

究極の繊維 “クモ糸”の人工合成



スパイバー株式会社
代表取締役社長 関山 和秀

21世紀最大の問題

「石油枯渇」



アラミド繊維

ポリエステル

ポリプロピレン

アクリル

炭素繊維

ポリエチレン

ナイロン

PBO繊維



次世代のスーパー繊維：“クモ糸”

- 鋼鉄の4倍の強度
- ナイロンを上回る伸縮性
- 既存繊維中で最高の『タフネス（靱性）』
- 300℃まで耐える耐熱性
- シルクと同じ『タンパク質』でできている
- 原料を『発酵』で作れる：バイオマス化可能

天然のクモ糸と、その他繊維材料の特徴比較

※ Gosline et al. 1999
 ※※ Swanson et al. 2006
 ※※※ Agnarsson et al. 2010

特性 材料	密度, ρ	タフネス (タフネス / ρ)	強度, σ_{\max} (σ_{\max} / ρ)	弾性率, E_{init} (E_{init} / ρ)	伸度, ϵ_{\max}
	(g/cm ³)	(MJ/m ³)	(GPa)	(GPa)	(%)
高張力鋼※	7.8	6 (0.8)	1.5 (0.19)	200 (25.6)	0.8
炭素繊維※	1.8	25 (13.9)	4 (2.22)	300 (166.7)	1.3
アラミド繊維※	1.4	50 (35.7)	3.6 (2.57)	130 (92.9)	2.7
合成ゴム※	1	100 (100)	0.05 (0.05)	0.001 (0.001)	850
ニワオニグモ (<i>Araneus diadematus</i>)※	1.3	160 (123)	1.1 (0.84)	10 (7.7)	27
アメリカ ジョロウグモ (<i>Nephila clavipes</i>)※※	(1.3)	111 (85)	1.2 (0.92)	13.8 (10.6)	17
ダーウィンドーク スパイダー (<i>Caerostris darwini</i>)※※※	(1.3)	354 (272)	1.65 (1.27)	11.5 (8.8)	52



ダーウィンダークスパイダー
(*Caerostris darwini*)



アメリカジョロウグモ
(*Nephila clavipes*)



ニワオニグモ
(*Araneus diadematus*)

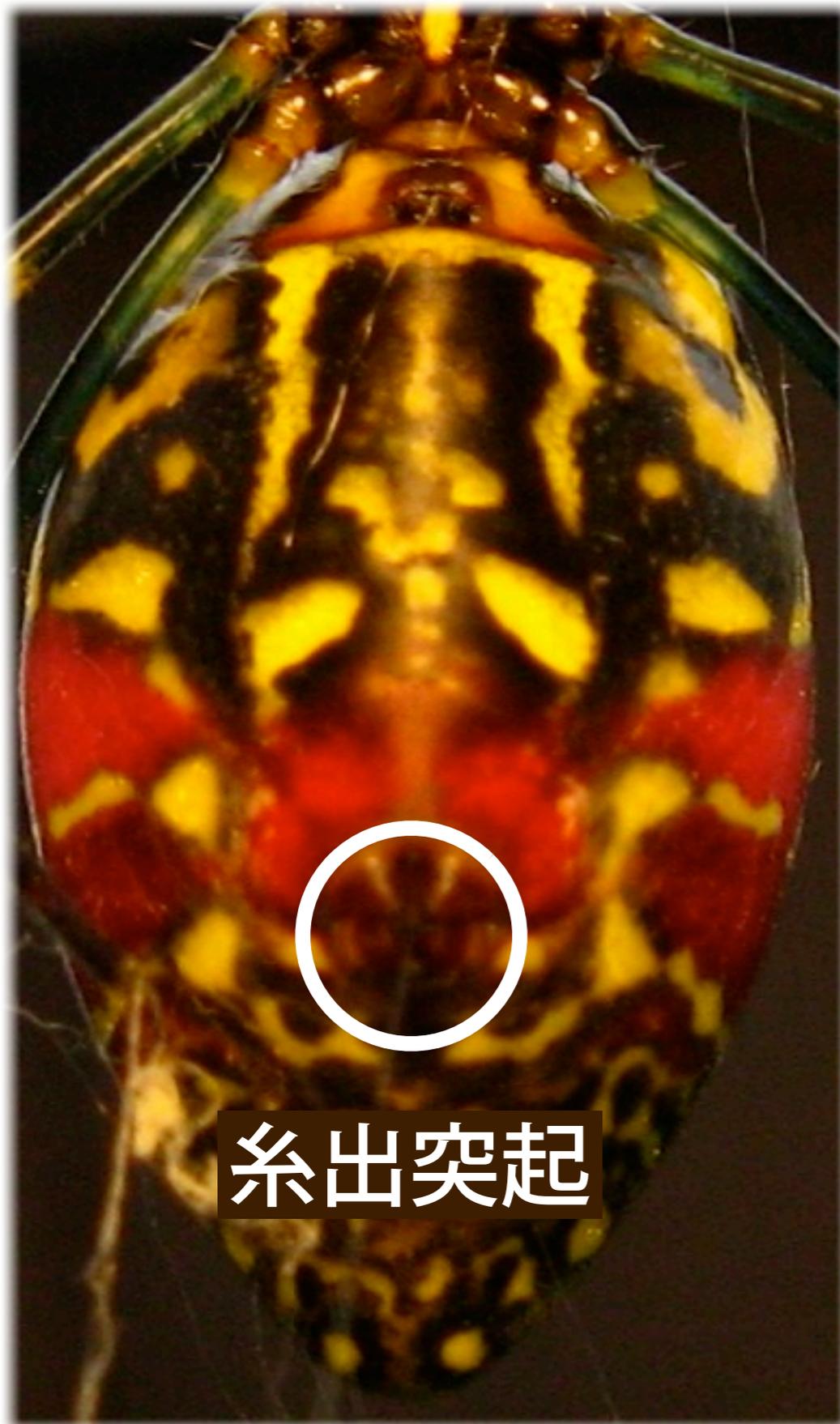


Agnarsson et al. 2010



Agnarsson et al. 2010

去年マダガスカルで発見された巨大クモの巣
(長さ、約25メートル)

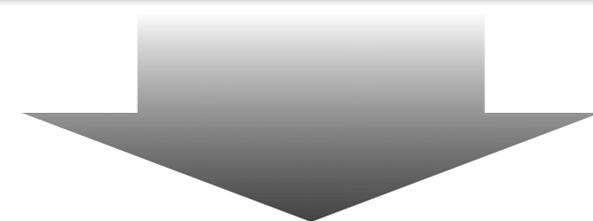


絹糸腺：原料生産工場

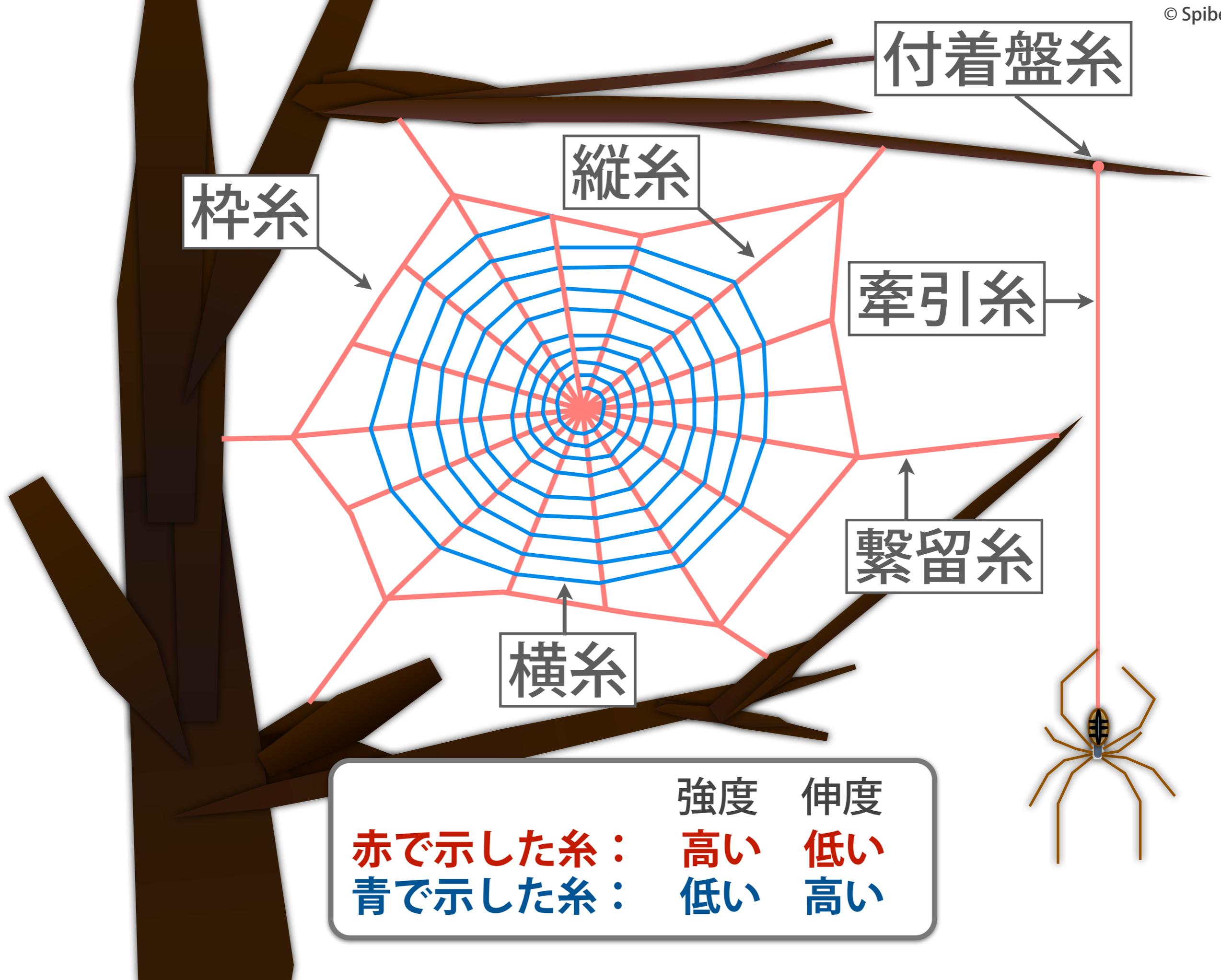
- 7種類の絹糸腺がある
- ここでフィブロインが分泌される
- 複数のフィブロインをブレンド

出糸突起：紡糸装置の役割

- ここに吐糸管（紡糸ノズル）がある
- 吐糸管は種々の絹糸腺につながる
- 吐糸管の構造や数は様々
- ここでフィブロインが繊維化



様々な種類の糸をつくれる



枠糸

縦糸

付着盤糸

牽引糸

繫留糸

横糸

	強度	伸度
赤で示した糸：	高い	低い
青で示した糸：	低い	高い

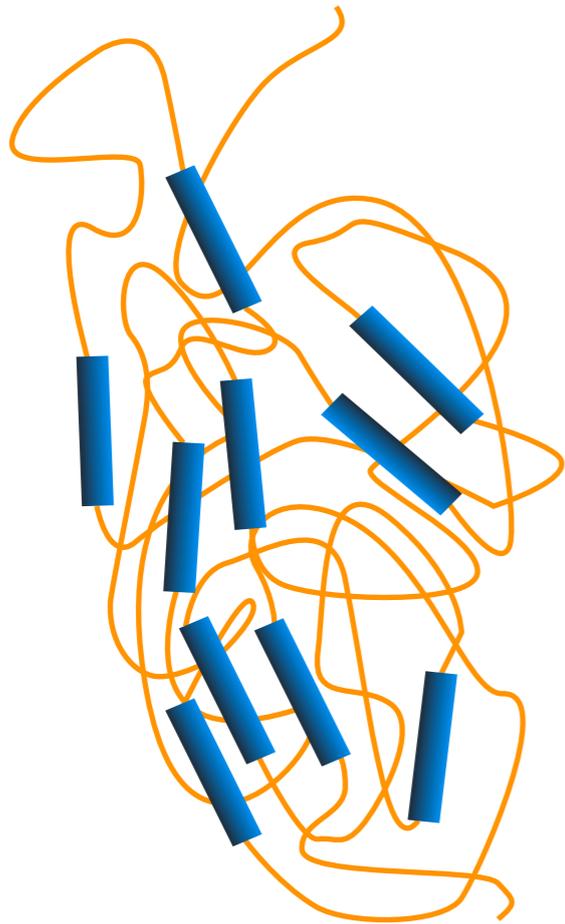
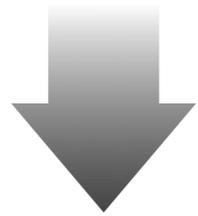
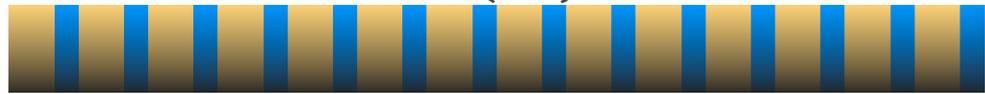
牽引糸の分子構造

柔らかい領域

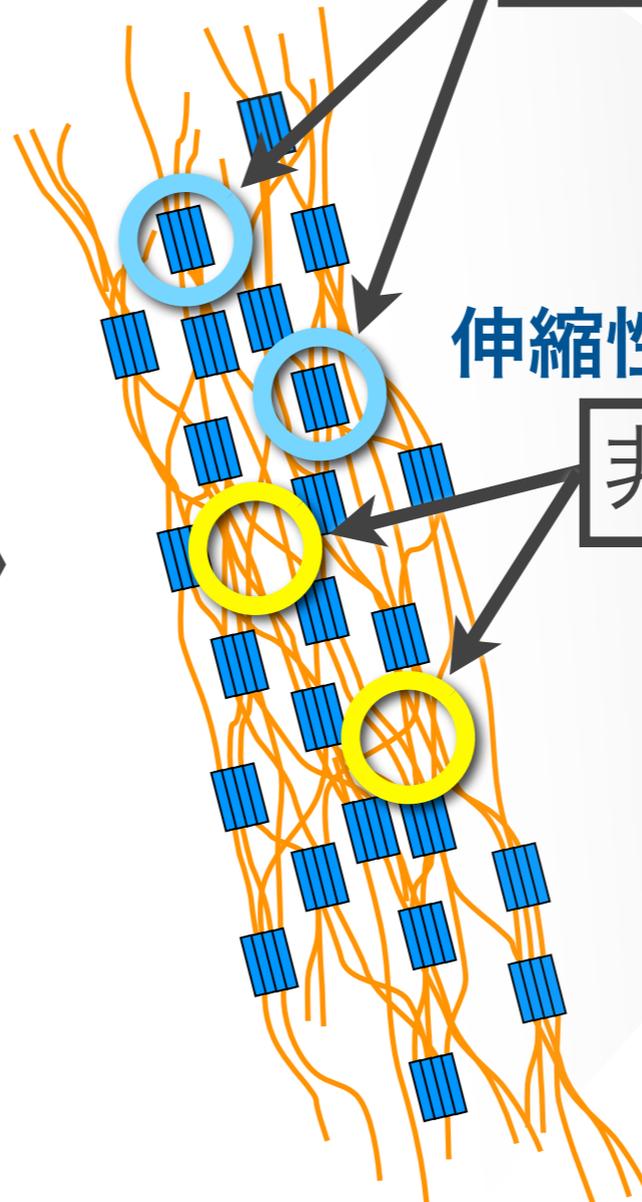
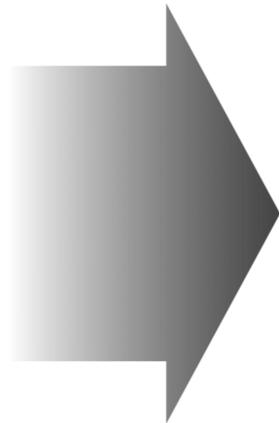
固い領域

GGAGQGGYGGLGSQGAGRGGQGAGAAAAAA

基本となるアミノ酸繰り返し配列



タンパク質 (フィブロイン)

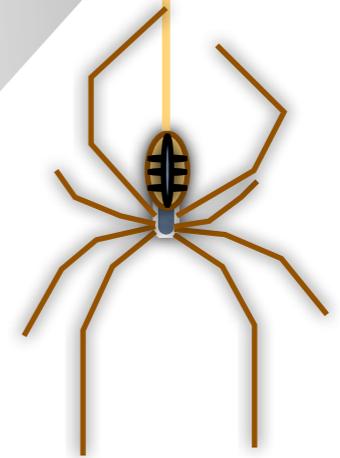


強度の向上に寄与

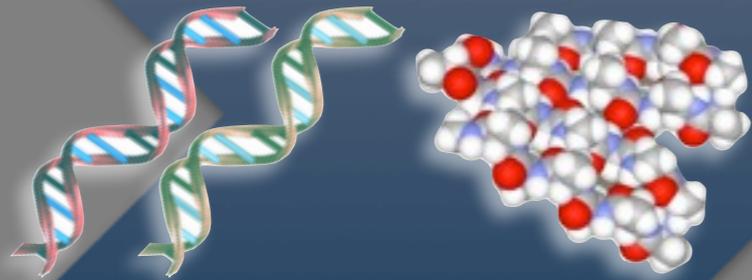
結晶領域

伸縮性の向上に寄与

非晶領域



デザイン技術



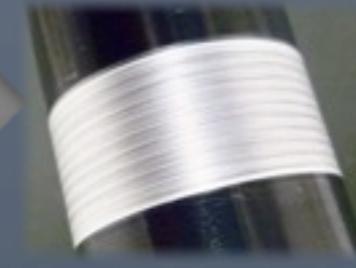
バイオインフォマティクス

大量生産技術



遺伝子工学／微生物工学

紡糸／加工技術



高分子材料学／応用物質工学

1. 天然のクモ糸繊維を再現するだけでよいのか？

➡ **高性能タンパク質素材デザインプラットフォームの構築**

2. 産業化に耐え得るタンパク質の量産技術がない

➡ **独自の生産基礎技術を開発、メーカーとのアライアンスへ**

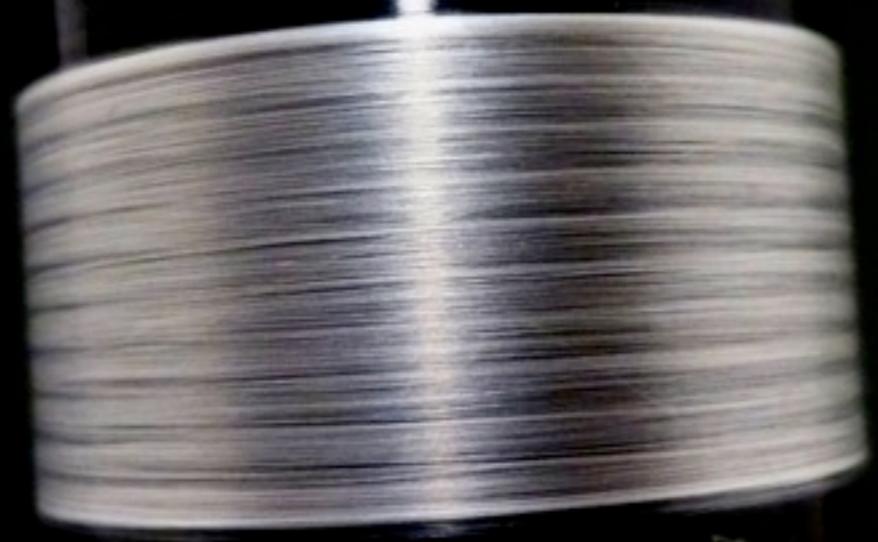
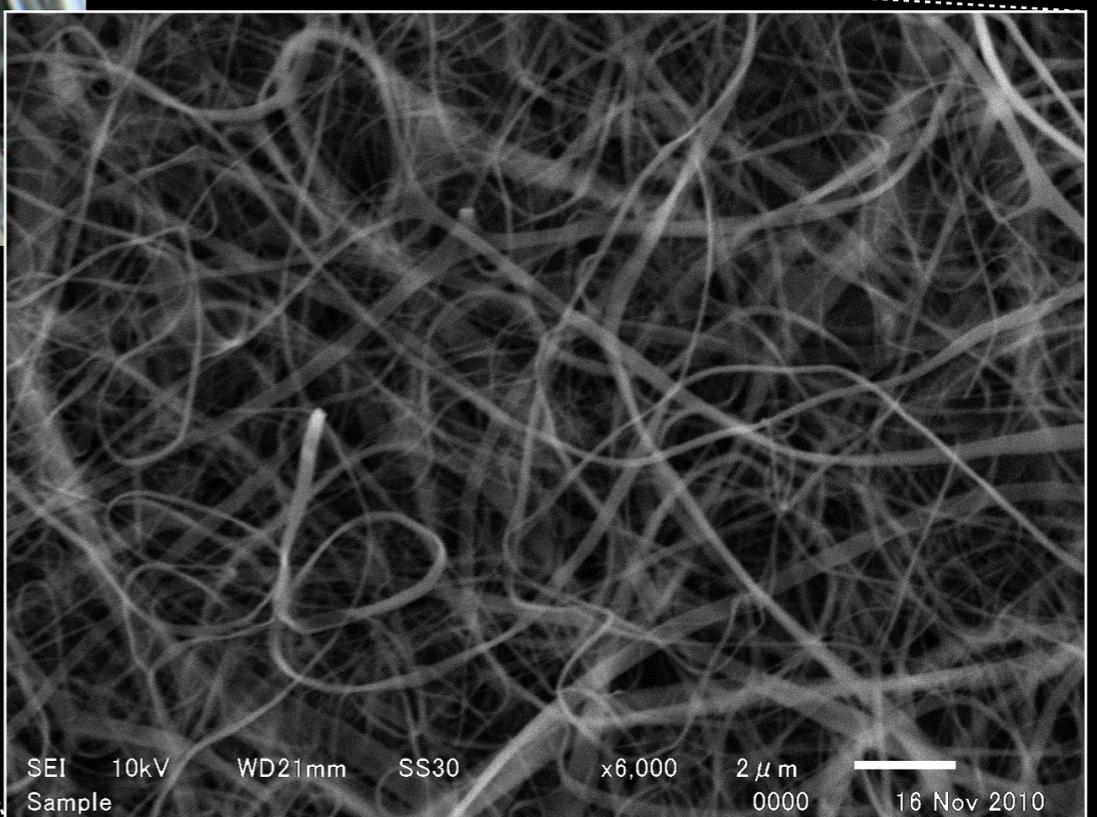
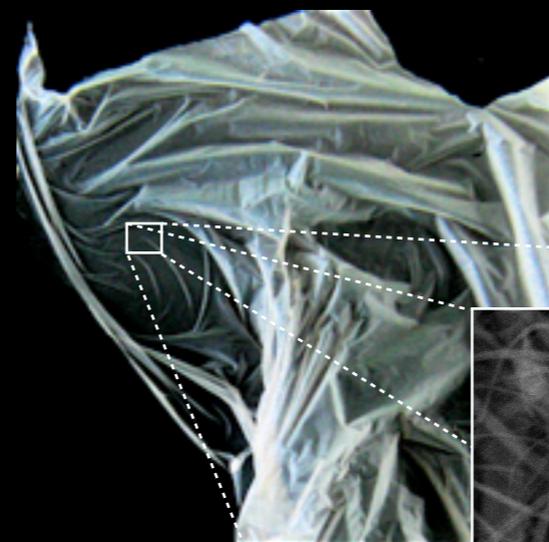
3. 本事業を実施可能な「分野横断的」な研究体制の困難性

➡ **メーカーOBや大学・高専等との分野横断的研究体制の構築**

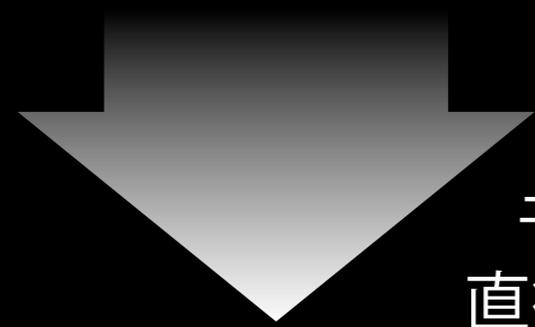
世界初の実用化へ！



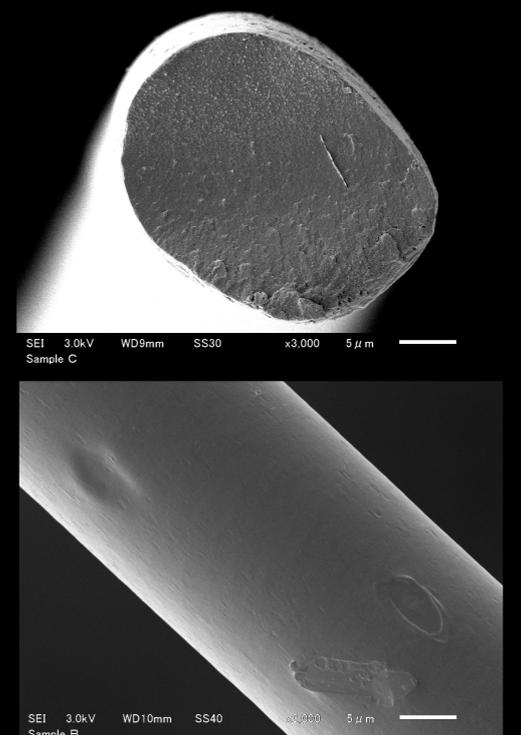
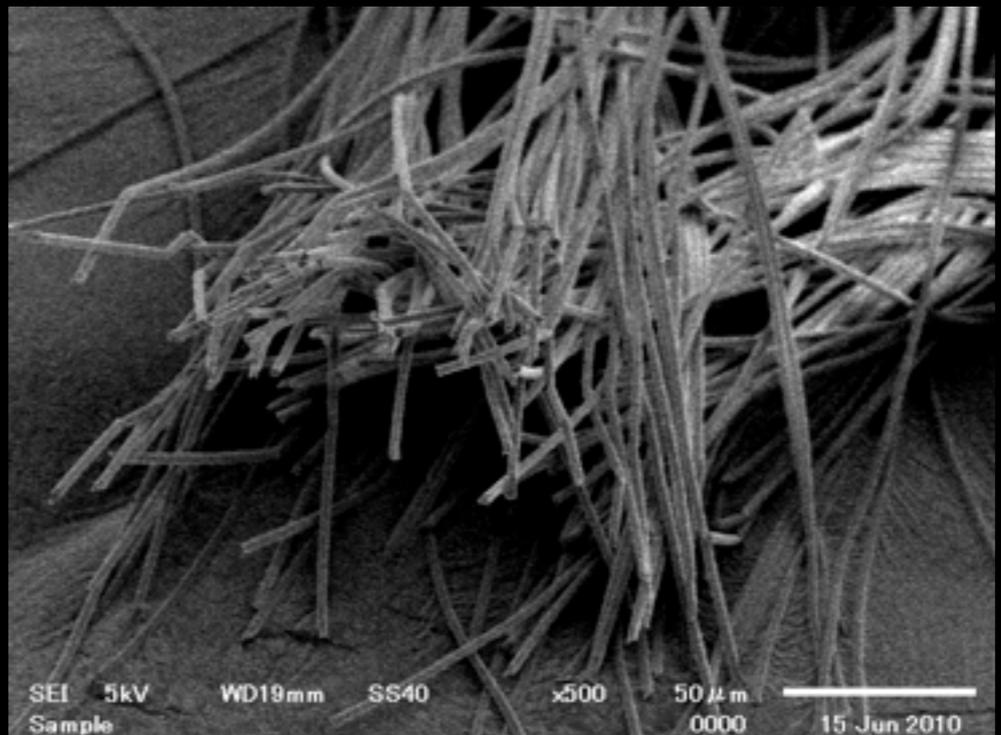
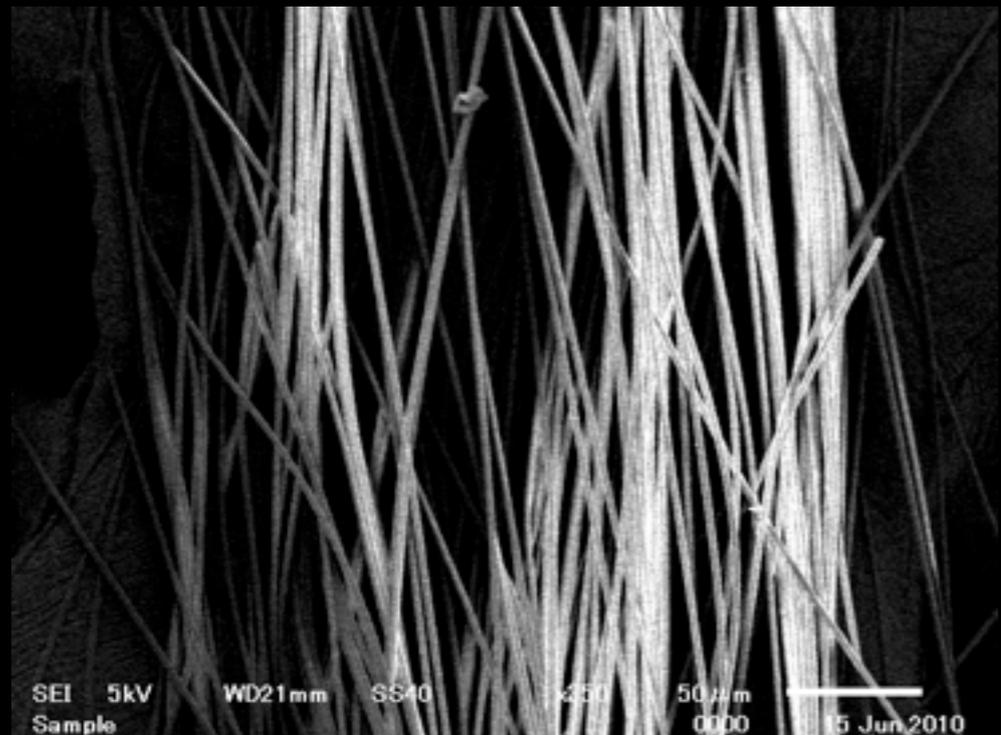
ナノファイバー不織布 の作製にも成功 (エレクトロスピンングにより紡糸)



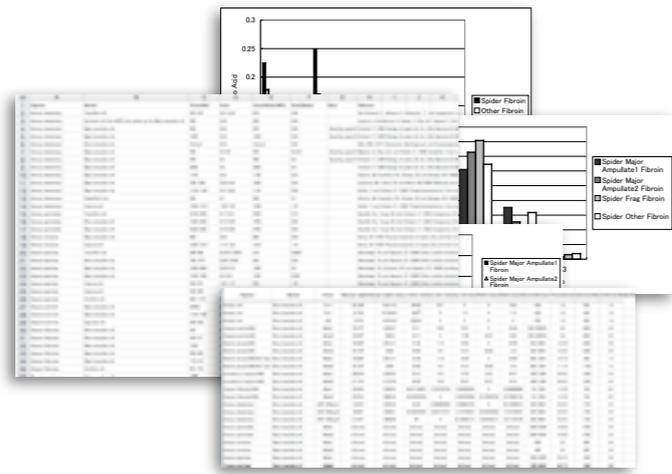
ボビンに巻き取った合成クモ糸繊維
(モノフィラメント)



モノフィラメントでは
直径2 μmの極細繊維可能



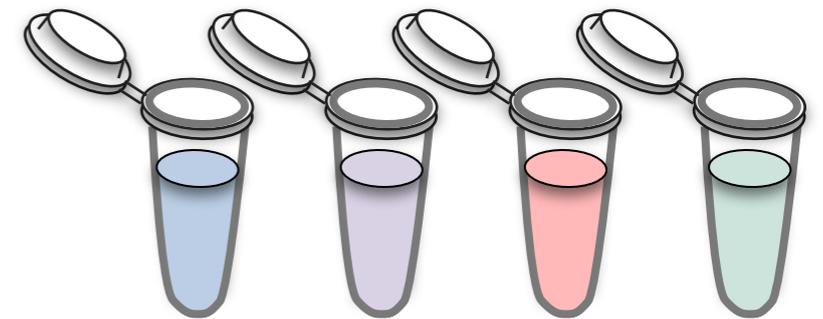
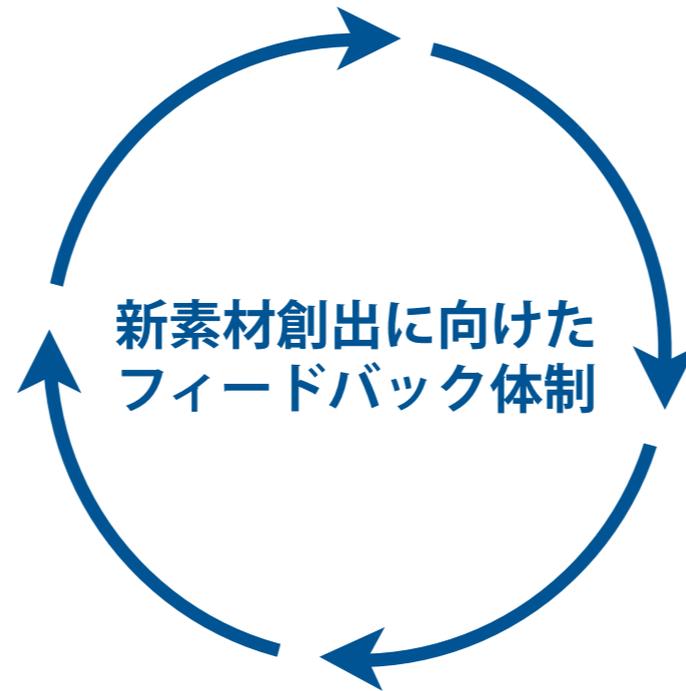
高性能タンパク質素材デザインプラットフォーム



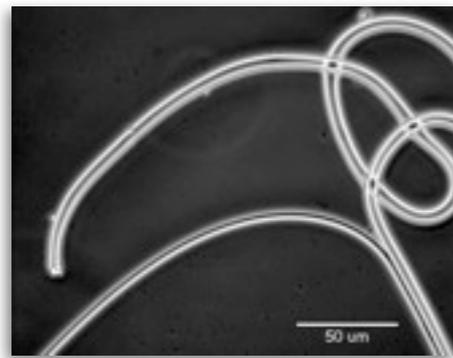
機械的特性データを基に、
新素材アミノ酸配列を設計



設計された新規タンパク質
の遺伝子を人工的に合成
(フィブロイン遺伝子ライブラリ)



独自の試験生産システムにより
紡糸試験用タンパク質を合成



一定条件で紡糸試験を行い、
種々の機械的特性を測定

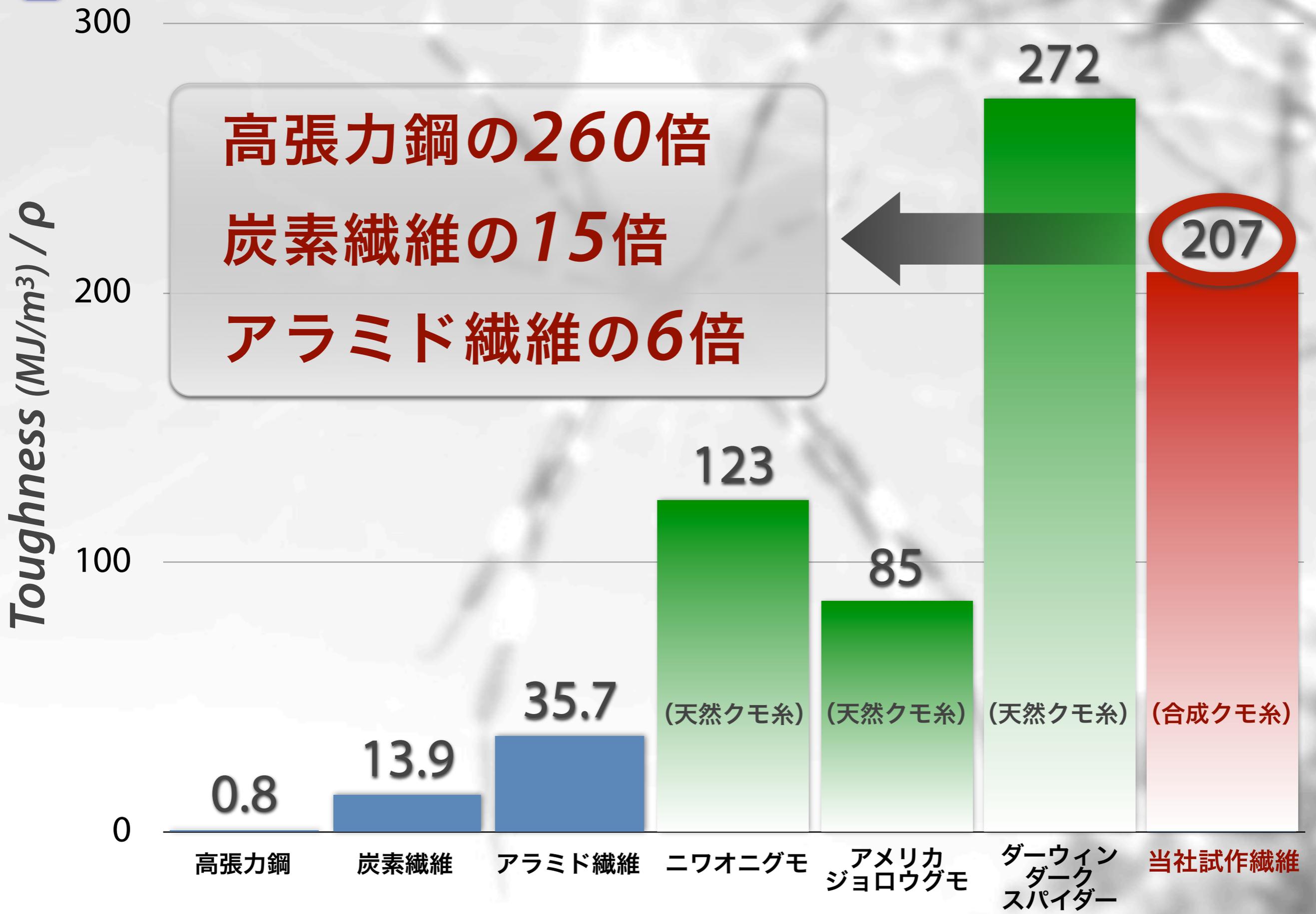


天然・合成クモ糸繊維と、その他繊維材料の特徴比較

※ Gosline et al. 1999
 ※※ Swanson et al. 2006
 ※※※ Agnarsson et al. 2010

材料	特性	密度, ρ	タフネス (タフネス / ρ)	強度, σ_{\max} (σ_{\max} / ρ)	弾性率, E_{init} (E_{init} / ρ)	伸度, ϵ_{\max}	原料バイオマス化
		(g/cm ³)	(MJ/m ³)	(GPa)	(GPa)	(%)	
高張力鋼※		7.8	6 (0.8)	1.5 (0.19)	200 (25.6)	0.8	-
炭素繊維※		1.8	25 (13.9)	4 (2.22)	300 (166.7)	1.3	×
アラミド繊維※		1.4	50 (35.7)	3.6 (2.57)	130 (92.9)	2.7	×
合成ゴム※		1	100 (100)	0.05 (0.05)	0.001 (0.001)	850	×
ニワオニグモ (<i>Araneus diadematus</i>)※		1.3	160 (123)	1.1 (0.84)	10 (7.7)	27	-
アメリカ ジョロウグモ (<i>Nephila clavipes</i>)※※		(1.3)	111 (85)	1.2 (0.92)	13.8 (10.6)	17	-
ダーウィング スパイダー (<i>Caerostris darwini</i>)※※※		(1.3)	354 (272)	1.65 (1.27)	11.5 (8.8)	52	-
短期的開発 ターゲット		1.3	300 (230)	0.6 (0.46)	15 (11.5)	50	○
中期的開発 ターゲット		1.3	400 (308)	1 (0.76)	25 (19.2)	40	○

重量当たりのタフネス（比タフネス）の比較



素材分野における人類未踏領域への挑戦

- 高機能繊維分野の主要用途は「樹脂等の強化材料」
- 背景は輸送機器の軽量化ニーズ
→ CO₂の排出削減、燃料節約

【強化材に求められることは？】

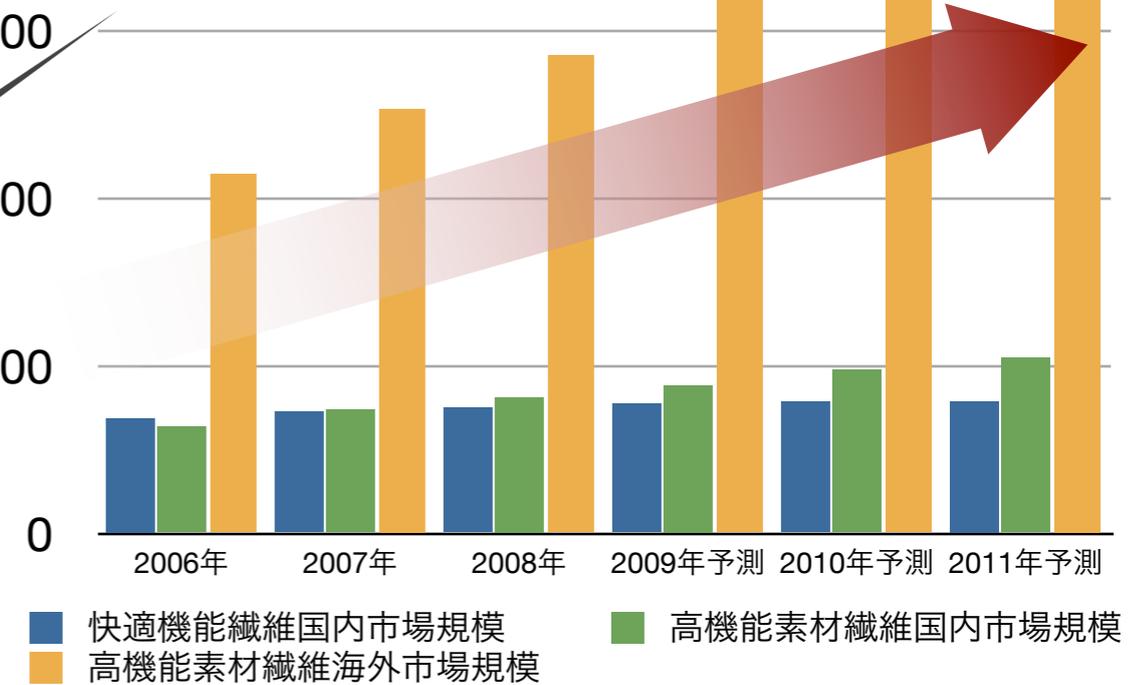
→ 繊維のポテンシャル、界面活性、脱石油、etc.

約7,000億円の市場規模

高機能繊維市場の市場規模

(百万円)
800,000
600,000
400,000
200,000
0

現状7,000億円の成長市場



超高強力・高弾性
低伸度
(炭素繊維、アラミド繊維等)

未踏領域

超高タフネス
中強力・中弾性・中伸度
→ これまで不可能とされた特性

高伸度
低強力・低弾性
(合成ゴム等)

クモ糸で実現可能！

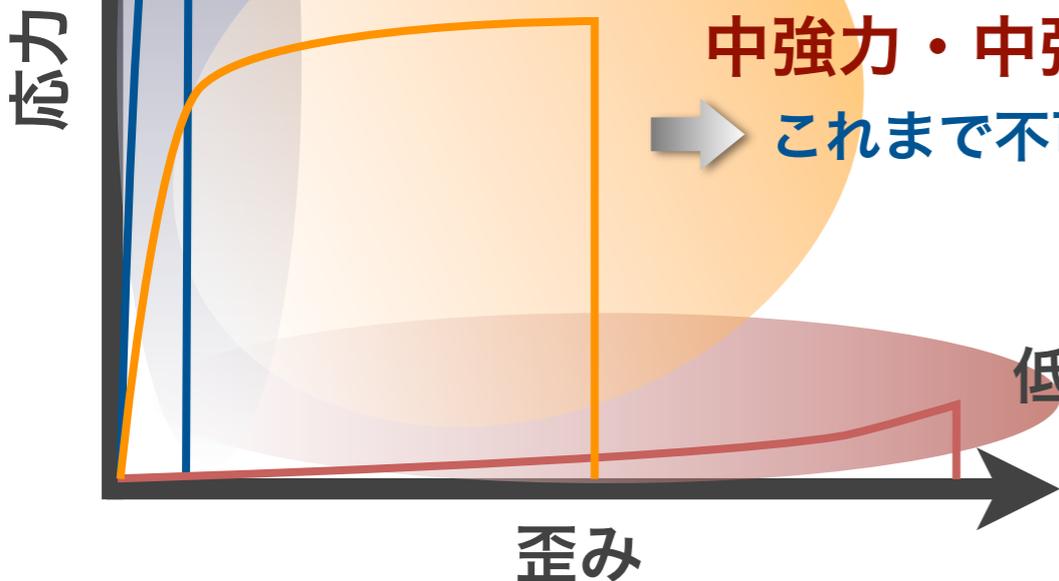


クモ糸は超高タフネスな天然繊維
→ 強度、伸度の高次元での両立が可能

リコンビナントタンパク質材料の可能性
→ ほとんど同じ生産プロセスで何でも生産可能

繊維と発酵は日本の得意分野

- 日本メーカーの炭素繊維シェアは7割
- 発酵も我が国の主力技術



実用化されると世界がどう変わるのか？ (キラーマテリアルになり得る分野)

輸送機器分野

【キーワード】

軽量化、安全性向上、脱石油化



建築分野

【キーワード】

安全性向上、耐震



衣料分野

【キーワード】

安全性、耐衝撃性



電子機器分野

【キーワード】

耐衝撃性、植物化



- ・ 輸送機器の燃費低減、安心・安全の向上
 - ・ バイオマスプラの普及拡大：CO₂削減に貢献
 - ・ 日常生活、災害時におけるの安全性向上
- ▶ 数千億円規模の市場創出効果と試算

➡ 持続可能、安心・安全な社会の実現に貢献

- 強靱性
- 耐熱性
- 伸縮性
- 界面活性
- 比重
- その他の機能

素材の特性を自由にデザイン、
超高性能素材をカスタマイズ

ものづくりの概念が一変

ほぼ無限の組み合わせを持つタンパク質素材の可能性は無限大

化石資源の乏しい我が国こそ、本研究開発が急務