



R8年度NPO東海生研 第2回セミナー

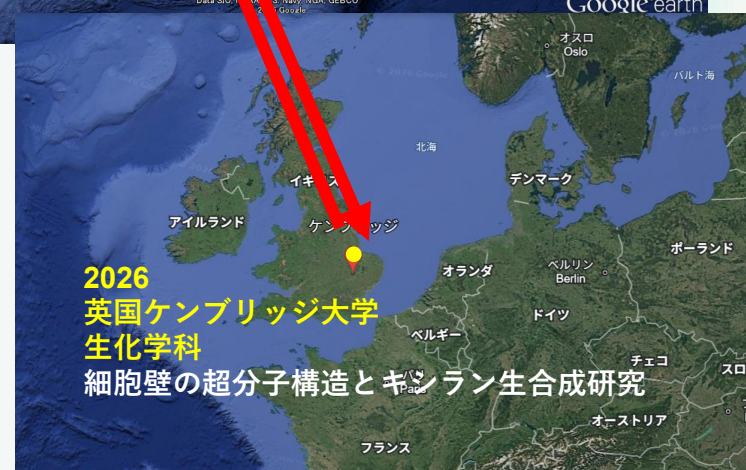
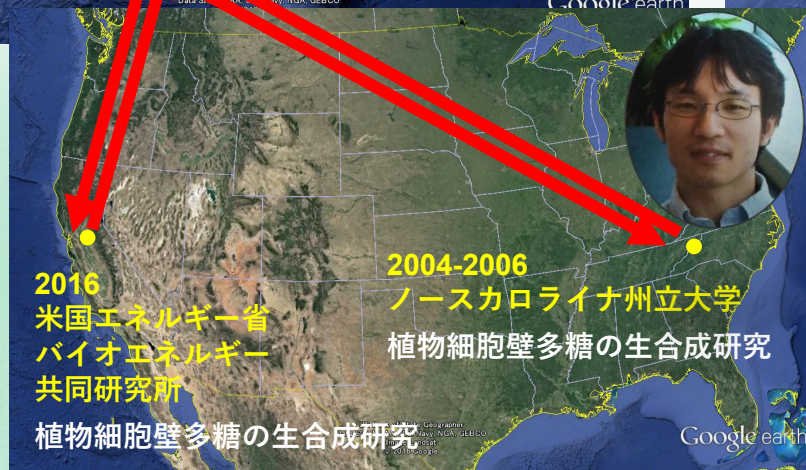
植物バイオマスを支えるアラビノキシラン — その生合成機構と機能 —

鈴木 史朗

岐阜大学 応用生物科学部 応用生命化学科
バイオマス代謝化学研究室



自己紹介 -何を研究してきたか-



植物細胞壁の化学成分の構造、生合成、利用

1. (アラビノ)キシランとは -構造と機能-
2. キシランの生合成 -当研究室の結果を中心に-
3. 竹プラスチックの紹介

■ (アラビノ)キシランの機能と利用展開



- 木材や竹の主成分の一種→建材・素材の強度保持
- 植物を支えている・細胞壁に存在→ストレス耐性作物の作出
- 野菜・穀物に含まれる→食物繊維・腸活
- 大量にある再生可能資源→石油代替・プラスチック代替

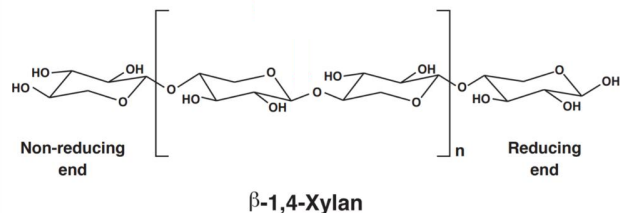


キシランの構造

キシロースが β -1,4結合した主鎖に、様々な側鎖が付加したヘミセルロース

主鎖構造

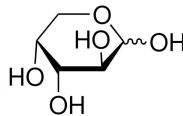
β -1,4結合した D-キシロース（五炭糖）の直鎖多糖



- 主鎖は β -1,4-キシロース結合
(セルロースのグルコースがキシロースに)
- セルロースより柔軟で、結晶性が低い

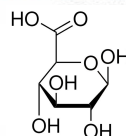
主な側鎖・修飾

① アラビノース (Ara)



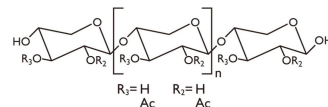
主鎖の O-2 や O-3 に
1～複数個付加

② グルクロン酸 (GlcA)



主鎖の O-2 に
付加しやすい
(負電荷をもつ)

③ アセチル基 (Ac)



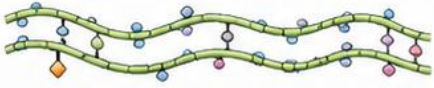
主鎖やアラビノースの
O-2、O-3 に付加



ポイント

- ✓ 側鎖の種類・量・位置が
植物種や組織によって
大きく異なる
- ✓ 側鎖やアセチル化により、
水溶性・柔軟性が高まる
- ✓ 他の成分（セルロースや
リグニン）との相互作用に
重要

セルロースとの比較

	セルロース	キシラン
構成糖	 グルコース（六炭糖）	 キシロース（五炭糖）
結合様式	β -1,4 結合（直鎖・無分岐） 	β -1,4 結合（側鎖・修飾あり） 
高次構造	高い結晶性・直線的 	低い結晶性・柔軟 
性質	高強度・難分解性	柔軟・水溶性が高い・分解されやすい

どこに多く存在するか？

木材（特に広葉樹）

イネ科植物の細胞壁

穀物の細胞壁



キシランが主成分



キシランが豊富



キシランが多い

★ 木ではキシランが“主役”！

- ✓ 木のヘミセルロースの **70～90%** はキシラン
- ✓ セルロースをつなぎ、細胞壁のネットワークを形成
- ✓ 木の強さとしなやかさに大きく貢献

➡ キシランは、セルロースをつなぎ、細胞壁ネットワークを支える“**つなぎ役**”のヘミセルロース！

イネ科植物のキシラン最新像 - アラビノキシラン -

主なイネ科植物

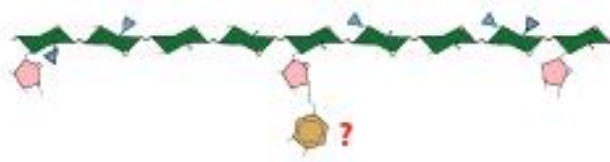


少なくとも側鎖糖のつき方やアセチル化パターンなどの修飾の違いにより、AXe、GAXc、hsGAXの3種類あり、加水分解酵素による分解性が異なる

Xylan molecule nomenclature and proposed structure

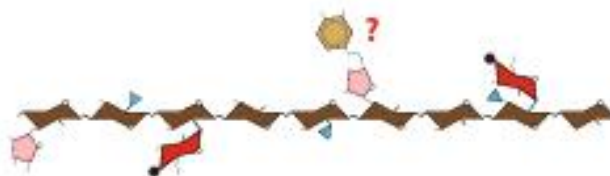
AXe

ArabinoXylan with even distribution of Ara substitutions



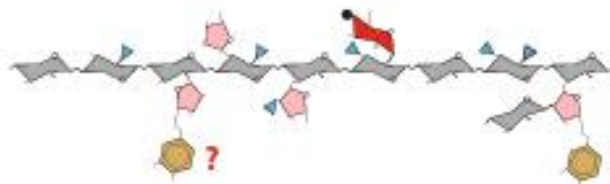
GAXc

GlucuronoArabinoXylan with clustered GlcA substitutions



hsGAX

highly substituted GlucuronoArabinoXylan



Enzyme sensitivity

CtGH5_34

arabinoxylanase releases **AXe** diagnostic oligosaccharides

EcGH30

glucuronoxylanase releases **GAXc** diagnostic oligosaccharides

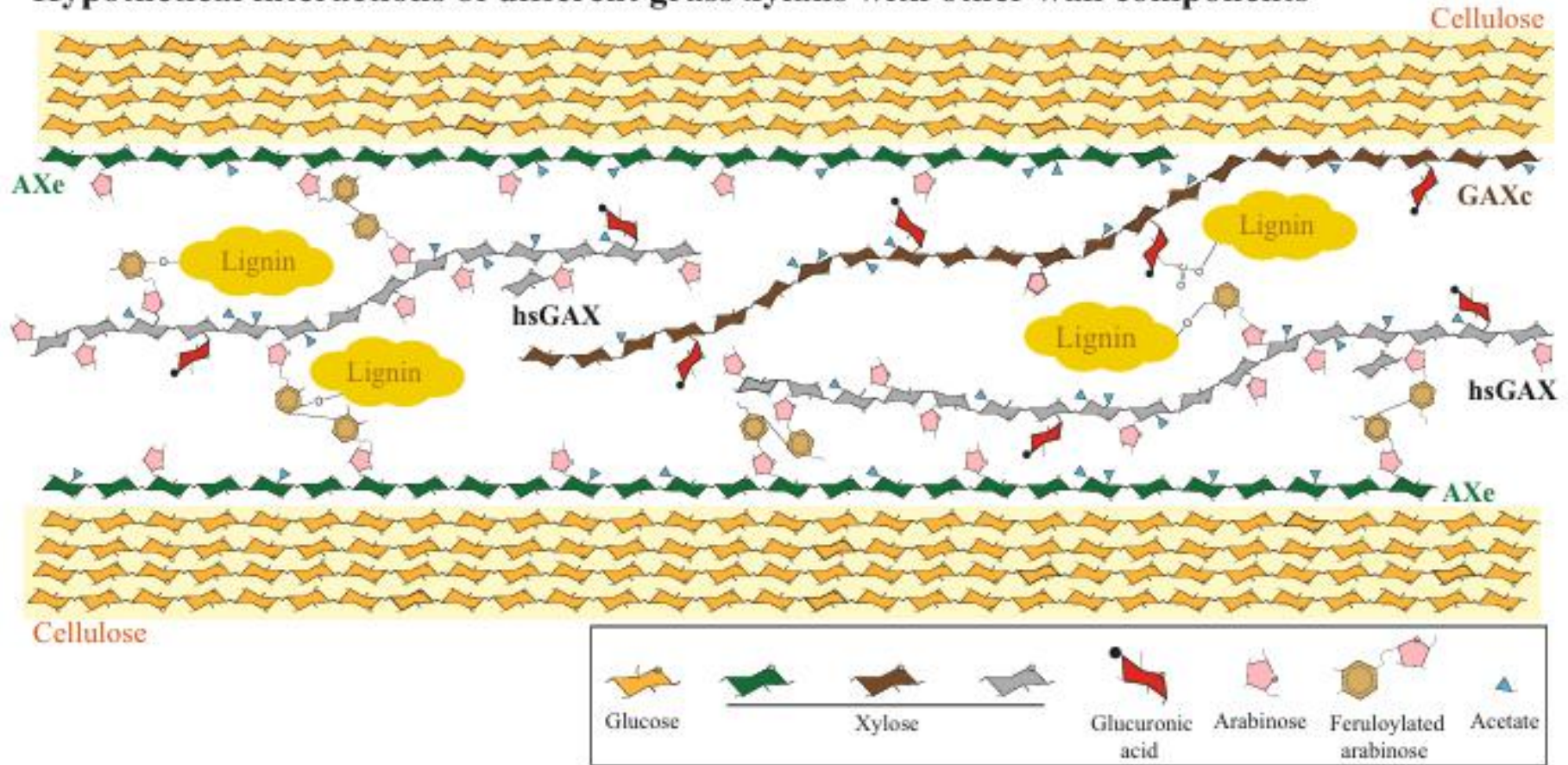
CjGH10

endoxylanase releases some **hsGAX** diagnostic oligosaccharides but also hydrolyses **AXe** and **GAXc**

■ イネ科植物のキシラン最新像 -アラビノキシラン-

3種類のキシランは細胞壁の中での存在場所や機能が異なる

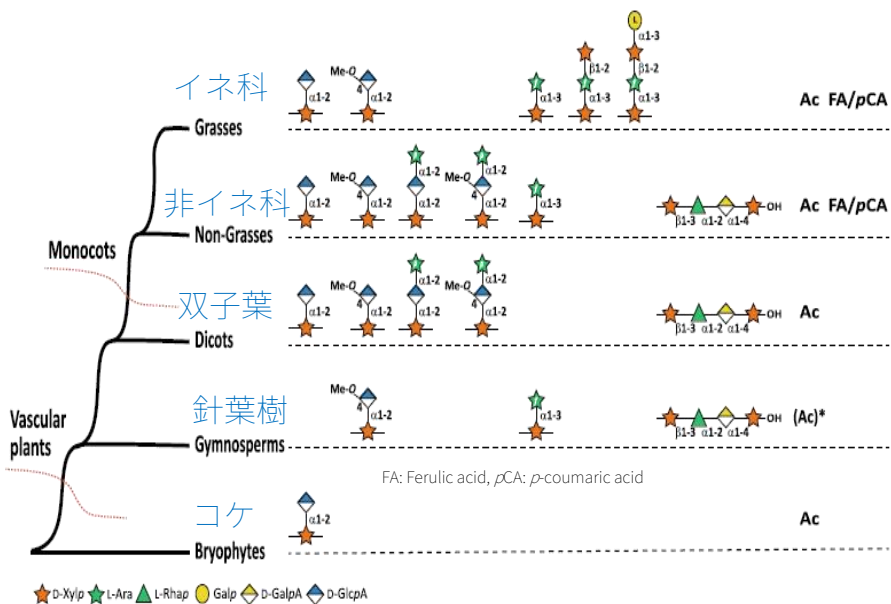
Hypothetical interactions of different grass xylans with other wall components



1. (アラビノ)キシランとは -構造と機能-
2. キシランの生合成 -当研究室の結果を中心に-
3. 竹プラスチックの紹介

キシランの構造と生合成酵素

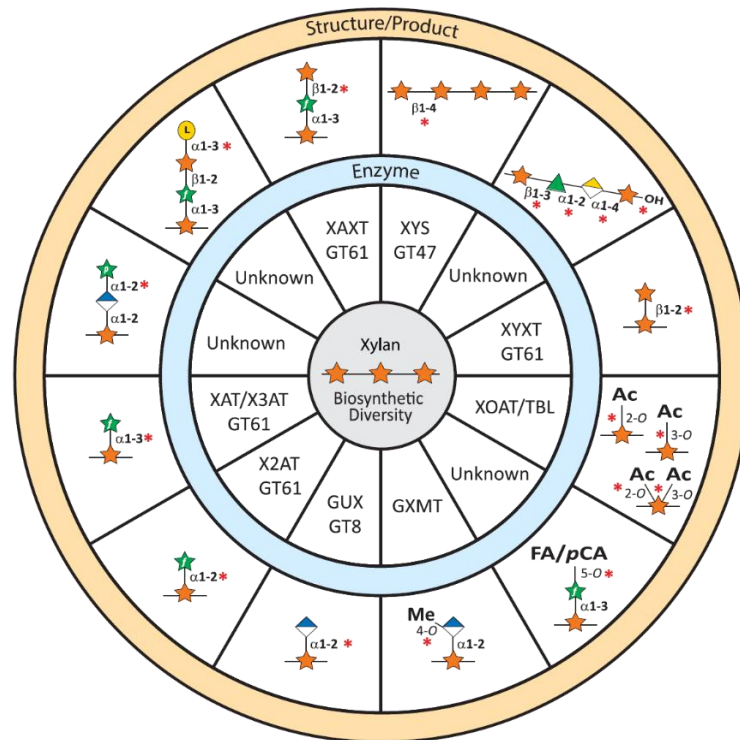
1 キシランの構造と多様性



Curry et al. 2023

- 共通のβ-(1, 4)骨格を持つ
- 側鎖修飾・アセチル化・FA/pCA修飾および還元末端配列の有無により多様化
- 系統によってキシラン構造が異なる
- 特にイネ科植物はFA/pCA修飾を持つが、還元末端配列を持たないことが特徴

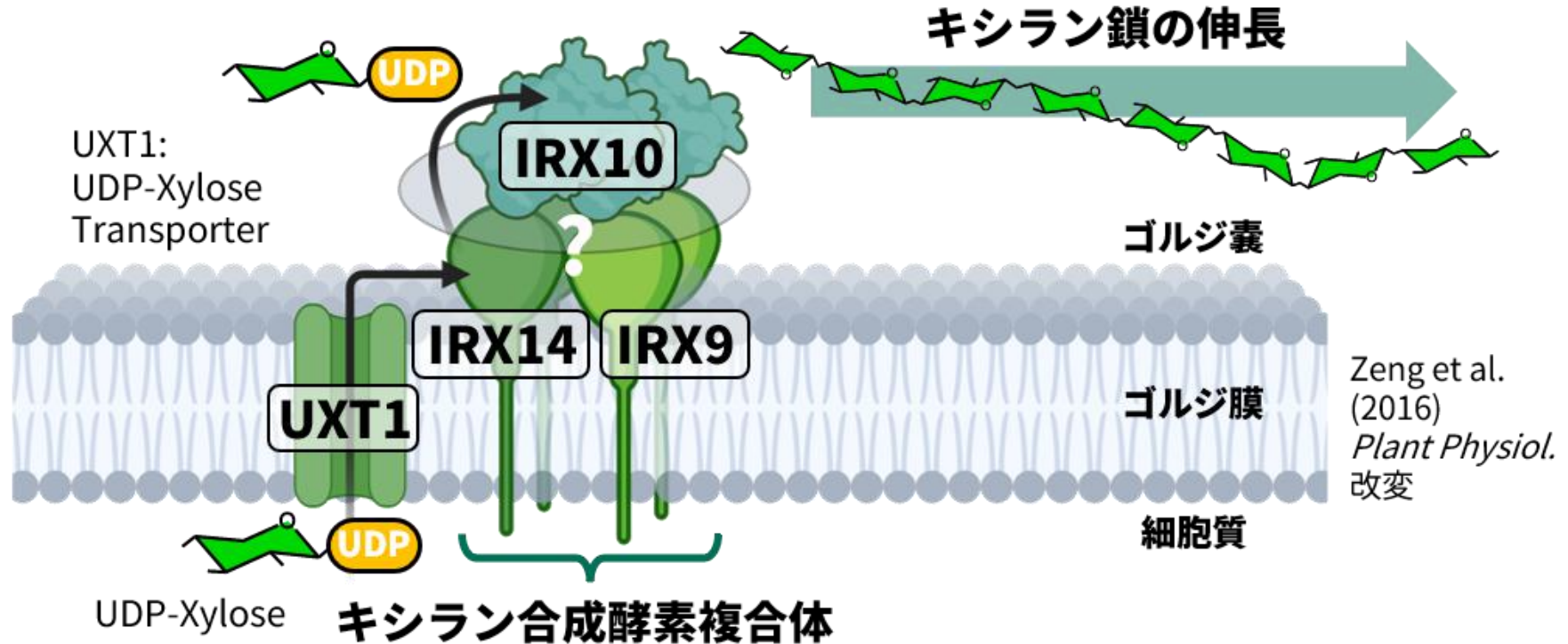
2 キシラン生合成酵素群



Curry et al. 2023

- 主鎖伸長：IRX10 (XYS) を中心とする反応
- キシラン鎖が伸びる
- 側鎖付加：GUXやXATなど
- グルクロン酸やアラビノースが付加する
- 修飾：GXMTやXOATなど
- アセチル化、メチル化が起こる

■ キシラン鎖を合成するタンパク質ユニット：IRX10



- IRX10 (GT47) と IRX9・IRX14 (GT43) とが XSC コアを形成
- 複数のタンパク質が協調して機能する酵素基盤
- UDP-キシロースをドナーとし、ゴルジ膜上で連続的に β -(1,4)-キシラン骨格を合成

IRX10は、キシラン合成酵素複合体の触媒因子であり、キシラン伸長機構を理解するために最も重要である

キシラン生成における大きな謎

[イネ由来IRX10 - OsXYS]



キシロオリゴ糖(DP 2-6)からキシラン鎖が伸びることが示されている
しかし、どのようにこのオリゴ糖がつくられ伸長が開始するのか不明

そもそも、DP2のオリゴ糖がどのようにして出来るのか不明ではあるが、伸長の開始反応を理解するためには、以下の疑問に答える必要がある。

1. 最も短いキシロオリゴ糖（DP2）に、様々な何か別なもの（蛍光標識）を付けたら伸長反応は異なるのか？
2. キシロオリゴ糖と構造の異なる「ヘテロ糖鎖」からもキシラン鎖が伸びるのか？
(一部のキシランの伸長開始末端にはヘテロ糖鎖が結合している)

IRX10組換えタンパク質生産→様々なオリゴ糖と酵素反応→
活性検出→構造モデリング を実施

2-4. アクセプター認識解析: 蛍光標識と鎖長の影響

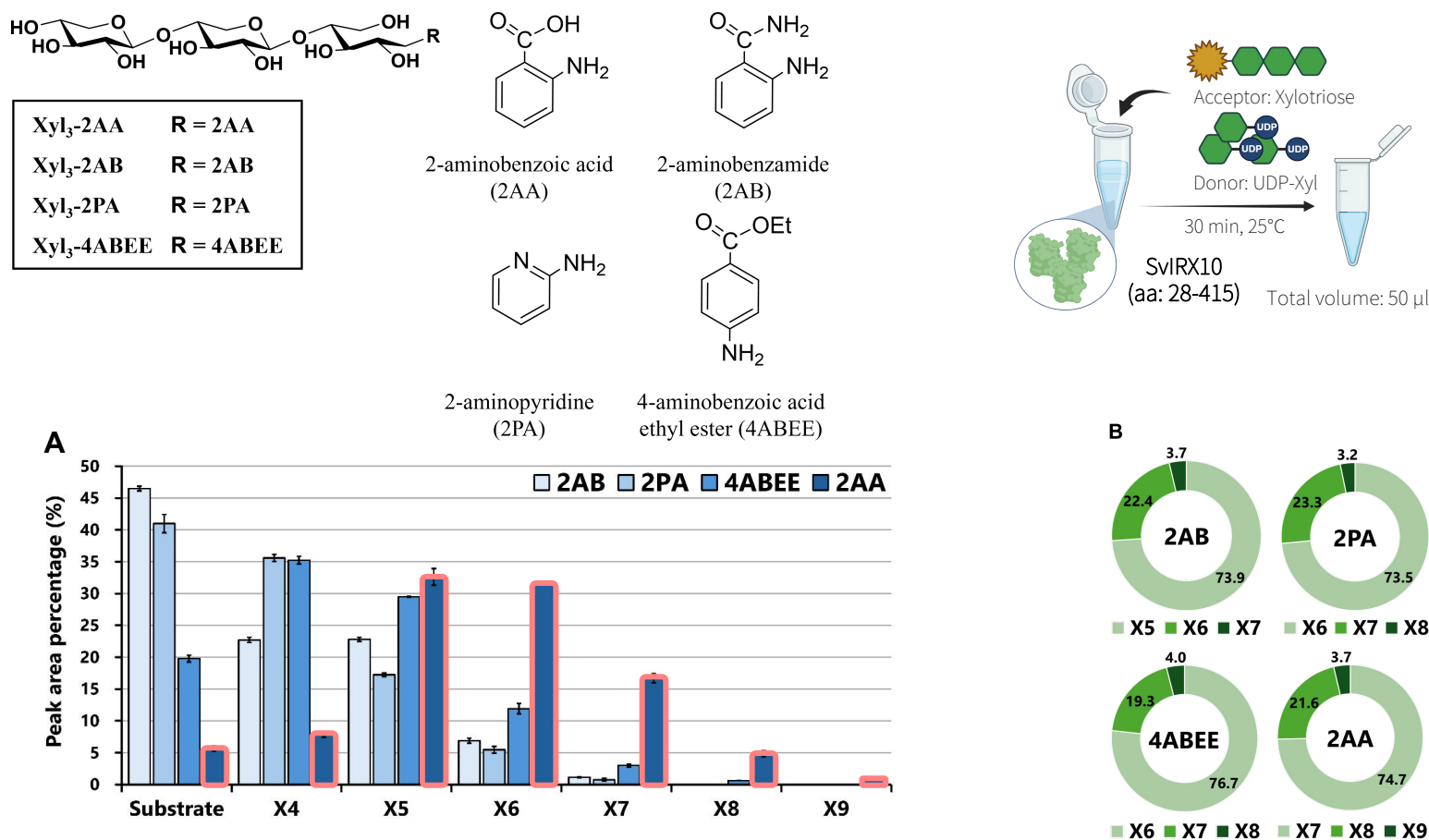


Fig. 3.8: 蛍光標識の異なるXyl₃アクセプターを用いた活性評価
 (A) 生成物分布 (B) 長鎖伸長産物の比率

短鎖アクセプターでは蛍光標識の違いがIRX10による初期伸長効率に影響する
 長さがDP5以上になると蛍光標識による差は見られない

■ 3次元モデルを用いたドッキングシミュレーション

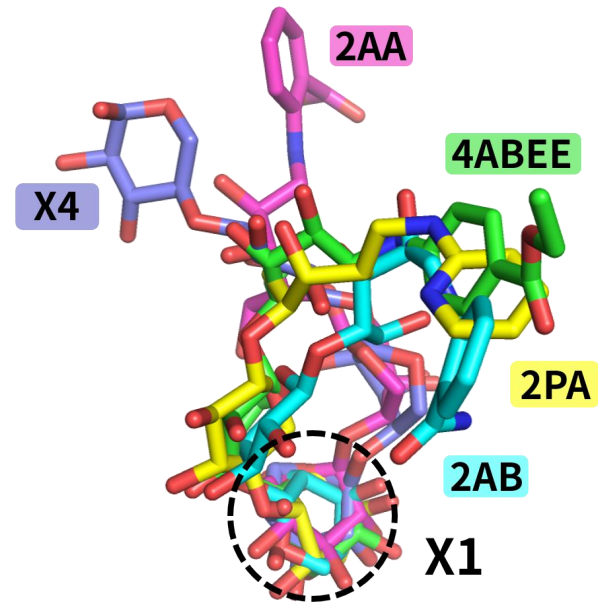
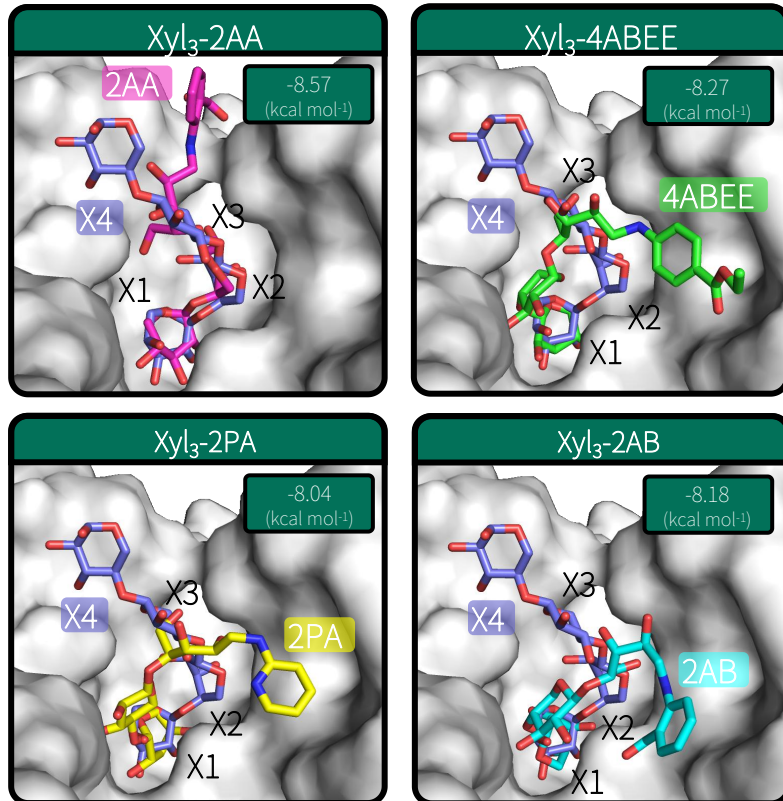
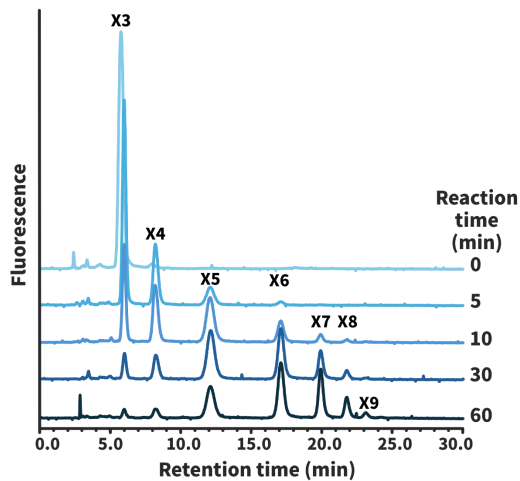
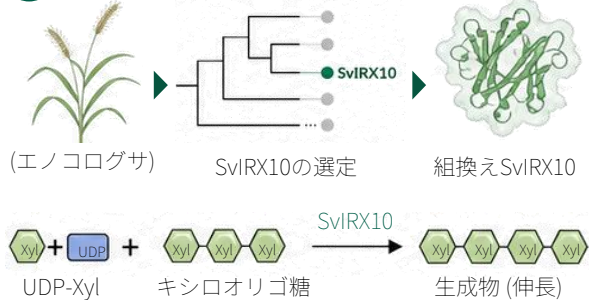


Fig. 3.14: SvIRX10と蛍光標識Xyl₃のドッキング解析

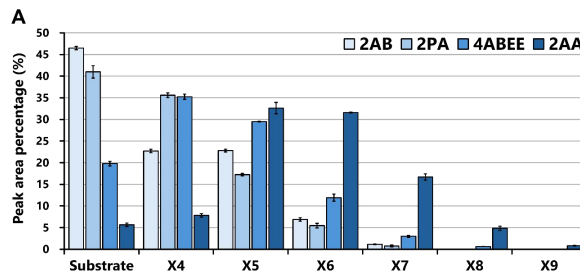
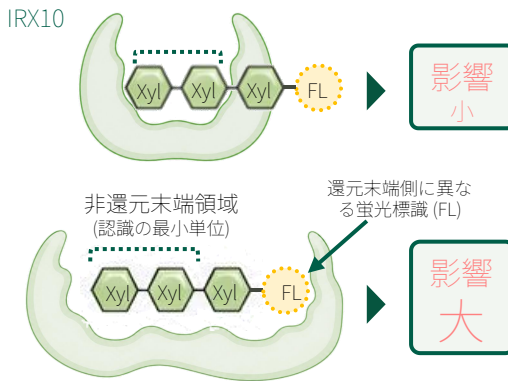
アクセプター認識には、非還元末端から1つ目のXyl残基の位置が重要でそれ以外の残基は比較的フレキシブルなコンフォメーションを取りうる

1 IRX10の活性検出



2 蛍光標識が初期伸長に影響

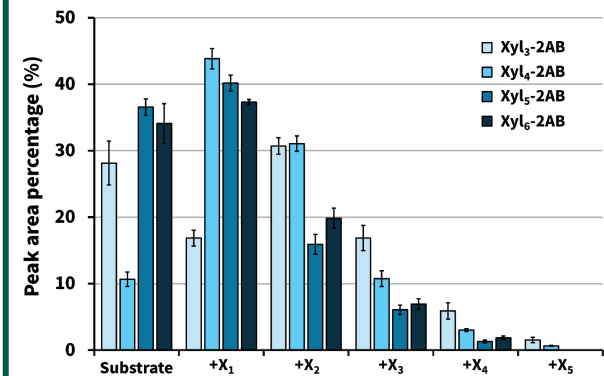
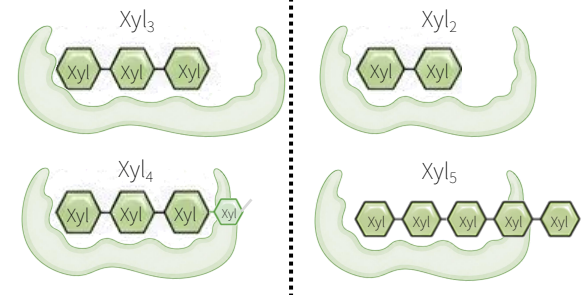
触媒ポケット内でのLabeled-Xyl₃配置モデル



3 アクセプターの構造的適合性

生産的に利用される
アクセプター

適合性の低い
アクセプター

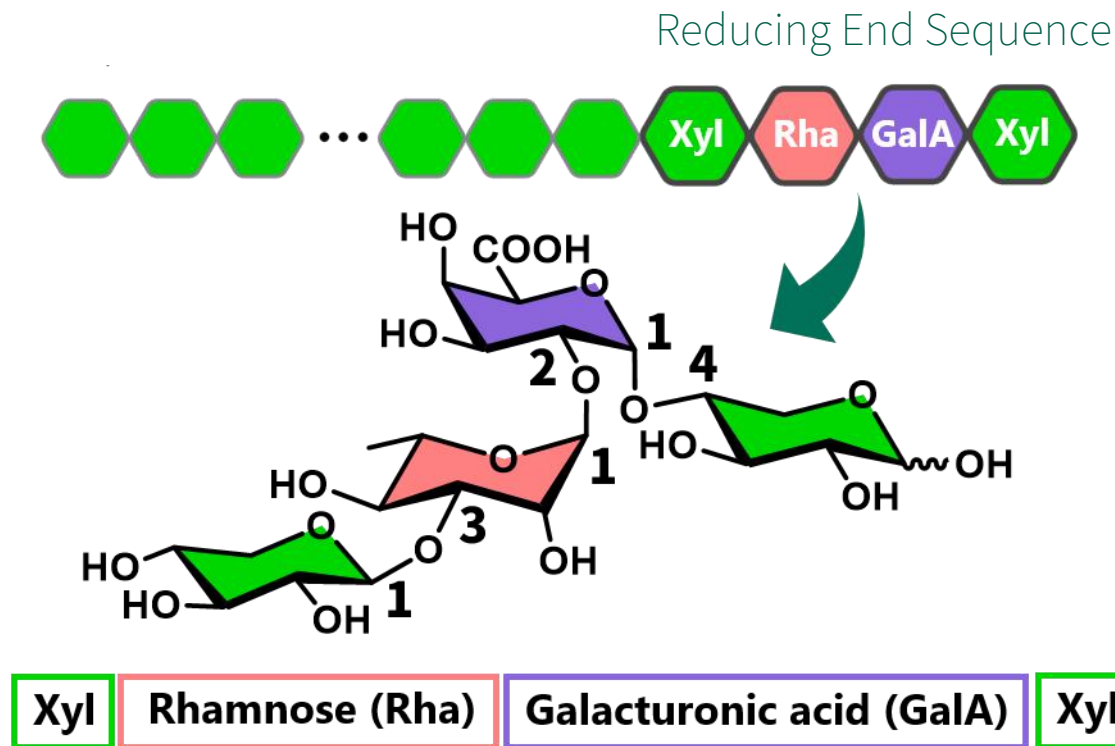


SvIRX10は、クレフト内に収まる実効的な長さで構造に応じて短鎖アクセプターを利用している

そもそも、DP2のオリゴ糖がどのようにして出来るのか不明ではあるが、伸長の開始反応を理解するためには、以下の疑問に答える必要がある。

1. 最も短いキシロオリゴ糖（DP2）に、様々な何か別なもの（蛍光標識）を付けたら伸長反応は異なるのか？
2. キシロオリゴ糖と構造の異なる「ヘテロ糖鎖」からもキシラン鎖が伸びるのか？
(一部のキシランの伸長開始末端にはヘテロ糖鎖が結合している)

IRX10組換えタンパク質生産→様々なオリゴ糖と酵素反応→
活性検出→構造モデリング を実施



- 構造: β -D-Xyl-(1 $\rightarrow$ 3)- α -L-Rha-(1 $\rightarrow$ 2)- α -D-GalA-(1 $\rightarrow$ 4)-D-Xyl
- 双子葉植物や裸子植物の キシランに共通して存在
- イネ科植物からは未同定

IRX10により、RES含有構造がプライミングアクセプターとして認識されるかを生化学的に検証する

キシラン還元末端はなぜ存在するか？ - 仮説と検証方法-

ギャップ1 / Gap1

プライマー仮説

Primer hypothesis

- *ix8*変異体でキシラン量が減少
(Persson et al. 2008)

1 RESの生合成



2 RESからキシラン鎖が伸長



RES含有構造がIRX10に対する
アクセプターとして認識される
かは未検証

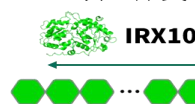
ギャップ2 / Gap2

ターミネーター仮説

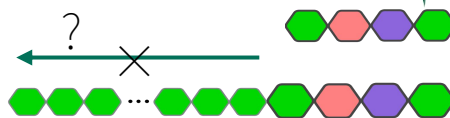
Terminator hypothesis

- *ix8*変異体ではキシラン鎖長が
延長・不均一化
(Penã et al. 2007)

1 キシラン鎖の伸長



2 RESによる伸長停止



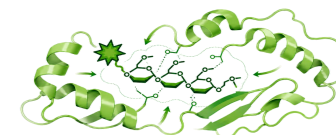
RES含有構造がIRX10
による伸長を阻害・終結させる
かは未説明

アプローチ / Approach

X-RESによる アクセプター認識解析

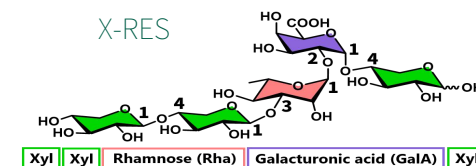
Acceptor recognition by IRX10
using X-RES

- 前章において、IRX10は蛍光
基を含むおよそ4残基を許容



- 末端Xyl₂を保持しつつ、還元
末端側にRES由来構造を持つ

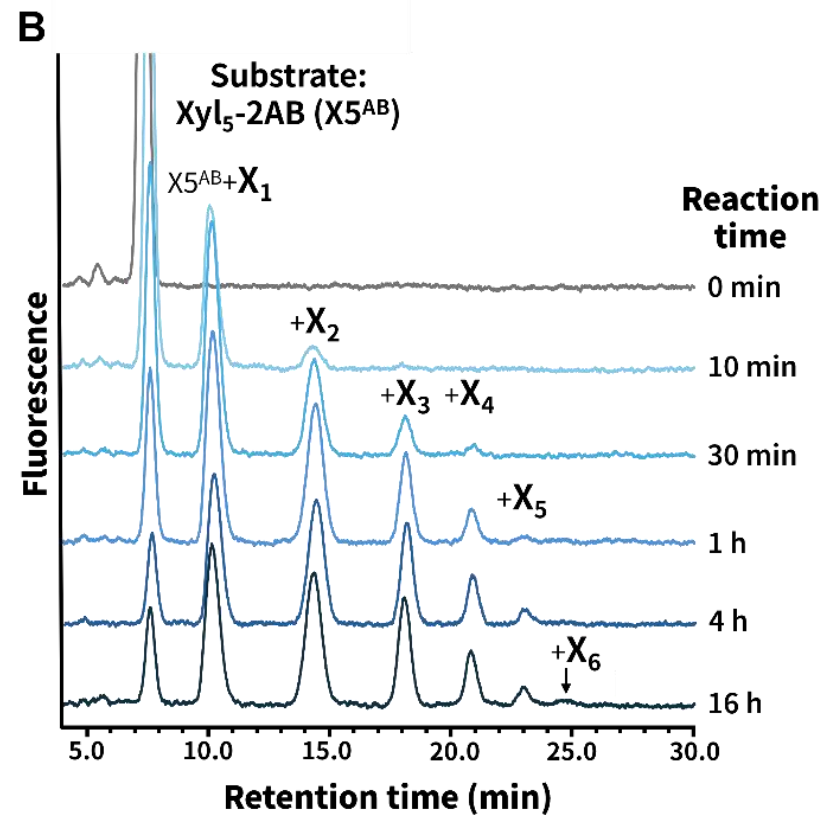
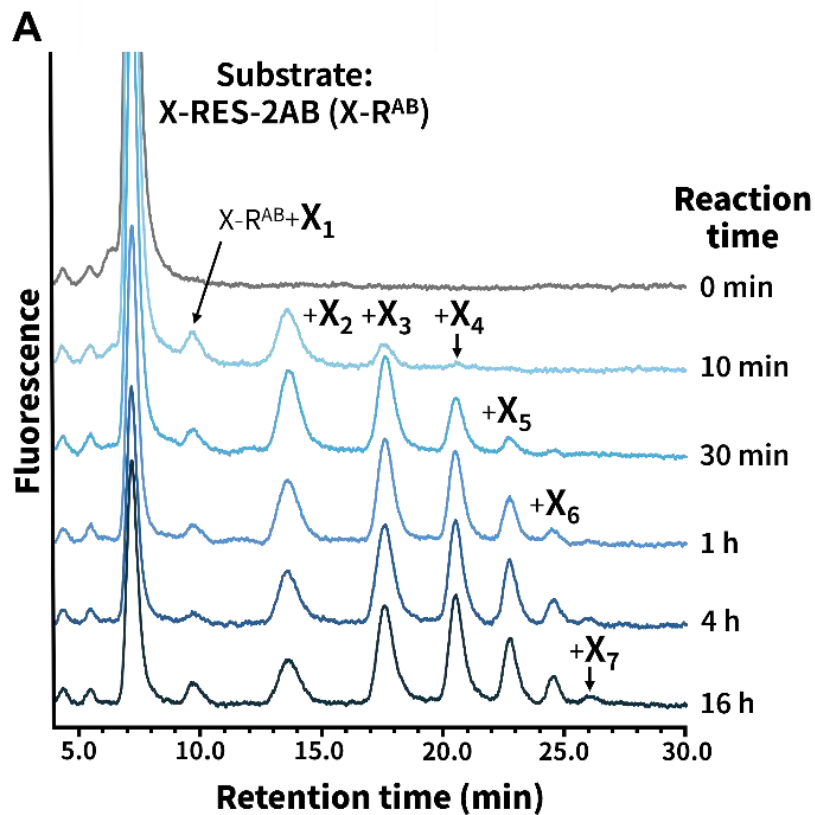
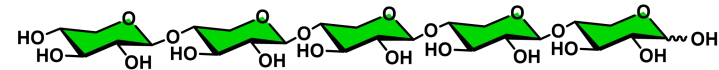
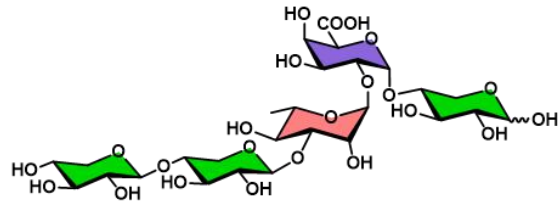
X-RES



RES含有構造がプライマー(プライミングアクセプター)として認識されるかを実証する

■ X-RESはXyl₅より+X1産物が蓄積せず、より長く伸長する

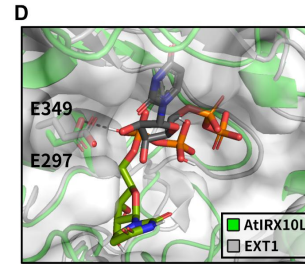
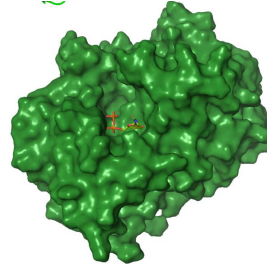
■ タイムコースによる伸長プロファイル比較



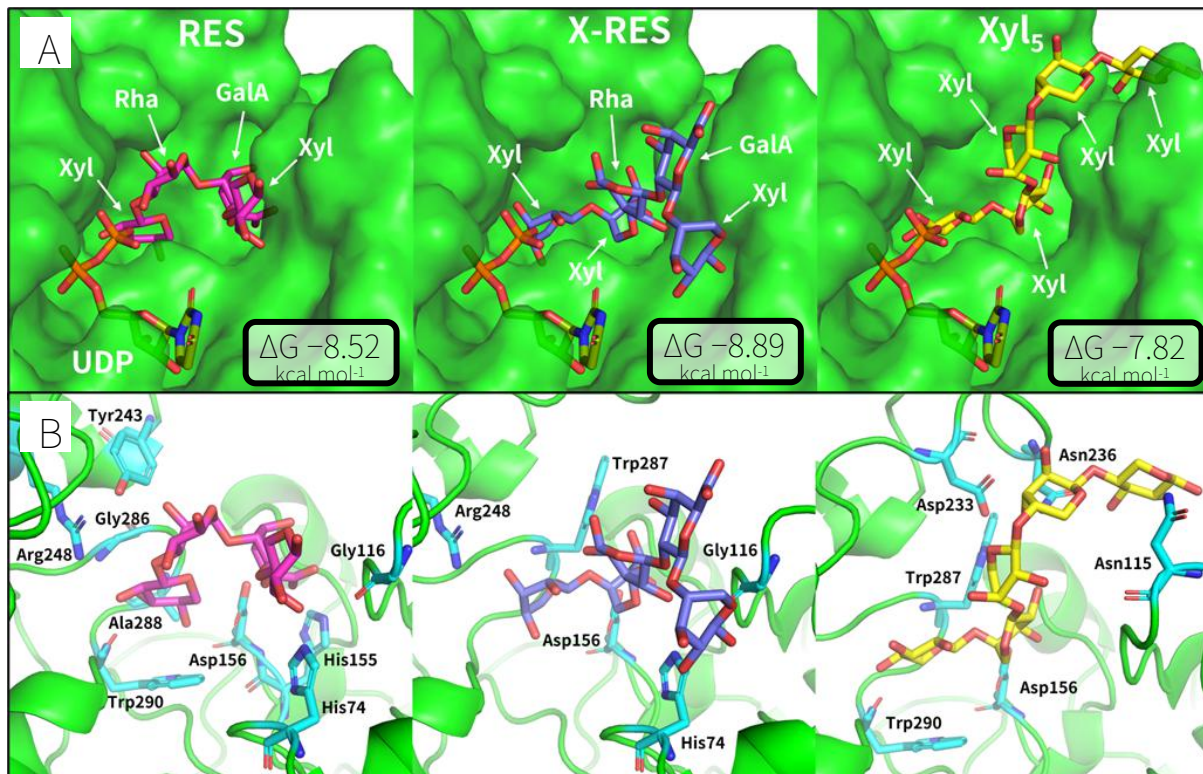
X-RESとXyl₅の伸長プロファイルの違いから、RES含有構造がIRX10の初期伸長に影響することを示唆

RES, X-RES, Xyl5も基質ポケットに安定的に認識されうる

3次元モデルの作成とUDPとのドッキング



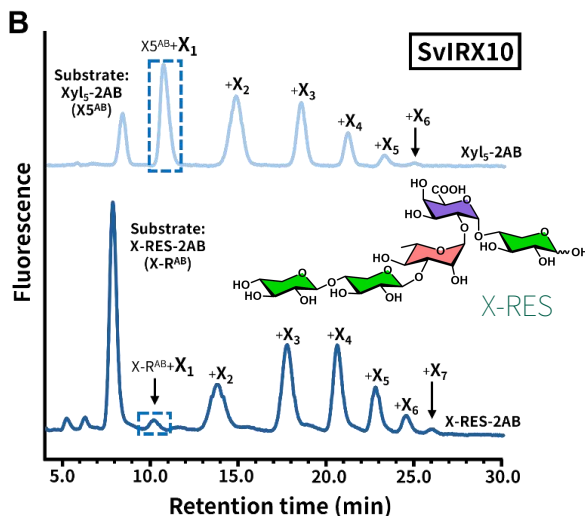
RES, X-RES, Xyl₅とのドッキング



RES含有アクセプターの認識と今後の展望

1 RESプライマー仮説

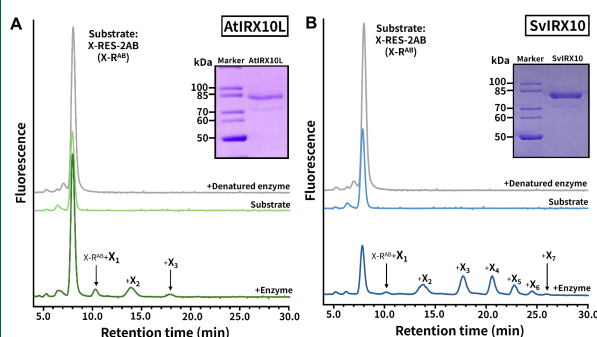
- ✓ X-RESはIRX10により伸長
- ✓ 伸長挙動は単なるキシロオリゴ糖と異なる
- ⇒ キシラン初期伸長にRES含有構造が影響を与える



RESプライマー仮説を
支持する生化学的証を提供

2 RESの生物学的意義

- ✓ 双子葉植物や裸子植物のキシラン還元末端には RESが存在
- ✓ イネ科キシランでは典型的なRESは検出されない

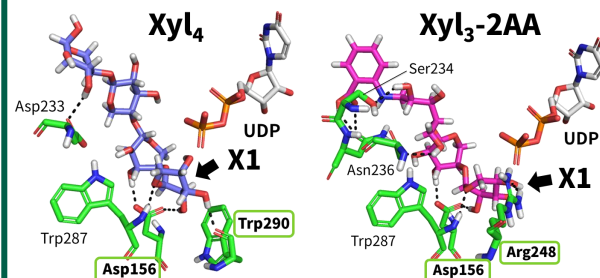


SviRX10がX-RESを伸長できることの意義

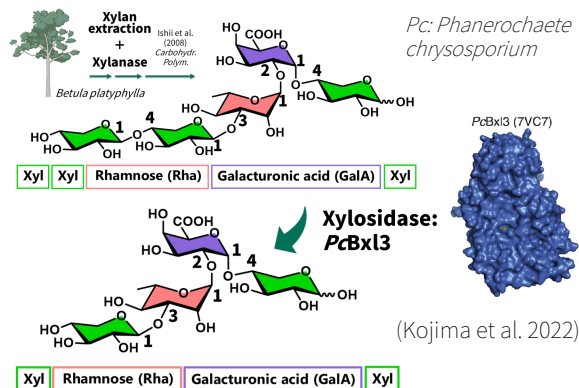
- ✓ イネ科植物が典型的なRESを利用することを示すわけではない
- ✓ 適切なXyl末端領域がRES関連構造に連結されていれば、IRX10の触媒機構で受容可能
- ⇒ IRX10はRES型構造に対する構造的適合性（柔軟性）を系統を超えて保存している

3 今後の展望

1. アクセプター認識に関わるアミノ酸の同定



2. RES単独プライマーによる活性検証



IRX10によるRES含有構造の認識は、キシラン生合成におけるプライミング機構の解明に向けた一歩

1. (アラビノ)キシランとは –構造と機能-
2. キシランの生合成 –当研究室の結果を中心に-
3. 竹プラスチックの紹介

竹プラスチック

岐阜県の地元企業と一緒に竹の粉が高配合（51%以上）されたプラスチックを開発しました

竹プラスチックについては、昨年（2025年）の12月7日の中日新聞岐阜版で取り上げられました。

ポリプロピレンに竹の粉が配合させています。竹の割合が51%でこの製品は「木製品」となります。半分だけでも脱炭素に貢献していると言えます。うろいろな企業さんから「これ、混ぜられませんか」という声をいただいています。このように、植物バイオマス形成の基礎研究だけではなく、利用を見据えた応用研究も進めています。

植物バイオマス形成の基礎研究だけでなく、植物バイオマス利用を見据えた応用研究も進めています

■ 謝辞 / Acknowledgements

本研究の遂行にあたり、以下の皆様に深く感謝申し上げます。

■ 共同研究・研究支援

- 鈴木 聖治 氏
- 山内 恒生 准教授
- 三上 文三 教授
- 石水 毅 教授
- 肥田 彰吾 氏
- 坂本 茉優 氏
- 戸田 陽己 氏
- 石井 忠 博士

✓ 研究材料・技術支援・助言をいただいた共同研究者の皆様

- 榊原 均 教授
- 木羽 隆敏 教授
- 小橋 芽生 氏
- 稲垣 瑞穂 准教授
- 海老原 章郎 教授
- 吉田 光毅 博士
- 光田 展隆 博士
- 坂本 真吾 博士
- 本田 諒 准教授
- Paul Dupree 教授

■ 研究支援

- 岐阜大学大学院 連合創薬医療情報研究科
- 岐阜大学 高等研究院 科学研究基盤センター
(機器分析分野/ゲノム研究分野)

■ 研究費助成

- 科研費 基盤研究C (23K05331)
- 東海国立大学機構 Make New Standards
- 岐阜大学大学院 連合農学研究科
- 岐阜県産業経済振興センター
- 岐阜県森林研究所
- 株式会社テクノプレニードヒダ