

ヨーグルトのふたの原理

I 研究動機

以前まで食べていたヨーグルトはふたととると、ふたにヨーグルトがべったりついていて、スプーンでパックに戻さなければならず、とても面倒だった。しかし、ある日冷蔵庫にあったいつもと違う種類のヨーグルトを食べようと、ふたをめくると、ヨーグルトがついておらず驚いた。偶然かと思い、同じヨーグルトを次はわざと振り、めくってみるとやはりついていなかった。このふたの技術はすばらしいと思い、調べることにした。

II 研究目的

ヨーグルトのふたにヨーグルトがつかないようにされている技術を文献調査で調べ、その技術に使われている原理を理解する。その原理がうまく働く条件を考えながら、他にこの原理を利用できる便利な使い方を提案する。

III 研究方法

1. 文献調査
2. 提案

IV 研究内容

文献調査

1. TOYAL LOTUS®

TOYAL LOTUS®とは、撥水性を有した機能性包材である。包装材料表面を物理化学的な処理でフラクタル構造【図1】（どんなに微小な部分をとっても全体に相似しているような構造）を形成することによって、この撥水性能を実現させている。

また、TOYAL LOTUS®は、図2のイメージ図で示されるようにシーラント材表面にマイクロレベルの微細な空気を含んだ撥水膜を形成させることにより、超撥水性の表面状態を



図1 TOYAL LOTUS® フラクタル構造
(<http://bihidus.jp/products/cover.html>から引用)

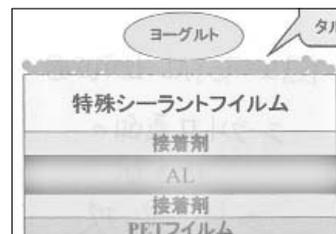


図2 TOYAL LOTUS® シーラント材表面の撥水膜
(トータルロータスー東洋アルミニウムから引用)

形成している。

この構造は、ハスの葉をヒントにつくられた。ハスの表面には、 $10\mu\text{m}$ 程度の、頭が半球となった円柱が規則正しく並んでいる。そのうえ、これらはワックス様物質でできているため、水がこの上に乗っても、滑り落ちてしまうのだ。【図3】この現象をロータス効果という。

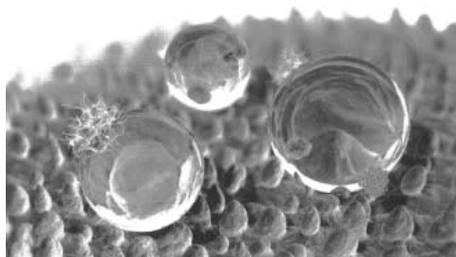


図3 ロータス効果 ハスの葉の構造
(「ロータス効果-wikipedia」から引用)

2. 接触角

ぬれ性(ぬれ具合)を定量的に表現するときを使うものが、接触角である。接触角は図4で示すような角度 θ で表され、 0° から 180° までのいずれかの値をとる。図4の点線は、液滴の輪郭曲線と固体表面との交点における、輪郭曲線の接線を表している。接触角 θ が 0° に近い程、「ぬれがよい」ということになり、 180° に近い程、「ぬれが悪い」ということになる。

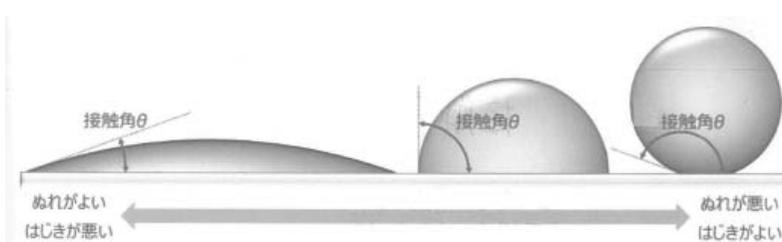


図4 接 触 角
(界面科学の基礎：接触角、表面張力、表面自由エネルギー | FIAから引用)

3. 表面張力

[1] 液体の表面張力

コップに水を注いだとき、水面を押さえつけようとする重力の作用に抗して、何らかの力が働いて、ある程度の高さまで水面が盛り上がる。この力を表面張力という。では、表面張力はどのようにして発生するのだろうか。

いま、液体の表面付近における分子の状態を考えてみる。【図5】まず、液体のバルク(内部)に存在する、ある1個の分子Bに着目する。この分子Bと、その周辺に存在するあらゆる分子との間には、分子間力(分子どうしが互いに引き合う力)が働いている。液体中の分子は、他の分子からの分子間力の作用を受けながら、ほぼ無秩序に熱運動している。したがって、ある分子に働く大きさも向きも様々である。分子Bにも様々な方向、大きさの分子間

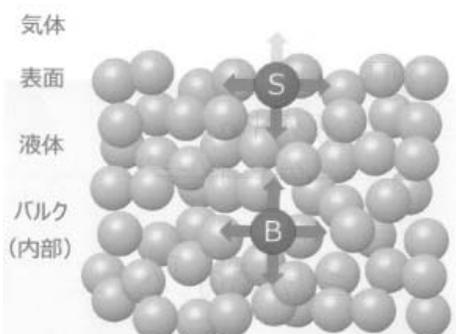


図5 液体中の分子イメージ
(界面科学の基礎：接触角、表面張力、表面自由エネルギー | FIAから引用)

力が働くが、ある時間で区切って、その時間内の平均的な分子間力を考えてみると、あらゆる方向から同じような大きさの分子間力が常に働いていることになり、結果的にはバランスが保たれていることになる。バランスが保たれているということは、安定しているということだ。分子Bにとっては、「居心地がいい」ということになる。一方、表面に存在するある分子Sに着目すると、この分子は両隣やバルク側の分子からは分子間力を受けるが、気体側の分子からはほとんど分子間力の作用を受けない。なぜなら、気体側の分子密度は気体側のそれと比較して圧倒的に低いからである。その結果、分子Sでは、分子Bのようにバランスが保たれておらず、「居心地が悪い」状態になるため、常にバルク側に引き込まれることになる。見方を変えれば、表面に存在している分子は、バルクに潜り込むように再配列している。このように液体の表面積をできるだけ小さくしようとする力が表面張力である。また、表面の分子にはバルク分子に比べて、過剰なエネルギーがある。この過剰なエネルギーを単位面積あたりの表面の量としてとらえたものが表面自由エネルギーである。

[2] 固体の表面張力

固体にも表面張力がある。固体も原子、分子から構成されているため、固体表面でもその表面積をできるだけ小さくしようとする傾向がでてくる。エネルギーという観点でみれば、固体表面にも表面自由エネルギーがあるということである。ただし、固体を構成する分子は、液体分子ほど自由には動けない。よって、自らの分子を再配列させて、表面積最小の形状にするのは容易ではない。そこで、気体・液体・微粒子を吸着したり、他の固体と付着することによって、自らの表面積を小さくし、安定化を図ろうとする。したがって、固体の表面自由エネルギーが大きい程、気体や微粒子を吸着しやすく、液体でぬれやすく、他の固体と付着しやすくなる。フッ素系材料のコーティングは、フッ素系材料のエネルギーが小さいことを利用して、防汚性・撥水性を高めているのである。

4. Youngの式

図6は固体表面上の液滴形状を水平方向から観察したものである。液滴の輪郭曲線と固体表面との交点を端点とすれば、端点における接触角が θ である。この時、端点には、固体の表面張力 Y_s と液体/固体の界面張力 Y_{Ls} と液体の表面張力 Y_L が働く。固体の表面張力 Y_s は固体の表面の面積を小さくしようとして、端点を左側に引っ張る。液体/固体間の表面張力 Y_{Ls} は液体/固体間の界面の面積を小さくしようとして、端点を右側に引っ張る。液体の表面張力 Y_L は液体の表面を小さくしようとして、液滴輪郭の接線方向に働くが、その水平方向の成分 $Y_L \cos \theta$ が端点を右向きに引っ張る。ぬれの状態が安定しているとき、端点は右にも左

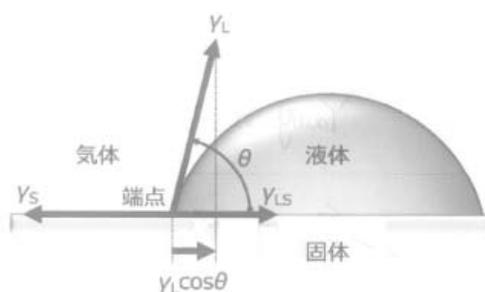


図6 Youngの式
(界面科学の基礎：接触角、表面張力、表面自由エネルギー | FIAから引用)

にも動かず静止しているから、これらの3つの力のつりあいを示したものがY o u n gの式である。下がY o u n gの式である。

$Y_s = Y_L \cos \theta + Y_{Ls}$ これを変形すると $\cos \theta = (Y_s - Y_{Ls}) \div Y_L$ したがって、 $\cos \theta$ が1に近づくということは、接触角 θ が 0° に近づき、ぬれがよくなることを意味する。つまり、ぬれをよくする方法は、1.液体の表面張力 Y_L を小さくする2.固体の表面張力 Y_s を大きくするのいずれかである。ここから、逆にぬれを悪くする方法は、1.液体の表面張力 Y_L を大きくする2.固体の表面張力 Y_s を小さくするのいずれかであることが分かる。 $(Y_L、Y_s$ が決まると Y_{Ls} が自動的にきまる。)

5. 凹凸による撥水 (W e n z e lの式)

ある液体に対して接触角が θ になる平らな固体表面に表面積が r 倍になるように凹凸をつけて粗面にする。[図7] (※液滴の大きさに比べて、凹凸は十分に細かいとする。) この時の粗面上での接触角 Θ について、

W e n z e lはY o u n gの式を変形して、

$$\cos \Theta = r(Y_s - Y_{Ls}) \div Y_L = r \cos \theta \quad (r > 1)$$

という式を提示した。これをW e n z e lの式という。

ただし、 $r \cos \theta > 1$ となると、この式は適応できない。

W e n z e lの式より

$$\theta > 90^\circ \text{のとき、} \Theta > \theta \quad \theta < 90^\circ \text{のとき、} \Theta < \theta$$

となるため、粗面にすることでぬれにくい面はますますぬれにくくなり、ぬれやすい面はますますぬれやすくなるということになる。

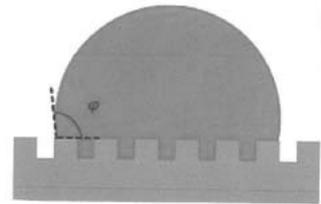


図7 W e n z e lの式
(濡れ-Wikipediaから引用)

提 案

案1. 鏡

日常よく目にして、よく使う鏡。[写真1]水回りに設置することが多いからこそ、この原理を利用したものに適したものである。例えば、お風呂のなかにある鏡は最初の方はきちんと映ってくれるが、そのうち周りのほうから水垢ができて、映りにくくなってしまふ。そこで、表面を超微細なフラクタル構造にしてみる。そうすると、表面につく水は水玉に近い形となり、重力に負けて、表面に水が常にとどまり続けることはない。したがって水垢はできにくくなり、いつでも美しく映る鏡をキープできる。



写真1 鏡

(http://www.komatsu-co.com/img_sekou/n2_3.jpgから引用)

《懸念点》

表面の構造が粗いと光の乱反射が起こる。この場合、鏡本来のものを映すという目的が達成されなくなる。

案2. 車のフロントガラス

誰でも一度は乗ったことがあるであろう車。その車のフロントガラスにこの原理を利用してはどうか。[写真2]今までは雨が降るとワイパーを動かし、水を払いのけて前が見えるようにしていた。しかし原理を利用すると、前のフロントガラスに雨水がついても、走るときの風できれいに吹き飛ばす。こうすることで、自らわざわざワイパー作動のボタンを押す必要がなくなり、ドライバーが気にならず、ドライブを楽しむことができる。また、車窓の景色もワイパーに邪魔されずに楽しむことができる。



写真2 車のフロントガラス
(http://allabout.co.jp/1/220654/1/product/220654_img04_01.jpgから引用)

《懸念点》

鏡と同じく表面の構造が粗いと光の乱反射が起こり、前が見えなくなり、事故発生率が高まってしまう。また雨が非常に激しい場合、前を見るのが厳しいかもしれない。

案3. 水族館の飼育方法

図8は水族館での水槽のない比較的自由的な飼育方法である。図8はペンギンの場合を使ったが他の動物ももちろん可能である。しかしこの案はある程度の規模が必要となる。そうでないと、動物が水の中に入ることができなくなってしまうからである。ここで今回使用する原理は同様にシートの表面の構造を超微細な凹凸にするというものとYoungの式から導き出した液体の表面張力を大きくするというものである。液体の表面張力を大きくするには、液体を海水にすればよい。グラフ1より海水は水より表面張力が大きいからである。また普段海に住んでいる動物たちにはやさしいので、一石二鳥である。

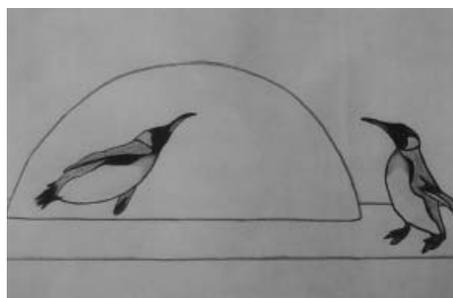


図8 水族館の飼育方法（ペンギンの場合）



グラフ1 液体の違いと表面張力
(表面張力、表面張力一役に立つ薬の情報～専門薬学から引用)

《懸念点》

どうしても規模が大きくなってしまいますので、水の量も多くなり、重力がたくさん働き、今ある技術では理想とする接触角よりだいぶ小さくなり、ぬれがよい状態、つまりべちゃんこの状態になってしまいます。

V まとめ

ヨーグルトのふたがヨーグルトを弾いているわけは、表面に超微細なフラクタル構造を形成させているからだ。またぬれについての関係式で $Y o u n g$ の式、凹凸との関係を示した $W e n z e l$ の式があった。これらの式からぬれを悪くするためには、

1. 液体の表面張力を大きくする
2. 固体の表面張力を小さくする 〈 $Y o u n g$ の式〉
3. もともとぬれにくい面を粗面にする 〈 $W e n z e l$ の式〉

という方法をとればよいことがわかった。

VI 感想

身近の小さな発見を掘り下げると、思いもよらないほど深く撥水性について理解できた。自分が撥水の原理を調べ、考えた提案がいつの日か実現されれば幸いである。

VII 参考文献

- ・界面科学の基礎：接触角、表面張力、表面自由エネルギー | F I A
- ・界面張力、表面張力ー役に立つ薬の情報～専門薬学
- ・トーヤルロータスー東洋アルミニウム
- ・濡れーW i k i p e d i a
- ・ロータス効果ーW i k i p e d i a
- ・http://allabout.co.jp/1/220654/1/product/220654_img04_01.jpg
- ・<http://bifidus.jp/products/cover.html>
- ・http://www.komatsu-co.com/img_sekou/n2_3.jpg