

安全な農畜水産物安定供給のための包括的レギュラトリーサイエンス研究推進委託事業

「黒糖の安全性をさらに向上するための研究」

令和4年度 最終年度報告書

課題番号	18063550
課題名	黒糖の安全性をさらに向上するための研究

研究実施期間	平成30年度～令和4年度（5年間）
代表機関	国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 基盤技術研究本部 高度分析研究センター
研究総括者	小野 裕嗣
研究総括者 連絡先	TEL : 029-838-8033 FAX : 029-838-7094 E-mail : ono@affrc.go.jp
共同研究機関	沖縄県農業研究センター 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構（九州沖縄農業研究センター、食品研究部門） 鹿児島県農業開発総合センター 鹿児島県大隈加工技術研究センター

＜別紙様式3＞最終年度報告書

1 研究目的

黒糖は、蔗汁を加熱濃縮して製造される含蜜糖の一種であり、製造工程の高温加熱によってアクリルアミドを生じる懸念があり、農水省の実態調査結果では、含蜜糖ならびに含蜜糖を原料とする菓子類の一部において比較的高濃度のアクリルアミドの検出が報告されている。アクリルアミド低減対策の基礎的知見として、製造工程の温度管理や食品添加物の利用が知られており、農水省の指針等に整理されているが、サトウキビの栽培から工場搬入までの管理の違いが蔗汁中のアクリルアミド前駆体及び蔗汁から製造される黒糖中のアクリルアミドに及ぼす影響や、生産された黒糖に残存するアクリルアミド前駆体から二次加工時に新たなアクリルアミドが生成する懸念については、先行研究がなく、本公募課題として設定されたこれらの知見の蓄積に取り組むことは喫緊の課題である。

このため、本研究では、

1. さとうきびの生産条件と蔗汁中のアクリルアミド前駆体濃度との関係の把握
2. 蔗汁等中のアクリルアミド前駆体濃度と黒糖中のアクリルアミド濃度等との関係の解明

により、さとうきびの生産条件と蔗汁中のアクリルアミド前駆体濃度に関する知見を4つ以上得るとともに、蔗汁等中のアクリルアミド前駆体濃度と黒糖中のアクリルアミド濃度等との関係について、3つ以上の知見を得ることを目標とする。

その結果、

1. 黒糖及び黒糖の二次加工品に含まれるアクリルアミド濃度を抑制し、安全性がさらに向上すること、
2. 海外展開を目指す黒糖生産・販売事業者にとっての不安要因を払拭すること、が期待される。

2 研究内容

(1) 研究課題

1) さとうきびの生産条件と蔗汁中のアクリルアミド前駆体濃度との関係の把握（小野

裕嗣・農研機構 基盤技術研究本部 高度分析研究センター）

黒糖産地の沖縄県、鹿児島県を構成メンバーに含むオールジャパンの体制により、さとうきびの品種等の栽培条件及び収穫から工場搬入までの管理の違いが、蔗汁中のアクリルアミド前駆体(還元糖及びアスパラギン)濃度に及ぼす影響を評価する。

(ア) 沖縄県の普及品種を中心とした栽培試験とサンプリング

糸満市内の試験圃場で品種、栽培条件、収穫方法等の明確なさとうきび試料を気象条件等の年次間差を含めて評価するため、複数年に渡りサンプリングする。

(イ) 鹿児島県の普及品種を中心とした栽培試験とサンプリング

種子島及び徳之島の試験圃場で品種、栽培条件、収穫方法等の明確なさとうきび試料を気象条件等の年次間差を含めて評価するため、複数年に渡りサンプリングする。

(ウ) アクリルアミド前駆体の分析

1) (ア)～(ウ)、2) (ア)～(エ)でサンプリング・調製した試料について、分光光度計を用いた酵素比色法によりブドウ糖と果糖を、また、全自動アミノ酸分析計あるいは酵素比色法等でアスパラギンを分析する。

2) 蔗汁等中のアクリルアミド前駆体濃度と黒糖中のアクリルアミド濃度等との関係の解明（小野 裕嗣・農研機構 基盤技術研究本部 高度分析研究センター）

蔗汁中のアクリルアミド前駆体等の濃度と、黒糖中のアクリルアミド濃度及びアクリルアミド前駆体濃度との関係を解明する。

また、黒糖中のアクリルアミド前駆体濃度と、加熱して溶かした黒糖中のアクリルアミド濃度との関係を解明する。

(ア) オープンパン方式のモデル装置による黒糖の試作

沖縄県農業研究センターが開発した黒糖試験製造装置を用いて、アクリルアミド前駆体濃度の異なるシラップから黒糖を試作する。試験に用いるシラップはBrix50～70%でアスパラギンと還元糖濃度が明確なものとし、同一シラップに還元糖とアスパラギンを段階添加するほか、バッチの違いにより還元糖とアスパラギンの濃度が種々に異なるものについて検討する。

(イ) 大規模含蜜糖工場における試料採取

沖縄県の含蜜糖工場から、製糖期間全体にわたって、原料蔗汁と黒糖をサンプリングする。

(ウ) 小規模含蜜糖工場における試料採取及び分析

鹿児島県の小規模含蜜糖工場から、原料蔗汁と黒糖をサンプリングするとともに、原料蔗汁中のアクリルアミド前駆体と黒糖中のアクリルアミドの関係、並びに原料・製造条件との関係を解明する。

(エ) 黒糖を用いた二次加工(黒糖の溶解等)試験

黒糖二次加工時の加熱温度、加熱時間、加水量等の製造条件を関係事業者から情報収集等を行い、試験条件を決定する。決定した条件でアクリルアミドとその前駆体濃度が明らかな黒糖を用いて溶解等の二次加工を行う。

(2) 達成目標

さとうきびの生産条件と蔗汁中のアクリルアミド前駆体濃度との関係を把握し、さとうきびの生産条件と蔗汁中のアクリルアミド前駆体濃度に関する知見を4つ以上得る。蔗汁等中のアクリルアミド前駆体濃度と黒糖中のアクリルアミド濃度等との関係を解明し、蔗汁等中のアクリルアミド前駆体濃度と黒糖中のアクリルアミド濃度等との関係について、3つ以上の知見を得る。さとうきびの栽培から黒糖工場搬入までの工程において、黒糖中のアクリルアミド濃度を低減するための管理点(改善点)を3つ以上提示する。

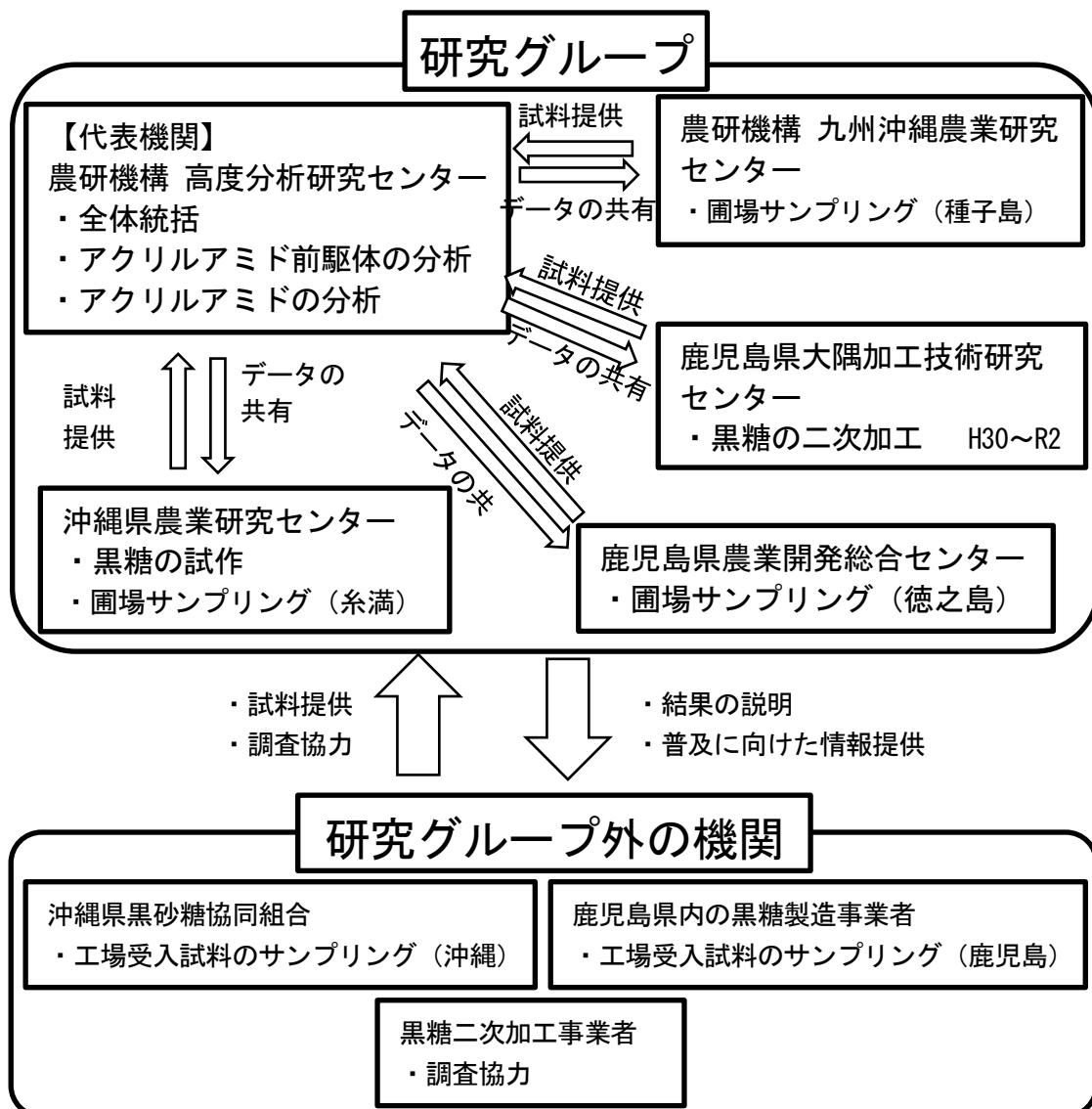
(3) 研究開発された成果の取扱い

行政部局と事業の進捗について情報共有を進めながら、行政部局の担当者と共に黒糖生産県の担当部署（沖縄県：農林水産部糖業農産課、鹿児島県：農政部農政課かごしまの食ブランド推進室）へ情報提供と意見交換を年1回以上実施する。また、現地の協力事業者（沖縄県：沖縄県黒砂糖協同組合、鹿児島県：小規模製糖工場、自治体など）に対して年1回以上の情報提供と意見交換を行う。また、圃場試験から得た還元糖とアスパラギンの濃度データについては、育種や栽培の研究者にとってアクリルアミド低減以外にも有用な情報であるため、積極的に公表を進める。アクリルアミド濃度を含むデータの公表については、本課題の協力事業者への十分な説明と了解を得た上で、黒糖生産県の担当部署と行政部局に相談しながら進めることとする。黒糖の加工段階の試験でアクリルアミドの低減に資する産業上有用な知見が得られた場合は、積極的に知財化を検討する。

(4) 年次計画

研究課題	研究年度				
	H 30	H 31	R 2	R 3	R 4
1. さとうきびの生産条件と蔗汁中のアクリルアミド前駆体濃度との関係の把握					
(1) 沖縄県の普及品種を中心とした栽培試験とサンプリング	←	沖縄での栽培試験と試料採取	→		
(2) 鹿児島県の普及品種を中心とした栽培試験とサンプリング	←	鹿児島での栽培試験と試料採取	→		
(3) アクリルアミド前駆体の分析	←	還元糖とアスパラギンの分析	→		
2. 蔗汁等中のアクリルアミド前駆体濃度と黒糖中のアクリルアミド濃度等との関係の解明					
(1) オープンパン方式のモデル装置による黒糖の試作	←	黒糖の試作	→		
(2) 大規模含蜜糖工場における試料採取	←	沖縄の現地工場での試料採取	→		
(3) 小規模含蜜糖工場における試料採取及び分析	←	鹿児島の現地工場での試料採取	→		
(4) 黒糖を用いた二次加工(黒糖の溶解等)試験	←	黒糖の二次加工試験	→		
(5) アクリルアミドの分析	←	アクリルアミドの分析	→		

(5) 研究体制



(6) 実施体制

研究項目	担当研究機関・研究室		研究担当者	エフォート (%)
	機関	研究室		
研究開発責任者	農研機構 高度分析研究センター	生理活性物質分析ユニット	◎小野 裕嗣	10
1. さとうきびの生産条件と蔗汁中のアクリルアミド前駆体濃度との関係の把握	農研機構 高度分析研究センター	生理活性物質分析ユニット	○小野 裕嗣	前出
(1) 沖縄県の普及品種を中心とした栽培試験とサンプリング	沖縄県農業研究センター	作物班	△伊禮 信(H30.4～H31.3) △内藤 孝(H31.4～) 比屋根 真一(H30.4～H31.3) 嘉数 耕哉(H31.4～R4.3) 儀間 靖(R4.4～) 大見 のり子 安仁屋 政竜(H30.4～H31.3) 島谷 真幸(H30.4～R3.3) 荷川取 佑記(R2.4～) 大城 晴海(R3.4～)	5 5 10 10 10 10 10 5 5 5 5 5
		農業システム開発班	前田 剛希(H30.4～R4.3) 崎間 浩(R4.4～) 土田 永渡(R2.4～) 仲間 絵理(R4.4～) 花ヶ崎 敬資(H30.4～R2.3) 恩田 聰(H30.4～H31.3)	10 10 10 10 10 3
(2) 鹿児島県の普及品種を中心とした栽培試験とサンプリング	農研機構 九州沖縄農業研究センター	畑作物・野菜栽培グループ	西場 洋一 石川 千秋(H30.4～R3.3)	10 10
		カシショ・サトウキビ育種グループ	樽本 祐助(R2.4～) △梅田 周 大久保めぐみ(R3.4～) 安達 克樹(H30.4～H31.3) 田村 泰章(H31.4～R4.3) 高橋 宙之(H31.4～R3.3)	5 10 5 5 5 5
	鹿児島県農業開発総合センター	徳之島支場 作物研究室	西原 悟(H30.4～R3.3) 黒木 栄一(H30.4～R4.3) 井上 健一(R2.4～) 佐藤 光徳(H30.4～R2.3) 末川 修(R3.4～)	5 5 5 5 5
(3) アクリルアミド前駆体の分析	農研機構 高度分析研究センター	生理活性物質分析ユニット	△小野 裕嗣 伊達 康博(R3.4～)	前出 10

	農研機構 食品研究部門	健康・感覚機能グループ	石川 千秋(R3. 4~)	10
2. 薫汁等中のアクリルアミド前駆体濃度と黒糖中のアクリルアミド濃度等との関係の解明	農研機構高度分析研究センター	生理活性物質分析ユニット	○小野 裕嗣	前出
(1) オープンパン方式のモデル装置による黒糖の試作	沖縄県農業研究センター	農業システム開発班	△前田 剛希(H30. 4~R4. 3) 崎間 浩(R4. 4~) 土田 永渡(R2. 4~) 仲間 絵理(R4. 4~) 花ヶ崎 敬資(H30. 4~R2. 3) 恩田 聰(H30. 4~H31. 3)	前出 前出 前出 前出 前出 前出 3
		作物班	比屋根 真一(H30. 4~H31. 3) 嘉数 耕哉(H31. 4~)	前出 前出
(2) 大規模含蜜糖工場における試料採取	農研機構 高度分析研究センター	生理活性物質分析ユニット	△小野 裕嗣	前出
(3) 小規模含蜜糖工場における試料採取及び分析	鹿児島県大隅加工技術研究センター		△河野 澄夫(H30. 4~R2. 3) 鮫島 陽人(H30. 4~H31. 3) 姫木芳春(H31. 4~R2. 3) 川添 幸治(H30. 4~H31. 3) 濱崎明博(H31. 4~R2. 3) 有村 恭平(R2. 4~R3. 3) 東瀬戸俊太郎(R2. 4~R3. 3) 新小田あづさ(H30. 4~R3. 3)	5 5 10 5 5 5 5 5 10
(4) 黒糖を用いた二次加工(黒糖の溶解等)試験	鹿児島県大隅加工技術研究センター		△與座 宏一(H30. 4~R2. 3) △下園 英俊(H30. 4~R3. 3) 八丸 珠恵(H30. 4~R3. 3) 鳴田 義一(H30. 4~H31. 3)	5 5 5 5
(5) アクリルアミドの分析	農研機構高度分析研究センター	生理活性物質分析ユニット	△小野 裕嗣	前出

(7) 各年度の研究費

平成30年度 8,934,001円
 令和1年度 8,167,160円
 令和2年度 6,300,648円
 令和3年度 6,175,990円
 令和4年度 5,682,000円

3 研究成果の概要

(1) 主な成果

1) 成果の内容

(i) さとうきびの生産条件と蔗汁中のアクリルアミド前駆体濃度に関する知見

- ・窒素肥料の施用量が増えると蔗汁中のアスパラギン濃度が増加することが明らかとなつた。
- ・栽培条件、収穫時期が同一の場合、品種・系統の違いが蔗汁中のアスパラギン濃度に影響することが明らかになった。
- ・蔗汁中のアスパラギン濃度とBrixに相関がないことが明らかとなった。
- ・蔗汁中のアスパラギン濃度は、製糖期間の12月から3月にかけて減少することが明らかになった。
- ・原料茎の上位節より下位節の蔗汁のアスパラギン濃度が高いことが明らかになった。
- ・原料茎を刈り置くことで蔗汁中のアスパラギン濃度が減少する。ただし、刈り置きの期間が長くなると糖度が下がり、還元糖濃度は増える。

(ii) 蔗汁等中のアクリルアミド前駆体濃度と黒糖中のアクリルアミド濃度等との関係に関する知見

- ・実験室における黒糖試作により、製造条件（加熱条件）が同じであれば、原料蔗汁中のアスパラギン濃度が高くなるほど黒糖中のアクリルアミド濃度は高くなることが明らかになった。
- ・蔗汁中のアスパラギン以外の還元糖やその他の成分の濃度変動は、製造した黒糖中のアクリルアミド濃度に影響しないことが明らかになった。
- ・製造工程が似通う3箇所の小規模工場において採取した原料蔗汁と製品黒糖の成分分析の結果は、いずれの工場においても原料蔗汁中のアスパラギン濃度が高い場合に黒糖中のアクリルアミド濃度が高い値を示した。
- ・大規模工場の搬入原料から得た蔗汁中のアスパラギン濃度は製糖期間の12月から4月にかけて徐々に減少し、製品中のアクリルアミド濃度も減少した。収穫時期による搬入原料中のアスパラギン濃度の変化が、製造時期による製品中のアクリルアミド濃度の変化に影響を与えていることを示唆した。

(iii) さとうきびの栽培から黒糖工場搬入までの工程において、黒糖中のアクリルアミド濃度を低減するための管理点(改善点)

- ・サトウキビ栽培時の施肥を標準的な施用量かそれ以下にとどめる。
- ・原料の下位節を除く。
- ・原料茎を刈り置く。

(iv) 黒糖の加熱溶解に生成するアクリルアミドに関する知見

- ・黒糖に水を加えて加熱溶解すると、新たにアクリルアミドが生成し、シロップの保温中にもアクリルアミド濃度が増加する。
- ・加熱溶解時の熱源出力を低くした上で、強く攪拌しながら溶解することで、加熱溶解時の新たなアクリルアミド生成を抑えることができる。
- ・シロップ保温時の温度を低くすることで、アクリルアミド生成を抑えることができる。

2) 成果の活用

本研究において、黒糖中のアクリルアミド濃度は、蔗汁中の還元糖よりもアスパラギンの濃度に依存していることが明確となった。そのため、工場に搬入される原料茎の段階でアスパラギン濃度を下げることが黒糖中のアクリルアミドの低減に有効である。本研究では、原料茎中のアスパラギン濃度の変動要因として、①品種、②収穫時期、③窒素施肥量、④収穫後の時間経過、⑤部位による違い、が明らかとなつたため、これらの知見を現場に周知して可能な範囲で活用することが望ましい。また、長期的には育種の段階で黒糖に仕向けられる育成系統について、蔗汁中のアスパラギン濃度が低いものを選抜し、想定する普及地域における適正施肥量の詳細な検討などを経て品種化することも考えられる。

アスパラギンは蔗汁中のアミノ酸の主要成分であるため、アスパラギンの低減はメイラード反応による黒糖の色調の淡色化や香りの変化に影響する可能性がある。本事業では、原料蔗汁中のアスパラギン濃度と黒糖の色や香り、硬さなどへの影響を検討していないが、上記の知見を黒糖生産に生かすことで、アクリルアミド以外の官能面での新たな特性を付与することができれば、黒糖品質の向上に繋がり、黒糖製造事業者に対してアクリルアミド低減に取り組むインセンティブを与えることが期待される。

一方、黒糖生産の設備や生産量が大きく異なる大規模工場と小規模工場では、販路において前者がBtoB、後者がBtoCを中心とする違いがあり、顧客が製品に求める品質が異なるため、上記知見の活用方法も異なるものと考えられる。例えば、大規模工場においては、大量生産の特徴を生かした大ロットの黒糖品質の安定化に資する知見として、原料生産段階の管理としての窒素施肥の低減や、産地における品種構成の入れ替えなどの参考とすることが考えられる。また、小規模工場においては、小ロット生産で高単価での販売が多いことから、部位の選別や減肥栽培など、量を減らして質を求める対策も可能と考えられる。小規模工場で収集した黒糖の中には、黒糖と言いながら色が非常に薄いものがあり、生産者にヒアリングしたところ、焦げ色のつかない品質を目指しているとのことであった。ポテトチップが馬鈴薯中のアクリルアミド前駆体の還元糖を減らすことで淡いチップカラーを目指すように、黒糖の品質としてメイラード反応を抑えた淡いカラーを目指す工場においては、本研究の知見は受け入れられやすいと考えられる。一方、メイラード反応で生成する色調や香気が強いことを品質で重視する場合は、極端なアスパラギンの低減は品質面への影響が大きくなるものと考えられる。工場ごとの目指す品質に對して許容可能な範囲となるよう、受容性に関して個別の検討が必要である。

(2) 各研究課題の成果

1) 小課題名：さとうきびの生産条件と蔗汁中のアクリルアミド前駆体濃度との関係の把握

(ア) 研究目標

さとうきびの品種等の栽培条件及び収穫から工場搬入までの管理の違いが、蔗汁中のアクリルアミド前駆体(還元糖及びアスパラギン)濃度に及ぼす影響を評価する。

(イ) 研究内容

沖縄県と鹿児島県の試験圃場から品種、栽培条件、収穫方法等の明確なさとうきび試料を集め、現地で搾汁した蔗汁を複数年に渡りサンプリングした。収集した蔗汁のアクリルアミド前駆体を全自動アミノ酸分析計や酵素比色法により定量した。小課題2と連携して、製糖工場で採取した蔗汁等についても分析を行った。

(ウ) 研究結果

① 蔗汁中のアスパラギン濃度とBrix等の育種選抜指標

蔗汁中のアスパラギン濃度とBrix値の相関は見られなかった（図 3-1-①-1、図 3-1-①-2）。育種選抜の過程ではBrix値が高いことを重要な選抜指標の一つとしているが、遺伝的に異なる多数の個体の集団について、図3-1-①-1と図3-1-①-2を比較すると、選抜試験の段階が進むことで集団全体のBrix値が高水準で安定し、品種間のばらつきが小さくなる一方、アスパラギン濃度の品種間のばらつきは変化しなかった。他の育種選抜指標（茎重、茎数、茎長など）ともアスパラギン濃度との明確な関係は見られなかった（データ不掲載）。

後述の小課題2の結果より、黒糖中のアクリルアミド低減には原料蔗汁中の前駆体のうち、アスパラギン濃度の低減が有効であることが明らかとなっている。サトウキビの育種において、アスパラギン濃度が低い系統を選抜しても、Brixを指標とするショ糖分の低下を引き起こさないのであれば、将来的に黒糖中のアクリルアミド低減対策に有効な品種の作出の可能性を示唆する結果と考えられる。

具体的なデータ

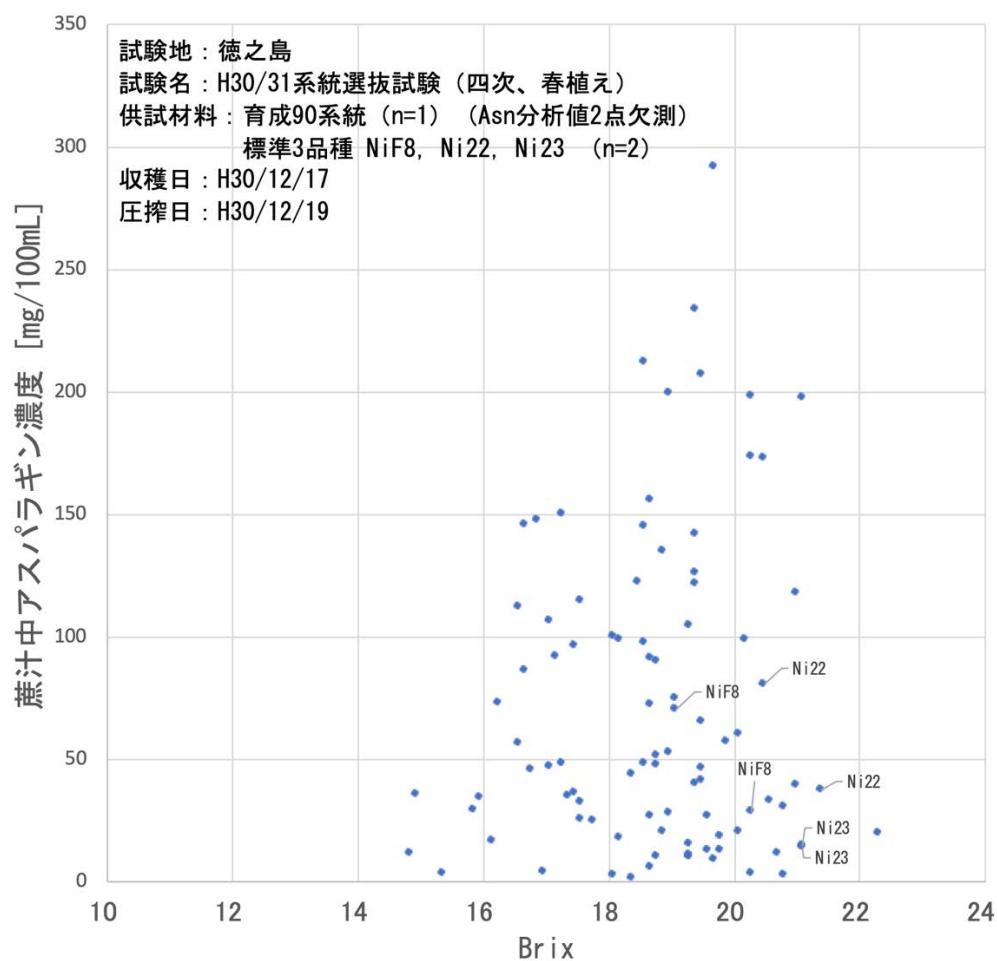


図 3-1-①-1 育成90系統と標準3品種の蔗汁のアスパラギン濃度とBrixの関係
(供試試料：系統選抜試験、試験地：徳之島、栽培型：春植え)。重要な選抜指標の一つであるBrixとアスパラギン濃度に相関は見られない。

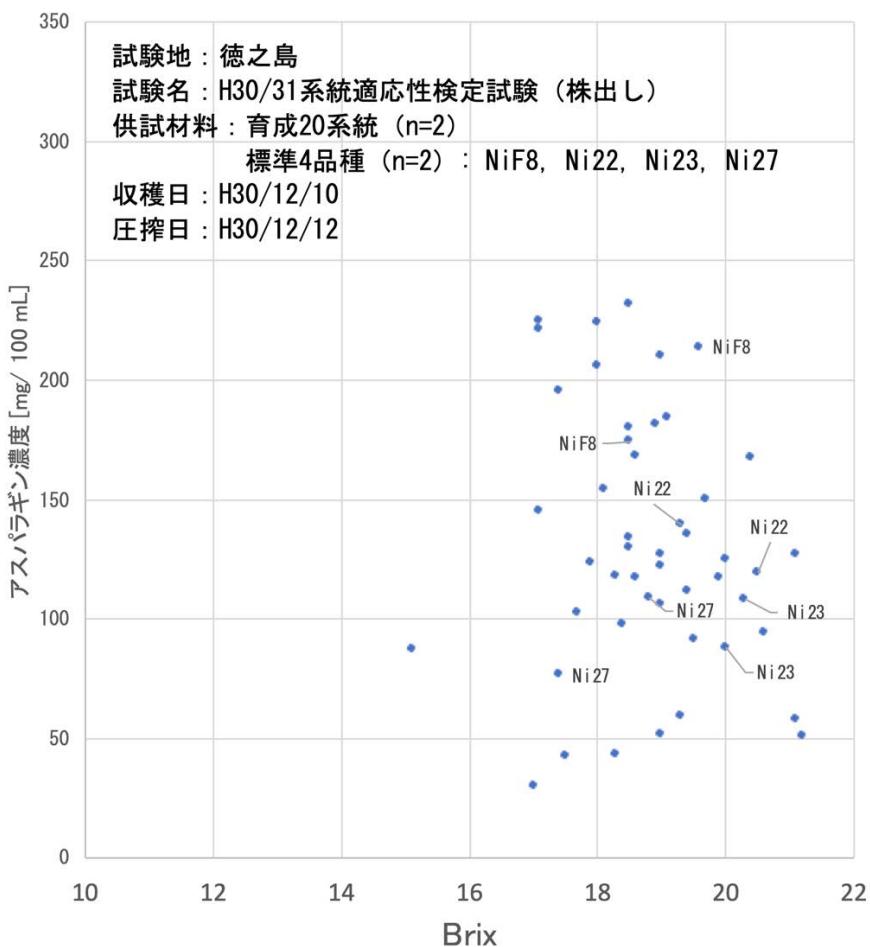


図 3-1-①-2 育成20系統と標準4品種の蔗汁のアスパラギン濃度とBrixの関係
(供試試料：系統適応性検定試験、試験地：徳之島、栽培型：株出し)。図3-1-1よりも選抜段階が進むことでBrix値が低い育成系統が淘汰されているが、重要な選抜指標の一つであるBrixとアスパラギン濃度に相関は見られない。

② 窒素施用量と蔗汁中のアスパラギン濃度

窒素施用量を変えた栽培試験区（春植え、夏植え）から得た蔗汁中のアスパラギン濃度は、窒素施用量が1.5～2倍の試験区で増加し、半量または無施肥の試験区で低下した¹⁾（図 3-1-②-1、図 3-1-②-2）。1回株出し栽培では、供試した農林27号、はるのとうぎ、農林8号の3品種のうち、後者2品種については、ばらつきが大きく单年度の結果からは影響は明確でなかった（図 3-1-②-3）。なお、収量については、窒素施用量を慣行量から増やすことで増加しなかったが、減肥により低下が見られた（データ不掲載）。

後述の小課題2の結果より、黒糖中のアクリルアミド低減には原料蔗汁中の前駆体のうち、アスパラギン濃度の低減が有効であることが明らかとなっていることから、窒素使用量を慣行量よりも増やさないこと、可能であれば減らすことが対策として有効であると考えられる。

具体的なデータ

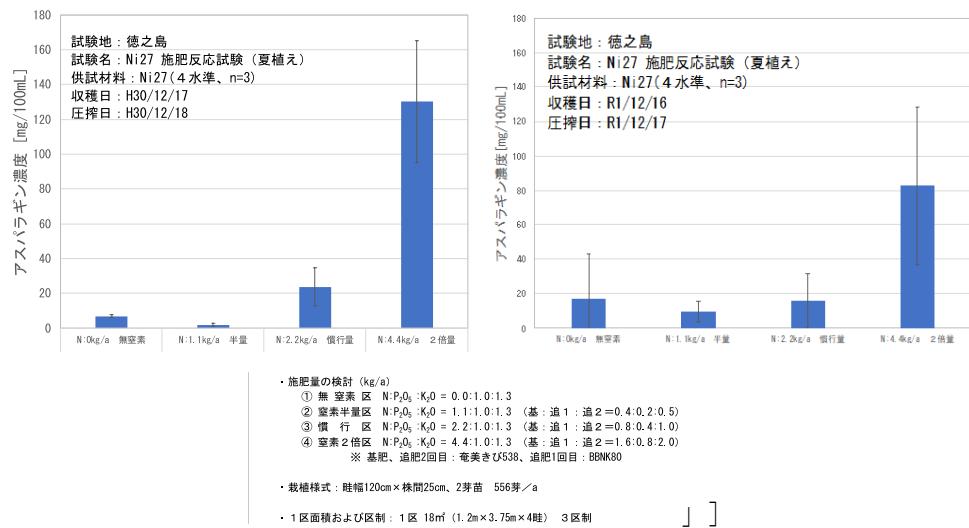


図 3-1-②-1 夏植え栽培で異なる窒素施用量で栽培されたサトウキビ搾汁中のアスパラギン濃度（供試試料：施肥反応試験、試験地：徳之島、品種：農林27号、栽培型：夏植え、左：H30年度、右：R1年度）。年次が異なっても高窒素施用区の蔗汁が高いアスパラギン濃度を示した。R1年度の無窒素区は3回復のうち検出下限未満 (< 1.5 mg/100 mL) を1点含む。

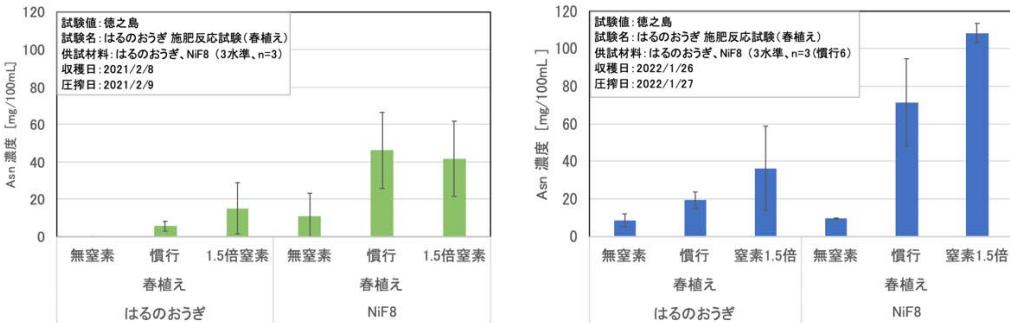


図 3-1-②-2 春植え栽培で異なる窒素施用量で栽培されたサトウキビ搾汁中のアスパラギン濃度（供試試料：施肥反応試験、試験地：徳之島、品種：はるのとうぎ／農林8号（NiF8）、左：R2年度、右：R3年度）。年次が異なっても高窒素施用区の蔗汁が高いアスパラギン濃度を示した。R2年度のはるのとうぎの無窒素区はすべて検出下限未満 (< 1.5 mg/100 mL) であった（0 mg/100 mLとして作図）。

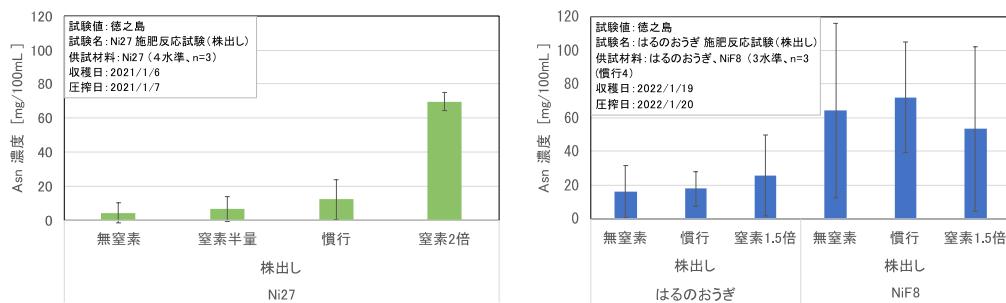


図 3-1-②-3 株出し栽培で異なる窒素施用量で栽培されたサトウキビ搾汁中のアスパラギン濃度（供試試料：施肥反応試験、試験地：徳之島、品種：農林27号、はるのとうぎ、農林8号、左：令和3年度、右：令和4年度）。

③ 収穫時期と蔗汁中のアスパラギン濃度

試験圃場（農林15号、糸満）で収穫時期が異なる蔗汁中のアスパラギン濃度は、10月から2月にかけて1/2～1/4に大幅に低下した。栽培型（夏植え、株出し、春植え）やかん水条件（かん水／無かん水）が異なっても同じ傾向を示した（図 3-1-③-1）。一方、同じ年次に異なる試験地と品種の組み合わせ（宮古島／農林8号、石垣島／農林8号）で実施した試験では、明確な傾向は見られなかった（図 3-1-③-2、図 3-1-③-3）。平成30年度で明確な傾向が認められた試験地（糸満）においても、異なる年次において試験区により明確な傾向が見られなかつた年もあった（データ不掲載）。

窒素施用量に対して蔗汁中のアスパラギン濃度が大きく影響を受けること（前述②）、本試験が畠全体の蔗茎を収穫せずに部分的なサンプリング（1反復あたり5～10本の蔗茎を搾汁）により実施していることを考慮すれば、圃場の施肥の不均一性などの要因が結果のばらつきを大きくしているものと考えられる。

大規模工場に12月から4月に搬入された原料サトウキビ（Ni15）の多数のロットについて、蔗汁中のアスパラギン濃度を調査したところ、ロット間の濃度のばらつきが非常に大きいが、収穫時期が遅くなるほど濃度が低下する結果が得られた。このことから、収穫時期が遅くなることは蔗汁中のアスパラギン濃度の低下に作用しているものと考えられる。

具体的なデータ

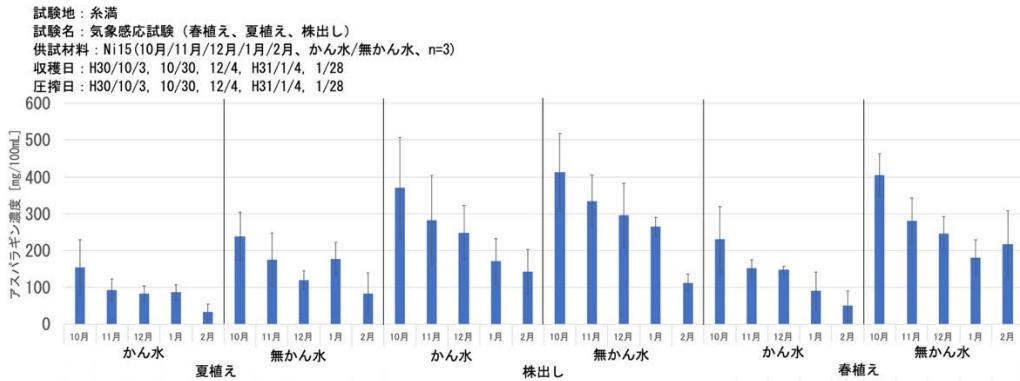


図 3-1-③-1 収穫時期が異なるサトウキビの搾汁中のアスパラギン濃度（供試試料：気象感応試験、試験地：糸満、品種：農林15号、栽培型：春植え、夏植え、株出し）。調査した10月以降において、蔗汁中のアスパラギン濃度は毎月低下し、製糖期（12月以降）に入ってからも低下傾向が続いている。

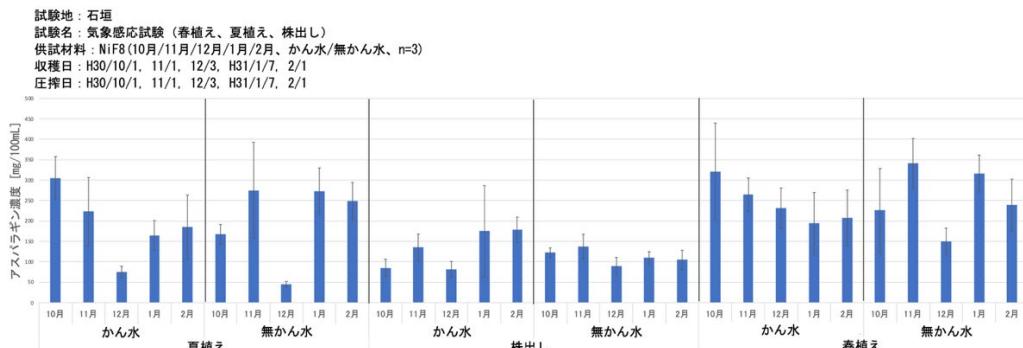
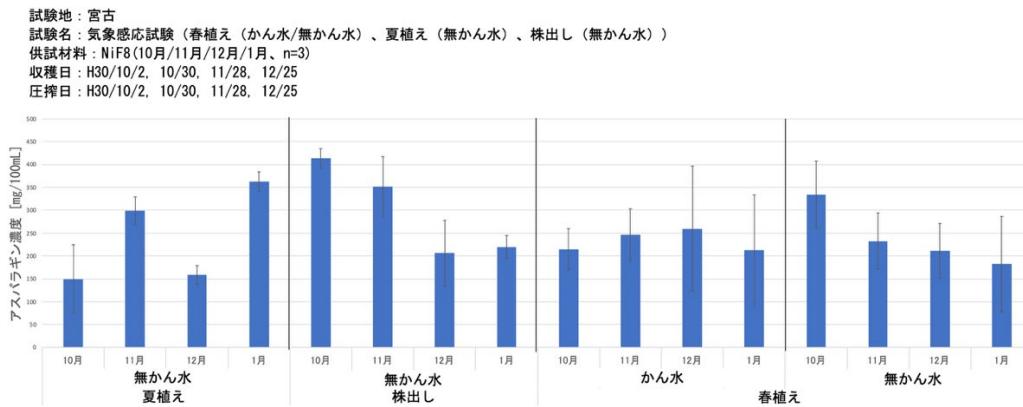


図 3-1-③-2 収穫時期が異なるサトウキビの搾汁中のアスパラギン濃度（供試試料：気象感応試験、試験地：宮古島（上段）、石垣島（下段）、品種：農林8号、栽培型：春植え、夏植え、株出し）

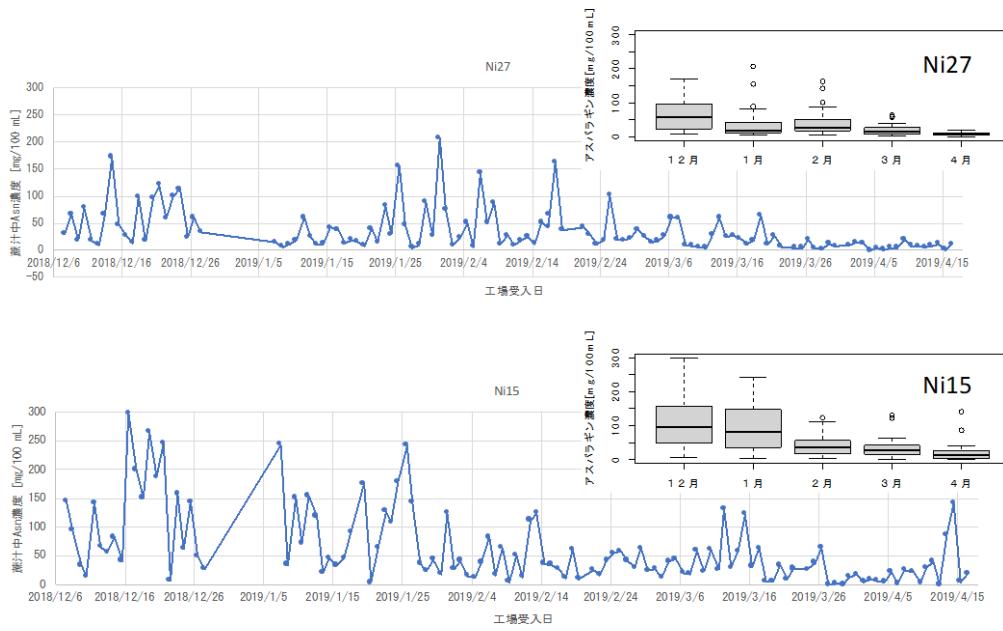


図 3-1-③-3 製糖工場に搬入された原料茎搾汁液中のアスパラギン濃度の推移
(期間: 2018/12/7~2019/4/16、サンプリング頻度: 搬入された品種毎に1点／日、品質取引のために搾汁された蔗汁を採取、A工場)。

④ 品種・系統の違いと蔗汁中のアスパラギン濃度

試験地（種子島）で同一の栽培・収穫条件で標準品種と育成中の系統について蔗汁中のアスパラギン濃度を比較すると、品種・系統により値が大きく異なっていた。栽培型（夏植え、株出し、春植え）が違っても品種・系統によるアクリルアミド濃度の傾向は変わらなかった（図 3-1-④-1、3-1-④-2）。一方、製糖工場に搬入された原料茎について蔗汁のアスパラギン濃度を調べたところ、同一品種でもロット内のばらつきが非常に大きいため、品種間の違いは明確でなかった。搬入点数の多かった農林15号と農林27号では、後者のアスパラギン濃度が有意に低かった（図 3-1-④-3）。

具体的なデータ

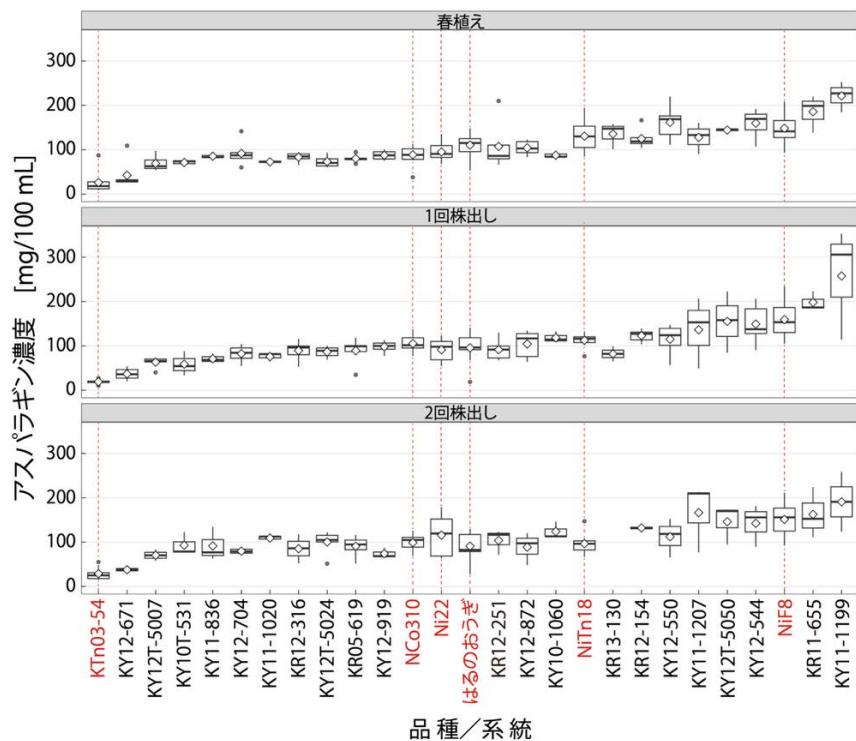


図 3-1-④-1 試験地(種子島)で栽培された標準6品種(赤字)と育成系統の栽培型別のアスパラギン濃度(2018~2020、n=6~15)。

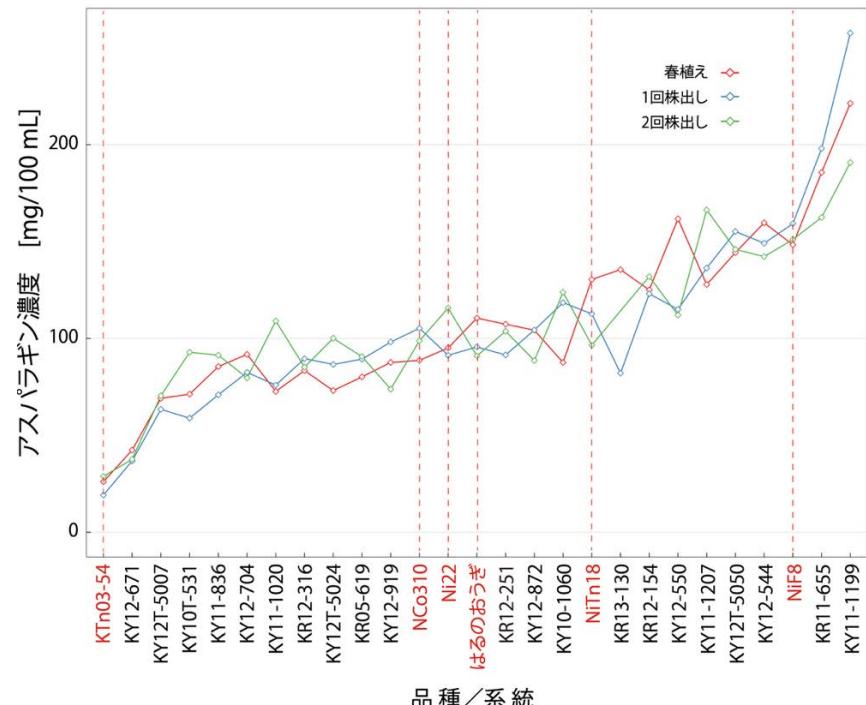


図 3-1-④-2 試験地(種子島)で栽培された標準6品種(赤字)と育成系統の栽培型別のアスパラギン濃度(2018~2020、n=6~15)。

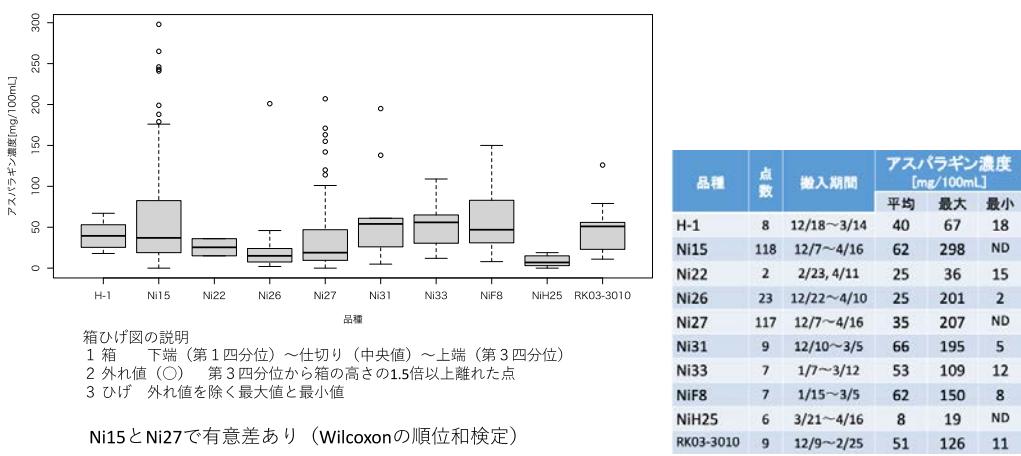


図 3-1-④-3 製糖工場に搬入された原料茎搾汁液中のアスパラギン濃度の製糖期全体における品種間の比較（期間：2018/12/7～2019/4/16、サンプリング頻度：搬入された品種毎に1点／日、品質取引のために搾汁された蔗汁を採取）。

⑤ 剪り取り後の時間経過とアスパラギン濃度の変化

農林15号、農林21号、農林27号の全茎（健全茎、障害茎）による刈り置き試験では、常温保管の4日目までではアスパラギン濃度に有意な変動は認められなかった（図3-1-⑤-1）。

ハーベスタ収穫された原料茎（農林8号、農林15号、RK06-6009、RK08-8009）を常温で保管し、翌日、4日、14日後に搾汁して比較すると、アスパラギン濃度は翌日に対して4日目で20～70%、14日目で80～90%程度減少した。冷蔵保管した原料茎も14日後に搾汁してアスパラギン濃度を調べたところ、常温保管品と同程度の水準に減少していた（図3-1-⑤-2）。ハーベスタ収穫原料は全茎に比べて短く裁断されているため、時間経過により傷みやすく還元糖の増加などの製糖に不利な成分変化が起こりやすいとされているが、アスパラギンについては、むしろ減少することが明らかとなった。

具体的なデータ

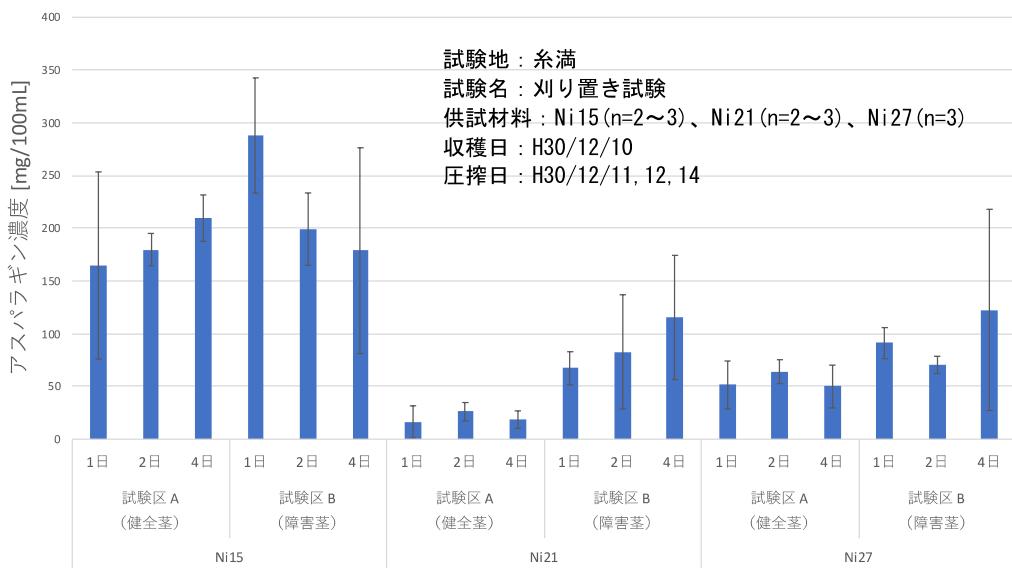
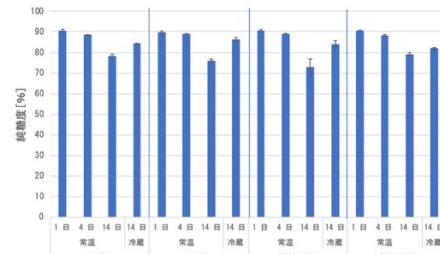
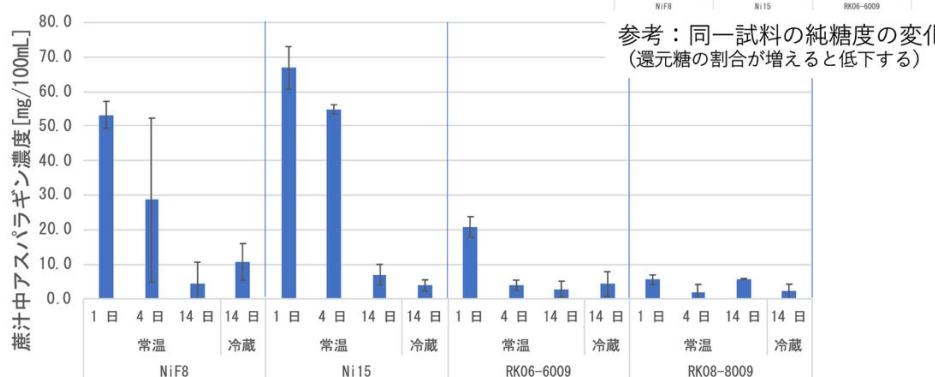


図 3-1-5-1 収穫から圧搾までの時間が経過したサトウキビの搾汁中のアスパラギン濃度（供試試料：刈り置き試験、試験地：糸満、品種：農林15号、農林21号、農林27号、収穫：手刈り（全茎））。刈り置き4日目までは傾向は認められない。

R1/R2 ハーベ스타収穫刈り置き試験（夏植え）

試験地：糸満
試験名：ハーベ스타収穫刈り置き試験（夏植え）
供試材料：NiF8, Ni15, RK076-6009, RK08-8009, n=2
収穫日：12/23
圧搾日：12/24（1日）、12/27（4日）、1/6（14日）



参考：同一試料の純糖度の変化
(還元糖の割合が増えると低下する)

図 3-1-5-2 収穫から圧搾までの時間が経過したサトウキビの搾汁中のアスパラギン濃度（供試試料：刈り置き試験、試験地：糸満、品種：農林8号、農林15号、農林27号、RK06-6009（参考：品種登録前の系統）、RK08-8009（参考：品種登録前の系統）、収穫：ハーベスタ（裁断茎））。

⑥ さとうきびの部位とアスパラギン濃度

原料茎（農林8号、農林22号、KTn03-54、はるのおうぎ、KRFo93-01（参考：飼料用品種））を梢頭部から下位節に分けて搾汁中のアスパラギン濃度を分析すると、梢頭部と下位節で濃度が著しく高かった。

梢頭部はショ糖分が少なく還元糖が多い上、得られる搾汁量もわずかであるため、製糖前に除去されるが、下位節は搾汁量が多くBrixも高いため、原料として用いられている部位である。アスパラギンを減らすために下位節を除くことは、原料歩留まり（収穫原料重量）に加え、ハーベスターや刈り倒しの作業性の低下が避けられないため、現実的な対応として難しいが、サトウキビの生産と黒糖加工を一貫して6次産業として行う小規模事業者において、品質面での差別化を目指して行うことは現場普及の可能性として考えられる。

具体的なデータ

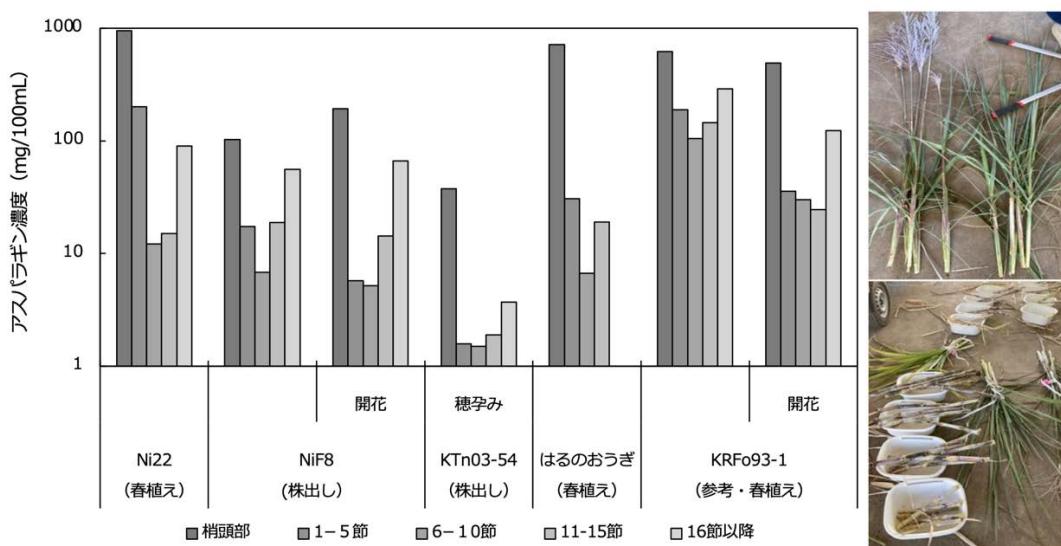


図 3-1-⑥-1 サトウキビの部位別搾汁液中のアスパラギン濃度（試験地：種子島）

⑦ 大規模製糖工場に搬入される原料のアスパラギン濃度

大規模工場では、1ロットが1～数トンのトラック単位で原料茎が搬入され、一部が抜き取られ、品質取引のために搾汁される。1工場に搬入されたある1日の全ロットについて、この搾汁液のアスパラギンを分析したところ、同一品種であっても、濃度に大きな違いが見られた（図 3-1-⑦-1）。トラックで搬入された原料は、ロット毎に生産圃場との紐付けできるが、品質取引の作業工程におけるロットからの抜き取りは1回である。そこで、別の工場で同一ロットから品質取引と同一手順で複数回のサンプリングをしてもらいアスパラギンを分析したところ、アスパラギン濃度に大きなばらつきが認められた（図 3-1-⑦-2）。品質取引の蔗汁から得たアスパラギン濃度から圃場単位の施肥等の生産条件の改善につなげるには、更なる検討が必要である。なお、反復分析におけるBrixの数値のばらつきは、アスパラギンに比べて非常に小さかった。

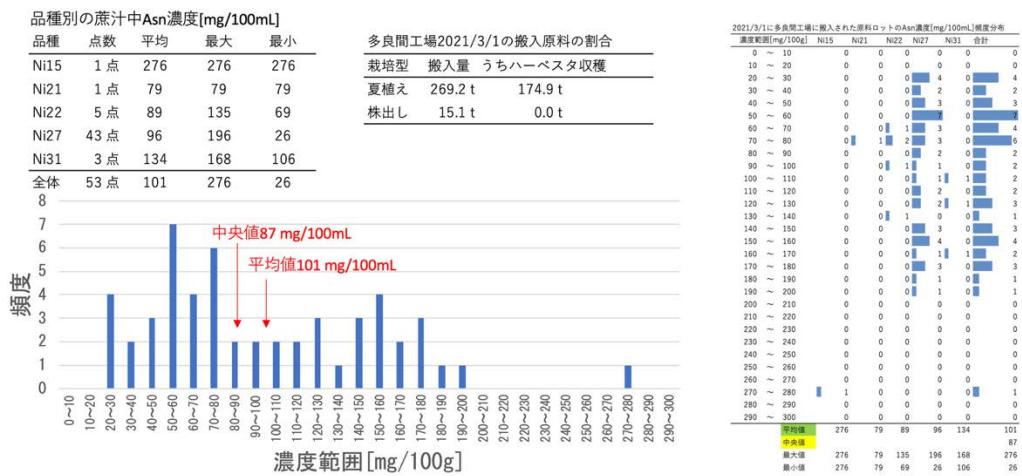


図 3-1-⑦-1 製糖工場に1日に搬入された原料茎の全ロット（53点）について搾汁液中のアスパラギン濃度の頻度分布（期間：2021/3/1、搬入されたトラック毎に品質取引のために搾汁された蔗汁を1点ずつ採取、B工場）。

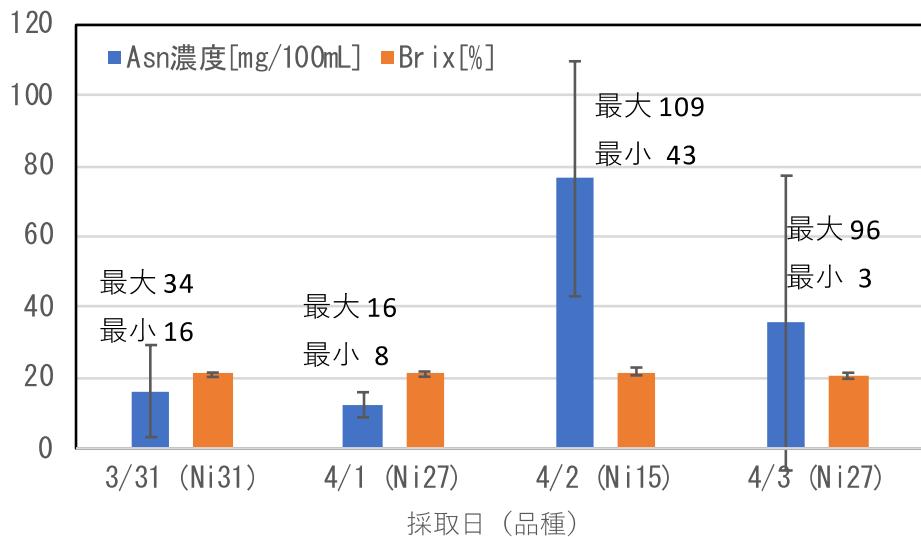


図 3-1-⑦-2 連続する4日間に製糖工場に搬入された4ロットの原料茎について、品質取引のサンプリング方により各4反復の蔗汁を得て分析したアスパラギン濃度とBrix。いずれも縦軸は左の数値。棒は平均値、エラーバーは標準偏差を示す。

⑧ NMRメタボロミクスとデータ駆動型解析手法の検討

NMR測定により、蔗汁中のアスパラギンや還元糖を含む多数の代謝物データを得るための蔗汁の前処理手法を開発した²⁾。また、農業形質とアスパラギン等の代謝物の関係についてデータ駆動型アプローチにより可視化することを検討した³⁾。種子島の試験圃場で栽培された27の品種系統（試料点数462点）について、試験地で育種選抜に用いられる指標（茎重、茎長、Brixなどの農業特性）に基づいて、階層的クラスタリングによる品種系統の群分けを行い、これらと紐づく蔗汁のアミノ酸分析データを解析したところ、群間の違いが認められた（図 3-1-⑧-1）。

具体的なデータ

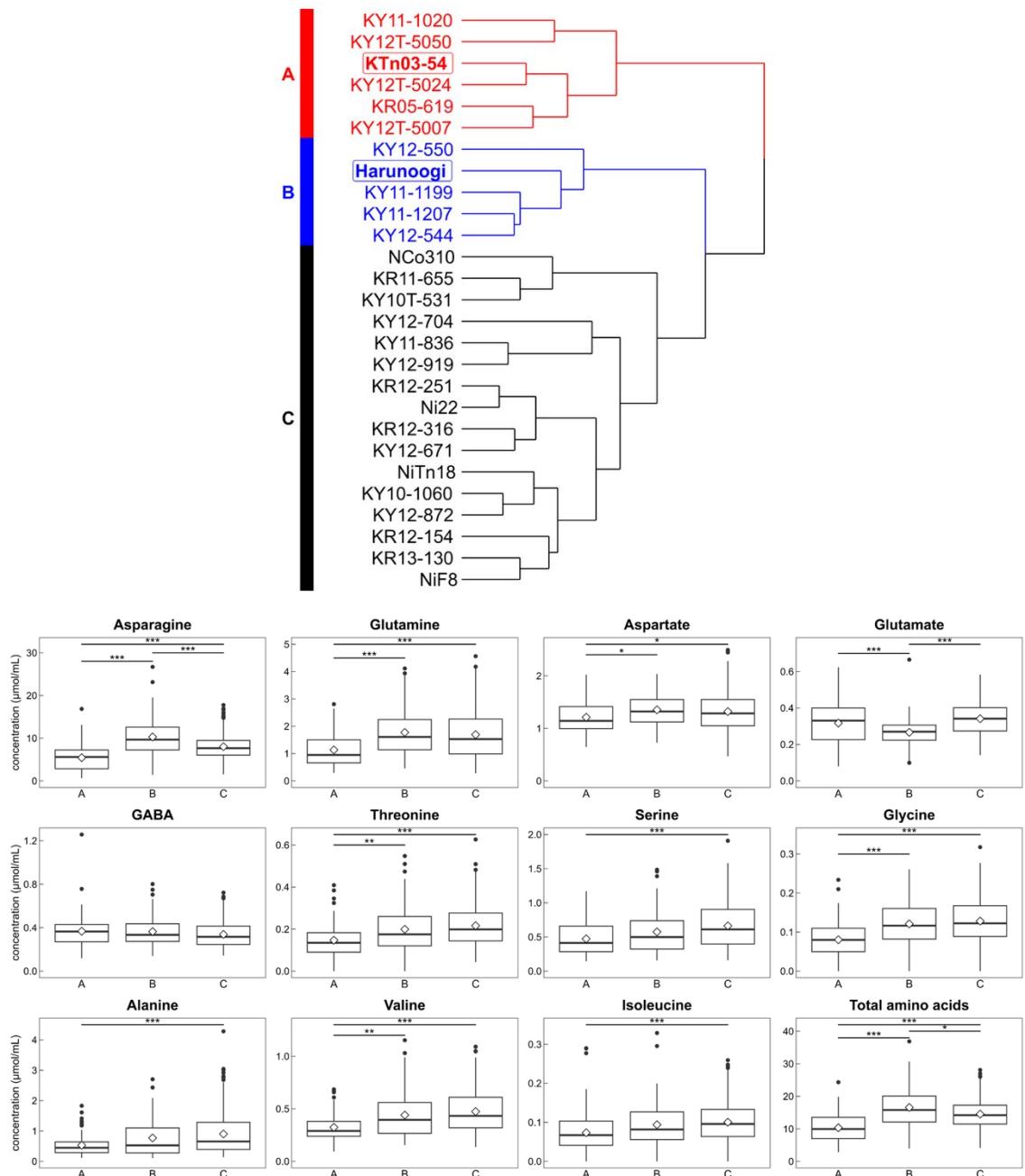


図 3-1-⑧-1 農業的特性に基づく階層的クラスタリングによる育成系統を含む品系集団の群分け（上）と、群間のアミノ酸含量の違い（下）。試料点数462点のうち、階層的クラスタリングには、欠測のない458点のデータを使用。

(エ) 研究成果の活用における留意点

品種・系統による蔗汁中のアスパラギン濃度の違いは、試験圃場で管理された条件での比較結果であり、生産圃場での検証結果が得られていないため、現時点では生産現場に特定の品種の利用を推奨するものではない。アスパラギンは植物体の窒素代謝と関係

する重要な代謝物であるため、品種と栽培体系の組み合わせに対して、窒素施用の最適化を図り、黒糖用に適した品種と栽培体系の特定と確立が期待される。

ハーベスタ収穫原料で1週間以上の刈り置きにより蔗汁中のアスパラギン濃度が下がることが見出されたが、純糖率は低下（還元糖が増加）する。還元糖の増加は黒糖製造時の結晶化阻害要因となり、製糖工程への悪影響も考えられるので注意が必要である。今回、手刈りの原料での長期保管試験は実施していないため、全茎での有効性については、別途検証が必要である。

農研機構、沖縄県、鹿児島県では現在も社会的なニーズに即したさとうきびの新品種の開発が進められている。地域ごとの普及品種がこれまで幾度となく置き換わってきたことから、現在の主要品種も将来的には新たな品種へと置き換わっていくものと考えられる。①では、育成系統の集団について、選抜指標の一つであるBrixとアスパラギンの関係を検討したが、実際の育種ではBrix以外にものさまざまな農業形質（病害抵抗性や普及地域における社会的要因等）が指標とされている。また加熱加工時のアクリルアミドの主要な生成経路はアスパラギンと還元糖を主要な反応物とするアミノカルボニル反応であるが、農産物中のその他の代謝物も反応場に共存して反応経路や反応速度に関わっている。⑧ではNMR測定により、蔗汁中のアスパラギンや還元糖を含む多数の代謝物データを得る手法を開発するとともに、農業形質とアスパラギン等の代謝物の関係についてデータ駆動型アプローチによる解析を検討した。本事業で得られた知見を将来さらに発展させ、データを継続的に取得・活用するためのツールとなることが期待される。

(才) 研究目標の達成に当たっての問題点

特になし。

<引用文献>

- 1) 石川、伊達、佐藤、井上、餅田、小野、徳之島で栽培されたサトウキビ搾汁液の窒素施肥量の違いによる代謝プロファイル変動、日本農芸化学会大会講演要旨集、**2025**, ROMBUNNO. 2D043
- 2) Date, Y. ; Ishikawa, C. ; Umeda, M. ; Tarumoto, Y. ; Okubo, M. ; Tamura, Y. ; Ono, H. Sugarcane Metabolome Compositional Stability in Pretreatment Processes for NMR Measurements. *Metabolites* **2022**, *12*, 862.
<https://doi.org/10.3390/metabolite1209086>
- 3) Ishikawa, C. ; Date, Y. ; Umeda, M. ; Tarumoto, Y. ; Okubo, M. ; Morimitsu, Y. ; Tamura, Y. ; Nishiba, Y. ; Ono, H. A Data-Driven Approach to Sugarcane Breeding Programs with Agronomic Characteristics and Amino Acid Constituent Profiling. *Metabolites* **2024**, *14*, 243.
<https://doi.org/10.3390/metabolite14040243>

2) 小課題名：蔗汁等中のアクリルアミド前駆体濃度と黒糖中のアクリルアミド濃度との関係の解明

(ア) 研究目標

蔗汁中のアクリルアミド前駆体等の濃度と、黒糖中のアクリルアミド濃度及びアクリルアミド前駆体濃度との関係を解明する。また、黒糖中のアクリルアミド前駆体濃度と、加熱して溶かした黒糖中のアクリルアミド濃度との関係を解明する。

(イ) 研究内容

原料蔗汁中の還元糖とアスパラギンのうち、どちらが黒糖中のアクリルアミド濃度に対し大きく影響を与えているかモデル実験から明らかにするとともに、工場で採取した試料の分析から検証する。黒糖に加水して加熱溶解する際のアクリルアミドの生成について明らかにする。

(ウ) 研究結果

① 蔗汁等中のアクリルアミド前駆体と黒糖中のアクリルアミド濃度

大規模製糖工場から高糖度シラップ（アクリルアミドが最も多く生成する仕上げ加熱工程直前の中间品）を入手し、アクリルアミド前駆体の添加の有無で黒糖製糖後のアクリルアミド濃度を比較した。アスパラギンを添加した場合、添加量が増えることで黒糖中のアクリルアミド濃度が増加した（図 3-2-①-1）。一方、還元糖を添加した場合は、黒糖加工後のアクリルアミド濃度に顕著な違いは認められなかった（図 3-2-①-2）。2つの結果の比較から、原料シラップ中の還元糖はアクリルアミド生成の当量に対して、過剰であり、黒糖中のアクリルアミド濃度は原料シラップ中のアスパラギン濃度の変動に対して追従することが明らかになった。

品種、栽培型、収穫時期等が異なる多数の蔗汁を用いて、人為的な添加を行わないでアスパラギン濃度が異なる多数のシラップから黒糖を試作したところ、黒糖中のアクリルアミド濃度と原料シラップ中のアスパラギン濃度が製造ロット毎に正の相関をもつことが確認された（図 3-2-①-3）。

具体的なデータ

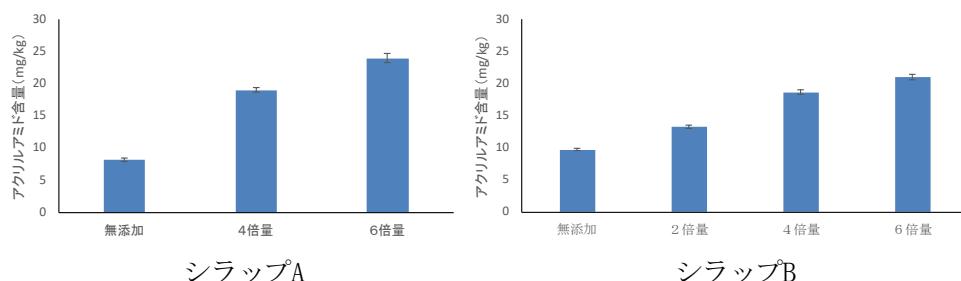


図 3-2-①-1 高糖度シラップにアスパラギンを段階添加して試作した黒糖中のアクリルアミド濃度。成分含量が異なる2ロットについて、元々含まれているアスパラギン濃度に対して2、4、6倍量を添加。
シラップA : Brix71.1、グルコース1200 mg/100g、フルクトース1720 mg/100g、アスパラギン176 mg/100g、アクリルアミド0.49 mg/kg
シラップB : Brix64.3、グルコース1010 mg/100g、フルクトース1150 mg/100g、アスパラギン169 mg/100g、アクリルアミド0.65mg/kg)

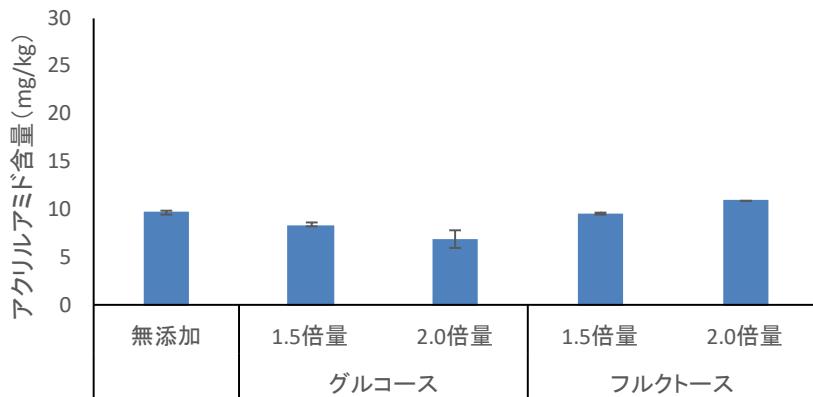


図 3-2-①-2 高糖度シラップ（図 3-2-①-1のシラップBを使用）に還元糖（グルコース、フルクトース）を段階添加して試作した黒糖中のアクリルアミド濃度。

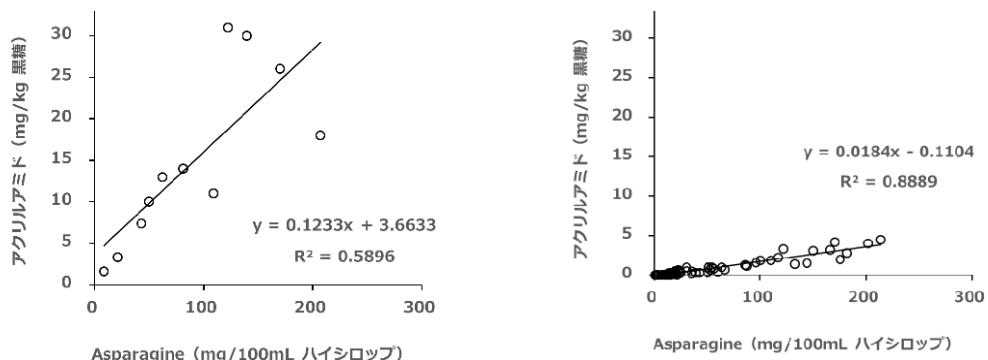


図 3-2-①-3 アスパラギン濃度が異なる多数のロットから製造した黒糖中のアクリルアミド濃度（左：沖縄農研本所（糸満）、右：沖縄農研石垣支所）。各々の製造地において、アスパラギン濃度とアクリルアミド濃度は正の相関であった。

② 小規模黒糖工場における原料蔗汁のアクリルアミド前駆体濃度と製品中のアクリルアミド濃度

小規模な黒糖工場3箇所から原料蔗汁と黒糖を現場採取し、アクリルアミド前駆体濃度と製品中のアクリルアミド濃度を分析したところ、アスパラギン濃度が高い蔗汁から製造された黒糖のアクリルアミド濃度が高かった一方、還元糖濃度の高低は相関しなかった（図 3-2-①-1）。

具体的なデータ

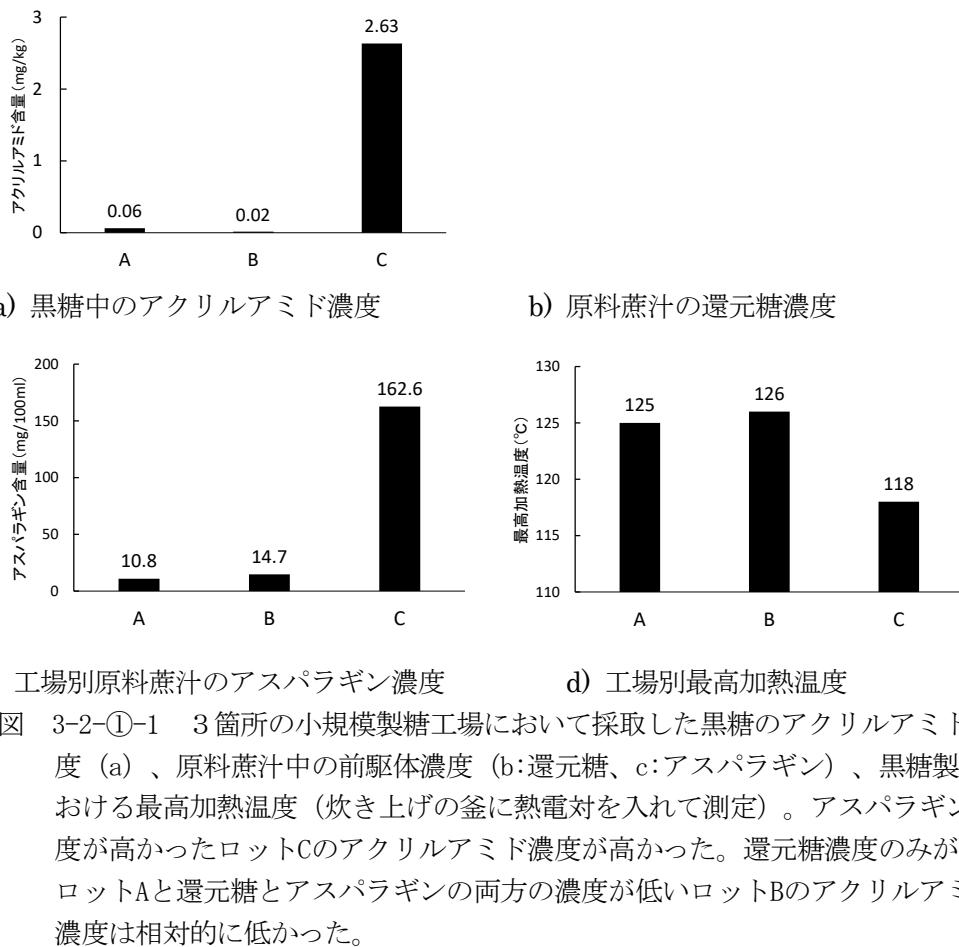


図 3-2-①-1 3箇所の小規模製糖工場において採取した黒糖のアクリルアミド濃度 (a)、原料蔗汁中の前駆体濃度 (b:還元糖、c:アスパラギン)、黒糖製造における最高加熱温度 (炊き上げの釜に熱電対を入れて測定)。アスパラギン濃度が高かったロットCのアクリルアミド濃度が高かった。還元糖濃度のみが高いロットAと還元糖とアスパラギンの両方の濃度が低いロットBのアクリルアミド濃度は相対的に低かった。

③ 大規模黒糖工場における製品中のアクリルアミド濃度

大規模工場で製造された黒糖（2箇所、1シーズン）を毎週サンプリングして、アクリルアミドを分析したところ、12月の製糖開始から4月の製造終了にかけて、アクリルアミド濃度が低下した。小課題1で明らかとなった製糖期間中の原料蔗汁中のアスパラギン濃度の低下により、製造された黒糖中のアクリルアミド濃度が低下したものと考えられた（図 3-2-③-1）。なお、青色のグラフで認められる製品中アクリルアミド濃度に約4週間の周期変動は、工場の記録と照らしあわせて検討したところ、洗缶周期と連動していたことが明らかとなった。協力事業者へ結果をフィードバックして、製造工程の改善の検討を促している。

具体的なデータ

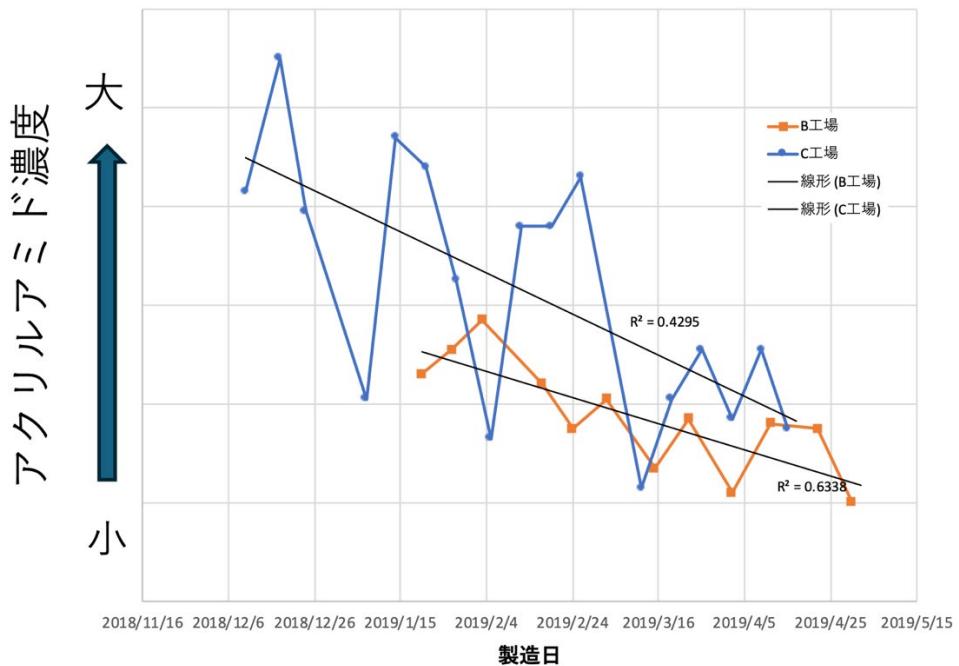


図 3-2-③-1 異なる製糖工場（2箇所）における製造直後の黒糖中アクリルアミド濃度。製糖期が進んで製造日が後ろになるほど濃度が減少している。短期的にみられる周期変動は工場の洗缶周期と連動しており、工程内の要因による変動とみられる。

④ 黒糖の加熱溶解時のアクリルアミドの生成と溶解条件の影響

黒糖に加水して加熱溶解するモデル実験を行なった結果、加熱溶解時にアクリルアミドが新たに生成することが明らかになった。さらに、アクリルアミドを低減する加熱条件を検討した結果、熱源の出力を低く、攪拌を強くすることで新たな生成を抑えられることを確認した（図 3-2-④-1）。また、加熱溶解後のシロップを保温することで、アクリルアミド濃度が増大することを確認し、品温が高いほど濃度の増加が速かつた（図 3-2-④-2）。

具体的なデータ

黒糖1kg、水0.5kgを仕込んでBrix70になるまで加熱攪拌。

原料黒糖アクリルアミド濃度：0.40 mg/kg

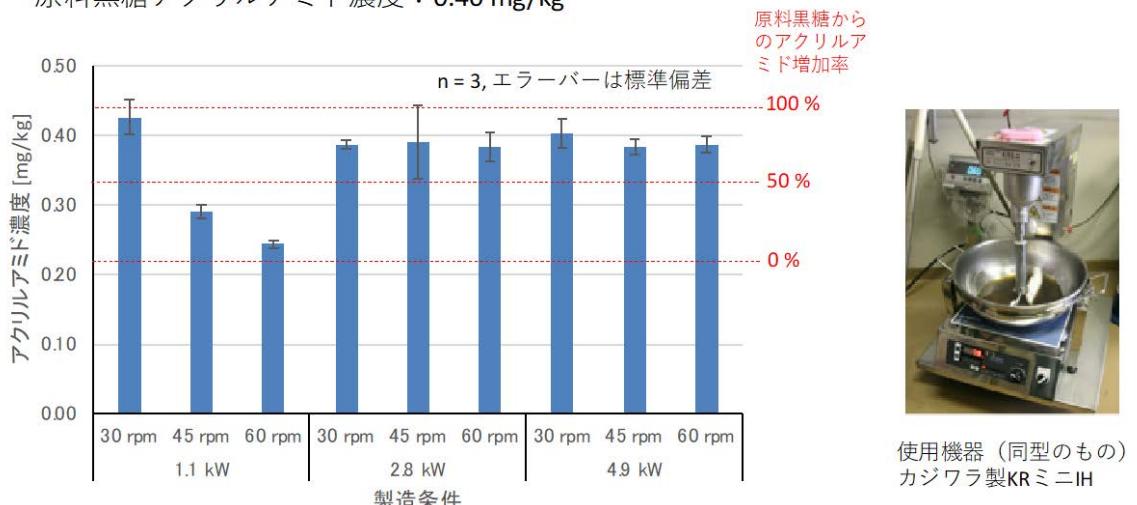


図 3-2-④-1 製造条件（熱源出力、攪拌速度）を変えて製造した黒糖シロップのアクリルアミド濃度。原料黒糖（アクリルアミド濃度：0.40 mg/kg）と水を加熱攪拌してBrix70のシロップを製造。

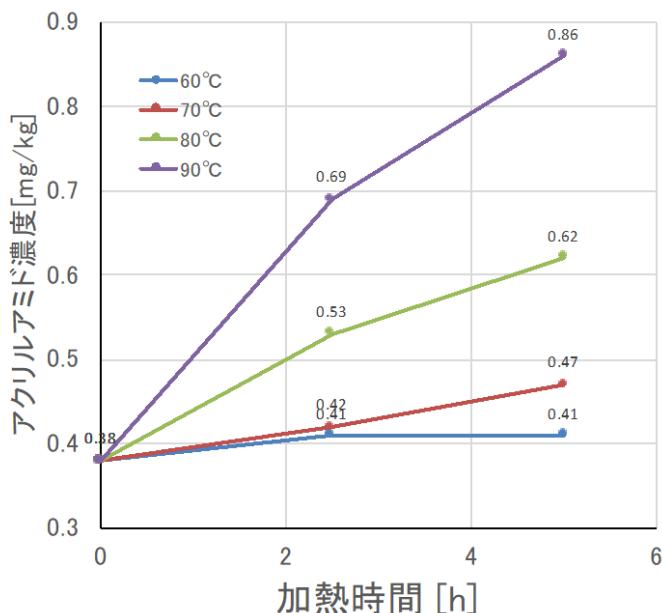


図 3-2-④-1 原料に黒糖を含むシロップを保温した際のアクリルアミド濃度の変化。加工黒糖製造事業者から提供を受けた加工黒糖の製造中間品のシロップ（粗糖、黒糖、糖蜜、水を80°C程度で煮溶かしたもの）を使用。

(エ) 研究成果の活用における留意点

黒糖や加工黒糖の製造時のアクリルアミド生成要因として原料中のアスパラギンの低減が有効であることを明らかにしたが、洗缶の頻度や溶解温度、シロップ保管時の加温温度など製造条件も大きく影響することが確認された。実験室だけでなく、1工場にお

ける製造条件も製造ラインの時々の状況により変動することが捉えられた。工場内の工程管理は本事業の検討範囲ではないが、原料段階のアスパラギン低減対策とセットで進めていく必要がある。黒糖の溶解時に生成するアクリルアミドは、熱源の出力を低く、攪拌を強くすることで抑えられることが明らかとなったが、同じ仕上がり（Brix）に到達するまでに必要な熱量は同一であるため、熱源出力に反比例して加熱時間が長くなる。そのため、現場への応用では実際の設備における低減効果の検証に加えて、工程に要する時間が長くなることへの考慮が必要である。

なお、アスパラギナーゼを用いてアスパラギンを低減した黒糖を大規模工場で製造する方法を農研機構が確立しており、黒糖の加熱溶解時のアクリルアミド生成が大幅に抑えられることが確認されている（引用文献）。この黒糖は現在、製品として流通していないが、沖縄県黒砂糖協同組合から数十キロ単位で評価用の試供品の提供と受注生産が可能となっているため、黒糖の二次加工において、工程の改善で十分な低減効果が得られない場合、原料の置換えが選択肢として検討可能である。

（才）研究目標の達成に当たっての問題点

黒糖中のアスパラギン濃度と加熱溶解時のアクリルアミド生成について、研究期間内に知見を得ることができなかった。

＜引用文献＞

- 1) アクリルアミド及びその生成源が低減された黒糖の製造方法、特許第6808257号、登録：令和2年12月11日、出願：令和2年5月2日

4 研究成果の発表

別添のとおり。

5 研究期間中に生じた問題、今後の課題等

研究期間中に生じた問題として、新型コロナの蔓延防止のため製糖工場が立地する離島との往来が困難となり、現地の協力が不可欠なサンプリングや研究で得られた知見を生かした新たな現地試験を計画・実施することができなくなったことがあげられるが、それ以外は研究は順調に推移し、多くの知見を得ることができた。

本プロジェクトでは、黒糖中のアクリルアミドの生成要因のうち、原料サトウキビの品質において、特にアスパラギン濃度のコントロールが重要であることを明らかとした。生産段階の対策として、収量への影響がでない範囲で、本研究で行った試験より細かな窒素施肥量の適正化（減肥化）を進めることができると考えられるが、産地や品種ごとにデータを集めた上で、個別の農家への普及方法にまで落とし込む必要があり、すでに普及している品種について改めて誰が主体となってこれらのデータを集めかが課題である。一方、育種の段階で黒糖に仕向けられる育成系統について、蔗汁中のアスパラギン濃度が低いものを選抜し、想定する普及地域における適正施肥量の検討などを経て品種化すれば、時間はかかるが通常の育種のスキームで進めることができる。小規模な黒糖製造事業者においては、製造した黒糖の販売単価が高く、さとうきびの生産も自ら行っているため、収量や歩留まりに拘らない原

料の選別や品種の選択が可能である。さまざまな対策を試すことができ、小回りが効く反面、業界団体がないことが課題である。個別の事業者への継続的な情報提供やフィードバックを地域行政が担うことが望ましいと考えられるが、小規模な黒糖製造事業者の多くは分蜜糖の生産地域に所在するため、生産したさとうきびの全量を分蜜糖工場が買い取れる状況にあることから、さとうきびの生産振興を理由とした黒糖事業者向けの積極的な対応が難しい状況ある。

工場内の製造工程におけるアクリルアミドの生成要因については、本プロジェクトのスコープではないが、現場データを取得する中で、製造工程を要因とする製品中のアクリルアミド濃度の変動が存在することも明らかとなった。製品品質の安定化にもつながるため、事業者における取り組みも引き続き必要と考えられた。

将来的に本プロジェクトの成果の普及や事業者の自主的な取り組みが進むことで、黒糖中のアクリルアミドは長期的には下がっていくことが期待されるが、黒糖中のアクリルアミド濃度は製造ロットごとに異なる上、貯蔵中に濃度が低下することが知られているため、対策や取り組みの効果を定量的に捉えるため、市場に流通するアクリルアミド濃度のモニタリング手法の確立も課題である。

一方、5年間の本プロジェクトで蓄積された分析試料は1万点近くあり、付帯する情報とともに活用するためのシステムや方法の検討も課題である。これについては、代表機関である農研機構が取り組んでいく予定である。