

複素ゲル

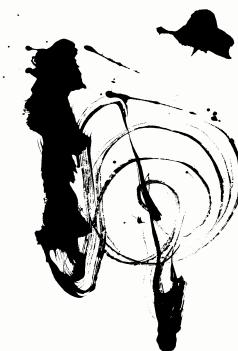
Real and Abstract Gels

【FIRM】ベンチャーブースター2026 in 九州

ゲルで医療を革新する



東京大学大学院工学系研究科  
化学生命工学専攻  
酒井崇匡



ERATO



酒井 崇匡

生年月日：1980年2月15日

1998年 長崎県立島原高校卒業

2007年 東京大学大学院工学系研究科マテリアル工学専攻  
博士課程修了 博士（工学）

2007年 東京大学大学院工学系研究科 特任助教

2011年 東京大学大学院工学系研究科バイオエンジニアリング専攻 助教

2015年 東京大学大学院工学系研究科バイオエンジニアリング専攻 准教授

2018年 ジェリクル株式会社 最高科学責任者

2020年 東京大学大学院工学系研究科バイオエンジニアリング専攻 教授

2022年 東京大学大学院工学系研究科化学生命工学専攻 教授

本講演に関連し、発表者の開示すべきCOI関係にある企業として、  
ジェリクル株式会社があります

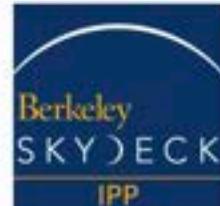
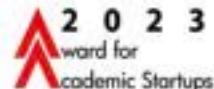


創業 8期目

VC入っていません

黒字

First in human まだです



酒井崇匡

生年月日：1980年2月15日

1998年

長崎県立島原高校卒業



スーパーさかいの長男として生を受け、  
18歳で東京へ出ました。



# スーパーさかいの長男として生を受け、 18歳で東京



島原新聞 2025年12月28日(土曜日) 第50回生

## 「限界決めずに挑戦を!!」

### ◎ゲル研究の第一人者 ◎

#### 酒井氏、母校島原高で講演

AIや学びの意義など討論

成功には、悪あがきが重要

島原新聞 2025年11月12日(土曜日)

## 島原新聞

### 島高第50回生 酒井宗匡氏が帰郷講演

来月12日開催

#### ◎島高PTA主催、島高同窓会共催

#### 母校後輩と一般向けに企画

31日申込締切

島原新聞 2025年11月12日(土曜日)

## 島原新聞

### 島高第50回生 酒井宗匡氏が帰郷講演

来月12日開催

#### ◎島高PTA主催、島高同窓会共催

#### 母校後輩と一般向けに企画

31日申込締切

島原新聞 2025年10月11日(土曜日)

## 島原新聞

### 島高第50回生 酒井宗匡氏が帰郷講演

来月12日開催

#### ◎島高PTA主催、島高同窓会共催

#### 母校後輩と一般向けに企画

31日申込締切

島原新聞 2025年10月11日(土曜日)

## 島原新聞

### 島高第50回生 酒井宗匡氏が帰郷講演

来月12日開催

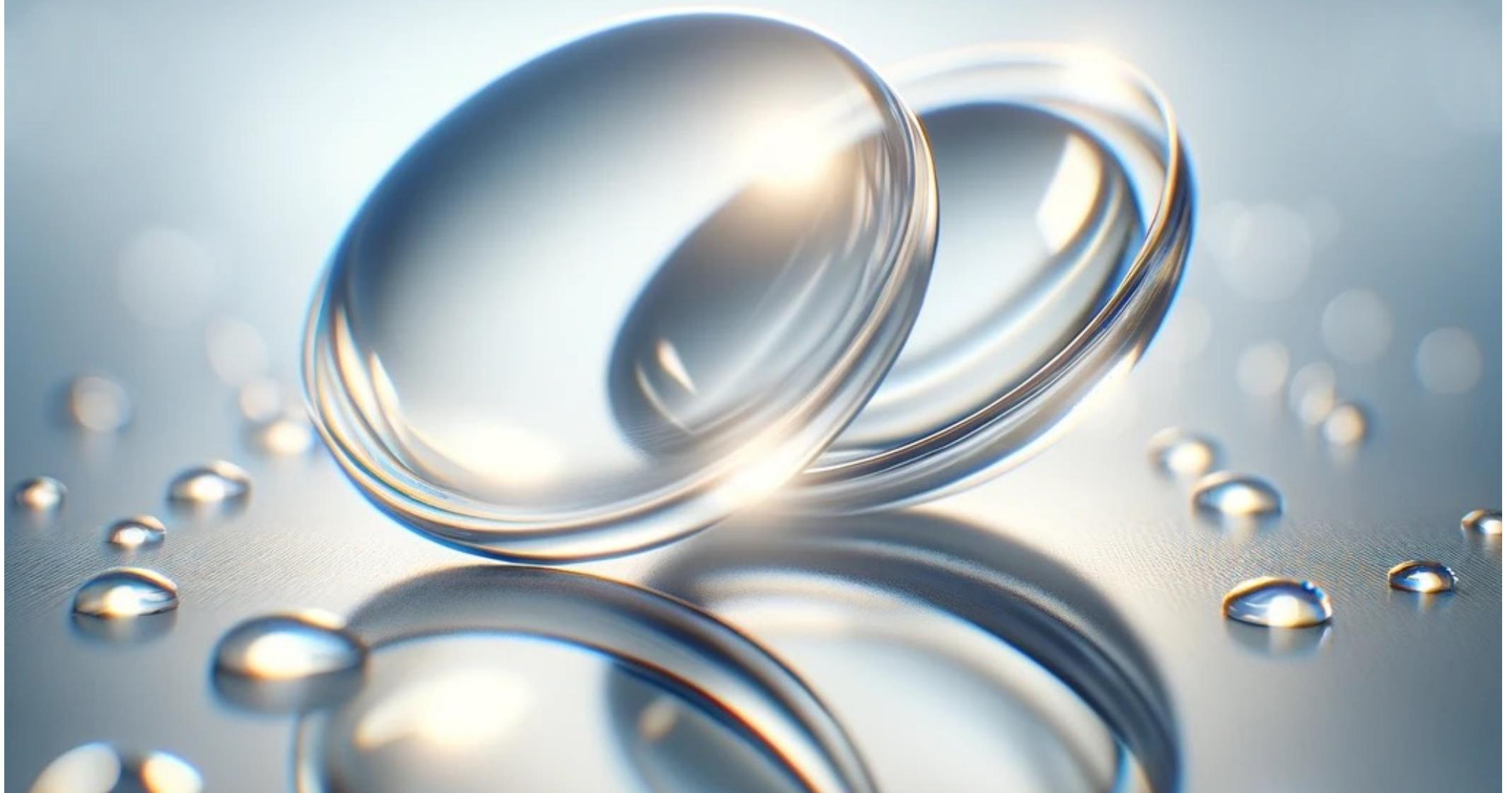
#### ◎島高PTA主催、島高同窓会共催

#### 母校後輩と一般向けに企画

31日申込締切











# Human



**water content**

**70%**

# Human



water content

70%

# Hydrogels



# Human



water content

70%

# Hydrogels



water content

99–50%

# Human



water content

70%

C

# Hydrogels



water content

99–50%

サイエンス  
**ZERO**

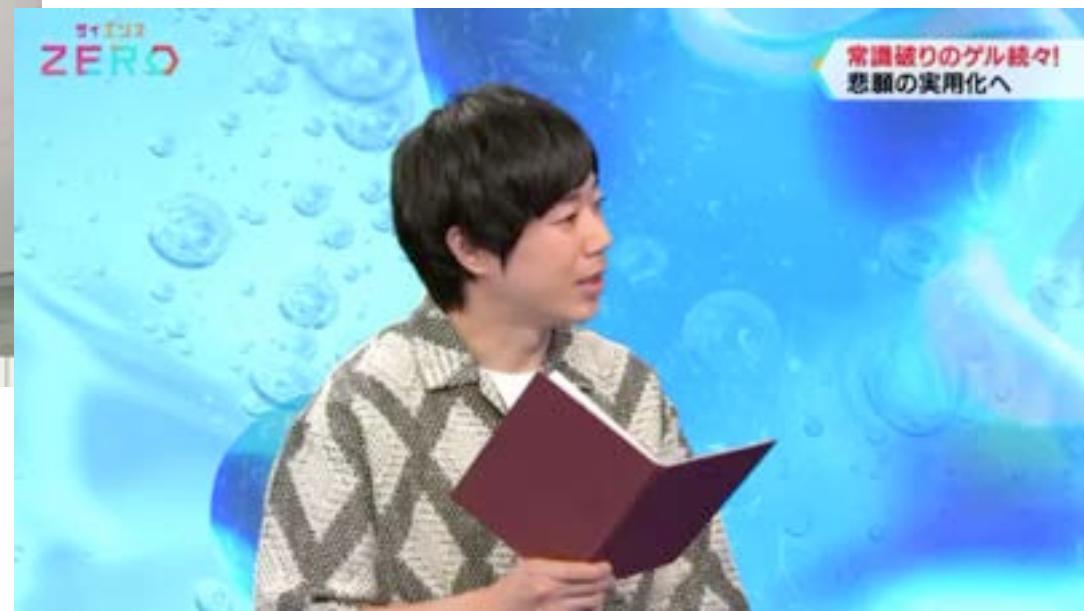
常識破りのゲル続々!  
悲願の実用化へ

公式X @nhk\_sciencezero

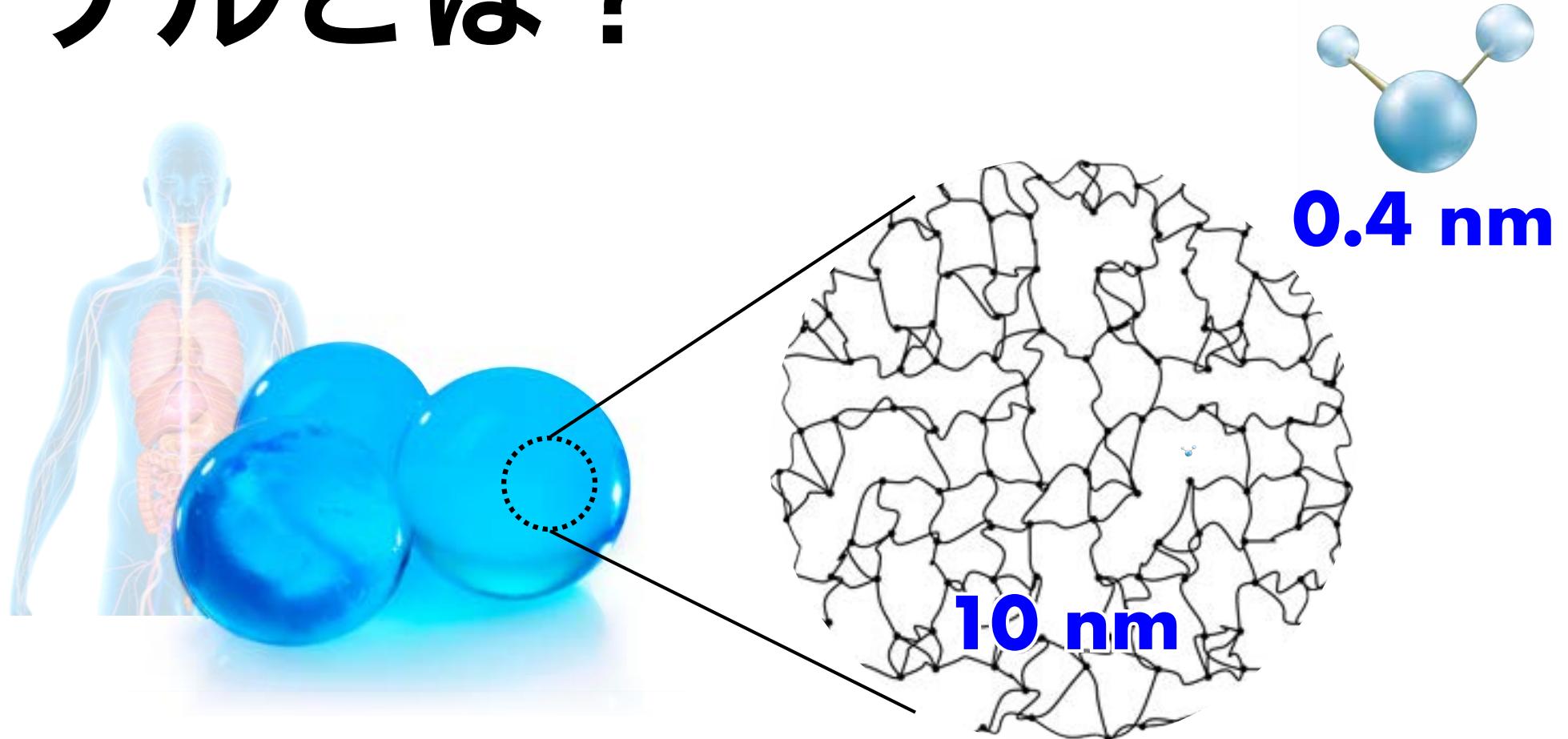


NHK+  
↑NHKプラスで  
番組見逃し配信中

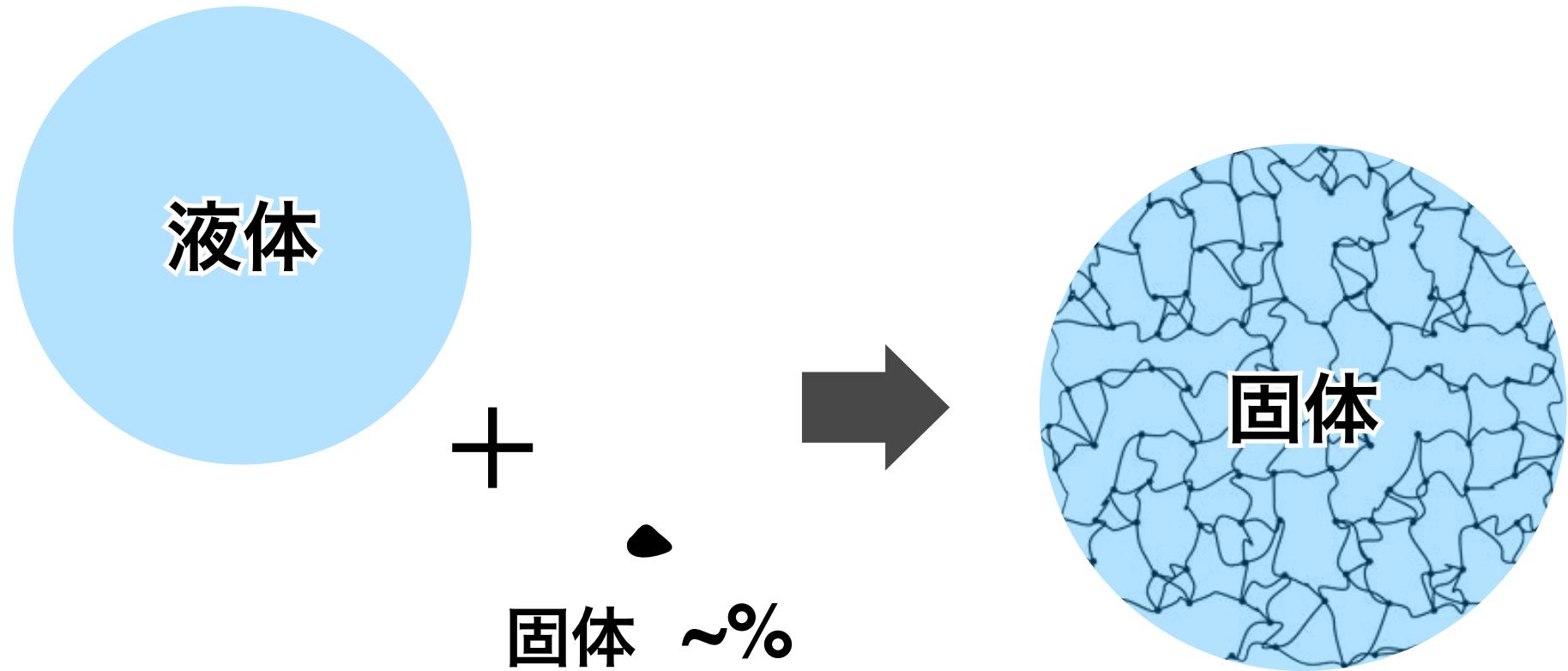
ゲルを愛しているので



# ゲルとは？



3次元の高分子網目が溶媒を含んだもの



主成分が液体であるにもかかわらず  
物質としては固体である

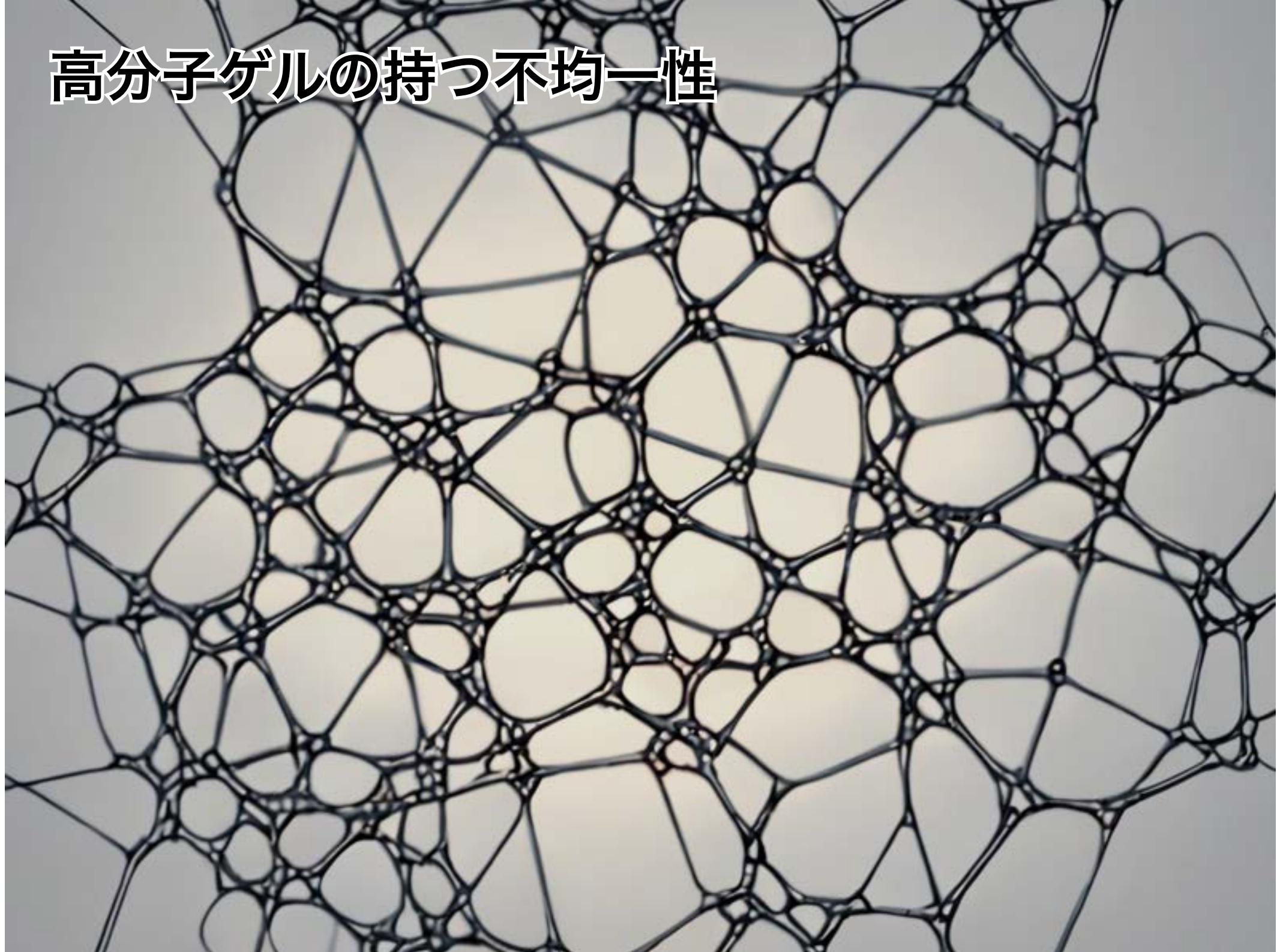
やわらかさを決めているのは何か？

どこまで伸びるかを決めているのは何か？

壊すのに必要な力を決めているのは何か？

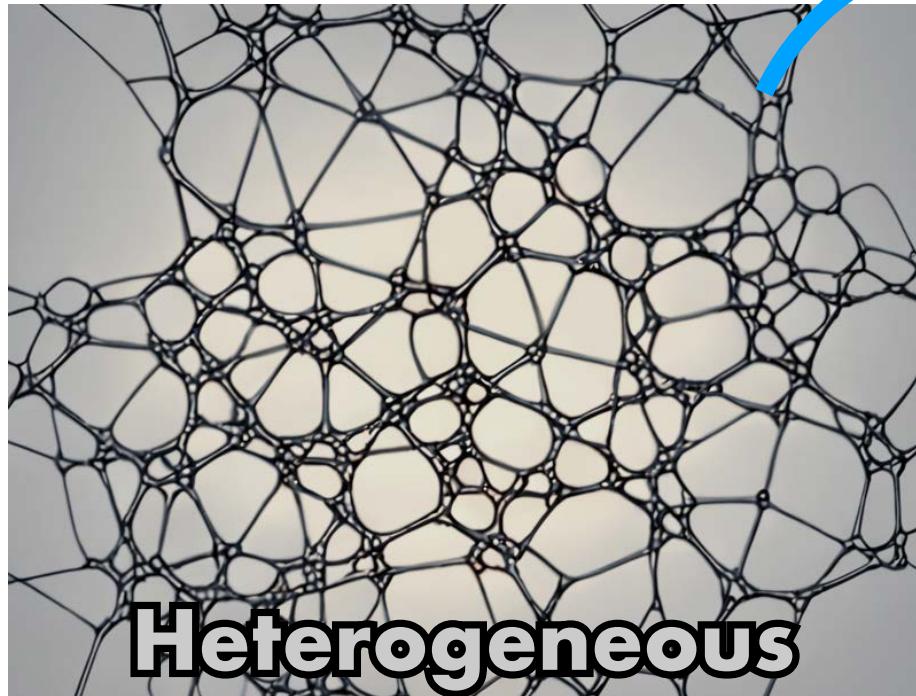


# 高分子ゲルの持つ不均一性



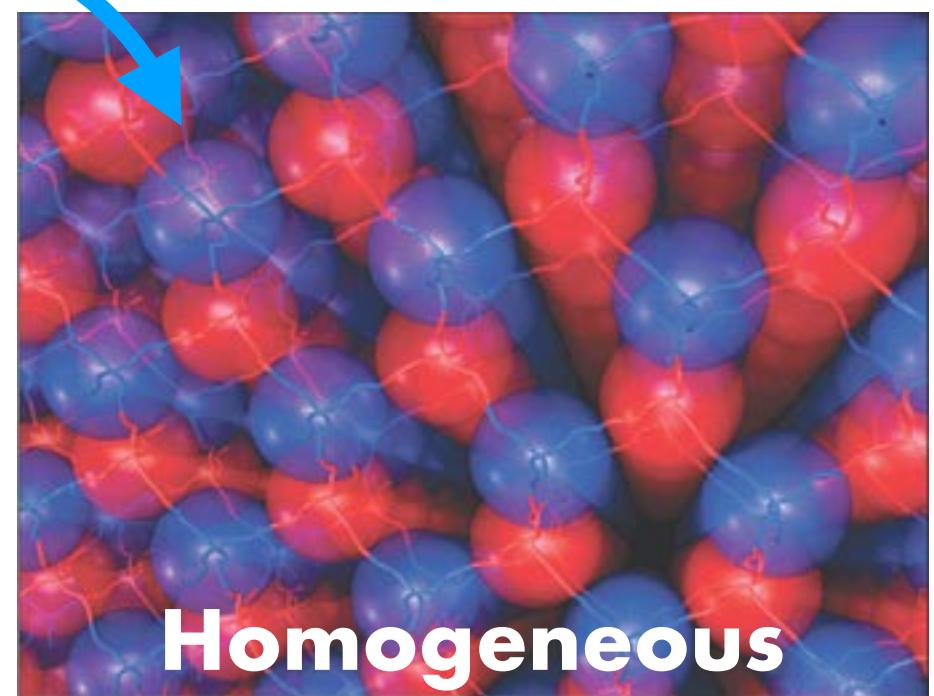
ゲルを「不均一でよくわからないもの」から、  
「均一でわかりうるもの」へ変えた

Conventional gels



Heterogeneous

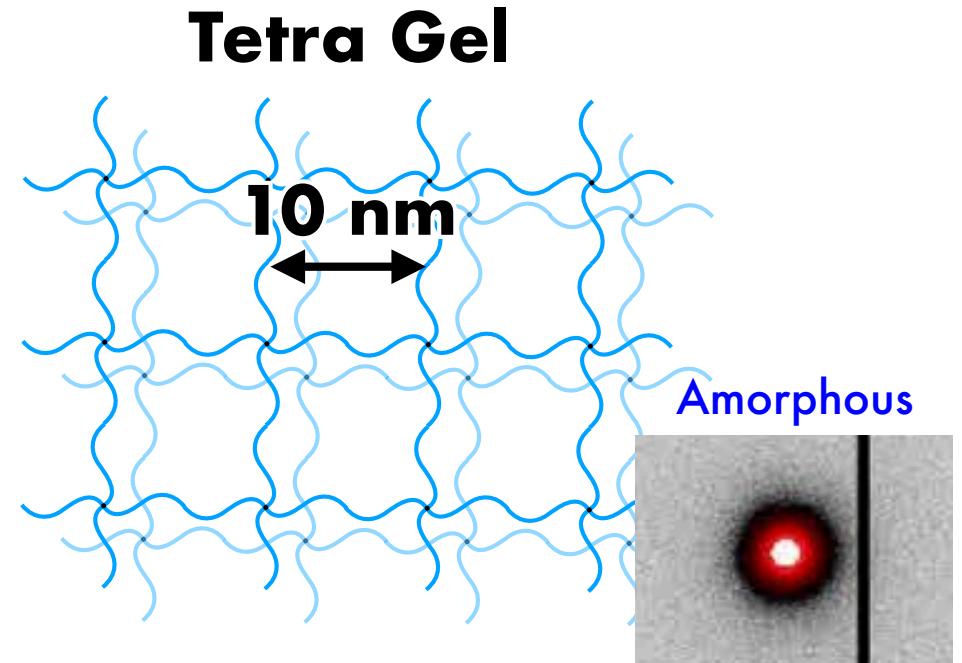
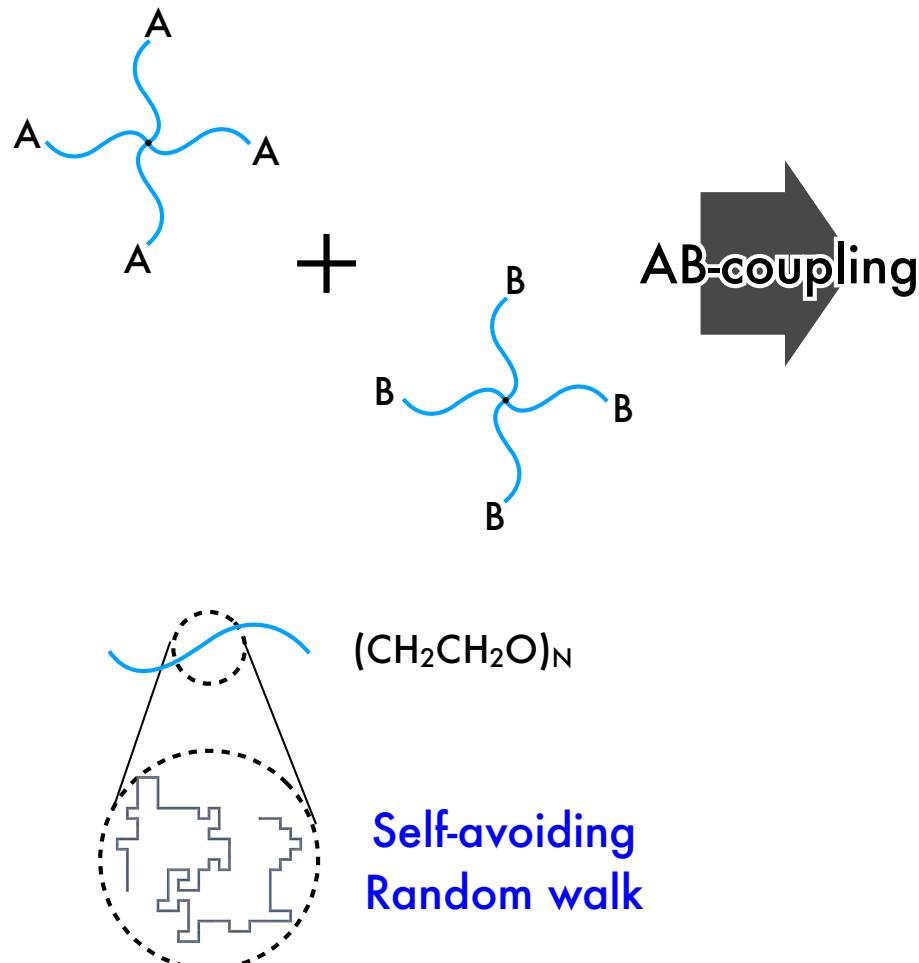
Tetra-PEG gels



Homogeneous

T. Sakai et al, Macromolecules 2008

# Tetra-PEG gel – 均一なゲル群



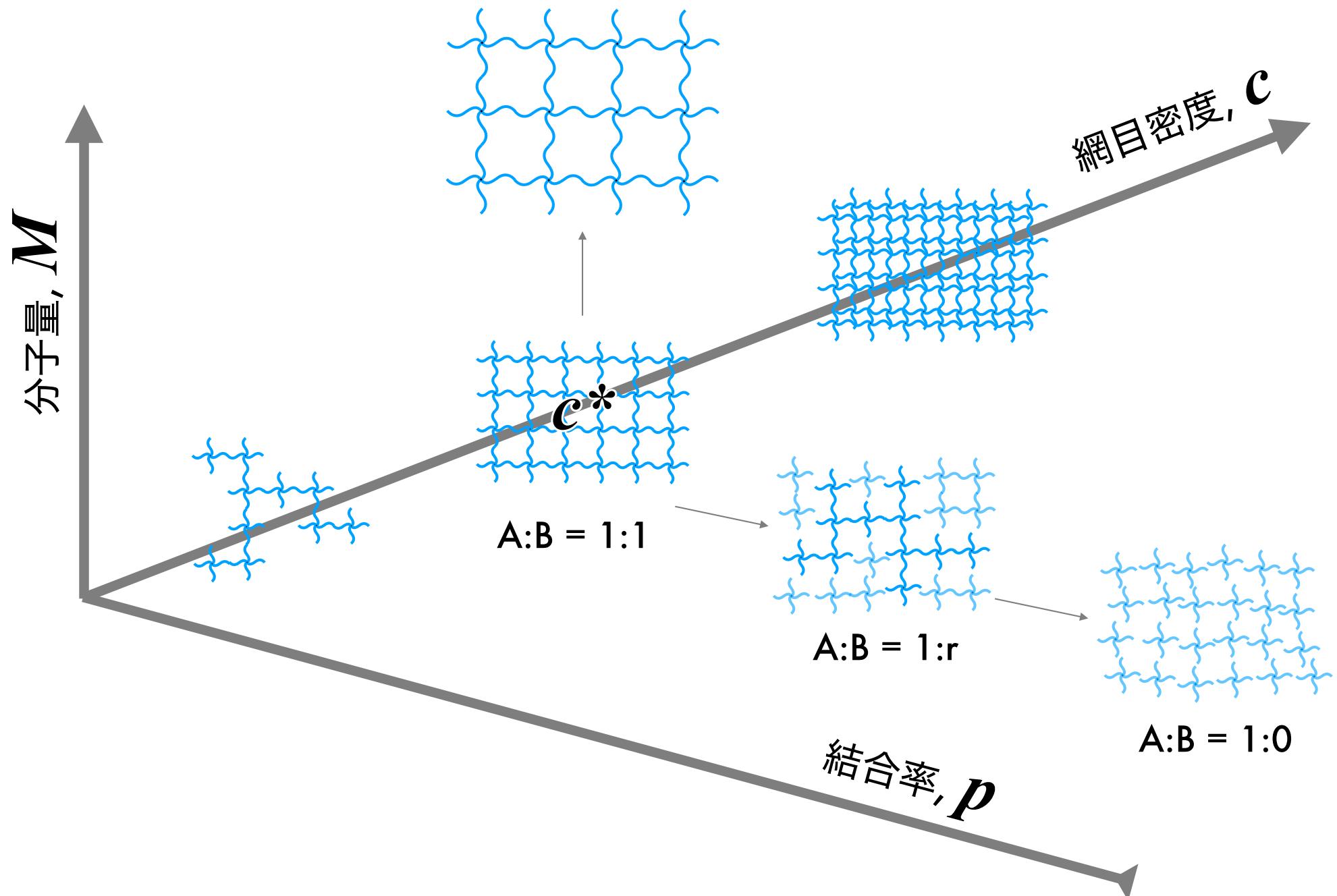
T. Sakai\* et al., *Macromolecules* 2008  
> 1100 times cited

*Nature Materials* 2023  
*Science Advances* 2022  
*Physical Review X* 2021

*Physical Review Letters* 2017, 2020, 2021  
*Journal of Chemical Physics* 2012, 2013, 2014, 2015

*Macromolecules* 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021  
> 140 papers

# 3つの独立パラメータ



# 世界最高峰のゲル物理を工学部でやる

**Elastic modulus** (弹性率, 負のエネルギー弾性)

$$G = A\xi(T-T_0)$$

Y. Yoshikawa et al., PRX 2021

**Ultimate elongation** (弹性域)

$$\lambda_{\max} = Cc^{1/3}N^{2/3}$$

T. Fujiyabu et al., Science Adv., 2022

**Osmotic pressure** (浸透圧, 準希薄スケーリング則)

$$\Pi = Bc^{2.31}$$

T. Yasuda et al., PRL 2020

**Partition of polymer chain** (分配係数)

$$K = -A \exp\left(\frac{R_g}{L_\xi}\right)^2$$

H. Takarai, Bachelors Dissertation, 2023

**Diffusion of dsDNA** (dsDNAの拡散係数)

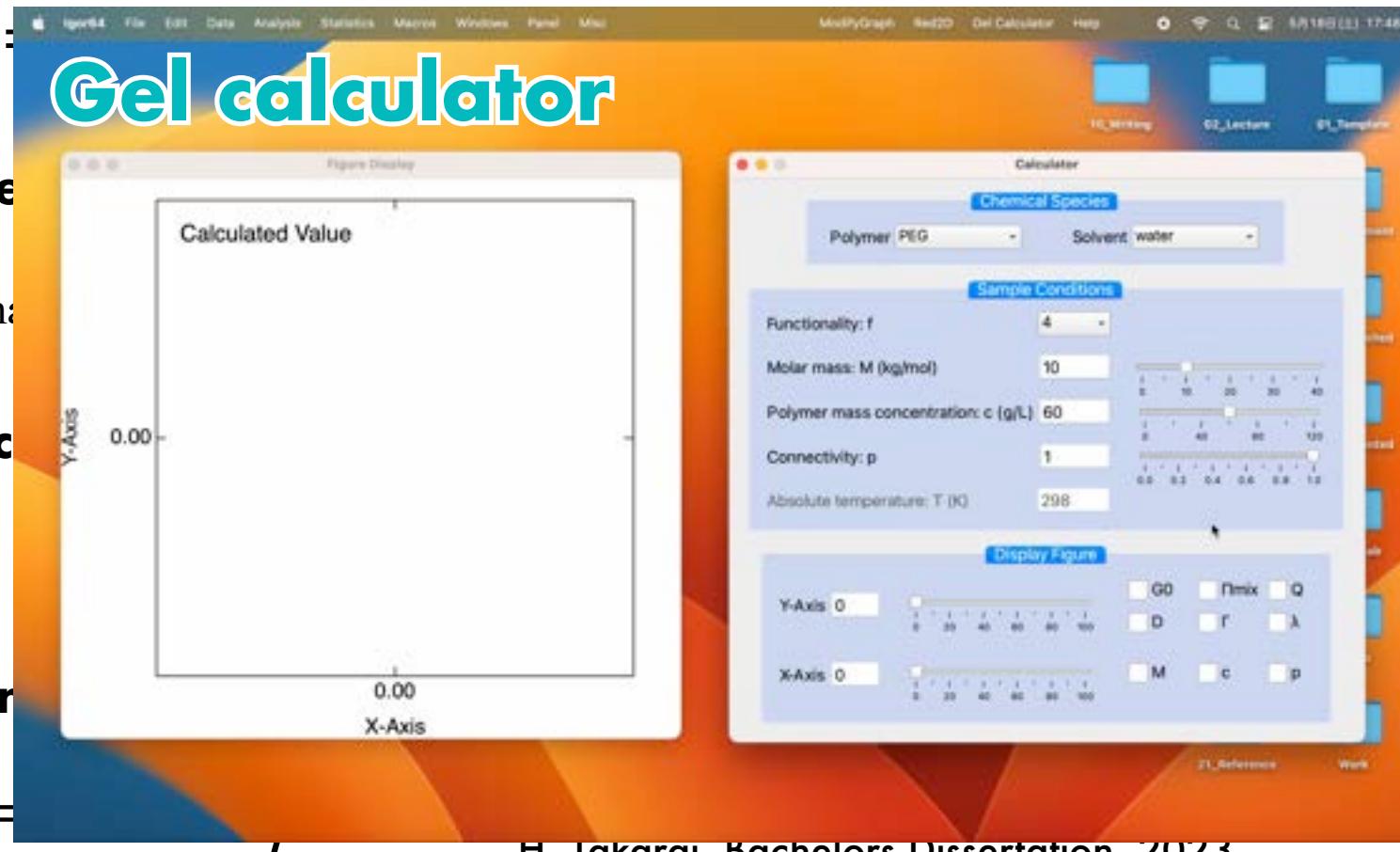
$$D/D_0 = An^{-\alpha} \exp(-Bn^\beta c)$$

X. Li et al., Macromolecules 2015

# 世界最高峰のゲル物理を工学部でやる

Elastic modulus (弹性率, 負のエネルギー弾性)

$$G =$$



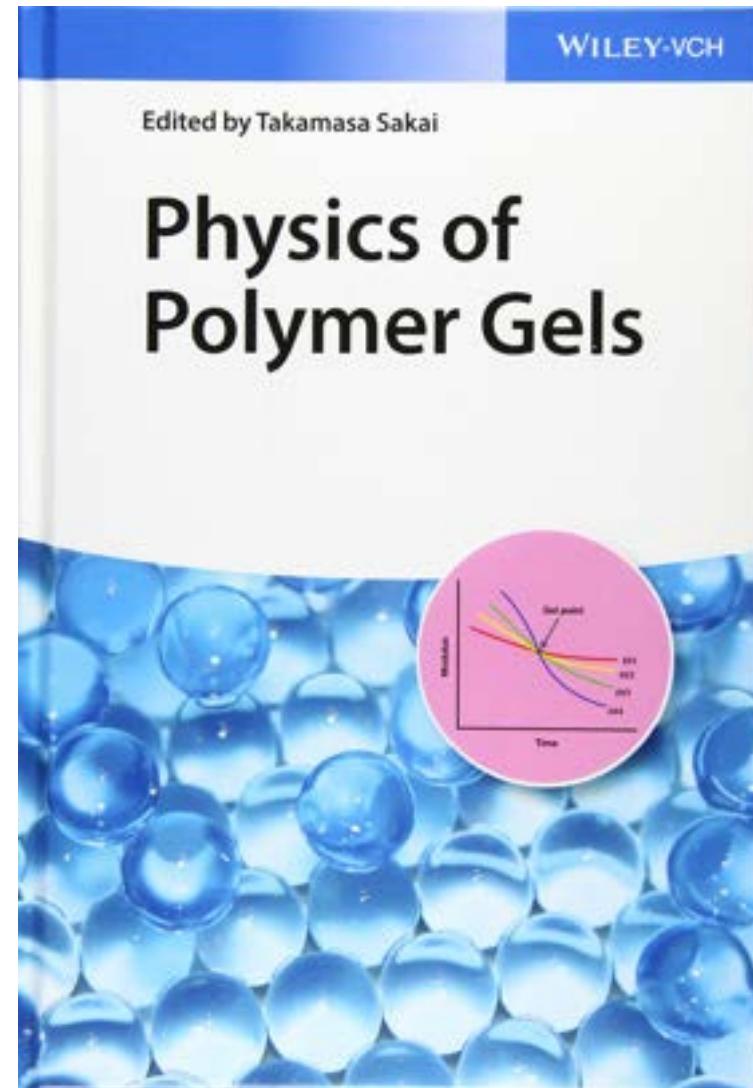
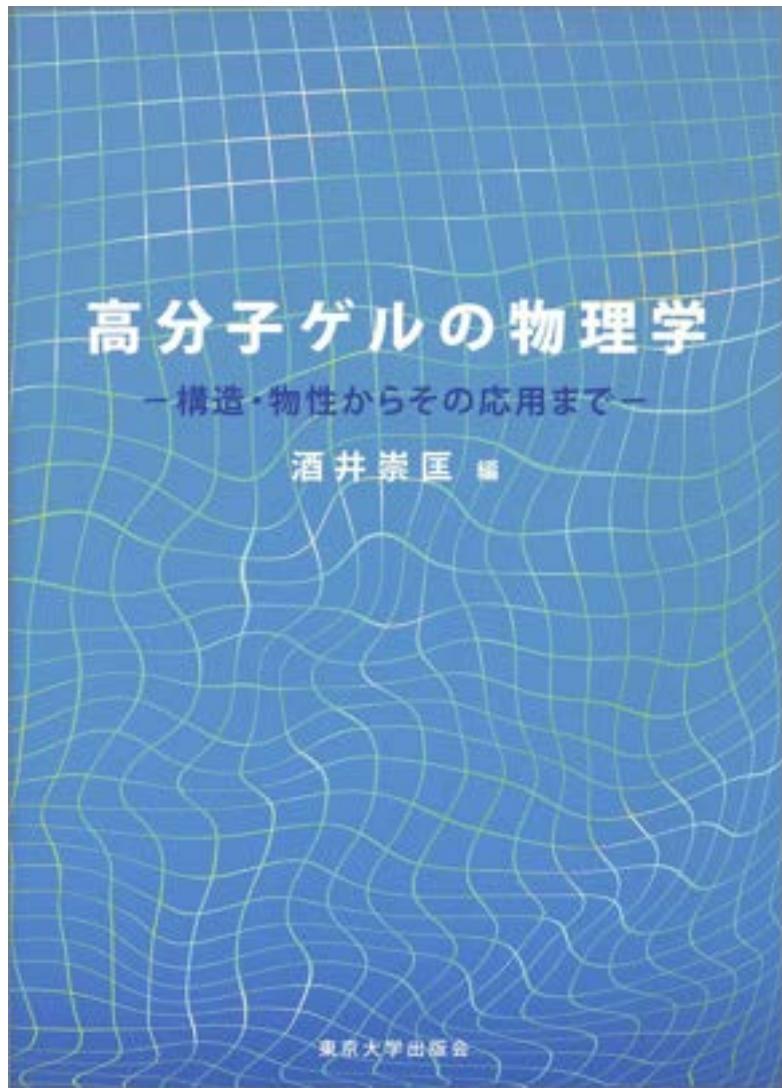
H. Takarai, Bachelors Dissertation, 2023

Diffusion of dsDNA (dsDNAの拡散係数)

$$D/D_0 = An^{-\alpha} \exp(-Bn^{\beta}c)$$

X. Li et al., Macromolecules 2015

# 世界最高峰のゲル物理を工学部でやる



物理 × 医療

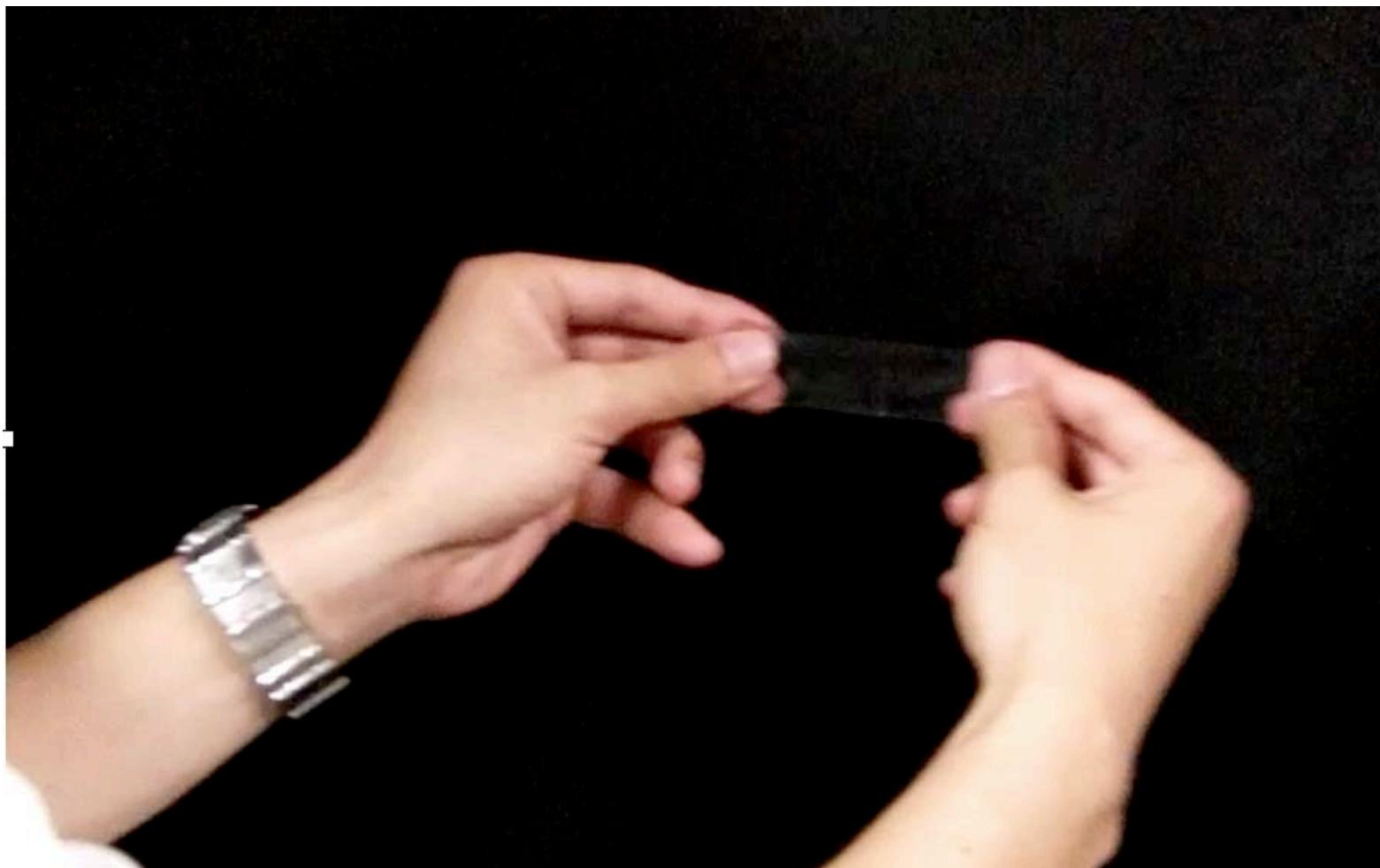
or

化学 × 医療

**物理 × 医療**

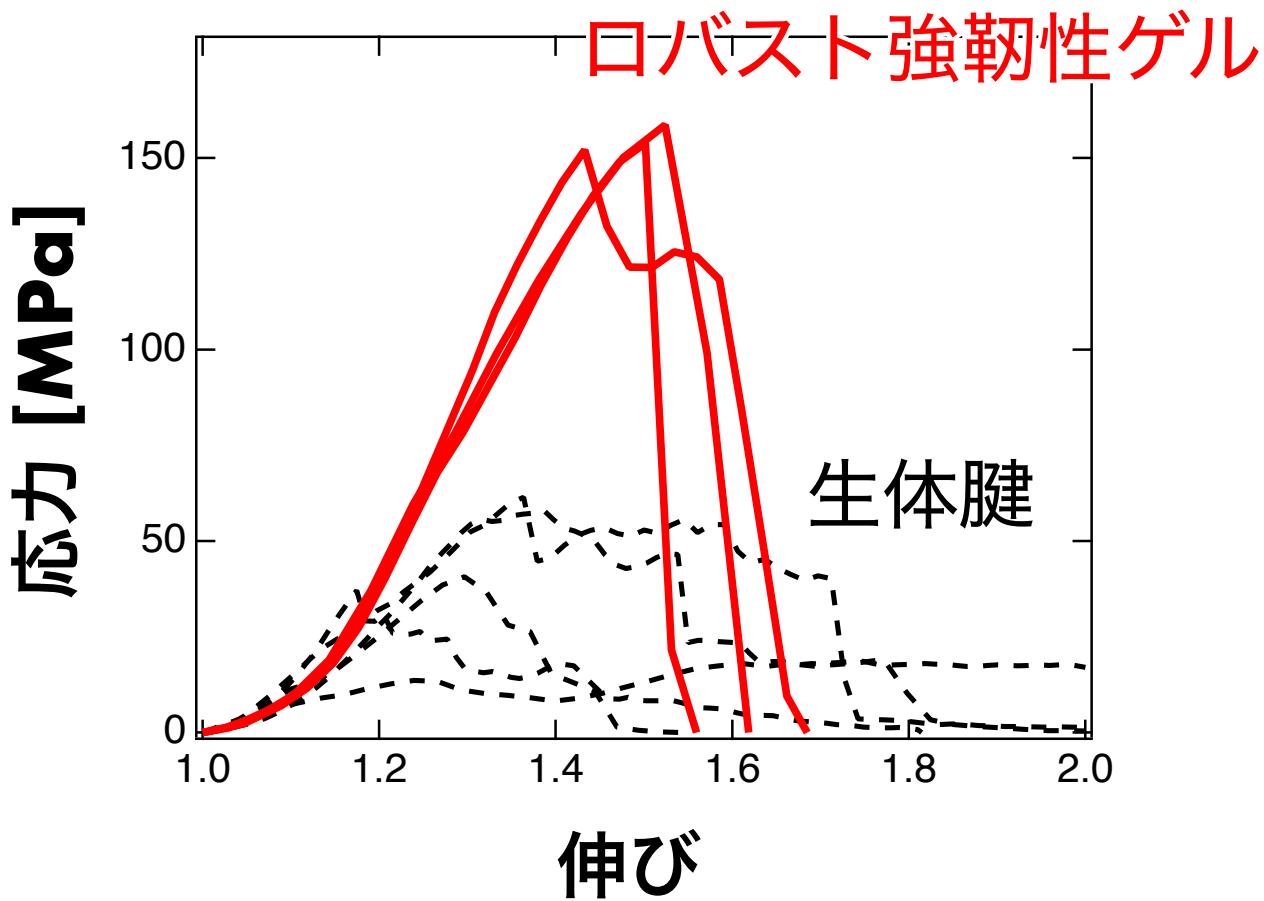


**H<sub>2</sub>O 98%**

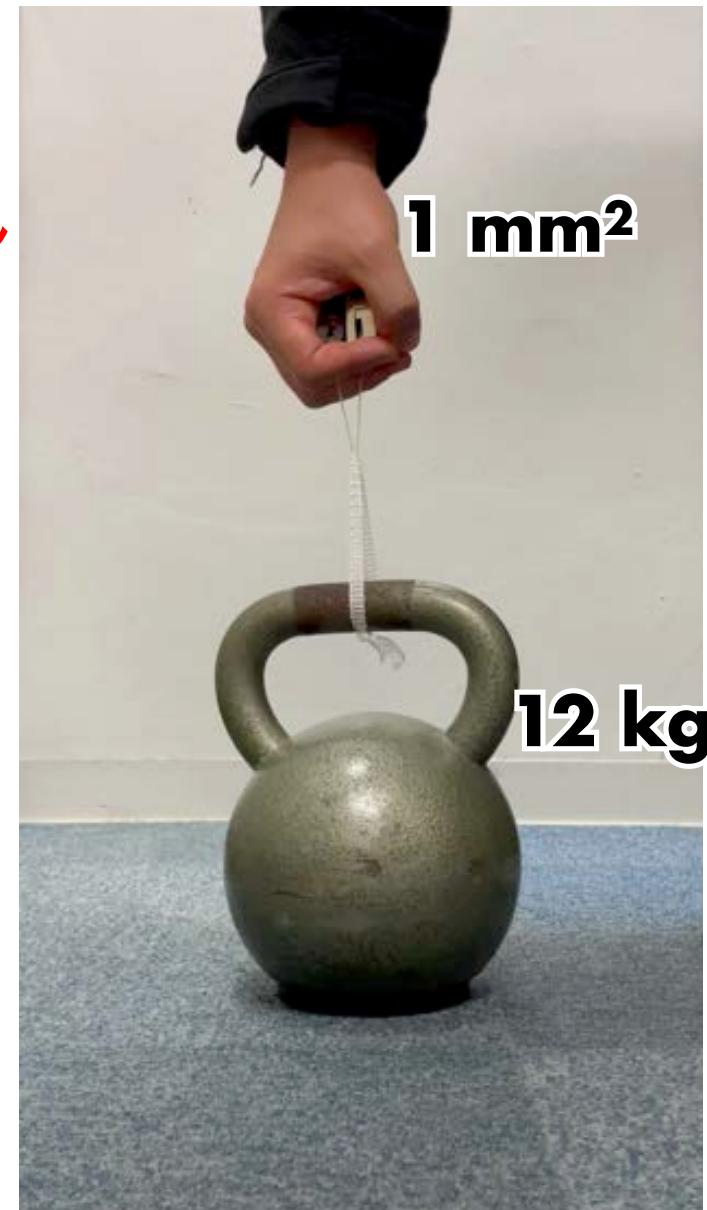


**H<sub>2</sub>O 85%**

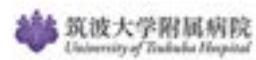
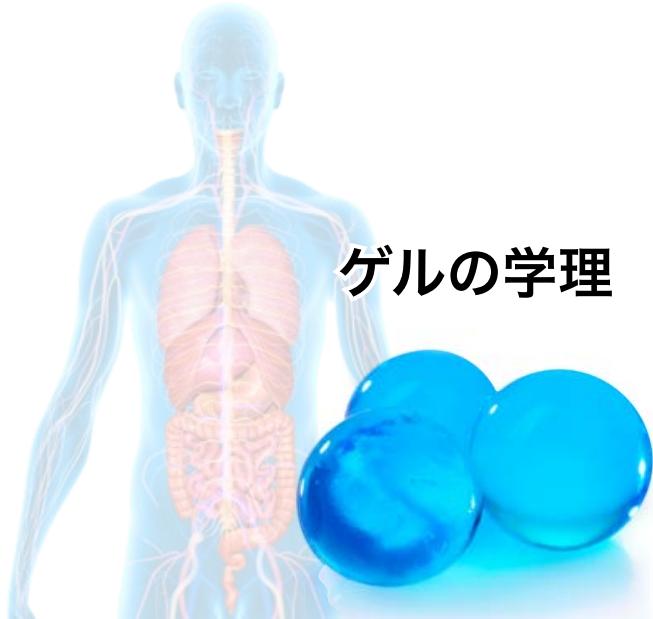
# 生体靭帯を超える強度を持つゲル



人工腱・靭帯への応用



# ゲルで医療を変える



脳神経外科  
齊藤 延人



整形外科  
齊藤 琢



循環器内科  
藤生 克仁



眼科  
岡本 史樹



血管外科  
保科 克行



心臓外科  
中島 淳

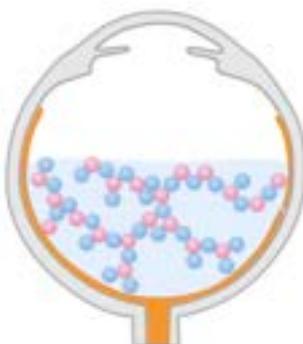


形成外科  
栗田 昌和



眼科  
星 崇仁

ベンチャーを起業し、臨床ニーズ駆動の開発、パートナー企業への導出を迅速化



人工硝子体

Nature Biomedical Engineering 2017



止血剤

Annals of Vascular Surgery 2022



癒着防止剤

J Hand Surgery Global Online 2020

ゲル物理の指導原理に基づき、複数の医療機器を同時開発

# 確かな学理を基盤とした医療応用

つくる



かためる

Artificial vitreous  
Hemostatic agent

わける

Adhesion barrier

つなげる

Scaffold

こわす



効果・効用は物理的な機序によるため、  
種差による影響が少ないと想定される



面白かったから、  
鄭先生の話してくださいよ

@先週 都内某所

# ジェリクルを創った男

## 鄭雄一



東京大学医学系研究科・工学系研究科 教授  
日本再生医療学会 理事





骨の研究は、やらなくて良いよ。  
自分のやりたい研究をやりなさい。  
研究費は、使って良いから。

来年、学生7人来るからさ、  
全員面倒見てね。

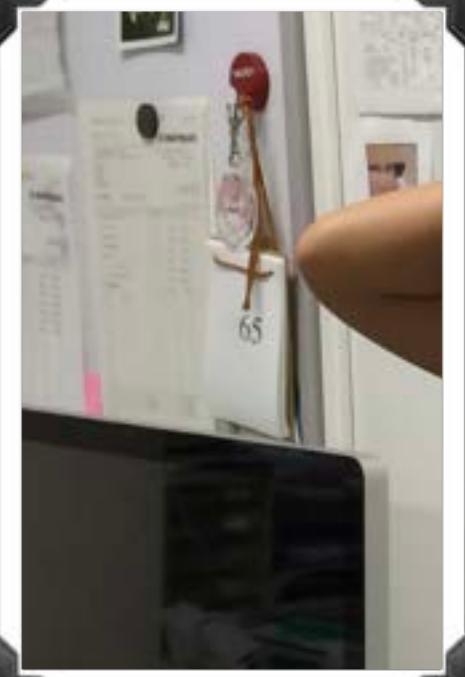
コラボとかは勝手に決めて良いよ。  
必要だったら、私が頭は下げるから。



まずは、論文を年の数だけ書こうか。  
そしたら、助教にしてあげるよ。

どう、論文書けた？

どう、論文の数増えた？



酒井 崇匡

生年月日：1980年2月15日

1998年 長崎県立島原高校卒業

2007年 東京大学大学院工学系研究科マテリアル工学専攻  
博士課程修了 博士（工学）

2007年 東京大学大学院工学系研究科 特任助教

2011年 東京大学大学院工学系研究科バイオエンジニアリング専攻 助教

New!



なんかさ、教員の昇進って謎だよね。  
気に食わないから、ルール決めよう。  
立川談志流は、ルールあるんだよ。

よし、  
論文50報とScienceかNature  
通したら、准教授にする。

どう？  
論文書いた？  
論文の数増えた？

HOME > SCIENCE > VOL. 343, NO. 6173 > "NONSWELLABLE" HYDROGEL WITHOUT MECHANICAL HYSTERESIS

 REPORT



## "Nonswellable" Hydrogel Without Mechanical Hysteresis

HIROYUKI KAMATA, YUKI AKAGI, YUKO KAYASUGA-KARIYA, JUNG-IL CHUNG, AND TAKAMASA SAKAI [Authors Info & Affiliations](#)

SCIENCE • 21 Feb 2014 • Vol 343, Issue 6173 • pp. 873-875 • DOI: 10.1126/science.1247811

 6,795  585



酒井 崇匡

生年月日：1980年2月15日

1998年 長崎県立島原高校卒業

2007年 東京大学大学院工学系研究科マテリアル工学専攻  
博士課程修了 博士（工学）

2007年 東京大学大学院工学系研究科 特任助教

2011年 東京大学大学院工学系研究科バイオエンジニアリング専攻 助教

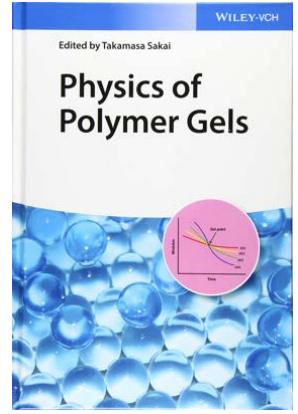
2015年 東京大学大学院工学系研究科バイオエンジニアリング専攻 准教授

New!

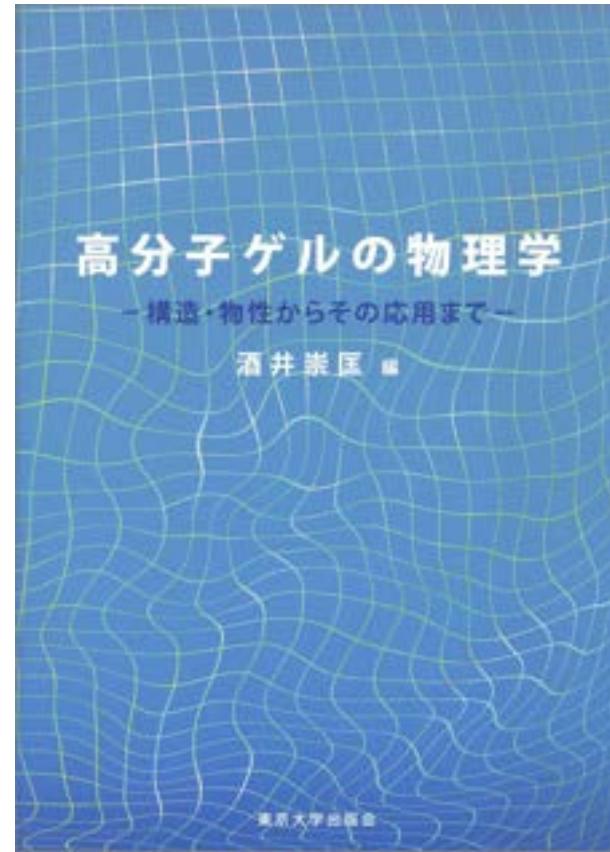


ノーベル賞取ってる人はさ、  
大体30代で教科書書いてるから。  
酒井くんも書いてみよう。

どう？  
書いた？  
毎日少しでも書かないと終わらないよ。



2020年 @40歳



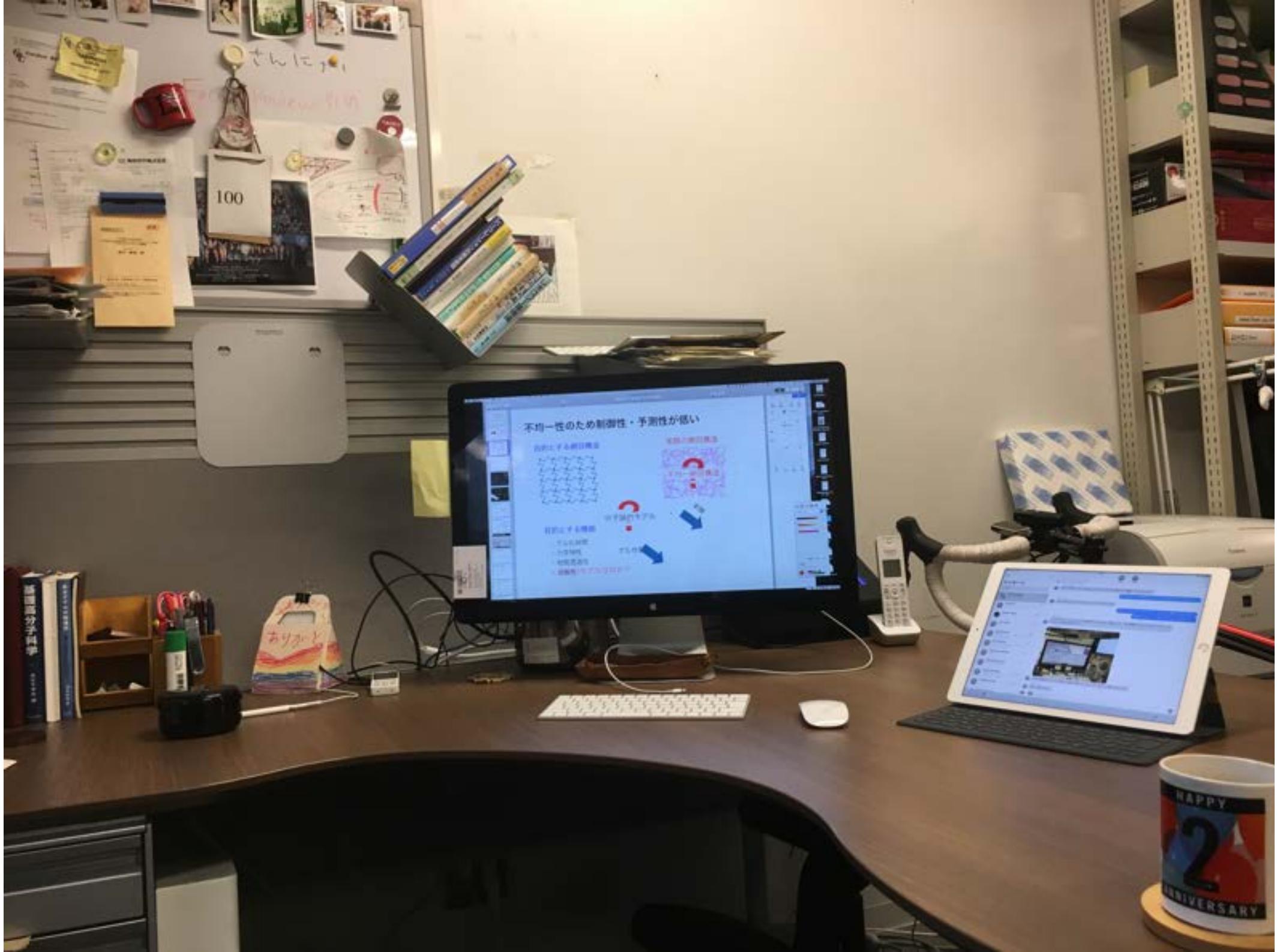
2017年 @37歳



教授はさ、タイミングが来たら、  
どの大学からのオファーでも  
絶対に受けなさい。

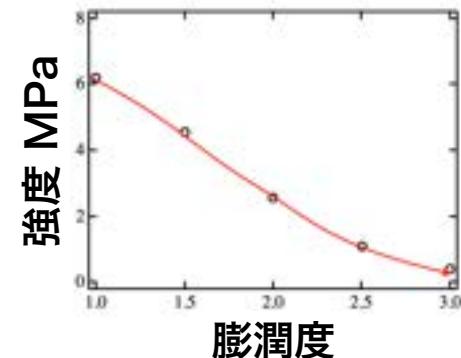
論文100報と  
後、ベンチャー設立かな。  
そこまでやれたら、東大でもいけるかも

どう？  
進んでる？  
論文の数増えた？

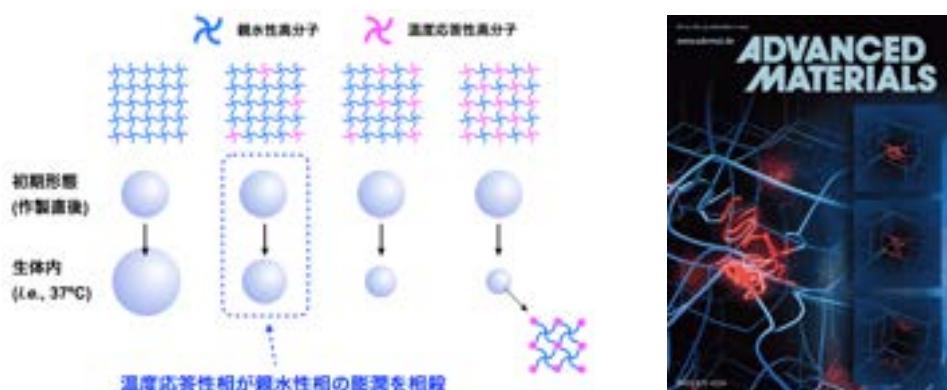




# 「膨らまないゲル」の開発と医療応用



問題：ゲルは生体内などの水のある環境で膨潤し、強度が劇的に低下、周辺組織を圧迫障害

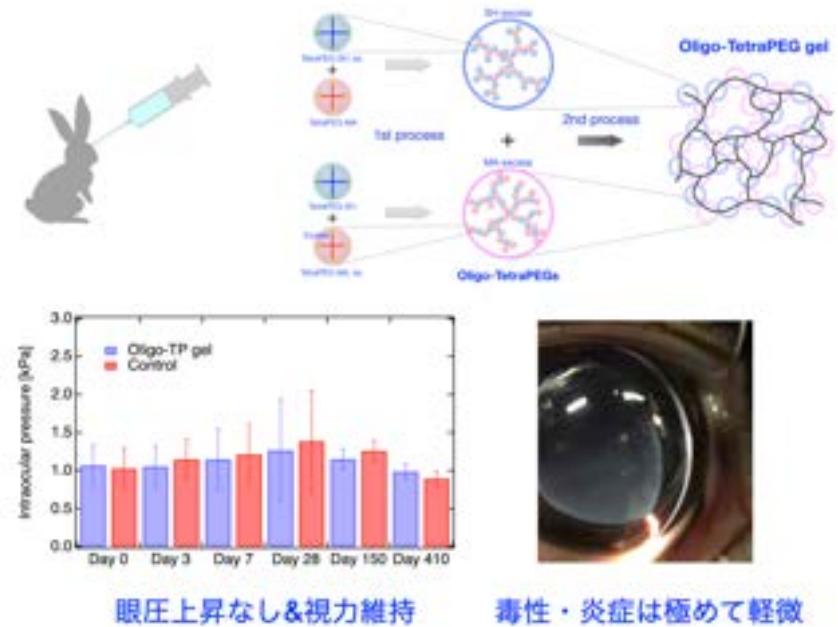


膨らまないゲルという概念を提案すると共に、設計原理を複数構築

Science 2014 (Top 1% citation in chemistry)

Advanced Materials 2015

Angewandte Chemie Int. Ed. 2016



99.5%の超高含水率ゲルの作製と  
人工硝子体への適用

Nature Biomedical Engineering 2017

## 既存の止血剤の問題点

1. 血液製剤の場合は未知のウイルス混入の可能性あり
2. 抗血液凝固剤を使用していると止血不可能
3. 止まらない時は止まらない



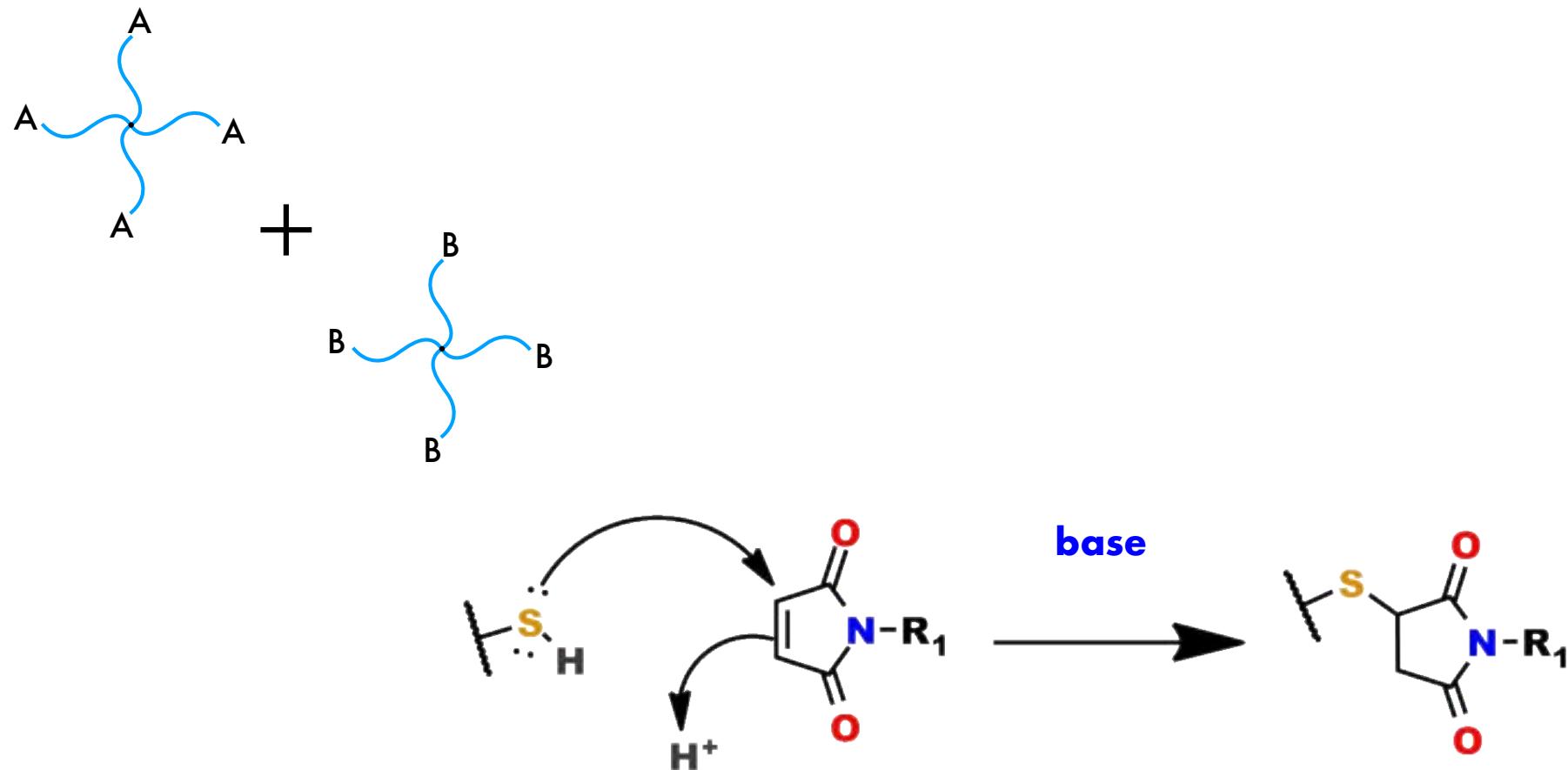
Prof. Katsuyuki Hoshina

現在においても、止血は困難な場合あり！



共同研究者：東京大学附属病院血管外科 保科 准教授提供

# シンプルな方法論：化学反応速度のpH依存性

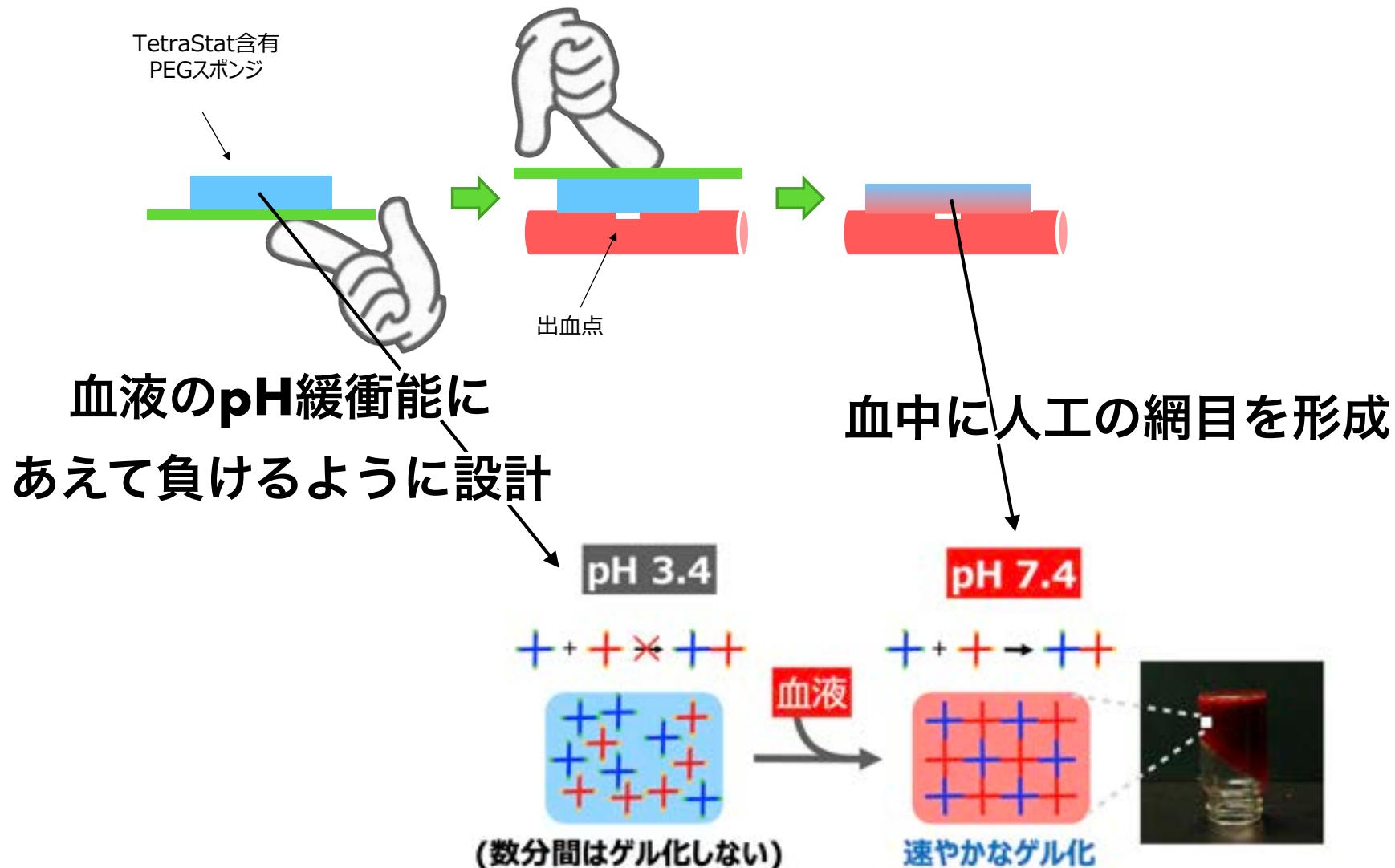


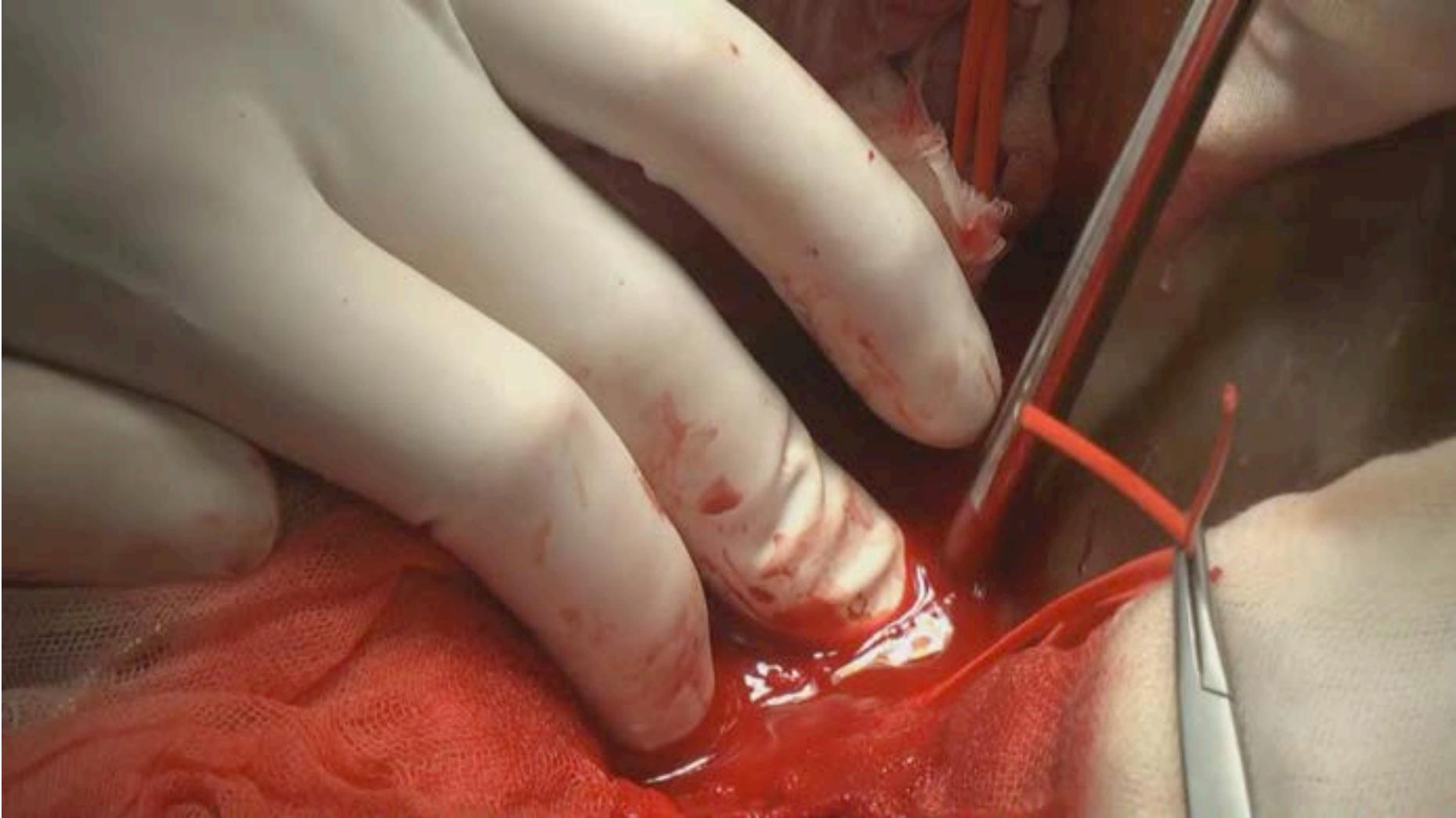
酸性では反応速度が遅く、塩基性では速い

# 「擬似」 血液反応性硬化剤

\*止血剤特許出願済

同意書不要！ ヘパリン使用時でも止血可能！





市販の止血剤よりも止まる！

メディコスヒラタとジェリクル、下肢静脈瘤を含む血流障害及び血管疾患分野の体に負担の少ない治療法として、テトラゲル技術の実用化に向けた提携拡大  
～ゲルの注射だけという侵襲性の低い治療が可能に～

医療機器業界に於いて100有余年の歴史を有し伝統医療の先駆者である株式会社メディコスヒラタ（本社：大阪府大阪市、代表取締役：平田 全孝、以下メディコスヒラタ）とテトラゲルを用いて医療に革新を起こす東京大学発のバイオベンチャー企業のジェリクル株式会社（本社：東京都文京区、代表取締役：雄井 公祐、以下ジェリクル）は、両社の共同開発の枠組みを拡大し、血流障害及び血管疾患分野におけるテトラゲルの適用を目的とした共同開発契約を締結しましたので、お知らせ致します。



× MEDICO'S HIRATA INC.

日本経済新聞

東大、体液に触れると瞬時に固化する合成ハイドロゲルで速やかな止血を実現

2022年3月7日 15:23

発表日:2022年03月07日

体液に触れると瞬時に固化する合成ハイドロゲルで速やかな止血を実現

—安全かつ高性能な局所止血材や体液漏出防止材の開発に期待—



市販の止血剤よりも止まる！

→開発パートナーに技術移転

# 既存の腱癒着防止剤の問題点

1. 癒着防止能が不足している
2. 術後、機能が完全には戻らない

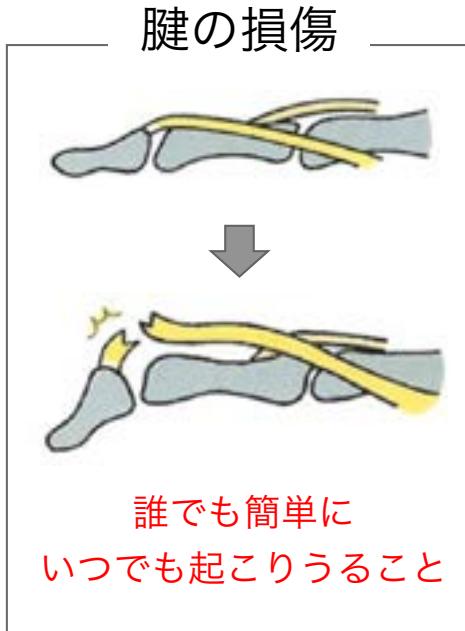


Prof. Taku Saito



Dr. Yasuhide Iwanaga

# 開発の背景



病院へ



腱縫合術の様子  
(縫合することはできるが...)

でも...



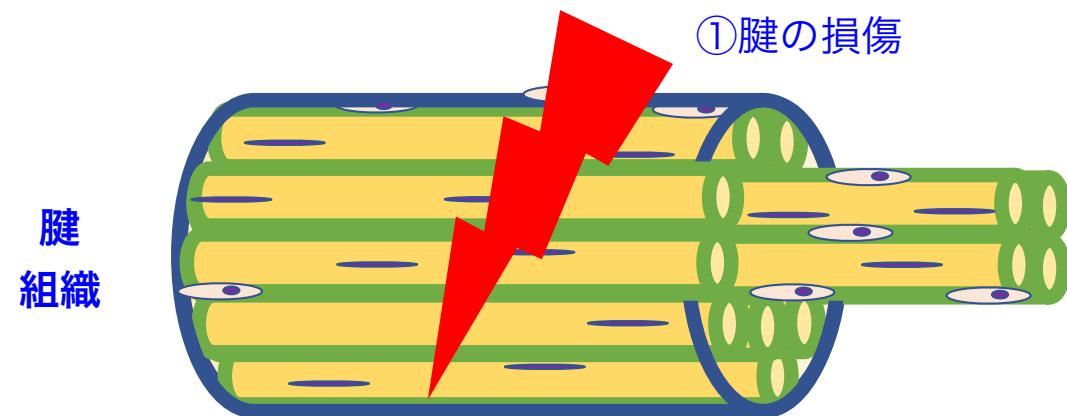
うまく動かない... QOLの大幅低下

原因: 腱の周囲組織との癒着

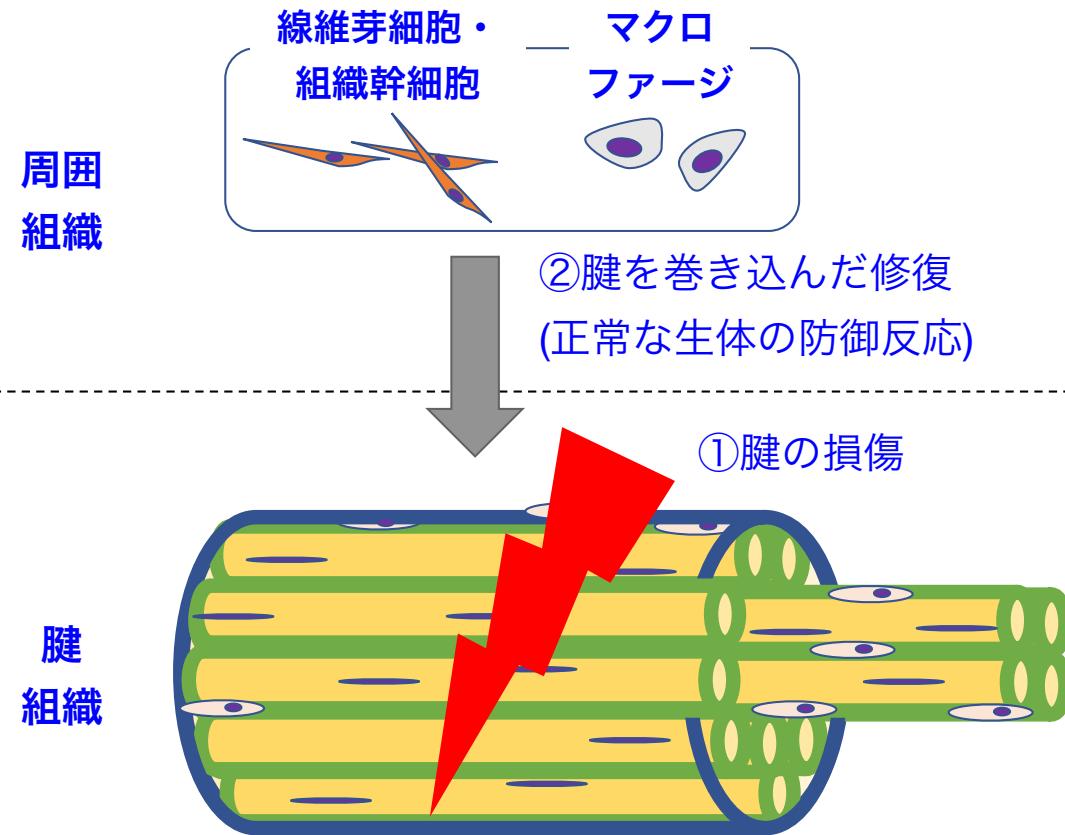


手術やリハビリの技術向上は限界に達しており、腱癒着防止のための医療機器も存在しない  
根本的な解決のためには、腱を癒着なく治癒させる新たな医療機器の開発が必要

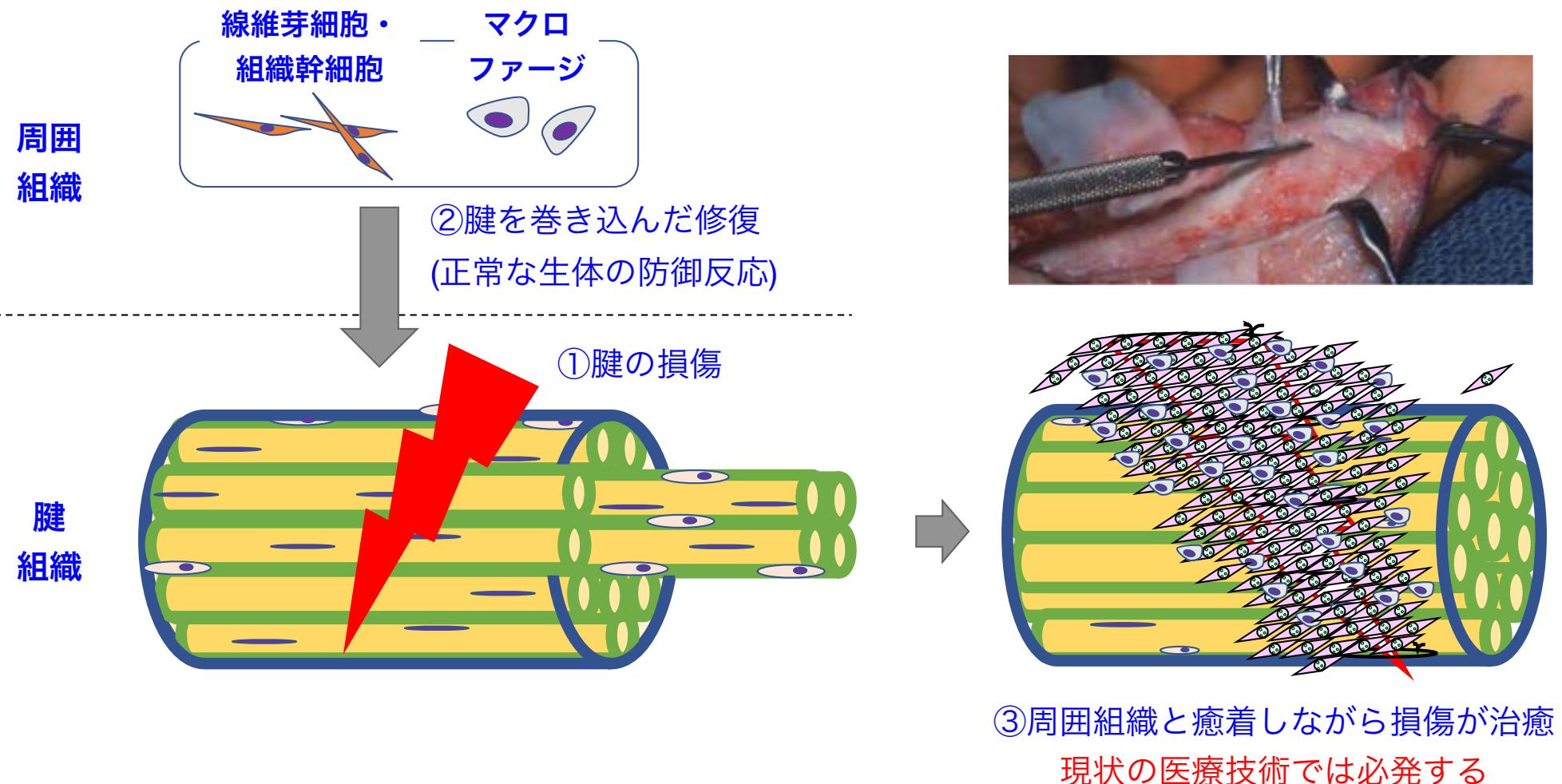
# 癒着の原因: 腱周囲からの細胞侵入がトリガー



# 癒着の原因: 腱周囲からの細胞侵入がトリガー



# 癒着の原因: 腱周囲からの細胞侵入がトリガー



癒着を防ぐには、周囲組織からの細胞侵入を防ぐバリアを設ける必要がある

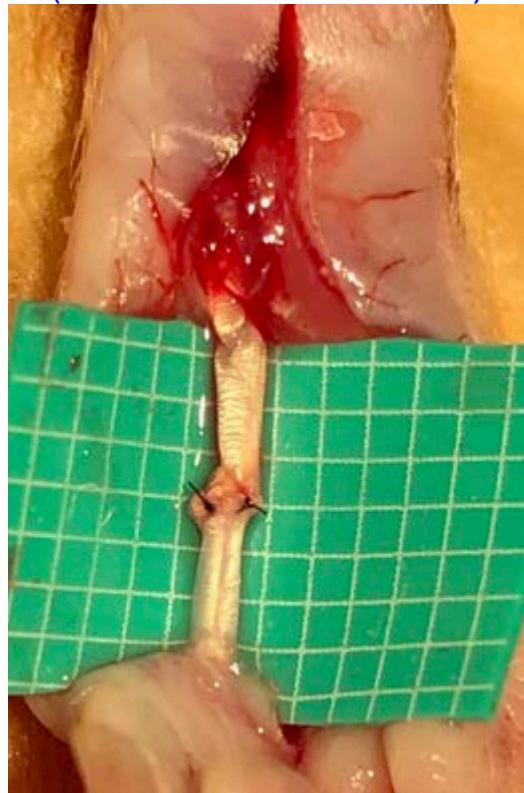
# 屈筋腱切断モデルでの癒着評価

## 方法<sup>[1]</sup>

- ①ラット足底の深指屈筋腱を展開し、中央で切断(各群12匹)
- ②津下式ループ針を用いて、下図のように縫合して閉創 \*本品適用群にはゲルを適用
- ③術後3, 7, 14, 21日目にそれぞれ3匹ずつ解析

### 比較対照群

(縫合のみ = 既存の治療法)



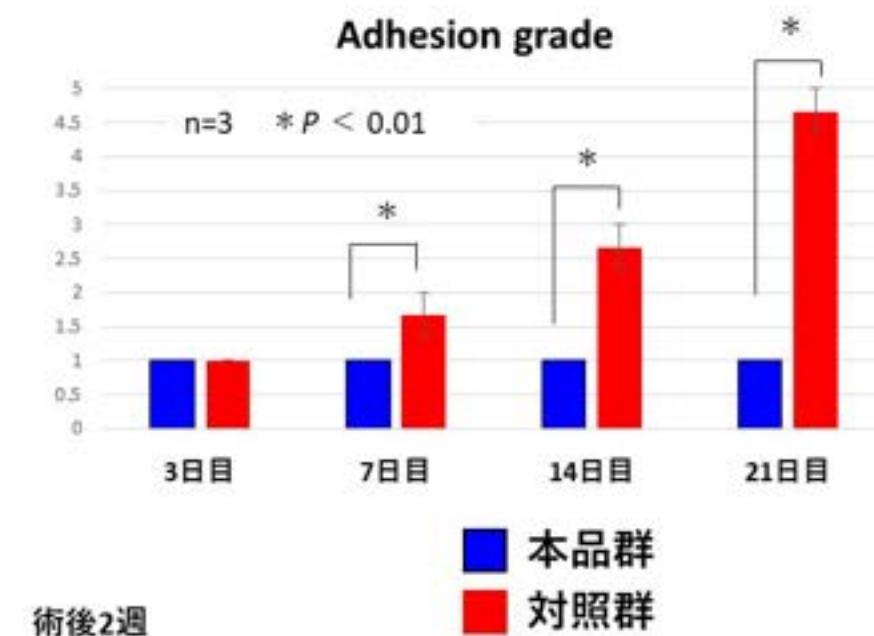
### 本品適用群

(透明部)  
立体的に硬化した  
ハイドロゲル

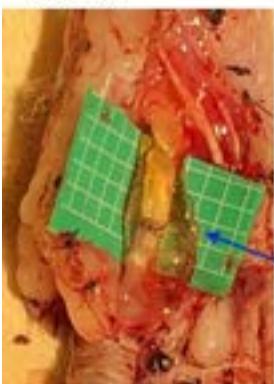


[1] 確立されたラット屈筋腱癒着モデル (Iwanaga Y et al., *J Hand Surg GO*, in press)

# 癒着グレードの評価



術後2週  
本品群



本品群において、周辺組織との癒着は見られず、  
本品は術直後のまま腱周囲に存在していた  
(術後3週でも同様の結果)

## Adhesion grade (macroscopic evaluation)

grade1

No adhesion

grade2

Adhesion can be separated by blunt dissection

grade3

Sharp dissection is required to separate less than or equal to 50% of the adhesion

grade4

Sharp dissection is required to separate 51-97.5% of the adhesion

grade5

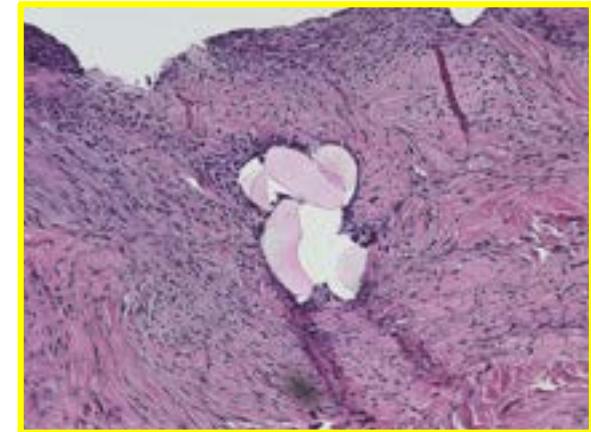
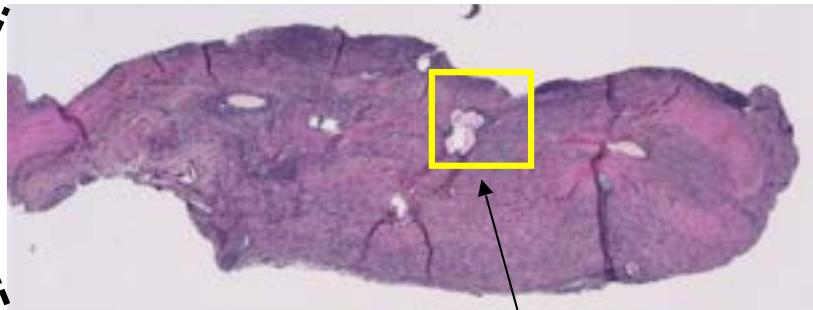
Sharp dissection is required to separate more than 97.5% of the adhesion

*J Orthop Res.* 2008 April ; 26(4): 562-569

本品によって、ラットモデルにおける腱癒着をほぼ完全に防止することができた

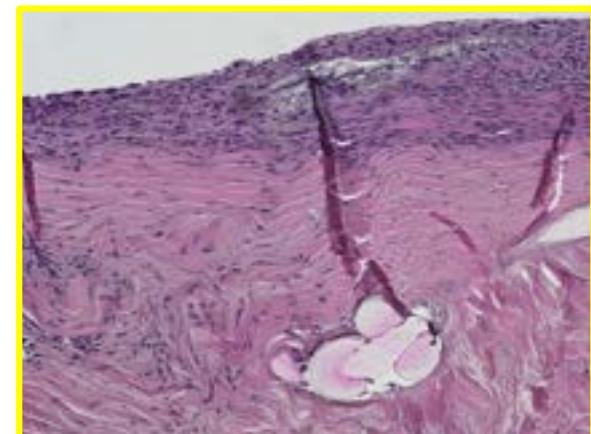
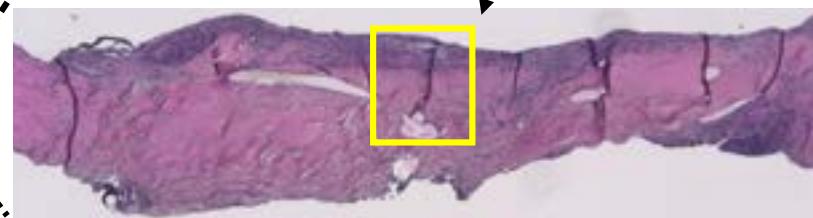
# 再生腱の組織学的評価の一部

対照群



腱内部まで広範囲に無数の細胞が増殖してお  
り、本来の構造を保っていない

本品適用群



辺縁は腱前駆細胞が豊富であるが、内部  
は腱本来の線維構造が保たれている



# ゲルの口バスト強靭化機構の解明と人工腱・靭帯の開発



東京大学大学院工学系研究科化学生命工学専攻

ジェリクル株式会社

酒井 崇匡



# 現状の人工靭帯は医療ニーズを満たしていない

前十字靭帯（ACL）損傷診療ガイドライン 2012

## 解説

Leeds-Keio 人工靭帯を用いた ACL 再建術 5 年以上の成績では、関節不安定性や関節症変化を高率に合併する。高い初期強度を確保し、優れた組織誘導能も有すると報告されているが、早期のスポーツ復帰が安全により高率に可能となるかどうかについては報告をみない。また、Dacron 人工靭帯と Gore-Tex 人工靭帯による ACL 再建術の成績は不良で、中長期成績での断裂頻度も高く、滑膜炎や骨孔拡大の合併症が数多く報告され、現在は使用されていない。



# 医学的アンメットニーズ：人工腱・韌帯

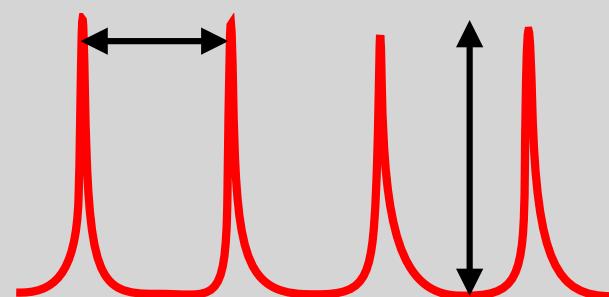
使用環境において、常に一定の力学応答を示すことが必要不可欠



$10^4$  歩 ...  $10^6$  歩 ...  **$10^7$  歩**  
1 日 ... 3 年 ... **30 年**

力学的ストレス

1 Hz 10 MPa



炎症によるストレス

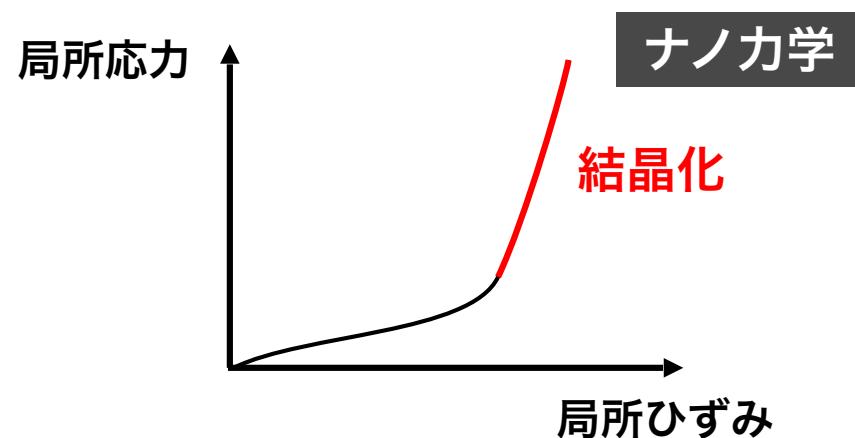


# 口バスト強靭性ゲルのタフ化メカニズム

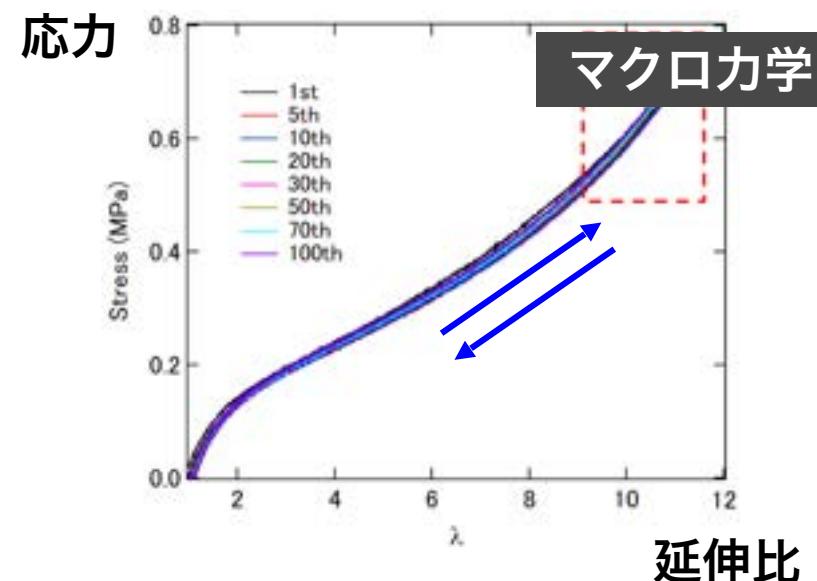
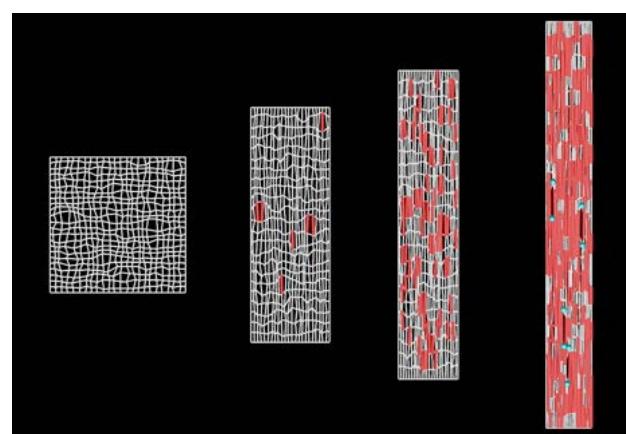
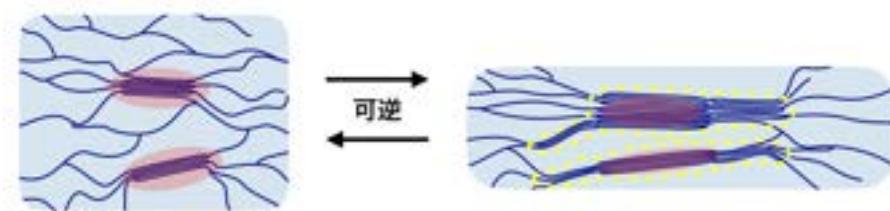
原理：ひずみの平準化



応力集中部位のひずみ硬化

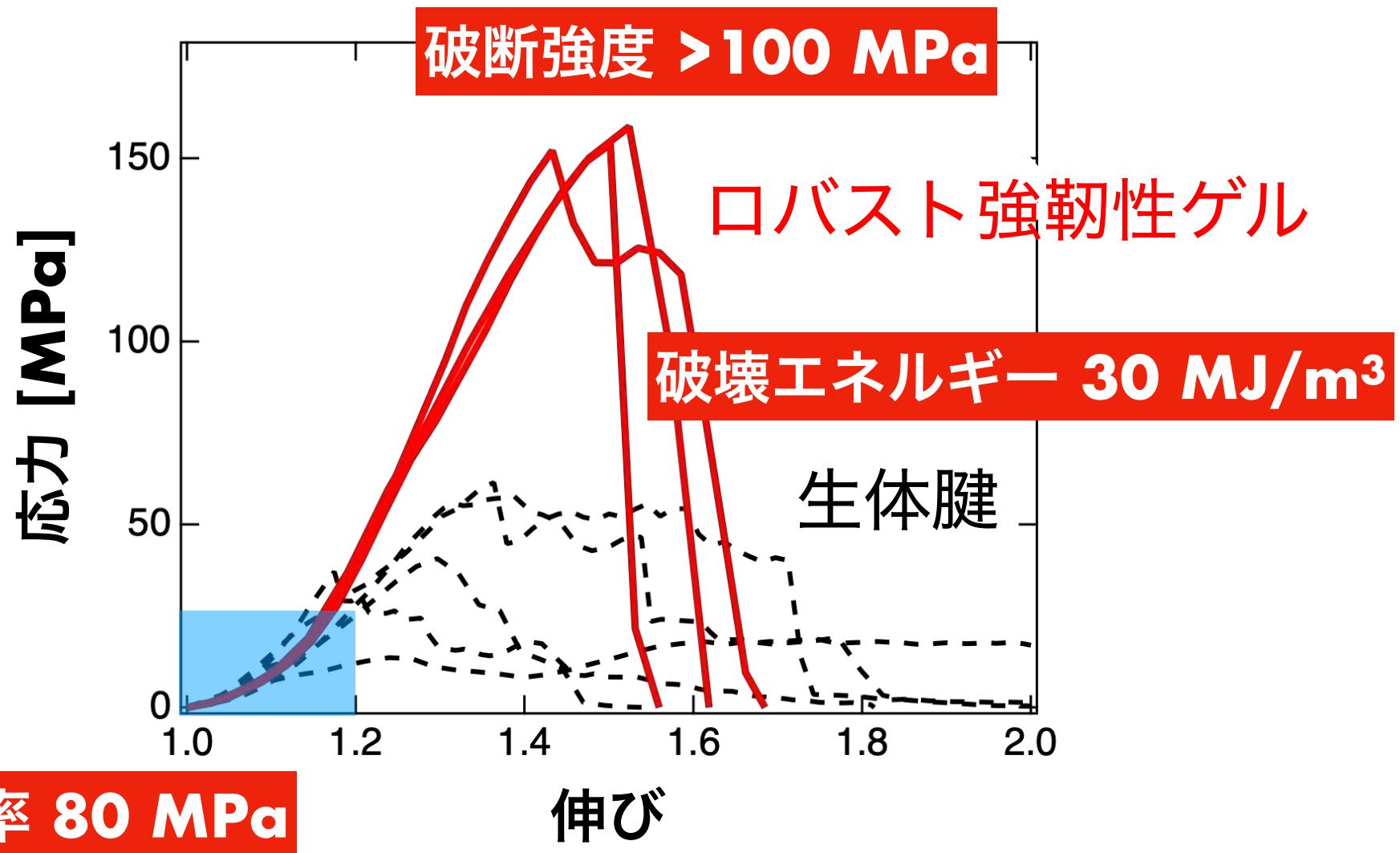


伸張誘起結晶化



# ロバスト強靭性ゲルの力学特性

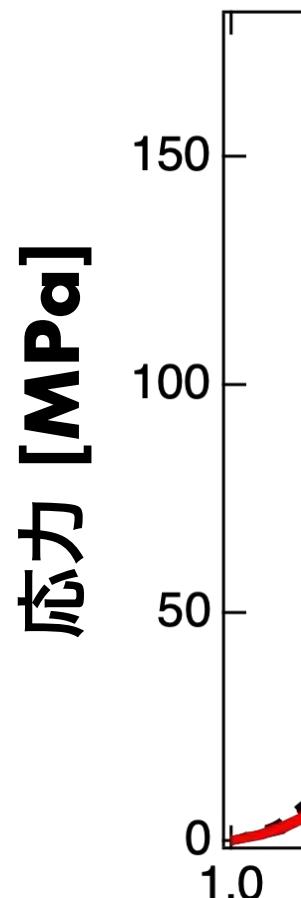
@生理食塩水中 37°C



ヒトに使用可能な高分子+水

# 口バスト強靭性

@生理食塩水中 37°C



Pa

ト強靭性ゲル

レギー 30 MJ/m<sup>3</sup>

腱

2.0

弹性率 80 MP

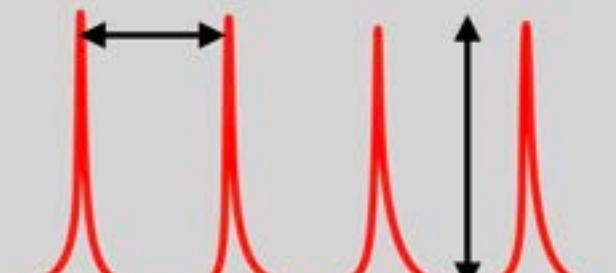
用可能な高分子+水

@生理食塩水中 37°C



### 力学的ストレス

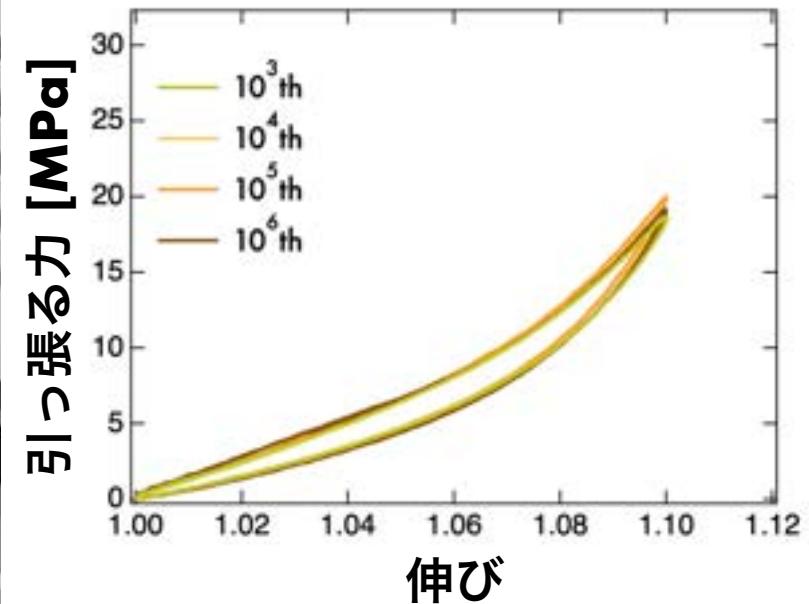
1 Hz      10 MPa



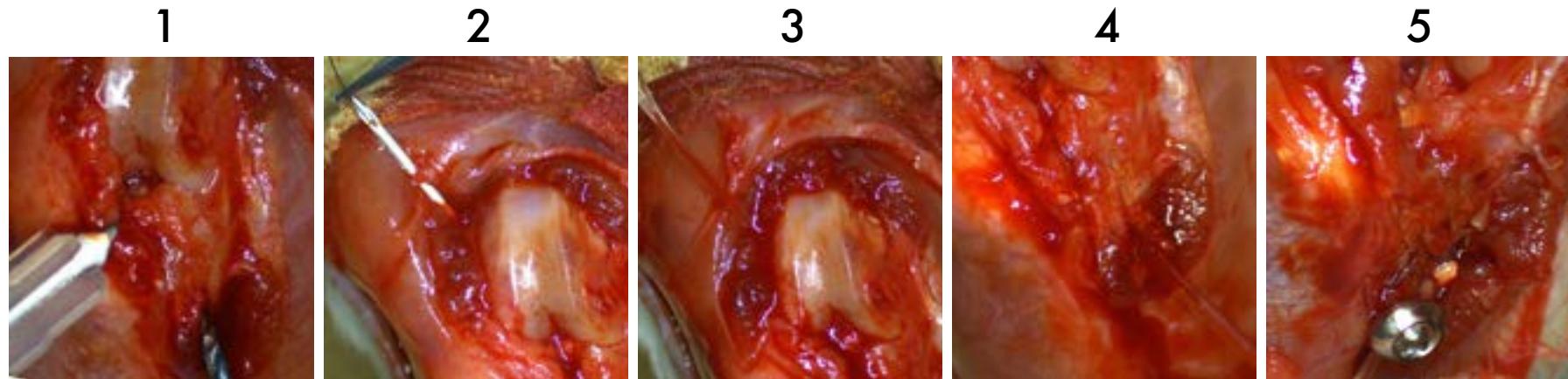
走行時



20 MPa 10<sup>6</sup> cycles

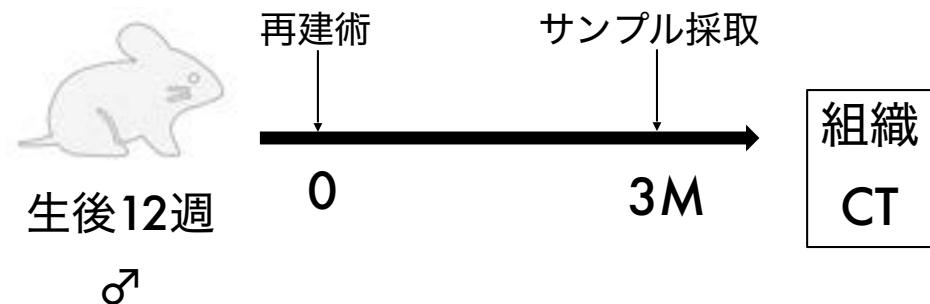


# ラットモデルを用いた前十字靱帯再建術



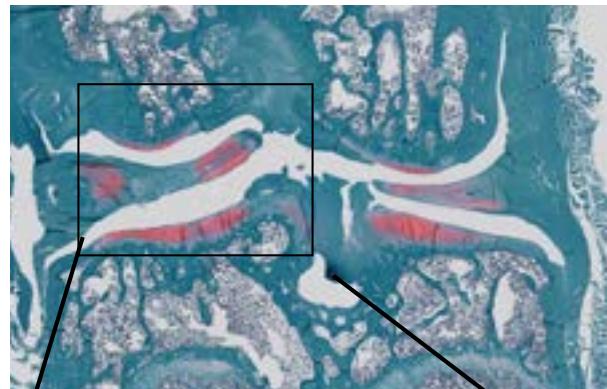
1 骨孔の作成  
2 注射針での誘導  
3 骨孔にゲルを通す  
4 ゲルを脛骨側に牽引  
5 ゲルの固定

## 術前的人工靱帯（モノフィラメント）

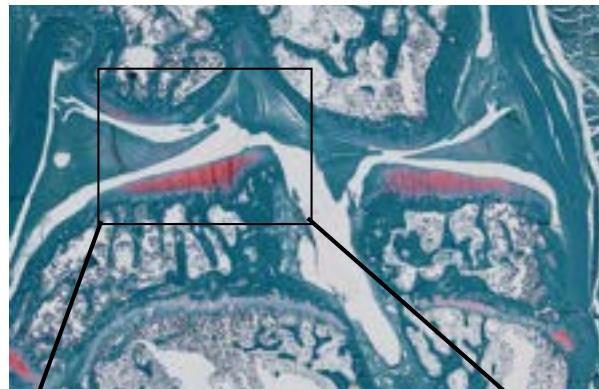


# 組織学的評価（術後3ヶ月）

ACL切斷

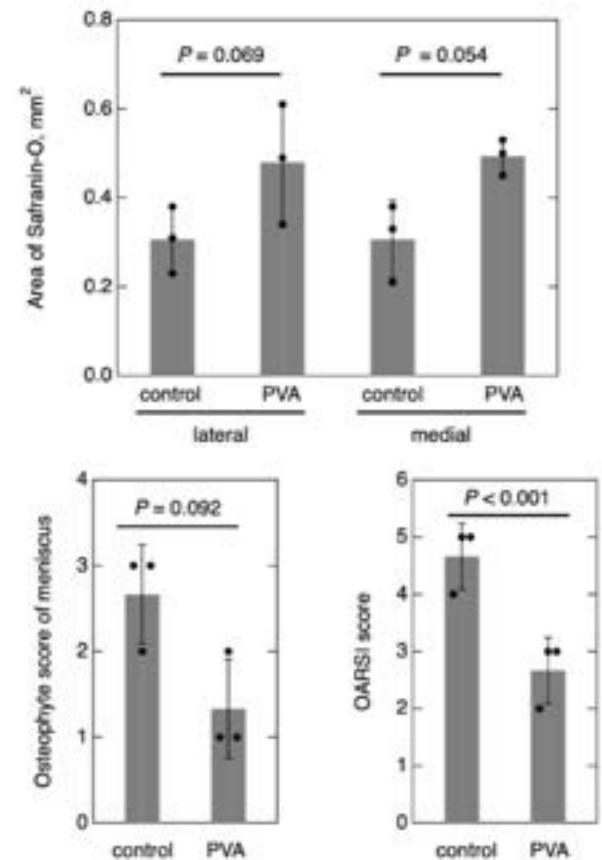


人工韌帯



Safranin-O staining  
軟骨細胞の染色

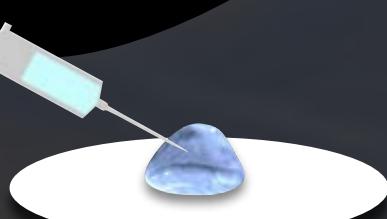
正常な軟骨細胞



異常な半月板  
の骨化  
変形性関節症  
スコア

# 確かな学理を基盤とした医療応用

つくる



かためる

Artificial vitreous  
Hemostatic agent

わける

Adhesion barrier

つなげる

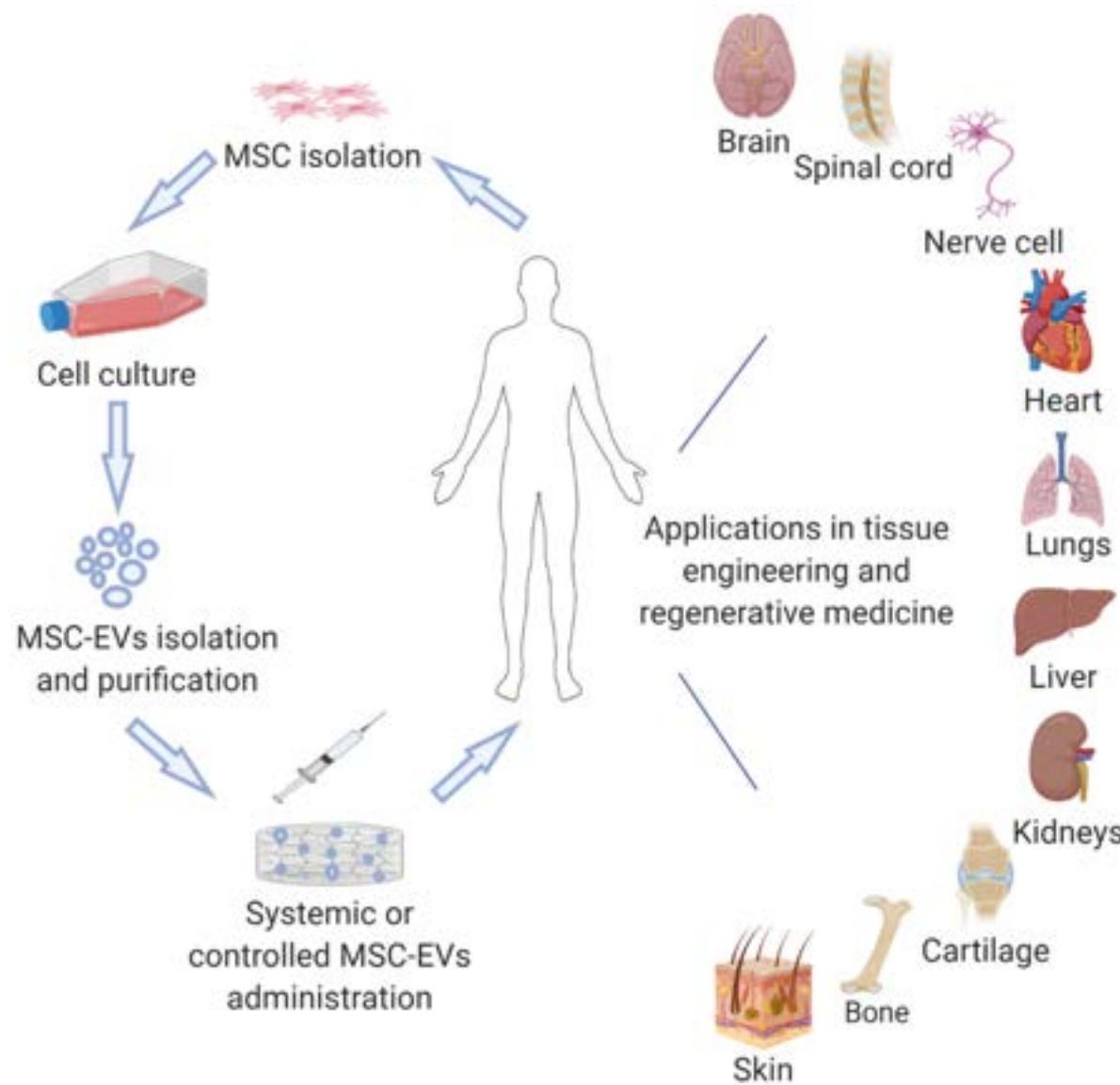
Scaffold

こわす



効果・効用は物理的な機序によるため、  
種差による影響が少ないと想定される

# 足場は再生医療における Last One Mile



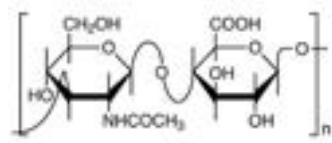
# マトリゲルはヒトには使えない



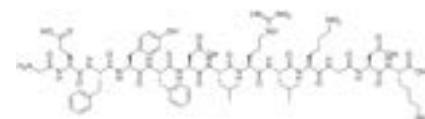
Corning Matrigel matrix is a solubilized basement membrane preparation extracted from the **Engelbreth-Holm-Swarm (EHS) mouse sarcoma**, a tumor rich in extracellular matrix proteins, including Laminin (a major component), Collagen IV, heparan sulfate proteoglycans, entactin/nidogen, and a number of growth factors.

# ヒトに使える材料は限られている

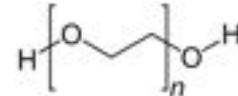
ヒアルロン酸



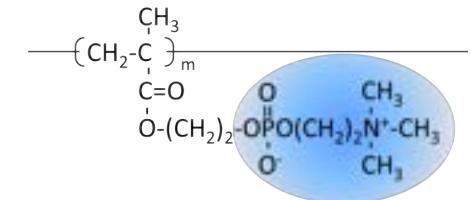
コラーゲン



ポリエチレングリコール



MPC



化粧品・石鹼



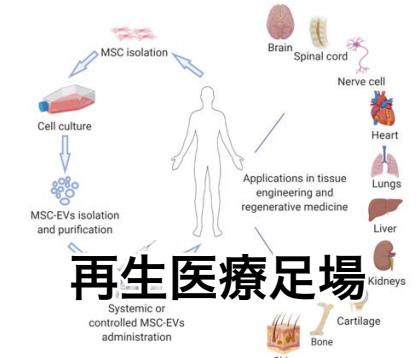
人工関節



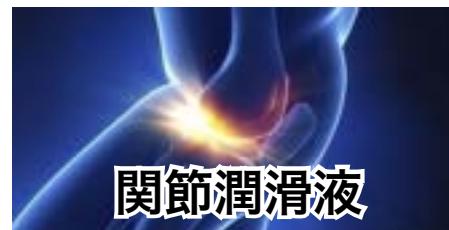
人工心肺



再生医療足場



人工血管



関節潤滑液

ステント



医用賦形剤



歯磨き粉

ワクチン  
抗体医薬  
核酸医薬



座薬

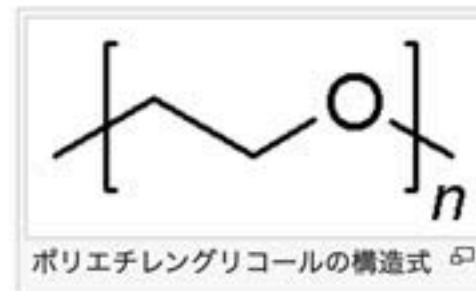
[ページ](#) [ノート](#)[閲覧](#) [編集](#) [履歴表示](#)

出典: フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』

ポリエチレングリコール (polyethylene glycol、略称 PEG、マクロゴールとも) は、エチレングリコールが重合した構造をもつ高分子化合物（ポリエーテル）である。ポリエチレンオキシド

(polyethylene oxide、略称PEO) も基本的に同じ構造を有する化合物であるが、PEGは分子量2万程度 (下記  $\text{CH}_2\text{-CH}_2\text{-O}$  の分子量が44なので、概ね  $n \leq 450$ ) までのもの、PEOは数万以上のものをいう<sup>[1]</sup>。両者は物理的性質（融点・粘度など）が異なり用途も異なるが、化学的性質はほぼ同じである。

一般的な構造式は  $\text{HO-(CH}_2\text{-CH}_2\text{-O)}_n\text{-H}$  と表される。PEG は水・メタノール・ベンゼン・ジクロロメタンに可溶、ジエチルエーテル・ヘキサンには不溶である。タンパク質など他の高分子に PEG構造を付加することを PEG化 (ペグ化/pegylation) という。



ポリエチレングリコールの構造式

## 利用 [編集]

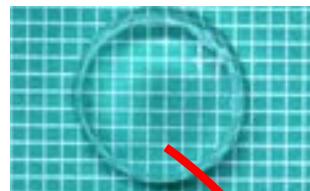
PEG はエチレングリコールを重合した物で、色々な製品に用いられる。材料としての PEG は、軍用防護服<sup>[2]</sup>や、糖尿病患者の血糖値を監視するための採血器に代わるタトゥー風の方法<sup>[3]</sup>などへの応用も開発されつつある。PEG により、ポリウレタンエラストマーにゴム状の性質を与えることができ、これはポリウレタンフォームやスパンデックス繊維へ応用されている。

PEG を他の疎水性分子に結合すれば、非イオン界面活性剤 (PEG部分はポリオキシエチレン[POE]鎖と呼ばれる) が得られ、化粧品の乳化剤などに用いられている。

分子量3500 - 4000 ( $79 \leq n \leq 91$ ) のポリエチレングリコールは、慢性便秘の瀉下薬として用いられる（日本の製品名はモビコールとして2018年上市された<sup>[4]</sup>）。

# PEGには、タンパク質も細胞も接着しない

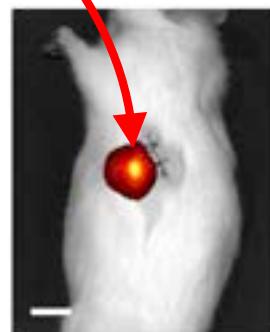
PEG gel



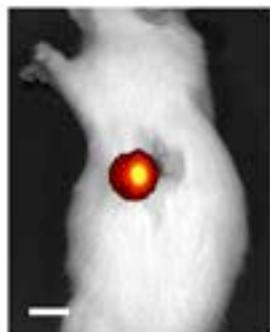
50万報を超えるPEGの論文において、

PEGに細胞やタンパク質が吸着した例は皆無

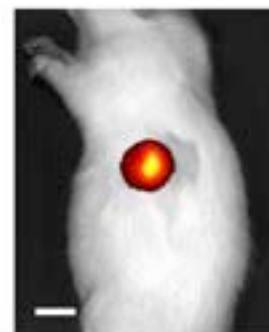
Day 0



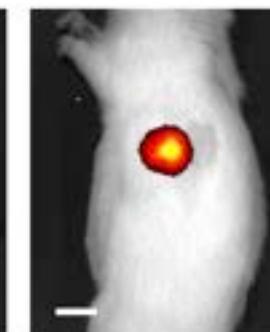
Day 4



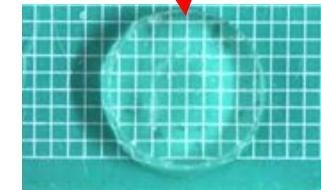
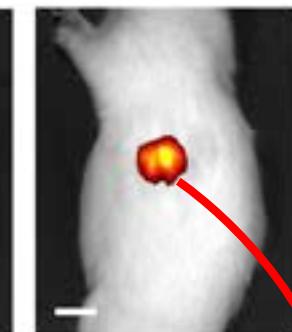
Day 7



Day 10



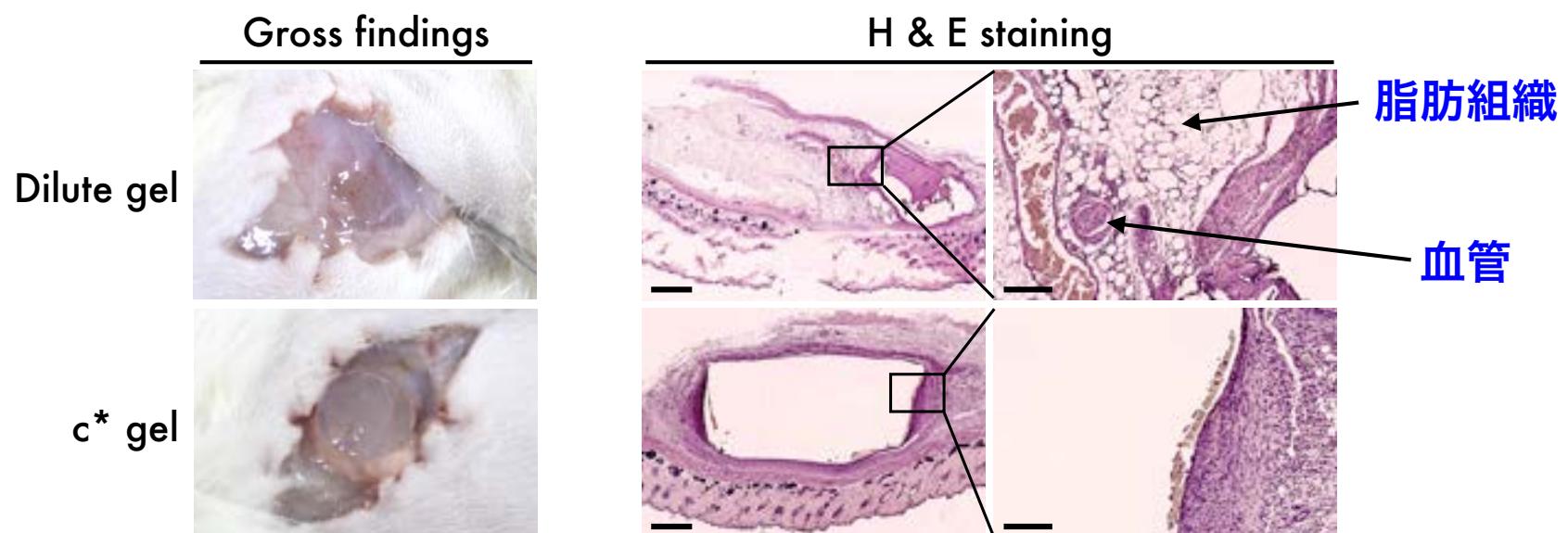
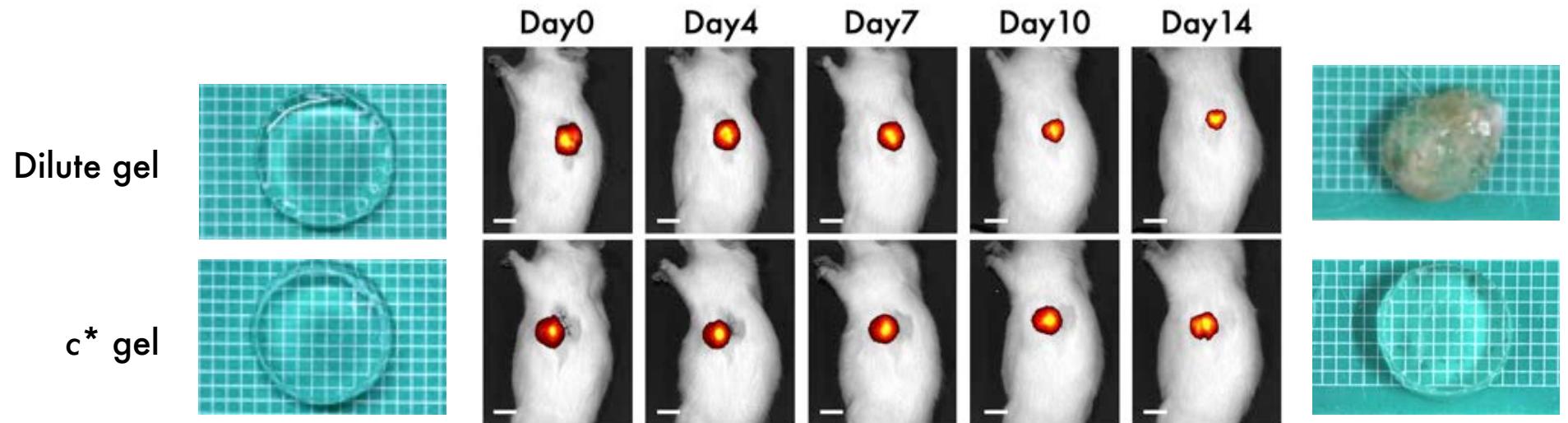
Day 14



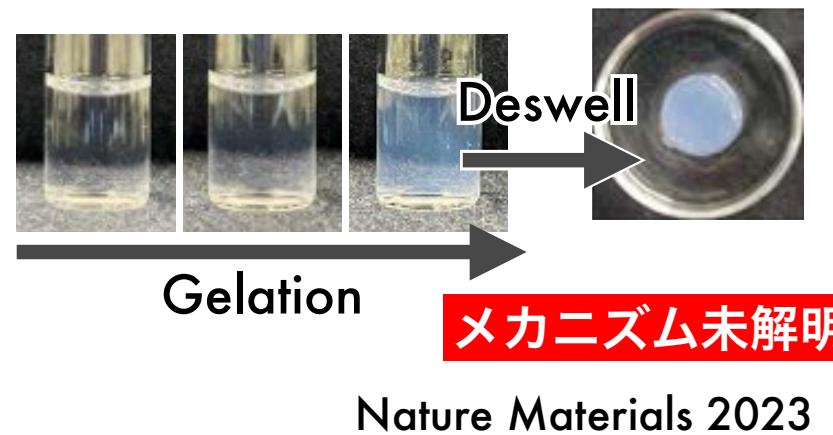
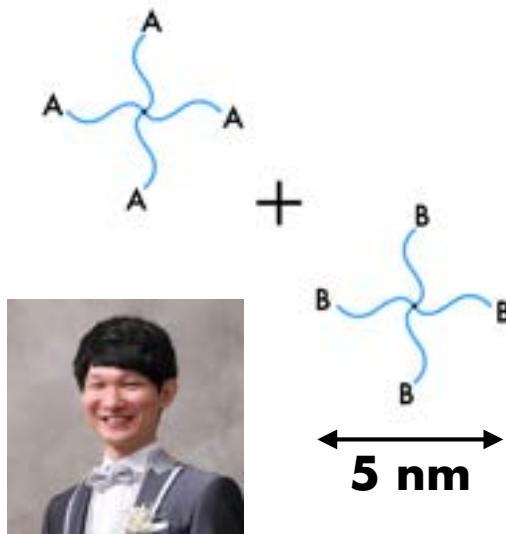
生体に対して不活性  
足場としては不適切

# ゲル化制御により細胞接着性PEGゲルが作製可能

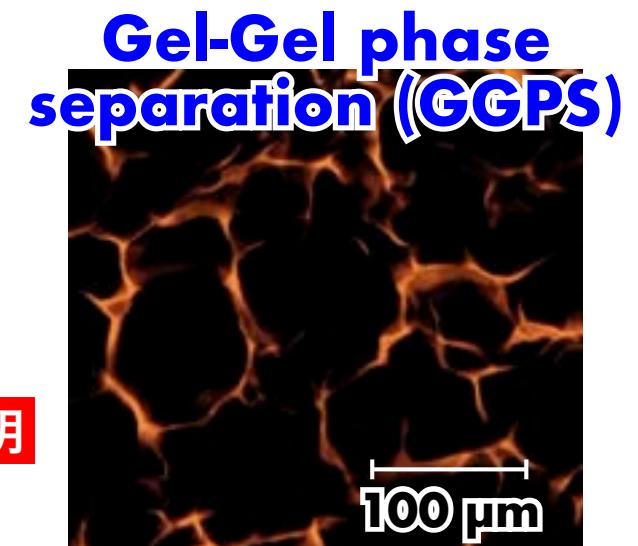
生体内で分解され、脂肪組織に置換される



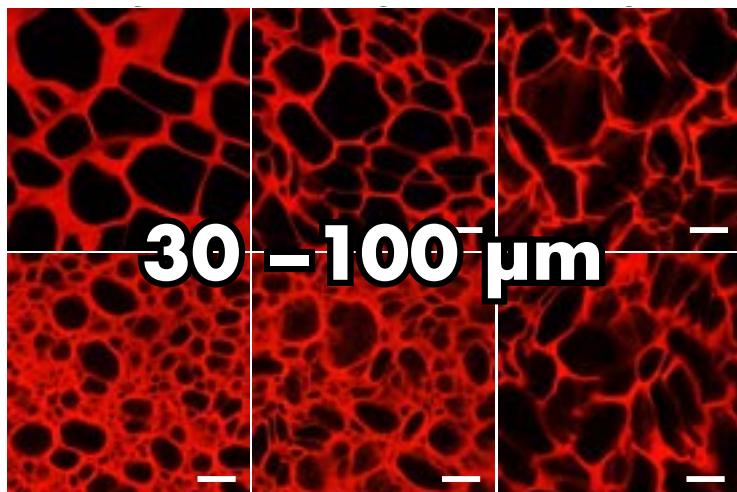
# 世界初：PEGのみからなる人工細胞外マトリックス



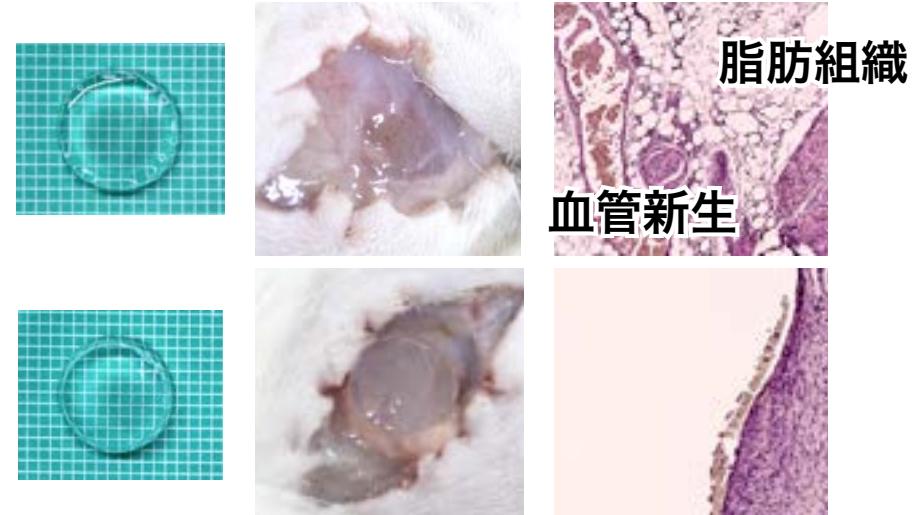
Nature Materials 2023



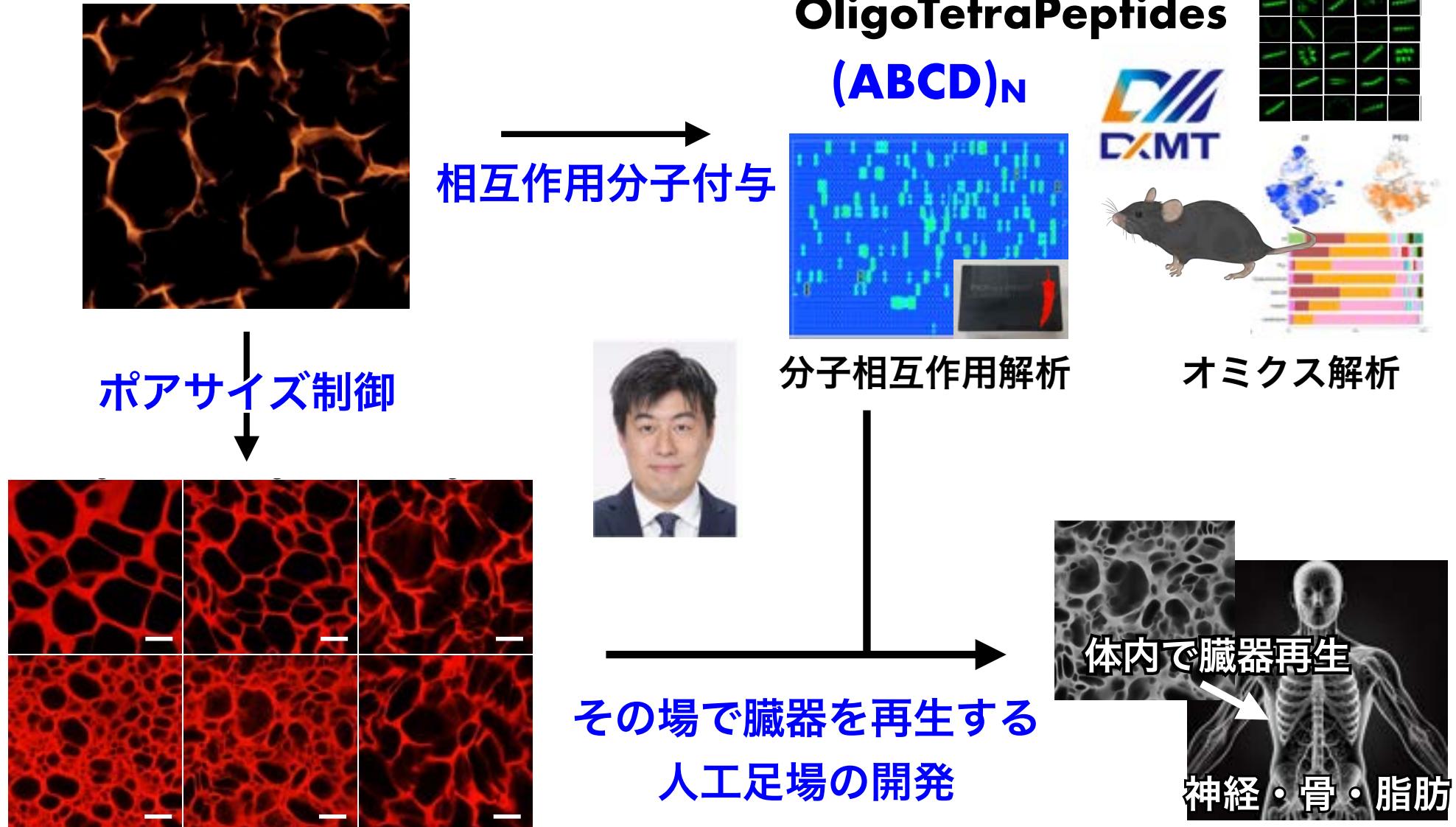
細胞と相互作用可能な孔を形成



組織親和性発現

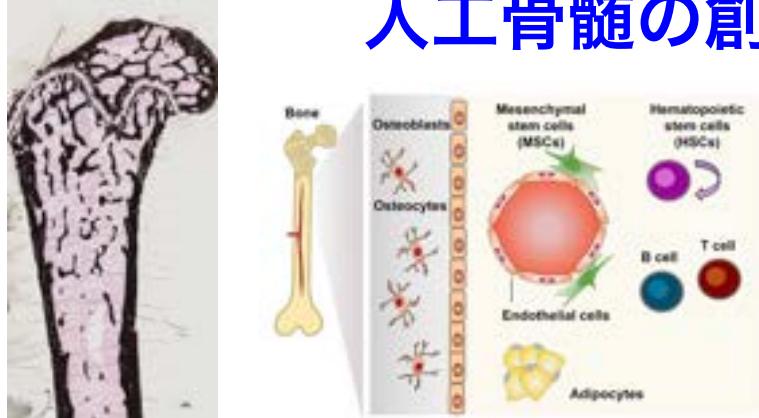


# 生体とゲルの相互作用制御による「その場臓器再生」

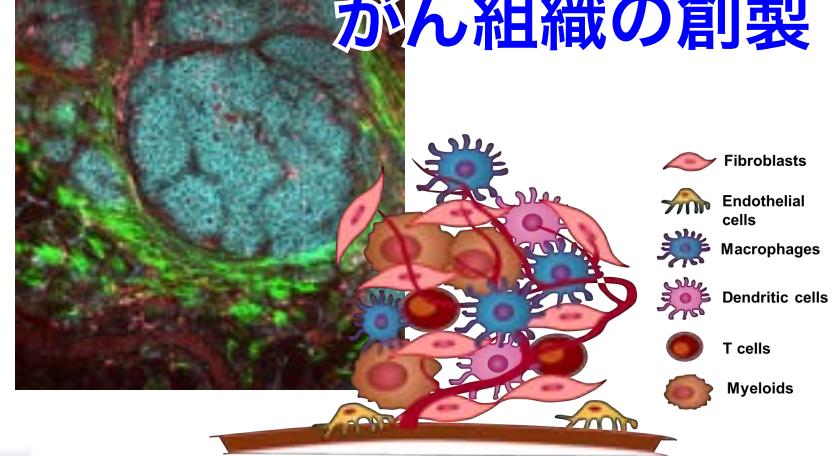


# 細胞微小環境を再現し「体外で」組織を作る

## 人工骨髄の創製



## がん組織の創製



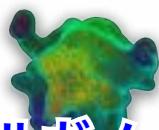
骨髄微小環境を再現



間葉系幹細胞



ヒト幹細胞 造血幹細胞

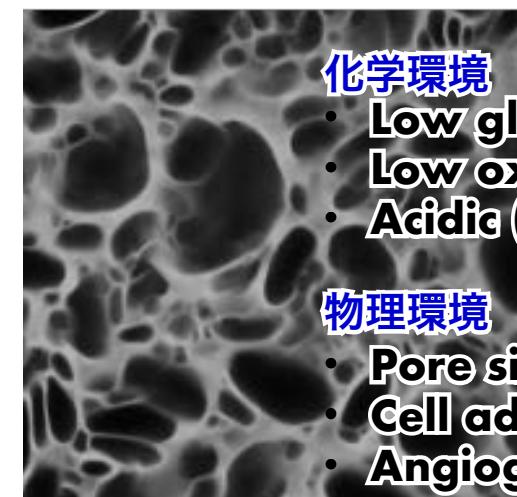


オルガノイド

化学環境  
• Cytokine  
• Nutrition

物理環境  
• Pore size  
• Cell adhesion  
• Angiogenesis

がん微小環境を再現



化学環境

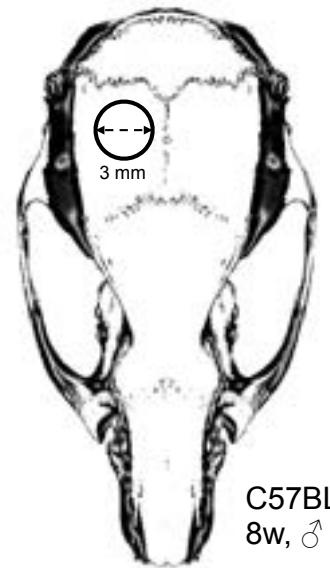
- Low glucose
- Low oxygen
- Acidic (pH: 6.5)

物理環境

- Pore size
- Cell adhesion
- Angiogenesis

# PEG gel can be scaffold for bone regeneration

**Cranial bone defect**

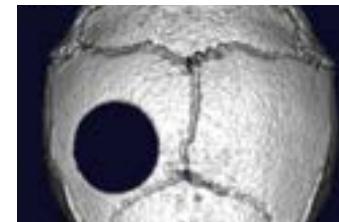


C57BL/6J  
8w, ♂

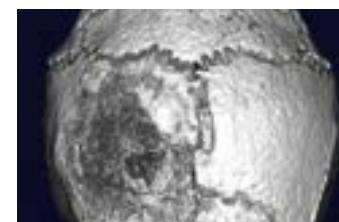


**Collagen  
+BMP**

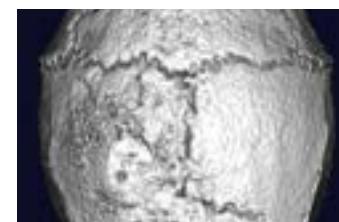
POD1



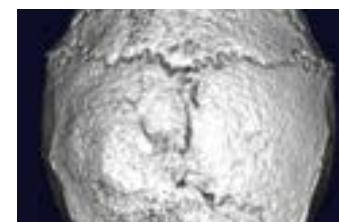
POD14



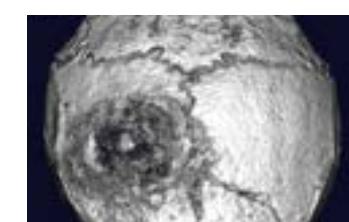
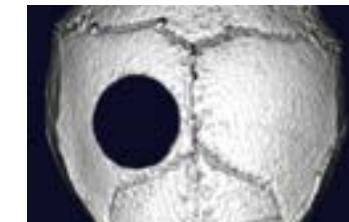
POD28



POD42



**GGPS gel  
+RGD+BMP**



「しょうがない」をなくしたい

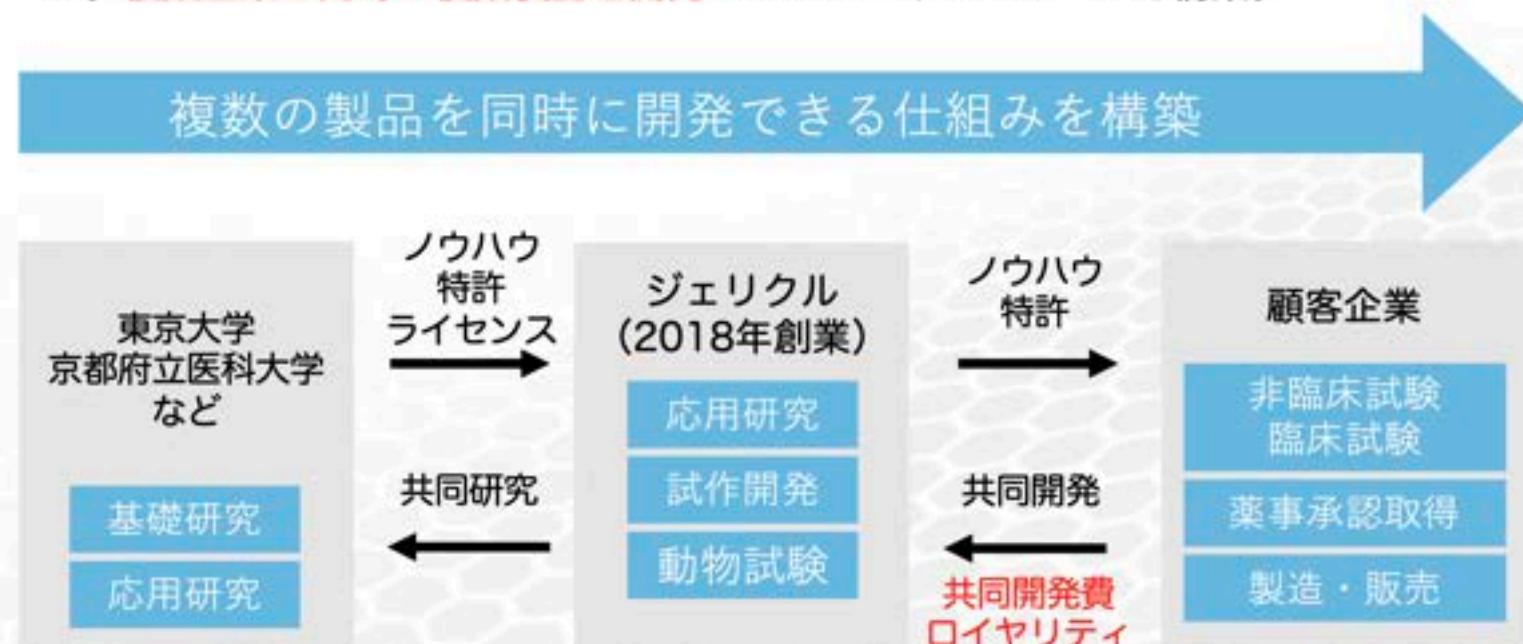
アンメットニーズを超える  
アンノウンニーズを探して

Find better QOL with hydrogels



## ビジネスモデル

東京大学などのアカデミックセンターとの共同研究で生み出した成果・特許技術を顧客企業との共同開発を実施。顧客企業との共同開発により技術の社会実装を目指す。複数企業と同時に複数製品を開発できるビジネススキームを構築。







Facebook

店内  
換気中