

追熟中のバナナ果実の物理的パラメーター と化学的成分との関係*

児島 清秀**

広島大学大学院生物圏科学研究科

Relationship between Physical Parameters and Chemical Composition of Banana Fruits During Ripening

Kiyohide KOJIMA

Graduate School of Biosphere Sciences, Hiroshima University
Hiroshima 730, Japan

要 旨

果実は収穫後も成熟過程を継続し、貯蔵物質の加水分解や硬さ・色素・香りなどの変化が起こり、これらの現象を総称して追熟とよんでいる。果実追熟中の軟化は、果実の収穫後の保存期間を決める要因であるため、果樹園芸上重要な意義があり、メカニズムの解明が期待されている。さらに、果実の硬さは、果実の品質の重要な因子でもあるので古くから様々の方法で測定されてきたが、多くの測定法の原理は、一定の深さにプランジャーを押し込むのに要する力で測定する方法であり、物理的モデルに基づく客観的で統一された方法ではない。一方、硬さを粘弾性として解析するレオロジック測定法として応力緩和法があり、1970年に山本らによって植物に適用された。この測定法は、植物の組織の力学的構造のモデルである粘弾性モデルに基づいた計算式でシミュレーションしてパラメーターを得る。従って、得られたパラメーターは、押し込み法のような単なる硬さの示標ではなく、植物組織の力学的構造の変化を示唆する。しかし、この応力緩和法は植物の繊維組織の両端をクランプではさんで引っ張って測定するため、柔らかい果実を測定するのは困難であった。また、硬さに関係すると考えられる果実の成分の追熟中の化学的变化としては、細胞壁成分のペクチン多糖類が分解して低分子化することがトマト、メロン、イチゴ等多くの果実で報告されており、他の細胞壁成分のヘミセルロースとセルロースに関しても少しは報告されており、これら細胞壁成分の分解が果実軟化の主な原因であると考えられてきた。しかし、果実の貯蔵物質としてデンプンを多く含むような果実のバナナでは、追熟開始後数日でデンプンがほぼ完全に糖化し、ほぼ時期を同じくして果実が軟化するので、デンプンも果実軟化に関係すると示唆されてきた。しかし、デンプンが多いバナナ果肉の細胞壁の分析は困難で信頼できる報告はない。

広島大学総合科学部紀要Ⅳ理系編、第19巻（1993）

* 広島大学審査学位論文

口頭発表日 1993年1月29日、学位取得日 1993年3月3日

**現在の所属：長崎県南高来郡口之津町乙870、農水省果樹試験場口之津支場、
（科学技術庁特別研究員）

本研究では、この軟化について物理的測定と同時に化学的測定を行い、デンプンを多く含むような果実の追熟中の軟化のしくみを解明した。一番目に応力緩和法を利用して果実の硬さの測定法を開発した。ここでは、すでに追熟中の軟化に関係する成分や酵素の変動が詳しく調べられ、硬さの測定だけで化学的変化との関連が調べられるトマトを材料にした。二番目に追熟中のバナナ果実の硬さの測定と同時にデンプンと細胞壁成分の変化を分析し、バナナ果実追熟中の軟化のしくみを検討し、下記のような研究成果が得られた。

植物の細胞壁の物理的性質を測定するために使用されていた応力緩和法を初めて果実軟化の測定に応用し、簡便な硬度測定法を開発した。装置は、培養細胞に力を与えるために開発されたひずみ計 (Vitrodyne Liveco 社製) に、プローブとしてみがいた釘 (直径2.1mm) を7 mmの長さに切断し、センサーに接続しているアームに固定した。材料としてトマトを用い、果実の熟度の進行に伴う、極めて狭い範囲の組織の軟化を定量的に表した。方法は厚さ7-8 mmの切片を水平なステージにのせ、プローブを一定速度で降下させた。ひずみ計の応力が約5 gに達したときを0秒として、降下を止めて組織の応力の減少 (緩和) を5秒間隔で60秒まで計測した。得られた応力緩和のデータを山本らの応力緩和の式にパーソナルコンピューターを使用し最小二乗法でシュミレートして3個の応力緩和パラメーター、最小緩和時間 (T₀)・緩和速度 (R)・最大緩和時間 (T_m) を得た。なおこの方法で得られたパラメーター変化は従来知られていたトマト果実のポリガラクトナーゼ活性の変化と一致し、物理的測定法と生化学的変化が一致することを見出した。このことは本測定法が軟化度の測定に有効であることを示している。

さらに、このひずみ計を使用した果実軟化測定法を改良した。応力緩和法は、一定の荷重をかけてその後の応力の減少を測定するものであるが、軟化の程度が大きいと変位、すなわちプローブの貫入が大きくなる。応力緩和法では変位が一定である方がより正確なパラメーターが得られる。従ってプローブのつきさす深さを一定に保つことができるレオメーター (山電製) を用い、円錐型プローブを接続した。追熟中の全ての段階で応力緩和を測定できる最適な条件を検討するため、追熟開始前 (緑色) と開始後 (黄色) のバナナ [Musa (AAA group, Cavendish subgroup) 'Giant Cavendish'] を用い、果肉の横断切片上の子室の中央部を測定点とした。プローブをつきさす深さは0.2、0.4、0.6mm、つきさす速度は0.05、0.1、0.5、1.0mm/秒を設定した。これらの設定条件で円錐型プローブをつきさし応力緩和データを得て、3つの応力緩和パラメーターを計算した。これらのパラメーターはつきさす深さと速度で変化し、緑色のバナナではつきさす速度を増していくとT₀、T_mともに低下する傾向が、また速度が0.5mm/秒以上ではほぼ安定したパラメーターが得られた。しかし速度を増すほど計算上誤差の原因となるオーバーシューティング現象が顕著となり、特につきさす深さが0.2 mm、速度が1.0 mm/秒の条件で著しかった。つきさす深さが0.6 mmで最もよく、山本らの式にシュミレートできた。従って、バナナ果実での応力緩和法の最適条件はつきさす速度が0.5mm/秒、つきさす深さが0.6 mmが適当であることがわかった。この条件で測定すると黄色のバナナは緑色のバナナに比べて有意にT₀とT_mが低下した。さらにバナナ果肉のいろいろな部位の応力緩和パラメーターを測定した。緑色のバナナを長軸方向に直角に切り、その切片の子室の中央部で測定すると長軸方向の中央部半分は応力緩和パラメーターに有意な差はないが、基部と先端部ではT₀が有意に低下した。黄色のバナナでは基部でT_mが有意に増加した。胎座の隔壁に近い部分と子室の中央部でパラメーターを求めると、緑色のバナナでは隔壁に近い部分ではT₀が有意に低下し、一方黄色のバナナでは有意に増加していた。物理的特性が同一果実内で均一ではないことが明かにされた。このことからバナナの果肉が追熟とともに生じる硬度の変化が物理量として捉えることが可能になった。

つぎに、この改良した果実軟化測定法で、追熟中のバナナ果実の変化を調べた。材料は、フィリピン産のバナナで、1000ppmのエチレンを一日間処理し、このエチレン処理を開始した時刻を0日目とし、4日間25度Cの人工気象器で追熟させた。示標としての果皮色度は1日目の2（果皮がライトグリーン）から4日目に6（果皮の緑色が完全にぬけた黄色の状態）に達した。水分含量はほぼ一定で77%前後であった。物理的变化は3個の応力緩和パラメーターで定量的に表し、同時にその変化のもとになるデンプンや細胞壁の化学的分析を行なった。その結果、ヘミセルロースBの構成中性糖が追熟に伴い減少することがわかった。構成単糖成分ではアラビノース、ガラクトース、グルコースの量的減少が最も早く、0.5日目から低下しはじめ、1日目に最低値まで低下した。ペクチン画分は中性糖、酸性糖、各単糖成分の全体の傾向としては0.5日目から4日目までゆるやかに減少する傾向であった。デンプンは1日目まで低下せず、0.5日目から2日目まで急激に低下し、その後ゆるやかに低下する傾向であった。弾性に関与する初期応力と硬さに関与する分子数に関するRは0.5日目から低下しはじめ、2日目に最低値まで低下した。粘性に関与するT0とTmは1日目まで低下せず、0.5日目から2日目まで急激に低下し、その後ゆるやかに低下する傾向であった。セルロースは追熟中に量が一定で軟化には寄与しないことが示唆された。

以上の結果を総合的に考察すると、果実の軟化が応力緩和法で定量的な測定が可能になり、バナナ果実での応力緩和法の最適条件はつきさす速度が0.5mm/秒、つきさす深さが0.6mmであった。更にバナナ果肉中の物理的特性の分布は、緑色のバナナでは果実の両端付近で粘性が低く、基部で弾性が高いことが示唆された。バナナ果肉の追熟中の物理的・化学的分析による、一連の変化を対応させることでバナナの果肉の硬さのもとになる成分が示唆された。0.5日目の初期応力の低下で示される弾力性の低下はヘミセルロースの急激な低下が寄与していると思われる。また、T0とTmの低下で示される粘性の低下はデンプンの分解が主に寄与していると思われる。

さらに、デンプンの分解に先立ち細胞壁成分のペクチンとヘミセルロースの分解が起こっていることから、つぎのことが示唆される。発芽に伴う大麦のはい乳でのデンプンの分解の機構の詳しい研究から、細胞壁が分解されることによって、 α -アミラーゼの通路ができ、はい乳全体に広がることでデンプンが急速に分解されることが明かにされている。バナナでは、デンプンの分解は、中心部の胎座のあたりから周囲に広がっていくことが調べられている。胎座のあたりから分泌されたデンプン分解酵素が分解された細胞壁を通路として周囲に広がっていくことでデンプンが急速に分解されることが示唆される。

参 考 文 献

1. Kojima K, Sakurai N, Kuraishi S, Yamamoto Y, Nevins DJ (1991) Novel technique for measuring tissue firmness within tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) fruit. *Plant Physiol* 96: 545-550.
2. Kojima K, Sakurai N, Kuraishi S, Yamamoto Y, Inaba A (1992) Physical measurement of firmness of banana fruit pulp: Determination of optimum conditions for measurement. *Postharvest Physiol Technol* 2: 41-49.
3. Kojima K, Sakurai N, Kuraishi S (1992) A novel technique for the determination of softening of banana fruits, and changes in their cell wall components and starch during ripening. In. Yamada conferenceXXXII. Plant cell walls as biopolymers with physiological functions. 392-394.