平成15年度

食品中の異物混入に関するミリ波検査システムの開発

北條仁士・*間瀬 淳

(筑波大学大学院数理物質科学研究科,*九州大学産学連携センター)

1. はじめに

法人化された大学においては大学での研究成果 の社会への還元が、重要な課題となりつつある。 我々の主専門はマイクロ波・ミリ波を利用したプ ラズマ計測等のプラズマ理工学であるが,産学連 携研究推進の立場から、これまでのプラズマ計測 技術を応用したミリ波帯電磁波を用いた非破壊検 査システムや食品中の異物混入に関するミリ波検 査システムの開発に関する実験及びシミュレーシ ョン研究をここ数年来進めてきた。現在物体内部 を検査するシステムとして透過性に優れたX線を 利用した検査装置が非常に良く知られているが、 エネルギーが高いために数ミリ程度以下の微小物 体を見分けることがむしろ困難となっていると考 えられる。本研究では,50-100GHz領域のミリ 波を用い,食品を想定した被検査物体からの散乱 波の電場信号を測定して解析することにより,物 体内部を非接触・非破壊で評価する装置を開発す ることを目的としている。

次節では,食品等の異物混入検査に関する計算 機によるシミュレーション解析について報告し, 被検査体中の異物の有無に対する判定基準や指標 について議論する。また第3節では,ミリ波を用 いた異物混入検査に関する実験について報告し, ニューラルネットワーク信号解析法を適用して, 異物の大きさは大体入射電磁波の波長の2分の1 程度まで推定可能であることを検証した。 2. 異物混入検査に関するシミュレーション解析^{1,4)}

この節では,食品中の異物混入検査に関する計 算機シミュレーション解析について述べる。食品 中の異物は検査のために照射する電磁波を散乱さ せる微小散乱体であり,この異物による電磁波の 散乱波の影響を詳細に解析することによって異物 混入の有無を判定する基準や指標を見出すことが 可能となる。これから、食品等の被検査物体への ミリ波帯の電磁波照射によって,被検査物体中に 微小散乱体としての異物がある場合と無い場合と では電磁波の散乱現象にどのような相違が現れる かを計算機シミュレーションによって明らかにす る必要がある。この相違を詳細に解析することに よって,被検査物体中に異物が有るか無いかを判 定する基準や指標を見いだすことを目指す。ここ で照射に用いる50 - 100GHz領域の電磁波の波長 はミリ単位を想定している異物のサイズと同程度 であり,このような場合の電磁波の散乱現象はミ - 散乱と呼ばれ, 近年多くの関心が持たれてい る。ちなみに,電磁波の波長が散乱体のサイズよ り十分に長い場合の電磁波散乱はレイリー散乱と 呼ばれ、電磁波の波長が散乱体のサイズより十分 に短い場合の電磁波散乱は幾何光学散乱と呼ばれ ている。

計算機シミュレーションのために用いる基礎方 程式は,媒質や物体中での電磁波の伝搬を記述す るマクスウェル方程式であり,電磁波を表す電場 Eと磁場Hは

$$\boldsymbol{H} = - \frac{1}{\mu} \times \boldsymbol{E}$$
(1)

$$E = - \frac{1}{t} (\times H - E)$$
 (2)

で記述される。ここで, µ は透磁率, 」は比誘電 率の実部, 。は真空の誘電率, は電気伝導率で ある。電磁波の周波数を とすると,誘電率 は

= ((, + ,)) = ((, + i)), (3)

で表現され,比誘電率の虚部、と電気伝導率の 間には = (。)の関係がある。空気中では 真空中の誘電率と透磁率の値:µ=µ₀, = ₀を 仮定する。またここでは,被検査物体や異物とし ての微小散乱体はその誘電率 のみで特徴付けら れ,物体の透磁率は真空の値µ=µ₀で与えられる と仮定する。マクスウェル方程式の数値計算は, 良く知られた時間領域差分(FDTD)法を用いて, 2次元のx-z面内で行う。マクスウェル方程式の 2次元FDTDシミュレーションによる,被検査物 体へ電磁波を照射した場合の電磁波の散乱波形に 関する計算結果の一例を図1に示す。シミュレー ション領域は長方形であり、中央付近に置かれた 被検査物体に対して下側境界(x=0)から電磁波 を照射する。他の3辺の境界に対しては,電磁波 が外へ逃げていくというMurの2次の吸収境界条

件を課している。
 x = 0の境界で入射する電磁波

の波形は

$$E\left(z,t\right) = \exp\left[-\left(\frac{z-z_0}{L}\right)^2\right]\sin(t) \quad (4)$$

で与える。ここで, は照射電磁波の周波数で, *L*はビーム幅を与えている。ここでは, /2 = 70GHz, *L* = 3 cmを仮定している。中に置かれた 円形で示された被検査物体の半径は4cmであり, 図1において左図は異物が無い場合の電磁波の散 乱波形(電場の絶対値の強度分布を表示)のスナ ップショットであり,右図は中心に直径2.6mmの 円形異物がある場合の散乱波形のスナップショッ トである。ここで,被検査物体の誘電率は均一で ,=1.5を,また異物としての微小散乱体の誘電率 は ,=10+10 iを仮定している。異物がない場合, 誘電体のレンズ効果により照射電磁波の収束現象 がみられるが,電磁波は殆ど前方に散乱される透 過波であることが分かる。一方中心に置かれた異 物がある場合、この異物によって照射電磁波が四 方に散乱されている様子がこの右図から分かる。 右図において,円の中心の白抜けの部分が散乱の 中心である異物に対応している。

異物により生ずる散乱波の影響を定量的に解析 するために,散乱された電磁波の散乱角依存性を 調べる。図2は,散乱波の電場信号の散乱角依存



図1 異物有り(右図)無し(左図)に対する電磁波散乱のシミュレーションにおける電場強度のスナップショット。円形が被検査物体の大きさを示し,右図の円中心にある白点が異物に対応する。



図2 散乱波の電場信号の散乱角依存性。実線が異物有りで,波線が無しの場合である。 =0度が電磁波の直進方向に対応する。



図3 散乱波の電場信号に対する自己相関関数。波線が異物無しで,実線と一点波線が異物有りの場合である。

性を示したものである。これはある時刻でのスナ ップショットではなく,ある時間幅で調べた各散 乱角での散乱波電場の最大値をプロットしたもの である。図において = 0 度が照射電磁波の直進 方向であり,前方散乱に対応している。図中の波 線が異物無しの場合,また実線が異物(半径:2) mm,誘電率: ,=10+10i)有りの場合に対応し ている。異物無しの場合,図1に対応して殆どが 前方散乱波(透過波)であることが分かる。また 大きな散乱角で見られる電場信号は入射波が被検 査物体の表面を回り込んで透過したものであると 考えられる。これに対して異物がある場合には、 異物による散乱波と考えられる電場信号が広い散 乱角にわたって観測されていることが分かる。ま た,異物による遮蔽効果により前方散乱波の電場 信号が小さくなっていることも分かる。ここで、

異物による散乱波の影響を解析するために,この 散乱波の電場信号に関して

$$C() = \frac{1}{2} \int_{0}^{1} E(x) E(x + x) dx \qquad (4)$$

で定義される自己相関関数を計算してみる。この 計算結果を図3に示す。図において,波線が異物 無しの場合で,一点波線と実線がそれぞれ半径2 mmと4mmの異物(誘電率:,=10+10i)が有 る場合に対応している。 = 0度の原点近傍を除 いた殆どの角度領域において,自己相関関数は異 物が無い場合より有る場合の方がより大きな値を 有していることが分かる。さらに異物のサイズが 大きくなるに従って,自己相関関数の値もより大 きくなることが分かる。これから,電磁波の散乱 波の電場信号に対する自己相関関数は,被検査物 体中の異物の有無を判定する1つの重要な指標と なり得ると考えられる。

以下では,異物の有無を判定するより具体的な 基準や指標について考察する。図4は,散乱波の 電場信号 E()をフーリエ変換して,そのフーリ エスペクトルの原点での値(0)を円形異物の半 径 の関数としてプロットしたものである。異物 による影響を正確に見るために,フーリエスペク トルの原点値& 0)は異物が無い場合の値でもっ て規格化している。FDTDシミュレーションは、 照射電磁波の周波数が40GHz(黒四角 で表示), 70GHz (黒丸 で表示), 120GHz (黒三角 で表 示)の3通りで行った。図から明らかなように, フーリエスペクトルの原点値 《0) は異物のサイ ズの単調増加関数になっていることが分かる。ま た照射する電磁波の周波数が高くなるに従って、 《 0)の異物の有無での信号比(即ち,検出感度) が大きくなることも分かった。これは周波数が高 くなると電磁波の波長が短くなるため,散乱断面 積が増大して,異物による散乱波の影響がより出 やすくなるためと考えられる。図には表示してい ないが,円形状の異物だけでなく,方形状の異物 についても同様にシミュレーションを行った。こ の場合,方形の一辺の長さを円の直径に対応させ



図4 散乱波の電場信号のフーリエスペクトルの原点値ℰ(0)の異物半径依存性(値は異物無しの場合の ℰ(0)で規格化)。用いた周波数は40GHz(),70GHz(),120GHz()の3通りである。

ると,方形状異物に対するシミュレーション結果 は円形状異物に対するシミュレーション結果とほ ぼ一致することが分かった。さらに図における白 四角 と白丸 の表示は,異物が被検査物体の中 心からそれぞれ5mmと10mmだけ外れている場 合の計算結果であり,この場合の散乱波の電場信 号政)は後述の実験に対応して被検査物体を 360度回転させて平均化した電場信号をフーリエ スペクトルの計算に用いている。図から明らかな ように,計算結果は異物が中心に有ると仮定した 場合の計算結果と大体一致している。これから、 異物が被検査物体の中心にない場合でも, 被検査 物体を360度回転させて計測することにより,異 物が被検査物体の中心に有る場合と同様に異物の 大きさを大体評価できることが分かる。

次に,先に議論した自己相関関数を利用した, 異物の有無を判定する基準や指標について考察す る。図5は,(4)式で定義された自己相関関数をフ ーリエ変換であるパワースペクトル密度の原点で の値 & 0)を異物の半径の関数としてプロット したものである。前の図4と同様に,異物が無い 場合の値でもって規格化してあり,用いた周波数 は40GHz(で表示),70GHz(で表示),120GHz



図5 散乱波の電場信号のパワースペクトル密度の原点値S(0)の
 異物半径依存性(値は異物無しの場合のS(0)で規格化)。用
 いた周波数は40GHz(),70GHz(),120GHz()の3
 通りである。

で表示)の3通りである。電場信号のフーリ (エスペクトルの原点値 & 0)と同様に,パワース ペクトル密度の原点値 S(0)も異物のサイズの単 調増加関数になっていることが分かる。また電磁 波の周波数が高くなるに従って,異物の有無での S(0)の信号比も同様に大きくなることも分かっ た。図における白四角 と白丸 の表示は,前の 図4と同様に,異物が被検査物体の中心からそれ ぞれ5mmと10mmだけ外れている場合の計算結 果であり,この場合も被検査物体を360度回転さ せて平均化した電場信号を用いて自己相関関数の 計算を行っている。これらの計算結果も異物が中 心に有ると仮定した場合の計算結果と大体一致し ていることは図から明らかである。従ってこの判 定においても,被検査物体を360度回転させて計 測することにより,異物が被検査物体の中心から 外れている場合でも,異物が被検査物体の中心に 有る場合と同様に異物の大きさを大体評価できる ことが分かった。

ここで議論した被検査物体中の異物の有無を判 定する2つの指標は、ともに異物のサイズの単調 増加関数であり、これから異物の有無を判定する 数値基準として利用できる。また、これら2つの 判定基準や指標を組み合わせて利用することによ り、異物の有無に関するより精度の高い判定基準 や指標を構築することが可能になると考えられ る。以上述べたように、被検査物体にミリ波帯の 電磁波を照射し、その散乱波の電場信号やその自 己相関関数を詳細に解析することによって、被検 査体中の異物の有無を判定することは可能である と結論付けられる。

3. 異物混入検査に関する実験

この節では, 食品中等に混入しているかも知れ ない異物を検出する電磁波を用いた検査システム の構築とそれによる検査実験について紹介する。 検査実験においても,用いる電磁波は50-100GHz領域のミリ波であり,食品中の異物のサ イズも電磁波の波長と同程度の数mmの大きさの 異物を想定している。従って,被検査物体への電 磁波照射による検査実験においても,微小異物に よる電磁波の散乱現象は前節と同様にミー散乱領 域にある。

先ず,ミリ波を用いた異物混入検査に関する実 験システムについて述べる。図6にこの異物混入 検査の実験装置の概略図を示す。70GHz,50mW 発振器出力の電磁波は、コルゲートホーンと誘電 体レンズの組合せにより8mm×40mmのシート 状ビームに整形されて,被検査物体に照射され る。照射された電磁波の透過波および散乱波は, 誘電体レンズを取付けた同一コルゲートホーンに より受信され, ヘテロダイン検波器により2-8 GHzの中間周波数信号となり,フィルターを通り マイクロ波アンプで増幅された後自乗検波され る。本実験装置では,散乱角を±90度の範囲で測 定することが可能で,また被検査物体も360度回 転可能なシステムを製作した。ここでは、カップ 麺の容器にグラニュー糖を入れたものを測定のた めの被検査物体として用い,異物としては直径1 - 10mmの金属球を混入させている。

受信した散乱波の電場信号の信号処理に、ここ



図6 異物混入検査のための実験装置。散乱波は±90度の範囲で測 定可能であり,また被検査物体も360度回転できる。

ではニューラルネットワークを用いる。先ず測定 したデータを対数値に直し,パワースペクトル密 度などの数値処理を行った後,ニューラルネット ワークを用いてそのパラメータ値を解析し,異物 の有無ならびにその大きさを判別する。ニューラ ルネットワーク解析を適用するにあたり,ネット ワークが判断する上でパラメータが必要になる が,今回はそのパラメータとして

測定電圧のパワースペクトル値の合計

測定電圧の対数値の合計

測定電圧の対数値の標準偏差

測定電圧の対数値の割合密度アスペクト比 の4点をネットワークに渡す。これを基にニュー ラルネットワークにおいてよく用いられる,階層 型のバックプロパゲーション法を使いシミュレー ションを行う。また,ニューラルネットワークに とってパラメータの数が多すぎると計算に時間が かかり,かえって的確な判断が下せない場合があ る。よって,ニューラルネットワーク計算をする にあたり,散乱角+20度と+40度における上記の パラメータを用いる。学習するべきデータ集合の 中からいくつかのサンプルを選び訓練課題セット としてニューラルネットワークに学習させる。こ のとき学習させた学習課題セット以外のデータを テスト課題として選び,このテスト課題の成績を 調べる事で学習したルールの一般化能力を見る。

図6で示した装置で測定し,得られたデータを 実測値の対数で表示した。図7にグラニュー糖に 金属球の異物を混入したときの透過波・散乱波を 示す。図において,グラフの縦軸は被検査物体を 回転した時の角度(全360度)であり,横軸は受信 ホーンの方向,すなわち散乱角を±90度の範囲で 変化させた場合を表している。図の濃淡は電場信 号強度の対数プロットとなっている。この結果か



図7 グラニュー糖内に金属異物を混入したときの透過・散乱波の電場信号強度(左上:異物無し,右上:1mm,左下:3mm,右下:5 mm)

ら,異物が無い場合においては散乱波が小さいた め受信信号が透過波に対応する0度付近に集中し ているのに対し,異物がある場合では広い散乱角 にわたって散乱波の信号が認められる。測定よ り,直径10mm~2mmの金属球を挿入した場合 は異物無しの場合と比べ違いは明らかであった が,直径1mmの金属球になるとデータからの判 別は困難であった。これは電磁波の波長が約 4.3mmであるため,波長の約2分の1以上に相当 する2mm球まではその散乱強度は十分である が,それ以下になると散乱断面積が小さくなり, 散乱強度も小さくなるためと考えられる。

異物として金属球の代わりにプラスチック球を 用いた検査実験も行ったが,金属球の場合と大体 同様な結果が得られた。また,散乱波の電場信号 の測定された散乱角分布から自己相関関数の計算 も行い,前節のシミュレーション解析結果に類似 する分布が得られることを確認した。

グラニュー糖を被検査物として直径1-10mm の金属球異物をそれぞれ挿入し,ニューラルネッ トワークにより判別した結果を図8に示す。図に

おいて,Outputはニューラルネットが推定した異 物の大きさを示し,Testはランダムに選んだパラ メータのうち,訓練には用いないテスト課題であ る。Targetは異物の実際の大きさを示す。これ から,訓練課題セットでは比較的正解を得ること ができるが,テスト課題では誤差が目立つ。これ は学習が進行しすぎるとしばしば観察される現象 で,過剰な学習がなされた事により未知のデータ に対する予測の精度が悪化したと考えられる。し かし,異物の大きさが2-10mmの時はその判定 がほぼ100%に近い確率で可能であること,また 大きさが1mmの異物では~50%で誤った判定を 下すことが分かった。なお異物の大きさが時によ り負値を示す事があるが,これはネットワークの 層に用いる伝達関数に出力が - 1から + 1の正接 シグモイド伝達関数そして同じく線形伝達関数を 用いていることによっている。

結論として,異物の判定にニューラルネットワ ークを使用した結果,異物の直径が2-10mmの 場合にはほぼ100%正しい判別を示す事が分かっ た。しかし,異物の直径が1mmの時にはその認



図8 ニューラルネットワークによる異物の大きさの解析結果。Outputはニューラルネットによる推定値,Testは訓練には用いないテスト 課題,またTargetは実際の大きさを示す。

識率は下がった。また,訓練課題セットでは比較 的正解を得ることができたが,テスト課題では誤 差が目立った。これは過学習によるものと考えら れる。今後はさらに異物の検出感度を上げるため に,ニューラルネットワークにおける誤差を小さ くする必要がある。この誤差の一因である過学習 の対策としては,適度な学習回数を設定する事が 有用だと考えられる。またニューラルネットワー クに渡す適切なパラメータの選出も誤差を減少さ せる上で重要である。本研究の結果より,ミリ波 の波長をさらに小さく(波長2mm程度)する事 により,1mm以下の異物検出も可能となること が期待される。

謝 辞

本研究は,浦上食品・食文化振興財団の研究助 成「食品中の異物混入に関するミリ波検査システ ムの開発」による支援に基づいており,この場を 借りて厚くお礼申し上げる。また研究の一部は, 文部科学省の科学技術振興調整費:産官学共同研 究の効果的な推進に関するプログラム「新方式の マイクロ波プロフィールメータの開発」による支 援も受けました。研究の遂行に当たっては,実際 に実験を担当した九州大学・大学院生であった西 依幸一郎氏,また九州大学・現大学院生の岩田武 徳氏,及び計算機シミュレーションを担当した筑 波大学・大学院生であった内田直人氏のご努力に 負うところが大きく,この場を借りて彼らのご尽 力に感謝の意を表したい。

文 献

- 1) 北條仁士,西依幸一郎,近木祐一郎,L.Bruskin,間瀬 淳,ミリ波非破壊検査システムの開発とシミュレーション研究,超高速高周波エレクトロニクス実装研究会論文集 (エレクトロニクス実装学会) Vol.4, No.1, 1-6 (2004).
- 2) 西依幸一郎,間瀬 淳,L. Bruskin,北條仁士,井手元
 浩,坂本 剛,ミリ波を用いた非破壊検査システムの研究
 ,電子情報通信学会・総合大会講演論文集,C-2-136(東京工業大学,2004).
- 3) 西依幸一郎,間瀬 淳,L. Bruskin,北條仁士,ミリ波 を用いた非破壊検査システムの研究 ,電子情報通信学会・ 総合大会講演論文集, C-2-119(大阪大学,2005).
- 4) 北條仁士,内田直人,西依幸一郎,間瀬 淳,ミリ波非 破壊検査技術の開発とシミュレーション研究,電気学会・プ ラズマ研究会論文PST-05-45(2005).
- 5) 岩田武徳,間瀬 淳,北條仁士,ミリ波を用いた異物検 査システムの研究,電子情報通信学会・九州支部学生講演 会, C-2(宮崎大学,2006).

Development of Millimeter-Wave Detecting System for Foreign Object Mixing in Food

Hitoshi Hojo and *Atsushi Mase

(Plasma Research Center, University of Tsukuba and *Art, Science and Technology Center for Cooperative Research, Kyushu University)

We report the development of millimeter-wave detecting system for foreign object mixing in food. We here show computer simulations and related experiments on the detection of a foreign object mixed in food with use of millimeter waves in the range of 50-100GHz.

In computer simulations, we have solved full-wave Maxwell equations describing millimeter-wave propagation and its scattering by a foreign object. The numerical scheme is based on the well-known finite difference time domain scheme, and the simulations were done in two-dimensional space. The optical property of matter is generally characterized by the complex permittivity, and since a foreign object has a complex permittivity different from a sample to be inspected, wave scattering due to the foreign object is caused. As we are interested in a foreign object of millimeter size, wave scattering lies in the Mie scattering regime. The simulation results show that forward scattering expressing penetrating waves mainly occurs if there is no foreign object, while forward scattering is reduced and side scattering by a foreign object increases when there is the foreign object in a sample. This feature is clearly shown in the scattering-angle dependence of the scattered waves. We introduce the auto correlation function of scattered electric-field signals being a function of scattering angle in order to distinguish a foreign object in a sample, and we compute the Fourier spectra of the auto correlation function as well as the scattered electric field. We then find that the values of these Fourier spectra at the origin are increasing functions of the size of a foreign object. From the simulation results, we can expect that these findings bring us good criteria to distinguish a foreign object in food.

In experiments, we have developed a millimeter-wave detecting system for a foreign object mixed in a sample. We have done the experiments with use of millimeter wave of 70GHz. We use granulated sugar filled in a polystyrene foam-made cup as a sample to be inspected and assume an iron or plastic ball of the size of 1-10mm in diameter as a foreign object. In the irradiation of probing millimeter wave into a sample, we could observe the scattered-wave signals clearly for the ball of the size of 2-10mm. However, it was difficult to distinguish clearly the ball of the size of 1mm, which was shorter than the half wavelength of

the millimeter wave. Using the method of neural network, we estimated the size of the ball in a sample, and confirmed that the ball of the size of 2-10mm in diameter could be distinguished almost perfectly, and that the distinction for the ball of the size of less than 1mm was poor. However, we expect that the use of millimeter-waves of the shorter wavelength will make it possible to detect a foreign object of the size of less than 1mm.