

平成30年度科学を語る会
九州大学西新プラザ
2018年11月10日

ガラスの不思議

ー物理学の立場からー

小田垣 孝
九州大学名誉教授
科学教育総合研究所



1964－1979 京都大学



京都府立桂高等学校
1972－1974

大阪工業大学

摂南大学
1973－1979



1982－1989 Brandeis U



2016－ 科学教育総合研究所



1979－1982 CCNY



1989－1993
京都工芸繊維大学



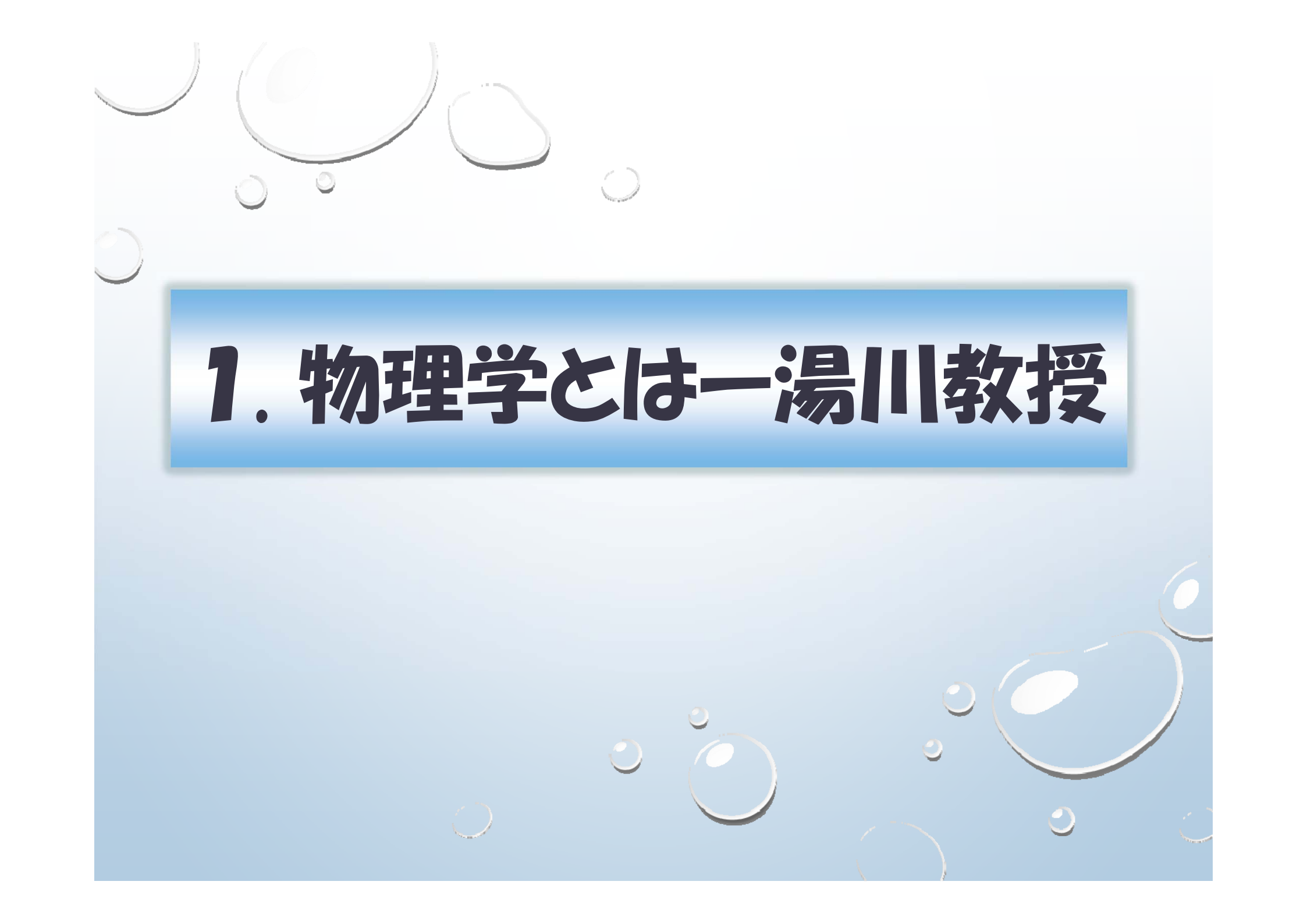
2009－2016 東京電機大学



1993－2009 九州大学

今日のお話

1. 物理学とは一湯川教授
2. ガラスの歴史
3. 身の回りのガラス
4. 物質の三つの相と
過冷却液体・ガラス
5. 何が不思議か
6. どう理解するか
7. 今後の発展

The background of the slide is a light blue gradient. It is decorated with several realistic water droplets and bubbles of various sizes, some with highlights and shadows, giving a fresh and clean feel.

1. 物理学とは一湯川教授

ドラマ「ガリレオ」 フジテレビ



東野 圭吾原作



湯川学教授(福山雅治)

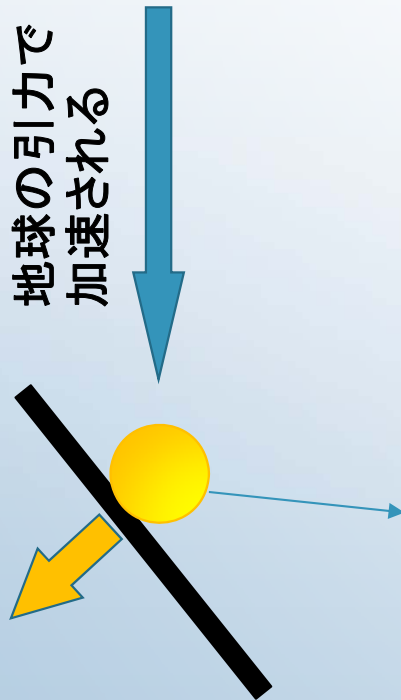
『現象には必ず理由がある。』

アルソミトラの種は何故前に進むのか

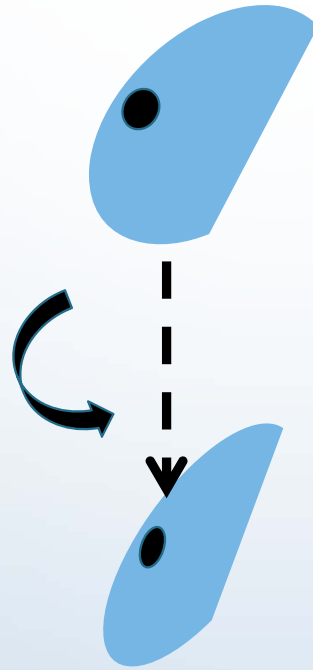
普通のボール



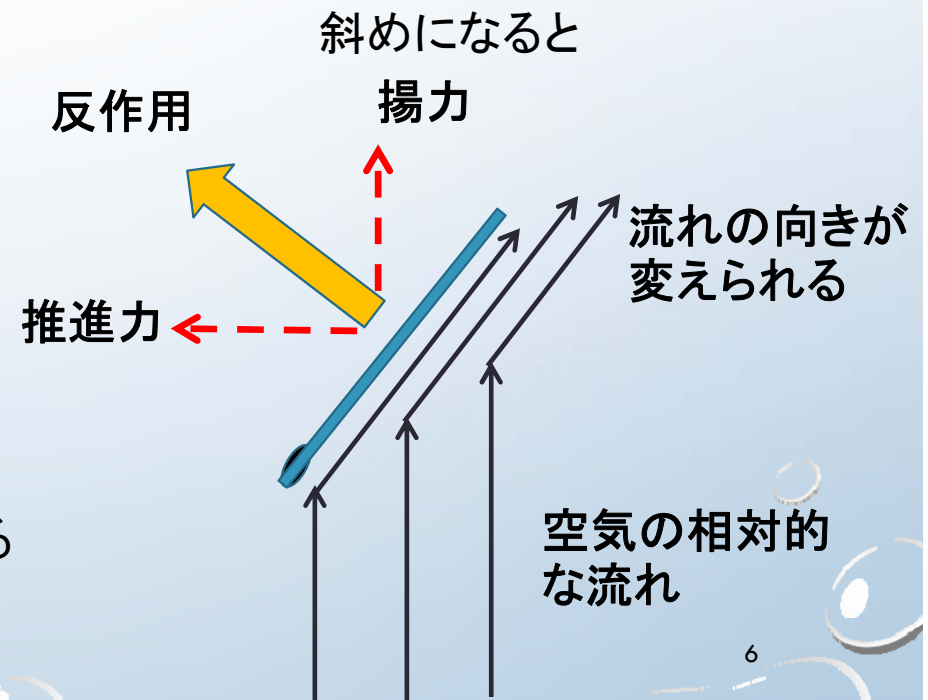
地球の引力で
加速される



斜めの板は反作用の力を受ける



落ちると回転する





湯川秀樹博士(1907-1981)
1949年ノーベル物理学賞

10.26



物理学通論 1967.4 ~ 1968.2

湯川秀樹

T. Odagaki

KYOTO UNIVERSITY



$\propto \exp(-\frac{1}{2}mv^2/kT)$
maxwell-Boltzmann 分布

一般に

$P \propto \exp(-\epsilon/kT)$

1: const でなく ϵ によって決まる。今迄の推論より、この P は非常に一般的に成立する事になる。

most probable distri は必ずしも、更に ϵ の値が ϵ になるに近づくにつれて ϵ は。

①. 自由度の大きい系、 ϵ の値は most prob. dis は sharp になり、他の分布は考えない。

②. その分布をかけて平均する。→ 同様の結果が得られる。力学的に与えるような、非常に自由度の大きい系 → Fowler 分布の形。前々から rm. B. 分布がある。

力学系は常に可逆性 (reversible) を持っている。

が dissipation は考えない。→ 統計力学の考え方。

「可逆性」第2法則より、熱現象は、右に非可逆である。これをどう考えるか、むづかしい問題であった。

可逆性

reversibility

可逆現象

initial $V(r)$

$\frac{d^2r}{dt^2} = -\text{grad} V$

(t) 解

$(t) = \frac{dV}{dt}$ になる。

非可逆性

irreversibility

熱現象

→ 初期条件

$t=0 : v=v_0, \omega=\omega_0$

それ以外は一般に解ける。

$t=t_0$

v_0, ω_0

(第 178号)

京都大学理学部専門課程
受教簿



昭和 39 年入学 (化 学科)
姓名 小田垣 孝

物理學通論

学修科目

自昭和 42 年 4 月
至昭和 43 年 3 月

期間

湯川秀人
教授

担任教官

成績
単位数

4

湯川の中間子理論

物質

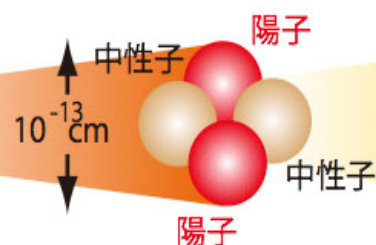


原子

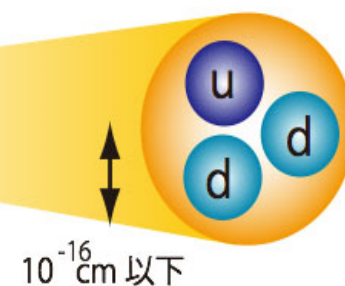
10^{-8} cm



原子核



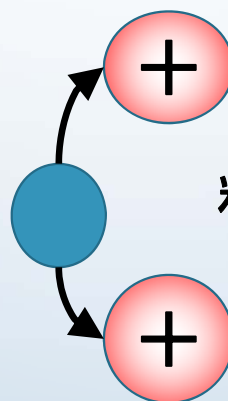
現在ではクォークで理解されている



陽子は+の電荷をもつのに近くにいる

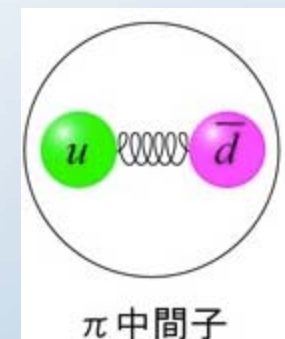
どう考えるかやね？

現象論



粒子をやりとりする

力が生じる



π 中間子

湯川の予言した性質を持つ粒子が実験で見つかった

物理学とは？

川本幸民「気海観瀾広義」(1855)

物理学とは何か

単純な原理から自然を読み解く

＝ 現象論→実体論→本質論

- ☆物理学は、自然現象を理解する枠組み。
- ☆その枠組みは、「**普遍性**」、「**予言性**」をもち、
「**単純**」でなければならない。
- ☆対象は、宇宙や物質に限らず人間、社会に及ぶ。¹¹

2. ガラスの歴史

身の回りの材料

(おおよその始まり)

紀元

20世紀

プラスチック

ステンレス

6世紀

ゴム

紙

5000年前

アスファルト

6000年前

セメント

9000年前

土器・陶器

~9000年前

鉄

5000年前

青銅

5000年前

ガラス製品

7000年前

ガラス

~30万年前

石¹³

30-40万年前

木材

30-40万年前

ネアンデルタール人

ホモ・エレクトウス

ホモ・サピエンス

世界のガラス

由布高原美術館より

1800~2000年前

ローマ

4000~4500年前

メソポタミア

2400~2600年前

エジプト



ローマングラス銀化瓶
東地中海沿岸域出土
1-2世紀

ローマ時代シリア地方で吹きガラス技法が発明され従来の一品生産から大量生産へ、貴重品から日常品へと変化していった。
器種についても今日我々が日常使用しているものはほとんど

んど全てが作られ中国、朝鮮、日本を含む全世界各国へ輸出されていた。我国ではガラスの虹色に輝く銀化色がとりわけ茶人に好まれ珍重されている。
[由水 常雄：ガラス入門より]



紅玉髄の玉
紅玉髄の玉
で採取した

メソポタミア
だが、資源が少
紅玉髄の首飾
ル国内で完成さ



アリュバロス型小壺
エジプト
紀元前6-5世紀

メソポタミアからその技法を導入したエジプトでは美しいコアガラスを千数百年間作り続けた。金属の芯金を14に耐火粘土で内型を作り乾燥固化したものの上に溶けたガラスを巻付け全体を覆い灰の中に入れて徐冷したのちに内部の芯金を引出し粘土をかき出して完成させたものである。天然の宝石ではかなえられない美しい器を人工的に作り出したという意味で宝石の器と同等の価値を持っていた。
[由水 常雄：ガラス入門より]

ガラスは日本でも古代から使われていた



黒曜石鏃(縄文時代)



勾玉(弥生時代)(輸入?)



正倉院白瑠璃の椀 (8c)
15

(ササン朝ペルシア?)

遣隋使(600-614) 遣唐使(630-894)

『延喜式(大蔵省式)』

四等官より下の構成員

- (1) 史生(ししょう、書記官)、雑使(ぞうし)、僉人(けんじん、使節の従者)
- (2) 訳語(やくご、通訳)、新羅・奄美等訳語、主神(神主)、医師、陰陽師(易占、天文観測)、卜部(うらべ、占い師)、射手(いて)、音声長(おんじょうちょう、楽長)
- (3) 知乗船事(ちじょうせんじ、船団管理者)、船師(船長)、船匠(船大工)、舵師(かじし、操舵長)、挟抄(かじとり、操舵手)、水手長(かこおさ)
- (4) 留学生(るがくしょう、長期留学生)、学問僧(長期留学僧)、請益生(しょうやくしょう、短期留学生)、還学僧(げんがくそう、短期留学僧)
- (5) 音声生(おんじょうしょう、楽師)、**玉生(ぎょくしょう、ガラス工人)**、鍛生(たんしょう、鍛冶鍛金工)、鑄生(ちゅうしょう、鑄物師)、細工生(さいくしょう、木工工人)

The background of the slide is a light blue gradient with several realistic water bubbles of various sizes scattered across it. Some bubbles are in the top left, some in the bottom right, and others in the center. The bubbles have highlights and shadows, giving them a 3D appearance.

3. 身の回いのガラス

ガラスは色々応用されている



グラス



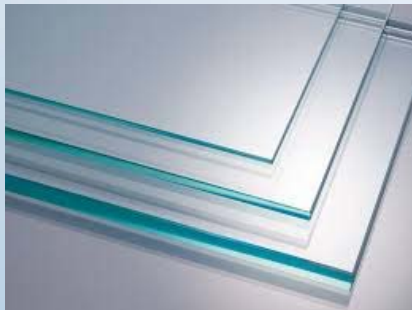
装飾品



ペンダント
スワロフスキー



めがね



板ガラス



実験器具



光ファイバー



iPhone6/6 Plus用
“ガラスライクフィルム”
株式会社ドスパラ

ガラスを食べる

飴



糖＋水

鰹節



タンパク質＋水

アイスクリーム



糖＋脂質＋タンパク質＋水

パスタ
天ぷら



デンプン＋水

京都祇園祭の夜店で

綿菓子



飴細工



鰹節の作り方

(株式会社 オクHPより)

生切り(なまぎり)



籠立て(かごたて)

煮蒸(しゃじく)



放冷



品仕キ



整形



間歇焙乾



削り(けずり)



カビ付け

天日干し



The background of the slide is a light blue gradient. It is decorated with several realistic water droplets and bubbles of various sizes, some with highlights and shadows, giving a fresh and clean feel.

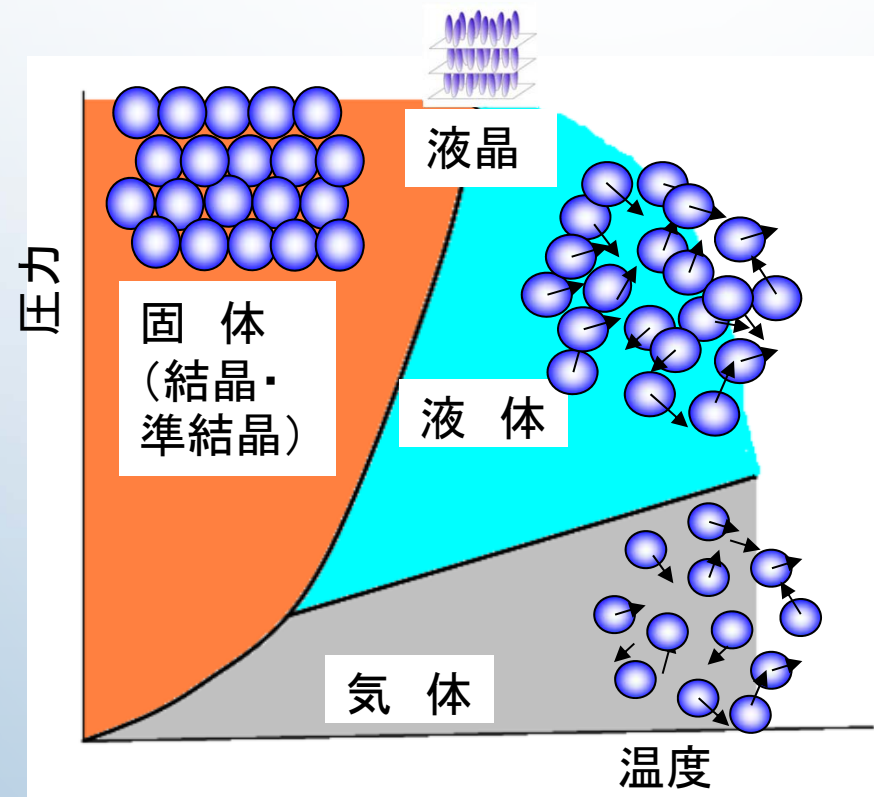
4.物質の三つの相と 過冷却液体・ガラス

物質の三つの相

相： 物理的・化学的に一様で、時間的に変化しない物質の状態

物質は、圧力と温度を与えると決まった相をとる。

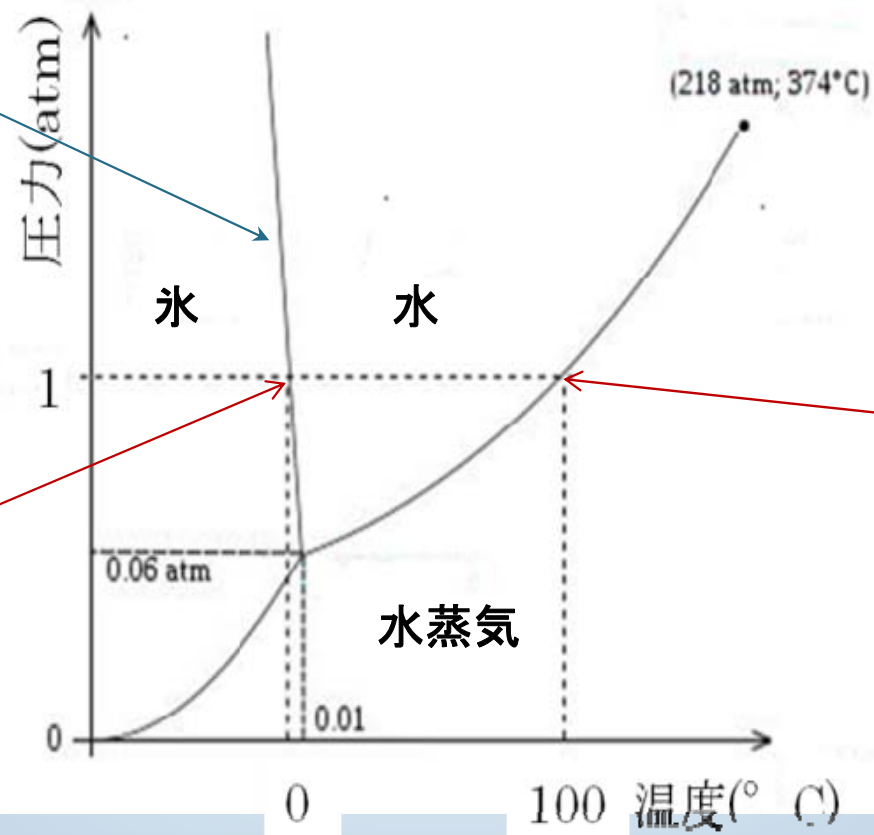
物質の三つの相



相図

水の相図

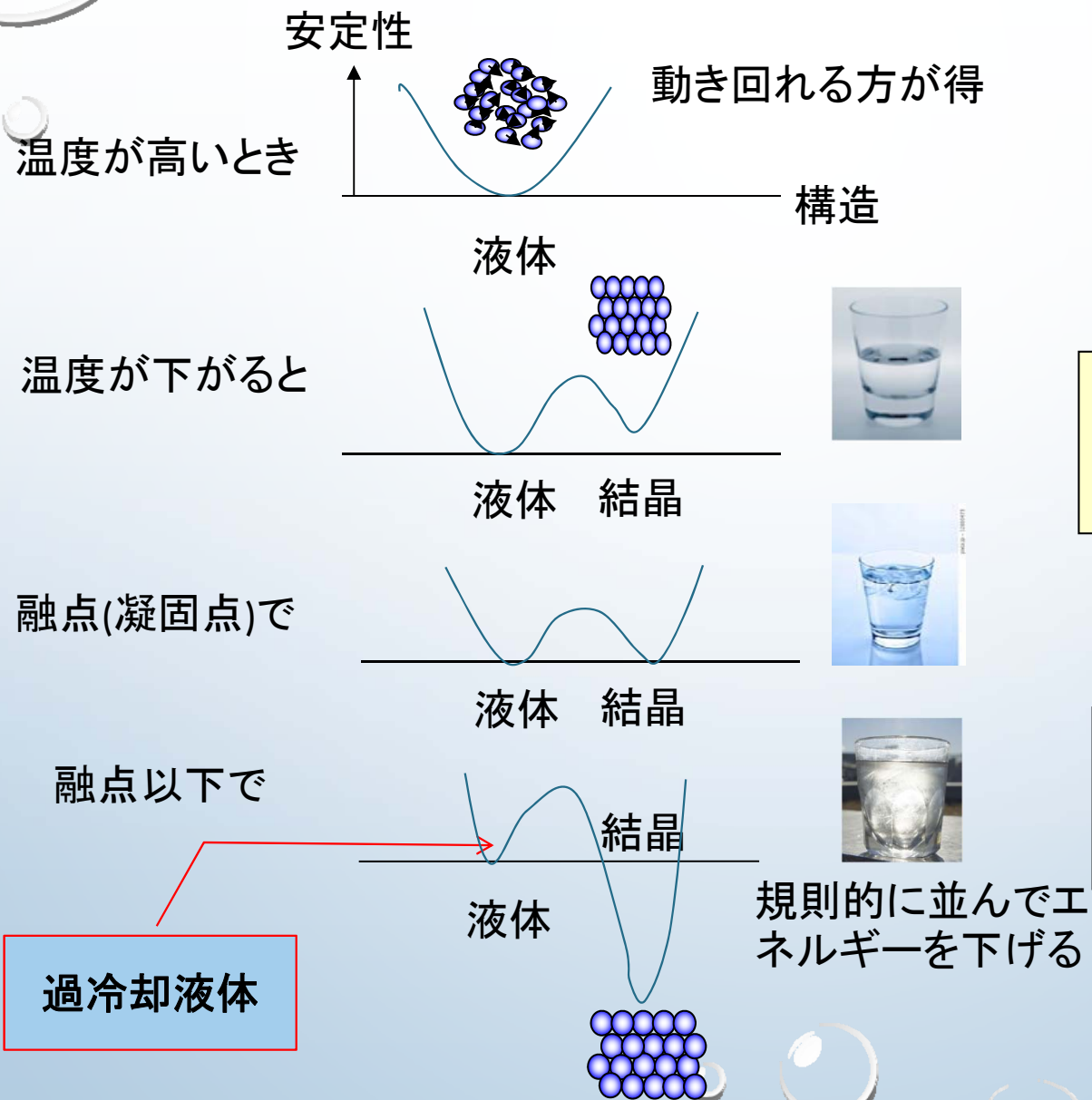
負の傾き: 圧力が上がると
融点が下がる(水の特徴)



融点

沸点

温度が下がると液体は何故結晶になるのか？



物質の安定性

(自由エネルギー)



できるだけ動き回れるように

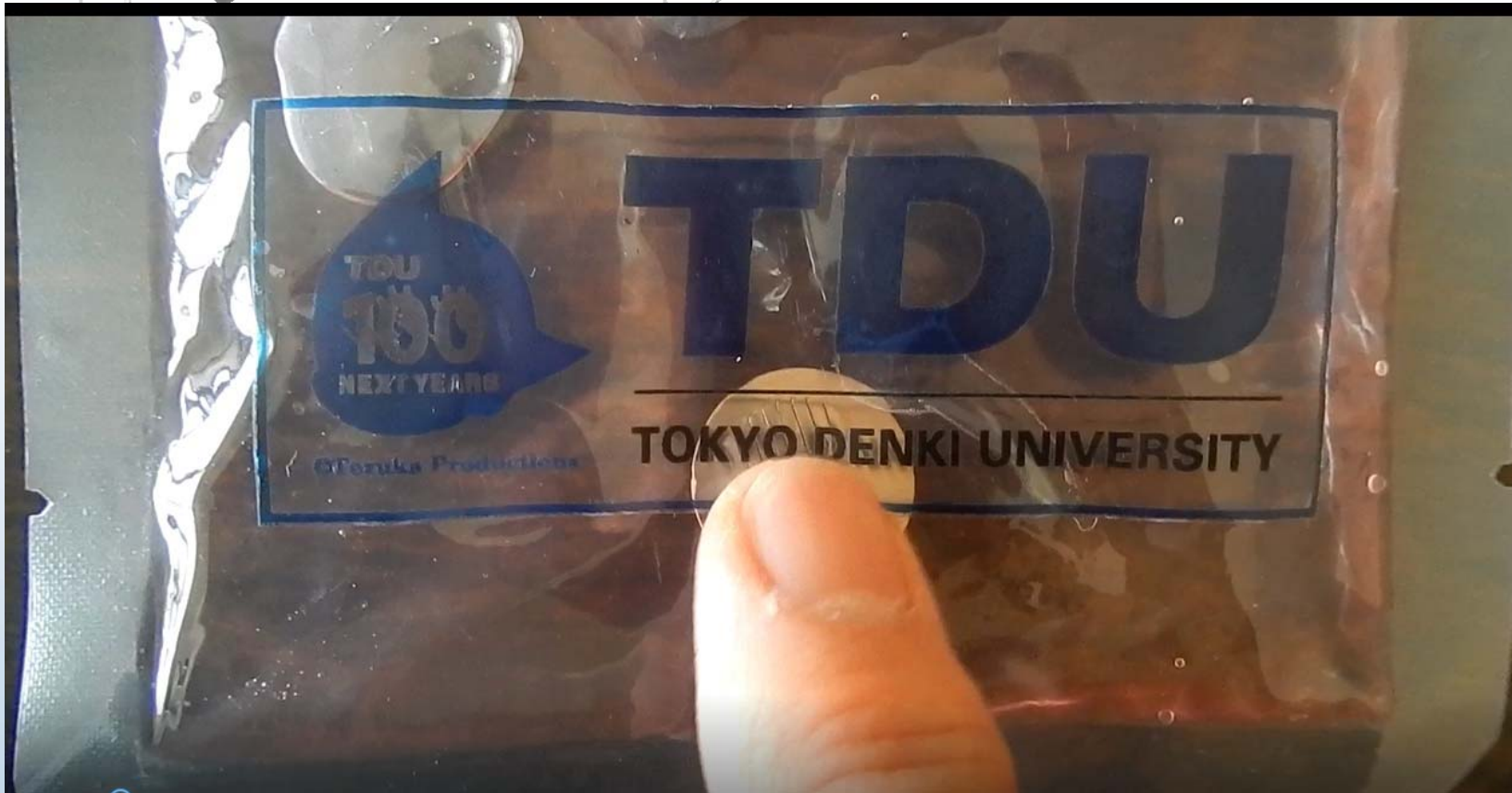
(高温ほど効果大)



できるだけエネルギーを低く

(規則的に並ぶとよい)

再利用できる(エコ)カイロ



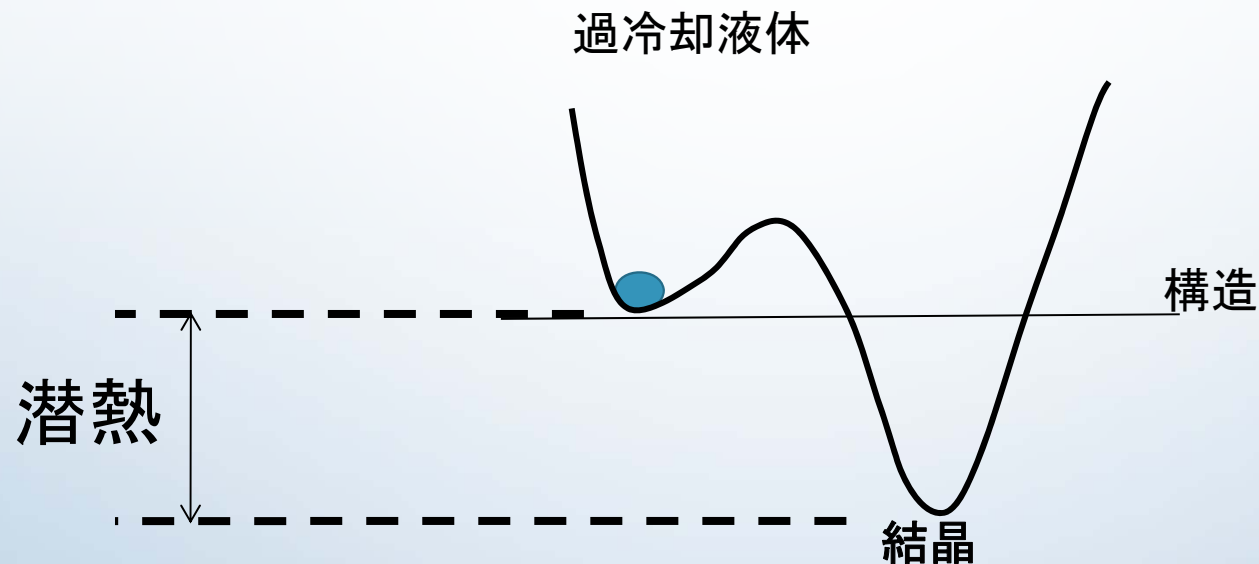
固体になれない液体=過冷却液体
トリガーで結晶化

過冷却液体と結晶化

融解点より少し下の温度では、
結晶化に何らかのきっかけが必要

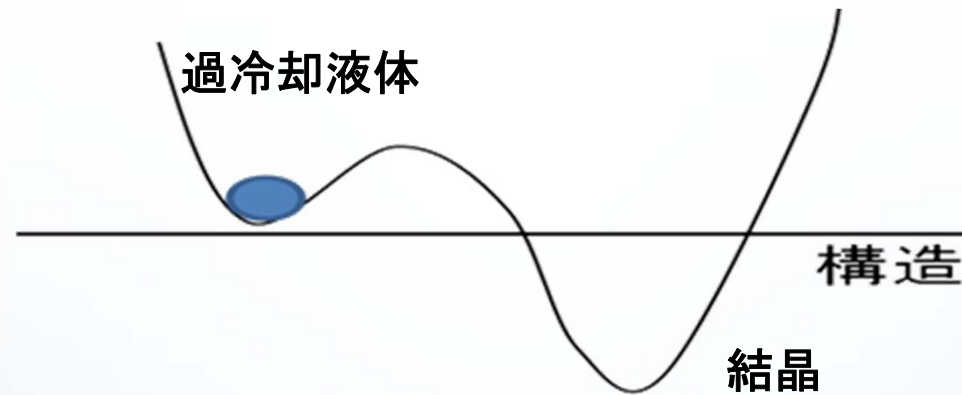


種をいれると結
晶化する

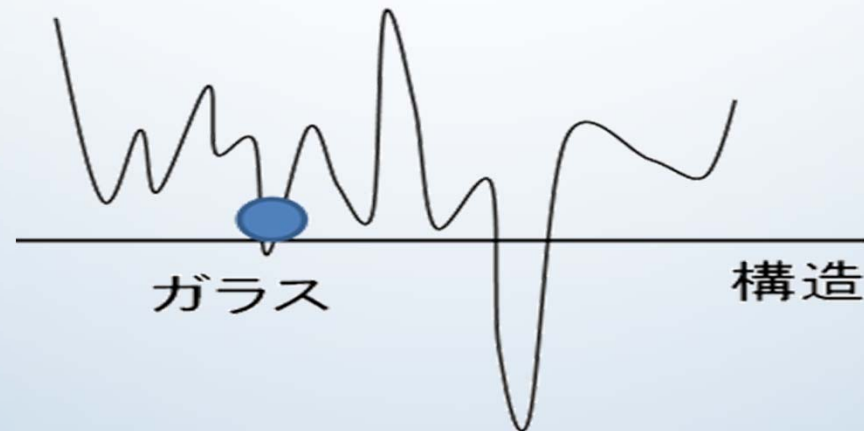


- ☆ 自由エネルギーの差が熱として放出される
- ☆ 融点以上に暖めてから、冷やすと同じことが起こる

過冷却液体のガラス化



急速に冷やすとそのまま固まり、ガラスになる。



- ・ガラスは、(準)安定的に長い間存在できる
- ・暖めると徐々に融け、過冷却液体あるいは結晶になる
- ・冷やすと徐々に固まってガラスになるものもある

The background of the slide features a light blue to white gradient. It is decorated with several realistic water droplets of various sizes, some with highlights and shadows, giving them a three-dimensional appearance. These droplets are scattered across the top and bottom portions of the slide.

5. 何が不思議か

ガラスと氷

Ice Mermaid K. Hirata

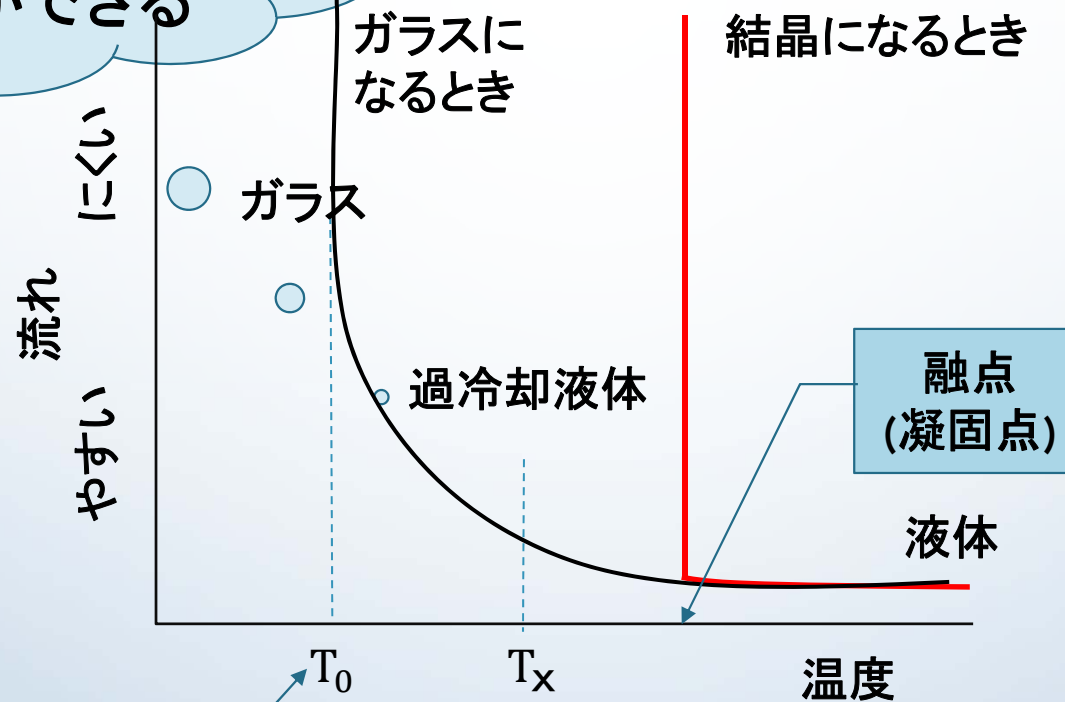


Glass Mermaid Mayflower glass



液体の流れにくさ(粘性)

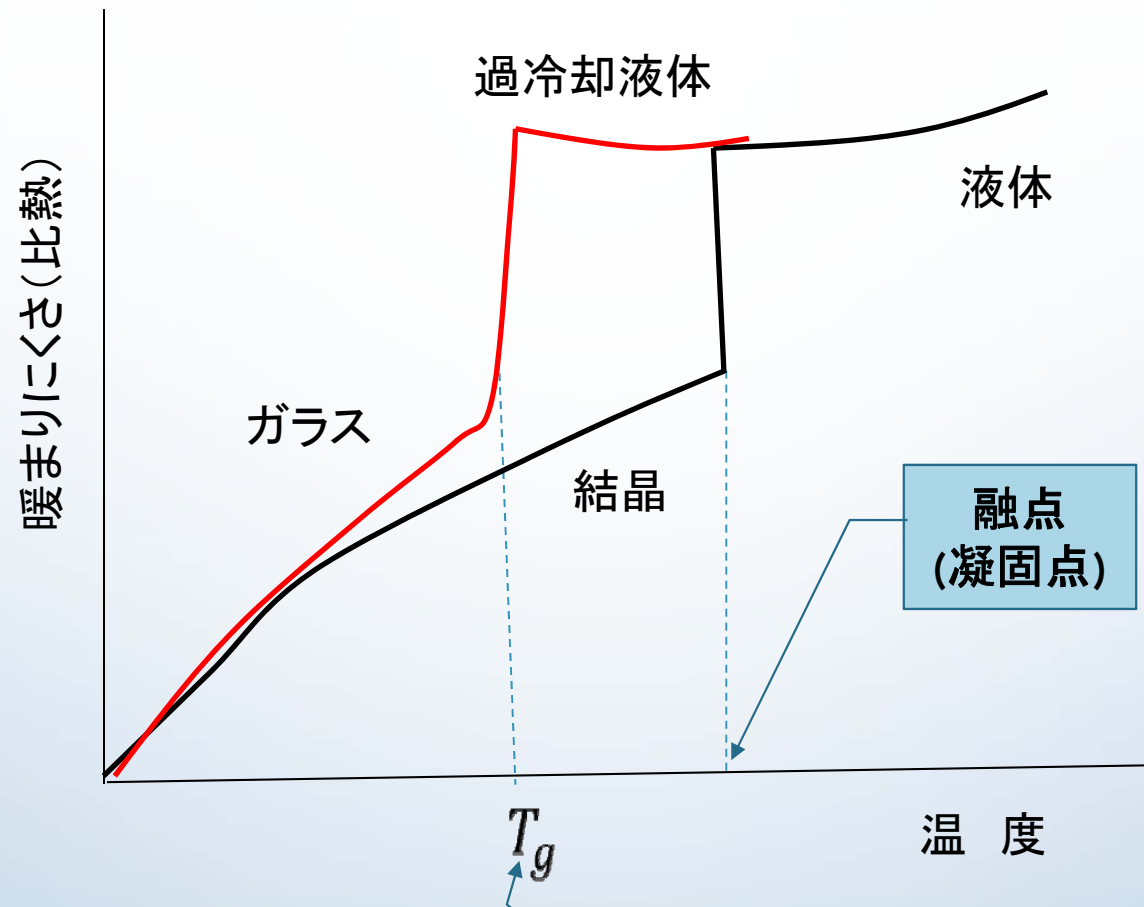
だらだら変化する
から細工ができる



構造が変化しなくなる

原子の運動に固体的振
る舞いが見え始める

温度を上げるのに必要な熱(比熱)

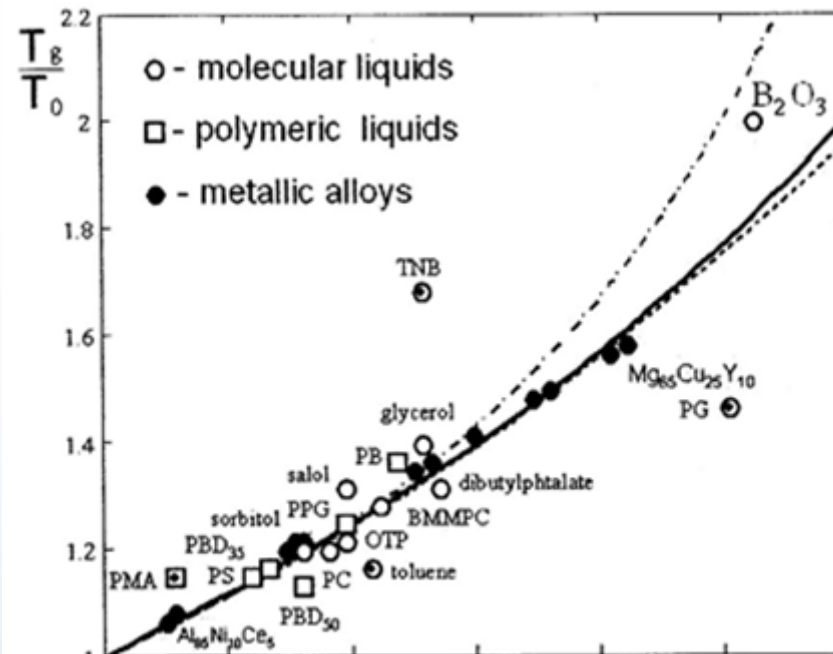


ガラス転移温度

$$T_0 < T_g < T_x$$

最初の発見
Gibson and Giauque, 1923

特性温度関係式



どう考えるかやね？

$$\frac{T_g}{T_0} = \frac{1}{2 - (T_x / T_g)} \rightarrow 2T_g = T_0 + T_x$$

みなさんはどう考えますか？³



6. 何をどう理解するか

提案されている三つの考え方



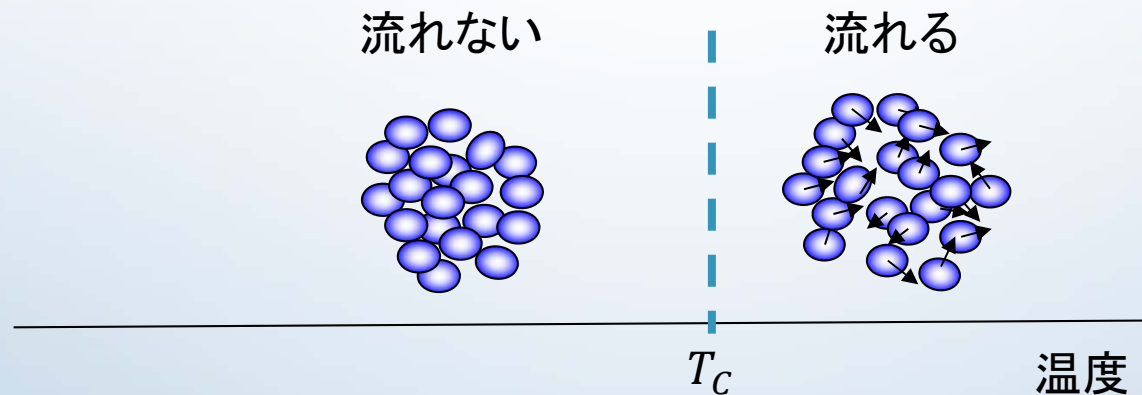
考え方: その1

運動の転移: 液体が流れなくなる

ドイツ+フランス+アメリカ+日本

☆液体の運動を密度と流れで記述する

☆液体の流れが止まるところが**理想的なガラス転移**



☆その他の異常は, 見かけ上のことにすぎない

$T_g < T_C < T_m$ (融点) が知られている

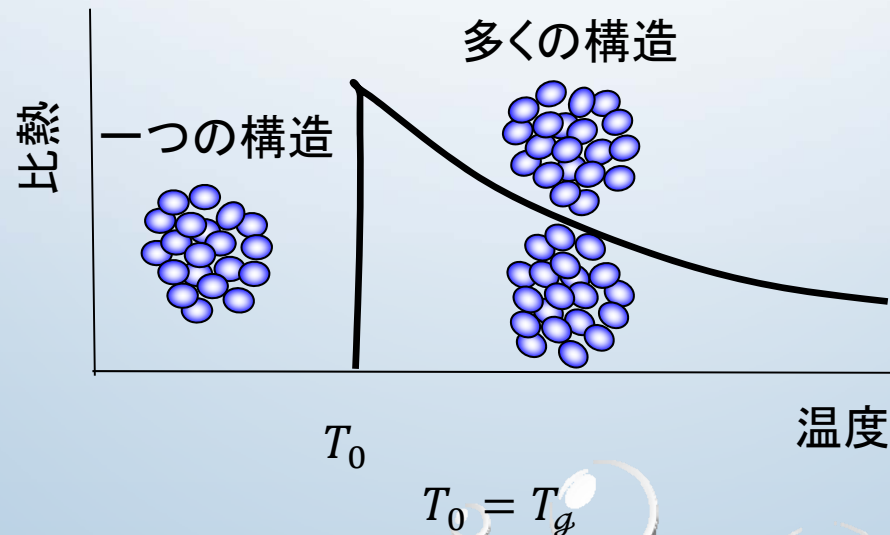
考え方: その2

結晶化と同じ; なり損ないの結晶 イタリア+フランス

☆ 沢山の状態から一つの状態に落ち込むのが

理想的なガラス転移

☆ そこで粘性が無限に大きくなり、比熱が跳ぶ

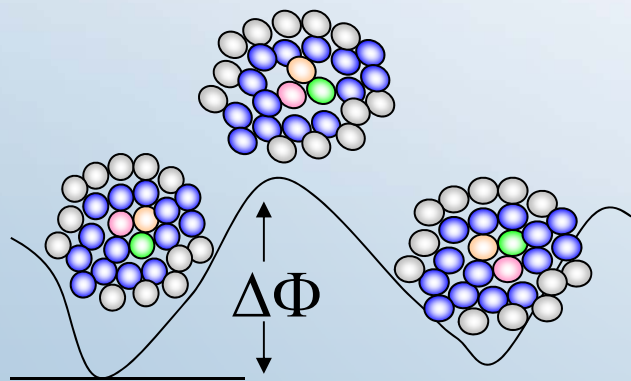
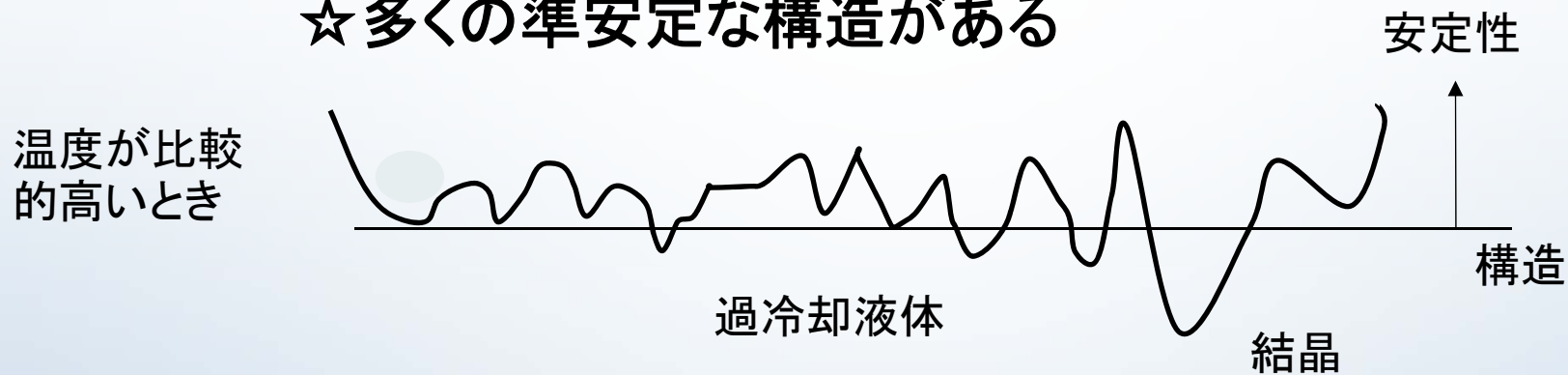


考え方: その3

ジャンプ運動による構造変化が遅くなる

小田垣

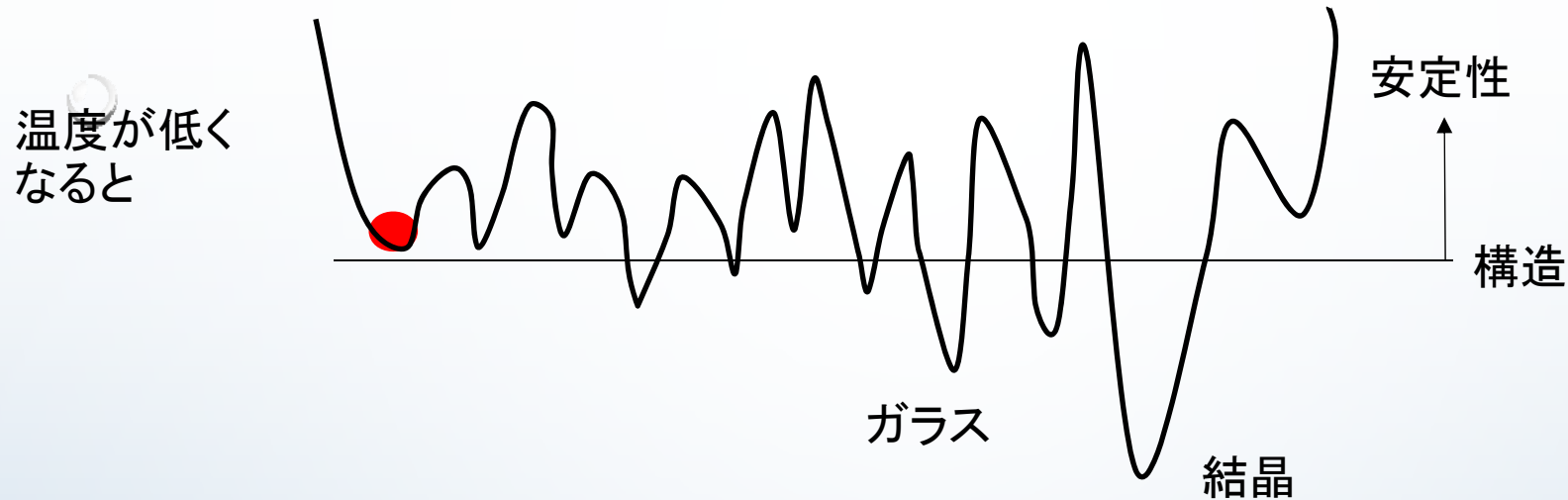
☆多くの準安定な構造がある



☆構造変化には周りの原子の協力が必要
☆温度が下がると、より多くの原子の協力が必要になり、構造変化が起こりにくくなる

ジャンプ運動による構造変化が遅くなる

小田垣



☆時々とどまることが多くなる温度 T_x

☆待ってもなかなか構造変化が起こらなくなる温度 T_g

ここで比熱の跳びが見える＝ガラス転移

☆構造変化がなくなる温度 T_0

特性温度の関係 $T_x + T_0 \approx 2T_g$

38

この考え方を自由エネルギーランドスケープ描像とよぶ

三つの考え方

1. 運動の転移：液体が流れなくなる
ドイツ＋フランス＋アメリカ＋日本

全ての実験は説明できない！

2. 結晶化と同じ；なり損ないの結晶
イタリア＋フランス

全ての実験は説明できない！

3. ジャンプ運動による構造変化が遅くなる
小田垣

全ての特徴を説明できる！

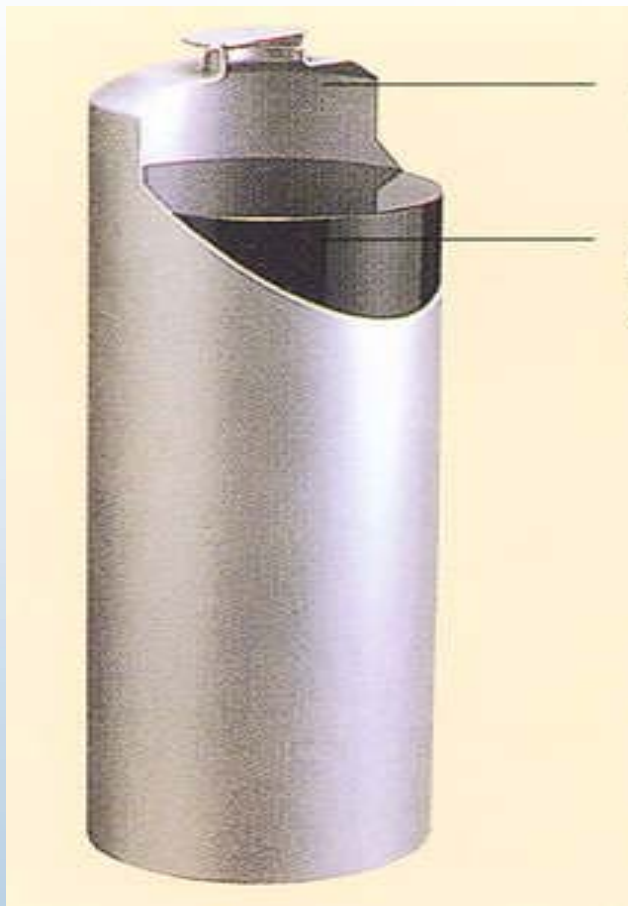
どの考え方が、現象を正しく説明しているか

欧米人は突然の転移
として理解したい

だらだらとした
変化による理
解は日本的

1. 今後の発展

ガラス固化体



★長寿命放射性核種を含む廃棄物をガラスとともに融解し、ステンレス製のキャニスター（容器）へ注入・固化、

★金属などの容器に封入し、地下深部に埋設する

★無害のレベルまで崩壊するには数万年以上の時間

★施設封鎖後1000年間程の情報管理が必要

☆ガラスが結晶化→破壊されることが危惧される

☆未来の人に莫大な負債を残すことになる

アミロイド病

病名

アルツハイマー型認知症

2型糖尿病

パーキンソン病

伝達性海綿状脳症 いわゆる「狂牛病」

ハンチントン病

甲状腺髄様癌

不整脈

動脈硬化症

関節リウマチ

大動脈中膜アミロイド

プロラクチン産生腫瘍

家族性アミロイドポリニューロパチー

遺伝的非ニューロパチー性アミロイドーシス

透析アミロイドーシス

フィンランド型アミロイドーシス

格子状角膜ジストロフィ

脳アミロイドアンギオパチー

脳アミロイドアンギオパチー (アイスランド型)

全身性ALアミロイドーシス (systemic AL amyloidosis)

タンパク質の特徴

ベータアミロイド^{[6][7][8]}

IAPP (Amylin)^{[9][10]}

α-シヌクレイン^[7]

プリオン^[11]

Huntingtin^{[12][13]}

カルシトニン^[14]

心房性ナトリウム利尿ペプチド

Apolipoprotein AI

Serum amyloid A

Medin

Prolactin

Transthyretin

リゾチーム

b2-Microglobulin

Gelsolin

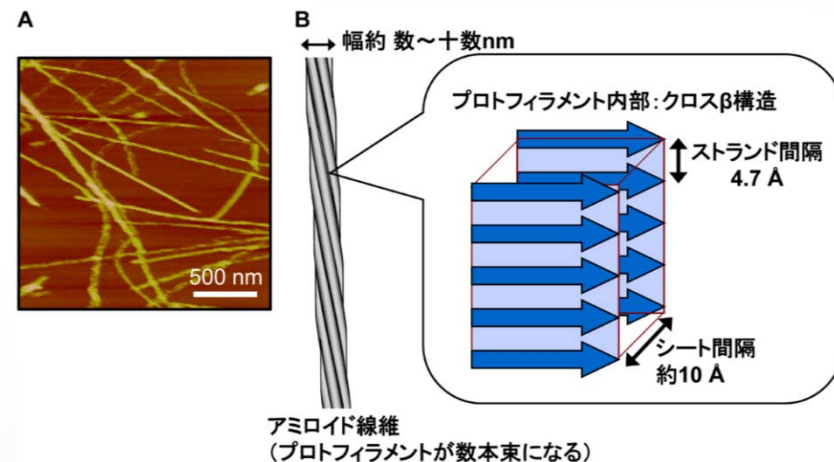
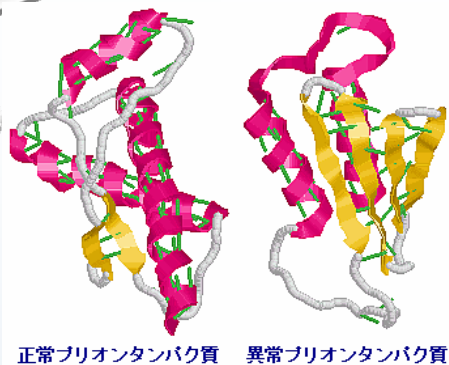
Keratoepithelin

Beta amyloid^[15]

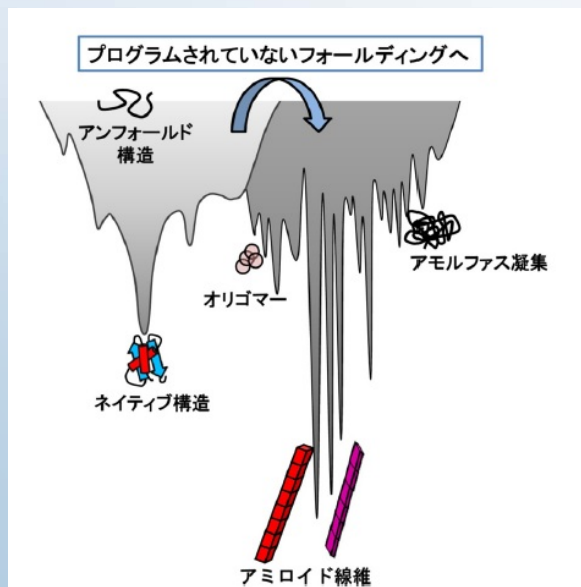
Cystatin

Immunoglobulin light chain AL^[16]

タンパク質のアミロイド線維化

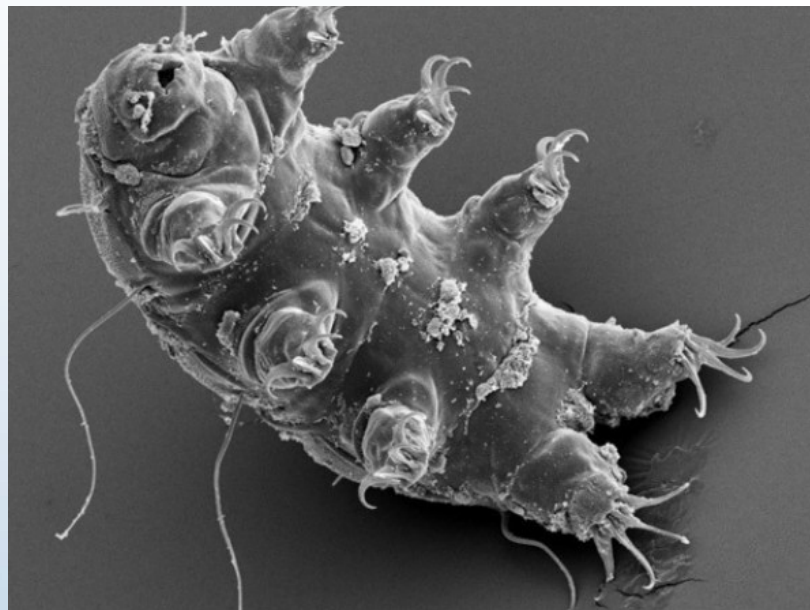


- ★ β シートが沢山でき、アミロイド線維が沈着して疾患を引き起こす
- ★ アミロイド線維は自己触媒的に増殖・伝搬する

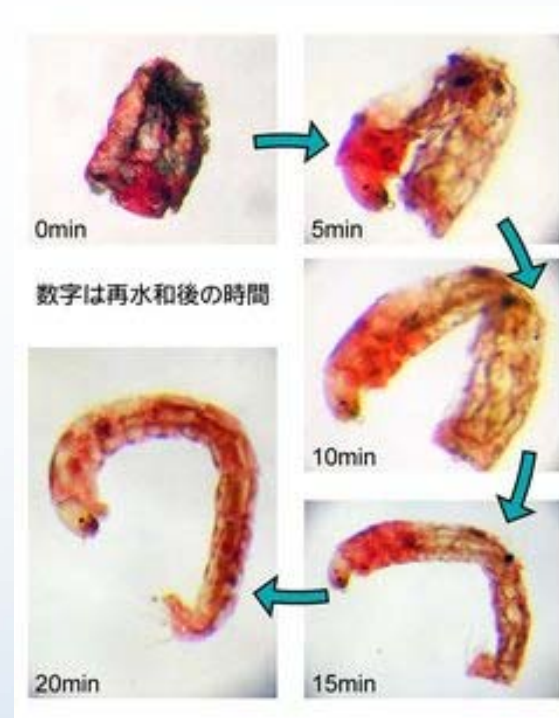


自由エネルギーランドスケープ描像に基づくアミロイド化過程の理論的研究は
今後の課題

クリプトビオシス(乾眠)



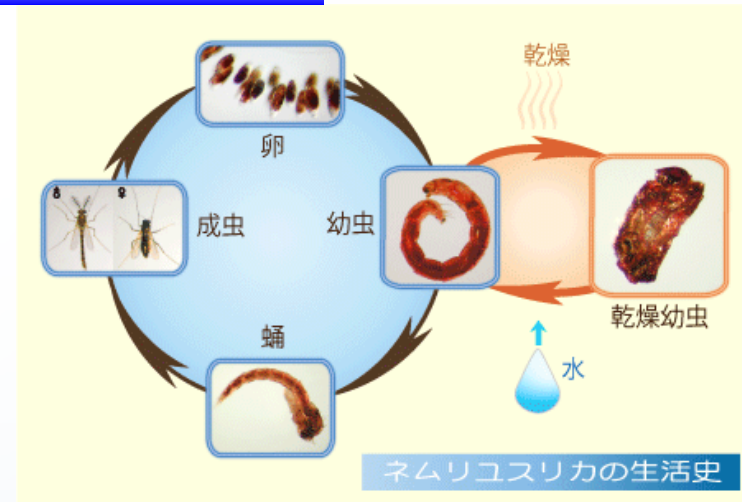
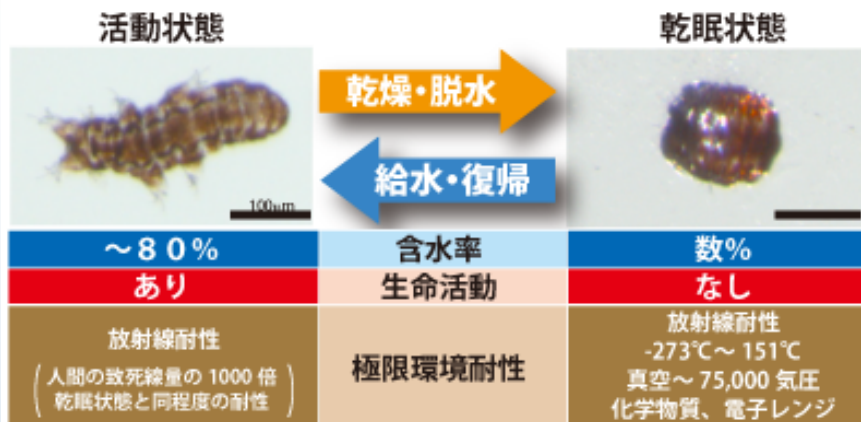
クマムシ



ネムリュスリカ

クリプトバイオシス

クマムシの乾眠能力と極限環境耐性

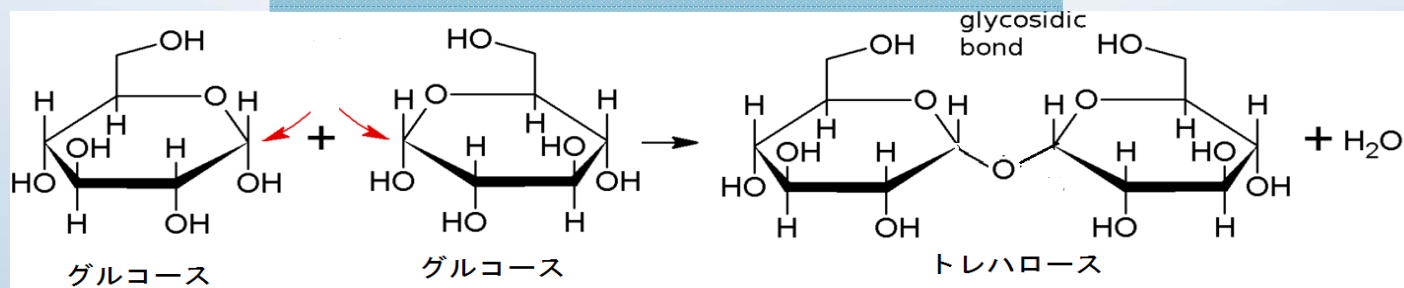


クマムシ

くまむし研究グループ

<https://youtu.be/v2SOCdkdXgs?t=10>

グルコース→トレハロース



☆トレハロースのガラス化？
 ☆ガラス化して細胞を保護？
 ☆人間に応用できれば……

東日本大震災(2011.3.11)は、科学のあり方を問いかけた

これまでの科学パラダイム

- (1) 知的好奇心は人間の固有のものである。
- (2) 科学は中立で、それ自身は悪ではなく、
使い方が悪いから負の側面が生じる。
- (3) 人間が望む科学・技術は必ず実現できる。



- (1) 自然環境のバランスの破壊
- (2) プラスチック・毒ガス・環境ホルモンなど、自然界に存在せず、かつ容易に分解されない有害物質の合成・排出
- (3) 放射性元素を分離・濃縮・分裂させ、自然界に存在しない核物質の生成・排出

科学者の責任

科学Vol.8 2 No.5 May 2012

「人間は自然を支配できる」というデカルトの主張に訣別する



新しい科学パラダイム

- (1) 地球上で得られる太陽エネルギー以上のエネルギーを頼りにしない
- (2) 地球環境に緩和時間の長い変化をもたらさない
- (3) 未来の技術を担保にしない
- (4) 生産者責任を負う

H.D. ソロー(アメリカの哲学者)の名言を振ると

“We must be as wise as the day we were born!”

The background is a light blue gradient with several realistic water droplets of various sizes scattered across it. Some droplets are in the upper left, some in the lower right, and others in the center. They have highlights and shadows, giving them a 3D appearance.

お わ り

ありがとうございました