

電流のみで駆動するナノワイヤ製造装置

名古屋大学 大学院工学研究科マイクロ・ナノ機械理工学専攻
助教 木村康裕

2021年11月26日(金)
JST新技術説明会(戦略的創造研究推進事業主催)
14:00-14:25



本日のアウトライン

本技術は
“優れた諸特性を有するナノワイヤを、
自在に作ることを可能にする
電流駆動のところてん式ナノワイヤ製造装置/技術”

1. ナノワイヤ(ウヰスカ)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？

極小なスケールに由来する優れた諸特性を有する微細な材料

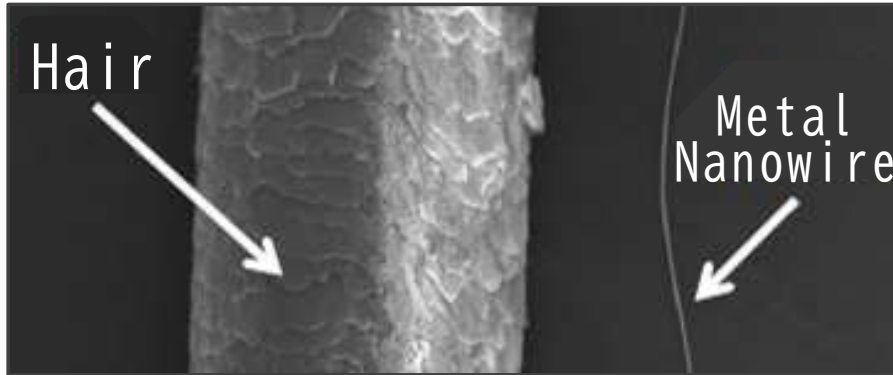


FIG. 1 髪の毛と金属ナノワイヤ¹

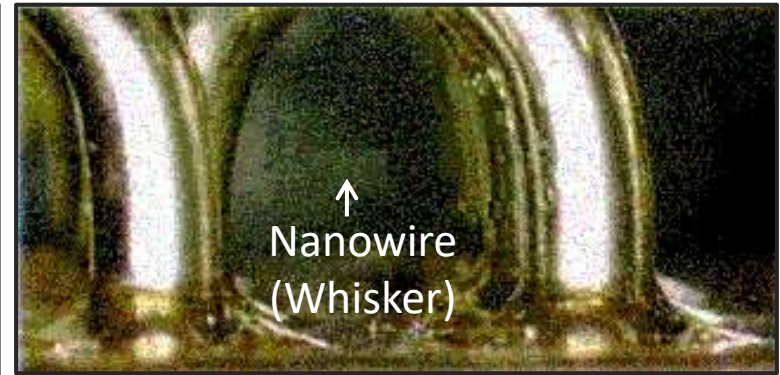


FIG. 2 金属ナノワイヤ成長の様子¹

特徴

- ✓ 高アスペクト比
- ✓ 高比表面積
- ✓ 特異な導電性・熱伝導性
- ✓ 高弾性・高強度

Snナノワイヤ：2～3%弾性ひずみ²
Alナノワイヤ：バルクの20倍の降伏応力³



強度低下となる結晶欠陥が少ない

1. NASA, <https://nepp.nasa.gov/whisker/>
2. C. Herring and J. Galt, *Phys. Rev.*, Vol. 85 (1952) 1060.
3. H. Tohmyoh, et al., *J. Phys. Soc. Jpn.*, Vol. 81 (2012) 094803.

ナノワイヤの材料特性

極小なスケールに由来する優れた諸特性を有する微細な材料

TABLE 1 金属ナノワイヤと他材料における材料特性の比較

	金属			非金属		
材料	Al ナノワイヤ	Cu ナノワイヤ	ハイテン	Carbon fiber	Single-walled Carbon Nanotube	くも糸
径	マイクロ ≈1.0 μm ナノ ≈数十 nm	マイクロ ≈1.2 μm ナノ ≈5.8 nm	バルク材	マイクロ ≈7.3 μm	ナノ 0.6-0.8 nm	N/A
結晶 構造	単結晶	単結晶	多結晶	N/A	N/A	N/A
力学 物性	降伏応力 0.425 GPa ⁴ 2.0 GPa ⁹	引張強さ 0.80~3.00 GPa ^{5,6} 5.8 GPa ⁵	引張強さ ≥ 0.49 GPa ¹⁰	引張強さ 3.8 GPa ⁷	引張強さ 50-500 GPa ⁷	引張強さ 0.180 GPa
特徴	加工性良好(耐熱性・展延性・焼結性) ⁸ 体積強度比・リサイクル性・補修性			高強度・軽量・ノウハウ豊富		

4. H. Tohmyoh, et al., *J. Phys. Soc. Jpn.*, Vol. 81 (2018) 276.

5. Y. Yue, et al., *Nano Lett.*, Vol. 11 (2011) 3151.

6. Brenner, *J. Appl. Phys.*, Vol. 27 (1956) 1484.

7. M.H. Al-Saleh and U. Sundararaj, *Composites, Part A*, Vol. 42 (2011) 2126.

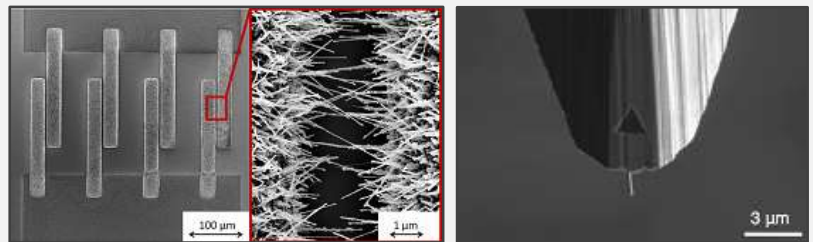
8. *日経ものづくり*, 3月号 (2017) 34.

9. S. Kim, et al., *Acta Materialia*, Vol. 160 (2018) 14.

10. *こべるにくず*, Vol. 6 (1997) 1.

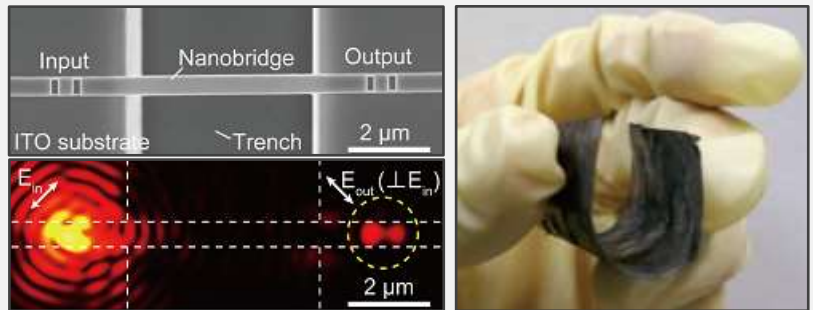
背景 素材としてのナノワイヤの重要性

産業的価値 特異な性質を利用したデバイス **学術的価値** 力学特性を理解する理想的試料



ガスセンサ¹¹
高比表面積による高感度

原子間力顕微鏡プローブ¹²
極小さに由来する高分解能



光導波路¹³
ナノに由来する光特性

透明導電性シート¹⁴
寸法効果を打破する高導電性

FIG. 3 ナノワイヤの応用事例

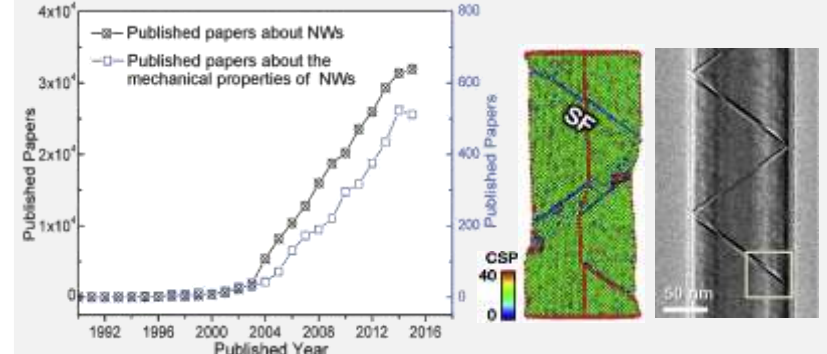


FIG. 4 (左)ナノワイヤおよびその機械特性に関する論文の推移¹⁵
(右)ナノワイヤ引張試験による積層欠陥生成の様子¹⁶

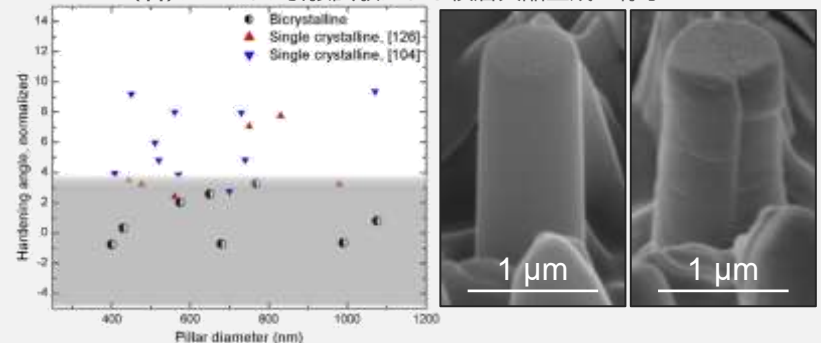


FIG. 5 (左)ピラーの寸法依存性¹⁷ (右)ピラー圧縮試験前後の様子¹⁸

課題 **機能材料**としての応用に限定

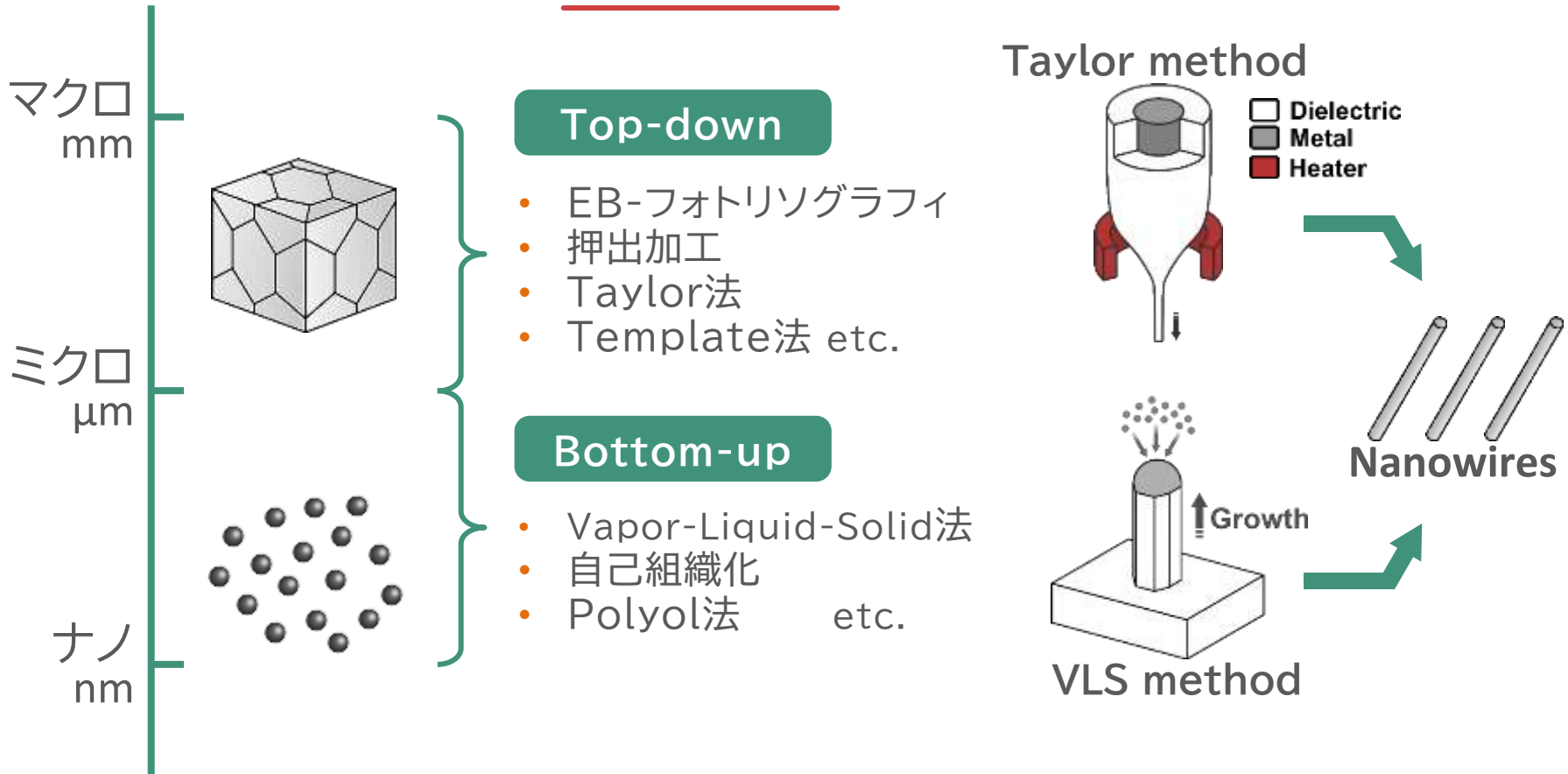
特定の形状/結晶性を有した材料特性の理解

- 11. S. Steinhauer, et al., *Sens. Actuators, B*, Vol. 186 (2013) 550.
- 12. M. Motoyama and F. Prinz, *ACS Nano*, Vol. 8 (2014) 3556.
- 13. Y. Nagasaki, et al., *MRS Commun.*, Vol. 5 (2015) 587.
- 14. M. Kawamori, et al., *Nano Lett.*, Vol. 14 (2014) 1932.

- 15. S. Wang, et al., *Adv. Sci.*, Vol. 4 (2017) 1600332.
- 16. S.-H. Kim, et al., *Acta Mater.*, Vol. 160 (2018) 14.
- 17. S.-H. Kim, et al., *Acta Mater.*, Vol. 196 (2020) 69.
- 18. A. Kunz, et al., *Acta Mater.*, Vol. 59 (2011) 4416.

従来技術とその問題点

ナノワイヤを自在に作る技術が存在しない



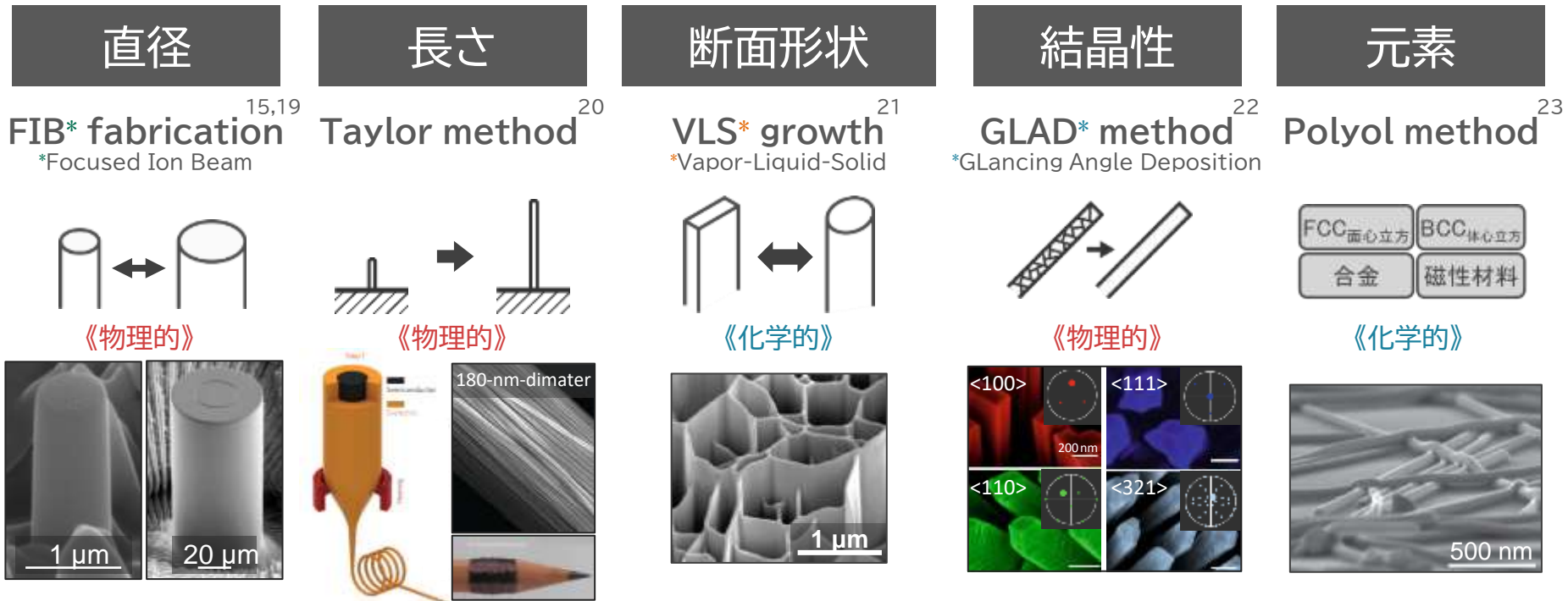
新たなワイヤ製造技術開発の必要性

従来技術とその問題点

ナノワイヤを自在に作る技術が存在しない

個別の要素を満足する技術は存在するが、網羅的な技術は存在しない
《ex. 高強度材料への適用には、極細・超長・単結晶化の全てが必須》

粒径/方位/転位密度/双晶など



15. S. Wang, et al., *Adv. Sci.*, Vol. 4 (2017) 1600332.
 19. S. Shahbeyk, et al., *Cryst.*, Vol. 9 (2019) 1.
 20. M. Yaman, et al., *Nat. Mater.*, Vol. 10 (2011) 494.

21. M. Brewster, et al., *J. Phys. Chem. Lett.*, Vol. 2 (2011) 1940.
 22. Y. Tao and C. Degen, *Nat. Commun.*, Vol. 9 (2018) 1.
 23. E. Garnett, et al., *Nat. Mater.*, Vol. 11 (2012) 241.

従来技術とその問題点

もう少し要点を絞ると

ナノワイヤがなぜ普及しないのか？

長いものが作れないから

ナノワイヤ特有の物性維持した超長化
《スケールアップ》

幾何形状に多様性がないから

用途拡大に向けた幾何形状の制御
《幾何デザイン》

独自技術

エレクトロマイグレーションによるナノワイヤ創製法により実現
(電流のみで駆動するナノワイヤ製造装置)

ナノワイヤの優れた特性を活かした高強度機械材料/機能材料としての普及

新技術の概要

ところてん式ナノワイヤ創製法 電流によるマイクロスケール押出加工
加熱しながら電流を流し圧力差(静水圧応力差)を利用して射出

※右イラスト射出機構に相当
保護膜により配線拘束

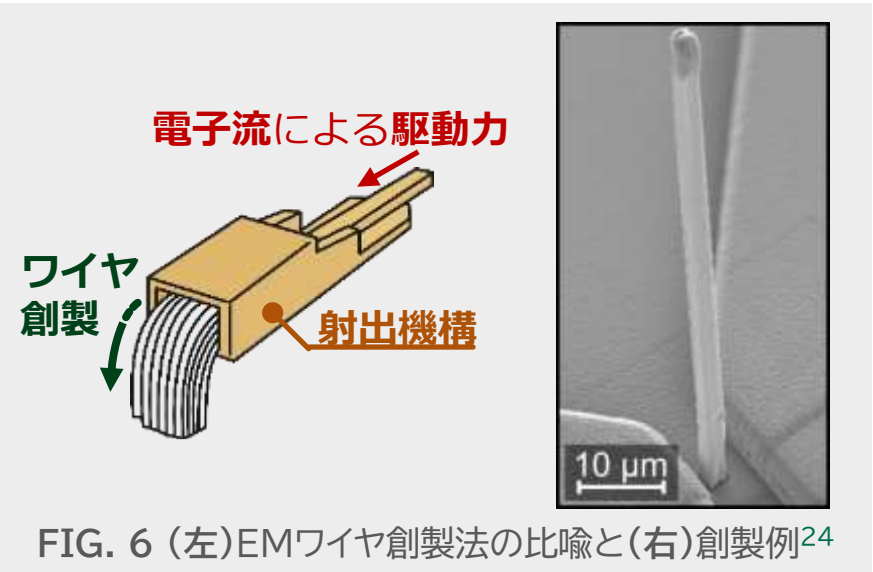
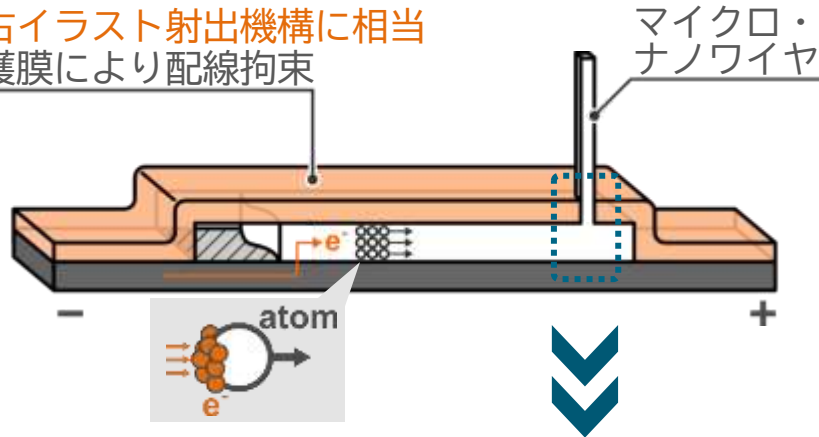
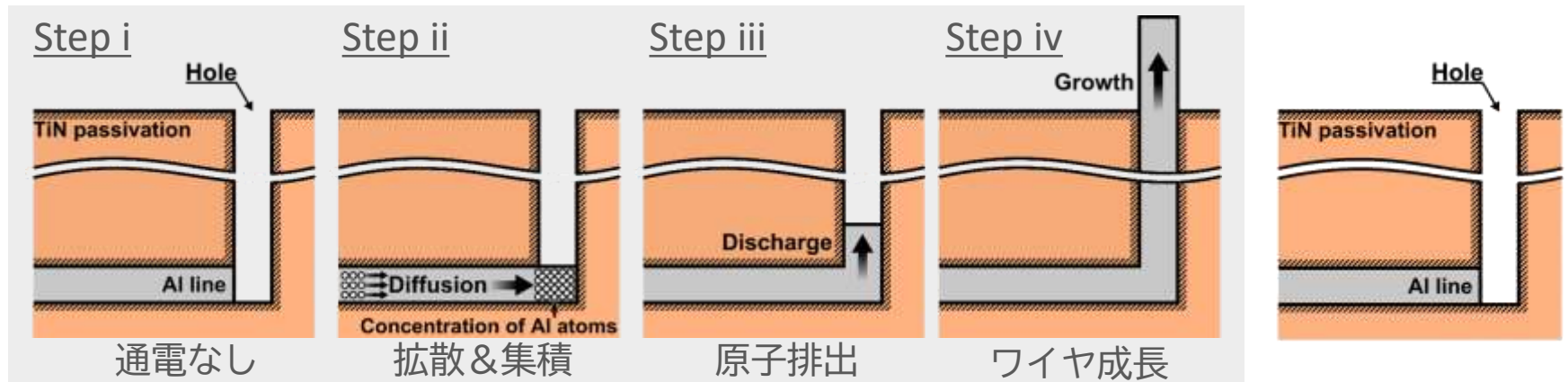


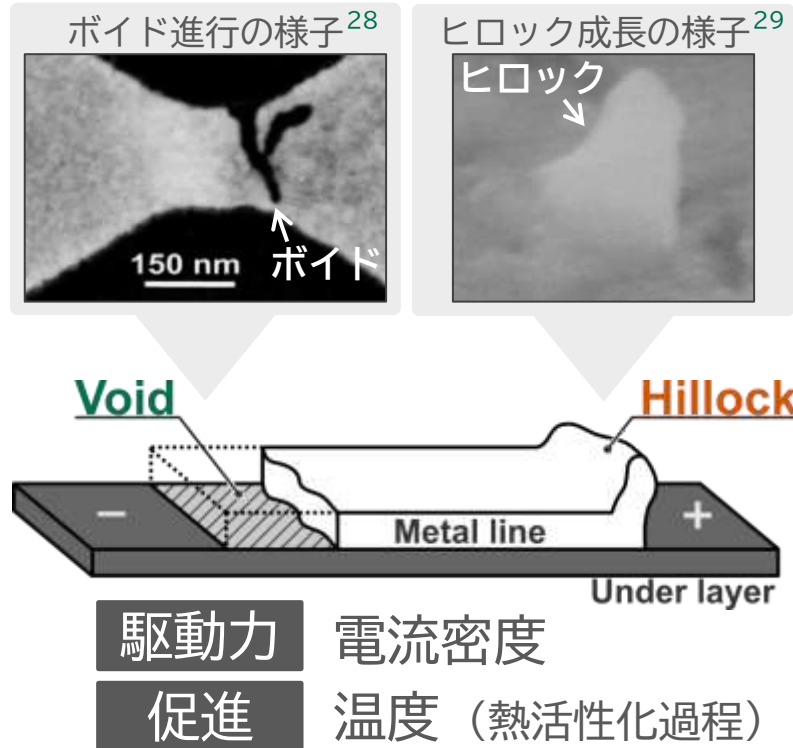
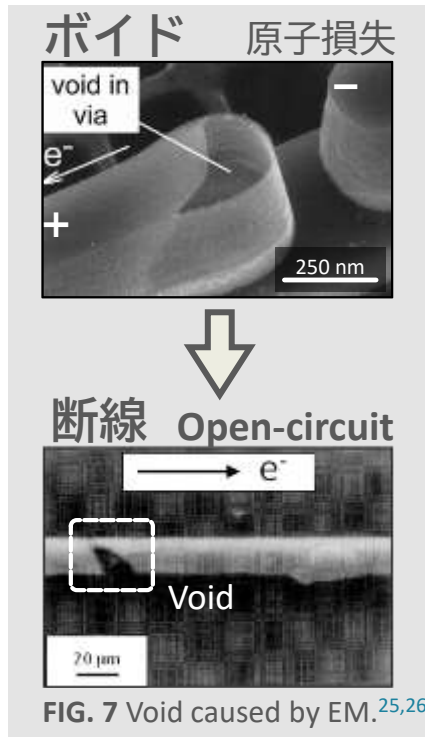
FIG. 6 (左)EMワイヤ創製法の比喩と(右)創製例²⁴



24. Y. Kimura, *Acta Mater.*, Vol. 157 (2018) 276..

動作原理 エレクトロマイグレーションとは？

高密度電子流を駆動力とした金属原子の拡散現象



25. A.H. Fischer, A. Abel, M. Lepper, et al., *Microelectron. Reliab.*, Vol. 41 (2001) 445.

26. Website: <http://www.csl.mete.metu.edu.tr/Electromigration/emig.htm>

27. I.A. Blech, *J. Appl. Phys.*, Vol. 47 (1976) pp. 1203–1208.

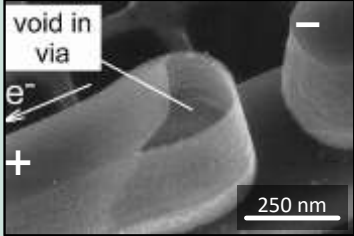
28. Website: <https://www.dailymotion.com/video/x2kdzc6> “Electromigration réussie.”

29. Website: <https://www.youtube.com/> “Electromigration: Hillock growth in conductor lines.”

動作原理 エレクトロマイグレーションの活用例

害悪因子を応用したマイクロ・ナノワイヤ創製

ボイド 原子損失



形状制御 ↓
ナノギャップ

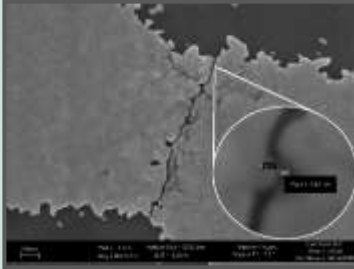
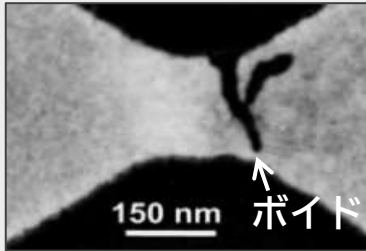



FIG. 9 Nanogap by EM.³⁰

ボイド進行の様子²⁸

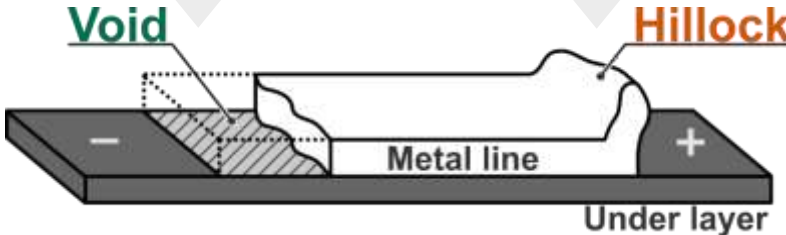


150 nm ボイド

ヒロック成長の様子²⁹



ヒロック



Void Hillock
Metal line
Under layer

ヒロック 原子集積



10 μm

形状制御 ↓
マイクロ・ナノワイヤ



10 μm

FIG. 10 Micro/nanowire by EM.³¹

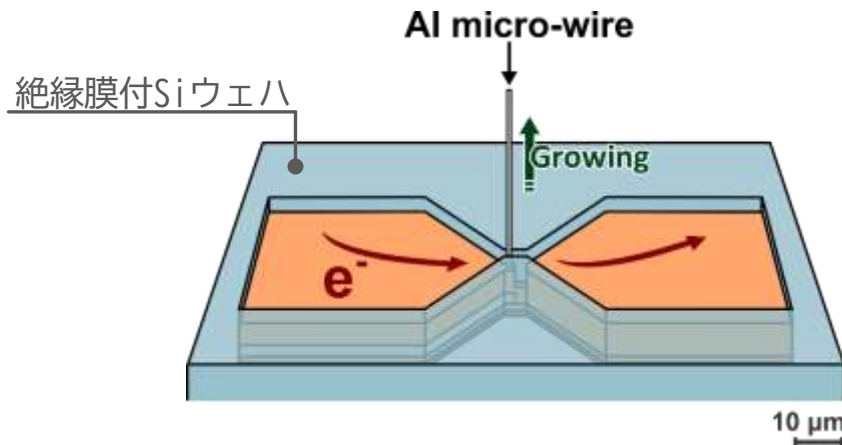
マイクロ・ナノワイヤ創製のための創製技術に応用

28. Website: <https://www.dailymotion.com/video/x2kdzc6> "Electromigration réussie."
 29. Website: <https://www.youtube.com/> "Electromigration: Hillock growth in conductor lines."
 30. P. Motto, et al., *Nanoscale Res. Lett.*, Vol. 7 (2012) 113.
 31. Y. Kimura, *Acta Mater.*, Vol. 157 (2018) 276.

新技術の概要

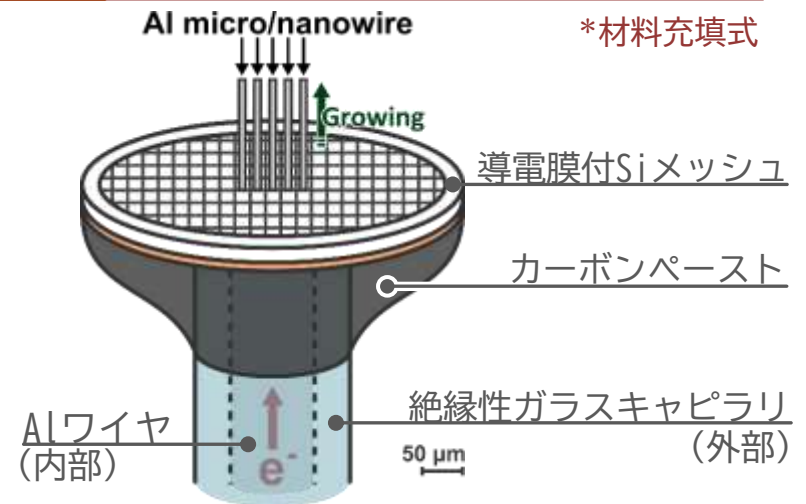
「強くて軽い」新素材つくれます 多様な材料づくりの基礎技術

方法1 チップ型サンプル構造³¹



- ✓ nm~ μm 径の創製
- ✓ nm~サブmm長の創製
- ✓ 単結晶・多結晶
- ✓ 自由断面形状

方法2 ファインインジェクション³²



- ✓ μm ~mm径の創製
- ✓ μm ~mm長の創製
- ✓ (単結晶)・多結晶・アモルファス
- ✓ 自由断面形状
- ✓ 手のひらサイズ (省電力)

31. Y. Kimura, *Acta Mater.*, Vol. 157 (2018) 276.

32. ナノワイヤ製造装置およびナノワイヤ製造方法, 特願2020-147169, 出願日2020年9月1日, 木村康裕, 巨陽

新技術の概要

新技術によるワイヤの創製例

方法2 ファインインジェクション

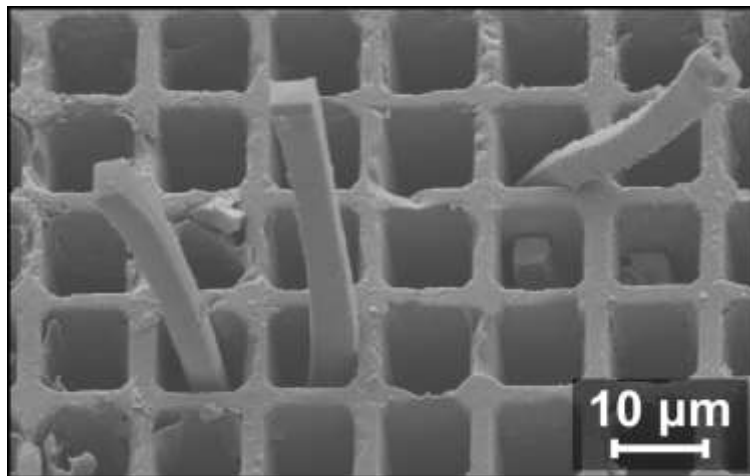
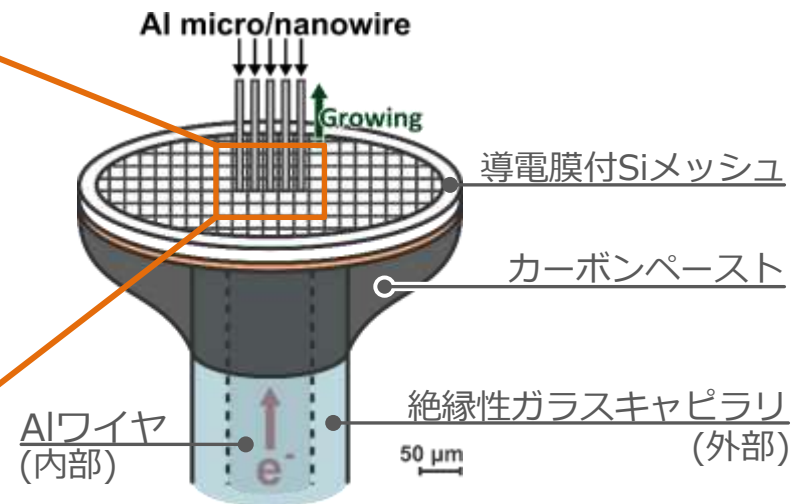


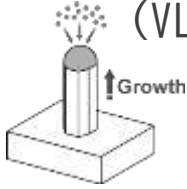
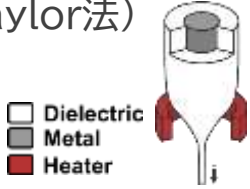
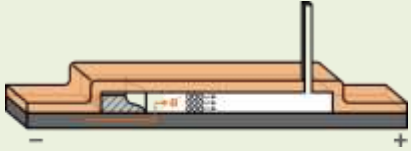

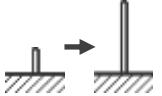
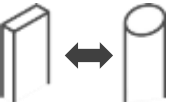

FIG. 11 Al microwires fabricated by Fine-injection.



エレクトロマイグレーションによる新機構
「ファインインジェクション」によってAlマイクロワイヤの創製に成功

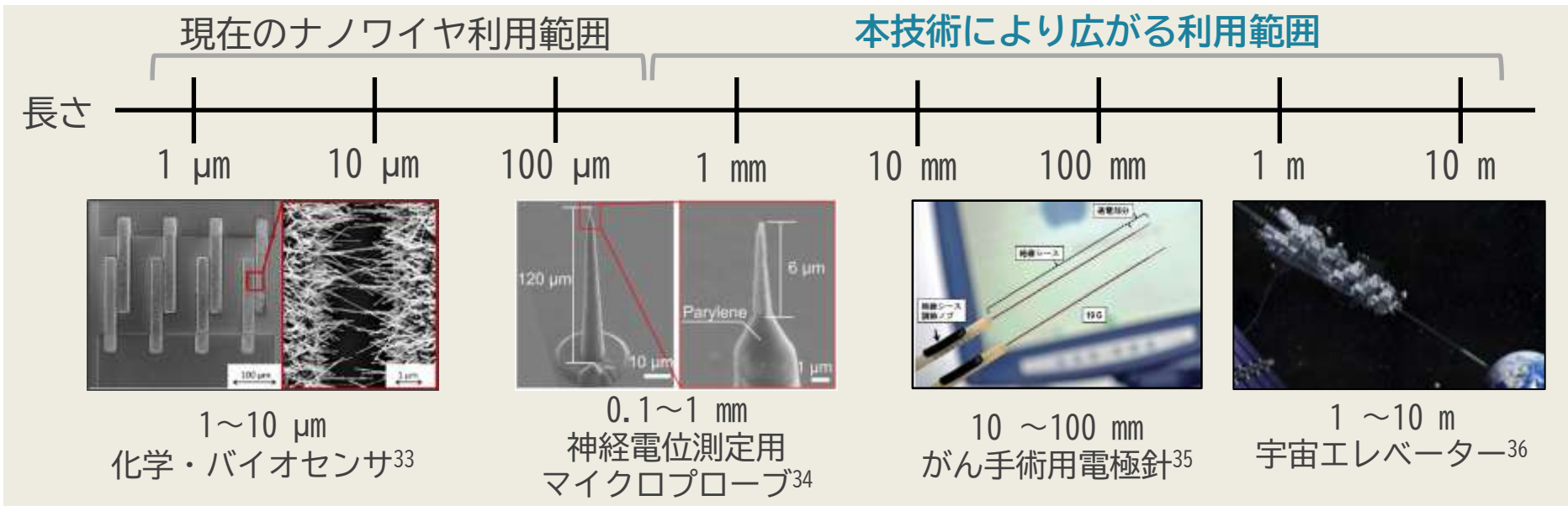
新技術の特徴・従来技術との比較

TABLE 2 類似研究と本研究の比較

	類似手法		本技術
	Vapor Liquid Solid法 (VLS) 	ガラス被覆溶融紡糸法 (Taylor法) 	電流のみで駆動する ナノワイヤ製造装置 
直径制御性 	× ~数百ナノ径 ※触媒径に依存	△ ナノ~マイクロ径 ※長さとのトレードオフ	○ ナノ~マイクロ径 ※射出孔径に依存
長さ制御性 	△ ~数十μm長	○ ~数メートル長	○ ~数メートル長 ※理論上
断面制御性 	△ 真円/矩形断面	× 真円断面	○ 円/矩形/チューブ ※理論上
材料選択性 	× 半導体	× 低融点材料	○ 全導電性材料 合金も可能

想定される用途

① 長さ/直径/元素制御による素材としての利用



《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 (Cu)
 - 高導電性オーディオケーブル (Cu)
- etc.

33. S. Steinhauer, et al., *Sens. Actuators, B.*, Vol. 186 (2013) 550.

34. Y. Kubota, et al., *Sens. Actuators, B.*, Vol. 258 (2018) 1287.

35. 森安史典 他, 膜臓, Vol. 30 (2015) 210.

36. タワー No. 53, 季刊大林, (2017): https://www.obayashi.co.jp/kikan_obayashi/detail/kikan_53_idea.html

想定される用途

② 長さ/直径/元素制御による技術としての利用

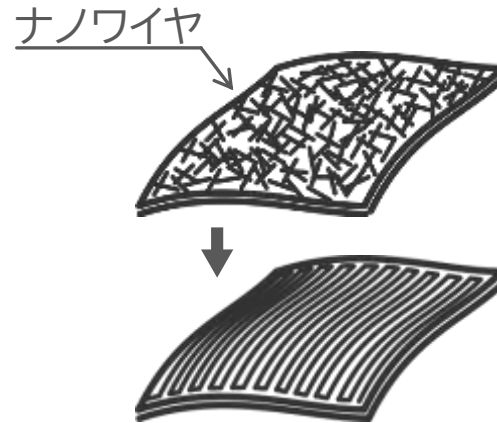
《Drawing技術への展開》

- 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.

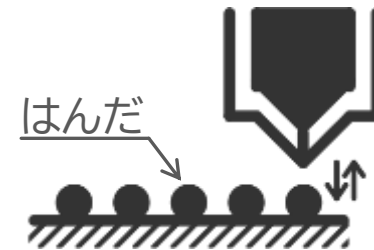


3Dプリンティング
(Additive Manufacturing:AM)

*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

③ 自由な断面形状による新用途

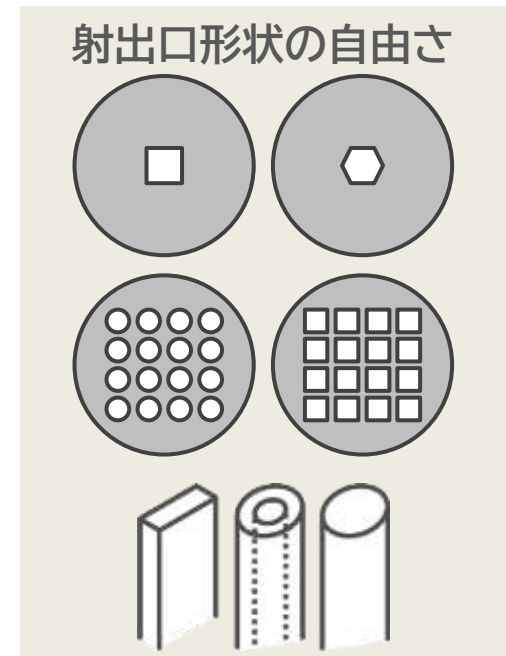
断面形状は射出口制御により自由に変化可能



無痛注射針

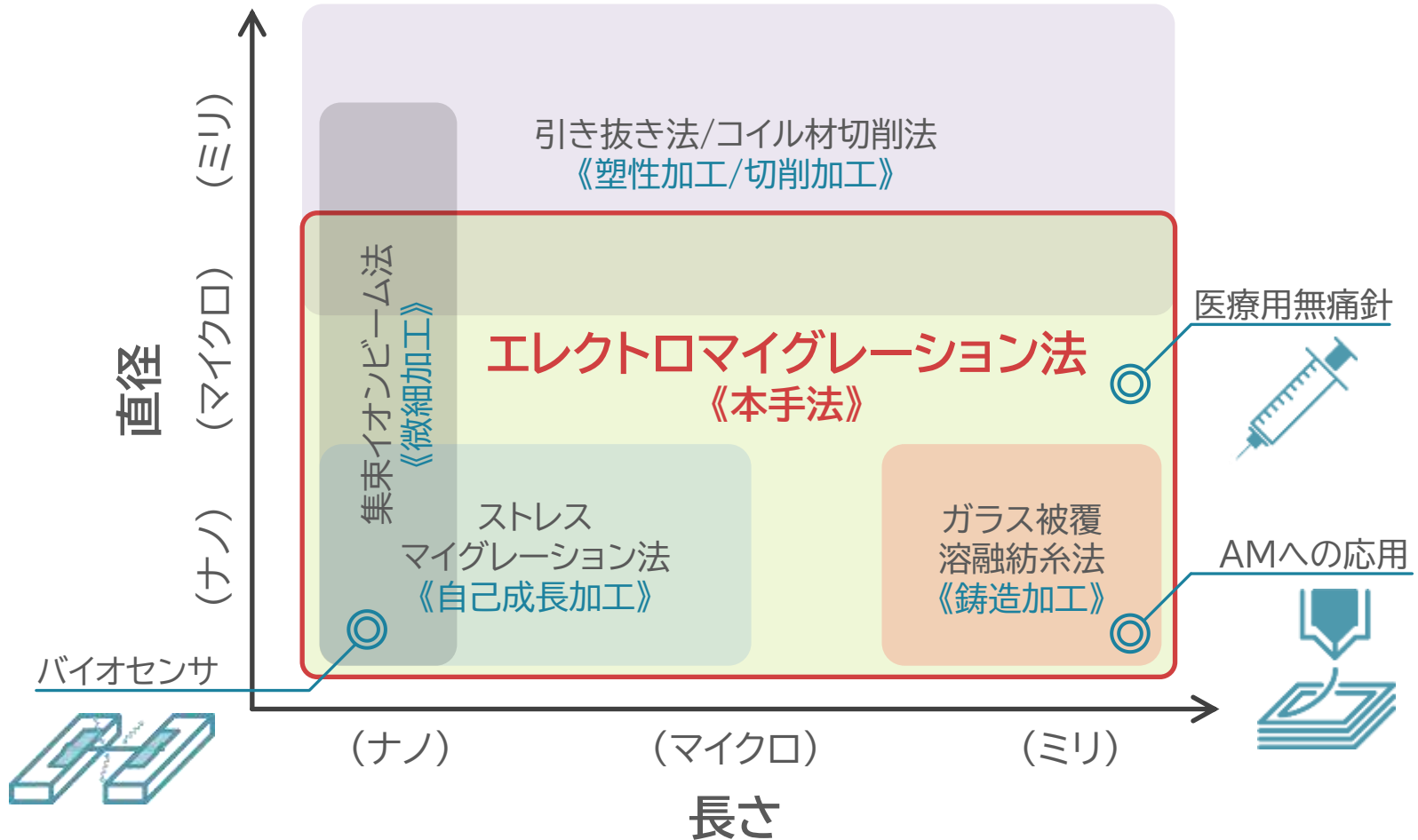


神経電位測定用
ナノプローブ



想定される用途

金属ナノワイヤの技術&用途マトリクス
*下記の技術マトリクスはすべて真円断面ワイヤの場合



実用化に向けた課題

社会Needsに合った課題設定と技術開発

例) 無痛針を作るには?

- ① 研究室レベルからの脱却
- ② 筒状
- ③ 生体適合性材料
- ④ 壊れにくさの評価

- ① 歩留まり向上
- ② 多様な形状
- ③ 多様な材料
- ④ 特性評価

フェーズ1
(シード期)
基礎研究

👉 今ここです

- ① 形状の具体化
- ② 材料の選定
- ③ 歩留まり向上
- ④ 簡便な特性評価

フェーズ2
(アーリー期)
技術展開

- ① コスト削減
- ② 資金確保
- ③ 市場調査
- ④ 高品質化

フェーズ3
(レイター期)
実用化

企業への期待

実用化に向けた課題を共にチャレンジ

- 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
- 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

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
- 出願番号 : 特願2020-147169
- 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

お問い合わせ先



国立大学法人東海国立大学機構
名古屋大学学術研究・産学官連携推進本部

TEL :052-788-6150

FAX :052-747-6796

Email: miraig@aip.nagoya-u.ac.jp