

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K06018

研究課題名(和文)音響振動測定によるモモ果実の内部障害及び成熟様相の樹上非破壊評価法の確立

研究課題名(英文) Study of on-tree nondestructive judgement of internal disorders and maturation of peach fruit by an acoustic vibration method

研究代表者

福田 文夫 (Fukuda, Fumio)

岡山大学・環境生命科学学域・准教授

研究者番号：60294443

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：一点式音響振動装置による音響振動法の利用により、果実内部に発生する生理障害の核割れと水浸状果肉褐変症の発生を調査した。核割れは、先行研究と同様、共鳴周波数の比でその発生を判別できたが、果実毎に6月末まで散発したことから、7月初めの判別で、核割れ果の混入を10%未満にすることが可能であった。また、水浸状果肉褐変症は、その発生によって軟化するため、共鳴周波数が正常果よりも低いことが示された。モバイル型音響振動装置によって果実袋上から共鳴周波数を調査することができ、収穫熟度を精度よくコントロールできたことから、障害果を含まない共鳴周波数の範囲を設定して、障害果の混入なく、高品質果実を採取できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

外観からわかりづらい内部障害の発生を、簡便に樹上で理解できる手法が明らかになったことは、内部障害の発生様相や障害果の発生軽減につながる知見を得る上で重要なツールになると考えられ、学術的意義を有すると考える。

また、本成果は、直ちに、モモ栽培においても、生理障害果の混入を抑制する実用性を有して、この間、栽培に用いることができる音響振動装置も開発されてきたことから、社会的意義も大きいと考えている。

研究成果の概要(英文)：Detection of internal fruit physiological disorders, "split-pit" and "water soaked brown flesh"(WSBF) was investigated using an acoustic vibration method with the sensor touched to fruit at one point. Almost of Split-pit fruit could be detected in the beginning of July and thinning of the fruit assumed as split-pit one decreased mixing of split-pit fruit less than 10%. Because WSBF fruit had abnormal softer flesh, their resonant frequency was significantly lower compared with normal fruit. Using this method, maturity levels in each fruit could be judged over the fruit bag, The range of resonant frequency that the mixing of WSBF fruit did not occur could be set. Based on these results, production of high quality peach fruit without internal physiological disorder was achieved by utilization of an acoustic vibration methods.

研究分野：果樹園芸学

キーワード：音響振動法 内部生理障害 一点式音響振動装置 モモ 核割れ 水浸状果肉褐変症

1. 研究開始当初の背景

モモの果実発育中に生じる典型的な内部生理障害の核割れや果肉障害は、収量や品質に悪影響を及ぼす課題で、この発生を抑えることは園芸学的に重要な研究となっている。しかし、これらの内部生理障害は、果実内部で生じることから、発生の有無や発生過程に関する情報が得づらく、研究を進めにくい側面があった。

そのような中、果実の熟度評価に利用されてきた音響振動法を用いて、内部障害の発生の有無を非破壊的に評価する研究がすすめられ、収穫果において音響振動法の共鳴周波数の比が核割れの有無によって変化することが明らかにされた (Nakano ら, 2018)。また、ポータブル PC により樹上で実測することで、果実発育中に、果実の共鳴周波数を継続評価することができ、核割れの発生時期を推定することも可能であることが示された (Kawai ら, 2018)。さらに、果肉障害果も正常果と比べて、果肉が軟化している状態を捉えて共鳴周波数が下がることが示された (福田ら, 2019)。音響振動法が内部生理障害の樹上評価に適し、発生過程の検討や障害果の混入を抑える栽培技術の開発にも応用できると考えられた。ただ、分析機器として、振動を与える加振センサーと、振幅を把握する受振センサーが独立しており、両センサーを一直線上に配置して測定を行う必要があったため、果実袋をかけて栽培するモモでは使いづらい点があった。そこをクリアするために、センサーを統合する特許技術が出願され (後日、特許公開された)、一点接触で共鳴周波数を解析できるセンサーが開発され、簡便に音響振動法に取り組みことができる一点式音響振動装置を先行制作して、さらにスマートフォンで駆動するモバイル型音響振動装置が実用機として制作された。

これらを導入することで、音響振動法を用いた、熟度把握や内部生理障害の発生過程の検討を開始することができた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、2 つに大別される。

まず、二点式音響振動装置を利用した先行研究と同様に、簡便な一点式音響振動装置を利用した音響振動法を用いて正確に内部生理障害の発生を評価できるかを示すことがあげられる。生理障害の対象は、音響振動法で評価しやすいと考えている“核割れ”と“水浸状果肉褐変症”とし、一点式音響振動装置での検出方法を明らかにすることとした (図 1)。

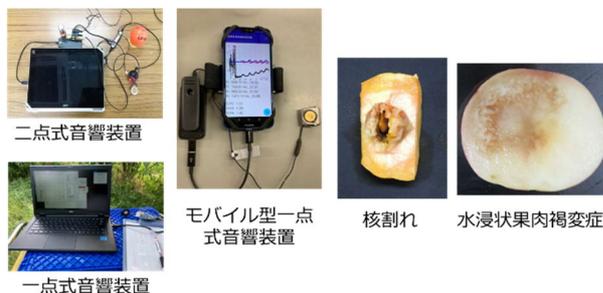


図1 音響振動法の測定装置 (左) と本研究で対象とした内部生理障害 (右)

次に、樹上評価により、生理障害の発生時期を特定することで、発生過程を明確にするとともに、発生果を事前に取り除く手法を検討することを目的と考えた。これは、収穫果で判別できても、規格外となるため、商品ロスになってしまうことから、それを回避するためには、収穫果への混入を減らす手法を導く必要があるためである。核割れについては、未熟段階で判別に適する時期を明確にし、核割れ果を除去することで、収穫果への混入を軽減できるかを示した。果肉障害果の発生を抑えるには、発生しない熟度で収穫を可能にすることが重要であるため、障害が発生しない適熟状態を音響振動法で把握できるかを明らかにしようとした。

3. 研究の方法

(1) 核割れ果の判別精度と時期の検討 : 2019 年 ~ 2021 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 (FS センター) に植栽のモモ ‘清水白桃’ を 3 樹供試し、60 果について、6 月初めから 8 月初めの収穫時期まで果実側径と二点式音響振動装置と一点式音響振動試作機とによる共鳴周波数を 1 週間間隔で調査した。両機器での第 3 共鳴周波数 (f_3) と第 2 共鳴周波数 (f_2) との比 (f_3/f_2 比) を算出し、収穫時の核割れの発生の有無から発育中の核割れ判別率を調査した。2022 年は 120 果を一点式音響振動試作機で調査し、判別率を同様に調査した。また、一部の核割れ果は、周辺の正常果とペアで、ラベルされ、7 月初めまでに採取して、果実および種子のエチレン生成量や種子の状態をみるとともに、成熟時期を評価した。

(2) 核割れ果判別除去による収穫果への混入軽減 : 2021 年と 2022 年に別の清水白桃 3 樹を供試し、慣行の栽培管理を行った後、半数の主枝で、7 月初めに本研究で導入したモバイル型音響振動装置で核割れ発生の有無を調査し、核割れと判別される果実 (f_3/f_2 比が 1.4 以上) を除去し、着果量を調整した (判別除去区)。残りの半数の主枝では、無作為に摘果を行い、判別除去区と同程度の着果量とした (慣行区)。これらを適期に収穫し、果実品質と核割れ果率を両区で比較した。

(3) 果肉障害“水浸状果肉褐変症”の発生と音響振動データとの関連：2020年から2022年にかけて、FSセンターに植栽のモモ‘白鳳’1樹を供試した。2020年と2021年には、適熟で収穫し、一点式音響振動装置で、共鳴周波数を調査した後、果実サイズや糖度、pH、硬度を調査した。果肉硬度として、3mm円柱型プランジャーをセットしたレオメータで貫入抵抗性を測定した。水浸状果肉褐変症の程度（程度0：無発生，程度1：わずかに発生，程度2：果肉断面の半分に発生，程度3：果肉断面全体に発生）で区分して、これらの品質データや共鳴周波数を比較した。2022年には、果実熟度をばらつかせて収穫し、障害程度別で、共鳴周波数と果肉硬度との関係をもとに、糖度や果実サイズなどの果実品質を保ちつつ発生が生じない共鳴周波数の範囲を調査した。

(4) 成熟度の判定と収穫への応用：2021年と2022年に、晩生品種の‘白麗’1樹と‘白皇’3樹を供試し、果実熟度にばらつきを持たせて収穫するため、一斉収穫を行った。2022年には、モバイル型一点式音響振動装置を用いて、樹上で果実袋上から共鳴周波数を測定した（図2）。収穫後一点式音響振動装置で共鳴周波数を測定し、(3)と同様に品質調査を行った。樹上で収穫後の共鳴周波数の関連をみた。品質との関連から共鳴周波数で果実成熟度を評価できるか確認し、共鳴周波数の範囲を設定した。



図2 果実袋上から音響振動測定を行う様子

4. 研究成果

(1) 2019年～2021年に分析機器の二点式音響装置と一点式音響装置とで、果実の第2および第3共鳴周波数（ f_2 ， f_3 ）を6月初めから収穫時期まで継続的に調査した。共鳴周波数は両者でほとんど同じ値を示し、 f_3/f_2 比を算出することができた。核割れの発生が6月中旬に散発したり、癒合して正常果と同様な状態となる場合があるため、核割れ果の判別率はその時期にどちらの評価でも低下した（図3）。一方、果実肥大を再開し、核割れ果が確定する6月末には、2022年を含め、いずれの調査年とも判別精度が90%以上となった。なお、2021年には、5月31日に f_3/f_2 比が1.4以上で核割れ果とみなされる果実30個のうち12個が収穫前に落果し、早期核割れ果の除去は、収穫ロスの軽減につながると考えられた。これまで核割れ果の判別は、果形に変化が生じるほど大きく割れたもの以外、できなかった。本研究で樹上で行うことができることが示されたことは意義深いと考えられる。

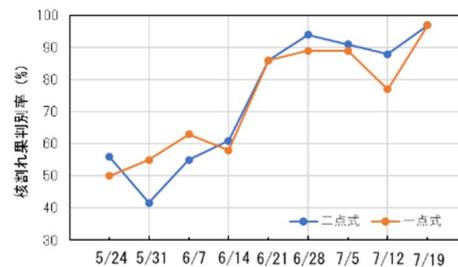


図3 二点式・一点式音響振動装置による核割れ果判別率の推移(2021年)

以上のことから、一点式でもこの時期に音響振動調査することで、樹上で核割れ果を精度良く判別することができることが示された。

(2) 核割れ果を推定し、近傍の正常果と、収穫時期の違いを確認したところ、成熟が数日早まることを明らかにした（Kawaiら，2021）。種子からのエチレン放出が核割れ果で増加することから、核の裂開によって種子のエチレン生成が早期に進み、果実の成熟開始を促す可能性を示した。

(3) 上記(1)の成果を受けて、収穫果への核割れ果の混入を抑えられるか調査するため、モバイル型音響振動装置を用いた判別後摘果区と慣行区とで収穫果の核割れ果率を比較した。慣行区では核割れ果率が核割れの発生が多い2021年には約30%であったのに対し、判別後摘果区では10%未満となり、収穫ロスの発生も有意に低下させることができた（図4）。核割れの発生がほとんどなかった2022年も判別時に核割れ果を取り除け、核割れ果の混入を著しく抑制できることが示された。今後、さらに同様の試験をおこない効果を確定するとともに、栽培技術として利用できるように、果実発育中の着果管理も含めて、摘果法をブラッシュアップする。

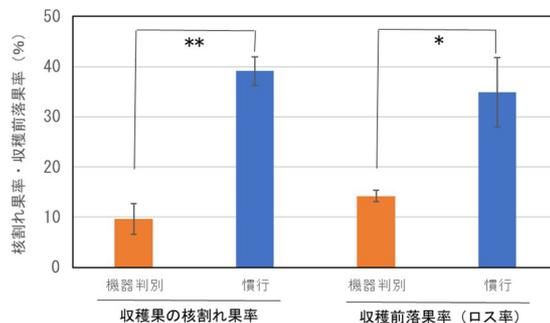


図4 モバイル型音響振動装置による機器判別摘果が収穫果の核割れ果混入及び収穫ロスの発生に及ぼす影響

(4) モモ‘白鳳’において、2020年と2021年に水浸状果肉障害果の発生程度別に果実品質および共鳴周波数を比較したところ、果肉障害果は、正常果と比べて、高糖度である一方、果肉硬度が有意に低く、それに合わせて、共鳴周波数も著しく低くなることが明らかとなった（表1）。成熟に向けて、いずれの果実も共鳴周波数は低下していくが、障害果では障害の発生に伴って、

さらなる低下が生じているとみなされ、障害果の判別や発生過程の検討に音響振動調査が有効であることが示された。

海外では、内部も評価できるハイパースペクトル画像で調査する手法も検討されているが、本結果は接触させる必要があるものの、音響振動法は簡便に状態把握できることから、特に圃場などで技術を利用、展開しやすいとみなされる。

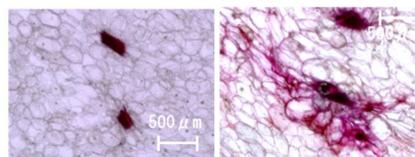
また、果肉の組織形態を確認したところ、障害部位では、細胞間隙にペクチンが多く蓄積していることが示され、予備調査であるが、共鳴周波数が樹上で大きく下がった果実を数日後に採取して、果肉組織の形態を観察すると同様の細胞間隙の状態が認められた(図5)。このようなことから、モモにおいて、水浸化やその後の細胞崩壊(褐変)に、ペクチンの蓄積が関係する可能性が新たな知見として得られた。一般には、リンゴのみつ症果と同様に、糖(ソルビトール)が果肉細胞外にあふれ、水分の滞留が生じることで、組織が透過するという過程が発症時に見られると考えられているが、モモはリンゴと異なっており、障害部位の果肉柔細胞が崩壊しやすい面でも、リンゴと異なる要素がその発生に関係しているのかもしれない。

表1 モモ‘白鳳’における水浸状果肉褐変症の程度別にみた果実品質と共鳴周波数

障害程度	果実重 (g)	縦径 (mm)	側径 (mm)	糖度 (Brix)	pH	硬度 ^z (N)	f ₂ (Hz)	f ₃ (Hz)	
2020年	0	291.2 b ^y	76.0	88.1	13.3 b	4.4 b	1.8 a	529.0 a	786.2 a
	1	320.6 ab	78.8	90.2	14.5 ab	4.6 a	0.9 b	446.2 b	597.8 b
	2	333.6 a	80.0	90.2	15.3 a	4.6 a	0.6 b	449.7 b	603.4 b
2021年	0	285.0 b	78.3 b	85.2 b	11.4 b	4.4 b	1.8	560.2 a	767.9 a
	1	331.2 b	79.7 b	89.6 ab	13.8 ab	4.6 a	1.4	439.1 b	613.4 b
	2	385.7 a	84.1 a	94.3 a	15.6 a	4.6 a	1.5	435.6 b	591.9 b

^z 硬度はレオメータ示度(プランジャー3mm円柱型)

^y異なる文字間には、Tukey多重検定により程度別で5%水準で有意差あり



正常部 障害部

図5 果肉障害果(褐変部)の果肉組織形態変化
ペクチンをルテニウムレッドで赤紫色に染色

(5) 2022年には熟度をばらつかせる一斉調査を行い、果実サイズや糖度などの果実品質が劣らず、障害発生が生じない共鳴周波数範囲を確認した。その結果、f₃が700-800Hzを示す果実は、商品性が消失する障害発生程度(程度2以上)を示す果実を含まず、硬度も十分に糖度も高かった(表2)。この範囲の果実は、果肉硬度との関係式から、果肉硬度がおおよそ2N-4Nの範囲で収集されることが示された(図6)。このように、音響装置の利用は、果肉障害果を混入させずに収穫することを可能にすると考えられた。

表2 収穫時の共鳴周波数と障害発生との関連

f ₃ (Hz)	個数	程度0 (個)	程度1 (個)	程度2 (個)	水浸果の割合	程度1割合	程度2割合	平均硬度	平均糖度
900以上	7	7	0	0	0%	0%	0%	5.1	13.5
900未満 800以上	7	7	0	0	0%	0%	0%	2.9	13.3
800未満 700以上	19	16	3	0	15.8%	15.8%	0%	2.1	14.7
700未満 600以上	26	13	10	3	50.0%	38.5%	11.5%	0.9	14.9
600未満	26	7	15	4	73.1%	57.7%	15.4%	0.8	15.4
全体	85	50	28	7	41.2%	32.9%	8.2%	1.7	14.7

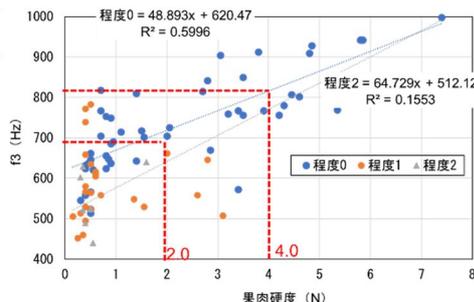


図6 障害程度別でみた果肉硬度とf₃値との関係

(6) 有底果実袋を用いる慣行栽培において熟度評価しづらい晩生モモ品種を対象として、2021年、2022年に、共鳴周波数による熟度評価が可能か調査した。2021年には、収穫後の果実で共鳴周波数を調査し、果肉硬度と共鳴周波数の間に一定の傾向があることを明らかにした。2022年には、モバイル型音響振動装置を用いて、果実袋上から音響振動調査を行った後、収穫して、収穫後の共鳴周波数と比較した。その結果、袋上からでは50Hzほど高くなるが、収穫後の共鳴周波数および硬度との関係性は極めて高いことが示され、収穫熟度把握に共鳴周波数を用いることができることを示した(図7)。

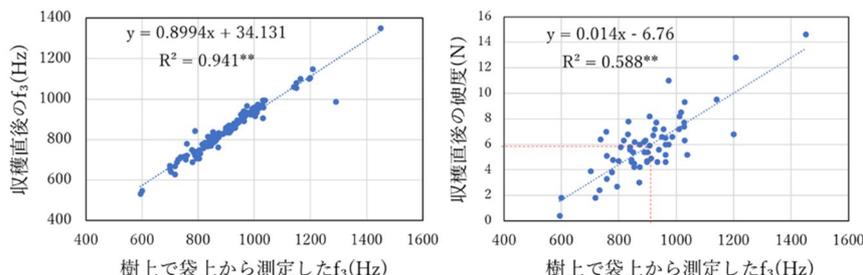


図7 モモ‘白麗’における樹上の袋上の共鳴周波数と果実の共鳴周波数(左)および果肉硬度との関係(2022年)

慣行の収穫熟度と一致した果肉硬度が 6N 前後となる共鳴周波数範囲を 850～950Hz と設定し、それ以外の果実と品質を比較したところ、収穫 5 日後も食べごろとなる果肉硬度を維持しつつ、約 90% が糖度 16 度以上を示した（図 8）。モモは成熟中に急速に糖度を上昇させることから、共鳴周波数を指標として判断することで、果実熟度を適切に管理でき、成熟様相を理解するツールとなりうることを示した。また、糖度が高かったものの、これらの果実には、水浸状果肉褐変症は全く生じなかった。さらに晩生で高糖度品種の‘白皇’でも、同様の硬度に当たる共鳴周波数範囲の果実で、障害発生なく、品質を保った状態で収穫が可能となることが示された。

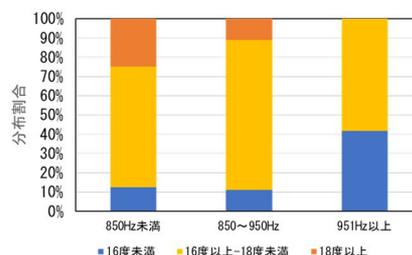


図8 モモ‘白麗’における共鳴周波数域別にみた収穫 5 日後の糖度の分布割合

< 引用文献 >

- Nakano, R., H. Akimoto, F. Fukuda, T. Kawai, K. Ushijima, Y. Fukamatsu, Y. Kubo, Y. Fujii, K. Hirano, K. Morinaga, N. Sakurai. Nondestructive Detection of Split Pit in Peaches Using an Acoustic Vibration Method. *The Horticulture Journal* 87:281-287. 2018.
- Kawai, T., F. Matsumori, H. Akimoto, N. Sakurai, K. Hirano, R. Nakano, F. Fukuda. Nondestructive Detection of Split-pit Peach Fruit on Trees with an Acoustic Vibration Method. *The Horticulture Journal* 87:499-507. 2018.
- 福田文夫・近藤毅典・藤井雄一郎・河井崇・平野健・森永邦久．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．岡山大学農学部センター報告 41：9-13．2019．
- Kawai, T., T. Ichioka, A. Ikeda, T. Ohashi, G. Inohara, K. Hirano, R. Nakano, F. Fukuda Effect of Split Pit on Maturation of ‘Shimizu Hakuto’ Peach on Trees. *The Horticulture Journal* 90:365-373. 2021.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kawai Takashi, Ichioka Tomoya, Ikeda Akari, Ohashi Tami, Inohara Go, Hirano Ken, Nakano Ryohei, Fukuda Fumio	4. 巻 90
2. 論文標題 Effect of Split Pit on Maturation of 'Shimizu Hakuto' Peach on Trees	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Horticulture Journal	6. 最初と最後の頁 365 ~ 373
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2503/hortj.UTD-285	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 向井琉晴・西口杏奈・吉村諒介・河井崇・平野健・福田文夫
2. 発表標題 モモ'白麗'の収穫への音響振動法の適用
3. 学会等名 園芸学会中四国支部会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉村諒介, 猪原豪, 西口杏奈, 向井琉生, 河井崇, 平野健, 福田文夫
2. 発表標題 モモ'白鳳'における"水浸状果肉褐変症"果の特徴と未熟果肉の形態変化
3. 学会等名 園芸学会令和4年度春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福田文夫, 河井崇, 近藤毅典, 酒井富美子, 平野健, 高嶋樹, 櫻井直樹, 中野龍平
2. 発表標題 ブドウ'シャインマスカット'果実発育中の音響振動法での果粒硬度測定を検討
3. 学会等名 園芸学会令和4年度春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福田文夫、河井崇、猪原豪、西口杏奈、市岡智也、吉村諒介、高嶋樹、平野健、櫻井直樹
2. 発表標題 モモ果実の核割れ発生や熟度の把握への一点式センサーによる音響振動法の利用可能性
3. 学会等名 園芸学会令和3年度春季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 市岡智也、河井崇、池田朱里、大橋民、猪原豪、中野龍平、福田文夫
2. 発表標題 核割れがモモ ' 清水白桃 ' の果実成熟に及ぼす影響
3. 学会等名 園芸学会令和3年度春季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福田文夫、岩井綾平、高嶋 樹、河井 崇、平野 健、櫻井直樹
2. 発表標題 音響振動法によるモモ ' 白鳳 ' の水浸状果肉果の非破壊判別
3. 学会等名 園芸学会令和2年度春季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 猪原豪、吉村諒介、西口杏奈、向井琉晴、河井崇、平野健、福田文夫
2. 発表標題 モモ ' 清水白桃 ' における音響振動装置を用いた樹上での " 核割れ " 果の判別除去が収穫ロスに及ぼす影響
3. 学会等名 園芸学会令和4年度秋季大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 河井 崇、福田文夫、中野龍平	4. 発行年 2019年
2. 出版社 (株)エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 5
3. 書名 青果物の鮮度評価・保持技術 収穫後の生理・化学的特性から 輸出事例まで 6章8節 音響振動法によるモモの内部障害の非破壊判別	

1. 著者名 福田文夫、河井 崇、中野龍平	4. 発行年 2020年
2. 出版社 農山漁村文化協会	5. 総ページ数 6
3. 書名 農業技術体系追録第35号 音響振動装置を用いた非破壊内部診断	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	河井 崇 (Kawai Takashi) (90721134)	岡山大学・環境生命科学学域・助教 (15301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------