

# ミリ波放射計による糖度の非破壊定量測定

小田 誠<sup>\*1\*2,†</sup>・間瀬 淳<sup>\*3</sup>・水野 皓司<sup>\*4</sup>  
(平成21年4月30日 受理)

## Quantitative Non-destructive Measurement of Sugar Content by Millimeter Wave Radiometer

Makoto ODA, Atsushi MASE, Koji MIZUNO

<sup>†</sup>E-mail of corresponding author: [m-oda6@asem.kyushu-u.ac.jp](mailto:m-oda6@asem.kyushu-u.ac.jp)

A millimeter-wave Dicke-type radiometer is developed for non-destructive quantitative measurement of biological samples. We have studied the effect of background noise on the receiving power as well as the relationship between the sugar content and the receiving power, and found that the raise of the difference between the thermal noise of the target and the background noise is the most important to measure the slight change of the radiation power due to the concentration change (i.e. the change of the emissivity). Furthermore, We understood that contact measurement was necessary to keep the background noise constant and to lower it.

**Key words :** *Millimeter-wave, Dicke-type radiometer, Background radiation, Non-destructive, Quantitative Measurement*

### 1. 緒 言

出荷する果実の品質を高めブランド化を図るには、信頼性が高くかつコンパクトで使いやすい検査装置が必要である。検査項目の中でも、特に糖度は、果実のおいしさを評価する上で最も重要な項目の一つである。糖度検査のため、従来はサンプルを抜き取り、搾った果汁の糖度を光屈折式糖度計により判定する方式が採られてきた。この方式には、前処理の必要な化学分析と異なり、すばやくかつ簡単に測定できる、分析者の技量に左右されない、同時に数項目の品質測定が可能である、などのメリットがある。しかしこの方式は破壊検査であり、全数検査ができないため選別の際に規格外の果実が含まれてしまうことが問題となっている。このような理由で、果実の糖度を非破壊で計測するための研究が進められており、実用化も進んでいる<sup>1), 2)</sup>。

現在一般的に行われている、光センサーを用いた果実糖度の非破壊計測では、光を果実に照射、果実の中で乱反射した後出てきた光を分析し、内部の情報を推定している。分析に使用される光は、物質を通過する力のある赤外線のうち可視光線に近い近赤外線である。しかし、透過してくる光の中から指標となる波長を取り出すには、高価な分光器が必要であり、装置構成が複雑なものとな

る。このため、メーカー数社から販売されている光センサーを利用した果実糖度の非破壊検査装置は非常に高額であり、また外からの光に影響されるため暗幕で覆うことが必要である、近赤外線の透過率の低さから皮の厚い果実の場合では測定精度が悪くなるなどの問題がある。

一方、マイクロ波などの電波を計測に応用するような研究はいまだなされていない。その主な原因は、マイクロ波は波長が長いと指向性が悪く、装置の小型化が実現できないためである。これに対し、ミリ波は光とマイクロ波の中間の性質を有し、光のような直進性に富み、マイクロ波に近い物質の透過性を持ち、また装置の小型化・軽量化が期待されるなど、数々の優れた特長を持っている。さらに、近年ミリ波帯における素子・回路技術の発達と共に、ミリ波を用いた装置が多く開発され、低価格化も進んできた。

電波を利用する計測方式には、大きく分けてアクティブ方式とパッシブ方式の2種類がある。アクティブ方式は、発振器からの電波を物体に照射し、その透過波や散乱波を受信する方式である。一方、パッシブ方式は、物体が自ら放射する熱放射(熱雑音)を受信する方式であり、発振器などを必要としないなどの特長を有する。しかし、受信強度が微弱なため、低雑音、高利得、広帯域のシステムが要求される。著者らは、パッシブ方式計測装置であるミリ波放射計を用いた生体成分の非破壊定量測定方法を検討した。

\*1 量子プロセス理工学専攻博士課程

\*2 宮崎県工業技術センター

\*3 九州大学産学連携センター

\*4 東北大学電気通信研究所

## 2. 糖度と放射率の相関関係

### 2.1 放射率

一般に熱放射の電力は、等価な電力を放射する黒体の温度（輝度温度  $T_{obj}$ ）を用いて表される。電力  $P$  と輝度温度  $T_{obj}$  の間には次式の関係がある。

$$P = kT_{obj}B \quad (1)$$

ここで、 $k$  はボルツマン定数 ( $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ )、 $B$  は帯域幅 (Hz) を表す。

また、輝度温度  $T_{obj}$  は理想的な黒体（放射率  $\epsilon$  が 1 の物体）であれば物理的な温度  $\bar{T}_{obj}$  と一致するが、通常  $T_{obj}$  と  $\bar{T}_{obj}$  の関係は、

$$T_{obj} = \epsilon \bar{T}_{obj} \quad (2)$$

と表され、放射率  $\epsilon$  によって輝度温度が決まる。

Brix%とも呼称される果実の糖度は、ショ糖が対象に含まれる重量パーセント濃度である。多くの果実は若い時期にデンプンを蓄積するが、果実が成長するに従いデンプンは糖へと分解され甘くなる。

ミリ波放射計を用いて果実の糖度を測定する場合には、果実の糖度が変化した際に放射率  $\epsilon$  が変化することが必要である。そこで、ミリ波放射計による果実糖度の非破壊計測の可能性を検証するために、ショ糖水溶液濃度と放射率  $\epsilon$  の間に相関があるかを調べた。放射率  $\epsilon$  は誘電率から求めることが可能であるので、始めに濃度の異なるショ糖水溶液の誘電率を測定した。

放射率  $\epsilon$  は、物体の複素誘電率（誘電率  $\epsilon'$  と誘電損失  $\epsilon''$ ）を用いると、

$$\epsilon = 1 - \left| \frac{1 - \sqrt{\epsilon' - j\epsilon''}}{1 + \sqrt{\epsilon' - j\epsilon''}} \right|^2 \quad (3)$$

で表わすことができる<sup>3)</sup>。

### 2.2 複素誘電率測定

ショ糖水溶液の複素誘電率は、開放終端同軸プローブを用い、500MHz~50GHz における複素反射係数をネットワークアナライザで測定することにより求めた。ネットワークアナライザには Agilent Technologies 社製 8361A を、同軸プローブには Agilent Technologies 社製 85070A スリムプローブを使用した。被測定用として、0%、5%、10%、15% のショ糖水溶液を調製した。誘電率には温度依存性があるため、恒温水槽を用い全てのサンプルが 20℃になるようにした。

Fig.1 に複素誘電率の測定結果を、それを用いて計算した放射率を Fig.2 に示す。Fig.2 の第 2Y 軸には液温 20℃ (293K) の時に輝度温度に換算した場合の目盛りを表示した。

Fig.2 から、ショ糖水溶液の濃度が高くなると放射率  $\epsilon$  は高くなり、放射計により測定した場合の受信強度は

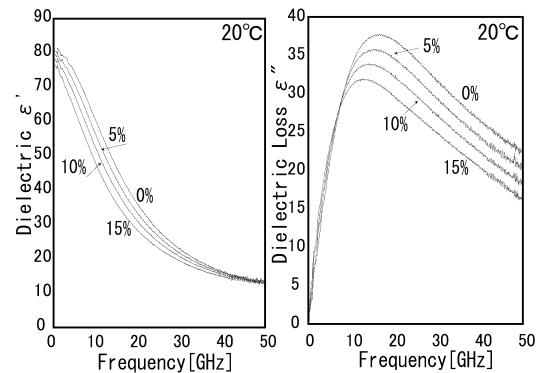


Fig. 1 Complex permittivity of aqueous sucrose solution at 20 °C.

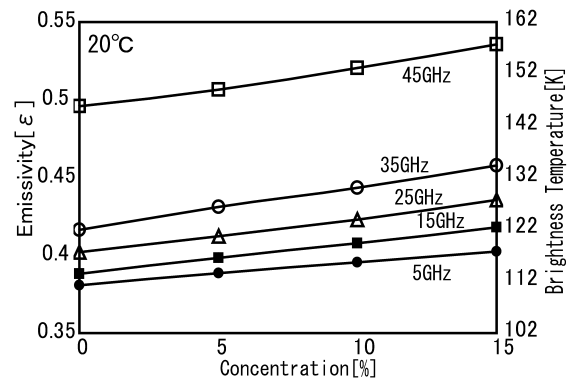


Fig. 2 Emissivity of aqueous sucrose solution at 20 °C.

強くなると考えられる。また、Fig.2 に示した測定周波数範囲にわたって直線性があり、傾きをとるとショ糖水溶液の濃度変化に対する放射率の変化は、周波数が Ka 帯（周波数 26.5-40 GHz）の時に最も大きくなる。このことから製作する放射計の周波数帯域は Ka 帯が適していると考えられる。

さらに、放射率の温度依存性を調べるために温度を変えた場合の誘電率を測定し、それから放射率を求めた結果を Fig.3 に示す。グラフは 35GHz における結果である。実線は各濃度の放射率の温度依存性を一次式で近似したものである。放射率は、温度とともに小さくなる傾向を示している。しかし、ショ糖水溶液の濃度が高くなるにつれて、放射率が高くなるという相関には変わりがない。

## 3. ミリ波放射計

### 3.1 基本構成

本研究では、いくつかの種類がある放射計の中のディック型放射計を製作し実験に使用した。ブロック図を Fig.4 に示す。

本装置は、入力部にスイッチを用い被測定物体と比較用参照信号とを交互に切り替え、両者の差を出力として

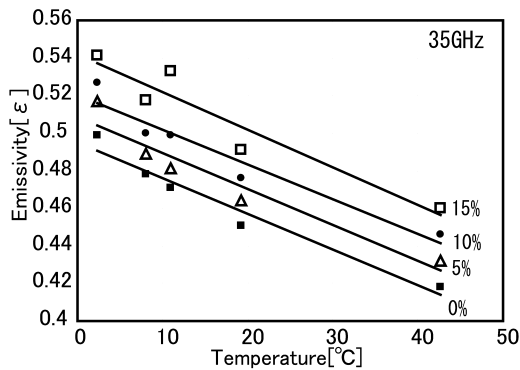


Fig. 3 Temperature dependence of emissivity of aqueous sucrose solution.

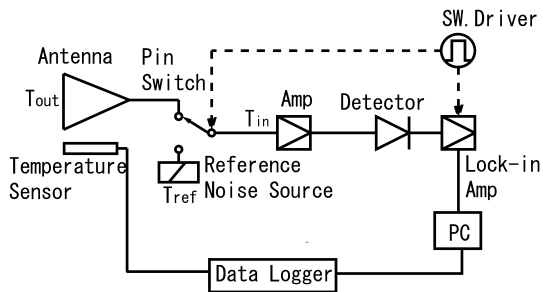


Fig. 4 Equivalent circuit of a Dicke-type radiometer.

取り出すものである。この方法では、増幅器利得のドリフトをキャンセルできるという特長があり、したがって、全電力型放射計に比べ、小さな信号を検出することに適している。また、雑音成分の直流出力が出てこないために全電力型放射計のように補正電圧を加える必要がないという特長がある<sup>4)</sup>。

なお、Fig.4でのロックインアンプは、低域での狭帯域フィルタの役割を持っており、今回の測定では時定数を100msに設定した。また、切り替え信号は、1kHzを使用した。ロックインアンプには(株)エヌエフ回路設計ブロック社製LI5640を使用した。

受信器の温度分解能は、増幅器で発生する雑音により大きく影響されるため、増幅器用のMMIC(モノリシックマイクロ波集積回路)には、NF(雑音指数)の低いMMIC(ユーディナデバイス社製FMM5704X)を用いた<sup>5)</sup>。実験に使用したディッケ型放射計(トキメック社製)の主な仕様をTable1に示す。なお、アンテナには利得11.4dBの円錐ホーンアンテナを用いている。

### 3.2 装置の特性および評価(温度分解能の測定方法および結果)

本放射計の温度分解能の評価を行った。温度分解能の定義は測定系によって区別できる最小の輝度温度変化であるが、これを実験で求めるために次のような方法を

Table 1 Specifications of TOKIMEC, Inc. Dicke-type radiometer.

Frequency range	35±5GHz
Small signal gain	40dB
Small signal gain flatness	±3dB typ
Noise figure	3dB typ
Low-level sensitivity	>0.5mV/μW
Operating temperature	0 to +55 °C
Bias voltage and current	3.3V±5% 150mA

用いた。THOMAS KEATING LTD.製RAM(Radar Absorbing Material)を液体窒素で冷却し、その後空中に放置し、RAMの温度変化に対する受信電圧の変化を測定して、その傾きを温度感度 $S$ とする。つぎに常温のRAMを長時間測定したときの受信電圧の変動幅を $W$ とする。この変動幅は増幅器の雑音指数に依存するもので、平均値を中心とした正規分布に従うものとする。そこで、経時変化の標準偏差 $\sigma$ をとり、信頼区間を $2\sigma$ として変動幅を定義する。このとき、温度分解能は、 $\Delta T = W/S$ となる。この性能が果実糖度測定時の糖度分解能に影響する。

上記した方法で温度感度と受信電圧変動を測定した結果の例をFig.5に示す。感度の測定値に対する近似直線の式

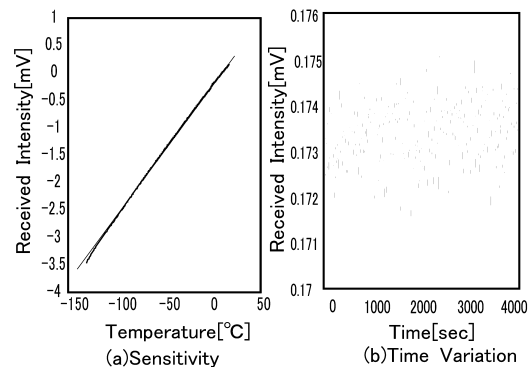


Fig. 5 Temperature resolution of the radiometer.

は $V = 0.024T + 0.24$ であり、一方変動幅は0.0013[mV]なので、温度分解能は0.055[K]となる。

## 4. 熱放射の測定方法

### 4.1 雑音測定原理

ミリ波放射計は、物体が放射する熱雑音(ホワイトノイズ)のうちミリ波帯をアンテナで受信する。アンテナで受信する熱放射は、被測定物が放射する成分だけではない。その様子を表したのがFig.6である。

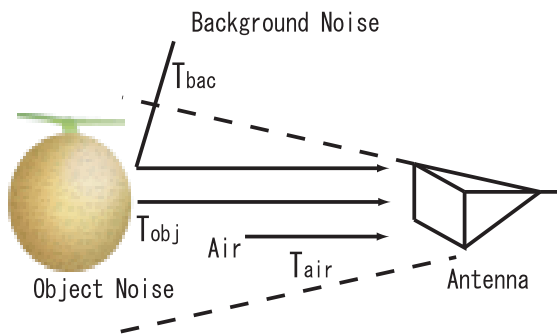


Fig. 6 Thermal noise entering an antenna.

被測定物体が放射する熱雑音  $T_{obj}$  および周辺物体からの熱雑音を含む背景放射  $T_{bac}$  がアンテナに到達する熱放射  $T'_{obj}$  である。さらに物体とアンテナの間の大気熱放射  $T_{air}$  もこれに加わるが、本測定の場合、近距離における果実の糖度測定を目的としているため、この項は省略する。物体の反射率を  $r$  とすると、被測定物体の輝度温度  $T'_{obj}$  は、背景放射が反射された  $rT_{bac}$  と物体の放射する熱雑音  $\epsilon\bar{T}_{obj}$  の和で表され、

$$\begin{aligned} T'_{obj} &= rT_{bac} + \epsilon\bar{T}_{obj} \\ &= (1 - \epsilon)T_{bac} + \epsilon\bar{T}_{obj} \end{aligned} \quad (4)$$

となる。ここで、物体の反射率  $r$ 、透過率  $t$ 、放射率  $\epsilon$  の間には、

$$1 = \epsilon + r + t \quad (5)$$

の関係があるが、ここでは、被測定物体は波長と比較して十分に厚いので、透過率  $t = 0$  とした。また、今回の測定は距離が短いので、大気中を伝搬する際の減衰はないものとする。

#### 4.2 放射率による受信信号の違い

本放射計の動作確認を兼ね、放射率の異なる物体を計測してみた。室温約 20℃ の電波暗室（熱容量が大きい）すなわち背景雑音  $T_{bac}$  が 293K の環境において、放射率  $\epsilon$  が 1 に近い電波吸収体と放射率  $\epsilon$  が 0 に近い金属板（アルミニウム）の輝度温度を測定した。結果を Fig.7 に示す。図で横軸はそれぞれの物体の（物理）温度であり、Metal1 の測定では、アンテナと物体との距離はフレネル領域より遠方、Metal2 の測定ではアンテナと物体はほぼ接触させた状態である。横軸は、アンテナを電波吸収体に接触させた場合の値で校正してある。

図に示されているように、電波吸収体の場合、輝度温度は自分自身の物理的な温度  $\bar{T}_{obj}$  と等しく、また金属板の方は自分自身の温度は殆ど関係せずにほぼ周囲環境の温度によって決まっていることがわかる。金属板を接触させたとき、測定された輝度温度の大部分は放射計の雑音によるものと考えられる。以上のことから反射のある被

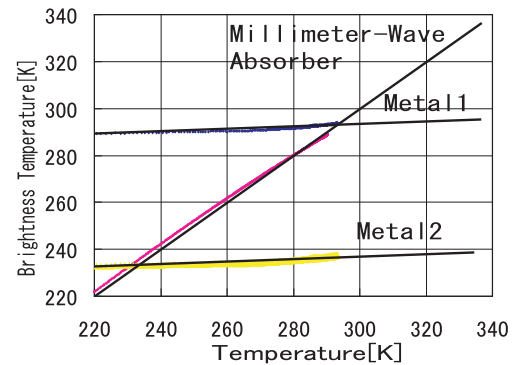


Fig. 7 Relationship between sample temperature and brightness temperature.

測定物の測定では、背景放射の影響を受けるため、濃度測定の分解能を上げ、安定した測定を可能にするためには、背景放射を一定かつ小さくする必要がありといえる。

#### 4.3 測定距離に関する検討

放射計で計測する場合、被測定物（果実）のみからの熱放射を観測するためには、アンテナと果実の距離を短くするか、アンテナの指向性を鋭くする必要がある。我々は、実用性の考慮から放射計を被測定物に近づけ測定するスタイルを想定し、測定距離に対する条件を求めた。実験では被測定物とアンテナとの距離を 0.1mm ステップで変化させ、放射計の出力変化をプロットした。被測定物は 500mm × 500mm のアルミ板と電波吸収体である。結果を Fig.8 に示す。電波吸収体を測定した結果が距離に対して一定であるのに対し、反射率の高いアルミ板を測定した場合には、出力は距離に対して振動的に変化することがわかる。これは、被測定物とミリ波放射計の距離が近い状態、すなわちフレネル領域では、マルチパスによる干渉効果が現れるためと考えられる。これは、熱放射はインコヒーレントではあるが、帯域が有限のためであると考えられ、実際ピークの間隔は、増幅器の中心周波数である 35GHz の約半波長程度となっている。この結果から、測定に際しては、各々の試料との距離を同じにするために、アンテナを各試料に接触させて測定を行う必要があることがわかった。また、接触測定にすることにより背景放射の影響を小さくすることもできる。

## 5. 結 言

ミリ波帯熱雑音測定用放射計として、ディック型放射計を作製し、装置特性の測定・評価を行った。また、背景放射が測定結果に及ぼす影響を確認した結果、背景放射の変動による測定結果への影響を抑え再現性の高い測定を行うためには、アンテナを被測定物に接触させて測定を行うことが必要であることがわかった。今後の課題

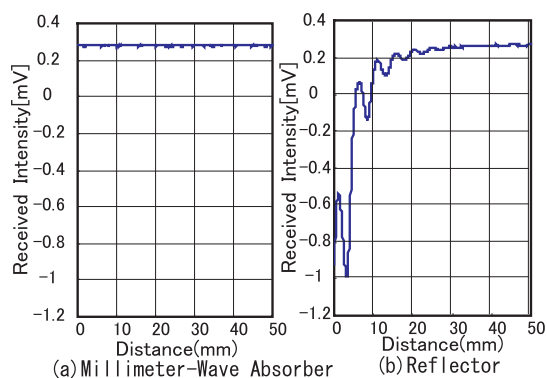


Fig. 8 Effect of measurement distance.

としては、接触測定に適したアンテナの開発が挙げられる。アンテナ開発の後には、ショ糖水溶液や果実を使った検証実験を行っていく予定である。本研究で提案したミリ波放射計を用いたパッシブ測定方法では、果実の糖度以外にも非常に広範な領域における非破壊成分定量分析を実現できると考えられるため、果実糖度以外の対象も検討していく予定である。

## 謝辞

測定方法の開発に関して多大なる助言と議論を頂きました九州大学近木祐一郎特任助教、東北大学電気通信研究所我妻壽彦技術専門官、宮崎県工業技術センターの古川直光客員研究員、室屋秀峰技師、江藤誠彦技師、実験装置の試作および評価にご協力を頂きました旭化成テクノシステム（株）の研究メンバーの皆様に感謝いたします。本研究は、平成 16、17 年度地域新生コンソーシアム研究開発事業の一環として、九州経済産業省から委託を受けた（財）九州産業技術センターから再委託された研究開発事業「ミリ波による果実の糖度測定装置の開発」として実施したものであり、関係各位に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) S.Kawano, H.Watanabe and M.Iwamoto, J.Japan Soc.Hort.Sci., 61(2), pp.445-451(1992).
- 2) S.Kawano, T.Fujiwara and M.Iwamoto, J.Japan Soc.Hort.Sci., 62(2), pp.465-470(1993).
- 3) 水野皓司, 2007 Microwave Workshop and Exhibition, WS01-01(2007).
- 4) 中野洋, 井上武海, 加藤吉彦, 電学論 (C), vol.120-C, No.11, pp.1609-1614(2000).
- 5) 水野皓司, 電子情報通信学会誌, vol.191, No.12, pp.1047-1053(2008).