

## さとうきび収穫機の開発に関する基礎的研究

蔗茎の力学的特性について

宮部 芳照

(農業機械学第一研究室)

昭和55年8月8日受理

### Fundamental Studies on the Development of a Harvesting Machine for Sugar Cane

On the Mechanical Properties of Sugar Cane Stalks

Yoshiteru MIYABE

(Laboratory of Agricultural Machinery I)

#### 緒 言

最近、内外において農産物の力学的特性に関する研究はかなり進められ来ているが<sup>(1,2)</sup>、農産物には一般の工業材料に見られるような等方性物質として見なされるものは極めて少ない。また、同じ農産物の中でもその形状、生育程度等にかかなり個体差があり、その特性を明らかにするための計測法も未だ統一されたものがないのが現状である。しかしながら、これらの力学的特性を明らかにすることは農産物の収穫調製、運搬作業の機械化を計る上にも重要なことである。

ここでは農産物の中でも、かなり内部細胞組織に非等方性が強いと考えられる蔗茎について、その物性値を表わすに重要なヤング率およびポアソン比について測定し、さとうきびの収穫調製作業機械開発の基礎資料にするものである。

#### 材料および方法

##### 1. 供試材料

供試したさとうきびは、ほぼ平均的な生育状態を示す株から最長あるいはそれに準ずるものを選び、地際から刈取ったもので、その条件は Table 1 に示すとおりである。また、原料茎とは展開葉の上部から6枚

Table 1. Experimental material

Variety	N: Co, 310		Top	73.7
Growing district	Campus farm, Kagoshima univ.		Stem	Mid 71.9
Planting date	Mar.	1977	Root	70.5
Harvesting date	Jan.	1979	Moisture content (wet base) (%)	Top 74.6
No. of harvesting time	1		Leaf	Mid 41.0
Planting distance (cm)	30		Root	8.3
Row spacing width (cm)	120		Diameter of stem (cm)	Top 2.2
Plant height (cm)	340			Mid 2.7
Plant weight (g)	925			Root 2.9
Mature cane length (cm)	178		Hardness of stem (kg/cm <sup>2</sup> )	Top 320.5
Mature cane weight (g)	720			Mid 465.3
No. of green leaf (leaf/stem)	11			Root 618.7
Yield (ton/10a)	8.0		Node distance (cm)	Top 12.0
	Top	17.8		Mid 13.8
Brix (%)	Mid	19.5		Root 14.2
	Root	20.0		

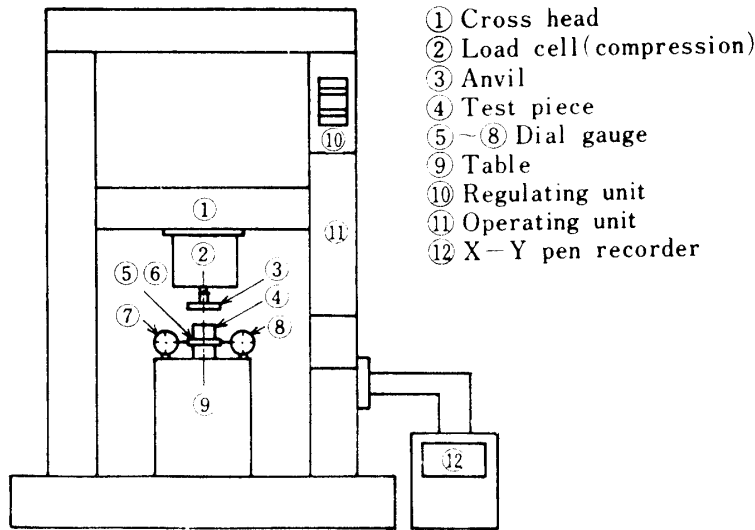


Fig. 1. Measuring apparatus.

目節位で切断した下部茎を指し、数値は材料の中から無作為に抽出した50本の平均で表わした。

## 2. 測定装置および方法

一般に農産物を縦軸方向に圧縮荷重を加えた場合、圧縮荷重と変形量はある範囲内ではほぼ直線比例し、その後、直線部分が失われる屈曲点、すなわち内部組織細胞が損傷を受け始める点 (bioyield point) が現われるものがあり、また更に荷重を増加させて行くと内部組織細胞が破壊する点 (rupture point) に達するとされている。この圧縮荷重 (応力) - 変形量曲線から比例限度内において農産物の縦弾性係数 ( $E$ ) を求めることが出来る。次に、縦軸方向には縦ひずみ (縮小) が、またこれと直交する横軸方向には横ひずみ (膨張) が生じることになり、比例限度内においてポアソン比 ( $\nu$ ) を求めることが出来る。Fig. 1 は本実験に用いた測定装置である。負荷方法にはいろいろな方法があるが、ここでは万能引張圧縮試験機 (新興通信工業, TOM/200D型) のクロスヘッドに圧縮用ロードセル (新興通信工業, TC-2型, 容量 500kg, 精度フルスケールの  $\pm 0.5\%$ ) を装着し、これに Fig. 2 に示す圧縮用鋼製平板 (縦 $\times$ 横, 50mm $\times$ 50mm), 鋼製プランジャ (直径 3.0mm, 長さ 15.0mm) をそれぞれ取付け、あらかじめ調製された試料に圧縮荷重を圧縮速度 5mm/min (一定) で加えた。圧縮荷重はロードセルを介して X-Y ペンレコーダ (新興通信工業, AS14型) に自記させた。ペンレコーダの記録紙送り速度は 100 mm/min とし、試料の縦軸方向の圧縮変位量は記録紙上から読取り、縦ひずみを算出した。

また、試料の横軸方向の膨張変位量の測定には Fig.

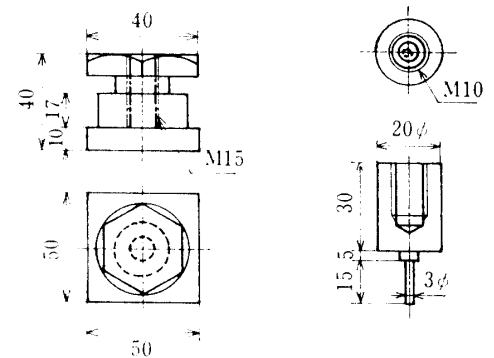


Fig. 2. Compression anvil and plunger.

3 に示すように、試料の縦軸長さ中央部に、4 個のダイヤルゲージを試料に直角にそれぞれ水平に  $90^\circ$  間隔で正確にセットし、生物降伏点と見なされる比例限度付近まで縦軸方向の圧縮変位量 0.2mm 毎に 4 方向のダイヤルゲージで、それぞれ同時に横軸方向変位量を読取り、横ひずみを算出した。

次に、試料は原料茎中央部位の節間中央部を Fig. 4 に示すように、表皮を含めた通常の状態のものを長さ 40mm に切断したものと、表皮を除いた髓部だけのものを円柱型 (長さ 30mm, 直径 15mm) に成形した 2 種類を供試した。なお、試料の調製に当っては圧縮試験の場合、一般に材料の細長比は 1~3 に採られているので、本実験でもこれを考慮した。また、試片両端部がそれぞれ平行断面になるように鋭利なナイフで注意深く切断し、圧縮平板およびプランジャ面にはワセリンを薄く塗布して試料との接触面の摩擦を出来るだけ少なくした。また、蔗茎の内部細胞組織は方向性がかなりあると考えられるので圧縮方向は Fig. 4 に示す

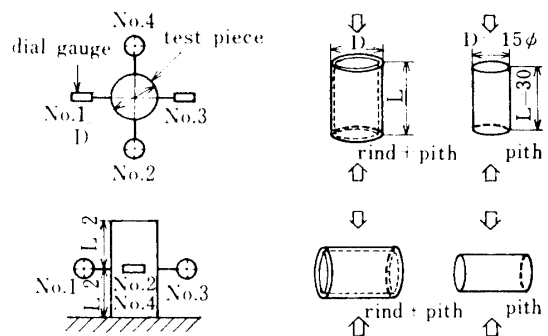


Fig. 3. Setting position of dial gauge. Fig. 4. Compressing direction of test piece.

ように、前述の2種類の試料ともに茎長方向とそれに直交する茎径方向の2方向にとった。

結果および考察

Fig. 5 は試料に圧縮荷重を加えた場合の X-Y ペンレコーダに記録された圧縮荷重(外力) - 変形量曲線の1例を示すものである。この曲線形状は試料表皮の有無、或いは圧縮方向の違いにかかわらず現われる代表的な記録例である。ここでA点が前述した生物降伏点であり、B点が破壊点であると見なされる。

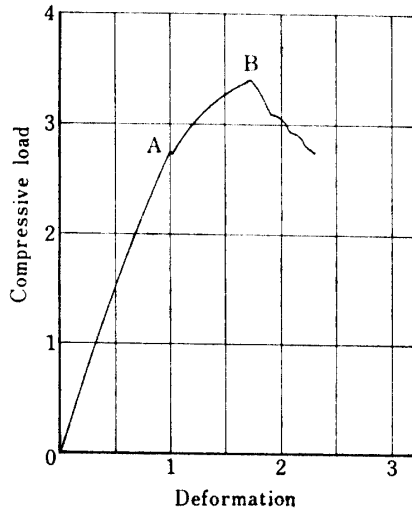


Fig. 5. Load-deformation diagram of sugar cane stalk.

本実験では圧縮荷重と変形量が直線比例しているA点までを比例限度内として、工学ひずみと外力とを実測したが、これは他の農産物の縦ひずみ(工学ひずみ)に比してかなり小さい範囲にあり、これより原料茎中央部位のヤング率、ポアソン比を算出した。Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9 は縦軸に応力、横軸に圧縮

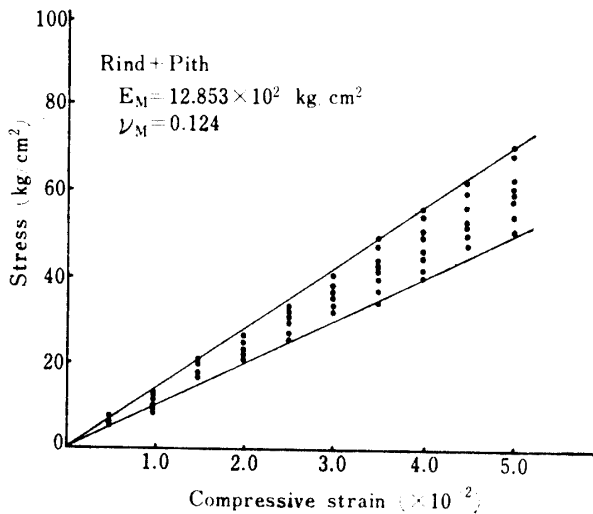


Fig. 6. Relation between stress and compressive strain loaded in the longitudinal direction.

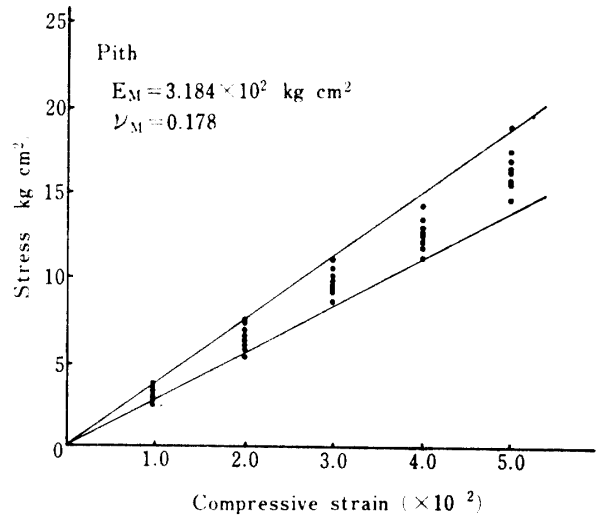


Fig. 7. Relation between stress and compressive strain loaded in the longitudinal direction.

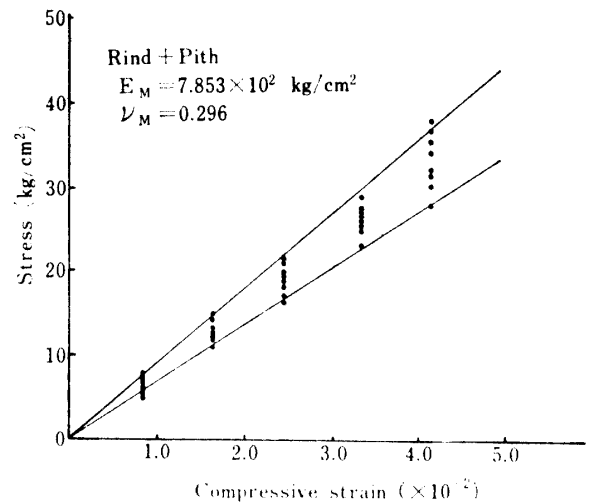


Fig. 8. Relation between stress and compressive strain loaded in the cross sectional direction.

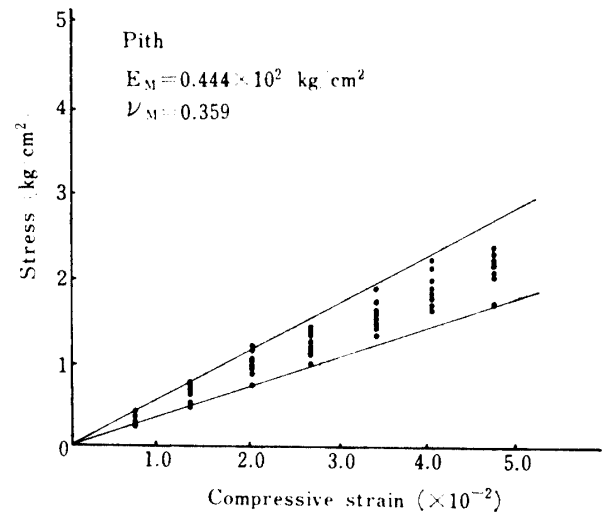


Fig. 9. Relation between stress and compressive strain loaded in the cross sectional direction.

(縦) ひずみをとった応力ひずみ線図とそのばらつきの範囲を示したものである。

その結果、圧縮方向が茎長方向の場合、Fig. 6, Fig. 7 に示すように、表皮付き蔗茎のヤング率  $E$  は  $9.784 \sim 14.241 \times 10^2 \text{kg/cm}^2$  であり、平均値  $E_M = 12.853 \times 10^2 \text{kg/cm}^2$  (標準偏差  $\sigma = 89.5 \text{kg/cm}^2$ ) であった。また、表皮を除いた髓部のみ蔗茎の  $E$  は  $2.238 \sim 3.738 \times 10^2 \text{kg/cm}^2$ ,  $E_M = 3.184 \times 10^2 \text{kg/cm}^2$  ( $\sigma = 29.0 \text{kg/cm}^2$ ) を示した。次に、茎径方向圧縮の場合、Fig. 8, Fig. 9 に示すように、表皮付き蔗茎の  $E$  は  $6.293 \sim 9.375 \times 10^2 \text{kg/cm}^2$ ,  $E_M = 7.853 \times 10^2 \text{kg/cm}^2$  ( $\sigma = 48.3 \text{kg/cm}^2$ ) であり、また、髓部のみ蔗茎の  $E$  は  $0.345 \sim 0.593 \times 10^2 \text{kg/cm}^2$ ,  $E_M = 0.444 \times 10^2 \text{kg/cm}^2$  ( $\sigma = 7.47 \text{kg/cm}^2$ ) であった。

以上のように、蔗茎のヤング率は表皮の有無によって差があり、表皮付き蔗茎は髓部のみのものに比べて、圧縮方向が茎長方向の場合、平均値で約4倍、茎径方向の場合で約18倍の高い値を示した。また、圧縮方向の違いでは表皮付き、髓部のみのものいずれの蔗茎の場合でも茎長方向に圧縮した方が茎径方向圧縮の場合より高い値を示しており、平均値で1.6~7.2倍の値を示した。このように蔗茎内部には茎長方向に強い内部組織が存在し、方向性がかなりあることが明確にされた。また、これらの値を他の農産物と比較してみると、例えばカキ ( $95.1 \text{kg/cm}^2$ )、サツマイモ ( $50 \sim 61 \text{kg/cm}^2$ )、ナシ ( $43.4 \text{kg/cm}^2$ )、パレイシヨ ( $24 \sim 33 \text{kg/cm}^2$ )<sup>3)</sup>などに比べて、髓部のみ蔗茎(茎径方向圧縮)は近い値を示しているが、他はかなり高い値であることがわかる。

次に、ポアソン比については Fig. 10, Fig. 11, Fig.

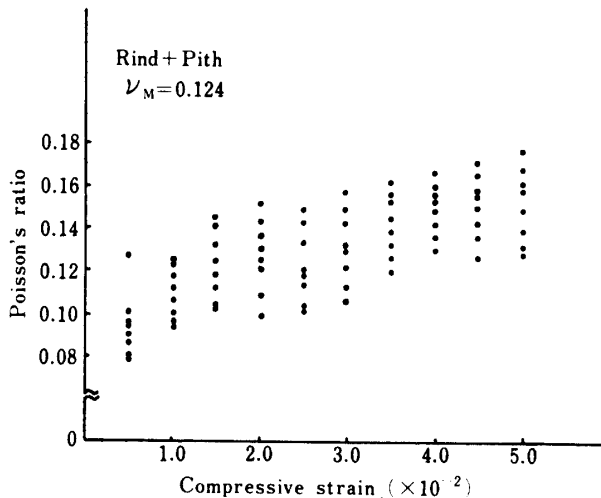


Fig. 10. Relation between Poisson's ratio and compressive strain loaded in the longitudinal direction.

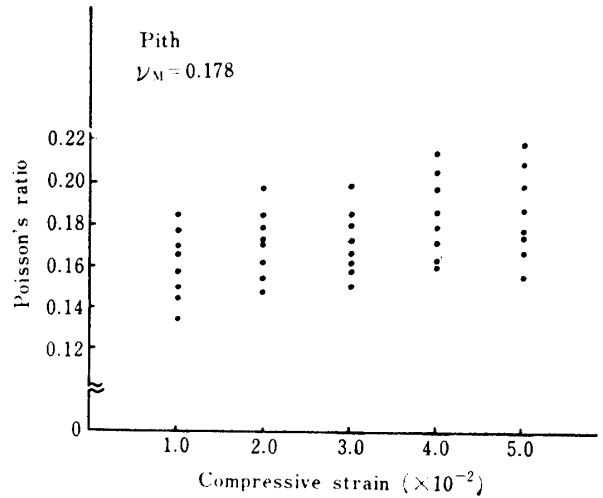


Fig. 11. Relation between Poisson's ratio and compressive strain loaded in the longitudinal direction.

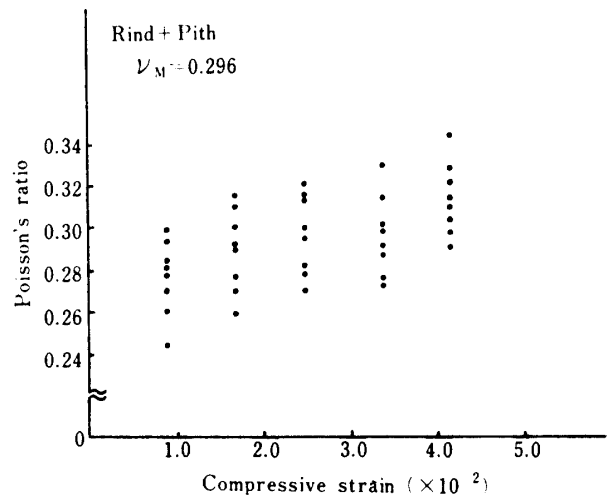


Fig. 12. Relation between Poisson's ratio and compressive strain loaded in the cross sectional direction.

12, Fig. 13 に、それぞれ横軸に縦ひずみ、縦軸にポアソン比をとって示すと、いずれの場合においてもポアソン比はその値にかなりのばらつきがあり、圧縮方向が茎長方向の場合、Fig. 10, Fig. 11 に示すように、表皮付き蔗茎のポアソン比  $\nu$  は  $0.080 \sim 0.178$  の範囲にあり、平均値  $\nu_M = 0.124$  ( $\sigma = 0.023$ ) で、また髓部のみ蔗茎の場合、 $\nu$  は  $0.135 \sim 0.220$ ,  $\nu_M = 0.178$  ( $\sigma = 0.020$ ) であった。次に茎径方向圧縮の場合は Fig. 12, Fig. 13 に示すように、表皮付き蔗茎の  $\nu$  は  $0.245 \sim 0.342$ ,  $\nu_M = 0.296$  ( $\sigma = 0.021$ ) であり、髓部のみ蔗茎の  $\nu$  は  $0.310 \sim 0.418$ ,  $\nu_M = 0.359$  ( $\sigma = 0.022$ ) であった。

以上のように、蔗茎のポアソン比は圧縮方向がいずれの場合においても、髓部のみ蔗茎の方が表皮付きに

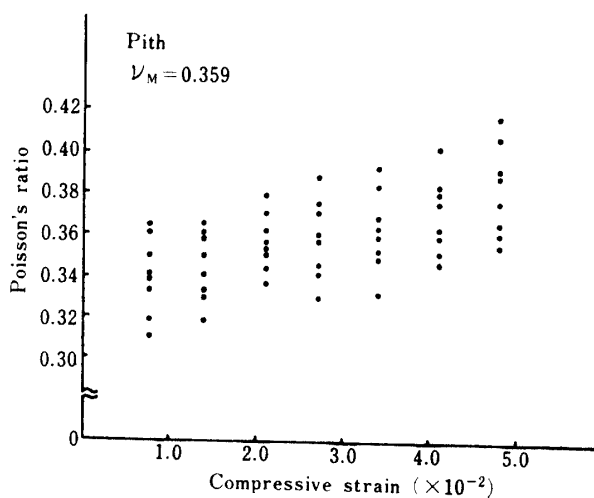


Fig. 13. Relation between Poisson's ratio and compressive strain loaded in the cross sectional direction.

比べて大きな値を示し、また圧縮方向の違いでは、茎径方向圧縮の方が茎長方向の場合より表皮付き無し

いずれの場合でも約 2.0~2.4 倍の値を示した。このように蔗茎表皮の有無、圧縮方向の違いによってポアソン比の値にかなり差があることが判明した。また、これを他の農産物と比較してみると、例えば、ニンジン (0.378~0.482)、サツマイモ (0.414~0.476)、パレイシヨ (0.430~0.495) などに比べて蔗茎のポアソン比はいずれの場合も小さな値を示した。Table 2 は以上の実測値をひとまとめたものである。また、Table 3 に表皮付き蔗茎の茎長方向圧縮の場合のヤング率およびポアソン比の実測例を示しておく。

一般に農産物の力学的特性を明らかにするには産物の形状、大きさ、成熟程度などの違いによる個体差のみならず、粘弾性的特性を有し、更には非等方性物質と見なされるものが多いことから非常に難しいとされているが、その中でも蔗茎の場合はこれらの諸条件が複雑に絡み、その物性値を明らかにすることをより困難なものにしている。本実験で得られた値にもかなりのばらつきはあるが、蔗茎の物性値の一つとしての

Table 2. Young's modulus and Poisson's ratio of sugar cane stalks

Compressing method	Test piece	Young's modulus $E(\times 10^2 \text{kg/cm}^2)$				Poisson's ratio $\nu$			
		Min.	Max.	Mean	S.D.	Min.	Max.	Mean	S.D.
Longitudinal direction	Rind+Pith	9.784	14.241	12.853	0.895	0.080	0.178	0.124	0.023
	Pith	2.238	3.738	3.184	0.290	0.135	0.220	0.178	0.020
Cross sectional direction	Rind+Pith	6.293	9.375	7.853	0.483	0.245	0.342	0.296	0.021
	Pith	0.345	0.593	0.444	0.075	0.310	0.418	0.359	0.022

Table 3. Example of Young's modulus and Poisson's ratio of sugar cane stalks (rind+pith)

$L$ (mm)	$D_1$ (mm)	$D_2$ (mm)	$\Delta L$ (mm)	$\Delta D_1$ (mm)	$\Delta D_3$ (mm)	$\Delta D_2$ (mm)	$\Delta D_4$ (mm)	$\Delta L/L$ ( $\times 10^{-2}$ )	$F$ (kg)	$E^{*1}$ ( $\times 10^2 \text{kg/cm}^2$ )	$\nu^{*2}$
40.0	21.5	22.1	0.2	0.01	0.00	0.00	0.01	0.5	23.0	12.324	0.092
40.0	21.5	22.1	0.4	0.01	0.01	0.01	0.02	1.0	45.0	12.056	0.114
40.0	21.5	22.1	0.6	0.02	0.01	0.02	0.03	1.5	68.5	12.235	0.122
40.0	21.5	22.1	0.8	0.03	0.02	0.02	0.04	2.0	100.0	13.396	0.126
40.0	21.5	22.1	1.0	0.03	0.03	0.03	0.04	2.5	110.5	11.842	0.119
40.0	21.5	22.1	1.2	0.05	0.04	0.03	0.05	3.0	140.5	12.547	0.130
40.0	21.5	22.1	1.4	0.07	0.06	0.03	0.05	3.5	170.0	13.013	0.138
40.0	21.5	22.1	1.6	0.09	0.06	0.05	0.06	4.0	182.5	12.224	0.149
40.0	21.5	22.1	1.8	0.12	0.07	0.05	0.07	4.5	206.5	12.294	0.159
40.0	21.5	22.1	2.0	0.12	0.08	0.06	0.09	5.0	240.0	12.860	0.161

\*1  $E = \left[ \frac{16FL}{\pi \Delta L (D_1 + D_2)^2} \right] \times 10^2 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$

\*2  $\nu = \frac{L}{2\Delta L} \left[ \frac{D_2(\Delta D_1 + \Delta D_3) + D_1(\Delta D_2 + \Delta D_4)}{D_1 D_2} \right]$

ヤング率およびポアソン比の実測値としては、その傾向および範囲はほぼ満足出来るものが見い出され、さとうきび収穫機設計の際の一助になるものと考えられる。

## 要 約

さとうきび収穫調製作業機開発のための基礎資料とするために、蔗茎のヤング率およびポアソン比について測定を行った。その結果を要約すると次のとおりである。

1. 蔗茎のヤング率は圧縮方向が茎長方向の場合、表皮付き蔗茎で  $E_{M_1} = 12.853 \times 10^2 \text{ kg/cm}^2$  ( $\sigma = 89.5 \text{ kg/cm}^2$ )、髓部のみのも  $E_{M_1} = 3.184 \times 10^2 \text{ kg/cm}^2$  ( $\sigma = 29.0 \text{ kg/cm}^2$ ) を得た。また、茎径方向圧縮の場合、表皮付き  $E_{M_2} = 7.853 \times 10^2 \text{ kg/cm}^2$  ( $\sigma = 48.3 \text{ kg/cm}^2$ )、髓部のみ  $E_{M_2} = 0.444 \times 10^2 \text{ kg/cm}^2$  ( $\sigma = 7.47 \text{ kg/cm}^2$ ) であった。

2. 蔗茎のポアソン比は圧縮方向が茎長方向の場合、表皮付き蔗茎で  $\nu_{M_1} = 0.124$  ( $\sigma = 0.023$ )、髓部のみのも  $\nu_{M_1} = 0.178$  ( $\sigma = 0.020$ ) でありまた、茎径方向圧縮の場合の表皮付き  $\nu_{M_2} = 0.296$  ( $\sigma = 0.021$ )、髓部のみ  $\nu_{M_2} = 0.359$  ( $\sigma = 0.022$ ) を得た。

3. ヤング率、ポアソン比ともに蔗茎の圧縮方向および表皮の有無によりかなりの差があり、ヤング率は圧縮方向がいずれの場合でも表皮付き蔗茎の方が髓部

のみもの比べて高い（ポアソン比は低い）値を示した。また、圧縮方向の違いではヤング率は茎長方向圧縮が茎径方向より、平均値で約 1.6~7.2 倍の高い値を示し、これらの値はサツマイモ、バレイショなどの農産物に比べて高い値を示した。また、ポアソン比は茎長方向圧縮の方が約 1/2~2/5 低い値を示した。

以上、本実験で得られた測定値はある程度のばらつきはあるが、一応その傾向および範囲は見い出されたものと考えられ、蔗茎にはかなり強い方向性があることが明確になった。

謝 辞 本実験を行なうにあたり、実験遂行に協力していただいた当研究室の柏木純孝技官、専攻学生の榎園 誠、南 隆晴の諸氏に深く感謝の意を表します。

## 文 献

- 1) 法貴 誠・他：超音波による大豆の力学的特性の測定。農機誌, 36, 555-558 (1975)
- 2) 石橋貞人・他：農産食品の力学的性質に関する研究（第2報）。農機誌, 32, 59-64 (1970)
- 3) 小島孝之・他：農産食品の力学的性質に関する研究（第4報）。農機誌, 36, 298-302 (1974)
- 4) 宮本啓二：バレイショのポアソン比とヤング率について。農機講要集, 83 (1976)
- 5) Mohsenin, N.N.: Physical properties of agricultural products. *Trans. ASAE*, 8, 25-29 (1965)

## Summary

In order to develop a harvesting machine for sugar cane, an experimental measurement was performed on Young's modulus and Poisson's ratio of sugar cane stalks.

The results obtained are summarized as follows:

1. In case of the compression executed towards the length of stem Young's modulus ( $E_{M_1}$ ) of sugar cane stalks was ascertained to be  $12.853 \times 10^2 \text{ kg/cm}^2$  ( $\sigma = 89.5 \text{ kg/cm}^2$ ) with rind, and  $3.184 \times 10^2 \text{ kg/cm}^2$  ( $\sigma = 29.0 \text{ kg/cm}^2$ ) without rind. And likewise, in case of the compression executed towards the diameter of stem Young's modulus ( $E_{M_2}$ ) of sugar cane stalks was ascertained to be  $7.853 \times 10^2 \text{ kg/cm}^2$  ( $\sigma = 48.3 \text{ kg/cm}^2$ ) with rind, and  $0.444 \times 10^2 \text{ kg/cm}^2$  ( $\sigma = 7.47 \text{ kg/cm}^2$ ) without rind.

2. In case of the compression executed towards the length of stem Poisson's ratio ( $\nu_{M_1}$ ) of sugar cane stalks was noted to be 0.124 ( $\sigma = 0.023$ ) with rind, and 0.178 ( $\sigma = 0.020$ ) without rind. And likewise, in case of the compression executed towards the diameter of stem Poisson's ratio ( $\nu_{M_2}$ ) of sugar cane stalks was noted to be 0.296 ( $\sigma = 0.021$ ) with rind, and 0.359 ( $\sigma = 0.022$ ) without rind.

3. The compressing direction and the existence of the rind were ascertained to have a considerable influence on the varieties in Young's modulus and Poisson's ratio of the stalks. Irrespective of the compression—direction Young's modulus noted in the sample covered with rind showed higher values than those in the sample supplied only with internal stem, though in Poisson's ratio the case was noted to be the reverse of this. And the former increased by about 1.6~7.2 times and the latter decreased by about 1/2~2/5 in accordance with the direction of the compression; in other words the

---

increasing was brought forth at the occasion when the compression was executed towards the length of the stem, while, the decreasing happened at the case when the compression was executed towards the diameter of the stem.

Judging from these results, it was assumed that the internal tissue of the sugar cane-stalk generally keeps a constant direction along the length of the stem, though there are some fluctuations in the measured values.