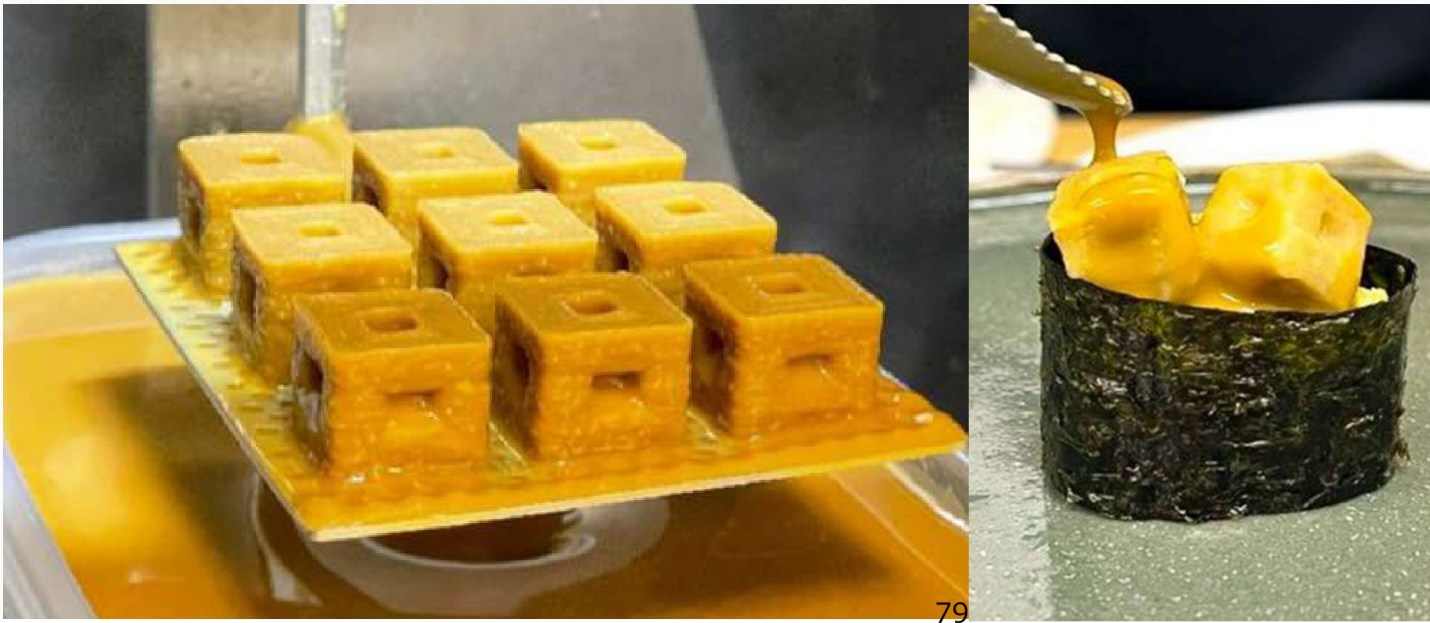


A material-specific response enables grasping and release

この材料系の膨潤・温度応答を利用して、把持と解放を制御する

Material design in food printing

食品造形にもつながる材料設計



Shape retention

形を保つ

Texture and deformation

食感と変形

Why does rubber recover?

輪ゴムが元に戻るのは、なぜ？

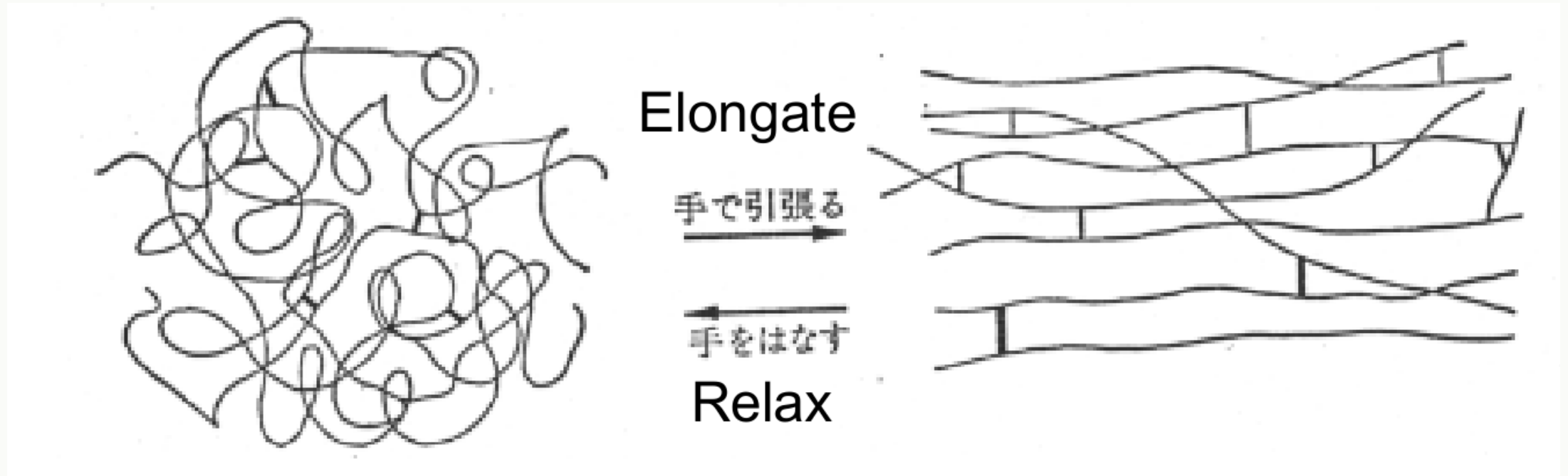
Does warming make rubber softer?

温めると弾性率はどうなるでしょうか？ まず予想を書きましょう。

Worksheet B1 90 seconds

Polymer conformations

高分子鎖が取り得る形



Stretching restricts the accessible conformations

引き伸ばすと、鎖が取り得る形態が制限される

Entropy and restoring force

エントロピーと復元力

$$A = U - TS$$

A Helmholtz free energy [J]
ヘルムホルツ自由エネルギー

T Absolute temperature [K]
絶対温度

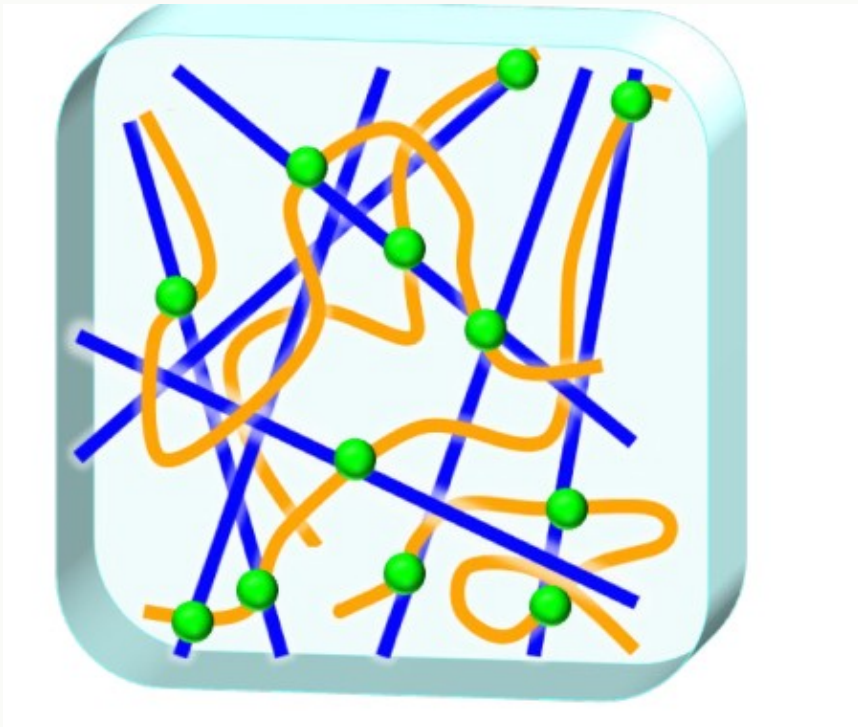
U Internal energy [J]
内部エネルギー

S Entropy [J K⁻¹]
エントロピー

Stretching reduces conformational entropy. / 伸長で配座エントロピーが低下する。

Crosslinks create a network

架橋が網目をつくる



Junctions constrain chain motion

架橋点が鎖の運動を拘束する

Network strands carry elastic load

架橋点間の鎖が弾性応答を担う

A single chain acts like an entropic spring

1本の鎖のエントロピーばね

$$A(R) = 3k_B T R^2 / (2N_s b^2) + \text{constant}$$

$$f = \partial A / \partial R = [3k_B T / (N_s b^2)] R$$

A Chain free energy [J]

鎖の自由エネルギー

k_B Boltzmann constant [J K⁻¹]

ボルツマン定数: 1.380649×10^{-23}

N_s Number of statistical segments [-]

統計セグメント数

f Applied tensile force [N]

伸長を保つ外力（復元力は逆向き）

R End-to-end distance [m]

末端間距離

T Absolute temperature [K]

絶対温度

b Statistical segment length [m]

統計セグメント長

$\partial A / \partial R$ Derivative at fixed temperature [N]

温度一定での自由エネルギーの傾き

Heating increases the ideal rubber modulus

理想ゴムの弾性率は、温度上昇で増す

$$G = \nu k_B T \quad E \approx 3G = 3\nu k_B T$$

G Shear modulus [Pa]

せん断弾性率

ν Active strand number density [m^{-3}]

弾性的に有効な網目鎖の数密度

T Absolute temperature [K]

絶対温度: °Cの値に 273.15 を加える

E Young's modulus [Pa]

ヤング率

k_B Boltzmann constant [J K^{-1}]

ボルツマン定数: 1.380649×10^{-23}

Ideal incompressible network at fixed ν : $E \propto T$.

理想的な非圧縮網目で ν 一定なら、300 K から 330 K で約 10% 増加。

Stress, strain and the initial slope

応力・ひずみ・初期の傾き

$$\sigma = F/A_0 \quad \varepsilon = (L - L_0)/L_0$$

$$E \approx \Delta\sigma/\Delta\varepsilon$$

σ Nominal tensile stress [Pa]

公称引張応力

A_0 Original cross-sectional area [m²]

変形前の断面積

L, L_0 Loaded / reference gauge length [m]

負荷時／基準状態の標点間距離

Δ Difference between two values

2点間の差: $\Delta\sigma$ 、 $\Delta\varepsilon$

F Tensile force [N]

引張力

ε Engineering tensile strain [–]

工学引張ひずみ

E Young's modulus [Pa]

微小ひずみ領域の傾き

Your calculation

自分で計算する

$$A_0 = 1.0 \text{ mm}^2 = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$\varepsilon = 0.010: F = 0.0020 \text{ N} \quad \varepsilon = 0.030: F = 0.0060 \text{ N}$$

A_0 Original cross-sectional area [m^2]

変形前の断面積

F Tensile force [N]

引張力

$\Delta F, \Delta \varepsilon$ Force / strain differences [$\text{N} / -$]

2点の力の差／ひずみの差

ε Engineering tensile strain [$-$]

工学引張ひずみ

E Young's modulus [Pa]

ヤング率

Calculate $E \approx \Delta F / (A_0 \Delta \varepsilon)$ in Pa and MPa.

与えた値は練習用。Pa と MPa で答えてください。

The slope gives 0.20 MPa

傾きから求めるヤング率

$$E = \Delta F / (A_0 \Delta \epsilon)$$
$$= 0.0040 / (1.0 \times 10^{-6} \times 0.020) = 0.20 \text{ MPa}$$

E Young's modulus [Pa]

ヤング率: $2.0 \times 10^5 \text{ Pa}$

A_0 Original cross-sectional area [m^2]

変形前の断面積: $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2$

ΔF Force difference [N]

力の差: $0.0060 - 0.0020 = 0.0040 \text{ N}$

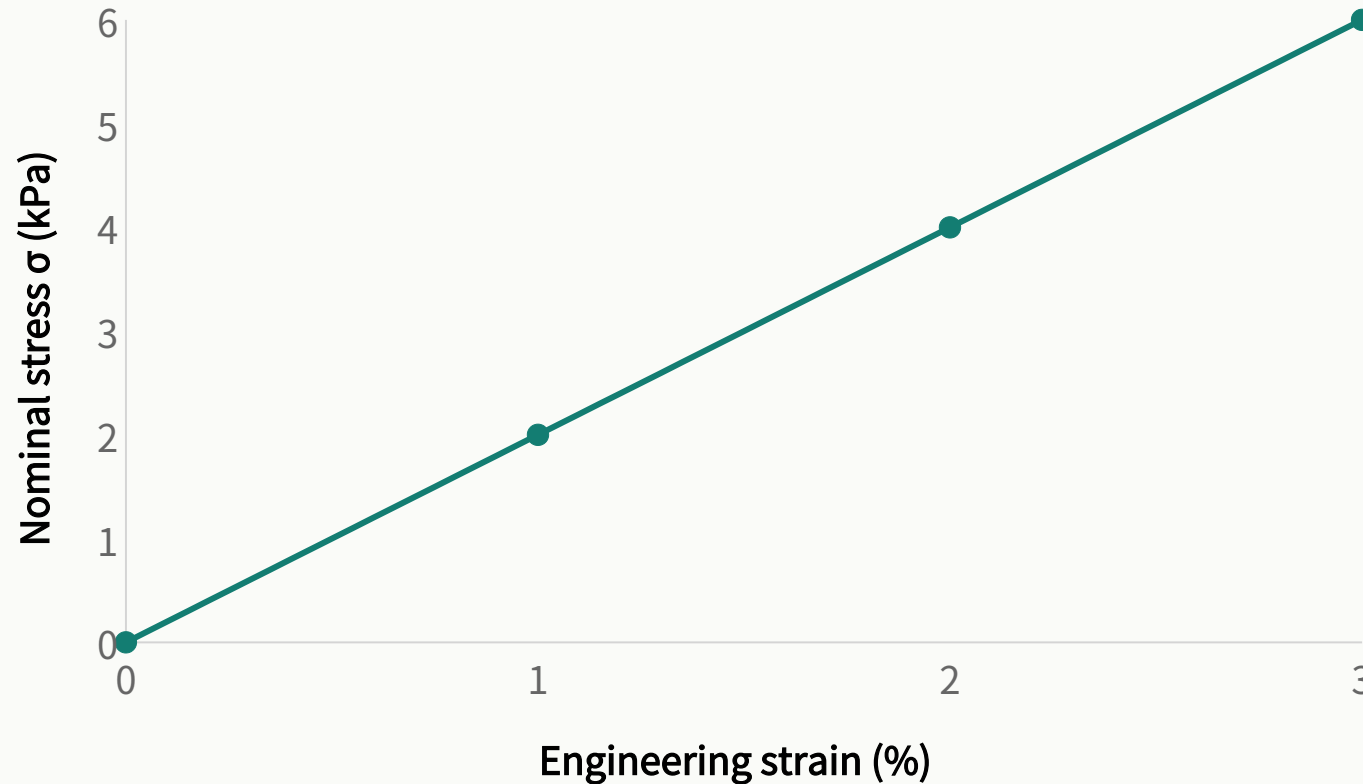
$\Delta \epsilon$ Strain difference [-]

ひずみの差: $0.030 - 0.010 = 0.020$

$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$ [-] = dimensionless / 無次元

A small-strain stress–strain curve

微小ひずみの応力-ひずみ曲線



$$E = 0.20 \text{ MPa}$$

E : Young's modulus [Pa]

ヤング率

σ : Nominal stress [Pa]

公称応力

ε : Engineering strain [-]

工学ひずみ（横軸は %）

Teaching data / 説明用データ

How many network strands?

網目鎖は、どれくらいある？

$$\nu = E / (3k_B T)$$

ν Active strand number density [m^{-3}]

弾性的に有効な網目鎖の数密度

k_B Boltzmann constant [J K^{-1}]

計算には 1.38×10^{-23} J/K を使用

$1/\nu$ Material volume per active strand [m^3]

有効網目鎖1本に割り当てる体積

E Young's modulus [Pa]

ヤング率: 2.0×10^5 Pa

T Absolute temperature [K]

絶対温度: 300 K

Calculate ν and $1/\nu$, then explain their meaning.
数値に加えて、何を数えているのかを説明してください。

A molecular-scale estimate

分子スケールの推定

$$\nu \approx 1.6 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$$

$$1/\nu \approx 6.2 \times 10^{-26} \text{ m}^3 = 62 \text{ nm}^3$$

ν Active strand number density [m^{-3}]

弾性的に有効な網目鎖の数密度

$1/\nu$ Material volume per active strand [m^3]

有効網目鎖1本に割り当てる体積

This allocated volume differs from the volume of an isolated coil.
網目鎖への割当体積であり、孤立した鎖のコイル体積とは区別する。

Your own measurements

自分で測るレポート

R1–R2: Rubber extension and temperature

輪ゴムの伸びと温度依存性を測る

R3–R5: Food stiffness and an equivalent network

食品を測り、高分子と水分から網目を見積もる

R6–R7: Uncertainty, evidence and reflection

不確かさ・実験記録・振り返りを示す

Rubber under a hanging load

おもりで輪ゴムを伸ばす

$$F = mg$$

F Total suspended force [N]

輪ゴムにかかる合計の荷重

m Suspended mass [kg]

おもりとホルダーを含む質量

g Gravitational acceleration [m s^{-2}]

重力加速度: 約 9.81 m/s^2

Measure dimensions and repeat loading and unloading.
寸法を測り、複数の荷重と除荷で伸び・回復を記録する。

Geometry sets the stress

取り付け方で応力の計算が変わる

One strip: $A_{\text{eff}} = wt$ Two legs: $A_{\text{eff}} \approx 2wt$

$$\sigma = F/A_{\text{eff}} \quad \varepsilon = (L - L_0)/L_0 \quad E_{\text{app}} = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon$$

A_{eff} Effective load-bearing area [m^2]

荷重を支える有効断面積

F Total suspended force [N]

おもりによる合計の荷重

L, L_0 Loaded / reference gauge length [m]

片脚の負荷時／基準の標点間距離

E_{app} Apparent tensile modulus [Pa]

選んだ区間の見かけの弾性率

w, t Strip width / thickness [m]

ゴム片の幅／厚さ（基準状態）

σ Nominal tensile stress [Pa]

公称引張応力

ε Engineering tensile strain [–]

工学引張ひずみ

$\Delta / \text{eff} / \text{app}$ Difference / effective / apparent

差／有効／見かけ。2脚は鉛直・等荷重を仮定

Can we detect the temperature effect?

温度の効果を測り分けられるか

$$E_2/E_1 \approx T_2/T_1 \quad \text{at fixed } \nu$$

E_1, E_2 Modulus at conditions 1 and 2 [Pa]

温度条件 1 ・ 2 での弾性率

T_1, T_2 Absolute temperatures [K]

条件 1 ・ 2 の絶対温度

ν Active strand number density [m^{-3}]

有効網目鎖の数密度（一定を仮定）

1, 2 Labels for temperature conditions

下付きの数字は測定条件の区別

Compare the predicted change with scatter, using the same strain range and reading time.

同じひずみ範囲・読取時間で比較。変化を検出できなかった理由も結果になる。

A food compression experiment

身近な食品を圧縮する

$$\varepsilon_c = (h_0 - h)/h_0 \quad \sigma_c = F/A_0$$

$$E_{\text{food,app}} = \Delta\sigma_c / \Delta\varepsilon_c$$

h, h_0 Loaded / reference height [m]

圧縮時／基準状態の試料高さ

F Compressive force [N]

上板とおもりによる圧縮力

σ_c Nominal compressive stress [Pa]

公称圧縮応力（圧縮を正とする）

Δ Difference over the fitted interval

傾きを求める区間での差

A_0 Original loaded-face area [m²]

変形前の荷重面の面積

ε_c Compressive strain [–]

圧縮ひずみ（圧縮を正とする）

$E_{\text{food,app}}$ Apparent food modulus [Pa]

食品の見かけの圧縮弾性率

c; food; app Compression; food; apparent

圧縮／食品／見かけを表す添字

Which polymer supports the food?

食品の形を支える高分子は何か

Tofu: investigate the soy-protein network

豆腐：大豆タンパク質の網目を調べる

Konjac: investigate glucomannan

こんにゃく：グルコマンナンを調べる

Sausage: investigate proteins and added ingredients

ソーセージ：タンパク質・添加成分・皮の影響も調べる

Polymer mass and volume

水分を除いた高分子の質量と体積

$$m_p = w_p m_{\text{wet}} \quad V_p \approx m_p / \rho_p \quad \phi_p = V_p / V_{\text{wet}}$$

m_p Assigned network-polymer mass [kg]

網目を担うと仮定した高分子の質量

m_{wet} Wet food specimen mass [kg]

水分を含む食品試料の全質量

V_p Estimated polymer volume [m^3]

高分子自体の体積の推定値

ϕ_p Polymer volume fraction [-]

湿潤試料内の高分子の体積分率

w_p Polymer mass fraction [-]

湿潤食品質量に対する高分子の質量分率

ρ_p Dry-polymer density [kg m^{-3}]

水分を除いた高分子自体の密度

V_{wet} Wet specimen volume [m^3]

測定時の水分を含む試料の全体積

p ; wet Polymer; wet specimen

高分子／湿潤試料。脂質・糖・塩は別に扱う

An equivalent network molar mass

ゴム網目に換算したモル質量

$$M_{c,app} = 3(m_p/V_{wet})RT / E_{food,app}$$

$M_{c,app}$ Apparent strand molar mass [kg mol⁻¹]
拘束点間の有効網目鎖のモル質量

V_{wet} Wet specimen volume [m³]
弾性率を測定した湿潤試料の体積

T Absolute temperature [K]
弾性率測定時の絶対温度

m_p Assigned network-polymer mass [kg]
網目を担うと仮定した高分子の質量

R Gas constant [J mol⁻¹ K⁻¹]
気体定数：約 8.314 （鎖の距離 R とは別）

$E_{food,app}$ Apparent food modulus [Pa]
自分で測った食品の見かけの弾性率

Ideal-network estimate in the wet reference state. kg/mol × 1000 = g/mol.
湿潤状態を基準とする理想網目の近似。高分子 1 本全体の実分子量とは異なる。

Repeat units and model limits

繰り返し単位と、推定値の意味

$$N_{\text{app}} = M_{\text{c,app}} / M_0$$

N_{app} Effective residue count per strand [-]
網目鎖あたりの見かけの残基数

M_0 Repeat-unit / residue molar mass [g mol⁻¹]
繰り返し単位または残基のモル質量

$M_{\text{c,app}}$ Apparent strand molar mass [g mol⁻¹]
拘束点間の有効網目鎖のモル質量

app; 0 Apparent; repeat-unit reference
見かけ／繰り返し単位を表す添字

Use consistent molar-mass units. Proteins require an average residue mass.
分子と分母の単位をそろえる。タンパク質は平均残基質量を仮定し、推定幅を示す。

Temperature and mixing

温度と混合・膨潤

UCST-type: heating can promote mixing

UCST 型：昇温によって均一相になりやすい

LCST-type: heating can promote phase separation

LCST 型：昇温によって相分離しやすい

Food and gel responses depend on the material system

食品・ゲルの温度応答は、材料系によって異なる

Planning your experiment

自分の実験計画を考える

What can you measure with the tools you have?

手元の道具で、力・寸法・温度をどう測るか

Which uncertainty will affect your result most?

どの不確かさが、結果に最も影響しそうか

Record a setup, an assumption and an improvement

実験方法・仮定・改善案をワークシート D に記入

Explaining your measurement plan

測定計画を説明する

“We will measure ... using ...”

「…を使って、…を測ります」

“Our largest uncertainty may be ...”

「最も大きな不確かさは、…かもしれません」

AI use and experimental evidence

AI の利用と、自分の実験の証拠

AI can help calculate, plot and organize

AI は計算・作図・整理に使ってよい

Your photos and raw measurements support the report

自分の写真・生データ・失敗した試行を残す

Explain your checks, uncertainty and improvements

AI 出力の確認、不確かさ、改善を自分で説明する

Your exit reflection

講義終了時の振り返り

Why can heating increase rubber stiffness?

なぜ温めるとゴムの弾性率が増すのか

What experiment will you try yourself?

自分でどのような実験を試すか

What would make your conclusion more reliable?

結論をより確かなものにするには何が必要か

Measurements give your model meaning

自分の測定から、モデルの意味を考える

What can your data actually tell you?

自分のデータから、どこまで言えるでしょうか？

Hidemitsu Furukawa furukawa@yz.yamagata-u.ac.jp

Supplementary material

補足資料：計算例とモデルの限界

Chain dimensions and model limits

鎖の大きさと、モデルの適用範囲

Dry-rubber practice example

乾燥ゴムを仮定した練習例

$$M_c = \rho N_A / \nu \approx 3.4 \times 10^4 \text{ g/mol}$$

M_c Network-strand molar mass [g mol^{-1}]

拘束点間の網目鎖のモル質量

N_A Avogadro constant [mol^{-1}]

アボガドロ定数: $6.02214076 \times 10^{23}$

ρ Dry-rubber density [g m^{-3}]

乾燥ゴムの密度: $9.0 \times 10^5 \text{ g/m}^3$

ν Active strand number density [m^{-3}]

有効網目鎖数密度: 約 1.6×10^{25}

All polymer mass is assigned to active strands in this practice model.

この練習モデルでは、高分子の全質量を有効網目鎖に割り当てる。

Repeat units and statistical segments

繰り返し単位と統計セグメント

$$N_{\text{repeat}} = M_c / M_0 \approx 5.0 \times 10^2$$

N_{repeat} Repeat-unit count per strand [-]

網目鎖あたりの繰り返し単位数

M_0 Repeat-unit molar mass [g mol⁻¹]

ポリイソプレン C₅H₈ : 約 68

M_c Network-strand molar mass [g mol⁻¹]

網目鎖のモル質量: 約 3.4×10^4

N_s Statistical segment count [-]

粗視化の仕方に依存する統計セグメント数

A statistical segment can contain several chemical repeat units.

統計セグメントは、複数の化学的な繰り返し単位を含み得る。

An ideal random-walk chain

理想ランダムウォーク鎖

$$\langle R^2 \rangle = N_s b^2 \quad R_{\text{ideal}} = \sqrt{\langle R^2 \rangle} = b \sqrt{N_s}$$

R Instantaneous end-to-end distance [nm]

各配座の末端間距離

R_{ideal} RMS end-to-end distance [nm]

理想鎖の二乗平均平方根末端間距離

b Statistical segment length [nm]

統計セグメント長: この例では 1.0 nm

Independent isotropic steps give $R_{\text{ideal}} = 10$ nm.

独立で方向に偏りのないセグメントを仮定すると、10 nm。

$\langle R^2 \rangle$ Mean-square end-to-end distance [nm²]

末端間距離の二乗の平均

N_s Statistical segment count [–]

統計セグメント数: この例では 100

$\langle \rangle$; ideal Ensemble average; ideal chain

配座についての平均／理想鎖

A chain in a good solvent

良溶媒中の鎖

$$R_{\text{good}} \approx bN_s^{3/5} \approx 15.8 \text{ nm}$$

$$R_{\text{good}}/R_{\text{ideal}} \approx 1.58$$

R_{good} Chain size in a good solvent [nm]
良溶媒中の鎖の大きさ

b Statistical segment length [nm]
統計セグメント長: 1.0 nm

$3/5$ Flory scaling exponent [–]
フローリー近似の指数（係数を1と仮定）

Excluded-volume effects expand the coil. / 排除体積効果で鎖が広がる。

R_{ideal} Ideal-chain RMS end-to-end distance [nm]
理想鎖の二乗平均平方根末端間距離: 10 nm

N_s Statistical segment count [–]
統計セグメント数: 100

good; ideal Good solvent; ideal chain
良溶媒／理想鎖を区別する添字

Chain size and gel swelling

鎖の大きさと、ゲルの膨潤

Volume per active strand: $1/v$ Chain size: R

v Active strand number density [m^{-3}]

弾性的に有効な網目鎖の数密度

$1/v$ Allocated material volume [m^3]

有効網目鎖 1 本に割り当てる体積

R A characteristic chain size [m]

鎖の空間的な広がり代表長さ

Gel swelling balances mixing and network elasticity.

ゲルの膨潤は混合と網目弾性の釣り合いで決まり、割当体積と鎖の大きさは別の量。

Large deformation changes the interpretation

大変形では、値の解釈が変わる

$$E_{\text{sec}} = \sigma / \varepsilon = 0.20 \text{ MPa} \quad \lambda = 1 + \varepsilon$$
$$\sigma = G(\lambda - \lambda^{-2}) \quad E_0 = 3G \approx 0.50 \text{ MPa}$$

σ Nominal tensile stress [Pa]
公称引張応力：この例では 1.0 MPa

λ Stretch ratio L/L_0 [-]
伸長比：この例では 6

E_{sec} Secant modulus [Pa]
原点と測定点を結ぶ割線の傾き

L, L_0 Loaded / reference length [m]
負荷時／基準状態の長さ

ε Engineering tensile strain [-]
工学引張ひずみ： 5 （ 500% ）

G Neo-Hookean shear modulus [Pa]
ネオフックモデルのせん断弾性率

E_0 Initial Young's modulus [Pa]
微小ひずみでの初期ヤング率

sec; 0 Secant; initial state
割線／初期状態を表す添字

Subscripts and units

添字と単位の読み方

$m_p, m_{\text{wet}}, E_{\text{app}}, E_{\text{food,app}}, [-]$

p / wet Polymer / wet specimen
高分子／水分を含む試料

0 / 1 / 2 Reference state / condition labels
基準状態／温度条件 1 ・ 2

[-] Dimensionless quantity
無次元。分率は 0 ～ 1 で代入する

$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$ $1 \text{ g/mol} = 10^{-3} \text{ kg/mol}$

app / eff / eq Apparent / effective / equivalent
見かけ／有効／等価

c Compression or network strand
 σ の添字では圧縮、M では網目鎖

Δ Difference between two values
2 点間の差。単位は元の量と同じ

Water fraction and wet-food density

水分率と食品全体の密度

$$\rho_{\text{wet}} = m_{\text{wet}} / V_{\text{wet}} \quad m_p = w_p m_{\text{wet}}$$

ρ_{wet} Wet-food density [kg m⁻³]
水分を含む食品全体の密度

V_{wet} Wet specimen volume [m³]
水分を含む試料の全体積

w_p Assigned polymer mass fraction [-]
網目に割り当てる高分子の質量分率

m_{wet} Wet specimen mass [kg]
水分を含む試料の全質量

w_w Water mass fraction [-]
試料全質量に対する水の質量分率

m_p Assigned polymer mass [kg]
網目を担うと仮定した高分子の質量

Determine polymer content separately from fat, salt and small sugars.
水以外の成分をすべて高分子とせず、脂質・塩・低分子糖を区別する。

A food with several polymers

複数の高分子を含む食品

$$V_p \approx \sum(m_i/\rho_i) \quad \Phi_p = V_p/V_{\text{wet}}$$

i Polymer component label

高分子成分を区別する番号

ρ_i Density of dry component i [kg m^{-3}]

乾燥した成分 i の高分子密度

V_p Total estimated polymer volume [m^3]

高分子体積の合計の推定値

Φ_p Polymer volume fraction [-]

湿潤試料に対する高分子の体積分率

m_i Mass assigned to component i [kg]

成分 i に割り当てた高分子質量

Σ Sum over selected components

選んだ高分子成分についての総和

V_{wet} Wet specimen volume [m^3]

水分を含む試料の全体積

p / wet Polymer / wet specimen

高分子／湿潤試料を表す添字

Conversion to polymer volume

高分子体積を基準とする換算

$$E_{eq} = E_{food,app} / \phi_p \quad M_{c,app} = 3\rho_p RT / E_{eq}$$

E_{eq} Equivalent modulus [Pa]
高分子体積基準への換算上の弾性率

ϕ_p Polymer volume fraction [-]
湿潤試料に対する高分子体積分率

$M_{c,app}$ Apparent strand molar mass [kg mol⁻¹]
拘束点間の有効網目鎖のモル質量

E_{eq} is a bookkeeping conversion, not a measured dry-sample modulus.
この等価量は、実際に乾燥した試料の弾性率の実測値・予測値ではない。

$E_{food,app}$ Measured apparent food modulus [Pa]
湿潤食品で測った見かけの弾性率

ρ_p Dry-polymer density [kg m⁻³]
水分を除いた高分子自体の密度

R / T Gas constant / absolute temperature
 $R \approx 8.314 \text{ J}/(\text{mol K})$ 、 T は K で代入

Further reading

参考文献

Shiblee et al. (2019), 4D Printing of Shape-Memory Hydrogels

Advanced Materials Technologies 4, 1900071. doi:10.1002/admt.201900071

Shiblee et al. (2018), 3D printing of shape memory hydrogels

Soft Matter. doi:10.1039/C8SM01156G

Experimental tests of classical rubber elasticity (2017)

Physical Review Letters 119, 267801. doi:10.1103/PhysRevLett.119.267801