1．研究成果

モモ‘紅清水’における赤肉果の音響振動法による非破壊判別技術の検討

福田文夫・近藤毅典（岡山大学農学部附属山陽圏フィールド科学センター）
藤井雄一郎（岡山県農林水産総合センター農業研究所）
河井　崇・平野　健・森永邦久（岡山大学大学院環境生命科学研究科）

緒　言

モモの果肉障害の１つである「赤肉症」は，成熟時に果肉が桃赤色を呈するとともに，その程度が進むと，果肉に多汁さがなく，軟化させた際に粉質となることから，商品性の低下につながる重要に障害である[1)]。これまでに，その特徴の解析が進められてきた。藤井ら[2)]は，成熟時期の気温が関係するメカニズムが明らかにし，果実の高温遭遇を抑制する対策技術の開発を行って，「赤肉症」の発生が低く抑えられるようになってきた。一方で,「赤肉症」は、樹内で一度高い発生率を示すと，その樹体では次年以降も発症が継続することが知られている[3)]。それ故,「赤肉症」果が集荷時に一定量混入して市場流通してしまう可能性があり，それを防ぐ非破壊選果技術が必要となっている。

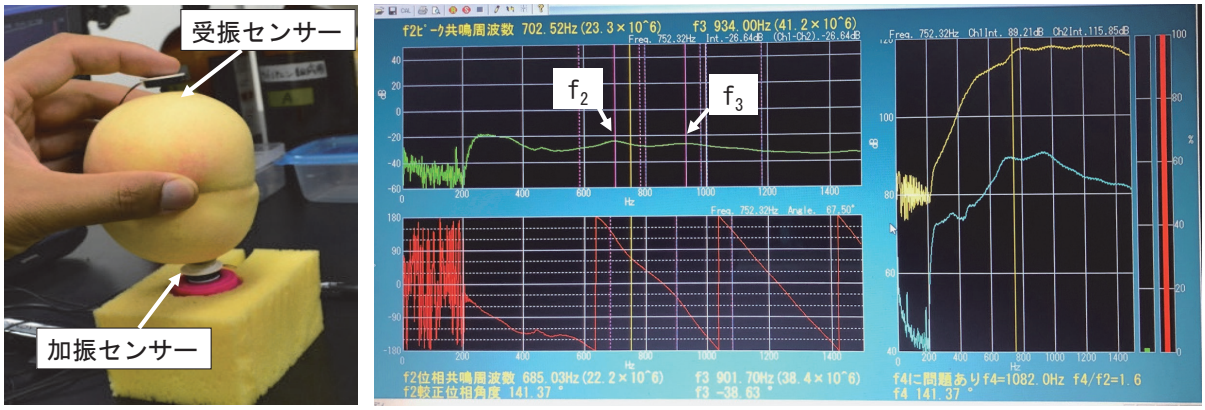
古くから，果実の熟度や状態と関連する固有の振動があることがリンゴで見いだされていて[4)]，Cookeら[5)]は果実の硬さを推定する弾性指標の数式を考案した。近年，微弱な振動を与えて共鳴する果実固有の周波数弾性指標の算出に利用でき，その硬さを反映することから非破壊で果実の硬度を推定する音響振動法が示された[6, 7)]。さらに，音響振動法と音響振動測定装置を用い，ニホンナシで果芯に発生した腐敗の範囲を非破壊で推定できることが明らかになった[8)]。これは、腐敗によって果芯部が軟化することで，共鳴周波数が低下するとみなされ，内部障害の発生判別に音響振動法が利用できることが示唆された。モモでは，ニホンナシと同様に，収穫果を用いて，音響振動法によって共鳴周波数を調査することができ，その比が核割れ果で正常果よりも高くなることから，果実内部に発生する障害の「核割れ」が検出できることを明らかとなった[9)]。この手法を用いて，モモ果実の種々の内部障害を判別できる可能性が示され，果肉障害の判別にも活用できる可能性がある。特に,「赤肉症」果は果肉細胞壁ペクチンが少なく，成熟時に果肉が粉質化して，障害部位の果肉が正常果よりも軟化することから[10)]，この軟化によって「赤肉症」果は，正常果と比べて，共鳴周波数が低下し，非破壊判別が可能となるのではないかと推測された。

そこで，判別技術開発の基礎資料を得ることを目的として，モモ‘紅清水’の収穫果を供試し，音響振動法による共鳴周波数の変化と赤肉症の発生程度との関係を検討し，音響振動法による赤肉症判別の可能性を検討した。

材料および方法

供試材料　2013年と2015年に，岡山大学農学部附属山陽圏フィールド科学センターに植栽の‘紅清水’から同日に収穫された果実のうち，果皮の脱緑程度から収穫適期と判断されたものを，2013年は35個，2015年には24個を供試した。

品質調査　2013年には，収穫果について，直ちに果実重を測定した後，据え置き型音響振動測定装置（聴振器，（有）生物振動研究所）を用いて，Nakanoら[9)]の核割れ判別法に準じ，果実のチーク部に両センサーを接触させて，０－2000Hzで加振し，第２および第３共鳴周波数を調査した（第１図）。次に，高田ら[1)]の方法に準じて，チーク部から半球状に果肉を切り出し，その断面における「赤肉症」の発生程度を４段階（０：正常，１：一部の果肉に障害発生，２：ほぼ半分の果肉に障害発生，３：ほ



音響振動測定の様子　　測定画面における第2・第3共鳴周波数（f_2・f_3）の表示

第１図　音響振動法によるモモ果実での測定の様子（左）と測定画面における共鳴周波数の表示（右）

ぼ全面に障害発生）で評価した。切り出した果肉を搾汁して，デジタル糖度計（PR-1（株），アタゴ）で糖度を測定した。

2015年には，収穫直後に，上述のように，果実重と，音響振動装置を用いて第２および第３共鳴周波数を調査した。その後，25℃に室温設定した部屋に３日間置き，追熟後の共鳴周波数を再度調査した。チーク部から半球状に果肉を切りだし，2013年と同様に「赤肉症」の程度を評価した。さらに，半球状の果肉の上端の果皮を除き，果肉硬度を果実硬度計（KM-5,（株）藤原製作所）で測定し，切り出した果実の果汁を採取してデジタル糖度計（PR-1,（株）アタゴ）で果汁糖度を測定し，品質と赤肉症との関連も調査した。

第１表　赤肉症の程度別にみた果実品質と共鳴周波数の比較（2013年）

果実区分[z]	果実数	果実重 (g)	果汁糖度 (° Brix)	f_2[y] (Hz)	f_3[y] (Hz)
正常	8	242.7 a[x]	15.4 a	664.2 a	868.7 a
程度1	7	253.6 a	14.5 a	632.9 b	872.3 a
程度2	12	236.8 a	13.6 b	527.9 b	826.6 a
程度3	6	295.6 b	15.1 a	421.9 c	675.1 b

[z]赤肉症の発生程度を3段階（1：断面の一部に障害，2：約半分に障害，3：ほぼ全体に障害）で評価
[y]f_2：第2共鳴周波数，f_3：第3共鳴周波数
[x]異なる文字間にTukey検定によって5%水準で有意差あり

結　果

2013年に供試した果実について，「赤肉症」の程度で４つ（正常果と程度１－３）に区分し，果実品質および共鳴周波数を比較したところ，果実重が程度３で大きかった一方，果汁糖度が，程度１や２で正常果よりも有意に低かった（第１表）。第２，第３共鳴周波数とも「赤肉症」の程度が進むにつれて有意に低くなった。同様に，2015年の果実についても，赤肉症の程度で区分して品質および共鳴周波数を比較したところ，果実重に「赤肉症」の程度との間には一定の傾向はみられなかったが，程度２や程度３で，正常果よりも果汁糖度は低かった（第２表）。また，共鳴周波数は，収穫時と追熟後に調査されたが，両調査時期とも，「赤肉症」の程度が進むほど低い傾向で，第２，第３共鳴周波数とも，同様の変化を示した。

2013年に供試した果実の第２共鳴周波数の分布を「赤肉症」の程度別に第２図に示した。正常果で

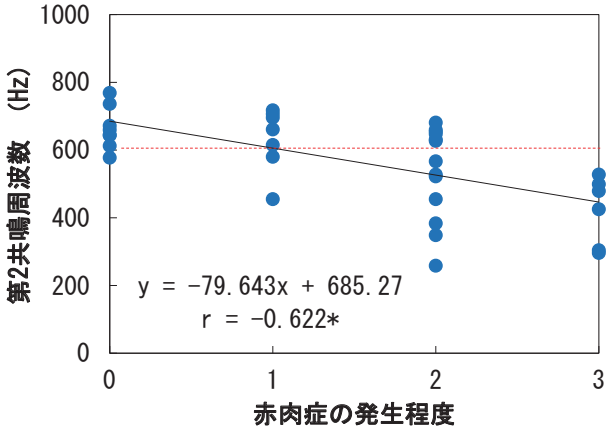
第２表　赤肉症の程度別にみた果実品質と収穫時と室温追熟３日後の共鳴周波数の比較（2015年）

果実区分[z]	果実数	果実重 (g)	果汁糖度 (%)	果肉硬度 (kg)	収穫時 f_2[y] (Hz)	収穫時 f_3[y] (Hz)	室温追熟3日後 f_2[y] (Hz)	室温追熟3日後 f_3[y] (Hz)
正常	6	271.8 a[x]	12.7 a	0.30 a	726.1 a	965.2 a	465.3 a	626.5 a
程度1	9	312.8 a	12.6 a	0.29 a	592.6 b	817.1 b	416.0 ab	565.5 ab
程度2	5	307.3 a	10.9 ab	0.25 a	588.4 ab	790.0 bc	375.2 bc	505.2 c
程度3	4	266.5 a	9.4 b	0.26 a	476.8 b	662.5 c	341.2 c	484.8 c

[z]第1表と同様に評価
[y]f_2：第2共鳴周波数，f_3：第3共鳴周波数
[x]異なる文字間にTukey検定によって5%水準で有意差あり

は，800 ～ 550Hzに位置した一方，「赤肉症」果は，程度１で750 ～ 400Hz，程度２で650 ～ 200Hzと程度３が550 ～ 300Hzとなり，それらの結果は「赤肉症」の程度に対して有意な負の相関を示した。正常果と「赤肉症」果を判別する閾値を600Hzとすることで，正常果が１つ誤判定されるものの，赤肉果のうち，程度１を３個，程度２を９個，程度３を６個全て，正しく判別して取り除くことができた。

2015年に供試した果実についても収穫時と追熟時の第２共鳴周波数の分布を「赤肉症」の程度別に示した（第３図）。収穫時の共鳴周波数と「赤肉症」の程度との関係は2013年の調査と同様であり，収穫時の閾値を600Hzとすることで，正常果が誤判定されずに，「赤肉症」果を72.2％判別できた。追熟後には，共鳴周波数が全体的に収穫時よりも下がったが，程度２以上の果実で共鳴周波数がさらに著しく低く，かつ揃うようになり，正常果との共鳴周波数の差が明確となった。追熟後では，450Hzに閾値を設定すると，軟化の進んだ一部の正常果を含んだものの，「赤肉症」果を88.9％判別できた。



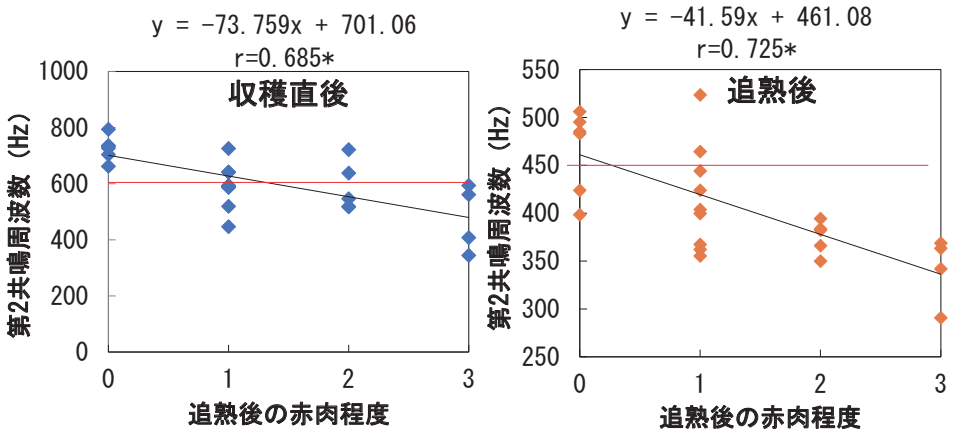
第２図　赤肉症の発生程度と第２共鳴周波
*：５％水準で有意な相関

考　察

本研究では，「赤肉症」果の市場流通を抑制するために，ニホンナシで内部障害の判別に有効性が示された音響振動法[8]を，モモの果肉障害の非破壊判別に利用できないか検討した。

「赤肉症」果は，低温障害（chilling injury）時に発生する果肉の変化[11]と同様に，果肉細胞壁が少なくなっている障害で，追熟させると粉質になることが知られている[12]。2015年の調査果実において，追熟時の音響データと赤肉症の程度との関係を検討したところ，程度２以上の果実が，果肉硬度が急激に低下するとともに，第２共鳴周波数も著しく低下し，400Hz付近に集中した。核割れ果では，核割れに伴う微細な空洞が第２共鳴周波数を低下させていることがシミュレーションされている[9]。赤肉症果では，軟化させた場合に，肉質に明確な違いが生じることを反映して第２共鳴周波数が著しく下がり，判別を行いやすいことが明らかとなった。

一方，収穫直後の評価でも，商品性が劣ると考えられている程度２以上の果実の多くを，第２共鳴周波数の閾値を600Hz程度に設定することで，判別することが可能であることが示され，特に2013年に供試した果実で，その違いは明確に認められた。このことは，「赤肉症」を呈する果実が，収穫時からすでにその特徴を有していることを示唆している可能性がある。Fukudaら[10]は，７月半ばに収穫を迎える中生品種の‘紅清水’において，６月末にはす



第３図　収穫直後(左)と追熟後（右）の赤肉症の程度と第２共鳴周波数の関係（2015年）
*：５％水準で有意な相関

でに、果肉のホウ素含量が少なく、ポリフェノールも高蓄積している可能性を推測している。追熟前であるが、細胞壁組成の違いなどを反映して、共鳴周波数は低下するのかもしれない。今後，共鳴周波数の違いと果肉成分との間に何らかの関係がないか検討することで，共鳴周波数の低下を招く要因を明らかにしたい。

ただし，収穫時同じ発生程度の中でも共鳴周波数には一定の幅があることも明らかとなり，いずれの発生程度でも，700-600Hzの第２共鳴周波数を示す果実が混ざっていた。これは，一般に外観（果皮地色の抜け具合）から主観的な判断で収穫されていることから，果実の熟度も厳密には揃えられていなかった可能性がある。また，Kurokiら[7]が弾性指標の算出には，共鳴周波数に加えて果実サイズが影響することを示しているように，果実サイズが影響するのかもしれない。さらに，同じ発生程度と判断しても障害部位の果肉の割合や障害部位の果肉の状態は異なったりする可能性もある。このような果実ごとの変動要因が相互に関連して，共鳴周波数の幅に関連しているのかもしれない。程度の判断による共鳴周波数の幅は狭めづらいかもしれないが，収穫適期を樹上で正確に判断できれば，収穫果実の斉一性を増すことが可能と考えられる。近年，音響振動装置の改良が進み，加振部と受振部に分かれていたセンサー部が１つに統合された“一点式”センサーも開発され，特許出願されている[13]。この一点式センサーを用いても核割れなど従来の音響装置で行ってきたことが，一点接触により測定速度も向上しつつ，簡便に実現可能になってきている[14]。さらに，樹上評価も可能とするモバイル型へと音響振動装置も展開してきていることから[15]，収穫熟度を揃えながら，第２共鳴周波数の低下によって異常果を早期に把握する技術の実用化を進めることが可能となると考えられる。

さらに，果肉硬度との関係以外でも共鳴周波数が変化するのであれば，より早い果実発育時期に，判別が可能となり，障害に伴う収量のロスを減じるかもしれない。上述のように，「赤肉症」果は果実発育第２期末（６月下旬）に既に成熟異常が始まっている可能性があること[10]や、‘清水白桃’の場合，７月初めに修正摘果を行うことが栽培指針にも取り上げられていることから[16]，６月下旬に判別が可能となれば，修正摘果に利用できるかもしれない。今後は，収穫果だけでなく，樹上での除去判別も可能となるように，未熟果で共鳴周波数に違いが生じるかを検討していく必要がある。

このように，音響振動法を用いることで，「赤肉症」果を一定レベルの判別精度を得ることが可能とみなされた。今後さらに，さらに判別レベルが高まる手法や判別時期を検討しつつ，本研究で供試した実験機器から上述の生産現場で使いやすい音響機器へ切り替えて，本研究の知見の利用が可能か，検討を進める。

また，岡山県のモモ産地では多くの品種で発生がわずかとされているが，全国的には気象変動の進行に伴って，「水浸状果肉褐変症」が問題となっている[17]。これは，高糖度果に多く，果肉細胞間隙の気層が消失して最終的に褐変，腐敗症状を呈することから，商品性を大きく低下させる[18]。これまで，近赤外光式選果機での判別除去法の開発が試みられているが，発生程度が軽微な果実まで取り除く具体的な判別方法は見出されていない[19]。水浸症状も，障害部位の果肉硬度が大きく低下することから，この判別にも音響振動法が利用可能となるかもしれない。今後，本障害の発生地域において，判別利用法の検討を行うとともに，「赤肉症」判別との相違点を検討できればと考えている。

以上のように，商品性が低下する「赤肉症」果の多くを音響振動法の利用によって非破壊で判別することが可能であることが示された。今後，さらに判別精度を高め，利用しやすい機器を導入していくことで，果肉障害果の非破壊判別技術の実用化を進めていきたい。

摘　要

モモ果実において，果肉が桃赤色を呈し粉質となる「赤肉症」果の市場流通を抑制する方法の開発を目的として，2013年と2015年に，附属山陽圏フィールド科学センター植栽の‘紅清水’から適熟収穫された果実を用いて，音響振動法による選果時の「赤肉症」非破壊判別の可能性を検討した。両年とも，程度２以上の「赤肉症」果は正常果よりも，音響振動における第２，第３共鳴周波数とも有意に低かっ

た。2015年には，「赤肉症」の発生が顕著になる室温追熟３日後の軟化状態でも音響調査を行い，程度２以上の「赤肉症」果では，共鳴周波数が正常果と比べてさらに低下することが示された。両年とも，収穫時の第２共鳴周波数について，600Hzに閾値を設けることで，約70％の「赤肉症」果を取り除くことができ，特に程度３の果実は収穫時に選別できることが示唆され，音響振動法利用の有効性を確認できた。今後，音響振動装置の改良や安定した測定方法の開発を通して，実用技術となるように検討を進める。

文　献

１）高田大輔・田上健太郎・福田文夫・久保田尚浩：モモ果実の生理障害“赤肉症”の特徴．園学雑.，74，407-413（2005）

２）藤井雄一郎・森永邦久・村瀬拓也・岸本里菜・嶋田真耶・北小路明久・池田征弥・荒川徹・江見登吉・寺村学・荒木有朋・樋野友之・河井崇・平野健・福田文夫：モモ‘清水白桃’の赤肉果発生に及ぼす気温の影響および障害を抑制する機能性果実袋の開発，園学研.，20，189-197（2021）

３）高田大輔・福田文夫・久保田尚浩：栽培管理法の違いがモモ‘紅清水’の赤肉果発生と果実発育に及ぼす影響，園学研.，7，367-373（2008）

４）Abbott, J. A., G. S. Bachman, N. F. Childers, J. V. Fitzgerald and F. J. Matusik: Sonic technique for measuring texture of fruits and vegetables. Food Technol., 22, 635-646（1968）

５）Cooke, J. R.: An interpretation of the resonant behavior of intact fruits and vegetables, Trans. ASAE, 15, 1075-1080（1972）

６）Terasaki, S., N. Sakurai, N. Wada, T. Yamanishi, R. Yamamoto and D. J. Nevins: Analysis of the vibration mode of apple tissue using electronic speckle pattern interferometry, Trans. ASAE., 44, 1697-1705（2001）

７）Kuroki, S., M. Tohro and N. Sakurai：Monitoring of the elasticity index of melon fruit in a green house, J. Japan. Soc. Hort. Sci., 75, 415-420（2006）

８）Kadowaki, M., S. Nagashima, H. Akimoto and N. Sakurai. Detection of core rot symptom of Japanese pear (*Pyrus pyrifolia* cv. Kosui) by a nondestructive resonant method, J. Japan. Soc. Hort. Sci., 81, 327-331（2012）

９）Nakano, R., H. Akimoto, F. Fukuda, T. Kawai, K. Ushijima, Y. Fukamatsu. Y. Kubo, Y. Fujii, K. Hirano, K. Morinaga, and N. Sakurai: Nondestructive detection of split pit in peaches using an acoustic vibration method, Hort. J., 87, 499-507（2018）

10）Fukuda, F., Y. Tomita, Y. Aishima, K. Koumoto, Y. Fujii, K. Hirano, K. Morinaga, N. Kubota: Effect of flowering time on occurrence of reddish pulp in the peach. Hort. J., 86, 145-150（2017）

11）Lurie, S. and C. H. Crisosto：Chilling injury in peach and nectarine, Post. Biol. Technol., 37, 95-208（2005）

12）高田大輔：モモの果肉障害“赤肉症”と“水浸状果肉褐変症”に関する研究，岡山大学大学院自然科学研究科学位論文（2006）

13）櫻井直樹・秋元秀美：一点接触硬度測定装置及び方法．特願2017-162122（2017）

14）福田文夫・河井　崇・松森史哉・深松陽介・秋元秀美・櫻井直樹・中野龍平：圃場利用型音響振動測定試作機を用いた樹上モモ果実での核割れ判別と果実熟度推定の検討，園学研.，18（別1），303（2019）

15）福田文夫・河井崇・中野龍平：音響振動装置を用いたモモの非破壊内部診断，最新農業技術　果樹，13，217-221，農文協，東京（2020）

16）岡山県うまいくだものづくり推進本部：Ⅰ．モモ．p.1–55．果樹栽培指針．全国農業協同組合連合会岡山県本部．岡山（2003）

17）杉浦俊彦・黒田治之・杉浦裕義：温暖化がわが国の果樹生育に及ぼしている影響の現状，園学研.，6，257-263（2007）

18）藤丸治・東光明・岡田眞治：中晩生モモの「みつ症」の発生要因，熊本県農業研究センター研究報告，13，93-99（2005）

19）渡辺晃樹・手塚誉裕・古屋　栄：モモ果肉障害における透過型光センサーを用いた非破壊判別の試み，山梨果試研報.，14，67-74（2015）