

# 蔗糖収率向上のための製糖技術の開発

## －蔗糖収率向上に向けた清浄工程の現状分析と技術的課題の抽出－

大谷武人\*, 安藤浩毅\*, 瀬戸口眞治\*\*

### Development of Sugar-Manufacturing Technology to Improve The Yield of Sucrose from *Saccharum Officinarum* -Analysis of Current Status about Cleansing Process and Suggestions for Improvement -

Taketo OTANI, Hiroki ANDO and Shinji SETOGUCHI

サトウキビを原料とする製糖工場の清浄工程における凝集剤の添加量および清浄度について詳細な分析を行い、蔗糖収率向上に向けた課題の抽出を行った。その結果、清浄工程のろ過工程でカルシウムイオン、リン酸イオンおよび乳酸、酢酸の濃度が上昇していることが分かった。また、ろ過工程で乳酸菌が増殖していることが確認され、このことから乳酸菌による清浄不良化の課題が見いだされた。さらに現状の石灰によるpH管理により、蔗糖の転化反応は起きていないが、石灰を過剰に添加しているという課題も示された。

**Keyword** : サトウキビ, 製糖工場, 蔗糖

## 1. 緒 言

サトウキビを生産している本県の離島（種子島、奄美大島、喜界島、徳之島、沖永良部島、与論島）では、製糖業が島の基幹産業となっている。粗糖（蔗糖の精製前の糖）を製造する企業は各島に1社、計6社存在しており、昭和38年の粗糖輸入自由化以降、海外産の輸入粗糖に頼ることのない、国内の甘味資源自給率向上と蔗糖収率向上に向けて各社、日々努力をしている。しかし、近年の自然災害や生産者の減少により、原料サトウキビの品質や生産量が安定せず、限られた原料から蔗糖を効率よく回収することが課題となっている。サトウキビを原料とする製糖工程は図1に示すように、サトウキビの圧搾、搾汁液の清浄、清浄液の濃縮、濃縮液から蔗糖の結晶化、分蜜の各工程からなっている<sup>1)</sup>。この中でも清浄工程は、不純物除去が蔗糖収率に大きく関わるため、最も重要な工程である。搾汁液の清浄工程では、石灰乳および凝集剤による凝集沈殿反応で清浄化が行われ<sup>1)</sup>、凝集剤は食品利用の観点から、化学合成品に代わり現在は天然高分子のキトサンが使用されている。しかしながら、製糖におけるキトサンの凝集効果に関する知見が少ないと同時に、搾汁液中の成分と物性が明らかにならないまま、現場の経験則により運転管理が行われてきた。凝集剤を変更した頃から、清浄工程で凝集沈殿不良などの不具合発生が多く見られるようになり、蔗糖収率の低下が問題となっており（H19に12.6%であったものが、H29で10.7%と10年間で約2%低下している。）、日本甘蔗糖工業会工務委員会より技術的協力の要望があった。

本報告では蔗糖収率の減少分を引き上げることが目標とし、製糖工程における清浄化の現状を調査した結果を報告する。

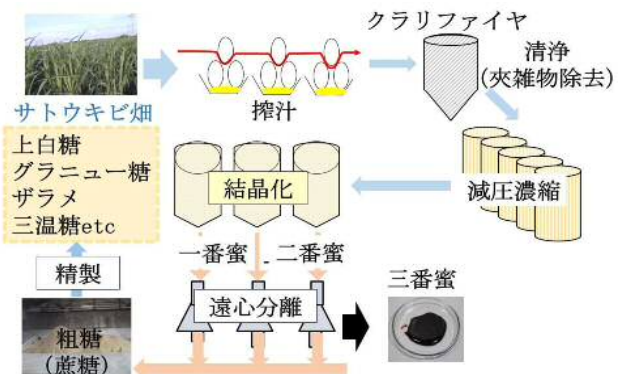


図1 サトウキビ製糖工程

## 2. 実験方法

製糖工程の各工程およびサンプリングポイントを図2に示す。畑で刈られた原料サトウキビは圧搾後、①混合汁タンクに入り、②ジュースヒーター（以下、JH）で98～105℃まで加熱される。加熱された搾汁液に石灰乳および凝集補助剤のキトサンを添加し、攪拌後に③クラリファイヤで不純物（タンパクやミネラルなど）を凝集沈殿によって除去する。不純物を除去した後の上清を④清浄汁として回収し、マッド（沈殿物）はサトウキビバガスと混ぜた後、残存していると考えられる糖分を回収するために⑤オリバーフィルターでろ過し、再度①混合汁タンクに投入する。

\*食品・化学部

\*\*企画支援部（現 副所長）

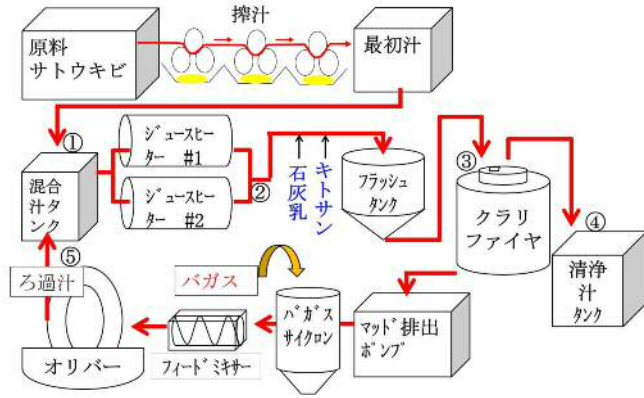


図2 最初汁からの清浄工程およびサンプリング箇所<sup>1)</sup>

### 2. 1 サトウキビ搾汁液の成分分析

図2に示すクラリファイヤにて沈殿不良が発生した時のサトウキビ搾汁液は、鹿児島県内離島の比較的大規模な製糖工場2社3工場より提供された。サトウキビ搾汁液に含まれる各成分の変化傾向を調べるため、提供された清浄工程のサトウキビ搾汁液を適当な希釈倍率により希釈し、0.45μmのフィルターでろ過し、分析サンプルとした。糖濃度および陽イオン、陰イオン濃度は既報<sup>2)</sup>に基づき糖類分析システム、イオンクロマトグラフにより測定した。また、有機酸濃度は有機酸分析装置（日本分光(株)製、カラムShodex RSpak KC-811）を用いて測定した。

### 2. 2 清浄工程での微生物試験

微生物試験におけるサンプル（図2に示す⑤の前後から採取）は製糖工場4社5工場より提供された。濾過工程前後からサンプル液を回収し、適宜希釈したものを鶏木らの方法<sup>3)</sup>に従い培養し、生育したコロニー数を計測した。

### 2. 3 凝集剤（キトサン、石灰乳）添加量の検討

工場より提供された②JH出口のサトウキビ搾汁液を用いて、製糖工場で凝集沈殿の指標として利用されているシリンドラー試験法<sup>4)</sup>によって凝集剤（キトサンおよび石灰乳）の添加量を調べた。サトウキビ搾汁液50mLを煮沸した後に800ppm（90℃付近での溶解度上限）に調製した凝集剤を所定量添加し、直ちに50mLのメスシリンダーに移し、30分間凝集の様子を観察するとともに、30分後のマッドの高さを計測した。なお、添加した凝集剤量は加熱による水の蒸発分を考慮せず添加した。

### 2. 5 pHによる蔗糖の転化反応確認試験

10%酢酸を用いてpHを4～7に調整した蔗糖溶液（図2③に示す清浄工程の加熱部分と同程度の糖濃度8%に調整）を三角フラスコに入れた後、沸騰浴で2時間半加熱し、流水により冷却したものを糖分析サンプルとした。

## 3. 結果および考察

### 3. 1 サトウキビ搾汁液の成分分析

本結果に示す図3～14に関しては、各工場ごとの比較で

はなく、清浄工程における各成分の変化傾向を調査したものである。また①混合汁～④清浄汁までは一連の工程の流れであるが、⑤ろ過汁の工程は④清浄汁の液が移動した工程ではないため、図中では線で結ばず表記している。

#### 3. 1. 1 糖濃度

糖類の分析結果を図3～5に示す。図3に示されるように、①混合汁タンク中の蔗糖（以下、Suc）濃度は、3工場すべてにおいて8～9%であり、その後の工程で多少の濃度増減はあるものの、これらは誤差と考えられる。また、ブドウ糖（以下、Glc）および果糖（以下、Fru）の濃度変

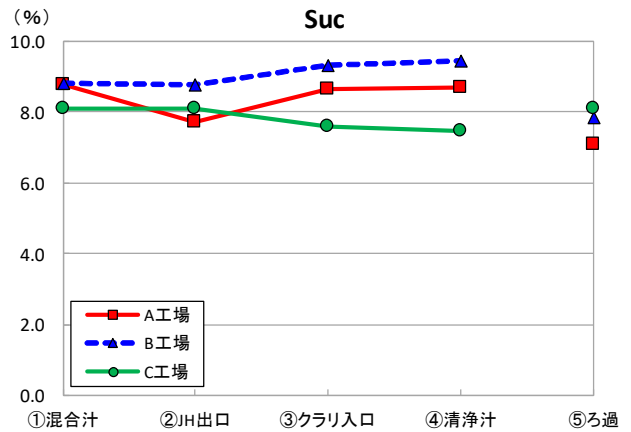


図3 清浄工程におけるSuc濃度の変化

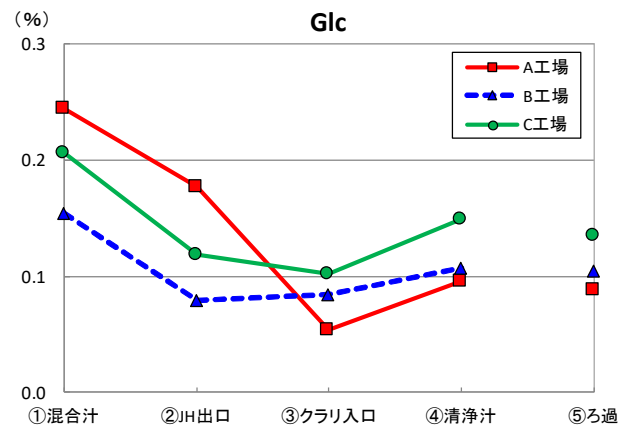


図4 清浄工程におけるGlc濃度の変化

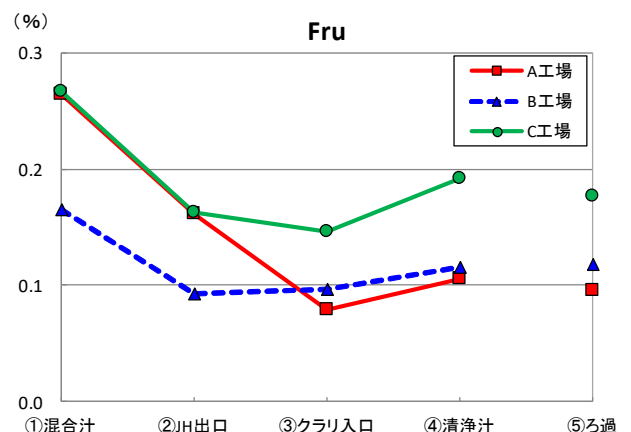


図5 清浄工程におけるFru濃度の変化

化についてはいずれも同様の挙動を示し、搾汁液を加熱する②JH出口ならびに③クラリ入り口の工程にて濃度が下がっていた。これはサトウキビ内のアミノ酸とこれらの糖が加熱で結合するメイラード反応によるものと考えられる。

### 3. 1. 2 イオン濃度

イオン濃度は、陽イオンとしてナトリウム (以下,  $\text{Na}^+$ )、カリウム (以下,  $\text{K}^+$ )、カルシウム (以下,  $\text{Ca}^{2+}$ )、マグネシウム (以下,  $\text{Mg}^{2+}$ ) の4成分を、陰イオンとして、塩化物イオン (以下,  $\text{Cl}^-$ )、硫酸イオン (以下,  $\text{SO}_4^{2-}$ )、リン酸イオン (以下,  $\text{PO}_4^{3-}$ ) の3成分を測定した。

陽イオンの分析結果を図6～9に示す。これらの結果から、 $\text{Na}^+$ および $\text{Mg}^{2+}$ は清浄工程の中で0.005～0.03%の間で濃度が推移し(図6, 図7),  $\text{K}^+$ については0.1～0.25%の間で推移していた(図8)。しかし $\text{Ca}^{2+}$ は、①～④の工程では0.007～0.024%の範囲で推移していたにも関わらず、⑤ろ過汁において0.029～0.044%と濃度の急激な変化が見られた(図9)。この理由については、クラリファイヤ内の凝集沈殿効果で沈降したマッドに含まれていた $\text{Ca}$ 塩の $\text{Ca}^{2+}$ が溶解したものと推察される。

陰イオンの分析結果を図10～12に示す。 $\text{Cl}^-$ および $\text{SO}_4^{2-}$ は、清浄工程中で0.07～0.09%の間で推移しており、大きな濃度変化は見られなかった(図10, 図11)。一方で、 $\text{PO}_4^{3-}$ は、④清浄汁中ではイオンクロマトグラフでは確認できないが、⑤ろ過汁では0.04～0.05%と高い濃度を示した(図12)。 $\text{PO}_4^{3-}$ は、凝集沈殿において凝集の核となるリン酸カルシウムの形成反応に深く関係するイオンであり、後工程の濃縮工程におけるスケール発生の原因と考えらる。

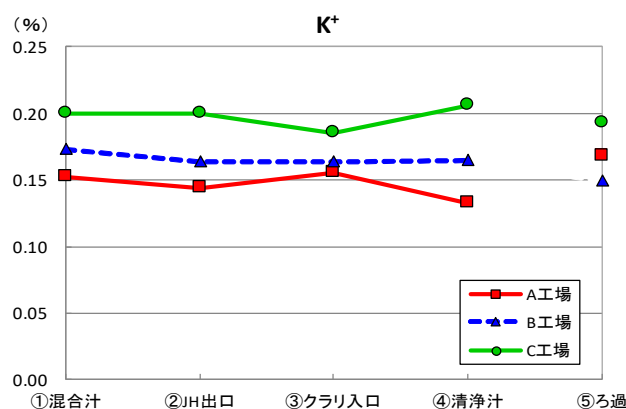


図8 清浄工程における $\text{K}^+$ 濃度の変化

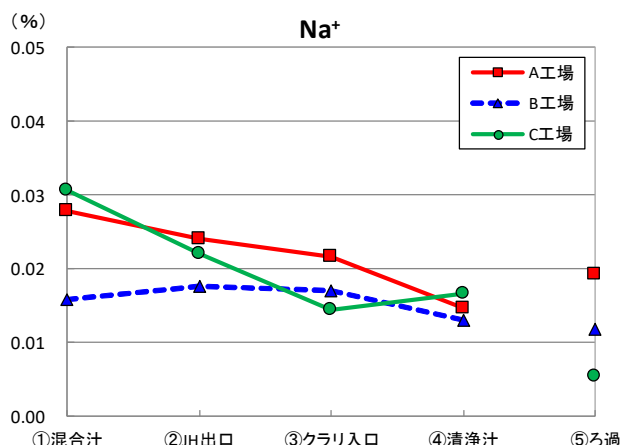


図6 清浄工程における $\text{Na}^+$ 濃度の変化

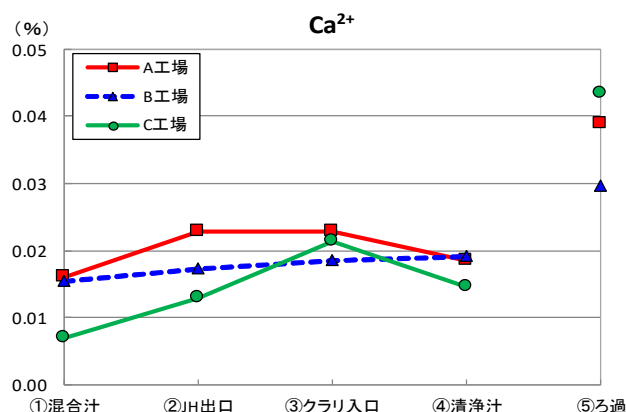


図9 清浄工程における $\text{Ca}^{2+}$ 濃度の変化

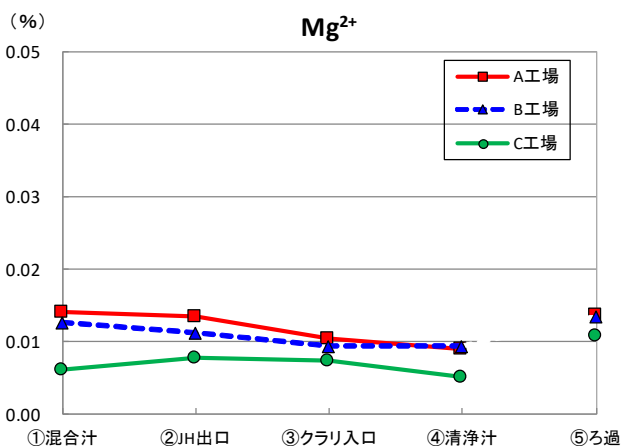


図7 清浄工程における $\text{Mg}^{2+}$ 濃度の変化

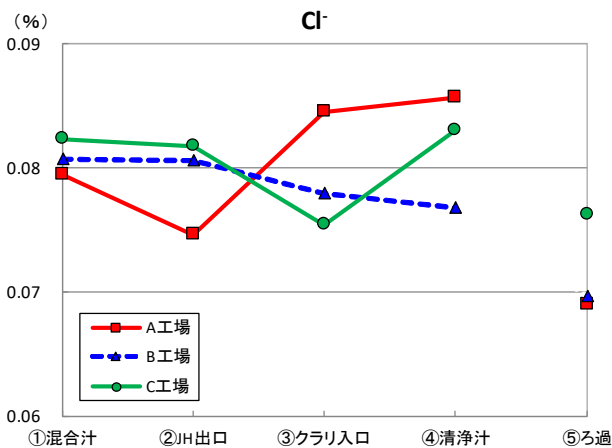


図10 清浄工程における $\text{Cl}^-$ 濃度の変化

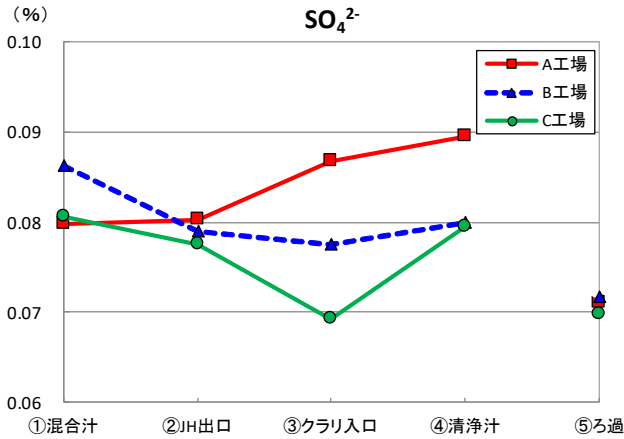


図11 清浄工程におけるSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度の変化

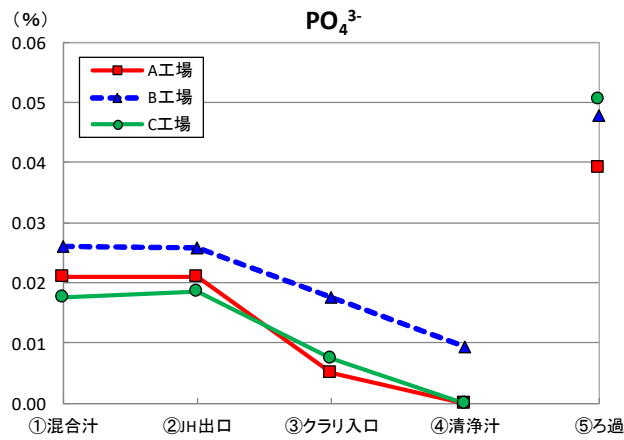


図12 清浄工程におけるPO<sub>4</sub><sup>3-</sup>濃度の変化

3. 1. 3 全窒素分

全窒素分については、凝集沈殿によりサトウキビ搾汁液中のタンパク質が④清浄汁で大きく低下することが予想されたが、本分析方法では3工場いずれも大きな濃度変化が見られなかった(図13)。

3. 1. 4 pH測定

pHについては、①混合汁でpH4.5~5.0とやや酸性領域であり、清浄工程中では③クラリ入口が最も高くpH6.5~7.2の範囲であった(図14)。

製糖工場では、クラリファイアにおける凝集沈殿時のpH制御が重要とされている。そのため、サトウキビ搾汁液自体のpHに対して、凝集剤補助剤のキトサンを溶解する酢酸、および添加する石灰によって工場独自のpH制御を行っている。今回の分析で、A工場およびB工場は③クラリ入口でpH7程度、C工場はpH5.5~6.0程度の設定条件でpH制御を行っており、各社の目指すpHに制御できていることが分かった。

3. 1. 5 有機酸濃度

有機酸については、クエン酸、リンゴ酸、キナ酸、コハク酸、乳酸、ギ酸、酢酸の7成分を測定した。その結果を表1に示す。煮沸により微生物が死滅していると考えられ

る②JH出口を基準に考えると、クエン酸、リンゴ酸、キナ酸およびコハク酸については、⑤ろ過汁での大きな濃度変化は見られなかった(クエン酸増減0%、リンゴ酸31.5%減、キナ酸9.5%減、コハク酸13%増)。しかし、乳酸、酢酸については、⑤ろ過汁において急激な濃度上昇が見られた(乳酸5.5倍増、酢酸3.5倍増)。またギ酸について同様の比較を行うと3倍増であるが、元々の濃度が低濃度であることから、測定誤差なども考えられる。各工程での希釈・濃縮による濃度変化なら各成分が一様に同じ傾向を示すはずであるが、前者4成分と後者2成分とでは増減幅に大きな差がある。乳酸菌がGlcを資化する際に、ヘテロ乳酸発

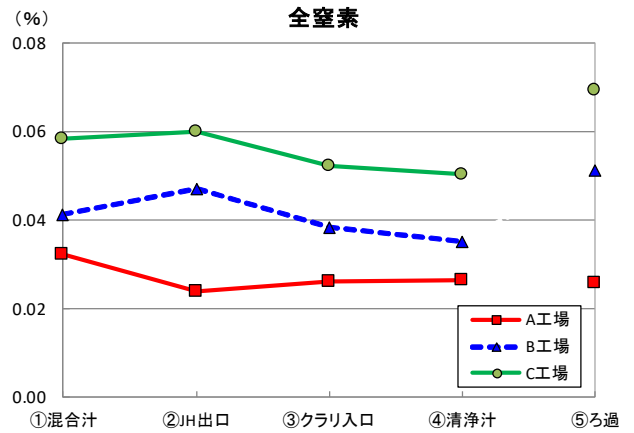


図13 清浄工程における全窒素濃度の変化

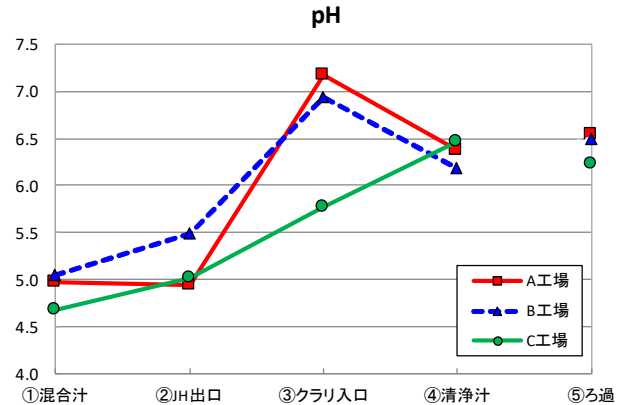


図14 清浄工程におけるpHの変化

表1 清浄工程における各有機酸濃度の変化

有機酸	(単位: mg/L)				
	①混合汁	②JH出口	③クラリ入口	④清浄汁	⑤ろ過汁
クエン酸	123	108	112	93	108
リンゴ酸	186	200	193	168	137
キナ酸	146	164	164	161	150
コハク酸	21	15	14	14	17
乳酸	57	73	67	63	404
ギ酸	1	3	2	6	9
酢酸	36	43	33	59	149

酵で乳酸と酢酸を産出する経路が知られており<sup>5)</sup>、工程での希釈・濃縮以外の要素による急激な乳酸の濃度上昇は乳酸菌による汚染がろ過工程で起きていることを示唆している。実際に、ろ過工程に用いるオリバーフィルターではサトウキビバガスが使用されており、サトウキビ表皮には乳酸菌が存在していることが知られているため<sup>6)</sup>、これが汚染の原因と考えられる。

### 3. 2 清浄工程での微生物試験

有機酸分析において乳酸・ギ酸・酢酸の濃度が上昇したことから、乳酸菌の関与が考えられた。そこで、前項でサンプリングした工場に加え、さらに2工場の乳酸菌数を測定した。サンプルは図2に示す⑤ろ過汁の周辺設備（図2のマッド排出ポンプ～オリバーフィルター）のものをを使用した。

今回測定を行った5工場全てにおいて、マッド排出ポンプ部で回収したサンプルの乳酸菌数は30cfu/mL以下であった。これに対して、オリバーフィルターを通過したろ過汁では $6.0 \times 10^4 \sim 3.2 \times 10^5$  cfu/mLの乳酸菌が検出された。図2に示す工程⑤で回収されたるろ過汁は、最初汁と混合され再び清浄工程に混入する。そのため、本来であればこれらの菌は検出できない程度の菌数で管理しなくてはならないが、フィルター内部では微生物が高濃度で存在していることが推測される。また、乳酸菌は乳酸等だけではなくGlcを資化してデキストランなどの高分子多糖類を産生することが知られている<sup>6)</sup>。工程内の高分子多糖類濃度が上昇すると、サトウキビ搾汁液の粘度が上昇し、不純物の凝集沈殿効率を低下させ、後段の結晶化の効率を低下させることが想定されるため、改善すべきポイントである。

### 3. 3 凝集剤（キトサン、石灰乳）添加量の検討

キトサンの添加量と凝集沈殿の相関性を試験したが、キトサン濃度の違いによる凝集沈殿効果には有意な差が見られなかった。そこで凝集剤の一つである石灰の添加量を変更したシリンダー試験の結果を表3に示す。40～47mLの煮沸したサトウキビ搾汁液に対して800ppmの石灰乳を250～1,000 $\mu$ L添加した場合、マッド高さ（沈殿量）が13.5～15.0 mLと少なく、マッドが密で良好な沈殿状態であった。一方、添加量が2,000 $\mu$ Lになると、マッド高さが24.5mLとなり、マッドが粗で悪い沈殿状態であった。県内製糖工場における現状の石灰乳添加量は、今回の試験範囲では500～1,000 $\mu$ Lすなわち最終濃度として1～2 ppmで、良好な沈殿状態を示す石灰乳の添加濃度（石灰最終濃度）の範囲内ではあるが、今回の試験で250 $\mu$ Lの添加でも良好な凝集状態を示していることから、石灰投入量は0.5～1 ppmでも十分であることが示された。このことから石灰乳の添加量削減が可能であることが分かった。

### 3. 4 pHによる蔗糖の転化反応確認試験

pHと蔗糖の転化反応の関係を表4に示す。pH6.5～7の範囲では、加熱の前後でGlcおよびFruは生成が見られなかったが、pH6.0では僅かにGlcおよびFruの生成が見られ、pH5.0以下では転化反応が起きていた。製糖工程で石灰を添加するのは、Suc以外の成分（イオン成分やポリフェノール等の不純物）を凝集沈殿により除去する目的のほかに、酸性下のサトウキビ搾汁液のpHを上げ、蔗糖の転化反応を抑制するためでもある。ここで工場でのpHを測定した図14を確認すると、蔗糖の転化反応が起こると考えられる②JH出口～③クラリ入口では、pH5以上で管理されており、転化反応はほとんど進まないということが分かった。さらに凝集剤として石灰乳の過度な添加も示唆された。

表2 ろ過工程後の乳酸菌生菌数

工場名	A	B	C	D	E
マッド 乳酸菌数 (cfu/mL)	$2.1 \times 10^5$	$6.2 \times 10^4$	$3.2 \times 10^5$	$6.4 \times 10^4$	$6.0 \times 10^4$

表3 シリンダー試験による凝集剤添加量の検討結果

石灰乳添加量 ( $\mu$ L)	石灰最終濃度 (ppm)	搾汁液量 (mL)	沈殿量 (mL)
250	0.5	40	13.5
500	1.0	45	16.5
1,000	2.0	47	15.0
2,000	4.0	46	24.5

表4 pH変化による蔗糖の添加反応結果

pH	Glc (%)		Fru (%)	
	前	後	前	後
7.0	—	—	—	—
6.5	—	—	—	—
6.0	—	0.01	—	0.02
5.0	—	0.03	—	0.04
4.0	—	0.16	—	0.13

## 4. 結 言

サトウキビ製糖の清浄工程における凝集剤の添加量および清浄度に関するその他の要因等を成分分析などから明らかにし、以下の蔗糖収率向上に向けた技術的課題を抽出した。

- (1) 製糖工程中のサトウキビ搾汁液の成分変化を追跡したところ、糖類（Suc, Glc, Fru）と窒素分およびほぼすべ

でのイオン成分 ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) において大きな変化は見られなかった。しかし、ろ過工程のオリバーフィルター部分で有機酸の乳酸および酢酸、イオン成分の $\text{Ca}^{2+}$ や $\text{PO}_4^{3-}$ の濃度上昇が確認された。

(2) ろ過工程において乳酸、酢酸の濃度が上昇していたことから、微生物が増殖していることが考えられ、現地にて乳酸菌の生菌数試験を実施したところ、ろ過工程のオリバーフィルター部分で $6.0 \times 10^4 \sim 3.2 \times 10^5$  cfu/mLの乳酸菌が検出された。

(3) これまで県内製糖工場で添加していた石灰添加量 1～2 ppm に対して 0.5～1 ppm に削減できる可能性が示唆された。また、pH 4～7 の範囲において蔗糖の転化反応を調べた結果、現状の pH 管理であれば転化反応は起こらないことが示された。

今回の試験以外にも各社への聞き取り等で原料が搬入される際の天候の影響や原料サトウキビの状態など、製糖工程以外のファクターが存在することが分かってきた。今後はそのような情報をIoT等を活用することによって収集し、蔗糖収率向上へ向けた技術改善の提案をしていきたいと考えている。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、サンプルの搾汁液や情報提供をいただきました日本甘蔗糖工業会工務委員会および所属する製糖工場の方々に感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 前田和義, 原永智晴, 塩浦五男, 島村克広, 橋口英文, 池田雄三, 内田昌克: 製糖概要書, 日本甘蔗糖工業会 (2013)
- 2) 安藤浩毅, 古川郁子, 松永一彦, 向吉郁朗: 鹿児島県工業技術センター研究報告, 27, 13-17 (2013)
- 3) 鶴木隆文, 瀬戸口眞治, 亀澤浩幸, 下野かおり: 鹿児島県工業技術センター研究報告, 18, 7-13 (2004)
- 4) 日本工業用水協議会編 (1971): 水処理実験法
- 5) 川崎寿, 上田賢志: 化学と生物, 54, 54-60 (2016)
- 6) 松永一彦, 瀬戸口眞治, 下野かおり, 亀澤浩幸, 中村寿一: 鹿児島県工業技術センター研究報告, 23, 9-12 (2009)