

弾性指標を用いたスライストマトの果肉硬度の非破壊評価

中野有加^{1a*}・桜井直樹²・藤路 陽³・堀江秀樹¹・中野明正¹・鈴木克己¹¹ 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構野菜茶業研究所 470-2351 愛知県知多郡武豊町字南中根 40-1² 広島大学生物圏科学研究科 739-8521 広島県東広島市鏡山 1-7-1³ 有限会社 生物振動研究所 739-0046 広島県東広島市鏡山 3-10-31

Nondestructive Measurement of Flesh Firmness of Sliced Tomato by Elasticity Index

Yuka Nakano^{1a*}, Naoki Sakurai², Minami Tohro³, Hideki Horie¹, Akimasa Nakano¹ and Katsumi Suzuki¹¹National Institute of Vegetable and Tea Science, 40-1 Minaminakane, Taketoyo, Chita, Aichi 470-2351²Graduate School of Biosphere Science, Hiroshima University, 1-7-1 Kagamiyama, Higasi-Hiroshima, Hiroshima 739-8521³Applied Vibro-Acoustics. Inc., 3-10-31 Kagamiyama, Higasi-Hiroshima, Hiroshima 739-0046

Abstract

The flesh firmness of sliced tomato (*Solanum lycopersicum* L. 'Reiyo'), cultivated under two different nutrient control systems with various amounts of supplied nutrients, was evaluated by acoustic vibration measurement. A whole tomato was placed between acoustic vibration probes, and the elastic indices were calculated using the second resonance and fruit diameter. The elastic indices measured at harvest and after 21 days of storage distinguished the firmness of fruit cultivated under different control systems and amounts of supplied nutrients. The elasticity index showed a higher correlation with the firmness of sliced tomato than that of the intact tomato. The correlation coefficient between the elasticity index and the sliced tomato firmness was as high as that between the intact tomato firmness measured by destructive methods and the sliced tomato firmness. As a consequence, acoustic vibration measurement might be available to nondestructively evaluate the flesh firmness of sliced tomato.

Key Words : acoustic vibration measurement, nondestructive measurement, penetration resistance, storage, texture

キーワード : 物性, 貯蔵, 非破壊測定, 貫入抵抗, 音響振動法

緒 言

近年、野菜の用途別需要においては、加工・業務用需要が過半を占め、さらにその割合が増加傾向にある(小林, 2006)。生食用トマトは、サラダやハンバーガー、サンドウィッチなどの業務用途の多様化に伴い、それぞれの用途に応じた適性をもつ果実の生産が求められている。これらのスライスやカット用の生食用トマトに共通して重視される品質評価項目に、果実の硬さがある。ここでは果実の硬さのうち、果実硬度とは、果皮を含めたインタクトなトマト果実の硬度、果肉硬度とは、スライスした果実の果肉部の硬度、とそれぞれ定義する。スライストマトでは、果実硬度は、果実のカット時の取り扱い性、輸送性や日もち性にとって重要であり、果肉硬度は、スライストマトとしての製品の品質や店頭での棚もちにとって重要である。そこで、トマトのスライス後の平均的な果肉硬度の値を的確に

推定することによって、その果実をスライスして利用する際の品質評価を行いたいと考えた。

果実硬度の測定には、携帯型の簡易測定機(中川ら, 2003)から高精度の物性測定可能な圧縮・引張試験機(藤井ら, 1990)に至るまで、さまざまな装置が用いられる。近年では、非破壊で果実の肉質を推定する方法として、果実に軽い振動を与えたときに発生する音の大きさや周波数を測定する音響学的方法の適用例が報告されている(De Ketelaere・De Baerdemaeker, 2001; Sakurai ら, 2005; 杉山, 1998)。Muramatsu ら(1997)の音響振動法は、果実をはさみ、片側のピエゾ素子から振動を与え、もう一方のセンサで音響振動を受信するものである。この方法は、破壊的方法で測定したキウイフルーツの貫入抵抗値の傾向とよく一致することが示された。

トマトの果実硬度については、品種(石内, 1990; Wu・Abbott, 2002)や貯蔵環境(薛ら, 1996)の及ぼす影響が報告されている。一方、養液栽培の施肥法や施肥量による果実硬度の変化について扱った研究は少ない(寺林ら, 1985)。Auerswald ら(1999)およびFanasca ら(2007)は、培養液濃度が高いほど、トマト果実の硬度が高くなることを報告している。トマトの果実硬度は品種によって大きく異なる

2008年4月2日 受付。2008年5月16日 受理。

* Corresponding author. E-mail: yuka88@affrc.go.jp

^a 現在: 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構総合企画調整部企画調整室

が、同時に果実の形状や果肉と子室組織（ゼリー部）の割合が異なる。音響振動法は、果実の全体としての振動を測定するため、不均質な内部構造の影響を受ける。そこで、本報告では、施肥法を変えて栽培した同一品種のトマトを材料とし、音響振動法を検証することとした。

養液栽培においては閉鎖型培養液管理の開発が進められている。著者らは無機成分の量管理法により、収量を維持した上で施肥量の削減と環境負荷の低減が可能であることを示した（データ省略）。本研究では、量管理法により栽培したトマトを材料とし、スライストマトとしての果肉硬度を、破壊法および非破壊法を用いて評価した。

材料および方法

1. 栽培方法

トマト (*Solanum lycopersicum* L.) ‘麗容’ (サカタのタネ) を供試した。‘麗容’は、果実の硬度が高いことを表示して販売されている品種であり、業務用 (サンドウィッチ) トマトの販売で高評価を得ている (新堀, 2006)。2006年10月2日に播種し、11月7日にロックウールスラブに定植した。処理区は濃度管理法の低EC区 (Low区) および高EC区 (High区) の2区、量管理法の標準区 (1.0倍区)、1.25倍区、1.5倍区の3区、計5区とした。培養液は、量管理法では循環式、濃度管理法では排液率約30%のかけ流し式とした。総窒素施肥量は、High区 (134 g/株) > Low区 (66 g/株) > 1.5倍区 (30 g/株) > 1.25倍区 (25 g/株) > 1.0倍区 (20 g/株) であった。

2月上旬から6月上旬にかけて第1～13段果房の成熟期の果実を午前7～8時に収穫し、熟度や大きさの揃った果実を各回2果ずつ選び、収穫直後あるいは冷蔵21日後に測定に用いた。熟度の判定は着色程度により行った。冷蔵は、4°Cの冷蔵庫に搬入した。

2. 音響振動法による果実の硬度測定

Kurokiら (2006) のメロンを材料とした方法に準じて振

動装置 (有限会社生物振動研究所) を用い、トマト果実に100～1,000 Hzまでの振動を与えて振動強度を測定した。加振側、受振側とも、果実の隔壁部分に接触させた。1回の測定に要する時間は約30秒であった。測定は各果実につき2回反復して行い、測定結果の波形の位相から、第2共鳴周波数を調査した。振動強度の測定後、装置で挟んだ位置の果実直径を測定した。以下の式で弾性指標 (E: Elasticity index) を算出した。

$$E = d^2 \times f^2$$

弾性指標 (E)、第2共鳴周波数 (f)、果実直径 (d)

3. 破壊法による果実の硬度測定

卓上物性測定器 (山電, TPU-2S) において $2.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ の速度で貫入抵抗を測定した。まず、果実のがく片に垂直に、果実赤道面を含む約4 cmの断片を切り出して果実硬度の測定に用い、残りをスライスの果肉硬度の測定に用いた。果実赤道部の硬度は、堀江 (2007) の方法に従い、直径7 mmの球状プランジャーでトマト赤道部を果皮側から垂直に圧縮し、3 mm圧縮時の力を果実赤道部の硬度とした。

果実のスライスの調整は、トマトスライサー (Westmark, 5140) を用いて8 mmの厚さに包丁でカットし、果頂部と果底部からそれぞれ2枚目のスライス測定サンプルとした。これらのサンプルは、果頂部と果底部で成熟に伴う軟化の進行が異なるという報告 (Kojimaら, 1991) に基づいて選定した。直径3 mmの円柱状プランジャーを切断面の中果皮および隔壁の各2箇所に入らせ、2 mm圧縮時の力を果肉硬度とした。

結果および考察

1. 施肥法を変えて栽培したトマトの果実硬度の差異

濃度管理法および量管理法で栽培したトマト果実の収穫直後の果実硬度は、High区で高く、1.0倍区で低かった。4°Cで21日間冷蔵貯蔵した後の果実硬度も、収穫直後と同様の傾向がみられ、施肥量の少ない区ほど果実硬度が低

Table 1 Firmness and elastic index of intact tomato fruit cultivated under EC-based control and daily nutrient addition.

Treatment ²	Storage time		0 days		21 days	
	Measurement	Firmness (N)	Elastic index ($\times 10^6 \text{ cm}^2 \cdot \text{Hz}^2$)		Firmness (N)	Elastic index ($\times 10^6 \text{ cm}^2 \cdot \text{Hz}^2$)
EC-based	High	9.4 ^y a ^x	21.8	a	8.8	a
	Low	8.7 ab	20.2	a	7.8	ab
Quantity	1.5-fold	8.7 ab	22.2	a	7.7	ab
	1.25-fold	8.6 ab	19.8	a	6.6	bc
	1.0-fold	7.7 b	15.9	b	5.5	c
Correlation coefficient ^w		0.728	0.996	0.624	0.994	

² EC-based: nutrients were supplied based on the adjustment of electrical conductivity (EC) of the nutrient solution at two EC levels (high and low), Quantity: nutrients were supplied by daily nutrient addition at three application rates (1.5-fold, 1.25-fold and 1.0-fold).

^y Values are the mean of 38 to 69 fruits.

^x Values followed by the same letter within same measurements did not significantly different at $P = 0.05$ (*Spjotvoll-stoline* test).

^w Correlation coefficient between two replicating measurements.

Table 2 Firmness of sliced tomato fruit cultivated under EC-based control and daily nutrient addition.

Treatment ^z		Firmness (N) ^y			
		Top-outside	Top-inside	Bottom-outside	Bottom-inside
EC-based	High	3.2 ab ^x	3.1 a	2.4 ab	2.1 a
	Low	2.9 bc	2.6 b	2.3 ab	1.9 ab
Quantity	1.5-fold	3.4 a	3.3 a	2.5 a	2.1 a
	1.25-fold	2.7 c	2.5 bc	2.1 b	1.8 ab
	1.0-fold	2.4 c	2.1 c	1.9 c	1.6 b
Correlation coefficient ^w		0.727	0.703	0.712	0.494

^zEC-based: nutrients were supplied based on the adjustment of electrical conductivity (EC) of the nutrient solution at two EC levels (high and low), Quantity: nutrients were supplied by daily nutrient addition at three application rates (1.5-fold, 1.25-fold and 1.0-fold).

^y Values are the mean of 55 to 69 fruits.

^x Values followed by the same letter within same measurements did not significantly different at $P = 0.05$ (Sjotvoll-stoline test).

^w Correlation coefficient between two replicating measurements.

かった (第1表). 弾性指標は, 収穫直後で $16 \sim 22 \times 10^6 \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{Hz}^2$ (以下単位同じ) であったものが, 21日貯蔵後で $12 \sim 17 \times 10^6 \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{Hz}^2$ の値に低下し, 破壊法と同様に貯蔵期間中に軟化したことを示した. 弾性指標は収穫直後, 21日間貯蔵後ともに High区で高く, 1.0倍区で低く, 破壊法による果実硬度と同様の傾向であった. また, 両測定日ともに果実硬度に比べて弾性指標の2回の測定値の間の相関係数が高かった. このことは, 弾性指標の測定が非破壊的に繰り返し行えることに加えて, 測定自体の再現性が高いことを示している.

堀江 (2007) は, 本実験と同様の破壊法により夏季に収穫した完熟トマト果実の硬度の品種間差異を調査した結果, 生食用品種で 2.2 ~ 5.4 N という測定結果を得ている. したがって, 5 N 程度の硬さがあれば十分硬い果実とみなせると考えられる. 本実験で供試した '麗容' は, 果実硬度の高い品種として知られており, 本実験の収穫直後で 8 ~ 9 N という測定結果もそれを裏付けている. 果実を 4°C で 21日以上貯蔵を続けた場合, 貯蔵期間の長期化に伴い果皮の裂壊が徐々に発生した. 21日間冷蔵貯蔵後の果実硬度は 5.5 ~ 8.8 N と依然として高く維持されていたことから, 21日は貯蔵可能期間であったといえる. これらの結果から, 音響振動法を用いた非破壊測定は, 同じ品種の施肥法および施肥量による果実および貯蔵による差を検出することができると考えられる.

2. 果実スライスの部位別の果肉硬度の違い

スライスの果肉硬度は, 処理にかかわらず果底部よりも果頂部で高く, それぞれのスライスの中では隔壁よりも中果皮で高い傾向がみられた (第2表). いずれの部位においても, 施肥量が少ない区ほど果肉硬度が低くなる傾向がみられた. 2回の測定値間の相関係数は, 果底部隔壁で 0.494 と他の部位の約 0.7 と比べて低かった. Kojima ら (1991) は, トマトスライスの硬度は成熟の進行に伴って部位別に異なる変化をするが, 完熟期ではその差が小さくなることを報告している. 本実験で用いたトマトは成熟期の果実で

あり, 完熟期に至るまで内部の硬度は均一にならないといえる.

3. 果実の弾性指標と果実硬度の相関

破壊法によって測定した果皮つきの赤道部の果実硬度とスライス果肉硬度の平均値との間の相関係数は, 0.537 とあまり高くなかった (第1図). 一方, 赤道部の果実硬度と弾性指標との間には, 有意な相関があったが, 相関係数は 0.404 と低い値であった. また, スライスした果肉4箇所 of 果肉硬度の平均値と弾性指標との間の相関係数は, 0.574 と破壊法の測定と同程度の値を示した.

このように, スライスした果肉硬度を推定するためには, 従来の赤道部の果実硬度の測定では精度が低い. これは, 果実内部の果肉硬度は均一ではなく, 赤道部の果実硬度が果皮の近傍のみを測定していることが主な原因であると考えられる. さらに, 果皮のついたままの切片では, 測定値は果皮硬度の影響を受ける. スライストマトとしての果肉硬度の評価では, スライスして切片の部位数箇所を測定することが最も正確である. しかし, スライス厚さをそろえるようカットすることや物性測定器による測定が必要となり, 煩雑である.

音響振動法による果実硬度の測定は, 内部が均質な球体では理論値に近い値が得られることが知られている. 一方, トマト果実の内部は, 果肉組織とゼラチン様の子室組織では質的に異なる. さらに, '麗容' は一般のトマト品種と同様に完全な球体ではなく, 扁平な球形である. 従って, 他の果実と比べてトマトにおける音響振動法の測定精度は低いと推察される. しかし, 音響振動法は, トマトの果実全体の振動の伝わり方を測定する方法であるため, 果皮硬度の影響が小さく, 破壊法による果実硬度よりも果肉硬度の推定に向けた方法と考えられる. 今後, トマトの内部構造を考慮して精度を向上させることにより, 音響振動法の実用化が可能と思われる.

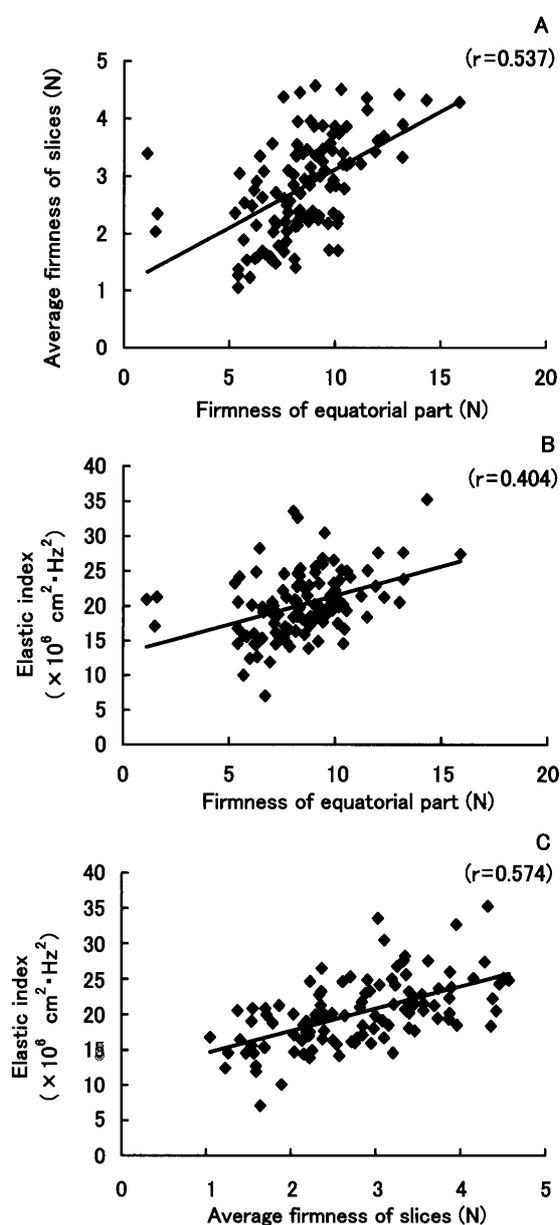


Fig. 1 Correlation among firmness at the equatorial region of the tomato, average firmness of slices and elasticity index of tomato fruits at harvest.

A: Correlation between firmness at the equatorial region and average firmness of slices.

B: Correlation between firmness at the equatorial region and elasticity index of tomato fruits.

C: Correlation between average firmness of slices and elasticity index of tomato fruits.

Each plot was measured on the same fruit ($n = 111$).

r indicates the correlation coefficient.

摘 要

異なる施肥法および施肥量で栽培されたトマトのスライスとしての果肉硬度を、音響振動法を用いて評価した。振動装置でトマト果実をはさみ、検出した第2共鳴周波数と果実直径から弾性指標を算出した。弾性指標は、施肥の異なるトマトの収穫直後や貯蔵後の硬度の差を示すことがで

きた。弾性指標は、赤道部の果実硬度よりもスライスの果肉硬度和相関が高かった。弾性指標とスライスの果肉硬度との間の相関係数は、破壊法によるインタクトなトマトの果実硬度とスライスの果肉硬度との間の相関係数と同程度であった。これらの結果から、音響振動法は、トマトのスライスの果肉硬度の推定に利用できる可能性があると考えられた。

引用文献

- Auerswald, H., D. Schwarz, C. Kornelson, A. Krumbeinl and B. Brückner. 1999. Sensory analysis, sugar and acid content of tomato at different EC values of the nutrient solution. *Sci. Hort.* 82: 227–242.
- De Ketelaere, B. and J. De Baerdemaeker. 2001. Advances in spectral analysis of vibrations for non-destructive determination of tomato firmness. *J. Agric. Eng. Res.* 78: 177–185.
- Fanasca, S., A. Martino, E. Heuvelink and C. Stanghellini. 2007. Effect of electrical conductivity, fruit pruning, and truss position on quality in greenhouse tomato fruit. *J. Hort. Sci. Biotech.* 82: 488–494.
- 藤井淑子・久山純子・団野源一. 1990. 小麦澱粉で調製したスポンジケーキのレオロジー的特性. *日食工誌.* 37: 619–624.
- 堀江秀樹. 2007. トマトのおいしさ評価法の開発1. 食感および呈味成分の評価. *園学研.* 6 (別1): 443.
- 石内伝治. 1990. トマト果実の物理的特性に関する研究. 第1報. 果肉の圧縮試験における物性値の品種間差異と成熟による変化. *野菜試報.* C1: 31–44.
- 小林茂典. 2006. 野菜の用途別需要の動向と国内産地の対応課題. *農林水産政策研究.* 11: 1–27.
- Kojima, K., N. Sakurai, S. Kuraishi, R. Yamamoto and D. J. Nevins. 1991. Novel technique for measuring tissue firmness within tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) fruit. *Plant Physiol.* 96: 545–550.
- Kuroki, S., M. Tohro and N. Sakurai. 2006. Monitoring of the elasticity index of melon fruit in a greenhouse. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 75: 415–420.
- Muramatsu, N., N. Sakurai, R. Yamamoto, D. J. Nevins, T. Takahara and T. Ogata. 1997. Comparison of a non-destructive acoustic method with an intrusive method for firmness measurement of kiwifruit. *Postharvest Biol. Technol.* 12: 221–228.
- 中川祥治・田村夕利子・山本秀治・吉田企世子・善本知孝. 2003. 有機質肥料および化成肥料で栽培したニンジン (*Daucus carota* L.) における生育量差の影響を除去した品質比較. *土肥誌.* 74: 45–53.
- 新堀健二. 2006. 高軒高ハウスの立体空間を利用したトマトの高生産システム. *野菜茶業研究集報.* 3: 103–108.
- Sakurai, N., S. Iwatani, S. Terasaki and R. Yamamoto. 2005.

- Evaluation of 'Fuyu' persimmon texture by a new parameter, "Sharpness index". J. Japan. Soc. Hort. Sci. 74: 150-158.
- 杉山純一. 1998. 打音によるメロンの非破壊計測—その原理から携帯用果肉硬度計の開発まで—. 農及園. 73: 238-246.
- 寺林 敏・藤原一哉・山下智史・並木隆和. 1985. 水耕トマトの果皮, 果肉の強度. 京都府大學報. 37: 183-188.
- Wu, T. and J. A. Abbott. 2002. Firmness and force relaxation characteristics of tomatoes stored intact or as slices. Postharvest Biol. Technol. 11: 59-68.
- 薛 彦斌・久保康隆・稲葉昭次・中村怜之輔. 1996. 湿度条件がトマトとキュウリ果実の生理および肉質に及ぼす影響. 日食工誌. 43: 164-171.