

冒頭図 2 に骨折治療を引用したが、有機結晶体の文献の序文にある healing

process とは修復や治癒の過程を指す。

有機結晶体の文献は次の 2 件：

① Nature Communications (2023) 14:6589

② Science 373, 321-327 (2021)

①の文献は非線形光学材料での自己修復に関する内容である (Autonomous self-healing organic crystals for nonlinear optics)。この材料は応用範囲も広い。図 4 を参照されたい。

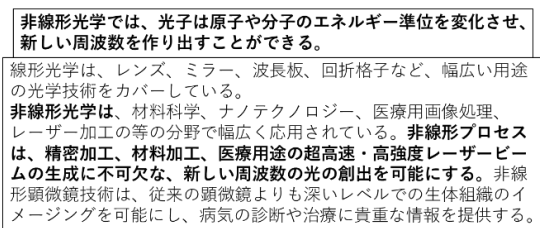


図 4 非線形光学材用

図 5 には a) 有機結晶体の構造を示した。特徴は-(NH-)基と-(COOMe)基の官能基を持つこと。b) この原料をメタノールに溶かしゆっくり溶媒除去する。これがポイントであり、分子間相互により、ネットワークを作り自己修復が出来る材料に仕上げる。c) 出来上がった有機結晶。e) 多少の傷は自己修復出来る。

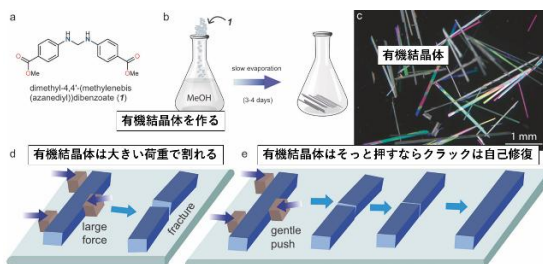


図 5 非線形光学有機結晶体の自己修復

ここで元に戻らない破断と傷が入っても自己修復出来るグラフがある。材料の厚みと荷重に関係がありそうだが、厚くても分子間相互作用、ネットワークがしっかりした構造の材料は耐えられる (図 6、緑のバラツキ)。

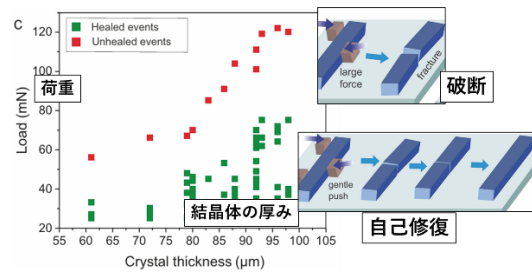


図 6 破断と自己修復

ネットワークを形成する様子は図 7 にある。この構造の乱れ欠陥が少なく、広がりがあり自己修復を発現するのだろう。

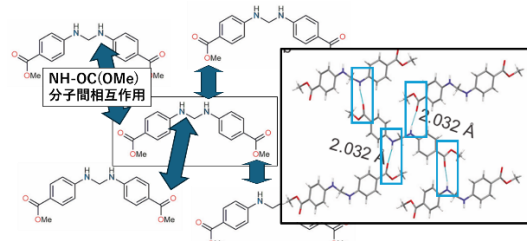


図 7 ネットワーク

②の文献 (Autonomous self-repair in piezoelectric molecular crystals.) は、圧電素子に関する。圧電素子にも自己修復出来る材料がある。これも前述の光学材料と同様に、ネットワークが広がっていて、水のチャンネルも関与すること自己修復の源になっている。(図 8、図 9)

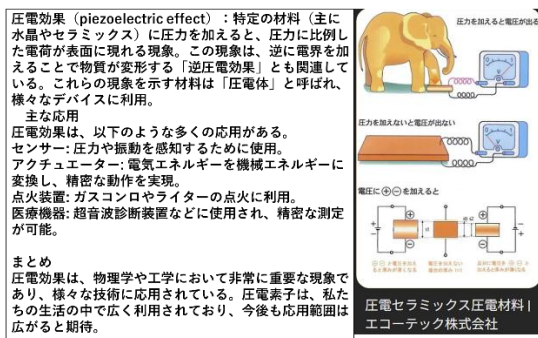


図8 圧電素子

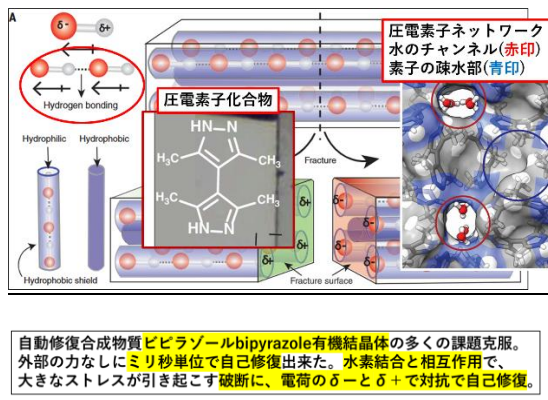


図9 圧電素子自己修復起源ネットワーク

2-3 ペロブスカイト光触媒の自己修復

この光触媒の自己修復については、ペロブスカイトの成分と平衡関係を利用して達成する。

・Communications Chemistry (2025)8:112

この文献の序文には、「生き物は自己修復の能力を備えるが、材料の世界でもそれが見られるし開発されている。特に外部の動力無しで、平衡に着目して研究した。」とある。

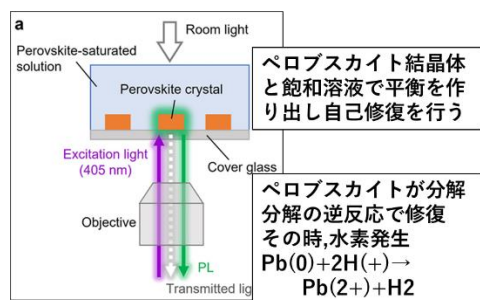


図10 自己修復ペロブスカイト光触媒

ペロブスカイトは、高湿度条件で安定性が低下する。そこで、平衡を保つ為に飽和水溶液を使っている。ユニークな組み立てである。

論文では、光照射によりペロブスカイトの一部に分解が起こるが、照射がなければこの系では鉛金属(Pb^0)が消えていく。これは、自己修復していくことを意味する。

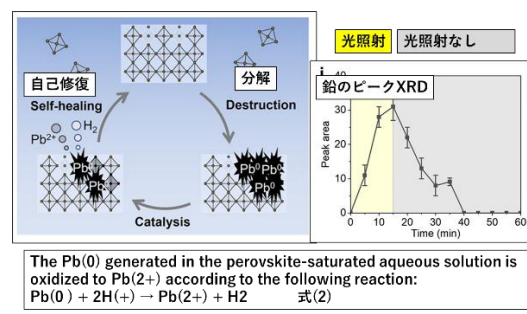


図11 ペロブスカイト光触媒/分解と修復

分解と自己修復のサイクルを利用して、日中に光触媒として、夜間は自己修復させるとも記載がある。更にペロブスカイトの種類によっては分解されにくい種もある。

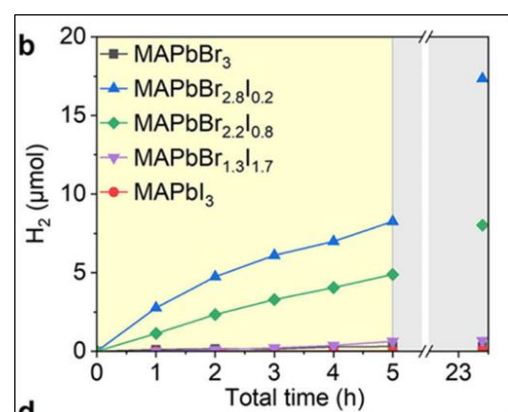


図12 ヨウ化物系は安定(水素発生少)

2-4 ポリマーに関する修復

最初に目に付いたのは理研の記事である。

・自己修復性ポリオレフィン」

化学と教育 69 巻 3 号 (2021 年) 98-101

・J. Am. Chem. Soc. 2019, 141, 3249

まずは理研の自己修復を図 1 3 に示す。
アニシルプロピレンとエチレンとの共重合
体を錯体触媒で得ている。水溶液中でも自
己修復機能や形状記憶性能を示す。

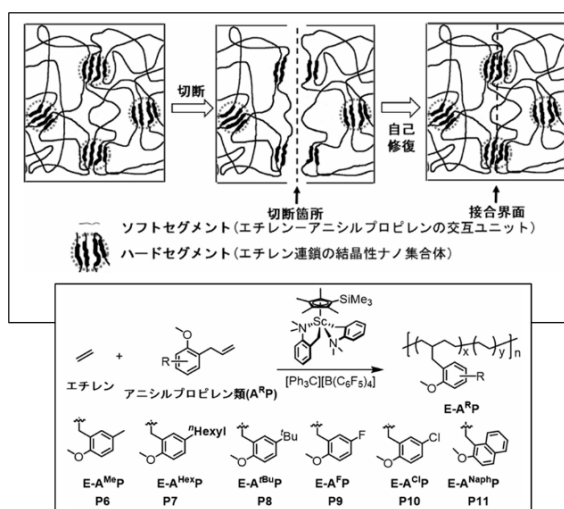


図 13 アニシルプロピレンエチレン共重合

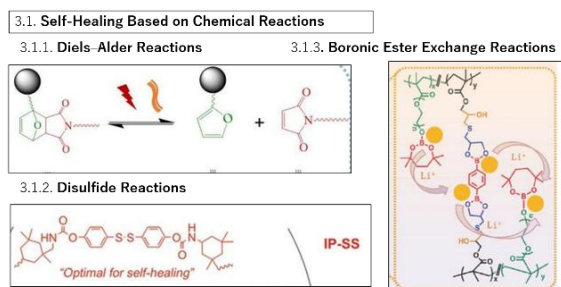
2-4-1 自己修復ポリマーの総説(一例)

一般的な内容を紹介する総説を選んだ。

・Polymers 2023, 15, 4408

この総説においては、自己修復力を内在
するポリマーを分類している。3 章の
「Intrinsic Self-Healing」を抜粋した。

(a)



(b)

Disulfide Reactions の例

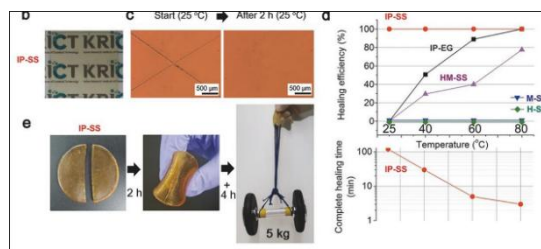


図 14 化学反応を利用した内在型自己修復

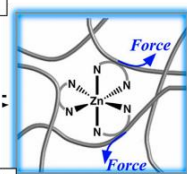
更に 5 つの超分子相互作用を挙げている。
(超分子 (Supramolecular) とは複数の分子
が水素結合や疎水性相互作用等の非共有結
合により秩序立って集合した化学種。)

3.2. Self-Healing Based on Supramolecular Interactions

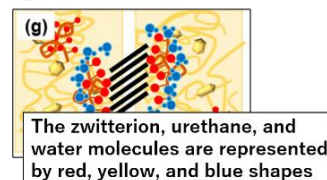
3.2.1. Host-Guest Interactions



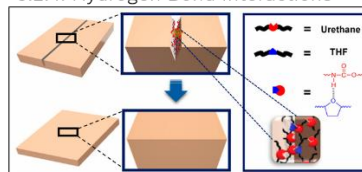
3.2.2. Metal-Ligand Interactions



3.2.3. Ion interactions



3.2.4. Hydrogen Bond Interactions



3.2.5. π - π Stacking Interactions

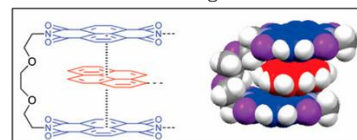


図 15 超分子型の内在自己修復

ポリマー自己修復に関する総説には同じ
ような記事が紹介されている。例えばイン
ターネットでも日本画像学会誌 59, 4,

305 (2020)「ポリマーを用いた自己修復材料の動向とそのアプローチ」がある。

ところで4章に应用として図16が紹介されている。自動車のクリアコートの自己修復の例である。日光下70℃で損傷を30秒以内で修復が出来る。反応はアクリルポリマーと嵩高い置換基を持つ尿素(ウレタン)などを使い分子間の相互作用を利用している。これによりメンテナンス費用の軽減と自動車本体の価値を高めている。



図16 自己修復の自動車クリアコート

もう一つの例は航空機材料に関するものであり、バードストライク(トリが飛行機と衝突)などの思わぬ災害に見舞われる危険性を考慮している。

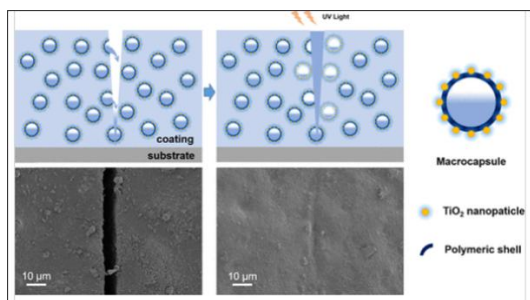


図17 航空機材コートでの自己修復

従来型のマイクロカプセル以上の性能を発揮出来る。航空機だから安全性が一番である。

それ以外にも、自己修復材料は多くの応用分野で検討されている。コンクリートを含む建設物関係、エネルギーのデバイスに関するもの、今注目のリチウム電池、さらには医療関係と、幅広い分野で検討されている。

3. まとめ(考察)

1、今回は、あまり馴染みのない対象だったが、何とかオープンアクセス中心で作成した。かえって変に先入観がない所から始まったので自分なりのまとめになったと思う。自己修復の意味を考えた。図18にはエネルギーを縦軸に生成物と損傷物との関係を図示した。安定な生成物が損傷し、その分損傷物はエネルギーが高い。自己修復して戻ろうとするのも熱力学的に理解できる。

図18 熱力学的に見た自己修復

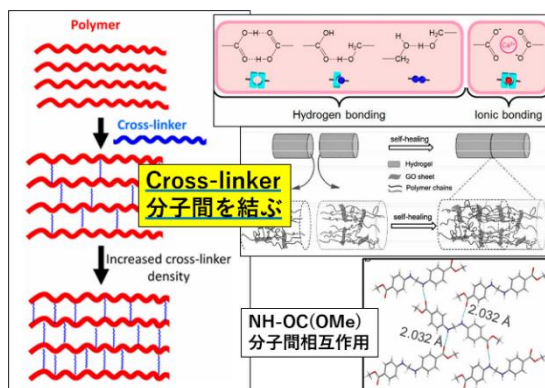
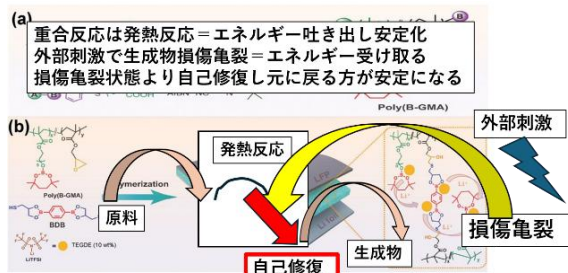


図19 自己修復はCross-linkerで

自己修復出来るのは、分子間を結ぶクロスリンクがキーである。NH 基と CO 基との分子間相互作用でも修復出来る。

2、予想される課題はコストである。フィールドテストと改善などの実績を作ることが肝要である。

3、さらに、応用と仕掛けを中心に深掘りしたい。

(日付) 2026 年 6 月 10 日