

超先端材料超高速開発基盤技術プロジェクト(超超PJ)
最終成果報告会

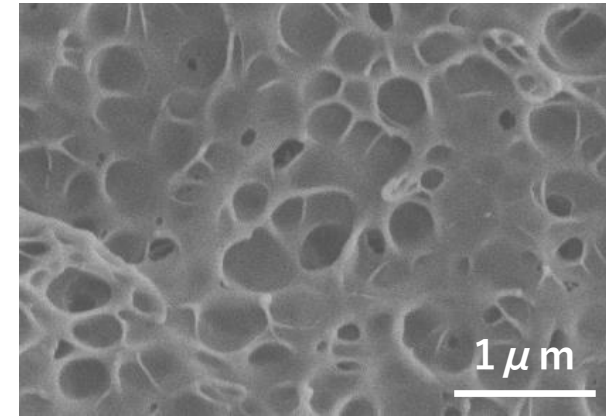
「ナノ発泡断熱材料の研究開発」

2022年1月19日(水)

積水化成品工業株式会社
吉田 賢一

■ ナノ発泡断熱材料とは

- ・ ナノオーダー(1 μm 以下)の気泡を有する発泡体
- ・ 気泡径は、一般的な発泡スチロールの1/10000以下

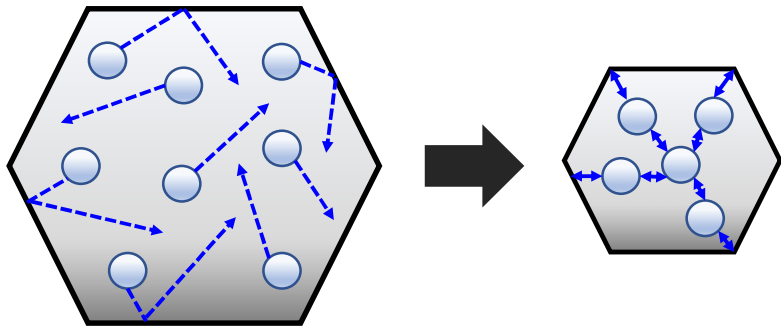


ナノ発泡ポリマーの断面気泡構造

■ 期待される性能

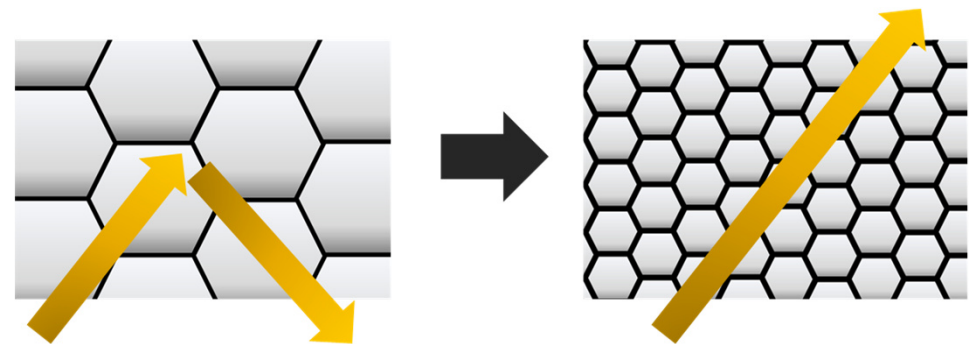
① 超断熱性

気泡径が空気の平均自由行程(約70nm)に近づくことで、気泡内の気体分子の衝突頻度が抑制。



② 光透過性

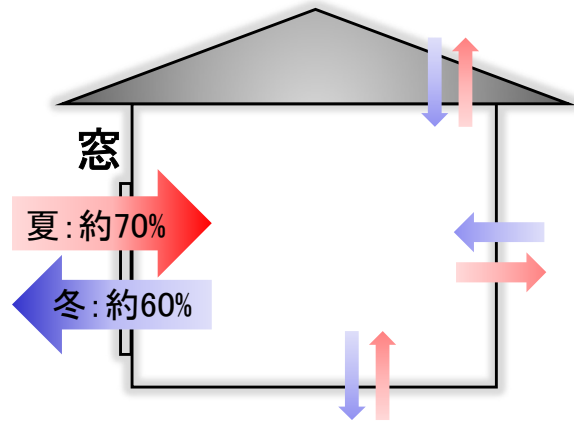
気泡径が可視光(約400~800nm)よりも十分に小さくなることで、光の散乱が抑制。



市場ニーズと想定される用途

■市場ニーズ

窓はエネルギーロスが大きい



住宅における熱の流出入イメージ

断熱ニーズが高く、省エネルギー化に貢献できる



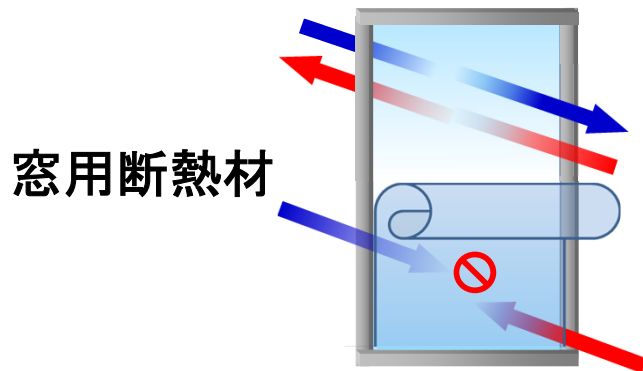
住宅分野



自動車分野

■想定される用途

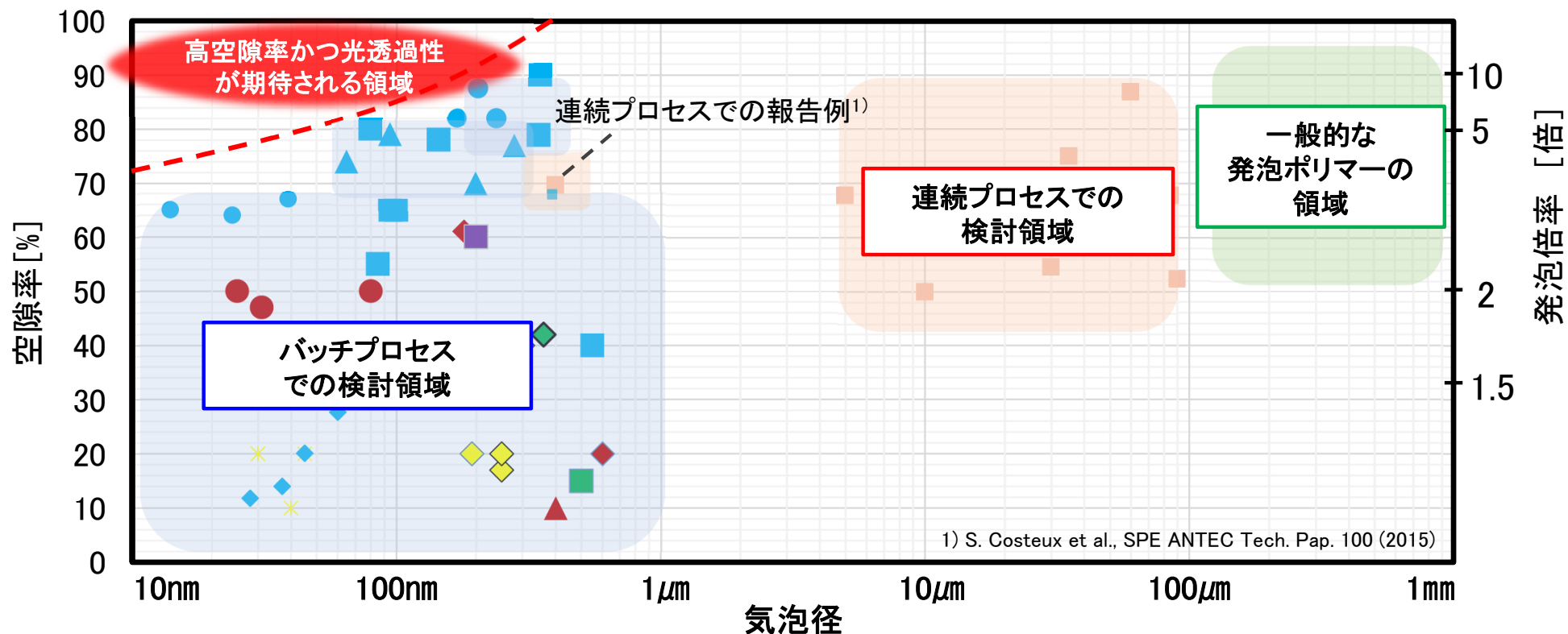
《窓用断熱材の要求特性》



		断熱性	光透過性	加工性
素材 既存材	一般的な発泡断熱材	△	×	○
	真空断熱材	○	×	×
	シリカエアロゲル	○	○	×
	ナノ発泡ポリマー	○	○	○

ナノ発泡ポリマーは窓用断熱材に必要な特性を満たす材料として期待される。

■気泡径と空隙率を指標とした微細発泡体の開発動向マップ



- 高い空隙率と光透過性を両立したナノ発泡ポリマーは、これまで実現していない。
- 実用化を見据えた連続プロセスでの試作検討はほとんどなされていない。

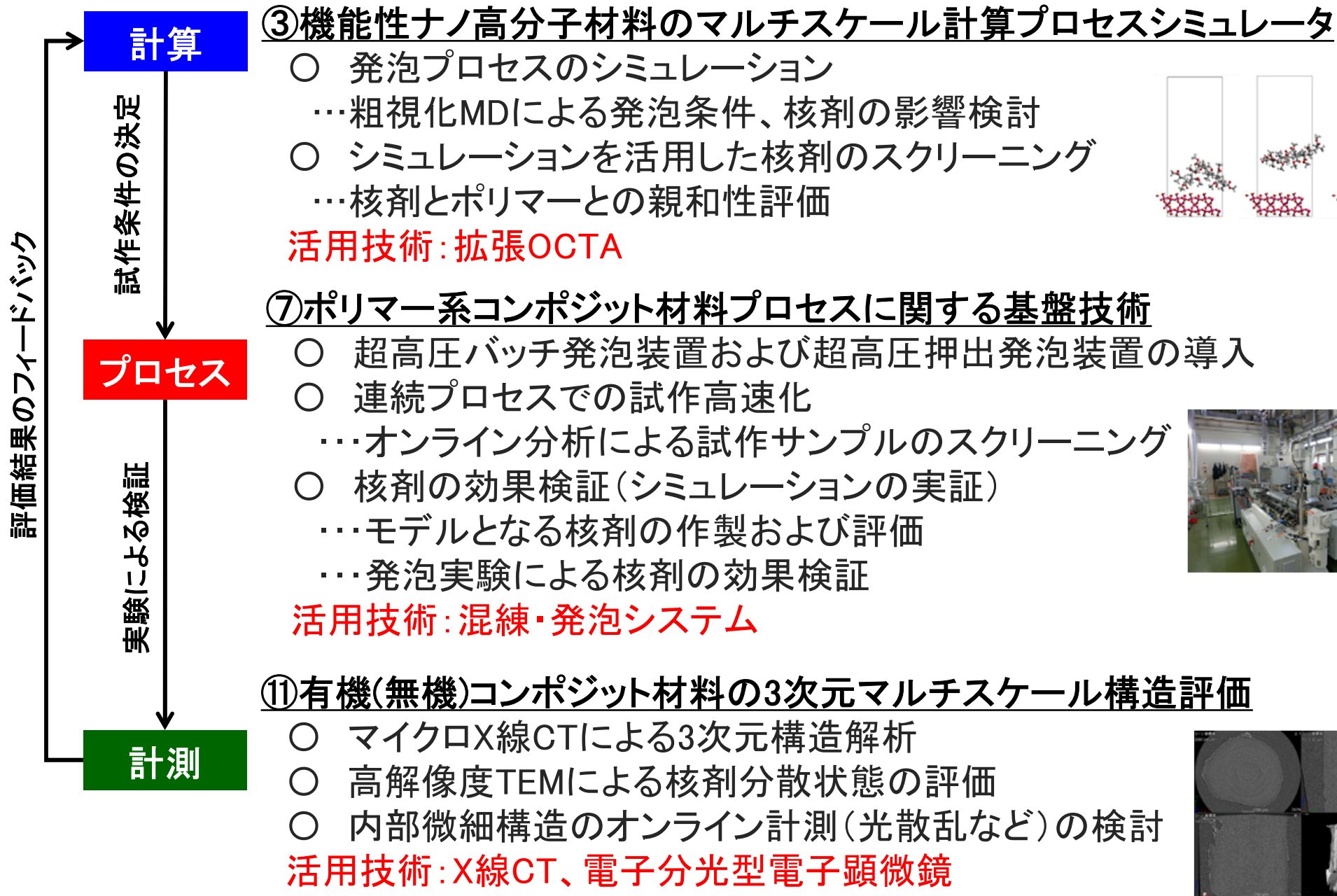
■これまでのナノ発泡ポリマー開発へのアプローチ

プロセス制御

- ポリマーへの発泡剤の溶解量アップ
(親和性アップ、低温、高圧条件など)

核剤効果の活用

- ナノ粒子の利用
- ポリマーブレンド
- ポリマー結晶部の利用

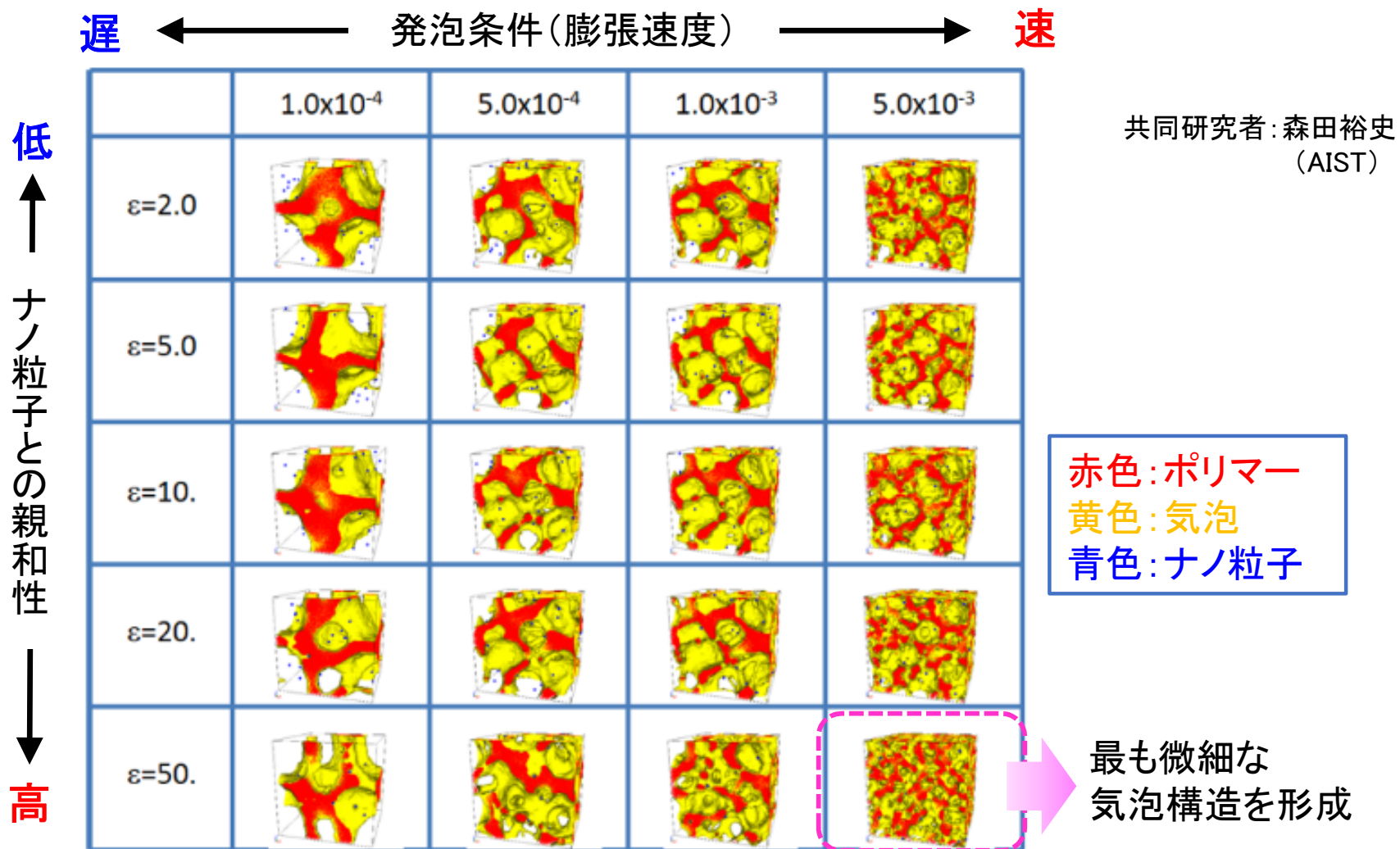


⇒ 三位一体の開発により、「ナノ発泡ポリマーの開発」と「開発期間短縮」を目指す。

ナノ発泡ポリマー開発、および 試作高速化に関する取り組み

<計算>シミュレーションによる発泡条件の探索

■ OCTAによる粗視化分子動力学シミュレーションで最適発泡条件を探索

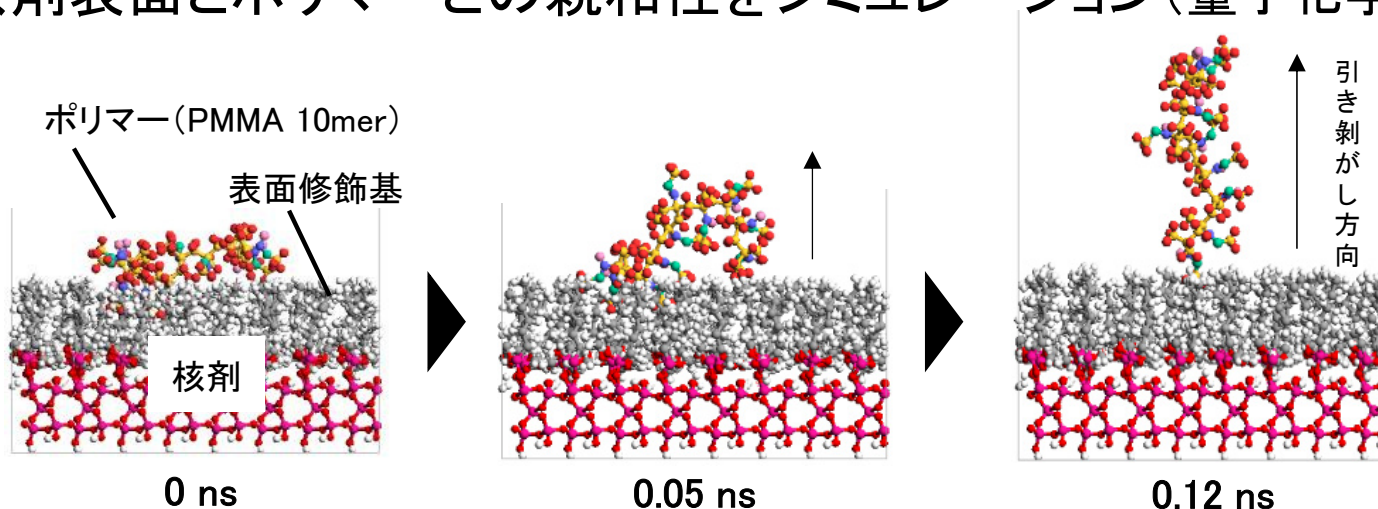


ナノ粒子を含むポリマーの発泡シミュレーション結果²⁾

ナノ粒子とポリマーとの親和性が高いほど気泡が微細化することが示唆された。

2) プレスリリース『ナノ粒子でプラスチックの発泡を微細で均質にする方法を開発』(2018/11/26)

■核剤表面とポリマーとの親和性をシミュレーション(量子化学+古典MD計算)



共同研究者:大谷 実
(AIST(現筑波大))

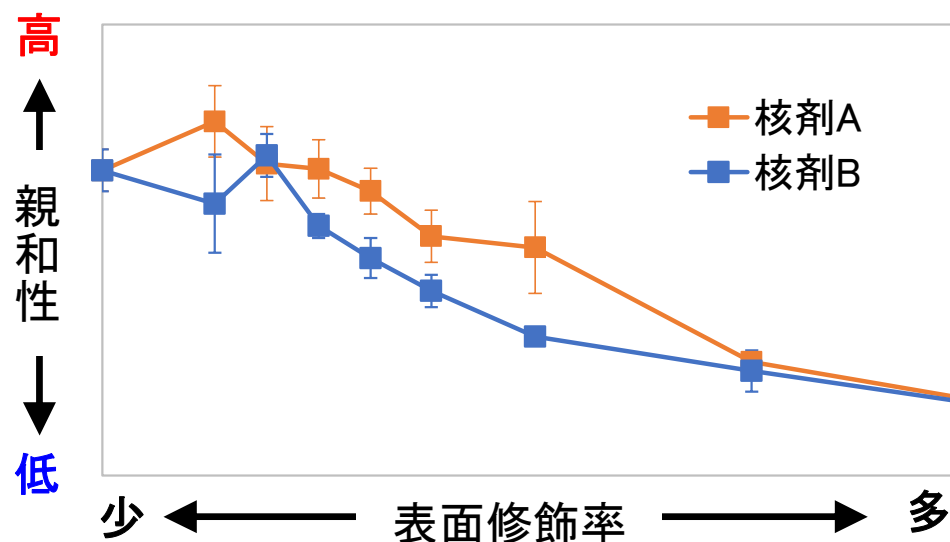
シミュレーションによる核剤とポリマー親和性評価の一例

■核剤の表面修飾基を変えた場合の親和性評価

実用的な材料として
表面修飾ナノ粒子に着目

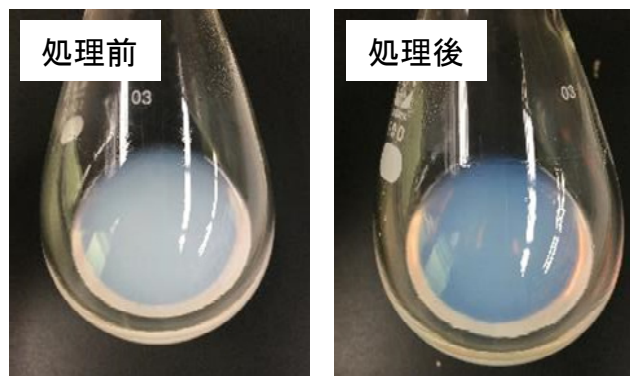
化学種や修飾率を変化させて計算

核剤候補のスクリーニングと選定



■ 有機修飾シリカ粒子分散ポリマーの発泡実験

① シランカップリング処理



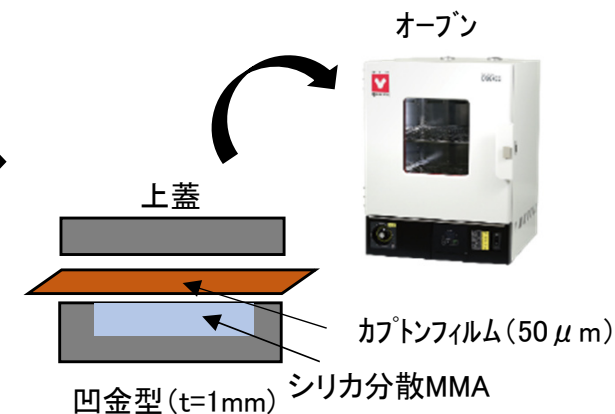
シリカ粒子表面を有機修飾。

② 溶媒/MMA置換

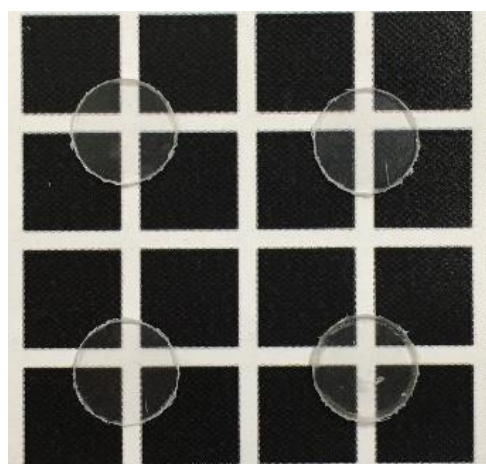


シリカ粒子が所定の量となるようMMAを追加。

③ バルク重合



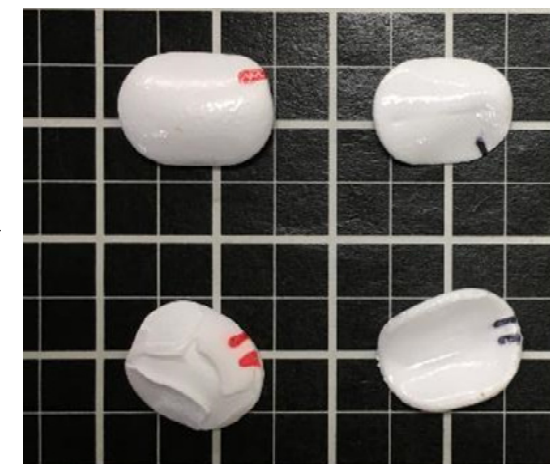
④ ガス含浸、発泡



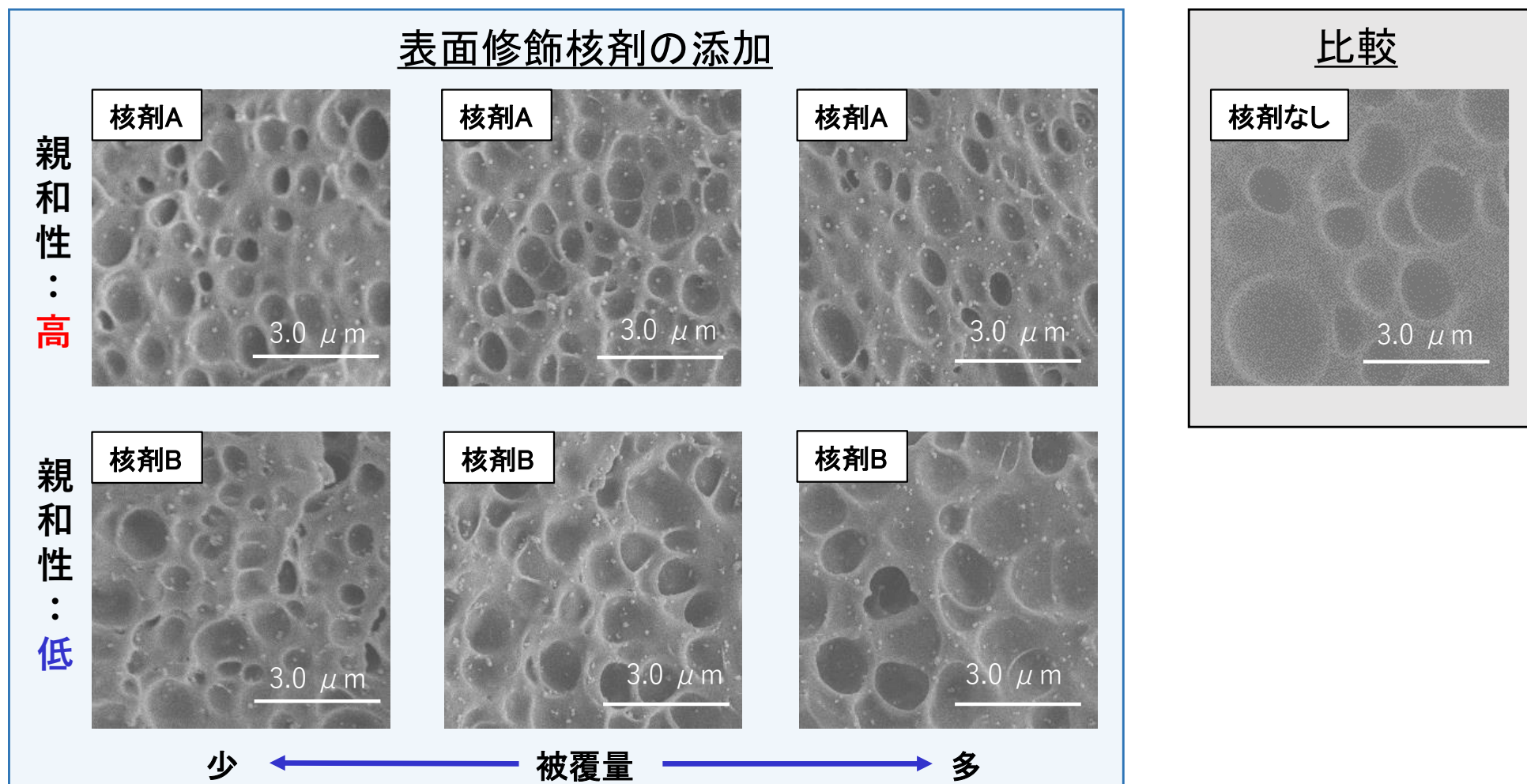
直径8 mm、厚さ1 mmのディスク状に加工。



高圧、加温状態でCO₂に24h浸漬後、急減圧し発泡体を作製。

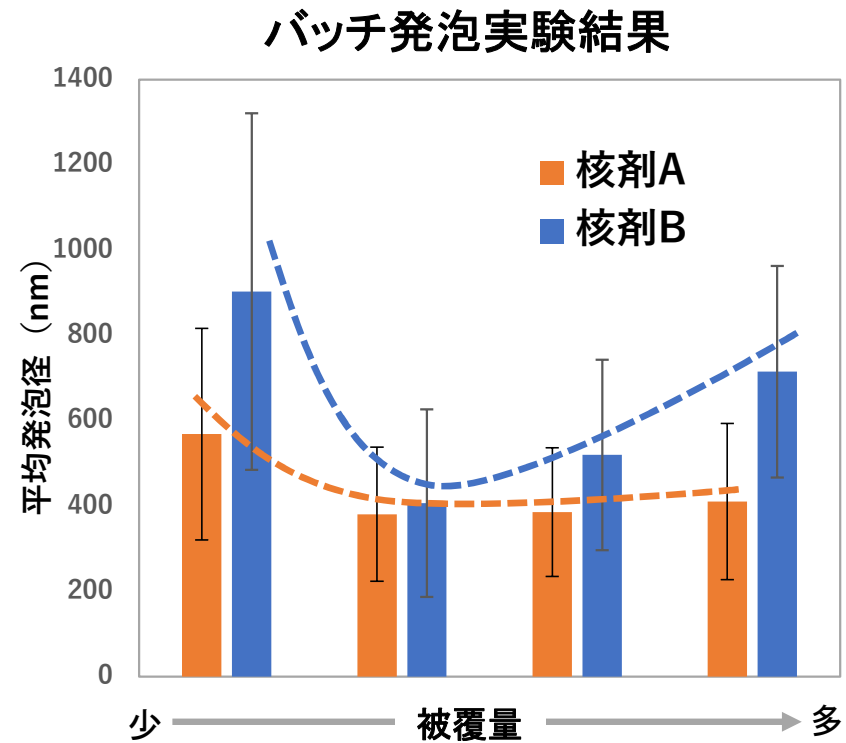
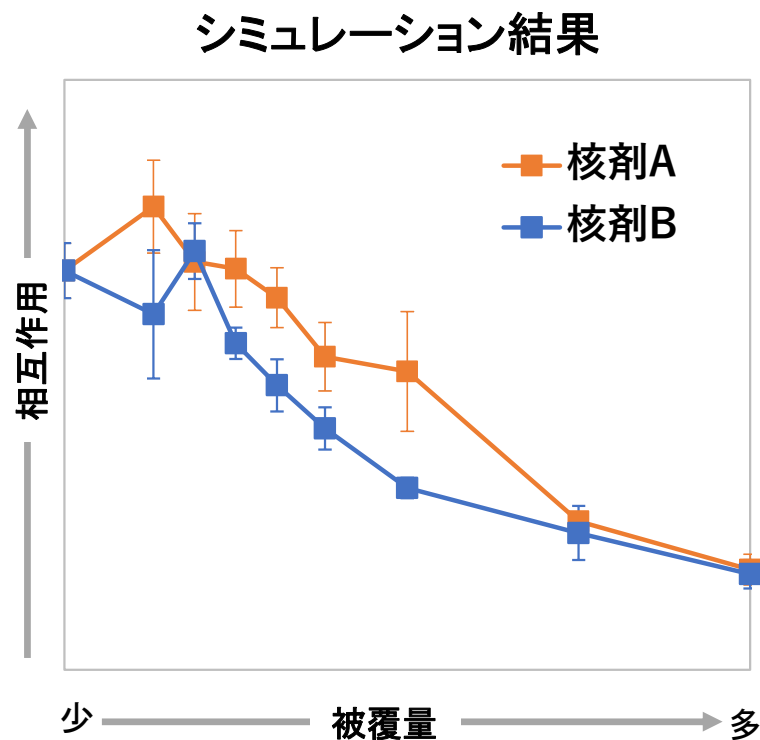


■ 計算によって得られた核剤のバッチ発泡による効果検証(1)



➤ ポリマーとの親和性が高い核剤(A)の方が、より気泡が微細化。

■計算によって得られた核剤のバッチ発泡による効果検証(2)



- 計算科学による相互作用評価結果と定性的に一致。
- シミュレーションで選定した核剤の効果を実験によって検証できた。
- シミュレーションを活用することで材料選定期間の短縮が可能。

<プロセス>超高压連続プロセスにおける発泡評価

■超高压押出機を使用した連続発泡評価

特長①: 超高耐圧仕様

特殊な減速機構および樹脂シール機構を備え、**超高压下(最大100MPa)での運転**が可能。

特長②: 小型

温度応答性が向上し、**サンプルの試作工数(作業人数×試作時間)を削減**できる。

特長③: オンライン分析システム

通常は、実験後に測定する発泡倍率や気泡径を測定。

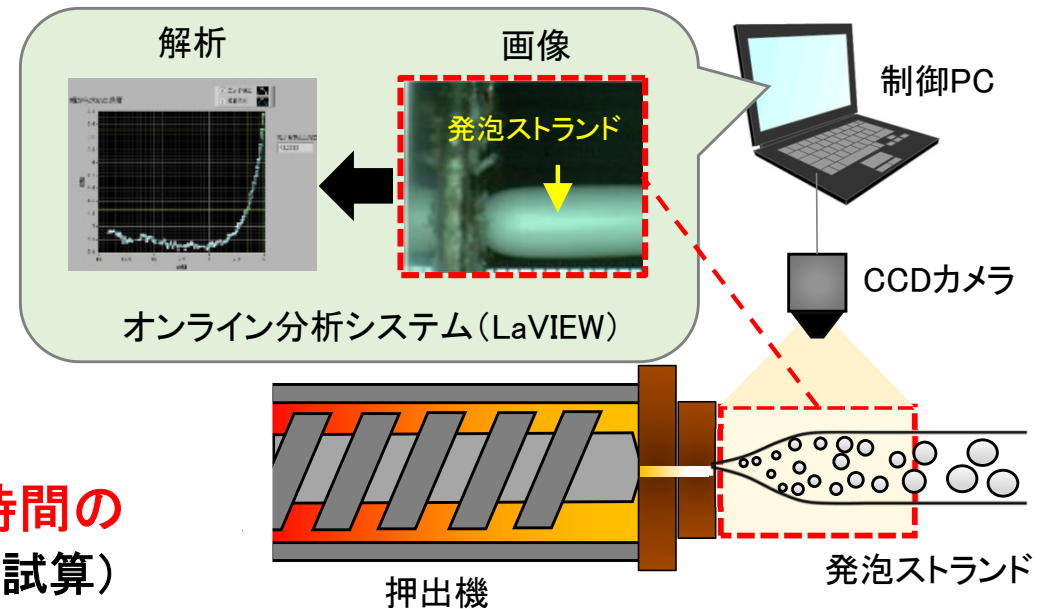
これらと相関がある発泡ストランドの形状情報(幅や収縮率)を**オンラインで連続的に取得**し、操作条件を調整。

- **試作サンプル数の低減とサンプル評価時間の短縮が可能** (従来比約1/5の短縮効果※を試算)

※サンプル試作～評価までの一連の実験試作サイクルを繰り返した場合



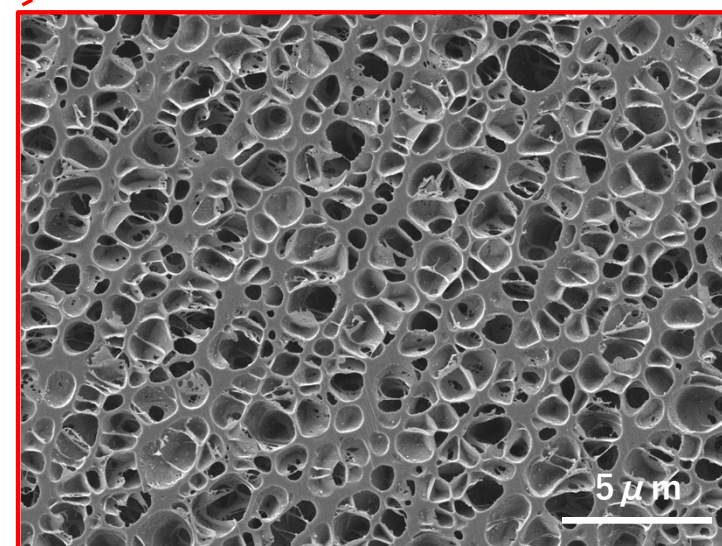
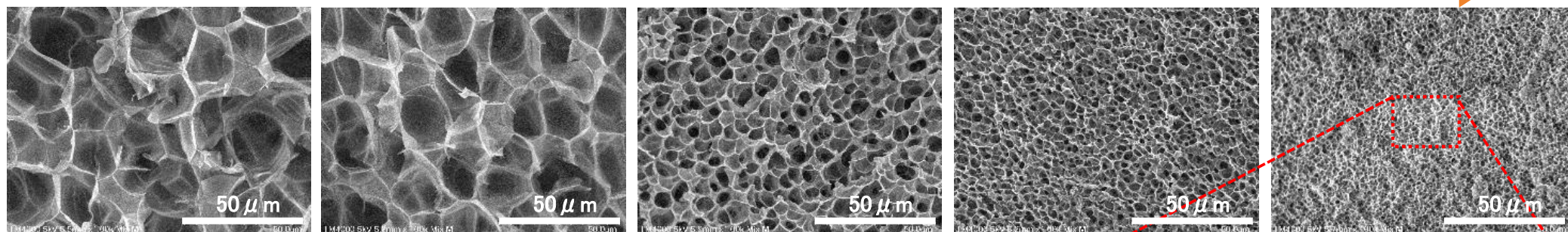
高圧小型押出発泡装置



発泡ストランドのオンライン分析のイメージ図

<プロセス>超高压連続プロセスにおける発泡評価

■超高压押出機を使用した連続発泡評価結果



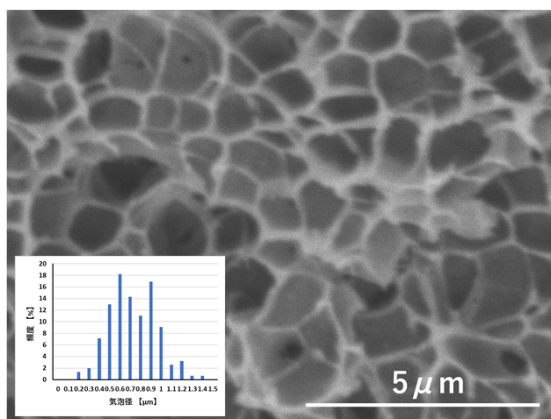
- 従来装置では困難な高圧かつ低温条件下で押出することによりCO₂溶解量が増大し、気泡が微細化。
- シミュレーションにより選定した核剤添加することで、空隙率75%、平均気泡径700nmの発泡ポリマーを連続製造することに成功。

ベースポリマー:PMMA

■ 高解像度X線CTによる非破壊での内部構造観察

- SEMによる断面観察では不可能な三次元構造解析が可能。

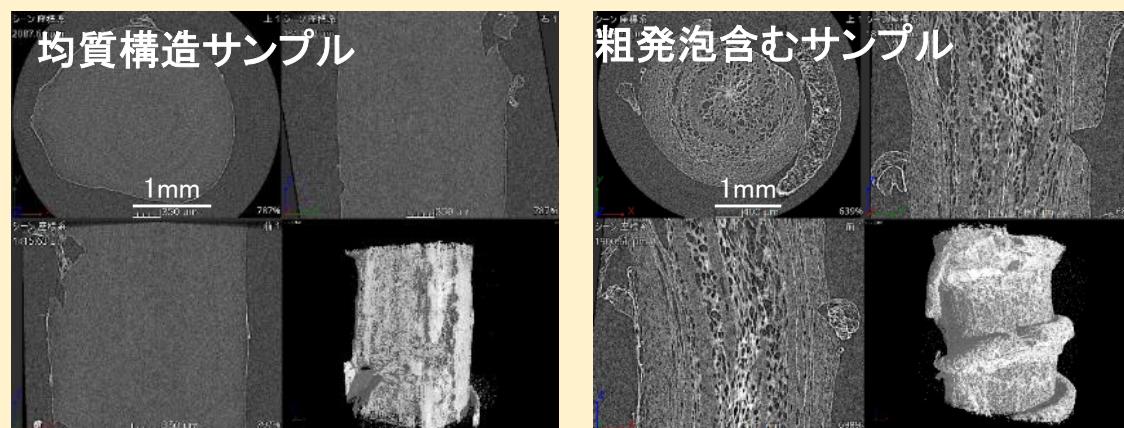
SEM観察



- ・局所構造の観察
- ・微細情報(径、分布)

数百nm～数μm

X線CT測定



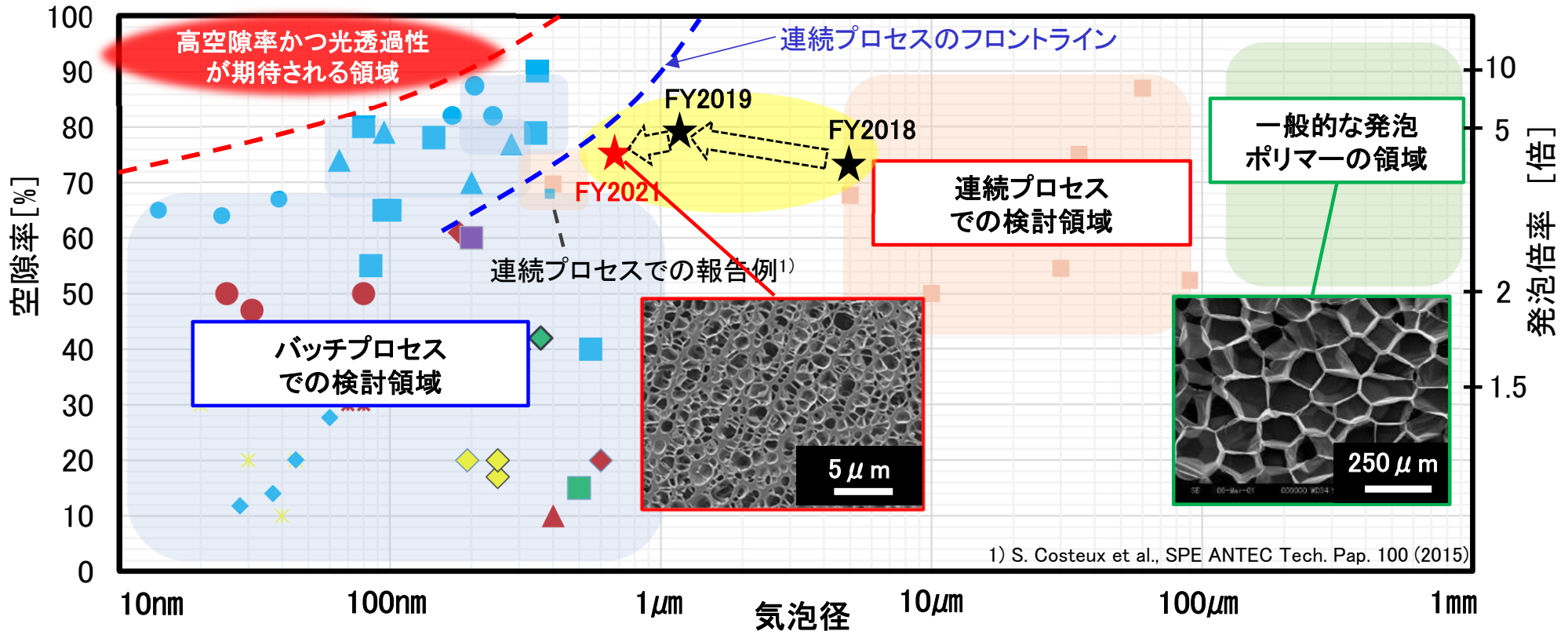
- ・全体構造の観察
- ・粗大気泡の位置、**体積%**

数μm～数十μm

共同研究者:新納弘之
(AIST)

高精度かつ高速な**三次元評価**により、評価時間の短縮に大きく貢献。

■ 開発動向マップにおける位置づけ



計算科学を活用した核剤選定とこれまでにない超高压プロセスの組合せで、
連続プロセスにおいてバッチプロセス領域の微細発泡体作製に成功。

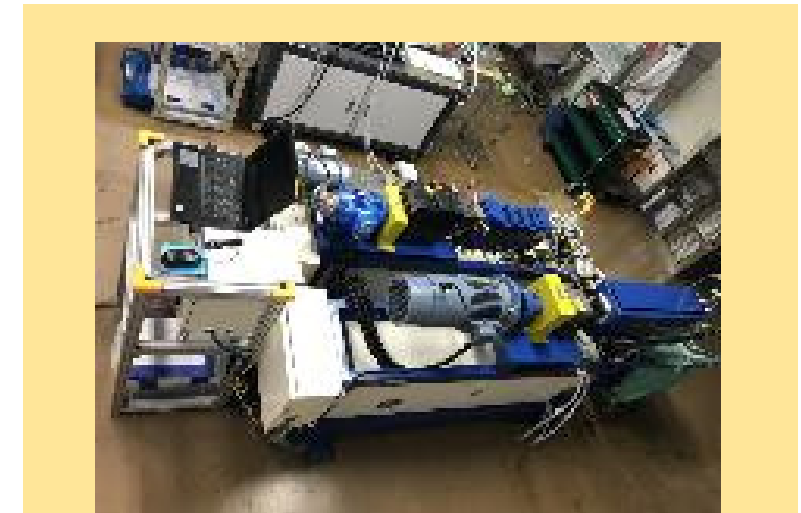
■ 熱伝導率評価

気泡微細化による熱伝導率の低下 ($0.044 \rightarrow 0.041 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、密度 0.23 g/cm^3) を確認。
 ただし、高い性能が期待される領域への到達には更なる検討が必要。

■材料設計プラットフォームへの取り組み

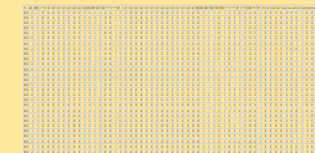
材料設計プラットフォーム(MDPF)活用に向け、オンラインでのデータ取得に特化した超小型押出発泡装置を導入し、DPFへデータを蓄積。

- 押出発泡プロセスの更なる高速化・高度化に向け、**データ分析主流の材料開発を目指した取り組み**を推進。



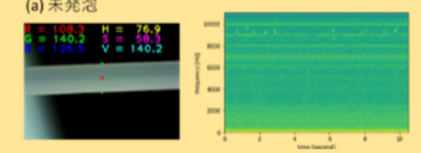
超小型押出発泡装置

プロセスデータ



(押出条件)

オンライン計測データ

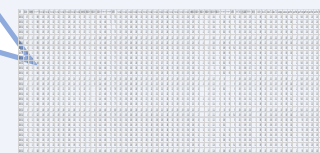


(ストランド画像・音)

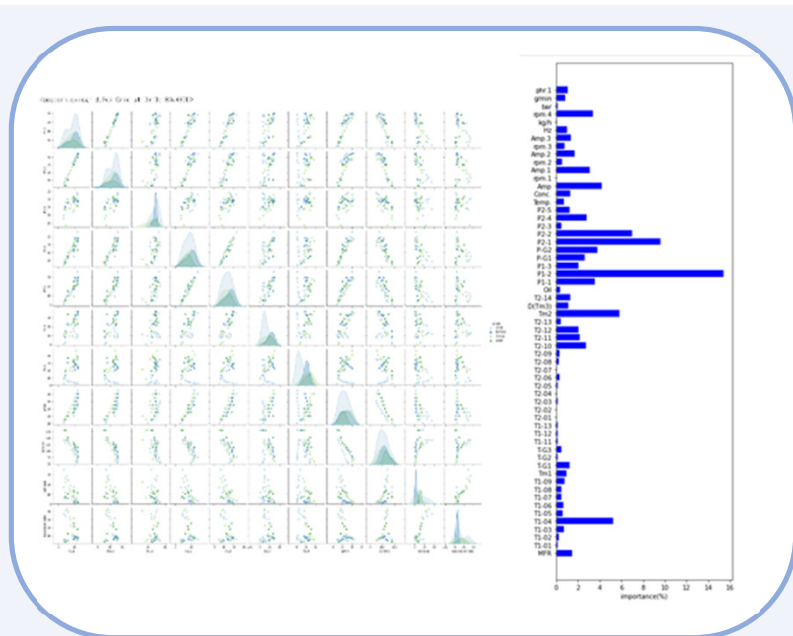


小型押出発泡装置

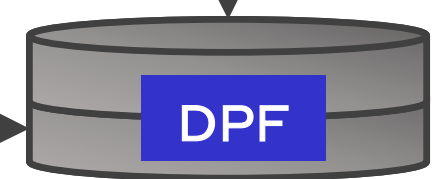
プロセス&構造データ



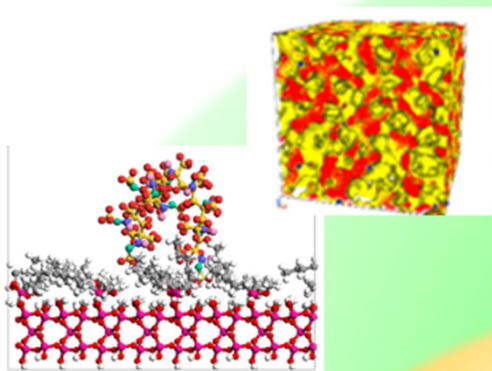
(押出条件+気泡径等)



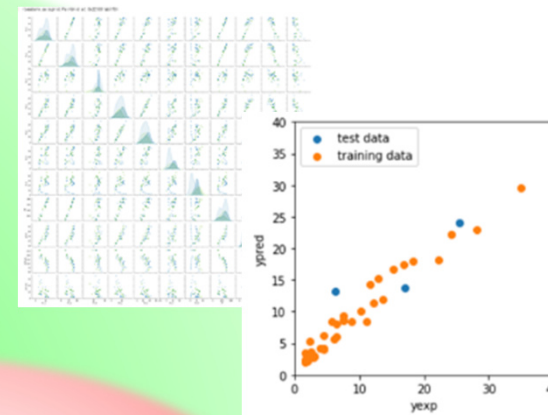
押出発泡での取得データ分析の一例



シミュレーションを活用
した開発期間の短縮



MI・機械学習を取り入れた
研究開発推進



研究者自身の スキルアップ

- プログラミングスキル
- データ処理・分析スキル

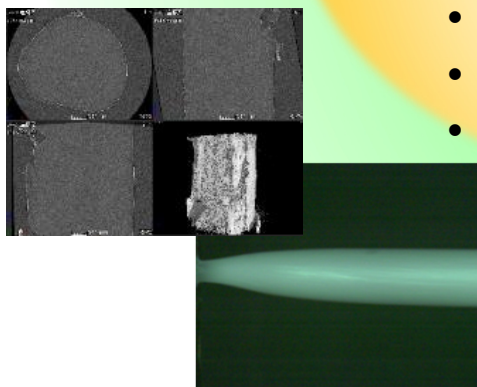
本PJで得た 成果・知見

三位一体の 高速試作スキームの確立

- 計算科学の活用
- オンライン計測技術
- 高度評価技術

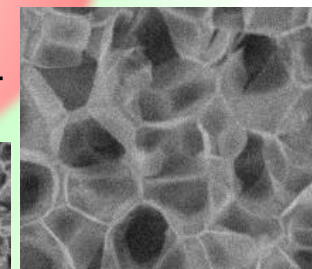
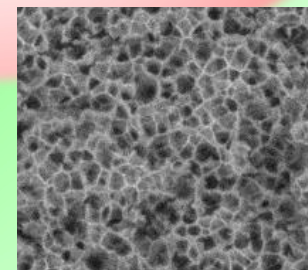
気泡微細化に 関する知見

- 超高压プロセス
- 核剤メカニズム・設計指針



新たな分析手法の導入による
評価技術の迅速化・高度化

当社での活用・波及効果



気泡構造制御による
高機能発泡体の開発

以上