

食品の安全性とリスクアナリシス

はじめに

一頭目の BSE¹ 感染牛発見（2001 年 9 月）以来、特に「BSE 問題に関する調査検討委員会」の報告書以来、わが国でも「食品の安全性」や「リスクアナリシス」、「リスク分析」などという語が新聞やテレビなどのマスメディアに頻繁に登場するようになってきた。また消費者の「食品の安全性」に対する関心もこれまでになく高い。

「BSE 問題に関する調査検討委員会」の報告書は、わが国政府の食品安全行政システムを改善すること、リスクアナリシスを導入することなどを勧告した。それに基づいて、「食品安全基本法」が 2003 年に成立し、7 月には食品安全委員会の発足、農林水産省の改組による消費・安全局の設置や厚生労働省の医薬局食品保健部の医薬食品局食品安全部への改称が行われるなど食品安全行政の強化改善策がとられた。「食品安全基本法」は、食品安全行政にリスクアナリシスを導入することを述べているものの、わが国には食品の安全性にかかわるリスクアナリシスに関する知識経験が乏しいだけでなく、食品安全の専門家も極めて少ない。また、マスコミで専門家とよばれている人々は法律、経済、農業経済専攻の学者か、医者であるという世界でも特異な状況にある。

食品の安全性においては、Codex Alimentarius Commission²（国際食品規格委員会）が唯一の国際的規格設定機関とされている³。本稿は、食品安全に興味を持つ人（自然科学専攻・非専攻を問わず）を対象に、食品の安全性に関する考え方、Codex におけるリスクアナリシスに関する議論や決定、食品の安全性確保における今後の課

-
1. Bovine Spongiform Encephalopathy, 牛海綿状脳症：詳細については http://www.maff.go.jp/soshiki/seisan/eisei/bse/bse_top.htm を参照のこと
 2. 国連食糧農業機関（FAO）と世界保健機構（WHO）によって 1962 年に設立された政府間機関で、消費者の健康の保護と公正な食品貿易・取引の促進を主たる目的として、食品の規格・基準や規範、ガイドランなどの作成を行う。現在 169 カ国が加盟している。日本政府は 1966 年に加盟した。（<http://www.codexalimentarius.net>）
 3. 世界貿易機関（WTO）の衛生と植物防疫措置に関する協定（Agreement on the Application of Sanitary and Phytosanitary Measures, World Trade Organization, Geneva, 1994, http://www.wto.org/english/docs_e/legal_e/15-sps.pdf）は、「食品安全にかかわる国際規格・基準とは Codex の勧告である」と明確に述べている。さらに WTO 加盟国の食品安全にかかわる措置は、Codex の勧告が存在するならば、それに基づいていなければならない、としている。

題などについて解説するとともに、その基礎となる考え方を理解する助けを提供することを目的とする。

食品安全に関する基本的考え方

Codex の「食品衛生に関する一般原則」⁴は、「食品の安全性 (Food safety)」を「予期された方法で調整かつ / または摂食された場合に、その食品が消費者に害を与えないという保証」と定義している⁵。

量の問題

2001年9月以来、食品の安全性に関する記事やインタビュー、講演会などが、以前に比べて飛躍的に増加した。しかしながら、その中にいろいろな気になる点が存在する。その最たるものが、いわゆるゼロリスク志向である。よく「危険な汚染物質が含まれている食品が売られているのはけしからん」という論調の新聞・雑誌記事が見られる。しかしながら、何らかの意味で危険性がある物質を一切含んではいけないならば、販売可能な食品はなくなってしまう。このような記事の背景には量的な感覚がなく、裁判における「有罪または無罪」と同様の二律背反の感覚で「食品安全」が捉えられているようだ。もし、この物質または食品は絶対に安全、あの物質または食品は絶対に危ない、というような二者択一が可能であれば、食品安全行政はきわめて楽であろうが、実際には連続的なスケールで考えなければならない。

食べた人の健康への影響という意味で「食品の安全性」を考える場合に最も重要な点は、「絶対的に(どのような量やどのような濃度・純度のものを摂取しても)安全な食品はあり得ない」ということと「食品や物質が安全かどうかは量の問題である」ということである。毒性が高い物質の場合は、少量しか摂取しなくても健康に悪影響がある可能性があるし、毒性が低い物質でも、ある一定以上摂取すれば健康に悪影響がある可能性がある。たとえ栄養素のように生命を維持するために摂取する必要があるような物質であっても、過剰に摂取すると健康に悪影響があり、死に至ることさえありうる。過剰に摂取した場合の健康への悪影響がビタミン類やミネラル類において報告されている。とくにセレンやビタミン B6 のように、栄養的に摂取が必要とされている量の最大値と、毒性を示す最小量が大きくは変わらない物質の場合、注意が必要である。必要量が摂取できているにもかかわらず、栄養素だから多くとるほうがいいと思って大量に摂取してしまうと、毒性を示す最小量を超えてしまう可能性もある。さらに、ふつう「食品安全」の文脈では語られないが、

-
4. International Code of Hygienic Practice - General Principles for Food Hygiene (CAC/RCP 1-1969, Rev.3-1997) (<http://www.codexalimentarius.net> よりダウンロードできる)
 5. Codex 全般における定義はない。

飽和脂肪酸の摂り過ぎと心臓病の因果関係やカロリー摂取の過多と肥満その他の疾病との関係などはよく知られている。

「絶対的に安全な食品はない」のであれば、いつも健康に危害が及ぶことを心配しながら食事をしなければならぬのかというと、そうではない。ゼロリスク、すなわちどんな量を摂っても、どんな濃度・純度・状態のものを摂っても危険が全くないという概念ではなく、現在では、通常の方法で調製し通常の量を食べた場合に（大食する人についても考慮する）安全かどうかを検討することにより、消費者の健康の保護を図るようになってきている。

毒性のタイプと措置

もう一点留意が必要なことは、問題となる毒性が急性なのか、慢性なのか、そして健康への悪影響が一定以上のハザード⁶を継続的に摂取した結果として生じるのか、一分子や一細胞への暴露によって悪影響が生じるのか、などによって、対応を変える必要がある、ということである。つまり：

- 一分子や一細胞への暴露によって悪影響を生じるような場合、万難を排して⁷そのようなハザードを人が摂取しないようにする必要がある。つまり、そのようなハザードが食品を汚染したり、食品に混入しないよう措置をとったり、当該ハザードを食品から除去したり、当該ハザードを含有する食品の販売禁止をしたりしなくてはならない。
- 上記以外で、ある一定以上を摂取すると直ちに健康への悪影響をもたらす（急性毒性）可能性のあるような物質や微生物を含む食品の場合には、一度（または一日）の摂取量がそれぞれの物質や微生物に特有の一定量を越えることがないように措置をとらねばならない。急性毒性のある場合、問題が起きれば（問題を起こさない努力が最重要ではあるが）、原因がわかれば直ちに措置を取ることができ、その効果がすぐ現れることが特徴である。
- ある一定以上の量のある一定の期間以上継続して摂取した後に健康への悪影響をもたらす（慢性毒性）場合には、長期的に見て（つまり平均的に）健康への悪影響をもたらす可能性のある量より、実際の摂取量が十分低いことを保証できるような措置をとる。この場合、一度または一日ある一定以上のハザードを摂取しても、健康への悪影響が見られる可能性はごく低い。摂取期間については、一週間程度を問題にする場合（鉛摂取による幼児の学習遅延作用）から40から50年間の摂取を問題にする場合（カドミウム摂取による腎臓障害）、さ

6. 用語の定義とその意味するところについては、本稿「リスクアナリシス」の節を参照のこと。

7. 「万難を排して」と言っても、食糧の確保が何よりも重要であり、食糧と栄養の確保ができていない場合において「万難を排する」という意味である。

らには世代を超えた影響まで広い範囲にわたっている。また、慢性毒性がある場合は、原因がたとえわかっても、問題がおきてから対処したのでは、今後の問題を防止することはできても、すでに影響をこうむった人の状態を改善するのは難しい。

以上のように状況に応じた措置をとるためには、問題となるハザードの毒性その他についての知見が必要である。さらに、急性毒性、慢性毒性を示す物質や微生物についての実態調査が不可欠である。実態調査は、問題の有無、問題があるとするところ何処にどのような問題があるのかなどを知るために必要なだけでなく、実際に消費者⁸がどの程度その食品からハザードを摂取しているのかの推定を含むリスクアセスメント⁶の実施にも、リスクマネジメント⁶の効果を評価するためにも重要な役割を果たす。

安全と安心の違い

食品の安全性に関連して、わが国では「安全」と「安心」という2つの用語がよく並列して使われている。時には同義のように使われるが、これらは実際には二つの全く異なった概念を示している。「安全」は、科学的評価（安全性評価やリスクアセスメント）を行うことによって結論付けられる客観的な概念であるのに対して、「安心」は心理的かつ主観的なものであり、個人個人によって異なる可能性が大きい。従って、安全であると言われても安心できない場合もあるし（遺伝子組換え食品や照射食品はその例）、安全であると証明されていない場合でも安心できる場合もある（近所の方が作った野菜などは検査しなくても何となく安心できるであろう）。

この安全と安心のギャップの大きさは、しばしば信頼度の大きさと反比例する。また、安全の確保に努めずして「安心」だけ売ろうとすれば、安全性を脅かすような問題が起きた後にはさらに安全と安心のギャップは大きくなる。ギャップを埋めるため、すなわち消費者の安心を得るためには、安全の確保と信頼の確保双方への努力が不可欠である。

先進国における食品安全行政の近年の考え方

BSE 以来、西ヨーロッパでは消費者の信頼を取り戻すために食品安全行政が大きく変化した。2003年12月にはアメリカにおいて BSE 感染牛が報告され、リスクアナリシス先進国であったアメリカでも、今後食品安全行政の強化が予測される。

当然のことながら、食品安全の確保の主目的は消費者の健康の保護であり、消費者保護の強調が顕著である。

8. ここでは、食品を摂取する人の意味で用いている。

その一方で、科学に基づいた政策、とくにリスクアナリシスの実施も強調されている。それに伴い科学データの作成も予算縮小の時代であるにも関わらず、重要になっている。ただし、ヨーロッパでは、科学以外の正当な要因、例えば消費者の懸念や動物福祉、も食品安全政策の決定要因となると言っている。

さらに、食品安全確保のために一次生産から消費までのフードチェーン⁹の全部をカバーする必要性についても強調されている。これは "Farm to table" (USA) とか "Farm to fork" (EU) のような言葉で表現されている。フードチェーンのうちでも、生産段階における安全管理が、きわめて重要であるとされている。これまでは、最終産物の規格策定と検査が主流であり、食品の安全性確保にはそれで充分と考えられてきた。しかし、近年の食品事故は、生産段階での汚染が原因であることが多い。従って、生産段階で汚染を防いだり、低減したりすることが、最終産物の検査より食品の安全性確保にはより有効である、という考え方が普遍的になってきた。本来、HACCP¹⁰も同様の考え方に基づいている。

食品安全確保には組織的・統合的な対応が必要である、ということも重要視されている。食品安全行政においては、単に関係省庁間だけでなく、すべての利害関係者(生産者や消費者など)間の意見や情報の交換、そして適切であれば、それらを政策へ反映することが必要とされるようになってきた。また、食品産業界においても、製品の安全を確保するためには、総合的な観点が必要であると言われている。たとえば、HACCP システムの作成には、各種の専門家からなるチームを作ることが必要であるとされている。

欧米先進国で近年前提となっている考え方は、「安全と証明されるまで安全とはいえない」と「事故の対応より予防に重点」というもので、これから、安全を証明する必要性とどの程度問題が起きる可能性があるかを知る必要性が生じてきた。このために有効なツールの一つがリスクアナリシスである。

これまでのわが国の考え方や BSE 問題以前のヨーロッパの多くの国における考え方は、「問題が起きなければ大丈夫と考えよう」というもので、これでは問題が起きてからしか行動を起こせなかった(危機管理(crisis management))。危機管理は、問題の拡大やパニックの防止に有効ではあるが、問題の発生の予防や被害の最小化は目的としていない。

-
9. 「フードチェーン」とは、以前は食物連鎖のこののみを意味していた。しかし現在は食物連鎖以外に食品の一次生産から消費までの流れも意味するようになった。
10. Hazard Analysis and Critical Control Point: 「食品安全において重要であるハザード(著者注: ハザードの意味については本稿表1参照)を特定、評価、管理するためのシステム」(International Code of Hygienic Practice - General Principles for Food Hygiene (CAC/RCP 1-1969, Rev.3-1997)中の定義による)

リスクアナリシスの枠組みができるずっと前から、食品に使用される物質や汚染物質の安全性・毒性の評価は行われてきた。その発達とともに消費者の安全を要求する声も大きくなり、アメリカでは 1958 年に連邦食品医薬品化粧品法の修正として有名な Delany 条項が成立した。これは「発ガン性があると証明された物質は食品中に存在してはいけぬ」というもので、概念的には歓迎できるものであったが、その後の分析化学の発達でとうてい実証不可能（特に汚染物質や自然に生じる物質の場合）であることがわかってきた。そこで、De minimis という概念が 1985 年に環境保護局（EPA）によって採用された。これは百万人の生涯（70 年）に一人の発ガンまでは許容しようというものである。しかしながら、その後さらに分析化学が発達し、いまや 0.001 ppt（千兆分の一）まで測定できるようになっている。また、感受性の高い実験動物（マウス、ラットその他）や細胞系が開発され、以前には検出されなかった毒性を検出できるようにもなってきた。したがって、「存在しない」とか「毒性がない」と一旦言われていても、科学の発達によって、存在が見出され、さらには定量されたり、また毒性が見出されたりし、もはやゼロリスクは科学的には証明できない状態になってきた。そこで、絶対的な安全性やゼロリスクの概念に替わって、実際に使用する濃度や量、摂取する量で安全かどうかを評価することが行われるようになった。それにはリスクアナリシス、特にその要因であるリスクアセスメントが重要な役割を果たす。また、評価されたリスクと、社会的に受け入れられるリスクの比較によって適切なリスクマネージメントを行うことも始まった。

食品の安全性にかかわるリスクアナリシス

リスクアナリシスは未だ進化中の新しい分野で、保険や投資、金融の分野で大きい進歩がみられたあと、環境や化学物質、食品の安全性の分野にも取り入れられた。多くの分野で適用可能であるが、それぞれの分野によって考慮すべき点も違えば、関連用語の定義や手法も異なる。しかし、一般的にリスクアナリシスとは将来の損失（起こるかどうかは確かではない）や悪影響の可能性や程度を推定し、それを防いだり低減したりする措置をとることをいう。つまり問題や事故を予防することを目指している。リスクアナリシスは通常リスクアセスメント、リスクマネージメント、リスクコミュニケーションの三要素からなる。

リスクアナリシスは、食品安全行政や食品産業のためのよいツールであるが、あくまで目的は「食品安全の確保」であって、リスクアナリシスを実施することが目的であってはならない。リスクアナリシスをきちんと行うには、時間も資金（データ作成費用や人件費）もかかる。もし、他のもっと容易かつ安価な手段で同程度の食品安全の確保が達成できるならば、別にリスクアナリシスを行う必要はない。

カタカナ語はわかりにくい、という批判がよくあるが、無理に同義でない日本語を使用すると、本来の定義と関係なく漢字から意味が自生し、誤解や混乱が生じ

る。その典型的な例が、precautionary principle¹¹ とその訳語「予防原則」である。後者は今やわが国では本来の定義を離れて、英語で言えば principles for prevention（防止のための原則）であるかのように理解されてしまっている。そのような事態を防ぐために、本文ではリスク関連用語は音訳にとどめ、定義を付することとする。

歴史的背景

食品の安全性に関してリスクアナリシスの概念が初めて適用されたのは、1980年代である。この分野のリスクアナリシスは、他の分野のそれに遅れているといえる。その理由として、必要な食糧の確保が必須なこと、毎日摂取するものであること、食品の味や香りが好ましいものである必要があることなどいろいろな条件があることが考えられている。また、消費者の健康の保護が最重要であるものの、食糧安全保障の観点から、国内の農業・食品産業の持続や保護も考慮しなければいけないという難しさもある。

世界貿易機関（WTO）の衛生と植物防疫措置に関する協定（SPS 協定）¹² の第 5.1 項に、「加盟国の食品安全性に関する措置は、関連国際機関によって確立されたリスクアセスメントの手法を使った、人へのリスクの評価に基づいていなければならない」と述べられている。食品の安全性については、この「関連国際機関」とは Codex Alimentarius Commission（Codex と略）のことである。Codex は 1993 年より食品の安全性に関するリスクアナリシスについて検討を開始した。FAO/WHO も専門家会議を開催して、その活動を助けている。これまでにリスクアナリシスに関する用語の定義¹³、リスクアセスメントの役割についての原則¹³、Codex 内部向けのリスクアナリシス作業原則¹³ を採択した。

用語の定義

表 1 に食品の安全性にかかわるリスクアナリシスで用いられる用語の Codex による定義を示した。

-
11. "Article 7 Precautionary principle" in Regulation (EC) No 178/2002 of the European Parliament and of the Council of 28 January 2002 laying down the general principles and requirements of food law, establishing the European Food Safety Authority and laying down procedures in matters of food safety
 12. Agreement on the Application of Sanitary and Phytosanitary Measures, World Trade Organization, Geneva, 1994, http://www.wto.org/english/docs_e/legal_e/15-sps.pdf
 13. Codex Alimentarius Commission Procedural Manual, 13th Ed., FAO, Rome (2003) (<http://www.codexalimentarius.net> よりダウンロードできる)

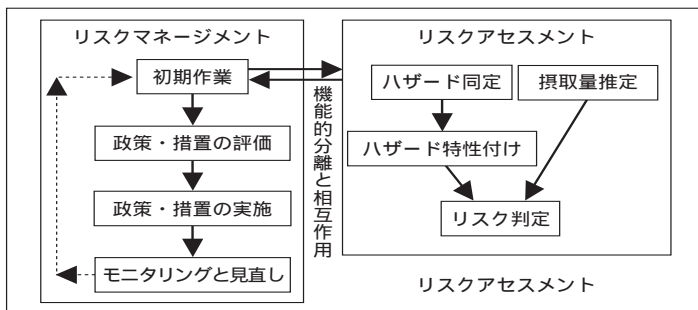
表 1 食品の安全性にかかわるリスクアナリシスで
用いられる用語の Codex による定義

用語（日本語）	用語（英語）	定義（日本語訳）
ハザード	Hazard	健康に悪影響をもたらす可能性を持つ食品中の生物学的、化学的または物理学的な物質・要因、または食品の状態
リスク	Risk	食品中にハザードが存在する結果として生じる健康への悪影響の確率とその程度の関数
リスクアナリシス	Risk analysis	リスクアセスメント、リスクマネージメント、リスクコミュニケーションの3つの要素からなるプロセス
リスクアセスメント	Risk assessment	ハザード同定、ハザード特性付け、摂取量推定（専門用語では暴露評価）、リスク判定の4つのステップからなる科学に基づいたプロセス 「食品中に含まれるハザードを摂取することによってどのような健康への悪影響が、どのような確率で起きうるかを、科学的に評価する過程」(FAO/WHO 専門家会議, 1995) 「食品や飲料...中の添加物、汚染物質、毒素、または病原性生物・微生物などに起因するヒト...に悪影響を及ぼすかもしれない可能性の評価...」(SPS 協定)
ハザード特定	Hazard identification	特定の食品又は食品群中に存在する可能性があり、健康に悪影響を及ぼす恐れのある生物学的、化学的及び物理学的な物質・要因を特定すること
ハザード特性付け	Hazard characterization	食品中に存在する可能性がある生物学的、化学的及び物理学的な物質・要因に起因する健康への悪影響の性質を定性的及び/又は定量的に評価（evaluation）すること。化学的な物質については、用量反応評価が行われるべきである。生物学的又は物理学的な要因については、データが入手できるのであれば、用量反応評価を行うべきである
用量反応評価	Dose-response assessment	化学的、生物学的又は物理学的な物質・要因への暴露の大きさ（投与量）と健康への悪影響の程度及び/又は頻度（反応）との関係を確定すること
暴露評価（摂取量推定）	Exposure assessment	食品を通じた生物学的、化学的及び物理的な物質・要因の現実に近い摂取の定性的及び/又は定量的な評価（evaluation）。同様に、食品以外に起因する暴露についても適宜評価を行う
リスク判定	Risk Characterization	ハザード特定、ハザード特性付け及び暴露評価に基づいて、ある集団における既知の又は今後起こり得る健康への悪影響の発生確率と程度について、定性的及び/又は定量的な推測をすること。付随する不確実性についての推測も含む。

用語（日本語）	用語（英語）	定義（日本語訳）
リスク推定値	Risk estimate	リスク判定の結果得られるリスクの定量的推定値
リスクマネジメント	Risk management	リスクアセスメントとは別個のプロセスで、すべての関係者と協議しながら、政策の選択肢を慎重に考慮すること。このプロセスにおいては、リスクアセスメントの結果と消費者保護など関連する他の因子を検討し、もし必要ならば、防止、管理の選択肢も決定する リスクマネジメントは、初期作業、政策・措置の評価、決定した政策・措置の実施、およびモニタリングと見直しを含む構造的な手法に即して行われる。
リスクマネジメントの初期作業	Preliminary risk management activities	食品の安全性に関する問題点の特定、その問題点に関するリスクプロファイルの作成、リスクアセスメントとマネジメントをするべきハザードの優先順位づけ、リスクアセスメント方針の決定、リスクアセスメントの依頼、リスクアセスメント結果の評価を含む
リスクプロファイル	Risk profile	食品の安全性に関わる問題及びその内容の説明
リスクアセスメント方針	Risk assessment policy	リスク評価の過程における科学的な完全性を維持するための、リスク評価における適切な意思決定ポイントにおける選択肢の選択及びその適用に関連する判断についての文書化されたガイドライン
リスクコミュニケーション	Risk communication	リスクアナリシスの全過程において、リスクそのもの、リスク関連因子や認知されたリスクなどについて、リスクアセスメントやリスクマネジメントに携わる人、消費者、産業界、学界や他の関係者の間で、情報や意見を交換すること。これにはリスクアセスメントで見出された事実や、リスクマネジメントの決定事項の説明も含まれる

「ハザード」は生産、製造中に使用される機材や材料や、生産、製造、貯蔵流通中に機械、器具、接触物体や環境から汚染する物質などを指し、微生物、化学物質、放射能などがその例である。それに対して、「リスク」は数学的な概念であって、ハザードのように目に見えたり、直接機器を使用して測定したりすることが可能なものではない。また、この概念はこれまで日本語には存在しなかったものなので、無理に翻訳すべきではない。たとえば、「危険」と訳するのは誤解のもととなる。なぜなら、一般に日本語で「危険」と言えば、英語の danger を意味し、遅かれ早かれ悪いことが起きることを示唆する。これは risk という用語が確率的な概念を含むのとは異なる。

図 1 食品の安全性に関するリスクアナリシスの枠組み



リスクアナリシスの枠組み

リスクアナリシスの通常の枠組みを図1に示した。リスクコミュニケーションはリスクアナリシスの全過程において行われねばならない。

- (1) 通常、リスクアナリシスの最初の作業はリスクマネジメントの初期作業である。この初期作業は「リスクアセスメントの依頼」を含む。

食品事故の予防は、リスクマネジメントの初期作業なしにはできない。海外情報や科学論文その他多くの情報の収集と解析などにより、新しいハザードが日本に導入されないような措置をとるべきである。とはいうものの、実際は起きた事故に対処する 경우가かなり多い。

スウェーデン政府がポテトチップなどの食品にアクリルアミドが含有されることを報告した後、イギリスやスイスなどで直ちに分析を開始したことなどは、この初期作業が効率良くできた例である。

どのようなデータを作成するかもここで決定される。どのハザードを優先してリスクアセスメントするかについては、予想される被害の程度や存在の範囲、その他各種の基準によって決められる。

リスクアセスメントはリスクマネジメントの基礎となるものであるので、リスクマネージャーが、どのような政策や措置を採るべきかをある程度考えに入れた上で、リスクアセッサと協議して「リスクアセスメント方針」を策定する。依頼したリスクアセスメントが、リスクマネジメントに活用できる結果をもたらすために、リスクアセスメント方針の策定が重要な役割を果たす。リスクアセスメントの各段階での価値判断など非科学的な決断をするための指針となるもので、リスクアセスメントの科学的無謬性と独立性を保つ。透明性を確保するために、そして将来の参照のために、文書化しなければならない。リスクアセスメント方針の例として、危険にさらされている集団(乳幼児

や妊婦その他)の決定、ハザードの順位付けのための判断基準、安全係数の適用に関する指針などがある。

リスクマネージメントの初期作業の最後の過程は、リスクアセスメントの結果の検討である。これを行うリスクマネージャーは、リスクアセスメントの結果を理解検討できるだけの科学的能力を備えていなければいけない。

- (2) リスクアセスメントでは、科学データを用いてリスクがどの程度あるのかを推定する。ハザード特性付けと摂取量評価はどちらが先に行われてもよい。通常、有害微生物のリスクアセスメントでは摂取量評価が先に行われるのに対し、化学物質のリスクアセスメントではハザード特性付けが先に行われることが多い。リスクアセスメントのためには、毒性学的データやモニタリングデータ(食品中のハザード濃度を知るため)、食品摂取データなど各種の科学的データが必要である。化学物質を例にとると、おおむね次のような手順で行われる。

- 食品中のハザードが何か、またその性質を決定
- ハザードによる健康への悪影響の性質の評価

毒性試験の結果や疫学調査の結果を評価し、通常もっとも低い無悪影響量(NOEL¹⁴)を安全係数で除し、許容一日摂取量(ADI¹⁵)や暫定一日耐容量(PTDI¹⁵;蓄積性のある物質の場合暫定一週間耐容量PTWIを設定)などを設定する。安全係数は通常種間差10、個体差10の積100が用いられるが、データの不確実性が高ければより大きい係数が使用されることもあるし、極めて鋭

14. No-observed-adverse-effect-level: 特定された暴露条件で、ターゲットとなる生物において、実験的または観察によって見出された、形態、機能、生育、発達、寿命などに悪影響が見られない当該物質の最大の濃度または量(IUPAC Compendium of Chemical Terminology, 2nd Edition (1997)).以前はNo-observed-effect-level (NOEL)とも言われた。
15. ADIやPTDIは、毎日一生食べ続けても健康に悪影響が出ない量とされている。通常体重一キログラムあたりで表される。ADIは意識して使用される物質(食品添加物、農薬、動物役など)の場合に設定され、通常0からある数値までの範囲で示される。栄養素であって添加物としても使用される物質の場合には、一定量以下の摂取では欠乏症状が出ることから、下限値が0ではなく、それぞれの栄養素独自の数値が示される。また、これまでの長い経験から、人の健康に対して安全であるとみなしてよいという知見が蓄積されている物質の場合には、「特定する必要は無い」というADIが出されることもある。酢酸などはそういう物質の例である。一方、PTDI、PTWIは、汚染物質のようにその物質を食品に生産に使用したわけでもないのに環境などから汚染した物質について設定される。PTWIは一週間の許容量であり、PTWIを7で割り1日あたりにした数値を超えてはいけない、とするのは正しくない。

敏なテストの結果が用いられたときにはより小さい係数が使用されることもある。

- 食品からのハザードの摂取量を推定

ハザード特性付けは、物質そのものの安全性 / 毒性についての情報は提供できるが、食品中に含まれるその物質を摂取することによるリスクの情報は提供できない。つまり、リスクを推定するには実際にどれだけ摂取しているのかを知るために摂取量評価を行う必要がある。国内レベルでは、実際の食事から取る量を分析・推計したり、汚染実態調査と食品消費量から統計学的に摂取量を推計したりすることが行われている。特に最近では確率論的手法を用いて、汚染物質や残留物の平均的摂取量や極端な場合の摂取量を推計することがいくつかの国で行われるようになって来た。

- 一定の集団における既知のまたは潜在的な健康への悪影響の程度と発生の確率を推定

通常、ADI/PTDI などの毒性学的指標と暴露評価の結果を比較することによって行われる。推定された暴露量が毒性学的指標を大きく上回る場合には、リスクマネージメントを考慮する必要がある。最近ではモデル化により定量的にリスクを推定することも行われるようになってきたが、どのようなモデルを使用するかによって推定されたリスクが大きく異なる場合もあり、いまだ定量的なリスク推定は発展の初期段階であるといえる。

リスクアセスメントは、科学的な過程であるとはいうものの、学術的な要素以外の要素も必要である。食品の安全性に関するリスクアセスメントにおいては関連する食品の生産・製造法や貯蔵・流通状態なども、必要に応じて考慮に入れなければならない。

リスクアセスメントでは独立性および中立性、透明性を確保しなければならない。そのために、たとえば専門家の選出を透明性のある方法（要求する専門性や選出基準などを詳細に明らかにするなど）で行ったり、参加する専門家の利害関係を書面で提出させたりすることが見られる。Codex や多くの国でリスクアセスメントとリスクマネージメントの機能的分離¹⁶（「組織的」とは言っていないことに注意）が言われているのも、リスクアセスメントが科学以外の要因から影響や干渉を受けることや、リスクアセッサーとリスクマネージャーの役割が混同されることを避けるためである。

リスクアセスメントの結果は、リスクマネージメントをするために有用な形で提供されなければならない。また結果と各ステップの検討過程は、透明性を保証するために記録に残して、閲覧できるようにしなければならない。ただ

16. Codex Alimentarius Commission Procedural Manual, 13th Ed., FAO, Rome (2003), p.183
 (<http://www.codexalimentarius.net> よりダウンロードできる)

し、農薬、動物薬や食品添加物のデータは製造者（登録申請者）の所有であることが多く、その場合にはもとのデータ自体は公開されない。

- (3) 再びリスクマネジメントにおいて、どんな政策や措置が可能かを考え、実施可能な政策や措置と適切な安全性基準の検討を行う。さらに、すべての関係者と意見・情報を交換しながら、どの程度リスクを受け入れることができるか、および各政策・措置のリスク低減効果、コスト/利益のバランスや二次的リスクについての社会科学的小および自然科学的考察、技術的実現可能性その他の要因を考慮して、政策・措置を最終決定する。この際、検討、評価されている政策や措置がどのようなリスク低減効果をもたらすのかについて、必要ならばリスクマネージャーはリスクアセッサに評価を依頼することもある。そして、最終決定された政策・措置を実施する。

リスクマネジメントの最も重要な因子は「健康の保護」である。つまり、「防止または予防（Prevention）」が強調されている。しかしながら食品安全行政においては消費者保護と小規模生産者・産業の保護とのバランスや食糧の確保を考えることも必要である。一方、企業においては「安全な食品」を供給する義務を負うものの、経済的リスクというおそらく企業にとってはより重要視されているリスクについて対処しなければならない。

- (4) さらに、リスクマネジメントにおいて実施した政策や措置が有効かどうかをモニタリング・評価し、もし有効でないならば、必要に応じてリスクマネジメントとリスクアセスメントの見直しを行う。リスクマネジメントは継続的プロセスであるので、再評価の必要性を忘れてはいけない。

リスクコミュニケーション

リスクコミュニケーションはリスクアナリシスのおそらく最も重要な要因である。しかしながら、リスクアセスメントやリスクマネジメントなしにリスクコミュニケーションだけで機能することはあり得ない。全ての関心あるグループ間のリスクコミュニケーションが必要で、政府関係者、科学者、消費者、産業界、報道の間にもリスクコミュニケーションが起ころう。リスクアセスメント機関とリスクマネジメント機関の間の密接なコミュニケーションは、有効なリスクアナリシスに不可欠であるとされている。これらの間のコミュニケーションがなければ、有効なリスクアナリシスは期待できず、予算や時間・人材の無駄遣いとなる。

一部で誤解されているようだが、リスクコミュニケーションは問題の解決法でもない。問題の解決法（リスクマネジメントオプション）を決定する助けとなり、その解決法を社会に受け入れられやすくする役割を果たす。またリスクコミュニケーションがうまく行われれば、利害関係者の信頼・信用の確立の助けにもなる。

情報公開は透明性確保のために必須である。一般に、情報量と信頼度は比例するとされているので、適宜情報を公開することは信頼性を高めるのに有効である。しかしながら、ただ情報を出すだけではコミュニケーションとはいえない。情報発信者が出したい情報を出すのではなく、情報の受け手が必要とする情報を彼らが理解できるような工夫をして出す必要がある。情報を出す前に、いつ、どのような人に、どういうメッセージを伝えたいのか、あらかじめ考えておく必要があるし、コミュニケーションする相手によって理解しやすいような用語や手法を選ばねばならない。リスクコミュニケーションであるからには、どの程度のリスクがあるのか、不確実な点は何か、リスクマネジメントまたはリスクアセスメントにおける困難な点は何かなどについての説明も必要である。さらに、情報や意見を他の利害関係者と交換し、彼らのニーズを知って、決定に反映することを考えるべきである。

情報公開への社会的要求が高まっている。情報は原則として公開すべきであるが、それなりの科学的、社会的な検討が必要である。科学的な面からは、データが母集団を反映しているのか、すなわちサンプリング法は正しいかどうかや、何が目的で分析しているのか（経口摂取の推定か環境汚染の程度か）、分析値の信頼性はどの程度か、そして正しい統計処理ができていないか、などについて検討しなければならない。そしてその結果として、データが何を意味しているのか、を知らずして情報の提供をすべきである。サンプルの出所を公開することについての要求も大きいようである。法律違反の場合は当然公開すべきであるが、無制限に公開することについては懸念がある。つまり、風評被害をこうむることを恐れて、試料の提供を受けられなければ、汚染の実態がつかめなくなり、事件や問題が生じるまで、汚染があることを認識できなかつたり、リスクマネジメント措置・政策の有効性を知ることができなくなつたりする。これでは、食品安全行政がかえって後退するのではないかと危惧される。また見かけ上安全であるように見えるだけで、「安心」する事ができていても実態が分からず、BSEと同じような事態が繰り返される可能性がある。

リスクコミュニケーションと言っても、コミュニケーションであるからには、相手の立場を理解すること、正直、率直、公正、オープンかつ明瞭であることは、信頼性を高めるために、そして円滑なコミュニケーションの確立のために不可欠である。日本では、他の多くの国と同様にマスコミの世論形成に対する影響が大きいので、情報をマスコミのニーズにあった形で提供することも重要である。ただし科学的な事実は曲げてはいけない。

リスクコミュニケーション活動として、教育啓蒙活動、たとえば大学を含む学校に於ける教育や、生産者（農業、漁業従事者も含む）、食品の取扱者や主婦への教育も大切である。

リスクコミュニケーションを困難にする要因として、実際のリスクと国民が感じるリスク（認知リスク）のギャップがある。通常、正しい情報量が少ないほどリス

クは大きく認知され、実際のリスクとの差が大きくなる傾向がある。自分でコントロールできると考えられるハザードや便利さや利益が明らかなハザードに由来するリスクは実際より小さく認知される。その他各種、実際のリスクと認知リスクの差を広げる要因が知られている。

食品の安全性にかかわるリスクコミュニケーションにおいて顕著な問題は、自然由来の物質は安全であるが、合成化学物質はみな危険だとの考えである。このような考え方は、日本のみならず世界の多くの国に普遍的に見られる。実際には、最も強い発がん物質のひとつアフラトキシンは天然物質であるし、人の体内で生合成され、生命の維持に不可欠な女性ホルモンが発がん性を持つことも証明されている。また、天然の植物から製造された、いわゆる「健康食品」で健康被害を引き起こしたのも数多くある。一方、最近では新しい合成物質の食品への使用には厳しい安全性評価が課せられている。天然物質であろうが、合成物質であろうが、それぞれの物質に特有なある量を超えて摂取すれば、人の健康に悪影響を及ぼす可能性がある。歴史的に「安全性」が確保されていると考えられている物質を例外として、起源に関わらず安全性を評価する必要がある。

また、未知のハザードによるリスクは、既知のハザードによるリスクより大きく感じられたり、受け入れ難かったりする。遺伝子組換え食品の問題はその未知性（不十分な情報開示）のために不安感が大きくなった例である。食品の安全性について、これ以外にもいろいろな思い込みが存在し、それがリスクコミュニケーションを難しくしている。

リスクコミュニケーションを行うものに必要な条件は、リスクの内容について理解し、それを噛み砕いて説明できるための専門知識と、コミュニケーション能力である。日本の教育システムでは、この両者を兼ね備えた人材を集めるのは困難に思われる。

今後の課題

上述したように、リスクアナリシスを効果的に適用するには、リスクマネージャーの知識向上、リスクアセッサーとリスクマネージャーの間の密接な相互作用、科学的データの整備など多くの課題がある。これはすでに適用を行っている国々でも認識されている。日本においては、食品安全にかかわるリスクアナリシスの適用は緒に就いたばかりである。従って課題は山のようにあるが、本稿ですでに詳述していない点を幾つか以下にあげておきたい。

人材養成

「はじめに」に記したように、わが国には食品安全の専門家が極めて少ない。とりわけ、欧米先進国（オーストラリア、ニュージーランドを含む）で食品安全行政を担当しているような自然科学系の専門家が希少である。データの作成、データの

分析・評価、情報の分析・評価、リスクマネジメントなどを行うのに絶対数が不足している。さらに、科学データを総合的に評価したり、研究と行政やマネジメントをつないだりできる人材となれば皆無に等しい。リスクアセスメントに関して言えば、毒性学、分析化学、微生物学の専門家はおられるが、数は不足しており、専攻の範囲としてはこれではまったく不十分である。したがって、一人の専門家がリスクアセスメントとリスクマネジメントの両方に関与していたり、自分で作成したデータを自分で評価したりするという事態も起こり得るので、科学的中立性や透明性確保の障害となる可能性がある。

食品産業においてはあまり欧米先進国との差は大きくないと考えられるが、食品安全行政の分野においては、欧米先進国で職員の八割程度は技術系の専門家（医学系はごくわずか）であって、その約半分またはそれ以上が博士号を持っているのに比べると、日本の食品安全行政の専門性不足は明らかである。もっとも、2 から 3 年ごとに異動する現在のシステムでは専門性を高めるのは至難の業である。さらに、食品安全行政にかかわる職員の絶対数も少ない。これでは、リスク情報やリスクアセスメントの結果を理解し、行政に活用するのは難しい。

これまで日本の大学では、食品の安全性について教えてこなかったが、この機会に系統だった食品安全専門家の教育（実務者の研修やトレーニングも含めて）に取り組んでもらいたい。ちなみにアメリカでは、官庁と連携していたり、食品安全センター（リスクアセスメントやリスクコミュニケーションのセンターも含む）を併設したりしている大学も多い。オランダのワゲニンゲン大学は、食品安全に関する専門家教育を目的とした実務的な修士課程を最近設置し（1 期生は 2002 年 9 月に入学した。講義はすべて英語で行われる。）、多くの国から学生を集めている。さらに、アメリカの Joint Institute for Food Safety and Applied Nutrition は食品安全性にかかわるリスクアナリシスの短期研修を行っている¹⁷。

リスクマネジメントについては、多くの国で on-the-job training であるということだが、そういう国では長年やっているベテランの専門家が実際に指導や監督できるところが、わが国のシステムとは違う。

科学データの作成とデータの信頼性の向上

最近の食品安全行政は、SPS¹⁸ 協定でも言われるように「科学に基づいて」いなければならない、基礎となる科学データが必要である。リスクアセスメントだけでなく、リスクマネジメントについても同様であり、Codex の「食品中の汚染物質と

17. これらの情報は、各大学のウェブサイトから得ることができる。

18. 世界貿易機関(WTO)の衛生と植物防疫措置に関する協定(Agreement on the Application of Sanitary and Phytosanitary Measures, World Trade Organization, Geneva, 1994, http://www.wto.org/english/docs_e/legal_e/15-sps.pdf)

毒素に関する一般規格¹⁹は、基準値を作成する際には各国政府から提出された汚染データ(主としてモニタリングやサーベイランスデータ)を基礎とすると述べている。FAO/WHO 合同食品添加物専門家委員会(JECFA)は、摂取量推定のために各国から実態データを要求するが、多くの場合北アメリカ、西ヨーロッパ、オーストラリアくらいからしかデータが提供されない。わが国もアジアの先進国として、科学データの作成を奨励し、国内で活用するだけでなく、Codex や JECFA などへのデータ提出を目指すべきである。それには、科学的かつ客観的に分析値の信頼性を保証するための精度管理システムを幅広く導入することが不可欠である。

科学技術的支援

「科学に基づいて」行政を行うため、また食品生産・製造の向上のために、科学技術的支援が必要である。今でも、新技術や新製品の開発は奨励され、予算もつく。このような研究は、民間が進んで行うので国が敢えて競争する必要はない。

しかし新しい技術や製品が安全かどうかの観点は抜け落ちていることが多い。さらに、汚染物質や有害微生物に関する研究は、食品添加物や農薬と異なりデータ作成に投資する人はおらず、せいぜい、地方で何か問題があった場合に大学の研究による分析その他の小規模のデータ作成が行われる程度である。国民の健康を守るために、このような研究にこそ国が予算と人材を投じるべきであると考えられる。

食品安全にかかわる研究は主として応用研究であり、研究と行政をつなぐようなシステム(レギュラトリーサイエンス)が必要である。国立の研究所は、このような応用研究や行政対応にもっと力を入れるべきである。もちろん、応用研究を支えるための基礎研究は必要である。ちなみにワーゲニンゲン大学に付属している食品安全研究所(以前は農務省に属していた)では応用研究 80%、基礎研究 20%ということである。行政や食品生産・製造との連携も行われている。

学会情報や海外の情報などの分析評価も食品事故の防止には必要な支援活動である。

食品の安全性に関心を示す関連分野の学者も少なくないのだが、現在の業績評価のやり方では、この分野に参入できないと言っているのを聞くので、食品安全行政への参画や協力についてもアカデミックな活動と同様評価するようにすべきである。

体系だったリスクアセスメントの確立

同様の物質や事態について首尾一貫した対応が行われることを保証するように、特にリスクアセスメントの原則や基準、手続きについてあらかじめ決めておく必要

19. Codex Alimentarius, Second Edition, Volume 1A, "General Standard for Contaminants and Toxins in Foods, Annex 1", FAO, Rome, pp. 271-272 (Revised 1999)

がある。国際的なリスクアセスメント機関では、その活動初期に評価のための原則を作成し、文書にして出版した。FAO/WHO 合同専門家会議やアメリカ政府や欧州連合もリスクアセスメントの原則や手法についての文書を発表している。

国際機関や欧米においてはリスクアセスメントが利害に影響されないように、個々の委員や参加者の利害について事務局に報告することが義務付けられている。雇用や金銭的關係（株の保有など）以外に、研究費補助や契約などについても報告する必要がある。専門知識が十分であっても利害関係がある場合には当該物質や事項の評価には参加しないようにしている。また、データ作成に関与した場合、そのデータや関連データの評価には参加しないようにしている。なぜならば、理論を提案している者は、中立では有り得ないからである。

リスクアセスメントにおいて透明性の確保は重要である。これまでわが国では誰が何を言ったか、に注意が集まっており、なぜその結論に至ったのかについては明確でないことが多かった。今後はどのような意見がでて、そのうちからどのような理由で結論が得られたのかを明確にする必要がある。さらに委員会や審議会などの委員を決める場合には、選考の基準や経過、候補者のリストなどを公開すべきである。

行政の変革

上記のように、人材不足のため、大きな変革は予想できない。しかし、リスクアナリシスの原則によれば、リスクマネージャーが、リスクアセッサと協議してリスクアセスメント方針を作成することになっており、リスクアセスメントを丸投げしたのでは、有効なリスクアセスメントが行われる保証はないことになる。

さらに、行政なり、企業なりの判断をリスクに基づいて（risk-based）行う必要があり、現在のように事件や問題が起きてから動くのでは国民の健康の保護には不十分である。リスク情報やリスクアセスメントの結果を分析・評価し、時宜に応じて必要な研究を委嘱することができる能力を持っていなければならない。

FAO や WHO が専門家会議を開く場合、ほとんどの先進国からは専門家として行政官庁の職員が参加する。つまり、専門知識・行政知識および実地の知識が要求されているからである。わが国でもこういう会議に参加して、他の先進国の専門家と渡り合えるような職員が育ってほしいものである。

リスクアセスメント同様、リスクマネジメントの決定とその実施の透明性を保証することは必須である。それには、全ての利害関係者との双方向のコミュニケーションが欠かせない。もちろんこれは、単に意見や情報を交換するだけでなく、適切であれば、他の利害関係者の意見を取り入れるところまで進まねばならない。

リスクコミュニケーション

今後、日本でリスクコミュニケーションを有効にしていくためには食品の安全性にかかわる者それぞれが努力しなければならない。政府は意識改革をし、国民を同レベルのパートナーとみなさなければならないし、もっと公僕意識やサービス感覚を持つ必要がある。一方、国民は提供される情報を理解し、かつ有用な意見や情報を出すために、知識や経験の蓄積と勉強の必要がある。また、生産者・産業界は如何に一般大衆にわかりやすく説明するかを検討することと、適切に責任を認める必要があるであろう。日本では流通業界が、何をどのように生産するかを決定する要因となることが多いが、単に消費者に迎合せず、本当に安全なものを供給するよう努力する必要がある。また、科学者も社会のニーズに敏感になり、食品の安全性に関する研究に力を入れるとともに、もっと国民にわかりやすく説明する努力をすべきである。

まとめ

新しい食品安全行政に対する国民の期待は大きい。食品安全に関わるリスクアナリシスの先進国の先例を教訓としつつ、早急に体制と原則を確立するとともに、食品安全に係わる者（行政だけでなく、生産者、食品産業、流通業界、消費者も）の知識ならびに意識向上を図る必要がある。

（食品総合研究所 企画調整部国際食品研究官 山田 友紀子）

食品のトレーサビリティと情報技術

1. 食品におけるトレーサビリティ

食品分野において、初めてトレーサビリティという言葉が公に使われ始めたのは、平成 13 年度から始まった農水省の安全・安心情報高度化事業（日本版トレーサビリティシステムの開発）が最初と思われる。「日本版」とあるのは、ヨーロッパの牛及び牛肉を中心に取組まれたトレーサビリティに由来しており、それを牛肉ではなく、広く食品に適用しようという事業であった。皮肉にも、この事業が始まった年（平成 13 年）に、日本でも BSE（牛海綿状脳症）が発生し、トレーサビリティがクローズアップされることになる。当初は、生産から加工、流通、販売段階まで全ての情報が記録され、消費者から訴求できるような構想であった。しかし、実際には、このように全ての情報を記録し、閲覧できるようにするには、コスト、情報入力の手間、が膨大なものとなり、現実的ではない。また、これらのコストを消費者が負担できるかという点、特に日本においては、「情報はタダ」という意識が未だ強いのが現状である。例えば、以前に、Web 実験で消費者を対象として、これらの情報に対して幾ら払えるかというアンケートをしてみても、40%が 0 円、38%が 10 円以下といった結果¹⁾であり、その他の調査でも同様の傾向がみ

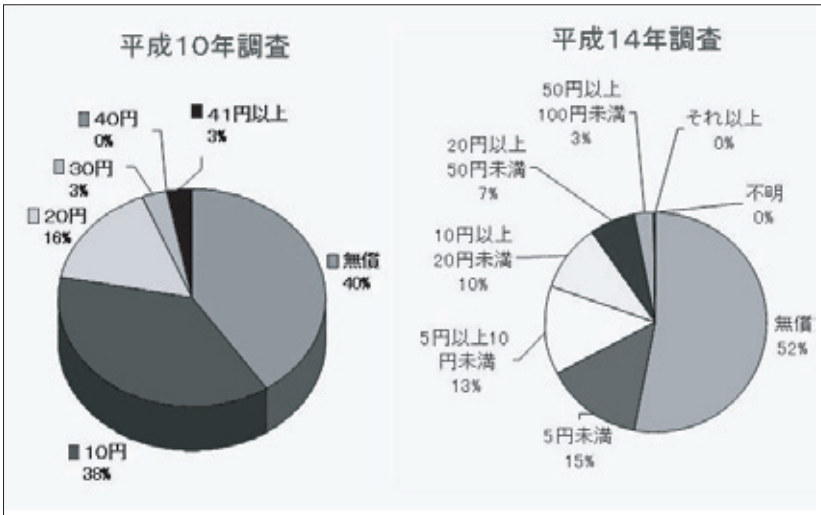


図 1 青果物情報の対価（1 商品あたり）

られ、販売価格に過大なコスト転嫁は困難なことが示されている。(図1)

すなわち、食品は安価なものであるとともに、トレーサビリティで保証しているからといって、高く売れるわけでもないため、トレーサビリティは、あくまで通常の品質管理の一貫として、できる所から取り組む必要がある。

2. トレーサビリティとは

そもそも、トレーサビリティとは、Trace+ability から来ており、原義は「もと(履歴)をたどること(遡及)ができる(能力)」ということである。食品以外では、計量機器の校正もトレーサビリティと称しており、例えば手元の秤(はかり)が表示する1kgが元を辿ると国際キログラム原器の1kgと同一であることを保証することに利用されている。時々、トレースという言葉は忠実に反映して「各段階での全ての記録を残すこと」がトレーサビリティであるということを耳にするが、国際的にもトレーサビリティの定義およびその有効性は議論の最中であり、ひとつの考え方にすぎない。前述の場合も、確かに「生産から流通、消費に至る全ての記録」があれば、間違いなく履歴の遡及は可能であるが、現実的には無駄が多すぎて実用化は困難である。また、本当に遡及するに値する必要な情報はごく一部であり、そのために全てを記録するのは非効率以外の何物でもない。例えば自宅の体重計がどのように国際キログラム原器に結びつくかの一連の情報を全て記録し開示するとなると相当の手間とコストがかかるが、実際には同一になるような仕組みと万一異なっていた場合の校正法を提供することで問題の解決が図られている。トレーサビリティを実用化するためには、やみくもに「記録すること」に重点を置く形式主義ではなく、如何に少ない労力(記録)で必要とする遡及を可能にするかといった観点での技術開発、すなわち、目的達成のために最も効率的なシステムの構築が求められている。

それでは、その目的達成の目的とは何であろうか。究極的には、食の安全と安心の確保である。トレーサビリティは、その目的達成のための手段であり、それを目的そのものに取り違えると前述のような「全てを記録する」といった誤解も生じかねない訳である。ちなみに、「安全」は、食品(物)を主体として考えた概念であり、「安心」は、消費者(人)を主体として捉えられ、安全だから安心が確保されるとは必ずしも限らない。逆に言うと、トレーサビリティは「安心」を確保するためのもので、「安全」は確保できないともいえる。このような目的の中で、トレーサビリティの果たす役割は大きく分けて以下の2つがある。

- 1) 食品事故発生時の追跡や回収を容易にする。
- 2) 生産情報等を提供して消費者と「顔の見える関係」を築く。

言い換えれば、前者は事故が起こった時の「保険」であり、後者は事故が起こる前に情報開示をして消費者に選択の余地を与えたとともに、場合によっては「情報付加価値」を付けてブランド化に結びつけるというアクティブな役割を担ってい

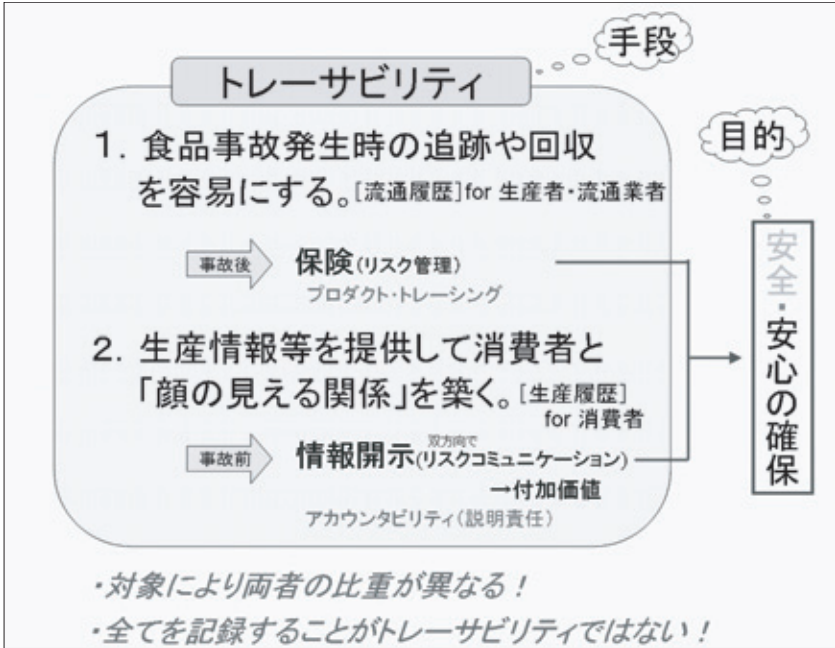


図2 トレーサビリティとは

る。英語では、前者はプロダクト・トレーシング、後者はアカウントビリティ（説明責任）と呼ぶこともあるが、実際ははっきりした線引きは困難であり、両者を一緒にしてトレーサビリティとして取り扱われることが多い。（図2）現に、農水省の「食と農の再生プラン」においても、この2点が含まれてトレーサビリティといった使われ方がされている。

3. トレーサビリティの多様性

トレーサビリティを実現する場合に、保険と情報付加価値のどちらが主体か、現状の流通形態、必要な情報項目、などは品目毎に異なるはずである。従って、システム構築も品目毎に異なったアプローチがあってしかるべきである。牛肉のように保険が重要な品目に対する手法を、そのまま青果物に適用することはコスト的にも不可能であり、消費者もそれは望んではいない。その意味では、先の「全てを記録する」のもトレーサビリティの1つではあるが、あくまで "one of them" であり、必要条件とはなり得ない。品目によっては流通の記録が余り意味をなさないものもあり、その点からも実際に現場に携わっている民間（業界）主導で、品目毎

に適応したトレーサビリティが取り込まれるべきである。現状では、どのような方法がいいか、あるいはどこまで追い求めるかという事に対しては、模範解答は存在しない。具体的にトレーサビリティ実現に際して、最初に立ちはだかる大きな壁は、「コスト」と「情報入力の手間」の2点である。これらを如何に解決するかという点では、かなり技術志向の強い取り組みが必要となる。とはいえ、単なるITを用いたシステム構築だけでは実用にはならず、現場でのオペレーションの協力・工夫も必要となる。牛肉以外の法律で義務化されない食品の場合は、試行錯誤で様々な方法を試みながら、最終的には消費者の購買行動とシステムの運用コストのバランスで最適なトレーサビリティだけが自然淘汰されて残ることになる。単価の安いものに必要以上のトレーサビリティを行っても流通・消費者の負担が増えるだけで、到底受け入れられないし、逆に、それを低コストでうまく運用できれば他との差別化が可能となり市場競争力が増すことになる。その意味では、保険としてのトレーサビリティよりは、情報付加価値としてのトレーサビリティの方が市場・消費者にも受け入れ易く、実用化の可能性は高いといえる。いずれにしても、どこで均衡がとれるかは、システム設計とその運用方法が大きく影響して決定がなされる。

4. 食品における現実解 - オープン・システム -

上記の2つの役割において、前者の典型的な例は牛肉であり、後者は有機栽培農産物等が掲げられ、対象により両者の比重は異なってくる。従って、どちらに重きを置くか、そして、どこまでコストと手間をかけられるかを総合的に考えながら、まずは、最低限必要な情報を記録・閲覧できるようなシステムを構築し、必要に応じてオプションで情報を増やせるようにする工夫が現実的な取り組みといえる。

その場合、以下のようなステップが考えられる。

- 1) 個体の識別：個体あるいはグループ毎に情報管理するためにIDを付与する。
- 2) 情報のデジタル化：コンピュータが扱えるように情報を変換、蓄積する。
- 3) 情報の公開：蓄積した情報を外部システムや消費者に伝えられるようにする。
- 4) 情報の連携：1)～3)を自分の所掌する範囲内だけで完結させ、それを外部システムに渡して情報をパケツリレー式に伝えるオープンなシステムを構築する。

1)と2)に関する情報の蓄積媒体としては、IDラベル、バーコード、2次元コード、ICカード、ICタグ(無線タグ)、ネットワークサーバー等、様々なものが考えられている。現在の技術レベルにおいて、最も実用的な組み合わせは、特殊な機器を必要とせず、コストが低価格、という理由からIDラベル+ネットワークサーバーの組み合わせである。

の条件は、食品においてはかなり重要である。なぜなら、食品(特に農産物)の流通経路は不特定ということが前提だからこそ遡及が必要なわけで、特殊な機器

に依存したシステムだと全国にその普及がなされない限り機能しなくなるからである。とはいえ、これは必ずしも、特殊な機器を必要とする媒体が使えないということではない。食品工場のようなクローズドのシステム内だけで使う分には問題は無く、要はその情報を次の段階に伝える時にはオープンな、特殊機器に依存しないシステムを使えばいいのである。

また、の低コストを実現するには、ネットワークの利用が最も有効であると思われる。すなわち、移動するモノ（農産物、食材、食品）には最低限の識別子（ID）だけを付与し、実際の情報はネットワーク越しに、サーバーコンピュータに一元的に蓄積し管理する方法である。このようにすることで、情報の入出力や編集がいつでもどこからでもできるようになる利点は大きい。また、蓄積するデータ量の制限も取り払われる。実は、この方式はJR東日本で実用化しているスイカ（Suica：自動改札機にかざすだけで電波によって瞬時に情報処理を行うICカード）でも採用されている方式で、カード自体には、ID番号が書き込まれ、実際のデータは改札口を通してサーバーコンピュータで記録や計算がなされている。近い将来には携帯電話でも同様なことができることが予定されており、この場合も携帯電話は主に識別子として使われることが伺える。まさに、IT時代の情報伝達の方向性を示しているものといえよう。さらに、この携帯電話が情報の入出力インターフェースに果たす役割は大きなものがある。最近のカメラ付き携帯電話には2次元コード読みとり機能が搭載され、これまで専用読みとり機が必要であった2次元コードが携帯電話で読みとれ、そのままホームページで表示することが可能になってきている。IDラベルとともに2次元コードを印刷するだけで閲覧が容易になるこの手法はコストもかからず、後述する青果ネットカタログ（SEICA）でも採用されるとともに、わざわざホームページアドレスを入力する必要がなくなる利便性がユーザーに受け入れられれば、普及していくものと思われる。

3)と4)に関しては、インターネットを使い、ホームページ上で消費者に情報公開をすることは段々と常識となりつつある。しかし、残念ながら、この認識は必ずしも行き渡っては居ない。現に、トレーサビリティといいながら、1)2)だけに留まって、せつかくの情報が消費者まで届かないケースが多々みられる。1)2)だけでは、単なるIT利用による品質管理に留まった段階であり、トレーサビリティの本質は、むしろ3)4)をいかに実施するかが重要なのである。消費者の安心は、情報を積極的に公開して得られるものであり、特にホームページ上での公開は、企業（生産者）と消費者の距離を縮めるひとつの有効な手段となるはずである。

さて、そうはいっても、4)の情報の伝達は、これまでなかなか困難であった。食材メーカーA社から、加工業者B社へ、そして、流通業者C社へ、フードチェーンの間をどのように情報を伝えるかは古くて新しい問題である。本来は、A社、B社、C社のデータベースが共通の規格でもって情報のやりとりをできれば理想的である。しかし、現実的には、共通の規格作りも難しいし、異なったシステムのデー

データベース間交信もこれまた困難を極め、思うように進められないという壁があるのが現状である。

5. XML Web サービスによる情報伝達

しかしながら、前述の問題点は、インターネット技術の進歩により、これまでと異なった新たな解決法が提案されている。Web サービス（単なるホームページと区別して XML Web サービスとも称する）の活用である。最近では、データベースと Web との連動がごく当たり前ようになってきている。Web 技術はシステムに依存しない統一規格である。そこで、Web を介して異なったシステムがデータ交信を行う XML Web サービスという技術が開発された。Web サービスとは、人手を介さず、ホームページ同志が自動的にデータ交信を行う技術であり、その時に使う言語が人間もコンピュータも理解できる XML (eXtensible Markup Language) である。XML は、ホームページを作成するために使う HTML と似ているが、大きな違いは、HTML はあらかじめ決められたタグしか使えないのに対して、XML は自分でタグを作れることである。さらに、XML を使うとデータ同士の主従関係を決めたり、データの意味を識別したりといった構造化した文書が作成可能となる。既に、インターネット上の世界標準である W3C (World Wide Web Consortium: インターネット上の標準を定める国際組織) の勧告がなされており、次期バージョンのワードやエクセルでも対応がなされるはずである。このような共通語を使うことで、電子商取引はもとより、異なったシステム間でのデータ交換が容易になる。これは、食品のトレーサビリティにも非常に有用な技術である。そこで、実際に、農産物のトレーサビリティへの適用例を紹介する。その前に、農産物の情報の特徴を整理してみると以下ようになる。

特徴 1. 情報の多様性: 例えば、同じ品目でも、生産者・品種・栽培方法等が異なり、工業製品のような均一情報では無い。

特徴 2. 情報の発生地点: 消費者の一番欲しい情報が発生するのは農家や畑であり、これらの情報のデジタル化を容易にする工夫が必要。

特徴 3. 複雑な流通ルート: 生産者 卸売市場 仲卸 小売店と流れ、最終的にどこに届くかは定まっておらず、途中で情報の消失や、スムーズな情報伝達が困難。

特徴 4. 不特定多数の受け手: 直販、宅配、代理店販売と異なり、どこの誰が手にするのか最後までわからない。

特徴 5. 情報の重要性: 消費者は、安全・安心な農産物に強い関心。

特に、特徴 5 の「情報の重要性」は、基本的な農産物の情報公開を誰もが望んでいることである。それらの情報がデータベース化して一元的に管理され、その情報を誰もが自由に取り出して再利用できれば非常に便利である。生産者は出荷先ごと

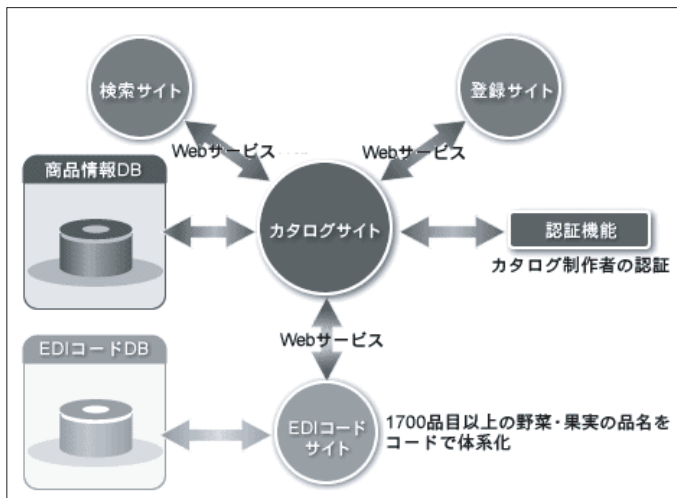


図3 XML Web サービスによる SEICA の構築

に情報を伝える必要が無くなり、その情報を再利用した様々なビジネス展開も考えられるようになる。このような「情報の共有化」により、農産物の流通を変えようという意図のもとに開発されたのが「青果ネットカタログ」SEICA（<http://seica.info>、以下、SEICA と略す）である。

このシステムは図3のように複数の XML Web サービスが連携しあって構成されている。公開されたのは平成 14 年 8 月だが、その前身となるシステムは、1 年以上前の農産物ネット認証システム VIPS（<http://vips.nfri.affrc.go.jp>）の実証試験において「しろね茶豆」や「ルレクチェ」を対象に構築されており、XML Web サービスの実装はかなり早い時期から試みられていた。SEICA は、VIPS の経験をもとに、これを汎用化し、あらゆる野菜・果実の情報発信を誰でも簡単に行え、着実に消費者までその情報を届ける XML Web サービスという位置付けとなっている。

さて、それでは、SEICA における XML の役割を説明していく。

特徴 1 に関しては、一つの農産物情報に、カタログ番号という ID をシステムから自動発行することで解決を図っている。これ自体は、XML とは直接的には関係しないが、実際の農産物には ID だけを流通させ、それに紐付けされた情報はネットワーク越しに XML で蓄積しておくことで、インターネット環境さえあれば、どこからでも閲覧できるようになっている。

特徴 2 に関しては、ホームページ上で全ての情報入力（文字だけでなく、画像、音声も含む）を行えるような仕組みを取り入れている。ここで、入力された情報を

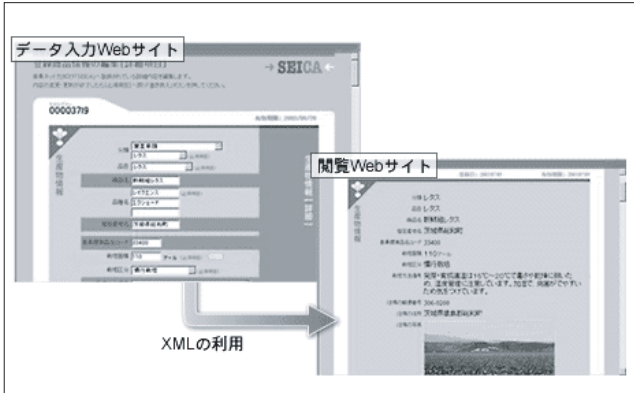


図 4 自動ホームページ作成機能

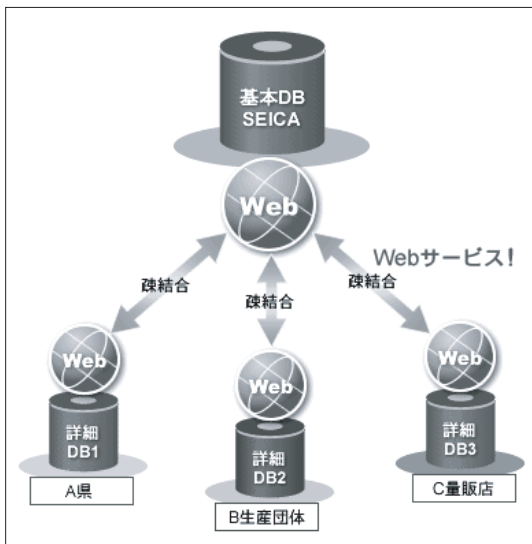


図 5 DB 間のリンク

XMLで蓄積することで、その後、さまざまな場面での繰り返し利用が可能になる。

まず、1番目の利用は、図4のようにXSLT(XMLデータの構造変換を行う言語)により閲覧画面を任意のデザインで表示させ、自動ホームページ作成機能を実現している。これにより、Web作成の知識が一切ない生産者でも、ホームページでの情報公開が可能になる。

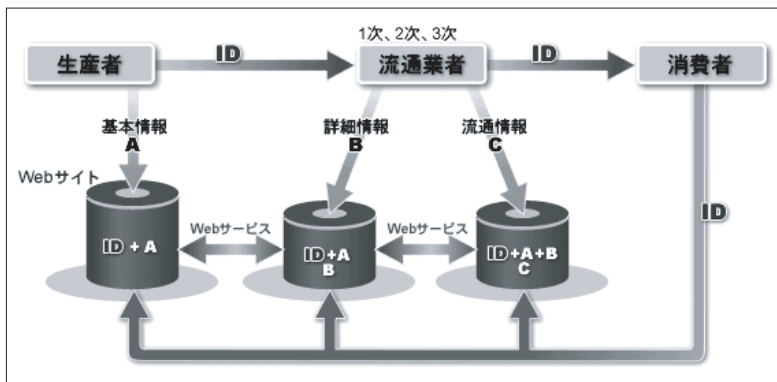


図 6 段階的なトレーサビリティの導入

2 番目の利用は、図 5 のような XML Web サービスによる連携が考えられる。SEICA に蓄積される情報は、ある意味では誰もが必要とする最大公約数的な基本情報である。ところが、県などの行政組織、JA 等の生産団体、売り場である量販店等では、それぞれの立場に応じた独自情報を付加し、カスタマイズした状態での情報発信のニーズがかなり大きい。例えば、JA で持っている各品目の作業日誌データも一緒に表示したいという場合が考えられる。従来は、全く異なったデータベースの情報交換は様々な制約があり、困難を極めていた。しかし、XML Web サービスであれば、システムの違いを考慮する必要はない。WSDL 文書（Web サービスを利用するための技術文書）さえ公開されていれば、情報を引き出して、自分のデザイン仕様にアレンジしなおして公開することが可能になる。例えば、取引機能を追加すれば、従来より充実した商品紹介を伴った E マーケットプレイスを実現することができる。

3 番目の利用として、特徴 3 & 4 に関して、図 6 のような使い方が考えられる。情報は農産物が流通する各所で新たに生じるので、生産側の情報だけでなく、流通過程や店舗等における入在庫状況もトレースしたいという場合、それぞれの情報が生じた場所で ID（カタログ番号）とともに分散管理し、ID をもとに XML Web サービスで情報交換すれば、自律分散型の増殖データベースが実現する。これは農産物だけでなく、加工食品にも適用可能である。つまり、原材料の情報は産地が SEICA を使って入力し、加工工程の情報は食品工場が Web サービス化し、両者を ID で紐付けすれば、一連の情報が消費者まで確実に伝えることができるようになる。さらなるメリットは、それぞれの情報管理に対する責任が明確になるばかりでなく、役割に応じたコスト負担も XML Web サービスで実現できることであり、実用可能なトレーサビリティに XML の果たす役割は非常に大きいといえる。

そして、最後の 4 番目の利用として、携帯電話対応 (i モード, EZweb, J-スカイ) が挙げられる。携帯電話の数が PC を凌駕した現在、携帯からのアクセスも無視できない状態にある。同じ内容のコンテンツを、各社の携帯向けに XSLT で整形しなおして発信できることが XML を採用した大きな利点でもあったわけである。

6. 青果ネットカタログ (SEICA) の利用と展望

SEICA のベースとなった農産物ネット認証システム (VIPS: Virtually Identified Produce System) は、平成 11 年より数多くの実証試験^{1) ~ 9)}を行っている。(<http://vips.nfri.affrc.go.jp/> を参照) この仕組みは、平成 14 年 10 月にビジネスモデル特許が成立し、特許登録されている。(特許第 3355366 号「識別子付与による農産物流通における農産物の個人情報入手システム」)

汎用化 VIPS として取りかかった SEICA 開発の基本方針は以下の 6 点を特徴としている。

- 1) 公共性：誰でもデータ入力でき、誰でも閲覧できる
- 2) 経済性：無料で利用可能
- 3) 汎用性：幅広い農産物をカバーできる
- 4) 発展性：単なる情報の蓄積だけでなく、積極的な応用展開ができる
- 5) 拡張性：将来の仕様変更に対応可能
- 6) グローバル性：インターネット、XML/SOAP (Simple Object Access Protocol : コンピュータ間の情報交換をするための規格) による世界規格

実際の利用は図 7 のようになる。生産者は、Web ページのフォームから、生産物単位で、生産物情報、生産者情報、出荷情報、を登録できる。この際、文字情報だけでなく、写真や音声等も登録可能である。登録されると、システムがその生産物に対しカタログ No. を発行する。生産者は、出荷する農産物にそのカタログ No. と登録したシステムの Web アドレスをラベルや包装に印刷することで、細かな情報をインターネットを通じて公開が可能になる。所謂、青果物に対する住民基本台帳制の導入といったイメージである。登録者は、個人生産者、産直農家、JA 等の生産団体、いずれのレベルでも可能なように設計されている。一方、これらのデータを検索する側としては、BtoB と BtoC の両方の活用が考えられる。BtoB は、市場、量販店、外食産業等が、入荷する農産物の探索に使えるように、品目に加え、地域等の条件検索が可能である。BtoC は、消費者が、購入した農産物に記載の Web アドレスとカタログ No. でその履歴が確認できる¹⁰⁾⁻²⁷⁾。

この青果ネットカタログは、公的なデータベースとして、(財)食品流通構造改善促進機構、(独)食品総合研究所、農林水産研究計算センター(農水省)が協力しながら運用していく予定である。あらゆる野菜と果実(1700 品目以上)の履歴を、誰でも、どこからでも、無料で登録でき、閲覧できる、世界で初めての大規模システムである。また、近年の携帯電話の普及を背景に、検索に関しては、i モー



図7 SEICAの利用法

ド、EZweb、J-スカイ等、各社の携帯電話に対応し、PCと同じURLで検索可能となっている。加えて、次世代Web技術とされるXML/SOAPによるWebサービスとして構築され、アクセスするためのインターフェースWSDL (Web Service Description Language) も公開する予定である。また、図6の実例として食品加工会社において、納品された食材のカタログNo.により、SEICAから情報を取り出して、自社のトレーサビリティシステムに情報を自動入力することも検討されている。

本システム自体は、公的な運用として情報提供だけに徹し、それらの情報を利用した様々な商用サービスは、XML Webサービスを利用して民間やJA等が独自のサイトを構築するといったことが可能になる。いわば、インフラにあたる電話線を引く部分をSEICAが果たし、それを使っのダイアルQ2のような様々なビジネスモデルは民間が担うというスキームである。このような役割分担により、民間も情報入力の手間が省け、開発コストを押さえて、農業分野に新しいサービスの提供が促進されると期待される。既にSEICAをプラットフォームとして、Webサービスを利用した様々なアプリケーションが民間会社から実用化に至っている。以下は、その一例である。

1) SEICA 連携付加機能サービス「VIPS v.2 (ビップスブイツー)」

<http://vips2.jp/>

SEICA と連携することで、独自の情報公開システムを実現するシステムである。独自のトレーサビリティシステムの構築を短期間で可能にするだけでなく、初期投資費用、システム運用管理の負担を軽減すると同時に、認証機能、アクセス解析、掲示板、アンケート機能などを駆使して、産地のブランド化が促進できる ASP サービスである。(図 8)すでに、このシステムを使っでの県単位での取り組み (JA 全農山形 <http://jaym.jp>, 茨城県・JA 全農いばらき <http://ibrk.jp>) や単協での取り組み (JA 白根市 <http://460.jp>, JA にいがた南蒲 <http://www.jankn.com>) 等が行われて注目を浴びている。また、VIPS v.2 とは異なるが、同様に SEICA をベースに独自情報開示システムを構築した JA あいち経済連 (<http://www.ja-aichi.com>) もブランド化を目指した試みとして注目に値する。

2) POP 作成ソフト「EasyPOP for SEICA」

<http://www.softlabo.jp/seica.htm>

SEICA に登録されている生産者情報、生産物情報、出荷情報をそのまま利用して POP の印刷を簡単に行うソフトである。レイアウトサンプルを指定し、カタログ番

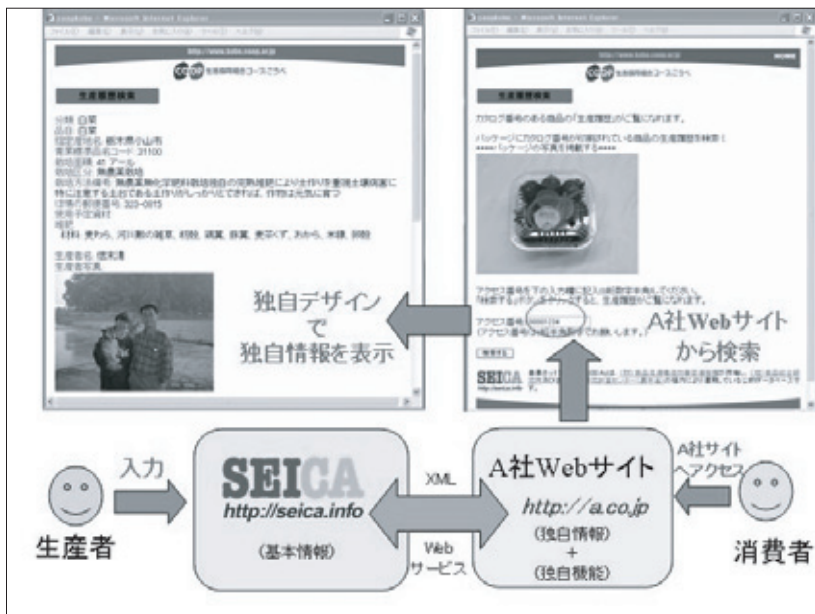


図 8 SEICA を利用した独自情報の発信

号を入力するだけで簡単に印刷が行えるので、店舗でのPOPやプライスカード、外食産業でのメニュー等、消費者への身近な情報公開ツールとして利用できる。

3) 食品スーパー向け青果生産者表示「フラッシュポップ」

<http://www.youworks.co.jp/product/flashpop/>

店頭にある農産物のカタログ番号を入力しておくことにより、SEICAから必要な情報を自動的に取得し、店頭用デザインで紙芝居のように順次表示するシステムが「フラッシュポップ」である。画面のハードコピーを印刷し、売り場にPOPのように表示することもできる。運用も、初期設定をすれば、お店では、パソコンの電源を「入・切」するだけで非常に簡単である。「フラッシュポップ」は、システムの運用費が不要な、Windowsパソコン用のソフトウェアである。

以上、SEICAは様々な拡張性を併せ持った農産物の情報インフラであり、農産物のデータ入力手法とそのデータの蓄積場所を無料で提供するものである。しかしながら、このシステムは誰にでも開かれたものであり、やる気のある生産者、生産団体、流通業者なら、それを利用して様々なことがコストをかけずにできるようになっている。今後は、実用システムとして更なる機能拡張を図りながら、他システムとの連携により、さまざまな形で消費者に情報を確実に届けることにより、安心を目的としたトレーサビリティの確立だけでなく、産地としてのブランド戦略にもつながる食と農の総合情報システムへと発展させる予定である。

詳しくは、パンフレットを始め、使用方法、入力できる情報項目、さらにはお試し版まで、必要な情報は全てホームページから入手可能である。まずは、<http://seica.info> にアクセスし、新しい農産物流通のインフラを是非とも体験して頂き、ご意見、ご質問等をお寄せ頂ければ幸いです。なお、<http://vips.nfri.affrc.go.jp> にも参考文献を始めアップデートの情報を掲載しているのでご参照願いたい。

(食品総合研究所 食品工学部電磁波情報工学研究室 杉山 純一)

参考文献

- 1) 杉山純一．ネット型農産物認証システム，山形だだちゃ豆の販売実験．今月の農業，44(7)，35-40 (2000) ．
- 2) 杉山純一．インターネットによる農産物情報公開システム， - 生産者の顔が見え消費者の声が聞こえる農産物の創出 - ．食品総合研究所ニュース，56，2-3 (2000) ．
- 3) 杉山純一．インターネットを用いた農産物の品質管理保証システム， - 生産者の顔が見える消費者の声が聞こえる - ．フレッシュフードシステム，29(3)，74-76 (2000) ．
- 4) 杉山純一．インターネットいろいろ (5) 農産物ネット認証システム (VIPS) による販売実験．農業情報利用研究会誌，29，45-47 (2000) ．
- 5) 杉山純一．農産物の安全性確保に寄与する履歴情報システム．フレッシュフードシステム，30(1)，28-32 (2000) ．
- 6) 杉山純一．消費者と生産者を結ぶ情報ネットワーク．研究ジャーナル，24(7)，30-34 (2001) ．
- 7) 杉山純一．農産物流通におけるネット認証システム (VIPS) の開発．システム農学，17(2)，102-109 (2001) ．
- 8) 杉山純一．インターネット利用による農産物ネット認証システム (VIPS) ．農業および園芸，76(8)，845-854 (2001) ．
- 9) 江原正規，杉山純一，宇田渉，星野康人，相良泰行．しるね茶豆」を用いた農産物ネット認証システム (VIPS) の実証実験．食科工，49(7)，454-461(2002) ．
- 10) 杉山純一．農産物の情報共有を目指す，青果ネットカタログ「SEICA」．今月の農業，46(11)，38-43 (2002) ．
- 11) 杉山純一．トレーサビリティと青果ネットカタログ「SEICA」．農業および園芸，78(1)，153-159 (2003) ．
- 12) 杉山純一．農産物のトレーサビリティの現状と展望．農林統計調査，53(1)，4-10 (2003) ．
- 13) 杉山純一．生鮮食品トレーサビリティの今後の展開とロジスティクス．フードロジスティクス 季刊「フレッシュフードシステム」臨時増刊号，32(2)，109-113 (2003) ．
- 14) 杉山純一．インターネットで食の履歴がわかる 青果ネットカタログ「SEICA」の試み．ネイチャーインタフェイス，3(1)，18-21 (2003) ．
- 15) 杉山純一．食品におけるトレーサビリティの現状と課題 - IT 利用による農産物の情報公開 - ．食品工業，46(4)，25-31 (2003) ．

- 16) 杉山純一．農作物の安全性確保に寄与する履歴情報システム (VIPS) - 情報開示の最前線 - . 「食の安全」 - 遺伝子の組換え食品，残留農薬，BSE，環境ホルモンから衛生管理，情報開示まで - ，19-54 (2003) .
- 17) 杉山純一．農産物のトレーサビリティ技術．農林水産技術研究ジャーナル，26(4)，36-42 (2003) .
- 18) 杉山純一．トレーサビリティと ID 付与による情報システムの構築．トレーサビリティって何？ - 食の安全・食品の安全性確保の為に - ，103-122(2003) .
- 19) 杉山純一．望まれるトレーサビリティと最新技術．農業情報学会会誌「農業情報研究」別冊，57-61 (2003) .
- 20) 杉山純一．食品・農産物におけるトレーサビリティの最新技術．食品機械装置，40(6)，104-110 (2003) .
- 21) 杉山純一．望まれる食品のトレーサビリティとは - コストをかけずにメリットを生む技術革新 - . 月刊食料と安全，8(6)，11-20 (2003) .
- 22) 杉山純一．実用的なトレーサビリティ技術．食品の安全性評価と確認，189-195 (2003) .
- 23) 杉山純一．農産物の実用トレーサビリティ技術 - コストをかけずに最大のメリットを目指して - . 農工研通信，127，2-8 (2003) .
- 24) 杉山純一．独立行政法人食品総合研究所 - XML Web サービス 青果ネットカタログ SEICA を構築．Microsoft web サイト case studies，
<http://www.microsoft.com/japan/showcase/nfriaffrc.msp> (2003) .
- 25) 杉山純一．SEICA で店頭での生産履歴表示が簡単に．食と農を考える雑誌 AFF，34(7)，18 (2003) .
- 26) 杉山純一．食品のトレーサビリティと情報公開．ソフト・ドリンク技術資料，140，43-70(2003) .
- 27) 杉山純一．トレーサビリティと Web 技術．安心を届ける食品のトレーサビリティ - 「食」と「農」再生の切り札 - ，61-66 (2003) .

無機元素組成によるネギの原産国判別

1. はじめに

2002年1月、雪印食品が国によるBSE対策を悪用し、牛肉の原産地表示を偽装していたことが明らかになったのを端緒に、食品業者による原産地表示の偽装が立て続けに発覚した。表示偽装に関する事件が連日テレビ報道され、新聞紙面上を賑すようになると、消費者の食品表示に対する不信感が一気に増大し、表面化することとなった。もっとも、このような事件が発覚する前から、食品の品質および安全性や健康に対する消費者の関心は高まってきており、食品の多様化と相まって1999年にJAS法（農林物資の規格化及び品質表示の適正化に関する法律）が改正され、2000年7月からは全ての生鮮食品に対して原産地表示が義務付けられていた。しかし、現実にはJAS法改正前だけでなく、改正以降にも表示の不正は行われており、偽装表示に対する罰則が強化され、行政当局および消費者によるモニタリングの目が厳しくなっているにもかかわらず、いまだに表示の偽装が摘発されている。これに対して行政当局も手をこまねいて見ているだけでなく、消費者のモニターや買い上げ検査を増やすことで対応しているが、食品表示、特に原産地表示の偽装を見破ることは難しいのが現実である。

食品の原産地を識別する方法には、以下の3つの方法がある。一つ目は、外見や食味、香りなど、人の五感で原産地を推定する官能検査である。二つ目は、業者が保管している伝票などの書類を調べることで、商品や原材料の入手先から販売先までを確認し、産地を判断する書類検査である。三つ目は、食品に含まれる成分の含有量やDNAを分析機器を使用して分析することで産地を判定する理化学検査である。これらの検査が現在表示チェックのために行われているが、どれも簡単に行える方法ではなく、検査の正確さの面でも問題が残る。官能検査で推定する方法は熟練を要すると共に、客観性がないことから、疑わしい物が見つかった場合には書類検査などで必ず確認する必要がある。書類検査では証拠となる書類が残っていれば正しく判断できるが、必ずしもそうはいかない。また、業者の協力も必須であり、非常に手間のかかる方法でもある。理化学検査では、客観的な結果が得られることから、原産地を判別する手法の開発が以前から切望されているが、未だ、実用に耐えうる手法は確立されていない。理化学分析による研究としては、非常に達成することが困難なテーマであるが、現在多くの試験・研究機関で取り組まれている。今後の展開が楽しみな分野であるとも言える。

2. 理化学検査による原産地の判別

2.1 DNA による判別

すでに実用化されているものとして、(独)食品総合研究所が開発したDNAの塩基配列の違いによる米の品種識別法が信頼性の高い手法として広く行われ¹⁾²⁾、これまでに多くの品種の偽装が摘発されている。他に、ウナギ³⁾、イチゴ、白インゲン豆などがある。

DNAによる品種判別手法では、品種に特有の塩基配列を特定するのに非常に労力を要するが、ひとたびその塩基配列が特定できれば正確に品種を識別できるという点で非常に優れた手法である。しかし、この手法では品種の識別は正確に行うことができるが、産地までは識別できない。現在、各産地で生じた変異に起因する塩基配列の変化を利用した米の産地判別についての研究が行われている。また、識別した品種から産地を推定する方法も有効な手段として考えられる。ただし後で紹介するネギのように、日本品種の種苗が海外に持ち込まれ、栽培されて日本に輸入されるような場合には対応できない。

2.2 含有成分による産地判別

海外では、欧米を中心にかなり以前から産地判別の研究が行われている。特にフランスでは、ワインの産地を理化学的に判別する研究が多数報告されている⁴⁾⁻⁶⁾。これは、ワインは産地により価格が大きく変わるとともに、外見や味覚による識別も難しく、ラベルを偽るだけで価格を何倍にも引き上げるような偽装が容易に行える事が一因にある。また、フランスではワインやチーズなどに対し、AOC(原産地呼称統制)など、優良な品質の製品を産する産地である事を保証する認証制度が古くからあり、こうした制度の信頼性を維持するためにも理化学的な原産地判別手法の開発が早くから求められてきた。フランス以外の国でも主にヨーロッパでワインの産地を判別する研究がなされてきた^{7),9)}。他に、コーヒー^{10),11)}、茶^{12),13)}、オレンジジュース¹⁴⁾、オリーブオイル¹⁵⁾などの産地判別に関する研究報告がある。これら加工食品の産地判別に関する研究はかなり行われているが、生鮮食品に関してはジャガイモ¹⁶⁾などで報告があるが、報告例は少ない。

日本では最近になって表示偽装の問題が浮上り、理化学的に産地を判別する研究が行われるようになった。しかし、それ以前には一部を除いてあまり行われておらず、産地判別技術開発の要望の高いコメ^{17),18)}についての報告があるが、報告例は少ない。現在行われている研究としては、2001年度から筆者らがネギの判別に取り組んでいる。他に、2002年度からスタートしたプロジェクトでは、茶、ウメ、プロッコリーおよび漬物などがあり、2003年度からはタマネギの判別プロジェクトがスタートしている。また、消費者からの強い要望により、原料原産地の表示を義務付ける方向でJAS法改正の検討が進められていることから、今後、加工食品の産地判別手法の開発も求められてくると考えられる。

2.2.1 有機成分による判別

有機成分による産地判別手法としては、カカオ豆および小麦の脂肪酸組成^{19),20)}、オレンジジュースの各種カロテノイド濃度¹⁴⁾、赤ワインのフラボノイド濃度²¹⁾、はちみつのpH、酸度、灰分および糖組成²²⁾などによる判別が報告されている。しかし、この手法を農産物の判別に適用する場合には、収穫時期（成熟度）や収穫後の保存期間の長さで成分濃度あるいは組成の変化のないことを確認する必要がある。また、同じ畑あるいは産地で栽培されたものでも個体差が大きくなることや、年による変動などの懸念もあり、こうした点に対しても問題のない事を確認する必要があるため、有機成分を産地判別に利用するのは難しいのが実状である。

2.2.2 無機元素組成による判別

無機元素組成による産地判別としては、ワイン⁷⁾、オレンジジュース²³⁾、コーヒー¹¹⁾、茶^{12),13)}、ジャガイモ¹⁶⁾、コメ¹⁷⁾など、多くの報告がある。現在国内で行われている産地判別の研究のほとんどは無機元素組成によるものである。無機元素組成による産地判別では、産地による土質の違いや、稲のように水を大量に要する植物では、土質と水の違いがそこで栽培された農産物の無機元素組成に反映されることで判別を可能にしている。有機成分による判別と違い、収穫後に変化することが無いために保存による影響はなく、通常通り収穫されたものであれば収穫時期（成熟度）による差は小さいと考えられる。また、同じ土質で同じ水を用いたほ場であれば個体差も小さいと考えられる。しかし、この判別手法にもやはり問題点がある。対象とする元素を何にするかにもよるが、例え隣り合ったほ場でも土質や水、施肥状況が違えば、栽培された農産物の無機元素組成も変わる可能性がある。そのため、ある特定の農産物の判別手法を確立するには、対象とする各産地内の多くのほ場で栽培された農産物に対して無機成分組成のデータを蓄積する必要がある。非常に時間と労力を要する。現実的には全てのほ場の農産物を分析する事は不可能であるため、100%正確に判別することはできない。ただし、判別したい産地に、他に比べて著しく多く、あるいは少なく存在する元素を見つければ、限りなく正確に判別することは可能である。また、データの蓄積が多ければ多い程信頼性の高い判別手法にすることができる。

2.2.3 同位体比による判別

同位体比による産地判別手法としては、D/H（水素同位体比）と¹³C/¹²C（炭素同位体比）によるワイン⁸⁾、¹³C/¹²Cと¹⁸O/¹⁶O（酸素同位体比）によるオリーブオイル¹⁵⁾、D/H、¹³C/¹²C、¹⁸O/¹⁶Oおよび無機元素濃度によるワイン⁵⁾、¹³C/¹²Cと¹⁵N/¹⁴N（窒素同位体比）によるコカイン²⁴⁾、¹¹B/¹⁰B（ホウ素同位体比）によるコーヒー¹⁰⁾、¹¹B/¹⁰Bと⁸⁷Sr/⁸⁶Sr（ストロンチウム同位体比）によるコメ¹⁸⁾、などの報告がある。なお、国内での報告例はホウ素とストロンチウム同位体によるコメの判別のみ

であるが、現在、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ と鉛同位体比によるネギの産地判別など、いくつかの研究機関で取り組まれている。

ストロンチウムや鉛のような重元素の同位体比では同位体間の相対的な質量差が小さいため、動・植物による吸収や代謝、および温度や pH、共存する元素あるいはイオン等の環境、による同位体比の分別（質量差別効果）が小さい。このことは、土壤中の重元素のうち植物に利用可能な形態にある元素が植物中の重元素とほぼ同じ同位体比になると共に、同じ環境下で栽培されていれば違う種類の農産物でもほぼ同じ同位体比となることを示す。また、これらの同位体比は地質の形成年代によって変わるため、当然地理上の違いが同位体比に反映される。これらのことから、判別したい産地の間でこれらの同位体比に有意な差が確認できれば、信頼性の高い原産地判別手法を確立できることになる。しかし、この判別手法にもいくつかの問題点がある。ストロンチウムあるいは鉛の同位体比の産地による差は非常にわずかであるため、農産物等の産地の判別には高精度の測定が求められ、前処理に多大な時間を要する。マルチコレクター型の ICP-MS（誘導結合プラズマ質量分析計）を用いれば時間を短縮できるが、高価な装置であるため、まだ限られた研究機関でしか利用されていない状態である。

3. 無機元素組成によるネギの原産国判別

3.1 背景と目的

近年、海外からの生鮮野菜等の輸入急増がその国内価格を下落させ、農家経営を大きく圧迫している。そこで、2001 年にはネギ・イグサ・生シタケを対象とした暫定のセーフガードが中国に対して発動された。結局、正式なセーフガードの発動は見送られたが、安価な輸入農産物が国内農家に与えている影響は依然として大きい。このような情勢に対応し、国内農家の優位性を保つためには JAS 法に基づく原産地表示を徹底させると共に、適性に表示がなされているかどうかを検証する技術の開発が必要である。こうした行政部局からの要請に応え、行政対応研究としてネギの原産国判別技術の開発を目的とした研究が 2001 年度から 3 年計画で行われている。また、前述のように、原産地表示を消費者にとって信頼性のあるものにする上でも、このような技術の開発は求められている。

さて、日本に輸入されてくる生鮮ネギ（白ネギまたは根深ネギ）の大部分は中国産である。これらは日本の商社などが日本の種子を中国に持ち込み、日本人の嗜好に会うように指導して日本向けのネギを栽培し、日本に輸入する開発輸入によるものである。中国でも元々ネギは栽培されているが、日本のネギとは味や形状が異なるため、日本の消費者には受け入れられず、特別に日本向けのネギを栽培する必要がある。そこで、人件費が安く、ネギ栽培の経験があり、南北に広い国土を持つため産地を移すことで通年栽培することができ、日本からの距離も近いために生鮮のネギを輸送するにも都合の良い、中国からのネギの輸入が増大した。従って、本研



図 1 国産ネギと中国産ネギ

究では国産か中国産かの判別ということで研究が行われている（図 1）。

なお、このプロジェクトでは、筆者らが行っている無機元素組成により、迅速かつ簡便にネギの原産国をスクリーニング判別する技術の開発と共に、独立行政法人・農業環境技術研究所と東京工業大学のグループが行っている $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ と鉛同位体比により判別する技術の開発が行われている。後者のグループの手法では、分析に時間がかかる点と、特殊な装置で測定する必要がある（東京工業大学にあるマルチコレクター型の ICP-MS を使用）点が問題となっているが、より信頼性の高い判別手法との位置付けで行われている。以下に筆者らの取り組みを紹介する。

3.2 部位別分析

生鮮食品を無機元素組成によりの産地判別判別する上で問題となるのが、部位による含有濃度の違いである。特にネギでは、根に近い白色をした下部と緑色をした上部とで元素濃度が大きく異なるだけでなく、内側と外側でも元素濃度が異なっている。また、ネギは上部が既に切り取られて売られているため、ネギ全体を分析対象にすることはできない。従って、サンプリングによる変動ができるだけ小さくなるように分析部位を決める必要がある。分析対象部位の候補としては、ネギ基部からの位置関係から部位の特定がしやすく、上部のように既に切り取られているようなこともない下部の白い部分が挙げられる。この部位を分析対象部位として決める前に部位による元素の濃度分布がどうなっているか調べた。

3.2.1 下部、中部、上部の部位別分析²⁵⁾

下部、中部、上部として、それぞれ基部から 1cm 上の上部 10cm の部位、白い部分と緑色の部分の境目から 5cm 下の下部 10cm の白または薄い緑色の部位、白い部分と緑色の部分の境目から 5cm 上の上部 10cm の緑色の部位を 25 本分採取して試料とした。29 元素の定量結果を表 1 に示す。全体的にネギ上部の緑色の部位の方が下部の白い部位よりも濃度の高いことが分かった。特に、Al, Fe, Mn, La, Ce, Nd, Pb で著しかった。Na, Co, Ni, Cu, Zn, Cd 及び Tl ついては、ネギの下部と

表 1 FAAS, ICP-AES および ICP-MS により得られたネギの下部, 中部, 上部の無機元素分析結果

元素	装置	測定値 ¹⁾			検出限界
		下部 ²⁾	中部 ³⁾	上部 ⁴⁾	
		wt% ⁵⁾			wt%
P	ICP-AES	0.383 ± 0.014	0.366 ± 0.012	0.433 ± 0.015	0.002
K	ICP-AES	1.43 ± 0.05	1.73 ± 0.07	2.15 ± 0.06	0.008
Ca	ICP-AES	0.321 ± 0.024	0.360 ± 0.023	0.566 ± 0.004	0.0008
		µg/g ⁵⁾			µg/g
Na	FAAS	99 ± 0	113 ± 5	114 ± 2	1
Mg	ICP-AES	1186 ± 93	1169 ± 75	1765 ± 53	1
Al	ICP-MS	8.8 ± 0.4	11.3 ± 0.5	47.6 ± 3.4	0.5
Mn	ICP-AES	17.9 ± 0.1	28.6 ± 1.6	49.7 ± 1.0	0.4
Fe	ICP-AES	18 ± 1	25 ± 1	66 ± 2	3
Co	ICP-MS	0.12 ± 0.01	0.11 ± 0.01	0.15 ± 0.01	0.01
Ni	ICP-MS	1.41 ± 0.02	1.14 ± 0.04	1.40 ± 0.04	0.04
Cu	ICP-AES	2.3 ± 0.1	2.4 ± 0.1	2.8 ± 0.1	0.9
Zn	ICP-AES	22 ± 1	19 ± 1	20 ± 1	2
Rb	ICP-MS	3.2 ± 0.0	3.3 ± 0.1	4.7 ± 0.2	0.4
Sr	ICP-AES	14.7 ± 0.1	15.8 ± 1.2	18.3 ± 0.2	0.1
Mo	ICP-MS	0.10 ± 0.01	0.22 ± 0.03	0.36 ± 0.02	0.02
Cd	ICP-MS	0.199 ± 0.016	0.107 ± 0.005	0.119 ± 0.018	0.003
Te	ICP-MS	ND ⁶⁾	ND	ND	0.01
Cs	ICP-MS	0.006 ± 0.001	0.004 ± 0.000	0.010 ± 0.001	0.003
Ba	ICP-AES	3.5 ± 0.2	4.6 ± 0.4	5.9 ± 0.2	0.6
La	ICP-MS	0.009 ± 0.001	0.008 ± 0.003	0.030 ± 0.002	0.006
Ce	ICP-MS	0.012 ± 0.000	0.020 ± 0.004	0.074 ± 0.008	0.002
Nd	ICP-MS	ND	ND	0.030 ± 0.013	0.006
Sm	ICP-MS	ND	ND	ND	0.008
Eu	ICP-MS	ND	ND	ND	0.003
Tb	ICP-MS	ND	ND	ND	0.006
Yb	ICP-MS	ND	ND	ND	0.005
W	ICP-MS	ND	ND	ND	0.008
Tl	ICP-MS	0.008 ± 0.000	0.005 ± 0.000	0.008 ± 0.001	0.002
Pb	ICP-MS	0.02 ± 0.01	0.02 ± 0.01	0.11 ± 0.02	0.01
水分 (%)		91.0	92.0	92.3	

1) 平均値 ± 標準偏差 (n=3)

2) ネギの基部から上 1cm から 10cm の部位 .

3) ネギの白い部分と緑色の部分の境目から 5cm 下の 10cm の白または薄い緑色をした部位 .

4) ネギの白い部分と緑色の部分の境目から 5cm 上の 10cm の緑色をした部位 .

5) 単位は乾重量当たりの元素濃度 .

6) ND = 未検出



図 2 ネギの分析対象部位

上部とでほとんど濃度差が無かった。ネギの下部と上部とで濃度差が無ければ、下部あるいは上部どこを使っても、そのネギに含まれる元素濃度として扱うことができるが、多くの元素で濃度が異なることが確認できた。そこで、既に切り取られて店頭に並べられているため、緑色の部分の状態が一定していない上部よりも、部位を特定しやすく、安定して採取できるネギの下部を分析対象部位とした(図 2)。また、ネギの下部 10cm の部位において、濃度が検出限界以上になった Na, Mg, Al, P, K, Ca, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Mo, Cd, Cs, Ba, La, Ce, Tl, Pb の 22 元素を分析対象とすることに決めた。

3.2.2 外側と中心部の部位別分析²⁵⁾

中心部と外側とでの無機元素の含有量の違いでは、Al, Co, Pb において、ネギの外側の方が中心部よりも含有量が著しく大きかった(表 2)。他に、Ca, Mn, Sr, Cd, Ba, La, Ce, Tl において、ネギの外側の方が中心部よりも含有量が大きかった。一方、P, K, Mg, Fe, Cu, Rb, Cs では、ネギの中心部の方が外側よりも含有量が大きかった。Na, Zn, Mo はネギの中心部と外側で含有量の差が小さかった。Na と Zn については、ネギの下部と上部での差も小さく、ネギ全体で均一に存在していると思われる。

以上のことから、Al, Co, Pb、この中でも特に Al については、ネギの外側と中心部とで濃度が著しく異なるため、調製の際に外側の皮が何枚剥かれたかによって、同じ産地でも濃度差が大きくなる可能性のあることが分かった。しかしながら、ネギの調製は上部の緑色の部分の分岐が 3 本になるよう、統一した基準のもとで行われている。日本に輸入されてくるネギは全て現地で調製された状態のネギであるため、外側をさらに剥くことはせずに、そのまま外側を十分に洗浄して分析に供する事とした。

3.3 ネギの原産国判別のための分析方法

3.3.1 試料

産地判別の研究の進める上で、最も頭を悩ませる問題の 1 つが、産地の確かな試料の入手である。現実問題として、由来の定かな試料を、対象とする各産地の様々な地域から多数入手することは非常に困難であり、このことがこれまで産地判別の

表 2 FAAS, ICP-AES および ICP-MS により得られたネギの中心部, 外側から 2 枚目, 外側から 1 枚目の無機元素分析結果¹⁾

元素	中心部 wt% ²⁾	外側から 2 枚目	外側から 1 枚目
P	0.317 ± 0.005	0.205 ± 0.003	0.155 ± 0.002
K	1.82 ± 0.04	1.47 ± 0.00	1.23 ± 0.00
Ca	0.106 ± 0.03	0.206 ± 0.008	0.327 ± 0.015
	μg/g ²⁾		
Na	67 ± 1	61 ± 14	65 ± 12
Mg	640 ± 14	358 ± 10	315 ± 12
Al	1.4 ± 0.2	2.8 ± 0.2	9.4 ± 1.8
Mn	55.7 ± 1.3	63.2 ± 2.5	72.1 ± 2.8
Fe	17 ± 1	10 ± 1	10 ± 0
Co	0.01 ± 0.00	0.03 ± 0.01	0.09 ± 0.00
Ni	3.11 ± 0.17	2.26 ± 0.22	2.58 ± 0.24
Cu	2.7 ± 0.1	0.8 ± 0.1	0.6 ± 0.1
Zn	26 ± 0	22 ± 1	24 ± 1
Rb	8.4 ± 0.5	5.4 ± 0.4	5.0 ± 0.4
Sr	3.3 ± 0.1	7.2 ± 0.4	10.2 ± 0.5
Mo	0.04 ± 0.01	0.02 ± 0.00	0.04 ± 0.00
Cd	0.348 ± 0.007	0.483 ± 0.031	0.581 ± 0.021
Cs	0.016 ± 0.001	0.009 ± 0.000	0.010 ± 0.000
Ba	1.1 ± 0.2	0.0 ± 0.2	2.9 ± 0.3
La	0.008 ± 0.001	0.020 ± 0.001	0.033 ± 0.002
Ce	0.007 ± 0.001	0.019 ± 0.001	0.030 ± 0.002
Tl	0.042 ± 0.001	0.066 ± 0.002	0.067 ± 0.001
Pb	0.01 ± 0.00	0.03 ± 0.02	0.07 ± 0.01
乾重量比	0.614	0.190	0.196

1) 平均値 ± 標準偏差 (n=3)

2) 単位は乾重量当たりの元素濃度。

研究が進まなかった大きな原因の 1 つであった。しかし、これが成されなければ、研究を遂行することができないのも事実である。本研究では、国産のネギは 53 産地から 65 検体を直接入手した (図 3)。中国産から輸入されてくるネギについては山東省、上海市、福建省産のものが大部分である。季節に応じて産地が移り変わり、6 月から 12 月は山東省産、12 月から 3 月は上海市産、3 月から 6 月は福建省産のネギが輸入されてくる。輸入量の多さは前記の順になっている。よって、中国産は特定の商社から山東省安丘市産 18 検体と福建省アモイ産 8 検体を、特定の商社および卸売業者から上海市産 10 検体の計 36 検体入手した (図 3)。これらの試料は、各試料が由来するほ場からのネギを代表するデータとするため、それぞれ 25 本分を粉碎して分析し、無機元素組成のデータを蓄積した。しかし、国産表示

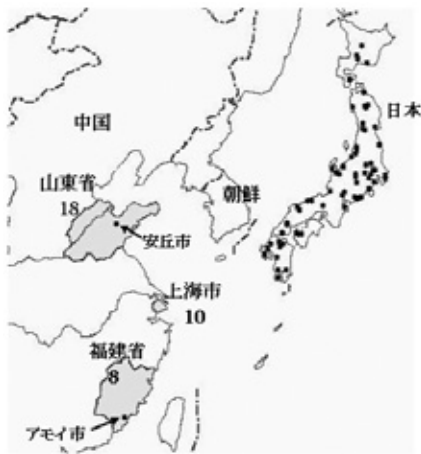


図3 収集した国産ネギ 65 件と中国産ネギ 36 件の地図上の位置

ネギ 1 束のうち 1 本だけ中国産が混ぜられるようなケースも考えられるため、実用的にはネギ 1 本での判別が求められる。そこで、前記の産地の定かな試料についてネギ 1 本での分析を行うと共に、店頭で買い上げたネギについてもネギ 1 本の分析を行った。店頭で買い上げたネギは、国産表示 22 検体、中国産表示 41 検体である。なお、国産表示ネギは偽装されている可能性がある。中国産ネギは現在国産の半額程度で売られており、消費者からあまり良い印象を持たれていないことから、わざわざ国産を中国産と表示して安く売ることが考えにくいから、中国産表示ネギは間違い無く中国産と考えられる。また、中国産のネギは既に外側の皮を剥かれて調製され、土が付いていない状態であるため、ネギ試料は全て既に調製された土の付いていないものを入手した。

以上のネギ試料をまとめると、下記ようになる。

ネギ 25 本分または 1 本分を粉碎処理した下記の計 203 検体を試料として用いた。

1. 産地の確かなネギ 25 本分：

1-1 国内産 53 産地 65 検体（産地から直接入手）

1-2 中国産 3 産地 36 検体（商社または卸売会社から入手）

2. 産地の確かなネギ 1 本分：

2-1 国内産 14 産地 14 検体（10 検体は 1-1 と同一ロット）

2-2 中国産 3 産地 25 検体（それぞれ別ロットで、22 検体は 1-2 と同一ロット）

3. 店頭から買い上げたネギ 1 本分：

3-1 国産表示 22 検体

3-2 中国産表示 41 検体

3.3.2 前処理

ネギ試料は、水道水で外側を良く洗い流し、次いで、純水および超純水でリンスした。25 本分析試料は、セラミック製ナイフで分析対象部位（ネギの基部から 1cm 上の 10cm の部位）を切り取り、ネギ 25 本分をチタンコート刃のクッキングカッターにより粉碎し、測定試料とした。これを、硝酸 - 過塩素酸 - フッ化水素酸によりホットプレートを用いて湿式分解し、ICP 測定用検液とした。Na 定量用の検液は、ブランク値が高くなることとネギ中の濃度が低いことから、別に 1% 塩酸抽出により調製した。

1 本分析試料は試料量が少ないため、前処理方法も一部改変した。ネギの粉碎はクッキングカッターの代わりに茶ミルで粉碎し、さらに乳鉢で潰して試料とした。後の酸による分解は超高純度試薬を用いることで、1% 塩酸抽出はせずに Na 測定にも用いた。

水分測定は 70°C 常圧乾燥法により測定した。

3.3.3 機器測定

測定対象元素はネギについて精度よく定量でき、NIST の標準物質（Spinach および Apple Leaves）により分析方法の精確さを確認した²⁵⁾ 22 無機元素とした。Na はフレイム原子吸光光度分析により、K, Ca, P, Mg, Fe, Zn, Sr, Ba, Mn および Cu は ICP-AES（誘導結合プラズマ - 発光分析法）により、Al, Rb, Ni, Mo, Co, Cd, Cs, La, Ce, Tl および Pb は ICP MS（誘導結合プラズマ - 質量分析法）により定量した。

3.3.4 ケモメトリックスによる解析

定量した 22 元素の内、Al と Pb はネギの外側に局在していることと、汚染による影響が大きいことから、²⁵⁾ これらの元素を除いた 20 元素についての結果を用いて統計解析を行った。無機元素濃度のデータから食品などの原産地を推定するための統計手法としては、多変量データを用いることから多変量解析がよく用いられる。また、今回のケースのように化学分析により得られる化学情報から、数学的あるいは統計的に各産地の元素濃度のパターンを分類したりあるいは回帰分析をするような手法として「ケモメトリックス」と呼ばれる手法もある。産地判別で用いられる多変量解析の例として、主成分分析、クラスター分析、判別分析などがある。これらは全てケモメトリックス手法でもあるが、ケモメトリックスではこの外に KNN（K-nearest neighbor）、SIMCA（soft independent modeling of class analogy）、ANN（artificial neural networks）などの手法も用いられる²⁶⁾。今回のケースでは、既に産地の分かっている試料についてのデータを用いてモデルを作成し、そのモデルを用いて未知試料を判別する方法が適していると考えられる。このような方法は「教師有りのパターン認識（分類）」²⁷⁾ と呼ばれ、判別分析、KNN、SIMCA、ANN

などの手法がそれに属する。この内、判別分析と SIMCA は統計分布を仮定した手法であり、判別したい各試料群のデータのパターンが、それぞれ特定の統計的な分布をしていなくてはならず、また多くのデータを必要とするという面で使いにくい部分がある。その代わりに、どの元素が判別に寄与しているかや、対象としている各グループにどれだけ近いか、と言った多くの統計データが得られるという面で優れている。産地判別の研究では統計的な裏づけのある判別分析と SIMCA が良く用いられる。本研究でもケモメトリックス手法として、判別分析の 1 つである線型判別分析 (LDA) と SIMCA を用い、判別を行った。

LDA ではステップワイズ帰帰により判別に有効な元素を選択し、それらの元素を用いた判別に有効な線型判別関数をモデリングする。この関数に各元素の濃度を代入することにより得られる値から、試料がどのグループに属するかを判別する。20 元素全てを用いた線型判別関数をモデリングすることも可能であるが、試料数が十分に無い場合には不安定なモデルとなる。つまり、モデリングに使用した試料については明確に分けられても、そうでない試料について予測を行った場合、判別の適中率が大きく下がるような事が起きる。元素数は少ない方が安定したモデルとなるが、多い方がモデリングに使用した試料についてはうまく分類できる。これらの兼ね合いを見て元素数を判断することになる。その判断方法の 1 つとして、モデリングに使用しない試料について予測を行い、その適中率からモデルの有効性を見る方法がある。今回は 25 本分のネギを用いて調製した試料 1 の 101 検体の試料の分析結果を用いてモデリングし、ネギ 1 本で調製した 102 試料の予測を行うことでモデルの有効性を確認した。LDA のモデルとして、国産と中国産との 2 群判別と、国産、中国の山東省産、上海市産、福建省産の 4 群判別の 2 種類モデルを作成し、判別を行った。

SIMCA では対象となる各グループについて主成分分析を行い、グループの数だけ主成分モデルを作る。次に、各モデルに判別したい試料を適用し、モデルからの距離を比較することにより判別する。通常 SIMCA では、どちらのグループからも遠い試料はどちらにも属さないアウトライヤーとして分類するが、今回の試料は全て国産か中国産であるため、通常ではアウトライヤーとされる試料も、いずれかのグループに分類される統計的確立の高い方のグループに試料を分類した。また、今回は 20 元素全ての分析データを用いてモデリングしたが、SIMCA では用いる元素数が多くても LDA のように不安定なモデルにはならないが、主成分数によってモデルの形が変わる。本研究で使用したソフトウェアでは最適な主成分数が自動的に計算され、モデリングされるので、得られたモデルを用いて予測を行った。ただし、SIMCA のモデルでは LDA のモデルよりも複雑なモデルであるため、より多くの情報を必要とする。LDA では国産 65 検体、中国産 36 検体の試料についての分析データを用いてモデリングしたが、SIMCA では中国産のモデルが不十分なものになってしまう。そこで、25 本分の国産ネギを用いて調製した試料 1-1 から 55 試

表 3 試料 1-1 と 1-2 に含まれる Na, P, K, Ca, Mn, Co, Zn, Sr, Cd, Cs, Ba, Ce, Tl 濃度を用いて作成された 2 群の線型判別関数による 203 ネギ試料の分類と予測

No.	原産国名	分類適中率	
			平均
1-1	日本	97% (63/65)	96%
1-2	中国	94% (34/36)	
		予測適中率	
2-1	日本	93% (13/14)	95%
2-2	中国	96% (24/25)	
		表示国名	表示との一致率
3-1	日本	77% (17/22)	93% (38/41)
3-2	中国	93% (38/41)	

料, ネギ 1 本を用いて調製した試料 1-2 の山東省産, 上海市産, 福建省産からそれぞれ 9, 5, 4 試料, 店頭で買い上げた中国産ネギ 1 本分を用いて調製した試料 3-2 から 28 試料の計 101 試料を任意に選択し, そのデータを用いてモデリングした。

3.4 結果と考察

3.4.1 国産と中国産との間の LDA

試料 1 についての分析結果を用いて国産と中国産との間の 2 群の LDA を行った。ステップワイズ回帰により選択された Na, P, K, Ca, Co, Cu, Zn, Sr, Cd, Cs, Ba, Ce, Tl の 13 元素による LDA の結果を表 3 に示す。試料 1 についての分類適中率は 96%, 試料 2 についての予測適中率は 95%, 試料 3-2 については 93% となった。試料 2 と 3-2 の予測適中率も十分に高いことから, 良好なモデルが作成されたと考えられる。産地の確かなネギである試料 1, 2, 3-2 についての判別適中率は 95% となった。試料 3-1 の国産表示ネギについては 77% と低い表示との一致率となった。

3.4.2 国産と中国の山東省産, 上海市産, 福建省産との間の LDA

輸入ネギの主産地である中国の山東省, 上海市, 福建省は地理的に離れている。従って, 中国産と国産の 2 群についてモデリングするよりも, 国産と中国産の 3 地域の 4 群についてモデリングした方が適切なモデルが作成できると考え, 上記 4 地域の中の 4 群の LDA を行った。ステップワイズ回帰により選択された Na, P, K, Ca, Co, Cu, Zn, Sr, Cd, Cs, Ba, Ce, Tl の 13 元素による LDA の結果を表 4 に示す。国産か中国産かの 2 群の判別では, 試料 1 についての分類適中率は 97%, 試料 2 についての予測適中率は 86%, 試料 3-2 については 90% となった。モデリングで使用し

表 4 試料 1-1 と 1-2 に含まれる Na, P, K, Ca, Co, Cu, Zn, Sr, Cd, Cs, Ba, Ce, Tl 濃度を用いて作成した4群の線型判別関数による203ネギ試料の分類と予測

No.	原産地名	分類適中率		
		2 群判別	4 群判別	平均
1-1	日本	98% (64/65)	98%	97% ¹⁾
1-2	中国	94% (34/36)		
	山東省		94% (17/18)	97% ²⁾
	上海市		90% (9/10)	
	福建省		100% (8/8)	
			予測適中率	
2-1	日本	86% (12/14)	86%	87% ¹⁾
2-2	中国	88% (22/25)		
	山東省		88% (7/8)	79% ²⁾
	上海市		78% (7/9)	
	福建省		63% (5/8)	
	表示国名	表示との一致率		
3-1	日本	86% (19/22)		
3-2	中国	90% (37/41)		

1) 国産と中国産との間の 2 群の判別による判別適中率

2) 国産と中国の山東省産, 上海市産, 福建省産との間の 4 群の判別による判別適中率

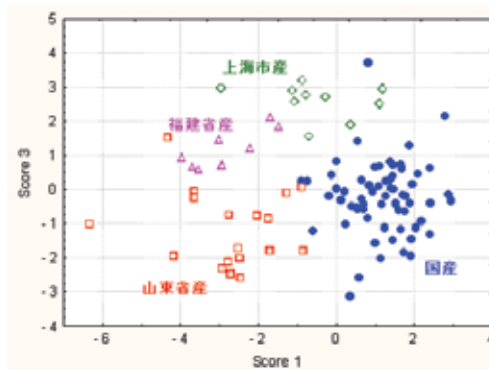


図 4 確かな国産 65 検体, 中国産 36 検体に対する, Na, P, K, Ca, Co, Cu, Zn, Sr, Cd, Cs, Ba, Ce, Tl 濃度を用いた線型判別関数のスコア 1 vs. 3 のプロット

た試料 1 についての分類適中率は良好だったが、ネギ 1 本についての予測適中率ではやや低くなり、不安定なモデルとなった。産地の確かなネギである試料 1, 2, 3-2 についての判別適中率は 93% となり、試料 3-1 の国産表示ネギのつについては 86% となった。

国産と中国産の 3 地域の間での 4 群の判別では、試料 1 についての分類適中率は 2 群の判別と同じ 97% と高い適中率になったが、試料 2 についての予測適中率は 79% とやや低くなった。しかし、中国の 3 地域の間でも元素組成に異なった傾向のある事が示された。試料 1 についての線型判別関数のスコアを図 4 に示す。各産地間で分布が分かれており、特に福建省産が他から大きく分かれる分布を示している。

3.4.3 国産と中国産との間の SIMCA

SIMCA では判別分析と同じ試料についてのデータを用いてモデリングしても良好なモデルができないため、国産ネギである試料 1-1 から 55 試料、中国産ネギである試料 1-2 と 3-2 から 46 試料を任意に選択してモデリング用試料とした SIMCA による予測結果を表 5 に示す。試料 1 についての予測適中率は 97%、試料 2 については 90%、試料 3-2 については 98% となった。産地の確かなネギである試料 1, 2, 3-2 についての予測適中率は 95% となった。LDA と同程度の判別適中率となり、良好なモデルが作成されたと考えられる。試料 3-1 の国産表示ネギのつについては 82% とやや低い表示との一致率となった。

表 5 試料 1-1, 1-2, 3-3 から任意に選択された 101 試料に含まれる 20 元素濃度を用いて作成されたされた SIMCA モデルによる 203 ネギ試料の予測¹⁾

No.	原産国名	予測適中率	平均
1-1	日本	95% (62/65)	96%
1-2	中国	97% (35/36)	
2-1	日本	93% (13/14)	90%
2-2	中国	88% (22/25)	
	表示国名	表示との一致率	
3-1	日本	82% (18/22)	
3-2	中国	98% (40/41)	

1) 試料 1-1 から 55 試料、試料 1-2 の山東省産、上海市産、福建省産からそれぞれ 9, 5, 4 試料、試料 3-2 から 28 試料を任意に選択。

3.4.4 LDA と SIMCA を組み合わせた判別

LDA と SIMCA 共に 95% 程度と良好な判別適中率になった。従って、どちらの手法を用いてもネギの原産国をスクリーニング判別することが可能であろう。どちらの手法も数学的に全く異なったモデルを構築して判別しているため、両方の手法を組み合わせた判別は、結果をダブルチェックして判別する有効な手法になると考えられる。特に、国産ネギを中国産と判別するような、好ましくない誤りを少なくすることができる。そこで、今回モデリングした国産と中国産との間の 2 群の LDA と SIMCA の判別結果について、両方の手法を組み合わせた判別を行った。国産か中国産かの判定基準として、両方の手法で中国産と判別された場合にその試料を中国産と判定し、少なくともどちらか 1 つの手法で国産と判別された場合には中国産ではないと判定することとした。結果として、国産を中国産と誤って判定されたのは国産の 79 試料中、試料 1-1 の中の 1 試料のみであった。中国産を国産と誤って判定したのは試料 1-2 の中の 3 試料、試料 2-2 の中の 3 試料、試料 3-2 の中の 3 試料となり、合計で 102 試料中 9 試料となった。国産を中国産と判定する第 1 種の誤りが 1%、中国産を中国産ではないと判定する第 2 種の誤りが 9% という結果になった。また、店頭で買い上げた国産ネギ試料 2-1 について中国産と判定されたものは 25 試料中 1 試料あった。従って、この試料については表示が間違っている可能性のあることが示唆された。

無機元素組成による産地の判別では、データの蓄積が多い程信頼性の高い判別を行うことができる。今後は、さらにデータを蓄積して信頼性の高い判別手法にして行く予定である。また、ネギは生鮮野菜であるため、迅速に判別することが求められる。今回紹介した方法では結果が出るまで 3 日かかるが、最終的には 2 日以内でネギの原産国をスクリーニング判別できる手法にする予定である。

4. おわりに

以上紹介してきたように、DNA による品種判別では正確に品種を特定する事は可能であるが産地を特定する事はできず、原産地の判別を行うには無機成分による手法が現在最も有効な手法であろう。現在、独立行政法人・農業環境技術研究所と東京工業大学のグループが行っている $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ と鉛同位体比によるネギの産地判別の研究において、各産地のネギの $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ の分析が行われている。ネギ栽培ほ場と他の農産物のほ場との間でどの程度同位体比に差が出るのか確認する必要があるが、こうした分析データを蓄積することで、知りたい産地の農産物中の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ をある程度見積もることができると思われる。そして目的としている産地間で有意な差が認められれば、様々な農産物の産地判別に適用できる可能性がある。しかしストロンチウムにしても鉛にしても、同位体比の差は日本と外国との間でもわずかであり（一部重なりも予想される）、国内での差はさらに小さい。いくつかの同位体比と組み合わせることで、より正確に産地を特定できるようになると期待される

が、まだまだこの分野の研究は始まったばかりであり、さらなる調査・研究・確認が必要である。このように、産地判別手法としては重元素同位体比による手法の進展が今後期待されるが、現段階では無機元素組成による手法がより迅速に対応でき、取組みやすいという利点がある。今後、この手法が様々な食品について適用され、多くのデータが蓄積されることにより、食品の産地判別手法として実用化されるようになることを期待する。

(食品総合研究所 分析科学部分析研究室 有山 薫)

文 献

- 1) 大坪研一, 中村澄子, 今村太郎, 米の PCR 品種判別におけるコシヒカリ用判別プライマーセットの開発, 農芸化学誌, 76, 388-397, (2002).
- 2) 大坪研一, 米および米飯の DNA 品種判別, 食品工業, 45(16), 40-46, (2002).
- 3) 若尾卓成, 疋田雄一, 常吉俊宏, 梶真壽, 久保田裕明, 久保田隆之, PCR-制限断片多型を用いたウナギ種簡易 DNA 鑑定, 日本水産学会誌, 65(3), 391-399, (1999).
- 4) Martin, G. J., Guillou, C., Martin, M. L., Cabanis, M. T., Tep, Y., Aerny, J., Natural Factors of Isotope Fractionation and the Characterization of Wines. *J. Agric. Food Chem.*, 36, 316-322 (1988).
- 5) Day, M. P., Zhang, B., Martin, G. J., Determination of the Geographical Origin of Wine Using Joint Analysis of Elemental and Isotope Composition. II-Differentiation of the Principal Production Zones in France for the 1990 Vintage. *J. Sci. Food Agric.*, 67, 113-123 (1995).
- 6) Etiént, P., Schlich, P., Varietal and Geographic Classification of Franch Red Wines in Terms of Elements, Amino Acids and Aromatic Alcohols. *J. Sci. Food Agric.*, 45, 25-41 (1988).
- 7) Latorre, M. J., Garía-Jares, C., Mèdina, B., Herrero, C., Pattern Recognition Analysis Applied to Classification of Wines from Galicia (Northwestern Spain) with Certified Brand of Origin. *J. Agric. Food Chem.*, 42, 1452-1455 (1994).
- 8) Košir, I. J., Kojančič, M., Nives Ogrinc, J. Kidrič, Use of SNF-NMR and IRMS in combination with chemometric methods for the determination of chaptalisation and geographical origin of wines (the examples of Slovenian wines). *Anal. Chim. Acta*, 429, 195-206 (2001).
- 9) Brescia, M. A., Caldarella, V., Giglio, A. D., Benedetti, D. Fanizzi, F. P., A. Sacco, Characterization of the geographical origin of Italian red wines based on traditional

- and nuclear magnetic resonance spectrometric determinations. *Anal. Chim. Acta*, 458, 177-186 (2002).
- 10) Wisers, M. E., Iyer, S. S., Krouse, H. R., Cantagallo, M. I., Variation in boron isotope composition of Coffea arabica beans. *Appl. Geochem.*, 16, 317 (2001).
 - 11) Anderson, K. A., Smith, B. W., Chemical Profiling To Differentiate Geographic Growing Origins of Coffee. *J. Agric. Food Chem.*, 50, 2068-2075 (2002).
 - 12) Marcos, A., Fisher, A., Rea, G., Hill, S. J., Preliminary study using trace element concentrations and a chemometrics approach to determine the geographical origin of tea. *J. Anal. At. Spectrom.*, 13, 521-525 (1998).
 - 13) Fernández-Cáceres, P. L., Martín, M. J., Pablos, F., González, A. G., Differentiation of Tea (*Camellia sinensis*) Varieties and Their Geographical Origin According to their Metal Content. *J. Agric. Food Chem.*, 49, 4775-4779 (2002).
 - 14) Mouly, P. P., Gaydou, E. M., Lapierre, L., Corsetti, J., Differentiation of Several Geographical Origins in Single-Strength Valencia Orange Juices Using Quantitative Comparison of Carotenoid Profiles. *J. Agric. Food Chem.*, 47, 4038-4045 (1999).
 - 15) Angerosa, F., Bréas, O., Contento, S., Guillou, C., Reniero, F., Sada, E., Application of Stable Isotope Ratio Analysis to the Characterization of the Geographical Origin of Olive Oils. *J. Agric. Food Chem.*, 47, 1013-1017 (1999).
 - 16) Anderson, K. A., Magnuson, B. A., Tschirgi, M. L., Smith, B., Determination the Geographic Origin of Potatoes with Trace Metal Analysis Using Statistical and Neural Network Classifiers. *J. Agric. Food Chem.*, 47, 1568-1575 (1999).
 - 17) 安井明美, 進藤久美子, 玄米中の無機元素組成による産地判別, 分析化学, 49, 6, 405-410, (2000).
 - 18) Oda, H., Kawasaki, A., Hirata, T., Determination of the Geographic Origin of Brown-Rice with Isotope Ratios of $^{11}\text{B}/^{12}\text{B}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. *Anal. Sci.*, 17, 1627-1630 (2001).
 - 19) Hernandez, B., Castellote, A. I., Permanyer, J. J., Triglyceride Analysis of Cocoa Beans from Different Geographical Origins. *Food Chemistry*, 41, 269-276 (1991).
 - 20) Armanino, C., Acutis, R. D., Festa, M. R., Wheat Lipids to discriminate species, varieties, geographical origins and crop years. *Anal. Chim. Acta*, 454, 315-326 (2002).
 - 21) McDonald, M. S., Hughes, M., Burns, J., Lean, M. E. J., Matthews, D., A. Crozier, Survey of the Free and Conjugated Myricetin and Quercetin Content of Red Wines of Different Geographical Origins. *J. Agric. Food Chem.*, 46, 368-375 (1998).
 - 22) Sanz, S., Perez, C., Herrera, A., Sanz, M., Juan, T., Application of a Statistical Approach to the Classification of Honey by Geographic Origin. *J. Sci. Food Agric.*, 69, 135-140 (1995).

- 23) Simpkins, W. A., Louie, H., Wu, M., Harrison, M., Goldberg, D., Trace elements in Australian orange juice and other products. *Food Chemistry*, 71, 423-433 (2000).
- 24) Ehleringr, J. R., Casale, J. F., Lott, M. J., Ford, V. L., Tracing the geographical origin of cocaine. *Nature*, 408, 311-312 (2000).
- 25) 有山薫, 堀田博, 安井明美, ネギの産地判別のための無機元素測定法の確立と予備的検討, *分析化学*, 52, 11, 969-978 (2003).
- 26) 宮下芳勝, 佐々木愼一, ケモメトリックス 化学パターン認識と多変量解析, (共立出版, 東京), pp. 79-107 (1995).
- 27) 相島鐵郎, ケモメトリックス, (丸善, 東京), pp. 89-102 (1992).

農産物遺伝子組換え体の検知・判定技術

はじめに

世界的に遺伝子組換え技術を利用して開発された農作物の実用化が進んでいる。我が国でも表 1 に示す遺伝子組換え (GM) 農作物が食品として利用されるようになっている。現在、この技術の応用について社会的合意を得るための一つの手段として、農林水産省では 2001 年 4 月から GM 農作物とそれを原料にした食品 (GM 食品) に対する表示制度が、「農林物資の規格化及び品質表示の適正化に関する法律 (JAS 法)」の下で実施されている。厚生労働省においても、食品の安全性に関わる情報提供として食品衛生法の下で、同じ内容の表示制度が実施されている。義務表示の対象食品は、安全性の審査が終了した GM 農作物 (ダイズ、トウモロコシ、ジャガイモ、なたねおよび綿実) とその加工食品 30 品目が指定されている。指定食品の判断基準は、組換え体由来の DNA や蛋白質が食品中から検知できるかにあるため、植物油や醤油、糖類などは表示義務の対象外となっている。高オレイン酸ダイズといった栄養素や用途などを変更した GM 食品については、表示義務の対象となっている。この表示を行うためには、信頼性と実用性の高い GM 農作物の検知技術の開発が必要である。筆者らのグループは、ポリメラーゼチェーンリアクション (PCR) 法を用いて GM 農作物に導入されている DNA の検知技術の開発を行っている。

1. DNA 抽出法の検討

PCR の鋳型となる DNA の抽出がうまくいかないと PCR は阻害され、良好な結果を得ることができない。そのため、筆者らは、ダイズおよびトウモロコシから PCR に適した DNA 抽出法を検討した。

まず、植物体からの一般的な DNA 抽出法であるセチルトリメチルアンモニウムブロミド (CTAB) を使用した方法および種々の市販の DNA 抽出キットを用いて、DNA を抽出した。抽出した DNA 溶液を用いて、260nm/230nm 吸光度比および 260nm/280nm 吸光度比の測定、ゲル電気泳動、ダイズまたはトウモロコシが内在的に持つ遺伝子 (内在性遺伝子) の PCR による検知を行い、PCR に適した抽出法であるか否かを評価した。ここで、260nm/230nm 吸光度比から夾雑物の残存量を、260nm/280nm 吸光度比からタンパク質の残存量を推定し純度を検定している。また、アガロースゲル電気泳動から、DNA 溶液に低分子化した DNA がないことを確認している。CTAB またはシリカメンブレンを利用して抽出した DNA 溶液は、通常 260nm/230nm 吸光度比 >1.8 かつ 260nm/280nm 吸光度比 >1.8 であり、ゲル電気

表 1 我が国で食品用として商品化が可能な GM 農作物の現状

2003.8 現在

GM 農作物の種類計 55 件	開発国 (開発企業)	他の商品化可能な国
除草剤の影響を受けないダイズ	アメリカ (Monsanto)	米国, EU
除草剤の影響を受けないダイズ (2 種)	アメリカ (Bayer)	米国, カナダ
オレイン酸高生産ダイズ	アメリカ (Dupont)	米国, カナダ
除草剤の影響を受けないトウモロコシ (5 種)	アメリカ (Bayer)	米国, カナダ, EU (一部)
	アメリカ (Monsanto)	
	アメリカ (Dekalb)	
害虫 (ガの仲間) に強いトウモロコシ (3 種)	アメリカ (Syngenta)	米国, カナダ, EU (一部)
	アメリカ (Monsanto)	
害虫 (ガの仲間) に強い及び除草剤の影響を受けないトウモロコシ (8 種) *1	アメリカ (Dekalb)	米国, カナダ
	アメリカ (Monsanto)	
	アメリカ (Dow)	
	アメリカ (Syngenta)	
害虫 (甲虫類) に強いジャガイモ (2 種)	アメリカ (Monsanto)	米国, カナダ
害虫 (甲虫類) に強い及びウイルスに強いジャガイモ (6 種)	アメリカ (Monsanto)	米国, カナダ
除草剤の影響を受けないテンサイ (3 種)	アメリカ (Bayer)	米国, EU (一部)
除草剤の影響を受けないナタネ (13 種)	カナダ (Monsanto)	米国, カナダ (一部)
	カナダ (Bayer)	
除草剤の影響を受けない雄性不稔ナタネ	カナダ (Bayer)	カナダ, 米国, EU
除草剤の影響を受けない稔性回復ナタネ	カナダ (Bayer)	カナダ, 米国, EU
除草剤の影響を受けないワタ (4 種)	アメリカ (Calgene)	米国, オーストラリア
害虫 (ガの仲間) に強いワタ (3 種)	アメリカ (Monsanto)	米国, オーストラリア
害虫 (ガの仲間) に強い及び除草剤の影響を受けないワタ (2 種) *2	アメリカ (Monsanto)	米国, オーストラリア

*1, 4 種は既に安全性審査済みの害虫 (ガの仲間) に強いトウモロコシと除草剤の影響を受けないトウモロコシの交配種

*2, 安全性審査済みの害虫 (ガの仲間) に強いワタと除草剤の影響を受けないワタの交配種

泳動像において DNA の低分子化は見られず, PCR に適した良好な DNA の抽出が可能であった¹⁾⁻³⁾。

2. 定性分析法

定性分析法の開発は, まず, 検知対象の GM 農作物を入手し, 抽出した DNA を用いて導入遺伝子の発現カセットのシークエンスを行う。次に, シークエンス結果

と公開されている安全性評価資料，DNA データベース等とを比較して，複数の生物種由来の DNA 配列部分であり組換え体に特異的な部分を増幅するようにプライマーの設計を行う．最後に，設計したプライマーの特異性と検知感度を PCR により調査する．さらに，抽出した DNA 溶液が PCR に適していることのコントロールとして，対象農作物に必ず含まれる DNA 配列を検知するためのプライマーの設計を行う必要がある．

例として，GM トウモロコシ CBH351 系統（商品名：スターリンク）の定性分析法の開発を示す⁴⁾．CBH351 系統は，Aventis CropScience 社（当時）が開発した害虫抵抗性トウモロコシである．1998 年に米国環境保護庁は，ヒトに対して食物アレルギーを誘発する可能性を否定できないとして，飼料用に限って栽培を許可していた．しかし，2000 年 9 月以降，米国で食品への混入が明らかとなり，2001 年度以降作付けを行うことが禁じられた系統である．

まず，環境に対する安全性評価資料および諸外国の安全性評価資料から CBH351 に導入されている DNA 配列の構造を調べた．図 1 に示す．CBH351 系統に導入されている遺伝子は，*Bacillus thuringiensis subsp. tolworthi* 由来の害虫抵抗性 Cry9C タンパク質を合成する遺伝子（*cry9C*）であり，これは cauliflower mosaic virus 由来の 35S プロモーター（p35S）と 35S ターミネーター（T-35S）に制御されている．また，*cry9C* 遺伝子の 5' 末端には *Petunia hybrida* 由来の photosynthetic 22L chlorophyll a/b binding protein (*cab22L*) のリーダー配列が導入されている．この情報を基に p35S から T-35S までの DNA 配列のシーケンスを行った．シーケンス結果から，CBH351 に特異的な DNA 領域として，2 生物または 3 生物の異なった生物種由来の DNA 配列部分を増幅するように，プライマー対 a および b を設計した（図 1）．設計したプライマー対の特異性を調べるため，non-GM トウモロコシ，6 系統の GM トウモロコシ（Bt11, GA21, T25, Event176, MON810, CBH351），non-GM ダイズ，1 系統の GM ダイズ（40-3-2 系統 Roundup Ready® Soy, RRS），その他の農作物としてコメ，コムギおよびオオムギから抽出した DNA を鋳型 DNA として，PCR を行った．この電気泳動写真を図 2 に示すが，設計したプライマー対 a および b から増幅が予想された長さのバンドが CBH351 抽出 DNA を鋳型 DNA にした場合のみ観察された．なお，RRS は Monsanto 社が開発した除草剤グリホサート耐性ダイズである．次に，non-GM トウモロコシに CBH351 を 0.05, 0.1, 0.5, 1, 5, 20% 混合し，DNA を抽出後，PCR を行った．その結果，プライマー対 a では 0.05%，プライマー対 b では 0.1%CBH351 が混入しているものまで検知することが可能であった（図 3）．GM 農作物の定性分析法の開発においては，検知感度と特異性はプライマーの配列に依存しており，プライマーの設計が最も重要であると考えられた．

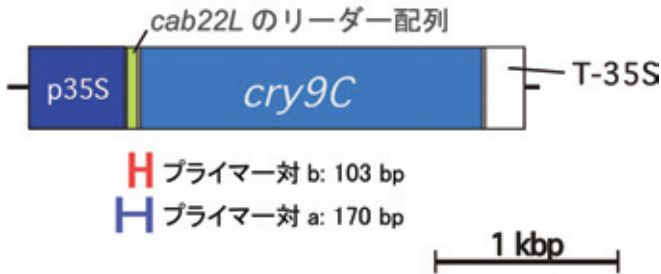


図 1 CBH351 系統に導入されている DNA 構造と PCR 増幅領域
 プライマー対 a は p35S-*cry9C*間を、
 プライマー対 b は *cab22L* のリーダー配列 -*cry9C*間を増幅する。

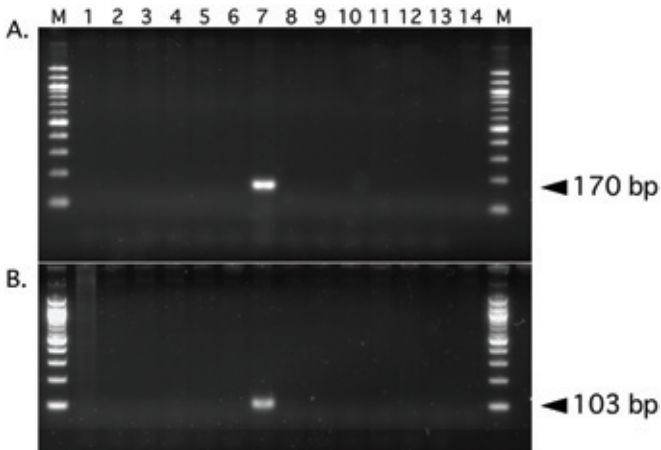


図 2 CBH351 検知用プライマー対 a,b の特異性の確認
 A はプライマー対 a, B はプライマー対 b を用いた。

M:DNA 分子量マーカー, 1:non-GM トウモロコシ, 2-7:GM
 トウモロコシ (順に, Event176, Bt11, T25, MON810, GA21,
 CBH351), 8-12: 順に, non-GM ダイズ, GM ダイズ (RRS),
 コメ, コムギ, オオムギ, 13-14: ネガティブコントロール
 (順に, DNA なし, プライマーなし)
 矢尻は, 予想される長さのバンド長

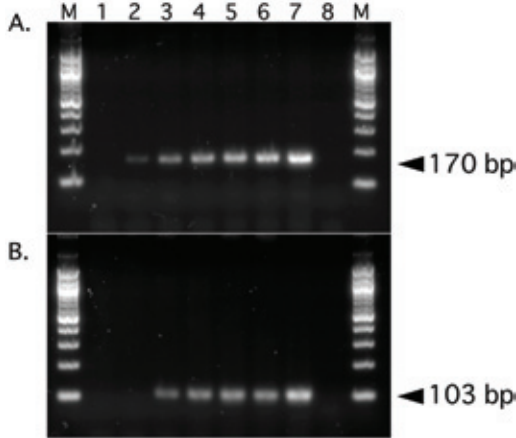


図3 CBH351 検知用プライマー対 a,b の検知感度の確認

A はプライマー対 a, B はプライマー対 b を用いた .

M:DNA 分子量マーカー, 1:non-GM トウモロコシ,

2-7:non-GM トウモロコシに CBH351 を順に, 0.05%, 0.1%, 0.5%, 1%, 5%, 20% 含む, 8: ネガティブコントロール (DNA なし)

矢尻は, 予想される長さのバンド長

3. 定量分析法

GM 農作物の PCR 法を利用した定量とは, 該当する農作物が必ず持っている内在性遺伝子に対する組換え遺伝子の存在比率から GM 農作物が何%存在するかを相対的に算出することである . 定量には標準物質が必要となるが, その作製には, GM の定量特有の以下のような問題が考えられる .

ダイズは自殖性の植物であることから, 在来優良系統との交配, 自殖を人為的に繰り返して遺伝子をホモ (homozygous) で持つ GM 品種が育成されている . 現在, 販売されている RRS 種子は, このような交配により米国内で 1,000 品種以上あり, 栽培されていると聞いている .

一方トウモロコシは他殖性であるため, GM, non-GM に関わらず種子は一代限りの優良形質を持つ F1 ハイブリッド (雑種強勢品種) として育成されている . 販売されている GM 種子は, GM ダイズの場合と同様に優良品種との交配, 自殖を繰り返して一度導入遺伝子をホモで持つ植物体を育成し, これを片親とし, もう一方の片親を在来交配種とするハイブリッド種子である . さらに最近になって, 異なる GM 系統を両親とする F1 ハイブリッド種子も育成されており, これはスタック (stack) 品種と呼ばれている . このため, F2 世代の種子が穀物として生産されるこ

とになり、生産された GM 種子は各 GM 系統の表現形質ではメンデルの遺伝の法則に従い 3:1 に分離し、組換え遺伝子も (+/+:+/-:-/-=1:2:1) に分離する。また、放任受粉の植物であるトウモロコシの花粉は、通常環境条件下では 9 割以上が数 m ~ 数十 m の範囲内にしか飛散しないが、風が強ければかなりの距離を移動する。そのため、他の畑の花粉が混ざること否定できない。以上のことから、GM 農作物を栽培している畑でも non-GM 種子はできるし、その逆も起きているはずである。さらに、これら穀物は植物種子であるため、トウモロコシなどの有胚乳種子ではゲノム量が胚 (2n) と胚乳 (3n) で異なる。胚乳の 2n 分は母親由来のため、GM 系統が雌しべ親の場合は、胚乳部分の導入遺伝子量は在来系統を雌しべ親にした場合の 2 倍となる。このため、育成過程の経緯の違いにより胚と胚乳の比率が品種間で異なる可能性もあり、定量結果に影響がでると考えられる。

このように 1 つの GM 系統には多数の品種が存在し、また non-GM 品種も多数存在すること、さらに育成過程の経緯が異なるため、測定結果は標準物質の調製に使用した品種の影響を受けることになる。公的機関等が同一品種の種子から標準物質を調製した場合であっても、植物であるために生産地、年、気候によって組成等が変化し、常に一定品質の DNA が抽出できる試料を入手することは困難であると考えられる。そのため筆者らは、種子によらない標準物質を作製し、GM 農作物の定量分析法を開発した。

3.1 標準物質

筆者らは、まず標準物質の作製を行った。定量技術の開発は、我が国で輸入可能な GM サイズ 4 系統およびデント種 GM トウモロコシ 11 系統 (害虫に強い GM トウモロコシと除草剤の影響を受けない GM トウモロコシの交配種を除く) のうち、実際に米国で種子として広く販売されている GM サイズ 1 系統 (RRS) および GM トウモロコシ 5 系統 (Bt11, GA21, T25, Event176, MON810) を対象とした。GM トウモロコシ Bt11 と Event176 は、Syngenta Seeds 社が開発した害虫抵抗性および除草剤グルホシネート耐性系統である。MON810 は、Monsanto 社が開発した害虫抵抗性系統である。GA21 は Monsanto 社が開発した除草剤グリホサート耐性系統である。T25 は Bayer CropScience 社が開発した除草剤グルホシネート耐性系統である。これら RRS と 5 系統の GM トウモロコシに導入されている DNA 配列模式構造を図 4 に示す。

定性分析法の開発と同様に各 GM 農作物に導入されている遺伝子構造を調べ、RRS および GM トウモロコシ 5 系統を特異的に検知するプライマーと、GM 農作物に導入されている遺伝子構造から幅広く利用されている p35S 領域および nopaline synthase terminator (tNOS) 領域を特異的に検知するプライマーを設計した。さらに、サイズ内在性遺伝子としてレクチン遺伝子 (*Le1*) およびトウモロコシ内在性遺伝子としてスターチシンターゼ IIb (*zSSIIb*) を検知するプライマーの設計を行った。

(図4, 5). これらのプライマーを利用することにより, RRS と GM トウモロコシ 5 系統を定性 PCR により特異的に検知することが可能となった. PCR 産物の長さ は, 100 ~ 150bp 程度である. これらの PCR 増幅産物をプラスミド上につないで (図6), RRS または GM トウモロコシ 5 系統を検知するための標準物質として使用 することとした⁵⁾. このプラスミドを標準物質とする場合は, GM 種子と non-GM 種子の混合物を標準物質にする場合よりも, 大腸菌により一定の品質のものが大量 生産できる上, GM 系統ごとに種子を入手する必要がない利点がある.

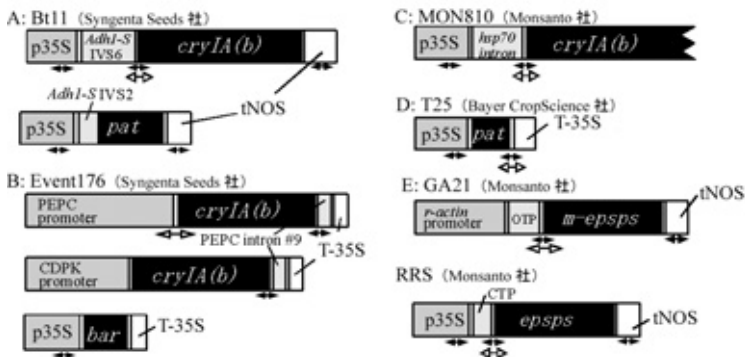


図4 各組換え体に導入されている DNA 構造
A-E:GM トウモロコシ, RRS:GM ダイズ ()内は開発企業を示す.
↔ 定量 PCR 増幅領域 ↔ Multiplex PCR 増幅領域

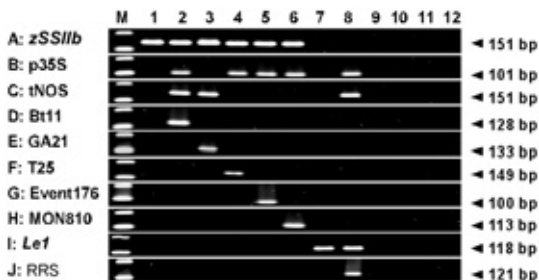


図5 RRS および GM トウモロコシ定量用プライマーの特異性
A, B, C, D, E, F, G, H, I 及び J はそれぞれ, zSSHb, p35S, tNOS, Bt11, GA21, T25, Event176, MON810, Le1 及び RRS 定量用プライマーを用いた場合の結果を示す.
M:DNA 分子量マーカー, 1:non-GM トウモロコシ, 2-6:GM トウモロコシ (順に, Bt11, GA21, T25, Event176, MON810), 7-11: 順に, non-GM ダイズ, RRS, コメ, コムギ, オオムギ, 12: ネガティブコントロール (DNA なし)
矢尻は, 予想される長さのバンド長

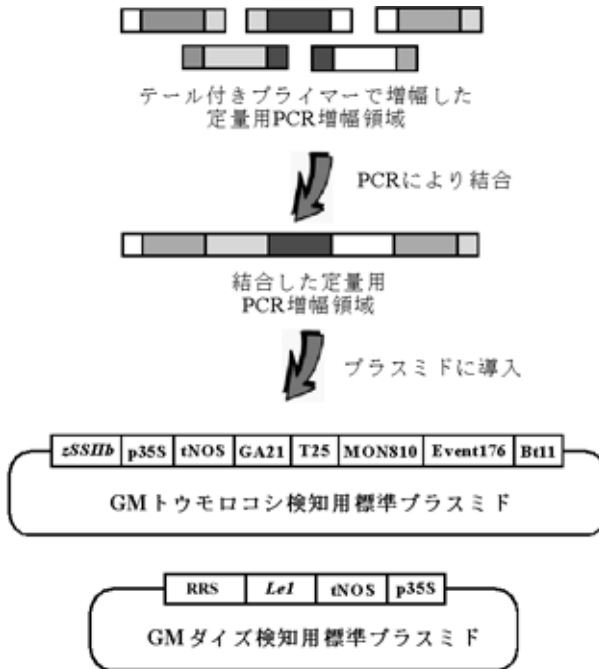


図6 GM 定量用のプラスミドの作成法

3.2 TaqMan® chemistry 法

GM 農作物の定量には、鋳型 DNA 量の定量を行うリアルタイム PCR 装置が必要となる。鋳型 DNA の定量には、Roche 社の TaqMan® chemistry 法を利用した。TaqMan® chemistry 法の原理は、まず、通常の PCR 用のプライマー間に、DNA プローブを設計する。DNA プローブは、鋳型とする DNA 配列中の一部と相補的配列を持ち、その 5' 側に蛍光色素（レポーター：R）、3' 側に消光色素（クエンチャー：Q）を結合させている。ポリメラーゼ反応が繰り返されるに従って DNA プローブは分解されるが、分解された DNA プローブに伴って放出される蛍光強度を動力学的に測定することにより PCR をリアルタイムに計測することができる（図7）。

3.3 リアルタイム PCR 法を用いた GM 系統の定量法⁵⁾

リアルタイム PCR 法で GM 系統を定量するために、まず純粋な GM ダイズまたはトウモロコシ系統の代表的な品種の種子から DNA を抽出し、組換え DNA 配列の数と内在性遺伝子の数を測定した。3.1 で示した標準物質となるプラスミド溶液を鋳型 DNA として、1 反応中 20, 125, 1,500, 20,000, 250,000 コピー含むように調製

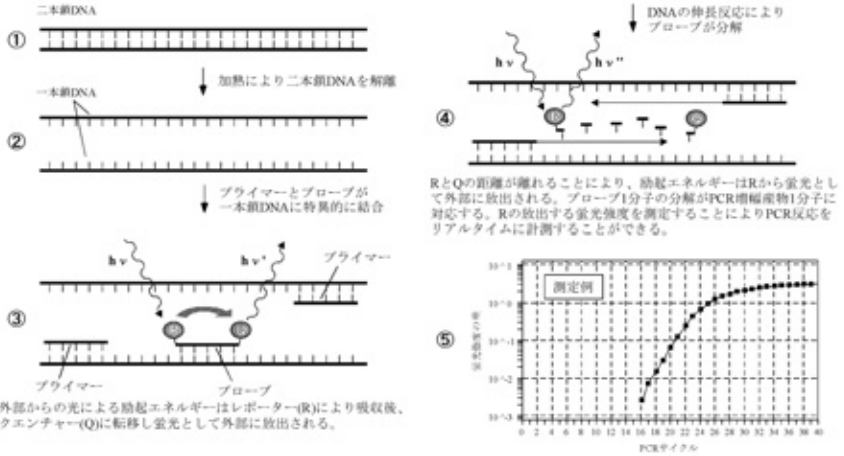


図 7 TaqMan Chemistry の原理 ~

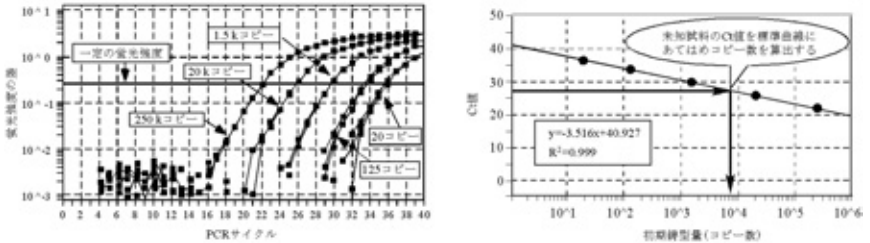


図 8 MON810 の増幅曲線 (左) 及び標準曲線 (右)

し、リアルタイム PCR を行った (図 8 左). 反応液の組成は、 $1 \times$ Universal Master Mix (Applied Biosystems 社), 各 $0.5 \mu\text{mol/L}$ 5'-, 3'- プライマー, $0.2 \mu\text{mol/L}$ プローブ (ただし, p35S 用は $0.1 \mu\text{mol/L}$) に鋳型 DNA を含み, 全量 $25 \mu\text{L}$ とした. PCR 温度条件は, 最初の熱変性を 95°C で 10 分行った後, 熱変性 95°C で 0.5 分, アニールリングと伸長反応 59°C で 1 分を 1 サイクルとして, 40 サイクル行った. プラスミドのコピー数に対し, その増幅曲線がある一定の蛍光強度に達したときの PCR サイクル (Threshold Cycle, Ct) をプロットし標準曲線を作成した (図 8 右). 同時に, 純粋な GM 系統から抽出した DNA 溶液を, 鋳型 DNA として 1 反応中 50ng 含むように調製し, リアルタイム PCR を行った. 一定の蛍光強度に達したときの PCR サイクルから, この DNA 溶液の組換え DNA 配列の数および内在性遺伝子の数を測定した. このようにして, 純粋な GM ダイズまたはトウモロコシ品種ごとの (組換

え DNA 配列の数) / (内在性遺伝子の数) の比率を求めた (式 1)。この比率を内標比とし、各組換え系統種子中で一定の値となる。混入率が未知の試料については、その試料から抽出した DNA 中の (組換え DNA 配列の数) / (内在性遺伝子の数) の比率を測定し、その値を内標比で除すれば、未知試料中の混入率が算出される (式 2)。

$$(式 1) \quad \text{内標比} = \frac{\text{純粋な GM 系統から抽出した DNA 中の組換え DNA 配列の数}}{\text{純粋な GM 系統から抽出した DNA 中の内在性遺伝子の数}}$$

$$(式 2) \quad \text{混入率 (\%)} = \frac{\text{未知試料から抽出した DNA 中の組換え DNA 配列の数}}{\text{未知試料から抽出した DNA 中の内在性遺伝子の数}} \times \frac{1}{\text{内標比}} \times 100$$

3.4 遺伝子組換え体の定量法の妥当性確認試験 (バリデーション)⁶⁾

筆者らは、本定量法の確立を目指し、日本、韓国、米国の 15ヶ所の研究室の協力により妥当性確認試験を行った。まず、純粋な GM サイズまたはトウモロコシ種子を入手し、15ヶ所の研究室で内標比を算出した。この内標比を統計処理し、混入率算出の際の定数となる内標比を決定した (表 2)。次に、ブラインド試料として混入率を隠した試料を 15ヶ所の研究室に配布し、その分析値を集計した。表 3 に統計処理を行った分析結果を示す。この結果から、決定した内標比は適当であり、本定量法は真度および再現性とともによれた定量法であることが実証された。本定量の絶対的な定量下限は、未知試料中の組換え DNA 配列の数が 20 コピーの検量点となるときであり、表 3 より組換えサイズ RRS, 0.1%; 組換えトウモロコシ MON810, 0.5%; T25, 0.5%; Bt11, 0.5%; GA21, 0.1%; Event176, 0.1% が、保証下限値となる。

表 2 各 GM 系統の内標比

GM 系統	内標比
Bt11	0.50
GA21	1.40
T25	0.34
Event176	2.05
MON810	0.38
RRS	0.95

表 3 組換え体定量法ブラインドテスト結果

GM 系統	実際の混入率	解析した研究室数	正確さ (%)		精度 (%)		組換え DNA 配列の測定値が 20 コピー以下の数
			平均値	かたより	室内再現性	室間再現性	
RRS	0.10%	11	0.108	+8.1	13.4	13.4	4 / 22
	0.50%	12	0.571	+14.3	12.0	15.9	0 / 24
	1.0 %	12	1.16	+16.1	11.2	13.9	0 / 24
	5.0 %	12	5.76	+15.1	7.6	11.5	0 / 24
	10 %	12	11.7	+17.2	8.5	10.6	0 / 24
Bt11	0.10%	11	0.091	-9.0	22.3	18.0	21 / 22
	0.50%	14	0.510	+2.0	23.7	20.5	0 / 28
	1.0 %	14	1.15	+14.7	18.9	18.8	0 / 28
	5.0 %	14	6.08	+21.6	13.7	12.9	0 / 28
	10 %	14	12.1	+21.1	10.4	11.5	0 / 28
GA21	0.10%	12	0.095	-5.4	20.5	20.6	4 / 24
	0.50%	13	0.538	+7.7	12.6	21.8	0 / 26
	1.0 %	13	1.20	+20.2	12.3	18.6	0 / 26
	5.0 %	12	5.83	+16.6	8.2	15.9	0 / 24
	10 %	13	11.5	+15.0	7.9	13.6	0 / 26
T25	0.10%	11	0.139	+38.6	23.7	26.5	22 / 22
	0.50%	14	0.577	+15.3	28.2	27.6	1 / 28
	1.0 %	13	1.20	+20.0	6.8	11.5	0 / 26
	5.0 %	14	5.58	+11.6	12.4	14.8	0 / 28
	10 %	14	10.8	+8.1	13.3	14.7	0 / 28
Event176	0.10%	12	0.111	+11.3	16.3	21.3	1 / 24
	0.50%	11	0.492	-1.6	5.8	10.3	0 / 22
	1.0 %	13	0.923	-7.7	7.1	11.4	0 / 26
	5.0 %	13	5.00	0.0	8.1	11.2	0 / 26
	10 %	12	9.62	-3.8	5.8	9.5	0 / 24
MON810	0.10%	11	0.125	+25.0	32.3	26.1	19 / 22
	0.50%	13	0.547	+9.4	15.1	19.6	0 / 26
	1.0 %	14	1.05	+4.6	11.8	15.1	0 / 28
	5.0 %	13	4.78	-4.3	13.5	11.9	0 / 26
	10 %	13	9.82	-1.8	10.5	11.6	0 / 26

3.5 定量分析法の加工食品への適用

本分析法にかかわらず、標準物質として GM 種子粉砕物を用いる場合でも、PCR 法を用いた定量は内在性遺伝子と組換え DNA 配列の数の比から算出される。熱等の加工により DNA が分解される場合であっても、両 DNA 配列が同程度に分解していれば、理論上定量は可能と考えられる。現在筆者らのグループが、その適用性について検討を進めている。

4. その他の PCR

定量法は GM 系統毎に測定するため、その前の段階としてスクリーニングを行うと便利である。筆者らは、定量分析法の開発を行った GM トウモロコシ 5 系統 (Bt11, GA21, T25, Event176, MON810) を対象に、簡便な組換え遺伝子の検知を行う Multiplex PCR 法も検討した^{2),3)}。各 GM トウモロコシに導入されている DNA 塩基配列を解析し、各 GM 系統とトウモロコシの内在性遺伝子 *Ze1* を 1 回の PCR で特異的かつ確実に特定でき、トウモロコシ、ダイズ、コメ、コムギ、オオムギに対して偽陽性のバンドが見られないプライマーの設計 (図 4) および PCR 条件の設定を行った。本法による検知感度を non-GM トウモロコシ粉砕物に GM トウモロコシ 5 系統の粉砕物を 0.05, 0.1, 0.5, 1, 5, 20% 混合して DNA を抽出し、Multiplex PCR を行ったところ、それぞれ 0.5% 程度であった (図 9)。その他、様々な GM 農作物の開発に利用されているプロモータ、構造遺伝子、ターミネータ配列を検知できる方法も開発している⁷⁾。

5. 加工食品からの遺伝子組換え体の検知

筆者らのグループは、豆腐および納豆における組換え遺伝子の検知も検討している¹⁾。non-GM ダイズに RRS が 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 5% となるように混合したダイズ粉末試料から豆腐を調製した。この豆腐から、CTAB を用いて DNA を抽出し電気泳動したところ、1kbp 付近を中心にスメアーとなり分解を受けていることがわかった。組換え体の検知用のプライマー対と、抽出した DNA 溶液が PCR に十分

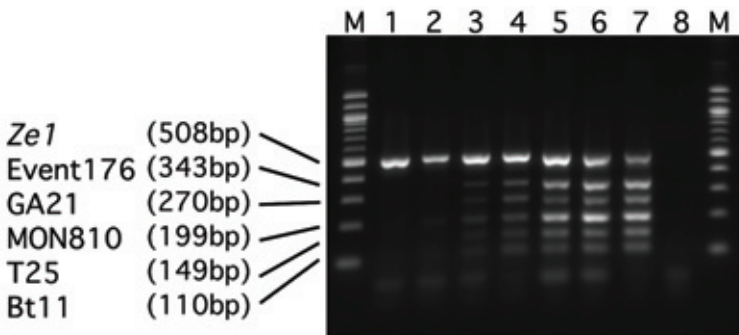


図 9 MultiplexPCR 法を用いた GM トウモロコシ 5 系統の検知
M:DNA 分子量マーカー, 1:non-GM トウモロコシ, 2-7:non-GM トウモロコシに 5 系統 GM トウモロコシ (Event176, Bt11, T25, MON810 及び GA21) の混合物を順に, 0.05%, 0.1%, 0.5%, 1%, 5%, 20% 含む, 8: ネガティブコントロール (DNA なし)
ターゲットとした組換え体と予想されるバンドの長さ示した。

な程度に精製されており,かつ分解を受けていないことを確認するためのダイズ内在性遺伝子 *Lel* 検知用のプライマー対を作製した. 予想される増幅 DNA の長さは,それぞれ 513bp および 818bp である. $1 \times$ PCR 緩衝液 (宝酒造株), 0.23mmol/L dNTP, 1.75mmol/L 塩化マグネシウム, $1\mu\text{mol/L}$ プライマーおよび 1.25 units DNA ポリメラーゼを含む液に,抽出 DNA を 250ng を加え,全量を 25 μL にして PCR を行った. 増幅は, 94°C に 3 分保った後, 96°C で 0.5 分, 62°C で 1 分, 74°C で 0.5 分に設定し, 45 サイクル行った. PCR 後, 電気泳動を行ったところ, RRS が 0.5% 含まれるダイズ粉末から調製した豆腐まで,組換え遺伝子を検知することが可能であった (図 10).

納豆 (丸ダイズ) は 131°C で 25 分間蒸煮処理した後, 発酵処理を行ったものについて検討した. 蒸煮処理後のダイズと納豆から DNA を抽出し, 豆腐と同様に組換え遺伝子の検知を行ったところ, *Lel* 遺伝子, 組換え遺伝子ともに検知できなかった. 一方, 挽割り納豆は 115°C で 17 分間蒸煮処理した後, 発酵処理を行った. 蒸煮処理後のダイズから抽出した DNA を鋳型にして *Lel* 遺伝子の検知を行ったところ, 増幅されたバンドが検知できた. 発酵後の挽割り納豆から抽出した DNA 溶液については, *Lel* 遺伝子のバンドは検知できなかった. このことから DNA の分解は加工温度に影響を受け, 高温処理される食品については DNA が分解を受けるため, 組換え遺伝子の検知は難しくなると考えられた. 特に納豆のような発酵食品ではさらに DNA の分解が進み, 検知がきわめて難しくなると考えられた. 現在は, 定量分析法で開発した PCR 産物の長さが 118 bp と短いプライマー対を用い, PCR の温度条件や組成等を変更することにより, 納豆からも内在性遺伝子の検知が可能となっている.

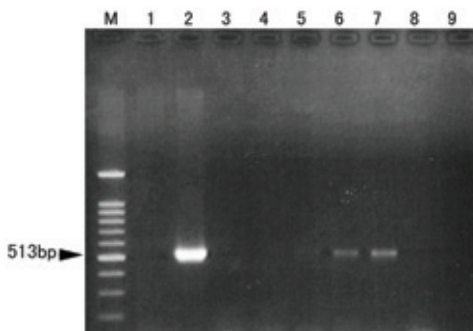


図 10 RRS 含有豆腐からの組換え遺伝子の検知
 M:DNA 分子量マーカー, 1:non-GM ダイズ,
 2:RRS, 3-7:RRS 含有豆腐 (順に, 0.01%, 0.05%,
 0.1%, 0.5%, 5% 含む), 8-9: ネガティブコントロ
 ール (順に, DNA なし, プライマーなし)
 矢戻は, 予想されるバンドの長さ示した.

6. 遺伝子組換え体検知技術を用いた食品表示モニタリング

GM 食品の表示制度が始まることに伴って、筆者らの開発した定量分析法および定量分析法用に設計したプライマーを用いた定性分析法は、独立行政法人農林水産消費技術センター（以下、「センター」とする）発行の「JAS 分析試験ハンドブック 遺伝子組換え食品の検査・分析マニュアル（JAS ハンドブック）」に採用・公開されるとともに、厚生労働省でも、筆者らの開発した定量分析法および CBH351 系統を検知するための定性分析法が、「組換え DNA 技術応用食品の検査方法（厚生労働省検査法）」に採用・公開されている。これらは併せて、我が国の標準分析法となっている。

ここでは、GM 農作物の栽培と流通の現状と、センターが実施した遺伝子組換え食品に係る表示内容の確認調査分析結果を紹介する。

6.1 GM 農作物の栽培と流通の現状

米国の農家は一軒で一農作物を百ヘクタール規模で栽培しており、使用する品種はリスク分散のために複数採用している。商品化が認可された GM 系統由来の品種の種子は、安全性審査が終了し他の品種と同様のルートで販売されているので、畑では GM 品種と non-GM 品種が混在して栽培されていることが多い。ダイズ、トウモロコシといった穀物は品種毎ではなく、食用油、飼料等の目的別に流通されるため、IP ハンドリングを行わない限り、農家が栽培した農作物は収穫段階から複数品種が混在することになる。GM 食品の表示制度においては、IP ハンドリングのためのマニュアル「アメリカ及びカナダ産のバルク輸送非遺伝子組換え原料（ダイズ、とうもろこし）確保のための流通マニュアル」および「非遺伝子組換えばれいしょにより製造されたばれいしょ加工品確保のための流通マニュアル」を（財）食品産業センターが配布しており、分別流通を実施しても非意図的に混入してくる組換え体の許容限度と、国内の輸送、加工時における管理方法について説明している。農林水産省では、その組換え体混入限度値を、ダイズおよびトウモロコシについては、最大 5%としている。

6.2 （独）農林水産消費技術センターでの遺伝子組換え食品に係る表示内容の確認調査分析結果

センターでは、JAS 法に基づく表示や JAS 規格（JAS マーク）が適切に実施されているかどうかのモニタリングや指導、食に関する情報の提供等を行っている。本調査は、平成 13 年度に GM 食品の表示状況および食品表示に関する調査の一環として行った結果である。

6.2.1 調査方法

遺伝子組換えの義務表示対象品目であって「遺伝子組換えでない」との表示があるもの、または遺伝子組換えについての表示がないもの（「遺伝子組換えでない」

との表示は任意表示のため、当該表示がないものは遺伝子組換えではないと理解される)を対象とし、305 商品を一般小売店から購入した。DNA を抽出し、GM サイズ 1 系統 (RRS) および GM トウモロコシ 5 系統 (Bt11, GA21, T25, Event176, MON810) を検知対象とした定性 PCR 分析を行った。組み換えられた DNA が検出されたものについては、分別生産流通管理の実態確認を行うとともに、サイズ、トウモロコシ乾燥品およびトウモロコシ半加工品 (トウモロコシグリッツ、トウモロコシフラワーおよびトウモロコシミール) である場合では、定量分析可能であるため定量 PCR 分析を行った。

6.2.2 調査結果の概要

305 商品の定性 PCR 分析の概略を以下に示し、詳細を表 4 に示す。

組み換えられた DNA が検出されなかったもの 212 商品 (全商品の 69%)

組み換えられた DNA が検出されたもの 80 商品 (全商品の 26%)

なお、残り 13 商品については、加工工程中の加熱等で遺伝子が分解されており DNA 分析が出来なかった。以外の商品について、分別生産流通管理の実態確認を行ったところ、1 商品 (コーングリッツ) 以外は適切に実施されており、表示が適正であることが確認された。

まとめ

本稿では、PCR を用いた遺伝子組換え体の検知技術の開発について述べた。我が国で輸入可能な GM サイズ 4 系統およびデント種 GM トウモロコシ 11 系統 (害虫に強い GM トウモロコシと除草剤の影響を受けない GM トウモロコシの交配種を除く) のうち、実際に米国で種子として広く販売されている GM サイズ 1 系統 (RRS) および GM トウモロコシ 5 系統 (Bt11, GA21, T25, Event176, MON810) について DNA の抽出法を検討し、定性分析法の開発を行った。さらに、組換え体が特異的に持つことを確認した DNA 配列をプラスミドに導入し、それを標準物質として使用して定量を行い、妥当性確認試験によって信頼性と実用性の高い定量分析法の確立を行った。さらに、安全性審査未了の GM トウモロコシ CBH351 系統の定性分析法および Multiplex PCR による 5 系統 GM トウモロコシの定性分析法等の開発を行った。これらの分析法は、JAS ハンドブックおよび厚生労働省検査法に採用され、モニタリング法として利用されている。

現在、各国が GM 食品の表示制度を決めており、同時にその監視等に必要な検知技術の標準化も検討されている。これまでに、標準的分析法を決めた国は、日本、韓国とドイツ、スイス (定性試験法のみ) くらいに限られている。多くの GM 農作物を開発し我が国に輸出している米国、カナダにおいては、未だに詳細な分析法を明らかにしていない分析会社への依頼が行われており、輸出国と輸入国で異なる分析法を使用しているために分析結果を巡る問題が生じかねない状態になっている。

表 4 遺伝子組換え食品に係る表示内容の確認調査結果（平成 13 年度）

品 目	調 査 商 品 数	組み換えられた DNA の 検出の有無			最終結果	
		不検出	検出	DNA 分 析不可能	適正な 表示 +（及び のうち、分別 生産流通管理 が適切に行わ れていたもの）	不適正な 表示 （及びのう ち、分別生産 流通管理が不 適切であった もの）
生						
大豆、枝豆、大豆もやし	11	9	2	0	11	0
とうもろこし	3	3	0	0	3	0
大豆加工品						
豆腐	64	40	24	0	64	0
油揚げ類	42	23	19	0	42	0
凍豆腐	10	7	3	0	10	0
おから	5	5	0	0	5	0
ゆば	5	4	1	0	5	0
納豆	19	15	0	4	19	0
豆乳類	10	7	2	1	10	0
みそ	20	15	3	2	20	0
大豆煮豆	12	10	1	1	12	0
大豆缶詰及び瓶詰	5	4	1	0	5	0
きな粉	10	8	2	0	10	0
大豆炒り豆	4	3	1	0	4	0
大豆（調理用）を主な原材料とするもの	3	2	1	0	3	0
大豆粉を主な原材料とするもの	4	2	2	0	4	0
大豆たん白を主な原材料とするもの	7	2	5	0	7	0
枝豆を主な原材料とするもの	4	4	0	0	4	0
大豆もやしを主な原材料とするもの	5	5	0	0	5	0
その他	7	5	2	0	7	0
とうもろこし加工品						
コーンスナック菓子	23	16	4	3	23	0
コーンスターチ	5	4	1	0	5	0
ポップコーン	6	5	1	0	6	0
冷凍とうもろこし	2	2	0	0	2	0
とうもろこし缶詰及び瓶詰	3	3	0	0	3	0
コーンフラワーを主な原材料とするもの	2	1	1	0	2	0
コーングリッツを主な原材料とするもの	5	1	4	0	4	1（注 2）
とうもろこし（調理用）を主な原材料とするもの	6	4	0	2	6	0
その他	3	3	0	0	3	0
合計	305	212	80	13	304	1
			（注 1）	（注 1）		

（注 1） 組み換えられた DNA（安全性審査済みの遺伝子組換え農産物由来のもの）が検出された商品（80 商品）及び DNA 分析ができなかったもの（13 商品）については、分別生産流通管理の実施確認を行ったところ、注 2 に示した 1 商品以外の 92 商品については、分別生産流通管理が適切に実施されていたことから、表示が適正であることが確認された。

（注 2） コーングリッツを主な原材料とするとうもろこし加工品のうち 1 商品（コーングリッツ）については、定量分析の結果、遺伝子組換え農産物の意図せざる混入の目安である 5% を上回っていた（6%）ことから、センターから改善の指示を行った。

このため、我が国が採用したプラスミドを利用する標準分析法を輸出国においても幅広く利用されるように努力することが重要と考えられる。

(農林水産消費技術センター神戸センター 微量物質調査課 松岡 猛)

(食品総合研究所 企画調整部食品衛生対策チーム 日野 明寛)

参考文献

- 1) 松岡猛, 川島よしみ, 穂山浩, 三浦裕仁, 合田幸広, 瀬畑環, 一色賢司, 豊田正武, 日野明寛, *ダイズ及びダイズ加工食品からの組換え遺伝子の検知法 (第一報)*, *食衛誌*, **40**, 149-157(1999)
- 2) Matsuoka T., Kawashima Y., Miura H., Kusakabe Y., Isshiki K., Akiyama H., Goda Y., Toyoda M. and Hino A., A method of detecting recombinant DNAs from four lines of genetically modified Maize., *J. Food Hyg. Soc. Japan*, **41**, 137-143 (2000)
- 3) Matsuoka T., Kuribara H., Akiyama H., Miura H., Goda Y., Kusakabe Y., Isshiki K., Toyoda M. and Hino A., A multiplex PCR method of detecting recombinant DNAs from five lines of genetically Modified Maize., *J. Food Hyg. Soc. Japan*, **42**, 24-32 (2001)
- 4) 松岡猛, 栗原秀夫, 末藤晴子, 三浦裕仁, 日下部裕子, 穂山浩, 合田幸広, 一色賢司, 豊田正武, 日野明寛, *遺伝子組換えトウモロコシ CBH351 系統からの組換え遺伝子の検知法*, *食衛誌*, **42**, 197-201 (2001)
- 5) Kuribara H. Shindo Y., Matsuoka T., Takubo K., Futo S., Aoki N., Hirao T., Akiyama H., Goda Y., Toyoda M. and Hino A., Novel Reference Molecules for Quantitation of Genetically Modified Maize and Soybean, *J. AOAC Int.*, **85**(5), 1077-1089 (2002)
- 6) Shindo Y., Kuribara H., Matsuoka T., Futo S., Sawada C., Shono J., Akiyama H., Goda Y., Toyoda M. and Hino A., Validation of Real-Time PCR Analyses for Line-Specific Quantitation of Genetically Modified Maize and Soybean Using New Reference Molecules, *J. AOAC Int.*, **85**(5), 1119-1126 (2002)
- 7) Matsuoka T., Kuribara K., Takubo H., Akiyama H., Miura H., Goda Y., Kusakabe Y., Isshiki K., Toyoda M. and Hino A., Detection of recombinant DNA segments introduced to genetically modified maize (*Zea mays*), *J. Agric. Food Chem.*, **50**, 2100-2109 (2002)

交流高電界による微生物制御技術の開発

はじめに

食品を 2 枚の平板電極で挟み、両電極に電界を印加すると材料中に電流が流れ、発熱する。この発熱は材料が持つ電気抵抗に抗して電流が流れることによるジュール発熱またはオーミック加熱と呼ばれている。ただし、印加する交流電界の周波数が高い場合、その発熱機構はジュール熱だけでなく誘電損によるものも考慮する必要があるため、広い意味で食品材料に電気を通じて加熱することを通電加熱と呼ぶことにする。通電加熱は商用電源と電極だけの簡易な装置で実現できるため、満足な調理器具が無かった戦時中から電気パンとして親しまれてきた食品の加熱方法である。ただし、当時は電源として商用周波数（50Hz または 60Hz）の交流を用いていたので、電極の電気分解でイオン化した金属材料が食品へ汚染する問題等のため、通電加熱の利用が拡大しなかった。しかしながら、最近、腐蝕しにくいチタニウムを電極材料として利用することや、電源の使用周波数を 10kHz 以上に高くすることにより、電極の腐蝕と食品への金属汚染が抑えられることが分かってきた。このため、今日では通電加熱をパン粉の製造、すり身製品の加工、ジャム製造および各種ペースト状食品の加熱に多く利用されるようになった^{1,2,3,4}。一方で、病原性大腸菌、リステリア等の微生物による食中毒事故が多く発生したことに対応した簡易な微生物制御手法の一つとしてこの通電加熱が注目されている。通電加熱は食品加工に利用し始めた当初から熱以外に電気的な殺菌効果が期待され、多くの研究がなされてきた⁵が、一部の例外⁶を除いて通電加熱には電気的な殺菌効果がないことが分かってきた⁷。一方、10kV/cm 以上の高電界のパルスを微生物に印加した場合に、微生物の細胞膜に物理的な損傷が生じることが知られ、その原理を利用した高電圧パルス法^{8,9}とよばれる殺菌方法が開発されている。しかしながら、高電圧パルス殺菌で必要となる大容量の電源装置は高価であり、原理上からも大容量化並びに連続処理が困難である為、高電圧パルス殺菌の実用化が進展していない。そこで、本研究では通常に通電加熱装置と同様の交流電源を用いながら電極間隔を狭くすることにより、高電圧パルスと同程度の電界を発生させることを特徴とする交流高電界殺菌装置を開発した。本装置の応用範囲は液状食品に限られるが、大量、連続的に処理できるため、液状食品の実用的な殺菌装置として期待される。以下に交流高電界殺菌法の原理及び装置について概説する。

1. 交流高電界殺菌の原理

1.1 通電加熱

通電殺菌される液状食品は図 1 に示す電極ユニットを上から下に通過するとき

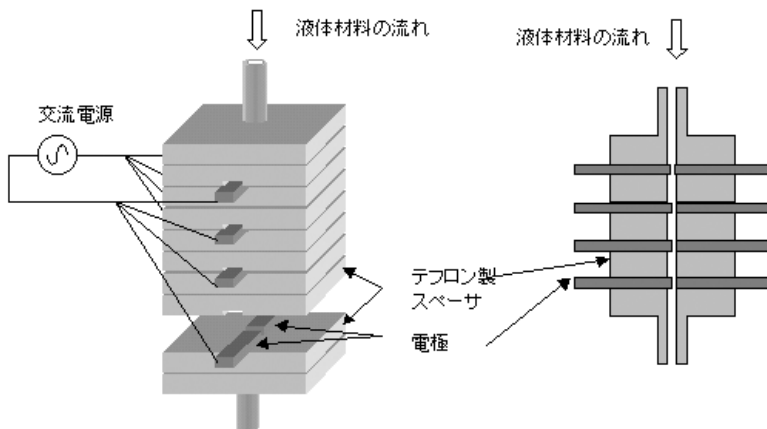


図1 電界印加ユニットとその断面図

に、左右の電極に印加した交流電界に起因する電流が材料を流れることにより、通電加熱が生じる。具体的には、 10°C の 0.1% 濃度の食塩水（オレンジジュースの電気伝導率に相当する）に対して、 200V の交流電圧を 0.2mm の電極間に印加して生じた 10kV/cm の電界中を約 0.1 秒で4段の電極間を通過させた場合、通電加熱における温度上昇はジュールの法則に従って、材料の電気伝導率に比例し、印加電界の二乗に比例することから、出口に現れる材料の温度（処理温度）は約 80°C まで上昇する。各種液状食品はそれぞれ図2に示すような固有の電気伝導率を持つため、同じ電界を印加した場合でも電極ユニット出口の処理温度が異なる。処理温度は以下に示すように殺菌効果に大きく寄与するため、所定の処理温度になるように印加電界、初期温度、および材料の流速を適当に制御する必要がある。

1.2 電気穿孔

液体中に浮遊する微生物の細胞に外部から電界を印加すると、細胞膜の表面に電界（ E ）および細胞の直径（ $2r$ ）に比例した正負の電荷が生じ、細胞膜を挟んで両電荷が引っ張り合うクーロン力が作用する。印加電界が高くなり、細胞膜がその力に抗しきれなくなったときに、最大の電位がかかる細胞の極部分（ $\cos = 1$ ）の表面に微細な穴が開くことを電気穿孔と呼んでいる（図3）。電気穿孔が小さい場合は可逆的に修復されるため、この現象は細胞融合に多く利用されているが、電界がさらに強くなると穿孔の穴が大きくなり、細胞膜を修復ができなくなると最終的にその細胞は死に至る。このような不可逆的な電気穿孔が生じるとき、細胞の両端に掛かる電圧は細胞の大きさに関わらず 1V 以上であることが知られている¹⁰⁾。したがって、対象とする微生物の大きさを $1\mu\text{m}$ と仮定すると、不可逆的な電気穿孔が

生じるのに必要な電界は 10kV/cm であり, 0.2mm の電極間の場合は 200V の電圧を印加すればよいことになる。

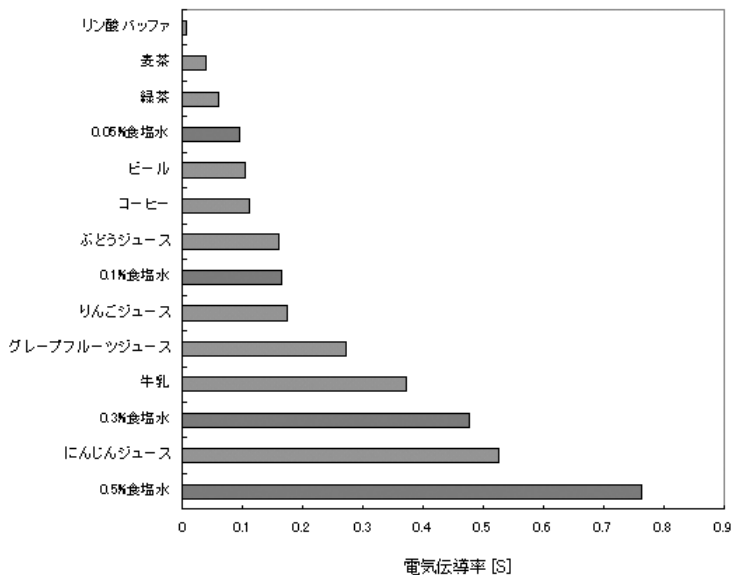


図2 各種飲料および各種濃度の食塩水の電気伝導率 (10°C , 20kHz の値)

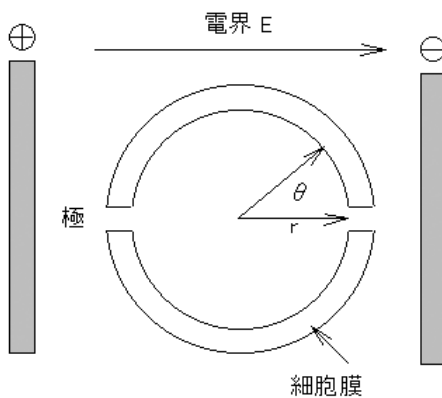


図3 電気穿孔のメカニズム

2. 交流高電界殺菌¹⁾

2.1 装置²⁾

交流高電界装置は図4に示す様に電源部、電極部、液送部、冷却部、計測・制御部からなる。電源部は発信機（NF回路ブロック，1915）で作られた20kHzの交流信号を電力増幅器（NF回路ブロック，4510）で最大282Vの電圧，5Aの電流に電力増幅した交流を電極ユニットの各電極に給電する。液体材料は溶液タンクから液送ポンプ（山善，THE FMI LAB PUMP）を用いて100～150ml/sの一定流速で電極ユニットの材料供給口に送入する。電極ユニットを通過した溶液は直ちに0°Cの冷却水中に浸した試験管内で20°C以下まで冷却する。

2.2 交流高電界印加の結果

2.1×10^6 CFU/mlの初発菌数の大腸菌を含む0.05%の食塩水を用い，印加する電界強度に対して，処理後の残存大腸菌の菌数を図5にプロットした。図より，5kV/cm

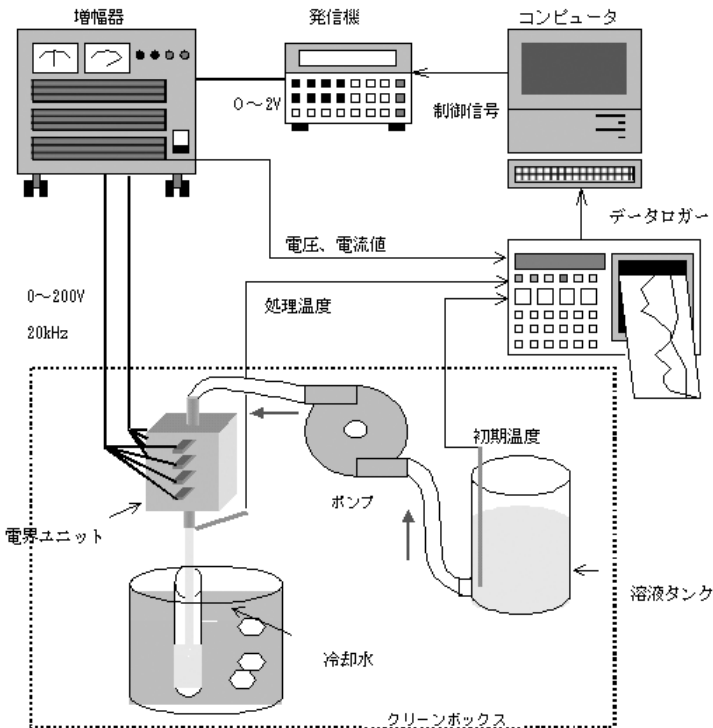


図4 通電殺菌装置

以上の電界から殺菌効果が現れはじめ、それ以上に電界が高くなれば電界に比例して残存大腸菌数が減少することがわかった。ただし、印加電界を高くすると必然的に通電加熱の効果が高くなり、材料の処理温度が上昇する（図5の添え字参照）。したがって、本結果からは、交流高電界処理の殺菌効果から、電界効果と温度効果を分けて考えることはできない。そこで、同一の温度条件で印加電界が異なる条件における殺菌効果を検証するために、濃度の異なる食塩水を材料とした実験を試みた。濃度が異なる食塩水は図2に示すように異なる電気伝導率を有するが、印加電界を制御することにより、所望の処理温度とすることが可能である。処理温度を70°Cおよび65°Cと設定した場合の印加電界と大腸菌数の変化を図6に示した。図より、同一の温度条件の場合、大腸菌数の対数は印加電界に比例して減少することがわかった。また、印加電界が同じ場合には、処理温度が高い70°Cの方が65°Cの

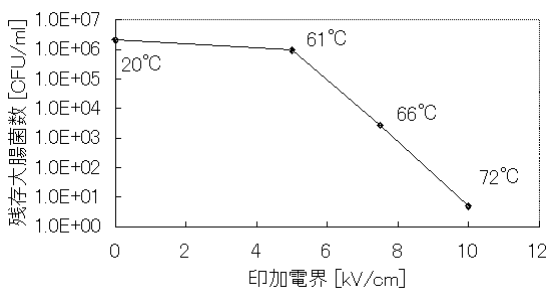


図5 印加電界と残存大腸菌数
各プロットの添え字は処理直後の温度を示す。

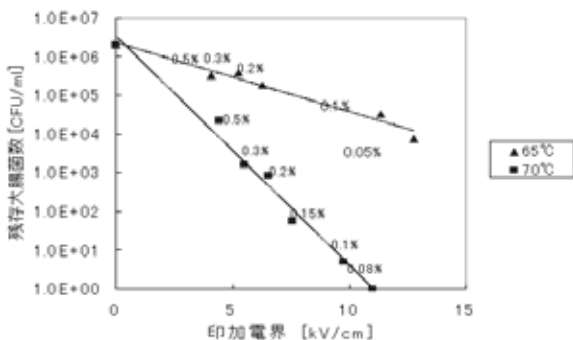


図6 処理温度が65°Cおよび70°Cの時の印加電界と大腸菌の生存数
各プロットの添え字は食塩水濃度を示す。

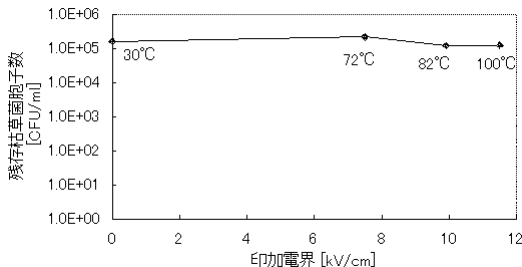


図 7 枯草菌胞子の交流高電界処理

ものよりも殺菌効果が著しく大きくなることがわかった。以上の結果を考え合わせると、本交流高電界において、電界が殺菌に寄与することが確認され、同時に通電加熱による材料の温度上昇が殺菌効果を増大するため、0.1 秒という非常に短い処理時間で十分な殺菌が実現できたものと考えられる。

大腸菌の代わりに酵母菌を添加した食塩水を通電殺菌したところ、大腸菌と同様に 5kV/cm 以上の電界を印加した場合に電界効果が現れ、印加電界が高くなるほど殺菌効果が高くなることがわかった。大腸菌の結果と比較すると、やや低い温度 (26°C) から菌数の減少が始まり、9kV/cm 印加 (54°C) したときに、添加した酵母菌を 10^5 オーダー以上低減できることがわかった。

また、0.1% 濃度の食塩水に枯草菌の胞子を添加したものを通電処理したところ、10kV/cm 以上の電界を印加しても枯草菌胞子を殺すことができなかった (図 7 参照)。したがって、枯草菌胞子のような耐熱性の高い微生物の殺菌に対応するために加圧型の交流高電界装置を考案した。

3. 加圧交流高電界殺菌¹³⁾

3.1 加圧交流高電界の目的

枯草菌胞子の殺菌を目指して窒素ガスの加圧下で交流高電界処理できる装置を開発した。圧力の物理エネルギーを利用した殺菌法として、超高压処理技術が既に報告されているが、300MPa 以上の超高压を用いること、微生物胞子には殺菌効果が少ないことが知られている^{14,15)}。

ここで用いた加圧は、窒素ガスによる 0.2MPa 程度の圧力のため、圧力による殺菌効果は期待できないが、液状食品の沸騰温度を 130°C 以上に上昇することを目的とする。ここでは、モデル食品である食塩水の他、市販の濃縮還元オレンジジュースおよび温州みかんのフレッシュジュースを供試材料とし、芽胞菌の殺菌効果およびジュースの品質変化について検討した。

3.2 加圧交流高電界殺菌装置¹⁶⁾

加圧交流高電界殺菌装置の電極ユニットおよび一次冷却ユニットを図8に示す様に耐圧ガラス容器（耐圧硝子製，TV1000）内に収め、容器内部を高圧窒素ガスで0.2MPaの圧力に加圧した。容器原料となる原液はポンプで120ml/sの速度で加圧容器中に定量供給した。通電処理された液は、通電ユニット下の一時冷却タンク（50ml トールピーカー）に入り、タンクの周りの5°Cの冷媒を循環させた冷却器で100°C以下まで冷却される。タンク内に処理された液が充満されると、タンクの上部に設置したレベルセンサーが電磁弁を駆動し、溶液は自動的に容器外部に排出される。溶液は容器外部の二次冷却器でさらに20°C以下まで冷却される。以上の処理工程は連続的に行うことが可能である。

3.3 加圧交流高電界殺菌の結果

交流高電界処理と同様に、各濃度の食塩水に枯草菌胞子を添加し、処理温度を120°Cと固定した時の印加電界と枯草菌胞子数の変化を図9に示した。図より大腸菌の結果（図6）と同様に、菌数の対数が印加電界に比例して減少することがわかった。

市販の濃縮還元オレンジジュースに枯草菌の胞子を添加し、未処理、加圧交流高電界処理、マイクロ波加熱および100°Cの煮沸浴槽中で5minおよび10min間処理

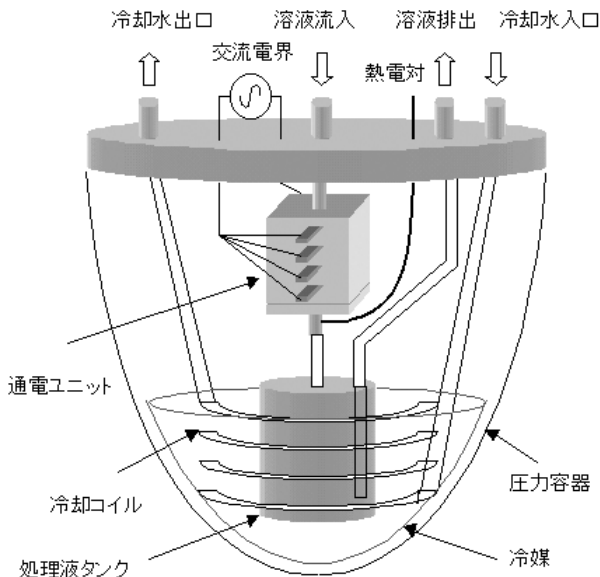


図8 加圧交流高電界装置

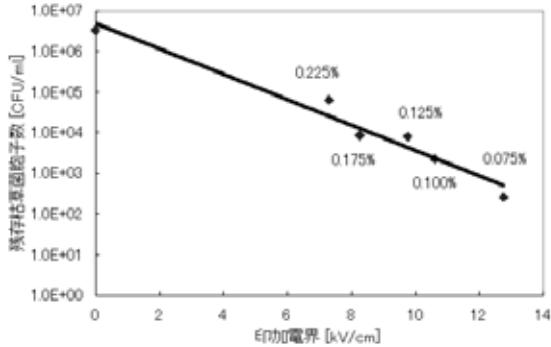


図9 食塩水中の枯草菌胞子の加圧交流高電界処理（処理温度：120℃）

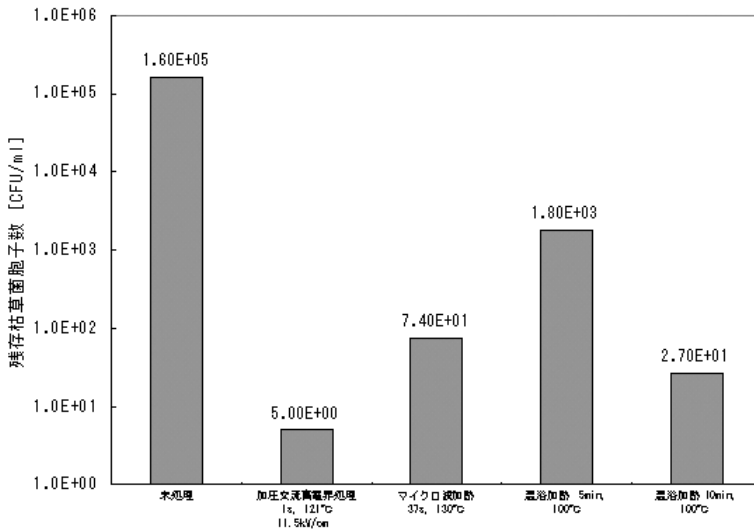


図10 オレンジジュースの各種殺菌処理による枯草菌胞子数の変化

した後、各処理液 1ml 当たりの枯草菌胞子の生存数をそれぞれ図 10 にプロットした。この結果、加圧交流高電界処理のものが最も殺菌効果が高く、菌数を 10^4 オーダー以上低減させることができたことがわかった。図 6 の低濃度食塩水に同様の電界を印加した結果よりも実際のオレンジジュースの殺菌効果が高いのはオレンジジュースの pH が 4 程度と低いことが原因であると考えられる。

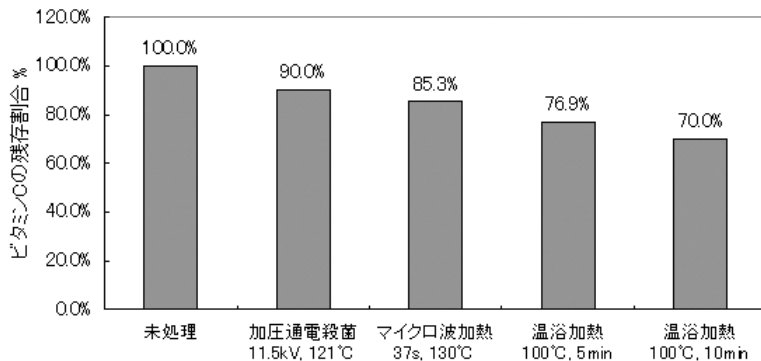


図 11 オレンジジュースの各種殺菌処理によるビタミン C の残存割合

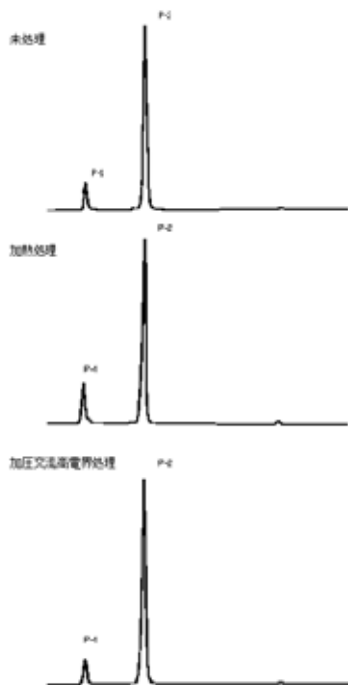


図 12 温州みかんのヘッドスペース GC パターン

P-1：メチルアルコール，
P-2：エチルアルコール

さらに、交流高電界処理を行ったジュースの品質への影響を検討した。未処理のオレンジジュースに含まれるビタミン C 濃度を 100% として、加圧通電殺菌、マイ

クロ波加熱および煮沸加熱後のビタミン C の変化量を図 11 にプロットした。ここで用いたビタミン C 含有率は、ヒドラジン比色法を用いて測定した還元型ビタミン C と酸化型ビタミン C の総和である。図より、加圧交流高電界処理の区分が最もビタミン C の減少量が少なく（10% 減）、マイクロ波加熱、温浴加熱 5min、温浴加熱 10min の順で減少量が大きくなることがわかった。

次に、香気成分の変化について検討した。温州みかんジュースを加圧交流高電界処理したものと、100°C の温浴中で 10 分間処理したものの香気成分を比較したところ、100°C で 10 分間処理したものは俗に芋煮臭と呼ばれる独特の加熱臭が生じるのに対し、加圧交流高電界処理では生じないことが分かった。加熱臭の主成分はジメチルスルフィド (DMS) として知られているが、微量な揮発成分のため測定が困難である。ただし、温州みかんは加熱処理に伴ってメチルアルコールが増加し、エチルアルコールが減少することが報告されている^{17,18)}。金子らと同様の方法でヘッドスペースの GC スペクトルパターンを測定したところ、加熱処理後のメチルアルコール (P-1) は未処理に比べて増加したのに対し、加圧交流高電界処理後のものは未処理のものと成分比に変化が見られなかったことがわかった (図 12 参照)。このことから、交流高電界処理は加熱処理に比べて匂いの変化を生じ難いといえる。

4. まとめ

交流高電界は通電加熱の熱的效果と電界印加の電气的効果の併用により、液状食品中の大腸菌の短時間かつ連続殺菌処理が可能であることがわかった。

また、加圧交流高電界処理では耐熱性の芽胞菌に対しても高い殺菌効果を持ちながら、熱に弱い有用成分 (ビタミン C) や香気成分の変化が少ない殺菌方法であることがわかった。現在の交流高電界処理装置の構造上、対象は液体材料に限られるが、果汁やお酒などの液状食品以外にも農業用水や工業用水などの殺菌処理へ適用することが可能である。また、電界の印加方法や電極を工夫することで、液状材料に若干の固形物が含まれているものへの応用が期待される。現在は、本装置の実用化を目指して本装置のスケールアップに取り組んでいるところである。

(農林水産省 総合食料局 植村 邦彦)

(食品総合研究所 食品工学部製造工学研究室 五十部 誠一郎)

参考文献

- 1) 朴聖峻, 金道彦, 植村邦彦, 野口明德: 食科工, 42, 569-574 (1995).
- 2) 植村邦彦, 五十部誠一郎, 今井哲也, 野口明德: 食科工, 43, 1190-1196 (1996).
- 3) 植村邦彦, 五十部誠一郎, 野口明德: 食科工, 43, 510-519 (1996).
- 4) 植村邦彦, 豊島英親, 岡留博司: 食科工, 45, 533-538 (1998).
- 5) Anderson, A. K., & Finkelstein, R.: A study of the electro pure process of treating milk. *Journal Dairy Science*, 2, 374-406 (1919).
- 6) Simada, K. and Shimahara, K., *J. Appl. Bacteriol.*, 62, 261 (1987).
- 7) Hall, C. W. & Trout, G. M.: *Milk Pasteurization*. Van Nostrand Reinhold/AVI, NY. (1968).
- 8) Zimmermann, U., & Benz, R.: Dependence of the electrical breakdown voltage on the charging time in *Valonia utricularis*, *Journal of Membrane Biology*, 53, 33-43(1980).
- 9) 佐藤正之: 食品と容器, 35, 308-314 (1994).
- 10) Coster, H. G. L., & Zimmermann, U.: The mechanism of electrical breakdown in the membranes of *Valonia utricularis*. *Journal Membrane Biology*, 22, 73-90(1975).
- 11) Uemura, K. & Isobe, S.: Developing a new apparatus for inactivating *Escherichia coli* in saline water with high electric field AC. *Journal of Food Engineering*, 53, 203-207(2002).
- 12) 植村邦彦, 液体の連続殺菌装置および液体の連続殺菌法, 特許登録, 第2848591(1998.11.6)
- 13) Uemura, K. & Isobe, S.: Developing a new apparatus for inactivating *Bacillus subtilis* spore in orange juice with high electric field AC under pressurized conditions. *Journal of Food Engineering*, 56, 325-329 (2003).
- 14) 滝受惠, 栗生武良, 光浦暢洋, 高垣康雄: 加圧食品(林力丸編), さんえい出版, 143-155(1990)
- 15) 小川哲郎, 松崎一, 一色賢司: 食科工, 45, 349-356 (1998).
- 16) 植村邦彦, 液体の連続殺菌装置および液体の連続殺菌法, 特許登録, 第2964037 (1999.8.13)
- 17) 金子勝芳, 片山修: 食研報, 36, 44-50 (1980).
- 18) 金子勝芳, 片山修: 食研報, 36, 57-63 (1980).

ソフトエレクトロンによる殺菌技術

はじめに

食品の持つ機能成分の効用が次々と明らかにされ、現代人は、食品の摂取により、健康を維持することに、かつてない関心を払っている。多くの食品メーカーが、機能性を付与した新製品の開発に力を注いでいるが、最終的に製品化を成功させるためには、流通期間における衛生上の品質を保証する必要がある、そのためには、原料となる食品が本来持っている機能性成分の特性や風味を損なわない、新しい殺菌法の開発も重要なポイントとなる。

加熱殺菌は、多くの食品加工で利用されているように、非常に有効な方法である。ただし、耐熱性の芽胞菌を殺滅するためには、食品本来の品質を損なう様な過酷な条件を必要とする場合があり、特に熱伝導の悪い穀類、豆類などの乾燥食品を加熱により完全に殺菌することは極めて困難である。これらの食品原材料を汚染する芽胞は、そのままの状態では増殖しないが、加工の過程で、適度な水分や栄養分を得ることで増殖し、最終製品のシェルフライフに影響するため、有効な非加熱殺菌法の開発が望まれている。

加速器を用いて発生する電子ビームは、ガンマ線と同様、芽胞菌に対して、強い殺菌能力を持っている。透過力が 50 ~ 150 μm の低エネルギー電子ビームは、紫外線とは異なり、複雑な形状をした食品の表層に入り込み、そこに生育する微生物に効果的に作用する。我々は、この透過力の小さいエネルギーが 300keV 以下の電子ビームを“ソフトエレクトロン”と呼ぶことにした。そして、このソフトエレクトロンを穀物、豆、香辛料、茶葉、種子などの食品の表層に効率良く照射する装置を開発し、各食品に適した処理条件を検討し、穀類のテクスチャー、香辛料や茶葉のフレーバー、種子の発芽力などを保持したまま殺菌を可能にする新しいシステムを確立した。また、本研究の成果をもとに、食品産業で利用できる実用装置の開発も行われた。これらの研究成果は、食中毒や薬剤使用の不安など、食品の安全に対する社会的ニーズが高まる中、それに対応する新技術を提供できるものと期待される。本稿では、殺菌を中心に、ソフトエレクトロン（低エネルギー電子ビーム）を用いた食品の処理技術についての我々の研究成果を紹介する。

1. 電子のエネルギーと透過力、殺菌効果

放射線のエネルギーを利用して、殺菌や殺虫を行う食品照射の分野では、従来、食品を包装したまま処理できるというメリットが重視され、透過力の大きいガンマ線やエネルギーの大きい電子線の利用が、香辛料の殺菌を中心に進められてきた。ただし、これらの透過力の大きい放射線は、デンプンなどを多く含む穀物において

は、テクスチャーなどの品質を低下させるため、殺菌には利用できないとされてきた。

ところで、穀物、豆などの乾燥食品原材料を汚染する微生物、特に多くの場合に問題とされる耐熱性芽胞菌は、穀物表層部分に多く分布しており、内部の可食部分にはほとんど存在しない。ただし、陰になる部分にも微生物は生育しているので透過力のない紫外線では十分な殺菌効果が得られない。それならば、殺菌に必要な最小限の透過力を有し、内部には到達せず品質劣化（変化）を起こさないような透過力の小さい電子ビームを、加速電圧の調整によって発生させて利用すれば、問題は解決するのではないか。このような発想に基づき、従来、食品には不向きとされてきた 300keV 以下のエネルギーの小さい電子ビームに着目し、このエネルギー域の電子をソフトエレクトロンと定義した。ソフトエレクトロンの食品への透過力と微生物への作用を、従来の電子線やガンマ線、紫外線と比較して表現したイラストを図 1 に示した。

ソフトエレクトロンの実際の透過力を図 2 に示す。この図は、電子のエネルギーを吸収した量に応じて、着色変化するプラスチックフィルム（ラジオクロミック線量計）数枚を積層し、エネルギー（電圧）の異なるソフトエレクトロンをあて、そ

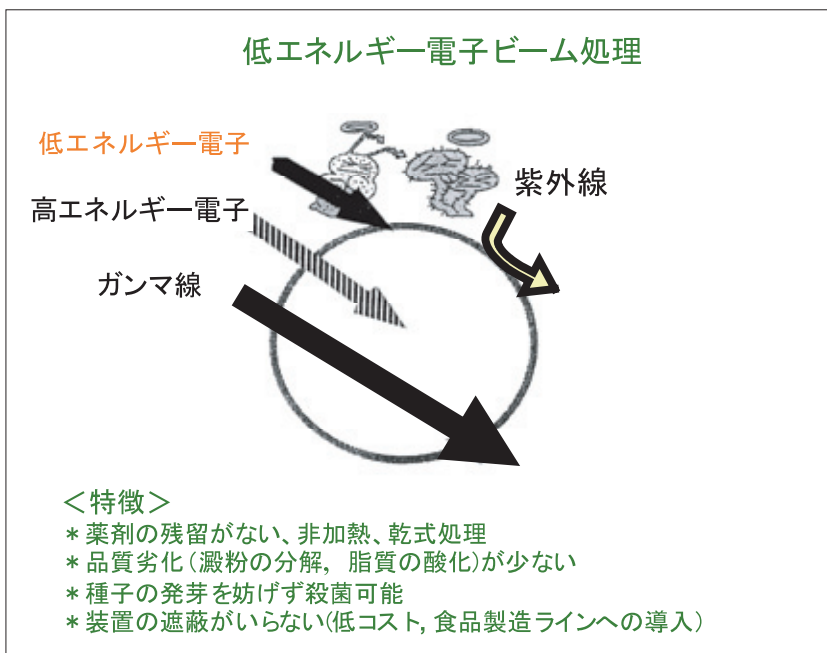


図 1 ソフトエレクトロンの透過力のイメージ

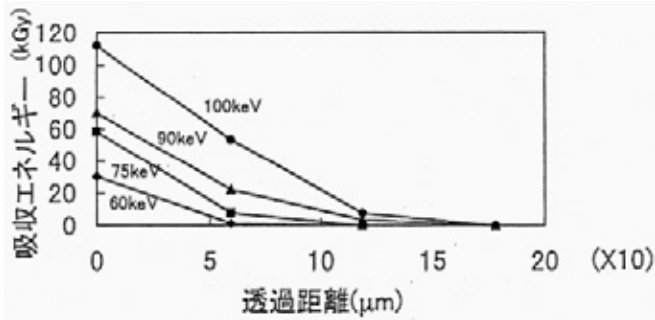


図2 ソフトエレクトロンの透過力

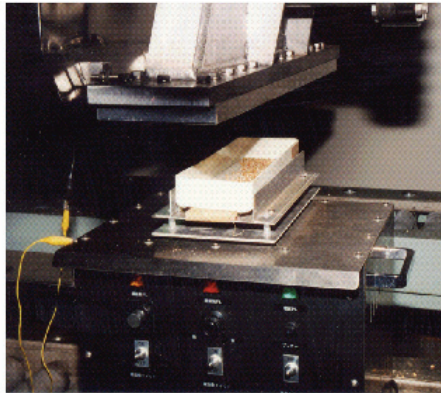
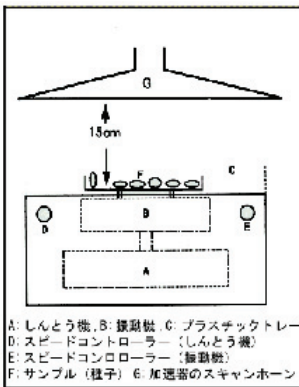


図3 バッチ式穀物回転装置

の1枚ごとに吸収されたエネルギー（吸収線量 = 単位は Gy）をプロットしたものである。このグラフから、例えば、60keV のソフトエレクトロンは、フィルムの1枚目にエネルギーをほとんど吸収され、二枚目まで通り抜けることはできないため、このフィルムの厚さ（50 ミクロン）と比重から、密度が 1g/cm^3 の物質に対する透過力は、60 ミクロン程度であると読みとれる。

2. 実験室規模の殺菌装置開発と穀類の品質^{1)~3)}

透過力の小さい電子を穀物などの粒状の食品の表面にまんべんなく当てるため、ソフトエレクトロンの照射ウインドウの下で穀物粒を回転させる方法をとった。米、麦など単純に転がらない形状のものを裏返すためには横振動と縦振動を同時に与える必要があり、写真のような試料回転装置を試作した（図3）。

この装置を用いて、籾、玄米、そば、豆などの表面をエネルギーと処理時間を変えてソフトエレクトロンで処理し、殺菌に必要な電子の最小エネルギーを検討した。結果を表 1 に示す。殺菌に必要な電子のエネルギーは玄米：75keV、籾：130keV、小麦：75keV、殻付ソバ：130keV であった。なお、この表中に示される処理時間は、数十分単位で非常に長くなっている。これは、実験に用いた電子加速装置では、その特性上、低エネルギー領域での電流値が μA オーダーで非常に小さく、殺菌に必要な電子をあてるには長時間を要するため、低エネルギー領域に特化した電子加速器を導入すれば、mA オーダーの電流が取り出せるため、極短時間の処理が可能となり実際上の効率は問題にならない。殺菌可能な条件で処理した穀物を粉末化し、アルカリ溶液中で加熱、糊化してその溶液の粘度を測定した結果を表 2 に示す。殺菌可能なソフトエレクトロンで穀物を処理しても、粘度はほとんど変化しなかった。一方、ガンマ線で殺菌すると粘度は非常に低下する。これは、穀物中のデンプンが分解して、低分子化したことによる。これらの結果から、殺菌可能な条件のソフトエレクトロンで穀物を処理しても、デンプンはほとんど分解していない。

表 1 ソフトエレクトロン処理した穀物の一般細菌数 (個/g)

	玄米	籾	小麦	殻付ソバ
Control ^{a)}	$4.1 \times 10^6 \pm 4.6 \times 10^5$	$4.7 \times 10^7 \pm 1.5 \times 10^7$	$2.7 \times 10^4 \pm 1.2 \times 10^4$	$1.4 \times 10^6 \pm 6.8 \times 10^5$
75 keV, 8 μA , 10 min	$5.1 \times 10^2 \pm 2.1 \times 10^2$	-----	$1.2 \times 10^3 \pm 8.3 \times 10^2$	-----
75 keV, 8 μA , 40 min	< 10	-----	< 10	-----
100 keV, 14 μA , 5 min	$1.2 \times 10^3 \pm 5.6 \times 10^2$	$5.8 \times 10^5 \pm 7.0 \times 10^4$	$3.1 \times 10^2 \pm 2.1 \times 10^2$	$1.4 \times 10^3 \pm 9.2 \times 10^2$
100 keV, 14 μA , 20 min	< 10	$6.3 \times 10^3 \pm 1.3 \times 10^3$	< 10	$3.3 \times 10^2 \pm 3.6 \times 10^2$
130 keV, 22 μA , 1 min	$2.5 \times 10^3 \pm 1.6 \times 10^3$	$1.6 \times 10^5 \pm 3.8 \times 10^4$	$2.9 \times 10^3 \pm 1.8 \times 10^3$	$1.8 \times 10^3 \pm 9.0 \times 10^2$
130 keV, 22 μA , 6 min	< 10	< 100	< 10	< 10
160 keV, 40 μA , 0.5 min	$7.4 \times 10^2 \pm 1.8 \times 10^2$	$1.3 \times 10^5 \pm 4.5 \times 10^4$	$2.0 \times 10^3 \pm 8.9 \times 10^2$	$9.7 \times 10^2 \pm 8.0 \times 10^2$
160 keV, 40 μA , 3 min	< 10	< 10	< 10	< 10
210 keV, 40 μA , 0.5 min	$1.4 \times 10^3 \pm 7.1 \times 10^2$	$1.3 \times 10^5 \pm 3.5 \times 10^4$	$1.7 \times 10^3 \pm 1.3 \times 10^2$	$6.7 \times 10^2 \pm 2.6 \times 10^2$
210 keV, 40 μA , 2 min	< 10	< 10	< 10	< 10
ガンマ線, 2.5 kGy	$2.2 \times 10^4 \pm 3.6 \times 10^3$	$3.2 \times 10^5 \pm 4.2 \times 10^4$	$2.5 \times 10^4 \pm 4.7 \times 10^3$	$2.0 \times 10^3 \pm 2.1 \times 10^3$
ガンマ線, 5.0 kGy	$3.3 \times 10^3 \pm 1.6 \times 10^3$	$8.4 \times 10^4 \pm 3.8 \times 10^4$	$4.6 \times 10^3 \pm 1.4 \times 10^3$	< 100
ガンマ線, 7.5 kGy	$5.8 \times 10^2 \pm 1.9 \times 10^2$	$7.4 \times 10^3 \pm 3.2 \times 10^3$	$7.5 \times 10^2 \pm 6.3 \times 10^1$	< 10
ガンマ線, 10.0 kGy	< 10	$6.3 \times 10^2 \pm 3.2 \times 10^2$	< 10	< 10
ガンマ線, 12.5 kGy	< 10	< 100	< 10	< 10

< 10 : 検出限界以下

表 2 ソフトエレクトロン処理した穀物の粘度 (mPa.s)

	玄米	粳	小麦	穀付ソバ
無処理	211.1 ± 12.5	149.5 ± 7.7	287.4 ± 18.2	211.3 ± 21.6
75 keV, 8μA, 40 min	206.0 ± 3.5	-----	293.6 ± 12.5	-----
100 keV, 14μA, 20 min	185.9 ± 8.6	147.3 ± 8.9	246.6 ± 10.8	199.9 ± 25.4
130 keV, 22μA, 6 min	146.7 ± 11.9	137.3 ± 7.3	206.4 ± 3.5	192.5 ± 6.4
160 keV, 40μA, 3 min	136.2 ± 4.6	133.4 ± 4.8	192.8 ± 8.0	165.6 ± 7.5
210 keV, 40μA, 3 min	88.5 ± 3.0	105.5 ± 6.8	133.6 ± 3.6	108.7 ± 10.9
ガンマ線, 0.1 kGy	198.4 ± 4.1	138.3 ± 5.6	246.5 ± 3.4	189.6 ± 12.2
ガンマ線, 0.5 kGy	160.8 ± 8.3	117.9 ± 5.5	211.3 ± 4.7	143.2 ± 8.3
ガンマ線, 10.0 kGy	21.1 ± 1.0	31.9 ± 4.9	34.6 ± 1.7	26.8 ± 4.6

表 3 ソフトエレクトロン処理した米の微生物数 (個 / g)

処理の方法	コシヒカリ	日本晴れ
無処理	2.8x10 ⁵	1.8x10 ⁶
60keV, 4μA, 45min	< 10	< 10
75keV, 8μA, 30min	< 10	< 10
90keV, 10μA, 25min	< 10	< 10
100keV, 14μA, 15min	< 10	< 10
ガンマ線 7.5kGy	< 10	< 10

が、穀物全体を透過するガンマ線では、穀物粒全体に作用するため、デンプンの分解が起こってしまうことがわかる。

また、60keV のソフトエレクトロンで「こしひかり」「日本晴れ」いずれの品種の玄米もほぼ無菌にできる(表 3)。処理した玄米では油の酸化が起こるが、精米して白米にすると酸化された油(糠の部分)が除去されると予想される。このことを確かめるため、次のような実験を行った。玄米を殺菌可能な条件でソフトエレクトロン処理した後、歩留まりを変えて精米した。その後、過酸化脂質の生成指標である TBA 値(チオパルピツール酸値)を測定し、精米部分の脂質酸化について検討した。その結果、60keV のソフトエレクトロンで処理した玄米を 90%あるいは 88%の歩留まりで精米して得られた白米では、TBA 値が無処理のものと同値を示すことが明らかになった。一方、ガンマ線処理した米の場合、粒の中まで酸化されているので、精米後も TBA 値はほとんど低下しなかった(表 4)。さら

表 4 ソフトエレクトロン処理した玄米の歩留まりを変えて精米した白米の TBA 値
(nmol/g of rice)

	精米度 (%)			
	100% a)	92% a)	90% a)	88% a)
無処理	17.69	4.95	4.75	4.23
60keV, 4 μ A, 45min	29.68 b)	7.98 b)	5.18	4.75
75keV, 8 μ A, 30min	34.21 b)	9.05 b)	8.37 b)	5.43
90keV, 10 μ A, 25min	41.45 b)	15.55 b)	9.47 b)	9.43 b)
100keV, 14 μ A, 15min	57.66 b)	19.74 b)	14.33 b)	13.70 b)
ガンマ線 7.5kGy	60.59 b)	46.59 b)	43.8 b)	43.23 b)

a) 精米度 (歩留まり),

b) 無処理に比べて有意差あり ($p < 0.05$)

表 5 ソフトエレクトロン処理した玄米の炊飯後の物理特性

	低圧縮試験		高圧縮試験	
	硬さ	粘り	硬さ	粘り
	(10^4 dyne)	(10^4 dyne)	(10^6 dyne)	(10^5 dyne)
無処理	7.02	2.13	2.03	4.88
60keV, 4 μ A, 45 min	6.94	1.94	1.99	5.03
75keV, 8 μ A, 30 min	7.08	2.09	1.99	4.83
90keV, 10 μ A, 25 min	6.74	1.64 a)	1.71	4.76
100keV, 14 μ A, 15 min	6.571	1.59 a)	1.52 a)	4.81
ガンマ線, 7.5 kGy	4.89 a)	0.77 a)	1.06 a)	4.46

a) 無処理に比べて有意差あり ($p < 0.05$)

に、ソフトエレクトロンで処理した玄米を、通常の米飯の歩留まりである 90% まで精米し、この白米を炊飯して、テンスプレッサーを使ってテクスチャーを検討した (表 5)。殺菌可能な 60keV のソフトエレクトロンで処理した玄米を原料とした米飯と無処理の米飯を比較しても、この処理が炊飯後のテクスチャーにも影響を及ぼさないことがわかる。

このように、玄米、粳、穀付ソバなどをソフトエレクトロン処理した場合には、脱穀やとう精に伴って電子が当たった部分が除去されるので、白米やソバは無処理のものと同じ特性をもつことが示された。

3. 大豆，茶葉の殺菌^{4)～6)}

大豆は、味噌や豆腐などの伝統的な食品の原料として、日本人にとって重要な食品である。最近では、大豆に含まれるイソフラボンなどの機能性成分も注目されており、豆乳などの食品も人気が高い。我々は、ソフトエレクトロンを用いて、加工原料としての大豆の微生物数を低減することを試みた。大豆の一般生菌数は、その起源によっても異なるが、我々が、実験で用いたものでは、1g あたり 10^3 個程度の汚染が見られた。この大豆を 60keV のソフトエレクトロンで検出限界以下に低減することが可能であった。なお、同等の殺菌効果を得るために必要なガンマ線の線量は 20kGy であった。殺菌効果と同時に、大豆の色素成分として抗酸化機能を有するルテイン（カロテノイドの一種）の含量や、DPPH ラジカル消去活性、発芽能力などを検討した。その結果、ソフトエレクトロン処理した大豆では、発芽能力や機能成分に影響なく殺菌を行えることが確認できた（表 6）。豆乳は健康飲料として、最近注目を集めている。豆乳調整時には加熱の工程があるが、この原料大豆を利用すると、加熱条件を緩和して、その温度を下げてシェルフライフの長い豆乳が製造できる（表 7）。さらにこの豆乳から豆腐を製造した際には、高温で加熱した豆乳に比べて、豆腐ゲルの特性が改善される（表 8）。

表 6 ソフトエレクトロンおよびガンマ線処理によるダイズの殺菌効果と品質変化

処理	一般生菌数 CFU/g	発芽率 (%)	TBA 値 nmole/g	DPPH ラジカル 消去能 (%)	ルテイン含量 (mg/g)
無処理	4.6×10^3	$97.5 \pm 5.0a$	$103.65 \pm 7.65a$	$45.13 \pm 0.46a$	$6.87 \pm 0.25a$
ガンマ線, 20kGy	< 10	0	$144.00 \pm 1.23b$	$42.80 \pm 0.50b$	$2.99 \pm 0.03b$
ソフトエレクトロン 60 keV, 26 kGy *	< 10	$97.5 \pm 5.0a$	$113.51 \pm 1.99a$	$44.71 \pm 0.33a$	$7.09 \pm 0.15a$

* 表層部分（深さ 60 ミクロン）における見かけの線量。

表 7 ソフトエレクトロン処理した大豆からできた豆乳の全菌数

原料処理	豆乳調精時の加熱 温度 (°C)	全菌数 (0 日後) (CFU/g)	全菌数 (35°C 5 日) (CFU/g)
無処理	92	11	1.3×10^8
60keV 7.5kGy	92	< 10	< 10
無処理	120	< 10	< 10

表 8 ソフトエレクトロン処理した大豆からできた豆乳のゲル化特性

原料処理	豆乳調製時の加熱温度 (°C)	ゲル化指標 (注)
無処理	92	5.24
60keV 7.5kGy	92	5.24
無処理	120	3.52

(注) 5.5 : 最高品質, 4.5 I < 5.5 : 高品質, 3.0 I < 4.5 : 良品質, 3.0 < : 低品質

表 9 ソフトエレクトロン処理したマンゴピーンの生菌数及び発芽後芽の総体積

	生菌数 (CFU/g)	発芽率 (%)			芽の体積 (ml) *	
		1 日	2 日	3 日	3 日	4 日
control	5.4×10^3	98.3	99.5	99.8	49.8	74.0
60 keV	1.9×10^2	98.3	99.5	100.0	50.6	73.6
75 keV	<10	99.8	100.0	100.0	50.6	73.6
90 keV	<10	99.5	100.0	100.0	49.8	72.6
100 keV	<10	99.0	99.8	100.0	49.8	65.0

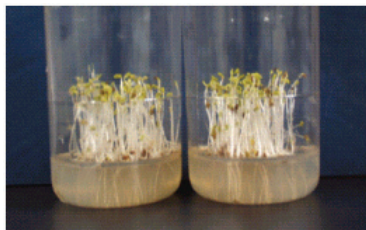
* 図 5 参照

また, 200keV のソフトエレクトロンで茶葉の殺菌が可能であることも確認された。同等の殺菌効果を加熱によって達成するためには, 色調やフレーバーに影響がみられた。

このように, ソフトエレクトロンによる殺菌工程を導入することで, 従来行っていた加熱殺菌の工程を省略または, 条件を緩和 (温度の低下や時間の短縮) し, 加工食品の色調やフレーバー, 加工適正を向上させることも期待できる。

4. 種子の殺菌^{7),8)}

モヤシやカイワレ大根の種子は, 土壌由来の微生物等で汚染されており, 種子を消毒しないと栽培中に微生物が増殖し, 生食する場合には食中毒の原因となる例が報告されている。ソフトエレクトロンのエネルギーを適切に設定することで, 種子の胚には影響が無く, 複雑な形状の種皮の表層に存在する微生物を殺滅することができる。我々の実験では, カイワレダイコン種子は 60 ~ 75keV, アルファルファ種子は 60 ~ 90keV (図 4), もやしの原料であるブラックマッペやマンゴピーンの種子は, 80 ~ 90keV のソフトエレクトロンで発芽力や成長力に影響を与えることなく殺菌できた。(表 9)(図 5)



種子中の生菌数

無処理: 4.8×10^8 CFU/g

処理 : <10 CFU/g

無処理 ソフトエレクトロン処理 (90keV)

図4 ソフトエレクトロン処理したアルファルファ種子の生育 (播種4日後)



Control 75keV 90keV 100keV

図5 ソフトエレクトロン処理した緑豆種子の生育

5. その他の応用 - 穀物の殺虫⁹⁾

穀物輸入の際害虫が混入していると、殺虫処理が施されている。現在日本で利用されている臭化メチルはオゾン層破壊物質であるとして、2005年までに全廃することが決定されており代替法の開発が急がれている。

ノシメダラメイガやコクヌストモドキなどの害虫は、穀物を外側から加害するが、これらの虫に対して60keVのソフトエレクトロンは殺虫効果を持つ。この場合に必要な電流量は殺菌に比べて小さいことから、実用規模の穀物の殺虫処理装置へのスケールアップも充分可能と考えられる。

6. 今後の展望¹⁰⁾

ソフトエレクトロンを食品の殺菌などに使う第一のメリットは、無処理のものと同じ特性を持った無菌の食品原材料（穀物、豆、香辛料）や種子を得ることができるところである。ソフトエレクトロンのコンセプトは単にエネルギーの小さい電子線による殺菌ではなく、できるだけ可食部に透過させず品質変化を抑えるという発想である。そのためには、対象となる食品の搬送装置が技術開発の鍵となる。我々はそのための連続処理装置として、傾斜をつけたトレイを振動しながら、原料が滑り落ちる装置設計を提案した。

この発想を実現し、振動コンベアを用いた実用規模の穀物殺菌装置の開発も行われている。例えば、日新ハイボルテージ社が開発した装置は、加速機部分と搬送部分の両方を、幅・高さ・奥行き各 2m 程度の大きさの遮蔽の中に組み込んだもので、一時間あたり 0.5 ~ 1.0 トンの処理能力を持っている。

電子顕微鏡程度の小さな透過力のソフトエレクトロンは、遮蔽が少なくてもよいから、装置もコンパクトにでき、食品の製造工程に殺菌装置を組み込むことが期待できる。また、装置も低価格であり処理コストが低いといったメリットもある。

今後さらに、食品メーカーや装置メーカーとの協力によって、実際の食品産業で利用できる装置開発が進み、この技術が普及することを願ってやまない。

（食品総合研究所 食品工学部電磁波情報工学研究室 等々力 節子）

参考文献

- 1) Hayashi, T., Okadome, H., Toyoshima, H., Todoriki, S. and Ohtsubo, K., Rheological Properties and Lipid Oxidation of Rice decontaminated with low energy electrons, *J. Food Protection*, **61** (1), 73-77(1998).
- 2) Hayashi, T., Takahashi, Y. and Todoriki, S., Sterilization of Foods with low energy electrons ("soft-electrons"), *Radiat. Phys. Chem.*, **52**(1-6), 73-76(1998).
- 3) Hayashi, T., Takahashi, Y., Todoriki, S., Low energy electron effects on the sterility and Viscosity of Grains, *J. Food Sci.*, **62** (4), 858-860(1997).
- 4) Todoriki, S., Kikuchi, O.K., Nakaoka, M., Miike, M., Hayashi, T., Soft electron (low energy electron) processing of foods for microbial control, *Radiat. Phys. Chem.* **63**, 349-351 (2002).
- 5) Kikuchi, O.K., Todoriki, S., Saito, M., Hayashi, T., Efficacy of soft-electrons (low-energy electron beam) for soybean decontamination in comparison with gamma-rays, *J. Food Sci.*, **68** (2), 649-652(2003).

- 6) 林徹, 中岡素子, 鶴岡誠, 等々力節子, 三池美佳, ソフトエレクトロンの茶葉に対する殺菌効果と品質への影響, 日本食品科学工学会誌, **46(10)**, 633-637(1999).
- 7) Todoriki, S., Hayashi, T., Disinfection of seeds and sprout inhibition of potato with Low energy electrons, *Radiat. Phys. Chem.*, **57**, 253-252(2000).
- 8) 林徹, 等々力節子, カイワレダイコン及びアルファルファの種子に対するソフトエレクトロンの殺菌効果と発芽に及ぼす影響, 日本食品科学工学会誌, **46(11)**, 754-757 (1999).
- 9) Imamura, T., Todoriki, S, Sota, N., Nakakita, H., Ikenaga, H., and Hayashi, T. Effect of "soft-electron" (low-energy electron) treatment on three stored-product insect pests, *Journal of Stored Products Research*, **40(2)**, 2004, 169-177
- 10) 林徹, 等々力節子, ソフトエレクトロン殺菌に用いる連続回転装置, 日本食品科学工学会誌, **46(6)**, 422-427(1999).

調理食品中のアクリルアミド

1. はじめに

アクリルアミドは、土壌凝固剤、土壌改良剤、紙力増強剤、水処理用凝集剤等として使用されるポリアクリルアミドの原料として知られている。アクリルアミドの毒性については、工場や工事現場などでアクリルアミドに接した職業曝露労働者に対する神経毒性が調べられている。また、ラットやマウスなどの実験動物に対しての発ガン性、遺伝毒性、生殖・発生毒性についての報告があり、国際がん研究機関 (IARC) による発ガン性の分類で、「ヒトに対しておそらく発ガン性がある」というグループ 2A に分類され、世界保健機関 (WHO) はアクリルアミドの水道水基準のガイドラインを $0.5\mu\text{g/L}$ としている。しかし、ヒトに対する毒性については、神経毒性に関するもの以外は報告がない。

アクリルアミド分子内の二重結合は、生体内で $-\text{SH}$ 基や $-\text{NH}_2$ 基と反応することが知られている。中でもヘモグロビンの N 末端のバリンと反応して付加物を生じる反応 (図 1) は有名で、この付加物はアクリルアミドへの曝露の証拠となるバイオマーカーとして利用されている。DNA との付加物の生成も知られており、このような生体分子に対する付加物の生成が、アクリルアミドの毒性の原因であろうと推測されている。アクリルアミドは、体内で酸化されてグリシダミドを生成する (図 1)。また、グルタチオン抱合されて尿中に *N*-アセチル-*S*-(2-カルバモイル)システインとして排出される解毒機構も知られている (図 1)。

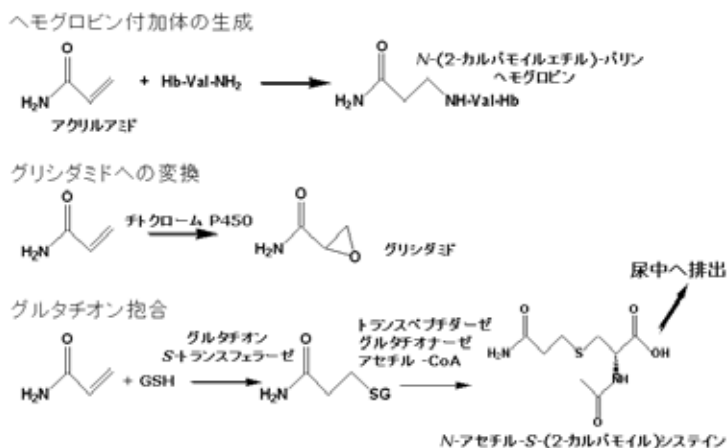


図 1 アクリルアミドの体内動態

2002年4月24日にスウェーデンから、揚げたり焼いたり、高温で加工調理された炭水化物を多く含む食品中に高濃度のアクリルアミドが検出されることが発表された^{1),2)}。これはスウェーデンで、アクリルアミド職業曝露労働者についての研究の対照とした曝露履歴がないと思われる人達の血液にもヘモグロビン付加物が検出されたことに端を発する。このヘモグロビン付加物の起源を探るべく動物実験を行ったところ、揚げた餌を与えたラットの血液中にヘモグロビン付加物が検出され、またその揚げた餌中にアクリルアミドが検出された³⁾ので、曝露源として調理食品が疑われた。そこで、食品中のアクリルアミドの分析を行ったところ、広範な高温調理食品中にアクリルアミドが存在することが判明したのである。生やゆでた食品中には検出されないことから、アクリルアミドは高温調理の際に生成すると考えられた。次いで英国からも同様な分析結果が発表され⁴⁾、国際連合食糧農業機関（FAO）とWHOは2002年6月25～27日に緊急に専門家会議を招集し、食品中のアクリルアミドに関する情報（表1）を収集するとともに、今後の対処方針

表1 FAO/WHO 専門家会議において報告されたノルウェー、スウェーデン、スイス、英国、米国の食品中のアクリルアミド分析値

食 品	アクリルアミド濃度				サンプル数
	平均値	中央値	最小値	最大値	
ポテトチップス	1312	1343	170-2287	38	
フレンチフライ	537	330	<50-3500	39	
パンケーキ・ワッフル類	36	36	<30-42	2	
ベーカリー製品	112	<50	<50-450	19	
ビスケット・クラッカー類	423	142	<30-3200	58	
朝食シリアル	298	150	<30-1346	29	
コーンチップス	218	167	34-416	7	
パン	50	30	<30-162	41	
魚介類フライ	35	35	30-39	4	
肉類フライ	52	52	39-64	2	
インスタント麦芽飲料	50	50	<50-70	3	
チョコレート粉	75	75	<50-100	2	
コーヒー粉	200	200	170-230	3	
ビール	<30	<30	<30	1	

を検討した。この会議では、食品中のアクリルアミドが健康に関する重要な問題になりうる事が確認されたが、健康に対する影響を評価するにはさらにデータを収集する必要があるとされた。そしてこれを機に各国で食品中のアクリルアミドに関する研究が緊急に開始された。

ドイツでは、2002年8月14日に連邦消費者保護・獣医学研究所(BgVV)が、食品中のアクリルアミドを劇的に減らすための第一段階として、1mg/kgを行動基準値(action value)として採用することを勧告したが、このような行動基準や規制値を設ける動きは今のところ他の国にはない。米国食品医薬品庁(FDA)は、2002年6月20日に液体クロマトグラフ・タンデム質量分析法(LC-MS/MS)によるアクリルアミドの分析法を公開し⁵⁾、9月20日には食品中のアクリルアミドに関する行動計画草案を発表している。その後、公聴会やワークショップを開催し、各層から意見を集めてこの問題に対する対応策を立て⁶⁾、広範な食品中のアクリルアミドのモニタリングを開始し、代謝や毒性の研究も進めている。

2. 独立行政法人食品総合研究所における対応

独立行政法人食品総合研究所では、加工・調理食品中にアクリルアミドが検出されたというスウェーデンの発表直後にこの情報をキャッチし、日本の食品に関しても調査が必要であると判断し、分析法の調査と検討を開始した。そして英国からすでに発表されていた誘導体化後にガスクロマトグラフ・質量分析法(GC-MS)で定量する方法⁷⁾を採用し、5月末から日本の市販食品中のアクリルアミドの分析を開始した。次いでスウェーデン食品庁が新たに発表したLC-MS/MS法¹⁾による分析も開始した。さらに、2002年7月23日には、複数の研究部にまたがった対策ワーキンググループを発足させ、7月29日には食品中のアクリルアミドに関するホームページ⁸⁾を立ち上げ、この問題の解説や関連最新情報を掲載し、広報を開始した。また全国消費者団体連絡会前事務局長、食品産業センター研究所長会会長、ポテトチップ協会会員企業執行役員をメンバーとしたアクリルアミド問題に関するアドバイザリーボード会議を8月12日と10月1日に持ち、この問題に大きな関心を寄せる各層の意見をいただいた。食品総合研究所による食品中のアクリルアミドの分析方法と緊急分析結果(図2.4)は、9月25日に国内向けに日本語で日本食品科学工学会誌に速報として投稿された直後、9月26日のAOAC国際ショナル116回年会シンポジウムで海外に向けて発表された。日本食品科学工学会はこの問題を緊急対応を要する重要な問題と認識し、投稿原稿の審査を速かにを行い、この速報は10月4日に受理され、12月号に掲載された⁹⁾。この内容は、次いで10月15日に英語でフルペーパーとしてFood Additives and Contaminantsに掲載され、このジャーナルでもアジアの食品におけるアクリルアミドの分析値を示す初めてのデータとしての価値を認められ、2週間後の10月30日に受理され、翌年3月の号に掲載となった¹⁰⁾。

10月28日～30日に米国イリノイ州ローズモントで行われた米国食品安全性応用栄養協同研究所（JIFSAN）/国立食品安全性技術センター（NCFST）共同開催による食品中のアクリルアミドに関するワークショップには、食品総合研究所は代表を2名送り、分析法と分析結果を発表し、今後の対応に関する議論に参加した。

10月31日には、厚生労働省薬事・食品衛生審議会食品衛生分科会毒性部会において、国立医薬品食品衛生研究所の分析結果^{11) 12) 13)}とともに食品総合研究所による分析結果が発表され、直後に記者発表が行われた。食品総合研究所は、同日アクリルアミド問題に関するホームページ⁸⁾に分析法と分析結果を追加掲載したが、このページはYahoo! ニュースのトップページに掲載されたアクリルアミドに関する記事からリンクが張られたため、10月31日夜から翌日にかけてのアクセス件数は4万件を超えた。このホームページには、アクリルアミド問題に関する解説に加えて、用語解説やQ&Aコーナーも設けてあるため、一般向けの報道がなされた際により詳しい情報を求めた消費者や食品業界関係者にとって、簡潔にまとまった正しい情報を容易に得られるサイトとして参照され、非常に評判がよかった。そして、様々な団体のサイトからリンクが張られ、また内容の一部が消費者啓蒙用に引用され、適切なリスクコミュニケーションに役立ったと考えている。

また、食品総合研究所は、10月下旬より翌年3月まで日本ポテトチップ協会と共同研究契約を締結し、協会メンバーにアクリルアミド分析法の講習を行い、特にアクリルアミド濃度が高く注目されたポテトチップスのアクリルアミド低減のための技術開発に協力した。また、2003年度からは、農林水産省のプロジェクト「食品の安全性及び機能性に関する総合研究」の中で他の独立行政法人と協力して、食品中のアクリルアミド低減のための研究に取り組んでいる。

3. 食品中のアクリルアミド分析

アクリルアミドの分析法としては、これまでに行われてきた誘導体化GC-MS法の他に、最近開発されたLC-MS/MS法が主に用いられている。LC-MS/MS法は誘導体化操作が必要ない前処理が楽であるが、試料の濃縮が行われないうえ、低濃度のアクリルアミドの検出においては試料を希釈しすぎないような工夫が必要である。また、GC-MSに比べて装置が高価なため、広範な普及には不向きである。タンデム質量分析(MS/MS)を使わない液体クロマトグラフ-質量分析(LC-MS)により分析する方法については、国立医薬品食品衛生研究所が4種類のカラムのスイッチングによる方法を発表している¹²⁾。誘導体化を行わないGC-MS法の場合、試料溶液にアスパラギンと還元糖が含まれていると、それらがGC導入部の温度で反応してアクリルアミドを生じるため、注意が必要である。また、メタノール中でアスパラギンとグルコースをメタノールの沸点65°C付近で長時間加熱すると、アクリルアミドを生じる^{14) 15) 16)}。よって、ソックスレー抽出法と非誘導体化GC-MS法を用いたポテトチップスの分析値が従来法の5倍以上の高い値を示す¹⁷⁾のは、

ポテトチップス中の還元糖やアスパラギンも抽出され、それが抽出及び分析操作中に反応して新たにアクリルアミドが生じたためと考えられる。

なお、アクリルアミドの回収率は、食品の種類によってはかなり低い場合があるので、定量分析に際しては、重水素化または ^{13}C 標識アクリルアミドを内標準物質として使用する必要がある。

食品総合研究所におけるアクリルアミドの分析の前処理操作を図 2 に示す。試料をフードプロセッサーで粉碎し、内標準のアクリルアミド- d^3 水溶液を添加した後、ホモジナイズした。遠心分離をして上澄みを取り、凍結後、解凍、再度遠心し、その上澄みを混合相固相抽出カートリッジに負荷し、水で溶出を行った。その一部を $0.2\mu\text{m}$ のフィルターでろ過後、スピナラムによる遠心限外ろ過を行い、この試料を LC-MS/MS 分析に供した。

LC-MS/MS 分析においては、高極性化合物用の Atlantis dC18 カラムを使用して、10% メタノール水溶液のイソクラティックで、アクリルアミド溶出位置を含む 4.8 ~ 10.2 分間について溶出液を質量分析装置に導入した。グラファイト系活性炭カラムについても検討を行ったが、より分離能の安定していた高極性化合物用の C18 カラムを採用した。質量分析は正イオンモードで、アクリルアミドおよび内標準それぞれの $[\text{M}+\text{H}]^+$ のプロダクトイオン (m/z 72>55, 75>58) を選択反応モニタリング (SRM) で検出した。

GC-MS 分析には、固相抽出カートリッジ処理後の試料溶液を氷浴中で冷却し、臭素化試薬を加え、氷浴上で 1 時間静置した。チオ硫酸ナトリウム水溶液を添加し、過剰の臭素を消失させ、酢酸エチルで抽出した。抽出液を硫酸ナトリウム (無水) で脱水し、大部分の溶媒を減圧留去し、GC-MS 分析用マイクロ試料管へ移し替え、さらに遠心エバポレーターで濃縮した。この試料管を 4°C に保管し、分析直前に酢酸

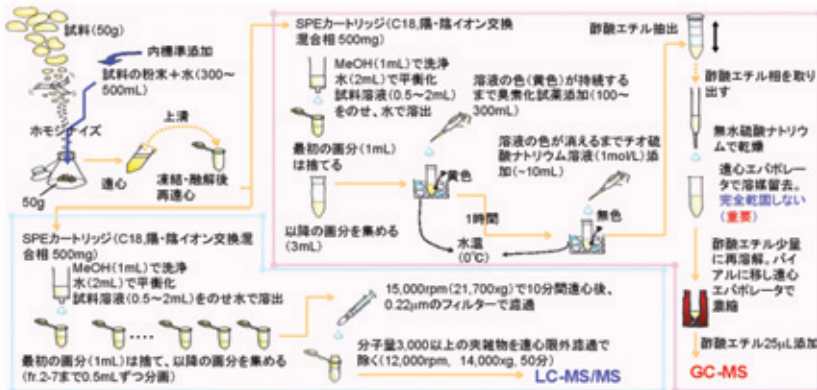


図 2 食品総合研究所における前処理法

エチルで希釈した。中極性カラムを用い、85°Cで1分間保持 - 25°C/分で175°Cまで昇温 - 6分間保持 - 40°C/分で250°Cまで昇温 - 250°Cで7.5分という昇温プログラムでGCを行った。保持時間8.2分の2,3-ジプロモプロピオンアミドの脱臭素フラグメントイオンピーク (m/z 150, 152) を選択イオンモニタリング (SIM) で検出し、内標準由来の保持時間8.1分のピーク (m/z 153, 155) との面積比から試料中のアクリルアミド濃度を算出した。LC-MS/MS, GC-MS 両法における分析値はよく一致していた。(図3)

市販の加工食品について分析を行ったところ、ポテトチップス、クッキー、朝食シリアル等、主に欧米で食されている食品の分析値はFAO/WHOから報告されている分析値の範囲内にあり、その他に新たに日本独自の高温加工・調理食品におけるアクリルアミド含量が明らかになった(図4)。ポテトチップスやバレイショが主原料のスナック菓子のようなバレイショ加工品が平均1000 μ g/kg以上の高い値を示しているが、中には100 μ g/kg以下のものもあり、これは材料や加工条件の違いによると思われる。一方、サツマイモを原料とした大学芋や芋かりんとうのアクリルアミド濃度は、120 ~ 150 μ g/kgであった。また、スナック菓子でも小麦粉やトウモロコシを主原料としたもののアクリルアミド濃度は、250 μ g/kg以下であり、米菓(せんべい、あられ)の値も300 μ g/kg以下であった。即席麺や即席ワンタンのアクリルアミド濃度は、ひとつの例外を除いて100 μ g/kg以下であり、揚げ調理、焼き調理により加工された市販の総菜類のアクリルアミド濃度は、高いものでもだいたい100 μ g/kg、低いものでは数 μ g/kgであった。麦茶については、粒の分析を行ったところアクリルアミドが検出されたので、浸出液中の濃度も調べたところ粒から浸出液へ抽出されて来ていることが明らかになったが、浸出液中の濃度は30 μ g/kg以

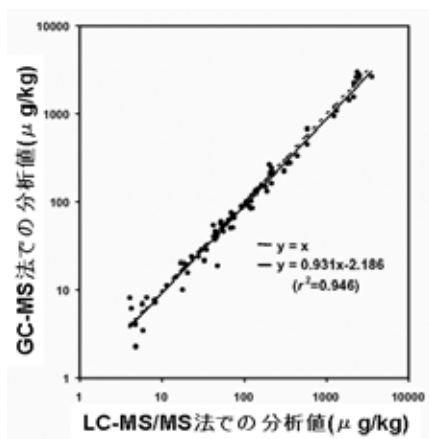


図3 LC-MS/MS法とGC-MS法による分析値の比較

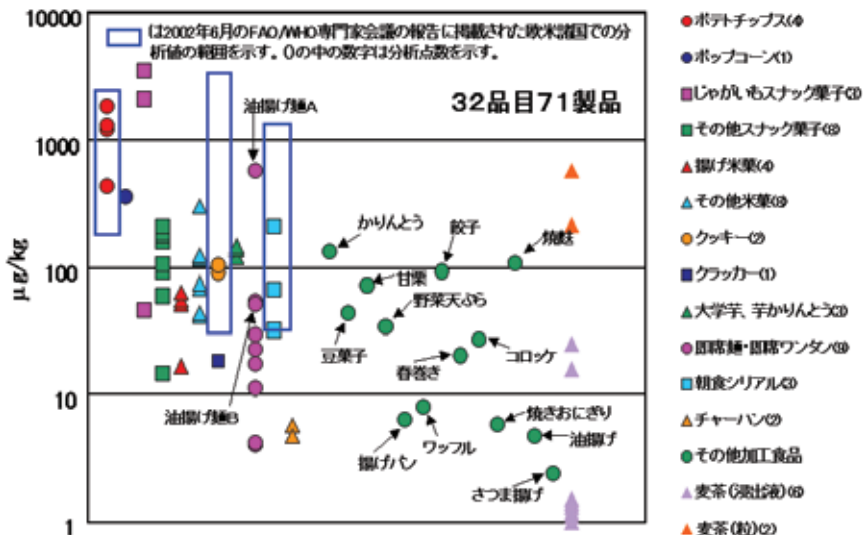


図4 食品総合研究所における日本の市販加工食品中のアクリルアミド分析結果

下であった。なお、同じ食品でもアクリルアミド含量にはかなりのばらつきが見られ、これは材料や加工条件の違いが反映されたためであると考えられた。

食品中のアクリルアミドの分析については、英国の Central Science Laboratory (CSL) と米国の American Oil Chemists' Society (AOCS) がプロフィシエンシテスト (外部精度管理) を行っている。食品総合研究所では、ポテトチップス、朝食シリアル、クリスピーブレッド、コーヒー試料についての CSL のプロフィシエンシテストに参加し、妥当な分析値を出している。

4. アクリルアミドの生成機構

アクリルアミドは、食品中の遊離のアスパラギンがグルコースなどの還元糖と反応して、シッフ塩基を形成した後、脱炭酸を経て生成すると考えられている^{18) 19) 20) 21) 22)} (図5)。アクリルアミドの炭素と窒素はすべてアスパラギン由来であるが、アスパラギンのみを加熱した場合には、通常、まず脱アンモニアや脱水反応が起き、脱炭酸によるアクリルアミドの生成はあまり見られない (図6)^{19) 21)}。アクリルアミドが効率よく生成するためには、アスパラギンが還元糖などカルボニル化合物と反応していったんシッフ塩基を形成することが重要である。なお、アスパラギンと還元糖がシッフ塩基を形成した後でも、アマドリ転位によってアマドリ化合物が生じると反応はアクリルアミド生成の方へは進まない (図6)²¹⁾。様々な成分が共存する食品中でのアクリルアミドの生成はこれらの競合反応とともに起こるた

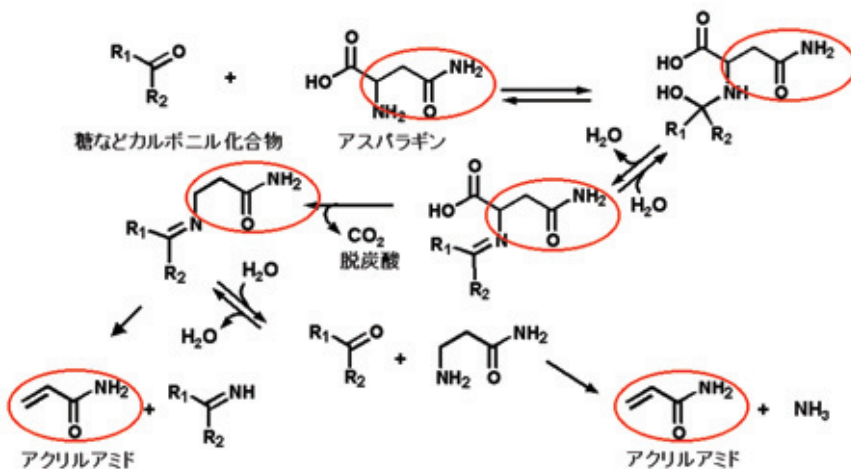


図5 アクリルアミドの生成機構

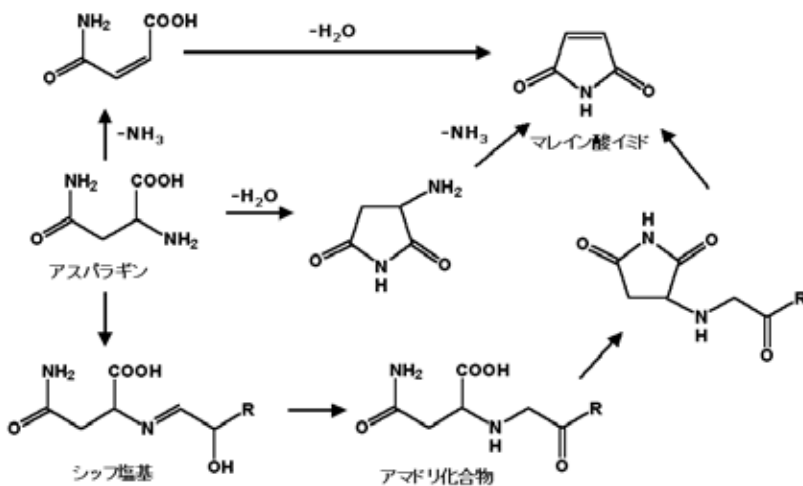


図6 アスパラギンからのアクリルアミド生成に対する競合反応

め、単純な *in vitro* の反応系での実験結果とは異なる。例えば、アスパラギンとグルコースからの *in vitro* でのアクリルアミドの生成は、170°C 前後で最高になり、それ以上の温度では生成量の減少がみられたが¹⁸⁾、食品中では 180°C 以上に調理温度を上げて必ずしもアクリルアミド生成量が減ることはなく食品の「こげ」と

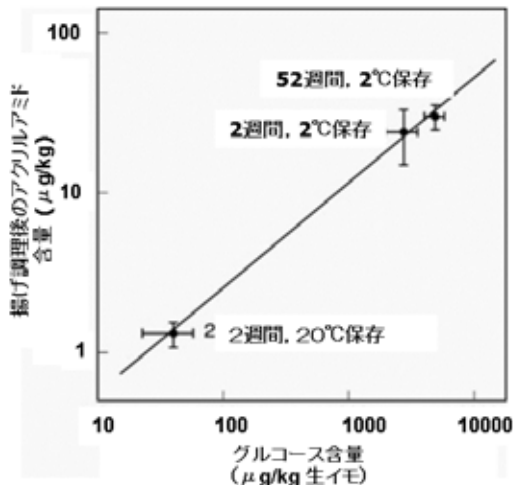


図7 バレイショ生芋中のグルコース含量と揚げ調理後のアクリルアミド含量の相関

もに生成量が増す場合もあり、アクリルアミド生成はこげを生ずるメイラード反応と密接な関係があると考えられる。

バレイショは低温で貯蔵するとデンプンが分解されて還元糖が増加し、それを高温で調理すると室温保存したイモを使用した場合に比べて、こげやすいばかりでなくアクリルアミド生成量が増加する(図7)²³⁾。市販のポテトチップス用の原料は、こげを防ぐために低温貯蔵はしていないが、家庭でも揚げ料理に用いるバレイショは低温貯蔵を避ける方がよい。

アクリルアミドの生成に関する今後の研究課題として、食材中のアスパラギンを始めとする遊離アミノ酸や還元糖とアクリルアミド生成量との関連の解明、各食品群におけるアクリルアミド生成機構の違いの調査、各食品素材中におけるアクリルアミド生成に対する温度、加熱時間、pH、水分の影響の調査、アクリルアミド生成反応の阻害、アクリルアミド分解・除去反応の解明などがある。アクリルアミド生成に対する揚げ油とその添加物の影響²⁴⁾や、トレハロース²⁵⁾、アルギニン、またシステインをはじめとするSH化合物の共存による効果²⁶⁾の報告が見うけられるが、このような共存物質の影響に関する研究成果がこれからも次々と発表されると予想される。

5. アクリルアミドの曝露評価

スウェーデンや米国の調査によれば、アクリルアミドの摂取量は、だいたい 20 ~ 40 μg/人/日と推定される。米国における食品中のアクリルアミド含量のモニタ

リング結果と食事内容の調査結果から推定した摂取源の内訳は、バレイショ製品から約30%、パン、朝食シリアル、クッキー類、コーヒーからそれぞれ10～15%であった。スウェーデンにおいては、クリスブレッドから28%、その他のパン類から13%、コーヒーから20%、フライドポテトから13%、ビスケットから8%という推定結果が報告されている²⁷⁾。このように食事を通じたアクリルアミドの摂取は食生活によって変わってくるので、地域差や世代間差が大きいと思われる。しかし一般に、子供の体重あたりの摂取量は大人より多く、また人によっては平均の数倍の摂取量になるのではないかと推測される。なお、アクリルアミドは喫煙によっても摂取され、喫煙者の曝露量は食品からの曝露量に喫煙由来の曝露量が加わったものになる。

6. アクリルアミドの毒性

職業上の曝露によるアクリルアミドのヒトに対する神経毒性についてはある程度調べられているが、生殖・発生毒性や遺伝毒性、発ガン性については、細胞や動物実験の結果に基づく報告だけであり²⁸⁾、ヒトでの報告はない。

疫学的研究では、最近、スウェーデンのカロリンスカ研究所と米国のハーバード大学が、大腸ガン591例、膀胱ガン263例、腎臓ガン133例の患者と健康な人538例の過去5年の食事内容を調査して、ガンになる確率とアクリルアミド摂取量との関係を分析した^{27) 29)}。その結果、アクリルアミドの摂取量が増えても、これらのガンになる確率が高くなることはなく、かえって腎臓ガンや大腸ガンは減っているという傾向がみられた。これはアクリルアミドを含むような食品は、食物繊維など健康維持の働きをもつ成分も多いためと考えられる。しかし、この論文に対しては証拠が不十分であるという反論もあり³⁰⁾、またアクリルアミドと他のガンとの関係や、神経系への影響等についても、さらに調査が必要である。

今後、食品を通じて経口摂取されたアクリルアミドの生体利用率(バイオアベイラビリティ)、代謝、解毒、用量反応関係など、体内での動態も考慮に入れた研究が望まれる。

7. おわりに

食品中のアクリルアミドの存在が指摘されて約1年が経過した段階で、食品中のアクリルアミドの分析法が確立し、さらに各種食品の分析値に基づいて米国やスウェーデンで曝露評価がなされた。残された大きな課題は、人類が火を使って食べ物を調理し始めて以来摂取し続けて来たアクリルアミドが、現在の曝露量のレベルにおいて、我々の健康にどのような影響を与えているのかを推定することである。発ガン性が疑われるため、食品中のアクリルアミドを低減するための研究が進められているが、アクリルアミドは揚げたり焼いたりして調理・加工された食品ほとんどすべてに生じており、現在の食文化のもとでアクリルアミドの摂取をゼロにする

ことはとうてい不可能であろう。

このアクリルアミドに限らず、すべての物質は取りすぎれば健康に悪影響が出るので、どんな食品にもリスクはある。また、発ガン性が疑われる物質が食品から検出されたのは今回のアクリルアミドが初めてではない。発ガン性のリスクを減らすためには食品の加熱のし過ぎを避けることが好ましいが、食中毒を防ぐためには肉や魚などは十分に加熱する必要がある。このようなことを配慮して、各食品の安全性の程度を知って、バランスの良い食事を取ることが重要である。

(食品総合研究所 アクリルアミド対策ワーキンググループ 吉田 充)

参考文献

- 1) Rosén, J. and Hellenäs, K., Analysis of acrylamide in cooked foods by liquid chromatography tandem mass spectrometry. *The Analyst*, **127**, 880-882 (2002).
- 2) Tareke, E., Rydberg, P., Karlsson, P., Eriksson, S. and Törnqvist, M., Analysis of acrylamide, a carcinogen formed in heated foodstuffs. *J. Agric. Food Chem.*, **50**, 4998-5006 (2002).
- 3) Tareke, E., Rydberg, P., Karlsson, P., Eriksson, S. and Törnqvist, M., Acrylamide: A cooking carcinogen? *Chem. Res. Toxicol.*, **13**, 517-522 (2000).
- 4) Ahn, J. S., Castle, L., Clarke, D. B., Lloyd, A. S., Philo, M. R. and Speck, D. R., Verification of the findings of acrylamide in heated foods. *Food Addit. Contam.*, **19**, 1116-1124 (2002).
- 5) U. S. Food and Drug Administration, <http://www.cfsan.fda.gov/~dms/acrylami.html>.
- 6) U. S. Food and Drug Administration, <http://www.cfsan.fda.gov/~dms/acryplan.html>.
- 7) Castle, L., Campos, M. and Gilbert, J., Determination of acrylamide monomer in hydroponically grown tomato fruit by capillary gas chromatography-mass spectrometry. *J. Sci. Food. Agric.*, **54**, 549-555 (1991).
- 8) 食品総合研究所, <http://aa.iacfc.affrc.go.jp>.
- 9) 吉田充, 小野裕嗣, 亀山真由美, 忠田吉弘, 箭田浩士, 小林秀誉, 石坂真澄, 日本で市販されている加工食品中のアクリルアミドの分析, *食科工*, **49**, 822-825 (2002).
- 10) Ono, H., Chuda, Y., Ohnishi-Kameyama, M., Yada, H., Ishizaka, M., Kobayashi, H. and Yoshida, M., Analysis of acrylamide by LC-MS/MS and GC-MS in processed Japanese foods. *Food Addit. Contam.*, **20**, 215-220 (2003).

- 11) Nemoto, S., Takatsuki, S., Sasaki, K. and Maitani, T., Determination of acrylamide in foods by GC/MS using ^{13}C -labeled acrylamide as an internal standard. *食衛誌*, **43**, 371-376 (2002).
- 12) Takatsuki, S., Nemoto, S., Sasaki, K. and Maitani, T., Determination of acrylamide in processed foods by LC/MS using column switching. *食衛誌*, **44**, 89-95 (2003).
- 13) 国立医薬品食品衛生研究所, <http://www.mhlw.go.jp/topics/2002/11/tp1101-1a.html>
- 14) Grob, K, Biedermann, M., Hoenicke, K. and Gatermann R., Comment on "Soxhlet extraction of acrylamide from potato chips" by J. R. Pedersen and J. O. Olsson, *Analyst*, 2003, 128, 332. *The Analyst*, **129**, 92 (2004).
- 15) DeVries, J. W. and Post, B. E., Comment on "Soxhlet extraction of acrylamide from potato chips" by J. R. Pedersen and J. O. Olsson, *Analyst*, 2003, 128, 332. *The Analyst*, **129**, 93-95 (2004).
- 16) Tanaka, M., Yoneda, Y., Terada, Y., Endo, E. and Yamada, T., Comment on "Soxhlet extraction of acrylamide from potato chips" by J. R. Pedersen and J. O. Olsson, *Analyst*, 2003, **128**, 332. *The Analyst*, 129, 96-98 (2004).
- 17) Pedersen, J. R. and Olsson, J. O., Soxhlet extraction of acrylamide from potato chips, *The Analyst*, **128**, 332-334 (2003).
- 18) Mottram, D. S., Wedzicha, B. L. and Dodson, A. T., Acrylamide is formed in the Maillard reaction. *Nature*, **419**, 448 - 449 (2002).
- 19) Stadler, R. H., Blank, I., Varga, N., Robert, F., Hau, J., Guy, P. A., Robert, M. and Riediker, S., Acrylamide from Maillard reaction products. *Nature*, **419**, 449 (2002).
- 20) Becalski, A., Lau, B. P. Y., Lewis, D. and Seaman, S. W., Acrylamide in foods: occurrence, source, and modeling. *J. Agric. Food Chem.*, **51**, 802-808 (2003).
- 21) Yaylayan, V. A., Wnorowski, A. and Locas, C. P., Why asparagine needs carbohydrates to generate acrylamide. *J. Agric. Food Chem.*, **51**, 1753-1757 (2003).
- 22) Zyzak, D. V., Sanders, R. A., Stojanovic, M., Tallmadge, D. H., Eberhart, B. L., Ewald, D. K., Gruber, D. C., Morsch, T. R., Strothers, M. A., Rizzi, G. P. and Villagran, M. D., Acrylamide formation mechanism in heated foods, *J. Agric. Food Chem.*, **51**, 4782-4787 (2003).
- 23) Chuda, Y., Ono, H., Yada, H., Ohara-Takada, A., Matsuura-Endo, C. and Mori, M., Effects of physiological changes in potato tubers (*Solanum tuberosum* L.) after low temperature storage on the level of acrylamide formed in potato chips. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **67**, 1188-1190 (2003).
- 24) Gertz, C. and Klostermann, S., Analysis of acrylamide and mechanism of its formation in deep-fried products. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.*, **104**, 762-771 (2002).

- 25) 奥和之, 久保田倫夫, 福田恵温, 栗本雅司, 辻阪好夫, メイラード反応によるアクリルアミド生成に及ぼすトレハロースの抑制作用, 日本農芸化学会大会講演要旨集, p.68, 神奈川 (2003).
- 26) グェエン・ヴァン・チュエン, 富坂和枝, 小長井ちづる, 加藤陽子, 新裕美子, 松永篤史, 中山孝志, 大河原あゆみ, 古賀秀徳, メイラード反応におけるアクリルアミド生成および抑制の検討, 日本食品科学工学会創立 50 周年記念第 50 回大会講演要旨集, p.40, 東京 (2003).
- 27) Mucci, L. A., Dickman, P. W., Steineck, G., Adami, H. O. and Augustsson, K., Dietary acrylamide and cancer risk: additional data on coffee. *British J. Cancer*, **89**, 775-776 (2003).
- 28) Friedman, M., Chemistry, biochemistry, and safety of acrylamide. A review. *J. Agric. Food Chem.*, **51**, 4504-4526 (2003).
- 29) Mucci, L. A., Dickman, P. W., Steineck, G., Adami, H. O. and Augustsson, K., Dietary acrylamide and cancer of the large bowel, kidney, and bladder: Absence of an association in a population-based study in Sweden. *British J. Cancer*, **88**, 84-89 (2003).
- 30) Hagmar, L. and Törnqvist, M., Inconclusive results from an epidemiological study on dietary acrylamide and cancer. *British J. Cancer*, **89**, 774-775 (2003).