焼き戻しは時間と温度を交換できるが、焼き入れはできない——交換できるのは拡散の側だけである

— 鋼の焼き戻しは、ホロモン＝ジャッフェの式で 500 ℃・1 時間を 4 時間なら 477.4060 ℃（22.5940 ℃ 下げ）に置き換えられる — 分離子は、その変化に拡散が要るかどうかである — [論文658]

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

鋼は、高温から急に冷やして硬くし（焼き入れ）、それからほどほどの温度で温め直して粘りを戻す（焼き戻し）。現場では「温度を下げるなら時間を延ばせばよい」と言われるが、それが言えるのは焼き戻しの側だけである。二つの段で、時間と温度の関係を数える。新しい定理も法則も主張しない。 第一に、焼き戻しは、時間と温度を交換できる——ホロモン＝ジャッフェの式 $P = T(20 + \log_{10} t)$ で、500 ℃・1 時間と同じ焼き戻しは、4 時間なら 477.4060 ℃（22.5940 ℃ 下げ）、10 時間なら 463.1833 ℃、100 時間なら 429.7136 ℃ で得られる（第2節）。 第二に、これが本稿の芯である。焼き入れのマルテンサイトは、時間を持たない——マルテンサイトの割合は、どの温度まで冷やしたかだけで決まる。炭素 0.4 %（Ms 369.8 ℃）なら 20 ℃ で 0.978673、炭素 0.8 %（Ms 200.6 ℃）なら 20 ℃ で 0.862839 で、そこで何時間待っても増えない。−80 ℃ まで冷やせば 0.954343 に増える（第3節）。 第三に、マルテンサイトが時間を持たないのは、拡散が間に合わないからである——炭素が 1 秒に拡散する距離は、900 ℃ で 2.4326 μm、焼き入れ中の 300 ℃ で 0.86482 nm で、比は 2812.8 だった（第4節）。 第四に、分離子は、その変化に拡散が要るかどうかである——焼き戻しは炭素が動いて析出する変化なので、温度で速さが変わり、時間で埋め合わせられる。マルテンサイトは原子がずれるだけの変化なので、温度が割合を決め、時間は何も足さない（第5節）。 キーワード：焼き入れ、焼き戻し、マルテンサイト、ホロモン＝ジャッフェの式、拡散。

本稿の射程（射程注記）：新しい定理も法則も主張しない——焼き戻しのホロモン＝ジャッフェの式（1945）、マルテンサイトの割合のコイスティネン＝マーバーガーの式（1959）、Ms のアンドリュースの式（1965）、マルテンサイト変態が拡散を伴わないことは、いずれも既知である。簡単にした前提である——Ms はアンドリュースの式の炭素の項だけで出し、合金元素は入れない。ホロモン＝ジャッフェの定数は 20 に置いた。炭素のオーステナイト中の拡散係数は代表値（$D_0 = 2.3 \times 10^{-5}$ m²/s、活性化エネルギー 148 kJ/mol）で、900 ℃ と、焼き入れ中に冷えた準安定のオーステナイト（300 ℃）だけに使った。扱わないもの——残留オーステナイトの安定化、焼き割れ、焼き入れ性（冷やす速さと太さ）は論じない。既刊との関係：論文562 は、拘束して冷やした鋼の残留応力の上限が降伏で決まることを示し、マルテンサイト変態は扱わないと明記した——本稿はその相変態の席に座る。論文560 は、拡散で育つ層が時間の平方根で厚くなり、待つほど伸びなくなることを示した——ここでは、拡散が要る変化だけが時間と温度を交換できる。加えたのは、焼き戻しの等価温度を時間ごとに出したこと、その交換を見かけの活性化エネルギーに書き直したこと、マルテンサイトの割合が温度だけで決まることと拡散距離を並べたこと、分離子を拡散の有無に置いたことである。

1. 記法と問い

焼き戻し：ホロモン＝ジャッフェの式は、焼き戻しの進み具合を

$$P = T\,(C + \log_{10} t) \qquad (T \text{ は K、} t \text{ は時間、} C = 20)$$

で表す。同じ P なら同じ硬さになる、とする。

焼き入れ：コイスティネン＝マーバーガーの式は、Ms より下の温度 T まで冷やしたときのマルテンサイトの割合を $f = 1 - \exp\{-0.011(M_s - T)\}$ で表す。Ms はアンドリュースの式の炭素の項 $M_s = 539 - 423C$（℃、C は炭素の %）で出した。

問い：「温度を下げるなら時間を延ばせばよい」は、どちらの段で言えるか。

2. 焼き戻しの交換

計算 2.1：500 ℃・1 時間で $P = 15463.00$ である。同じ P になる温度を時間ごとに出した。

時間	同じ焼き戻しの温度	下げる温度
1 時間	500 ℃	—
4 時間	477.4060 ℃	22.5940 ℃
10 時間	463.1833 ℃	36.8167 ℃
100 時間	429.7136 ℃	70.2864 ℃

計算 2.2：この交換の割合は、500 ℃ で見かけの活性化エネルギー 296.0354 kJ/mol のアレニウスの式と同じである（その値のアレニウスで 4 時間なら 477.4060 ℃）。

> **観察 2.3**
>
> 焼き戻しは、時間と温度を交換できる。焼き戻しは、マルテンサイトに閉じ込められた炭素が動いて炭化物として析出する変化で、その速さは温度で大きく変わる。低い温度で遅くなった分は、長い時間で埋め合わせられる——時間を 100 倍にすれば、温度を 70.2864 ℃ 下げられる。

3. 焼き入れは時間を持たない

計算 3.1：マルテンサイトの割合を、冷やした温度ごとに出した。

炭素	300 ℃	200 ℃	100 ℃	20 ℃	−80 ℃
0.4 %（Ms 369.8 ℃）	0.535967	0.845537	0.948584	0.978673	0.992901
0.8 %（Ms 200.6 ℃）	0.000000	0.006578	0.669319	0.862839	0.954343

> **観察 3.2**
>
> これが本稿の芯である。マルテンサイトの割合は、どこまで冷やしたかだけで決まり、時間を持たない。式に時間が入っていない。炭素 0.8 % の鋼を 20 ℃ で何時間置いても 0.862839 のままで、増やしたければ −80 ℃ まで冷やす（0.954343）しかない——焼き入れでは、温度を下げる代わりに時間を延ばすことはできない。

4. 拡散が間に合わない

計算 4.1：炭素のオーステナイト中の拡散係数（代表値）から、1 秒の拡散距離 $\sqrt{Dt}$ を出した。900 ℃ で 2.4326×10^{-6} m、焼き入れ中の 300 ℃ で 8.6482×10^{-10} m、比は 2812.8 だった。

> 観察 4.2
>
> マルテンサイトが時間を持たないのは、炭素が動く前に変わってしまうからである。Ms の近くでは、炭素は 1 秒に 1 nm も動けない。そこで起きる変化は、炭素を運ばずに鉄の並びがずれるだけの変化で、進むかどうかは温度で決まる——焼き入れを急ぐのは、拡散が要る別の変化（パーライトなど）を間に合わせないためである。

5. 分離子

> 観察 5.1
>
> 分離子は、その変化に拡散が要るかどうかである。拡散が要る変化は、速さが温度で決まるので、時間と温度を交換できる。拡散が要らない変化は、進む量が温度で決まるので、時間は何も足さない——同じ熱処理の二つの段が、一方は時間を持ち、他方は持たない。

> 観察 5.2
>
> 論文562 と論文560 と並べる。562 は、拘束して冷やした鋼の残留応力の上限が降伏で決まることを示し、マルテンサイト変態は扱わないと明記した。560 は、拡散で育つ層が時間の平方根で厚くなることを示した——ここでは、拡散の側の変化（焼き戻し）だけが時間と温度を交換でき、拡散しない変化（焼き入れ）は温度だけで決まることを数えた。

> 観察 5.3
>
> 言わないこと。合金元素、残留オーステナイトの安定化、焼き割れ、焼き入れ性は扱わない。拡散係数は代表値である——示したのは、時間と温度の交換が効く段と効かない段を分けているものである。

6. 点呼と結び

1. 4 時間で **22.5940 ℃** 下げ（計算 2.1）：焼き戻しの交換。
2. 100 時間で **70.2864 ℃** 下げ（計算 2.1）：時間で埋め合わせる。
3. 見かけの活性化エネルギー **296.0354 kJ/mol**（計算 2.2）：アレニウスと同じ。
4. 炭素 **0.4 %** で **20 ℃** なら **0.978673**（計算 3.1）：温度だけで決まる。
5. 炭素 **0.8 %** で **0.862839**（計算 3.1）：待っても増えない。
6. **−80 ℃** で **0.954343**（計算 3.1）：冷やすしかない。
7. 焼き入れは時間を持たない（観察 3.2）：本稿の芯。
8. **900 ℃** と **300 ℃** の拡散距離の比 **2812.8**（計算 4.1）：拡散が間に合わない。
9. 急ぐのは別の変化を間に合わせないため（観察 4.2）：パーライト。
10. 拡散が要るか（観察 5.1）：分離子・論文562・論文560。

結び：「温度を下げるなら時間を延ばせばよい」は、焼き戻しでは言えるが、焼き入れでは言えない。焼き戻しは、**500 ℃・1** 時間を **4** 時間なら **22.5940 ℃** 下げて得られ、それは見かけの活性化エネルギー **296.0354 kJ/mol** のアレニウスと同じ交換だった。焼き入れのマルテンサイトは、冷やした温度だけで割合が決まり（炭素 **0.4 %** で **20 ℃** なら **0.978673**）、待っても増えなかった。**Ms** の近くでは炭素は **1** 秒に **0.86482 nm** しか動けない——時間と温度を交換できるのは、拡散が運ぶ変化だけである。分離子は、その変化に拡散が要るかどうかである。既刊との位置——論文562 が扱わなかった相変態の席で、時間を持つ段と持たない段を分けた。正直に言えば——**Ms** は炭素の項だけで出し、合金元素と焼き入れ性は入っていない。

参考文献

1. Andrews, K. W. (1965). Empirical formulae for the calculation of some transformation temperatures. *Journal of the Iron and Steel Institute*.
2. Hollomon, J. H., & Jaffe, L. D. (1945). Time-temperature relations in tempering steel. *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*.
3. Koistinen, D. P., & Marburger, R. E. (1959). A general equation prescribing the extent of the austenite-martensite transformation in pure iron-carbon alloys and plain carbon steels. *Acta Metallurgica*.
4. 山岸勇輝 (2026). 『いちばん速いのは最初の一瞬で、あとはいくら待っても伸びない』[論文560]. Zenodo. 10.5281/zenodo.23014242
5. 山岸勇輝 (2026). 『残留応力の上限を決めているのは、温度ではなく降伏である』[論文562]. Zenodo. 10.5281/zenodo.23014250

— 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)