

生鮮食品のコールドチェーンにおける 低温処理の技術的な展望

Some Comments on the Low Temperature Treatments in the Cold Chain System as applied in Perishable Foods Distribution in Japan

加藤舜郎* *Shunrô Katô*

Cold chain system applied in distribution of perishable foods needs an engineering and technical co-ordination between operations of refrigerating equipments and other installations involved and knowledge on various behaviours of foods to different physical state under low temperature treatments, such as cooling, chilling (partial freezing) and freezing.

This article gives some technical comments on the merits and demerits of conventional cooling and freezing systems as well as an aspect on feature of partial freezing system practised very recently in Japan.

Ⅰ 緒 言

魚肉、食肉、鳥肉、野菜、果実、鶏卵など、いわゆる生鮮食品といわれて日常の食生活に欠かせない農畜水産物は、ごく一部の例外的のものを除いて、新しいものが品質が良く美味であるとして喜ばれている。

言い換えると鮮度の良いものほど食品価値あるいは商品的価値が高いのである。ところが都合がわるいことには、これらの農畜水産物は、そのままでは鮮度を保ちがたく時間の経過に伴って品質の低下が一般に非常にすみやかできわめて不安定である。英語には「いたみやすい食品」(Perishable foods)という用語があるが、これは生鮮食品を意味している。フランス語でも同じ意味になる *Dendrées périssables*、同様にドイツ語では *Verderblicher Lebensmittel* という言葉が使われている。

生鮮食品の生鮮という文字から受ける感じは、なまで新しいということである。しかし、現実には市販されている農畜水産物の全部が必ずしも鮮度の点で申し分のないものばかりではなく、むしろかなり鮮度の落ちている場合のほうが多いようであるから生鮮食品の実体は、その名にそぐわないものといえるのではなからうか。したがって、農畜水産物をその本質から見て表現するならば「いたみやすい食品」のほうが、生鮮食品よりもむしろ適切であり、「いたみやすい食品」のあるべき姿が生鮮食品であると考えたほうがよい。

このような次第で生産から消費に至る流通間の質的コントロールがきわめて重要な問題となってくることがわかる。前述した一部の例外的のものというのは、固有の肉質や風味は、あまり新しい間では味わえないで、いくらか時間がたつてから、いわゆる熟成期間を経てから出てくる食品の種類のことを指(さ)している。この代表的な例には牛肉、洋ナシ、バナナなどがある。なお、質的なコントロールとともに必ず量的な問題も伴っている。すなわち、すべての農畜水産物は一般に含水率の多い食品であるから、流通間に蒸発によって水分を間断なく失っており、そのために重量の自然減少は避けられないし、また品質の劣化があまりひどくなると、廃棄処分されるものが生じて、これも減量の原因になってくるから

である。

また、これらの農畜水産物にはもう一つの大きな問題点がある。それはほとんどのものの生産性が自然条件によって決定的に左右されていることから生ずる主として量的コントロールがむずかしいという問題である。すなわち、天候、気象、海流、海水の異変、病虫害や伝染病の発生まん延など、その中の大部分は今日の科学技術レベルでは防ぎ得られない自然現象であるが、これによって生産が異常な打撃を受けて、大減産を免れないことがよく起こることである。この場合は数量的には供給が需要を著しく下回るから、結果として価格の高騰を招くことになる。しかし、ときには自然条件がよくて大豊作や大漁になると、反対に供給が需要を大幅に上回ることで価格の暴落を見ることがある。しかも価格が生産地からの輸送費や容器代も支払えないような安値になると、発送しないで生産地において魚は飼料や肥料用につぶされたり、引取手のない野菜は野積みそのまま放置されるなどの例がこれまでもたびたび起こっている。これは食糧資源の利用という見地からは、まことにむだでもったいない国家的な大損害である。

このように需給の間に量的コントロールが計画的にうまく調整ができにくいこと、それが結果として物価に好ましくない影響を直接与えることは農畜水産物がもっている宿命的な大きな欠陥の一つであると指摘してよいであろう。

生鮮食品の流通の体系や組織などのこれまでのあり方に対して物価問題との関連において、いろいろの批判がでて今日では大きな社会問題の一つになっているが、これらは以上述べた生鮮食品における質的および量的コントロールのむずかしさという二つの問題点ときわめて関係が深いものである。したがって、これらの問題点を解決することができれば、生鮮食品の流通を体系的あるいは組織的に合理化しうる可能性も生まれてくる。この点において生鮮食品の品質(鮮度)を長期間にわたって保持するコールドチェーンと呼ばれているシステムのもたらす効果は非常に大きいものがあるといつてよいであろう。

生鮮食品の今日のような流通の実態は、多量の「いたみや

* 社団法人日本冷凍協会 副会長

すい食品」を取り扱うためにふさわしいように長年かかってでき上がったもので、それなりの理由がある。しかし、もしなんらかの方法によって生鮮食品から「いたみやすい食品」と呼ばれるような性質を取り去ってしまうならば、すべての事情が一変してくるであろう。これのためには、生鮮食品の品質(鮮度)を必要な期間にわたり安定させたらよいのであるが、その意味でとられる実用的な方法の中では低温利用が最も有効であって、それに立脚しているコールドチェーンという流通システムが適正に採用されるならば、今まで3日もたてば鮮度の低下がひどく商品価値を失っていたものが、10日間あるいは1ヶ月間もほとんど鮮度を変えないで保つこともできるのである。こうなれば多量を短時間に処分するために市場でせりにかけている在来流通経路に必ずしも依存しなければならない理由はなくなるであろう。また低温貯蔵が半年間から1個年間の長期にわたっても、商品価値を失うようなことがなくなるならば、価格が暴落するときには、一部を低温貯蔵に入れ、暴騰のときは在庫品の一部放出を行なって出荷量の調整を図り、価格の安定化を図りうるという良い面も期待できることになる。したがって、コールドチェーンの普及と充実は、ひとり生鮮食品の消費者側ばかりではなく、生産者側にとっても益するところが少なくないのである。

コールドチェーンに期待される品質的あるいは経済的のメリットについては、すでに今までに多くの資料が出ている。またコールドチェーンの各段階で利用しなければならない機器や装置もいろいろあるが、これはいわゆるハードウェアであって、これらがただばく然とそろえられて使用されただけではコールドチェーンシステムのメリットが期待どおりに発揮できるとは限らないし、場合によっては期待に反する成績に終わることすらある。その原因がコールドチェーンシステムのもとになっているソフトウェアの知識と経験が欠けていたり、コールドチェーンの各段階の規模や技術的レベルの間に適切な調和がとれていなかったことにあるという事例は少なくないようである。コールドチェーンはシステムエンジニアリング(**System engineering**)といわれているように、流通経路の各段階における施設と技術の間はもとより、相互の段階の間にも調和がとれ、さらに各段階の接続点の作業も順調に進み、その総合的結果としてはじめて期待されるメリットが生まれてくるものである。

ここではコールドチェーンシステムにとって重要であるソフトウェア的な知識の概念をつかむために参考になるであろうと思われるいくつかの基本的なことの要点についてごく大要を述べることにしたい。

2 温度の領域

いわゆるコールドチェーンと呼ばれるシステムによって流通している際の生鮮食品は、一般にまわりの常温よりも低いある品温に保たれている。この品温はどのくらいであるかということは生鮮食品の種類、性状あるいは流通期などによって異なっている。およそ 15°C から -30°C ぐらいまでであるが、特殊なものを含めると下限は -40°C ～ -50°C までの範囲まで広がるであろう。しかし所定の品温にまで下げるために使われる予冷や凍結用の冷却装置および貯蔵、輸送あるいは陳列用の冷却装置は、いずれも品温よりも低くなるので、設備としては -50°C 以下のものがある。

一般に常温よりも低く保たれているからコールドチェーン(**Cold chain**)といわれるのであるが、外気のほうが冷たくて品温のほうが逆に高いこともあり、この場合はその品温を

保持するためにはむしろ加温を必要とするので、コールドチェーンの名は実体を必ずしも正確には表現していないことになる。むしろ恒温あるいは定温流通とか適温流通の体系と呼んだほうがふさわしいかも知れない。

コールドチェーンの語源は、このような流通体系が発達しているアメリカにあり、わが国では1966年(昭和41年)1月末の科学技術庁資源調査会の勧告書で初めて実体と名称が紹介されたようにいわれているが、このような流通体系の内容自体は、わが国でもこの用語が紹介されるずっと以前から、すでに鮮魚や牛乳あるいは凍結した食品の流通では実施されてきており、決して珍らしいものではない。また用語自体も、実はそれより以前にヨーロッパで出版されている食品の冷凍に関する専門書中には、すでに全く同意義の用語が使われているのである。すなわち、1950年版のフランスのピエトル教授(Maurice Pieltre)の著書“**Conservation par le froid des denrées d'origine carnée**”(食肉の低温貯蔵)中には1933年ごろからこのような流通体系が必要なことは同国で同教授らによって唱えられ、これをフランス冷凍協会は“**Chaîne frigorifique**”(シエン・フリゴリフィク)のスローガンのもとに宣伝啓もうしたことが述べられている。そのほかソ連のM.W. Tuschneidの原著書をドイツのエンブリック(Ed. Emblik)が補筆し、1936年に出版した“**Die Kälte-technologische Verarbeitung Schnellverderblicher Lebensmittel**”(いたみやすい食品の低温処理)中には、生産から消費に至る経路の各段階は低温の鎖でつながっていることの効果と必要性が述べられており、これを**Kühlkette**(キュルケッテ)と呼んでいる。これらフランスおよびドイツ両国語による表現は、全く英語のコールドチェーンと同意義の言葉を使ったものである。フランスでは、その後に“**Chaîne du froid**”(シエン・ドゥ・フロア)という同意義の用語も併用されている。

品温を常温よりも下げるのは、温度が低下するほど、生鮮食品に起こる諸変化の中で、腐敗に導くような、主として微生物の繁殖によって生ずるものは、すべて進行が遅れるからである。しかし変化の中には腐敗とは直接の関係がなくとも、商品価値や食品価値をそこなう原因になるものがある。これらの中には必ずしも品温が下がるほど進行が防がれるものばかりではなく、常温よりもある程度低いところでは、むしろ促進され、さらに下がると抑制の効果が出るものがある。要するに警戒すべき危険温度(**Critical temperature**)の区域があるので、このような食品の場合は、これをはずした品温での取り扱いが必要になってくる。この危険温度の区域は、食品の種類によって、また果実や野菜では生産地や熟度などによっても差があるばかりでなく、この温度におかれていた時間的な長さによっても変質の程度に軽重があるので、ことは非常に煩わしくなってくる。

流通期間というのは生鮮食品の生産(収穫、漁獲、屠(と)殺、産卵)から始まって最終的に消費されるまでにかかる時間的の長さを指している。したがって、生産現場における処理や集荷、輸送や配達などのほかに長期間または短期間の冷蔵や販売店におかれている各段階を含んだものである。すなわち、これらの過程を通じて適当な低い品温が継続的に維持されることにより生鮮食品の生命ともいえるべき鮮度(品質)の低下が遅れ、長期間にわたり商品価値が保たれるのである。

生鮮食品の鮮度とはなんぞやということを科学的に定義することは非常にむずかしい問題であるが、ここでは一般に官能的な意味でいわれている「新しさ」と解しておけば支障はな

いであろう。この「新しさ」の評価には肉質、硬軟、口当り、風味などの実質的なものや形状、色、艶(つや)などの外見のなものすべてが含まれていて、新しいものは商品価値も高いのが普通である。しかも食品の成分や栄養価などの科学的評価は、官能的評価にほぼ比例するようなので、官能的に新しく商品価値のよいものは、また、食品価値も高いことになる。

2.1 品温によって異なる物理的状态

コールドチェーンの柱になる低温での取り扱いで最もたいせつなことは適切な品温の選択と維持という技術であるが、この品温いかんによって流通の際の生鮮食品の物理的状态が変わり、それは次の三つに分けられる。

- (1) 冷却状態 (Cooled, Chilled)
- (2) 半凍結状態 (Chilled, Super chilled Deep chilled, Partial frozen)
- (3) 凍結状態 (Frozen, Deep frozen)

備考: Chilled は半凍結状態と冷却度の強い冷却状態の場合にも使われている。

以上のほかに過冷却状態 (Super cooled) の取扱いの実験例もあるが、実用化は至難のようである。流通の間は、以上のいずれかの状態であるが、途中で凍結→半凍結、冷却→半凍結、半凍結→冷却へと状態の変化が行なわれることがある (5.参照)。

このような区別は品温が下げられた食品内の氷結晶の発生の有無、あるとすれば、その量の多いか少ないかによるのである。もちろん、品温の高低では凍結状態は低く、冷却状態は高く、両者の中間に半凍結状態があることになる。けれども、これらの三つの状態の境界を、それぞれある温度の線でくぎって、これをすべての生鮮食品に一律に当てはめることは不可能である。それは清水ならば過冷却現象が起こらなければ水温が0℃になれば氷結するけれども、生鮮食品中に含まれている水が氷結を始めるのは必ず0℃よりも低い品温であり、しかも、その品温も一定ではなく高い低いがあるからである。また0℃以下の同じ温度であっても発生している氷結晶の量が異なるからである。このように同じ水であっても生鮮食品中のものは清水の場合に比べて氷結の現象が異なるのは、生鮮食品に含まれている水の中には、いろいろな成分が溶けてうすい水溶液になっているからである。しかもうすい水溶液の場合は、氷結点降下の現象があつて、凍り始める温度 (Initial freezing point) すなわち、氷結点は必ず0℃よりも低くなるからである。どれだけ低いかを示す度合、すな

表1 食品の氷結点の例 食品中の水溶液のより濃いものが、氷結点の温度はより低くなっている。

Table 1 Examples of Initial Freezing Point of Perishable Foods

魚 名	氷結点 (℃)	食 品 名	氷結点 (℃)	食 品 名	氷 結 点 (℃)
コ イ	-0.7	サ ラ ダ 菜	-0.4	レ モ ン	-2.2
イ ワ シ	-1.3	ト マ ト	-0.9	サ ク ラ ン ボ	-2.4
ウ ナ ギ	-1.95	タ マ ネ ギ	-1.1	バ ナ ナ	-3.4
タ ラ	-1.0	エ ン ド ウ	"	ク リ	-4.5
カ ツ オ	-2.0	カ リ フ ラ ワー	"	ク ル ミ	-6.7
カ レ イ	-1.95	バ レ イ シ ョ	-1.7	牛 肉	-0.6~-1.7
ブ リ	-1.2	サ ツ マ イ モ	-1.9	魚 肉	-0.6~-2
オ ヒ ョ ウ	-0.9	リ ン ゴ	-2	牛 乳	-0.5
マ グ ロ	-1.3	洋 ナ シ	"	卵 白	-0.45
ヒ ラ メ	"	オ レ ン ジ	-2.2	卵 黄	-0.65
カ ニ	-2.0	ブ ド ウ	"	バ タ ー	-2.2
ザ リ ガ ニ	"	柿	-2.1	チ ー ズ	-8.3

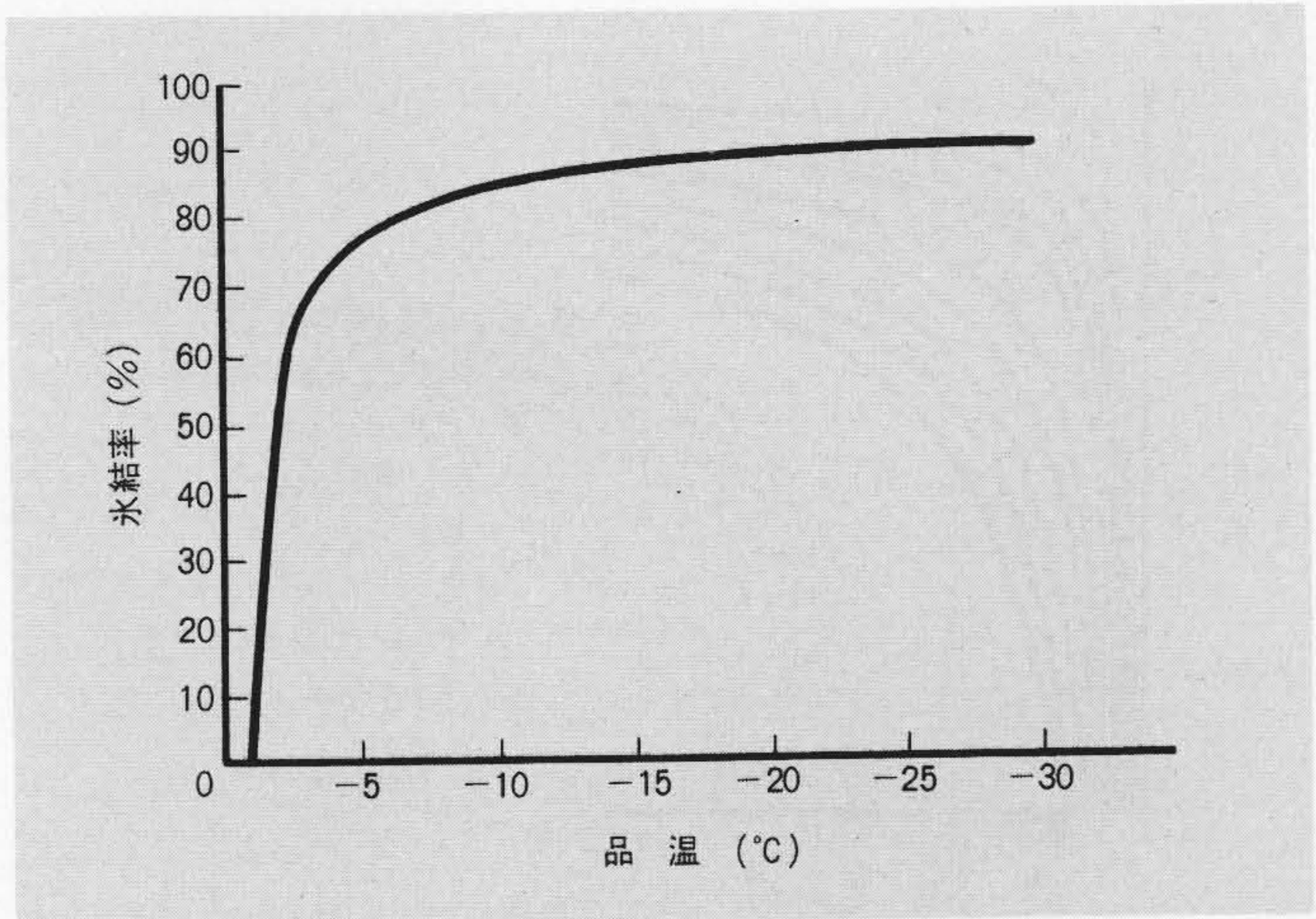


図1 タラ魚肉(Kabeliau)の品温と氷結率 魚肉中の水分は品温が-5℃まで降下する間にほぼ80%は氷結し、以後の降下ではわずかである。

Fig. 1 Relation between Increase in Ratio of Ice to Water Content (in Percent) and Lowering Freezing Temperature in Fish (Kabeliau) Meat

わち氷結点降下度は、その水溶液のモル濃度に比例することになっており、濃度が1molの場合は氷結点降下度は1.86℃である。したがって、濃度1molの水溶液の氷結点は-1.86℃になる。食品の種類や性状によって、この濃度に差があるので、これに応じてさまざまな氷結点を呈することになり、たとえば表1に示すとおりである。ここに掲げた氷結点は一応の標準になるが、同じ食品であっても、いろいろな条件で多少変わってくる。たとえば、果実であればその成熟度、生物組織の生死、死後の経過時間などがある。同じ魚であっても淡水産と海水産および種類により、また同じ食品の中でも部分によって差があることは、この表中の魚名別および卵白と卵黄の氷結点が示すとおりである。生鮮食品が冷却状態で取り扱われる場合は、その品温は必ずその氷結点よりも高く保持されていなければならない。

品温が食品の氷結点に達した後、そのまま冷却を続けると過冷却 (Super cooling) の現象が起きなければ、食品内の水分の一部が氷結晶に変わり始め、品温がより降下するに伴って氷結晶の量が増加してくる。この場合、食品の含有水分量をWとし、発生している氷結晶の量をw'とすると、w'/Wを氷結率といっている。食品の品温が、その食品の氷結点以下になっている場合の各品温と氷結率との関係は、西ドイツのRiedelによればタラ魚肉の場合には図1のようである。

このような関係から氷結点がおよそ-1℃ぐらいの食品の場合は、品温が-5℃あたりまで下がると、氷結率がほぼ80%か、それ以上になって官能的には凍結状態になる生鮮食品が多いことが知られている。この比較的狭い品温降下の幅において多量の氷結晶が形成するので、この品温の範囲は最大結晶生成温度帯 (Zone of maximum ice crystal formation) と呼ばれている。残りのほぼ20%の水分は凍りにくい数パーセントの水分を残して、品温が-30℃ぐらいまで降下する間に氷結するとされている。

しかし、-1℃よりも低い氷結点をもっている生鮮食品では、氷結率が80%になるためには-5℃よりも、もっと低い品温が必要である。西ドイツのHeissが調べた数種の食品の品温と氷結率との関係は図2のとおりであるが、これが、そのことを明らかにしている。すなわち、氷結点が-1℃あたりにある食品 (曲線1,2,3,など) は、-5℃で氷結率は80%

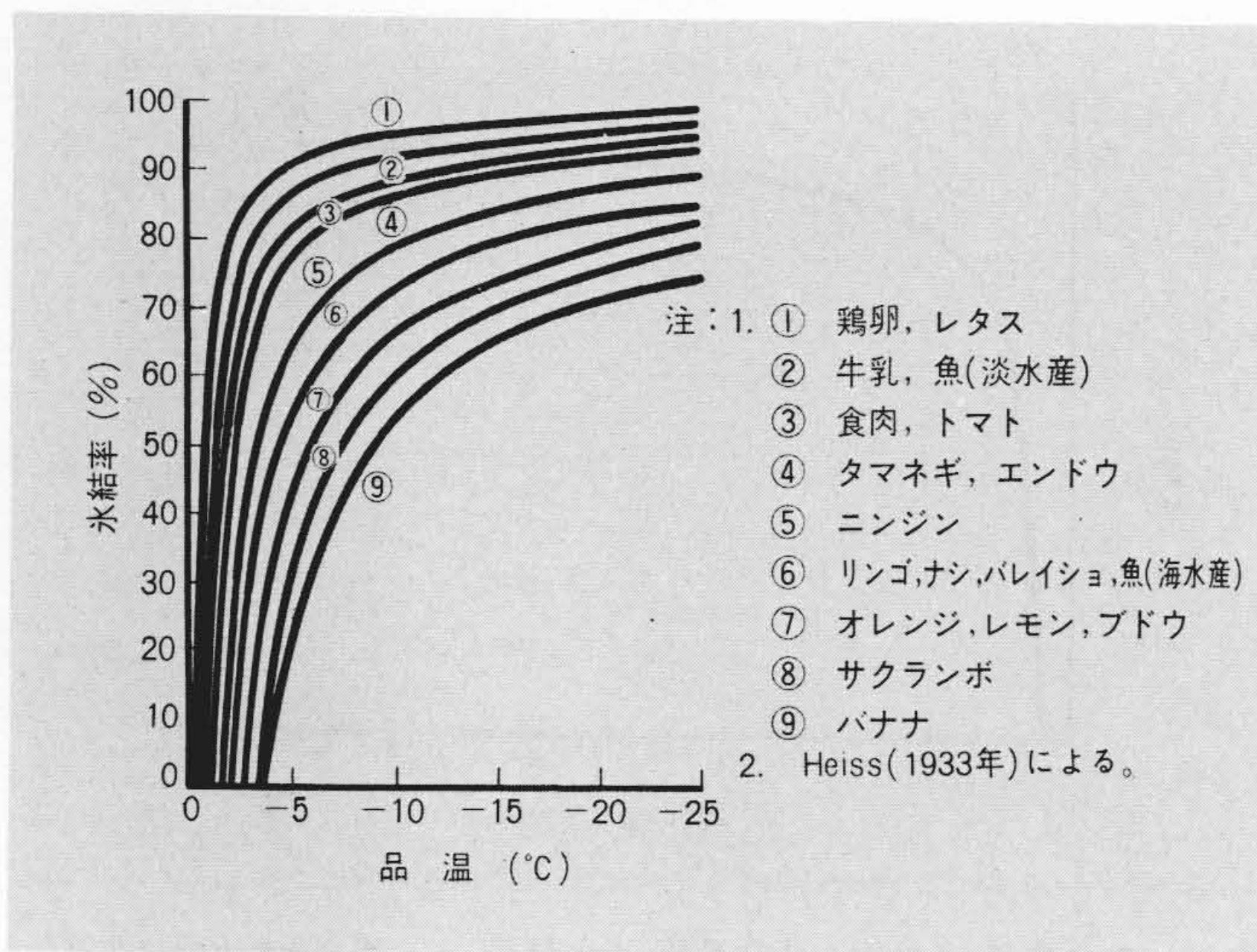


図2 数種の食品の品温と氷結率 氷結点が一℃あたりの鶏卵やレタスと、-5℃に近いバナナやサクランボでは、凍結品温が同じでも氷結率は異なっている。

Fig. 2 Relation between Increase in Ratio of Ice to Water Content (in Percent) and Lowering Freezing Temperature in various Perishable Foods

か、それ以上になっているが、氷結点より低い食品（曲線7, 8, 9など）では、もっと低温にならないと氷結率が80%になっていない。食品が凍結状態で取り扱われる場合は、その品温は少なくとも、この最大氷結晶生成帯よりも低く保たれていなければならないが、単に物理的な凍結状態であればよいというのではなく、品質の保護のためには、より低温であるほどよく、少なくとも-18℃以下になっていることが、今日では要請されている（4. 参照）。このために普通は品温は-20℃以下になっていることが多い。

図1の氷結率の曲線からわかるように、品温が-2～-3℃あたりに保たれていると、氷結率はまだ少ないからやわらかく凍結したいいわゆる半凍結状態である。このように品温が最大氷結晶生成温度帯の中間に保たれた生鮮食品の流通は、あまり一般的ではないが、かつては利用された時代もある。その後はほとんど普及はせず、すたれたと思われていたが近年になって、いろいろな事情から再び魚肉、食鳥、食肉などで試みられている。

2.2 生鮮食品の生死の状態例

生鮮食品は大別して動物性と植物性に分けられるが、コールドチェーンにおける取り扱いでは生鮮食品が生きているか死んでいるかによって低温の適用のしかたが異ならなければならないので、技術的な見地からは生体食品と非生体食品に区別して考えたほうが好都合である。

野菜や果実は、収穫後も呼吸作用を続けているから生体食品であり、その流通では健全な生きたままであることが必要である。野菜や果実は、ごく軽微な部分的の氷結ならば解凍しても、その組織は損傷を受けることなく生きていることもあるが、一般に凍結あるいは半凍結の状態にいったんなったものは解凍しても損傷がひどく死んでしまうから、そのコールドチェーンは必ず冷却状態によらなければならない。しかし、生体として流通する場合のほかに、冷凍食品のような凍結製品になっている際は、野菜や果実も凍結状態のコールドチェーンになってくるのはもちろんのことである。

魚肉、食肉、鳥肉などは、普通は非生体であるから、凍結や半凍結の状態になってもいっとうに支障がない。したがっ

てコールドチェーンにおいての状態は、冷却、凍結、半凍結に制約を受けることはなく、目的に沿う状態を適宜に選択することができる。けれども、貝類やエビ、カニなどの甲殻類は生きたままで取り扱われ、一部の高級魚では活魚輸送が行なわれているので、これは例外的なことになる。

以上のように消費の時点まで生体として流通する際は、利用できるのは冷却状態だけに制約されるのである。したがって、品温としては比較的高いことになる。この場合には流通間のまわりの空気その他の条件、たとえば湿度、成分、運動など鮮度（品質）に与える影響が、凍結や半凍結の場合に比べると大きくなるので、この点もあわせて考えたコールドチェーンがより効果的である。すなわち、これは空気の温湿度や成分を調整した一種の空気調和方法の技術の採用が望ましいことを意味している。すでにC.A.冷蔵とかC.A.式輸送といった空気組成を人工的に変えた方法の実用化が見られているのはこのためである（3. 参照）。空気の湿度、成分、運動の影響は、品温が低くなるほど小さくなるので、半凍結から凍結へと品温がより低くなった場合には、このような特殊な方法による経済的メリットはさほど目立たないようである。このような関係から生体食品の場合は、単に品温の管理だけでは完全でないので技術的にはむずかしく複雑である。

2.3 低温処理の時期と速さ

これは生産された生鮮食品に必要な冷却、凍結、半凍結の状態になるまで品温を下げる処置、具体的には予冷（Pre-cooling）および凍結（Freezing）の作業に着手する時期と作業終了までにかかる時間のことである。これはコールドチェーンの第一段になるものであって、これの適否は、以後のコールドチェーンの条件が同じであったとしても、最終的な鮮度（品質）を大いに左右することになるから、非常に重要である。

一部の例外的な食品もあるが、一般的にいえることは、収穫、漁獲あるいは屠殺後には、なるべく早く予冷あるいは凍結に着手して、できるだけ短時間内に所定の品温にまで下げることが品質にとっては好ましいとされている。換言すると、どんな生鮮食品も流通間に品温を所定のところまで時間をかけてしだいに下げるようにするのではなく、これをなるべくすみやかにこなして、所定の品温になったものが流通の過程に入るようにするのである。このためにとられる作業が予冷あるいは凍結である。この辺の事情をもっと具体的にいえば、魚は漁船内でとりたてのものをすぐ予冷ないし凍結すること、野菜や果実は収穫の現場か、おそくとも現地の集荷所に入ったらすぐ予冷すること、食肉やブロイラーは屠殺解体後に直ちに予冷することが理想的である。予冷や凍結のための施設が同じであっても、時間が経過してから利用された場合は、最終的な品質（Ultimate quality）が劣っている。

一部の例外的な食品といったのは、きわめて新しい魚肉片や食肉片を死後硬直前に凍結すると、品温が低く冷蔵期間が短いときは、解凍の際にはなはだしく収縮硬化して多量の液汁（Drip）を失う有名な現象、すなわち解凍硬直（Thaw rigor）を起こすからである。この場合でも、骨付きの形状であればあまり支障がないが、肉片のみのときは死後硬直後まで待つて凍結すればよい。また野菜や果実の種類の中には、収穫後しばらく放置して、皮から余分の水分を蒸発させたり、すり傷を治療させるキュアリング（Curing）という予措をさせてから冷却したほうがずっと成績が良いものがあるからである。この例としては、ミカン、バレイショ、サツマイモなどがある。

3 冷却状態の利用

この状態で流通する生鮮食品には生体食品として野菜および果実それに鶏卵 (Shell egg) があり、非生体食品としては魚肉、食肉、鳥肉がある。いずれも予冷によって品温は所定のところまで下げてあるが、この品温を流通間に保つためには、外周から加わる熱を除かなければならない。しかも野菜や果実の場合は、呼吸作用が続いているので間断なく炭酸ガス、水分および熱の発生があるので、これらがたまらないように除く処置を採らなければならない。この熱は呼吸熱といわれ、呼吸速度が速いほど単位的时间と数量当りの発熱量が大きくなる。呼吸速度は野菜や果実の種類で異なるが、そのほか、品温や成熟度によっても大きく左右される。果実の中には成熟期に入ると図3で示すように、呼吸速度の急激な上昇をみる有名な Climacteric rise という現象があるものが知られている。野菜と果実は品温が高くなると、呼吸速度が速くなるので発熱量も多くなる。正常な呼吸作用では呼気中の炭酸ガス1 g 当り発熱量は2.57kcalである。これから計算すると各種の野菜と果実の呼吸熱の大きさは表2のようである。これだけの余分に加わってくる熱を除くために、同じく冷却状態であっても食肉、魚肉、鳥肉のような非生体食品の場合に比べて、冷蔵や輸送などの設備の冷却装置の能力を大きくしなければならない。

炭酸ガスが、空气中にたまることは、いくらかC.A.冷蔵的な効果を生むことが期待できるが、あまり濃度がふえることは、生体食品の中で炭酸ガス耐性の弱いものには有害であるし、作業員に対しても酸素欠乏による事故発生の危険性があるので、適宜に換気の必要性がある。また冷却冷蔵中に野菜、果実の場合には、エチレンその他のガスの発生があって成熟が促進されることがあるので、これも除く必要がある。また呼気中に含まれて水分が排出されることは、空気を多湿にして発カビの原因になることがあるので、これも適度に除かねばならない。

表2 野菜と果実の呼吸熱(1,000kg, 24時間当りkcal) 呼吸による発生熱量は果実や野菜の種類によっても異なるが、品温が高くなるとふえてくる。

Table 2 Respiration Heat of Vegetables and Fruits (kcal per 1,000 kg, 24 hours)

青果物別	温度(℃)	呼吸熱	温度(℃)	呼吸熱	温度(℃)	呼吸熱
リンゴ	0	210	2.2	280	4.4	390
バナナ	12.2	700~2,400	15.0	740~3,800	20.0	1,800~7,700
洋ナシ	0	150~210	12.2	600~1,940	15.5	2,200~3,320
ブドウ	"	280	4.4	440	7.2	700
モモ	"	420	"	760	"	1,100
オレンジ	"	250	3.5	380	15.5	1,390
サクラナボ	"	330	15.5	2,770~3,320	—	—
グレープ・フルーツ	4.5	300	"	770	—	—
イチゴ	0	890	7.2	1,500~2,700	1.5	2,100~4,200
ブラム	"	420	4.4	620	7.2	830
ハナヤサイ	-0.6	480~1,500	"	1,200~1,670	10.0	2,500~3,000
キャベツ	0	550~780	"	950~1,280	"	1,640~2,050
レタス	"	660~1,070	"	770~1,600	"	1,500~3,000
セロリ	"	300~450	"	570~770	"	1,200~1,670
ホウレン草	"	800~1,430	"	1,900~3,000	"	3,900~5,500
バレイショ	"	550	"	200	21.0	540
タマネギ	"	165~275	—	—	—	—
エンドウ(さやなし)	0.6	1,800~2,260	3.3	3,000~3,900	10.0	4,200~7,100
タウジサ	0	330~450	4.4	570~600	"	700~830
トマト	12.2	890~1,300	—	—	—	—
メロン	0	55	15.5	1,000	—	—

このほか、野菜や果実には低温障害 (Chilling injury) といわれている現象があって、あまり低い品温に長く保つことが危険なものがある。これは低温にさらされたときに病的な症状を起こして、そのために変質することで、この部分は二次的に微生物におかされて、商品価値を失うことになる。その原因は生体内の正常な生理作用のバランスが低温によってくずれることにあるが、その機序については研究が進められてだんだん明らかにされてきつつある現状である。しかしこれは、すべての種類に必ず発生をみるというのではなく、低温に対する感受性の弱いものに多発している。

危険な温度範囲と症状は異なっている。バナナ、レモン、ライム、アボカド、ナス、キュウリ、サツマイモ、バレイショ、トマトなどは、この害を受けやすく、これらの中の数例について危険温度と症状を掲げると表3のようである。したがって、野菜や果実の場合には呼吸速度の抑制効果をよくするためには、それぞれの氷結点にできるだけ近い冷却状態にしたいのであるが、この低温障害を避けるために限界があることになる。

冷却状態のコールドチェーンにおいては、2.2において触れておいたようにC.A.冷蔵とかC.A.的輸送という方法が効果をあげている場合が少なくない。このC.A.冷蔵は人工的に組成を変えた空気 (Controlled atmosphere) 中で冷蔵する方法であって、1919年にイギリスの Kidd と West が行なった研究がその端緒になっている。イギリスではリンゴを対象にして実用化を見たのは1929年のことであるが、1938年にオランダ、1948年にデンマーク、次いでアメリカへと普及し、わが国では1963年になって初めて青森と岩手の両県下でやはりリンゴ用に実施されるようになった。人工空気の組成としては炭酸ガスおよび窒素ガスのような化学的に不活性なガスの濃度を濃くし、その増加分だけは酸素が減っているものであるから、いわば低酸素空気の利用である。ヨーロッパやアメリカではリンゴや洋ナシの品種の中にはC.A.冷蔵が、普通の冷蔵に比べてはるかに優秀な成績をあげているものがあり、

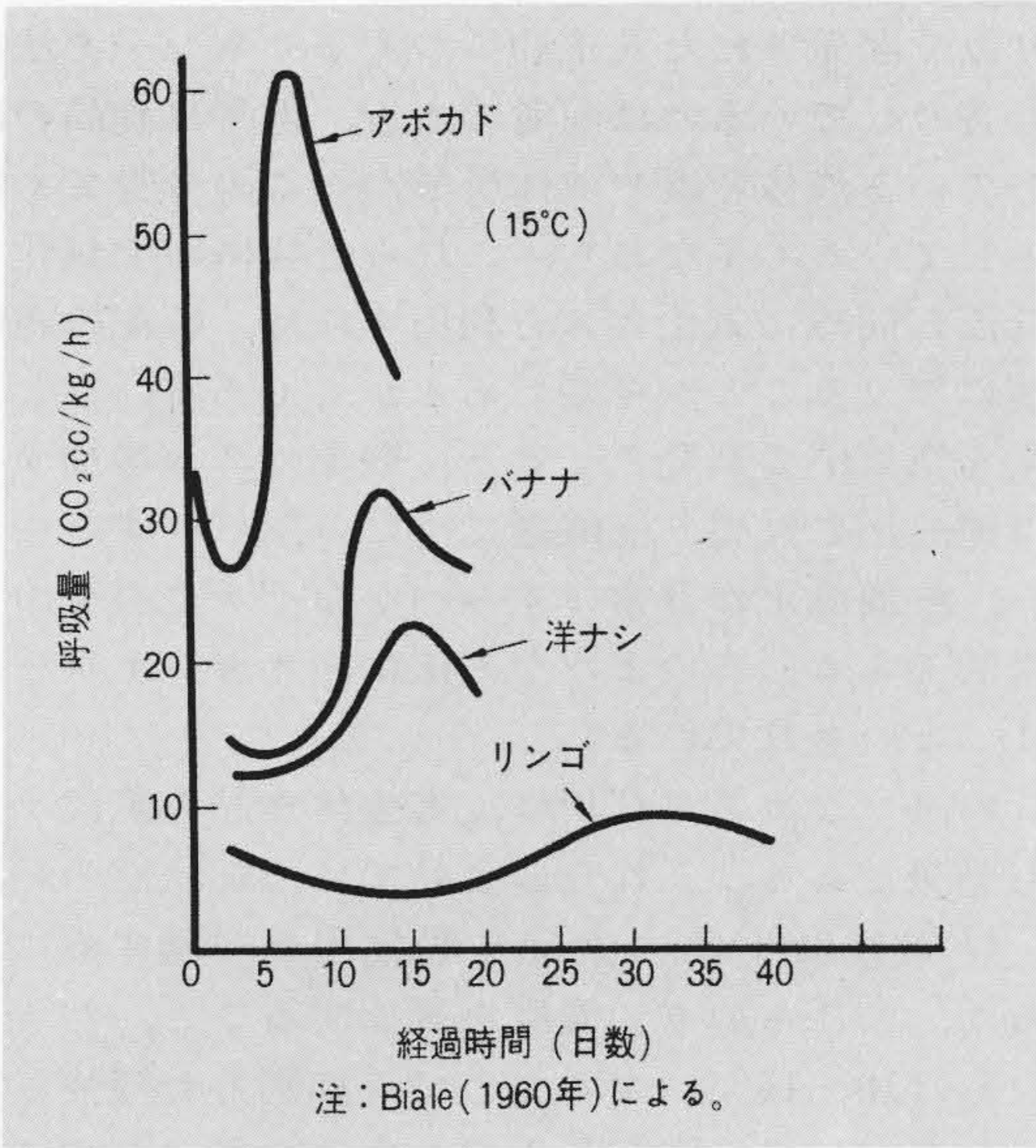


図3 果実における呼吸速度の急昇 (Climacteric rise) の数例 呼吸速度とその急昇の大きい熱帯産のアボカドやバナナは、リンゴに比べて日持ちがわるい。

Fig. 3 Examples of Climacteric Rise in Respiration Velocity seen in Some Fruits

表3 低温障害の数例 表中の温度は普通の電気冷蔵庫内でも経験するので、ここに長く置くことは低温障害発生の心配がある。

Table 3 Examples of Low Temperature Injury in Some Vegetables

品 名	温 度	症 状
バナナ (緑色)	13℃以下	後熟がうまく進まない。
〃 (黄色)	12℃以下	果皮が褐変する。
トマト (緑色)	13℃以下	色つきがよくなる。
サツマイモ	〃	皮が黒褐変し、肉質も悪くなる。
ナス	7℃以下	果皮が軟化し褐変する。

表4 C.A.冷蔵の条件の数例 C.A.冷蔵の際の空気の状態は、果実の種類のほか産地によっても差がある。

Table 4 Examples of Conditions for C.A.Cold Storage of Fruits

果 実		空 気			冷蔵期間 (月)	国 別
種別	品 種	温度(℃)	炭酸ガス(%)	酸 素(%)		
リンゴ	Cox's Orange Pippin	3.5	5	2.5	4～5	ドイツ、オランダ
	〃	〃	0	2.0	5	イギリス
	Laxton's Superb	4.5	10	2.5	6～7	〃
	〃	〃	6	14	〃	オランダ
洋ナシ	Bartlett	1	〃	15	5	イギリス
	〃	-1	0	2～5	3～4	〃
	〃	0	5～10	2.5～3.5	—	〃

注：I.I.R. (International Institute of Refrigeration) の資料による。

その実用化が普及している。わが国ではリンゴのほかには富有ガキ、二十世紀ナシなどが対象である。同じ果実であっても品種や産地その他のことで生物的素質が影響を受けるためか、最適の温度や空気組成の組合せが異なり、一律に通用する条件が得られていないことは、適用面では技術的に不便であり、かつ難点である。たとえば表4で見られるとおりである。

適当な人工空気組成をつくる方法は、いろいろあるが、果実自身の呼吸作用でたまる炭酸ガスと減る酸素を利用する原理に立脚したいわゆるイギリス式の在来法と後年になってアメリカで開発された人工的につくるゼネレータ法に大別され、最も普及しているのは前者である。近年は食品の凍結用に進出している液体窒素や液体炭酸が、この分野でも利用されようとしている。すなわち、これらを空气中で気化させて生ずる低温と同時に気化ガスを利用すれば、C.A.冷蔵的な条件を迅速につくることが可能であるからである。たとえば、液体窒素を空气中で蒸発させると、窒素ガスが増加するに伴い酸素は追い出されて、低酸素で冷たい空気がすみやかにできるから、鮮度低下が非常にすみやかなイチゴの予冷と輸送には効果的である。このような方法は、オキシトロール法(Oxytrol)といわれている。

このようなガスの利用は、非生体食品の魚肉や食肉に対しても効果がある。これらの食品では冷却状態の範囲の品温では、好気性微生物の繁殖や酸化用を抑制するには不十分であるが、これらのガス濃度を高くすること、たとえば炭酸ガスならば10～15%にすることで、抑制力が補強されるのである。したがって、同じ利用でも生体食品に対する呼吸作用の抑制とは目的が違っている。

冷却状態で商品価値が保持できる期間は、生鮮食品の種類や低温処理のしかたいかんによってかなり差がある。同じ生体食品でも軟弱な葉菜類は1週間足らずの短期であるが、リ

ンゴやバレイショ、鶏卵のように数ヶ月間から半年間に及ぶものもある。非生体食品では低温障害にかかる心配がないので、氷結点ぎりぎりまで品温を下げる事が可能であり、この点では生体食品に比べて取り扱いがずっと簡単である。条件がよくそうと、牛枝肉などは30～40日間はほぼ商品価値をもっており、このあたりが最長の限界であろう。魚類も種類によってかなり差があり、一般的には氷を併用して、およそ1週間か10日間までがよいところで2週間になると、かなり鮮度の低下が目だつものが多い。流通にかかる時間があまり長くない短距離の輸送や配送の際は、氷の利用が非常に効果をあげている。使用されるときの水の形状には角氷 (Blok ice)、砕氷 (Crushed ice)、フレーク氷 (Flake ice)、雪氷 (Snow ice)、リキッド・アイス(Liquid ice) その他などがあり、それぞれ適した用途をもっている。いずれの形状であっても、氷のもっているおもな特性として(1)品温を非常に速く降下させること、(2)解ける際の冷却力が大きく、解けるまでに時間がかかるので、その間は冷却力が維持すること、(3)空気が多湿になるので食品の乾燥が少ないこと、(4)品温が下がりすぎて食品を誤って氷結させる心配がないことなどがあげられる。欠点としては、氷が解けて生じた水にぬれてはぐあいが悪くものには使えないこと、氷の重量とかさだけがよけいになること、排水処理をとらなければならないことなどがあげられる。氷を食品にかけて、冷却したり、そのまま貯蔵する方法は氷蔵 (Icing)といわれるが、多くの場合は外気の熱で氷が解けるとむだであるから、氷が徐々に解ける程度の冷室内で氷蔵されることが多い。氷蔵の際に氷の特性を生かすようにすれば、冷却状態を利用する場合の冷却手段の中では非常に良いものである。

4 凍結状態の利用

十分に低い品温の凍結状態に保っておけば、その期間が冷却状態や半凍結状態に比べて、ずっと長期にわたっても解凍した際の性状は、官能のおよび科学的には凍結直前のそれに近いものに再現できること、寄生虫たとえば牛肉中の条虫、豚肉中の旋毛虫、魚肉中のアニサキス、食肉中の原虫トキソプラズマなどが死滅すること、しかも、この方法は少数の不適當なものおよび凍結前の処理が必要で、それによってなまの性状が変わる一部のものがあるが、それらを除くとほとんどすべての生鮮食品に適用ができることがなによりもすぐれた利点である。凍結に不適當なものとしてはパリパリした食感が尊ばれるサラダ用のなま野菜類がその例の一つである。

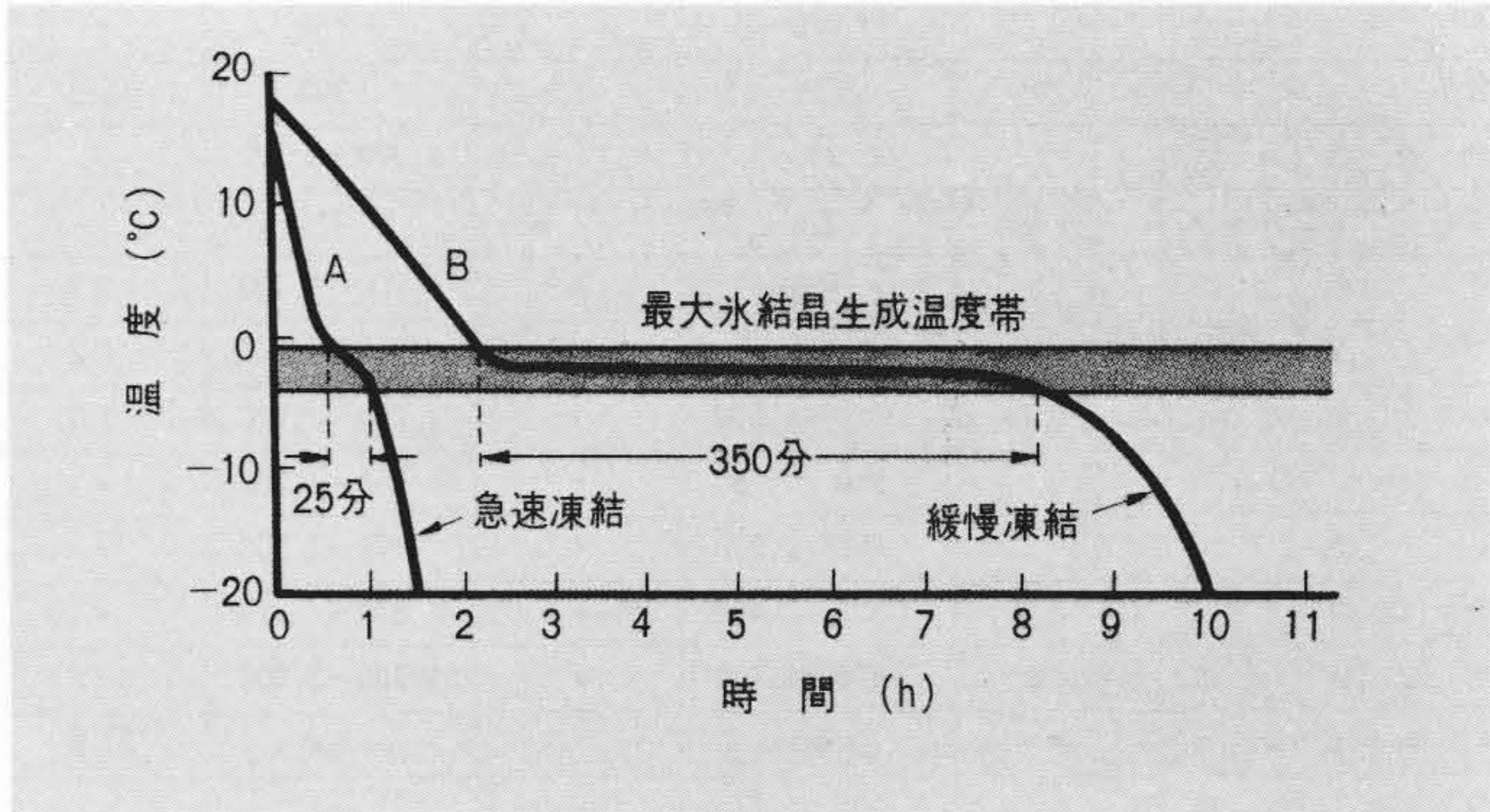


図4 急速凍結と緩慢凍結の冷凍曲線の比較 最大氷結晶生成温度帯の通過にかかる時間が曲線Aのように早いと氷結晶の発生状態がよい。

Fig. 4 Comparison between Quick Freezing Curve and Slow Freezing Curve

これらは凍結すると、その食感を全く失うからである。凍結前に必要な処理の代表的な例としては、野菜のブランチング（熱湯またはスチームによって酵素を不活化するための処理）や果実の加糖処理があげられる。このような処理によってなまとは少し性状が変わったものになるが、商品的価値は失ってはいない。品温が十分に低いと、生鮮食品を腐敗に導く微生物の繁殖や分解作用は事実上停止すること、品質の低下に関係する酵素による分解作用や酸化作用は、酵素の活性が弱くなるか、失活するのでほとんど進行しないこと、酵素が関与しない自動酸化のような化学反応や物理的な乾燥の進捗がおそくなることなどによって以上のような長期間の品質保持の効果が生まれるのである。すでに 2.1 で述べてあるように最大氷結晶生成温度帯の下限温度 -5°C 以下まで品温が下がっておれば物理的には凍結状態になるものが多いが、商品としての凍結状態の利用では、品質の保護のためには少なくとも -18°C 以下であることが国際的に勧告されており、このような品温まで凍結することは深温凍結 (Deep freezing) と呼ばれている。このために近年は一般には品温は -20°C から -30°C に保たれて流通しているものが多くなっている。

確かに、このようなすぐれた利点はあるけれども、その反面に欠点ともいえる問題点がある。それは凍結状態になったことに基づく別な変化が伴い、条件が悪いとこれがひどくなって官能的な品質を著しく低下させて、商品的価値をそこなうこともあるからである。このような変化を発生部位で大別すると、凍結食品の表面と内部に分かれ、おもなものは次のとおりである。

表面……………乾燥と酸化による冷凍やけ (Freezer burn)

内部……………肉質の損傷

タンパク質の変性

ドリップ（液体分離）の発生

これらの変化の中では冷凍やけだけは凍結状態のままで、その発生と進行が認められるが、他の変化はすべて解凍してみないとわからないものである。いずれも凍結状態になっている食品中に存在する氷結晶が直接または間接の原因になっているので凍結がもたらす副作用といってもよからう。

冷凍やけは凍結食品の表面にある氷結晶が昇華して水蒸気になって空气中へ散逸し、その部分が著しく脱水され脂肪などの成分に空気が作用して酸化が強度に進むために起こる現象であるから、乾燥のひどいものと解することができる。したがって、空気を完全にしゃ断すれば防がれる。このために手段としては、気密で密着する包装やグレーズ（食品の全表面を薄い氷膜で包むこと）などが効果をあげている。他の変化は、いずれもやはり、肉質中に発生した氷結晶に基づくものである。すなわち、水が氷結すると体積がほぼ9%ぐらいふえるので膨張圧力が生ずること、氷結によってその部分は脱水を受けて濃度が強くなるのが原因となって、物理的あるいは化学的な変化を起こし、それが品質に影響を与えるからである。この影響の様相は氷結晶の状態いかんによって左右されるが、状態が良ければ、たとえ科学的な測定や観察では変化が検知されても、官能的な品質の評価にはほとんど支障はない程度の小さいものであるから商品としては支障はない。

良い氷結晶の状態というのは、なるべく微細で無数の氷結晶が細胞内部に均一に分布していることである。反対に大形で少数の氷結晶が細胞の外側にできることは、肉質を形成している細胞組織の構造に圧傷を与え、かつ細胞の内容物にも物理的ないし化学的変化をもたらすので、その結果として肉質の損傷、タンパク質の変性、ドリップの発生が促進され

る。したがって、氷結晶が良い状態であることがきわめて重要である。この状態を左右するのは、まず凍結速度が速いかおそいかであるが、消費するまで凍結状態におかれている間の品温いかんとその管理も同様に影響する。それは凍結の際にできた氷結晶は、そのまま安定しないでこの間に再結晶を行ない、その結果として氷結晶は、小形が消えて大形がますます大きく成長しその数が減る傾向があり、このために凍結直後の氷結晶の状態が良くとも凍結状態が長期にわたると、その間にだんだん悪い状態になるからである。これはいわゆる氷結晶の成長という有名な現象である。

凍結の際には品温はなるべくすみやかに最大氷結晶生成温度帯を通過することが、氷結晶の状態を良くするために効果的であるとされている。急速凍結 (Quick freezing) の必要性が唱えられてすでに久しいのはこのためである。凍結速度の定義については諸説があるが、最もわかりやすいのは最大氷結晶生成温度帯の通過にかかった時間による表現である。これによると図4中の冷凍曲線Aのように30分間以内の場合が急速凍結と呼ばれている。冷凍曲線は凍結の際に食品の中心部の品温が時間の経過に伴い降下する状態を示すものである。

氷結晶の成長が進行するためには時間的な余裕が必要である。その意味からすれば、凍結の行程よりもその後の消費に至るまでの流通期間のほうが一般にずっと長いから、この間の変化をできるだけ抑制することがたいせつである。このためにはできるだけ品温を低く保つこと、品温の上下変動の幅を狭くし、その頻(ひん)度を少なくすることが有効である。先に述べた深温凍結に関心が集まり、近年はだんだんと低温化の傾向になっているのはこのためである。この低温化はひとり氷結晶に関するばかりではなく、タンパク質の変性、ドリップの発生、乾燥と酸化などを軽減するためにも有効な手段である。また十分な低温化が変色や脂肪の酸化などの防止に著効があることも知られている。たとえば、マグロ肉の美しい赤色は今まで凍結状態にすると褐(かつ)変したものであるが、この防止が $-40\sim-50^{\circ}\text{C}$ の凍結状態に保つことによって可能であり、すでにわが国では実用化されて好成績を収めている。そのほか、脂肪の多い魚類では脂肪の酸化を防ぐために -30°C ぐらいの品温が採用されているのもこの

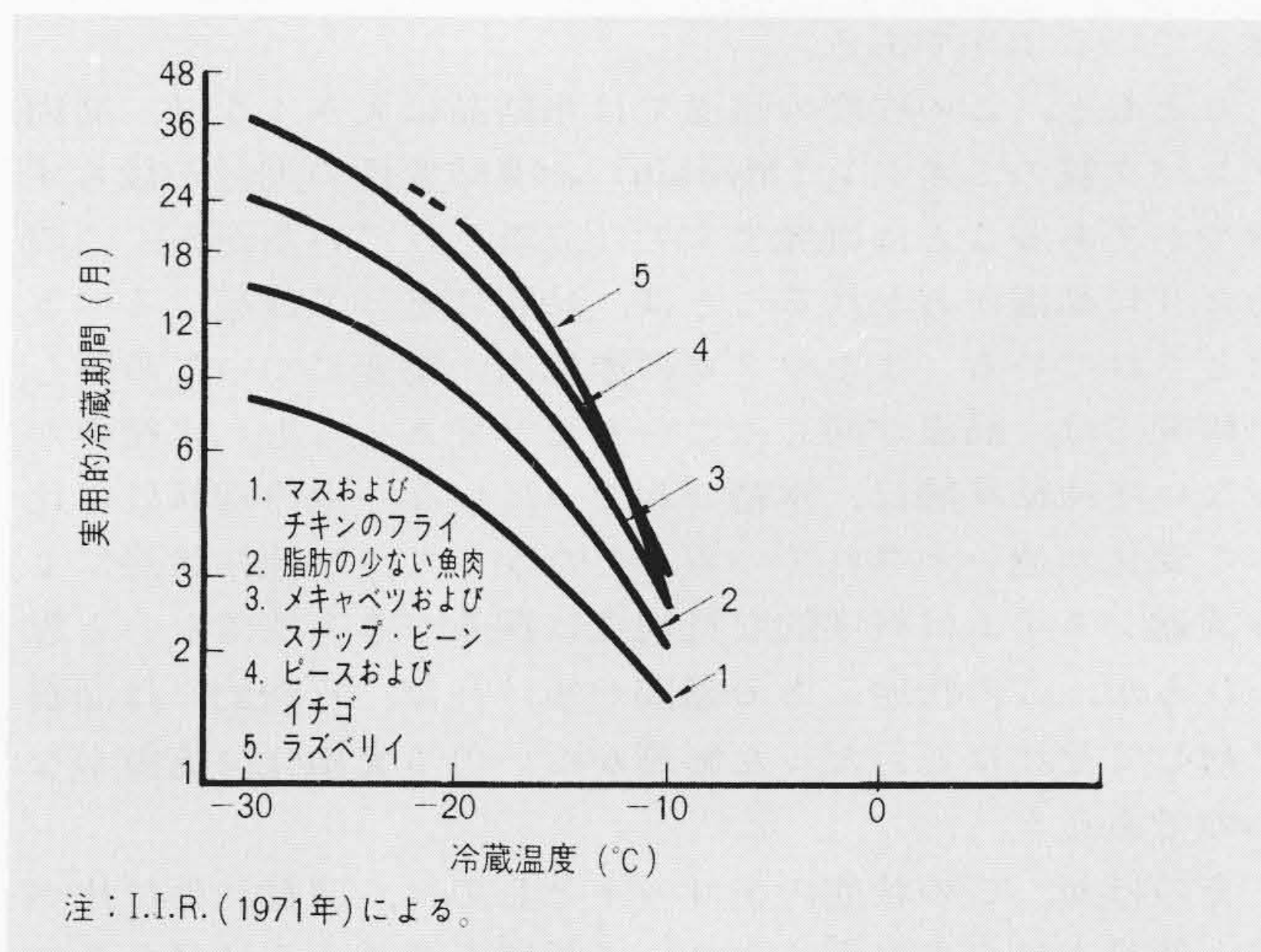


図5 冷凍食品の品温と実用的冷蔵期間 品温が下がるほど実用的冷蔵期間は伸びるが、同じ品温では脂肪の多いものは短期間である。

Fig. 5 Practical Cold Storage Period and Temperature of Frozen Foods

例の一つである。このように、品質保持期間は品温により左右されるので、多種の冷凍食品を対象にして両者の関係が調べられ、得られた多くの資料に基づいてT.T.T.(Time Temperature Toleranceの略)という概念が提唱されている。

図5はこの概念のもとになる資料の一部であるが、いずれも品温の低下によって商品価値を失うに至るまでの実用的冷蔵期間が伸びていることが明らかである。

このような低温化の傾向は確かに品質のためには望ましいことではあるが、コストはより低温になるほど高くなるので経済性との折合いが問題になってくる。

このほか、凍結状態の利用における欠点の一つに解凍の問題が残っている。解凍は、凍結の逆で熱を与えて氷結晶を水にもどすことであるからコールドチェーンとは関係がないようであるが、凍結状態にあった食品の最終的な品質の良否は解凍をまっしてはじめて明らかになり、また解凍の条件の適否が、これを左右することもあるという意味からコールドチェーンの一部として考えるべき問題である。このような解凍の技術的なことばかりでなく、解凍には時間がかかるということも加わって、いっそう煩わしい問題になっている。だからこれを解消または緩和することができればその意義が大きい。この点については、次に述べる半凍結状態の利用も考慮に価するものであろう。

5 半凍結状態の利用

生鮮食品の品温が、その氷結点以下になっても、まだ氷結率がそんなにふえていないとやわらかい半凍結状態である。その品温が仮に -3°C ぐらいであるとすると、鮮度や品質のモチは -20°C 以下の凍結状態ほど長くはないが、 0°C 以上の冷却状態よりも延びてくる。たとえば、魚肉では氷蔵と併用した冷却状態では、せいぜい1週間ぐらいであるが、 -3°C ぐらいの半凍結状態にすると20日間ぐらいまで延びてくる。したがって、あまり長い流通期間を予想しなくてもよい場合は、わざわざコストのかかる凍結状態にしなくても、この半凍結状態でもまにあうのである。しかも氷結率が少ないので解凍の手間と煩わしさがかなり緩和され使いやすくなるという点が大きなメリットである。近年は凍結状態の流通でも、末端の段階では品温を上げて半凍結状態にして取り扱っている例が見られるのは、このような利点が一つの理由になっているようである。

もともと、この程度の品温では氷結晶は大きくなり、筋肉タンパク質のミオシン(Myosin)の凍結変性の進行が最もすみやかであることは研究ですでに立証されているから、このあたりに品温がおかれることは、品質にとっては避けるべきだとされている。またマグロの赤色肉の褐変についての新しい研究では、品温が同じくこのあたりであっても、氷結率が少ない半凍結状態は、氷結が起こっていない過冷却状態に比べて変化が速いとされている。したがって、半凍結状態による流通システムは科学的な見地では採るべき方法でないと思われるが、この状態にある期間が短ければ、官能的には品質に対してそれほど目だった影響がないので実用化に支障がないのであろう。

そのほか、この状態のメリットとしては、凍結状態に比べて、外見上はなまに近くきれいで購買心をそそるに足りること、低温設備が安くできることなどがあげられる。しかし品温が少し上がれば冷却状態になること、少し下がれば凍結状態になるので、品温の管理が容易でないこと、売れ残った場合の品質低下を防ぐ処置がないことなどはデメリットであろ

う。利用範囲は、現状では魚肉、鶏肉、食肉に限られ、特にここ数年前からは、ブロイラーのなま肉を生産工場から消費地に輸送する際に従来とられていた氷蔵に代わって、この状態の利用がアメリカでは多くなり、わが国でも最近に至り実用化が見られている。この場合は目的地に到着したときにはほとんど冷却状態のなまの性状になっている。すなわち、半凍結→冷却の状態変化である。液体窒素や液体炭酸はクライオゼニク凍結方法(Cryogenic freezing)と称して、一般の機械冷凍では得られないか、得にくい範囲のごく低い温度を利用して、急速凍結を実現するために採用されているが、この方法は数年前からブロイラーを連続作業によって、短時間内に半凍結状態にするためにも利用されている。

この半凍結状態にするには、冷却→半凍結あるいは凍結→半凍結の状態変化のいずれかが利用できる。またその状態も氷結率はごくわずかで、ほとんど半凍結らしく見えないものもあり、氷結率がやや多く明らかに半凍結状態と認められるものもあってさまざまである。そのためか、この状態に対する呼び方も、チルド(Chilled)、スーパー・チルド(Super chilled)、ディープ・チルド(Deep chilled)、半凍結(Partial frozen)などがあり統一されていないし、これらの用語間の意義の区別もはっきりしていない。

6 結 言

以上はいわゆる生鮮食品を冷却、凍結、半凍結の3状態に分け、それぞれを利用する際の得失、それに新しい動向も加えて現状をソフトウェア的な立場から展望して述べたつもりであるが、対象を欧米なみに「いたみやすい食品」と考えるならば、これには加工食品の一部、たとえばかまぼこ、ハム、ソーセージ、豆腐、多種の調理食品などが含まれてくる。これらはいずれも非生体食品として、その流通ではコールドチェーンシステムの採用が、生鮮食品に劣らず重要である。これらの加工食品は従来は商品の寿命を伸ばすためには、防腐剤や保存剤の添加に依存してきているが、これは食品公害の見地からは問題になってくる。したがって、これらを使用しない純正な姿の加工食品が要請される傾向がある。この場合に添加する薬剤に代わって効果が期待できる実用的な技術はコールドチェーンということになる。これによってコールドチェーンの対象食品の領域はさらに広がることになる。

また、コールドチェーンの各段階は、冷蔵庫や末端の売場のようにある期間は滞留するものと、集荷、輸送、配送のように移動するものとがあるが、ソフトウェア的問題は原理的には共通するものがある。すなわち、輸送は移動冷蔵庫と見なしてよいのである。そのほか、たいせつなことは、各段階の接続の時点における取扱いと作業である。それはここで失敗すると各段階における取り扱いが、いくら高いレベルのもとに実施されていても、それが水泡(ほう)に帰すことになるからである。このために移動と滞留のくり返し、たとえば、輸送→冷蔵→配送→デポー→配送→売店の行程では、各段階の接続点でFirst-in, First-out(冷蔵庫や販売ケースでは先にはいった順に出庫ないし販売すること)、Quick-in, Quick-out(冷蔵庫や販売店での積荷と積卸作業を待たないですぐ行なうこと)の原則が守られるような施設のもとで、その作業が進められなければならない。これはある程度までは、作業側側のソフトウェア的な良識と注意によって可能であるが、やはり基本的には施設や設備のハードウェア的なことにも関連している問題であるから、ここでも両者のよき調和が必要である。