

原子番号も電荷も電子配置も同じで、質量だけを変えたら、速度が7倍動いた

— C-H と C-D の振動数比は **0.734230** で、 $1/\sqrt{2} = 0.707107$ とは一致しない — 零点エネルギーの差 **4.7690** kJ/mol が、室温で $k_H/k_D = 6.8468$ を作る — [論文341]

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

水素を重水素に置き換えると、化学反応の速度が変わる。本稿が問うのは、質量だけを変えて、なぜ速度が動くのかである——答は、止まっているときのエネルギーが質量で決まっているからである。新しい数学定理も新しい法則も主張しない。第一に、C-D の伸縮振動数は **2202.69** cm^{-1} で、C-H の **0.734230** 倍である（第2節）。第二に、その比は $1/\sqrt{2} = 0.707107$ とは一致しない。換算質量に炭素の **12** が入るからである（第2節）。第三に、これが本稿の芯である。差を作っているのは反応の途中ではなく、反応前の静止状態である（第3節）。第四に、零点エネルギーの差 **4.7690** kJ/mol が、室温で $k_H/k_D = 6.8468$ を作る（第3節）。第五に、温度で大きく動く。**0** °C で **8.1650**、**100** °C で **4.6512**（第4節）。第六に、分離子は「切れる結合に軽い原子が付いているか」である（第5節）。

本稿の射程（射程注記）：新しい数学定理も新しい法則も主張しない——調和振動子の零点エネルギー、換算質量、一次速度論的同位体効果はいずれも標準的である。反応機構を決めない——特定の反応の律速段階や遷移状態の構造には立ち入らない。半古典的な上限だけを見る。トンネル効果を扱わない——低温で観測される k_H/k_D の異常な大きさはトンネル効果によるが、本稿は零点エネルギーだけで説明できる範囲に留まる。触れるにとどめる。二次同位体効果を扱わない——切れない結合の置換による効果には入らない。平衡同位体効果を扱わない——速度ではなく平衡定数がずれる話は主題にしない。非調和性を扱わない——実際の振動は調和的でなく、 3000 cm^{-1} は代表値である。既刊との関係：論文314 は「定数は変わったか」と問える相手は一つしかないとした——そこでは無次元の定数だけが問える相手だった。本稿は逆に、同じ元素の中で質量だけを動かして何が変わるかを問う。定数を動かすのではなく、標本を取り替える。論文283 は同じ「 Q を二倍」が三機構で 10^{17} 倍ちがうとした——そこは原子核で、本稿は化学結合である。どちらも「質量やエネルギーの小さな差が、速度に指数で届く」型である。論文300 は同根か別根かは判定できると示した——本稿では同位体効果と温度効果が同じ指数の中に同居している。論文272 は同じ「2 倍に感じる」が刺激の側で 6.70 倍ひらくとした——そこでも小さな入力差が大きな出力差になっていた。加えたのは振動数比を換算質量から計算し、 $1/\sqrt{2}$ と一致しない理由を数で示したこと、零点エネルギー差から k_H/k_D を三つの温度で出したこと、O-H と炭素 12/13 で同じ計算をして効果の大きさが質量比で決まることを確かめたこと、分離子を「切れる結合に軽い原子が付いているか」に置いたことである。

1. 記法と問い

設定：水素 (^1H 、質量 1.007825) を重水素 (^2H 、質量 2.014102) に置き換える。原子番号も電荷も電子配置も変わらない——化学的な性質は同じはずである。

観察 1.1

ところが反応速度が変わる。典型的な一次速度論的同位体効果は 6 倍から 8 倍である——電子が同じなのに、速度が桁に近く動く。

観察 1.2

変わったのは質量だけである。質量は、量子力学の中で振動数に入る——そして振動数は、止まっているときのエネルギーに入る。

観察 1.3

本稿の測り方を先に固定する。C--H 伸縮を 3000 cm^{-1} の代表値とし、調和振動子として扱う——非調和性は無視するので、本稿の値は目安であって精密値ではない。

問い：質量だけを変えて、なぜ速度が動くのか。

2. 振動数比は 0.734230 で、 $1/\sqrt{2}$ ではない

設定：二原子の伸縮振動の振動数は $\nu \propto \sqrt{k/\mu}$ である。 k はばね定数（電子が決める）、 $\mu = m_1m_2/(m_1 + m_2)$ は換算質量である。同位体置換では k が変わらないので、 ν の比は $\sqrt{\mu_H/\mu_D}$ だけで決まる。

検算 2.1：C--H と C--D で計算する（本稿で計算）。

量	値
C-H 伸縮（代表値）	3000.00 cm^{-1}
振動数比 $\sqrt{\mu_{CH}/\mu_{CD}}$	0.734230
C-D 伸縮	2202.6900 cm^{-1}
素朴な $1/\sqrt{2}$	0.707107

観察 2.2

0.734230 は $1/\sqrt{2} = 0.707107$ とは一致しない。質量が二倍になったのだから $1/\sqrt{2}$ だと思いたくなるが——振動しているのは水素だけではなく、炭素も少し動くからである。

観察 2.3

換算質量が、その「少し」を数にしている。 $\mu_{CH} = 0.929740$ 、 $\mu_{CD} = 1.724636$ で、比は 1.854965 であって 2 ではない——炭素の 12 が、質量比の二倍を 1.854965 倍に薄めている。

観察 2.4

相手の原子が重いほど、 $1/\sqrt{2}$ に近づく。O--H / O--D で計算すると 0.728010 で、C--H / C--D の 0.734230 より $1/\sqrt{2}$ に近い——酸素の 16 のほうが炭素の 12 より動きにくいからである。

観察 2.5

逆に、重い原子どうしなら効果はほとんど消える。炭素 12 と炭素 13 では比が 0.980520 である——2 パーセントしか変わらない。同位体効果が水素で大きいのは、質量比が 2 倍もあるからである。

3. 芯：差を作っているのは、反応前の静止状態である

設定：量子力学では、絶対零度でも振動が止まらない。最低の状態でも $E_0 = \frac{1}{2} h\nu$ を持つ——零点エネルギーである。

観察 3.1

これが本稿の芯である。C--D は振動数が低いので、零点エネルギーも低い——つまり C--D のほうが、はじめから深い井戸の底にいる。結合を切るのに、余分に登らねばならない。

検算 3.2：零点エネルギーの差を計算する（本稿で計算）。

$$\Delta E_0 = \frac{1}{2} hc (\nu_{CH} - \nu_{CD}) N_A = 4.7690 \text{ kJ/mol}$$

観察 3.3

これが活性化エネルギーの差になる。遷移状態でその振動が完全に失われるなら、活性化障壁の差はちょうど零点エネルギーの差になる——速度比はアレニウス因子で $k_H/k_D = \exp(\Delta E_0/RT)$ である。

検算 3.4：三つの温度で速度比を出す（本稿で計算）。

温度	T [K]	k_H/k_D
0 °C	273.15	8.1650
25 °C	298.15	6.8468
100 °C	373.15	4.6512

観察 3.5

自己検査——室温の 6.8468 は、通説の一次同位体効果 6～8 倍の中に入る。代表値 3000 cm^{-1} から出した値が、独立に知られている範囲に落ちる。

観察 3.6

4.7690 kJ/mol は、化学反応としては小さい。典型的な活性化エネルギーは 50 から 150 kJ/mol である——5 kJ/mol 未満の差が、速度を 7 倍動かしている。指数の中に入るからである。

観察 3.7

そして差は「反応の途中」にはない。反応の道筋も、遷移状態の形も、電子が決めるので同位体で変わらない——変わっているのは出発点の高さだけである。同じ山を登るのに、片方だけが低い場所から出発している。

4. 温度が効くのは、差が指数の中にあるからである

観察 4.1

0 °C から 100 °C で、効果は 8.1650 から 4.6512 に落ちる。1.7555 分の 1 である——温度を上げると、4.7690 kJ/mol という差が相対的に小さくなる。

観察 4.2

高温では同位体効果が消える。 RT が ΔE_0 より十分大きくなれば $\exp(\Delta E_0/RT) \rightarrow 1$ である——同位体効果は、量子効果が熱に埋もれるまでの現象である。

観察 4.3

逆に低温では大きくなる。ただし実測はこの式が予想するよりさらに大きくなることもある——トンネル効果が効くからで、本稿の式では説明できない。本稿の値は、トンネルが無い場合の目安である。

観察 4.4

ここが正直に書くべき境目である。 k_H/k_D が 7 を大きく超えたら、それは零点エネルギーだけでは説明できない——数が上限を超えたこと自体が、別の機構の証拠になる。本稿の 6.8468 は、その上限を与える値である。

観察 4.5

論文283 との位置関係。283 は同じ「 Q を二倍」がアルファ崩壊で 5.69×10^{18} 倍、ベータで 32 倍、ガンマで 8 倍になると書いた——そこでも小さな入力差が指数を通して巨大な出力差になっていた。原子核と化学結合で、桁は 17 ちがうが構図が同じである。

5. 分離子：切れる結合に、軽い原子が付いているか

観察 5.1

分離子——置換した原子が、律速段階で切れる結合の上にいるか、いないか。

置換の位置		零点エネルギーの差	k_H/k_D
一次同位体効果	切れる結合の上	4.7690 kJ/mol	6.8468
二次同位体効果	切れない位置	ずっと小さい	1.1 程度

観察 5.2

だから同位体効果は、機構を測る道具になる。 k_H/k_D を測って 6 を超えていれば、その水素が律速段階で切れていると分かる——分子の中のどこで反応が起きているかを、外から言い当てられる。

観察 5.3

これは論文314 の裏返しである。314 は「定数は変わったか」と問える相手が一つしかないと書いた——そこでは定数を動かすことが問題だった。本稿では定数（電子の性質）は動かさず、標本の質量だけを取り替えている。変えられるものが違う。

観察 5.4

分離子は動かせる。分子の別の位置を重水素にすれば、同じ分子で効果が 6.8468 から 1.1 程度に落ちる——どこを置換したかで、答が変わる。

観察 5.5

正直に書くべき点——本稿は遷移状態でその振動が完全に失われると仮定している。実際には部分的にしか失われないので、6.8468 は上限であって予言値ではない——実測はこれより小さくなるのが普通である。

観察 5.6

最後に一つ——ここで動いたのは、化学の外にある量である。原子核の質量は、化学が扱わないところで決まっている——化学が「同じ元素」と呼ぶものの中に、化学が説明しない差が残っていて、それが速度を 7 倍動かしている。

6. 点呼と結び

1. 振動数比 0.734230（検算2.1）：C--D は 2202.6900 cm^{-1} 。
2. $1/\sqrt{2} = 0.707107$ とは一致しない（観察2.2）：炭素も動くから。
3. 換算質量の比は 1.854965 で 2 ではない（観察2.3）：炭素の 12 が薄めている。

4. O--H/O--D は **0.728010** (観察2.4) : 相手が重いほど $1/\sqrt{2}$ に近い。
5. 炭素 12/13 では **0.980520** (観察2.5) : **2** パーセントしか違わない。
6. 零点エネルギーの差 **4.7690 kJ/mol** (検算3.2) : 活性化障壁の差になる。
7. 室温で $k_H/k_D = \mathbf{6.8468}$ (検算3.4) : 通説の **6~8** に入る。
8. **5 kJ/mol** 未満が速度を **7** 倍動かす (観察3.6) : 指数の中に入るから。
9. **0 °C** で **8.1650**、**100 °C** で **4.6512** (検算3.4) : **1.7555** 分の **1**。
10. **7** を大きく超えたらトンネル効果 (観察4.4) : 上限を超えたことが証拠。

結び：水素を重水素に置き換えると、原子番号も電荷も電子配置も同じなのに、反応速度が **7** 倍動く——変わったのは質量だけである。質量は振動数に入る—— $\nu \propto \sqrt{k/\mu}$ で、同位体置換では k が変わらないので比は換算質量だけで決まる。C--D は **2202.6900 cm⁻¹**、比は **0.734230** である。質量が二倍だから $1/\sqrt{2} = 0.707107$ かと思うと合わない——振動しているのは水素だけではなく炭素も少し動くので、換算質量の比は **1.854965** であって **2** ではないからである。相手が重いほど $1/\sqrt{2}$ に近づき (O--H/O--D で **0.728010**)、重い原子どうしなら効果はほぼ消える (炭素 12/13 で **0.980520**)。そして差を作っているのは、反応の途中ではない——絶対零度でも振動は止まらず、 $E_0 = \frac{1}{2} h\nu$ が残る。C--D は振動数が低いぶん零点エネルギーも低く、はじめから深い井戸の底にいる。差は **4.7690 kJ/mol** で、これがそのまま活性化障壁の差になる。反応の道筋も遷移状態の形も電子が決めるので同位体で変わらず、変わっているのは出発点の高さだけである。同じ山を登るのに、片方だけが低い場所から出発している。**4.7690 kJ/mol** は化学反応としては小さい——典型的な活性化エネルギーは **50** から **150 kJ/mol** である。**5 kJ/mol** 未満の差が速度を **7** 倍動かすのは、それが指数の中に入るからである。室温で $k_H/k_D = \mathbf{6.8468}$ 、**0 °C** で **8.1650**、**100 °C** で **4.6512**——温度を上げれば RT が差を飲み込み、同位体効果は消えていく。分けるものは一つ——置換した原子が、律速段階で切れる結合の上にいるかどうか。切れる位置なら **6.8468**、切れない位置なら **1.1** 程度である——だから k_H/k_D を測れば、分子のどこで反応が起きているかを外から言い当てられる。正直に書いておく——本稿は遷移状態でその振動が完全に失われると仮定しており、**6.8468** は上限であって予言値ではない。実測はこれより小さくなるのが普通である。逆に **7** を大きく超えたら零点エネルギーだけでは説明できず、それ自体がトンネル効果の証拠になる。最後に一つ——ここで動いたのは、化学の外にある量である。原子核の質量は、化学が扱わないところで決まっている。化学が「同じ元素」と呼ぶものの中に、化学が説明しない差が残っていて、それが速度を **7** 倍動かしている。

参考文献

-
1. Urey, H. C., Brickwedde, F. G., Murphy, G. M. (1932). A Hydrogen Isotope of Mass 2. *Physical Review*, 39(1).
 2. Bigeleisen, J., Mayer, M. G. (1947). Calculation of Equilibrium Constants for Isotopic Exchange Reactions. *The Journal of Chemical Physics*, 15(5).
 3. Melander, L., Saunders, W. H. (1980). *Reaction Rates of Isotopic Molecules*. New York: Wiley.

4. Westheimer, F. H. (1961). The Magnitude of the Primary Kinetic Isotope Effect for Compounds of Hydrogen and Deuterium. *Chemical Reviews*, 61(3).
5. Bell, R. P. (1980). *The Tunnel Effect in Chemistry*. London: Chapman and Hall.
6. 山岸勇輝 (2026). 同じ「2 倍に感じる」が、刺激の側では 6.70 倍ひらく [論文272]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22169965
7. 山岸勇輝 (2026). 同じ「 Q を二倍にする」が、 5.69×10^{18} 倍と 32 倍と 8 倍になる [論文283]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22171127
8. 山岸勇輝 (2026). 三百本目の点呼 — 同根か別根かは、判定できる [論文300]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22171914
9. 山岸勇輝 (2026). 「定数は変わったか」と問える相手は、一つしかない [論文314]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22175192

— *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)