

温帯地域の鹿児島におけるキャッサバの生産性 I. 生育, 乾物生産および収量

南さやか^{1,4)}・薮田伸^{2,5)}・富永克弘³⁾・山本夕菜³⁾・中之内亜紀子³⁾・
壹岐香代³⁾・石川大太郎^{2,6)}・石黒悦爾³⁾・箱山晋³⁾

¹⁾ 元鹿児島大学大学院農学研究科, ²⁾ 元鹿児島連合大学院農学研究科, ³⁾ 元鹿児島大学農学部,

⁴⁾ 出光興産株式会社石炭事業部, ⁵⁾ 鹿児島大学農学部, ⁶⁾ 福島大学食農学類)

要旨: 熱帯・亜熱帯に広く適応し高い生産性を持つキャッサバを, バイオマス資源作物として温帯地域へ導入・利用が可能か否かを知るため, 2007~2009年にブラジル国育成のデンプン含有率が高い品種 IAC-576-70 を鹿児島で圃場栽培し, その生育, 乾物生産の推移と収量を調査した. 年平均気温 18.3℃, 年平均降水量 2280 mm, 冬期に降雪もある鹿児島の気象条件で, 栽培可能期間は4月下旬~12月上旬までの7~8ヶ月間に限られた. 3ヵ年間にわたる最大生産量は全乾物重が 1793 g m⁻², 塊根乾物重が 524 g m⁻², 生鮮塊根収量が 2000 g m⁻² であり, 熱帯地域の植え付け8ヶ月後における収量と同程度の生産であった.

キーワード: 塊根収量, 鹿児島県, 乾物生産, キャッサバ (*Manihot esculenta*), 生育期間.

熱帯アメリカ原産のキャッサバ (*Manihot esculenta* Crantz) は, 降雨不安定な半乾燥・乾燥環境や酸性・低肥沃土等の不良土壌環境でも生産性低下が少ない特性をもつ (El-sharkawy 2004). このため熱帯・亜熱帯地域の, とりわけ小規模農家を中心に栽培され, 主食用, 家畜飼料用, 加工食品やデンプン製造に利用されてきた (IFAD and FAO 2000, El-sharkawy 2004). 近年では糖化用や加工デンプン, アルコール製造などの工業用原料としても注目されている (Adekan 2010, El-sharkawy 2004). キャッサバの塊根は他のイモ類の塊根・塊茎よりもデンプン含有率が高く (Scott ら 2000), 熱帯環境で生産が制限されない条件では, 単位土地面積あたり, 1日あたり太陽エネルギーを炭水化物に変換する潜在能力はトウモロコシ, ソルガム, イネを凌ぐといわれる (Vries ら 1967, El-Sharkawy 2004).

2018年の世界キャッサバ生産量は2億7千万トンを超え, 1961年以降約60年間で収穫面積は2.6倍, 生産量は3.9倍増え, 平均収量も1.5倍向上した (FAO 2020). このように世界的にキャッサバ利用が拡大した背景には, 開発途上の国々や地域・人々の食糧危機回避, 換金作物として小農の収益拡大を目指し, 国際熱帯農業研究センター (CIAT), 国際熱帯農業研究所 (IITA), および関係各国農業研究機関などを軸に地域適応性品種の開発・普及に多大な労資が注ぎ込まれてきた経緯がある (Nassar 2006). アフリカはキャッサバの世界収穫面積の76%を, そして世界生産量の61%を占め, アジア (29%), 中南米 (9%) を凌いでおり, この約60年の間キャッサバが常に他作物生産量をはるかに凌駕している. 2018年では第2位のトウモロコシを2倍強上回る1億6千9百万トンを生産し, 劣悪環境下で生産性を維持できるキャッサバの特性が良く示されている (FAO 2020).

近年はさらにさまざまな辺縁環境下でキャッサバのこの

ような特性を評価する試みも盛んで, 南アジア熱帯地域で水稻栽培後の休閑期を活用したキャッサバ早生品種の生産性を調査した例 (Suja ら 2010), インド高緯度地域で夏の高温・熱波・水ストレスの常襲被害を回避するため冬季に, 早生品種を用いて生産性を調べた研究 (Singh ら 2013), あるいは熱帯・亜熱帯地域の高標高地での生産性比較 (Irikura ら 1979, Manrique 1992) や, 亜熱帯内陸部で冬季にしばしば遭遇する突発型低温被害回避のための抵抗性品種開発 (An ら 2012) などが報告されている.

コストパフォーマンスの高いキャッサバを温帯暖地で栽培できるなら, 我が国で試みられるバイオマスタウンの構築 (内閣府・環境省・経済産業省等関係府省 2002) にも, そのバイオマスエネルギーを活用する資源作物として, 地域再生に重要な役割を果たすと考えられる. 本研究は, 亜熱帯地域辺縁で温帯暖地の鹿児島において, 降雪の恐れがない4月下旬から12月中旬にわたる露地栽培によるキャッサバの生育, 乾物生産量および塊根収量を把握する目的で行ったものである.

材料および方法

1. 供試品種および試験圃場

供試品種は, ブラジル連邦共和国サンパウロ州立カンピーナス農業研究所 (IAC) でデンプン高含有率向けに育成された品種 IAC-576-70 で, 温帯地域でのバイオマス生産に活用するため, 同研究所から供与を受けたものである. 2007年~2009年 (以下 '07年などと略記) にわたり, 鹿児島市喜入町 (31°23'N, 130°32'E) の農家圃場で栽培実験を行った. 圃場は鹿児島湾西岸の傾斜地に位置し, 淡色黒ボク土ないし淡色多湿黒ボク土 (農研機構農業環境変動研究センター 2019) からなる. 20~25 cm の作土層より下層に粘土質の圧密土壌層が在り, 圃場排水性がやや悪かった.

2. 挿し穂苗の準備

鹿児島でキャッサバ露地栽培するには、当年成長した地上部枝条を晩秋～初冬に刈り取り、翌年挿し穂苗を圃場に植え込むまでの冬季低温期を何らかの方法で越冬させなければならない。本実験開始時点で、わが国において翌年の圃場栽培利用に向けたキャッサバの挿し穂苗の越冬・確保手法は定かでなかったため、本実験では年ごとに模索変更して挿し穂苗の越冬・確保を試みた。'07年は無加温温床(縦1.5 m×横2.0 mの底面を深さ約25 cm掘り下げ、底面周囲土壌壁に、径約10 cmで結束した稲藁束を地面30 cm高で縦に並べて囲み、掘り下げた最下層に堆肥を厚さ約10 cm敷き、その上に15 cm土壌を埋め戻した温床、2面)に、2～4芽をもつ約18 cm長の挿し穂苗を20 cm×10 cmの間隔で垂直挿しした。温床全体を厚さ0.05 mmの透明ビニルフィルムで覆った。降霜が予想される夜間はさらにブルーシートで温床を覆った。'08年は2通りの方法を試みた。一方は0.05 mm厚ビニルフィルムで被覆したパイプハウス内に畝長10 m、畝間20 cmで作成した植え溝に、挿し穂苗を10 cm間隔で約5 cmの深さに水平において覆土した。5畝ずつを2つの小型トンネルにしてさらにビニルフィルム被覆した。他方は、晩秋に約150 cm長で採取した枝条20本/束で結束し、ビニルハウス内に約15 cm深で作った溝中に、天地揃えた直立の結束枝条列として並べ、その下部を覆土、安定化させた。更に結束枝条列全体をビニルフィルムで覆った。'09年は'08年の後者、結束枝条を直立に並べ、ビニルフィルムで覆う方式に依った。

'07年および'08年前者の方法のように、予め挿し穂苗長に裁断し、土中に挿すまたは埋めて越冬保存した場合、越冬後期(翌年3～4月)に挿し穂苗木はほとんどの芽の萌芽、発根が見られ、本圃植え付け時に断根損傷・萎凋が生じた。一方、結束枝条の列保存の場合は、越冬後期に枝条頂部で萌芽・伸長したが、枝条の中・下位部の腋芽の萌芽はなく、挿し穂苗長での裁断可能数は多く、効率よく挿し穂苗が確保できた。

3. 栽培管理

'07年は越冬保存した挿し穂苗を4月28日(以下4/28などと略記)に圃場へ移植した。圃場は他作物用の残余肥料が施用量不明のまますでに施され、かつロータリー耕整地済であったため、施肥はしなかった。6.3 m×6.3 mの1区面積に0.9 m×0.9 m(1.23株m⁻²)の栽植密度で植え付けた。4反復で12月中旬まで生育追跡調査をおこなった。

'08年は1区面積、栽植密度を前年同様とし、4/30に植え付けて同年12月中旬まで栽培した。根茎が貯蔵器官となる作物には概してカリウム成分の施用が多いため、サツマイモに用いられる化成肥料(N:P₂O₅:K₂O=8:12:24%)を準用し、38.4 g m⁻²宛て全量元肥で施し、ロータリー耕で整地した。挿し穂苗で越冬保存して移植した区(水平植え区)、および結束枝条列で越冬保存し植え付け前に裁断した挿し穂苗を垂直挿した区(垂直植え区)をそれぞれ3

反復設けた。

'09年は結束枝条保存で越冬させ、植え付け前に裁断し挿し穂苗とした。1区面積7 m×5.5 mとして、1.1 m×0.7 mの栽植密度(1.30株m⁻²)で5/8に3反復で植え付け、12月中旬まで栽培した。施肥は'08年に準じた。

なお、3ヶ年とも台風対策として7月下旬以降、実験区の周囲に高さ1.8 m、径6.6 cmの支柱を立て、地表面から約1.2 mの高さにナイロン製魚網(ラッセル網 N-4 210D×48本、目合い25 mm、市川漁網 KK)を水平に張り、風による障害軽減を図った。伸長している枝条は網目から上方へ通過させた。

4. 植物試料の採取

植物試料の採取は、植え付け約40日後(以後DAP 40などと表記)から概ね月1回の頻度で、降霜前の12月中旬まで計7回行った。1回の採取個体は反復あたり2個体である。これは枝条の越冬保存で十分な挿し穂苗確保ができなかったため、採取個体数を減らして反復を増やしたことによる。また'08に設けた水平植え区、垂直植え区間で不定根の伸長方向に目視による差が認められたが、枝条の伸長、乾物増加などに統計的差は認められなかったため、両区を合わせて6反復として扱った。そのため採取個体数は年により異なった。各年の採取回ごとに6～12個体の草丈測定後、地上部を切断採取し、地下部は株元を中心に'07、'08年は0.9×0.9×0.3 m³、'09年は1.1×0.7×0.3 m³容の土壌から掘り取り採取し、流水で土を洗い流した。採取試料は茎、葉柄、葉身、塊根(径5 mm以上の根)、細根および枯死部に分け、80℃で72時間通風乾燥した。乾燥済み試料はデシケータ中で室温に戻し秤量した。草丈が長くなった生育後半は、各器官の一部試料を通風乾燥し、求めた乾物率に器官別生体重を乗じて器官乾物重とした。また、葉身試料の一部を自動面積計(AAC-400、林電工)で葉面積を測定後、他の試料同様に通風乾燥・秤量して比葉面積を求め、個体生葉重を乗じて個体葉面積を推定し、葉面積指数(LAI)を求めた。なお移植時(DAP 0)の値は挿し穂苗5～10個体から得た。各試料採取日の乾物重、LAI、塊根乾物重から各種成長パラメータ、即ち個体群成長速度(CGR)、純同化率(NAR)、平均葉面積指数(mLAI)および塊根成長速度(TuGR)を算出した。実験結果の統計解析にはエクセル統計2008((株)社会情報サービス)を用いた。

結 果

1. 栽培期間中における各年の気象

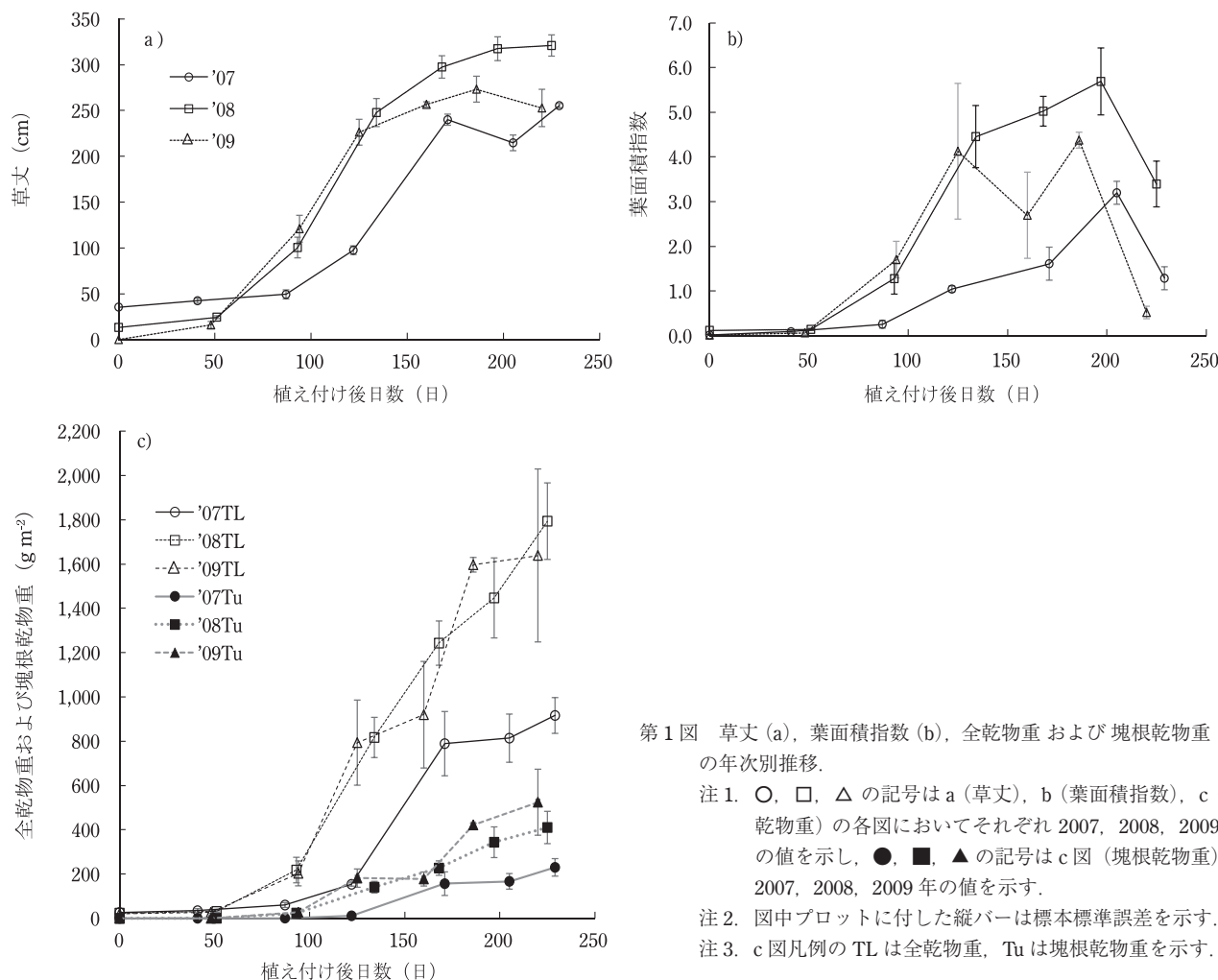
気象庁ホームページの各種データ・資料サイトに掲載されている'07～'09年の4～12月における毎月の日別データ表から、鹿児島観測所の全天日射量と試験圃場に近い喜入観測所の日平均気温、日降水量観測データを用い、各年の生育期間別(I～VI)日平均値および全生育期間の積算値を第1表に示した。

第1表 各年度の試料採取時期、その植え付け後日数（DAP）、および各生育期間の日平均気象要素とそれらの生育期間を通じた積算値。

年度	試料採取の		各生育期間の		各生育期間中における日平均の			各生育期間積算値		
	時期	DAP ^b	略号	日数	全天日射量	気 温	降雨量	全天日射量	日平均気温	降雨量
					s	t	p	S	T	P
					MJ m ⁻² day ⁻¹	℃ day ⁻¹	mm day ⁻¹	MJ m ⁻²	℃	mm
2007	1 ^a	0								
			I	41	19.8	20.9	6.3			
	2	41						813	855	257
			II	46	14.4	26.2	26.5			
	3	87						1473	2061	1476
			III	35	21.8	29.3	5.4			
	4	122						2236	3085	1665
			IV	49	16.9	27.4	2.3			
	5	171						3062	4429	1777
			V	34	13.6	19.0	2.7			
2008	6	205						3525	5074	1869
			VI	24	9.3	12.5	2.0			
	7	229						3747	5373	1916
	全生育期間の日平均				15.9	22.5	7.5			
	1 ^a	0								
			I	51	17.0	21.7	15.5			
	2	51						865	1106	788
			II	42	19.7	28.1	4.7			
	3	93						1691	2286	986
			III	41	18.5	28.5	6.1			
2009	4	134						2450	3456	1237
			IV	34	12.5	24.7	15.1			
	5	168						2875	4295	1750
			V	29	11.2	19.9	3.6			
	6	197						3198	4873	1853
			VI	28	9.5	12.3	3.8			
	7	225						3464	5218	1960
	全生育期間の日平均				14.7	22.5	8.1			
	1 ^a	0								
			I	48	19.6	22.8	5.7			
2009	2	48						941	1094	273
			II	46	17.0	27.8	4.9			
	3	94						1722	2372	501
			III	31	20.1	29.1	0.4			
	4	125						2347	3273	514
			IV	35	15.2	24.4	2.6			
	5	160						2880	4127	604
			V	25	12.8	19.3	1.8			
	6	185						3200	4610	649
			VI	35	8.3	14.7	5.3			
2009	7	220						3492	5123	836
	全生育期間の日平均				15.5	23.0	3.5			

a：各年度の試料採取1回目は植え付け日で、'07年は4月28日、'08年は4月30日、'09年は5月8日である。

b：DAPは植え付け後日数を示す。



第1図 草丈 (a), 葉面積指数 (b), 全乾物重 および 塊根乾物重 (c) の年次別推移.

注1. ○, □, △ の記号は a (草丈), b (葉面積指数), c (全乾物重) の各図においてそれぞれ 2007, 2008, 2009 年の値を示し, ●, ■, ▲ の記号は c 図 (塊根乾物重) の 2007, 2008, 2009 年の値を示す.

注2. 図中プロットに付した縦バーは標準標準誤差を示す.

注3. c 図凡例の TL は全乾物重, Tu は塊根乾物重を示す.

各年の全天日射量および温度は、全生育期間積算値、生育期間別日平均値ともに類似した変化傾向を示した。全天日射量は I~III の生育前半期間に $17\sim 20 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ と高く、IV 以降低下し、VI で $8\sim 9 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ であった。日平均気温は生育期間 I~III で上昇し、III で $28.5\sim 29.3 \text{ }^{\circ}\text{C day}^{-1}$ の最高を示したのち IV 以降次第に低下し、VI で $12\sim 14 \text{ }^{\circ}\text{C day}^{-1}$ となった。降雨量は年により特徴的に変動した。'07, '08 両年の全生育期間積算値は 1900 mm を超え、特に '07 年の II で 26 mm day^{-1} 、'08 年の I, IV で 15 mm day^{-1} と生育初期に多雨の傾向だった。これに対し、'09 年の積算降雨量は前 2 年の半分以下で、各生育期間の降雨も 6 mm day^{-1} 以下と少なかった。

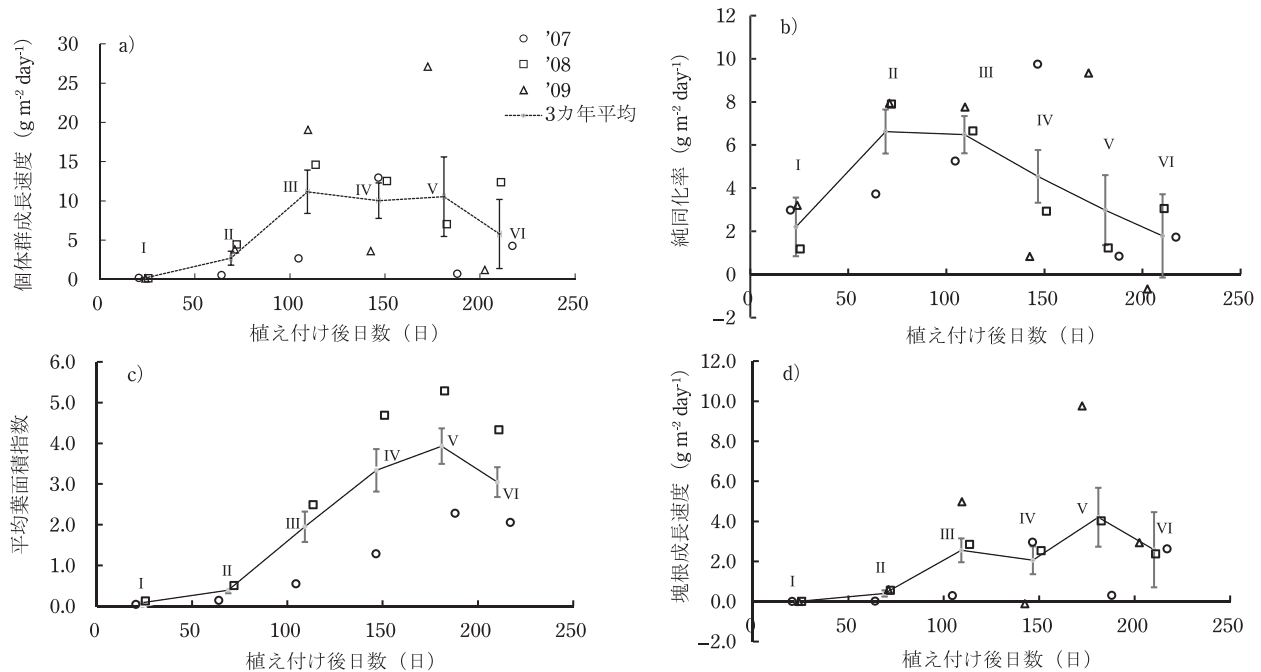
2. 生育の年次間比較

第1図に年度別の草丈、LAI、全乾物重および塊根乾物重の推移を示した。

草丈 (第1図 a) は、'07, '08 年は挿し穂で越冬させたため、本圃移植時すでに新梢が伸びており DAP 50 頃までは $15\sim 40 \text{ cm}$ で推移した。生育中頃から '08, '09 年の草丈が優ったが、最終的な草丈は '07, '09 年の約 250 cm に比べ '08 年は約 300 cm と有意 ($p < 0.05$) に高かった。

LAI (第1図 b) は DAP 50 以降著しく増加した。'07 年は生育期間を通し緩やかに増加し、DAP 200 頃に最大 LAI 3.0 となった。これに対し '08, '09 年の LAI は DAP 130 頃までは '07 年より有意 ($p < 0.05$) に大きく推移したのち、'08 年は DAP 200 頃に最大 LAI 5.7 となり、'07, '09 年を凌駕した。'09 年は DAP 160 頃にイノシシ (残されていた糞で判断) に一部の地下部が被害され、地上部付着のまま地下部が露出して葉の一部が萎れ、LAI は一旦低下した。しかし被害株を埋め戻した後に新葉も展開し、DAP 185 (11 月 9 日) には '07 年と同程度の LAI まで回復した。

全乾物重および塊根乾物重の推移を第1図 c に示した。全乾物重は DAP 50 頃から増加し始めたが、塊根乾物重の増加はそれより 1 ヶ月遅れた。'07 年は II の時期に日平均 26 mm に及ぶ多雨の影響が大きく、全乾物重、塊根乾物重の増加開始が遅れ、その後の乾物増加も他の年より小さかった。全乾物重は DAP 95 以降に、塊根乾物重は DAP 120 以降に大きく増加した。それぞれ '08, '09 両年が '07 年より有意 ($p < 0.05$) に高く推移した。最終全乾物重は '07 年の 916 g m^{-2} に比べ '08, '09 年は各々 $1793, 1638 \text{ g m}^{-2}$ と有意 ($p < 0.01$) に高かった。塊根乾物重も '07 年の 230 g m^{-2} に比べ '08 で 410 g m^{-2} ($p < 0.05$)、'09 年で 524 g m^{-2} (p



第2図 個体群成長速度 (a), 純同化率 (b), 平均葉面積指数 (c) および塊根成長速度 (d) の推移。

注1. 図中の記号は第1図に同じ。

注2. 図中の点線は3ヶ年平均値の推移で、縦バーは標本標準誤差を示す。

注3. 図中のローマ数字は第1表の生育期間の略号に準ずる。

< 0.01) と有意に高かった。'08, と '09 年の全乾物重, 塊根乾物重には差がなかった。'09 年 DAP 160 における全乾物重, 塊根乾物重の低下はイノシシ食害の影響である。

以上, 鹿児島県の自然条件で生育したキャッサバは, 草丈が最大 2.5~3.2 m, LAI が生育後半の DAP 150~200 に 3~5 に達した。生育初期の多雨がなければ概略 1800 g m⁻² の全乾物生産量をもたらした。その 30 % 弱が塊根に蓄えられた。12 月中旬の植え付け 8 ヶ月後における生鮮塊根収量は '07 年に 860 g m⁻², '08 年に 1850 g m⁻², '09 年に 2000 g m⁻² であった。

3. 成長パラメータの推移

第2図は植え付け後日数に対し各年の生育時期別 CGR, NAR, mLAI および TuGR をプロットし, 各生育期間別の3ヶ年平均値の推移を破線で示した。

CGR, NAR, TuGR はいずれも年次変動が大きく年次間で統計的差はないが, 生育期間別の3ヶ年平均値の推移には一定の傾向が窺える。CGR は I~III に, NAR は I~II にそれぞれ増加傾向をしめし, その後低下した(第2図 a, b)。対して TuGR は生育時期別3ヶ年平均値が生育後期ほど大きくなる傾向にあった(第2図 d)。一方, mLAI は3ヶ年とも II 以降に増加し, III~V では '07 年より '08, '09 両年で大きく推移した ($p < 0.01$)。'09 年の V~VI 生育期間における低下はイノシシによる塊根食害の影響である。mLAI の生育期間別3ヶ年平均値は, I, II 間で差はなく, III では I, II より大きく, IV, V, VI では III より大きかった ($p < 0.01$)。

3ヶ年平均値は V で最大 3 だった(第2図 c)。

考 察

新世界の熱帯に起源し, 他の主要作物が生産阻害を受け環境でも耐性を発揮するキャッサバを, 温帯の鹿児島(31°23'N) で初夏~初冬に至る約 8 ヶ月(日平均気温の栽培期間平均値 t_m ; 22.7°C, 年平均気温 t_{am} ; 18.3°C) 露地栽培し, 年による変動はあったがヘクタールあたり換算の全乾物重 9.2~17.9 t ha⁻¹ (生鮮全重 48~70 t ha⁻¹), 塊根乾物重 2.3~5.2 t ha⁻¹ (生鮮塊根重 8~20 t ha⁻¹) を得た(第1図 c)。得られたバイオマス量, 塊根収量に及ぼす生育期間の温度の影響について, 既往の報告と対比しつつ考察する。

低緯度地域のキャッサバ栽培は 12 ヶ月を超え 2 年近くに及ぶ例もあり, それに応じて収量も異なる。Irikura ら(1979) は熱帯のコロンビアで標高により温度環境が変わる 3 地点(ICA, Caribia: 10°46'N, 海拔 35 m.asl, t_{am} 28°C; CIAT: 3°31'N, 1020 m.asl, t_{am} 24°C; Km 27: 3°55'N, 1500 m.asl, t_{am} 20°C) でキャッサバの塊根収量を比較し, 供試 4 品種の植え付け 8 ヶ月後および 16 ヶ月後における生鮮塊根平均収量は 20°C でそれぞれ 9.2, 28.6 t ha⁻¹, 24°C で 17.5, 42.5 t ha⁻¹, 28°C で 17.5, 45.4 t ha⁻¹ という結果を報告した。温度が高いほど, また植え付け後の月数が長いほど塊根収量も高い。彼らはまた t_{am} 28°C の高温環境では植え付け 16 ヶ月後に生鮮塊根重 53~60 t ha⁻¹ と高かった品種群が, t_{am} 20°C の低温環境では 13~33 t ha⁻¹ と劣ったのに比べ, 高温環境下で 13 t ha⁻¹ の極端な低収品種が, 低

温環境下で 40 t ha^{-1} の高収を示した品種があることを指摘し (Irikura ら 1979), 品種の塊根収量と生育温度の要因間に明らかな交互作用があることを認め, それぞれの品種が遭遇してきた環境条件のもとで自然選択の過程を経て, 環境への適応が生じたのであろうと論じた.

Akparobi (2009) もナイジェリアの低緯度高地 (Jos Plateau: $9^{\circ}55'N$, 1280 m.asl , t_m $18 \pm 5^{\circ}C$) で, 高い全乾物重 10 t ha^{-1} が得られた品種の葉の気孔拡散伝導度が高かったことから, その特性は低温抵抗性品種の選抜指標になることを示唆した. さらに低緯度熱帯の南インド, ケララ州 (Sreekariyam: $8^{\circ}28'N$, t_m $28^{\circ}C$) で, 天水稲休閑期にあたる 11 月～翌年 5 月の 7 ヶ月間, 塊根早期肥大型キャッサバ短期品種を栽培比較し, 生鮮塊根収量は品種グループ間で $20.6 \sim 38.3 \text{ t ha}^{-1}$ (塊根乾物重で $6.9 \sim 12.7 \text{ t ha}^{-1}$) に変異したが, 3 倍型品種が高収だったことを報告している (Suja ら 2010). 高緯度の北インド, トランスガンジス平原では, 冬期霜害の危惧, 5, 6 月の熱暑乾燥, その後のモンスーン気候の卓越と気候変動は激しいが, 7 月～翌年 3 月までの冬季を含む 8 ヶ月間にキャッサバ短期品種の栽培試験 (Ludhiana: $30^{\circ}54'N$, t_m $21.5^{\circ}C$) から, 冬期低温は塊根肥大を妨げ, 品種による変異はあるものの全生鮮重 $82 \sim 99 \text{ t ha}^{-1}$, 生鮮塊根重 $25 \sim 41 \text{ t ha}^{-1}$ の生産性が報告されている (Singh ら 2013). ハワイ, マウイ島の 3 標高地 ($21^{\circ}2'N$, 低標高地: 282 m.asl , t_m : $22.4^{\circ}C$, 中標高地: 640 m.asl , t_m : $20.6^{\circ}C$, 高標高地: 1097 m.asl , t_m : $18.1^{\circ}C$) でのキャッサバの生育, 収量比較から, 高標高地では萌芽, 分枝発達, 葉面積展開が遅れ, 径 5 cm 以上の商品塊根収量は低標高地ほど高く, 高標高地では皆無になったと報告されている (Manrique 1992). これら研究例から, 緯度, 標高が高まるとキャッサバ生育期間中の平均気温 (または年平均気温) は低下し, 生産性にも大きく影響していることが分かる.

鹿児島県の自然条件でキャッサバを栽培して得た CGR の変化と日平均気温との関連からキャッサバ生育の低温限界温度を考えてみる. DAP 100 (生育期 III) 頃の日平均気温 $29^{\circ}C$ 前後で高い CGR となった後, しだいに CGR は低下し DAP 180 (V, 10 月中～下旬) 頃の日平均気温 $20^{\circ}C$ 前後 (第 1 表) を境に, その後気温の日変化拡大につれ CGR の変動幅も増大した (第 2 図 a). それに伴う蓄積乾物は地下部貯蔵器官へ多く分配される傾向にあった (表略). DAP 200 (VI, 11 月中旬) 以降は日平均気温が $15^{\circ}C$ 以下となり, 生育は停滞した.

Akparobi (2009) は温度制御下の 昼 $20^{\circ}C$ / 夜 $15^{\circ}C$ で育ったキャッサバ葉の気孔拡散伝導度は 昼 $32^{\circ}C$ / 夜 $22^{\circ}C$ における値より低く, 昼 $15^{\circ}C$ / 夜 $10^{\circ}C$ では供試したキャッサバの全系統が枯死したことを報告している. Imai ら (1983) も異なる温度設定の人工気象室でキャッサバを 40 日間育成し, 昼 $23^{\circ}C$ / 夜 $18^{\circ}C$ の低温条件では相対成長率, 葉面積成長速度, 純同化率などが顕著に抑制されたことを報告している. Irikura ら (1979) はキャッサバ生育の低温限界は

日平均気温 $18 \sim 20^{\circ}C$ 近辺にあり, それより低い温度では正常な生育は難しく, 著しく収量は低下すると述べており, 本研究でも概ねこれら既往の報告と同様の結果となった.

温帯の鹿児島では盛夏を含む 8 ヶ月のキャッサバ栽培可能期間の日平均気温平均値は t_m $22.7^{\circ}C$, 年平均気温 t_{am} $18.3^{\circ}C$ であり, キャッサバ生育温度の低温限界にほぼ匹敵する. 生鮮塊根収量 $8 \sim 20 \text{ t ha}^{-1}$ という本研究結果は, 栽培期間に最寒月を含む低緯度のインド, ケララ州 (t_m $28^{\circ}C$) における塊根収量 (Suja ら 2010) や高緯度のパンジャブ州 (t_m $21.5^{\circ}C$) における塊根収量 (Singh ら 2013) の $1/3 \sim 1/2$ 程度だった. パンジャブ州の研究地点は本研究地点より緯度がわずかに $0^{\circ}30'N$ 低いに過ぎないが, たとえ年間気候変化が大きいとはいえ, 最寒月を含めたキャッサバ栽培期間の温度が鹿児島より高いことがキャッサバ生産には有利といえる.

本研究の塊根収量は, ナイジェリアの低緯度高地での値 (Akparobi, 2009), およびコロンビアの標高 $1,000 \sim 1,500 \text{ m}$ の中・低温地における植え付け 8 ヶ月後の値 (Irikura ら 1979) に近い. これらの報告例と比べると, 本研究の塊根収量がとりわけ低いわけではなく, 鹿児島の生育環境下では概ね妥当な収量といえよう. 箕田ら (2013) も鹿児島指宿でキャッサバ 3 系統の生育型と個体の乾物重および塊根乾物重の推移を比較し, 7 ヶ月の生育期間において生鮮塊根収量に系統間差はなく概ね 30 t ha^{-1} と推定している. 彼らの報告では本研究より好結果が得られているが, 温帯地域の暖地でのキャッサバ露地栽培試行例 (Minami ら, 2007) も含めて, 温帯暖地でキャッサバ露地栽培の可能性を支持している.

低温の季節に向かうにつれキャッサバの蓄積同化産物が地下器官へ移行する傾向については, Keating ら (1982b) もオーストラリア, クィンズランド南東部 ($27^{\circ}37'S$) で同様の観察結果を報告している. ただクィンズランドでは低温期に落葉した個体を圃場で維持しても, 低温期が過ぎると新葉が萌芽・展開し正常な生育が回復する (Keating ら 1982b). しかし, 鹿児島では 12 月以降に自然条件の圃場に置いた個体は, 冬季の日最低気温の月平均値が $5^{\circ}C$ まで低下する 1 月下旬には地上部が枯死し, 地下部塊根も腐敗して越冬できなかった.

年によって変動するが, 鹿児島でのキャッサバの生育は最終草丈が $250 \sim 300 \text{ cm}$ (第 1 図 a), 最大 LAI は $3 \sim 5.6$ (第 1 図 b), CGR は 8 月中旬～10 月の高温時に最大 $12 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ (第 2 図 a) となった.

キャッサバの CGR に関しては, Hobman ら (1987) による植え付け 13.5 ヶ月後の $11 \sim 15 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, Hammer ら (1987) による植え付け 13 ヶ月後の $20 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ および植え付け 16～20 ヶ月後の $14 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, Keating ら (1982a) による植え付け 8 ヶ月後の $23.8 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, Suja ら (2010) による早期成長型短期品種の $15.5 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ および晩期成長型短期品種の $26.4 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ などが報告されている.

低緯度で、植え付け後日数が長い条件で CGR の値が概して高い傾向にある。本研究の最大 CGR は既往の報告例の低い値に類するが、おそらくは鹿児島の緯度 (31°23'N) および圃場の排水不良が影響していたと思われる。Maduakor (1993) は、圧密化した土壤条件では蓄積同化産物の多くが優先的に地上部成長に分配されて葉面積は増加するが、貯蔵根の生産効率は低下することを報告している。

本研究の収穫指数は3ヶ年平均で概ね0.3で良好とは言えなかった。これは生育期間が7ヶ月と短いことに加え、生育初期の多雨、圃場の排水不良などが地下部生育を抑制したと考えられる。Hammer ら (1987) は多雨のサウスジョーンストンと少雨のクールムでキャッサバの乾物生長を比較し、最大乾物重に達した時点での地下部乾物重の占める割合が前者の多雨地で低く、生育後期には塊根腐敗も生じ、収穫指数が低下したことを報告している。

以上のことから元来熱帯環境に適するキャッサバは、温帯に属する鹿児島の冬季自然条件では越冬できないため、その栽培可能期間は5月～11月の7ヶ月程度であり、その期間の前後を幾分延長できたとしても、せいぜい8ヶ月程度と考えられる。

太陽エネルギーを炭水化物に変換する能力が高いと言われるキャッサバの特性 (Vries ら 1967) を考えると、単位土地面積あたり炭水化物の生産性は、鹿児島県のサツマイモ平均収量 2.3 kg m^{-2} (農林水産省 2019) に遜色ない能力を持つといえよう。近年注目されている、バイオマスエネルギーを利活用するカーボンニュートラルな社会 (内閣府・環境省・経済産業省等関係府省 2002) の実現にも有力なバイオマス資源作物となる可能性は大きい。ただ、用いた品種のデンプン含有率は高い部類に属するが、アミロース含有率が高いため工業的利用に不向きという指摘もあり (Schmitz ら, 2017)、低温抵抗性品種や生産性の高い短期品種の開発・導入なども考慮した適合品種選択も重要な要素であろう。

謝辞：供試品種の分譲・供与に関してはサンパウロ州立カンピーナス農業研究所育種部職員の方々、ならびにサンパウロ州立大学ボツカツ農科大学の Dr. S. J. Bicudo, Dr. J. Nakagawa 両教授から懇篤なご協力を賜った。また本実験遂行に当たっては永野昭宣氏ならびにご家族の皆様から多大なご支援ご協力を賜った。更に本稿取り纏めに際しては明治大学名誉教授今井 勝博士から貴重なご助言と激励を賜った。上記の方々に心より感謝の意を表し厚くお礼申し上げます。

引用文献

- Adelekan, B.A. 2010. Investigation of ethanol productivity of cassava crop as a sustainable source of biofuel in tropical countries. *Afr. J. Biotech.* 9: 5643-5650.
- Akparobi, S.O. 2009. Screening of low temperature tolerance on cassava genotypes according to stomatal conductance. *Afr. Jour. Pl. Sci.* 3: 117-121.
- An D., Yang J. and Zhang P., 2012, Transcriptome profiling of low temperature-treated cassava apical shoots showed dynamic responses of tropical plant to cold stress. *BMC Genomics*, volume13: Article number:64. <http://www.biomedcentral.com/1471-2164/13/64> (2020/02/15 閲覧).
- El-Sharkawy, M. A., 2004. Cassava biology and physiology, *Pl. Molec. Biol.* 56, 481-501.
- FAO 2020. FAOSTAT databases, Crops (Production), Last update, February 6, 2020, <http://faostat.fao.org>. (2020/2/15 閲覧).
- Hammer, G.L., Hobman, F.R. and Shepherd, R.K. 1987. Effects of planting time and harvest age on cassava (*Manihot esculenta*) in Northern Australia. I. Crop growth and yield in moist environment. *Expl. Agric.* 23, 401-414.
- Hobman, F. R., Hammer, G. L. and Shepherd, R.K. 1987. Effects of planting time and harvest age on cassava (*Manihot esculenta*) in northern Australia. II. Crop growth and yield in a seasonally-dry environment. *Expl. Agric.* 23, 415-424.
- IFAD and FAO 2000. The World Cassava Economy: Facts, trends and outlook. International Fund for Agricultural Development/Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. 1-41.
- Imai, K., Yoshida, T., Takahashi, M., Kanda, A. and Murata, Y. 1983. Effect of temperature on dry matter production in young plants of cassava and rice. *Jpn. J. Trop. Agr.*, 27, 107-113.
- Irikura, Y., Cock, J.H. and Kawano, K., 1979. The physiological basis of genotype- temperature interactions in cassava. *Field Crops Res.* 2, 227-239.
- Keating, B.A., Evenson, J.P. and Fukai, S. 1982a. Environmental effects on growth and development of cassava (*Manihot esculenta* Crantz.). II. Crop growth rate and biomass yield. *Field Crops Res.* 5, 283-292.
- Keating, B.A., Evenson, J.P. and Fukai, S. 1982b. Environmental effects on growth and development of cassava (*Manihot esculenta* Crantz.). III. Assimilate distribution and storage organ yield. *Field Crops Res.* 5, 293-303.
- Maduakor, H.O. 1993. Effect of soil compaction on leaf, stem and fibrous root growth of cassava (*Manihot esculenta* Crantz). *Soil Tillage Res.* 26, 69-78.
- Manrique, L.A. 1992. Growth and yield performance of cassava grown at three elevations in Hawaii. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 23, 129-141.
- Minami, S., Yabuta, S., Matsumoto, S., Fukudome, Y., Taura, I., Kawamitsu, Y., Imai, K. and Hakoyama, S. 2007. Cassava cultivation in a temperate region – A case study in Kagoshima, southern part of Japan. A paper presented at XII Congresso Brasileiro da Mandioca held at Paranavai-PR, Brazil on 23-26, Oct., 2007.
- 箕田佐友里・遠城道雄・朴柄宰. 2013. 鹿児島県におけるキャッサバ3系統の生育および草型並びに収量の比較. *鹿児島農学雑誌* 35: 1-6
- Nassar, N.M.A. 2006. Cassava in South America, Brazil's contribution and the lesson to be learned from India. *Genet. Mol. Res.* 5, 688-695.
- 農研機構農業環境変動研究センター 2019. 日本土壌インベントリ. <https://soil-inventory.dc.affrc.go.jp> (2020/02/15 閲覧).
- 内閣府・環境省・経済産業省等関係府省 2002. バイオマス・ニッポン総合戦略骨子. www.kantei.go.jp/jp/singi/bt/dai2/2siryou11-2.pdf (2020/02/15 閲覧).

農林水産省 2019. 平成 30 年産作物統計 (普通作物, 飼料作物, 工芸作物), 統計表 4 平成 30 年産かんしょ収穫量 (全国農業地域別・都道府県別).

Schmitz, G.J.H., GonScalves Peroni-Okita, F.H., Oliveira do Nascimento, J.R., Campanha, R.B., Valle, T.L., Franco, C.M.L., and Cordenunsi-Lysenko, B.R. 2017, Selected physicochemical properties of starches isolated from ten cassava varieties reveal novel industrial uses. *Starch/Stärke* 2017, 69, 1600272 (1 - 9).

Scott, G.J., Rosegrant, M.W. and Ringler, C. 2000. Roots and Tubers for the 21st Century: Trends, projections, and policy options. Food, Agriculture, and the Environment Discussion Paper 31. International Policy Research Institute, Washington, D.C., U.S.A./Centro

Internacional de la Papa, Lima, Peru. 1-64.

Singh, H., D.S. Khurana, S.K. Chakrabarti, A. Mukherjee, M. Nedunchezhiyan 2013. Performance of Short Duration Cassava in the Trans-Gangetic Plain Region of Punjab. India. *Jour. Root Crops* 39, 234-237.

Suja, G., John, K.S., Sreekumar, J. and Srinivas, T. 2010. Short-duration cassava genotypes for crop diversification in the humid tropics: Growth dynamics, biomass, yield and quality. *J. Sci. Food Agric.* 90, 188-198.

Vries, C.A. de, J.D. Ferwerda, and M. Flach. 1967. Choice of food crops in relation to actual and potential production in tropics. *Netherlands J. of Agric. Sci.* 15, 241-248.

The Crop Productivity of Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) in Kagoshima, Prevailing a Temperate Zone in East Asia I. Growth, Dry Matter Production and Yield : Sayaka MINAMI^{1, 4)}, Shin YABUTA^{2, 5)}, Katsuhiko TOMINAGA³⁾, Yuuna YAMAMOTO³⁾, Akiko NAKANOCHI³⁾, Kayo IKI³⁾, Daitaro ISHIKAWA^{2, 6)}, Etsuji ISHIGURO³⁾ and Susumu HAKOYAMA³⁾ (¹⁾Formerly, Grad. Sch. of Agric. Sci., Kagoshima Univ.; ²⁾Formerly, United Grad. Sch. of Agric. Kagoshima Univ.; ³⁾Formerly, Fac. Agric., Kagoshima Univ.; ⁴⁾Idemitsu Kosan Co. Ltd., Coal Bus. Dept.; ⁵⁾Fac. Agric., Kagoshima Univ., Kagoshima 890-0065, Japan; ⁶⁾Fac. Food and Agric. Sci., Fukushima Univ.)

Abstract : Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) is highly productive in the tropics and sub-tropics, including marginal conditions. A high starch content cultivar IAC-576-70, selected at the Instituto Agronômico de Campinas, São Paulo, Brazil, was grown in a field in Kagoshima Prefecture during cropping seasons from 2007 to 2009, to determine its capability as a biomass source even in a temperate region of southwest Japan. At the experimental site, the annual mean temperature was 18.3°C with several incidences of frost in winter and annual mean rainfall of 2280 mm (for years from 1971 to 2000). Under these conditions, cassava grew for 8 months from late April to mid-December, and produced a total dry weight of 1793 g m⁻², tuberous root dry yield of 524 g m⁻² and tuberous root fresh yield of 2000 g m⁻². The yield in Kagoshima was equivalent to that at 8 months after planting in tropical regions.

Key words : Dry matter production, Growth period, Kagoshima Prefecture, *Manihot esculenta*, Tuberous root yield.