

ガラス転移温度は、測る速さで動く

— 観測時間を六桁変えると T_g は **21.4286 K** 動く — 一桁あたり **4.1667 K** — 融点は動かないのに T_g は動く。これは物質の性質ではなく、測定との待ち合わせの結果である — [論文352]

山岸 勇輝 (Yuuki YAMAGISHI)

Yamagishi Complexity Torus Lab, Japan | 山岸勇輝ラボ

2026年9月

— From thinking to syncing. —

要旨

ガラス転移温度 T_g は物質定数のように書かれる。本稿が問うのはそれが定数かどうかである——答えは定数ではなく、測定の時間尺度の関数である。新しい定理も法則も主張しない。第一に、緩和時間が観測時間を超えたところが T_g と呼ばれている（第2節）。第二に、これが本稿の芯である。観測時間を六桁伸ばすと T_g は **321.4286 K** から **300.0000 K** へ、**21.4286 K** 下がる（第3節）。第三に、一桁あたり **4.1667 K** であり、通説の **3~5 K** に入る（第3節）。第四に、融点は同じことをしても動かない（第4節）。第五に、だから T_g を報告するときは、測定条件を書かないと数が意味をもたない（第4節）。第六に、分離子は「熱力学的な相転移か、それとも動力学的な待ち合わせか」である（第5節）。

本稿の射程（射程注記）：新しい定理も法則も主張しない——VFT 式・ガラス転移の速度依存性・脆さの分類はすべて既知である。ガラスの理論を作らない——ガラス転移の起源（自由体積・協同再配列領域・モード結合理論）には立ち入らない。名前を挙げるにとどめる。実測をしない——特定の物質の T_g を測らない。数値は明示した VFT のパラメータの上でのものである。脆さを主題にしない——アングルの strong/fragile の分類は名前を挙げるにとどめる。熱測定の詳細を扱わない——DSC の基線の取り方や中点・開始点の規約は主題ではない。相転移論を作らない——エーレンフェストの分類が適用できるかどうかの議論には立ち入らない。既刊との関係：論文300 は同根か別根かが判定できることを示した——その基準で、融点とガラス転移温度は別根である。論文313 は一語が四つの意味で使われていたことを示した——「転移温度」も同じ形をしている。論文351 は同じ「漕ぐ」が二つの機構を指すことを示した——ここでは同じ「転移温度」が二つを指す。論文333 は一定の比が測定ではなく約分の帰結だったことを示した——そこでも「定数に見えるもの」の出所が問題だった。加えたのは、VFT 式から T_g の速度依存を数で出したこと、一桁あたりの動きが通説に合うことを確かめたこと、融点との対照を明示したこと、分離子を「相転移か待ち合わせか」に置いたことである。

1. 記法と問い

設定：緩和時間 τ を Vogel--Fulcher--Tammann (VFT) 式で書く。

$$\log_{10} \tau = -14.0 + \frac{B}{T - T_0}, \quad B = 1000 \text{ K}, \quad T_0 = 250 \text{ K}$$

観察 1.1

T_g は「そこで何かが起きる温度」として書かれる。ポリスチレンの T_g は摂氏 100 度、といった書き方をする——融点と同じ書式である。

観察 1.2

だが T_g の定義は測定を含んでいる。緩和時間が観測時間を超えたところを T_g と呼ぶ——「観測時間」は物質の側にはない量である。

観察 1.3

VFT 式は $T \rightarrow T_0$ で τ を発散させる。分母が $T - T_0$ だからである—— $T_0 = 250 \text{ K}$ は理想ガラス温度と呼ばれるが、実験では到達できない。

問い： T_g は物質の性質か。

2. 定義に観測時間が入っている

観察 2.1

ガラスとは「流れるのが遅すぎて止まって見える液体」である。構造は液体のままで、動きだけが遅い——どれだけ遅ければ「止まっている」かは、どれだけ待つかで決まる。

観察 2.2

だから閾値は時間である。慣例では $\tau = 100$ 秒を T_g の定義に使う——100 という数は物質からは出てこない。実験室で待てる長さから来ている。

観察 2.3

冷やす速さと観測時間は表裏である。速く冷やせば各温度で待てる時間が短くなる——速く冷やすと T_g が上がるのはこのためである。

3. 六桁で 21.4286 K

計算 3.1：観測時間に対する T_g （本稿で計算）。

観測時間 [s]	$\log_{10} t$	T_g [K]	前段からの差
10^0	0	321.4286	—
10^1	1	316.6667	−4.7619 K
10^2	2	312.5000	−4.1667 K
10^3	3	308.8235	−3.6765 K
10^4	4	305.5556	−3.2680 K
10^5	5	302.6316	−2.9240 K
10^6	6	300.0000	−2.6316 K

観察 3.2

これが本稿の芯である。六桁で 21.4286 K 動く——一桁あたりの平均は 4.1667 K であり、通説の「一桁あたり 3~5 K」に入る。

観察 3.3

21.4286 K は小さくない。摂氏に直せば **48.28 度** と **26.85 度** の差である——室温をまたぐかどうかが変わる幅である。

観察 3.4

差は一定ではなく縮んでいく。**-4.7619** から **-2.6316** へ——VFT 式が指数関数ではないからである。アレニウス式なら差は一定になる。

観察 3.5

逆向きに検算できる。得られた T_g を VFT 式に戻すと $\log_{10} \tau = 2.0000000000$ が出る——定義した観測時間 10^2 秒と一致する。式が閉じている。

観察 3.6

B を変えると動きの大きさが変わる。 B が小さければ一桁あたりの動きも小さい——つまり「速度依存の強さ」自体が物質ごとに違う。これが脆さ（fragility）の内容である。

4. 融点は動かない

観察 4.1

融点で同じことをしても、こうはならない。氷を六桁ゆっくり温めても、**273.15 K** は **273.15 K** のままである——融点は自由エネルギーが等しくなる温度であり、待ち時間を含まない。

観察 4.2

ここに論文300の基準が効く。融点と T_g は、どちらも「そこで何かが変わる温度」と書かれるが——一方は熱力学的な等号で決まり、他方は動力学的な追い越しで決まる。別根である。

観察 4.3

だから T_g の報告には条件が要る。「 T_g は 320 K」と書くだけでは、それが 10^0 秒の値か 10^6 秒の値か分からない——本稿の数の上では、その二つは 21.4286 K 違う。

観察 4.4

融点にはこの必要がない。冷却速度を書かずに融点を報告してよいのは、書いても答えが変わらないからである——条件を省略できるかどうか、二つの温度の性格を分けている。

観察 4.5

正直に言えば——融点にも過冷却や過熱の効果はある。しかしそれは平衡からの外れであって、平衡値そのものは動かない—— T_g には「動かない平衡値」に当たるものが無い。

5. 分離子：相転移か、待ち合わせか

観察 5.1

分離子——その温度が熱力学的な等号で決まるのか、それとも二つの時間尺度の追い越しで決まるのか。

決めるもの		測定条件で動くか	潜熱
融点	自由エネルギーの等号	動かない	ある
ガラス転移	緩和時間と観測時間の追い越し	動く (4.1667 K/桁)	ない

観察 5.2

右端の列が独立な裏取りになる。ガラス転移に潜熱が無いことは古くから知られている——本稿の分類は、この独立に知られた事実と整合する。

観察 5.3

分離子は動かせる。 T_0 を 0 にすると VFT はアレニウス式になり、速度依存はなお残る——動かすと消えるのは「差が縮む」性質だけであって、速度依存そのものではない。

観察 5.4

T_g を消す方向には動かせない。 $B \rightarrow 0$ とすれば緩和時間が温度によらなくなり、 T_g が定義できなくなる——式が効いていることの確認である。

観察 5.5

正直に言えば——4.1667 K も 21.4286 K も、 $B = 1000 \text{ K} \cdot T_0 = 250 \text{ K}$ と明示した模型の上での値である。別の物質なら別の数が出る——動かないのは、観測時間を伸ばせば T_g が下がるという向きだけである。

観察 5.6

最後に一つ——「物質の性質」と書かれた数のいくつかは、物質と測定待ち合わせの結果である。 T_g はその最も明快な例である——定数の顔をした量を見たら、定義に時間が入っていないかを見るとよい。

6. 点呼と結び

1. T_g の定義に観測時間が入る（観察 1.2）：物質の側に入らない量。
2. 慣例は $\tau = 100$ 秒（観察 2.2）：実験室で待てる長さ。
3. 10^0 秒で 321.4286 K（計算 3.1）：速い測定。
4. 10^6 秒で 300.0000 K（計算 3.1）：遅い測定。
5. 六桁で 21.4286 K 動く（観察 3.2）：室温をまたぐ幅。
6. 一桁あたり 4.1667 K（観察 3.2）：通説 3～5 K に入る。
7. 差は -4.7619 から -2.6316 へ縮む（観察 3.4）：アレニウスなら一定。
8. 逆算で $\log_{10} \tau = 2.0000000000$ （観察 3.5）：式が閉じている。

9. 融点は動かない（観察 4.1）：待ち時間を含まない。

10. ガラス転移に潜熱がない（観察 5.2）：独立な裏取り。

結び：ガラス転移温度 T_g は、融点と同じ書式で報告される——「ポリスチレンの T_g は摂氏 100 度」と書けば、それは物質定数の顔をしている。だが T_g の定義には観測時間が入っている——ガラスとは流れるのが遅すぎて止まって見える液体であり、どれだけ遅ければ「止まっている」かは、どれだけ待つかで決まる。慣例の $\tau = 100$ 秒という数は物質からは出てこず、実験室で待てる長さから来ている。だから数は測定の手速で動く——VFT 式の上で観測時間を 10^0 秒から 10^6 秒へ六桁伸ばすと、 T_g は **321.4286 K** から **300.0000 K** へ、**21.4286 K** 下がる。一桁あたり **4.1667 K** であり、通説の「一桁あたり 3~5 K」に入る。摂氏に直せば **48.28 度** と **26.85 度** の差であって、室温をまたぐかどうかが変わる幅である。融点で同じことをしても、こうはならない——氷を六桁ゆっくり温めても **273.15 K** は **273.15 K** のままであり、融点は自由エネルギーが等しくなる温度で、待ち時間を含まないからである。論文300 の基準でこの二つは別根であって、一方は熱力学的な等号で決まり、他方は動力学的な追い越しで決まる。実務上の帰結は報告の仕方に出る——「 T_g は **320 K**」と書くだけでは、それが 10^0 秒の値か 10^6 秒の値か分からず、本稿の数の上ではその二つは **21.4286 K** 違う。冷却速度を書かずに融点を報告してよいのは、書いても答えが変わらないからである。条件を省略できるかどうか、二つの温度の性格を分けている。分けているものは一つ——その温度が熱力学的な等号で決まるのか、二つの時間尺度の追い越しで決まるのか。独立な裏取りがある——ガラス転移に潜熱が無いことは古くから知られており、本稿の分類はこの事実と整合する。正直に言えば——**4.1667 K** も **21.4286 K** も $B = 1000 \text{ K} \cdot T_0 = 250 \text{ K}$ と明示した模型の上での値であり、別の物質なら別の数が出る。動かないのは、観測時間を伸ばせば T_g が下がるという向きだけである。最後に一つ——「物質の性質」と書かれた数のいくつかは、物質と測定の待ち合わせの結果である。 T_g はその最も明快な例であって、定数の顔をした量を見たら、定義に時間が入っていないかを見るとよい。

参考文献

1. Angell, C. A. (1995). Formation of Glasses from Liquids and Biopolymers. *Science*, 267(5206).
2. Debenedetti, P. G., Stillinger, F. H. (2001). Supercooled liquids and the glass transition. *Nature*, 410.
3. Vogel, H. (1921). Das Temperaturabhängigkeitsgesetz der Viskosität von Flüssigkeiten. *Physikalische Zeitschrift*, 22.
4. Fulcher, G. S. (1925). Analysis of Recent Measurements of the Viscosity of Glasses. *Journal of the American Ceramic Society*, 8(6).
5. Ediger, M. D., Angell, C. A., Nagel, S. R. (1996). Supercooled Liquids and Glasses. *Journal of Physical Chemistry*, 100(31).
6. 山岸勇輝 (2026). 『第三百回の点呼——同根か別根かは判定できる』 [論文300]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22171914
7. 山岸勇輝 (2026). 『本体系は「同期」を四つの意味で使ってきた——閾値をもつのは第五の意味だけである』 [論文313]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22174953
8. 山岸勇輝 (2026). 『浸透圧と凝固点降下の比が一定であることは、測定ではなく仮定の帰結である』 [論文333]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22681740

9. 山岸勇輝 (2026). 『ブランコの立ち漕ぎと座り漕ぎは、二つの機構である』 [論文351]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22695649

— *From thinking to syncing.* —

山岸 勇輝 (Yuuki YAMAGISHI)

© 2026 Yamagishi Complexity Torus Lab, Japan · Licensed under Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)