

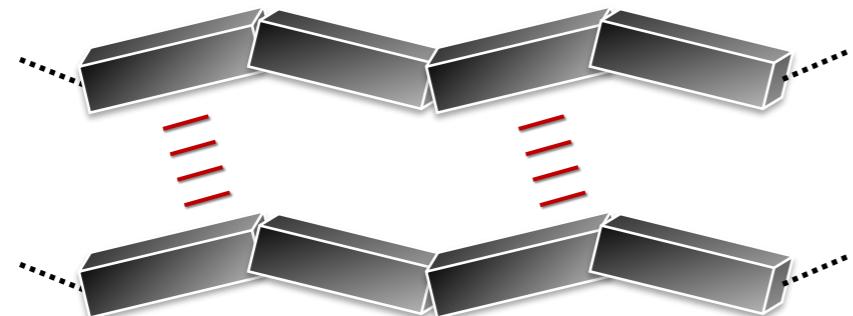
剛直-柔軟、親水-疎水など 相反する性質を切替え可能な高分子

東京科学大学 物質理工学院
助教 高橋 明

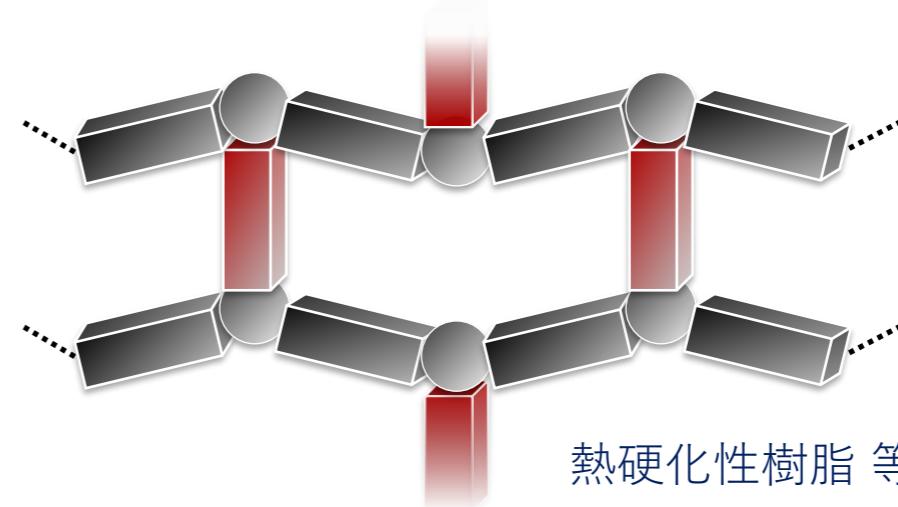
2025年9月19日

従来技術とその問題点

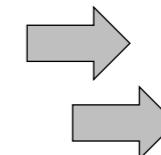
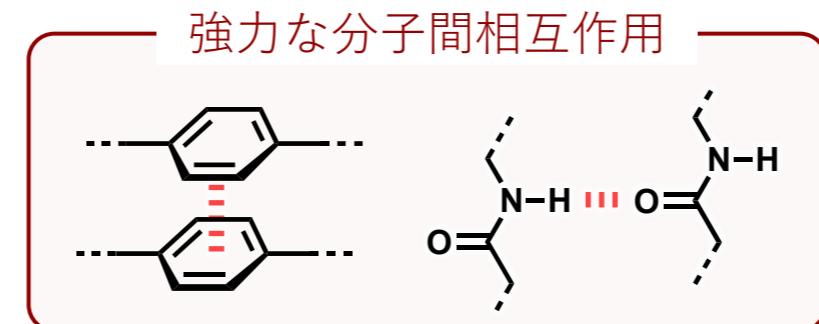
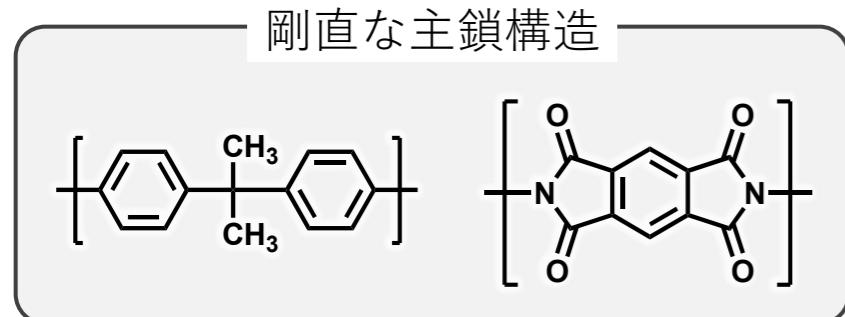
優れた物性を示す高分子の構造と課題



芳香族系高分子 等.



熱硬化性樹脂 等.



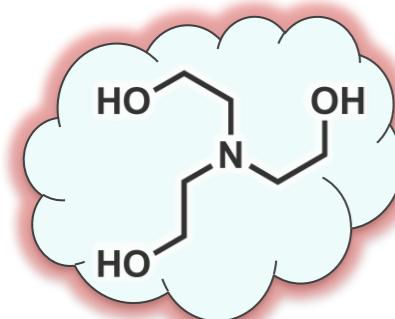
再利用を困難化

- ・物性を大きく変えるほどの化学構造変化を起こすには一般に**煩雑な工程を要する**
- ・優れた物性の要件と加工・分解を困難化する原因是同じ → **単一の化学構造での両立は困難**

新技術の概要と特徴

プロセス時と使用時の高分子物性の変換

<プロセス時>



柔軟状態

低温でも加工容易

<使用時>

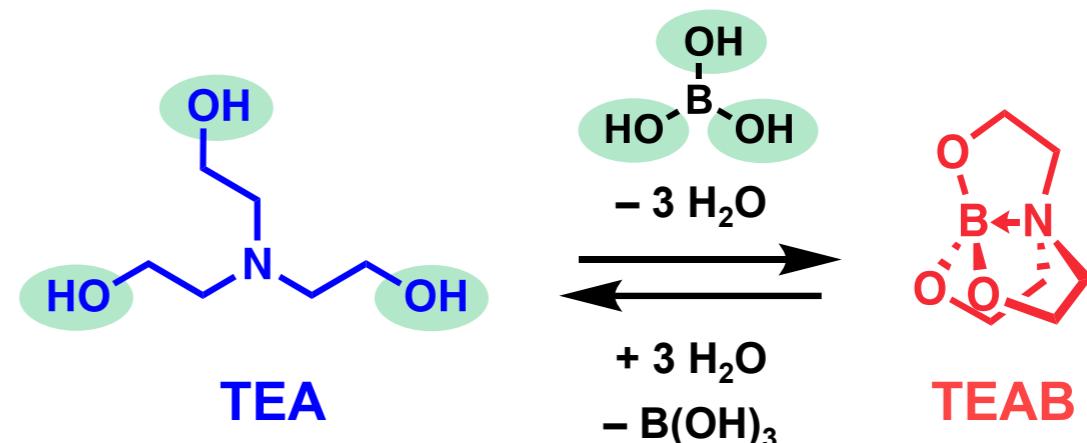


剛直状態

耐熱性・高

鍵反応

トリエタノールアミン (TEA) の可逆的ホウ素化



- ・多点での環の開閉により構造の剛直/柔軟性が劇的に変化
- ・正反応/逆反応ともに高選択的・高効率

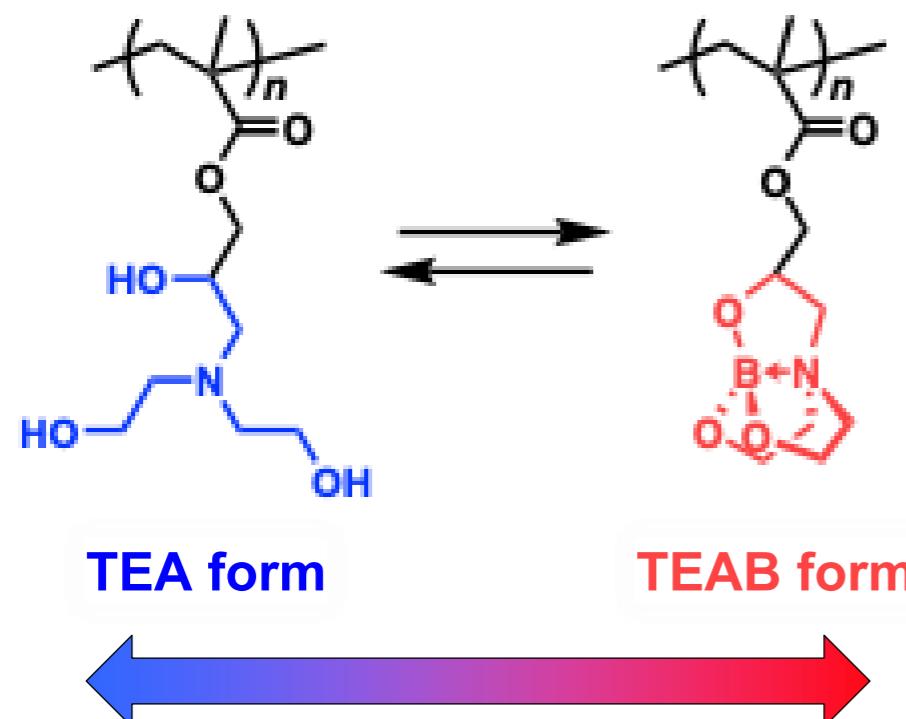
使用時は剛直な分子構造、プロセス時は柔軟な構造に変換することで物性を最適化

→ 加工・リサイクル容易な耐熱性高分子を設計可能

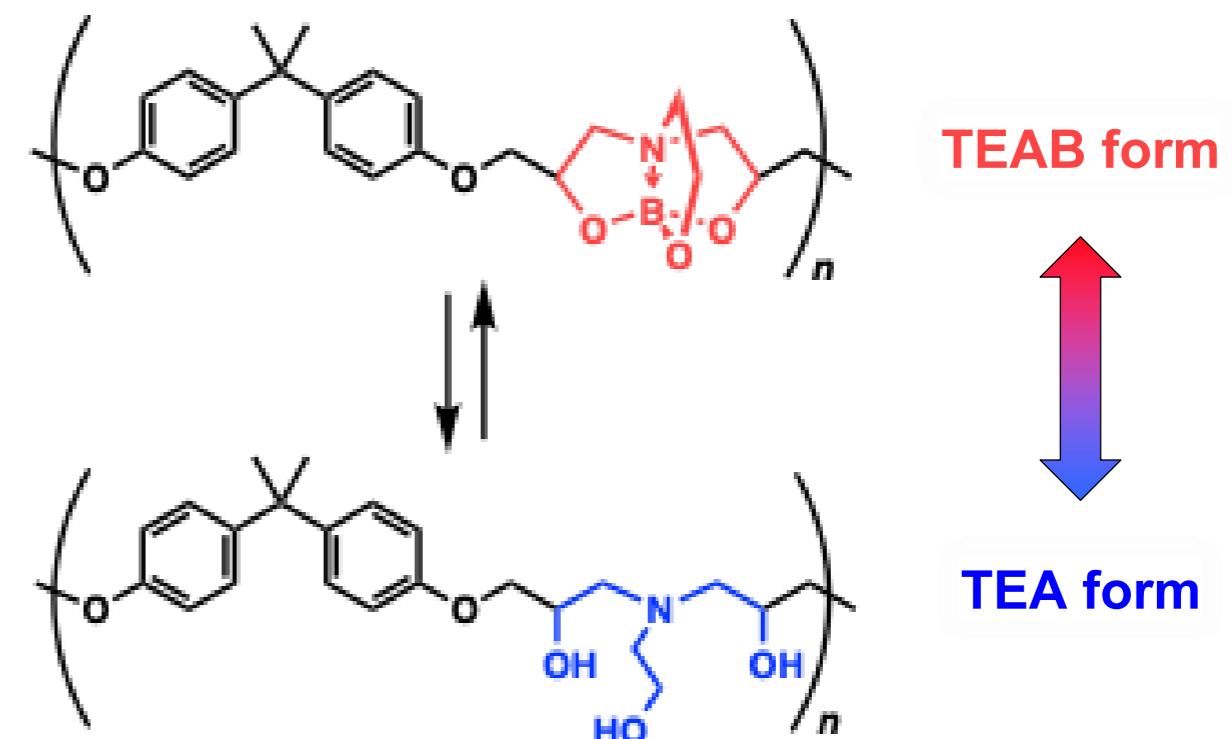
新技術の概要と特徴

トリエタノールアミン(TEA)とそのボレート体(TEAB)の可逆変換

側鎖への導入例



主鎖への導入例

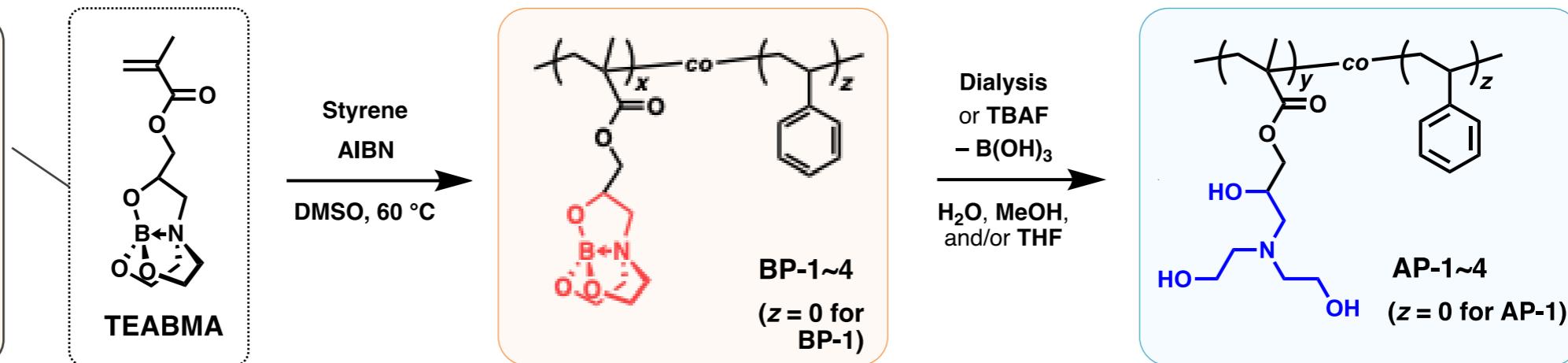


高分子の主鎖・側鎖を問わず導入が容易

A. Takahashi et al. *Chem. Lett.* 2021, 50, 1993;
ACS Macro Lett. 2022, 11, 766; *Polym. J.* 2025, 57, 259.

新技術の具体例：高分子（側鎖型）の合成

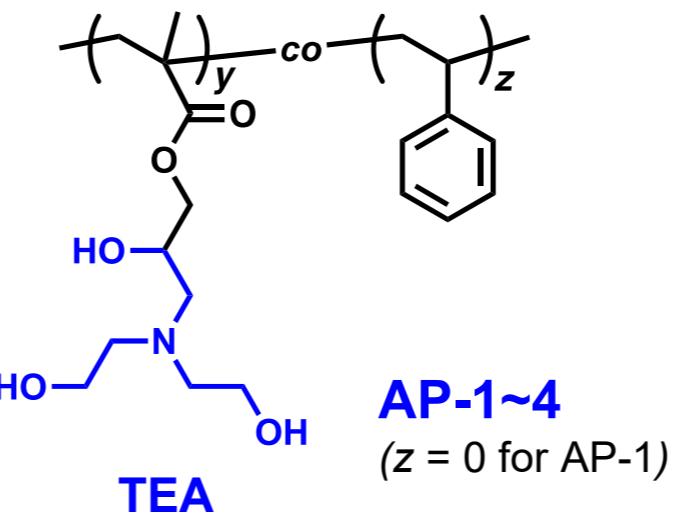
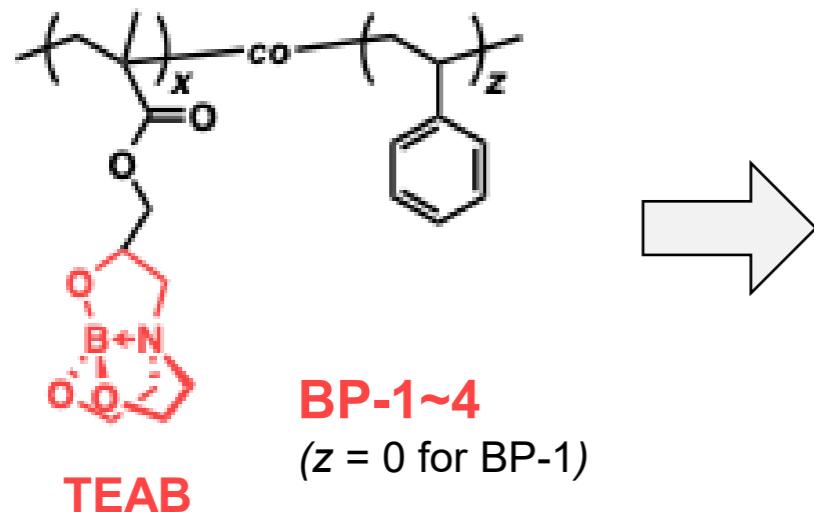
- モノマーは市販の原料から2段階で合成
- カラム精製不要、スケールアップ容易 (\geq kg)



Sample	Feed		Time (h)	Conv. (%) ^{a)}		Yield (%)	Molar comp. (<i>x</i> / <i>y</i> / <i>z</i>)	<i>M_w</i> (DOSY)
	TEABMA	St		TEABMA	St			
BP-1	1.0	0.0	5	93.9	—	94	1.00 / — / —	182,000
AP-1	—	—	—	—	—	85	— / 1.00 / —	188,000
BP-2	0.55	0.45	6	57.6	60.4	59	0.56 / — / 0.44	134,000
AP-2	—	—	—	—	—	90	— / 0.55 / 0.45	174,000
BP-3	0.29	0.71	6	44.8	35.7	35	0.35 / — / 0.65	81,000
AP-3	—	—	—	—	—	87	— / 0.35 / 0.65	95,300
BP-4	0.12	0.88	23	78.2	58.3	41	0.18 / — / 0.82	47,400
AP-4	—	—	—	—	—	84	— / 0.21 / 0.79	54,200

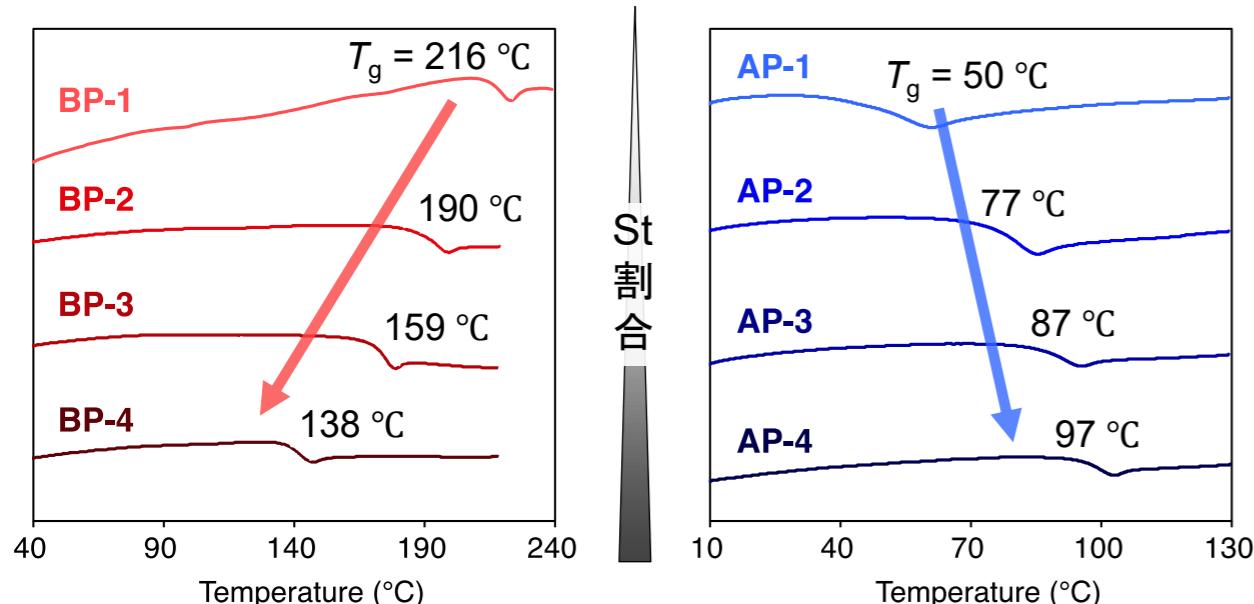
a) Calculated by ^1H NMR of reaction mixture.

新技術の具体例：構造変換に伴う熱物性変化

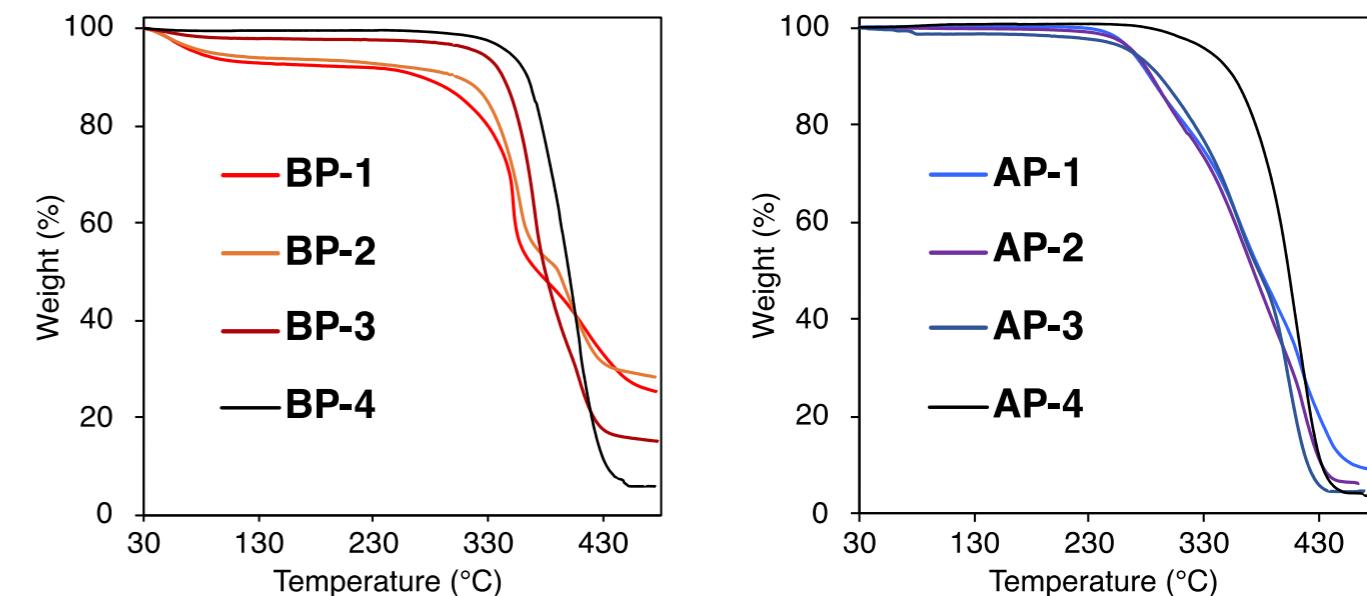


Sample	Molar comp. ($x / y / z$)
BP-1	0.980 / — / —
AP-1	— / 1.00 / —
BP-2	0.56 / — / 0.44
AP-2	— / 0.55 / 0.45
BP-3	0.35 / — / 0.65
AP-3	— / 0.35 / 0.65
BP-4	0.18 / — / 0.82
AP-4	— / 0.21 / 0.79

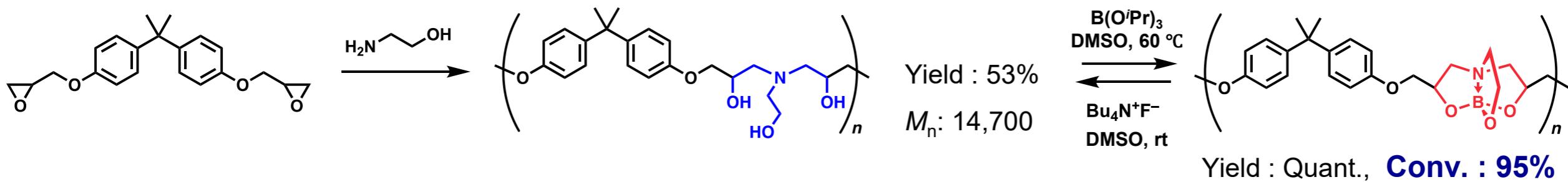
DSC profiles (10 °C/min, N₂)



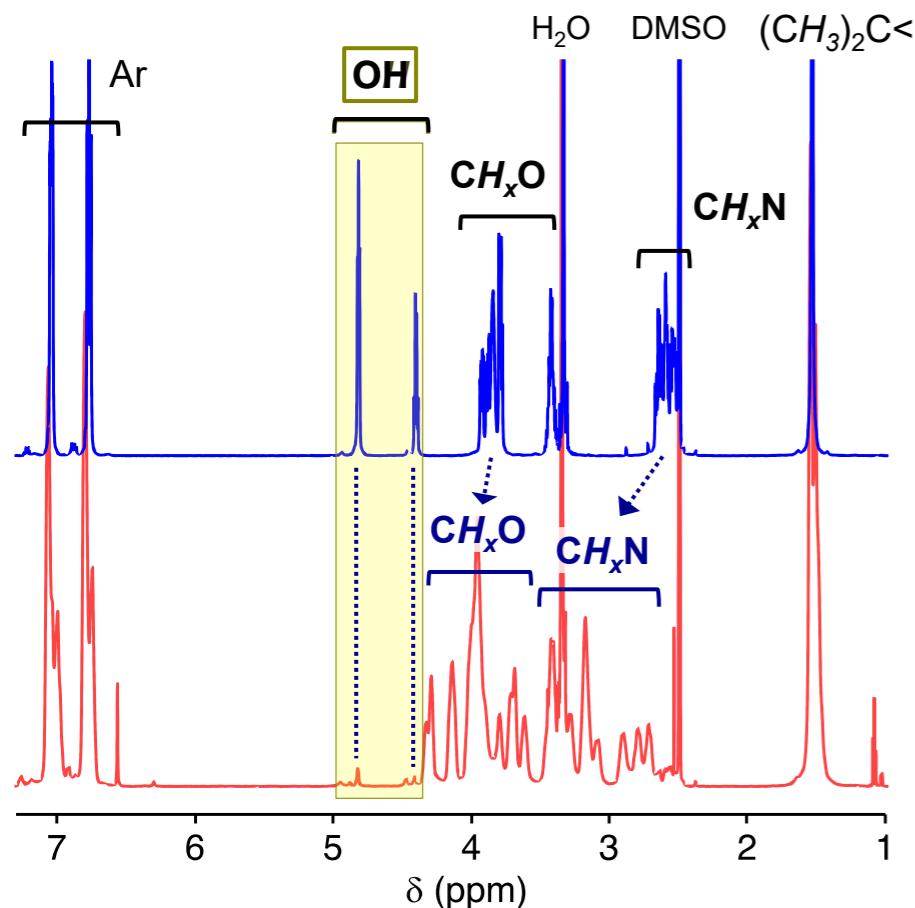
TGA profiles (10 °C/min, N₂)



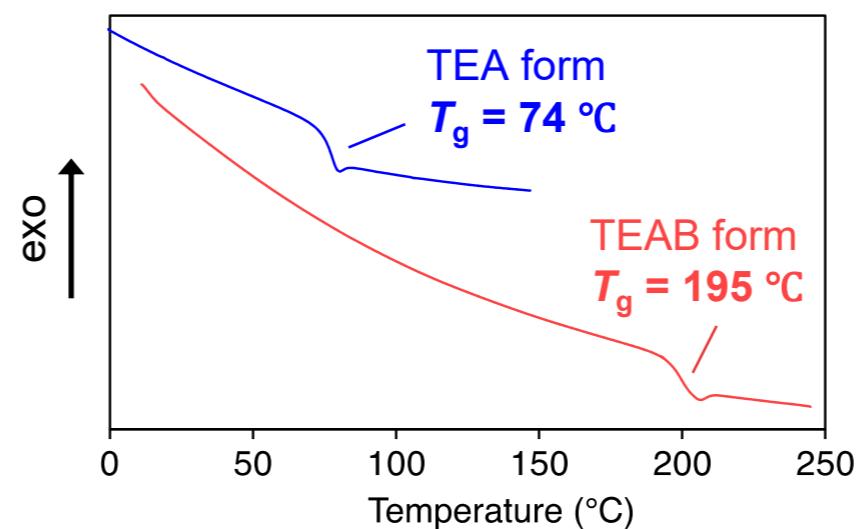
新技術の具体例：高分子（主鎖型）の合成と物性



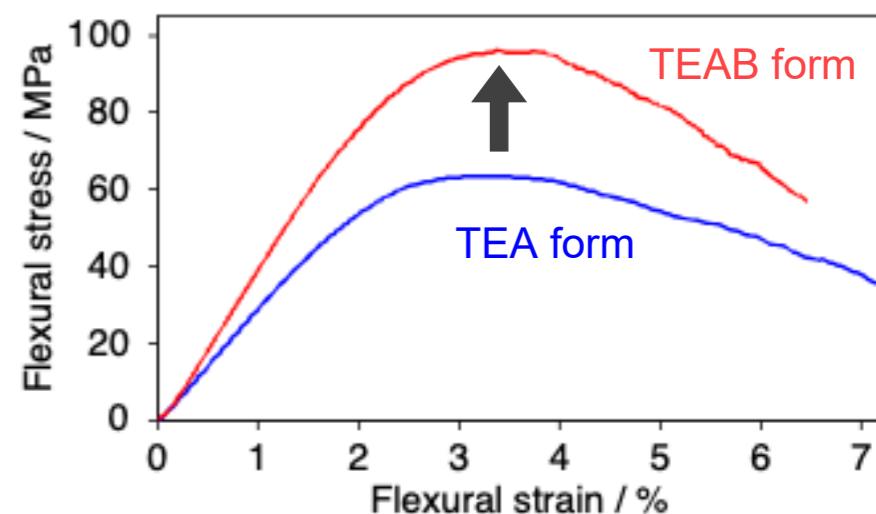
¹H-NMR (DMSO-*d*₆, 25 °C)



DSC (in N_2 , 10 °C/min, 2nd heat)



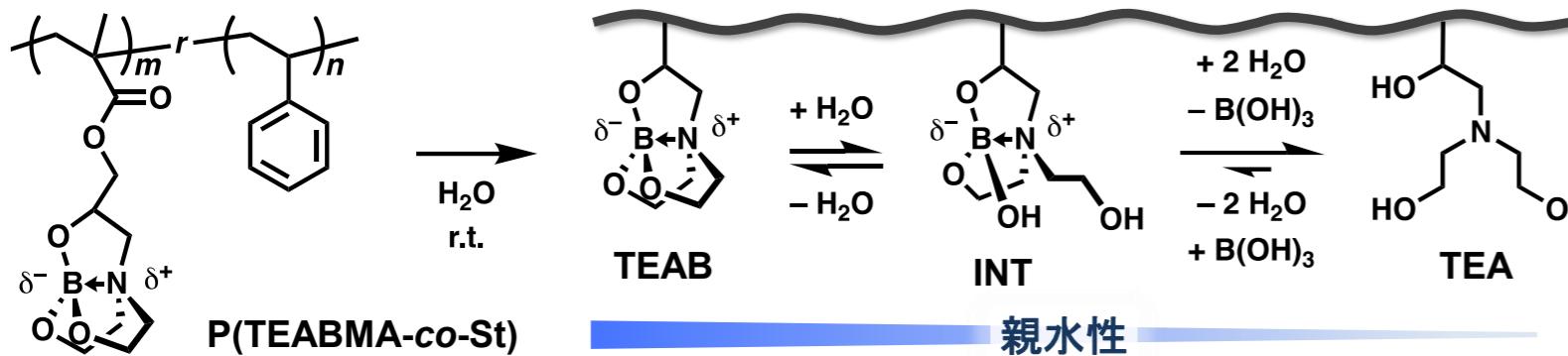
応力—歪み曲線 (3点曲げ法、1 mm/min)



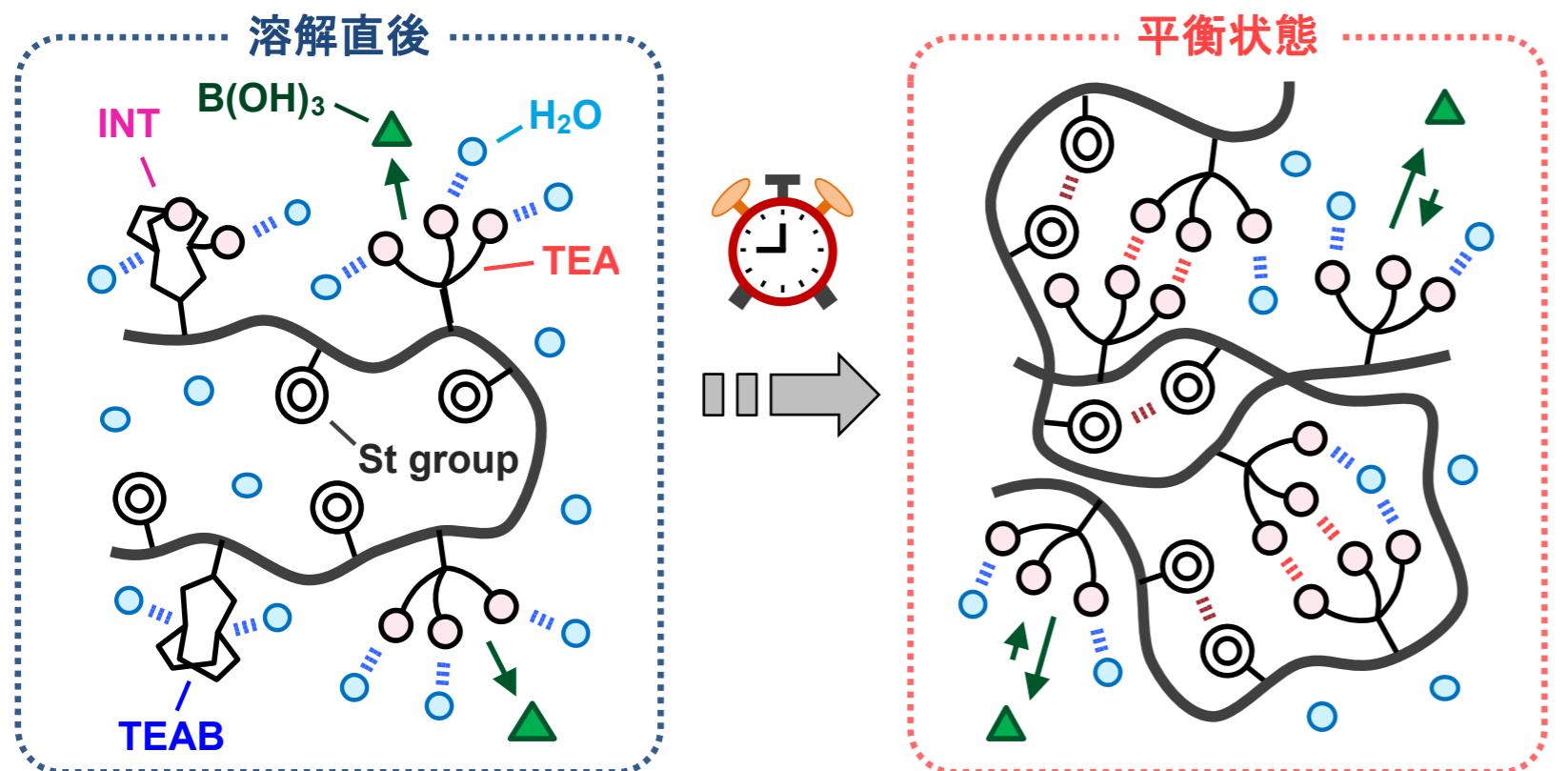
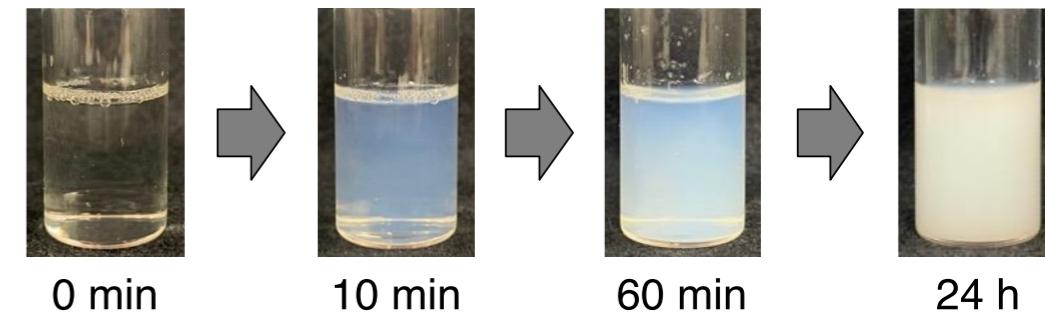
- 主鎖に導入した場合においても熱物性が顕著に変化
- 3点曲げ試験より1.3～1.5倍の弾性率・強度上昇を確認

新技術がもたらす更なる特徴

ホウ酸有無における高分子の親水性変化

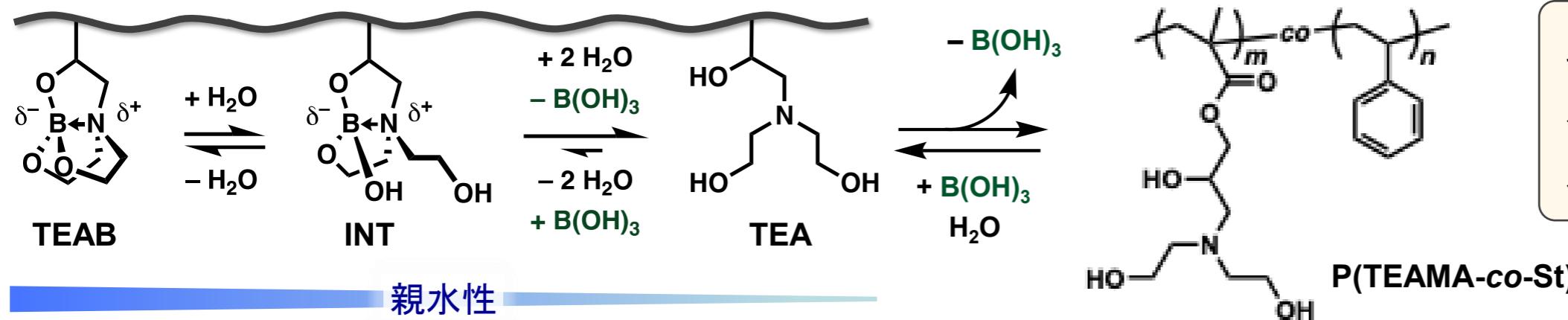


- ・高分子粉末を水に加えた後の変化



- ・ホウ素化により両親媒性高分子に「一時的な親水性」を付与
- ・TEABがTEAと比べて高い極性を有することに由来

ホウ酸有無における水和状態



疎水構造の割合により
ホウ酸の有無における
水和状態を設計可能

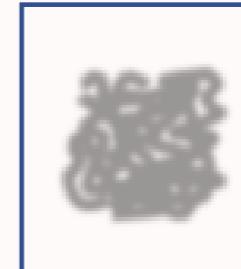
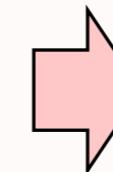
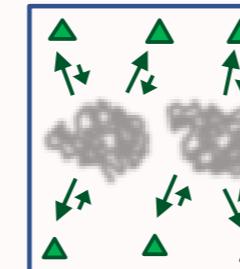
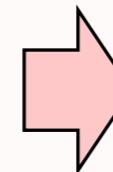
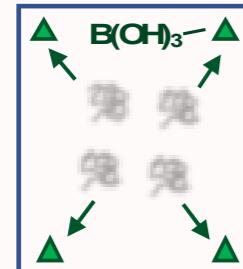
親水性

溶解直後

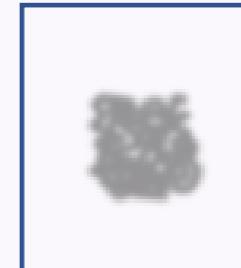
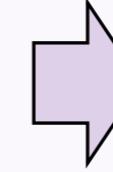
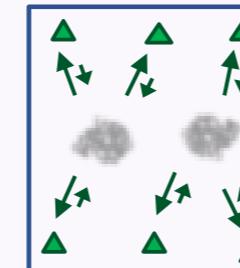
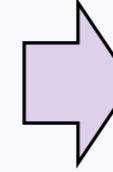
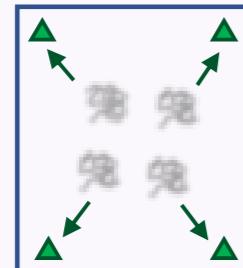
平衡時

加水分解後(側鎖TEA)

St:
49%



St:
40%



水溶液からの塗布後に不溶化する高分子

高分子水溶液



塗布



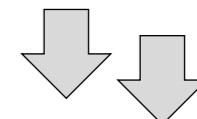
自然乾燥



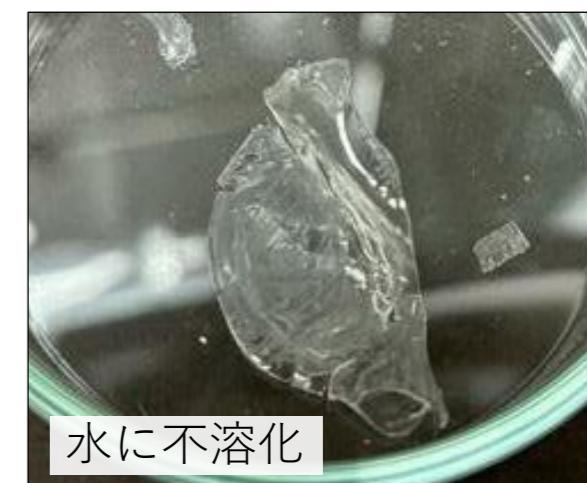
水に浸漬 (脱ホウ酸)



溶解せず形を保持



ホウ酸有無における親水性を適切に設計することで、
水系樹脂のような不溶化挙動を示す高分子を開発可能



水に不溶化

想定される用途

- 既存の耐熱高分子材のリサイクル性向上に向けた改質
- 高耐熱性と低環境負荷の双方が求められる高分子材の新規開発
(厚物部材、接着剤など)
- 界面活性剤を使用しない水系樹脂 (コート剤、接着剤など)
の開発

実用化に向けた課題

- ホウ素化後の材料の成形加工条件の最適化
- ホウ素化物の物性データの系統的収集
- より多様な化学構造をもつ樹脂の合成と、それによる設計可能な物性幅の解明
- 実用化レベルの高分子量をもつポリマーの合成と、それを用いた性能検証

企業様への期待

- ・前半技術は、エンプラ・熱硬化性樹脂を扱う企業様との共同研究を希望
- ・後半技術は、水系（水性）樹脂接着剤・コーティングの技術を持つ企業様との共同研究を希望
- ・特定材料の代替検証や新規用途の開拓を希望

企業様への貢献、PRポイント

- 本資料で紹介したモノマー・ポリマーはいずれも汎用装置で大スケール ($\geq \text{kg}$) 合成可能。
- 耐熱樹脂（エンプラ、熱硬化性樹脂）の再利用化・環境負荷低減を促進している企業様に、新たな材料設計指針を提供できる。
- 本技術と同様のことを行なうことができる化学反応は他に無く、独自性の高い分子技術を提供できる。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称：ポリマー化合物、その柔軟性を変化させる方法、それを用いた樹脂の成型方法及び可溶化方法、モノマー化合物、並びにそれを含む重合性組成物
- 出願番号：特願2023-27492
 特開2023-126174
- 出願人 ：神奈川大学
- 発明者 ：高橋 明、亀山 敦

お問い合わせ先

東京科学大学 (Science Tokyo)
産学共創機構技術プロモーション室

TEL 03-5734-3817
e-mail consult@cim.isct.ac.jp