携帯型振動硬度計によるウメ ‘南高’ 果実の非破壊硬度測定と 高品質梅酒製造への応用

大江孝明^{1,2*}・櫻井直樹²・土田靖久^{1a}・中面 慶¹・細平正人¹

¹ 和歌山県果樹試験場うめ研究所 645-0021 和歌山県日高郡みなべ町東本庄

² 広島大学大学院生物圏科学研究科 739-8521 広島県東広島市鏡山

Nondestructive Measurement of the Fruit Firmness of ‘Nanko’ Japanese Apricot (*Prunus mume* Sieb. et Zucc.) Using a Portable Vibration Hardness Meter, and Application to Processing High-quality Japanese Apricot Liqueur

Takaaki Oe^{1,2*}, Naoki Sakurai², Yasuhisa Tsuchida^{1a}, Kei Nakanishi¹ and Masato Hosohira¹

¹ Japanese Apricot Laboratory, Wakayama Fruit Tree Experiment Station, Higashihonjo, Minabe-cho, Hidaka, Wakayama 645-0021

² Graduate School of Biosphere Sciences, Hiroshima University, Kagamiyama, Higashihiroshima, Hiroshima 739-8521

Abstract

We investigated alternative portable methods to the rheometer in fruit firmness evaluation for high functional or aroma components of processed Japanese apricot liqueur (ume liqueur) of ‘Nanko’ Japanese apricot (*Prunus mume* Sieb. et Zucc.). Fruit firmness using the universal hardness meter showed a difference based on the harvesting time and fruiting position, although there was little difference using the rheometer. The elasticity index (EI) using the portable vibration hardness meter was also able to evaluate these differences as well as the universal hardness meter. EI was more significantly correlated with the rheometer than the universal hardness meter. There was little difference between EIs calculated based on the fruit diameter and mass. EI calculated by $f_2^2 \cdot d^2$ (Edf_2), where f_2 was the second resonant frequency and d was the fruit diameter, showed a higher correlation with the firmness obtained from the rheometer than EI calculated by $f_3^2 \cdot d^2$ (Edf_3), where f_3 was the third resonant frequency, in both developing and ripening fruit. Therefore, Edf_2 should be suitable for determining the firmness of Japanese apricot fruit as a substitute for the rheometer. The time of a sharp decrease in fruit firmness, the index of the time when functional components reached high levels in ume liqueur for the rheometer, was not detected by either the universal hardness meter or portable vibration hardness meter. However, the ume liqueur made from fruit with below 10,000 in Edf_2 , 17,000 in Edf_3 or 2.2 kg using the universal hardness meter with a 3-mm-diameter cylindrical plunger, contained higher functional components. These results suggest that the portable vibration hardness meter is suitable for the nondestructive measurement of fruit firmness, and might be available for calculating the index of raw material fruit to process ume liqueur with high functional components or aroma components in Japanese apricot ‘Nanko’.

Key Words : acoustic vibration method, antioxidant activity, elasticity index, functional component, ripening

キーワード : 弾性指標, 機能性成分, 抗酸化能, 音響振動法, 追熟

緒 言

ウメ (*Prunus mume* Sieb. et Zucc.) は生果を食しないことから、青果の収穫基準は主に、大きさ、毛じの抜け具合、果皮の色つやなどの外観品質で決められている。しかし、毛じの抜け具合および果皮の色つやはその変化が小さいことから、客観的な判断が難しく、個人差が問題点である。一方で、収穫後の軟化も早いことから、硬さも重要な品質項目である。

既報（大江ら、2007）で筆者らは、果実硬度が急激に低下し始めた時点の果実はクエン酸含量が多く、そのような果実を用いた梅酒は褐色度、クエン酸含量、ポリフェノール含量および抗酸化能が大きく、機能性成分などの品質に優れた梅酒製造のための原料選定の指標となることを報告した。加えて筆者らは、高い芳香成分（デカラクトン、酪酸エチルおよび酢酸ブチル）を有する梅酒製造のためのウメ ‘南高’ 果実の熟度指標として、果実硬度および果皮色 b^* 値が利用できることを報告した（大江ら、2012）。しかし、これらの試験において果実硬度の測定に用いたレオメータは大型で持ち運びが容易でないため、実際の生産現場での利用範囲は限定される。

果実硬度の測定には様々な装置が用いられるが、非破壊

2012年6月19日 受付。2012年8月16日 受理。

* Corresponding author. E-mail: oe_t0002@pref.wakayama.lg.jp

^a現在：和歌山県経営支援課

で果実硬度を推定するための方法として、レーザー・ドップラー法による硬度測定技術が開発され、リンゴ(元村ら, 2004), セイヨウナシ(Murayama ら, 2006) など様々な果実で報告されてきた。さらに近年では、このレーザー・ドップラー法の原理を応用した小型の音響振動による硬度測定装置(携帯型振動硬度計)が開発され(Taniwaki・Sakurai, 2010), アボカドの食べ頃予測(秋元ら, 2011), セイヨウナシの追熟指標(知野ら, 2009, 2010), カキの収穫盛期予測(神田ら, 2010), スライストマトの果肉硬度評価(中野ら, 2008), ブドウ(Takahashi ら, 2010), マンゴー(文室・櫻井, 2011) およびニホンナシ(黒坂ら, 2010) の硬度評価, プルーンの糖度および酸度の推定(大畑・櫻井, 2011) など、多方面で熟度の判定法としての活用が報告されている。本装置は持ち運びが容易であることに加え、着果状態の果実の硬度を非破壊で経時的に測定することも可能である。果実の硬度測定については、古くから携帯型のパネ式の貫入式硬度計が用いられているが、精度が劣り測定した果実が商品価値を失う破壊法である。

そこで、これら2つの硬度測定法について、ウメ果実においてレオメータ値との関係を調査して適用性を評価するとともに、梅酒品質を高めるための原料果実の熟度指標としての実用性を調査した。

材料および方法

1. 各種の方法による発育中果実の硬度測定(試験1)

2010年に和歌山県うめ研究所に植栽されている‘南高’成木3樹について、主幹と樹冠外周との中間より外側の果実(以下外層果実)と内側の果実(以下内層果実)の果実硬度の変化を調査した。調査果実は直射日光が当たらない部位のものとした。現行の収穫基準である色つや、毛じの抜け具合などの果実外観および完熟落果の状況をもとに、外層果実の青果収穫開始の直前の時期(5月31日)を判断し、外層果実の完熟落果開始期(6月19日)までの間、ほぼ3日ごとに7回果実を採取した。また、2011年に和歌山県みなべ町内の収穫時期が異なる3園(収穫時期の早い順にA～C園)に植栽された‘南高’成木(B園のみ3樹、その他は1樹)について、樹冠外層の果実を供試した。青果収穫開始直前から完熟落果開始期までの間、ほぼ3日ごとに5～7回果実を採取した。各年とも1回当たりの採取果数は30果程度とした。

採取した果実のうち10果は、レオメータ(COMPACK-100, サン科学), 貫入式硬度計(KM型, 藤原製作所)および携帯型振動硬度計(SP-B-1, 生物振動研究所)により果実の硬度および弾性指標を測定した。レオメータ値は既報(大江ら, 2007)と同様、5mm円柱形プランジャーを装着して、 $1\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ の速度で1mm貫入する時の最大負荷(kg)を測定した。貫入式硬度計値については貫入する時の最大負荷(kg)を測定した。なお、筆者らの予備試験において、円柱形プランジャーの直径を2, 2.5, 3および3.5mm

としてウメ果実の硬度変化を測定したところ、各プランジャーともにレオメータ値との間には強い正の相関関係が認められたが、硬度変化がレオメータ値の変化により近かった直径3mmのプランジャーを本試験では用いた。携帯型振動硬度計による弾性指標は、縫合線を挟んで赤道部に加振部と受振部を当て、100～6,000Hzまでの正弦波振動を与えて共鳴周波数を測定した。測定結果の波形の位相角度から第2および第3共鳴周波数を求めた。弾性指標は第2共鳴周波数を f_2 (Hz), 第3共鳴周波数を f_3 (Hz), 直径(加振部と受振部を当てた部分の距離)を d (m), 果実重を m (kg)とし、 $Edf_2=f_2^2\cdot d^2$, $Edf_3=f_3^2\cdot d^2$, $Emf_2=f_2^2\cdot m^{2/3}$ および $Emf_3=f_3^2\cdot m^{2/3}$ の4つの弾性指標を算出した。2010年については、レオメータ値および弾性指標を測定した果実で貫入式硬度計値も測定した。樹ごとに外層および内層果実の硬度差をt検定で調査するとともに、上記3方法での硬度および弾性指標の相関関係をピアソンの方法(坪井, 2002)で調査した。2011年については、レオメータ値および弾性指標を測定した果実は梅酒に加工し、これとは別の8果で貫入式硬度計値を測定した。このため、相関関係はレオメータ値と弾性指標のみの関係を調査した。また、2010年はこれら調査とは別に、着果状態の果実の硬度を継続して携帯型振動硬度計で測定可能かを検討した。

2. 各種の方法で測定した果実硬度と梅酒の品質との関係(試験2)

2010年は青果収穫開始期の6月4日から完熟落果開始期の6月19日に、試験1で果実硬度を測定した際、各樹の着果位置別に別の約300gを梅酒に加工した。2011年は青果収穫開始期直前から完熟落果開始期に、試験1でレオメータ値および弾性指標を測定した果実10果と他の8果を6果ずつに分けて、3反復で梅酒に加工した。加工方法はウメ果実1kgに対して35%果実酒用アルコール(ホワイトリカー)1.8L, 氷砂糖0.8kgの割合で、冷暗所にて6か月間漬け込んだ。漬け込み終了後、既報(大江ら, 2006, 2007)と同様に、果実重減少率(歩留まり)を測定するとともに、 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ のメンブレンフィルターでろ過し、梅酒の褐色度(450nm吸光度), クエン酸含量, ポリフェノール含量および抗酸化能を測定した。既報(大江ら, 2006, 2007)と同様に、クエン酸含量はHPLC(LC10A, 島津製作所)で、ポリフェノール含量は上田(2000)の方法を参考にフォーリンチオカルト法で、抗酸化能は小林(1999)の方法を参考に1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl(DPPH)を用いた比色法でフリーラジカル消去能を測定した。これら梅酒品質と各種果実硬度および硬度指標との関係を調査した。

3. 各種の方法による追熟条件の異なる果実の硬度測定(試験3)

2011年6月22日に和歌山県うめ研究所で収穫した果実について、選果機により2L, 3Lおよび4Lの大きさの果実を選別してそれぞれ出荷用段ボール箱に入れた。果実階級4Lおよび2Lは追熟温度20℃で、果実階級3Lは追熟温度

20, 25 および 30°C で追熟した (以下 4L 20°C, 2L 20°C, 3L 20°C, 3L 25°C および 3L 30°C と省略). 追熟日数は 0 ~ 6 日 (3L 30°C のみ追熟 6 日目に腐敗果が発生したため 0 ~ 5 日) とし, 各日とも各段ボール箱から 10 果を抜き出し, レオメータ値と弾性指標を試験 1 と同様に測定し, これら硬度値の相関関係を調査した.

結 果

1. 各種の方法による発育中果実の硬度測定 (試験 1)

2010 年の結果について, レオメータ値は 6 月 10 日頃か

ら, 貫入式硬度計値は 6 月 7 日頃から外層果実が内層果実よりも小さい傾向がみられた (第 1 表). 携帯型振動硬度計による弾性指標について, 2010 年は Edf_2 は Emf_2 との間に $r=0.991$ ($p<0.0001$) の, Edf_3 は Emf_3 との間に $r=0.995$ ($p<0.0001$) の強い正の相関関係が認められ, 2011 年は Edf_2 は Emf_2 との間に $r=0.995$ ($p<0.0001$) の, Edf_3 は Emf_3 との間に $r=0.996$ ($p<0.0001$) の強い正の相関関係が認められた (データ略). 従って, 以下の発育中の果実における弾性指標は Edf_2 または Edf_3 で示す. Edf_2 , Edf_3 とともに, 6 月 7 日から低下する推移を示し, 6 月 7 日から外層果実が

第 1 表 着果位置, 採取時期が異なる果実の硬度および弾性指標の推移 (2010 年)

	樹 No. ^z	着果位置 ^y	採取日 (月/日)						
			5/31	6/4	6/7	6/10	6/13	6/16	6/19
レオメータ値 (kg)	No. 1	外層	2.43	1.92	1.92	1.59	1.19	1.33	0.63
		内層	2.19	2.22	2.67	2.19	1.80	1.66	1.08
		有意性 ^x	NS	**	***	**	***	NS	***
	No. 2	外層	2.63	2.09	2.16	1.88	1.42	1.41	0.63
		内層	2.29	2.32	1.82	2.24	2.27	1.63	1.20
		有意性	*	*	NS	**	***	NS	***
	No. 3	外層	2.44	2.33	2.44	2.05	1.57	1.37	0.71
		内層	2.39	2.34	2.14	2.24	2.32	1.81	1.22
		有意性	NS	NS	NS	NS	***	**	***
貫入式硬度計値 (kg)	No. 1	外層	4.34	3.95	3.29	3.03	2.61	1.91	1.88
		内層	4.14	4.19	3.67	3.22	2.98	1.93	2.04
		有意性	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	No. 2	外層	4.23	4.31	3.23	3.07	2.67	1.76	1.84
		内層	3.95	3.81	3.71	3.54	3.40	2.18	2.08
		有意性	NS	*	*	NS	**	**	NS
	No. 3	外層	4.19	4.45	3.62	2.97	2.26	1.74	1.78
		内層	3.53	4.25	3.86	3.49	3.25	1.89	2.13
		有意性	*	NS	NS	*	***	*	NS
弾性指標 Edf_2 (Hz ² ・m ²)	No. 1	外層	1.39	1.24	1.25	1.13	0.94	0.75	0.57
		内層	1.28	1.20	1.54	1.26	1.18	1.04	0.75
		有意性	*	NS	***	*	***	***	***
	No. 2	外層	1.54	1.29	1.38	1.20	1.02	0.81	0.53
		内層	1.31	1.20	1.68	1.32	1.26	1.06	0.84
		有意性	**	NS	***	*	***	***	***
	No. 3	外層	1.46	1.31	1.42	1.20	1.01	0.79	0.56
		内層	1.30	1.20	1.62	1.27	1.26	1.07	0.79
		有意性	*	NS	**	NS	***	***	***
弾性指標 Edf_3 (Hz ² ・m ²)	No. 1	外層	2.83	2.19	2.31	2.01	1.57	1.35	1.06
		内層	2.74	2.31	3.08	2.20	2.08	1.67	1.34
		有意性	NS	NS	**	NS	***	***	***
	No. 2	外層	3.36	2.57	2.62	2.11	1.76	1.47	0.98
		内層	2.87	2.47	3.62	2.52	2.31	1.74	1.44
		有意性	*	NS	***	*	**	**	***
	No. 3	外層	2.87	2.24	2.68	2.12	1.73	1.44	1.01
		内層	2.79	2.35	3.40	2.29	2.48	1.73	1.37
		有意性	NS	NS	**	NS	**	***	***

^z 果実は 1 園の 3 樹 (No. 1 ~ 3) の外層および内層より採取

^y 主幹と樹冠外周との中間より外側を外層, 内側を内層とした

^x *, **, *** は t 検定によって 5%, 1% または 0.1% 水準で有意差あり, NS は有意差なし (n = 10)

第1図 着果位置、採取時期が異なる果実におけるレオメータ値と貫入式硬度計値および弾性指標の関係(採取直後の果実, 2010年)
詳細は第1表参照

第2図 採取樹および採取時期の異なる果実の硬度および弾性指標の推移(2011年)

3園の5樹(B園のみNo.1~3の3樹)より果実を採取

携帯型振動硬度計値およびレオメータ値は同じ果実で測定し、これとは別の果実で貫入硬度計値を測定

バーは標準誤差を示す(貫入式硬度計はn=8, その他はn=10)

第3図 採取樹、採取時期の異なる果実におけるレオメータ値と弾性指標の関係(採取直後の果実, 2011年)
詳細は第2図参照

内層果実よりも小さい傾向がみられた。また、 Edf_2 、 Edf_3 は非破壊かつ着果状態で果実硬度が低下する推移を測定することが可能であった(データ略)。

着果位置および採取時期が異なる果実の果実硬度について、貫入式硬度計値はレオメータ値との間に $r=0.693$ ($p<0.0001$) の正の相関関係が認められた(第1図)。 Edf_2 および Edf_3 はレオメータ値との間にそれぞれ、 $r=0.816$ および 0.752 (ともに $p<0.0001$) の強い正の相関関係が認められた。

2011年の結果について、レオメータ値、貫入式硬度計値、弾性指標 Edf_2 、 Edf_3 ともに、急激に低下し始める時期が認められた(第2図)。また、採取樹および採取時期が異なる果実の果実硬度について、弾性指標は Edf_2 および Edf_3 とも

にレオメータ値との間にそれぞれ、 $r=0.939$ および 0.909 (ともに $p<0.0001$) の強い正の相関関係が認められた (第3図)。

2. 各種の方法で測定した果実硬度と梅酒の品質との関係 (試験2)

2010年の結果について、各樹の着果位置別に果実硬度と梅酒品質との関係を調査したところ、レオメータ値が急激に低下し始める時期 (0.08 kg/日以上) の果実を原料とした梅酒は、褐色度、果実重減少率、クエン酸含量、ポリフェノール含量および抗酸化能とも各樹の各着果位置それぞれの最高値の64%以上で、クエン酸含量、ポリフェノール含量および抗酸化能については82%以上であった (第2表)。貫入式硬度計で果実硬度が急激に低下し始める時期を判断

することは困難であったが、硬度計値が2.2 kgを下回った時期の果実を用いた梅酒は、褐色度、果実重減少率、クエン酸含量、ポリフェノール含量および抗酸化能が各樹の各着果位置それぞれの最高値の89%以上であった。弾性指標で果実硬度が急激に低下し始める時期を判断することは困難であったが、 Edf_2 が10,000を下回った時期および Edf_3 が17,000を下回った時期の果実を原料とした梅酒は、褐色度、果実重減少率、クエン酸含量、ポリフェノール含量および抗酸化能が各樹の各着果位置それぞれの最高値の81%以上であった。また、貫入式硬度計値が2.2 kgを下回った時期、 Edf_2 が10,000を下回った時期および Edf_3 が17,000を下回った時期の果実を原料とした梅酒は、各樹の各着果

第2表 果実採取樹、着果位置および採取時期の違いと果実硬度、弾性指標および梅酒品質 (2010年)

	採取日 (月/日)	レオ メータ値 (kg)	貫入式 硬度計値 (kg)	弾性指標		褐色度 (吸光度 450 nm)	果実重 減少率 (%)	機能性成分含量		抗酸化能 ($\mu\text{mol TE} \cdot$ 100 mL^{-1}) ^z
				Edf_2 ($\text{Hz}^2 \cdot \text{m}^2$)	Edf_3 ($\text{Hz}^2 \cdot \text{m}^2$)			クエン酸 ($\text{g} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$)	ポリフェノール ($\text{mg CE} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$) ^z	
外層 No. 1	6/4	1.92	3.95	12438	21917	0.124 (63) ^y	45 (92)	0.77 (79)	52 (99)	76 (87)
	6/7	1.92	3.29	12526	23078	0.108 (55)	33 (68)	0.86 (88)	48 (92)	73 (83)
	6/10	1.59 ※ ^x	3.03	11327	20053	0.154 (78)	41 (85)	0.88 (90)	49 (94)	80 (91)
	6/13	1.19	2.61	9366 ※	15696 ※	0.160 (81)	41 (85)	0.87 (89)	48 (92)	81 (93)
	6/16	1.33	1.91 ※	7452	13533	0.197 (100)	48 (100)	0.96 (98)	52 (100)	88 (100)
	6/19	0.63	1.88	5741	10615	0.188 (95)	46 (94)	0.98 (100)	48 (92)	85 (97)
外層 No. 2	6/4	2.09	4.31	12922	25652	0.109 (53)	47 (95)	0.78 (78)	47 (93)	75 (88)
	6/7	2.16	3.23	13848	26186	0.084 (41)	47 (97)	0.68 (68)	44 (86)	67 (79)
	6/10	1.88 ※	3.07	11994	21094	0.145 (71)	45 (92)	0.82 (83)	46 (91)	78 (92)
	6/13	1.42	2.67	10199	17627	0.179 (87)	37 (76)	0.93 (93)	49 (97)	85 (100)
	6/16	1.41	1.76 ※	8082 ※	14663 ※	0.205 (100)	49 (100)	1.00 (100)	51 (100)	84 (99)
	6/19	0.63	1.84	5335	9773	0.181 (88)	48 (98)	0.99 (99)	44 (86)	77 (91)
外層 No. 3	6/4	2.33	4.45	13069	22406	0.110 (54)	50 (87)	0.76 (80)	47 (98)	78 (91)
	6/7	2.44	3.62	14241	26832	0.103 (51)	48 (83)	0.74 (78)	45 (92)	72 (84)
	6/10	2.05 ※	2.97	11983	21240	0.130 (64)	42 (72)	0.78 (82)	47 (97)	76 (89)
	6/13	1.57	2.26	10076	17294	0.167 (82)	44 (76)	0.92 (97)	48 (99)	81 (95)
	6/16	1.37	1.74 ※	7914 ※	14399 ※	0.203 (100)	51 (89)	0.92 (97)	48 (100)	86 (100)
	6/19	0.71	1.78	5560	10130	0.190 (94)	58 (100)	0.95 (100)	48 (98)	85 (99)
内層 No. 1	6/4	2.22	4.19	11962	23123	0.059 (33)	40 (78)	0.67 (74)	46 (87)	61 (67)
	6/7	2.67	3.67	15365	30787	0.134 (76)	36 (71)	0.91 (100)	51 (96)	74 (81)
	6/10	2.19 ※	3.22	12582	21958	0.116 (66)	41 (80)	0.77 (84)	49 (91)	78 (85)
	6/13	1.80	2.98	11794	20755	0.147 (83)	42 (83)	0.81 (89)	53 (99)	83 (91)
	6/16	1.66	1.93 ※	10372	16700 ※	0.177 (100)	51 (100)	0.85 (94)	54 (100)	92 (100)
	6/19	1.08	2.04	7506 ※	13371	0.174 (98)	47 (93)	0.86 (95)	47 (88)	80 (88)
内層 No. 2	6/4	2.32	3.81	12026	24692	0.062 (33)	34 (67)	0.70 (82)	50 (87)	67 (65)
	6/7	1.82	3.71	16761	36227	0.089 (47)	39 (77)	0.73 (86)	51 (87)	73 (71)
	6/10	2.24	3.54	13156	25227	0.115 (61)	37 (74)	0.78 (91)	52 (90)	80 (78)
	6/13	2.27	3.40	12587	23117	0.153 (81)	42 (83)	0.81 (95)	55 (94)	92 (90)
	6/16	1.63 ※	2.18 ※	10650	17355	0.180 (95)	49 (98)	0.85 (100)	55 (95)	98 (96)
	6/19	1.20	2.08	8425 ※	14442 ※	0.189 (100)	50 (100)	0.85 (100)	58 (100)	103 (100)
内層 No. 3	6/4	2.34	4.25	11980	23496	0.060 (37)	53 (100)	0.60 (73)	46 (88)	68 (71)
	6/7	2.14	3.86	16154	33995	0.114 (70)	35 (67)	0.73 (89)	49 (93)	80 (84)
	6/10	2.24	3.49	12705	22872	0.099 (60)	38 (73)	0.73 (89)	46 (87)	73 (77)
	6/13	2.32	3.25	12603	24820	0.157 (96)	43 (82)	0.81 (99)	52 (99)	85 (90)
	6/16	1.81 ※	1.89 ※	10748	17274	0.153 (93)	53 (100)	0.81 (99)	53 (100)	95 (100)
	6/19	1.22	2.13	7886 ※	13748 ※	0.164 (100)	49 (93)	0.82 (100)	49 (92)	89 (93)

^zCEはクロロゲン酸相当量、TEは α -トコフェロール相当量を示す

^y()内は各樹の各着果位置でのステージ中の最大値に対する割合

^x各硬度測定値の※はレオメータ値が急激に (0.08 kg/日) 低下し始める時期、貫入式硬度計値が2.2 kgを下回った時期、 Edf_2 が10,000を下回った時期および Edf_3 が17,000を下回った時期を示す

第3表 果実採取樹および採取時期の違いと果実硬度、弾性指標および梅酒品質（2011年）

	採取日 (月/日)	レオ メータ値 (kg)	貫入式 硬度計値 (kg)	弾性指標		褐色度 (吸光度 450 nm)	果実重 減少率 (%)	機能性成分含量		抗酸化能 ($\mu\text{molTE} \cdot$ 100 mL^{-1}) ^z
				Edf_2 ($\text{Hz}^2 \cdot \text{m}^2$)	Edf_3 ($\text{Hz}^2 \cdot \text{m}^2$)			クエン酸 ($\text{g} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$)	ポリフェノール ($\text{mgCE} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$) ^z	
A 園	6/8	3.03	4.44	18355	37844	0.062 (46) ^y	33 (55)	0.59 (60)	45 (94)	72 (82)
	6/11	2.89	4.09	15731	30809	0.102 (75)	38 (64)	0.68 (69)	48 (100)	79 (90)
	6/14	2.00 ※ ^x	3.60	12195	21161	0.096 (70)	31 (53)	0.86 (87)	48 (99)	78 (90)
	6/17	2.24	3.14	11549	19873	0.134 (98)	43 (73)	0.95 (96)	48 (100)	87 (100)
	6/20	1.59	2.61	8956 ※	15065 ※	0.136 (100)	47 (80)	0.95 (96)	48 (99)	88 (100)
	6/23	0.78	1.88 ※	5753	9792	0.137 (100)	54 (91)	0.96 (97)	42 (88)	81 (92)
	6/26	0.97	1.66	6396	10795	0.132 (96)	59 (100)	0.99 (100)	41 (85)	80 (91)
B 園 No. 1	6/14	2.01	3.19	12785	22110	0.104 (71)	30 (57)	0.84 (74)	45 (96)	80 (90)
	6/17	2.01	3.07	10262	16684 ※	0.144 (98)	44 (85)	0.88 (78)	47 (100)	88 (99)
	6/20	1.69 ※	2.58	10007	16984	0.144 (98)	46 (88)	0.89 (79)	46 (98)	89 (100)
	6/23	0.88	2.32	6397 ※	10654	0.139 (94)	48 (92)	1.07 (95)	39 (84)	77 (86)
	6/26	0.83	1.66 ※	5988	10256	0.147 (100)	52 (100)	1.13 (100)	40 (87)	82 (93)
B 園 No. 2	6/14	2.05	2.67	10637	18490	0.135 (100)	46 (80)	0.83 (80)	42 (97)	73 (89)
	6/17	1.83	2.96	10814	18569	0.121 (90)	47 (81)	0.90 (88)	43 (100)	82 (100)
	6/20	1.32 ※	2.23	8187 ※	13839 ※	0.131 (97)	52 (90)	0.93 (90)	40 (93)	80 (97)
	6/23	0.72	1.93 ※	5194	8969	0.118 (87)	57 (100)	0.95 (92)	39 (89)	71 (86)
	6/26	0.78	1.82	5669	9572	0.113 (84)	52 (90)	1.03 (100)	37 (86)	69 (84)
B 園 No. 3	6/14	2.15	3.43	12451	21746	0.076 (59)	32 (67)	0.77 (75)	41 (95)	69 (85)
	6/17	2.56	2.70	12749	21911	0.100 (78)	45 (96)	0.81 (79)	43 (100)	81 (100)
	6/20	1.89 ※	2.28	9864 ※	16787 ※	0.113 (88)	46 (97)	0.86 (84)	40 (95)	80 (98)
	6/23	0.89	1.92 ※	6425	10868	0.129 (100)	47 (100)	1.03 (100)	38 (90)	75 (92)
	6/26	0.82	1.75	5695	9822	0.122 (95)	47 (100)	1.00 (97)	37 (86)	71 (87)
C 園	6/16	2.90	4.07	16051	28574	0.088 (56)	31 (55)	0.89 (78)	44 (89)	77 (82)
	6/19	2.29 ※	3.31	12820	22047	0.117 (73)	41 (74)	0.85 (75)	47 (96)	89 (96)
	6/22	1.60	2.48	9115 ※	15289 ※	0.146 (92)	51 (91)	0.92 (81)	49 (100)	93 (100)
	6/25	1.10	2.08 ※	7701	12805	0.149 (94)	50 (90)	1.07 (94)	47 (96)	92 (99)
	6/28	0.80	1.72	6011	10009	0.159 (100)	51 (91)	1.14 (100)	45 (93)	88 (95)
	7/1	0.96	1.65	6880	11219	0.138 (87)	56 (100)	1.14 (100)	42 (87)	82 (88)

^zCEはクロロゲン酸相当量, TEは α -トコフェロール相当量を示す^y()内は各樹のステージ中の最大値に対する割合^x各硬度測定値の※はレオメータ値が急激に(0.08 kg/日)低下し始める時期, 貫入式硬度計値が2.2 kgを下回る時期, Edf_2 が10,000を下回る時期および Edf_3 が17,000を下回る時期を示す

位置それぞれのポリフェノール含量が最大となる時期かその前後であった。

2011年の結果について, レオメータ値が急激に低下し始める時期の果実を原料とした梅酒は, 褐色度, 果実重減少率, クエン酸含量, ポリフェノール含量および抗酸化能が各樹の各着果位置それぞれの最高値の53%以上で, クエン酸含量, ポリフェノール含量および抗酸化能については75%以上であった(第3表)。貫入式硬度計値が2.2 kgを下回った時期の果実を用いた梅酒は, 褐色度, 果実重減少率, クエン酸含量, ポリフェノール含量および抗酸化能が各樹の各着果位置それぞれの最高値の87%以上であった。 Edf_2 が10,000を下回った時期の果実を原料とした梅酒は, 褐色度, 果実重減少率, クエン酸含量, ポリフェノール含量および抗酸化能が各樹の各着果位置それぞれの最高値の80%以上であった。 Edf_3 が17,000を下回った時期の果実を原料とした梅酒は, 褐色度, 果実重減少率, クエン酸含量, ポリフェノール含量および抗酸化能が各樹の各着果位置それぞれの最高値の78%以上であった。また, 貫入式硬度計値

が2.2 kgを下回った時期, Edf_2 が10,000を下回った時期および Edf_3 が17,000を下回った時期の果実を原料とした梅酒は, 各樹の各着果位置それぞれのポリフェノール含量が最大となる時期かその前後であった。

両年とも, 原料果実のレオメータ値, 貫入式硬度計値, Edf_2 および Edf_3 は梅酒のクエン酸含量と強い負の相関関係が認められた(第4表)。

第4表 果実硬度および弾性指標と梅酒中クエン酸含量との相関係数

	2010年 ^z	2011年
レオメータ値 (kg)	-0.727 *** ^y	-0.848 ***
貫入式硬度計値 (kg)	-0.770 ***	-0.831 ***
弾性指標 Edf_2 ($\text{Hz}^2 \cdot \text{m}^2$)	-0.697 ***	-0.850 ***
弾性指標 Edf_3 ($\text{Hz}^2 \cdot \text{m}^2$)	-0.677 ***	-0.864 ***

^z2010年は1園の3樹の外層および内層より, 2011年は3園の5樹より, 発育ステージの異なる果実を採取

2010年はn=36, 2011年はn=28

^y***は0.1%水準で有意であることを示す

第4図 追熟条件の異なる果実の硬度および弾性指標の推移 (2011年)

果実階級 4L および 2L は追熟温度 20℃ で、果実階級 3L は追熟温度 20, 25 および 30℃ で追熟し、それぞれ 4L 20℃, 3L 20℃, 2L 20℃, 3L 25℃, 3L 30℃ とした

追熟日数は 0～6 日 (3L 30℃ は腐敗果発生のため 0～5 日)

バーは標準誤差を示す (n = 10)

第5図 追熟条件の異なる果実におけるレオメータ値と弾性指標の関係 (2011年)

詳細は第4図参照

3. 各種の方法による追熟条件の異なる果実の硬度測定 (試験3)

追熟条件の異なる果実における弾性指標について、 Edf_2 は Emf_2 との間に $r = 0.999$ ($p < 0.0001$) の、 Edf_3 は Emf_3 との間に $r = 0.999$ ($p < 0.0001$) の強い正の相関関係が認められた (データ略)。従って、以下の追熟中の果実における硬度指標についても発育中の果実と同様、 Edf_2 または Edf_3 で示す。 Edf_2 、 Edf_3 も経日的に低下し、レオメータ値と同様に追熟中の軟化進行を示した (第4図)。しかし、 Edf_2 および Edf_3 では追熟2日以後、3L 30℃ 区と他区との差が認められたがレオメータ値では差が認められなかった。追熟条件が異なる果実の硬度について、レオメータ値との間に Edf_2 は $r = 0.909$ の、 Edf_3 は $r = 0.889$ (ともに $p < 0.0001$) の強い正の相関関係が認められた (第5図)。

考 察

筆者らは、レオメータによる果実硬度が急激に低下し始める時期が、果実や加工した梅酒に機能性成分が多く含まれる時期の指標となること、および梅酒中の芳香成分含量が原料果実のレオメータ値との間に強い相関関係が認められ、レオメータ値が 0.98 kg より大きい果実を排除することで芳香成分が多い梅酒を製造できることを明らかにした

(大江ら, 2007, 2012)。このように果実硬度は梅酒の機能性成分や芳香成分の含量を高めるための原料選定の指標となることが示されたが、現地における汎用性の高い指標とするには、硬度の測定方法の改良が必要である。

レオメータ以外の装置でウメの果実硬度を測定した事例としては、恩田ら (1995) が近赤外分光法により、Chuma ら (1982) が delayed light emission により非破壊で硬度を推定できるとする報告があるが実用化には至っていない。非破壊での硬度測定については、近年、小型の音響振動硬度計 (携帯型振動硬度計) が開発され、その熟度推定に関する報告が多くなされているが、ウメについての報告はみあたらない。

そこで、携帯型振動硬度計で果実発育中や収穫後の弾性指標の変化を測定し、レオメータ値と比較するとともに、弾性指標と梅酒品質との関係についても調査した。また、発育中の果実の硬度変化については、より簡易な貫入式硬度計を用いた測定法についても実用性を検討した。

円柱形プランジャー直径 3 mm の貫入式硬度計での測定により、レオメータ値とは少し異なるものの、樹および採取時期の違いによる硬度差や同じ樹の着果位置の違いによる硬度差をある程度判断することができた。しかし、携帯型振動硬度計と比べてレオメータ値との相関関係が弱かった。従って、レオメータの代用としては、貫入式硬度計はやや精度の劣る測定法と考えられた。また、追熟中の果実は柔らかいため高い精度での測定が困難であり (データ略)、生産現場での硬度の目安に限定されると判断された。

携帯型振動硬度計での測定について、ウメ果実は種子が占める割合が大きく、青果収穫終期までは楕円形であるため、他の果実と同じ弾性指標の算出式を用いることができるかどうか不明であった。そこで、第2共鳴周波数または第3共鳴周波数に果実横径または果実重を組み合わせた4つの算出式で最適な測定方法も検討した。その結果、弾性指標の算出には、生育中の果実、追熟中の果実ともに、直径または果実重のどちらを用いても大差なく、貫入式硬度計と同様に、各弾性指標とも硬度差を検出することができ

た。また、レオメータとの相関関係が貫入式硬度計と比べて強く、より高い精度で硬度を測定可能と判断された。なお、 Edf_3 よりも Edf_2 を用いるほうがレオメータ値との相関関係が強いため、レオメータの代用としては Edf_2 を用いるのがよいと判断された。携帯型振動硬度計では、着果状態のウメ果実でも硬度指標の測定が可能であり、加えて非破壊測定のため同じ果実の硬度変化を測定できることから、果実による硬度のパラッキに影響を受けにくい測定方法であるとも考えられる。

次に、本試験において、機能性成分の多い梅酒を製造するための指標について調査したところ、レオメータでの測定時にみられる果実硬度が急激に低下する時期を、携帯型振動硬度計や貫入式硬度計により明確に判断できなかった。しかし、弾性指標 Edf_2 、 Edf_3 および貫入式硬度計値はレオメータ値と同様に梅酒中のクエン酸含量と負の相関関係が強く、梅酒中のクエン酸含量の目安になると判断された。また、 Edf_2 が 10,000 または Edf_3 が 17,000 を下回った時期の果実もしくはプランジャー直径 3 mm の貫入式硬度計で 2.2 kg を下回った時期の果実を用いた梅酒は機能性成分含量が多く、原料選定指標として利用できると判断された。既報（大江ら、2007）で、梅酒のポリフェノール含量および抗酸化能が最大となる時期は、レオメータ値が急激に低下し始める時期またはその前後 5 日の時期であることを報告した。本試験でも梅酒のポリフェノール含量および抗酸化能が最大となる時期は、レオメータ値が急激に低下し始める時期またはその前後 6 日以内の時期であり、既報とほぼ一致した。一方、本試験で Edf_2 が 10,000 または Edf_3 が 17,000 を下回った時期の果実もしくは貫入式硬度計で 2.2 kg を下回った時期は、梅酒のポリフェノール含量および抗酸化能が最大となる時期またはその前後 3 日の時期と一致した。従って、機能性成分を高めるための梅酒原料の選定指標としてはレオメータ値よりも精度良く判定できる可能性が示唆され、今後さらに多くの園地での調査が必要である。

一方、筆者らは既報（大江ら、2012）において、‘南高’果実を用いて製造した梅酒の総デカラクトン（ γ -デカラクトンと δ -デカラクトンの合計）、酪酸エチルおよび酢酸ブチルの各芳香成分含量とも、原料果実の果実硬度との間には強い相関関係が認められ、原料果実の硬度が 0.98 kg より大きい梅酒は、各芳香成分含量がほぼ $50 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 未満であり、梅酒の芳香成分含量の指標として果実硬度が利用できることを明らかにした。本試験では梅酒の芳香成分を調査していないが、携帯型振動硬度計値は Edf_2 、 Edf_3 とともに、果実発育中および追熟中のどちらもレオメータ値との間に強い正の相関関係が認められたことから、芳香成分の多い梅酒製造のための原料選定指標として利用できることが示唆された。本試験で発育中の果実について、 Edf_2 とレオメータ値との間には $y = 4525x + 2306$ （ y は Edf_2 、 x はレオメータ値）の関係式が得られ、レオメータ値が 0.98 kg の時

には、 Edf_2 が 6,741 となる。この数値が芳香成分が多い梅酒を製造するための収穫指標となると考えられることから、今後、実際に Edf_2 の測定値が梅酒の芳香成分を高める指標となるか検討が必要である。

摘 要

高い機能性成分や芳香成分を有するウメ‘南高’果実を用いた梅酒製造のために、硬度の評価法について、レオメータに代わる携帯型の硬度測定法を見いだそうとした。円柱形プランジャー直径 3 mm の貫入式硬度計で測定した果実硬度は、レオメータ値とは少し異なるものの、収穫時期による硬度の違いや着果位置による硬度の違いを判断することができた。携帯型振動硬度計で測定した弾性指標によっても、貫入式硬度計と同様にこれらの硬度の違いを検出することができ、弾性指標はレオメータとの相関が貫入式硬度計値と比べて強かった。弾性指標の算出には、生育中の果実、追熟中の果実ともに、直径または果実重のどちらを用いても大差なく、 Edf_3 よりも Edf_2 のほうがレオメータ値との相関関係が強かった。従って、レオメータの代用としてウメ果実の硬度を測定するには、 Edf_2 を用いるのが適当と判断された。レオメータで機能性成分の多い梅酒を製造するための指標である果実硬度が急激に低下する時期は、貫入式硬度計や携帯型振動硬度計では明確に判断できなかった。しかし、携帯型振動硬度計による Edf_2 が 10,000 または Edf_3 が 17,000 を下回った時期の果実、もしくは円柱形プランジャー直径 3 mm の貫入式硬度計で 2.2 kg を下回った時期の果実を用いた梅酒は機能性成分含量が多かった。これらの結果から、携帯型振動硬度計はウメ果実の非破壊硬度測定に適し、その弾性指標は機能性成分や芳香成分の多い梅酒原料の指標として利用できる可能性が示された。

引用文献

- 秋元秀美・櫻井直樹・岩谷真一郎・高橋昌之. 2011. 弾性指標を用いたアボカドのサイズ・硬さ別の食べ頃予測. 園学研. 10 (別1): 265.
- 知野秀次・松本辰也・太田祐樹・児島清秀. 2009. 追熟中のセイヨウナシ‘ルレクチェ’における非破壊法による果実特性の評価. 園学研. 8: 109-114.
- 知野秀次・徳田美佳子・大石智美・小式澤一博・太田祐樹・松本辰也・児島清秀. 2010. 低温処理期間の違いが追熟中のセイヨウナシ‘ルレクチェ’の果実特性に及ぼす影響. 園学研. 9: 235-241.
- Chuma, Y., K. Nakaji and M. Ohura. 1982. Maturity and freshness evaluation of Japanese apricots by means of delayed light emission. J. Fac. Agr. Kyushu Univ. 27: 21-31.
- 文室政彦・櫻井直樹. 2011. 音響振動法によるマンゴー‘アーウィン’の果肉硬度の評価. 園学研. 10 (別1): 263.
- 神田巳樹夫・谷脇 満・櫻井直樹. 2010. 携帯型振動硬度

- 計によるカキ‘西条’の収穫期予測法. 園学研. 9 (別2): 233.
- 小林秀誉. 1999. DPPHを用いたラジカル捕捉能の測定. p. 19–20. 食品の機能性評価マニュアル集. 農林水産省農林水産技術会議事務局.
- 黒坂 俊・知野秀次・太田祐樹・齋藤洋太郎・坂井 優・児島清秀. 2010. ニホンナシ‘幸水’, ‘新高’および‘新興’におけるMA包装が果実貯蔵に及ぼす影響および貯蔵期間中の弾性指標のモニタリング. 新潟大農研報. 62: 81–87.
- 元村佳恵・長尾多実子・櫻井直樹. 2004. 6品種のリンゴ果実硬度のレーザー・ドップラー法による非破壊・非接触測定. 食科工誌. 51: 483–490.
- Murayama, H., I. Konno, S. Terasaki, R. Yamamoto and N. Sakurai. 2006. Nondestructive method for measuring fruit ripening of ‘La France’ pears using a laser doppler vibrometer. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 75: 79–84.
- 中野有加・櫻井直樹・藤路 陽・堀江秀樹・中野明正・鈴木克己. 2008. 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. 園学研. 7: 543–547.
- 大江孝明・桑原あき・根来圭一・山田知史・菅井晴雄. 2006. ウメ‘南高’果実の開花時期, 採取時期と果実成分の関係およびそれらを原料として製造した梅酒品質への影響. 園学研. 5: 141–148.
- 大江孝明・桑原あき・根来圭一・山田知史・菅井晴雄. 2007. ウメ‘南高’における梅酒用果実の熟度指標に関する研究. 園学研. 6: 77–83.
- 大江孝明・櫻井直樹・山崎哲弘・奥井弥生・石原紀恵・岡室美絵子・細平正人. 2012. 高い芳香成分を有する梅酒製造のためのウメ‘南高’果実の熟度指標. 園学研. 11: 515–521.
- 大畑和也・櫻井直樹. 2011. 携帯型振動硬度計を用いたブルーン果実品質の非破壊測定. 園学研. 10 (別2): 297.
- 恩田 匠・飯野修一・乙黒親男. 1995. 近赤外分光法によるウメ果実の硬度計測. 日食低温誌. 21: 139–142.
- Takahashi, M., M. Taniwaki, N. Sakurai, T. Ueno and H. Yakushiji. 2010. Changes in berry firmness of various grape cultivars on vines measured by nondestructive method before and after veraison. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 79: 377–383.
- Taniwaki, M. and N. Sakurai. 2010. Evaluation of the internal quality of agricultural products using acoustic vibration techniques. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 79: 113–128.
- 坪井達夫. 2002. 相関係数と共分散. p. 98–99. Excelで学ぶ統計・統計で学ぶExcel. エーアイ出版. 東京.
- 上田悦範. 2000. 収穫物の評価と品質管理. 化学成分の変化. p. 139. 山田裕文編著. 応用植物科学実験. 養賢堂. 東京.