大豆の吸水におけるある問題(2)

長期保存大豆の内容物漏出, 吸水不良及び膨潤不良の解決

小泉美香・五十部誠一郎・内藤成弘
石田信昭・菊地 郁*・狩野広美**

前編において、貯蔵大豆の水分含量と浸漬障害についての生化学的解析を基に、大豆の水分含量を13~17%に保持した時、生物活性は非常に低く抑制されているが、種子は好適な条件を与えられれば生命活動を開始する準備が整っており、また、急激な浸水に際しても種皮や細胞膜が重大な損傷を受けにくい状態となることを考察した。後編ではあらたな研究結果を加えて、豆の水分含量が13~17%となるとどのようなメカニズムで浸漬障害が抑制されるのかという課題について分子レベルの考察を行う。さらに、大豆の種皮が浸漬障害回避に対してどのような役割を果たすか、貯蔵中に劣化が起りやすい種皮の性質をどのように制御し、吸水過程を改善できるかという課題について考察する。

6. 浸漬障害と MRI

(1) 浸漬障害を受けた発芽大豆の MRI のイメージ

ここでは、乾燥した豆に急激に水を吸収させるとどのようなメカニズムで浸漬障害が起きるか、また、空中から緩慢に吸水させた場合に10~20%の水分領域における生体物質の水和がどのような生理的意味を持ち、どうして浸漬障害回避につながるかということを考察する。

収穫直後の健全な大豆と、長期保存で乾燥した大豆を5分浸漬したものを、少量の水で湿らせた濾紙で24時間吸水させた後にMRIのイメージを測定した

(第11a図)。このイメージの測定法は通常の方法とは異なり、貯蔵物質に吸着されて運動性を束縛された水が存在する部位を強く表すように測定されている。すなわち、イメージの白いシグナルは束縛された水の分布を示している。健全な大豆では、子葉全体にシグナルはほぼ均一であった(第11a図左)が、乾燥した大豆では、束縛された水を含む部位が局所的に網目のように存在していた(第11a図右)。急激な吸水によって子葉組織が損傷を受け、そこから取り込まれた水が貯蔵物質に吸着して運動性を制限されているものと考えられる。

さらに、長期乾燥保存をした大豆を注意して少量の水で湿らせた濾紙で発芽させた場合と、濾紙上に水が認められるほど過湿にして発芽させた場合を比較した¹³⁾。これは空気中から吸水させる操作と水に浸漬する操作の差を小さくしたモデル実験である。第11b図は、吸水開始後20日経って胚軸が伸長を始めた時期の大豆子葉のMRIのイメージである。イメージ測定には全自由水を検出する方法が採用されている。注意して湿らせた濾紙の上で正常に発芽した大豆の子葉には葉脈構造が見えてくる(第11b図左)。一方、過湿にした状態で発芽させた豆は外見的には生長が遅れるように見えるだけであるが、MRIのイメージでは子葉にシグナルの強いところと弱いところがモザイク状に存在し、それに加えて横向きの亀裂が認められた(第11b図右)。自由水に基づくMRIのシグナル強度

A Solution for the Imbibitional Problems of Leguminous Seeds ; the Leakage of Accumulated Substances, Inadequate Water Uptake and Reduced Swelling of Long Stored Soybeans

Mika KOIZUMI, Seiichiro ISOBE, Shigehiro NAITO, Nobuaki ISHIDA, Kaori KIKUCHI* and Hiromi KANO**

(National Food Research Institute, * National Institute of Vegetable and Tea Science, ** Oak-Hill Georgic Patch-Work Laboratory)

第 11 図 浸漬障害を受けた大豆の子葉の MRI イメージ

(a) 健全な大豆 (左) と 5 分浸漬した乾燥大豆 (右) を、少量の水で湿らせた濾紙で緩やかに 24 時間吸水させた子葉のイメージ。

MRI イメージは Bruker DRX 300 NMR スペクトロメーターのイメージング装置を用いてスピンエコー 2D-FT 法によって測定した。T₁ 強調法によって測定され、束縛された水が存在する部位を浮き上がらせたイメージである。

(b) 正常に発芽した大豆 (左) と浸漬障害を受けた大豆 (右) の吸水開始後 20 日目の子葉のイメージ。(註 日本農芸化学会の許可を得て Ishida *et al.*, *Agric. Biol. Chem.*, **54**, 1359-1365, 1990 より転載)

MRI のイメージは JEOL 270 NMR スペクトロメーターのイメージング装置を用いて、スピンエコー 2D-FT 法で測定した。全自由水を検出できる方法で測定したイメージであり、シグナルは自由水量を表し代謝活性と定性的関係にある。

と組織の生物活性が相関することは多くの研究で認められる^{25,29,30)} ことから、シグナルが強いところは細胞の代謝が活発になったことを、シグナルが弱いところは代謝活性が低く生命活動を復活することができなかったことを示している。このような状態は程度の軽い石豆様症状である (種皮の性質の変化によって起こる吸水不良を石豆という。上記の生物活性の損傷による膨潤不良とは異なり、種皮の変性による石豆の場合は種皮に傷をつけると膨らむとされている)。

初期吸水 (大豆では 2 時間くらい) を過ぎると子葉への給水は胚軸によって生物的にコントロールされ¹⁰⁾、水は維管束及び原形質連絡など生物的機能によって子葉に運ばれ、システマティックに分配される。従って、吸水の初期に子葉の組織に亀裂が入り隣接する細胞間に断絶ができて胚軸との連絡が切れると、生物的な水の移動と物質の輸送ができなくなり有機的総体としての子葉組織の復活ができなくなる。生命活動を回復できなかった細胞では、水は貯蔵物質である澱粉やタンパク質を膨らませるだけで細胞の生物活性が無いので液胞が発達しない。また、膜が生物的な伸長、肥大をしないので子葉は十分には膨らまないだけでなく、澱粉や貯蔵タンパク質も生物的な反応なしでは分子間結合を解除できないので、一定以上には膨らまない。膨潤の不良であり、見かけ上の石豆様吸水不良となる。これは、乾燥した豆をいきなり水に浸漬した時、低い水分含量で水の緩和時間が長くなること (第 9 図)、そして、水分含量が 20% を超えても ¹H-NMR の測定で自由水が増加しないこと (第 7 図) と同じ意味である。

液胞や小胞に貯蔵された高分子化合物は生物的反応によって立体的構造を転換され、多量の水を保有して可溶化し易い状態になり、細胞質で低分子へ異化されて生長部位へと輸送される。しかし障害を受けた部位では細胞が活性化されず、生長部位に物質輸送が行われないで貯蔵物質は膨潤した状態のままで細胞内に留まる。そのために、使われないで残された高分子化合物が詰まった部位がモザイク状に存在するが、その部位は貯蔵物質が十分に水を保持できない上、液胞が発達しないので自由水の量が少なくイメージのシグナルが弱い部分として出現する。

種子の細胞膜を損傷すると吸収した水が束縛された水になることは、アサガオの種子に電場を作用させた研究で示されている³¹⁾。500 kV/m の電場を 1 時間作用させるとアサガオの発芽率は約 50% にまで低下し、緩和時間が短い束縛された水の成分が増加して水は移動性を失う。MRI のシグナルは発芽率よりも電場の影響を鋭敏に受け、電場の強さによってシグナルが低下して 400 kV/m においてシグナルが極めて弱くなった。電場の作用によって種皮だけでなく折り畳まれた子葉の膜が破壊され、吸収された水が子葉の貯蔵物質に取り込まれたためである。上で述べた浸漬障害を受

けた発芽大豆の子葉のモザイクにおける暗い部分と同じである。

(2) 豆の細胞膜の乾燥による機能停止と水和による機能回復のメカニズム

このようなことが起こるのは、乾燥して浸漬障害が出るようになった豆では種皮に細孔隙が開き、また、皺が寄り褻の組織が弱くなったり亀裂ができ^{28,32)}、そこから水が浸入して異常な急速吸水が起り、乾燥した生体膜の緩やかな水和による機能回復ができないためであると考えられている。生体膜は乾燥すると脂質分子の配置が不揃いになり³³⁾、細胞及び細胞小器官の膜に孔が開く⁴⁾ (第12図)。この生体膜の穴は緩慢な水和によって膜構成物質及び脂質側鎖の間に水分子が割り込み膨潤して脂質膜の空間構造を回復することによって閉じられ、膜が選択的透過性の機能を獲得することによってその後の水の無秩序な浸入を制御する。

乾燥した生体膜の機能回復のメカニズムは第13図のように考えられる。強く(10%近くまで)乾燥した細胞膜は水を失って水分子程度の分子やイオンを容易に通すことができる穴が開いている³³⁾。これは、膜がリン脂質でできているためである。膜はグリセリドに結合したリン酸基に親水性アルコールが結合して構成されている。親水性リン酸基を持つグリセリドが、親水基を水相に向けて整列する。この際に、サイズが大

きい親水基で構成される脂質の頭が互いに接合して、膜の脂肪酸の側鎖間に、水分子に比較すると広い構造的空間ができる。脂肪酸の側鎖同士は所々でイオン結合、水素結合、または、リン酸で結合されているが、残りの親水面付近の空間は水分子によって埋められ、小さな水分子が揺動するので柔軟性を有する。また、機能している膜の脂肪酸の側鎖は互いに絡み合い疎水層を形成し、不規則な擦動をするとされている。

乾燥して脂肪酸と脂肪酸の間の水分子が抜けると脂肪酸の側鎖同士だけが接合して膜には所々に大きな孔が開く⁴⁾ (第13a図、乾燥膜)。正常な種子では、吸水した時に緩慢な水和によって、膜の脂質及び膜タンパク質の周辺に水分子がおだやかに吸着し膜が膨潤して孔を閉じる (第13b図、水和した膜)。ゆっくり水和するので吸水面に近い吸着エネルギーが高い膜化合物が先に水和する。結合エネルギーに制御されながら順番に水和して構造が回復することによって、膜タンパク質が基質との相互作用ができる状態になると同時に整列した脂質の間を埋める水分子の高い結合エネルギーによって水の不透過性を獲得する。すなわち、膜機能を回復して水の動態をコントロールする。その後は、選択透過膜で構成された小胞によって高分子貯蔵物質は隔離され、水が高分子化合物と直接接触しないために膜の水和に使われなかった余剰の水が細胞に自

第12図 乾燥膜及び水和膜の電子顕微鏡写真

(a) 不連続な乾燥膜、(b) 膜の見えない部分や三重膜(矢印)がある乾燥膜、(c) 滑らかな水和した膜。L、脂肪球；W、細胞壁。(The Botanical Society of Americaの許可を得て Webster and Leopold, *Amer. J. Bot.*, 64, 1286-1293, 1977 より転載)

第 13 図 水和した生体膜と乾燥した生体膜のモデル

太線グレーはタンパク質のペプチド鎖を示す。丸い頭を付けた二本の足があるものは生体膜を構成するリン脂質分子、小さなV字型は水分子を表す。

(a) 乾燥した膜構造。乾燥により、リン脂質の空隙を充填していた水分子が失われ、脂質の足は互いに接近して糖リン酸の頭（丸）の面積を埋めきれない分だけ膜の内外を貫通する孔が開く。そこを小さな水分子が通ることができる。一方、タンパク質分子内の水は除去されにくい。

(b) 水和した膜構造。水和した水分子は高い吸着（結合）エネルギーを持つが、強い乾燥で一旦失われると、穏やかな水で吸着エネルギーに制御されることにより、均一に膜内の空間に再配置される。水和した脂質の間に小さな水分子が挟まって親水面を構成し、膜の内側の脂質の足は不規則な構造を取り、制約された運動をされると考えられている。膜は水分子の充填により水の不透性、物質の選択透過性、輸送性を、また、脂質の足の不規則な配置により外力に対する柔軟性を得る。

由水相を生じる。

(3) 強く乾燥した豆の異常な急速吸水の場合

上に記述した正常な豆の膜機能の回復に対して、非常に強く乾燥した豆に多量の水を与えると、膜の脂質

の間が水和され膨潤して機能を回復するよりも前に、水は乾燥膜にできた孔を通過して（第 13 a 図）いきなり貯蔵澱粉やタンパク粒に到達する。自由水が増加しないのは吸収された水が貯蔵高分子化合物に直接吸

収され分子内の架橋及び分子—分子間に取り込まれゲルを形成し、多量の水分子がゲル間隙を埋めるために使われるからである。種子の貯蔵タンパク質や澱粉はセルロースゲルほど膨潤するわけではないが、吸水によって2〜3倍に膨らむことは明らかである。また、発芽において生物的に制御されながら膨らむよりも膨潤速度は数倍大きく、密なゲルの性質を有している。

このように、細孔がある乾燥膜が機能を回復する前に一時に浸入した多量の水が、無秩序に膜内の澱粉やタンパク質などの高分子貯蔵物質に到達すると、高分子貯蔵物質に急速な膨潤を誘導するという事態は、機能回復する前の伸縮性のない膜構造を膨圧によって切断し、さらに多量の水の浸入により貯蔵物質の膨潤する圧力が高まり細胞膜をマクロなレベルで破壊する。これが浸漬障害の原因とメカニズムであると考えられる。

生体膜は正常な水和が行われ機能を回復すれば強靱である。それは、水分含量を17%以上にしておくと子葉よりさらに膨張率が高い大豆の胚軸¹⁰⁾に亀裂が入らないこと⁵⁾からも明らかである。しかし、乾燥した状態では弱く、容易に破壊を受ける。また、生命活動の基本である膜機能の損傷割合が大きいと、受けた損傷をその後の生命活動の場で自己補修する機能は働かない。

7. 豆類の吸水過程と種皮の役割

(1) 豆の種皮の吸水チャンネル

豆の浸漬障害は吸水を開始して約48時間以内に起きる過程である。ここで豆類の吸水が通常はどのように起こるかということを考察する。豆の内部への急激な水の浸入を防いでいるのは種皮である³⁴⁾。吸水は、種皮上の特殊な組織を通して行われるとされているが、吸水の過程について時間間隔を短く取った詳細な変化の観察及び解析は行われていなかった。そこでMRIによって水が豆に浸入する初期過程を追跡した³⁵⁾。

MRIは水の動きを追跡するための優れた手法であるが、従来、MRIの計測では吸水初期のように水分量が非常に少ない試料のシグナルを検出することはできなかった^{36,37)}。最近、single point mapping imaging (SPI) 法³⁸⁾が開発されて40%以下の水分含量の試料のイメージを明瞭に捉えられるようになった³⁹⁾。そこで、SPI法により時間分解能15分でイメージを連続測定し、水が浸入する経路を解明した。

最初に種皮が硬く保存性の良い小豆を材料として測定した例を示す。第14図は吸水の過程を側面から見たイメージである。小豆を水に浸漬して最初の3時間程度でヘソとその下部にあるlensと呼ばれる組織に水のシグナルが認められた(第14b図)。lensは豆の吸水チャンネルである⁴⁰⁾。その後、顕著な変化は起こらなかったが、9時間を過ぎる頃から豆内部への比較

第14図 小豆の形態と吸水のMRIイメージ

小豆の縦断面の実体顕微鏡写真(a)と、吸水3時間(b)及び9時間(c)のMRIのイメージ。Bruker DRX 300 NMR スペクトロメーターのイメージング装置を使用して、single point mapping imaging (SPI) 法で測定した。吸水3時間ではヘソとlens(矢印)に強い水のシグナルが認められる。9時間になると、lensから維管束様の構造を通して水が広がっていく様子が見られる。

第 15 図 小豆の SEM 画像と MRI イメージによる lens からの吸水過程

小豆の SEM 画像 (a, 全体像 ; b, lens の拡大像) と、ヘソ側から見た吸水過程の MRI イメージ (c, 3 時間 ; d, 7 時間 ; e, 9 時間)。MRI イメージは SPI 法で測定した。矢印は lens の位置を示す。

的速い水の浸入が開始される (第 14 c 図)。水は主に種皮を通して胚軸へ向かい、少量の水が子葉に広がる。そして、胚軸が吸水して膨潤すると、続いて子葉の急速な伸長が起こった。第 15 図は lens を正面から見た MRI イメージの測定結果である。吸収された水は lens から円形を描いてヘソの両側を幼根に向かって広がった (第 15 c-e 図)。

特徴的なのは、lens に水が認められてから数時間は顕著な変化が見られず、豆の内部に水が浸入を開始するまでに長い時間がかかったことである。すなわち、水の取り込みを制御する lens の機能が回復するための水和は非常に緩慢に進行する。一度 lens 組織の機能が回復されると、水はシステマティックに比較的最早い速度で種皮、幼根及び胚軸、続いて子葉の貯蔵澱粉粒やタンパク粒などの高分子化合物に分配され、子葉の膨潤が認められる。このような lens による水の浸入の制御が貯蔵澱粉や貯蔵タンパク質の急激な膨張を抑制しているものと考えられる^{34,40)}。重要なのは、その間、種皮は頑強に水の浸入を阻止する役割をしていたことである。

(2) 大豆の種皮の健全性と子葉が受ける浸漬障害

この過程は大豆でも基本的には同じである。第 16 a 図に健全な大豆の吸水過程の MRI のイメージを示す。大豆では水は早い段階で子葉の外側に取り込まれ種皮が膨潤する。そして、種皮は 1 時間にわたって次第に厚くなるが豆の子葉のサイズは殆ど変化しない。小豆と違って浸漬によって種皮が急速に水和され、比較的早く水のシグナルが出現するので、吸水過程を明瞭に追跡することはできないが、内部への水の浸入はヘソ近傍の縫線 (lens に当たる組織) から行われると考えられる。2 時間を過ぎると豆は縦方向へ伸長を開始した。そして 5~6 時間目まで伸長が続いた後、少し伸長速度を緩めると、子葉は短軸方向に急速に膨潤して 8 時間程度で最大に達した (第 17 図)。

詳細に MRI イメージを観察すると、1 時間までの伸長は種皮の膨潤に当たり、5 時間まで緩やかに幼根及び胚軸の水和と肥大が進んだ後、急激に子葉が伸長する。すなわち、種皮が子葉への水の無作為な浸入を止め、水のチャンネルの活性化と幼根及び胚軸の水和を待って、子葉に水を配給するメカニズムが存在することが明らかである。損傷がない種皮は水の浸入を許さない^{9,32)}ので、水のチャンネルの機能回復と働きが水の浸入を制御して子葉が裂壊することを防いでいるものと考えられる。

そこで、豆の吸水における種皮の生理的役割を明確に実証するために種皮を除去した豆を用いて前述の方法で吸水の初期過程を連続的に測定した (第 16 b 図)。種皮を除去した豆では、水は子葉の裏側の表皮と同時に表側の表皮からも取り込まれた。子葉は 35 分くらいで開き始め、1 時間経つとわずかに膨潤すると同時に左側の子葉が分離して落下し、残った右側の子葉は伸長と共にバラバラになって落下した。これは、大豆の浸漬障害における子葉裂壊の人為的再現である⁷⁾。すなわち、水の無秩序な浸入を防ぐ役割を受け持つ種皮が極度の乾燥によって損傷を受けて亀裂が入り機能が不完全になるために浸漬障害が起こることを示していると考えられる。小豆は種皮が丈夫で長年の保存にも耐えられるが、大豆は種皮が乾燥によって傷つきやすい構造になっていることが長期保存が困難な理由である。

第 16 図 健全な大豆と種皮を除去した大豆の吸水過程の MRI イメージ

大豆を接着剤で棒に固定して、水を入れた試験管につり下げ、15 分間隔で SPI 法により連続測定した。健全な大豆 (a) は吸水で種皮が著しく膨潤した。一方、種皮を除去した大豆 (b) は約 1 時間で裂壊した。

第 17 図 大豆の吸水過程におけるサイズの変化

第 16 a 図の MRI データから算出した大豆の吸水過程における断面積 (●), 長軸長 (○) 及び短軸長 (▲) の変化を示す。

8. 種皮の硬化による吸水不良と対策

(1) 種皮の亀裂に対する対策

これで、最初の納豆研究者の ① 何故、豆を浸漬した時、十分に水を吸収できない豆が出るか、② 何故、しばしば浸漬液が白濁するか、③ どうしたらそのようななくなるかという疑問には回答が出たと思われる。豆は保存中に極度の乾燥に会い生体膜内の水分

子を失って膜構造に孔が開く。その状態で多量の水が来ると、水は孔を通して細胞の内側に無秩序に浸入して貯蔵高分子物質に吸収されて化合物を膨潤させる。高分子物質に吸収される水の量が多いと膨潤の程度が大きく、水の浸入を制御する生体膜が水和により機能を回復する前に、細胞膜を破壊する。さらに、ひどい時は組織に大きな亀裂、もしくは、裂壊をもたらす。その結果、①組織破壊を受けた子葉では、胚軸との連絡を絶たれて生物的な活動を失うので、貯蔵物質に吸収された以上には水が増えず、子葉細胞の生物的な肥大も起こらない、②破壊された細胞膜から細胞内の貯蔵澱粉や貯蔵タンパク質の一部が漏出する、③水に浸漬する以前に豆の含水量を穏やかに 20% 程度まで上昇させ、細胞を構成する生体膜を緩慢に水和して生理機能を潜在的に復活させておけば、細胞膜の選択透過性により無秩序な水の浸入を防御でき、浸漬障害は起こらない、という納豆の原料大豆の品質劣化及び浸漬障害、もしくは、吸水過程の問題の一部についてのメカニズムは解明できたことになる。

しかし、豆の吸水では、子葉内部で起こる本質的障害のメカニズムに到達する前に、種皮が物理的に豆への水の浸入を防御していることが多くの研究で明らかにされている^{7,9,32,34,40}。また、種皮を除去した豆を浸漬した時に、大豆やインゲンでは子葉の損壊を招くが、エンドウやラッカセイでは損壊が認められなかったというような程度の差はあるが、いずれの豆でも細胞内容物の漏出が認められ浸漬液に胚軸の酵素活性が検出される⁷⁾ので、種皮が無秩序な水の浸入に対する防止

効果を持つことは明らかである。

わが国の大豆は、育成の過程で種皮が柔らかい品種が選抜されているようである。食味においては長所であるが、長期保存する上では劣化や亀裂の発生につながる性質を保有するものと考えられる。栽培用種子の保存においては、種皮の保護技術としてグルコースコーティングが大きな成果を挙げた（吉田堯博士私信）。種皮は、吸水初期には浸漬障害を起こさないよう水の浸入の防壁になる。その上、大豆では種皮は吸水すると4倍近くに膨潤して、種皮に保持された水は播種後の万一の日照りに水溜の役割を果たすと考えられている¹⁰⁾。

(2) 石豆と種皮の化学的、物理的修飾

ここまでは、長期とはいってもそれ程長い時間の保存を想定していないので、大豆の品質低下の主要な原因として、乾燥しすぎて種皮に亀裂が入ることによってもたらされる障害について考察した。大豆には、それとは違って長期保存すると種皮が硬化して吸水不良になることがあるとされる。同種の現象は、家庭での調理における花豆などで顕著に認められ、固い煮豆ができる。いわゆる石豆であり、納豆の原料大豆の品質劣化における吸水不良のもう一つの原因に当たるが、浸漬障害とは別のメカニズムから生じる問題である。

前の研究結果（第14図）の流れで言えば、豆の吸水チャンネルである lens の機能喪失であると推定される。実際に、豆類には種皮が堅固で発芽率が低いものがあり、それらは lens⁴⁰⁾ や strophilar plug⁴¹⁾ を熱破壊することによって発芽率を改善できる、また、酸処理なども効果がある⁴⁰⁾。大豆では野生種に近いものに種皮が固い品種があり、このような場合は種皮に物理的な亀裂を作ることによって吸水を改善できることが示唆されている³²⁾。石豆の吸水不良については lens の機能劣化だけでなく、種皮全体に配置された lens からの水を配分する通水組織も劣化している可能性が否定できない。従って、吸水改善のためには、種皮全体に水を吸収、もしくは、通水する孔を均一に開けなくてはならないのではないかと推量される。

大豆の吸水に関して、300 MPa に加圧して吸水させると種皮に適度に亀裂が入り、均質に短時間で吸水できることが報告されている⁴²⁾。SEM の観察によれば、種皮の構造が潰れて孔が開くことが短時間で吸水を可能としていると考えられるが、この研究では組

第18図 加圧吸水した大豆のSEM画像

通常の吸水をさせた大豆（a, c）と加圧吸水させた大豆（b, d）のSEM画像で、種皮（a, b）と子葉（c, d）を示す。加圧吸水大豆では、種皮（b）にも子葉（d）にも微細構造の破壊が認められる。（American Society of Agricultural and Biological Engineersの許可を得て Zhang *et al.*, *Trans. ASAE*, **47**, 1151-1158, 2004 より転載）

織構造破壊が子葉にまで及んでいた（第18図）。子葉の組織破壊により生物学的肥大が抑制されるという面、また、子葉内部の貯蔵物質の漏出という面において処理後の形状や製品歩留まりを考慮すると、現段階の加圧吸水は食品加工技術として最適条件とはいえない。

しかし、栃木県地域食品研究会による超高圧処理試験装置の食品加工への利用研究を進展させて、栃木県食品工業指導所が行った低い圧力領域での加圧試験は興味ある結果である⁴³⁾。種皮が硬く水を通しにくい小豆に25 MPa から125 MPa の圧力を加えて調査したところ、浸漬・加圧直後に煮ると、吸水率は無加圧の約4倍となり、煮豆の硬さが均一となった。また、クライオ電顕による破断面の観察では子葉組織の微細構造に変化が認められ、吸水に寄与しているものと考えられた。このような石豆湯煮において物性改善が報告されているので、加圧による豆内部組織の物性変化を検討し、圧力、加圧時間、タイミング、及び、豆の種類や品種との関係を微調整することによって種皮のみを処理し、子葉に影響を与えない技術を見出せる可能性がある。

また、吸水における高圧処理は、原料豆の種皮に付着して混入する滅菌が困難な土壌微生物の芽胞を予め発芽させるため、滅菌の前処理としての効果が注目されている技術でもある。さらに、パック米飯の炊飯製

造において、200 MPa の高圧吸水前処理が炊飯時の煮崩れを防止する効果があるとして実用技術となっている⁴⁴⁾ことから、今後、豆の吸水改善のために期待が持てる技術開発の方向の一つと考えられる。

9. ま と め

納豆研究者の疑問は、種皮の問題に到達する。原因は、長期保存及び強乾燥によって水が抜け種皮が変性するところにある。変性は、種皮が硬化して全く水を通さなくなる、または、種皮にひび割れができ、水が無作為に通るという二つの現象となって現れる。両者は一つながりのもので、品種固有の性質によって何処で変化が止まるかが決まるのではないかと考えられる。結果として、前者の場合は、種皮に孔を開ける必要があるが処理が強すぎると吸水したときに子葉が壊れ浸漬液が白濁する。後者の場合は、前処理無しに浸漬すると既に開いている穴から水が入り子葉が壊れ浸漬液が白濁する。どちらにしても長期保存した豆の吸水においては水分含量 20% 程度までは吸水速度を穏やかにする操作を必要とするものと考えられる。また保存においては、発芽を抑制しつつも豆の生物学的組織構造を維持することが良い製品を製造する上で不可欠な条件であると考えられる。

納豆製造業のように多量の豆を処理する上で浸漬障害を避け、良好な吸水を達成するためには、① 大豆本来の性質を管理するために保存庫を改善し、貯蔵豆の水分含量を調べ種皮を乾燥しすぎないように積極的に保護し、加工に際して湿った場所でインキュベートしたり、湿った場所を通過させるなどの前処理を施し、種皮と子葉細胞のゆっくりした水和により機能回復を促す方法が可能である。また、一方において、② 人工的に種皮の性質を修飾、改変して適切な吸水行程を組み立てることができる可能性もある。さらに進んで、③ 加圧など吸水方法をコントロールして、豆がそれぞれの食品の製造に適した性質となるよう吸水させる技術開発の可能性はある。

これらの技術開発研究において、種皮や子葉の電顕や SEM による形態観察とともに、物理的方法による水の存在状態の測定は本質的な情報をもたらすと考えられる。大豆の水の状態を観察するためには NMR 及び MRI は有効な手法である。水分子の周辺構造との相互作用による束縛状態を緩和過程によって解析す

ることで、水分子が存在する微小部位におけるナノメートルからマイクロメートルの孔隙の量、サイズ及び分布を知ることができる。

また、直接的に水分含量を管理するためには第 7 図で示したように NMR で油脂のシグナルを基準として水のスペクトル強度をモニターすることができる。さらに、種子破壊の MRI イメージによるリアルタイム追跡 (第 16 図) については、比較的簡易で一般実験室に設置可能な小型 MRI を開発し^{45,46)}、乾燥種子への水の浸入や発芽のモニターへの応用について検討中である。このように、器官及び組織の形態形成における分子レベルでの水の役割から、さらに、現象の発現へと総合的に理解を深めることによって初めて大豆の貯蔵における問題が解決されると考察される。

謝 辞

本報告をまとめるにあたり、(独)農研機構・食品総合研究所顧問 (勲日本醸造協会理事) 児玉徹先生に励ましとアドバイスを頂きましたことを心より感謝いたします。また、図の転載許可を下さいました(独)日本農芸化学会、American Society of Agricultural and Biological Engineers 及び The Botanical Society of America に感謝いたします。

<独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 食品総合研究所 *独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 野菜茶業研究所 **くぬぎ山雪研究所>

参 考 文 献

- 29) Kano, H., Ishida, N., Kobayashi, T. and Koizumi, M.: *Jpn. J. Crop Sci.* **59**, 503-509 (1990)
- 30) Faust, M., Wang, P.C. and Maas, J.: *Hort. Reviews*, **20**, 225-266 (1997)
- 31) Isobe, S., Ishida, N., Koizumi, M., Kano, H. and Hazlewood, C.F.: *Biochim. Biophys. Acta*, **1426**, 17-31 (1999)
- 32) Ma, F., Cholewa, E., Mohamed, T., Peterson, C.A. and Gijzen, M.: *Annals Bot.*, **94**, 213-228 (2004)
- 33) Simon, E.W.: *New Phytol.*, **73**, 377-420 (1974)

- 34) Van Staden, J., Manning, J.C. and Kelly, K. M. : *Advances in Legume Biol. Monogr. Syst. Bot. Missouri Bot. Gard.*, **29**, 417-450 (1989)
- 35) Kikuchi, K., Koizumi, M., Ishida, N. and Kano, H. : *Annals Bot.*, **98**, 545-553 (2006)
- 36) Heil, J.R., McCarthy, M.J. and Özilgen, M. : *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.*, **25**, 280-285 (1992)
- 37) Pietrzak, L.N., Frégeau-Reid, J., Chatson, B. and Blackwell, B. : *Can. J. Plant Sci.*, **82**, 513-519 (2002)
- 38) Cho, Z.H., Ro, Y.M. and Kim, Y.K. : *J. Magn. Reson. Anal.*, **1**, 35-39 (1995)
- 39) Ishida, N., Naito, S. and Kano, H. : *Magn. Reson. Imaging*, **22**, 871-875 (2004)
- 40) Manning, J.C. and Van Staden, J. : *Annals Bot.*, **59**, 705-713 (1987)
- 41) Dell, B. : *Amer. J. Bot.*, **67**, 556-563 (1980)
- 42) Zhang, H., Ishida, N. and Isobe, S. : *Trans. ASAE*, **47**, 1151-1158 (2004)
- 43) 荷見昭夫, 阿久津智美, 柳沢 洋 : 栃木県食品工業指導所研究報告, **10**, 10-12 (1996) .
- 44) 山崎 彬, 笹川 秋彦 : 食科工, **45**, 526-532 (1998)
- 45) 小泉美香, 内藤成弘, 狩野広美, 石田信昭, 拝師智之 : 食品工業, **49**, 57-71 (2006)
- 46) Koizumi, M., Naito, S., Haishi, T., Utsuzawa, S., Ishida, N. and Kano, H. : *Magn. Reson. Imaging*, **24**, 1111-1119 (2006)
-