

令和8年7月8日

報道機関 各位

国立大学法人電気通信大学  
国立大学法人東京科学大学

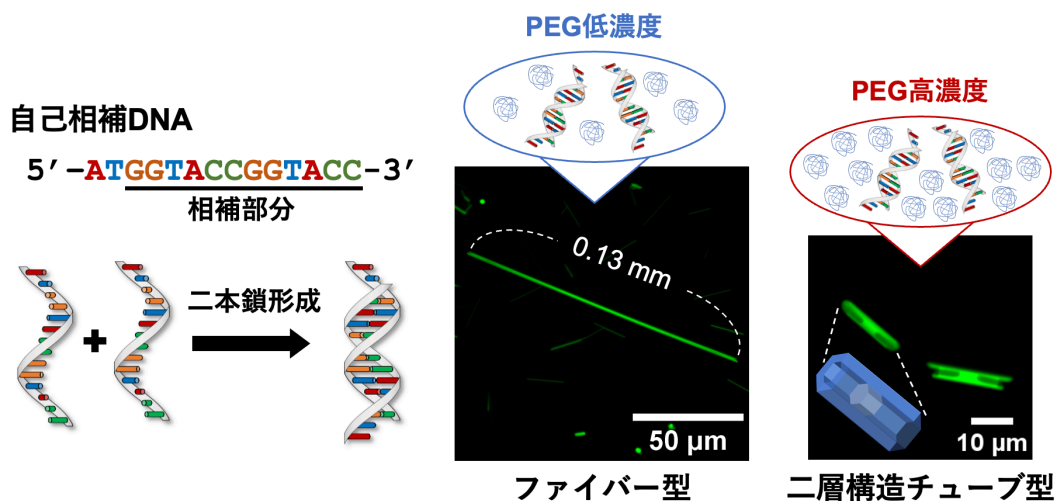
## 分子の「混雑」を調節するだけで、わずか1種類のDNAから ファイバー型・二層構造チューブ型の異なる液晶が形成

### 【ポイント】

- \* わずか1種類の短いDNAから「細長いファイバー型」と「二層構造チューブ型」という異なる液晶の形成に成功
- \* 共存するポリエチレングリコールの濃度を調節するだけで、液晶構造の作り分けが可能
- \* 周辺環境に応じて形状変化するDNA液晶の性質を利用した刺激応答性材料への展開に貢献

### 【概要】

電気通信大学大学院情報理工学研究科基盤理工学専攻博士前期課程の白井想氏（研究当時）、同専攻博士後期課程／日本学術振興会特別研究員の牧野哲直氏と同専攻田仲真紀子准教授は、東京科学大学 リサーチインフラ・マネジメント機構の梶谷孝上席技術専門員との共同研究により、1種類の短い自己相補DNAが、共存するポリエチレングリコールの濃度に応じて、「ファイバー型」または「二層構造チューブ型」へと形を変えて自己集合する現象を初めて明らかにしました。これまでDNA液晶の構造制御には、DNA配列の変更や複数成分の組み合わせが必要でしたが、本研究は「1種類の極めてシンプルなDNA」であっても、分子の混雑環境を調節するだけで、単一のDNA配列から質的に異なる液晶構造を作り分けられることを示したものです。これらの液晶集合体は10マイクロメートルを超えるサイズであり、実験条件によりサブミリメートルにまで及ぶ成長も観察されました。研究成果は6月23日にドイツの国際学術雑誌「*Angewandte Chemie International Edition*」のオンライン速報版で掲載されました。



概要図. 自己相補DNAの配列および、PEGの濃度に応じて形成されたDNAのファイバー型・二層構造チューブ型の液晶集合体の蛍光顕微鏡画像。

## 【背景】

DNA は生命の設計図としての役割だけでなく、その配列に基づく予測可能な塩基対形成能から、ナノサイズの優れた材料としても注目されています。精密に配列を設計した DNA を利用することで、DNA オリガミテクノロジー（※1）が発展を遂げ、また一方でソフトマテリアルの分野からは、高濃度の DNA が液晶相（※2）を形成することが知られていました。研究チームは近年、DNA 配列の設計原理を DNA 液晶形成に応用し、複数の DNA 鎖を組み合わせることで、分子混雑環境（※3）を模したポリエチレングリコール（PEG）の高濃度溶液中で誘起される枯渇力（※4）から、六角形構造に基づく階層的液晶構造を作り出すことに成功していました（[電気通信大学・東京科学大学共同プレスリリース 2025 年 1 月 14 日](#)）。このような枯渇力による DNA 液晶の形成制御は、これまで着目されてこなかった研究手法であり、DNA 液晶集合体の形状を決定する要因について、さらなる基盤的知見を得ることができれば、医療方面をはじめ多岐にわたる分野での機能性材料の開発に応用することができます。研究チームは今回、1 種類の DNA のみをビルディングブロックとすることで、周辺の混雑環境に応じて、DNA が本来持つ階層的な自己組織化能により、質的に異なる液晶構造体が形成されることを見出しました。

## 【手法】

ビルディングブロックとなる DNA として、14 塩基が連結した自己相補配列（※5）をデザインしました。自己相補配列は同じ配列の DNA 同士が 2 本鎖を組むことで、12 塩基の相補部分を持ち、両側に 2 塩基が突出した末端を有することになります。この 1 種類の DNA と塩を含む溶液に任意の濃度の PEG を添加し、80°C まで加熱したあと、室温までゆっくりと冷却しました。形成された液晶集合体は、蛍光顕微鏡や偏光顕微鏡による観察を行い、小角 X 線散乱測定（※6）により、内部構造を解析しました。さらに、自己相補 DNA の塩基配列を変えることで、集合体の形状への影響を検証しました。

## 【成果】

自己相補配列の DNA 鎖は、溶液中の PEG 濃度が比較的低い場合には細長いファイバー型に集合し、PEG 濃度が高くなるとチューブ型という異なる形状を取ることがわかりました。さらに小角 X 線散乱測定を行ったところ、ファイバー型およびチューブ型の集合体はどちらも内部では二本鎖を組んだ DNA が六方柱状構造を取って並び、さらにチューブ型液晶は、DNA のパッキング密度が異なる相から形成されているという高度な階層構造を持っていることがわかりました。またファイバー型は、溶液の冷却速度に応じて、サブミリメートルの長さまで成長しました。それぞれの液晶集合体について顕微鏡観察下での温度変化観察により、形成過程の詳細を調査した結果、溶液の PEG 濃度に応じて二本鎖 DNA 同士に生じる枯渇力の違いが、このような形状の違いの要因となったことが考えられました（図 1）。

### ・ 低 PEG 濃度におけるファイバー型液晶の形成

二本鎖 DNA 同士に生じる枯渇力が比較的に弱いと、高温から次第に冷却することにより一本鎖から相補を組んで二本鎖となった DNA はすぐには集合せず、40°C 付近で充分量が生成した段階で、核生成が始まります。この場合は水平方向の枯渇力による成長よりも、DNA 末端同士の水素結合と  $\pi$  スタッキングによる積層が優勢となり、細長いファイバー型液晶が形成されます。

### ・ 高 PEG 濃度における二層構造チューブ型液晶の形成

枯渇力が強くなるため、溶液中の DNA の一部が二本鎖を組み始める比較的高い温度（60°C 付近）から集合による核生成が始まります。比較的高温で形成された六方柱状型のコアの周囲に、温度が下がるにつれて増加する二本鎖 DNA が外殻として加わることで成長し、形成した温度に応じた異なるパッキング密度を持つ二層構造のチューブ型液晶が形成されます。

積層部分の塩基配列を変更して垂直方向の積層を弱めると、細長い集合体は形成しなくなります。

そこでこのような DNA の液晶集合体の形状は、①垂直方向の二本鎖の積層による成長と、②水平方向の枯渇力による成長の競合によって決定され、またそのバランスは PEG 濃度によって制御できることが示されました。

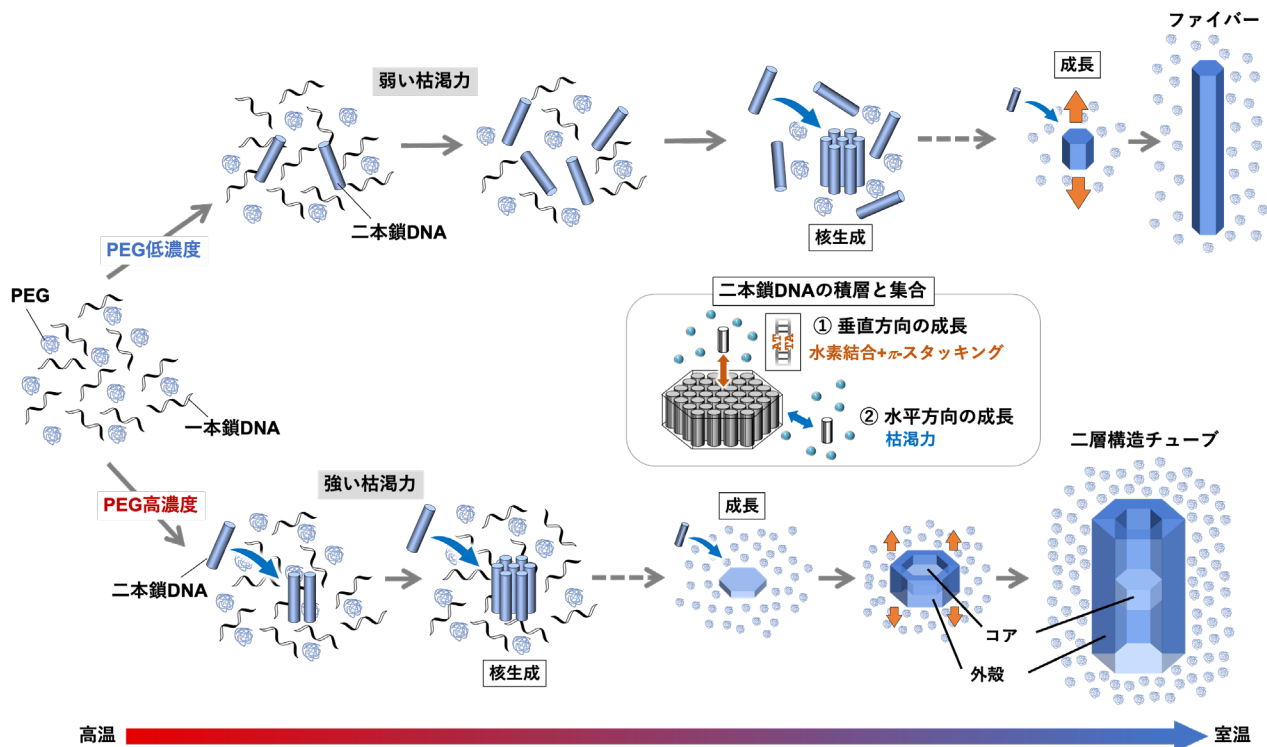


図1. 1種類の自己相補 DNA が高温からの冷却により二本鎖を組み、低 PEG 濃度においてファイバー型液晶、高 PEG 濃度において二層構造チューブ型液晶を形成する過程の模式図。低 PEG 濃度では枯渇力が弱く、垂直方向の積層が優勢となり、細長いファイバー型が形成し、高 PEG 濃度では枯渇力が強くなるため、比較的高い温度から集合による核生成が始まり、より低い温度領域でさらに二本鎖 DNA が加わることで、異なる密度を持つ二層構造のチューブ型液晶が形成されます。

### 【今後の期待】

本研究では、分子の混雑環境の調節により、わずか1種類の短い DNA からなる階層的な液晶の形状を制御できるという基盤的知見を得ることができました。これは二本鎖形成という DNA が本来持つ階層性に基づいて現れる性質であり、シンプルな生体分子から狙い通りのソフトマテリアルを作り出す新しい設計指針の構築に貢献するものとなります。この DNA 液晶集合体は温度変化にも敏感に反応して形状を変える温度応答性を持つため、新たな刺激応答性材料の開発や、人工核酸との組み合わせによる機能性ソフトマテリアルなどへの展開が期待されます。

### (論文情報)

著者名 : So Shirai; Tetsunao Makino; Takashi Kajitani; Makiko Tanaka

論文名 : Fibers and Double-Layered Tubes Formed from a Single Self-Complementary DNA Oligonucleotide

雑誌名 : *Angewandte Chemie International Edition* (Wiley-VCH)

DOI: 10.1002/anie.6741643

公表日 : 2026/06/23

### (外部資金情報)

本研究成果は日本学術振興会 科学研究費助成事業 基盤研究 C (課題番号 : 25K08740)、特別研究員奨励費 (課題番号 : 24KJ1129)、国立研究開発法人科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 (課題番号 : JPMJCR23L2) の助成を受けて行われ、文部科学省先端研究基盤共用促進事業

JPMXS0440200024 で共用された機器を利用した成果です。

#### (用語説明)

##### ※1：DNA オリガミテクノロジー

DNA の相補となる塩基対間の水素結合による相互作用を利用して、長大な 1 本の DNA をあらかじめデザインした多数の短い DNA を利用して折りたたみ、2 次元もしくは 3 次元のナノ構造体を作成する手法。

##### ※2：液晶相

液体のような流動性をもちながら、分子配列に一定の規則性を持つ、液体と結晶の中間の状態。

##### ※3：分子混雑環境

細胞内のように多くの分子が混み合っている環境。混雑環境における分子は、希薄で均一な水溶液中とは異なる挙動を示すことがある。

##### ※4：枯渇力

混雑環境で、粒子もしくは分子同士に働く引力。溶質分子である二本鎖 DNA の周辺には PEG が入り込めない排除体積が存在する。排除体積の重なりは PEG のエントロピー利得につながるため、二本鎖 DNA 間に引力が働くことになる。

##### ※5：自己相補配列

同じ DNA 同士の、アデニン (A) とチミン (T)、グアニン (G) とシトシン (C) が対となることで、相補関係にある二本鎖構造を形成できる配列。

##### ※6：小角 X 線散乱測定

試料に X 線を照射し、その散乱パターンを解析することで、内部のナノメートルスケールの構造や分子の並びを調べる手法。

#### 【連絡先】

<研究内容に関すること>

電気通信大学大学院情報理工学研究科 基盤理工学専攻

【職名】 准教授

【氏名】 田仲 真紀子

Tel : 042-443-5897 E-Mail : makiko.tanaka@uec.ac.jp

東京科学大学 リサーチインフラ・マネジメント機構 コアファシリティセンター

【職名】 上席技術専門員

【氏名】 梶谷 孝

Tel : 045-924-5252 E-Mail : kajitani.t.a5dc@m.isct.ac.jp

<報道に関すること>

電気通信大学 総務部総務企画課広報係

Tel : 042-443-5019 Fax : 042-443-5887

E-Mail : kouhou-k@office.uec.ac.jp

東京科学大学 総務企画部広報課

Tel : 03-5734-2975 Fax : 03-5734-3661

E-Mail : media@adm.isct.ac.jp