

原子拡散を駆使した純金属ナノワイヤの高密度生成

九州大学 大学院工学研究院 機械工学部門

准教授 木村康裕

2025年9月19日(金)
JST新技術説明会(戦略的創造研究推進事業主催)
11:00-11:25

本日のアウトライン

本技術は

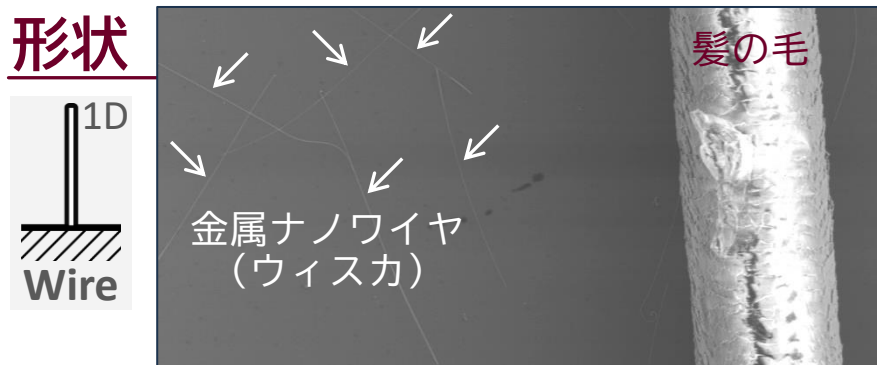
「優れた特性を有する金属製ナノワイヤを、所望の位置に高密度生成可能な技術」

1. ナノワイヤ(ウィスカ)とは？
2. 従来課題とその問題点
3. 新技術の概要
4. 新技術の特徴・従来技術との比較

背景 ナノワイヤ(ウィスカ)とは？

極小さに由来した新奇機能を有する小さな1次元材料

形状

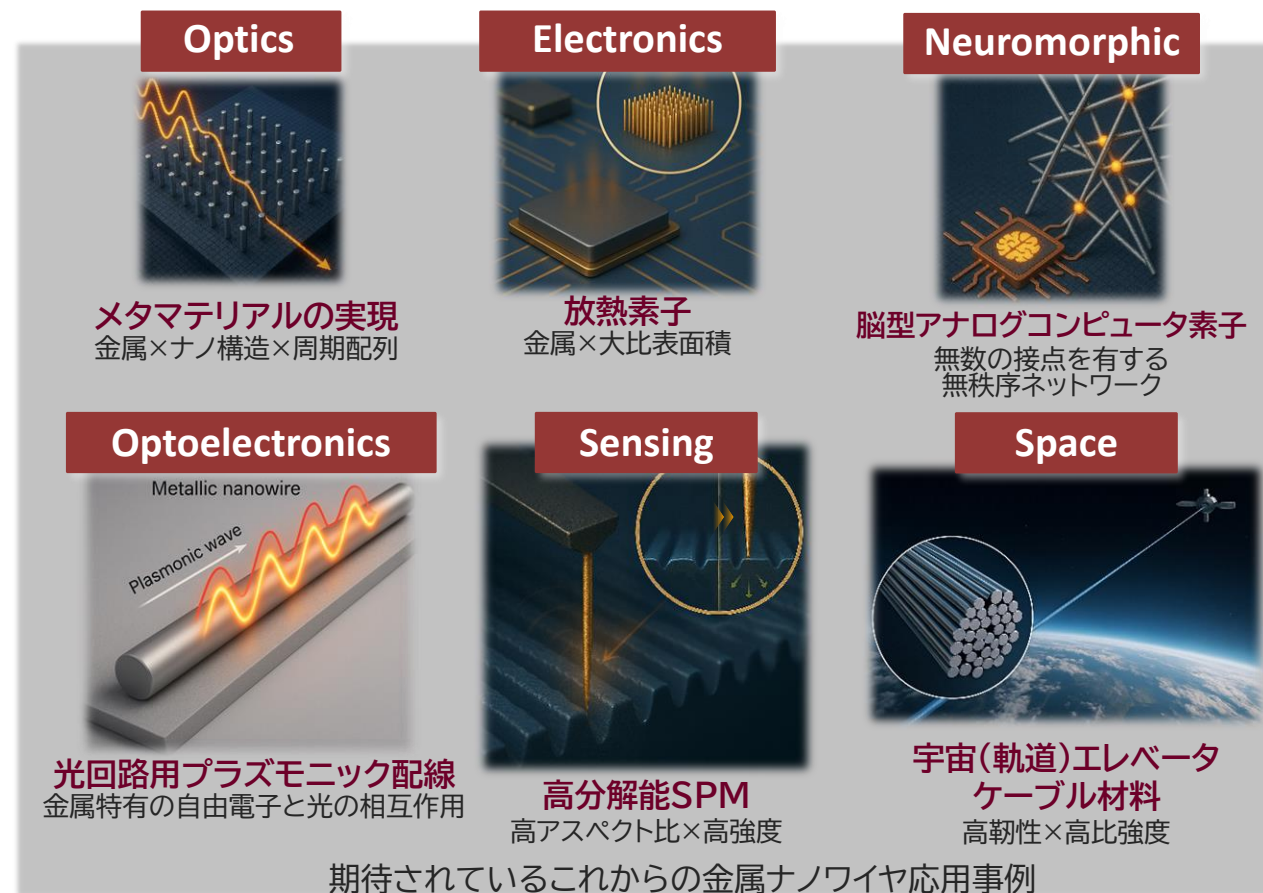


特徴

- ✓ 高い化学反応性 by 比表面積増大
- ✓ 特異な伝導性 by キャリア異常散乱
- ✓ 超高強度 by 少ない結晶欠陥

Snナノワイヤ：2～3%弾性ひずみ^{*1}
Alナノワイヤ：バルクの100倍の強度^{*2}

^{*1} C. Herring and J. Galt, *Phys. Rev.*, Vol. 85 (1952) 1060.
^{*2} S. Kim, et al., *Acta Mater.*, Vol. 160 (2018) 14.

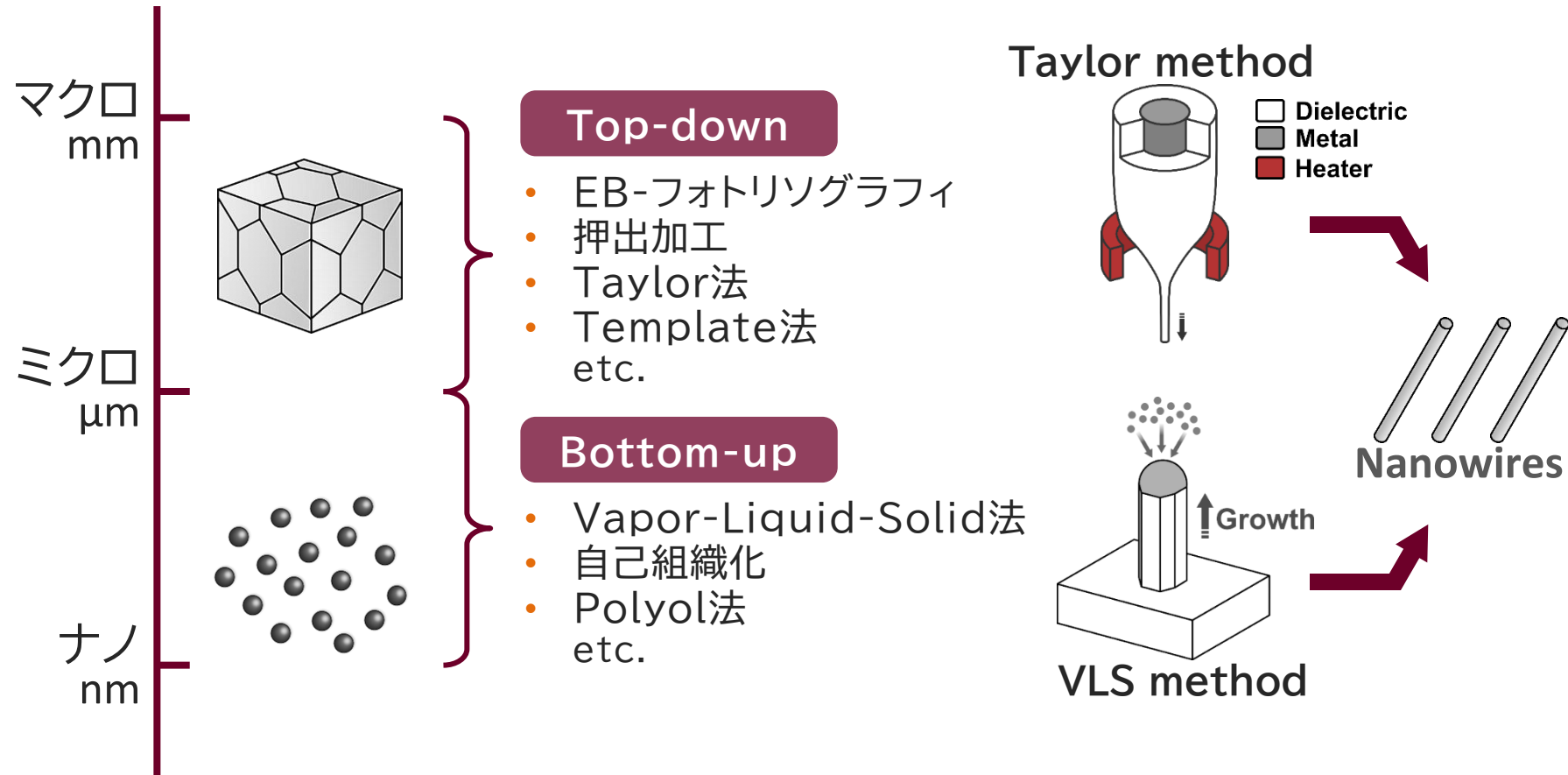


既存製品の性能向上や新機能開発に資する次世代材料

課題 | どうやってつくるのか？

従来技術とその問題点

純金属ナノワイヤを「安定して」「安く」「大量に」つくる技術が存在しない



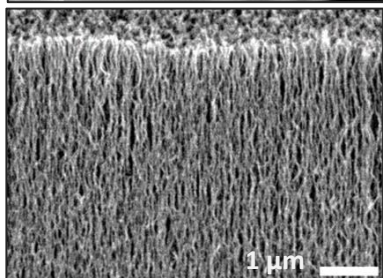
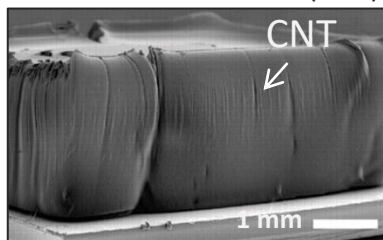
新たなワイヤ製造技術開発が不可欠

従来技術とその問題点

ボトムアップ的手法において、他元素の1次元ナノ構造体と比べると
純金属ナノワイヤは作製技術が未熟(発展途上)

【有機物】

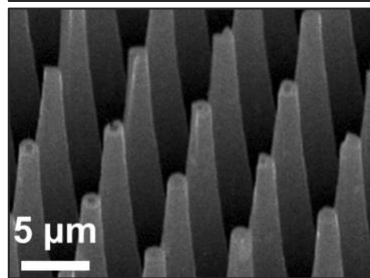
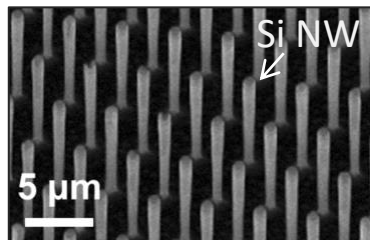
カーボンナノチューブ(CNT)



Hata, et al. (2004)
Science, vol.306, 1362

【半導体】

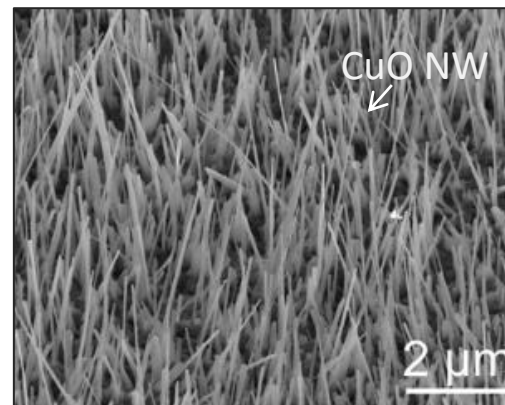
Si NW



Refino, et al. (2021)
Sci. Rep., vol.11, 19779

【金属酸化物(半導体)】

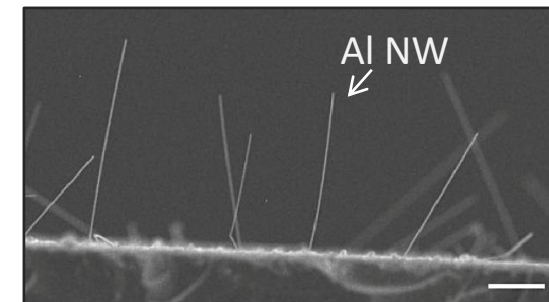
CuO NW



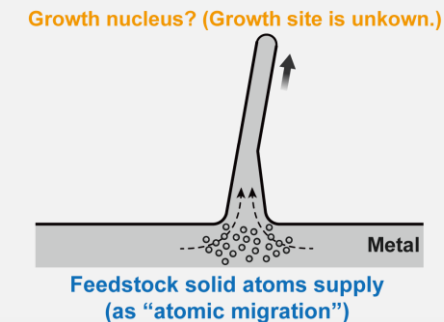
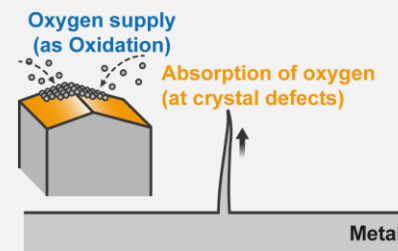
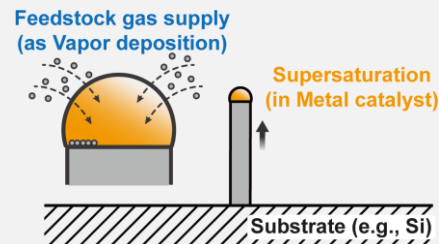
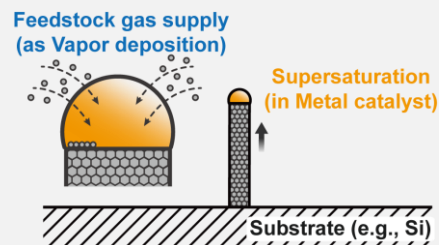
Chen, et al. (2012)
J. Appl. Phys., vol.111, 104305

【純金属ナノワイヤ】

Al NW



Ye, et al. (2015)
Phys. Status Solidi A, vol.212, 566



従来技術とその問題点

純金属ナノワイヤはなぜつくるのが難しい？

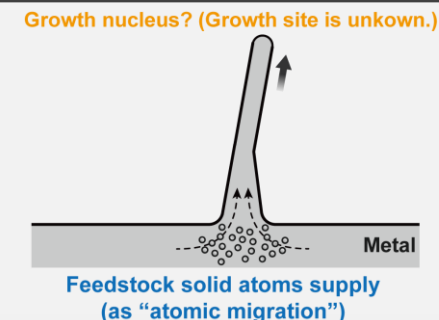
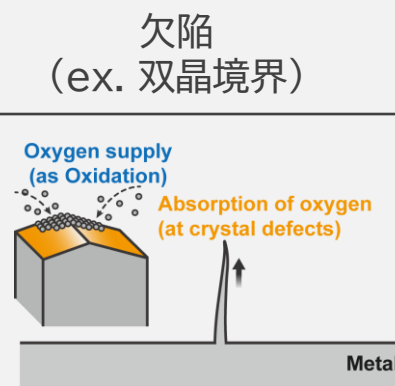
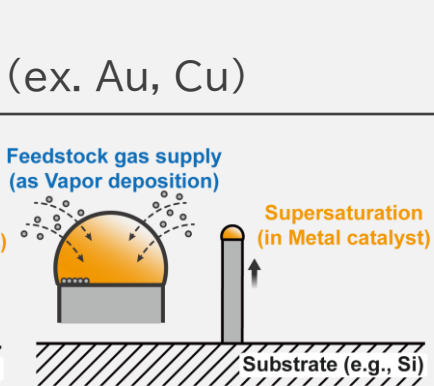
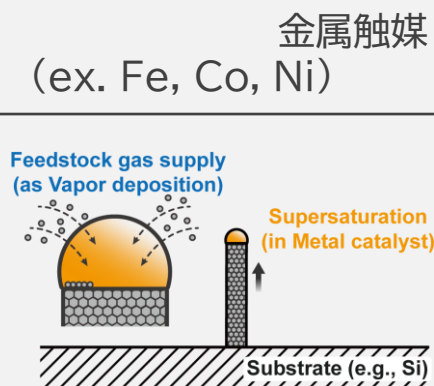
Table 1 世の中で報告されている様々な元素の1次元ナノ構造体との比較表

	カーボンナノチューブ (C)	半導体ナノワイヤ (Si, Ge, etc.)	金属酸化物ナノワイヤ (CuO, Fe ₂ O ₃ , etc.)	純金属ナノワイヤ 【Al など】
手法	触媒内の原材料過飽和による結晶成長 (Vapor-Liquid-Solid法)		固体表面への吸着分子が もたらす結晶成長	固相中の原子拡散 『マイグレーション』
前駆体 (原材料)	気相 (ex. C, C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆ O)	気相 (ex. SiH ₄ , Ge ₂ H ₆)	気相 & 固相 (ex. O ₂ & 金属)	固相 (ex. 金属)
原子を どう供給するか	固-液界面(基板-触媒) @根元/先端		気-固界面(O ₂ ガス-酸化物) @先端	固-固界面(ex. 粒界) @根元
駆動力	過飽和度に依存した 化学ポテンシャルの変化		核生成サイトとして作用する 欠陥に起因した 化学ポテンシャルの変化	固体中の原子拡散を促す 化学ポテンシャルの変化
成長核	金属触媒 (ex. Fe, Co, Ni)	金属触媒 (ex. Au, Cu)	欠陥 (ex. 双晶境界)	未解明

原子を
どう供給するか

駆動力

原子を
どう集めて
どう排出するか



従来技術とその問題点

重要なのは



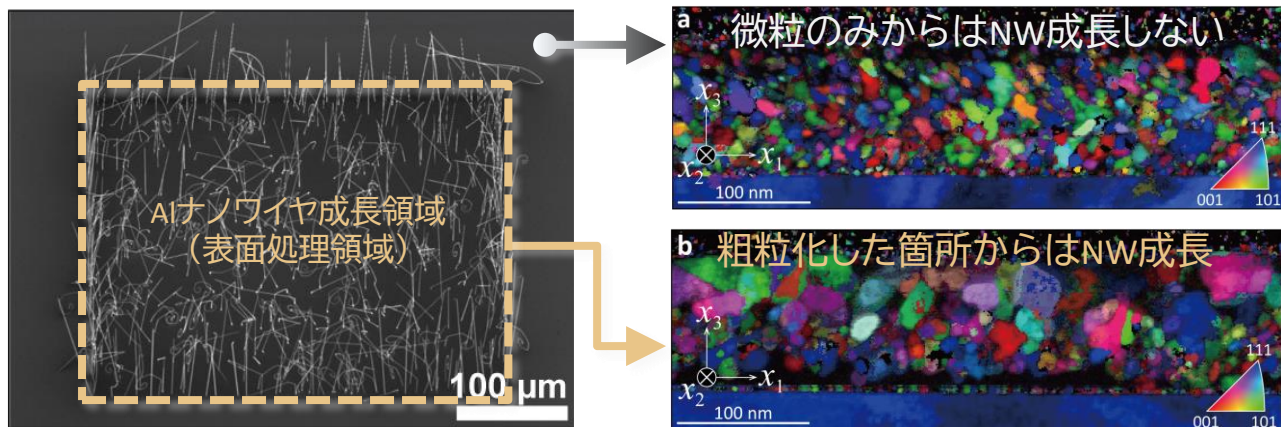
従来、確率的であった金属ナノワイヤ成長について、人工的に安定して大量成長させる手法開発に世界で初めて成功

製造可能な金属ナノワイヤの特徴

- ✓ 成長領域の制御が可能
- ✓ 高アスペクト比 (≥ 100) による高い比表面積
- ✓ さまざまな金属種で成長可能
- ✓ 基板に垂直
- ✓ 化学溶液フリーなドライ手法
- ✓ デバイスへ組み込み可能

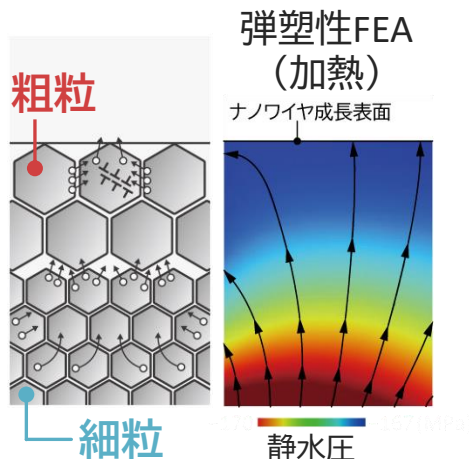
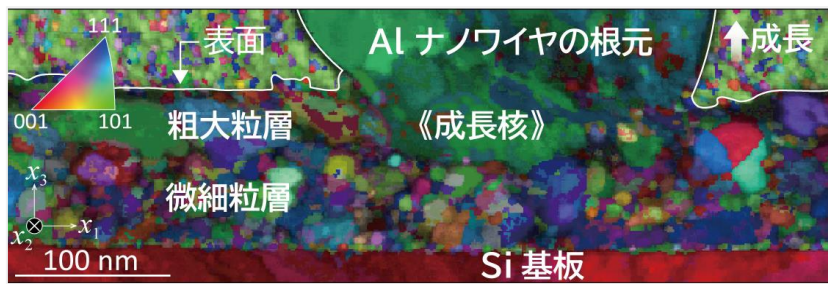
新技術の概要

「強くて軽い」「高比表面積」を実現する新素材つくれます
多様な材料づくりの基礎技術



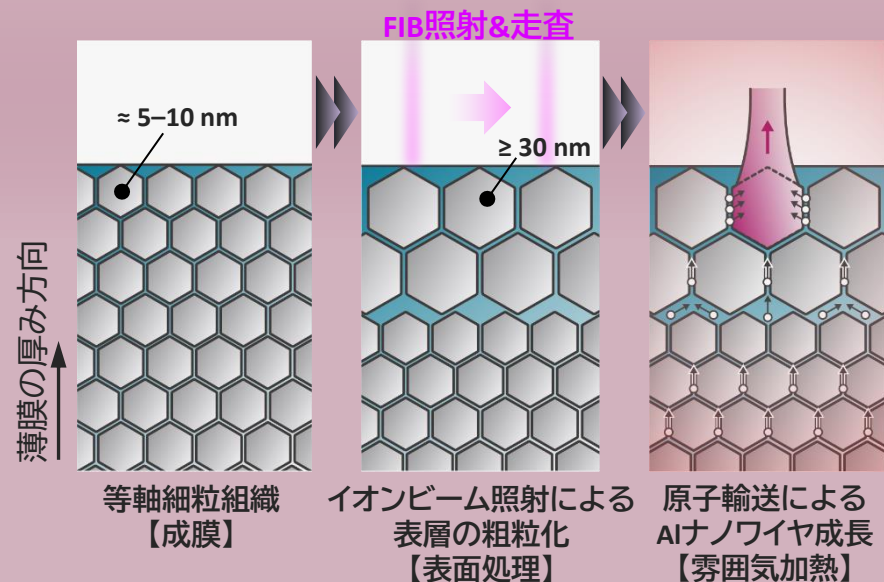
イオンビーム照射によって
Al NW成長箇所を定めることに成功した成果
Y. Kimura, et al., *Science*, vol.385 (2024) 641

TEM-EBSD (nmオーダーでの結晶方位解析)



ボトムアップ式金属ナノワイヤ創製法

加熱による自己組織的成長
加熱により生じる静水圧応力勾配を利用して表面から析出

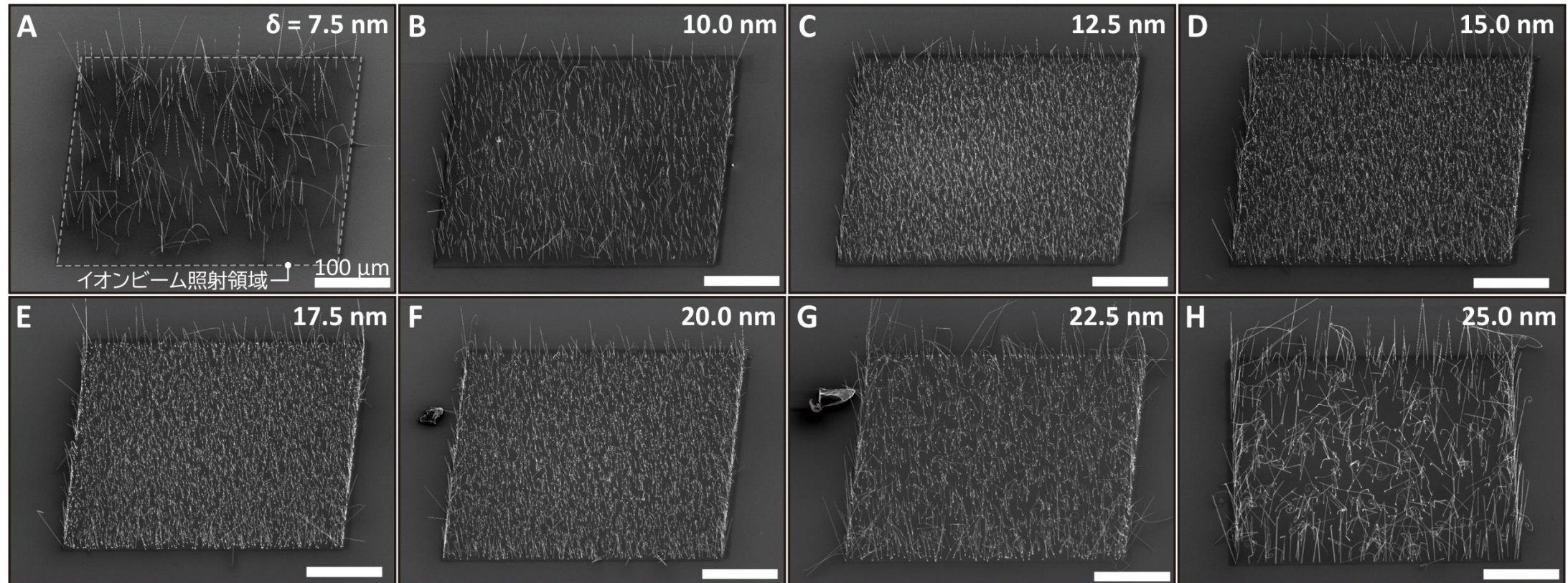


[特徴1] Al NWが成長する領域を制御できる(数 μm ～数センチ領域)

[特徴2] Al NWの長さや直径を制御できる

新技術の概要

「強くて軽い」「高比表面積」を実現する新素材つくれます
多様な材料づくりの基礎技術



δ : イオンビーム照射による薄膜のエッチング深さ

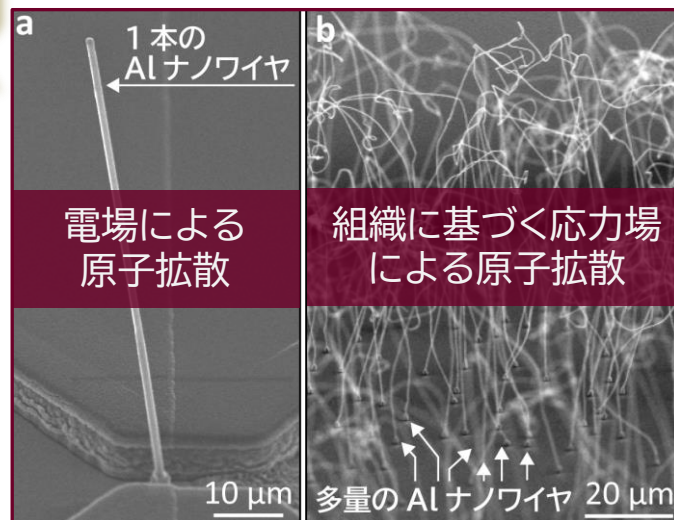
Al NW成長の例

Y. Kimura, et al., *Science*, vol.385 (2024) 641

新技術の概要

純金属ナノワイヤ(NW)の成長原理を解明 + 技術化することに成功
【これまで】従来の純金属NW成長は不確定事象であり、技術化されていなかった

約半世紀進展がなかった
ボトムアップ純金属NW研究に
大きな進展



Kimura
(2018)

Acta Mater., vol.157, 276

Kimura et al.
(2024)

特願2024-010984
Science, vol.385, 641

FIG. 木村らによるAI NW成長成果

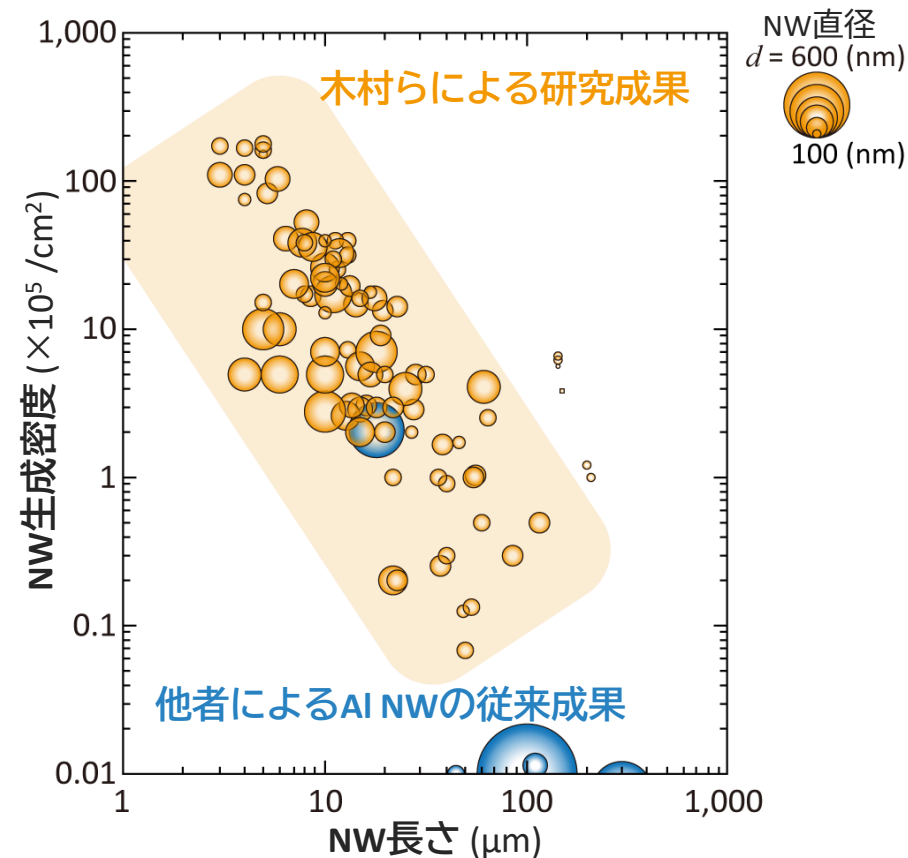
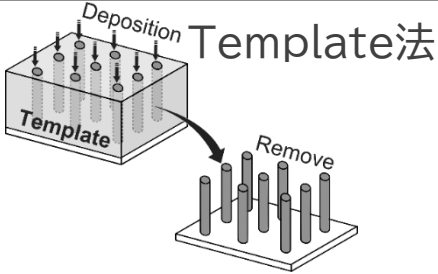

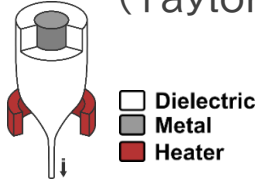
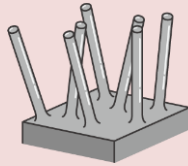

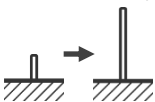


FIG. AI NWに関する密度vs.長さグラフ

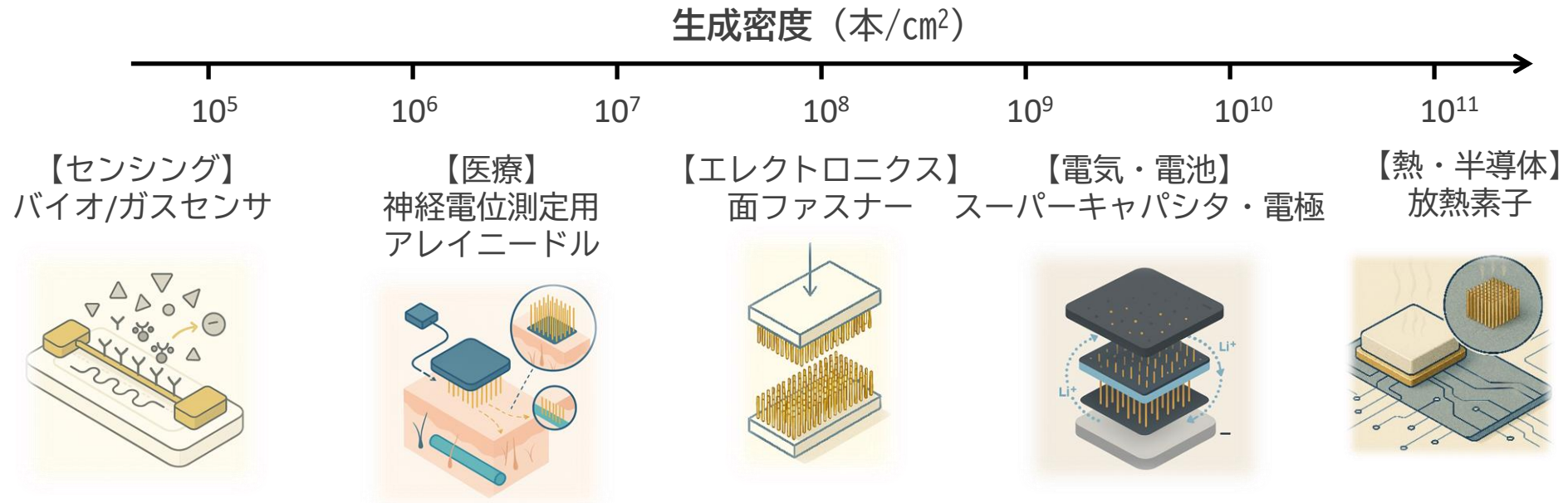
原子拡散を駆逐することによって
狙った箇所に長尺で大量に純金属NWを基板に垂直成長させることができる(基板に水平にも生やせます)

新技術の特徴・従来技術との比較

	類似手法			本技術
	 <p>Template法</p>	 <p>化学還元合成法 (Polyol法)</p>	 <p>ガラス被覆溶解紡糸法 (Taylor法)</p>	<p>原子拡散を駆使した 金属ナノワイヤ生成</p> 
<p>直径制御性</p> 	<p>○ ～数百マイクロ径 ※テンプレート径に依存</p>	<p>○ ナノ～マイクロ径</p>	<p>△ ～マイクロ径 ※長さとのトレードオフ</p>	<p>○ ナノ～マイクロ径</p>
<p>アスペクト比</p> 	<p>△ ～100</p>	<p>× ～50</p>	<p>◎ ≥10,000 ※直径とのトレードオフ</p>	<p>◎ ≥ 1,000 直径100 nm～ 長さ100 μm～</p>
<p>密度制御性</p>	<p>○ テンプレート種に 依存</p>	<p>× 分散液で凝集</p>	<p>× 単線</p>	<p>○ 高密度</p>
<p>材料選択性</p>	<p>テンプレート除去液に 耐性のある元素(Alは困難)</p>	<p>還元反応が可能な 元素に限定(Alは困難)</p>	<p>低融点材料 (ガラス曳糸性のため)</p>	<p>金属全般</p>
<p>その他</p>	<ul style="list-style-type: none"> 基板に垂直 Wet手法 廃液による環境負荷 多結晶 	<ul style="list-style-type: none"> 液に分散・凝集 Wet手法 廃液による環境負荷 単結晶 	<ul style="list-style-type: none"> 線引き塑性加工 Dry手法 ガラスで被覆 多結晶 	<ul style="list-style-type: none"> 基板に垂直 Dry手法 成長領域の制御可能 単結晶

想定される用途

① 長さ/密度制御によるデバイスとしての利用



《従来用途の代替》

- 電子配線(Al, Cu, Co, Ru)
- 電子顕微鏡フィラメント(Wなど)
- 電子部品用ボンディングワイヤ(軽金属)
- 複合材料としての包埋
- 自動車用ワイヤハーネス
- 高導電性オーディオケーブル

etc.

想定される用途

② 自在な成長制御による技術としての利用

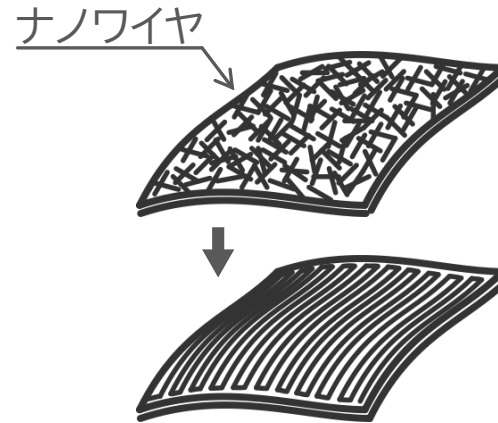
《Drawing技術への展開》

- 3Dプリンティング(Additive Manufacturing)としての活用
- 透明導電膜(導電性シート)におけるワイヤ作製/アセンブリ技術の統合
- はんだバンピング/電子デバイスviaフィル技術への応用 etc.

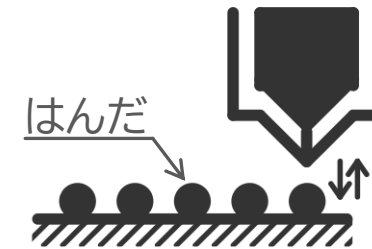


3Dプリンティング
(Additive Manufacturing:AM)

*極細ボンディングワイヤとしても



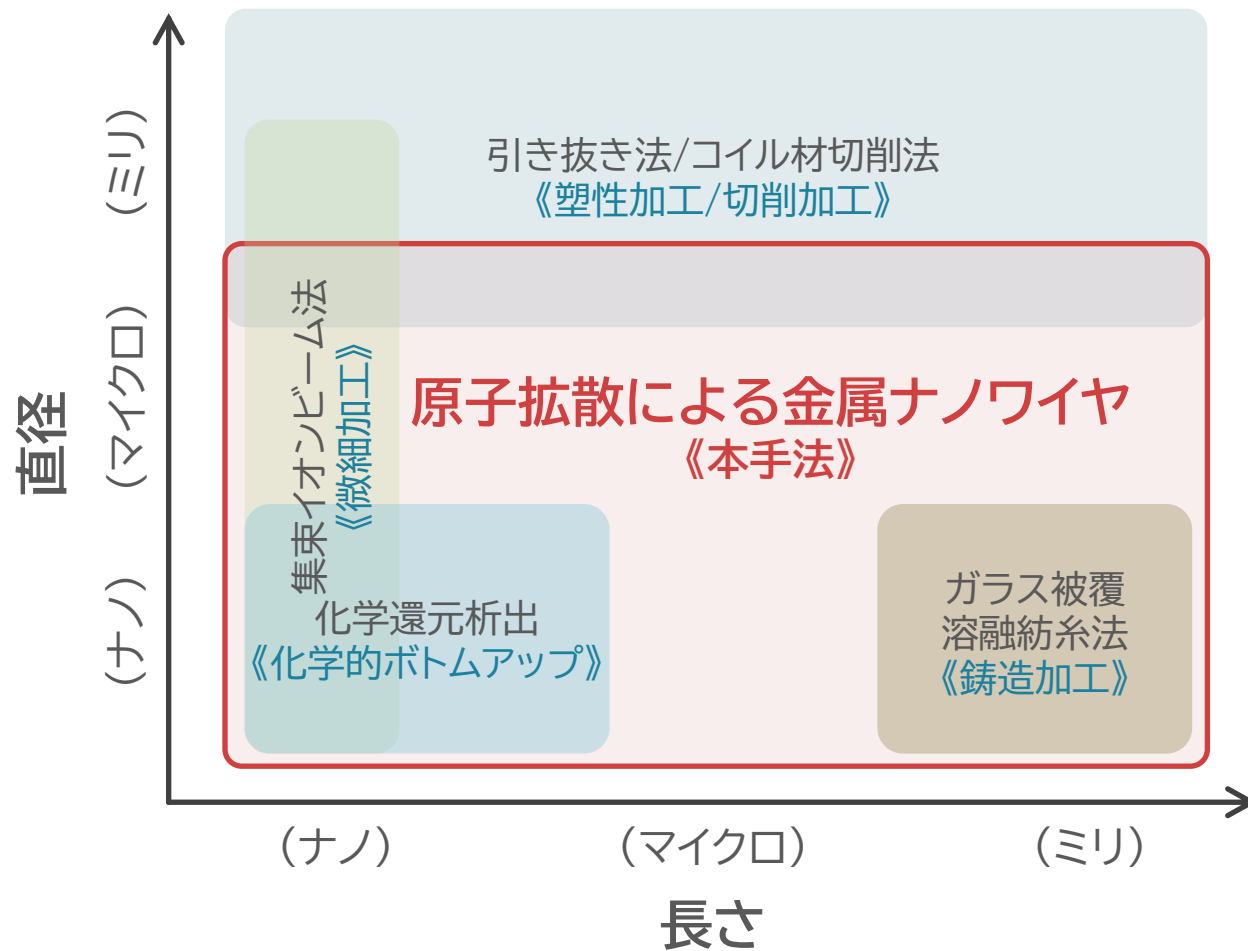
透明導電膜
(導電性シート)



はんだバンピング
(金属ディスペンサー)

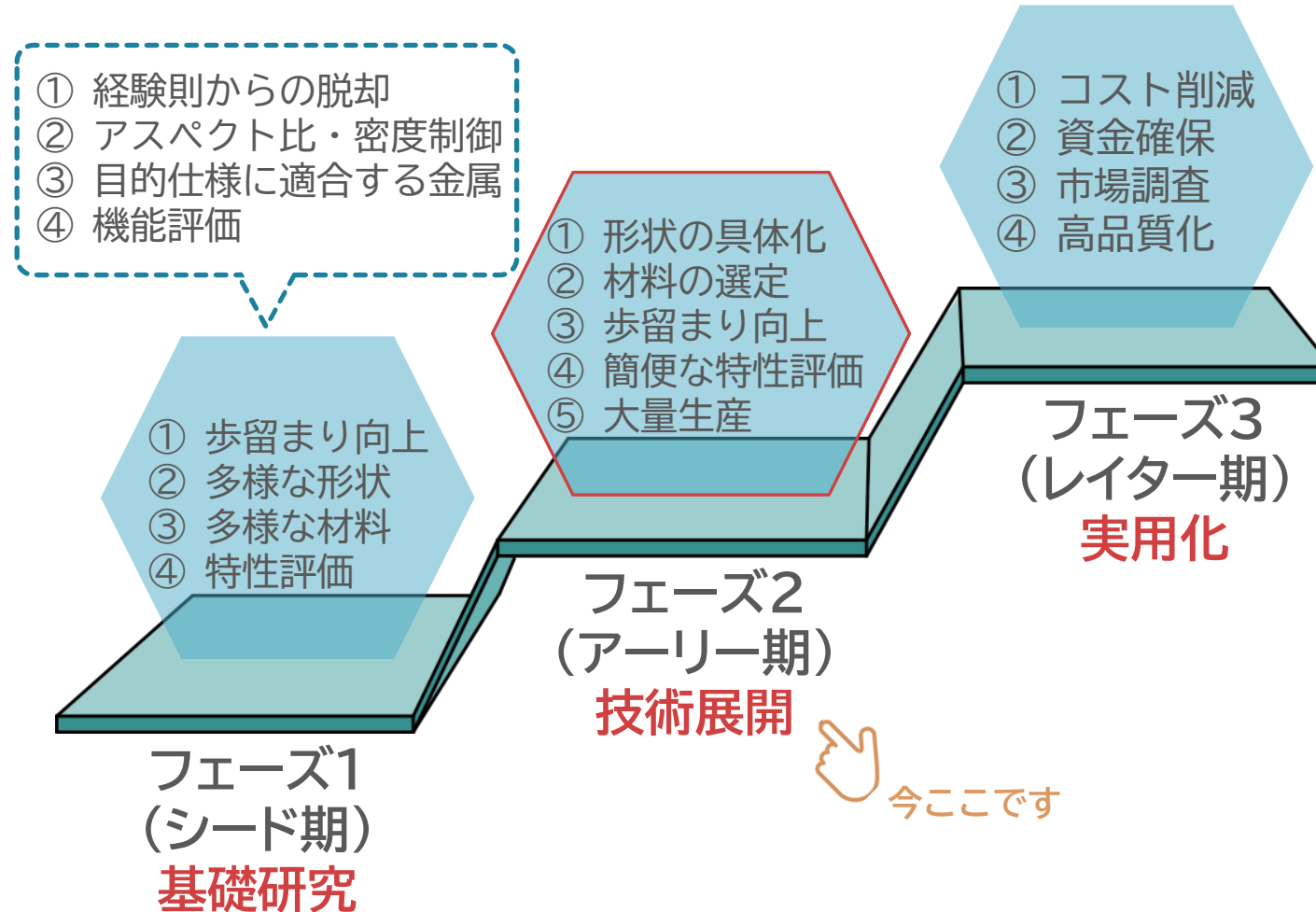
想定される用途

金属ナノワイヤの技術&用途マトリクス



実用化に向けた課題

社会ニーズに合った課題設定と応用 スケーラビリティ・成長領域のサイズ制御・低コスト化



社会実装への道筋

時期	取り組む課題・社会実装への取り組み
現在	<ul style="list-style-type: none">・結晶粒組織制御による金属ナノワイヤ成長原理の発見・Alナノワイヤ群の高密度化(従来比10~100倍)
2年後	<ul style="list-style-type: none">・プロセスのスケールアップ(ウェハサイズへの適用)・デモンストレーション実施 (例:光学素子・センサー応用)
5年後	<ul style="list-style-type: none">・主要特性の評価(光学・電気・表面反応活性・力学)・安定性試験(耐久性・耐酸化性・耐熱性)・用途別の材料最適化手法確立
7年後	<ul style="list-style-type: none">・大面積・低コスト製造プロセスの実現・光回路/センシング/エレクトロニクス実装素子としての展開・標準化/試験サービス確立、量産化・市場投入

企業への貢献・PRポイント

1. 本技術は既存デバイスにおける所望箇所で大表面積化が可能
例：放熱性の向上・接触抵抗の低減・反応特性の向上
 2. 現場ニーズに基づき元素・サイズ・密度を指定してもらえれば検討可能
- ※ 金属ナノワイヤ導入/ウィスカ低減策に関する技術指導も可

企業への期待

次世代の小さなモノづくりプラットフォームとして 多様な実用化を共にチャレンジ

カーボンナノチューブや半導体ナノワイヤに匹敵する「金属ナノワイヤ社会実装プラットフォーム」を目指す

- 将来を見据えたアーリーステップからの共同研究を希望【実装に向けた技術開拓】
 - (1) 「従来の発想に無い」金属ナノワイヤの新しい使い道の開拓
- 既存製品で求めるドメイン&ニーズに対して、
本技術による社会的課題の打破&本技術の更なる高度化
 - (1) 電子デバイス | 所望位置での大表面積による放熱ヒートシンク・導電性via etc.
 - (2) 光デバイス | ナノスケールプラズモニック導波路 etc.
 - (3) 構造材料 | 高い比強度を活かした宇宙エレベータケーブル etc.
- このような金属のナノワイヤを作って欲しい(直径・長さ・元素・密度)という要望も歓迎します

本技術に関する知的財産権

- ・ 発明の名称 : ナノワイヤ製造装置およびナノワイヤ製造方法
 - ・ 登録番号 : 特許第7550440号
 - ・ 出願人 : 国立大学法人東海国立大学機構
 - ・ 発明者 : 木村 康裕、巨 陽
-
- ・ 発明の名称 : 金属ナノワイヤ製造方法および金属ナノワイヤデバイス
 - ・ 公開番号 : 特開2025-116514
 - ・ 出願人 : 国立大学法人東海国立大学機構
 - ・ 発明者 : 木村 康裕、崔羿、徳悠葵、巨 陽

お問い合わせ先

九大OIP株式会社
サイエンスドリブンチーム

TEL :092-400-0494

Email :transfer@airimaq.kyushu-u.ac.jp