

## マイクロ波センサを利用したアズキ粒の非破壊水分測定

熊林義晃・清水英樹・河野慎一・山崎邦雄

### Measuring Adzuki Bean Moisture Content Using a Microwave Sensor and a Cavity Resonator

Yoshiteru KUMABAYASHI, Hideki SHIMIZU, Shinichi KONO and Kunio YAMAZAKI

Adzuki beans often suffer from the inclusion of “stony beans” which lack the ability to absorb water. These beans can reduce the overall quality of an entire bean lot. At present, no non-destructive technique exists for separating these beans from their moisture-absorbing counterparts. There have, however, been reports that the moisture content of such “stony beans” is lower than that of normal beans. This study thus attempted to measure adzuki bean moisture content using a microwave sensor and a cavity resonator. Adzuki beans were placed in the center of the cavity resonator, and their moisture content was measured by determining the resonant frequency and the level of reflected waves from the cavity, both of which are a function of the bean’s dimensions and moisture content.

Using this method, moisture content for adzuki beans containing moisture levels between 8% and 18% was determined with an uncertainty of 1.2% at the 95% confidence level.

あんの原料となるアズキは、全国シェアの6割を占める北海道の特産品である。近年、価格の安い輸入アズキとの競争が激しくなっており、供給の安定化や品質の維持が求められている。アズキがもつ品質問題の一つとして「石豆」がある。アズキの種皮は不透性で食用豆のなかでも吸水速度が遅いためアズキを調理・加工するときは、あらかじめ一定時間水に浸漬する。収穫時期の天候が不良な年には長時間浸漬してもまったく吸水しないアズキが高い頻度で混入していることがある。このアズキが「石豆」と呼ばれており、製造されるあんの品質を低下させる。アズキの出荷工程では、色彩選別機やX線検査器の導入により、石、土やガラス等の異物混入の問題がほぼ解決されつつある中で、それらの選別工程で除くことが難しい石豆の混入が問題としてクローズアップされ、その対策が要望されている。

現在まで、アズキの吸水特性<sup>1)</sup>や煮熟速度の差などの品質<sup>2)</sup>や貯蔵温度、湿度の品質への影響<sup>3,4)</sup>などに関して研究されており、吸水率の低下が煮熟豆の硬度の増大に関連があることや吸水率の低下の要因が明らかにされている。

一方で、ゆでアズキの製造過程で除かれる未吸水豆の分析から、石豆の含水率は、正常豆に比べて低いところに分布しており、含水率の測定により石豆かどうかを高い確度で判定できると云われている。アズキ粒の含水率を測定できれば、石豆を機械的に選別できる可能性がある。

本研究では、電気的水分測定法の一つである誘電率測定によりアズキ粒の含水率の測定を試みた。この方法は水の誘電率が他の食品成分の誘電率に比べて大きく、アズキ粒に含まれている水の量によってアズキ粒の誘電率が大きく変化することを利用して、誘電率の測定は試料の表面状態に影響を受けにくいという特徴をもつマイクロ波<sup>5)6)7)</sup>を利用して行った。小型で低コストな測定装置として実現するために小さなきょう体にマイクロ波発振器、マイクロ波検出器を一体化したマイクロ波センサを用いた。このセンサを用いて新規な水分測定器を製作し、石豆を機械的に選別するための基礎的試験を実施した。

## 実験方法

### 1. 試料アズキ

アズキ試料はエリモ小豆で、市販されている室温貯蔵されていたものを使用し、包装年月が92年8月のものを「92-8」と表示した（以下同様）。

本試験では、92-8, 96-5, 96-9(以上, A社), 96-12(B社)の4種類, 合計280個を用いた。

### 2. 測定装置

図1に測定装置のブロック図を示した。マイクロ波センサに空洞共振器を接続し、共振特性測定用の装置を製作し、アズキ粒の水分測定器とした。

空洞共振器内に向けて放つマイクロ波の発振周波数は、センサ内にある発振器に接続された周波数可変つまみを回転させることで変化させた。本装置は、共振特性が再現性良く得られるように、モーター駆動で発振周波数を変化させた。モーターはリレーを用いてコンピュータから回転方向や動作・停止を制御した。周波数可変つまみの目盛り位置は、モーターに連動したポテンシオメータ出力電圧値  $V_{fre}$  と対応させた。この出力電圧はアンプを通してコンピュータに取り込んだ。発振周波数は、周波数可変つまみの目盛りと周波数との関係グラフから求めた。

空洞共振器から反射してくるマイクロ波は、センサ内の検出器で受信される。検出器の出力は所定の増幅率のアンプで増幅し、センサ出力電圧値  $V_{sen}$  としてコンピュータに取り込んだ。

コンピュータでは、製作したプログラムにより、モーターの制御及び取り込んだ上記二種類の電圧値データの表示、保存を行った。

図2にマイクロ波センサと共振器の外観を、表1に使用したマイクロ波センサ及び共振器の仕様を示した。

共振特性は、所定周波数範囲を掃引することで得た。発振周波数を変化させていくと、それに伴い空洞共振器からの反射波の大きさが変化する。上記二つの電圧値の  $V_{fre}$  を横軸の値に  $V_{sen}$  を縦軸の値としてプロットす

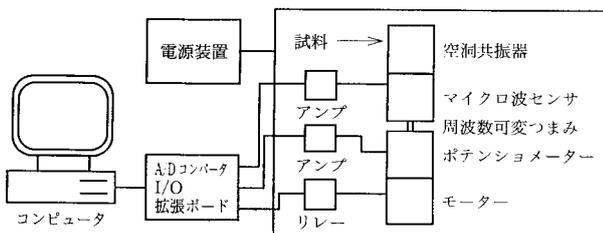


図1 測定装置ブロック図

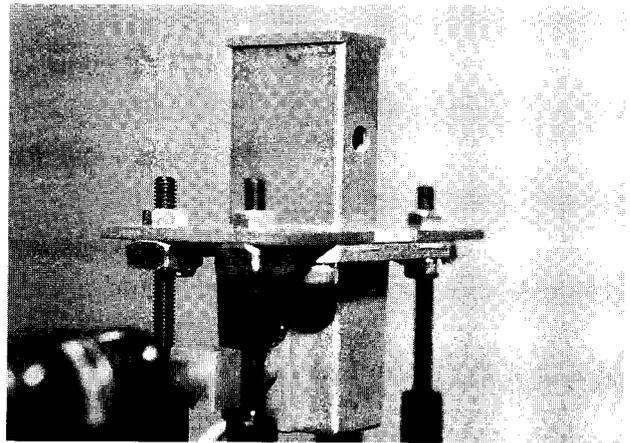


図2 マイクロ波センサと共振器の外観

表1 マイクロ波センサと共振器の仕様

マイクロ波 センサ	メーカー	東芝
	型名	S-RX 17
	マイクロ波 発振源	ドップラーレーダー用ガンダイ オード
	周波数可変 範囲	10.3-10.8 GHz (基準周波数 10.525 GHz)
	マイクロ波 出力	約 20 mW
	検波方式	ショットキーバリア型ミキサ ダイオード
共振器	空洞共振器	矩型 TE 102 モード Q=4000 (初期値)

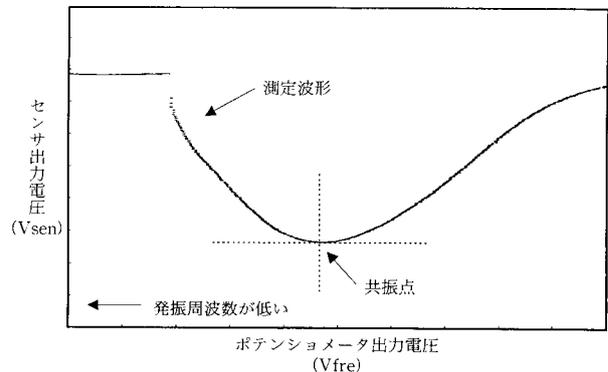


図3 共振特性の波形の一例と共振点

ることで共振特性の波形が得られる。この波形中でセンサ出力電圧値  $V_{sen}$  が最小となる点を共振点とし、その点のセンサ出力電圧値を共振点電圧、発振周波数を共振周波数とした。共振特性の波形の一例と共振点を図3に示した。

空洞共振器中の一部に被測定物を挿入すると、被測定物の水分量によって、共振周波数と共振点電圧などの共

振特性が変化する。

### 3. 測定方法

空洞共振器の高周波電流が流れていない向かい合う2つの面に穴をあけ、そこにテフロンチューブ(外径6.0, 内径5.0 mm)を貫通させた。アズキ試料は、一粒づつチューブに入れ、空洞共振器の中心に、アズキの種瘤部分が同一方向を向くようにして静置した。測定は、一つの試料当たり3回行い、ポテンシオメーター出力電圧値  $V_{fre}$ 、センサ出力電圧値  $V_{sen}$  それぞれの平均値をデータとした。測定は、25°Cで行った。その後、一粒づつ粒径と含水率(分析含水率)を測定した。粒径は、長径、厚径、幅径をノギスを用いて測った。含水率は乾燥法を用いて測定した。試料を105°Cに72時間保ち、重量を測定し、その減量を水分含有量とし、原重量に対する比率から求めた。

測定したアズキは検量線作成用160点(92-8:60点, 96-5:60点, 96-12:40点), 検量線評価用120点(92-8:40点, 96-5:40点, 96-9:40点)に分けて、重回帰分析を行った。

## 結果及び考察

### 1. アズキ粒の性状

図4に検量線作成用アズキの、図5に検量線評価用アズキの相乗積、重量、含水率のヒストグラムを示した。相乗積は、長径、厚径、幅径の積をとったもので、粒の大きさを表す指標とした。

相乗積は、110~230 mm<sup>3</sup>の範囲に分布しており、180~190 mm<sup>3</sup>にピークがあった。重量は、80~180 mgの範囲に分布しており、120~150 mgにピークがあった。いずれの場合も、包装年月によって分布に大きな差は認められなかった。試験に使用したアズキ粒は、相乗積で表した大きさや重量の分布において、ほぼ均一の試料であると云える。

含水率は、8~18%の範囲に分布しており、分布にいくつかのピークがみられた。ピークは、包装年月に対応しており、古いものほど含水率が低くなっていた。これは、室温貯蔵のため水分が減少したと考えられた。図4(c)の検量線作成用アズキでは、10, 14, 17%に三つのピークがみられ、図5(c)の検量線評価用アズキでは、10, 14%に二つのピークがみられた。

市販されているアズキの水分は、14~18%といわれており、石豆の場合、含水率が11%以下になっているといわれている。今回使用したアズキの含水率は、包装年月が一番古い「92-8」を除いて、上記の正常豆の範囲にあ

る。包装年月「92-8」のアズキは、含水率が石豆と同等な試料であり、本試験では疑似的な石豆として考えた。試験に使用したアズキ粒は、含水率の分布において、正常豆に石豆が混入した試料であると云える。

### 2. 共振点測定

共振特性を得るために、10.48~10.54 GHzの周波数範囲を掃引した。周波数に対応するポテンシオメーター出力電圧では、6.0~7.0 Vである。測定時間は約15秒であった。

図6に測定した共振特性から得られた共振点の分布を、一例として検量線作成用アズキについて示した。共振点の位置は、包装年月の違いにより、大きく3つの集団に分かれた。図7にアズキ粒に含まれる水分重量とセンサ出力電圧  $V_{sen}$  との関係を示した。図6, 図7から水分重量が多くなるほどセンサ出力電圧は大きくなり、大きな正の相関があることがわかった。図8に相乗積とポテンシオメーター出力電圧  $V_{fre}$  との関係を示した。相乗積が大きくなるほどポテンシオメーター出力電圧は小さくなり、大きな負の相関があることがわかった。

### 3. 重回帰分析

得られた二つの電圧値からアズキ粒の含水率を推定する方法を検討した。

共振点の位置は、相乗積という外形寸法から求めた数値に影響を受けていた。これを考慮して、将来の連続測定を想定した場合でも光電式センサで測定が可能であることから2つの粒径寸法を重回帰分析の説明変数に採用した。また、相関を高めるために2つの電圧値と2つの粒径寸法の逆数についても重回帰分析の説明変数に加えて検討した。

含水率を目的変数とし、2つの電圧値  $V_{fre}$ ,  $V_{sen}$  と粒径(厚径, 幅径)、さらにそれらの逆数である  $1/V_{fre}$ ,  $1/V_{sen}$ ,  $1/\text{厚径}$ ,  $1/\text{幅径}$  を説明変数として重回帰分析を行った結果を以下に示した。

$$X = 31.05607 A + 22.05917 B + 1066.433 C \\ + 36.92904 D - 506.087$$

$$R = 0.9719$$

$$X: \text{含水率}\% \quad A: V_{sen} \quad B: V_{fre} \quad C: 1/V_{sen}$$

$$D: 1/\text{幅径}$$

図9に検量線作成用アズキ粒の回帰含水率と分析含水率との比較を示した。図4(c)にみられた3つの含水率のピークに対応した点の集団として分離できていることがわかった。回帰式から含水率を求め、分析含水率との差(残差)を算出した。残差の標準誤差(SEC)は0.68312であった。

図10に評価用アズキ粒に回帰式を適用して求めた回

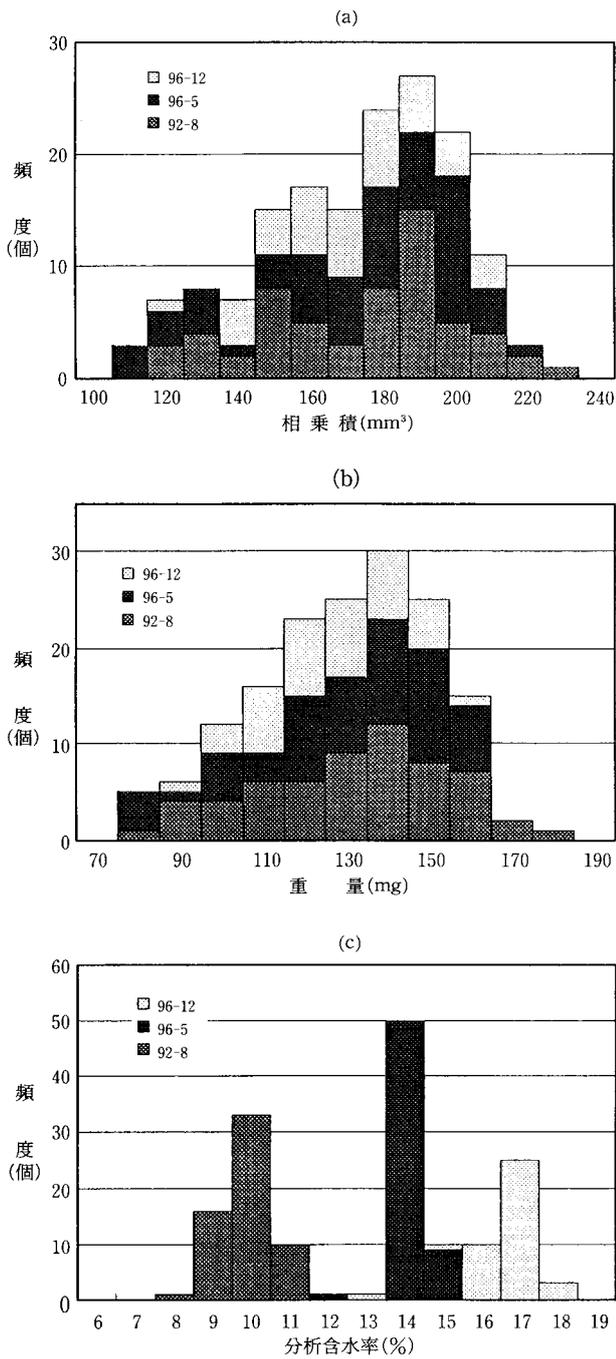


図4 検量線作成用アズキ粒の性状  
(a)相乗積 (b)重量 (c)含水率

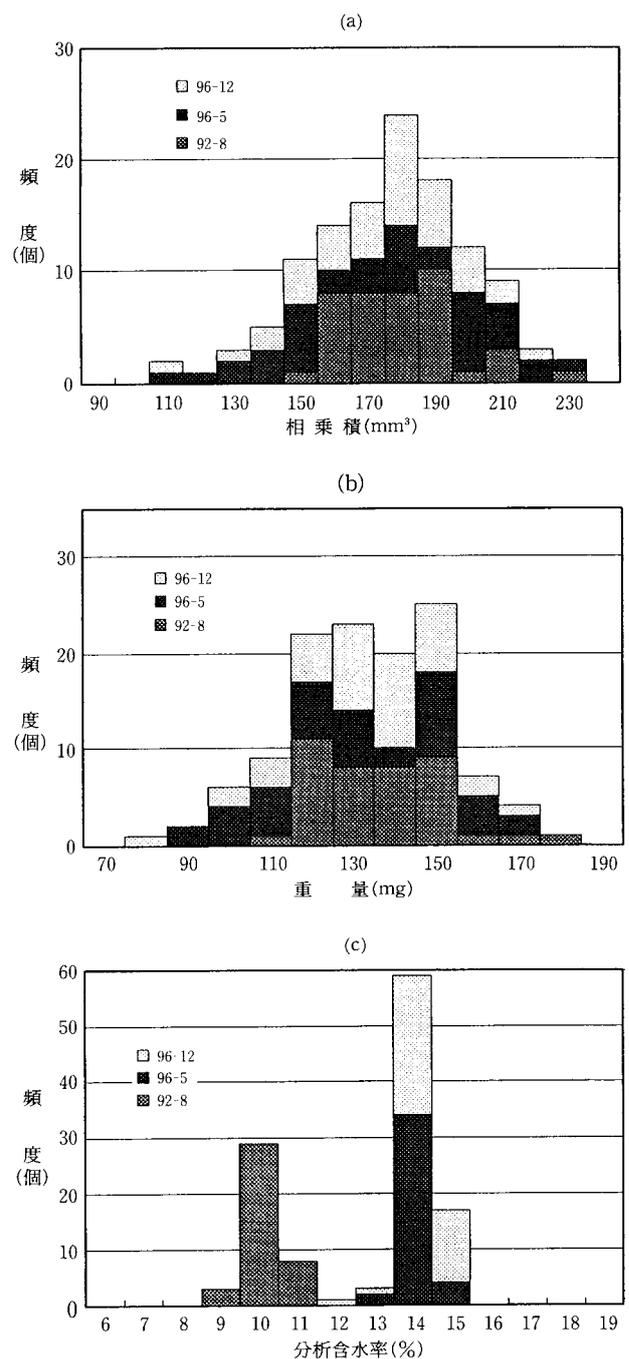


図5 検量線評価用アズキ粒の性状  
(a)相乗積 (b)重量 (c)含水率

帰含水率と分析含水率との比較を示した。先の検量線作成用アズキ粒の場合と同様に図5(c)の2つの含水率のピークに対応した点の集団として分離できていることがわかった。回帰含水率と分析含水率との残差の標準誤差(SEP)は0.62654、バイアスは0.15922であった。従って、得られた標準誤差(SEP)から95%の信頼限界は、1.2%となった。相関式から求めた含水率は乾燥法による

含水率とほぼ一致することが確認できた。

前述したように正常なアズキ粒の含水率が、14%以上あり、石豆の場合11%以下であれば、今回の信頼限界の数値で選別が可能と考えられた。

要 約

アズキに混入している未吸水粒である石豆を機械的に

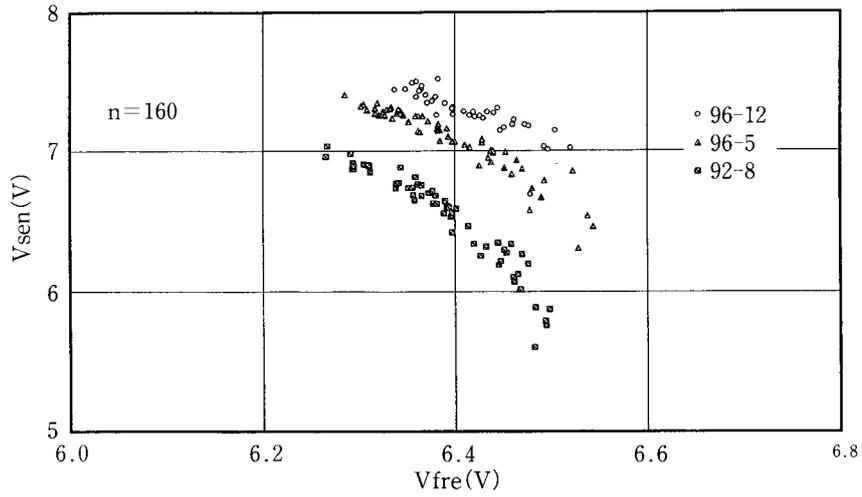


図6 検量線作成用アズキ粒の共振点の分布

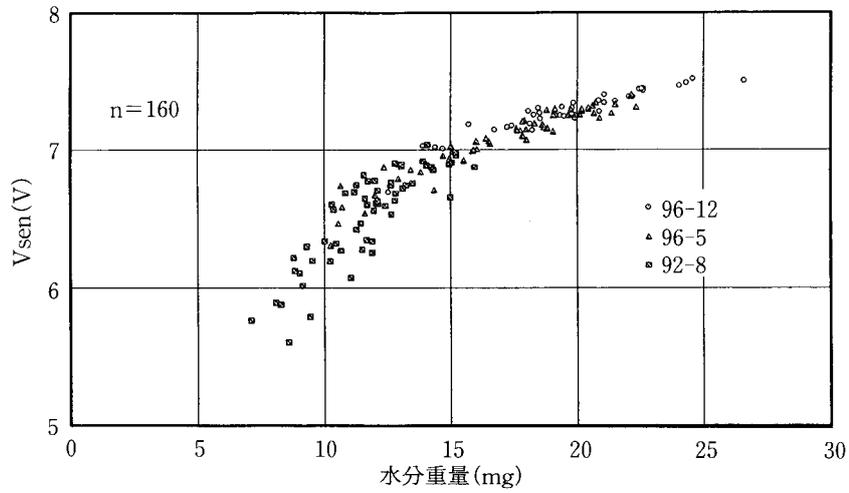


図7 水分重量と Vsen との関係

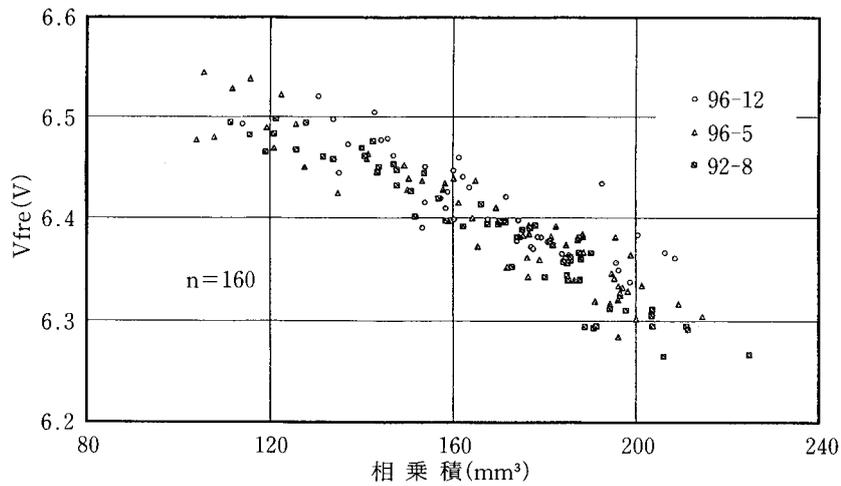


図8 相乗積と Vfre との関係

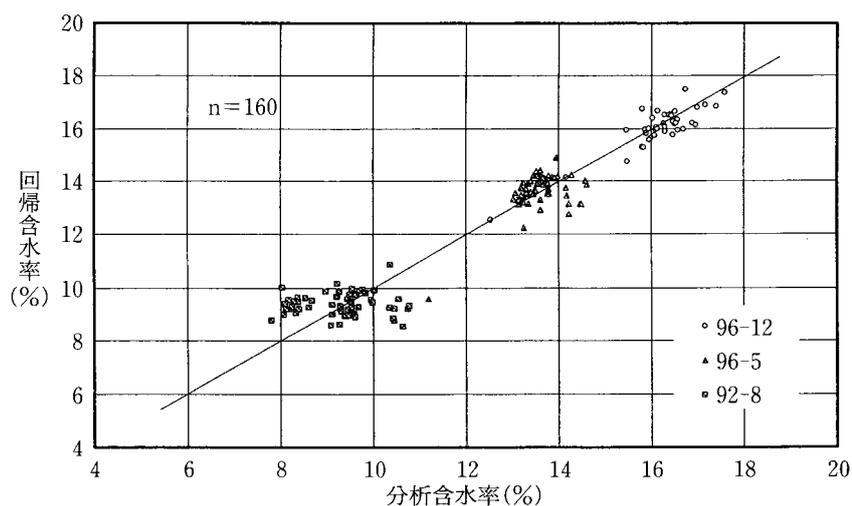


図9 検量線作成用アズキ粒の回帰含水率

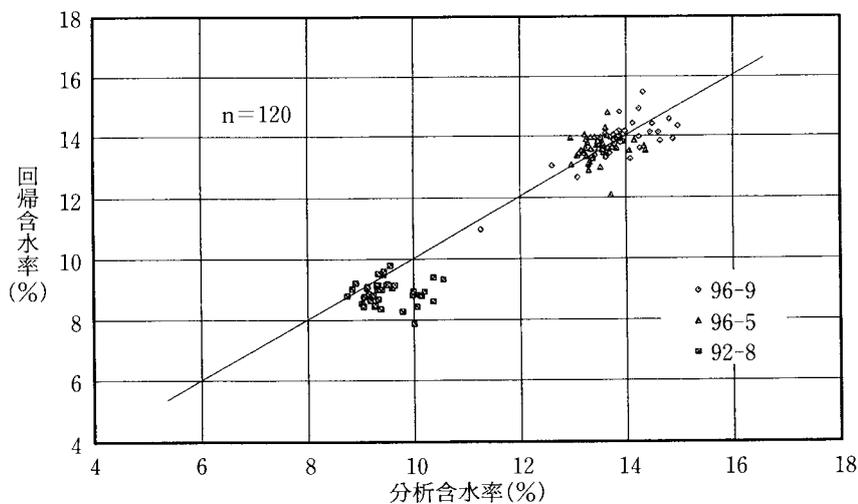


図10 検量線評価用アズキ粒の回帰含水率

選別するための基礎的試験を実施した。石豆の含水率が正常豆に比べて低いことに着目し、アズキ粒の含水率をマイクロ波センサを用いて新規に製作した共振特性測定用の装置で測定した。

乾燥法から得た含水率と上記装置から得られる二つの電圧値及び粒径値とについて重回帰分析を行った結果、これらの数値を組合せることでアズキ粒の含水率を求めることができることが明らかになった。

#### 謝 辞

この試験の遂行に当たり、ホクレン農業協同組合連合会の石狩穀物調製センター、十勝食品工場からご援助いただきましたこととお礼申し上げます。

#### 文 献

- 1) 塩田芳之・倉田美恵・土屋房江：家政誌，**34**，12 (1983)。
- 2) 由田宏一・佐藤久泰・上島尚・石井伸朗・佐藤導謙：日本作物学会紀事，**58**，別号 (1989)。
- 3) 畑井朝子：家政誌，**33**，11 (1982)。
- 4) 畑井朝子：北海道教育大学紀要，**33**，2 (1983)。
- 5) KRASZEWSKI A.W., YOU T.S. and NELSON S.O.: *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **38**, 1 (1989)。
- 6) 千葉正兄・松田英司：センサ技術，**12**，5 (1992)。
- 7) 越島哲夫：マイクロ波加熱技術集成，第1版 (エヌ・ティー・エス，東京) p.665, 1994。