	研究代表者	北海道大学・先端生命科学研究院・教授 グン 剣平（ぐん ちえんぴん） 研究者番号:20250417
	研究課題 情報	課題番号：22H04968 キーワード：メタボリック材料、破壊と再生、ダブルネットワークゲル、力学刺激、メカノラジカル 研究期間：2022年度～2026年度

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

●研究の全体像

生体を作る材料と、我々が合成する人工材料とは、その設計思想に大きな違いがある。生体組織は、外界から取り込んだ栄養を用いた新陳代謝によって常に構造が更新されている「活きた材料」である。生体はこの新陳代謝によって、環境に適合するように自身の構造を更新し、機能を成長させる。例えば骨格筋は、高負荷運動をすと、取り込んだアミノ酸を用いてより強く大きく作り替えられることで、当該運動に適した組織へと成長する。一方、金属・プラスチックなどの人工材料は原則、ひとたび合成されるとその構造・機能を変えることは無い「死んだ材料」と言える。構造更新が生じないため、丈夫さでは生物に大きく勝るものの、その機能を環境に応じて成長させることは本質的に困難である。

そこで我々は、生物の新陳代謝反応に学んだ、生物様の人工材料成長システムを構築することを目指している。図1左に、生物の代謝反応の簡単な模式図を示す。生体が構造更新を起こすには、まず外界からアミノ酸などの原料を取り入れることが必要である。次に、新規構造形成を起こすためには、既存の構造が部分的に破壊される必要がある。そして、構造破壊が生じた部位で、取り込んだ原料を用いて新規構造が形成されることにより、初めて構造更新・機能成長が達成される。以上を踏まえて我々は、材料成長システムの基本要素は①外界から系に分子を取り込む開放系であること、②何らかの刺激に応じて既存構造の部分的破壊が生じること、③構造破壊が生じた部位で、取り込んだ分子を用いて新規構造が形成され、機能・物性が成長すること、の3点を満たす必要があると考えた。本提案では、この新陳代謝の3要素を全て備えた構造更新能を有する人工材料を、幹細胞Stem cellにちなんで「Stem材料」と呼ぶ。

本研究の目的は、成長の基盤となる開放系材料「Stem材料」の内部構造を、外界から取り込んだ原料分子を用いた破壊・再形成反応によって別構造に「更新」することで、材料の多様な力学的・形態的・機能的成長を実現することである。このような構造更新による材料成長システムを「メタボリック材料システム」と呼称する。これまでの静的・閉鎖系材料学から、生物様の動的・開放系材料学へと大きく踏み出し、革新的材料学術を切り拓く。

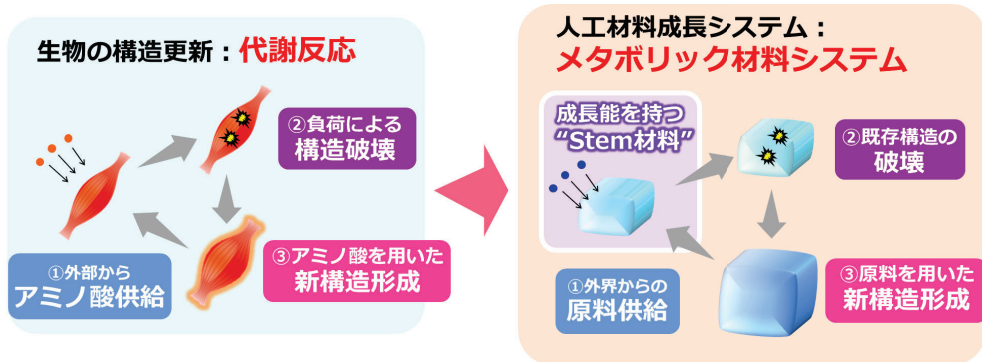


図1 (左) 生物の新陳代謝反応の簡略な模式図。生物は、①原料取り込み ②構造の部分的破壊 ③取り入れた原料を用いた構造の再構築というプロセスによって成長する。(右) 生物の代謝反応に学んだ人工材料成長システムの模式図。外部から分子の取り込みが可能な開放系材料を基盤材料として用い、生物の代謝反応の3要素を導入することによってその構造更新を行うことで、材料の多様な「成長」を実現する。

●Stem材料の候補：ダブルネットワークゲル

上記の条件を満たすStem材料の候補として、ダブルネットワークゲル（DNゲル）の使用を提案する。DNゲルとは、図2に示すように脆い網目と柔軟な網目の複合構造を有するゲルである。ゲルは一般に、溶媒を通して系⇄外界の物質やり取りが可能な開放系であり、要素①を満足する。要素②③は、DNゲルの特異な変形プロセスが利用出来る。DNゲルを変形させると、全体の破壊に先立ち、内部の脆い網目が優先的に破断する。この脆い網目（結合）の大量破断は、要素②構造破壊とみなせる。ここで我々は、脆い成分の破断は化学的活性種を発生させ、本活性種はDNゲル内部で高分子重合を誘起し得ることに注目した。内部における高分子重合によってゲルの物性・機能は大きく変化するため、これにより要素③新規構造の形成と機能成長も実現出来る。

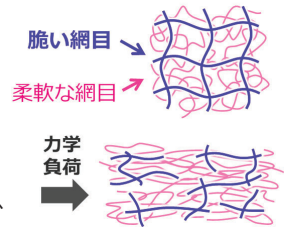


図2 DNゲルの構造模式図と、その変形に伴う脆い網目の優先的破壊

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

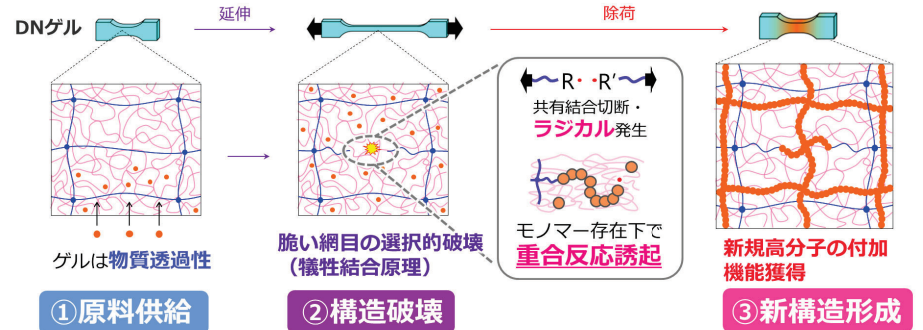


図3 DNゲルをStem材料とした構造更新プロセスの模式図

図3に、DNゲルを用いた構造更新プロセスの模式図を示す。まず、DNゲルを自身の原料であるモノマー溶液に浸漬し、内部に原料を拡散させる。次いでDNゲルに力学負荷（変形）を加え、内部の脆い網目鎖（共有結合）を選択的に破断させる。すると、共有結合の破断に伴いラジカルが生じ、本ラジカルがモノマー類の重合を引き起こしてDNゲル内部に新規高分子が形成される（構造更新）。この構造更新を利用して、DNゲルの多様な力学的・形態的・機能的成長を実現させる（図4）。現在までに、繰り返しの力学負荷を加えると強度や重量が成長する、まるで筋肉のような材料や、力学負荷によってDNゲルの形状を任意に変化させる技術などが開発されている。

最終的には、使用環境に適応するよう構造・機能を自在に更新可能な環境適応材料、自身に加わった環境履歴を学習し、その構造・機能を最適化するインテリジェント材料などの創製を目指す。

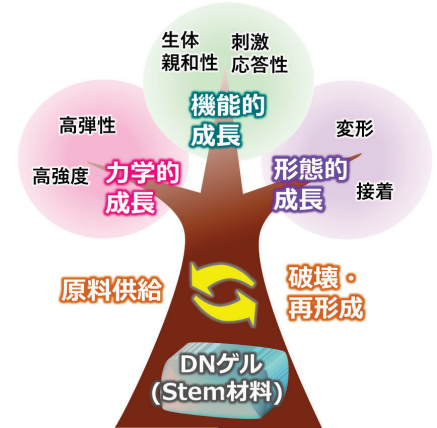


図4 構造更新によって実現されると期待されるDNゲルの多様な成長