

# 総説

## サトウキビ生産の現状と砂糖収量向上のための課題

寺内方克\*

(国際農林水産業研究センター)

**要旨:** サトウキビの生産量は栽培面積の拡大によって増加してきた。しかし、生産性の改善は他の作物に比べて遅れており、収量とスクロース含有率の向上が必要とされている。そこで、世界と日本における生産の現状とサトウキビ発展の鍵となる遺伝資源について由来と現状を紹介する。また、サトウキビの生理・生態的特性を整理し、乾物生産特性改善およびスクロース含有率向上のための問題点を示す。さらに、スクロース蓄積生理研究の現状を整理するとともに、分子生物学的なアプローチによる生理研究の情勢について紹介する。

**キーワード:** 遺伝子組み換え、遺伝資源、乾物生産、高糖性育種、サトウキビ、収量、スクロース含有率、糖代謝。

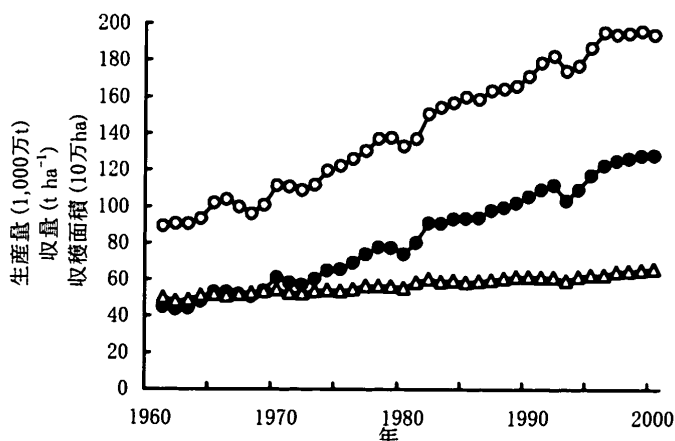
### 1. 世界における生産の現状

熱帯・亜熱帯地域の糖料作物サトウキビ (*Saccharum* sp.) は主として開発途上国で栽培されている。サトウキビの生産量はブラジル、インド、中国、パキスタン、タイ、メキシコ、オーストラリアの順に多く、甘蔗糖の輸出量はブラジル、オーストラリア、キューバ、タイ、グアテマラ、南アフリカ、コロンビアの順に多い (第1表)。生産量に比して人口の少ない国が輸出国となっているのが特徴である。こうした輸出国では、甘蔗糖の輸出金額が全輸出金額の半分以上を占めるキューバのように、サトウキビが社会経済上の重要な作物となっていることが多い。

砂糖需要は人口の増加と経済の発展によって増大してきている。一人当たりの砂糖供給量が 15 kg 前後と欧米諸国の半分以下のインドは、10 億を越す人口を擁するため、全体として多量の砂糖を必要とする世界一の砂糖消費国となっている。このため、ブラジルと並ぶ最大のサトウキビ生産国であるが、砂糖の輸入国となっている。インドと同様に人口が多い中国では、経済発展によって砂糖の消費量

が伸びる傾向にあり、輸出国から輸入国へと転換した。なお、中国では健康上の理由によって諸外国で使用が禁止されている人工甘味料のサッカリンが大量に消費されているため、現在の一人当たりの砂糖供給量は 6 kg と少ないが、サッカリンの規制が実施された場合には砂糖の消費量が大きく増大すると推測されている (周 1999)。このようなインドや中国などにおける状況は、世界的な人口の増大や経済の発展によって砂糖需要が今後も増大することを示唆している。

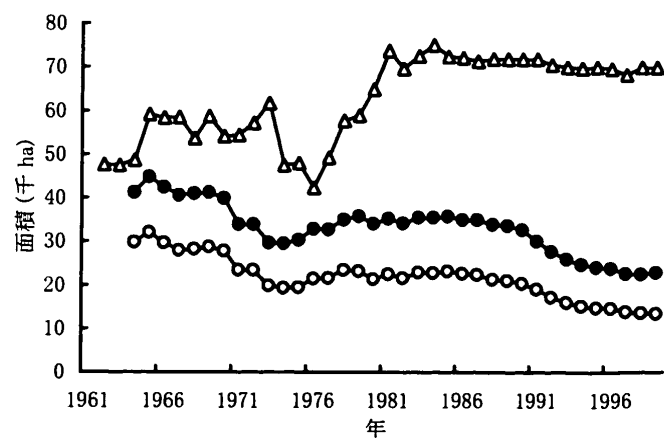
サトウキビの生産量は 1960 年代の 5 億 t から 1990 年代後半には主として収穫面積の拡大によって 12 億 t に増大した (第1図)。しかし、現在では自然環境の保全のために耕地拡大の可能性は限定されてきており (大賀 1998)、今後も同様に栽培面積が拡大することは期待しにくい状況にある。このため、今後の生産量の増大には収量の上昇が必要とされている。サトウキビの収量は 1960 年代初めの 50 t ha<sup>-1</sup> から 2000 年には 65 t ha<sup>-1</sup> に上昇した。しかし、



第1図 世界におけるサトウキビの生産量、収量および収穫面積の推移。

●—生産量 ▲—収量 ○—収穫面積

FAO による統計 FAOSTAT (2001) をもとに作成。



第2図 日本におけるサトウキビ収穫面積およびテンサイ栽培面積の推移。

●—サトウキビ (全体) ▲—サトウキビ (沖縄)

○—テンサイ

精糖工業会による 粗糖統計年鑑 (1974, 1980, 1990, 2000) をもとに作成。

第1表 世界における糖料作物の生産と砂糖の貿易および供給量 (1999)。

国・地域	作物生産量		粗糖の生産と貿易			精製糖の供給量	
	サトウキビ 10万t	テンサイ 10万t	生産量 万t	輸出 万t	輸入 万t	全体 万t	一人あたり kg
世界	12759	2624	13397	2236	2347	11176	19.0
アジア	5687	428	4378	236	971	4563	13.0
インド	2957	-	1744	1	115	1522	15.0
中国	781	86	774	2	55	730	6.0
パキスタン	552	1	379	-	-	300	22.0
タイ	535	-	563	200	-	161	26.0
フィリピン	238	-	168	14	25	183	25.0
インドネシア	235	-	160	-	61	328	16.0
ベトナム	178	-	94	-	13	107	14.0
トルコ	-	220	240	-	-	164	25.0
アフリカ	835	59	899	184	151	1037	13.0
南アフリカ	212	0	254	71	-	142	33.0
エジプト	153	26	135	-	45	182	27.0
ヨーロッパ	1	1795	2594	17	900	2426	33.0
フランス	-	329	491	6	17	198	34.0
ドイツ	-	276	430	-	1	271	33.0
ロシア連	-	152	172	1	577	534	36.0
ウクライナ	-	139	164	-	32	169	34.0
イタリア	-	133	185	-	1	157	27.0
ポーランド	-	126	196	3	-	150	39.0
イギリス	-	106	154	2	126	204	34.0
北アメリカ	320	311	832	1	243	960	54.0
アメリカ合衆国	320	303	820	1	161	856	30.0
中央アメリカ	1266	-	1272	487	18	661	40.0
メキシコ	459	-	476	16	1	400	41.0
キューバ	340	-	378	263	-	65	59.0
グアテマラ	164	-	162	114	-	41	37.0
南アメリカ	4238	31	2813	873	41	1434	42.0
ブラジル	3372	-	2106	783	-	857	51.0
コロンビア	369	-	224	55	-	119	29.0
アルゼンチン	167	-	158	7	-	133	36.0
オセアニア	412	-	610	439	22	96	33.0
オーストラリア	385	-	578	408	-	69	36.0

FAO による統計 FAOSTAT (2000) をもとに作成。

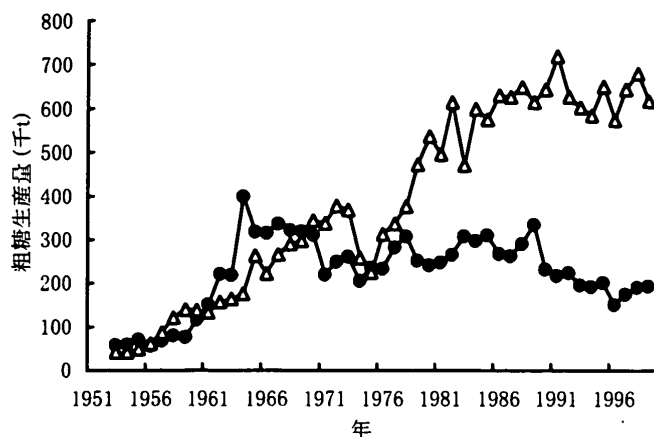
イネ、コムギ、トウモロコシなどの主要な作物では収量がさらに大きく増大したことに比べると、サトウキビの収量は依然として低い水準に留まっているのが現状である (Moore 1987)。

## 2. 日本における生産の現状

我が国ではサトウキビの収穫面積が1960年代の4万haから現在の2万ha台へと半減している (第2図)。かつて30万t以上であった甘蔗糖生産量も現在では20万t以

下に減少している (第3図)。一方、収量は1960年代から現在に至るまで増大しておらず、製糖歩留まりも向上していない (第4図、第5図)。

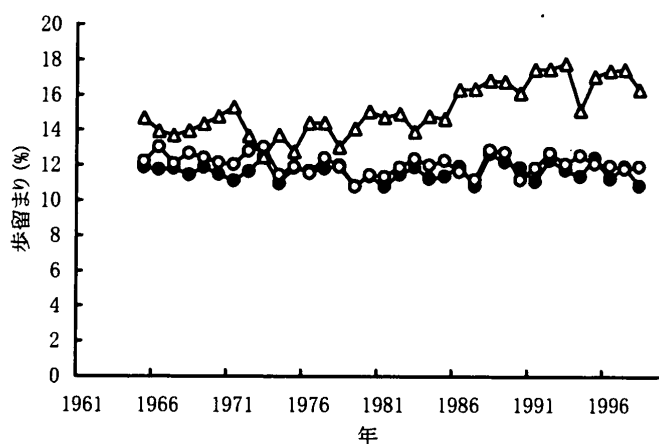
これに対し、同じ糖料作物であるテンサイでは、1980年前後に栽培面積が大きく拡大し、甜菜糖の生産量も年を追って増加している。収量と製糖歩留まりは1960年代以降に大きく向上しており、生産性の向上と栽培面積の拡大によって甜菜糖の生産量は増大してきた。このようなテンサイでの生産性の向上によって、サトウキビの生産効率は



第3図 日本における甘蔗糖および甜菜糖生産量の推移。

● 甘蔗糖 ▲ 甜菜糖

精糖工業会による粗糖統計年鑑(1974, 1980, 1990, 2000)をもとに作成。



第5図 日本におけるサトウキビおよびテンサイの製糖歩留まりの推移。

● サトウキビ(沖縄) ○ サトウキビ(鹿児島)

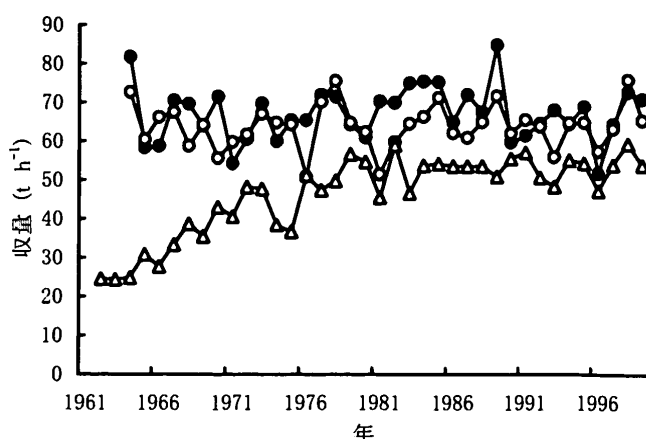
▲ テンサイ

農林水産省による甘味資源に関する資料(2000)をもとに作成。

相対的に低下しているのが現状である。

さらに、サトウキビでは収量やスクロース含有率の年次変動が大きく、安定性が低いことも大きな問題点となっている。不安定で低い生産性は機械化の遅れとともに生産意欲の低下をもたらし、生産者数の減少と高齢化を招いている(家坂 1989, 岡 1990, 杉本 1999)。

サトウキビが栽培されている南西諸島は台風や干ばつの常襲地帯であり、こうした気象災害が収量変動の大きな要因となっている(杉本 1998)。また、冬季の多雨・日照不足あるいは暖冬などの気象変動は収穫期のスクロース含有率を不安定とする要因となっている(杉本 1999)。こうした悪条件のもとにありながら新品種の開発が進まず、戦後に普及した品種 NCo310 が長らく栽培面積のほとんどを占めてきたことが収量と製糖歩留まりが低迷した原因であった(岡 1990)。さらに、サトウキビ価格にスクロース含



第4図 日本におけるサトウキビおよびテンサイの収量の推移。

● サトウキビ(沖縄) ○ サトウキビ(鹿児島)

▲ テンサイ

精糖工業会による粗糖統計年鑑(1974, 1980, 1990, 2000)をもとに作成。

第2表 サトウキビ属植物および関連の深い植物。

属・種	染色体数	分布域
<i>Saccharum</i>		
<i>S. officinarum</i>	80	インドネシア～ミクロネシア
<i>S. barberi</i>	81-124	インドネシア～ミクロネシア
<i>S. sinense</i>	111-120	中国南部, インド北部
<i>S. edule</i>	60-80	ニューギニア
<i>S. spontaneum</i>	40-128	ニューギニア～アフリカ
<i>S. robustum</i>	60, 80, 114-205	ニューギニア
<i>Erianthus</i> sp. (Sect. <i>Ripidium</i> )	20, 30, 40, 60	ニューギニア～地中海
<i>Miscanthus</i> sp.	38, 40, 57, 76, 95, 114	東アジア～太平洋
<i>Sclerostachya</i> sp.	30, 34	インド, 東南アジア
<i>Narenga</i> sp.	30	インド, 東南アジア

Daniel and Roach (1987) から作成。

有率が反映されてこなかったことも製糖歩留まりを制限する要因であった。しかし、1995年にサトウキビの品質取引制度が導入されたことから、スクロース含有率への生産者の関心は高まっており、その期待に添うべく新品種が開発されている。

### 3. 遺伝資源の現状

現在のサトウキビの基になった *S. officinarum* は、紀元前 2500 年以前にニューギニア島付近で作物化されたと考えられている(Daniel and Roach 1987)。その後、東南アジアからインド、中国へと伝播し、*S. barberi* と *S. sinense* が分化したと考えられている。これらがさらにヨーロッパに伝わり、プランテーションによって、広く栽培されるようになった。その後、プランテーションでも *S. officinarum* が栽培されるようになり、さらに、品種改良に野生種 *S. spontaneum* (ワセオバナ) が利用されたこ

とによって、現在のサトウキビ品種は種間雑種となっている。

サトウキビ属植物には6種が含まれている(第2表)。このうち *S. officinarum* と *S. barberi*, *S. sinense*, *S. edule* が栽培種で、*S. robustum* と *S. spontaneum* が野生種である。*S. officinarum* は *S. robustum* から分化したと考えられており、*S. barberi* と *S. sinense* は *S. officinarum* と *S. spontaneum* との交雑によって分化したと考えられている(Daniel and Roach 1987)。*S. edule* は幼穂を食用とする特殊なサトウキビである。

なお、これらのうち *S. barberi* と *S. sinense* については、その起源につきインドを起源地として *S. spontaneum* から分化したとする異論があった(Rao 1987)。しかし、現在では *S. officinarum* と *S. spontaneum* の染色体の識別が可能となり、染色体の基本数は *S. officinarum* が10で、*S. spontaneum* では8であることが明らかにされるとともに、*S. barberi* と *S. sinense* に属する品種は *S. officinarum* と *S. spontaneum* との交雑によって分化してきたことが明らかになっている(D'Hont ら 1998)。

野生種のうち *S. spontaneum* は南太平洋から中央アジアを北限に、西はアフリカ大陸まで、熱帯・亜熱帯地域を中心に広く分布している(Daniel and Roach 1987)。中でも、北インド付近には遺伝的・形態的に多様な *S. spontaneum* が自生しており、また、サトウキビとの交雑が可能な *Miscanthus* 属(ススキ属)、*Erianthus* 属(タカオススキ属)、*Sclerostachya* 属、*Narenga* 属などの近縁植物も数多く分布していることから、この地域は野生種遺伝資源の宝庫となっている。一方、もう一つの野生種 *S. robustum* はニューギニア島近辺に分布している。この地域では現在も多様な *S. officinarum* が生食用として栽培されており、北インドと並ぶ遺伝資源の重要な分布地域となっている。

このような野生種と在来種は、品種改良に必要な遺伝子を提供する遺伝資源として収集と保存が実施されている(Berding and Roach 1987, Krishnamulthi 1987)。サトウキビの遺伝資源収集は、プランテーションの発展とともに導入育種を目的として行われるようになったが、19世紀末における種間交雑の成功と、これに続く種間交雑育種の開始によって遺伝資源の重要性が認識され、本格的に実施されるようになった。アメリカ農務省やインド政府などの組織的な探索によって、在来種 *S. officinarum* と野生種 *S. robustum* を中心とした遺伝資源がニューギニア島および周辺の島嶼部から、在来種 *S. barberi* および野生種 *S. spontaneum* を中心とした遺伝資源が北インドを中心とした地域から収集された。こうした遺伝資源は、大半がアメリカとインドに集められ、ワールドコレクションとして国際的な保存事業が実施されるに至っている(寺内 1996)。遺伝資源は品種改良の素材として期待されており、特に現行のほとんどの品種は、インドネシアで育成された

POJ 品種群を共通な遺伝的基盤として近縁化が進んでいることから、育種の限界を打破する材料としてその活用が求められている(永富 1989)。

野生種 *S. spontaneum* が自生し、在来種 *S. sinense* が栽培されてきた我が国においても、遺伝資源が収集・保存されている。永富(1988)は我が国に自生する *S. spontaneum* が、南西諸島の風土に適した品種の育成に有用な材料として期待できることから、数次の探索調査(永富ら 1984, 永富 1985)を行い、南西諸島から本州までの広い範囲から数百点の *S. spontaneum* を収集した。これらの野生種は国のジーバンク事業によって保存と利用が図られている。

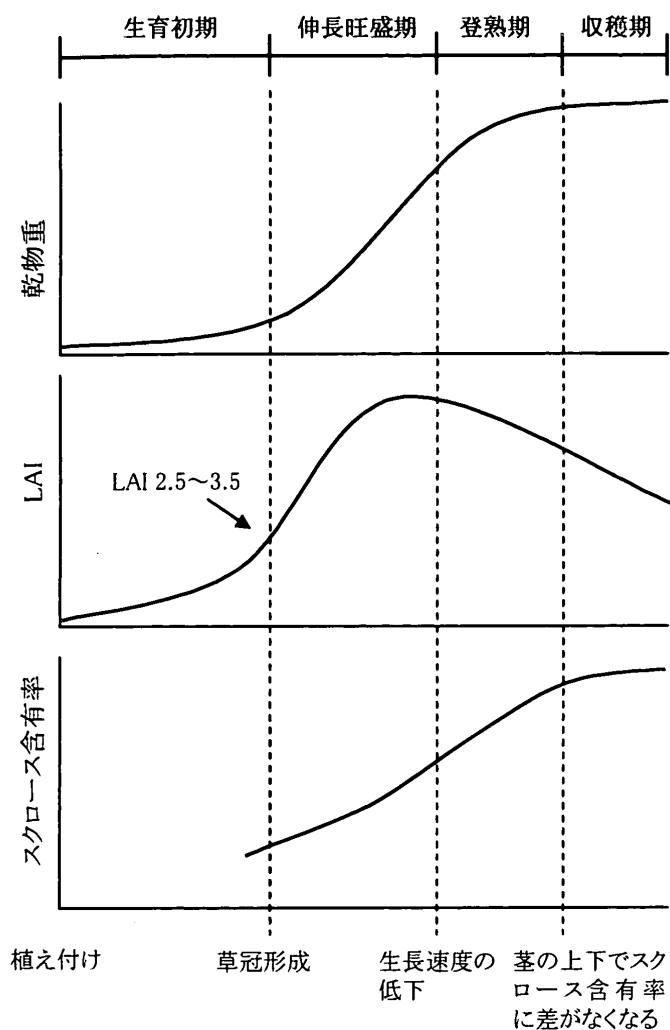
このようにサトウキビの遺伝資源は早くから収集・保存が実施されてきたが、残された課題も多い。栄養繁殖であるサトウキビは他の多くの作物のように種子で保存することが不可能であるため、圃場において栄養体保存を実施しなければならない。その費用・労力は大きな負担となっており、さらには毎年の植えかえに際して品種の取り違えや、病・虫害や気象災害などによる消滅の危険も大きい。このため、栄養繁殖作物では二重保存することがことが好ましく、負担はさらに大きいものとなっている。

サトウキビのワールドコレクションもアメリカとインドで二重保存の体制が敷かれているが、人件費等のコストの高いアメリカでは、その維持に窮しており、消失する遺伝資源が多いのが現状である。このため、効率的な保存方法の開発が求められている一方で、世界的なネットワークを構築し、世界各地で独自に保存している遺伝資源をサブバンクとして取り込むことも検討されている。我が国のシーバンク事業にもこうした世界的な要請に貢献してゆくことが求められよう。

#### 4. サトウキビのスクロース蓄積と生育期

サトウキビは低温、水ストレス、栄養ストレスなどの茎葉生長が抑制される条件下でスクロースを蓄積する性質がある(Alexander 1973)。このため、一般にサトウキビは冬季または乾季に収穫されている(Blume 1985)。こうした収穫期に関係する主たる要因によってサトウキビの栽培地域は亜熱帯地域と、乾季を伴う熱帯地域、さらに乾季を伴わない湿潤な熱帯地域に大きく分けることができる。

亜熱帯地域では冬季の低温によってスクロース含有率が上昇したサトウキビが収穫されているが、気温の低下が厳しい地域では生育期間が制限され、収量・スクロース含有率ともに影響を受けている。また、登熟期から収穫期にかけての気温の変動によってスクロース含有率が不安定となりやすい問題を抱えている。一方、乾季を伴う熱帯地域では、乾季の水ストレスによってスクロース含有率が上昇したサトウキビが収穫されており、降雨の状況によって収量・スクロース含有率ともに不安定となりやすい傾向にある。これに対し、湿潤な熱帯地域では低温・水ストレスな



第6図 乾物重、LAI およびスクロース含有率の推移からみたサトウキビの生育期。

どの気象条件による制限がないことから、栽培期間が長く、収穫期も一定しないことが特徴である。こうした地域では、ハワイなどのように高糖・多収を実現している地域もあるが、スクロース蓄積を促進する顕著な気象要因がないため、ガイアナのようにスクロース含有率がきわめて低いことが問題となっている地域が多い。環境要因が複雑に絡み合う地域もあるが、このような栽培地域の分類は、スクロース蓄積がどのような環境要因に依存するか示すもので、栽培、品種の選定と育成の上で重要である。

サトウキビの栽培期間はおよそ12～18ヶ月である。栽培法には新規に植え付ける新植栽培と収穫後の刈り株を再生させる株出し栽培がある。新植は低温や乾燥などの栽培環境が不良なことが多い収穫時期を避け、その前後に実施されることが多い。収穫期以前に植え付けられ、翌年の収穫期に収穫されるサトウキビの栽培期間は18ヶ月に及ぶ。一方、株出し栽培では収穫直後から株の再生が始まることから、その栽培期間はおよそ12ヶ月である。南西諸島での新植栽培は、植え付け時期によって夏植え栽培や春植え栽培と呼ばれている。なお、初年目に出穂（後述）させないために、栽培期間はおよそ18ヶ月が限度となっている。

栄養器官である茎を収穫するサトウキビでは生育期を明確に区分できないが、生長とスクロース蓄積の視点から次の4つの生育期に区分できる。すなわち、1) 草冠が閉じ群落地完成するまでの生育初期、2) 乾物生産が旺盛で茎の伸長が著しい伸長旺盛期、3) 茎の伸長が緩慢となり、茎にスクロースが蓄積される登熟期、4) 乾物重の上昇およびスクロース含有率の上昇がともに停滞する収穫期である（第6図）。

生育初期は、緩慢な初期生育と広い畦間（120～150 cm）とが相まって長期に及ぶ。例えば沖縄における夏植え栽培では生育初期は6ヶ月に及び、全生育期間のおよそ3分の1を占めている。この時期には分けつが形成され、その後の茎数が決定される。

LAIが2.5～3.5に達し草冠が閉じると、群落生長速度に影響する主たる要因が葉面積から群落内への光透過効率へと転換する（島袋・比嘉 1977）。この時期をもって生育初期と伸長旺盛期を区分することができる。伸長旺盛期には、およそ1週間に1枚の速度で葉身が展開して節が形成されるとともに節間が伸長する（小野・中西 1983）。この時期には茎葉生長が旺盛であるが、一方では茎内部には低いながらもスクロースが蓄積される。

伸長旺盛期から登熟期に移行する明確な境界はないが、登熟期には出葉速度と節間伸長の低下によって茎葉生長が低下し、群落生長速度も低下する（島袋ら 1980）。登熟期にはスクロース蓄積が旺盛となる。スクロース蓄積は伸長旺盛期にも緩やかに進行するが、登熟期のスクロース蓄積は茎上部での急速なスクロース含有率の上昇が特徴である。伸長旺盛期から登熟期への移行には主として気温などの環境条件の変化が関係する。

スクロース含有率がほぼ最大値に達すると収穫期となる。登熟期と収穫期は、スクロース含有率の上昇が停滞する時期をもって区分することができ、茎の上下間でのスクロース含有率に差がなくなることが目安となる。収穫期にはスクロース含有率の上昇がほぼ停止するが、極めて緩慢ながら葉身が展開して節が形成されることから、収量は微増する。

以上4つの生育期の他にサトウキビには出穂期がある。サトウキビは花芽形成において特殊な日長反応を示す日性植物とされ、十分に生長したサトウキビでは10～11月以降（北半球）に出穂期を迎える（宮里 1986）。出穂の有無や頻度、時期は品種や栽培地の緯度、栽培環境、生長の程度によって異なっている。

出穂はしばしば栽培上の問題として取り上げられることがある。すなわち、高緯度地域では出穂期が登熟期～収穫期にあたり、出穂直後に収穫されることから、問題とされることはないが、低緯度地域では、出穂期と登熟期・収穫期の関係が一定していないことから、出穂とその後の側枝発生による収量およびスクロース含有率の低下や作業効率の低下が問題となっている。このような地域では生産性や

作業性を良くするために出穂し難い品種が育成されているが、一方で交配育種が困難となる問題を抱えている。

## 5. 乾物生産特性

糖料作物であるサトウキビでは、最終生産物である砂糖収量を増大させることが大きな課題である。しかしながら、砂糖収量を決定する茎収量とスクロース含有率には負の相関関係があり、同時に進行する茎葉生長とスクロース蓄積は同化産物を巡り競合する関係にある (Alexander 1973)。サトウキビの高糖・多収を図るには、これらのバランスをはかる一方で、乾物生産特性を改善することが不可欠である。

サトウキビは  $C_4$  型光合成作物で高い光合成能力を有することから、一般に熱帯の強い日射条件下で高いバイオマス生産を示すと考えられている。例えば、見かけの光合成能力は  $34\sim 86\text{ mg CO}_2\text{ dm}^{-2}\text{ h}^{-1}$  であり、テンサイの約  $30\text{ mg CO}_2\text{ dm}^{-2}\text{ h}^{-1}$  などと比べ高い値を示している (前 1992)。また、 $C_4$  型光合成は光飽和点が高いため強日射に適しており、太陽エネルギー利用効率は、イネの  $0.18\sim 0.42\%$  やテンサイの  $0.56\%$  と比べ、サトウキビでは  $0.30\sim 0.95\%$  と高く (Moore 1987)、沖縄県における試験では  $4.26\%$  の利用効率が報告されている (島袋ら 1981)。さらに、個体群生長速度はおよそ  $45\text{ g m}^{-2}\text{ day}^{-1}$  と極めて高い値を示すことが知られており (島袋ら 1980, 野瀬ら 1989)、 $C_4$  型光合成作物としての物質生産力の高さを示している。

しかしながら、全生育期間を通じた平均乾物生産速度は光合成能力から予想されるほど高くないのが現状である。平均乾物生産速度は、同じ  $C_4$  型光合成作物で近縁なソルガムでは  $13\sim 17\text{ g m}^{-2}\text{ day}^{-1}$  程度であるのに対し (館野・小島 1973)、サトウキビでは  $9\sim 11\text{ g m}^{-2}\text{ day}^{-1}$  程度であり (島袋ら 1980, 1986, 野瀬ら 1989 から推定)、ソルガムのおよそ  $3$  分の  $2$  と低い値となっている。

この原因は、生長緩慢な生育初期が長期に及ぶためである。生育初期のサトウキビ個体の生長は緩慢であり、栽培様式として広い畦幅が採用されていることと相まって、太陽エネルギーを効率よく利用する群落を形成するまでに長期間を要している。緩慢な初期生長には、葉面積の拡大を通じて比葉面積が大きく関わっている (Ehara ら 1994, 寺内ら 1999 c)。サトウキビ品種には比葉面積の変異が見られることから、比葉面積の大きな品種を材料とした品種改良によって生育初期を短縮できると考えられる (寺内・松岡 2000)。

生育初期の短縮には品種特性の改善とともに栽培方法の改善も必要とされている。そこで、初期生育の改善のための密植も試みられており、生育初期の乾物生産特性の向上が認められているが、一方で生育後半には葉面積過剰のため枯死茎が発生し、収量性の向上には結びつかないことが報告されている (野瀬ら 1989)。このため、生育初期の生

育促進効果を得ながら、生育後半に葉面積過剰とならないよう栽培することが重要である。茎数を調整しながら密植を実現することがその一つの方法として考えられる (寺内ら 2001)。

伸長旺盛期の群落光合成速度を改善する研究は島袋らによって実施されてきた (島袋 1997)。その結果、葉身が細く立ち型の品種で群落吸光係数が小さく受光態勢上有利であり、細茎で茎数の多い品種が群落光合成速度の点で有利であることが明らかにされている (島袋・津波 1976, 島袋 1976, 島袋・比嘉 1977, 島袋・工藤 1979, 島袋ら 1980, 1981, 1982)。しかしながら、伸長旺盛期は、全生育期間の  $3$  分の  $1$  を占めるに過ぎないことから、この間の乾物生産特性を改善することによって得られる収量の向上は限られている。このため、全生育期間を通じた乾物生産特性の改善が必要であり、生育初期と登熟期における乾物生産特性を見直し、乾物生産速度の高い伸長旺盛期が全生育期間に占める割合を高めることが今後の重要な課題である。

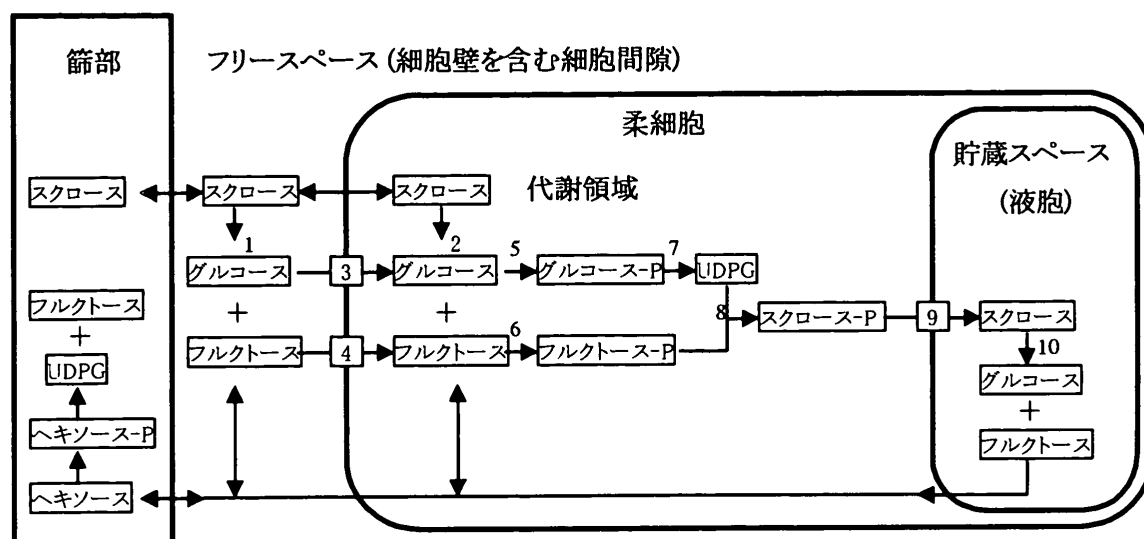
## 6. 高糖性育種

サトウキビのスクロース含有率は砂糖収量を決定する収量構成要素であるばかりではなく、スクロース回収率の良否と製糖コストにも大きく影響する重要な形質である。このため、収穫期のスクロース含有率が高い高糖性品種の開発が品種改良の大きな目標の一つとなっている。

高糖性を目標とした品種育成では、ルイジアナで 1963 年に  $8.6\%$  であったスクロース含有率が 1982 年には  $12.9\%$  に上昇したように (Tew 1987)、一定の成果を上げてきた。しかし、砂糖収量に対する影響は茎収量で大きいことから、インドやオーストラリア、ハワイでは茎収量の増大がはかられてきたため、スクロース含有率の改善が停滞しており (Naidu 1987, Cox ら 2000, Tew 1987)、ルイジアナのような一部の例外を除き、高糖性品種の開発は世界的に遅れているのが現状である。

我が国ではスクロース含有率の改善が大きな育種目標とされ、世界的にも先導的な高糖性品種の育成が進められている。特に、スクロース含有率の改善にあたり収穫期に早く達する特性である早期性が重視されてきたことから、早期性と高糖性を兼ね備えた早期・高糖性品種の開発が進んでいる。これは、早期・高糖性品種は収穫期のスクロース含有率が高く、また、製糖工場の稼働期間の拡大や作期の短縮、他作物との輪作、降霜・季節風といった気象災害の回避などの効果が期待されるためである (杉本 1998, 1999)。その結果として、これまでに  $\text{NiF3}$ ,  $\text{NiF4}$ ,  $\text{NiN7}$ ,  $\text{NiF8}$ ,  $\text{Ni9}$ ,  $\text{Ni12}$  などの品種が育成されてきた。

こうした糖蓄積性に関する品種改良によって、従来栽培されてきた NCo 310 に比べるとスクロース含有率は値で  $1\sim 2\%$  程度上昇するとともに、その安定性が向上した。しかし、機械収穫の進展による原料品質の低下や同じ糖料作



第7図 サトウキビの貯蔵組織における糖代謝経路。

1: 遊離型および細胞壁付着型の酸性インベルターゼによる分解, 2: 中性インベルターゼによる分解, 3: グルコースの輸送, 4: フルクトースの輸送, 5, 6: ヘキソースの転換とリン酸化, 7: UDPGの合成, 8: スクロースリン酸の合成, 9: スクロースの貯蔵, 10: 酸性インベルターゼによる貯蔵スクロースの分解. Glasziou and Gayler (1972) を参考にして作成。

物であるテンサイではスクロース含有率の改善が著しいことを考慮すると、サトウキビのスクロース含有率の改善は十分とはいえないのが現状である。

早期・高糖性を有する品種の育成には、早期性に優れた品種と高糖性に優れた品種が母材として利用されており、収穫期のスクロース含有率に加え、系統間差が著しい10～11月におけるスクロース含有率を指標の一つとすることで選抜が実施されている(杉本ら 2000)。しかし、収穫期の早晩性には栄養ストレスに対する反応性が関係しており、一方、収穫期における高糖性には、早晩性とともに関与している。さらに、最終的なスクロース含有率の高さには登熟期間の長さも関係することから、スクロース含有率を高めるには、これらの要因からの解析を進めることが重要である。

## 7. 糖の代謝生理研究

サトウキビでは、光合成によって生成されたスクロースが転流後にそのままの形で茎に蓄積されるのではなく、分解と再合成の過程を経て貯蔵組織の液胞中に蓄積される(Glasziou and Gayler 1972, 第7図)。すなわち、葉身からの転流スクロースは、細胞壁と細胞間隙からなるフリースペースと代謝領域とされる細胞質中において、一旦グルコースとフルクトースに分解される。細胞質中ではこれらの還元糖から再びスクロースリン酸を経てスクロースが合成され、貯蔵領域とされる液胞中に蓄積される。こうして蓄積された貯蔵スクロースは還元糖に分解されると細胞質中に放出されると考えられている。

こうしたスクロース蓄積過程にはさまざまな酵素が関与

しているが、中でもスクロースを還元糖へと分解するインベルターゼ(EC 3. 2. 1. 26)は、葉身からの転流スクロースの分解と液胞中の貯蔵スクロースの分解という二つの過程でスクロース含有率に関与している(Hawker 1985)。インベルターゼには複数の酵素があり、遊離型でpH 5.5付近の酸性域で至適活性を示す酸性インベルターゼ(Acid invertase; AI)と、pH 7.0付近の中性域で至適活性を示す中性インベルターゼ(Neutral invertase; NI)、細胞壁に付着し酸性域で至適活性を有する細胞壁付着インベルターゼ(Cell wall binding invertase; CWBI)の3種類に分類されている。

これらのうち、フリースペースにあるCWBIと細胞質にあるNIは、ともに葉身からの転流スクロースの分解に関与していると考えられている(Hatch and Glasziou 1963, Gayler and Glasziou 1972)。CWBIは齢の進行によって活性化し(Gayler and Glasziou 1972, Batta and Singh 1986)、細胞壁が多いサトウキビでスクロース含有率が高いと報告されている(Oworuら 1977a, b)。また、NI活性は下位の節間で高く(Matui and Kitagawa 1985)、齢の進行によって上昇し(Hatch and Glasziou 1963, Gayler and Glasziou 1972, Batta and Singh 1986)、スクロース含有率と正の相関関係にあると報告されている。すなわちNIとCWBIは、転流スクロースを分解し、貯蔵スクロースの前駆物質を生成することから、スクロース蓄積に寄与していると、考えられている(Sacherら 1963)。

一方、AIは細胞間隙と液胞中で転流スクロースと貯蔵スクロースの両者を分解する作用があると考えられている(Glasziou and Bull 1965, Gayler and Glasziou 1972)。

AI 活性は生長中の茎組織で高く、茎の伸長停止とともに急速に低下することから、茎の伸長と密接な関係にあると報告されている (Hatch and Glasziou 1963, Matui and Kitagawa 1985, Vekataramana and Naidu 1993). しかしながら、気温とは正の相関関係が (Vekataramana ら 1991), スクロース含有率とは負の相関関係が報告されており (Vekataramana ら 1991, Su ら 1992, 寺内ら 1999 a), 貯蔵スクロースの分解を通じてスクロース含有率にも影響を及ぼすと考えられている (Zhu ら 1997).

このように、インベルターゼに関する多くの研究がなされてきたが、必ずしも一定した傾向が見られず、インベルターゼだけをもってスクロース含有率との関係を解明できていないのが現状である。このことは、茎においてスクロースを合成する酵素の役割が大きいことを示すと考えられる (寺内 1999 b).

茎貯蔵組織においてスクロース合成に関わる酵素にはスクロースフォスフェートシンターゼ (Sucrose-phosphate synthase; SPS, EC 2. 4. 1. 14) とスクロースシンターゼ (Sucrose synthase; SS, EC 2. 4. 1. 13) がある。このうち、SS は、スクロース含有率との因果関係が認められないことから、スクロース蓄積とは無関係であるとの報告がなされている (Goldner ら 1991, Lingle and Smith 1991, Lingle and Irvine 1994). 一方、SPS とスクロース蓄積との関係は 1960 年代から指摘されており (Hatch 1964), スクロース含有率の上昇する低温条件下で活性が高い傾向を示し (Terauchi ら 2000), また、多数の品種間での比較で、AI 活性が低い場合にスクロース含有率と正の相関関係がみられることが報告されている (Zhu ら 1997). さらに、ピロフォスフェート D-フルクトース-6-フォスフェート 1-フォスフォトランスフェラーゼ (PFP) 活性とスクロース含有率との間には負の相関関係があり、PFP がフルクトース-6-リン酸をフルクトース 2,6 ニリン酸に変化させることから、SPS の基質でもあるフルクトース-6-リン酸の減少を通じてスクロース含有率に影響を及ぼしていることが報告されている (Whittaker and Botha 1999).

サトウキビとは組織が異なるが、液胞中のスクロース含有率が SPS と AI の活性によって制御されていることが、メロンの果実で報告されている (Hubbard ら 1989). また、トマトではスクロース含有率の高い種で AI の活性が低いことが認められており (Klann ら 1993), アンチセンス技術による AI 活性を抑制した遺伝子組み換え植物で、スクロース含有率が向上することも報告されている (Ohyama ら 1995). このようなことから、スクロース含有率は AI 活性と SPS 活性のバランスが関係している可能性が高いと考えられている (Zhu ら 1997).

SPS に関する研究は、葉身の SPS 活性が同化産物の転流に影響することが知られるようになったことから (Huber and Huber 1992), 近年各種の作物で進展してい

る。葉身において SPS は同化産物を転流物質のスクロースに合成する働きを担っており、その活性はスクロース含有率と正の、デンプン合成とは負の相関関係にあり (Huber 1983), その日変化はスクロースの転流量と同調しており (Huber ら 1985), 植物の全乾物重と正の相関関係にあることから (Kerr ら 1984), 作物の生長との深い関係が指摘されている (Rocher ら 1989). このように SPS は作物の生産性との関係が深いことから、トウモロコシ、ハウレンソウ、イネ、テンサイなどで SPS 遺伝子が単離されている (Worrell ら 1991, Klein ら 1993, Sonnewald ら 1993, Sakamoto ら 1995, Hesse ら 1995). さらに、SPS 遺伝子を利用した組み換え作物が各種作物で作出されており、収量性などの改善が試みられている (Worrell ら 1991, Ono ら 1999, Tobias ら 1999).

サトウキビにおいても SPS 遺伝子の単離が報告されており (Sugiharto ら 1997), 外来の SPS 遺伝子をサトウキビに導入する試みも実施されている (Grof 2001). しかしながら、SPS 遺伝子の導入によってスクロース含有率を上昇させることに成功するには至っていない。これは、遺伝子の機能を研究する以前に遺伝子組み換え技術の安定性に問題があるためと考えられている。こうしたことから、AI 活性を下げる試みも行われているが、スクロース含有率を向上させるには至っていない (Botha ら 2001). サトウキビの遺伝子組み換えによる生理機能の改変では、アンチセンス技術により SPS と関係の深い PFP の活性を下げた場合にスクロース含有率が上昇することが唯一の成功例として報告されている (Groenewald and Botha 2001).

一方、サトウキビには複数の SPS 遺伝子があり、スクロース含有率に関する遺伝子の集積効果がある可能性が示されている (寺内ら 2000, Quintana ら 2000). 遺伝資源には未利用の SPS 遺伝子もあることから、種・属間交雑が可能な高次倍数性作物であるサトウキビでは、こうした遺伝資源が品種改良の材料として活用できると考えられる。

## 8. おわりに

主要な作物で収量水準が飽和に近づきつつあるが、サトウキビでは理論的な収量と実際の収量にはいまだ大きな格差が存在している。すなわち、サトウキビの栽培・育種研究は十分に進展しているとは言い難く、スクロース蓄積のメカニズムもいまだ解明するに至っていないなど、サトウキビの研究は発展の途上にあるといえる。こうした背景には、長大で個体差の激しい植物体が群落の解析を困難なものとし、100 本を超える染色体や長期間を要する生殖サイクルおよび出穂しない個体の出現が遺伝解析を困難なものとしてきたことが挙げられる。しかしながら、こうした遅れは研究発展の大きな可能性を示唆するものであり、この意味でサトウキビは大きな成果の期待できる魅力ある研究



対象といえよう。

## 引用文献

- Alexander, A.G. 1973. Sugarcane Physiology. Elsevier, Amsterdam. 1—752.
- Batta, S.K. and R. Singh 1986. Sucrose metabolism in sugar cane grown under varying climatic conditions : Synthesis and storage of sucrose in relation to the activity of sucrose synthase, sucrose-phosphate synthase and invertase. *Phytochemistry* 25 : 2431—2437.
- Berding, N. and B.T. Roach 1987. Germplasm collection, maintenance, and use. In *Sugarcane Improvement through Breeding*. Elsevier, Amsterdam. 143—210.
- Blume, H. 1985. Geography of sugar cane. Verlag Dr. Albert Bartens, Berlin. 1—371.
- Botha, F.C., B.J. B Sawyer and R.G. Birch 2001. Sucrose metabolism in the culm of transgenic sugarcane with reduced acid invertase activity. *Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol.* 24 : 588—591.
- Cox, M., M. Hogarth and G. Smith 2000. Cane breeding and improvement. In *Manual of Cane Growing*. Bureau of Sugar Experiment Stations, Brisbane. 98—108.
- Daniel, J. and B.T. Roach 1987. Taxonomy and evolution. In *Sugarcane Improvement through Breeding*. Elsevier, Amsterdam. 7—84.
- D'Hont, A., D. Ison, K. Alix, C. Roux and J.C. Glaszmann 1998. Determination of basic chromosome numbers in the genus *Saccharum* by physical mapping of ribosomal RNA genes. *Genome* 41 : 221—225.
- Ehara, H., T. Takamura and M. Tsuchiya 1994. Growth and dry matter production of sugar cane in warm temperate zone of Japan. *Jpn. J. Trop. Arg.* 38 : 335—342.
- Gayler, K.R. and K.T. Glasziou 1972. Physiological function of acid and neutral invertases in growth and sugar storage in sugarcane. *Physiol. Plant.* 27 : 25—31.
- Glasziou, K.T. and T.A. Bull 1965. The relation between total invertase and internode expansion in sugarcane stalks. *Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol.* 12 : 575—581.
- Glasziou, K.T. and K.R. Gayler 1972. Storage of sugars in sugarcane. *The Botanical Review* 38 : 471—490.
- Goldner, W., M. Thom and A. Maretzki 1991. Sucrose metabolism in sugarcane cell suspension cultures. *Plant Sci.* 73 : 143—147.
- Groenewald, J.H. and F.C. Botha 2001. Down regulating pyrophosphate-dependent phosphofructo-kinase (PFP) in sugarcane. *Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol.* 24 : 592—594.
- Grof, C. 2001. Molecular manipulation of sucrose metabolism. *Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol.* 24 : 586—587.
- Hatch, M.D. and K.T. Glasziou 1963. Sugar accumulation cycle in sugarcane. II. Relationship of invertase activity to sugar content and growth rate in storage tissue of plant grown in controlled environments. *Plant Physiol.* 38 : 344—348.
- Hatch, M.D. 1964. Sugar accumulation by sugarcane inter node : The roll of sucrose phosphate. *Biochem. J.* 93 : 521—526.
- Hawker, J.S. 1985. Sucrose. In *Biochemistry of storage carbohydrates in green plants*. Academic Press, London. 1—51.
- Hesse, H., U. Sonnewald and L. Willmitzer 1995. Cloning and expression analysis of sucrose-phosphate synthase from sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Mol. Gen. Genet.* 247 : 515—520.
- Hubbard, N.L., S.C. Huber and D.M. Pharr 1989. Sucrose phosphate synthase and acid invertase as determinants of sucrose concentration in developing muskmelon (*Cucumis melo* L.) fruit. *Plant Physiol.* 91 : 1527—1534.
- Huber S.C. 1983. Role of sucrose-phosphate synthase in partitioning of carbon in leaves. *Plant Physiol.* 71 : 818—821.
- Huber S.C., P.S. Kerr and T.W. Ruffty 1985. Diurnal changes in sucrose phosphate synthase activity in leaves. *Physiol. Plant.* 64 : 81—87.
- Huber, S.C. and J.L. Huber 1992. Role of sucrose-phosphate synthase in sucrose metabolism in leaves. *Plant Physiol.* 99 : 1275—1278.
- 家坂正光 1989. 沖縄におけるさとうきび作経営の現状と課題. *農業経済論集* 40 : 63—75.
- Kerr, P.S., S.C. Huber and D.W. Israel 1984. Effect of N-source on soybean leaf sucrose phosphate synthase, starch, and whole plant growth. *Plant Physiol.* 75 : 483—488.
- Klann, E.M., R.T. Chetelat and A.B. Bennett 1993. Expression of acid invertase gene controls sugar composition in tomato (*Lycopersicon*) fruit. *Plant Physiol.* 103 : 863—870.
- Klein, R.R., S.J. Crafts - Brandner and M.E. Salvuccib 1993. Cloning and developmental expression of the sucrose-phosphate-synthase gene from spinach. *Planta* 190 : 498—510.
- Krishnamulthi, M. 1987. Sugarcane genetic resources and their utilization through conventional and unconventional approaches. In *Sugarcane Varietal Improvement*. Sugarcane Breeding Institute, Coimbatore. 163—176.
- Lingle S.E. and R.C. Smith 1991. Sucrose metabolism related to growth and ripening in sugarcane internode. *Crop Sci.* 31 : 172—177.
- Lingle S.E. and J.E. Irvine 1994. Sucrose synthase and natural ripening in sugarcane. *Crop Sci.* 34 : 1279—1283.
- 前忠彦 1992. 光合成. 光合成と物質生産. 朝倉書店, 東京. 134—152.
- Matsui, T. and H. Kitagawa 1985. Seasonal changes of activities of invertases in relation to sugar accumulation in sugarcane. *Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi* 32 : 655—660.
- 宮里清松 1986. サトウキビとその栽培. 沖縄県糖業振興協会, 那覇. 1—364.
- Moore, P.H. 1987. Physiological basis for varietal improvement in sugarcane. In *Sugarcane varietal improvement*. Sugarcane Breeding Institute, Coimbatore. 19—55.
- 永富成紀・大城良計・仲宗根盛徳 1984. 南西諸島におけるサトウキビ遺伝質の探索. 第1・2次調査. *沖縄農試報告* 9 : 1—27.
- 永富成紀 1985. 南西諸島におけるサトウキビ遺伝質の探索. 第3次調査. *沖縄農試報告* 10 : 1—24.
- 永富成紀 1988. サトウキビの国内産野生遺伝質の探索と育種利用. *農林水産技術研究ジャーナル* 11 : 18—23.
- 永富成紀 1989. サトウキビの起源と遺伝資源. *農業技術* 44 : 405—408.

- Naidu, K.M. 1987. Potential yield in sugarcane and its realization through varietal improvement. In *Sugarcane Varietal Improvement*. Sugarcane Breeding Institute, Coimbatore. 1—17.
- 野瀬昭博・仲間操・宮里清松・村山盛一 1989. 密植が夏植えサトウキビの乾物生産特性に及ぼす影響. 日作紀 58: 279—289.
- 大賀圭治 1998. 2020 年世界食糧需給予測. 国際農林水産業研究センター, つくば. 1—151.
- Ohyama, A., H. Ito, T. Sato, S. Nishimura, T. Imai and M. Hirai 1995. Suppression of acid invertase activity by antisense RNA modifies the sugar composition of tomato fruit. *Plant Cell Physiol.* 36: 369—376.
- 岡三徳 1990. 島嶼部農業とさとうきび生産. 農林水産技術研究ジャーナル 13: 40—47.
- Ono, K., K. Ishimaru, N. Aoki, S. Takahashi, K. Ozawa, Y. Ohkawa and R. Ohsugi 1999. Characterization of maize sucrose-phosphate synthase protein and its effect on carbon partitioning in transgenic rice plants. *Plant Prod. Sci.* 2: 172—177.
- 小野良孝・中西建夫 1983. 南西諸島におけるサトウキビの生育・収量の季節変化. 第1報 主茎の出葉経過. 日作紀 52: 500—507.
- Oworu, O.O., C.R. MacDavid and D. MacColl 1977a. A comparison of rates of storage of sucrose in eight clones of sugar-cane as measured by sucrose uptake in vitro. *Ann. Bot.* 41: 393—399.
- Oworu, O.O., D. MacColl and C.R. MacDavid 1977b. Anatomy of the storage tissues of sugar-cane in relation to sugar uptake. *Ann. Bot.* 41: 401—404.
- Quintana, M., T. Terauchi, C. Bangwaek and A. Rubio 2000. SPS gene evaluation by RFLP for use in breeding programs to develop high sugar content sugarcane varieties. 育種学研究 2 (別1): 274.
- Rao, J.T. 1987. Sugarcane origin, taxonomy, breeding and varieties. In *Sugarcane Varietal Improvement*. Sugarcane Breeding Institute, Coimbatore. 83—113.
- Rocher, J.P., J.L. Prioul, A. Lecherny, A. Reyss and M. Jousaume 1989. Genetic variability in carbon fixation, Sucrose-P synthase and ADP glucose pyrophosphorylase in maize plants of differing growth rate. *Plant Physiol.* 89: 413—420.
- Sacher, J.A., M.D. Hatch and K.T. Glasziou 1963. Sugar accumulation cycle in sugarcane. III. Physical & metabolic aspect of cycle in immature storage tissues. *Plant Physiol.* 38: 348—354.
- Sakamoto, M., T. Satozawa, N. Kishimoto, K. Higo, H. Shimada and T. Fujimura 1995. Structure and RFLP mapping of rice sucrose phosphate synthase (SPS) gene that is specifically expressed in the source organ. *Plant Sci.* 112: 207—217.
- 島袋正樹 1976. 光利用効率から見たサトウキビ品種の多収性に関する研究. 第1報 サトウキビ品種における個体群吸光係数と生産構造. 熱帯農業 19: 151—155.
- 島袋正樹・津波清一 1976. 重回帰分析法によるサトウキビ品種の産糖量および収量構成要素の解析. 沖縄農試報告 2: 1—4.
- 島袋正樹・比嘉勝也 1977. 光利用効率から見たサトウキビ品種の多収性に関する研究. 第2報 サトウキビ品種における葉面積と収量形質について. 熱帯農業 21: 25—32.
- 島袋正樹・工藤政明 1979. 葉身形質から見たサトウキビ品種の分類. 沖縄農試報告 4: 1—7.
- 島袋正樹・工藤政明・宮城幸照 1980. サトウキビの物質生産に関する研究. 1. サトウキビ夏植における乾物生産と収量成立過程について. 沖縄農試報告 5: 1—15.
- 島袋正樹・工藤政明・宮城幸照 1981. 沖縄におけるサトウキビの物質生産に関する研究. 第2報 サトウキビの太陽エネルギー利用効率の品種間差と生長関数. 熱帯農業 25: 157—162.
- 島袋正樹・工藤政明・玉城光一・宮城幸照 1982. 沖縄におけるサトウキビの物質生産に関する研究. 第3報 サトウキビの乾物生産と最適葉面積について. 熱帯農業 26: 193—197.
- 島袋正樹・最上邦章・杉本明・永富成紀 1986. 南西諸島サトウキビ栽培における太陽エネルギーの利用効率. 第4報 Euの栽培型間差異, 特に春植えと株出しとの差について. 九農研 48: 95.
- 島袋正樹 1997. サトウキビ育種における多収性に関する研究. 沖縄農試報告 19: 1—75.
- 周民臣 1999. 中国砂糖産業: 過去・現在・将来の展望. 海外砂糖情報 (6): 169—173.
- Sonnewald, U., W.P. Quick, E. MacRae, K.P. Krause and M. Stitt 1993. Purification, cloning and expression of spinach leaf sucrose-phosphate synthase in *Escherichia Coli*. *Planta* 189: 174—181.
- Su, L.Y., A.D. Cruz, P.H. Moore and A. Maretzki 1992. The relationship of glyphosate treatment to sugar metabolism in sugarcane: New physical insights. *J. Plant Physiol.* 140: 168—173.
- Sugiharto, B., H. Sakakibara, Sumadi and T. Sugiyama 1997. Differential expression of two genes for sucrose-phosphate synthase in sugarcane: Molecular cloning of the cDNAs and comparative analysis of gene expression. *Plant Cell Physiol.* 38: 961—965.
- 杉本明 1998. サトウキビ: 望ましい未来と育種研究. 農業技術 53: 76—80.
- 杉本明 1999. サトウキビの早期型高糖性品種の育種に関する研究. 沖縄農試報告 22: 1—68.
- 杉本明・氏原邦博・前田秀樹 2000. 南西諸島各地で安定して高糖性を発現するサトウキビ品種に必要な特性. 熱帯農業 44: 238—244.
- 館野宏司・小島睦男 1973. グレインソルガムの乾物生産からみた多収条件の解析. 日作紀 42: 555—559.
- 寺内方克 1996. サトウキビの生産技術開発の動向と海外との研究協力: 遺伝資源の利用と研究協力. 熱帯農業 40: 237—240.
- 寺内方克・松岡誠・小林真・中野寛 1999a. 温度および施肥がサトウキビの生長, スクロース含有率およびインベルターゼ活性に及ぼす影響. 熱帯農業 43: 18—25.
- 寺内方克・松岡誠・小林真・中野寛 1999b. サトウキビの早期高糖性と生長およびインベルターゼ活性との関係. 熱帯農業 43: 271—276.
- 寺内方克・中川仁・松岡誠・中野寛・杉本明 1999c. スイートソルガムとの比較によるサトウキビ初期生長特性の解析. 日作紀 68: 414—418.
- 寺内方克・松岡誠 2000. サトウキビ初期生長特性改善のための形態形質の解析. 日作紀 69: 286—292.
- Terauchi, T., M. Matsuoka, M. Kobayashi and H. Nakano 2000. Activity of sucrose phosphate synthase in relation to sucrose

- concentration in sugarcane internodes, *Jpn. J. Trop. Agr.* 44 : 147—151.
- 寺内方克・M. Quintana・C. Bangwaek 2000. サトウキビのスクロース蓄積とスクロースリン酸シンターゼの関係. *熱帯農業* 44 (別1) : 75—76.
- 寺内方克・松岡誠・W. Ponragdee・平松紀士 2001. サトウキビ初期生育における除けつの効果. *熱帯農業* 45 (別1) : 75—76.
- Tew, T.L. 1987. New varieties. In *Sugarcane Improvement through Breeding*. Elsevier, Amsterdam. 559—594.
- Tobias, D.J., T. Hirose, K. Ishimaru, T. Ishige, Y. Ohkawa, Y. Kano-Murakami, M. Matsuoka and R. Ohsugi 1999. Elevated sucrose-phosphate synthase activity in source leaves of potato plants transformed with the maize SPS gene. *Plant Prod. Sci.* 2 : 92—99.
- Vekataramana, S., K.M. Naidu and S. Singh 1991. Invertases and growth factors dependent sucrose accumulation in sugarcane. *Plant Sci.* 74 : 65—72.
- Vekataramana, S. and K.M. Naidu 1993. Invertases-sucrose relation in young and mature stem of sugarcane. *Phytochemistry* 32 : 821—822.
- Whittaker, A. and F. Botha 1999. Pyrophosphate : D-fructose-6-phosphate 1-phosphotransferase activity patterns in relation to sucrose storage across sugarcane varieties. *Physiol. Plant.* 107 : 379—386.
- Worrell, A.C., J.M. Bruneau, K. Summerfelt, M. Boersig and T. A. Voelker 1991. Expression of a maize sucrose phosphate synthase in tomato alters leaf carbohydrate partitioning. *Plant Cell* 3 : 1121—1130.
- Zhu, Y.J., E. Komor and P.H. Moore 1997. Sucrose accumulation in the sugarcane stem is regulated by the difference between the activities of soluble acid invertase and sucrose phosphate synthase. *Plant Physiol.* 115 : 609—616.

**State of Sugarcane Production and Problems for Sugar Yield Improvement : Takayoshi TERAUCHI\*** (*Okinawa Subtropical Station, Japan International Research Center for Agricultural Sciences, Ishigaki 907-0002, Japan*)