

[総説]

2- アルキルシクロブタノン分析と照射食品の検知

尾花裕孝

大阪府立公衆衛生研究所 (〒 537-0025 大阪市東成区中道 1-3-69)

Analysis of 2-alkylcyclobutanone and detection of the irradiated food

Obana Hiroataka

Osaka Prefectural Institute of Public Health, 1-3-69, Nakamichi, Higashinari, Osaka 537-0025 Japan

はじめに

最近食品に混入した化学物質による中毒事例などが報道され、食品中の化学物質に対する関心が高まっている。しかし食中毒事例の多くは、微生物に汚染された食品を摂食することに由来する。食料生産において、微生物を管理する手段として食品照射が優れた手段であることは学術的には認められていても、現状では広く消費者に受け入れられる食品加工技術とは言い難い。日本の現状は、原子力委員会が食品照射を検討すべきであると結論しているが¹⁾、厚生労働省はまだ具体的に食品照射規制を変更する動きを見せていない。我が国が諸外国と同様に多様な食品への食品照射を許可した場合でも、消費者が照射食品と非照射食品を区別できるようにすることが、食品照射が社会に受け入れられるための重要な条件と考えられる。食品の照射履歴検知は、照射表示を検証する重要な手段であるが、完全に確立された技術とは言えない。照射検知の困難さは、放射線が食品に残留しないために、照射によって生じる食品の物理化学的な変化を検出することによる間接的な手法しかないことである。さらに照射による食品の変化の大部分は、程度の差はあるが他の食品への刺激、例えば加熱のような日常的な刺激でも生じることであり、放射線照射による特異的な変化は少ない。

筆者らは放射線照射により特異的に生成すると考

えられている 2- アルキルシクロブタノンを検知指標として選び、独自の分析法を開発し、様々な条件下の食品において、照射履歴の検知が可能であることを検証した。

2- アルキルシクロブタノン

2- アルキルシクロブタノンは放射線照射により脂肪酸から特異的に生じ、前駆脂肪酸の側鎖に応じた構造を示す²⁻⁴⁾。2- アルキルシクロブタノンが食品照射の検知指標として優れているのは、日常環境中には存在しない物質なので、試料ブランク値を考える必要がなく、分析的に 2- アルキルシクロブタノンを検出したと判断できれば、その試料は放射線照射を受けたと判断できるからである。この点は他の照射検知指標に比べ、行政処分などが必要な場合の科学的根拠としての優位性が高い。2- アルキルシクロブタノンは照射特異的な物質であるために、安全性に関する情報はこれまで多くない。発ガンとの関わりを示唆するような報告もあるが⁵⁾、本稿では触れない。

一般的に照射検知に使用される 2- アルキルシクロブタノンは、検出器 (ガスクロマトグラフ質量分析計: GC/MS) の感度と食品中の前駆脂肪酸濃度が比較的高い 2- ドデシルシクロブタノン (2-DCB) と 2- テトラデシルシクロブタノン (2-TCB) である。2-DCB と 2-TCB は化学構造が異なるが、そのマススペクトルはほとんど同一である (図 1A)。その理由

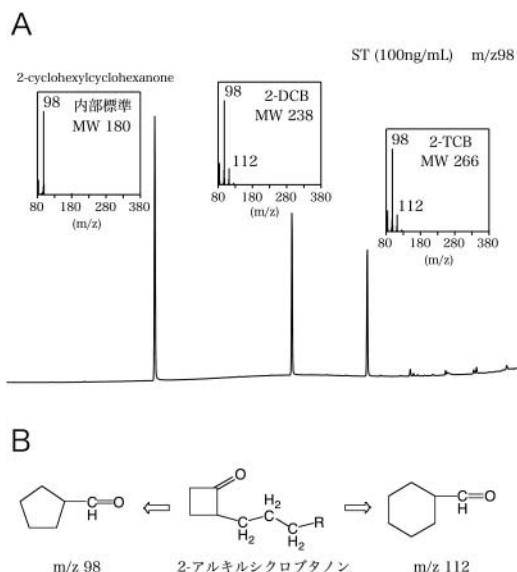


図1 2-DCB および2-TCB のクロマトグラムとMS スペクトル

として Horvatovich et al. は MS 測定時のイオン化時に図 1B に示す共通の物質が生成することにより同じマススペクトルを示すと考えている⁶⁾。GC/MS 測定時において、鶏肉や鶏卵試料は妨害成分の出現頻度が少ないが、牛肉や豚肉試料では精製が不十分であると共存ピークが多く、明瞭なクロマトグラムを得にくい。側鎖に二重結合を持つ 2-アルキルシクロブタノンについては、通常の GC/MS で使用されるイオン化法（電子イオン化法：EI 法）では測定感度が低いですが、Horvatovich et al. は化学イオン化法を用いると対応する分子イオンを検出できるので、選択性や感度が高くなると報告している⁶⁾。

2-アルキルシクロブタノンの GC/MS 測定では、試料成分によるマトリクス増強効果により見かけ上の測定感度が上がり、測定値が過大評価される可能性がある⁷⁾。これを避けるために、試験液を過度に濃縮しないことや、内部標準法により測定することにより過大評価が改善された。

分析法

2-アルキルシクロブタノンは脂肪酸に由来する物質であるので、その分析法は脂肪成分の分析法に近い。分析法としてはヨーロッパ連合(EU)が公定法

として定めた、ソックスレー抽出による脂肪の抽出、フロリジルカラムによる脱脂と精製、GC/MS により測定する方法がもっとも広く検討されている^{2, 8)}。しかしこの方法は、必要な労力、煩雑さ、使用する溶媒量などを考えると、検査機関が日常的な検査として実施するには適していない。迅速簡便に食品試料から 2-アルキルシクロブタノンを抽出する方法として超臨界流体抽出法(SFE)がある。SFE 法は脂肪をあまり抽出せず、2-アルキルシクロブタノンを選択的に抽出する手法であり、SFE 抽出液をそのまま GC/MS 測定する報告もある⁹⁾。低濃度の 2-アルキルシクロブタノンを正確に測定するには、追加的な精製操作を行う方が現実的である⁴⁾。EU 法では 2-アルキルシクロブタノン濃度を試料中の脂肪濃度当たり (FAT ベース) で表すが、SFE 法では脂肪は抽出されないで、2-アルキルシクロブタノン濃度を試料中の FAT ベースで表す場合には別途脂肪抽出が必要である。

筆者らはソックスレー抽出の自動化を目的に開発された高速溶媒抽出法 (ASE) を使用し、脱脂を独自の方法で行う分析法を考案した¹⁰⁾。ASE 法は試料を加熱・加圧した溶媒で抽出することにより、短時間に化学物質を抽出することが可能である。効率が高いので、ダイオキシン類や残留農薬など微量化学物質の抽出にも使用されているが、EU 法で使われるソックスレー抽出法に比べ、抽出時間や使用溶媒量を大幅に削減することが期待された。

分析法

考案した分析法では(図2)、試料と試料の水分を吸収させる吸水材のケイソウ土とを混合し、抽出用セルに充填する。試料から脂溶性成分の抽出効率を上げるために、抽出溶媒には、酢酸エチルを使用し、100℃, 10.5MPa で加熱、加圧抽出し、1 試料の抽出時間は約 30 分で、複数の試料を自動的に連続抽出する。

食品成分表などを参考にした試料の脂肪含有濃度に合わせ、抽出液の一部を採取し等量のアセトニトリルを加えた後、-20℃で30分間放置し脂肪を析出させる。析出した脂肪を素早くろ紙で濾過することにより、中性脂肪類など脂肪の大部分を除去できた。残った脂肪成分や GC/MS 測定で妨害となる成分を除くために、シリカゲルミニカラムによる精製

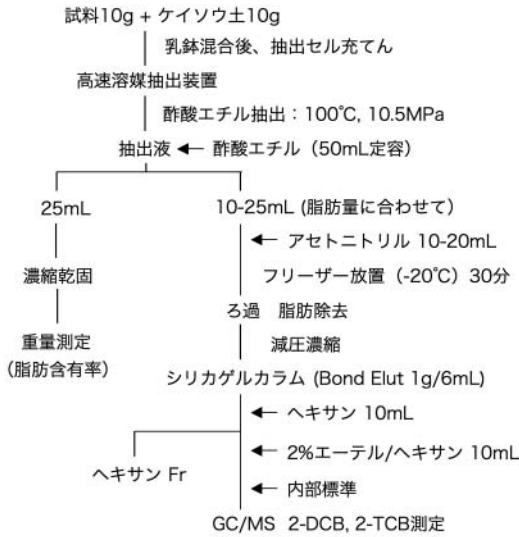


図2 食品中の2-アルキルシクロブタノンの分析法

を行い試験液を得る。精製カラムの充填剤としてはシリカゲルを使用した。シリカゲルを使用した。シリカゲルに比べ妨害成分の除去効率が高かった。

ASE抽出液の一部を濃縮恒量化後重量測定し試料の脂肪含有率を測定した。簡単な脂肪含有率測定操作を加えることにより、分析結果をEU法と比較することが可能となり、さらに2-アルキルシクロブタン濃度をFATベースで表すことにより、後に述べるように調理操作を加えても試料中の2-アルキルシクロブタン濃度が大きく変動しないことを示せた。

分析法の検証

考案した分析法の精度や再現性を確認するために、8種類の非照射食肉類に2-DCBおよび2-TCBを加えて回収試験を行った(表1)。添加濃度は、照射実験例などから実用レベルの照射を検知できること、GC/MSでの安定した測定が可能な最低濃度付近であることなどの理由から、20ng/gとした。2-DCBおよび2-TCBは70~105%の範囲で回収され、また分析値の変動を示す相対標準偏差もおおむね10%以下であり、食肉類中の2-DCBおよび2-TCBの分析法として満足できる方法であることを確認した。

ブランク試料も含めた6検体を同時処理した場合の、分析操作の前処理時間は7~8時間程度であり、同様の操作にEU法では2日間程度要するので、大幅に時間短縮できた。

照射試験

回収試験に用いた冷凍状態の試料に⁶⁰Coを線源とする線を照射し2-DCBおよび2-TCBの分析を行ったところ、すべての試料において照射線量の増大に応じた両者の生成を確認することが出来た(図3)。一方非照射試料からは2-アルキルシクロブタンは検出されなかった。2-DCBおよび2-TCB生成量は試料の脂肪含有量が影響し、重量ベースで濃度を表すと大腸(内臓脂肪が付着)>牛ミンチ、豚ミンチ>鳥モモ>肝臓、鮭>牛モモ、豚モモの順に生成量が多かった。2-TCBと2-DCBの生成量を比較する

表1 2-DCBおよび2-TCBの食肉類への添加回収試験

試料	2-DCB		2-TCB	
	回収率 (%)	RSD	回収率 (%)	RSD
牛 ミンチ	83	6	96	4
モモ(赤身)	104	6	87	3
レバー	105	4	100	4
大腸	91	9	78	11
豚 ミンチ	79	10	80	6
モモ(赤身)	94	8	100	14
鳥 モモ	70	2	74	5
鮭	102	5	87	5

添加濃度: 20ng/g

回収率: n=5 の平均値 RSD: 相対標準偏差

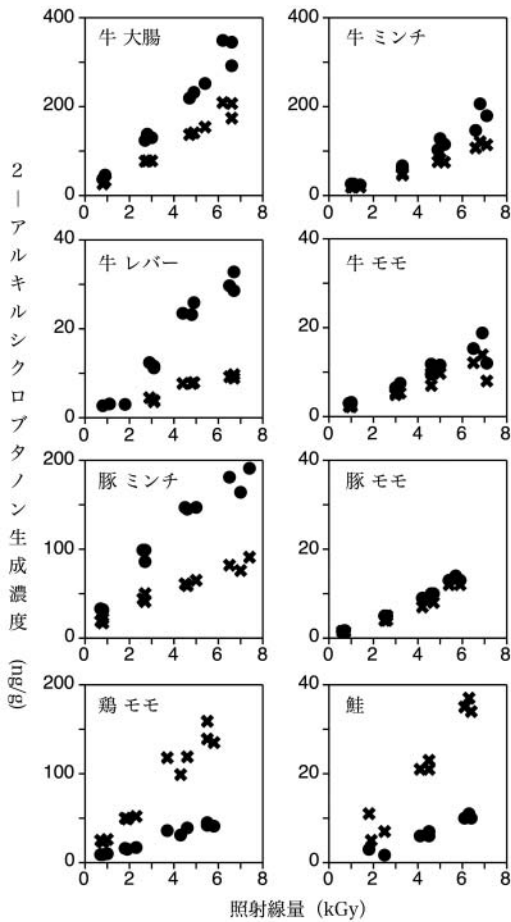


図3 食肉類への線照射による2-DCBおよび2-TCBの生成

と、豚肉や牛肉は2-TCBの方が2-DCBよりも生成量が多い傾向であったが、鶏肉と鮭では2-DCBの方が多く生成した。試料由来のきょう維成分の影響などを考慮した検出下限は分析値で5ng/g程度であり、照射線量から考えると脂肪の多い試料で0.5kGy、少ない試料でも1kGy程度の線量を検出できる感度であった。

照射温度

放射線照射による、2-アルキルプタノン生成には、照射時の温度が影響するという報告があり¹¹⁾、照射時の試料温度と2-アルキルプタノン生成量との関係を検討した。均一化した牛ミンチ肉から直径

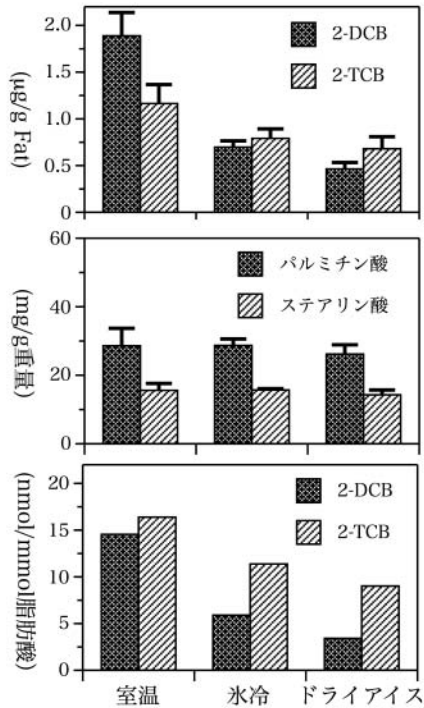


図4 照射時温度と2-DCBおよび2-TCBの生成

約10cmのパテを成型し、室温、氷冷、ドライアイス冷凍の三段階の温度環境下で線を4.7kGy照射した¹²⁾。

その結果2-DCBおよび2-TCBともに、照射時の温度が室温から氷冷やドライアイス冷凍に下がると生成濃度が大きく減少した(図4上段)。中段の図は、照射したパテ中の2-DCBと2-TCBの前駆脂肪であるパルミチン酸とステアリン酸の濃度を示している。各サンプルでそれぞれの脂肪酸は同じレベルを示した。最下段の図は、生成した2-DCBと2-TCBのモル数(nmol/g)を前駆脂肪酸のモル数(mmol/g)で割った値を示し、生成物を前駆物質当たりの濃度で表している。もし2-DCBと2-TCBがそれぞれの前駆物質から同じ比率で生成するのであれば、2本のグラフは同じ高さになると考えられる。室温照射では両者の2-DCBと2-TCB比率は近似している。照射温度が下がると2-DCB、2-TCBどちらも濃度が減少するが、2-DCBの減少の方が大きい。冷却条件下の照射では、2-DCBと2-TCBの生成は元の脂肪酸組成をそのままに反映していないと考

表2 異なった温度条件下での前駆物質からの2-DCB および2-TCBの照射生成^{a)}

温度	2-DCB		2-TCB		2-DCB/2TCB
	平均 (n=3) (nmol/L)	SD ^{b)}	平均 (n=3) (nmol/L)	SD ^{b)}	
室温	73	6	110	7	0.66
氷冷	77	9	95	1	0.81
ドライアイス	14	9	18	17	0.79

^{a)} 前駆物質溶液に 5.3 kGy の線を照射

2-DCBの前駆物質はパルミチン酸メチル；2-TCBの前駆物質はステアリン酸メチル

SD^{b)}：標準偏差

えられ、照射時の温度の影響も無視できないと考えられる。

パテの放射線照射では、肉の成分により2-DCBまたは2-TCBのどちらか一方の生成が抑制されたり、その逆に促進される可能性も考えられた。そこで同一濃度の前駆物質のヘキサソール溶液に、上記と同様の条件で線を照射し、生成した2-DCBおよび2-TCBを測定した(表2)。室温照射でも2-TCB濃度が2-DCBよりも多い傾向であり、氷冷でも大きな変化はなく、ドライアイス冷却で両者の濃度が大きく減少した。一方低温照射での2-DCB/2-TCB比率には大幅な減は認められなかった。図4に示した牛肉照射での照射温度が下がった時の2-DCB/2-TCB比率の変化には、共存する牛肉成分が影響しているかもしれない。例えば食肉類は室温では脂肪組織は固化していないが、氷冷温度になると固化する。このような形態変化が放射線照射による2-DCBや2-TCBの生成に影響することも考えられる。

調理済み食品の照射履歴検知

照射食品の検知においては、未加工食品は照射表示や照射履歴検知も比較的簡単と思われる。一方調理済み食品では食材が混合され、加熱調理などにより食品が変化するため、照射履歴検知は困難になるかもしれない。市販の調理済み食品の多くが加熱調理されており、加熱による2-アルキルシクロブタノン類の安定性確認も必要と考えられる。加熱による食品の変性により、測定上の妨害成分が増え測定が困難になることも想定される。その他、調理時に加えられる他の食材成分との混合による照射食品の希釈なども、分析上の考慮すべき点として考えられる。これらを検証するために、実際に照射食肉など

を加熱調理して2-DCBおよび2-TCBを分析した¹³⁾。

牛肉の加熱調理

牛肉の加熱調理例として焼き肉と牛丼風煮込みを試した。牛丼は典型的な牛肉加工食品例として選んだ。

焼き肉は、線を4.5kGy照射した霜降り肉を一枚ごとに220℃のホットプレート上で加熱した。牛丼煮込みでは、同様の牛肉に玉ねぎ、市販の牛丼の素、水を加えて30分間加熱した。焼き肉も牛丼も調理により重量ベースの2-DCBおよび2-TCB濃度は増えているが、これらは肉の水分減少が大きな原因と考えられる(表3)。焼き肉では調理後重量が14%減り、牛丼でも34%減少しているため、水分減少でほぼ説明できると考えられる。

照射した牛肉、焼き肉、牛丼とそれぞれの非照射生牛肉のクロマトグラムを図5に示した。20分過ぎに2-DCBが、23分前に2-TCBが照射試料で検出されているが、非照射試料では検出されていない。牛丼できょう雑ピークがやや増えているが、測定には影響していない。照射試料で、2-TCBピークの少し前にピークがあるが、非照射試料では調理後も検出

表3 照射牛肉を加熱調理した時の2-DCB および2-TCB変化

試料	2-DCB ^{a)}		2-TCB ^{a)}	
	平均	RSD (%)	平均	RSD (%)
生牛肉	0.29	14	0.39	12
焼き肉	0.36	3	0.50	2
牛丼	0.38	10	0.56	13

^{a)} 重量ベース濃度(μg/g weight)で表示、n=5;

RSD: 相対標準偏差

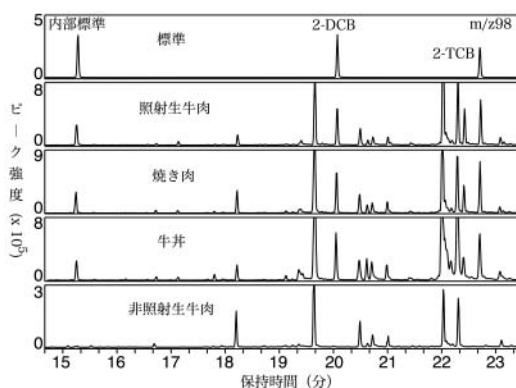


図5 牛肉調理食品中の2-DCBおよび2-TCBのGC/MSクロマトグラム

されているので、この成分も照射により生成したと推察される。牛肉への照射線量は実用線量に比べやや高いと思われるが、加熱調理後も照射検知が可能であるとともに、調理による測定上の問題はほとんどない結果であった。

鶏肉の加熱調理

3.5kGyの線を照射した一口サイズの皮付き鶏肉を180℃の天ぷら油中で揚げた(調理後の肉中心部温度は81~97℃)。2-DCBおよび2-TCB濃度を測定すると、試料の油の分布が均一でないで、重量ベースの分析値は大きく変動した(表4)。重量当たりの両化合物濃度は、調理前後であまり変化しなかったが、FATベースでは調理後両化合物濃度は減少した。FATベースでの化合物濃度の減少には、調理中の揚げ油と両化合物濃度を含む鶏中の油との交

換もあったと考えられる。2-アルキルシクロブタンを含まない揚げ油が肉に入るために、FATベースの濃度が下がったと推定される。両化合物の分析による照射検知の報告では、鶏肉と卵に関するデータが多く検討されており、通常の加熱では今回の実験同様加熱に対しては安定という結果が出ている⁴⁾。

鶏卵の加熱調理

次に卵の加熱調理を検討した。3.1kGyのガンマ線を照射した卵に小麦粉、バター、砂糖、牛乳などを加え均一化した後、180℃のホットプレート上で加熱した。

重量ベースでは、他の材料と混ぜるので卵単独に比べて2-DCBおよび2-TCB濃度が減少している(表5)。FATベースでも両化合物濃度は下がっているが、これは材料のバター、牛乳などの脂肪も入ってきたためと考えられる。卵なしのホットケーキを調理(ホットケーキブランク)後、脂肪を抽出し、ホットケーキブランク(脂肪濃度3.65%)を算出した。ホットケーキブランクを差し引いたFATベースで計算すると、加熱調理前と同レベルの濃度になった。他の食品と混合後加熱すると2-DCBおよび2-TCBの測定には影響せず、2-DCBと2-TCBの比率では鶏肉と同様に2-DCBが多い結果であった。

2-DCBおよび2-TCBの高温加熱

通常の加熱調理では食品の内部温度が100℃を超えないので、より高温での安定性を確かめるため、牛脂に2-DCBと2-TCBを溶かし200℃まで加熱した。その結果、両化合物は100℃、60分間の加熱で

表4 照射鶏肉を空揚げにした時の2-DCBおよび2-TCB変化

	2-DCB ^{a)}		2-TCB ^{a)}		重量減少率 (%)
	平均	RSD (%)	平均	RSD (%)	
重量ベース濃度 (μg/g weight)					
生鶏肉	0.060	46	0.027	39	
空揚げ	0.069	46	0.031	36	31.7
Fat ベース濃度 (μg/g fat)					
脂肪濃度 (%)					
生鶏肉	0.59	16	0.27	16	10.3
空揚げ	0.41	27	0.19	23	16.1

^{a)} 重量ベース濃度 (μg/g weight) で表示, n=5; RSD: 相対標準偏差

表5 照射鶏卵をホットケーキに調理した時の 2-DCB および 2-TCB 変化

Sample	2-DCB ^{a)}		2-TCB ^{a)}		脂肪濃度 (%)
	平均	RSD (%)	平均	RSD (%)	
重量ベース濃度 ($\mu\text{g/g weight}$)					(%)
生鶏卵	0.053	8	0.031	15	5.3
ホットケーキ	0.020	8	0.011	14	5.7
Fat ベース濃度 ($\mu\text{g/g fat}$) ^{b)}					
生鶏卵	1.01	11	0.59	19	
ホットケーキ	0.35	16	0.20	17	
ホットケーキ脂肪補正 ^{b)}	1.08	41	0.61	42	2.1

^{a)} 重量ベース濃度 ($\mu\text{g/g weight}$) で表示, n=5; RSD: 相対標準偏差

^{b)} 2-DCB および 2-TCB 濃度をバターや牛乳の脂肪を差し引いた脂肪棒度で表示.

は減少しなかったが, 150 , 60 分間の加熱で半分以下になり, 200 ではノイズピークと区別できなくなった。100 では牛脂成分の分解はなかったが, 150 では少し認められ, 200 ではかなりの夾雑ピークが検出された。恐らく 200 付近になると, 脂肪酸を含めて多くの成分が分解し, 構造の近い 2-DCB や 2-TCB も分解するのではないかと考えられる。

100 程度までは 2-DCB および 2-TCB が安定なこと, 調理により表面温度は高温になっても内部温度は 100 超えなかったこと, 加熱調理後もクロマトグラム上に妨害成分が検出されなかったことなどから, 一般的な加熱調理では, 照射した食肉類を調理後も 2-DCB および 2-TCB を指標とした照射履歴の検知は可能と考えられる。

保存後の照射履歴検知

照射食品の検知では, 照射直後よりも消費されるまでの流通課程でも検知可能であることが重要である。食肉類は冷凍すれば長期保存が可能なので, 現実には照射直後よりも一定期間保存後の検知可否が重要である。そこで 1 年間保存しても 2-DCB および 2-TCB を検出できるか確認した ¹⁴⁾。

照射生肉類の冷凍保存

図 3 に示した 線 を照射した生食肉類の中で A ~ 5kGy を照射した試料を, -20 で 1 年間冷凍保存した時の 2-DCB および 2-TCB 濃度を, 照射直後と比較した。冷凍保存しても水分の減少があり, 重量ベースで表示すると誤差の原因になりやすいので,

濃度は FAT ベースを用いた。

その結果一部例外もあるが, 1 年の保存では 2-DCB, 2-TCB とともに大幅な濃度の減少はなく, 保存後も照射履歴の検知は可能であった。ほとんど試料中の 2-DCB の減少は 30% 以下であった。2-TCB の場合は, 2-DCB よりも減少が少なく, 減少率は最大で約 20% であった。

材料を照射した調理済み食品の冷凍保存

生の食肉類だけでなく先に示した空揚げやホットケーキは, 調理済み食品が冷凍食品として流通している。通常の冷凍食品の賞味期限が製造後 1 年間となっているので ¹⁵⁾, 加熱調理した試料の冷凍保存期間を 1 年とし, 照射された原材料を使った冷凍食品の流通过程での照射検知を検証した。

表 4 に示した鶏肉空揚げを冷凍保存し, 6 ヶ月および 1 年後の 2-DCB と 2-TCB を測定した (表 6)。6 ヶ月冷凍保存で, 2-DCB は 24% 減少し, 2-TCB は 20% 減少した。1 年の冷凍保存では 2-DCB は 46%, 2-TCB は 32% 減少した。保存期間が長くなるほど減少しているが, 十分測定できる濃度であり, 照射履歴の検知は可能であった。

同様に表 5 に示したホットケーキを冷凍保存し, 7 ヶ月および一年後の 2-DCB と 2-TCB を測定した。2-DCB は 7 ヶ月で 17%, 1 年で 32% 減少し, 2-TCB は同時期にそれぞれ 23%, 53% 減少した。調理後の冷凍保存で保存期間が長くなるほど, 2-DCB と 2-TCB が減少したが, 十分測定できる濃度であり, 照射履歴の検知は可能であった。生の食肉では 1 年の冷凍保存後も顕著な減少がなかったが, 調理済み食

表6 照射材料を使った調理済み食品を冷凍保存後の2-DCB および2-TCB 濃度の変化

試料	2-DCB ^{a)}			2-TDCB ^{a)}		
	平均 ($\mu\text{g/g fat}$)	SD	減少率 (%)	平均 ($\mu\text{g/g fat}$)	SD	減少率 (%)
空揚げ						
直後	0.41	0.11		0.19	0.04	
6ヶ月後	0.31	0.11	24	0.15	0.04	20
1年後	0.22	0.01	46	0.13	0.01	32
ホットケーキ						
調理直後	0.35	0.06		0.20	0.03	
7ヶ月後	0.29	0.07	17	0.15	0.04	23
1年後	0.24	0.05	32	0.09	0.03	53

^{a)} 平均; n=5, SD: 標準偏差

品では傾向が異なった。加熱調理により水分が減少するが、減った水の代わりに空気が入っている。試料に入り込んだ空気(酸素)の酸化作用により2-DCB および2-TCBの減少が速まる可能性も考えられる。

2-DCBや2-TCBの分析値から試料の照射線量を推定する例があるが¹⁶⁾、調理済み食品に関しては冷凍保存中に明らかに両化合物が減少したことから、2-DCBや2-TCBの分析値から照射線量を推定することには問題があると考えられる。

簡便分析法の取り組み

2-アルキルシクロブタノンの分析法は筆者らの方法を含めて、抽出に特殊な機器を使用するかソックスレー法のような長時間を要する方法である。最近Tewfikは非常に簡便な方法を提唱している¹⁷⁾。乳鉢中で混合した試料と無水硫酸ナトリウムの混合物を分析ロートに入れ、n-ヘキサン:ヘプタン(9+1)混液を加えて振とうして抽出液を得、それを20%含水フロリジル層に負荷する。溶出液を濃縮後、内部標準物質を加えて試験液とし、GC/MSで測定する。試験液調製に要する時間は1検体当たり60~90分である。線を照射した鶏肉や鶏卵の分析例では、1kGy照射した鶏肉から2-DCBを検出し、5kGyまでの線量範囲では、直線的な2-DCB生成を示している。彼の示した手法は大がかりな装置を使用せず、迅速であるだけでなく溶媒使用量も少ないので、今後多くの食品での適用性が検討されれば、新しい分析法として注目されるかもしれない。また、2-アルキルシクロブタノンの測定に使用される

GC/MSについても、最近選択性や検出感度により優れたGC/MSが普及しつつある。測定系の感度や選択性が上がれば、甲殻類など脂肪含有量の少ない試料においても2-アルキルシクロブタノンを照射の検知指標として適用できる可能性が高いと思われる。

文 献

- 1) 原子力委員会：“食品照射専門部会報告書「食品への放射線照射について」”。
http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo2006/kettei/kettei061003_2.pdf.
- 2) European Committee for Standardization. Foodstuffs-Detection of irradiated food containing fat- Gas chromatographic/mass spectrometric analysis of 2-alkylcyclobutanones EN1785. European Committee for Standardization, Brussels, (2003).
- 3) Stevenson, M. H. et al. Irradiation detection. *Nature*, **344**, p.202-203 (1990).
- 4) Stewart, E. M. et al. Isolation of lipid and 2-alkylcyclobutanones from irradiated foods by supercritical fluid extraction. *J. AOAC, Int.*, **84**, p.976-986 (2001).
- 5) Rao, C. V. Do irradiated foods cause or promote colon cancer? *Nutr Cancer*, **46**, p.107-109 (2003).
- 6) Horvatovich, P. et al. Determination of 2-alkylcyclobutanones with electronic impact and chemical ionization gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS) in irradiated foods. *J.*

- Agric. Food Chem.*, **54**, p.1990-1996 (2006).
- 7) Erney, D. R. et al. Explanation of the matrix-induced chromatographic response enhancement of organophosphorus pesticides during open tubular column gas chromatography with splitless or hot on-column injection and flame photometric detection. *J. Chromatogr.*, **638**, p.57-63 (1993).
- 8) Stevenson, M. H. "Validation of the cyclobutanone protocol for detection of irradiated lipid containing foods by interlaboratory trials". Detection methods for irradiated foods Current status. McMurray, C.H. et al. Eds. Cambridge, Royal Society of Chemistry, p.269-284 (1996).
- 9) Gadgil, P. et al. 2-alkylcyclobutanones as irradiation dose indicators in irradiated ground beef patties. *J. Agric. Food Chem.*, **50**, p.5746-5750 (2002).
- 10) Obana, H. et al. Analysis of 2-alkylcyclobutanones with accelerated solvent extraction to detect irradiated meat and fish. *J. Agric. Food Chem.*, **53**, p.6603-6608 (2005).
- 11) Stevenson, M. H. Identification of irradiated foods. *Food Technol.*, **48**, p.141-144 (1994).
- 12) Obana, H. et al. Effects of temperature during Irradiation on the production of 2-alkylcyclobutanones in beef. *J. Hlth. Sci.*, **53**, p.215-219 (2007).
- 13) Obana, H. et al. Detection of 2-alkylcyclobutanones in irradiated meat, poultry and egg after cooking. *J. Hlth. Sci.*, **52**, p.375-382 (2006).
- 14) Obana, H. et al. Detection of irradiated meat, fish and their products by measuring 2-alkylcyclobutanones levels after frozen storage. *Shokuhin Eiseigaku Zasshi*, **48**, p.203-206 (2007).
- 15) 日本冷凍食品協会 . http://www.reishokukyo.or.jp/del-sft/qanda/qa_07.html.
- 16) Victoria, A. et al. Detection of 2-dodecylcyclobutanone in irradiation-sterilized chicken meat stored for several years. *Int. J. Food Sci. Technol.*, **27**, p.691-696 (1992).
- 17) Tewfik, I. A rapid direct solvent extraction method for the extraction of cyclobutanones from irradiated chicken and liquid whole egg. *Int. J. Food Sci. Technol.*, p.108-113 (2008).

(2008年6月12日受理)