最新フリーズドライ食品製造技術* ～おいしいみそ汁の作り方～

畠 中 和 久*¹

New Technology of Freeze-dried Foods —How to Make Miso Soup—

Kazuhisa HATAKENAKA*¹

*¹Amano Jitsugyo Co., Ltd., 4215 Satomi, Satosho, Asakuchi-gun, Okayama 719-0393, Japan

(Received April 7, 2015, Accepted April 28, 2015)

1. はじめに

フリーズドライ（真空凍結乾燥）は中真空域を利用した乾燥技術である。この技術はドイツの学者が1890年に植物組織を真空容器中で昇華・乾燥を行い観察したことに始まる。以降1900年初頭には血清のフリーズドライ化の研究が進んだようである。第一次世界大戦直前であることが研究の背景にあったのかもしれない。その後はウィルス等の研究機関に普及、第二次世界大戦中の1940年頃には輸血用血液製品の研究が進んだ。大戦後は英国食糧省研究所などで食品のフリーズドライの研究が進んだようだが、軍用食・兵士の携行食の開発が目的であったことから、研究報告の結果は公開されることがなかった。1950年代半ばには医薬品、コーヒーの開発が試みられ、米国ではアポロ計画による有人宇宙船打ち上げを想定し、NASA が宇宙食などの開発も行っていたという。宇宙食は今でも一部の食品がフリーズドライ製法によって作られている。

日本にこの技術が紹介されたのは1960年代の前半であり、それ以前に南極観測隊が南極大陸で越冬するための食材の研究開発が行われていたという。当時の観測船「宗谷」に

は冷凍設備がなかったため、長期間の食品保蔵技術としてフリーズドライに着目したらしい。残念ながら当時は保蔵のための適切な包材と技術がなかったことから、輸送中に吸湿・変質するなどのトラブルも多かった。後に観測船は大型化し、十分な冷凍設備を設置したこともあり南極観測隊用のフリーズドライ食品開発は衰退したといわれる。フリーズドライ技術の黎明期の出来事である。

1970年、世間が万国博覧会に浮かれていた頃、ある即席麺メーカーによる「カップラーメン」の開発が行われていた。フライ麺とカップの中の“具”は熱湯3分で完全に復元する乾燥品を使用する企画であり、様々な乾燥法の中からフリーズドライ技術を用いることが決まった。1971年9月に発売された「カップラーメン」は若者を中心に広がり、翌年2月に起きた浅間山荘事件で、機動隊員らが現地で食べている姿がテレビで映し出されたこともあり、全国民の目に留まり“新しい食スタイル・食べ物”として認知されていった。この商品の登場以来、フリーズドライは日本独自の進化を遂げていくことになる。世界的にはコーヒーや、シリアル食品の中のフルーツ類がフリーズドライによって製造されているほか、レーションと呼ばれる軍隊の携行食の一部に見ること

1890年	生物組織研究のために、試料を凍結し真空中で昇華乾燥を行う
1909年	血清のフリーズドライが行われ、細菌ウィルスの研究室に普及
1940年	輸血用血液製品の研究が進む
1954年	英国食糧省研究所で食品のFD研究が進む 医薬品製造、宇宙食、戦闘食、コーヒーの開発進む
1960年代	日本国内にフリーズドライ設備が導入される 特殊用途食、南極観測隊の食料乾燥の研究
1971年	世界初カップめん登場 エビ・肉・卵・ネギ
1980年代	具材開発の時代 焼豚・たこ焼き・鶏肉、牛肉、油揚げ
1982年	成型加工品の味噌汁発売、世界初の成型タイプの離乳食発売
1990年代	成型加工品の時代 味噌汁、粥・雑炊、卵スープ

図1 フリーズドライ技術の変遷。

* 平成26年12月11日 日本真空学会関西支部実用技術セミナー
2014で発表

*¹ 天野実業株式会社 (〒719-0393 岡山県浅口郡里庄町里見4215)

はできるが、日本では加工食品の具材、とりわけカップ麺の具材開発の歴史が始まったわけである（図1）。

当社は1968年にフリーズドライ装置を導入、当初は調味料製造に使用していたが、先述の「カップラーメン」の具の開発を共同研究することになった。その具材開発は全てが手探りの中で行われ、エビや肉などの具をフリーズドライしながら、酸化防止や退色防止の方法など数多くの知見を蓄えていった。その後は焼豚、鶏肉、油揚げ、牛肉、イカ、野菜類など数多くの具材をフリーズドライ化し、カップ麺の具材として採用された。1980年頃に、あるメーカーから具材と麺用のスープを一緒に固型化できないか？ という依頼があり、独自に固型化のための研究・試作を始めた。そこで蓄えた技術やそれまでのノウハウを基に1982年「フリーズドライ固型みそ汁」を開発し翌年に発売した。

前置きが長くなったが、この稿では「最新フリーズドライ食品製造技術～おいしいみそ汁の作り方～」というタイトルで解説したい。当社は「フリーズドライ固型商品」の将来性に逸早く着目し、たまごスープをはじめ、米飯類、にゅうめん、シチュー、カレー、どんぶりなど業界に先駆けて多数の新商品開発を行ってきた。固型化することによるメリット・デメリットも含め、その形状ゆえの技術力も必要である。「フリーズドライ。たかがみそ汁、されどみそ汁」として幾つかの知見も述べさせていただく。

2. フリーズドライの原理

密閉容器の中に20℃程度の水を入れ、容器内の圧力を下げていくと何が起きるか？ 当社では技術系の新入社員に必ず質問し、実験映像を見せてフリーズドライの原理を理解させる。

水は、その温度に依存する水蒸気分圧を持っている。20℃の水の水蒸気分圧は約2300 Pa である。水蒸気分圧は、水が水蒸気になろうとする圧力（力）と言い換えると分かりやすい。容器内の圧力が2300 Pa まで降下すると、水蒸気になろうとする圧力がとが等しくなる。この時点で20℃の水が沸騰し始める。沸騰・蒸発するためには、エネルギーが必要であり、密閉容器中の水は自身の熱を使って沸騰し続ける。そして沸騰し続けながら、蒸発熱を奪われるために自身の温度が下がっていくのである。更に気圧を下げ、約610 Pa に達する頃に水は0℃程度になり、沸騰しながら一瞬にして凍結する現象が見られる。更に圧力を下げると氷は表面から水蒸気となりながら徐々に小さくなっていく。これが昇華現象でありフリーズドライの基本原理である。昇華現象は日常的に見ることは出来ないため、中々理解しにくいものだが、このように容器内の水の変化を見せることによって、フリーズドライの原理を感覚的・論理的に理解することは出来るであろう。

水が昇華するためには、エネルギーが必要である。大学などの研究機関の実験用フリーズドライ装置などでは、中真空域を維持するだけで乾燥することが多いが、乾燥終了までに長時間を要するため、食品の乾燥では目指す真空域を維持しながら、凍結している製品を加熱して乾燥を促進する。加熱するのに融けださないのは、昇華に必要な熱量だけを与えるためである。氷は水になる融解熱が80 cal/g、水が水蒸気に

図2 フリーズドライの原理（昇華）。

なる気化熱が598 cal/g であり、これらを合算した678 cal/g が昇華に必要なエネルギーと考えてよい（図2）。実際のフリーズドライ装置では、外部に逃げる熱もあるため、エネルギーロスを考慮して余分な熱量を供給する。圧力を監視しながら、昇華熱を供給するのである。目指す圧力は食品に含まれる成分によって大きく異なるが、一般的な食材であれば50～60 Pa 程度、「固形みそ汁」のようなものであれば、更に高真空側で制御しなければその商品価値を損ねる場合がある。

フリーズドライは文字通りフリーズ（凍結）工程と、ドライ（乾燥）工程にポイントがある。「凍結したまま、乾燥する」ためには、それぞれの工程を監視しコントロールすることが重要である。特に「固型みそ汁」のフリーズドライ化では、一般の具の乾燥と異なり、乾燥後に固型状態を保ちながらも熱湯を注ぐと10秒程度で復元し、中から色鮮やかな具が現れ、全てが作りたてのみそ汁と変わらない、という高度な品質が求められる。そのため、凍結工程において緻密なコントロールが必要になる。

3. 凍結工程の重要性

食品中の水を凍結させ、昇華させると氷の部分が空洞化し多孔質の乾燥品ができる。この空洞部分にお湯が浸透し、固型状の製品が溶解しながら復元してゆく。つまり、氷が抜けた後こそフリーズドライ製品の品質ということである。商業的にフリーズドライを行うには、予備凍結工程が必要になる。仮にみそ汁を予備凍結せずに、フリーズドライ装置の中で減圧状態に置くと、先述のような沸騰現象が起り、調味液が飛散してしまい商品価値が損なわれてしまう。このための予備凍結工程であるが、みそ汁の調味液（通常は3～4倍程度に濃縮している）を完全に凍結すること、更にはどのような速度で凍結するか、という凍結条件設計が重要になる。

みそは塩分、糖分、アミノ酸を多く含む食品である。濃縮したみそ調味液を冷却すると、-21℃付近で濃縮塩化ナトリウム溶液相が完全凍結する。この状態を共晶といい、この時の温度を共晶温度という。しかしながら、みそ中の糖分は食塩の共晶温度である-21℃付近では、まだ糖液のまま分散した状態になっている。つまり、みそ調味液としては完全には凍結していない状態にある。このままフリーズドライ

イ装置に入れ減圧すると、未凍結部分が蒸発を起し製品の内部圧力が上昇するため沸騰、発泡、爆発し、商品価値を失うことがある。このため、予備凍結はみそ調味液全体が完全に凍結するまで十分に冷却することが基本である。一般にブドウ糖溶液の共晶温度は -40°C 程度といわれるため、みその成分を考慮して、何度まで冷却するかという条件設定が必要である。一般に食品のフリーズドライメーカーでは、予備凍結庫の能力は $-30\sim-40^{\circ}\text{C}$ 程度であり、糖液相の完全凍結を行うには厳しい仕様である。ミクロで観察すると、フリーズドライした商品の内部や、表面に若干の発泡が見られるものもあるが、その商品価値を大きく損ねることは少ないように凍結温度をコントロールしている。近年弊社商品を模したフリーズドライ固型みそ汁が市場に見られるようになったが、みそ感を抑えて食塩を添加して生産し、発泡を回避している商品もあるようだ。つまり、比較的能力が劣る凍結庫や、フリーズドライ装置でも“見た目品質”はそれなりに生産できるということである。少量のみそに食塩を添加し、出汁感をアップして飲ませるといった商品設計は、本来のみそ汁とは異なるものと個人的には感じているが、このあたりは消費者の感性や判断に委ねる部分であるため、これ以上の記述は避けたいと思う。

さて、予備凍結において重要なポイントとして、完全凍結、共晶温度以下まで十分冷却することを挙げたが、もう一つ重要なポイントがある。どのように凍らせたか？ 別な言い方をすれば、どのような凍結速度であったか？ ということである。一般には食品は急速凍結するのが良いと思われるが、ちである。魚類や肉類では無論、急速凍結が必要である。緩慢凍結をおこなうと、食品中の水は大きな氷結晶を作りやすくなり、細胞膜の破壊を起す。氷になると8%程度の体積膨張が起こるため、できるだけ細かい氷結晶を作らせ細胞膜破壊による食感の低下や、ドリップ喪失を無くすることが基本である。野菜類も同様で、緩慢凍結を行うと細胞壁の破壊が起こってしまう。即席麺の具として肉や野菜をフリーズドライしていた場合には、急速凍結でも大きな問題は起きなかったが、固型みそ汁を予備凍結する場合には、氷結晶が小さすぎると乾燥速度や熱湯を注いだ場合の復元性に、マイナスの影響があることが分ってきた。凍結速度と氷結晶の大きさには相関性があることが知られている。急速凍結した場合は、固型みそ汁内の調味液部分の氷結晶が小さくなり、緩慢凍結した場合は氷結晶が大きくなるのである。また、緩慢凍結では純水部分から凍結し始めるため、調味液自体が更に濃縮される。未凍結部分が大きくなるため、凍結が不十分であると発泡現象が目立つ場合がある。これを避けるために急速凍結により氷結晶を小さくした場合には、水部分が抜けた後が昇華した水蒸気の通り道になるため、昇華面が製品の内部に移っていくに従い、水蒸気の通り道が狭く物質移動の抵抗が大きい、という状態が起こる。これによって、被乾燥物がフリーズドライ中に内圧が上昇し、液部分が融解、蒸発、発泡して商品価値を失うという現象も発生する。つまり、その製品に使用するみその成分や原材料に応じて、みそ汁の具の食感を損ねないような凍結条件を決め、乾燥条件を設定することが重要なのである。

実機での生産となると大量のみそ汁が時間差で作られるわけであり、予備凍結庫に入る時の品温には大きな差がある。かつ、予備凍結庫の中は冷風による「対流伝熱」による凍結であるため、冷風温度と製品に接触する冷風の風速に差があると、凍結速度は大きく異なってくる。冷凍時の伝熱係数は、理論的には流速の影響を受けることが知られている。実際に予備凍結庫に入ると製品上の風速は不均一であり、風速計等で測定すると、数倍以上の差があることも珍しくない、というよりも一般的な現象である。この状況を考慮しながら予備凍結条件を如何に設定していくか、生産部門においては如何に風速のバラツキを最小化していくか？ がポイントであるが、フリーズドライ商品の製造において最大のノウハウであることから、これ以上の記述はお許しいただきたいと思う。

4. みそ汁生産ラインの実例

ここからは、実際のみそ汁生産ラインに沿って説明する。**図3**は当社の「しじみのみそ汁」の乾燥までの流れである。加熱殺菌されたみそ調味液を予め樹脂製の容器に小分けした具材に充填する。樹脂容器はアルミ製トレーに置かれており、更にアルミトレーはトロリーのアームに置かれている。次に、トロリーごと予備凍結庫に入れて所定温度、所定時間で完全に凍結する。写真の上部に、工場の天井に固定されたレーンが設置されているのがお分かりいただけるであろうか？(A)

続いてフリーズドライ装置にトロリーごと入れられる。トロリーに置かれたアルミトレーの間に金属製の板が見えるのが、フリーズドライに必要な熱を供給するための加熱板である(B)。加熱板からアルミトレーへの伝熱は「輻射」によって行われる。昇華によってフリーズドライ装置の中で水蒸気になった水は、装置内の圧力によって、ボイルの法則で計算されるように数百万倍の体積に膨れ上がる。フリーズドライに必要な中真空域を維持するためには、乾燥室と真空ポンプの間にコールドトラップという装置を設けることが必須である。被乾燥物の水が昇華され、水蒸気となった水を -40°C 以下に冷却した蛇管の間を通過させることで、再び氷として補足する。それ以降は水蒸気を含まない乾いた空気を真空ポンプで排気する。「冷たい罠」にかかった水蒸気は、再び氷になるために昇華熱を蛇管、或いは既に補足された水(氷)の表面で排出する。コールドトラップに付着した氷の表面は、常に昇華熱をもらいながらも、融解することなく乾燥の終了までそこにとどまる。コールドトラップに付着した氷は、乾燥中の「しじみのみそ汁」内に存在した水なのである(C)。

乾燥が終わった製品は、金属探知機やX線検査器を通過し、最終包装工程へ向かう。**表1**にフリーズドライ製品の特徴を示したので参考にいただきたい。また、「しじみのみそ汁」の成功例と失敗例の写真も載せたので、2の後半で述べた発泡事例としてご参照いただきたい(**図4**)。

図5に氷の温度と飽和蒸気圧の関係を示した。被乾燥物の成分から、その共晶温度が想定されれば、その温度における飽和蒸気圧以下の状態にフリーズドライ装置の圧力を保つこ

図3 フリーズドライ味噌汁の製造工程.

表1 フリーズドライ食品の特徴.

長 所	短 所
形状の変化が少ない	酸化しやすい
色の変化が少ない	吸湿しやすい
香りが良く残る	壊れやすい
味, 栄養価の変化が少ない	製品単価が高い
復元性が良い	包装費用がかかる
長期保管が可能である

図5 氷上の飽和蒸気圧.

図4 殻付きシジミ汁の発泡事例.

とで、理論的には昇華・乾燥が行われる。乾燥工程中は発泡現象を起こさせないように被乾燥物の品温を監視しながら、加熱板の温度をコントロールすることが重要である。純水物質と異なり、天然物由来の食品成分は産地や時期によって大きく変動する。基本的な乾燥プログラムはあるが、細かな乾燥条件のコントロールが必要なのは、このためである。

5. おいしいみそ汁を作るために

これまででは、フリーズ工程と、ドライ工程について主に述べてきたが、実際の製品が出来上がるまでには「農場から食卓まで」のトータル・サプライチェーンを構築することが重要であることは言うまでもない。ここでは、フリーズドライの短所に上げられている「酸化しやすい」と「吸湿しやすい」

の基本的な対策について若干の知見を述べてみたい。

食品中の成分である油脂は、フリーズドライすることによって酸化されやすくなる。一般に食品中の油脂は、トリグリセライドといわれるグリセリンに3つの脂肪酸が結合したものである。脂肪酸には飽和脂肪酸と呼ばれるものと、不飽和脂肪酸と呼ばれる炭素の二重結合を含むものがある。不飽和脂肪酸は温度、遷移金属の存在、光の介在により容易に酸素と結合することが知られている。乾燥され多孔質となったフリーズドライ製品は、表面積が大きくなることから酸素と接触する面積が増える。二重結合部に酸素がアタックすると、ペルオキシラジカルが生成し、更に酸化が進み過酸化物ができる。油脂の初期酸化の状態である。この酸化メカニズムを防止（遅延）するために、一般には抗酸化剤として、ビタミンEを使用する。ビタミンEはペルオキシラジカルができると逸早く、ラジカルを補足して加速度的な連鎖反応を食い止める。またビタミンCとの併用により、ビタミンEが補足したラジカルをビタミンCが引き受け、不活性化することで再びビタミンEの抗酸化力を復活させる。酸化しやすい個々の具材の下処理や、調味液部分に抗酸化剤としてビタミンEやCを添加するのはこのためである。過酸化物が生成すると、その炭素鎖が短く切断され、低級脂肪酸が生成し、いわゆる油脂の酸敗臭などが発生し商品価値を落とすばかりでなく、急性毒性中毒を引き起こす原因にもなる。微量の油脂含量であれば健康危害は少ないものの、注意を要する。

もう一つの短所である吸湿について少しばかり説明したい。今まで何度も述べてきたが、フリーズドライ食品は多孔質の構造である。しかも、真空下で強制的に乾燥する方法であるために、装置の外に出た時点から環境の湿度の影響を受けやすい。酸素との接触面積が増えることにより酸化されやすいと先述したが、空気中の水分との接触面積も増えるということである。水分活性という概念がある。乾燥品を密閉容器に入れ、その中の関係湿度（RH、相対湿度ともいう）を測定し、100で除した値のことである。フリーズドライ直後の製品の水分活性は0.1にも満たない。乾燥品の水分活性（Aw）×100と環境の関係湿度の差が大きければ大きいほど、乾燥品は吸湿しやすいということである。よって、製品の水分、水分活性を上げないようにするためには、乾燥が終わった製品を扱う作業場の関係湿度をできる限り低く抑える

ことが重要であることは容易に想像がつく。また、乾燥品を包装する場合には、先述の酸素と水蒸気のバリア性が高い包材を選ぶ必要がある。一般的には、アルミ層をもつ積層フィルムを採用することが多いが、商品によっては具材などによる突き刺しの可能性も考慮し、厚手の包材やナイロン層などを加えるものもある。更に包装品内部の酸素によって酸化が促進されるために、窒素などの不活性ガスを封入して残存酸素を低く抑える商品もある。

レーションといった米軍兵士用の野外戦闘携行食をフリーズドライ製法で作っている。米国の基準では、酸化抑制のために包装後の残存酸素を2%以下にコントロールしているようである。当社の場合は包装された直後の残存酸素を1%以下になるよう不活性ガスの流量や、シール機を速度をモニタリングするとともに、一定時間おきに残存酸素を測定しながら生産している。

6. おわりに

本稿では「おいしいみそ汁の作り方」という副題で、最新のフリーズドライ食品製造技術の一部を紹介させていただいた。同業者やフリーズドライ技術に詳しい方にとっては、目新しいこともない稚拙な内容に終始したことをお詫びしたい。また、真空とは関係のない技術や知見について多少の脱線があった点も、ご容赦願いたいと思う。

昨今の加工食品メーカーを取り巻く環境は、大変厳しいものがある。急激な円安による海外原材料の上昇、HACCP、ISO、FSSCといった食品の安全性に対するマネジメントシステムの取得や維持に伴う企業負担は、この先減ることはいでであろう。加えて異物混入問題により、今まで以上に加工食品の品質に対する消費者の要求は高くなっている。当社も農場とその一次加工場や加工方法を定期的に訪問しながら、強固な信頼関係と強い品質保証体制を確立し、安全で安心な体制を実現するとともに、お客様の生活を豊かにする創造企業となるために日々努力していく所存である。

謝 辞

2014年12月に日本真空学会関西支部の実用技術セミナーで講演させていただいたこと、並びに本稿への執筆の機会を賜りましたことに深く感謝いたします。