

低温やけどについて

通商産業省 工業技術院 機械技術研究所 基礎技術部長

山田 幸生

1. 「低温やけど」とは

「低温やけど」という言葉を聞いたことがあるでしょうか。普通、高温の物体に皮膚が触れて細胞が壊れると「やけど」になる。蛋白質は一般にその温度が42°Cを超えると変質し、蛋白質からできている細胞は壊れる。従って、熱湯や熱くなった物に触れると「やけど」になるのは当たり前である。しかし、それほど熱いと感じない物や、暖かいと感じる物に触れていて「やけど」になることがあり、それが一般に言われる「低温やけど」である。

氷のような0°C以下の冷たい物に触れて組織が壊れることもある。確かに組織が「低温」になったために起きた障害であるが、それは「低温やけど」とは呼ばず、「凍傷」あるいは「凍害」と呼ばれる。ここで問題にしているのは「凍傷」ではなく熱いとは感じないのに「やけど」する場合である。

なお、「やけど」は「火傷」と書くが、医学用語としては「火傷」は使われておらず、「熱傷（ねっしょう）」と呼ばれている。「低温やけど」の医学的用語は従って「低温熱傷」であるが、ここでは判りやすくするため、また、一般にはよく使われているため「低温やけど」と呼ぶことにする。

2. 「やけど」に関する研究

蛋白質は42°Cを超えると変質すると上述したが、一瞬42°Cになっただけでは細胞は壊れない。50年も前の1947年頃にHenriques⁽¹⁾らは、皮膚がどれだけの時間、どんな温度になっていると「やけど」になるかを調べた。彼は多くの実験を行い、やけどになるかならないかの境目や障害が明らかになるやけどがどのような条件になるかを調べ、表や式で表わした。組織の損傷の度合を与える目安として損傷関数という考えを導入し、この関数の値 Ω が0.53を超えたらやけどと言える障害（不可逆的障害）が発生するとした。それを表すのが式(1)(2)である⁽²⁾。

$$\Omega = 3.1 \times 10^{98} \int_0^t \exp\left(\frac{-75000}{T_t + 273}\right) dt \dots \dots \dots (1)$$

$$T_t = T_s - (T_s - 35) \left[\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{0.15/\sqrt{t}} \exp(-y^2) dy \right] \dots \dots (2)$$

ここで、 Ω は損傷関数、 t は熱源に皮膚が接触している時間 (sec)、 T_t は表皮底部温度 (°C)、 T_s は熱源に接触しているときの皮膚表面温度 (°C) である。式(1)(2)で $\Omega = 0.53$ および $\Omega = 1.0$ となる組織温度と熱源接触時間の関係をグラフに表わしたのが図1である。 $\Omega = 0.53$ の曲線より上ではやけど

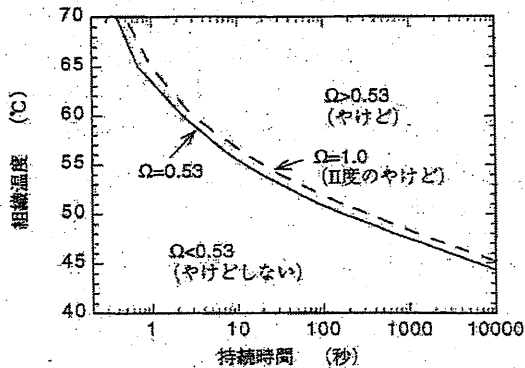


図1 Henriquesの提唱した損傷関数による障害の有無の判定。Ω=0.53の曲線より上ではやけどになり、下では障害は見られない。

になり、下ではやけどにはならないということとなる。さらにΩ=1.0の曲線よりも上の部分ではやけどの程度はⅡ度となる。

(医学的にはやけどの程度はⅠ度：紅斑、Ⅱ度：水疱・びらん・潰瘍、Ⅲ度：壊死、に分類される。) 高い温度の物に触れて組織温度が42℃よりもかなり高くなると短い時間でもやけどになるが、42℃より少し高い温度であれば多少長い時間であってもやけどにはならないことになる。

しかし、図1によれば、

・やけどとなるΩ=0.53に達するには、

①44℃では12000秒≈200分≈3時間20分

②46℃では2800秒≈47分

③50℃であれば165秒≈2分45秒

・Ⅱ度のやけどであるΩ=1.0に達するには

①44℃では23000秒≈383分≈6時間30分

②46℃では5200秒≈87分≈1時間30分

③50℃では325秒≈5分25秒

ということであるから、無意識の状態で皮膚表面が46℃になっていたとすると1時間以内でやけど状態となり、1時間半でⅡ度のやけどになってし

まうことになる。図1は皮膚表面温度が45℃付近では1℃上昇するとやけどになる時間は約1/2になることを意味している。

この研究は50年も前に主に豚を用いて行われた研究であるが、人間で実験することはできないため今でも貴重なデータであり、やけどの重要な指針となっている。ただし、これらは皮膚が通常の状態の室内にある場合の結果であり、皮膚が極端に圧迫されていたり、血行障害のような全身的な病気を持たない場合である。

3. 低温やけどの状況

さて、低温やけどでは通常の高温度物体に触れたときのやけどとは少し違った状況が観察される。

低温やけどになった人にやけどになったときの状況を聞いてみると、疲れ果てたり泥酔して意識がないほどに身動き一つせずに眠っていたという場合が多い。いくら疲れ果てたり、泥酔していても、とても熱い物に触れば反射的に手足を引っ込めたり避ける動作をするはずである。しかし、寒い夜などに心地よい程度の暖かさを持った物の場合には、必ずしも避ける動作をしないと考えられる。ゆたんぼに足を乗せたまま眠ってしまったり、電気ストーブの直前で眠ってしまったったりする。身動きせずにいれば、足の同じ部分が長時間ゆたんぼに接触して、図1の曲線よりも上の条件となってやけどになってしまう。少し手で触れた程度ではやけどはそうもないゆたんぼでも条件によってはやけどになってしまう。電気ストーブの前で泥酔して眠ってしまった場合も同じである。

また、障害などで特に皮膚感覚が極端に鈍化した場合、赤ん坊などで回避動作を取りにくい人の場合には、46℃の物体に1時間以上同じ姿勢で接触してしまうことが考えられる。高齢者は特に温

熱感覚が鈍化してしまうことが報告されており、特に障害を持たない場合でも注意が必要となる。

さらにひどい低温やけどの症例が報告⁽³⁾されている。たとえば、老人性痴呆が存在した84歳男性の場合には、入浴中に何らかの原因で風呂から上がれなくなり、腹部から下部をお湯に1時間以上漬けた状態となった。お湯の温度は家人が手を入れてもやけどするような熱さではなかったが、腹部より下部が低温やけどとなり、表面的にはⅡ度のやけどと診断された。しかし、やけどが内部まで届いており、結局Ⅲ度のやけどとなり、10日後に死亡した。また、起立歩行不能の85歳女性の場合には、電気コタツに足を入れて寝る習慣を持っていた。この女性は、就寝後6時間経過したある朝コタツに足を入れたままぐったりしているのを発見され、衣服に接触していた両下肢にⅡ度およびⅢ度のやけどが認められたが、深部への障害がひどく、結局Ⅲ度のやけどで19日後に死亡した。この他にも「通常ではやけどを起こすとは考えられない比較的低温によってやけど」を被る高齢者が報告されている。

4. 低温やけどの特異性

よく考えると、低温やけどの症状には一つ不思議な点がある。それは表面の皮膚からは見られない深い所の組織が意外にも強い障害を受けていることが多いことである。上述のように表面的にはⅡ度に見えても深部の障害が存在し、時間が経過してようやくⅢ度の障害であったことが判明することが報告されている。そのため、表面的にはすぐに治癒するだろうと思われてもなかなか治癒しにくい場合が多い。低温やけどは皮膚だけでなく深部が障害を受ける場合が多いので、表皮のやけどとは違った治療が必要となる。総合病院なら「形

成外科」で適切な治療を受けることができる。

外から熱を受けて障害が発生したのであるから、熱を受けている間は表面の皮膚の温度が最も高く、内部に向かって徐々に温度が下がって熱が内部に伝わるわけである。内部の方が温度が高くなることは不可能で、それは熱力学第二法則に反する。水の流れと同じで、熱は温度の高い所から低いところにしか流れない。従って、低温やけどで表面の皮膚よりも内部の方が障害が強いというのは、納得しかねる状況である。

低温やけどと似たような障害が熱とは無関係に起こることがある。それは俗に「床ずれ」、医学的には「褥瘡」と呼ばれる障害である。これは寝たきりの病人や脊椎損傷者などに頻繁に発生する障害で、身動きが容易でなく、また、皮膚感覚が衰えた場合に特に注意が必要となる。これから急速に高齢社会となる日本にとって、褥瘡の問題は重要である。

褥瘡の場合は長時間身体と同じ部分が圧迫され、血流が十分でない状態が続くことにより組織がダメージを受けるが、その発生メカニズムはいまだに完全には理解されておらず、研究が続けられている⁽⁴⁾。いずれにしても組織の同じ部分が長時間圧迫されないようにすることが褥瘡を発生させない重要なポイントであるため、病院などでは看護婦さんが定期的に動けない患者さんの姿勢を変えるという重労働に頼って褥瘡を予防する努力をしている。

ところが、一旦生じてしまった褥瘡はなかなか直りにくい。それは、障害が皮膚近辺に止まらず、深い組織までダメージを受けることが多いからである。ひどいときには骨にまで達してしまう。低温やけどと褥瘡は内部にまで障害が及んでしまうという共通点がある。

なぜこのようなことが起きるのかを生体内熱移

動の観点から考えてみた^(5,6,7)のが次節である。

5. 生体内熱移動の特徴

まず、基本に立ち戻って生体内の熱の移動現象を説明する。簡略化された計算では式(3)で表されるPennésの生体伝熱方程式⁽⁸⁾が受け入れられ、よく用いられている。

$$\rho C \frac{\delta T}{\delta t} = \nabla(k \nabla T) + \rho_b C_b W_b (T_b - T) + Q_m + Q_o \quad (3)$$

左辺は時間変化による組織への熱の蓄積、右辺第1項は温度勾配に従う熱伝導による熱の流れ、第2項は動脈血から組織への熱移動、第3項は組織の代謝による産熱(発熱でも良いが、病気による発熱と区別するため産熱と呼ぶ)、第4項は外部エネルギー源からの加熱(たとえば、電磁波を用いて組織内部を加熱する場合)である。

(記号を説明すると、 ρ は組織の密度、 C は組織の比熱、 T は組織の温度、 t は時間、 $\delta T / \delta t$ は組織温度の時間変化、 k は組織の熱伝導率、 ∇^2 は空間に対する勾配を示す記号、 ρ_b は血液の密度、 C_b は血液の比熱、 W_b は血液の流量、 T_b は動脈血の温度、 Q は代謝による産熱。)

第4項は外部の熱源によるやけどの場合には無視できる。この式が通常、工業的に使われる熱伝導方程式と違う点は、右辺第2項の血液との熱交換の項と第3項の代謝による産熱の項である。

さて、周囲との熱交換を考えず、定常状態で一樣な組織があると仮定すると、温度勾配がないため熱伝導はなく、また、定常状態のため時間的変化もない。従って、式(3)で考えなければならないのは右辺の第2項と第3項だけになり、代謝による産熱が全て血流で運ばれ、組織の温度と動脈血の温度の差は、代謝による産熱を動脈血流量などで割った式(4)により決まる。

$$T - T_b = \frac{Q}{\rho_b C_b W_b} \quad (4)$$

安静な状態で血流も阻害されていなければ、この式から組織温度 T は動脈血温度 T_b よりも 0.2°C 程度しか高くないという結果が得られる。盛んに運動して代謝による産熱が増えると、血流も増えるが、産熱が大幅に増えても血流がそれほどには増えなければ体温は上昇し、血液温度と組織温度の差は大きくなる。激しい運動による産熱の増加は最大で安静時の20倍にもなるが、血流量は5倍程度にしかならない。その結果、組織の温度を血流による熱輸送だけでは安定に保てることができなくなり、汗をかいて周囲に熱を放散して体温を下げようとする。

では安静時に圧迫などによって血流が阻害されたときはどうなるかを考えてみる。たとえば、血流量が5分の1になったと仮定する。組織の代謝による産熱は血流で運ばれた酸素が基になっているから単純に考えれば酸素輸送量も5分の1になって、産熱も5分の1になる。従って、式(4)の分子も分母も5分の1になり、組織温度は変わらないことになる。

しかし、血流が阻害されて酸素輸送が減少すると組織は生理学的な反応をして酸素輸送量に変化が現れる。その鍵はヘモグロビンの酸素解離曲線(図2)にある。図2に血液中の酸素担体であるヘモグロビンがどのように酸素を組織に放出するかを説明している。組織の酸素分圧が減少すると、図2の曲線に従ってヘモグロビンが酸素を放出してその酸素飽和度は減少する。しかし、この曲線は固定してはおらず、組織の温度、pH、炭酸ガス分圧によって左右に動く。たとえば、正常状態では組織のpHは7.4であるが、何らかの理由で組織のpHは7.0に下がると酸素解離曲線は右にシフトする。また、組織の温度が上昇しても、炭酸ガス

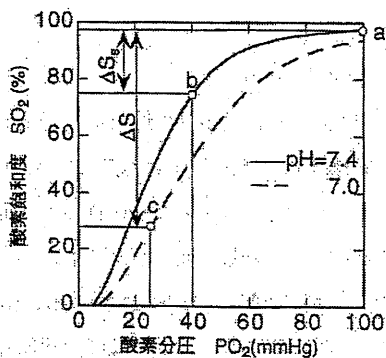


図2 ヘモグロビンの酸素放出。正常時には動脈血を表すa点と正常組織を表すb点の差 ΔS 分の酸素を放出するが、血流が減少して酸素不足の状態の組織はc点となるため、酸素の放出量は $\Delta S'$ と多くなる。

分圧が上昇しても右にシフトする。

さて、血流が減少して酸素輸送が減ったとすると組織の酸素分圧は当然下がり、炭酸ガス分圧は上がる。その結果、組織の酸性化（アシドーシス）が進み、pHも下がり、酸素解離曲線は右にシフトする。このときヘモグロビンが酸素を放出する様子を図2で見る。

正常な動脈血の酸素分圧 PO_2 は約100mmHgで、酸素でほぼ一杯になっており、その酸素飽和度 SO_2 は98%である。この状態は、図2ではa点で表わされている。組織が正常な状態にあるときは、酸素分圧 PO_2 は約40mmHgで酸素飽和度 SO_2 は75%となっており、図のb点で表わされる。動脈血は組織との酸素分圧の違いに従って、a点とb点の差の分（ ΔS ）だけ酸素を放出して酸素飽和度が下がり、静脈血となる。

さて、血流が減少して組織の酸素分圧 PO_2 が約25mmHgとなり、pHも7.0に低下したとすると、図の破線のように酸素解離曲線は右に移動し、組織の状態はc点となる（この曲線の移動はボーア効果と呼ばれる。）。従って、動脈血はこの場合にはa点とc点の差（ $\Delta S'$ ）の酸素を放出する。つまり、正常な

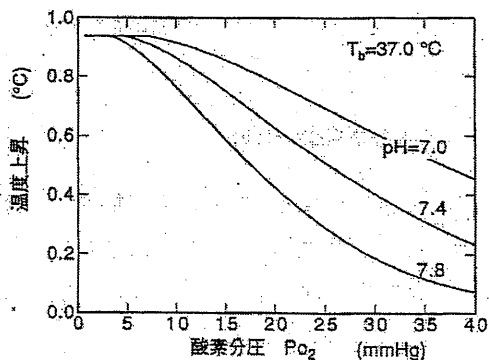


図3 酸素不足の状態にある組織温度の体温よりの上昇。約 $1^{\circ}C$ の温度上昇となる。ただし、周囲との熱のやりとりは考えていない。

状態の場合よりも多くの酸素を放出することとなる。組織の代謝による産熱もその酸素輸送量に比例する。結局、式(4)で血流量 W_{bs} が減少しても、 Q はかならずしも W_{bs} に比例して減少するわけではないため、その結果、組織の温度は上昇することになる。計算で推定した温度上昇は図3のようなグラフとなり(6)、血流が途絶えることにより組織の温度は約 $1^{\circ}C$ 上昇することになる。

この結果は、血流が途絶えると組織温度が低下するという常識とは逆の傾向になっている。この推論を確かめるため動物実験を行った。豚の臀部に細い温度センサーを数本差し込んで、体温を一定に保ちながら臀部を局所的に圧迫してみた。すると、圧迫された部位の組織温度は計算による推定と同じく、見事に体温よりも約 $1^{\circ}C$ 上昇した(7)。もちろん、これは組織と周囲の間で熱のやりとりが無いという条件の下で成り立つ議論である。周囲の温度が低ければそちらに熱が流れて組織温度も下がることになる。

これから言えることは、安静の状態にあって周囲との熱のやりとりも少ない場合、圧迫が強いほど組織の温度が上昇するということである。低温

やけどや褥瘡の症状がときには深い組織も強いダメージを受けることがあるが、これは身体の部位によっては、外から圧迫されても局所的に強い圧力がかかり、血流量が減少して組織自身で温度を上げた可能性があるのではないかと推測することができる⁽⁵⁾。

このシミュレーションを行った結果が図4である。たとえば図4 (a) のように、表面から y_1 mmまで圧迫によって血流量が安静時の10分の1になった ($W_r=0.1$) とし、皮膚表面は 37°C に保たれていたとする。すると外部から熱を加えなくても、長時間経過すると組織内部の温度分布は図4 (b) のように、圧迫部位の厚さが100mmの場合には温度上昇が約 3°C となる可能性もある。

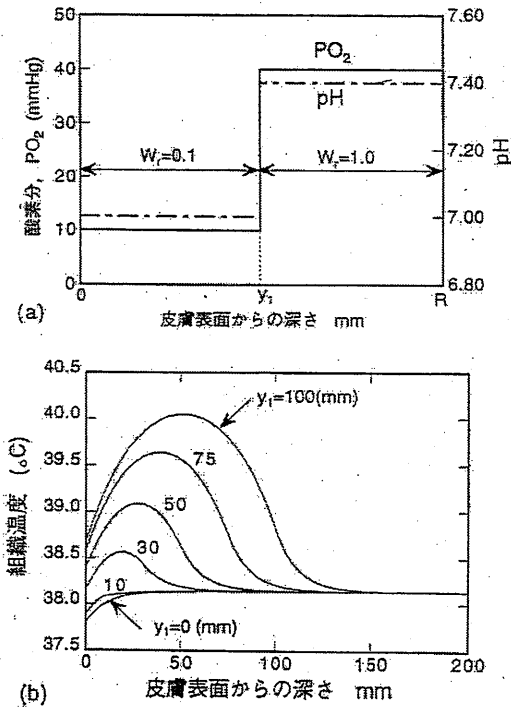


図4 (a) 血流、pH、 PO_2 分布のモデル。皮膚表面から深さ y_1 までは血流量が安静時の10分の1と仮定している。
(b) 皮膚表面が 37°C に固定されている場合の組織内部温度分布のシミュレーション結果。

このように、圧迫による組織の温度上昇だけでは蛋白質の変成を引き起こすほどの温度には達しないが、低温やけどや床ずれのきっかけになったり、症状を促進したりすることも考えられる。ただ、これは推測の域を出ておらず、さらなる解析や実験が必要である。

6. まとめ

低温やけども床ずれ（褥瘡）も、長時間同じ姿勢で組織に熱や圧迫が加わった結果の障害である。床ずれを防ぐためには、介護の方は大変であるが、寝たきり老人や障害者の姿勢には十分注意してあげる必要がある。ベッドを清浄に保つことも重要である。そのような患者さんのために、姿勢を自動的に変えることのできるベッドや、局所的に圧力のかからないベッドも開発されている。

低温やけどを防ぐためには、お若い方、お酒の好きな方、くれぐれも泥酔してゆたんぼに足を上げたまま寝たり、電気ストーブのすぐ傍で寝たり、あるいは電気カーペットの上に直接寝たりしないようお勧めする。また、高齢者や障害のために皮膚感覚が衰えている方に対しては、本人だけでなく周囲の方が十分な注意をして、熱くはなく暖かいと感じるくらいでも、長時間身体と同じ部位に接触させておくことがないよう心掛けていただきたい。

《参考文献》

1. A. R. Moritz and F. C. Henriques Jr., "Studies of Thermal Injury, II. The Relative Importance of Time and Surface Temperature in the Causation of Cutaneous Burns," American J. of Pathology, Vol. 23, pp. 695-720, 1947.
2. F. C. Henriques Jr., "Studies of Thermal

Injury, V. The Predictability and Significance of Thermally Induced Rate Processes Leading to Irreversible Epidermal Injury, "Archives of Pathology, Vol. 43, pp. 489-502, 1947.

3. 菅 又章、鳴海篤志、奥津 寛、谷平 茂、牧野惟男、「老人における広範囲な低温熱傷の検討」形成外科、32巻、pp.781-786,1989.

4. 新妻淳子、矢野英雄、「動物モデルによる褥瘡発生機序の検討(第8報)」、医用電子と生体工学第36巻特別号、p.461,1998.

5. 石黒 博、田中忠良、山田幸生、山下 衛、小竹 進、竹内正顕、「生体を温水マットで保温した場合に発生する低温火傷の伝熱学的研究」、日本機械学会論文集、B編、56巻、pp.1457-1466, 1990.

6. 山田幸生、菅原理裕、河村 洋、「血液の酸素解離度を考慮した生体内温度変化の解析」、日本機械学会論文集、B編、60巻、pp.3693-3697, 1994.

7. 山田幸生、石黒 博、山下 衛、田中忠良、竹内正顕、「圧迫部位の温度に関する実験的研究…低温熱傷との関連について…」、医用電子と生体工学、Vol.31、pp.68-73, 1993.

8. H. H. Pennes, "Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting forearm," J. Appl. Physiol., Vol. 1, pp. 93-122, 1948.