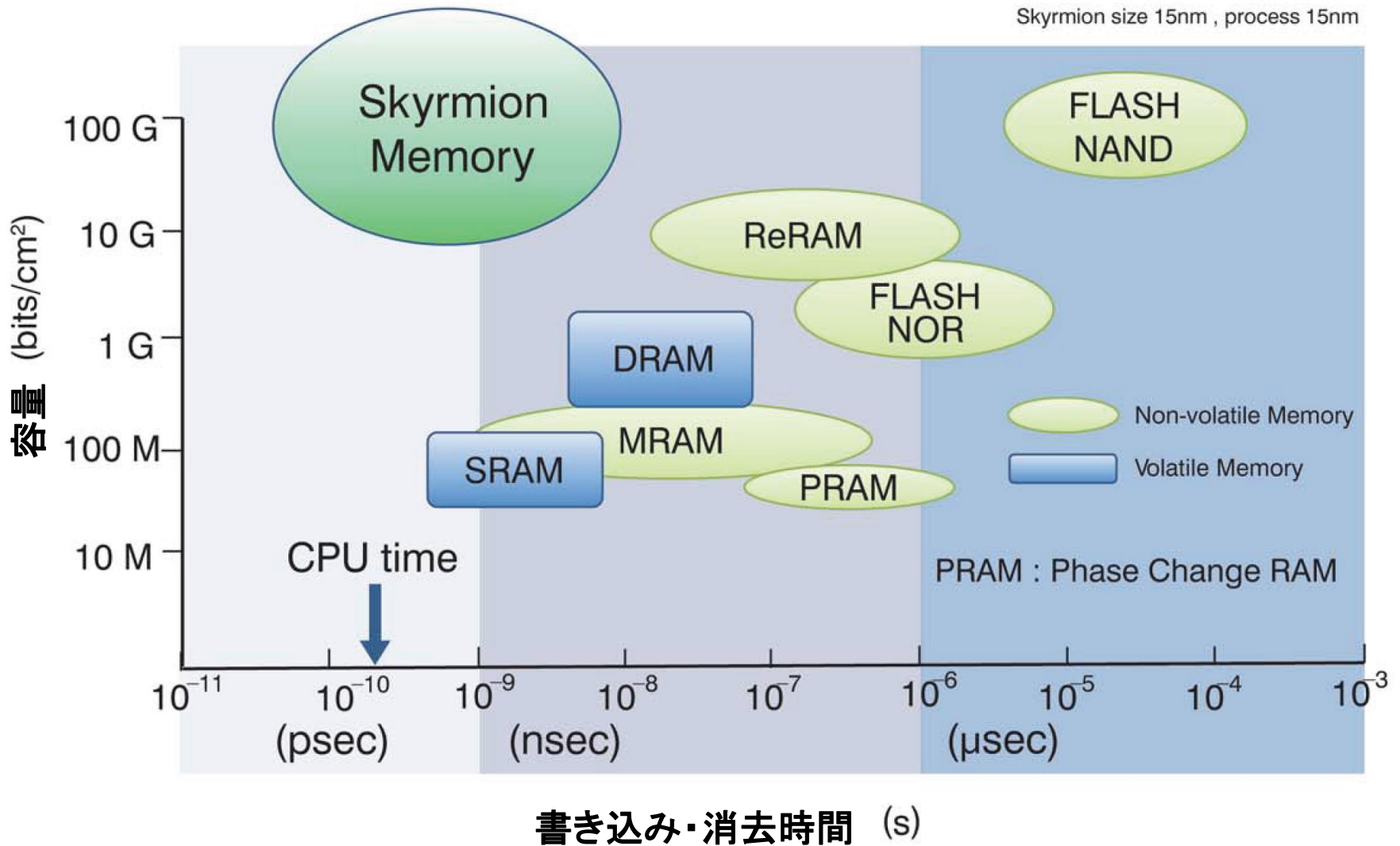


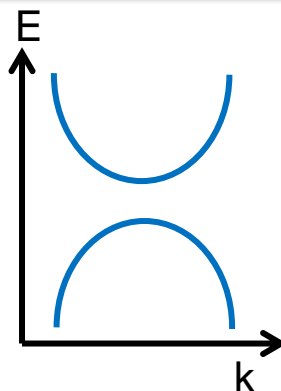
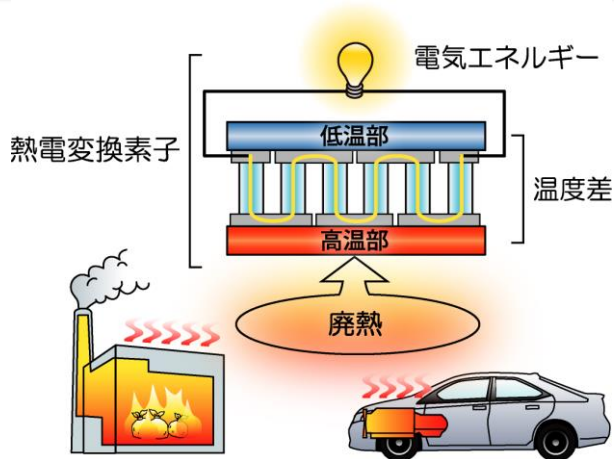
# スキルミオン メモリの可能性



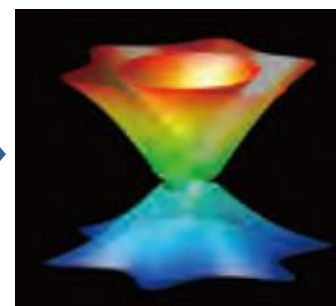
# 熱電材料の革新

国内の未利用排熱は1兆kWh/年であり、発電量に匹敵する量の熱が捨てられている。熱電変換によるエネルギー回収が期待される。

ラッシュバ系特有のスピン分裂と、多谷のバンド構造を応用し、高い熱起電力と高い導電率を両立し、中低温領域で従来より高い性能指数を実現。



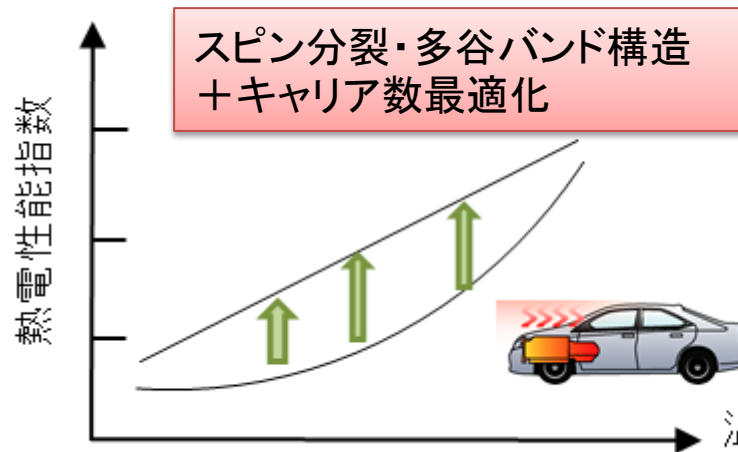
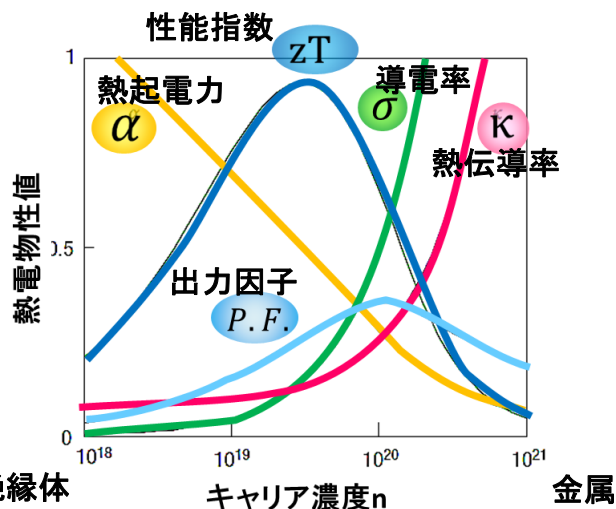
自由電子系  
従来のバンド構造



**ラッシュバ系**  
スピンと軌道運動が強く結合したバンド構造  
スピントロニクスへの応用が期待されている

熱電性能指数

$$zT = \frac{\alpha^2 \sigma}{\kappa} T$$

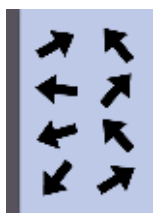


G.J. Snyder and E.S. Toberer Nature Materials 7, 105-114 (2008)  
熱電性能指数が最大となるキャリア濃度を見出す必要あり。

# 磁気熱量効果

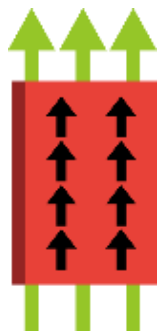
磁気熱量効果：  
磁場をかけると温度変化が生じる現象

無磁場



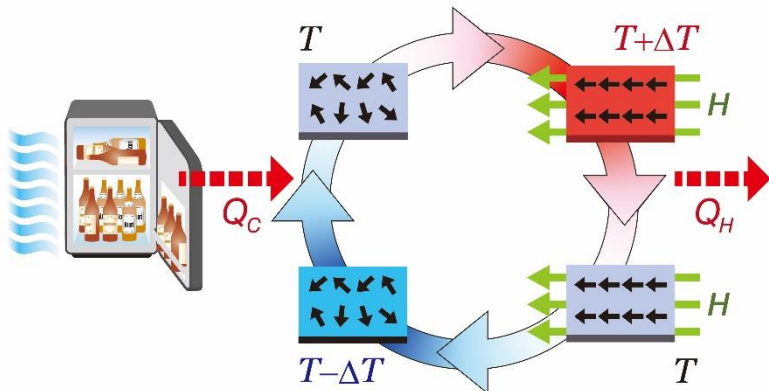
発熱

磁場印加



磁気熱量効果を利用した磁気冷凍

冷媒ガスを使わない冷却技術

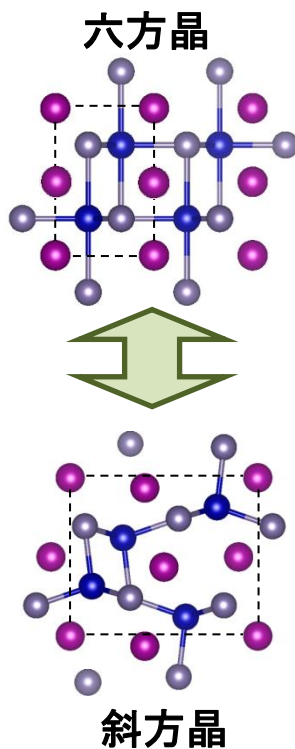


磁気転移と構造転移を組み合わせることにより  
磁気熱量効果を巨大化

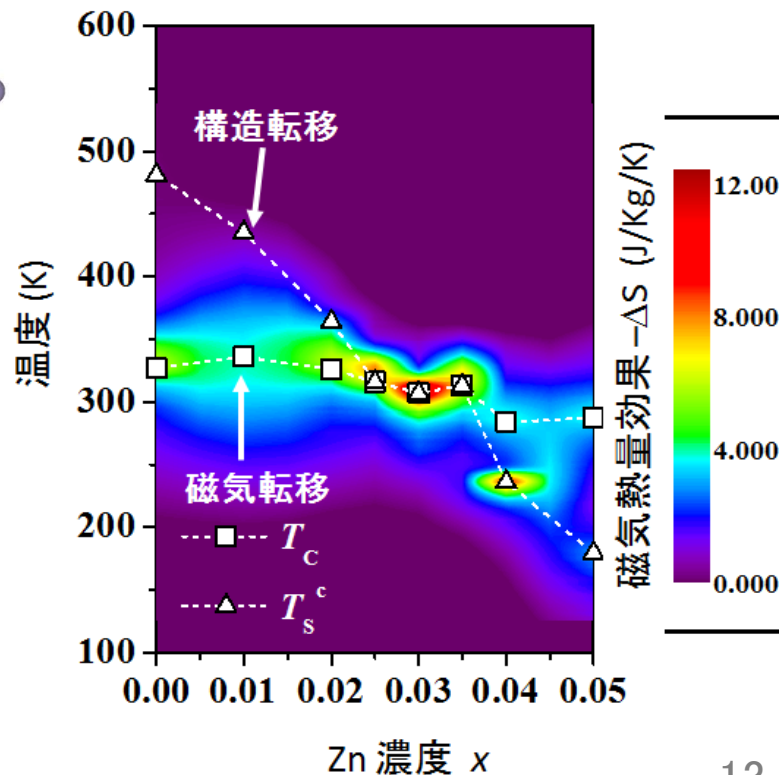
D. Choudhury *et al.*, Scientific Reports (2014)

高効率 磁気冷凍へ指針

相対冷却能 ( $RCP = \Delta S \times \Delta T$ ) を巨大化



$MnCo_{1-x}Zn_xGe$

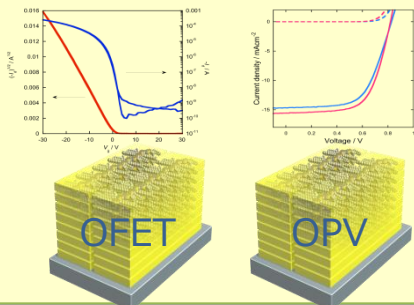


### 研究目標

有機分子・高分子を1つずつ精密に合成し、それらを規則正しく配列・集積させることで、個々の分子ではなし得なかった新機能を発現するための学理（学問体系）を構築する。  
分子レベルでの現象を目に見える機能に直結させることにより新しい機能を持つ構造体をデザインし、エネルギー問題の解決に繋がる材料を創出する。

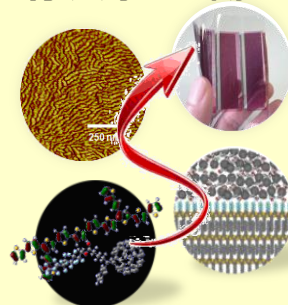
### 研究テーマ

#### 超分子有機エレクトロニクスの開発



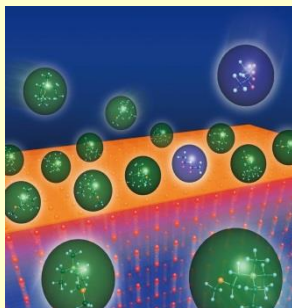
機能性分子を集積化し、分子配向・電子構造を制御することにより、高効率な光電変換が可能な有機エレクトロニクスや高性能な有機半導体を開発する。

#### 有機薄膜太陽電池の開発



高分子薄膜中の界面構造・ナノ構造を分子レベルで制御することにより、高効率の電荷輸送を実現する。

#### 界面デバイスの量子物性機能の開拓



電気二重層トランジスタ・有機/無機界面材料を用いて様々な電界有機現象を探索し、電界誘起超伝導・モットトランジスタ・スピンの電界制御を実現する。

#### アクアプラスチックの開発



ほとんどが水で構成され、プラスチックやゴムのような特性を示すアクアマテリアルを発展させ、環境に負荷を与えない機能材料を創出する。

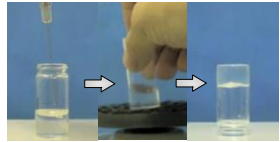


# 主な研究成果(アクアマテリアル)

## アクアマテリアル：ほとんどが水でできた究極のプラスチック (H22年1月, 相田ら, *Nature*)

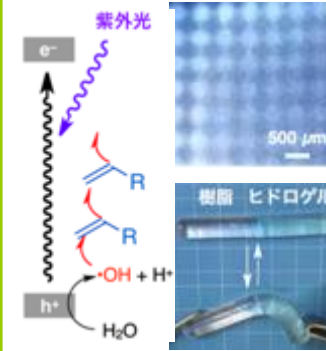


- ▶ 水は地球上において最も安全かつ無尽蔵に存在する資源。もし、ほとんどが水よりなる固形材料が作れたなら、究極の環協定負荷材料・革新的なバイオメディカル材料となることは必至。
- ▶ 水中に分散した粘土ナノシートにごくわずかな有機ポリマーを加え、室温で攪拌するだけで得られる、高含水率かつ強靱なヒドロゲルを開発。
- ▶ **環境にも生体にも優しい究極のプラスチック代替としてのヒドロゲル材料の可能性を提示する画期的な成果。**



ほとんどが水よりなる強靱なヒドロゲル(上)が、原料の室温攪拌により調製可(下)。

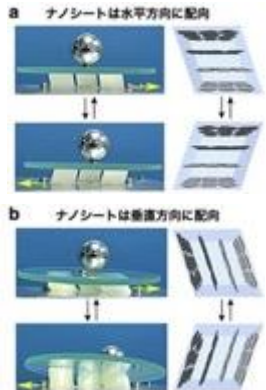
## 光により、望みの場所を何度でも加工できるヒドロゲル材料 (H25年5月, 石田、相田ら, *Nature Communications*)



- ▶ 水を主原料とするヒドロゲルは、生体にも地球環境にも優しい材料であるが、成形後に形状や組成を変えることが不可能であり、用途が制限されていた。
- ▶ 安全・クリーン・高活性な光触媒である酸化チタンを極薄ナノシートにしてヒドロゲル中に固定したところ、光照射により何度でも切り貼りしたり、微細加工したりできる材料が開発された。
- ▶ **ヒドロゲル材料の寿命・信頼性・加工性を飛躍的に向上させ、人工臓器などのさまざまな応用につながる成果。**

フォトマスクを使った光微細加工(上)ならびに異物質との完全な接合(下)。

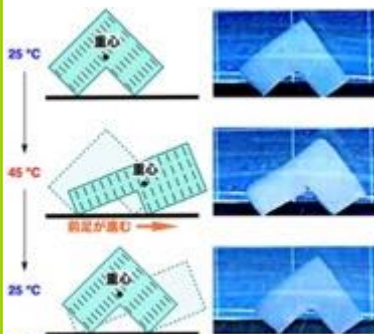
## ナノシート間の静電反発力により、構造補強されたヒドロゲル材料 (H26年12月, 石田、相田ら, *Nature*)



- ▶ 水中に分散したイオン性の酸化チタンナノシートに磁場を加えることで、ナノシート間に巨大かつ異方的な静電反発力が現れることを発見。
- ▶ この分散液をゲル化することによって、縦方向の大きな荷重に耐えつつ、横方向には容易に変形するという、通常材料では実現しにくい特異な機械的物性を示す材料を開発することに成功。
- ▶ **荷重に耐えるタフな材料、振動を絶縁する材料、あるいは関節軟骨の代替材料など、さまざまな応用に期待。**

酸化チタンナノシートを内包するヒドロゲルの防振機能(a)は、防振機能が働いている

## 内部の静電反発力のオンオフだけで動くヒドロゲル材料 (H27年10月, 石田、相田ら, *Nature Materials*)



- ▶ 従来のヒドロゲルアクチュエータは、水中でしか利用できず、容易に劣化してしまう。
- ▶ 互いに静電反発する無機ナノシートを平行に配向し閉じ込めることにより、筋肉のように早く、大きく、方向性のある動きを繰り返すヒドロゲルアクチュエータを開発。
- ▶ **前例のない動作原理により、従来のヒドロゲルアクチュエータを凌駕した動きの質と量を実現。人工筋肉やスマート材料として期待。**

特別な外部環境に頼ることなく、一方向に歩き続けるヒドロゲルアクチュエータ。

# 高効率 (>10%) 有機薄膜太陽電池の開発

太陽電池の高効率化に向け、1) 合成化学の手法による独自の半導体ポリマーの開発、2) 分子配向と素子構造のマッチング、の二つのアプローチにより高効率有機薄膜太陽電池を実現

材料開発: 様々なナフトビスチアゾール (NTz) 系ポリマーを合成

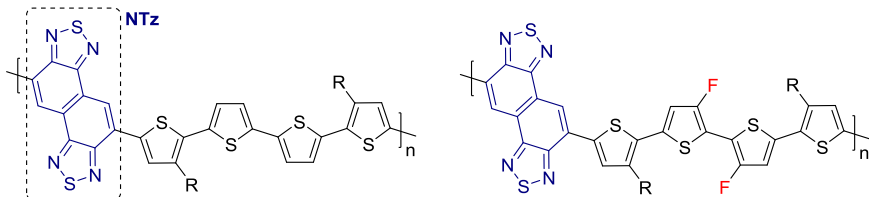


図. 開発した半導体ポリマーの例

- 未踏有機半導体骨格、ナフトビスチアゾール (NTz) に着目し、世界に先駆けて半導体ポリマーの構成ユニットとして採用
- 広い光吸収領域、良好な結晶性に由来する高いホール移動度、分子修飾による配向制御により、一連の高効率有機太陽電池を開発
- 合成化学の手法を活かし、様々な分子修飾法を開発し、半導体ポリマーの電子構造と配向構造を制御

素子構造最適化: 分子配向と素子構造とのマッチングによる高効率化

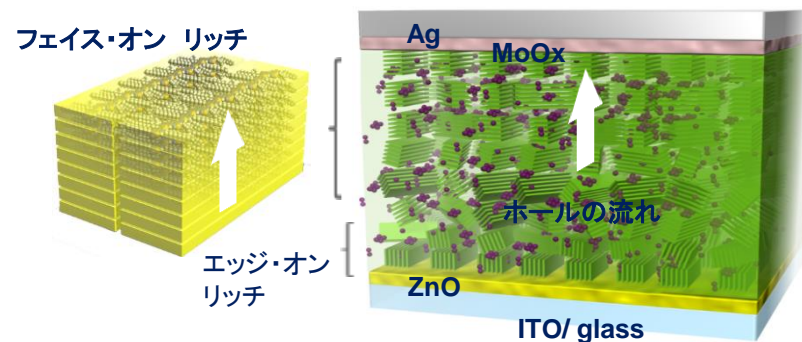


図. ポリマー半導体のフェイス・オン配向(左)と素子中での配向分布の模式図(右).

- 二次元X線回折を用い、太陽電池素子内での半導体ポリマーの分子配向を精査
- 異なる分子配向をもつドメインが偏在することを見出し、キャリア輸送に適した素子構造を採用

半導体ポリマーの分子構造修飾による電子構造と分子配向の最適化、及び、太陽電池素子内のキャリア輸送を考慮した素子構造の採用により、世界最高レベルの光電変換効率、10.5%を達成

## 研究目標

固体中の量子状態を光学的、電氣的、磁氣的に制御する技術を基盤として、量子コンピュータや量子ナノデバイスの概念と技術を創出し、安全で超低エネルギー消費の情報処理技術を実現する。

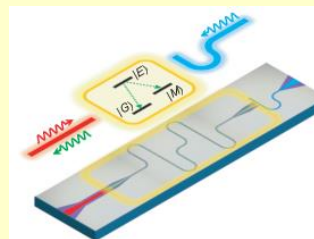
## 研究テーマ

### 誤り耐性を含めた量子コンピュータの研究開発



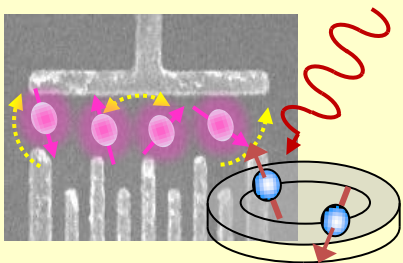
大規模計算への拡張を視野に、量子計算の基本単位となる論理回路を構成し、小規模量子計算を実現する。

### 超伝導量子回路の開発



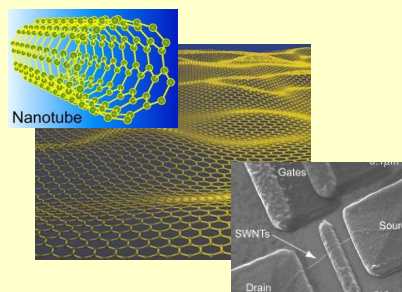
従来の電気回路では不可能であるような、新しい機能を持った、超伝導体で構成される電子回路を実現する。

### 量子中継/ネットワークの研究開発



スピン間、光-スピン間の量子結合を制御する要素技術を開発する。

### 低次元材料・量子デバイスの開発



カーボンナノチューブなど、量子制御・計測に適した材料やデバイスを開発し、量子効果を最大限に利用する。

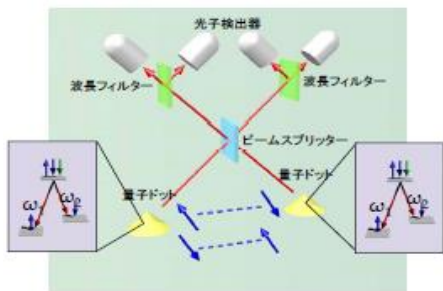


# 主な研究成果（量子情報エレクトロニクス部門）

## 量子ドットスピンと単一光子の間に量子もつれ状態を生成

(H24.11, 山本ら, *Nature*)

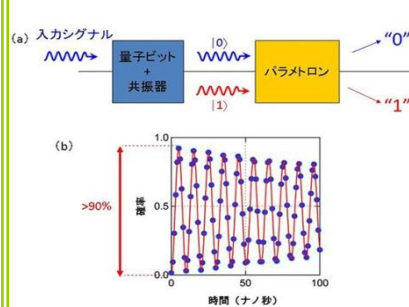
- InAs量子ドット中の量子スピンと放出された単一光子の間に、高フィデリティー(92%)の量子もつれ状態の生成に初めて成功。
- 放出された波長0.9ミクロンの単一光子を通信波長帯の1.5ミクロンの単一光子に抵雑音・高効率で変換。
- **長距離量子暗号通信、分散型量子情報処理を可能にする量子中継システム開発に道筋。**



量子中継の概念図

## 超伝導回路を用いてパラメトロンを実現

(H26.7, 蔡ら, *Nature Communications*)



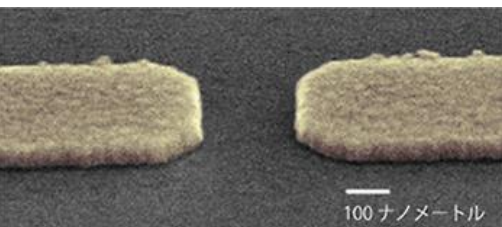
(a)量子ビット読み出しの動作原理図。  
(b)量子ビットの観測データ。90%以上の高い精度で、読み出しができていていることを示している。

- 磁束計に用いる超伝導磁束量子干渉計 (SQUID) を超伝導共振器の回路に組み込んだパラメトロンを作製。
- 単一のパラメトロンは位相検波器としての機能を持つが、この検波機能を超伝導量子ビットの読み出しに応用したところ、90%を超える高い精度で高速かつ非破壊性を保ったままの単一試行読み出しに成功。
- **量子計算機の実現に必須な技術である、量子計算のエラー訂正への応用に導く画期的な発見。**

## 電子回路の「くびれ」に生じる微小な磁化を測定

(H27.7, 河野ら, *Physical Review Letters*)

- これまで測定することができなかった、量子ポイントコンタクト（電子回路の一部を電子の波長程度まで狭くした「くびれ」）の微小な磁化の測定に世界で初めて成功。

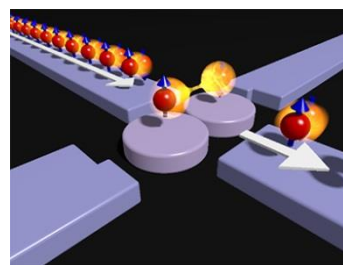


量子ポイントコンタクトの電子顕微鏡写真

- 磁化によるNMRの共鳴周波数の変化を量子ポイントコンタクトの電気伝導度の変化として検出することで、局所的な情報を得た。
- **これまで直接測定が困難だったナノスケール物質の磁気特性測定への応用が期待。**

## 固体中で非局所量子もつれを実証

(H27.7, 樽茶ら, *Nature Communications*)



矢印は「もつれ電子対」の流れ。2つの超伝導体の間には、2個の量子ドットがあり、もつれ電子対を構成する電子を1個ずつ、それぞれの量子ドットに分離できる。

- 超伝導体中のクーパー対から1つのもつれ電子対を取り出し、電子対を構成する2つの電子を2つの量子ドットへそれぞれ分離する新しいナノデバイスを開発。
- 空間的に離れた2個の電子の間に非局所性の量子もつれ（非局所量子もつれ）が存在することを初めて確認。
- **量子計算機等の基盤となるもつれ電子対発生器の実現へ大きな一歩。**



# 分野融合プロジェクト

## 研究目標

- 電子の状態を操作することで、熱電特性の高い仮想的な物質を設計するとともに、新たな熱電変換物質を合成・評価し、高効率熱電変換材料を開発する。
- 従来の半導体素子や磁場による磁化制御に取って代わる、創発現象を利用した革新的超低消費電力デバイスの開発を推進し、電子情報機器の構成要素となるデバイスの電力消費を低減しうる革新的な新原理を開拓する。
- 「微弱エネルギーの効率的な取出・貯蔵技術」と「使用環境を選ばない素子材料とシーリング技術」を組み合わせることで、センシングシステムの基盤となる絆創膏型デバイスのプロトタイプの開発を行う。

