

98

## 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

元村佳恵<sup>§</sup>, 長尾多実子, 桜井直樹\*

弘前大学農学生命科学部

\* 広島大学総合科学部

Nondestructive and Noncontact Measurement of Flesh Firmness of 6 Apple Cultivars  
by Laser Doppler Vibrometer (LDV)

Yoshie Motomura<sup>§</sup>, Tamiko Nagao and Naoki Sakurai\*

Faculty of Agriculture and Life Science, Hirosaki University.

3, Bunkyo-cho, Hirosaki-shi, Aomori 036-8561

\* Faculty of Integrated Art and Science, Hiroshima University,

1-7-1, Kagamiyama, Higashi-Hiroshima-shi, Hiroshima, 739-8511

For the investigation of non-destructive measurement of fruit firmness, 6 cultivars of apple fruit were stored at 20°C after harvest. Every week, using 5-10 fruits, the frequency of second resonance of individual fruit were measured by a Laser Doppler Vibrometer (LDV) non-destructively, and the elastic indexes were calculated with the second resonance and fresh weight. Thereafter, the flesh firmness was measured by ordinary destructive method with the Magnes-Taylor fruit firmness tester. From the correlation coefficient between the elastic indexes and the firmness, the possibility to measure the flesh firmness of 6 apple cultivars by LDV method was evaluated. As the result, in 'Natsumidori', 'Iwai', 'Tsugaru' and 'Starking Delicious', the correlation coefficients were over 0.89, a practical possibility of this method was suggested. In 'Fuji' and 'Golden Delicious', however, the correlation coefficients were lower than 0.73, and 0.66, respectively. In these two cultivars, further analysis on this method are proceeding for the practical application.

(Received Mar. 29, 2004 ; Accepted Jun. 1, 2004)

近年、果実などの農産物の品質評価と等級付けが消費者価格に直接影響するばかりでなく、生産者の収入を大きく左右するため、個々の果実について、より正確な品質評価が求められている。現在では、果実の流通過程において農協等の共同出荷施設で個々の果実品質の非破壊的測定が行われ、大きさ、果皮色などの外観に加えて、糖度や酸度の測定、及び内部障害の検出が行われている。しかし、果実は成熟に伴って軟化するの、果肉硬度は品質評価の重要な因子の一つであるにもかかわらず、果肉硬度の非破壊的測定法はまだ研究段階にあり、実用化には至っていない。

果肉硬度の非破壊測定の可能性については古くから検討が行われ、リンゴ<sup>1)~6)</sup>、キーウィフルーツ<sup>7)</sup>、カンキツ<sup>8)</sup>、セイヨウナシ<sup>14)8)</sup>、モモ<sup>14)</sup>、アボカド<sup>9)</sup>、トマト<sup>10)11)</sup>、などの果実に軽い衝撃や振動を与えた時に発生する音や振動などの応答反応の大きさと周波数を測定する方法、及び近赤

外線を用いる方法などが研究され、総説にまとめられている<sup>12)</sup>。しかし、物理的な衝撃を与える方法は、モモなどの柔らかい果実の測定では、果実表面に傷がつく可能性があり、利用できる果実種が限られてくる。近年、レーザー・ドップラー (LDV) 法によって、非破壊・非接触で果肉硬度を測定する方法<sup>13)</sup>の研究が進み、リンゴ<sup>13)~15)</sup>、キーウィフルーツ<sup>13)14)16)17)</sup>、カキ<sup>14)</sup>、などの果実で試験が行われた。これらの果実で、破壊法で測定した果実の硬度、果実組織や細胞壁多糖類の化学変化及び、LDV法で測定した共鳴周波数から算出した弾性率や粘性の関係を検討した結果、果肉の弾性率から果肉硬度の推定が可能であることが報告されている。この方法は、果実の軟化に伴って共鳴周波数や弾性率が低下することを利用したもので、非破壊であるばかりでなく、非接触測定なので、モモのような柔らかい果実にも応用できるだけでなく、メロンのように大きい果実でも、ブドウなどの小果類でも測定できるという利点がある。また、LDV法でキーウィフルーツ、モモ、カンキツなどで、果実内組織の異常の検出や<sup>18)</sup>、輸出用リンゴの

〒036-8561 青森県弘前市文京町3

\* 〒739-8511 広島県東広島市鏡山1-7-1

§ 連絡先 (Corresponding author), ymotomur@mte.biglobe.ne.jp

臭化メチルクン蒸処理によって発生した果実内褐変果の検出<sup>19)</sup>も可能であることが報告されている。

リンゴについては、'Delicious'<sup>2)</sup>, 'Golden Delicious'<sup>3)5)6)</sup>, 'Starking Delicious'<sup>5)6)</sup>, 'Granny Smith'<sup>5)6)</sup>, 'ふじ'<sup>13)15)</sup>, '王鈴'<sup>14)</sup> など<sup>3)</sup> の品種で非破壊的硬度測定が検討された。その中で LDV 法で測定されたのは、'ふじ'<sup>13)15)</sup> 及び '王鈴'<sup>14)</sup> で、共鳴周波数から算出した弾性率の値から果肉硬度が推定できることが報告されている。リンゴは、早生種から晩生種まで多くの品種が栽培され、果肉の軟化速度や肉質が品種や栽培条件、貯蔵条件などによって異なることが知られている。品種間差については 3 品種のリンゴを用いて、非破壊測定を行った報告<sup>3)6)</sup> があるが、現在日本で流通している品種について LDV 法で測定した報告は見あたらない。筆者らは LDV 法の実用化を目指すにあたって、リンゴでどの品種でも LDV 法で非破壊的硬度測定が可能かどうかを検討する必要があると考えている。

本研究では、現在日本の市場に流通している主要 6 品種のリンゴについて、LDV 法で測定して得た共鳴周波数から弾性率を算出し、その値と、従来から広く一般に用いられている Magnes-Taylor 形硬度計による破壊的方法による硬度の測定結果を比較し、LDV 法による非破壊的硬度測定のリンゴへの応用の可能性を検討することを目的とした。

実験方法

1. 供試果実

弘前大学農学生命科学部附属生物共生教育研究センターの藤崎農場で無袋栽培しているリンゴ (*Malus pumila* Mill. var. *domestica* Shneid) の '祝', 'つがる', 'スターキング・デリシャス', 'ゴールデン・デリシャス' 及び 'ふじ' の 5 品種、及び弘前市近郊の農家で栽培している '夏緑' の合計 6 品種を用いた。2001 年に品種ごとに通常の収穫時期に収穫し (表 1), 収穫当日に 0℃ の貯蔵庫に搬入した。それぞれの品種で熟度や大きさの揃った果実 65~170 果を選び、初回測定分の 5~10 果を除いて半数ずつ 2 区に分けた。各区の果実 2~4 果ずつをポリエチレン袋 (25×35 cm, 厚さ 0.03 mm) に入れて袋の口を閉め、1 区を 0℃, 他区を 20℃ の恒温器に貯蔵した。貯蔵開始後、早生品種は 3

~4 日ごと、中晩生種は 7 日ごとに 10 果を恒温器から取り出して以下の測定を行った。各品種の収穫日、貯蔵条件、測定日、測定個体数などを表 1 に示した。

2. レーザー・ドップラー法による果実の弾性率の測定

果実を恒温器から取り出し、新鮮重を測定した後、Muramatsu<sup>13)</sup> らの方法に準じて振動装置 (加振装置: 振動試験装置 エミック株式会社製 512A, 増幅装置: 増幅器 エミック株式会社製 371-A, 振動測定計: レーザー・ドップラー振動計 株式会社小野測器製 LV-1300, データ解析装置: マルチパーパス FFT アナライザ, 株式会社小野測器製 CF-5210) を用い、10~2000 Hz までの振動を与えて、10 Hz ごとに振動強度を測定し、第 2 及び第 3 共鳴周波数を調査した (図 1)。果実の新鮮重と第 2 または第 3 共鳴周波数を用いて以下の式で弾性率 (E: Elastic index) を算出した<sup>13)</sup>。

$$Ef_2 \text{ (または } Ef_3) = m^{2/3} \times f_2^2 \text{ (または } f_3^2)$$

弾性率 (E), 新鮮重 (m), 第 2 共鳴周波数 ( $f_2$ ), 第 3 共鳴周波数 ( $f_3$ ),

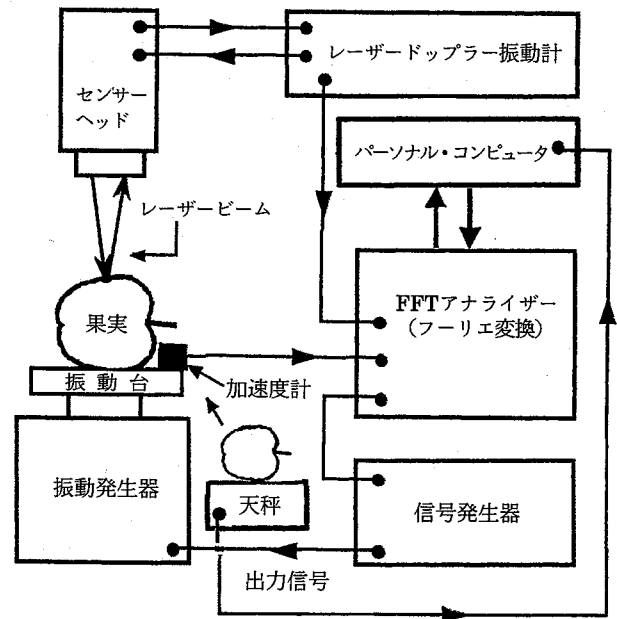


図 1 レーザー・ドップラー法による振動測定装置の概略

表 1 供試果実の概要

品種名	収穫日 (年月日)	測定期間 (2001-2002)	貯蔵温度 (℃)	測定間隔 (日)	1回の測定 個体数 (個)	測定回数 (回)	全測定 個体数 (個)
夏緑	2001. 8. 3	8/ 6- 8/23	0, 20	3 または 4	7	6	77
祝	2001. 8. 22	8/31- 9/20	0, 20	3 または 4	10	7	130
つがる	2001. 9. 19	10/ 4-11/ 8	0, 20	7	10	7	130
スターキング	2001. 10. 25	12/28- 2/ 8	0, 20	7	5	7	65
ゴールデン	2001. 11. 13	2/ 6- 3/18	0, 20	7	5	7	65
ふじ	2001. 11. 8	12/27- 2/22	0, 20	7	10	9	170

### 3. 破壊法による果肉硬度の測定

果実赤道部付近の2ヶ所の果皮を直径約2cmの円形に除去した。Magnes-Taylor型果実硬度計(Penetrometer, Fruit tester FT-327, FACCHINI製, Italy)に直径11mm, 高さ22mmの円筒形プランジャーを装着した。果肉に常法により深さ6mmまでプランジャーを侵入させたときの破断強度(最大抵抗)を測定し, 果肉硬度とした。

### 4. 果実比重の測定

上記の項目について測定した後, 個々の果実を適宜の大きさに分割し, 一定量の水を入れたメスシリンダーに入れ, 果実全体を水面下まで沈め, 果実の体積を測定した。新鮮重と体積の値から果実の比重を算出した。

## 実験結果及び考察

### 1. 各品種の果実の第2, 3共鳴周波数及び弾性率

本実験で, 個々の果実をLDV法で非破壊的に測定したときの波形から, 第2共鳴周波数( $f_2$ )及び第3共鳴周波数

( $f_3$ )を調査したところ, 20°C貯蔵ではどの品種でも, 貯蔵期間が長いほど低い値を示した(表2~7)。 $F_2$ と果実の新鮮重を用いて算出した弾性率(第2弾性率( $Ef_2$ ))も貯蔵期間が長いほど, 低い値を示した。また, 0°C貯蔵果に比べて, 20°C貯蔵果では, 貯蔵期間が長くなると $f_2$ 及び $f_3$ の低下, 及び $Ef_2$ の低下が顕著であった。 $F_3$ を用いて同様に弾性率( $Ef_3$ )を算出したが,  $Ef_2$ とほとんど同様の傾向を示した。0°C貯蔵果では, どの品種でも $f_2$ や $f_3$ の低下は少なく,  $Ef_2$ や $Ef_3$ の変化も小さかった。

$Ef_2$ の変化を品種間で比較すると, 20°C貯蔵区では, '夏緑', '祝', 'つがる', 'スターキング・デリシャス'では比較的低下速度が速かったが, 'ふじ'では変化が最も少なかった。0°C貯蔵区では,  $Ef_2$ の変化はすべての品種で20°C貯蔵果に比べて小さかった。

### 2. 果実貯蔵中の果肉硬度の変化

果肉硬度を表す場合, 単位面積あたりの応力をNなどの単位で表すのが一般的である。しかし, Magnes-Taylor

表2 '夏緑'の共鳴周波数, 弾性率及び果肉硬度の変化

貯蔵温度	貯蔵期間(日)	果重(g)	第2共鳴周波数(Hz)	第2弾性率( $Ef_2$ )	第3共鳴周波数(Hz)	果肉硬度 N (lb)
0°C	0	136.6	965	24.78	1422	48.1 (10.8)
0°C	3	126.2	1010	25.59	1483	59.6 (13.4)
	7	126.2	1020	26.09	1520	49.4 (11.1)
	10	125.7	1027	26.19	1513	48.5 (10.9)
	14	126.2	977	24.13	1430	48.5 (10.9)
	17	125.4	1015	25.62	1494	43.1 (9.7)
20°C	3	140.4	981	26.21	1450	47.6 (10.7)
	7	140.1	884	20.93	1299	32.1 (7.2)
	10	138.8	793	16.85	1022	29.8 (6.7)
	14	143.8	826	18.63	1066	32.1 (7.2)
	17	132.4	774	15.77	1149	29.4 (6.6)

表3 '祝'の共鳴周波数, 弾性率及び果肉硬度の変化

貯蔵温度	貯蔵期間(日)	果重(g)	第2共鳴周波数(Hz)	第2弾性率( $Ef_2$ )	第3共鳴周波数(Hz)	果肉硬度 N (lb)	比重
0°C	0	202.4	925	29.35	1451	63.2 (14.2)	0.801
0°C	3	191.3	946	29.58	1473	64.5 (14.5)	0.799
	6	184.1	969	29.98	1509	62.7 (14.1)	0.799
	10	179.6	970	29.76	1515	60.5 (13.6)	0.799
	13	177.7	957	28.72	1504	60.1 (13.5)	0.811
	17	187.2	946	29.45	1485	57.4 (12.9)	0.806
	20	180.1	943	27.57	1462	52.1 (11.7)	0.808
20°C	3	198.1	880	26.08	1370	49.4 (11.1)	0.795
	6	177.4	835	21.78	1277	37.8 (8.5)	0.781
	10	204.6	776	20.55	1191	31.6 (7.1)	0.781
	13	206.8	750	19.28	1175	27.6 (6.2)	0.779
	17	196.1	716	16.89	1110	25.8 (5.8)	0.776
	20	170.4	735	15.81	1097	30.2 (6.8)	0.795

表 4 'つがる' の共鳴周波数, 弾性率及び果肉硬度の変化

貯蔵温度	貯蔵期間 (日)	果重 (g)	第 2 共鳴周波数 (Hz)	第 2 弾性率 ( $Ef_2$ )	第 3 共鳴周波数 (Hz)	果肉硬度 N (lb)	比重
0°C	0	303.8	789	27.92	1169	46.3 (10.4)	0.796
0°C	7	307.9	767	26.61	1158	45.4 (10.2)	0.804
	14	295.7	779	26.72	1135	43.1 (9.7)	0.801
	21	320.6	763	26.53	1120	44.9 (10.1)	0.817
	28	288.4	757	24.98	1140	40.5 (9.1)	0.796
	35	325.2	705	23.42	1053	33.4 (7.5)	0.785
	42	281.3	741	23.41	1120	35.1 (7.9)	0.795
20°C	7	306.9	700	22.18	1053	35.1 (7.9)	0.792
	14	262.5	679	20.25	1008	33.8 (7.6)	0.792
	21	272.1	678	19.32	1026	31.6 (7.1)	0.799
	28	327.1	578	15.79	899	28.9 (6.5)	0.783
	35	319.8	545	13.86	838	25.4 (5.7)	0.788
	42	308.5	599	16.09	904	29.8 (6.7)	0.789

表 5 'スターキング・デリシャス' の共鳴周波数, 弾性率及び果肉硬度の変化

貯蔵温度	貯蔵期間 (日)	果重 (g)	第 2 共鳴周波数 (Hz)	第 2 弾性率 ( $Ef_2$ )	第 3 共鳴周波数 (Hz)	果肉硬度 N (lb)	比重
0°C	0	306.7	813	30.01	1271	57.4 (12.9)	0.911
0°C	7	313.7	832	31.91	1247	54.7 (12.3)	0.867
	14	296.2	810	29.08	1252	52.9 (11.9)	0.888
	21	308.7	798	29.05	1235	48.5 (10.9)	0.867
	28	293.2	812	28.99	1282	52.1 (11.7)	0.871
	35	290.7	820	29.22	1283	48.1 (10.8)	0.881
	42	293.8	838	30.94	1301	47.6 (10.7)	0.859
20°C	7	283.1	772	25.48	1247	48.5 (10.9)	0.855
	14	295.8	724	23.26	1252	36.5 (8.2)	0.814
	21	286.9	694	20.77	1235	32.1 (7.2)	0.816
	28	297.3	562	15.91	1282	23.1 (5.2)	0.806
	35	217.3	462	10.93	1283	18.2 (4.1)	0.732
	42	298.1	653	16.89	968	24.9 (5.6)	0.781

表 6 'ゴールデン・デリシャス' の共鳴周波数, 弾性率及び果肉硬度の変化

貯蔵温度	貯蔵期間 (日)	果重 (g)	第 2 共鳴周波数 (Hz)	第 2 弾性率 ( $Ef_2$ )	第 3 共鳴周波数 (Hz)	果肉硬度 N (lb)	比重
0°C	0	240.3	843	26.87	1300	44.9 (10.1)	0.775
0°C	7	230.9	700	18.55	1056	49.8 (11.2)	0.771
	14	224.8	737	20.97	1226	44.9 (10.1)	0.779
	21	227.9	793	23.41	1221	42.7 (9.6)	0.786
	28	248.5	805	25.71	1240	44.9 (10.1)	0.781
	35	247.2	760	22.81	1177	42.7 (9.6)	0.781
	42	262.9	758	23.65	1182	41.8 (9.4)	0.772
20°C	7	243.2	743	21.49	1151	42.3 (9.5)	0.786
	14	237.1	706	19.12	1041	36.1 (8.1)	0.765
	21	242.6	706	19.49	1110	34.7 (7.8)	0.772
	28	232.7	640	18.98	1026	36.1 (8.1)	0.763
	35	233.9	475	10.44	893	36.1 (8.1)	0.776
	42	223.1	513	9.81	—	35.1 (7.9)	0.762

型硬度計で測定した値が実用場面では広く一般に用いられている。本研究は、LDV法の実用化の可能性を検討することを視野に入れたものなので、表2~7では果肉硬度としてMagnes-Taylor型硬度計による測定値(1b)を付記した。また、図2では同硬度計による測定値(1b)を用いた。

6品種のリンゴ果実を0℃または20℃で貯蔵した時の果肉硬度の変化(表2~7)を見ると、どの品種でも、0℃貯蔵果では果肉硬度はほとんど変化しなかったが、20℃では

貯蔵期間が長くなると低下した。品種間で比較すると、20℃貯蔵では‘夏緑’や‘祝’では果肉硬度は急速に低下し、‘ふじ’では変化が最も少なく、その他の品種ではそれらの品種の中間的な変化を示した。表2~7の結果では、果肉硬度と前記の第2弾性率はともに低下したが、品種によって、両者の低下速度が必ずしも一致しないことが判った。

表7 ‘ふじ’の共鳴周波数、第2弾性率、及び果肉硬度の変化

貯蔵温度	貯蔵期間(日)	果重(g)	第2共鳴周波数(Hz)	第2弾性率(Ef <sub>2</sub> )	第3共鳴周波数(Hz)	果肉硬度N(1b)	比重
0℃	0	294.5	830	30.49	1291	68.1 (15.3)	0.866
0℃	7	292.2	878	32.92	1352	65.4 (14.7)	0.862
	14	273.7	876	32.21	1346	68.9 (15.5)	0.863
	21	269.1	880	31.47	1370	67.6 (15.2)	0.857
	28	278.7	914	35.41	1374	63.2 (14.2)	0.861
	35	287.8	904	35.25	1378	61.4 (13.8)	0.851
	42	298.7	890	34.47	1358	60.9 (13.7)	0.861
	49	277.8	898	34.21	1348	61.4 (13.8)	0.857
	56	291.1	874	33.43	1250	56.1 (12.6)	0.849
20℃	7	306.6	821	30.65	1257	64.5 (14.5)	0.854
	14	317.1	759	26.79	1162	56.1 (12.6)	0.841
	21	317.1	748	26.01	1161	57.4 (12.9)	0.856
	28	304.3	717	23.26	1103	54.3 (12.2)	0.841
	35	290.1	710	22.09	1101	56.5 (12.7)	0.849
	42	273.1	688	19.91	1037	50.3 (11.3)	0.851
	49	296.1	634	17.43	958	54.3 (12.2)	0.844
	56	289.6	634	17.61	978	56.9 (12.8)	0.841

表8 各品種の果肉硬度と第2弾性率との相関係数の変化

貯蔵温度	累積測定回数	夏緑	祝	つがる	スターキング・デリシャス	ゴールドン・デリシャス	ふじ
0℃	1回目まで	0.892**	0.044	0.611*	0.318	-0.208	0.611*
0℃	2回目まで	0.901**	0.325	0.673*	0.374	-0.305	0.324
	3回目まで	0.871**	0.475	0.674*	0.572*	-0.335	-0.146
	4回目まで	0.882**	0.468	0.631*	0.592*	-0.345	-0.272
	5回目まで	0.871**	0.477	0.573*	0.546*	-0.359	-0.354
	6回目まで	0.829**	0.434	0.692**	0.542*	-0.278	-0.365
	7回目まで	—	0.577*	0.733**	0.487*	-0.296	-0.355
	8回目まで	—	—	—	—	—	-0.227
	9回目まで	—	—	—	—	—	-0.205
20℃	2回目まで	0.894**	0.803**	0.845**	0.638*	0.371	0.555*
	3回目まで	0.878**	0.921**	0.895**	0.836**	0.561*	0.729**
	4回目まで	0.881**	0.943**	0.901**	0.836**	0.604*	0.692**
	5回目まで	0.862**	0.946**	0.904**	0.878**	0.655*	0.661**
	6回目まで	0.850**	0.928**	0.902**	0.914**	0.526*	0.621*
	7回目まで	—	0.881**	0.913**	0.907**	0.543*	0.583*
	8回目まで	—	—	—	—	—	0.495*
	9回目まで	—	—	—	—	—	0.462*

\*、\*\*：それぞれ5%、1%レベルで有意であることを示す。

### 3. 果実の第 2 弾性率と果肉硬度の相関

貯蔵中の果実について、各区の果肉硬度と  $E_{f2}$  値の平均値の経時変化を見ると、概略的には類似の傾向を示すように思われた。しかし、本研究の目的から、果実の非破壊測定においては、個々の果実の果肉硬度が、LDV の測定結果から推定できるかどうかの問題である。そこで、品種ごとに 20°C 貯蔵果実について測定した個々の果実について、果肉硬度と LDV 法で測定した弾性率 ( $E_{f2}$ ) との関係を図 2 に示した。この図で、20°C 貯蔵区ではどの品種でも果肉硬度と第 2 弾性率との間には有意な相関があることが示された。特に、'夏緑'、'祝'、'つがる'、'スターキング・デリシャス' では高い相関が見られた。

次に、両者の関係を相関係数を用いて数量的に検討した (表 8)。本実験では、貯蔵中測定回数を重ねるごとに 5~10 果分づつ測定結果が累積される。そこで、貯蔵期間ごとに累積された結果を用いて相関係数を算出したところ、20°C 貯蔵の '夏緑' では 2 回目 (3 日目)、'祝' では 5 回目 (13 日目)、'つがる' では 7 回目 (6 週間目)、'スターキング・デリシャス' では 6 回目 (5 週間目)、'ゴールデン・デリシャス' では 5 回目 (4 週間目)、'ふじ' では 3 回目 (2 週間目) に最高の値を示し、それ以前及びそれ以降では次第に低下する傾向が認められた。最も高い相関係数を比較すると (表 8)、'祝'、'つがる'、'スターキング・デリシャス' の 3 品種ではそれぞれ約 0.9 以上、'夏緑' では 0.89 以上の高い値を示したが、'ゴールデン・デリシャス' と 'ふじ' ではそれぞれ 0.655 及び 0.729 と、比較的低い値であった。

表 2~7 の結果を見ると、20°C 貯蔵で軟化が急速に進む品種である '夏緑'、'祝'、'つがる'、'スターキング・デリシャス' では、比較的高い相関を示す傾向が認められた。'ゴールデン・デリシャス' と 'ふじ' で比較的低い相関が低かったのは、これらの品種では軟化が緩慢であり、本実験期間中の硬度変化が少なかったことが影響していると考えられる。リンゴ果実の軟化程度の測定や肉質 (粉質化の程度) の官能検査は、生産・出荷現場では日常的に行われているが報告は非常に少ない。本報で測定した 6 品種中 'ゴールデン・デリシャス' 以外の 5 品種については報告があり<sup>20)</sup>、これらの品種の軟化速度は本報の結果 (表 2, 3, 4, 5, 7) とよく一致している。これらの果実を 20°C で本実験の期間以上貯蔵を続けた場合、果皮の破壊や果実内褐変が高い頻度で発生したので、それぞれの品種の貯蔵期間は貯蔵可能期間であった。これらの結果から、前の 4 品種については LDV 法で果肉硬度の測定が充分可能であると考えられる。しかし、後の 2 品種については今後の検討が必要である。

本法は内部が均質な理想的球体では理論値に非常に近い値が得られることが報告されている。しかし、リンゴなど天然の果実の形は理想球体ではなく、内部は均質ではないので、それらが測定値に影響している可能性が考えられる。表 8 で、貯蔵期間によって相関が変化するのは、果実内部の質的な変化を反映している可能性があると考えられる。また、果実内部は均一ではなく、果肉の部位によって軟化 (粉質化) の進行に遅速があることも知られている<sup>20)</sup>。

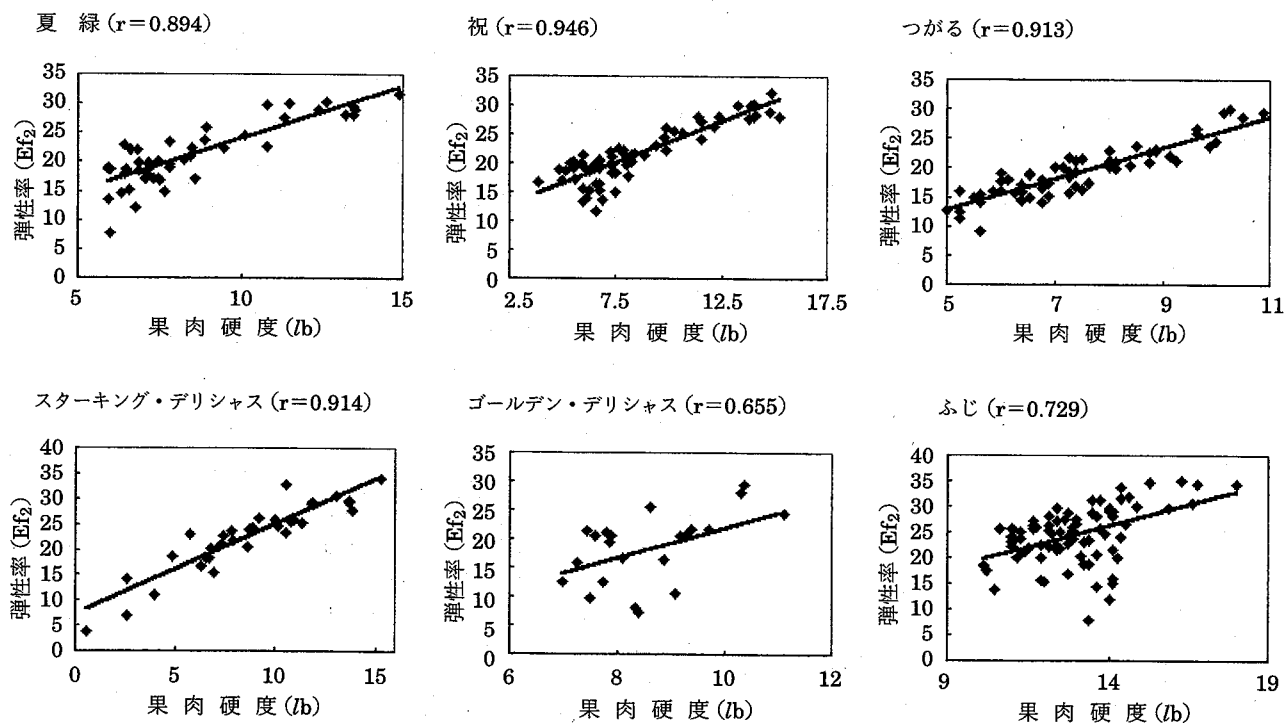


図 2 各品種の果肉硬度と第 2 弾性率との関係 (かっこ内の数字は測定中の最高相関係数)

そこで、果実内部にある測定値に影響する因子を検索したと考えた。リンゴ果実は品種によっても、成熟の程度によっても比重が異なると考えられるので、 $Ef_2$ に及ぼす果実比重の影響を検討した。品種ごとに個々の果実の $Ef_2$ に果実比重を掛けた値を算出したところ、すべての品種で果肉硬度との相関係数が若干(0.01程度)高くなったが、比重の影響は小さいことが明らかになった。この結果は $Ef_2$ への影響因子として、比重以外の果肉の物理性を検討する必要のあることを示している。

今回測定した品種の中で、'夏緑'、'祝'、'ゴールデン・デリシャス'、'ふじ'では、 $Ef_2$ が低いにもかかわらず、果肉硬度が必ずしも低くはない個体があることが認められた。本実験でも、一般農家や選果場でも破壊的に果肉硬度を測定する場合、Magnes-Taylor型硬度計で、果皮の下、数mmの深さまでプランジャーを挿入している。従って、この方法では果肉全体の硬度を測定しているとは限らない。今後、果肉硬度の測定部位や測定方法を検討する必要があると考えられる。

現在の主力品種である'ふじ'では相関係数が比較的低く、本法の実用化を考える上で若干の問題が残るので、現在、'ふじ'については弾性率( $Ef_2$ )と果肉硬度の単純相関以外の方法を検討中である。現実には、'ふじ'の実用場面における選果の目安として、Magnes-Taylor型硬度計による破壊的測定で、約141b(62.3N)以上の果肉硬度を持つ果実を高品質、約121b(53.4N)を出荷限界としている。現実には市場では101b(44.5N)程度の果実でも販売されている。本実験で用いたLDV法による測定結果を基にした弾性率( $Ef_2$ )の値からでも、'ふじ'については、果肉硬度121b以上及び141b以上の果実を選別することは可能と考えられる。

さらに、果実の軟化においては、果実の種や品種、貯蔵条件などによって肉質が異なることはよく知られている。リンゴ果実の特徴的な変化の一つとして、粉質化があげられる。粉質化とは成熟に伴って細胞壁多糖類の分解が起こり細胞間の接着力が弱まることで、細胞間の解離を利用して、粉質化の程度を破壊的に測定する方法が確立されている<sup>20)</sup>。しかし、非破壊的に粉質化を測定する方法はまだ提案されていない。果肉の組織や細胞壁多糖類の化学的変化が、LDVの測定値に影響することも報告されており<sup>14)16)</sup>、本報におけるリンゴのLDVによる測定値はそれらの変化を反映していると考えられる。今後、果肉の硬度ばかりでなく、リンゴの粉質化、セイヨウナシのメルティングなど、果肉の質的な違いを非破壊的に測定する方法の開発が望まれる。

LDV法の実用化にあたって、特定範囲の周波数の振動を測定することになるので、装置の簡便化は充分可能と考えられる。しかし、現在用いられている選果システムのラインにLDV装置を組み込む場合、他の機器による振動の

影響を低減させることが必要と考えられる。また、コスト面での検討も必要であろう。

## 要 約

現在市場に流通している6品種の無袋栽培リンゴ果実を20℃で約2~8週間貯蔵した。1週間ごとに5~10果について、個々にレーザー・ドップラー(LDV)法で第2共鳴周波数を測定し、その値と果実新鮮重から弾性率( $Ef_2$ )を算出した。また、個々の果実の果肉硬度を従来の破壊法(Magnes-Taylor型硬度計)で測定した。両者の相関係数は'祝'、'つがる'、'スターキング・デリシャス'、'夏緑'では約0.89以上であったことから、これらの品種ではLDV法で果肉硬度を推定することが充分可能と考えられた。'ゴールデン・デリシャス'と'ふじ'では、相関係数がやや低かった。果実の比重が $Ef_2$ に影響するかどうかを検討したが、影響は小さいと判断された。青森県では'ふじ'の選果において、販売可能な果肉硬度限界は121b(Magnes-Taylor型硬度計)以上、高品質果実の判定基準は141b(同)以上とされているが、LDV法でそれらの硬度を持つ果実を選別することは可能と考えられる。

本研究の遂行にあたって、装置の設置場所を提供し、多くの助言を下された青森県りんご試験場の研究員の皆様に感謝の意を表す。また、レーザー・ドップラー装置の設置や果実の物理性の測定について、多くの助言を下された松下寿電子(株)の和田直樹氏及び寺崎章二氏に深謝する。

## 文 献

- 1) Delwiche, M. and Sarig, Y., A probe impact sensor for fruit firmness measurement. *Trans. Amer. Soc. Agr. Eng.*, **34** (1), 187-192 (1991).
- 2) Abbott, J.A., Affeldt, R.A. and Liljedahl, L.A., Firmness measurement of stored 'Delicious' apples by sensory methods, Magnes-Taylor, and Sonic Transmission. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **117** (4), 590-595 (1992).
- 3) Chen, P. and Huarng, L., Factors affecting acoustic responses of apples. *Trans. Amer. Soc. Agr. Engineer*, **35** (6), 1915-1920 (1992).
- 4) Molto, E., Selfa, E., Pons, R., Fornes, I. and Juste, F., A firmness sensor for quality estimation of individual fruits. *Acta Hort.*, **421**, 65-72 (1998).
- 5) Shmulevich, I., Galili, N. and Rosenfeld, D., Detection of fruit firmness by frequency analysis. *Trans. Amer. Soc. Agr. Eng.*, **39** (3), 1047-1055 (1996).
- 6) Shmulevich, I., Galili, N. and Howarth, M.S., Nondestructive dynamic testing of apples for firmness evaluation. *Postharv. Biol. Technol.*, **29**, 287-299 (2003).
- 7) Muramatsu, N., Sakurai, N., Yamamoto, R., Nevins, D.J., Takahara, T. and Ogata T., Comparison of a non-destructive acoustic method with an intrusive method for firmness measurement of kiwifruit. *Postharv. Biol. Technol.*, **12**, 221-228 (1997).
- 8) Chen, P., Ruiz-Altisent, M. and Barreiro, P., Effect of impacting mass on firmness sensing of fruits. *Trans.*

- Amer. Soc. Agr. Eng.*, **39** (3), 1019-1023 (1996).
- 9) Galili, N., Shmulevich, I. and Benichou, N., Acoustic testing of avocado for fruit ripeness evaluation. *Trans Amer. Soc. Agr. Eng.*, **42** (2), 399-407 (1998).
  - 10) Muramatsu, N., Sakurai, N., Yamamoto, R. and Nevins, D.J., Nondestructive acoustic measurement of firmness for nectarines, apricots, plums and tomatoes. *Hort Sci.*, **31** (7), 1199-1202 (1996).
  - 11) De Ketelaere, B., De Baerdemaeker, J., Advances in spectral analysis of vibrations for non-destructive determination of tomato firmness. *J. Agr. Eng. Res.*, **78** (2), 177-185 (2001).
  - 12) Dull, G.G., Nondestructive Quality Evaluation of Horticultural Crops: An overview. Nondestructive Quality Evaluation of Horticultural Crops. Ed. Dull, G.G., Iwamoto, M. and Kawano, S., Saiwai Shobo, Kyoto, Japan 1-7 (1996).
  - 13) Muramatsu, N., Sakurai, N., Wada, N., Yamamoto, R., Tanaka, K., Asakura, T., Takano, Y.I. and Nevins, D.J., Critical comparison of an accelerometer and laser Doppler vibrometer for measuring fruit firmness. *Hort Technol.* **7** (4), 434-438 (1997).
  - 14) Muramatsu, N., Sakurai, N., Wada, N., Yamamoto, R., Tanaka, K., Asakura, T., Takano, Y.I. and Nevins, D.J., Remote sensing of fruit textural changes with a laser Doppler vibrometer. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **125**, 120-127 (1999).
  - 15) Terasaki, S., Sakurai, N., Wada, N., Yamanishi, T., Yamamoto, R. and Nevins, D.J., Analysis of the vibration mode of apple tissue using electronic speckle pattern interferometry. *Amer. Soc. Agr. Eng.*, **44** (6), 1697-1705 (2001).
  - 16) Terasaki, S., Sakurai, N., Yamamoto, R., Wada, N. and Nevins, D.J., Changes in cell wall polysaccharides of kiwifruit and the visco-elastic properties detected by laser Doppler method. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.*, **70** (5), 572-580 (2001).
  - 17) Terasaki, S., Wada, N., Sakurai, N., Muramatsu, N., Yamamoto, R. and Nevins, D.J., Nondestructive measurement of kiwifruit ripeness using a laser Doppler vibrometer. *Amer. Soc. Agr. Eng.*, **44** (1), 81-87 (2001).
  - 18) Muramatsu, N., Sakurai, N., Wada, N., Yamamoto, R., Takahara, T., Ogata, T., Asakura, T., Takano, Y.I. and Nevins, D.J., Evaluation of fruit tissue texture and internal disorders by laser Doppler detection. *Postharv. Biol. Technol.*, **15** (1), 83-88 (1999).
  - 19) 長内敬明, 元村佳恵, 桜井直樹, 無袋リンゴ「ふじ」果実の臭化メチル処理が内部褐変の発生, 果肉硬度, 果肉の弾性に及ぼす影響, *食科工*, **50** (5), 254-258 (2003).
  - 20) Motomura, Y., Takahashi, J. and Nara, K., Quantitative measurement of mealiness in apple flesh. *Bull. Fac. Agr. Life Sci., Hirosaki Univ.* **3**, 23-28 (2000).

(平成 16 年 3 月 29 日受付, 平成 16 年 6 月 1 日受理)