

厚生労働省科学研究費補助金（食品の安全確保推進研究事業）
「核酸等温増幅反応を用いた食品遺伝子検査の新規プラットフォーム開発に係る研究」
令和5年度 分担研究報告書

核酸等温増幅反応技術に関する需要調査と DNA 簡易抽出法の適用性の検討

研究分担者 曾我慶介 国立医薬品食品衛生研究所 生化学部 主任研究官

研究要旨：近年の食品種の多様化、世界各国からの食品の輸入量及びその安全性確保需要の増加に伴い、我が国における食品遺伝子検査数も増すことが見込まれる。現在の食品遺伝子検査はリアルタイム PCR がゴールドスタンダードになっているが、機械が高価かつ時間がかかることが問題視されていた。一方で、他分野では遺伝子検出技術として様々な等温核酸増幅反応の有用性が報告されている。特に、Loop-mediated isothermal amplification (LAMP) 法や Recombinase Polymerase Amplification (RPA) 法は等温でかつ数十分で反応が完了することから、定性検査法として医療分野では普及が進んでいる。しかし、国内の食品遺伝子検査としては検討が進んでいないのが実情である。そこで本研究は、LAMP や RPA 等の核酸等温増幅反応の現状の情報収集を行い、その中から実用的な方法を選択して、サンプリングから結果の解析までの流れを鑑みて食品行政に係る遺伝子試験としての適用性を評価し、試験法として開発することを目的とする。

そこで、本研究では、公的検査機関の遺伝子組換え食品、アレルゲン、自然毒の遺伝子検査担当者を対象とした等温核酸増幅反応の需要調査を実施し、核酸等温増幅反応のメリット、オンサイト検査、現在の課題に関する情報収集を行った。その結果、通常の検査では迅速性が必要な半面、通知試験法と同等の感度・精度を有しなければ利用しにくいという意見が大多数であった。また、加工食品からの前処理時にカラムが詰まる等の現行通知試験法の問題点も多数意見があり、粗抽出 DNA で適用可能な方法も需要が見込まれた。需要調査を基に、PCR と同等の性能を持つ等温核酸増幅反応を目指すと共に、緊急時に利用可能な迅速に結果がわかる検査法等の開発を目指す。

とうもろこし加工食品をモデルに、粗抽出 DNA の適用性を評価したところ、リアルタイム PCR、LAMP と比較して、RPA が最も食品マトリクスの適用範囲が広い結果が得られた。さらに、PCR が 2 時間かかるのに対し、同様の定性検査結果が 30 分未満でわかることから、DNA 簡易抽出から実施は検査の大幅の迅速化が見込まれる。次年度はラテラルフローアッセイへの RPA の適用性を評価し、検査法開発を検討する。

A. 研究目的

世界の食品安全性検査市場は 2022 年に 211 億米ドルと推定され、2027 年には 311 億米ドルに達し、8.1%の年次成長率になると予測されている（MarketsandMarkets 社、2022）。近年では、「培養肉」等の新規技術で開発された食品種が増えるとともに、世界の食品取引及び規制遵守を満たすための安全性確保需要も増加することから、結果的に食中毒等のリスクを低減し、かつ食品表示不

正を防止するために世界各国で食品検査の需要が増すと考えられる。

食品行政にかかる遺伝子検査（遺伝子組換え食品、アレルゲン、微生物）はリアルタイム Polymerase Chain Reaction (PCR) がゴールドスタンダードになっている。その理由として、特異性が高いことおよび高感度なことが挙げられる。しかし、PCR はサーマルサイクラーを用いて特定温度の多段階ステップを複数サイクル繰り返す必要があるため、高価な機械が必要なこと及び結果を

得るまでに数時間がかかることが課題であった。従って、今後はリアルタイム PCR と同等の特異性・感度・精度を有しつつ、より簡便で検査速度を向上させた試験法の開発が求められる。

近年、遺伝子検出技術として様々な等温核酸増幅反応の有用性が報告されている。Loop-mediated isothermal amplification (LAMP) 法は、60-65℃の等温反応であり、インキュベーション時間も数十分と短時間で済むことから、世界的にも近年の Covid-19 検査などの感染症診断の分野で適用され始めており、我々も LAMP 法を用いた DNA 粗抽出法やラテラルフロー法の検討を進めている (Takabatake et al, 2018., Narushima et al, 2020)。

Recombinase Polymerase Amplification (RPA) 法は 20-45℃の反応温度でインキュベーション時間が最短 10 分未満という利便性を備えた核酸増幅であり、蛍光プローブで検出する方法に加え、CRISPR-Cas システムを応用した DNA endonuclease-targeted CRISPR trans reporter (DETECTR) (Chen et al, 2018) 等は感染症診断分野での高感度検査法として特に注目されている。一般に等温核酸増幅反応では、PCR と比べて DNA ポリメラーゼが夾雑物に強いという特徴を有することから、DNA 抽出も簡便な方法に代替できうる。しかしながら、食品行政に関わる公定検査法としての検討はあまり進んでいないのが実情である。

昨年度までの検討で、文献調査で有力視された RPA による検出法を検討し、温度管理及び反応時間において、PCR より有用なことが確認された。

本年度は、LAMP や RPA 等の核酸等温増幅反応を用いた遺伝子検査の需要調査を、国内食品検疫所及び地方衛生研究所を対象に実施する。

B. 研究方法

等温増幅反応検査需要調査

地方衛生研究所及び検疫所を対象とし、任意で回答可能なアンケート型の調査を実施した。検査項目としては、遺伝子検査実施例のある遺伝子組

換え (GM) 食品検査、アレルゲン検査、自然毒検査別に、主に下記の 5 つの点に関して①核酸の抽出・精製法、②PCR との代替可能性、③オンサイト検査需要、④マルチプレックス検査需要、⑤その他困りごとに関して聞き取りを行った。

試料

とうもろこし穀粒をミルサーで粉砕し、その粉末試料を 14 mg 測り取り、DNA 抽出用試料とした。とうもろこし加工食品モデルとして、市販のコーングリッツ 3 種およびスナック菓子 2 種を購入した。

DNA 簡易抽出法

GenCheck® DNA Extraction Reagent (FASMAC 社) を用い、取扱説明書通りに実施した。試料に GenCheck® DNA Extraction Reagent を 140 µL 加え、ボルテックスで攪拌後、100℃で 10 分間加熱後、氷上で 1 分間冷却し、15,000×g、1 分間遠心後、上清を DNA 抽出液試料とした。

Template Prepper for DNA (ニッポンジーン社) を用い、取扱説明書通りに実施した。Template Prepper A 液を 70 µL 加えた後、室温で 5 分懸濁し、Template Prepper B 液を 70 µL 加え、100℃で 5 分間加熱した。その後、氷上で 2 分間冷却し、15,000×g、5 分間遠心後、上清を DNA 抽出液試料とした。

成島らの方法 (Narushima et al, 2020) を用い、アルカリ試薬 (25 mM NaOH、0.2 mM EDTA) を 70 µL 加え、10 秒間ボルテックスで攪拌後、中和試薬 (40 mM Tris-HCl, pH 5.0) を 70 µL 加え、軽く攪拌後 1 分間静置した。100℃で加熱 1 分間の有無、静置 (氷上、常温) 1 分後、15,000×g、1 分間遠心し、上清を DNA 抽出液試料とした。

RPA 法

昨年度検討したとうもろこし内在性遺伝子スターチ合成酵素 IIb (SSIIB) RPA 用プライマー及びプ

ローブを用いた（表1）。TwistAmp exo（TwistDx社）に含まれる試薬を用い、下記の通りに反応溶液を調製した。

Rehydration Buffer	29.6 µL
MQ	9.2 µL
Primer-F (10 µM)	2.0 µL (400 nM)
Primer-R (10 µM)	2.0 µL (400 nM)
Exo probe (10 µM)	0.8 µL (250 nM)

上記組成で PCR チューブ内に調製・混和し、2 個の PCR チューブにそれぞれ 21,8 µL ずつ分注した。分注した各チューブに DNA 抽出液を 2.0 µL 加えた後、蓋に MgOAc (280 mM) 1.2 µL を滴下し、遠心で落とすことで混合し、反応を開始した。等温増幅蛍光測定装置 GeneLyzer FIII（Canon メディカルシステムズ社）を用いて 37℃で 30 分間保温し、蛍光シグナルをリアルタイムで検出した。

LAMP 法

とうもろこしの内在性遺伝子 SSIIb 用プライマーは、PrimerExplorer（栄研化学社）を用いて作成された。配列を表1に示した。ポリメラーゼはニッポンジーン社製の LAMP MASTER を用いた。

・10×LAMP プライマー Mix

50 µM FIP	31 µL	(16 µM)
50 µM BIP	31 µL	(16 µM)
50 µM F3	4 µL	(2 µM)
50 µM B3	4 µL	(2 µM)
50 µM LoopP F	16 µL	(8 µM)
50 µM LoopP B	16 µL	(8 µM)
1M Tris-HCl(pH8.0)	1 µL	(10 mM)
1M DTT	1 µL	(1 mM)
Total	100 µL	

・反応溶液調製（1 ウェル当たり）

DNA 抽出液	2 µL
2×LAMP MASTER	12.5 µL
10×LAMP プライマー Mix	2.5 µL
10×インターカラータ Mix	2.5 µL
MQ	5.5 µL

Total	25 µL
-------	-------

反応は等温増幅蛍光測定装置 GeneLyzer FIIIを用いて 65℃で 30 分間保温し、蛍光シグナルをリアルタイムで検出した。融解曲線分析では、1 秒当たり 0.05℃のスピードで 98℃から 80℃まで温度を下降させ、蛍光シグナルデータを取得した。

リアルタイム PCR 法

とうもろこしの内在性遺伝子 SSIIb 用プライマーは消費者庁通知試験法「安全性審査済みの遺伝子組換え食品の検査方法」で採用されているものを用いた（表1）。

・反応溶液調製（1 ウェル当たり）

FastStartProbeMaster	12.5 µL
Primer-F (50 µM)	0.4 µL (800 nM)
Primer-R (50 µM)	0.4 µL (800 nM)
Probe (10 µM)	0.25 µL (100 nM)
DNA 抽出液	2 µL
MQ	9.45 µL

Total	25 µL
-------	-------

反応では 50℃2 分、95℃10 分で加熱後、95℃30 秒→59℃1 分のサイクルを 45 サイクル繰り返した。PCR は LightCycler480（ロシュ・ダイアグノスティクス社）を用いて実施し、蛍光シグナルをリアルタイムで検出した。

C. 研究結果

等温増幅反応検査需要調査

(GM 食品・アレルゲン)

GM 食品とアレルゲンの検査は、試料サンプリングから DNA を抽出する行程が共通する部分が多いため、同項で述べる。地方衛研からは、GM 食品 31 機関（回答 35 件）、アレルゲン 32 機関（回答 43 件）からの回答を得た。検疫所からは GM 食品 2 機関（回答 4 件）からの回答を得た。以上を合算して集計した。

DNA 抽出法に対する不便さを訴える回答が GM 検査担当からは 46%、アレルゲン担当からは 40%

に上った（図1A,B）。DNA抽出に関して寄せられた意見を表にまとめた（図1）。特に意見が多かったのは、現在の公定法に記載されているカラムを用いたDNA抽出法に関するもので、加工食品等に適用した際にカラムが詰まってしまい時間がかかり作業が煩雑になる点であった（図1C）。また、コストがかかる点も問題点として挙げられた（図1C）。

20分前後で反応が終了する核酸等温増幅反応による地方衛研の業務改善可能性に関しては、「改善される」と回答されたのは40%に留まり、「不明」あるいは「改善されない」と回答されたのは60%に上った（図2A）。核酸等温増幅反応の試験導入に関する意見を表にまとめた（図2B）。迅速性は有用とされる半面、PCRの反応時間（2時間）は別作業に時間を取れること、迅速性よりも正確性が問われるためPCRと同等の感度・特異性を有するか現時点で不明なこと、装置・実施経験が無く判断ができないこと等が「不明」または「改善されない」という回答が多い原因として挙げられた。また、新しく標準手順書を作成する手間がある等の新技術導入への抵抗を示す回答も見られた。迅速な点でのメリットが想定されても、その他の懸念点が払拭されない限りは総合的に見た場合のデメリットが大きいと考えられるようである。地方衛研や検疫所では公定法に準じた業務を実施することから、感度、精度の観点で公定法との同等性が担保されない場合は導入メリットが低いとされる傾向にあった。

オンサイト需要に関しては、地方衛研の業務では「需要無し」あるいは「わからない」と回答した割合が94%に上った（図3A）。一部の意見で、保健所との連携業務では嘔吐物や加工食品からのアレルゲンのオンサイト検査や、製造業者の自主点検や収去前の簡易検査等のニーズは有りうると回答された（図3B）。

マルチプレックス検査の需要に関しては、28%の回答者から需要があり、その内約はアレルゲン

検査の特定原材料8種の同時検査需要が高く、6割に上り、続いてGM大豆検査、GMパレイショ検査と続いた（図4）。

困っていることの有無を問うアンケートでは、困っていることがあると答えた回答は全体の54%に上った（図5）。加工度の高い食品に対する適切な前処理法が確立されていない点や、キットや試薬の高騰が主な問題として挙げられた（図5）。地方衛研では、理化学分析の中でも遺伝子検査の割合が低いところもあり、技術習得やその継承、および予算確保に関する問題点も確認された。また、検査法の通知されたタイミングにより、従来PCRからリアルタイムPCR、核酸クロマト技術まで試験項目によって、技術的な差が見られ、DNA抽出キット、PCR試薬等も統一されていない点で指摘があり、全体の通知試験法のバランスを考慮した見直しの必要性について問われた。

等温増幅反応検査需要調査（自然毒）

地方衛研からは24機関（回答28件）からの回答を得た。

自然毒の遺伝子検査では国で定める公定法が存在しないため、各地方衛生研究所が各地域の需要に応じて検査を実施している。DNA抽出に対する不便さは43%を占めた（図6）。オンサイト検査需要に関しては「需要あり」と回答したのは14%であった（図7）。検査対象が地域特有なことも特徴的であり、ツキヨタケ、トリカブト、ホンシメジ等が挙げられた（図7）。マルチプレックス検査の需要に関しては「需要あり」と回答したのは18%に留まり、「無し」と回答されたのは60%弱に上った（図7）。またその検査対象もクワイズモ等の地域特有な植物が挙げられた（図7）。国立医薬品食品衛生研究所生化学部の公開している植物性自然毒データベース [MushPlant \(https://mushplant.go.jp/\)](https://mushplant.go.jp/) の存在を知っていると回答したのは全体の54%であった（図8）。自然毒

データベースへの意見として、各種データの拡充が挙げられた（図 8）。

等温増幅反応検査需要調査（その他）

上記に挙げられた検査対象として、寄生虫、フグ等の有毒魚の判別等も実施されているが、データ処理の煩雑さから同定までが困難という意見が見られた（図 8）。

その他要望について

GM 食品、アレルゲン、自然毒の遺伝子検査に関する総合的な要望を表に示した（表 2）。遺伝子検査も検査頻度が低いことから、技術研修会の要望が意外に多いことがわかる。また、通知試験法に関する情報開示や改善要望が多かった。核酸等温増幅反応のような簡易方法の開発要望も含まれていた。

RPA 法、LAMP 法、リアルタイム PCR の簡易 DNA 抽出法を用いた溶出液での比較

今回、現在の遺伝子検査で最も利用されているリアルタイム PCR と核酸等温増幅反応の LAMP 及び RPA によって、粗抽出 DNA からの検出に関して、とうもろこし及びその加工食品を用いて検討した。

・とうもろこし粉末を試料とした場合

RPA 法では、GenCheck 法で 2 回抽出した DNA 液の一回と陰性コントロールとして用いた超純水では増幅が確認されなかったが、その他のサンプルからは、反応開始から 10～16 分間で増幅が確認された（図 9）。

LAMP 法では、市販の簡易抽出試薬 2 種類を用いて抽出された DNA はいずれも反応開始 11～12 分台で増幅が確認された（図 10）。蛍光強度は RPA より強い傾向であった。一方で、成島らの方法を用いた場合は、早い時間では増幅が確認されなかったが、加熱無しの場合で 20 分後に増幅曲線の立ち上がりが確認された（図 10）。

リアルタイム PCR 法では、超純水と成島らの方法を用いた場合は増幅が確認されなかったが、市販の簡易抽出試薬 2 種類を用いて抽出された DNA では、Cq 値 25～28 で増幅が確認された（図 11）。

・コーングリッツを試料とした場合

コーングリッツは乾燥させたとうもろこしの皮と胚芽を取り除いた胚乳部分のみを粒状に粉碎したものである。油などを用いた調理による加工でないことから加工度は低い加工食品のモデルとして用いた。

RPA 法では、全 3 製品で GenCheck 及び Template Prepper を用いて抽出された DNA 溶液からは 10～12 分で増幅が確認された。成島らの方法では熱処理を行わない方法を用いて抽出された DNA 溶液からは 12～16 分で増幅が確認された（図 12）。

LAMP 法では、全 3 製品で GenCheck 及び Template Prepper を用いて抽出された DNA 溶液からは 11～13 分で増幅が確認されたが、成島らの方法（熱処理を行わない）を用いて抽出された DNA 溶液からは増幅が確認されなかった（図 13）。

リアルタイム PCR では、LAMP 法同様に、全 3 製品で GenCheck 及び Template Prepper を用いて抽出された DNA 溶液からは Cq 値 27～30 で増幅が確認されたが、成島らの方法（熱処理を行わない）を用いて抽出された DNA 溶液からは増幅が確認されなかった（図 15）。

・スナック菓子を試料とした場合

スナック菓子は食用油で揚げられており、加工度が高いとうもろこし加工食品モデルとして用いた。

RPA 法では、スナック菓子 A では全ての DNA 抽出法で増幅が確認され、GenCheck を用いて抽出された DNA 溶液からは 15 分後、成島らの方法（熱処理を行わない）を用いて抽出された DNA 溶液からは 16 分後、Template Prepper を用いて抽出された DNA 溶液からは 20 分以降に増幅が確認さ

れた（図 1 4）。一方、スナック菓子 B からは全ての抽出法で増幅が確認されなかった（図 1 4）。LAMP 法では、RPA 法同様にスナック菓子 A では全ての DNA 抽出法で得られた DNA 溶液から増幅が確認され（13～18 分後）たが、スナック菓子 B からは全ての抽出法で増幅が確認されなかった（図 1 4）。

リアルタイム PCR では、スナック菓子 A では GenCheck を用いて抽出された DNA 溶液からは Cq 値 31 台、成島らの方法（熱処理を行わない）を用いて抽出された DNA 溶液からは Cq 値 33 台の増幅が確認されたが、Template Prepper を用いて抽出された DNA 溶液からは増幅が確認されなかった。スナック菓子 B からは全ての抽出法で増幅が確認されなかった（図 1 5）。

D. 考察

1. 核酸等温増幅反応需要調査

DNA 抽出について

DNA 抽出に関して、各検査機関で困っているところが多く、特に公定法で記載されているキット類では加工食品への適用性が低い点で問題視されている点が多くみられた。加工食品では PCR の阻害物質やキットのカラムが詰まってしまう要因ともなる油などの不純物が多く含まれるため、より正確な DNA 抽出法の開発が期待されている。現在検討を進める核酸等温増幅反応で用いられる *Bacillus stearothermophilus* や *Bacillus subtilis* ファージ phi29(φ29)由来の鎖置換活性を有する DNA ポリメラーゼは夾雑物に強いことが知られており、粗抽出 DNA を用いた増幅では従来の PCR による増幅より利点があり、核酸等温増幅法を導入することで時間短縮が見込める可能性がある。

核酸等温増幅反応に対する期待

40%以上の業務が改善されたとした回答者が核酸等温増幅反応に期待するのは多くの場合は迅速性であった。しかし、地方衛研などの担当者で未

経験な場合や、感度、精度がまだ明らかになっていない点で導入メリットはわからないと判断されることが多かった。地方衛研では PCR の反応時間は、別の作業に充てられることから、そこまで迅速性の需要が無いことや、別試験を行うとなれば新たに標準手順書を作成する労力が新たに発生すること等、新しい手法に対する不安等も障壁となっていると考えられた。核酸等温増幅反応を実際の試験で使われるようにするには、PCR との性能比較データを示し、同等性を確認することやその手順書を示す必要があると考えられた。

オンサイト検査需要

地方衛研や検疫所の検査では GM 食品やアレルギーのオンサイト検査の需要がほとんどないことがわかった。一部保健所と連携している部署では需要があるが、オンサイト検査が必要な場所等を再度検討する必要がある。例えば事業所での自主検査等まで利用者を拡大する場合は需要があるかもしれない。一方、地方によっては、自然毒に関するオンサイト検査需要が見られたことから、トリカブトやツキヨタケ等の有毒植物やキノコの検査法開発は有用と考えられる。近年の厚生労働科学研究「我が国で優先すべき生物学的ハザードの特定と管理措置に関する研究」（平成 28～29 年度）及び「植物性自然毒による食中毒対策の基盤整備のための研究」（平成 30 年～令和 2 年度）では、ツキヨタケ、クワウラベニタケ、スイセン、バイケイソウ、イヌサフラン、チョウセンアサガオ及びトリカブトに関しては LAMP 法が既に開発されていることから（Sugano et al, 2022, 厚生労働科学研究費報告書）、これらを応用することで実現することが期待される。

マルチプレックス検査需要

現在、公定法では遺伝子のマルチプレックス試験を採用しているものは少ない。それを加味して、需要調査を行ったところ、アレルギーとして挙げ

られる特定原材料 8 品目及び GM 大豆の 3 標的、GM とうもろこし 2 標的、キノコなどの有毒植物の一斉検査が挙げられた。また、地方ではクワイズモ等の食中毒事例が多いものも需要がある。しかし、PCR としても 8 品目同時は世界的に見ても例がなく、多くても 4 標的までであることから、まずは 2 標的から確認していく必要があると考えられる。

自然毒データベースに関して

2024 年 2 月に植物性自然毒データベース MsuhPlant はアップデートされた。しかし、まだ知らない試験機関が半分以上と多く、プライマーの情報等も少ないことから、今後の周知活動や、開発された検査法の収載等、定期的なアップデートも必要である。

その他

有毒魚の種判別法に関しても、標的配列の相同性解析のみでは困難な場合があることから、今後より精度の高い検査法へと改良する必要がある。

今回の調査で、一部の地方衛研等の理化学を専門とした検査者であっても、遺伝子検査の実施件数が少ないことから、分析技術習得、手技伝達や試薬在庫管理の点で多くの悩みを抱えていることが判明し、遺伝子検査技術研修会等も要望が多かった。また、通知試験法内に収載される検査技術バランスの悪化等、過去に収載された試験法が近況を鑑みたアップデートがなされず放置されていることに対する不満等もみられた。公定法としても他の化学物質分析と異なり、遺伝子検査の場合は試薬・機器等が指定されているケースが多いことから、疑問に思われているようであった。しかし、PCR は使用するポリメラーゼによって、結果が異なることもあり、頑健性を担保することは難しいため、暫くはこの現行の体制が続くのではないかと見られる。

今回のアンケート調査対象には公的な機関のみの需要調査になったが、民間の事業所に需要調査を行うと利便性について違った所見が得られていたかもしれない。公的機関では基本的には通知試験法を採用し、事前に立てた計画に基づいて検査を実施していることから、突発的な対応として核酸等温増幅反応の迅速性が活きる場面が少ないようにも考えられた。

DNA 簡易抽出法を用いた検出

とうもろこし粉末から簡易抽出法により得た DNA を標的に検出を試みたところ、成島らの方法によって抽出された DNA 溶液において、リアルタイム PCR、LAMP では検出できなかったが、RPA では検出された。また、コーングリッツでは、加熱を行わない成島らの方法では RPA でのみ増幅が確認された。スナック菓子では、2 つの製品のうち、1 つの製品ではどの方法でも検出されなかったが、もう 1 つの製品で RPA、LAMP では 3 種類の簡易抽出法全てで、リアルタイム PCR では GenCheck と成島らの方法で増幅が確認された。これらの結果より、RPA が食品マトリクスに最も強い核酸等温増幅系であること示唆された。しかし、RPA は蛍光シグナルの強度が LAMP やリアルタイム PCR より弱かったことから、検出方法に関しては今後の検討課題といえる。

加工度の低い食品であれば、市販の粗抽出 DNA 試薬を用いて従来法でも検出可能であったが、PCR の 2 時間と比較すると、LAMP や RPA を用いて 30 分弱で検査結果が判明することから、核酸等温増幅反応の迅速性に関する有用性も確認された。

E. 結論

核酸等温増幅反応の需要調査では、公的機関を対象に行ったことから、通知試験法に対する問題点を確認することができた。核酸等温増幅反応の迅速性の観点から需要は高いことが伺えたが、従

来法と同等であることを示すことができないと導入は難しいとも考えられた。オンサイト検査、マルチプレックス化はポイントによっては需要があるため、本研究で今後性能及びその有効性を示していくことが重要である。

粗抽出 DNA 溶液の適用性については、市販の簡易抽出試薬と核酸等温増幅反応を組み合わせ PCR と比べて RPA 及び LAMP は迅速に結果が得られることが実証された。さらに RPA は食品マトリクスへの適用範囲が広いことが示唆された。次年度はラテラルフロー法への適用性を評価する予定である。

F. 参考文献

Chen JS, Ma E, Harrington LB, Da Costa M, Tian X, Palefsky JM, Doudna JA. CRISPR-Cas12a target binding unleashes indiscriminate single-stranded DNase activity. *Science*. 2018; 360(6387):436-439.

MarketsandMarkets, *Food Safety Testing Market, Forecast to 2027*. 2022.

Narushima J, Kimata S, Soga K, Sugano Y, Kishine M, Takabatake R, Mano J, Kitta K, Kanamaru S, Shirakawa N, Kondo K, Nakamura K. Rapid DNA template preparation directly from a rice sample without purification for loop-mediated isothermal amplification (LAMP) of rice genes. *Biosci Biotechnol Biochem*. 2020; 84(4):670-677.

Sugano Y, Sakata K, Nakamura K, Hosokawa A, Kouguchi H, Suzuki T, Kondo K. Loop-mediated isothermal amplification (LAMP) for rapid and easy identification of *Omphalotus japonicus*. *Food Chem (Oxf)*. 2022; 5:100115.

Takabatake R, Kagiya Y, Minegishi Y, Futo S, Soga K, Nakamura K, Kondo K, Mano J, Kitta K. Rapid Screening Detection of Genetically Modified Crops by Loop-Mediated Isothermal Amplification with a Lateral Flow Dipstick. *J Agric Food Chem*, 2018, 66(29):7839-7845.

厚生労働科学研究費補助金「我が国で優先すべき生物学的ハザードの特定と管理措置に関する研究」H27-食品-一般-007（平成 27～29 年度）総合報告書

厚生労働科学研究費補助金「植物性自然毒による食中毒対策の基盤整備のための研究」H30-食品-一般-008（平成 30～令和 2 年度）総合報告書

消費者庁通知試験法「安全性審査済みの遺伝子組換え食品の検査方法」

G. 研究発表・業績

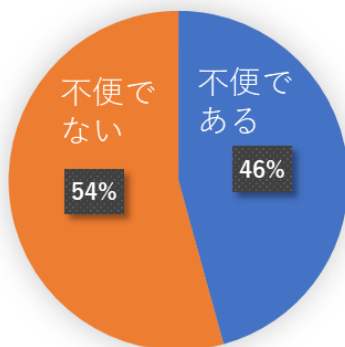
1. Nakayama T, Soga K. Simple and quick detection of extended-spectrum β -lactamase and carbapenemase-encoding genes using isothermal nucleic acid amplification techniques. *J Microorganism Control*, 2023; 28(4):145-152.

H. 知的財産権の出願・登録状況

該当なし

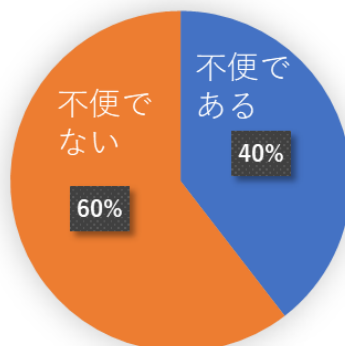
A

GM



B

アレルゲン



C

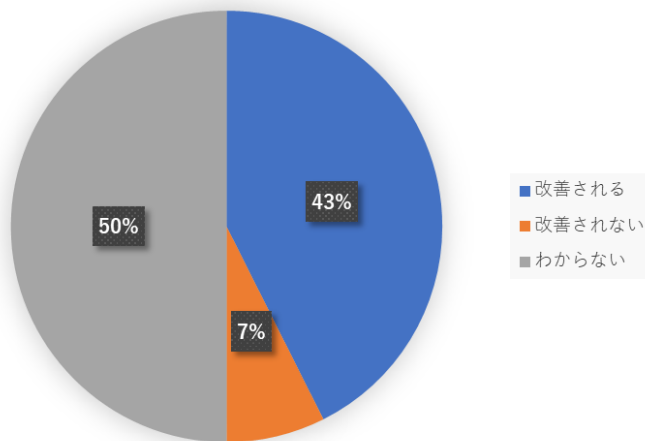
不便な理由	件数
抽出キットのカラムが詰まる (加工食品等)	10
操作が煩雑	5
コストが大きい	3
検査毎にキットが複数必要	3
DNA が取れないことがある	3
キットの使用期限が短い	2
時間がかかる	2
油が多いと困難	1
キット選択肢が少ない	1
50mL チューブでは遠心機の問題で多検体処理できない	1

図1 DNA抽出法に関する意見 (GM 食品・アレルゲン)

A) GM 食品検査の DNA 抽出における不便性アンケート結果、B) 食品中アレルゲン検査の DNA 抽出における不便性アンケート結果、C) 不便な理由

A

等温反応で業務が改善されるか



B

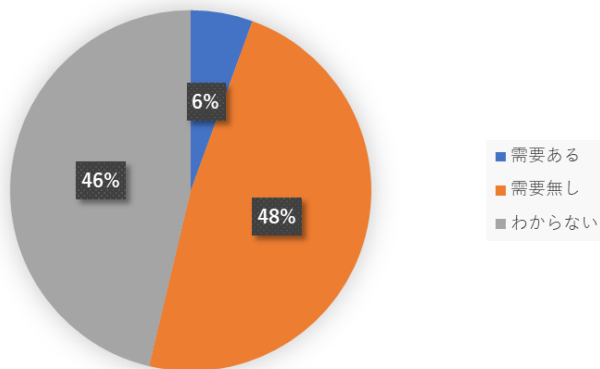
メリット	件数
迅速性（多検体可能）	22
電気泳動不要	3
DNA 抽出の操作性が良好になりそう	2
高価装置不要、コスト抑えられそう	1
ゾーニングしやすそう	1
デメリット	
反応時間の短縮は反応中の他の作業もあるのでメリットに感じない	1
正確性＞迅速性の場合使いにくい	1
LAMP 装置が無い	1
プライマー試薬が多い	1
新たに標準手順書等が必要	1
その他	
実施した経験が無く判断できない	6
PCR と同等の感度、特異性があれば良い	3
引継ぎしやすい方法がのぞましい	2

図2 核酸等温増幅反応に関する意見（GM 食品・アレルギー）

A) 核酸等温増幅反応の導入に関する調査、B) 意見内容

A

オンサイト需要
(GMO/アレルゲン)



B

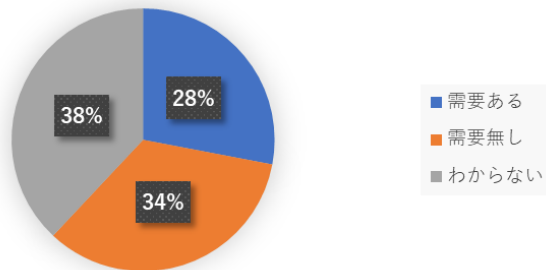
意見	件数
未表示のアレルゲンを早めに検知することは、アレルギー発症を事前に防ぐのに重要	1
保健所食品衛生監視時の GMO や特定原材料 8 品目等の現場簡易検査	1
十分な感度があるなら、GM 大豆の任意表示「遺伝子組換えでない」を確認するための簡易検査キットがあれば、製造業者などの自主点検や収去検査前の保健所での簡易検査といったニーズがありそう。(加工食品(豆腐など)でも検査可能なら使い勝手がよい)	1

図3 オンサイト検査需要に関する意見 (GM 食品・アレルゲン)

A) オンサイト検査需要に関するアンケート結果、B) オンサイト検査需要に関する意見

A

マルチプレックス需要 (GMO/アレルゲン)

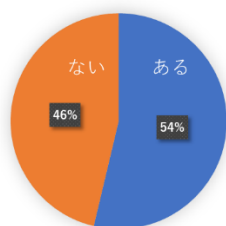


B

意見	件数
アレルゲン複数（動物&植物&特定原材料等）	5
特定原材料 8 品目	4
GM 大豆 3 標的、とうもろこし 2 標的（公定法）	4
GM バレイショ 検査	1

図4 マルチプレックス検査に関する意見（GM 食品・アレルゲン）
A) マルチプレックス需要アンケート結果、B) マルチプレックス検査需要意見

A 不便性
(GM・アレルゲン)



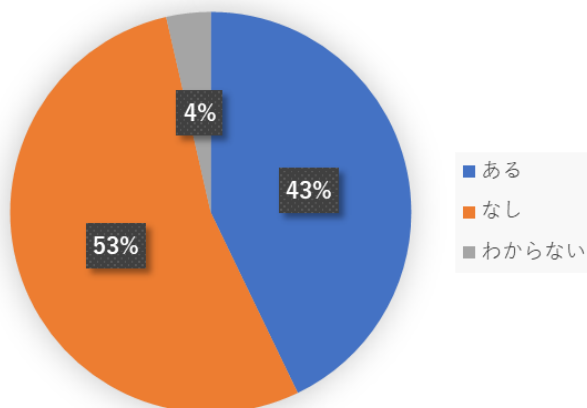
B

ジャンル	不便性	件数
実験手技	加工度の高い製品の適切な前処理法が確立されていない	7
	DNA 試料液を調製するまでの工程が煩雑、かつ PCR 測定時間が長い	4
	検査頻度が低い、手技に経験が必要	3
通知試験法	従来 PCR のものが存在しているためリアルタイム PCR にしてほしい。	3
	検査項目の標準プラスミド、陽性検体が販売されていない	2
	GM 食品検査の判定スキームが複雑で難解	2
	リアルタイム PCR が限定されており、最新機種が対応されていない	1
	GM 大豆の定量検査が、一回で3項目あり、労力とコストが増大した。	1
	試薬の成分がよくわからない	1
	同等性確認試験が膨大な時間と労力を要するため現実的でない	1
	実際は通知試験法に基づくサンプリングは困難	1
	公定法でキットが指定されているため、指定以外のキットで目的遺伝子が検出されても結果が使用できない	1
	DNA が十分とれても純度試験でアウトになる事が多い	1
	従来 PCR の目視判定が困難	1
コスト面	特定原材料の検査は ELISA で定量し、PCR で定性するが、例えば、コムギとオオムギが ELISA で陽性となる場合、PCR でコムギの定性を行っても、コムギの含有量が基準を超えるか確信をもてない	1
	安全性審査済 GM ばれいしょの検査法が通知されていない	1
	キット、試薬価格の高騰	5
	理化学の他の検査と比較して、必要試薬・キット種類が多く、管理が困難	4
その他	実施頻度が低いため、予算確保が困難	2
	検査機器の保守管理費、更新費が負担大	1
	講習会希望	2

図5 その他不便性 (GM 食品・アレルゲン)

A) 不便性の調査、B) 不便性の意見

A 検査の不便性（自然毒）



B

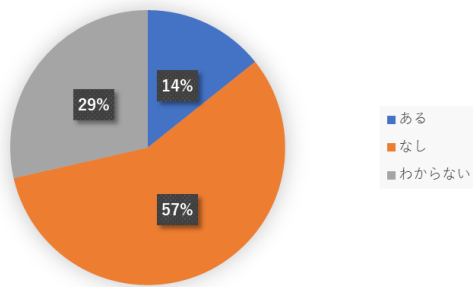
不便性	件数
食中毒事例は調理済の場合は多く、DNA が断片化していて抽出、検出が難しい	3
遺伝子解析の情報（プライマー情報、ITS 情報等）が少ない	2
理化学検査では機器分析担当が遺伝子検査を行うので不慣れ、技術継承が難しい	2
検査事例が少ないため、不測の事態に困りそう。試薬の管理（期限切れ多発）も困難	2
各種キノコ、植物毎のプライマーを整備することは非現実的	1
有毒植物、キノコの簡便なマルチプレックスの検出系が有用	1
遺伝子検査○、機器分析×の場合判断に困る	1
サンプリング時にコンタミしやすい	1
DNA 抽出時クロロホルムを使用する	1
DNA 抽出キットによって、収量が変わる検体の種類を問わずオールマイティに使えるものが求められる	1
陽性対照品（ポジコン）入手困難	1

図6 検査の不便さに関する意見調査（自然毒）

A) 不便性アンケート調査、B) 不便性意見

A

自然毒オンサイト需要

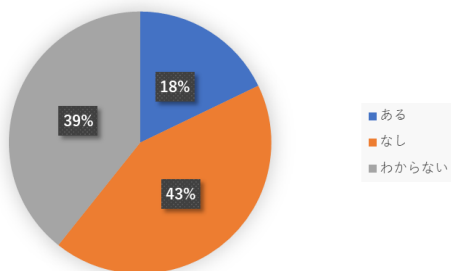


B

意見	件数
トリカブト等	1
ツキヨタケとクサウラベニタケ	1
ナラタケ分類	1
ホンシメジ、ハタケシメジに類似した毒キノコ等	1

C

自然毒マルチプレックス需要



D

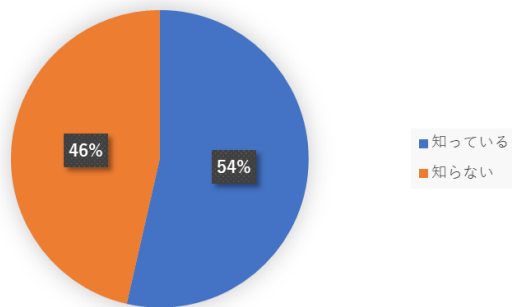
マルチプレックス検査意見	件数
クワイズモと似た植物のマルチプレックス	1
同じ料理に使いそうな組合せ	1
複数種類の自然毒含有生物種を一斉に分析可能なら有用	3

図7 オンサイト検査、マルチプレックス検査に関する意見調査（自然毒）

A) オンサイト検査需要調査、B) オンサイト検査需要項目調査、C) マルチプレックス検査需要調査、D) マルチプレックス検査需要項目調査

A

自然毒DBについて



B

意見	件数
検査に関する新しい情報があれば掲載してほしい	1
食中毒事例のあった植物等の採取場所情報の公開	1
クワイズモの情報を追加してほしい	1
各種植物、キノコに関するプライマー情報の追加	1
食中毒対応事例の集約	1

C

その他実施項目	件数
寄生虫検査	1
ヒラメのクドアオンサイト検査	1
フグ種判別検査	1
有毒魚 16S 及び COI 領域での塩基配列の相同性一致率 99%以上で判定するが、複数の魚種で一致することがあり、同定が困難な場合がある	1

図8 自然毒データベース（DB）とその他項目に関して

A) 自然毒 DB 調査、B) 自然毒 DB での公開希望項目調査、C) その他実施項目

	Name	Result	Values	
1	MQ			
2	G1		14.42	
3	G2			
4	T1		13.15	
5	T2		13.46	
6	N1		10.17	
7	N2		13.13	
8	N3		16.04	

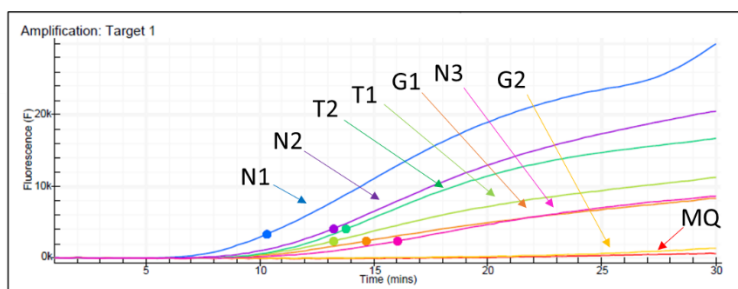


図 9 とうもろこし粉末を用いた DNA 粗抽出法別 SSIIb-RPA

MQ : 超純水、G1,G2 : GenCheck キットで抽出 (1 回目、2 回目)、T1,T2 : Template Prepper キットで抽出 (1 回目、2 回目)、N1 : 既報簡易法 (Narushima et al) で加熱無しの場合、N2 : 既報で加熱後冷却有の場合、N3 : 既報で加熱後冷却無の場合。Values の値は増幅が確認された時間を示す。その横に、融解曲線分析でのピークトップの温度帯を示す。

	Name	Result	Values	
1	MQ			
2	G1		12.25	93.24°C
3	G2		12.04	93.24°C
4	T1		11.34	93.08°C
5	T2		11.24	93.38°C
6	N1			92.27°C
7	N2			83.33°C
8	N3			83.84°C

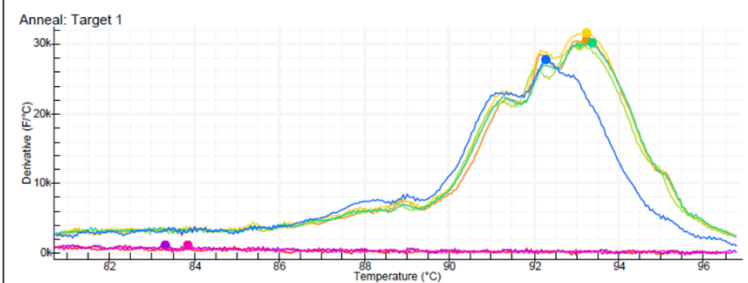
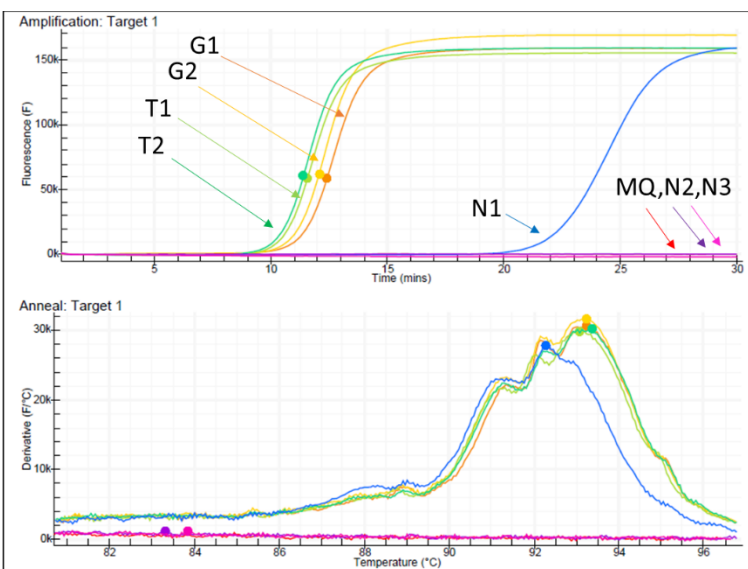
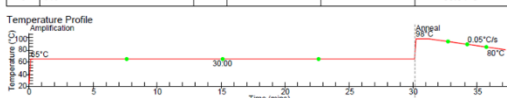
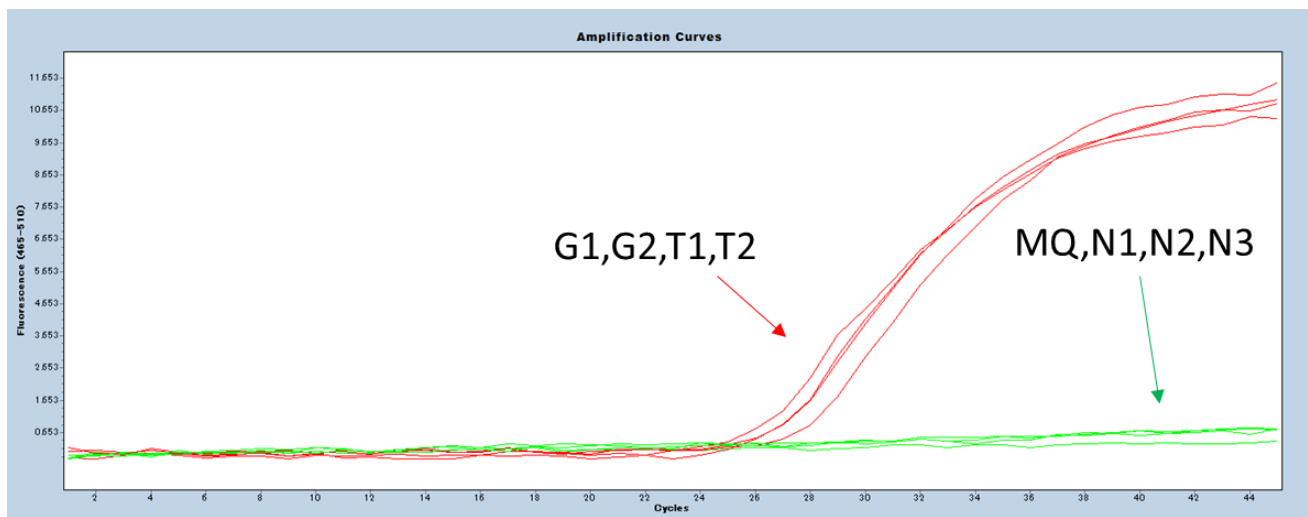


図 10 とうもろこし粉末を用いた DNA 粗抽出法別 SSIIb-LAMP

MQ : 超純水、G1,G2 : GenCheck キットで抽出 (1 回目、2 回目)、T1,T2 : Template Prepper キットで抽出 (1 回目、2 回目)、N1 : 既報簡易法 (Narushima et al) で加熱無しの場合、N2 : 既報で加熱後冷却有の場合、N3 : 既報で加熱後冷却無の場合。Values の値は増幅が確認された時間を示す。その横に、融解曲線分析でのピークトップの温度帯を示す。



MQ	G1	G2	T1	T2	N1	N2	N3
-	27.55	26.65	25.74	26.25	-	-	-

図 1 1 とうもろこし粉末を用いた DNA 粗抽出法別 SSIIb-リアルタイム PCR

MQ : 超純水、G1,G2 : GenCheck キットで抽出（1 回目、2 回目）、T1,T2 : Template Prepper キットで抽出（1 回目、2 回目）、N1 : 既報簡易法（Narushima et al）で加熱無しの場合、N2 : 既報で加熱後冷却有の場合、N3 : 既報で加熱後冷却無の場合を指す。

	Name	Result	Values
1	MQ		
2	G-A		11:52
3	G-B		11:30 48.32°C
4	G-C		11:00 47.52°C
5	T-A		10:14 46.70°C
6	T-B		10:40 48.26°C
7	T-C		11:29 48.37°C

	Name	Result	Values
1	MQ		
2	A,B		
3	N-A		12:17
4	N-B		14:15
5	N-C		15:13

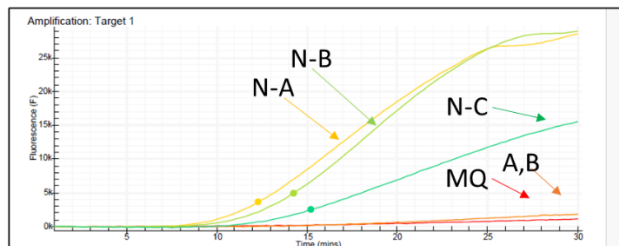
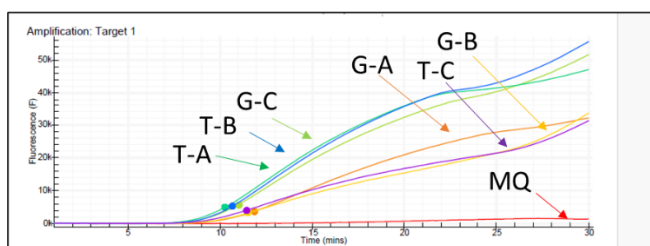


図 1 2 コーングリッツを用いた SSIIb-RPA

（左図）MQ : 超純水、G-A, G-B, G-C : GenCheck キットでコーングリッツ製品 A,B,C からそれぞれ抽出されたゲノム、T-A,T-B,T-C : Template Prepper キットでコーングリッツ製品 A,B,C からそれぞれ抽出されたゲノム、（右図）A,B : 既報（Narushima et al）で用いたアルカリ試薬と中和試薬の混合液、N-A,N-B,N-C : 既報簡易法（加熱無し）（Narushima et al）でコーングリッツ製品 A,B,C からそれぞれ抽出されたゲノムを指す。

	Name	Result	Values	
1	MQ			
2	G-A		12:48	93.04°C
3	G-B		12:56	92.98°C
4	G-C		12:23	92.80°C
5	T-A		11:55	93.07°C
6	T-B		11:30	93.03°C
7	T-C		11:18	93.14°C

Name	Result	Values
MQ		81.09°C
N-A		
N-B		
N-C		80.87°C

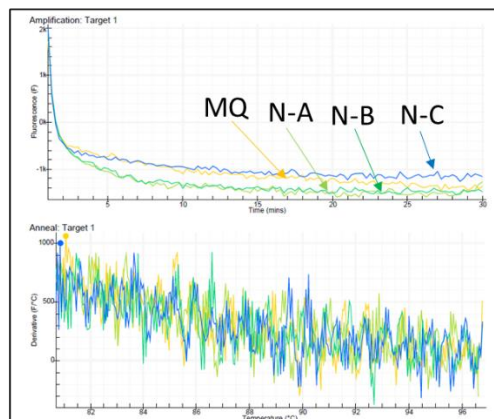
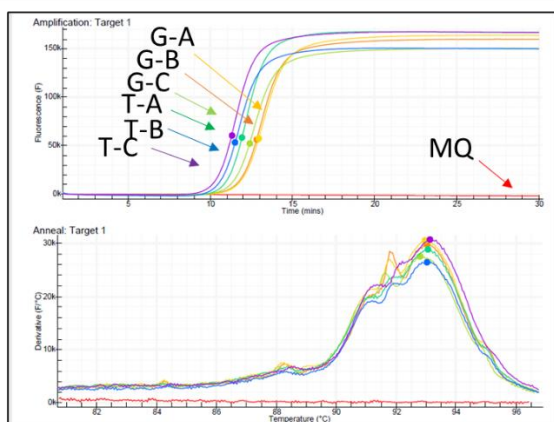


図 1 3 コーングリッツを用いた SSIIb-LAMP

(左図) MQ : 超純水、G-A, G-B, G-C : GenCheck キットでコーングリッツ製品 A,B,C からそれぞれ抽出されたゲノム、T-A, T-B, T-C : Template Prepper キットでコーングリッツ製品 A,B,C からそれぞれ抽出されたゲノム、(右図) N-A, N-B, N-C : 既報簡易法 (加熱無し) (Narushima et al) でコーングリッツ製品 A,B,C からそれぞれ抽出されたゲノムを指す。Values の値は増幅が確認された時間を示す。その横に、融解曲線分析でのピークトップの温度帯を示す。

	Name	Result	Values	
1	MQ			
2	AB			
3	S-G		15:02	
4	S-T			
5	S-AB		16:25	
6	T-G			
7	T-T			
8	T-AB			

	Name	Type	Result	Values	
1	MQ	Blue			
2	AB	Blue		89.63°C	
3	S-G	Blue		13.31	93.45°C
4	S-T	Blue		17.41	91.09°C
5	S-AB	Blue		14.13	92.84°C
6	T-G	Blue			83.10°C
7	T-T	Blue			
8	T-AB	Blue			

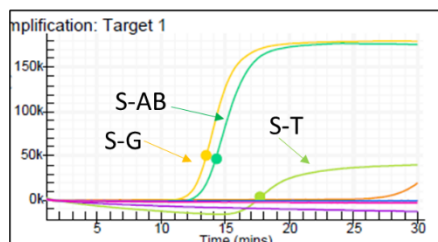
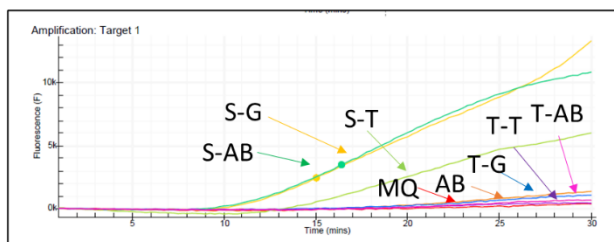
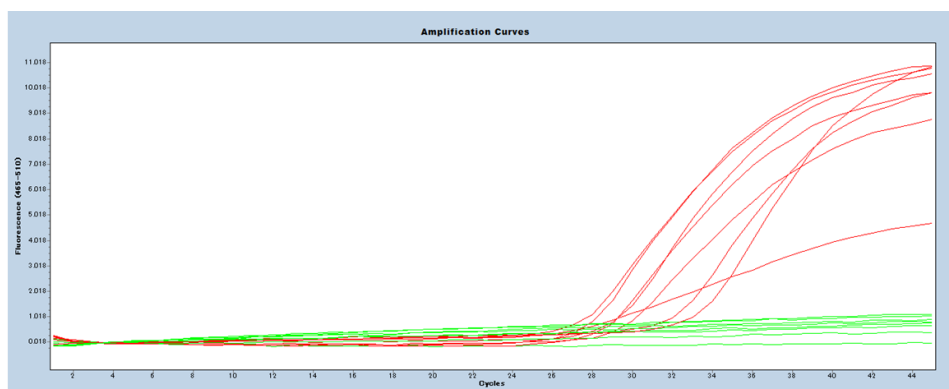


図 1 4 スナック菓子を用いた SSIIb-RPA、SSIIb-LAMP

(左図) RPA. (右図) LAMP. MQ : 超純水、AB : 既報 (Narushima et al) で用いたアルカリ試薬と中和試薬の混合液、S-G, S-T, S-AB : スナック菓子製品 A からそれぞれ GenCheck キット、Template Prepper キット、既報簡易法 (Narushima et al) で抽出されたゲノム、T-A, T-B, T-C : スナック菓子製品 B からそれぞれ GenCheck キット、Template Prepper キット、既報簡易法 (加熱無し) (Narushima et al) で抽出されたゲノムを指す。



	コーン ⁺ リッツA	コーン ⁺ リッツB	コーン ⁺ リッツC	スナックA	スナックB	MQ
G	29.13	26.87	28.81	31.91	-	-
T	28.23	27.37	27.27	-	-	
N1	-	-	-	33.18	-	

図1 5 とうもろこし加工食品を用いた DNA 粗抽出法別 SSI1b リアルタイム PCR

MQ : 超純水、G : GenCheck キットで抽出、T : Template Prepper キットで抽出、N1 : 既報簡易法（加熱無し）（Narushima et al）で加熱無しの場合で抽出したゲノムを指す。

表 1 プライマー一覧

標的	プライマー名	オリゴ DNA 配列 (5'→3')
RPA-SSIIb	SSIIb-rpa1-Fw9	ccgaagcaaagtcagagcgctgcaatgcaa
	SSIIb-rpa1-Rv8	gctttccaccggtctagcatcatcacctgc
	SSIIb-rpa1-Probe	cgcgccggtgtccggacccaaagctgatcaTxcaXcagctcctgtcacca
LAMP-SSIIb2	SSIIb-LAMP-F2	gattctgcttcacctcccaa
	SSIIb-LAMP-B2	gtctagcatcatcacctgcg
	SSIIb-LAMP-FIP-2	gccccactcgttcggtttgcctttgacatctgctccgaa
	SSIIb-LAMP-BIP-2	ggtgtccggacccaaagctggcactggcatcgatttctct
	SSIIb-LAMP-FL-2	gcagcgctctgactttgc
	SSIIb-LAMP-BL-2	tcattccatcagctcctgtcac
Real-time PCR-SSIIb	SSIIb 3-5'	ccaatcctttgacatctgctcc
	SSIIb 3-3'	gatcagctttgggtccgga
	SSIIb-Taq	FAM-agcaaagtcagagcgctgcaatgca-TAMRA

RPA-Probe に関して、T は t に Fluorescein (FAM)が修飾、x は 1',2'-Dideoxyribose (dSpacer)が導入、X は t に Black Hole Quencher®-1 (BHQ1)が修飾されており、3'末端にはポリメラーゼ伸長防止のためアルキルリンカー(C3Spacer) が導入されている

表2 その他の要望一覧

意見	件数
遺伝子検査の技術研修会があれば参加したい	3
同等性試験が予算・時間的に困難なため、低コストの機器・試薬の選択肢を複数開示してほしい	2
検査精度が同等で簡易な方法が開発されるとよい	2
収去の際はロット大きさに対する検体採取が困難なため、より実態に即した方法が示されるとよい	1
遺伝子検査の標準品を国内で安定供給できる体制にしてほしい	1
通知試験法で各自治体が選択している方法を集計・公開希望	1
検査法に関する問い合わせ窓口があればよい	1
FDA 等機関のモニタリングが終了した検査項目は通知試験法から削除してほしい	1
収去検査、行政指導を行う機関同士の調整が難しい	1
検出限界値を示してほしい	1
新しい検査を開発されたら、通知試験法で示してほしい	1