

振動特性によるスイカの内部品質判別

— 自己相関関数の包絡線のパワースペクトルと内部品質 —

宮里 満・陳 介余・石黒 悦爾・難波 直彦*¹

(農業システム工学講座・生産環境工学講座*¹)

平成5年8月9日受理

Discrimination of Watermelon-inner-quality to be Fixed by means of the Vibration Response Properties — Relationship between the Power Spectrum of Curve Suited to the Auto-correlation Function Peak Points and Inner Quality —

Mitsuru MIYAZATO, Jie Yu CHEN,

Etsuji ISHIGURO and Naohiko NANBA*¹

(Laboratory of Agricultural System Engineering,

Laboratory of Water Control and Reclamation Engineering*¹)

緒 言

近年、流通の近代化と選果施設における人手不足に伴い、各種の青果物に対し内部品質の客観的で迅速・確実な非破壊判別方法の開発が望まれる。

Yamamoto³⁻⁷⁾は青果物の有望な非破壊判別法の一つとして衝撃応答を利用して内部品質を評価することを提案し、青果物の貯蔵時間の増加につれて打音信号のパワースペクトルのピークが低周波側に推移したことを報告した。また、笹尾²⁾は打撃による振動波形のパワースペクトルのピーク周波数はスイカの熟度が進行するにつれて低周波数へ推移することを見だし、このピーク周波数がスイカの熟度判別の指標になり得ると報告している。さらに川村等¹⁾は吊り下げたスイカの打撃音を測定し、これらのピーク周波数の変化から熟度の判別を行っている。この方法は従来の熟練者がスイカを叩いてその音質で熟度を判断することに相当し、実用に近いものと考えられるが、ピーク周波数に及ぼすスイカの大きさの影響が考慮されていない。

そこで本論文は振動波形の自己相関関数の形状に着目し、この自己相関関数の包絡線のパワースペクトルより、スイカの内部品質を検出する方法を検討した。

供試材料および実験方法

1. 供試材料

鹿児島県指宿郡指宿農業協同組合山川支部の集荷場に出荷された徳光スイカを供試材料として用いた。打撃実験ならびにスイカの基礎物理特性を測定した後、これらのスイカを切断し、果肉と種子の着色状態および果肉細胞の破壊状態を参考にして適熟、煮え、亀裂と未熟の等級判別を行った。また、スイカの体積を水の体積に置換し、測定質量とその体積値との比を近似的に密度とした。また、各スイカの中央部を試料片とし、20名のパネラーにより、甘味、歯ごたえ、水分含量と果肉色の4項目について5段階評価の官能試験を行った。ここでの評価は普通の商品的な価値があると思われる程度を3点とし、それより良好なものに高い値を、悪いものに低い値を与えた。

2. 非破壊打撃試験装置

Fig. 1 に試作した打撃振動試験装置の概略図を示す。本装置の打撃部はインパルスハンマーを用いた振り子式とし、この先端部にゴム製のコーンを取り付けた。この時の振り子の腕の長さは35cm、コーンと腕の質量は255gであった。さらに振り子最下点において、コーン先端部が果実赤道部に接するように振り支点の調節を可能とし、また振り子落下角度は

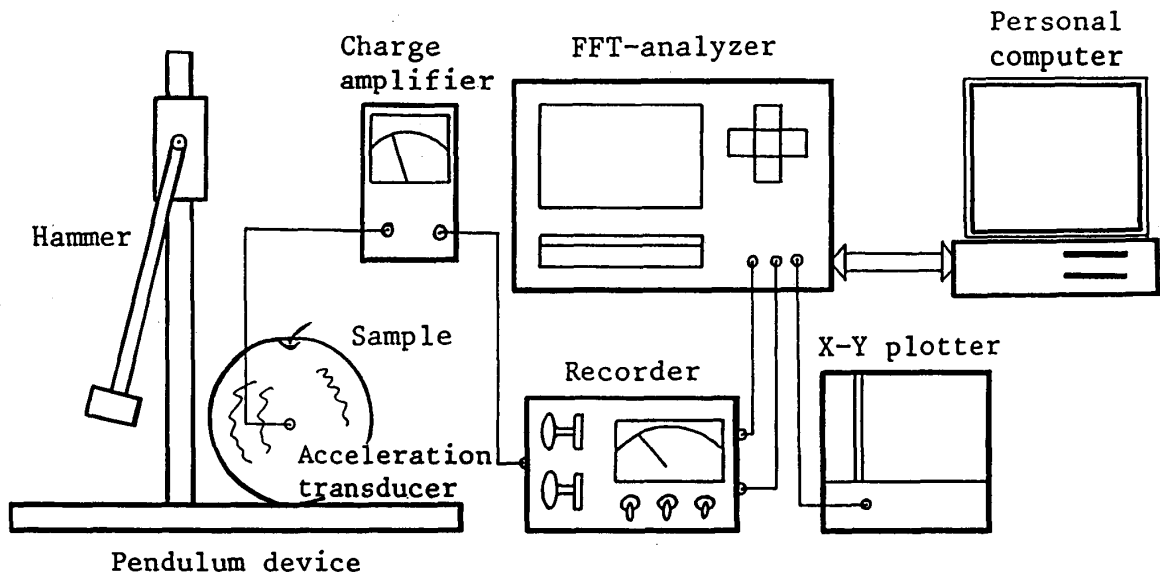


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus.

振り子取り付け部において任意の角度に調節できるようにした。

スイカの赤道上の一点をインパルスハンマーを用いて一定の強度（落下角度が一定）で打撃し、打撃による試料の減衰振動波形を加速度ピックアップを用いて測定した。ここで、測定位置は打撃点から90度離れた同じ赤道上の点である。また、実験誤差を小さくするため、試料を8回打撃し、それらのデータを平均して一つのデータとした。その後、FFTアナライザ (CF-920S, ONO-SOKKI Ltd.) を用いて減衰振動波形を解析するとともにパーソナルコンピュータ (PC-9801, NEC Ltd.) 及び波形解析ソフト (DADiSP, DSP Development Ltd.) を利用し自己相関関数の包絡線の解析を行った。ここで、解析データ点数を1024個、サンプリング周波数を1 KHzに設定した。

3. 解析手順

解析手順は以下のように示す。

- (1) 打撃したスイカの赤道から加速度ピックアップを用いて振動波形 (Fig. 2) を測定した。
- (2) FFTアナライザを用いて、Fig. 2に示した振動波形から Fig. 3の自己相関関数を求めた。
- (3) GP-IBインターフェイスを用いてFFTアナライザからパソコンへ自己相関関数を読み出した。
- (4) その自己相関関数の上部ピーク値を検出し、そのピーク点を連線して Fig. 4に示したような包絡線を求めた。
- (5) 波形解析ソフトを用い、Fig. 5のような包絡線のパワースペクトルを求めた。

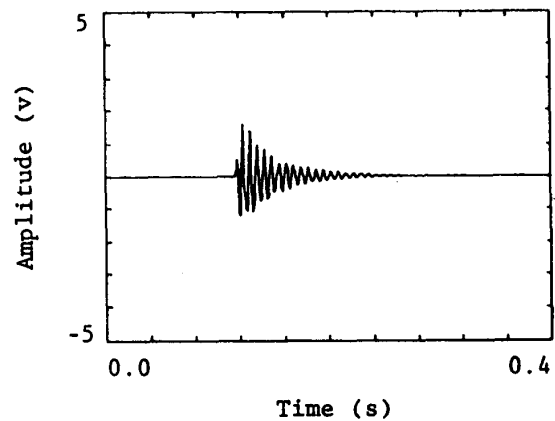


Fig. 2. Wave form of vibration.

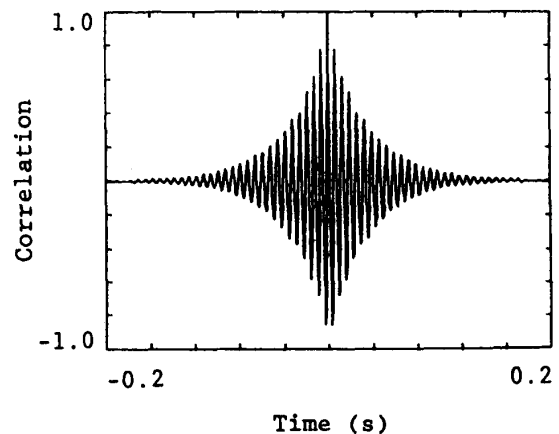


Fig. 3. Auto-correlation function.

- (6) このパワースペクトルから周波数が0.008Hz間隔に0.000Hz (H_1), 0.008Hz (H_2), 0.016Hz (H_3) ... 0.088Hz (H_{12}) である時の振幅値をそれぞれ V_{H_1}

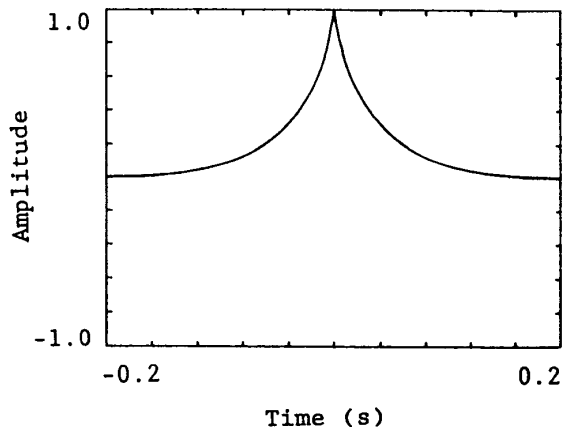


Fig. 4. Curved line fitted to the peak points of auto-correlation function.

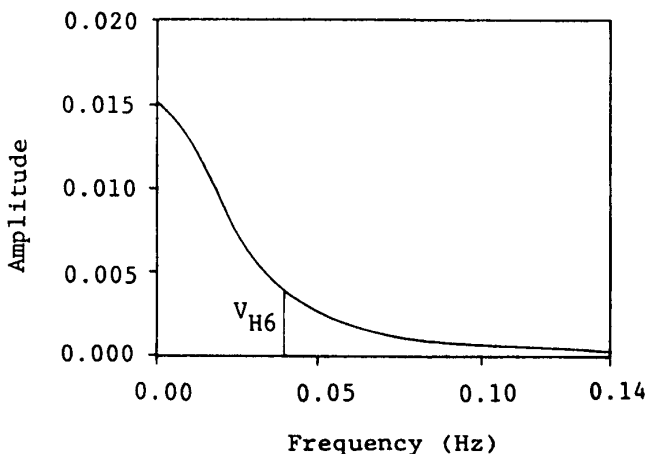


Fig. 5. Power spectrum for the curved line.

… V_{H12} として求めた。

(7) これらの振幅値とスイカの質量、密度、食味実験の結果および内部品質の関係を検討した。

結果および考察

1. 自己相関関数と質量の関係

適熟スイカを用いて振動波形の自己相関関数と質量の関係を Fig. 6 に示す。質量が増加するにつれて自己相関関数のパターンが変化した。また、小さいスイカの自己相関関数は縦長のひし形を示したが、質量が増加するにつれて段々と横長のひし形になった。したがって、自己相関関数の上部包絡線は質量の変化に伴って変化することが示された。

2. 自己相関関数と内部品質の関係

Fig. 7 に内部品質の異なるスイカの振動波形の自己相関関数を示す。

適熟スイカの自己相関関数は普通のひし形を示したが、未熟スイカの自己相関関数は縦長のひし形を

示し、また煮えスイカの自己相関関数は横長のひし形を示した。また、内部空洞のスイカの自己相関関数は不規則な形を示した。このように内部品質により自己相関関数の上部包絡線が異なった。

したがって、スイカの質量の影響を取り除ければ自己相関関数による品質判別が可能であると考えられる。

3. 自己相関関数の包絡線のパワースペクトルの各周波数の振幅値と質量、密度、官能試験の結果の関係

適熟スイカを用いて振動波形の自己相関関数の包絡線のパワースペクトルの各周波数の振幅値 (V_{Hn}) と質量、密度及び官能試験の結果(甘味、歯ごたえ、水分と色)の相関関数を Table 1 に示す。

V_{H1} , V_{H2} と質量の間には正の相関が得られたが、以後の振幅値と質量の間には負の相関が示された。その中で、 V_{H3} と質量の相関係数は最も小さく、わずか -0.01 となったので、 V_{H3} と質量の間には相関がないものと考えられる。また、 V_{H4} 以後になると、負の相関は次第に強くなった。特に V_{H7} は質量と最も高い相関を示し、相関係数が 0.90 となった。したがって、 V_{H7} を用いるとスイカの質量を測定する可能性があると考えられる。

密度については、質量と同様に V_{H1} , V_{H2} と密度の間には正の相関が得られたが、以後の振幅値と密度の間には負の相関が示された。その中では密度と最も高い相関を示したのは V_{H3} であった。

歯ごたえについては、質量と同様に、 V_{H1} , V_{H2} と歯ごたえの間には正の相関が得られたが、以後の振幅値と歯ごたえの間には負の相関を示した。しかし、その中では、 V_{H3} と歯ごたえの相関係数が一番大きく、 -0.76 となったので、 V_{H3} と歯ごたえの間には相関が認められる。

甘味については、 V_{H1} から V_{H7} までは甘味の間には負の相関を示したが、以後のワパー値と甘味の間には正の相関を示した。その中では甘味の間には最も高い相関を示したのも V_{H3} であった。

同様に官能試験の水分と色は、振幅値との関係には正の関係と負の関係を示し、その中で、 V_{H3} との関係が最も大きいことを示した。

このように V_{H3} が質量との相関がほとんどなく、密度、官能試験との間には最も高い相関を示したので、 V_{H3} が内部品質の指標とする可能性があると考えられる。

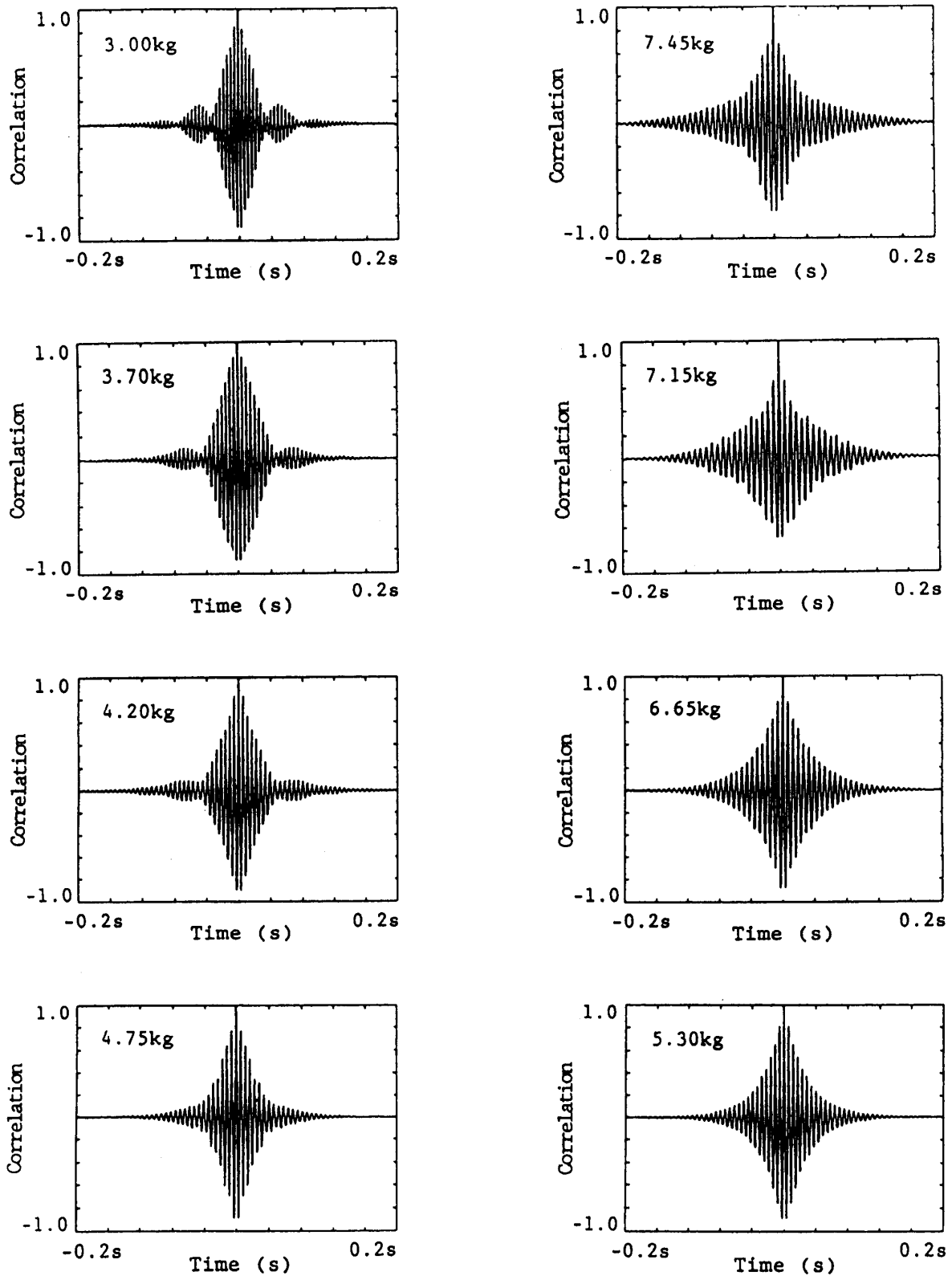


Fig. 6. Auto-correlation function for different masses of watermelon.

4. V_{H3} と内部品質の関係

Fig. 8 は各内部品質のスイカの V_{H3} 値のヒストグラムを示す。適熟スイカの場合は正規分布を示し、

その平均値が0.0165である。同様に未熟、煮えと空洞のスイカも正規分布を示し、平均値はそれぞれ0.0060, 0.0055, 0.0070であり、明らかに有意の差

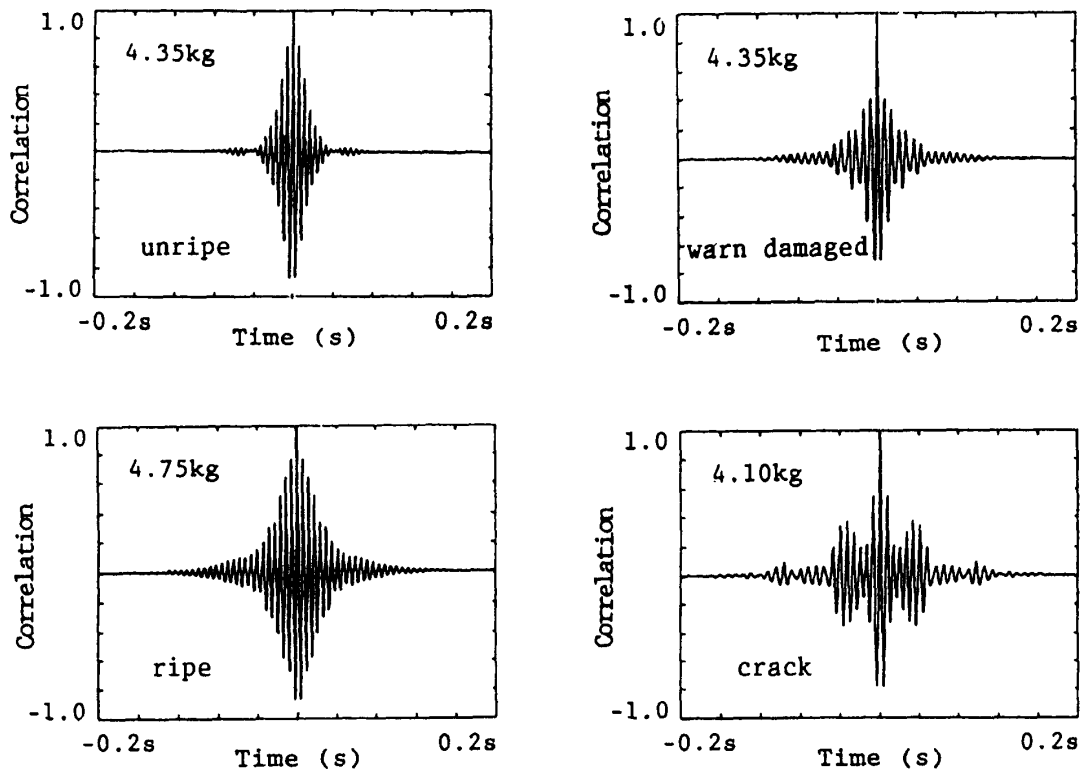


Fig. 7. Auto-correlation function for watermelons with different qualities.

Table 1. Matrix of correlation coefficients between amplitudes at various frequencies in power spectrum and mass, density, various sensing levels of watermelon

amplitude	mass	density	sensuous sugar	tooth's sensation	sensuous water	observed color
V_{H1}	0.66	0.17	-0.52	0.39	-0.24	-0.08
V_{H2}	0.61	0.08	-0.57	0.14	-0.28	-0.16
V_{H3}	-0.01	-0.32	-0.65	-0.76	-0.53	-0.46
V_{H4}	-0.67	-0.22	-0.41	-0.57	-0.48	-0.34
V_{H5}	-0.81	-0.14	-0.47	-0.39	-0.47	-0.10
V_{H6}	-0.86	-0.11	-0.44	-0.30	-0.36	0.01
V_{H7}	-0.90	-0.11	-0.33	-0.29	-0.18	0.15
V_{H8}	-0.89	-0.07	-0.05	-0.17	0.04	0.24
V_{H9}	-0.77	-0.02	0.46	-0.05	0.36	0.27
V_{H10}	-0.57	-0.07	0.51	-0.06	0.44	0.19
V_{H11}	-0.45	-0.04	0.50	-0.07	0.53	0.30
V_{H12}	-0.36	-0.01	0.54	-0.05	0.55	0.36

が認められた。したがって、適熟と他の品質のスイカを区分する判別値を決めれば、 V_{H3} による適熟スイカの検出の可能性があると考えられる。この判別値は適熟スイカの正規分布より求められる。

要 約

本文では振動波形の自己相関関数に着目し、自己

相関関数の包絡線のパワースペクトルの各周波数の振幅値と質量、密度、官能試験の結果（甘味、歯ごたえ、水分と色）の関係を検討しながら、スイカの質量に依存しない新たな非破壊判別指標を見いだすことを試みた。

1. 振動波形の自己相関関数のパターンが質量の増加につれて縦長のひし形から段々と横長のひし形に

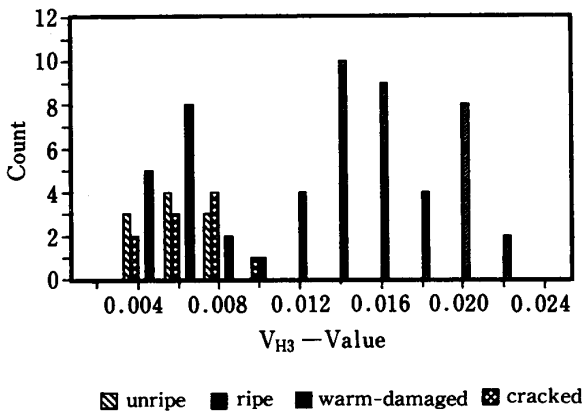


Fig. 8. Histogram of V_{H3} -value.

変化した。

2. 未熟スイカの自己相関関数は適熟スイカより縦長のひし形を示したが、煮えスイカの自己相関関数は適熟スイカより横長のひし形を示した。

また、内部空洞のスイカの自己相関関数は不規則な形を示した。このように自己相関関数のパターンがスイカの内部品質により変化することを示した。

3. 自己相関関数の包絡線のパワースペクトルの各周波数の振幅値と質量、密度並びに官能試験の各項目の関係には正の相関と負の相関を示した。

V_{H3} は質量との相関がほとんどなく、密度、官能試験との間には最も高い相関を示したので、 V_{H3} が内部品質の指標となる可能性を示した。

文 献

- 1) 川村恒夫・西村 功：スイカの物性に関する研究（第1報），農機誌，50（2），85-92（1988）
- 2) 笹尾 彰：育生中のスイカの衝撃特性，農機誌，47（3），355-358（1985）
- 3) Yamamoto H., Haginuma S.: Methods for Evaluating the Damping Constants of Free Vibrations of Intact Apples, *Rept. Natl. Food Res. Inst.*, No. 44, 26-29 (1984)
- 4) Yamamoto H. and Haginuma S.: Dynamic Viscoelastic Properties and Acoustic Properties of Japanese Radish Roots, *Rept. Natl. Food Res. Inst.*, No. 44, 36-44 (1984)
- 5) Yamamoto H. and Haginuma S.: Estimation of the Dynamic Young's Modulus of Apple Flesh from the Natural Frequency of an Intact Apple, *Rept. Natl. Food Res. Inst.*, No. 44, 20-25 (1984)
- 6) Yamamoto H. and Haginuma S.: Dynamic Viscoelastic Properties and Acoustic Properties of Watermelons, *Rept. Natl. Food Res. Inst.*, No. 44 30-35 (1984)
- 7) Yamamoto H., Iwamoto M. and Haginuma S.: Non-destructive acoustic impulse response method for measuring internal quality of apples and watermelons. *J. of Japanese Society of Horticultural Science*, 50（2），247-261（1981）

Summary

In this research, a new watermelon quality discrimination method making use of the auto-correlation function was proposed.

The relationships between the amplitudes at various frequencies in the power spectrum of the curved line suited to the peak points of auto-correlation function for vibrational signal and the several fundamental quality factors, namely, mass, density, sensing levels (sensuous sugar, tooth's sensation, sensuous water and observed color) were put under examinations, with the obtained results of the production of new reliable criteria, the one which was sensitive to the inner quality of watermelon and not sensitive to the variability in mass.

1). The auto-correlation function pattern in vibrational signal changed in accordance with the increase of the mass, showing a higher lozenge-shape for small mass and a longer lozenge-shape for large mass.

2). The auto-correlation function pattern in vibrational signal changed in accordance with the changes of the inner-quality, showing a higher lozenge-shape for the unripe watermelon and a longer lozenge-shape for warm-damaged one.

3). There were positive and negative relationships between the amplitudes at various frequencies in the power spectrum of a curved line suited to the peak points of auto-correlation function and the several fundamental quality factors, such as, mass, density and various sensing levels.

It was ascertained that the V_{H3} was the most suitable criterion for determining the watermelon inner quality, owing to the fact that there was a considerable correlation between the V_{H3} and the sensing levels of flesh, added with the fact that the V_{H3} was not sensitive of the mass of watermelon.