

薬用及び環境浄化用遺伝子組換え植物の開発・生産に関する最近の動向

吉松嘉代,^{*,a} 河野徳昭,^a 川原信夫,^a 穂山 浩,^b 手島玲子,^b 西島正弘^b

Current Status of Application and Commercialization of Genetically Modified Plants for Human and Livestock Health and Phytoremediation

Kayo Yoshimatsu,^{*,a} Noriaki Kawano,^a Nobuo Kawahara,^a
Hiroshi Akiyama,^b Reiko Teshima,^b and Masahiro Nishijima^b

^aResearch Center for Medicinal Plant Resources, National Institute of Biomedical Innovation; 1-2 Hachimandai, Tsukuba, Ibaraki 305-0843, Japan; and ^bNational Institute of Health Sciences; 1-18-1 Kamiyoga, Setagaya-ku, Tokyo 158-8501, Japan.

(Received December 5, 2011; Accepted February 9, 2012; Published online February 13, 2012)

Developments in the use of genetically modified plants for human and livestock health and phytoremediation were surveyed using information retrieved from Entrez PubMed, Chemical Abstracts Service, Google, congress abstracts and proceedings of related scientific societies, scientific journals, *etc.* Information obtained was classified into 8 categories according to the research objective and the usage of the transgenic plants as 1: nutraceuticals (functional foods), 2: oral vaccines, 3: edible curatives, 4: vaccine antigens, 5: therapeutic antibodies, 6: curatives, 7: diagnostic agents and reagents, and 8: phytoremediation. In total, 405 cases were collected from 2006 to 2010. The numbers of cases were 120 for nutraceuticals, 65 for oral vaccines, 25 for edible curatives, 36 for vaccine antigens, 36 for therapeutic antibodies, 76 for curatives, 15 for diagnostic agents and reagents, and 40 for phytoremediation (sum of each cases was 413 because some reports were related to several categories). Nutraceuticals, oral vaccines and curatives were predominant. The most frequently used edible crop was rice (51 cases), and tomato (28 cases), lettuce (22 cases), potato (18 cases), corn (15 cases) followed.

Key words—genetically modified plant; molecular farming; nutraceutical; oral vaccine; plant-made pharmaceuticals

緒 言

1996年に世界で初めての遺伝子組換え (GM) 食品「日持ちトマト」が商品化されて以来、毎年多くの GM 作物が世界中で栽培され、食品として市場に流通している。日本での食品としての安全性審査が終了し、販売が認められている作物は、2011年9月6日現在、7作物167品種¹⁾であるが、これらの作物の多くは、除草剤耐性、害虫抵抗性、ウイルス病抵抗性、乾燥耐性など農業上有用な性質が付与された作物である (Table 1)。このような食品の場合、組換え遺伝子及びその産物は、食品の栄養成分や、その他の食品の質に係わる成分への影響を意図しないため、それらの安全性評価においては、実質的同等性に基づき、挿入遺伝子とその産物の影響を

中心に評価が行われてきた。しかし最近では、Table 1の高オレイン酸形質を持つダイズ、高リシン形質を持つトウモロコシあるいは耐熱性 α -アミラーゼを産生するトウモロコシ等のように、食品の栄養価を高めるため、あるいは機能性を持たせるための組換え遺伝子が挿入された GM 作物が開発、商品化されるようになってきており、従来の概念及び判断基準での安全性評価が困難となってきている。また、GM 植物を、医薬上重要なペプチドやタンパク質を製造するための工場として利用、あるいはそれらの成分が生産され、蓄積された植物製品そのものを病気の予防や治療に利用する試みがされるようになってきた。このような医薬品類を生産する GM 植物 (薬用 GM 植物と呼ぶこととする) も、外見上は通常の植物と変わらないため見分けがつかず、外国では一般圃場での栽培も行われている。さらに、GM 植物を土壌や地下水などの環境中に含まれる重金属等の有害物質を除去するための手段 (環

^a医薬基盤研究所薬用植物資源研究センター筑波研究部、

^b国立医薬品食品衛生研究所

*e-mail: yoshimat@nibio.go.jp

Table 1. List of Products That Have Undergone Safety Assessment and Been Announced in the Official Gazette (Department of Food Safety, MHLW As of 6 Sep. 2011, 167 Crops)

作物 Crops (品種数 number)	性質 Trait	品種数 number	開発者 Developer (国名 Country)
ジャガイモ Potato (8)	害虫抵抗性 Insect resistant	2	Monsanto Company (米国 USA)
	害虫抵抗性+ウイルス抵抗性 Insect & Virus resistant	6	Monsanto Company (米国 USA)
ダイズ Soybean (9)	除草剤耐性 Herbicide tolerant	5	Monsanto Company (米国 USA), Pioneer Hi-Bred International Inc. (米国 USA), Bayer CropScience (ドイツ Germany)
	害虫抵抗性 Insect resistant	1	Monsanto Company (米国 USA)
	除草剤耐性+害虫抵抗性 Herbicide tolerant, Insect resistant	1	Monsanto Company (米国 USA)
	高オレイン酸 High oleic acid	2	Pioneer Hi-Bred International Inc. (米国 USA), Optimum Quality Grains LLC (米国 USA)
テンサイ Sugar Beet (3)	除草剤耐性 Herbicide tolerant	3	Monsanto Company (米国 USA), KWS Saat AG (ドイツ Germany), Syngenta Seeds AG (スイス Switzerland), Bayer CropScience (ドイツ Germany)
トウモロコシ Corn (102)	除草剤耐性 Herbicide tolerant	6	Monsanto Company (米国 USA), Bayer CropScience (ドイツ Germany)
	害虫抵抗性 Insect resistant	8	Monsanto Company (米国 USA), Syngenta Seeds (スイス Switzerland)
	除草剤耐性+害虫抵抗性 Herbicide tolerant, Insect resistant	72	Monsanto Company (米国 USA), Pioneer Hi-Bred International Inc. (米国 USA), Optimum Quality Grains LLC (米国 USA), Mycogen Seeds (米国 USA), Dow AgroSciences LLC. (米国 USA), Syngenta Seeds (スイス Switzerland)
	乾燥耐性 Drought tolerant	1	Monsanto Company (米国 USA)
	乾燥耐性+除草剤耐性 Drought tolerant, Herbicide tolerant	1	Monsanto Company (米国 USA)
	乾燥耐性+害虫抵抗性 Drought tolerant, Insect resistant	1	Monsanto Company (米国 USA)
	乾燥耐性+除草剤耐性+害虫抵抗性 Drought tolerant, Herbicide tolerant, Insect resistant	3	Monsanto Company (米国 USA)
	高リシン High lysine	1	Renessen LLC. (米国 USA)
	高リシン+害虫抵抗性 High lysine, Insect resistant	1	Renessen LLC. (米国 USA)
	耐熱性 α -アミラーゼ産生 Thermostable α -amylase	1	Syngenta Seeds (スイス Switzerland)
	耐熱性 α -アミラーゼ産生+害虫抵抗性 Thermostable α -amylase, Insect resistant	1	Syngenta Seeds (スイス Switzerland)
	耐熱性 α -アミラーゼ産生+除草剤耐性+害虫抵抗性 Thermostable α -amylase, Herbicide tolerant, Insect resistant	6	Syngenta Seeds (スイス Switzerland)
ナタネ Rapeseed (18)	除草剤耐性 Herbicide tolerant	14	Monsanto Company (米国 USA), Bayer CropScience (ドイツ Germany)
	除草剤耐性+雄性不稔性 Herbicide tolerant, Male sterility	2	Bayer CropScience (ドイツ Germany)
	除草剤耐性+稔性回復性 Herbicide tolerant, Recovering male sterility	2	Bayer CropScience (ドイツ Germany)
ワタ Cotton (24)	除草剤耐性 Herbicide tolerant	9	Monsanto Company (米国 USA), Stoneville Pedigreed Seed (米国 USA), Bayer CropScience (ドイツ Germany)
	害虫抵抗性 Insect resistant	4	Monsanto Company (米国 USA)
	除草剤耐性+害虫抵抗性 Herbicide tolerant, Insect resistant	11	Monsanto Company (米国 USA), Bayer CropScience (ドイツ Germany), Micogen Seeds (米国 USA), AgroSciences LLC (米国 USA)
アルファルファ Alfalfa (3)	除草剤耐性 Herbicide tolerant	3	Monsanto Company (米国 USA), Forage Genetic Inc. (米国 USA)

境浄化用 GM 植物と呼ぶこととする) とする研究も進められている。

意図的に特定成分を生産・蓄積させた, 又は医薬品類を生産する薬用 GM 植物や, あるいは環境中の有害物質が蓄積された環境浄化用 GM 植物が誤って食用作物に混入し, 一般の食品として摂取された場合, 生産物あるいは蓄積物の種類によっては健康被害等の重大な問題を引き起こす恐れがある。したがって, 以上のような薬用及び環境浄化用 GM 植物の開発状況及び実態を調査し, 把握しておくことは, 食品の安全性確保の見地から非常に重要である。本調査研究では, 食品の安全性評価基準作成の一助とするため, 2006 年から 2010 年までの薬用及び環境浄化用 GM 植物の開発・生産・商品化に関する情報を収集整理し, カテゴリー別の分類を行った。

方 法

GM 植物のうち, 人の健康に影響を与える成分を生産する植物を「薬用 GM 植物」の範囲と位置づけた。また, 近年, 牛, 豚, 鶏等の家畜は, 人畜共通の感染症の報告があることから, これらの家畜の健康に影響を与える植物も, 「薬用 GM 植物」の範囲とした。さらに, 環境中(土壌, 地下水など)の汚染物質(重金属, 残留農薬, 残留肥料, 有害有機化合物など)に耐性を示す, あるいは吸収する能力が付与された植物を「環境浄化用 GM 植物」の範囲と定めた。2006-2010 年に公表された薬用及び環境浄化用 GM 植物に関する情報を文献データベース(Entrez PubMed, SciFinder[®]), インターネット検索(Google), 関連学会講演要旨集, 雑誌等を用いて調査し, 得られた情報は, カテゴリー別に整理し, 分類した。各年度の調査媒体を Table 2 に示

Table 2. List of Media Reviewed for GM Plants Developed for Pharmaceuticals and Phytoremediation from 2006 to 2010

年 Year	Media
2006	<ul style="list-style-type: none"> • SciFinder[®] (キーワード Keyword : transgenic plant) • PubMed (キーワード Keyword : transgenic plant) • 日本農芸化学会 2006 年度大会 (京都) 講演要旨集 Annual Meeting of Japan Society for Bioscience, Biotechnology, and Agrochemistry 2006 Abstract • 第 24 回日本植物細胞分子生物学会大会・シンポジウム (つくば) 講演要旨集 The 24th Annual Meeting of the Japanese Society of Plant Cell and Molecular Biology Abstract
2007	<ul style="list-style-type: none"> • SciFinder[®] (キーワード Keyword : transgenic plant) • 第 25 回日本植物細胞分子生物学会大会・シンポジウム (千葉) 講演要旨集 The 25th Annual Meeting of the Japanese Society of Plant Cell and Molecular Biology Abstract
2008	<ul style="list-style-type: none"> • SciFinder[®] (キーワード Keyword : transgenic plant) • 第 26 回日本植物細胞分子生物学会大会・シンポジウム (大阪) 講演要旨集 The 26th Annual Meeting of the Japanese Society of Plant Cell and Molecular Biology Abstract • 第 26 回バイオテクノロジーシンポジウム (植物利用物質生産/糖鎖機能活用技術開発, 疾患制御遺伝子探索/AD 総合診断体系実用化) 予稿集 The 26th Biotechnology symposium preprint • World Congress on In Vitro Biology, Tucson (Jun. 14-18) 2008 Abstract
2009	<ul style="list-style-type: none"> • SciFinder[®] (キーワード Keyword : transgenic plant) • 日本農芸化学会 2009 年度大会 (福岡) 講演要旨集 Annual Meeting of Japan Society for Bioscience, Biotechnology, and Agrochemistry 2009 Abstract • 第 27 回日本植物細胞分子生物学会大会・シンポジウム (藤沢) 講演要旨集 The 27th Annual Meeting of the Japanese Society of Plant Cell and Molecular Biology Abstract • 第 27 回バイオテクノロジーシンポジウム (植物利用物質生産/糖鎖機能活用技術開発, 疾患制御遺伝子探索/AD 総合診断体系実用化) 予稿集 The 27th Biotechnology symposium preprint
2010	<ul style="list-style-type: none"> • SciFinder[®] (キーワード Keyword : transgenic plant) • 第 28 回日本植物細胞分子生物学会大会・シンポジウム (仙台) 講演要旨集 The 28th Annual Meeting of the Japanese Society of Plant Cell and Molecular Biology Abstract • 第 28 回バイオテクノロジーシンポジウム (植物利用物質生産/糖鎖機能活用技術開発, AD 総合診断体系実用化) 予稿集 The 28th Biotechnology symposium preprint • 12th International Association for Plant Biotechnology Congress, St. Louis, Missouri (Jan. 6-11) 2010, Abstract

す。カテゴリーは、前報²⁾に従い、薬用 GM 植物については、そのまま口より摂取するものとして、「機能性食品」、「経口ワクチン」及び「食用医薬」、抽出・精製後使用するものとして「ワクチン抗原」、「抗体医薬」、「治療薬」及び「診断薬・試薬」の7項目を設け、さらに環境浄化用 GM 植物を「環境浄化」1項目とし、全8項目とした。

結 果

1. 2006-2010年の米国における薬用及び環境浄化用 GM 植物野外圃場栽培申請・認可及び作付け状況 U.S. Department of Agriculture (USDA), Animal and Plant Health Inspection Service (APHIS) の情報公開サイト Release Permits for Pharmaceuticals, Industrials, Value Added Proteins for Human Consumption, or for Phytoremediation Granted or Pending by APHIS (http://www.aphis.usda.gov/brs/ph_permits.html)³⁾で、2006年から2010年までの薬用及び環境浄化用 GM 植物米国野外圃場作付け申請・認可状況を調べた (Fig. 1, 2011年10月28日公表, ただし産業利用のための物質生産も含む)。認可面積は2008年までは年々増加し、特に2008年是对2007年327%の2650.50エーカーの認

可面積であったが、その後は減少し、2010年は2007年の認可面積に近い773.00エーカーであった。実際に作付けが行われた面積は認可面積よりも小さく、その割合(作付け面積/認可面積×100)は、2006年が最大(30.8%)で、2009年以降は10%以下であった(2009年:6.2%, 2010年:8.3%)。最も作付け面積が大きかったのは2008年の459.28エーカーであり、2010年は64.13エーカーに減少した (Fig. 1)。

2006年から2010年に米国野外圃場に作付けされた薬用及び環境浄化用 GM 植物の状況(企業等名, 作物, 生産物, ただし産業利用のための物質生産も含む)³⁾を Table 3 に示す。企業等のうち, Kentucky BioProcessing 社は, 非 GM タバコ植物に組換え遺伝子を有するタバコモザイクウイルスを接種・感染させて物質生産を行っており, GM 植物ではないが, 組換え遺伝子(GM 植物ウイルス)が利用されていることから, 本データに加えられている。2006年は9社(大学を含む), 2007年と2008年は5社, 2009年と2010年は6社が野外圃場栽培を行っている。食用作物としては, トウモロコシ, エンドウ, ベニバナ, イネ及びオオムギの作付けが行われ, 導入遺伝子産物又は生産物は, 環境浄化用酵素(水銀

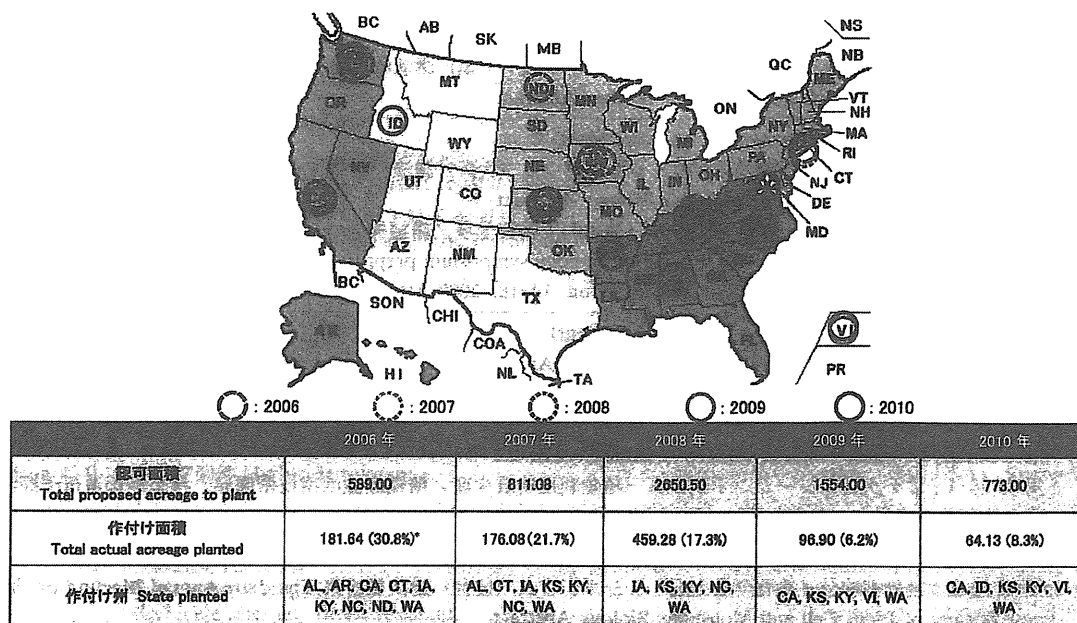


Fig. 1. Release Permits for Pharmaceuticals, Industrials, Value Added Proteins for Human Consumption, or for Phytoremediation Granted by Animal and Plant Health Inspection Service, U.S. Department of Agriculture from 2006 to 2010

イオン還元酵素, 有機水銀分解酵素, チトクローム P450), 工業用酵素 (エンドグルカナーゼ: バイオエタノール生産, レニン: チーズ生産, セリンプロテアーゼ不活性型前駆体), 医療用酵素 (リゾチーム), 免疫抗原 (大腸菌易熱性腸管毒素 B サブユニット, B 型肝炎ウイルス外殻タンパク質表面抗原), 抗体 (抗虫歯菌, 抗カゼウイルス), ホルモン (コイ成長ホルモン), 医療用タンパク質 (ラクトフェリン, ヒト血清アルブミン, ウシ肺アプロチニン, レクチン様タンパク質: 抗ウイルス作用), 生分解性プラスチック (ポリβヒドロキシブチレート), 機能性タンパク質 (ブラゼイン: 甘味タンパク質) であった。

Table 3 の企業等のうち, 2006 年の野外圃場作付けを行った Chlorogen, Inc. は 2007 年 9 月に事業を停止し, Novoplant はホームページへのアクセスが不可となっている。2009 年及び 2010 年に野外圃場での GM トウモロコシ作付けを行った Applied Biotechnology Institute のホームページの Publication リスト⁴⁾には, 2002 年 11 月に医薬品類を生産するトウモロコシが後作の非 GM 大豆に混入する事件を起こし, 倒産した Prodigene 社の論文⁵⁾が含まれている。

2. 2006-2010 年に公表・出版された薬用及び環境浄化用 GM 植物に関する論文等

2-1. 薬用及び環境浄化用 GM 植物に関する論文等の分類と件数

2006-2010 年に公表・出版された薬用及び環境浄化用 GM 植物に関する論文等の情報件数は 405 件であった。⁶⁻⁴¹²⁾ これらの GM 植物は, 研究・開発目的, 用途, 導入遺伝子, 宿主植物の種類が様々である。これらの GM 植物に関する情報の分類方法として, 利用方法・目的での分類と利用物質での分類が考えられるが, 本調査研究では, 利用方法・目的に基づいた分類を行った (Fig. 2)。

利用方法・目的として, そのまま食用又は経口での摂取, 抽出・精製後の利用, 栽培があり, 食用又は経口での摂取では, 機能性食品, 経口ワクチン, 食用医薬が, 抽出・精製後の利用では, ワクチン抗原, 抗体医薬, 治療薬, 診断薬・試薬が, 栽培での利用では, 環境浄化がある (Fig. 2)。

Table 4 にそれぞれのカテゴリー別研究の代表例を示す。機能性食品では, 高トリプトファン

米,^{8,16,20,24,27)} 高コエンザイム Q10 米,^{10,11,22)} ゴールデンライス (βカロテン米),^{21,25)} やミラクリントマト^{72-75,77-83)} が, 経口ワクチンでは, インフルエンザ予防米,^{132,133,135,140)} コレラ予防米,^{132,133,135-140)} B 型肝炎予防ジャガイモ,¹⁴⁶⁻¹⁴⁹⁾ ペスト予防トマト¹⁷²⁾ が, 食用医薬では, 糖尿病予防米,²⁰¹⁾ 花粉症緩和米,^{203,205,207)} アルツハイマー病予防大豆²¹¹⁻²¹³⁾ が, ワクチン抗原では, インフルエンザワクチン,^{222,226-229,234,236,240,248)} 炭疽病ワクチン,²³⁰⁾ ポリオワクチン²³²⁾ が, 抗体医薬では, ヒト化抗 CD20 単クローン抗体,^{254,255)} 抗大腸がん単クローン抗体,^{258,260)} B 型肝炎抗体²⁵⁹⁾ が, 治療薬ではヒトインスリン,^{308,347)} ヒトプラスミン,²⁹¹⁾ ヒト顆粒球・マクロファージコロニー刺激因子^{293,305)} が, 診断薬・試薬では, プロテアーゼ阻害タンパク質,³⁷⁰⁾ α-アミラーゼ,³⁷¹⁾ ウシラクトフェリン³⁷²⁾ が, 環境浄化では亜ヒ酸耐性イネ,³⁷⁸⁾ 重金属耐性カラシナ,³⁷⁹⁾ 水銀耐性シロイヌナズナ^{389,390)} などの開発例がある。

Table 5 に年別の情報件数とその内訳を示す。研究・開発例には複数の目的での実施例があり, それらは個別に集計したため, 計 8 件の重複があり, 情報件数はのべ 413 件であった。それぞれのカテゴリーに分類した研究・開発例数は, 機能性食品 120 件, 経口ワクチン 65 件, 食用医薬 25 件, ワクチン抗原 36 件, 抗体医薬 36 件, 治療薬 76 件, 診断薬・試薬 15 件, 環境浄化 40 件であり, 機能性食品に関するものが最も多く, ついで治療薬, 経口ワクチンが多かった。

2-2. 薬用及び環境浄化用 GM 植物研究・開発に使用された作物及び実施国

Table 6 にそれぞれのカテゴリー別に使用された作物と研究・開発国の概要を示す。口からの摂取を目的とする, 機能性食品, 経口ワクチン及び食用医薬に使用された作物として非食用のシロイヌナズナ, タバコが含まれている。これらの植物は GM 植物作出・栽培方法が確立されており, 本来の目的植物での研究・開発前に, 植物中で目的遺伝子が機能し発現することを確認するために使用されることが多い。そこで, 研究目的が上記の範囲であると判断されたものは, それらのカテゴリーとして集計した。

機能性食品では, 機能性タンパク質やペプチドをコードする遺伝子を導入し, 宿主植物が本来生産しないタンパク質等を生産させる場合, 宿主植物が本

Table 3. Release Permits for Pharmaceuticals, Industrials, Value Added Proteins for Human Consumption, or for Phytoremediation Granted by Animal and Plant Health Inspection Service, U.S. Department of Agriculture from 2006 to 2010

企業等 Company	作付け作物 Crop (生産物 Product : 作付け州 State planted)				
	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年
Applied Biotechnology Institute				トウモロコシ Corn (B型肝炎ウイルス外殻タンパク質表面抗原 HBsAg ^{*1} : CA)	トウモロコシ Corn (ブラゼイン Brazzein, B型肝炎ウイルス外殻タンパク質表面抗原 HBsAg ^{*1} : CA)
Chlorogen, Inc.	タバコ Tobacco ^{*2} (社外秘 CBI ^{*3} : KY)				
Edenspace Systems	タバコ Tobacco (エンドグルカナーゼ Endoglucanase: AR)				
Iowa State University	トウモロコシ Corn (大腸菌易熱性腸管毒素 B サブユニット LT-B ^{*4} : IA)	トウモロコシ Corn (大腸菌易熱性腸管毒素 B サブユニット LT-B ^{*4} : IA)	トウモロコシ Corn (大腸菌易熱性腸管毒素 B サブユニット LT-B ^{*4} : IA)		
Kentucky BioProcessing		タバコ Tobacco ^{*5} (ウシ肺アプロチニン bovine lung aprotinin: KY)	タバコ Tobacco ^{*5} (ウシ肺アプロチニン bovine lung aprotinin: KY)	タバコ Tobacco ^{*5} (ウシ肺アプロチニン bovine lung aprotinin: KY)	タバコ Tobacco ^{*5} (ウシ肺アプロチニン bovine lung aprotinin, レクチン様タンパク質 lectin-like protein, セリンプロテアーゼ不活性型前駆体 inactive precursor of a serine protease: KY)
Metabolix, Inc.				タバコ Tobacco (ポリβヒドロキシブチレート PHB ^{*6} : KY)	アマナズナ Camelina (ポリβヒドロキシブチレート PHB ^{*6} : ID)
Novoplant	エンドウ Pea (社外秘 CBI ^{*3} : ND)				
Planet Biotechnology	タバコ Tobacco (抗虫歯菌抗体 CaroRx TM ^{*7} , 抗風邪ウイルス抗体 RhinoRx TM ^{*8} : CA, KY)				
SemBioSys Genetics	ベニバナ Safflower (コイ成長ホルモン Carp growth hormone: WA)		ベニバナ Safflower (社外秘 CBI ^{*3} : WA)	ベニバナ Safflower (レンニン rennin ^{*9} : WA)	
Ventria Bioscience	イネ Rice (ヒト血清アルブミン human serum albumin, ラクトフェリン lactoferrin, リゾチーム lysozyme: NC)	イネ Rice (ヒト血清アルブミン human serum albumin, ラクトフェリン lactoferrin, リゾチーム lysozyme: NC, KS)	イネ Rice (ヒト血清アルブミン human serum albumin, ラクトフェリン lactoferrin, リゾチーム lysozyme, 社外秘 CBI ^{*3} : NC, KS)	イネ Rice (ヒト血清アルブミン human serum albumin, ラクトフェリン lactoferrin, リゾチーム lysozyme: KS, VI)	イネ Rice (ヒト血清アルブミン human serum albumin, ラクトフェリン lactoferrin, リゾチーム lysozyme, 社外秘 CBI ^{*3} : KS, VI)
Washington State University	オオムギ Barley (ラクトフェリン lactoferrin, リゾチーム lysozyme: WA)	オオムギ Barley (ラクトフェリン lactoferrin, リゾチーム lysozyme: WA)		オオムギ Barley (ラクトフェリン lactoferrin, リゾチーム lysozyme: WA)	オオムギ Barley (ラクトフェリン lactoferrin, リゾチーム lysozyme: WA)
Applied Phyto Genetics	ポプラ Poplar (水銀イオン還元酵素 mercuric ion reductase, 有機水銀分解酵素 organomercury lyase: AL, CT)	ポプラ Poplar (水銀イオン還元酵素 mercuric ion reductase, 有機水銀分解酵素 organomercury lyase: AL, CT)			
University of Washington			ハコヤナギ属 Aspen (チトクローム P450 Cytochrome P450 2E1: WA)		ハコヤナギ属 Aspen (チトクローム P450 Cytochrome P450 2E1: WA)

^{*1}: The hepatitis B virus surface antigen, ^{*2}: 葉緑体形質転換 (葉緑体遺伝子への遺伝子導入) Plastid transformation, ^{*3}: Confidential business information, ^{*4}: B subunit of the *Escherichia coli* enterotoxin, ^{*5}: Recombinant Tobacco mosaic virus infection, ^{*6}: Poly-β-hydroxybutyrate, ^{*7}: Antibody that specifically binds to the bacterium *Streptococcus mutans*, ^{*8}: Antibody that specifically binds to the rhinovirus, a major cause of the common cold, ^{*9}: bovine chymosin.

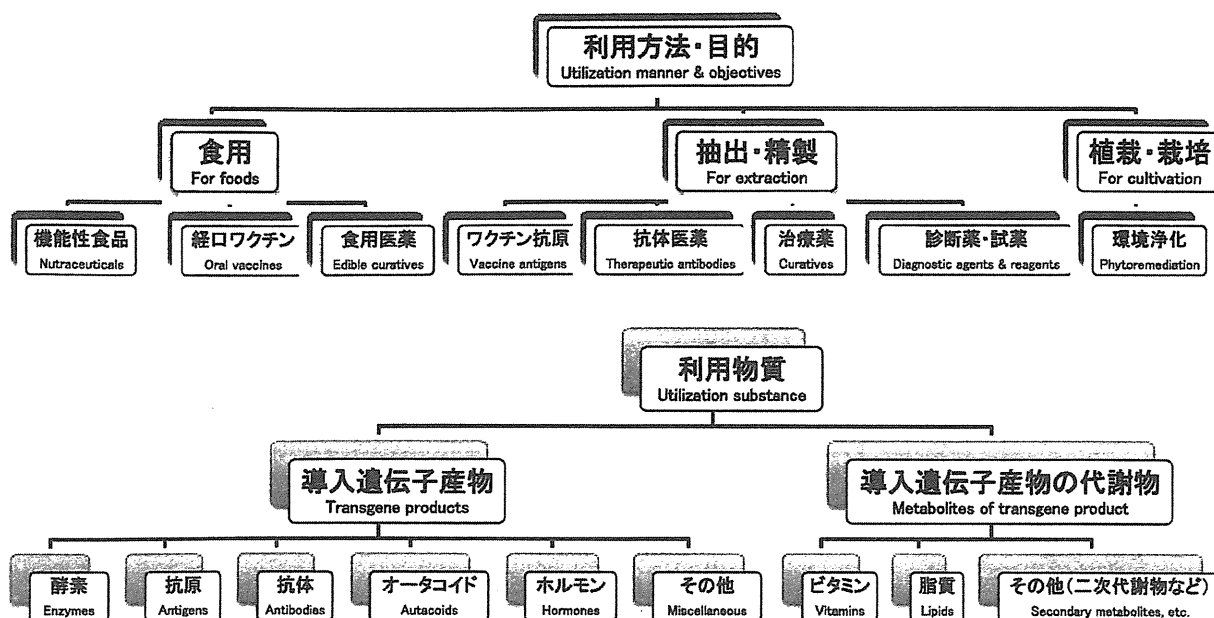


Fig. 2. Categorization of Genetically Modified Plants for Human and Livestock Health and Phytoremediation

Table 4. Categorization of Genetically Modified Plants for Human and Livestock Health and Phytoremediation and Representative Examples

区分 Categories	研究・開発例 Research & development examples	文献 References
機能性食品 Nutraceuticals	高トリプトファン米, 高コエンザイム Q10 米, ゴールデンライス, ミラクリントマトなど High tryptophan rice, High coenzyme Q10 rice, Golden rice, Miraculine tomato, etc.	8, 10, 11, 16, 20-22, 24, 25, 27, 72-75, 77-83
経口ワクチン Oral vaccines	インフルエンザ予防米, コレラ予防米, B 型肝炎予防ジャガイモ, ペスト予防トマトなど Influenza prevention rice, Cholera prevention rice, Hepatitis B prevention potato, Plague prevention tomato, etc.	132, 133, 135-140, 146-149, 172
食用医薬 Edible curatives	糖尿病予防米, 花粉症緩和米, アルツハイマー病予防大豆など Diabetes prevention rice, Japanese cedar pollinosis alleviation rice, Alzheimer disease prevention soybean, etc.	201, 203, 205, 207, 211-213
ワクチン抗原 Vaccine antigens	パンデミックインフルエンザワクチン, 炭疽病ワクチン, ポリオワクチンなど Pandemic influenza vaccine, Anthrax vaccine, Polio vaccine, etc.	222, 226-230, 234, 236, 240, 248
抗体医薬 Therapeutic antibodies	ヒト化抗 CD20 単抗体, 抗大腸がん単クローン抗体, B 型肝炎抗体など Humanized anti-CD20 monoclonal antibody, Anti-human colorectal cancer monoclonal antibody, Anti-hepatitis B antibody, etc.	254, 255, 258-260
治療薬 Curatives	ヒトインスリン, ヒトプラスミン, ヒト顆粒球・マクローファージコロニー刺激因子など Human insulin, Human plasmin, Human granulocyte-macrophage colony stimulating factor, etc.	291, 293, 305, 308, 347
診断薬・試薬 Diagnostic agents & reagents	プロテアーゼ阻害タンパク質, α -アミラーゼ, ウシラクトフェリンなど Protease inhibitor, α -amylase, Bovine lactoferrin, etc.	370-372
環境浄化 Phytoremediation	亜ヒ酸耐性イネ, 重金属耐性カラシナ, 水銀耐性シロイヌナズナなど Arsenous acid-resistant rice, Heavy-metal-resistant Indian mustard, Mercury-resistant thale cress, etc.	378, 379, 389, 390

Table 5. Itemization of Genetically Modified Plants for Human and Livestock Health and Phytoremediation from 2006 to 2010

年 Year	情報 件数 No. of cases	重複 件数 No. of duplication	内訳 Itemization								内訳 合計 Sum
			機能性食品 Nutraceuticals	経口 ワクチン Oral vaccines	食用医薬 Edible curatives	ワクチン 抗原 Vaccine antigens	抗体医薬 Therapeutic antibodies	治療薬 Curatives	診断薬・試薬 Diagnostic agents & reagents	環境浄化 Phytoremediation	
2006	105	1	31	19	3	9	13	17	5	9	106
2007	55	1	15	7	4	5	3	8	3	11	56
2008	71	0	13	13	2	10	9	13	1	10	71
2009	73	2	26	11	6	5	6	12	3	6	75
2010	101	4	35	15	10	7	5	26	3	4	105
合計	405	8	120	65	25	36	36	76	15	40	413

重複 Duplication, 2006年 機能性食品 Nutraceuticals : 環境浄化 Phytoremediation, 2007年 機能性食品 Nutraceuticals : 環境浄化 Phytoremediation, 2009年 機能性食品 Nutraceuticals : 環境浄化 Phytoremediation, 抗体医薬 Therapeutic antibodies : 治療薬 Curatives, 2010年 ワクチン抗原 Vaccine antigens : 治療薬 Curatives, ワクチン抗原 Vaccine antigens : 抗体医薬 Therapeutic antibodies, 抗体医薬 Therapeutic antibodies : 治療薬 Curatives (2件).

来生産する機能性物質の含有量向上のための遺伝子を導入する場合、あるいは宿主植物が本来生合成し蓄積する物質をより機能性を持った物質に変換させるための遺伝子（例えば代謝酵素遺伝子など）を導入する場合があります、使用された作物数が最も多い（34作物）。治療薬も同様に、生物活性を有するタンパク質やペプチドをコードする遺伝子を導入し、宿主植物が本来生産しないタンパク質等を生産させる場合、宿主植物が本来生産する薬用成分（二次代謝物）の含有量向上のための遺伝子を導入する場合、あるいは宿主植物が本来生合成し蓄積する物質をより生理活性の高い物質に変換させるための遺伝子（例えば代謝酵素遺伝子など）を導入する場合があります、機能性食品について使用された作物数が多い（26作物）。

Table 7 に国及びカテゴリー別に集計した結果を示す。学会等の情報収集が容易な日本が最も件数が多く142件、ついで米国97件、中国56件、ドイツ20件、韓国20件、カナダ14件、英国12件、スペイン10件であり、上位3カ国（日本、米国及び中国）はすべてのカテゴリーについての情報が得られ、様々な用途・目的のための薬用及び環境浄化用GM植物の研究・開発が行われていることが明らかとなった。また、学会等での情報収集が困難な中国において第3位の情報件数（56件）が得られた。このことは、中国での薬用及び環境浄化用GM植物の研究・開発は非常に活発であり、今回の調査で得られた情報数よりも、より多くの研究・開発が行

われていることが示唆される。

Table 8 に国及び年別に集計した結果を示す。前記の上位8カ国は、すべての年において情報が得られ、継続して薬用及び環境浄化用GM植物の研究・開発が行われていることが窺えた。

Table 9 に使用された食用作物及びカテゴリー別に集計した結果を示す。調査した資料の要約中に作物の名称がないものは、穀類及び油糧作物として集計した。食用作物で最も使用頻度が高いのはイネ51件で、ついでトマト28件、レタス22件、ジャガイモ18件、トウモロコシ15件であった。

Table 10 に使用された非食用作物及びカテゴリー別に集計した結果を示す。Table 9と同様に、調査した資料の要約中に作物の名称がないものは植物として集計した。非食用作物では、モデル植物としての利用の多い、タバコ（106件）及びシロイヌナズナ（26件）の使用頻度が高かった。

2-3. 薬用及び環境浄化用GM植物研究・開発の各カテゴリーの内容の詳細 Table 11 に機能性食品に関する情報の内容を示す。機能性食品での使用例が多い食用作物は、イネ21件、トマト16件、ナタネ12件である（Table 9 食用作物別集計参照）。イネでは、高トリプトファン形質に関する情報が最も多く5件^{8,16,20,24,27} ついで高コエンザイムQ10形質に関するものが3件^{10,11,22} 高アミロース形質に関するものが2件^{18,19} であった。トマトでは、ミラクリン生産形質に関する情報が最も多く11件^{72-75,77-83} であった。ナタネでは、アスタキサ

Table 6. Summary of Genetically Modified Plants for Human and Livestock Health and Phytoremediation from 2006 to 2010 (Crops & Countries)

区分 Categories	作物 Crops (合計 Total)	件数 No.	研究・開発国 Countries (合計 Total)
機能性食品 Nutraceuticals	アマ, アビシニアガラシ, イチゴ, イネ, オオアラセイトウ, オリーブ, オレンジ, カラシナ, キャッサバ, クレソン, ゴマ, コムギ, サツマイモ, サトウキビ, ジャガイモ, ダイズ, テンサイ, トウモロコシ, トマト, ナタネ, ニンジン, ヒマワリ, ベニバナ, ラッカセイ, リンゴ, レタス, シロイヌナズナ, シンテッポウユリ, タバコ, タルウムゴヤシ, ハルザキヤマガラシ, ペチュニア, ミヤコグサ, レンギョウ (34)	120	米国, カナダ, 英国, フランス, ドイツ, スペイン, イスラエル, サウジアラビア, インド, オーストラリア, 韓国, 台湾, 中国, 日本 (14)
経口ワクチン Oral vaccines	アルファルファ, イネ, オオムギ, サツマイモ, ジャガイモ, トウモロコシ, トマト, ナガバクコ, ニンジン, ハツカダイコン, レタス, シロイヌナズナ, タバコ, ミヤコグサ (14)	65	米国, カナダ, メキシコ, フランス, ドイツ, イタリア, スペイン, スウェーデン, ロシア, インド, オーストラリア, 韓国, 台湾, 中国, 日本 (15)
食用医薬 Edible curatives	アマ, イチゴ, イネ, ダイズ, レタス, タバコ (6)	25	米国, 中国, 日本 (3)
ワクチン抗原 Vaccine antigens	イネ, タバコ (2)	36	米国, カナダ, イタリア, スペイン, ロシア, 南アフリカ, インド, ベトナム, 韓国, 中国, 日本 (11)
抗体医薬 Therapeutic antibodies	トウモロコシ, トマト, ウキクサ, シロイヌナズナ, タバコ, ヒメツリガネゴケ (6)	36	米国, カナダ, キューバ, 英国, ドイツ, オランダ, ベルギー, イタリア, ギリシャ, スペイン, ハンガリー, イラン, オーストリア, 韓国, 中国, 日本 (16)
治療薬 Curatives	イネ, ウラルカンゾウ, エンドウ, オオムギ, サツマイモ, ジャガイモ, ダイズ, トウモロコシ, トマト, ニンジン, ラッカセイ, レタス, ロジオラ・サカリネンシス, ウキクサ, ケシ, クソニンジン, サウスレア・インボルクラタ, シロイヌナズナ, スウェルチア・ムソティ, ゼニゴケ, セリバオウレン, タバコ, ニチニチソウ, ヒメツリガネゴケ, ベラドンナ, マダラハウチワマメ (26)	76	米国, カナダ, ブラジル, 英国, フランス, ドイツ, アイスランド, イタリア, フィンランド, ロシア, ヨルダン, イスラエル, 韓国, 中国, 日本 (15)
診断薬・試薬 Diagnostic agents & reagents	イネ, オオムギ, ジャガイモ, トウモロコシ, シロイヌナズナ, タバコ (6)	15	米国, カナダ, アイスランド, 中国, 日本 (5)
環境浄化 Phytoremediation	イネ, カラシナ, ジャガイモ, カバノキ, シバ, シャリンバイ, シロイヌナズナ, タバコ, ナタネ, トレニア, ペチュニア, ヘビノネゴザ, ポプラ, マリーゴールド, ヨシ, レンゲソウ (16)	40	米国, カナダ, スペイン, トルコ, イスラエル, インド, 韓国, 台湾, 中国, 日本 (10)

The cases that extend over multiple categories were counted separately. Therefore the total number of cases (411) was higher than the actual number of cases (405).

ンチン生産形質に関する情報が最も多く4件^{90,93-95)}であった。生産物としてはカロテノイド類 (β カロテン, ケトカロテノイド, アスタキサンチン及びゼ

アキサンチンを含む) の件数が最も多く14件^{21,25,30,40,41,48,54,68,69,76,90,93-95)}ついで多いのはミラクリン13件^{7,72-75,77-83,100)}であった。なお、ノルニ

Table 7. Summary of Genetically Modified Plants for Human and Livestock Health and Phytoremediation from 2006 to 2010 (Countries & Categories)

国名 Countries	区分 Categories								
	機能性食品 Nutraceuticals	経口 ワクチン Oral vaccines	食用医薬 Edible curatives	ワクチン 抗原 Vaccine antigens	抗体医薬 Therapeutic antibodies	治療薬 Curatives	診断薬・試薬 Diagnostic agents & reagents	環境浄化 Phytoremediation	合計 Total
米国 USA	26	14	1	16	8	21	4	7	97
カナダ Canada	1	1		3	2	2	4	1	14
メキシコ Mexico		2							2
キューバ Cuba					1				1
ブラジル Brazil						1			1
英国 UK	4				5	3			12
フランス France	1	1				3			5
ドイツ Germany	13	1			3	3			20
オーストリア Austria					2				2
オランダ Holland					5				5
ベルギー Belgium					1				1
アイスランド Iceland						2	1		3
イタリア Italy		1		1	1	1			4
ギリシャ Greece					1				1
スペイン Spain	4	1		2	1			2	10
フィンランド Finland						1			1
スウェーデン Sweden		1							1
ロシア Russia		1		1		1			3
ハンガリー Hungary					1				1
トルコ Turkey								1	1
ヨルダン Jordan						1			1
イスラエル Israel	1					2		1	4
イラン Iran					1				1
サウジアラビア Saudi Arabia	1								1
南アフリカ South Africa				3					3
インド India	1	2		1				1	5
ベトナム Vietnam				1					1
オーストラリア Australia	2	1							3
韓国 South Korea	4	5		3	3	4		1	20
台湾 Taiwan	1	3						1	5
中国 China	20	12	1	2	2	10	2	7	56
日本 Japan	49	20	23	3	2	21	5	19	142
合計 Sum	128	66	25	36	39	76	16	41	427

The cases that extend over multiple countries were counted separately. Therefore the total number of cases (427) was higher than the actual number of cases (405).

Table 8. Summary of Genetically Modified Plants for Human and Livestock Health and Phytoremediation from 2006 to 2010 (Countries & Years)

国名 Countries	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	合計 Total
米国 USA	24	12	28	15	18	97
カナダ Canada	1	3	3	2	5	14
メキシコ Mexico	2					2
キューバ Cuba				1		1
ブラジル Brazil	1					1
英国 UK	3	1	2	2	4	12
フランス France	2		2		1	5
ドイツ Germany	7	4	4	2	3	20
オーストリア Austria			2			2
オランダ Holland	4	1				5
ベルギー Belgium			1			1
アイスランド Iceland					3	3
イタリア Italy	1		2	1		4
ギリシャ Greece	1					1
スペイン Spain	1	2	1	3	3	10
フィンランド Finland			1			1
スウェーデン Sweden				1		1
ロシア Russia	1				2	3
ハンガリー Hungary	1					1
トルコ Turkey					1	1
ヨルダン Jordan			1			1
イスラエル Israel			2		2	4
イラン Iran	1					1
サウジアラビア Saudi Arabia					1	1
南アフリカ South Africa	2	1				3
インド India	4		1			5
ベトナム Vietnam					1	1
オーストラリア Australia	2	1				3
韓国 South Korea	3	2	3	8	4	20
台湾 Taiwan	2			2	1	5
中国 China	16	10	5	10	15	56
日本 Japan	33	19	16	29	45	142
合計 Sum	112	56	74	76	109	427

The cases that extend over multiple countries were counted separately. Therefore the total number of cases (427) was higher than the actual number of cases (405).

コチン及びN'-ニトロソノルニコチン含量低下形質のタバコ⁶⁰は食用とするものではないが、口にくわえて吸う煙草の毒性低下のための開発なので本カテ

ゴリーとした。

Table 12 に経ロワクチンに関する情報の内容を示す。経ロワクチンでの使用例が多いのは、レタス

Table 9. Summary of Genetically Modified Plants for Human and Livestock Health and Phytoremediation from 2006 to 2010 (Edible Crops)

作物 Crops	区分 Categories								合計 Total
	機能性食品 Nutraceuticals	経口 ワクチン Oral vaccines	食用医薬 Edible curatives	ワクチン 抗原 Vaccine antigens	抗体医薬 Therapeutic antibodies	治療薬 Curatives	診断薬・試薬 Diagnostic agents & reagents	環境浄化 Phytoremediation	
アマ Flax	4		1						5
アビシニアガラシ Abyssinian mustard	1								1
アルファルファ Alfalfa		3							3
イチゴ Strawberry	2		7						9
イネ Rice	21	10	10	1		2	3	4	51
ウラルカンゾウ Chinese licorice						1			1
エンドウ Pea						1			1
オオアラセイトウ Chinese violet cress	1								1
オオムギ Barley		1				1	1		3
オリーブ Olive	2								2
オレンジ Orange	1								1
カランナ Indian mustard	1							1	2
キャッサバ Cassava	1								1
クレソン Water cress	1								1
ゴマ Sesame	3								3
コムギ Wheat	3								3
サツマイモ Sweet potato	1	1				1			3
サトウキビ Sugar cane	1								1
ジャガイモ Potato	3	9				3	2	1	18
ダイズ Soybean	10		3			1			14
テンサイ Sugar beet	1								1
トウモロコシ Corn	6	4			3	1	1		15
トマト Tomato	16	8			2	2			28
ナガバクコ <i>Lycium barbarum</i>		1							1
なたね Rapeseed	12							1	13
ニンジン Carrot	1	3				3			7
ハツカダイコン Radish		1							1
ヒマワリ Sunflower	2								2
ベニバナ Safflower	2								2
穀類 Grain	2								2
油糧作物 Oilseed crop	2								2
ラッカセイ Peanut	1					1			2
リンゴ Apple	1								1
レタス Lettuce	7	11	3			1			22
ロジオラ・サカリネンシス <i>Rhodiola sachalinensis</i>						1			1
小計 Subtotal	109	52	24	1	5	19	7	7	224

The cases that extend over multiple crops were counted separately.

Table 10. Summary of Genetically Modified Plants for Human and Livestock Health and Phytoremediation from 2006 to 2010 (Non-edible Crops)

作物 Crops	区分 Categories								合計 Total
	機能性食品 Nutraceuticals	経口 ワクチン Oral vaccines	食用医薬 Edible curatives	ワクチン 抗原 Vaccine antigens	抗体医薬 Therapeutic antibodies	治療薬 Curatives	診断薬・試薬 Diagnostic agents & reagents	環境浄化 Phytoremediation	
ウキクサ Lemna					3	1			4
カバノキ Birch								1	1
ケシ Opium poppy						1			1
クソニンジン <i>Artemisia annua</i>						2			2
サウスレア・ インボルクラタ <i>Saussurea involucrata</i>						1			1
シバ Lawny grass								1	1
シャリンバイ Yeddo hawthorn								1	1
シロイヌナズナ Thale cress	8	3			1	2	3	9	26
シンテッポウユリ Lily	1								1
スウェルチア・ムソティ <i>Swertia mussotii</i>						1			1
ゼニゴケ Liverwort						3			3
セリバオウレン <i>Coptis japonica</i>						2			2
タバコ(ウイルスベク ター含む) Tobacco (Including viral vector)	9	9	1	24	22	29	3	9	106
タルウマゴヤシ Barrel medic	1								1
トレニア Torenia								1	1
ニチニチソウ Madagascar periwinkle						2			2
ハルザキヤマガラシ Bittercress	1								1
ヒメツリガネゴケ <i>Physcomitrella patens</i>					1	1			2
ペチュニア Petunia	1							2	3
ヘビノネゴザ <i>Athyrium yokoscense</i>								1	1
ベラドンナ Belladonna						2			2
ポプラ Poplar								1	1
マダラハウチワマメ Tarwi						1			1
マリーゴールド Marigold								1	1
ミヤコグサ <i>Lotus corniculatus</i>	2	1							3
ヨシ Ditch reed								1	1
レンギョウ <i>Forsythia</i>	3								3
レンゲソウ <i>Astragalus</i>								1	1
植物(ウイルスベク ター含む) Plant (In- cluding viral vector)	17	7	1	11	5	14	6	8	69
小計 Subtotal	43	20	2	35	32	62	12	37	243
合計(食用+非食用) Total (Edible+Non-edible)	152	72	26	36	37	81	19	44	467

The cases that extend over multiple crops were counted separately.

Table 11. Summary of Genetically Modified Plants for Human and Livestock Health and Phytoremediation from 2006 to 2010 (Nutraceuticals)

作物 Crop	生産物・機能 Products・Function	開発国 Country	文献 Reference
アビシニアガラシ Abyssinian mustard	エイコサペンタエン酸 (EPA, 20:5n-3) Eicosapentaenoic acid	カナダ Canada	6
イチゴ Strawberry	ミラクリン (味覚修飾機能タンパク質) Miraculine (taste-modifying protein)	日本 Japan	7
イネ Rice	高トリプトファン High tryptophan	日本 Japan	8, 16, 20, 24, 27
イネ Rice	二次代謝物 Secondary metabolites	日本 Japan	9
イネ Rice	高コエンザイム Q10 High coenzyme Q10	日本 Japan	10, 11, 22
イネ Rice	β -コングリシニン (中性脂肪減少) β -conglycinin (reducing neutral fat)	日本 Japan	12
イネ Rice	鉄含量増加 Increasing iron content	中国 China	13
イネ Rice	米アレルギータンパク質 (16 kDa) 減少 Reducing rice allergic protein (16 kDa)	日本 Japan	14
イネ Rice	リンの生体内利用率増加 Enhanced bioavailability of phosphorus	日本 Japan	15
イネ Rice	鉄, 亜鉛, ニコチンアミン含量増加 Increasing iron, zinc and nicotianamine contents	中国 China	17
イネ Rice	高アミロース (難消化性) High amylose (non-digestible)	中国 China	18, 19
イネ Rice	カロテノイド Carotenoid	スペイン, ドイツ Spain, Germany	21
イネ Rice	微量金属イオン濃度の上昇 Increasing minor metal ions concentration	韓国 South Korea	23
イネ Rice	β -カロテン (ゴールデンライス) β -carotene (Golden rice)	米国, 中国 USA, China	25
イネ Rice	GABA 含量増加 Increasing GABA content	日本 Japan	26
イネ等 Rice, etc.	ピノレン酸, コニフェロン酸 Pinolenic acid, coniferonic acid	日本 Japan	28
オオアラセイトウ Chinese violet cress	エイコサペンタエン酸, ドコサペンタエン酸, ドコサヘキサエン酸 Eicosapentaenoic acid (EPA), docosapentaenoic acid (DPA), docosahexaenoic acid (DHA)	ドイツ Germany	29
オレンジ Orange	β -カロテン含量増加, キサントフィル含量の低下 Increasing β -carotene content, reducing xanthophyll content	スペイン Spain	30
カラシナ Indian mustard	γ -リノレン酸 γ -linolenic acid (GLA)	インド, 米国 India, USA	31
キャッサバ Cassava	シアン物の減少, タンパク質量の増加 Low cyanide, increasing protein content	米国 USA	32
クレソン等 Water cress, etc.	ビタミン C (L-アスコルビン酸) 含量増加 Increasing vitamin C (L-ascorbic acid) content	米国 USA	33
ゴマ Sesame	メチル化リグナン Methylated lignan	日本 Japan	34
コムギ Wheat	高アミロース (>70%, 難消化性デンプン) High amylose (non-digestible)	オーストラリア, 英国 Australia, UK	35
コムギ Wheat	N-アセチルグルコサミン誘導体, グルコサミノグリカン (ヒアルロナン) N-acetylglucosamine derivative, glucosaminoglycan (hyaluronan)	ドイツ Germany	36
コムギ Wheat	多糖アルタナン Polysaccharide alternan	ドイツ Germany	37
サツマイモ Sweet potato	10KD ゼイン 10KD Zein	中国 China	38
サトウキビ Sugar cane	イソマルツロース (代替甘味料) Isomaltulose (alternative sweetener)	オーストラリア Australia	39

Table 11. (Continued)

作物 Crop	生産物・機能 Products・Function	開発国 Country	文献 Reference
ジャガイモ Potato	ケトカロテノイド, アスタキサンチン Keto-carotenoid, astaxanthin	英国 UK	40
ジャガイモ Potato	β -カロテン含量増加 Increasing β -carotene content	米国 USA	41
ジャガイモ Potato	リンの生体内利用率増加 Enhanced bioavailability of phosphorus	台湾 Taiwan	42
シロイヌナズナ Thale-cress	シスバイシード (レスベラトロール配糖体) Cis-piceid (resveratrol glycoside)	中国 China	43
シロイヌナズナ Thale-cress	ビタミン E 含量増加 Increasing vitamin E content	中国 China	44, 45
シロイヌナズナ Thale-cress	脂肪酸組成の制御 Regulation of fatty acid composition	韓国 South Korea	46
シロイヌナズナ Thale-cress	フロフラン型リグナン (ゴマリグナン) Furofuran-type lignan (sesame lignans)	日本 Japan	47
シンテッポウユリ Lily	カロテノイド, ケトカロテノイド Carotenoid, keto-carotenoid	日本 Japan	48
ダイズ Soybean	高トリプトファン High tryptophan	日本 Japan	49
ダイズ Soybean	高 α -トコフェロール High α -tocopherol	米国 USA	50
ダイズ Soybean	高含硫アミノ酸貯蔵タンパク質 (SCMRP) High-sulfur-containing amino acid storage protein	中国 China	51
ダイズ Soybean	種子脂肪酸組成の改善 Improving seed fatty acid composition	米国 USA	52
ダイズ Soybean	フラボノイド組成改変 (ケンフェロール配糖体増加) Improving flavonoid composition (Increasing kaempferol glycoside)	日本 Japan	53
ダイズ Soybean	β カロテン含量増加 Increasing β -carotene	米国 USA	54
ダイズ Soybean	ω -3 脂肪酸増加, エイコサペンタエン酸 Increasing ω -3 fatty acid, eicosapentaenoic acid (EPA)	米国 USA	55
ダイズ等 Soybean, etc.	多価不飽和脂肪酸 (PUFAs, α -リノレン酸, ステアリド ン酸, エイコサペンタエン酸等) Poly unsaturated fatty acids (PUFAs, α -linoleic acid, stearidonic acid, eicosapentaenoic acid, etc.)	日本 Japan	56, 57
タバコ Tobacco	イソフラボン Isoflavone	米国 USA	58
タバコ Tobacco	高コエンザイム Q10 High coenzyme Q10	日本 Japan	59
タバコ Tobacco	ノルニコチン及び N'-ニトロソノルニコチン含量低下 Reducing nornicotine and N'-nitrosonornicotine (NNN)	米国 USA	60
タバコ Tobacco	トレオニン含量増加 Increasing threonine	英国 UK	61
タバコ Tobacco	クロロゲン酸含量増加 Increasing chlorogenic acid	中国 China	62
タルウマゴヤシ等 Barrel Medic, etc.	フラバン-3-オール合成 Flavane-3-ol synthesis	米国 USA	63
テンサイ等 Sugar beet, etc.	フラクトオリゴ糖 Fructooligo-sugar	日本 Japan	64
トウモロコシ Corn	19 及び 22 kDa ゼイン減少, リジン, トリプトファン, アスパラギン, アスパラギン酸, グルタミン酸の増加 Reducing 19 and 22 kDa zein, Increasing lysine, tryptophane, asparagine, asparaginic acid, glutamic acid	米国 USA	65
トウモロコシ Corn	高アミロース (難消化性) High amylose (non-digestible)	中国 China	66, 67
トウモロコシ Corn	β -カロテン, ビタミン C, 葉酸増加 Increasing β -carotene, vitamin C, folic acid	スペイン, ドイツ Spain, Germany	68
トウモロコシ Corn	ゼアキサンチン含量増加 Increasing zeaxanthin	スペイン, ドイツ Spain, Germany	69

Table 11. (Continued)

作物 Crop	生産物・機能 Products・Function	開発国 Country	文献 Reference
トマト Tomato	フェノール性化合物含量増加 Increasing phenolic compounds	フランス France	70
トマト Tomato	遊離アミノ酸含量増加, グルタミン酸含量増加 Increasing free amino acid content, increasing glutamic acid content	日本 Japan	71
トマト Tomato	ミラクリン (味覚修飾機能タンパク質) Miraculine (taste-modifying protein)	日本 Japan	72-75, 77-82
トマト Tomato	アスタキサンチン Astaxanthine	韓国 South Korea	76
トマト等 Tomato, etc.	ミラクリン (味覚修飾機能タンパク質) Miraculine (taste-modifying protein)	日本 Japan	83
トマト等 Tomato, etc.	プレニル化フラボノイド Prenylated flavonoids	日本 Japan	84, 85
なたね Rapeseed	シスパイシード (レスベラトロール配糖体) Cis-piceid (resveratrol glycoside)	ドイツ Germany	86
なたね Rapeseed	脂肪酸組成の制御 Regulation of fatty acid composition	米国 USA	87
なたね Rapeseed	高オレイン酸 High oleic acid	中国 China	88
なたね (カノーラ) Canola	リンの生体内利用率増加 Enhanced bioavailability of phosphorus	中国, 米国 China, USA	89
なたね Rapeseed	アスタキサンチン Astaxanthine	日本 Japan	90
なたね Rapeseed	オレイン酸含量増加, 多価不飽和脂肪酸含量低下, エルカ酸除去 Increasing oleic acid, reducing polyunsaturated fatty acid contents, eliminating erucic acid	中国 China	91
なたね等 Rapeseed, etc.	脂肪酸組成の制御 Regulation of fatty acid composition	ドイツ Germany	92
なたね等 Rapeseed, etc.	ケトカロテノイド (アスタキサンチン等) Keto-carotenoid (astaxanthine, etc.)	日本 Japan	93, 95
なたね等 Rapeseed, etc.	アスタキサンチン, β -カロテン Astaxanthine, β -carotene	日本 Japan	94
ニンジン Carrot	カルシウム含量増加 Increasing calcium content	米国 USA	96
ラッカセイ Peanut	アレルゲンタンパク質の除去 Eliminating allergic proteins	米国 USA	97
リンゴ Apple	シスパイシード (レスベラトロール配糖体) Cis-piceid (resveratrol glycoside)	ドイツ Germany	98
レタス Lettuce	カルシウム含量増加 Increasing calcium content	米国 USA	99
レタス Lettuce	ミラクリン (味覚修飾機能タンパク質) Miraculine (taste-modifying protein)	日本 Japan	100
レタス等 Lettuce, etc.	ゲニステイン (イソフラボン) Genistein (isoflavone)	中国 China	101
レタス等 (葉緑体) Lettuce (plastid), etc.	トコフェロール含量増加 Increasing tocopherol	日本 Japan	102
レンギョウ Forsythia	セサミン Sesamin	日本 Japan	103
レンギョウ Forsythia	フロフラン型リグナン (ゴマリグナン) Furofuran-type lignan (sesame lignans)	日本 Japan	104, 105
穀類 Grain	タンパク質改変 (消化性向上, 栄養向上, アミノ酸含量増加) Protein modification (improving digestion, fortifying nutrition, increasing amino acid contents)	米国 USA	106
油糧種子作物 Oilseed crop	長鎖不飽和脂肪酸 Long chain unsaturated fatty acid	英国 UK	107
油糧作物 Oil crop	アラキドン酸 Arachidonic acid	米国 USA	108
植物 (穀類) Plant (grain)	窒素含量増加 Increasing nitrogen content	米国 USA	109

Table 11. (Continued)

作物 Crop	生産物・機能 Products・Function	開発国 Country	文献 Reference
植物 Plant	油脂濃度増加, 脂肪酸組成改変 Increasing oil content, modifying fatty acid composition	ドイツ Germany	110
植物 Plant	ヘキソサミン (N-アセチルグルコサミン, N-アセチルグルコサミン-6-リン酸) Hexosamine (N-acetylglucosamine, N-acetylglucosamine-6-phosphate)	日本 Japan	111
植物 Plant	多価不飽和脂肪酸 Poly unsaturated fatty acids (PUFAs)	ドイツ Germany	112
植物 Plant	ヒアルロナン Hyaluronan	ドイツ Germany	113
植物 Plant	長鎖不飽和脂肪酸 (アラキドン酸, エイコサペンタエン酸) Long-chain polyunsaturated fatty acid (arachidonic acid, eicosapentaenoic acid)	ドイツ Germany	114
植物 Plant	トコフェロール Tocopherol	韓国 South Korea	115
植物 Plant	ステアリドン酸 Stearidonic acid	米国 USA	116
植物 Plant	ビタミン E Vitamin E	中国 China	117
植物 Plant	(不)飽和脂肪酸/油脂代謝物の増加又は改変 Increasing/modifying (un)saturated fatty acids/oil metabolites	中国 China	118
植物 Plant	ビタミン E Vitamin E	中国 China	119, 121, 126
植物 Plant	ビタミン E Vitamin E	米国 USA	120
植物 Plant	ステアリン酸含量増加, γ -リノレン酸含量増加 Increasing stearic acid, increasing γ -linolenic acid	米国 USA	122
植物 Plant	遊離 ϵ -, α -N-アセチルアミノ酸含量増加 Increasing free ϵ -, α -N-acetylamino acid content	米国 USA	123
植物 Plant	分岐アミノ酸含量増加 Increasing branched-chain amino acid	米国, サウジアラビア USA, Saudi Arabia	124
植物 Plant	極長鎖多価不飽和脂肪酸 Very-long-chain polyunsaturated fatty acids	イスラエル Israel	125

11 件, イネ 10 件, ジャガイモ 9 件, トマト 8 件である (Table 9 食用作物別集計参照). レタスはブタ浮腫病ワクチンに関するものが最も多く 8 件,^{182,185-191} イネはコレラワクチンに関するものが最も多く 8 件,^{132,133,135-140} ジャガイモは B 型肝炎ワクチンに関するものが最も多く 4 件¹⁴⁶⁻¹⁴⁹であった. 対象とした生産物・機能はインフルエンザウイルスに関するものが最も多く 11 件,^{132,133,135,140,141,144,145,150,152,156,181} ついでコレラトキシゲン D サブユニット (CTB) に関するものが 10 件^{132,133,135-140,163,179}で, そのうちの 5 件^{132,133,135,140,163}は経口コレラワクチンよりもむしろ CTB のアジュバンド効果を期待しての使用例であった.

Table 13 に食用医薬に関する情報の内容を示す. 食用医薬での使用例が多いのは, イネ 10 件, イチゴ 7 件である (Table 9 食用作物別集計参照). イネはスギ花粉症緩和米に関するものが最も多く 3

件^{203,205,207}で, イチゴでは 7 件中 6 件はヒトアディポネクチン生産¹⁹⁵⁻²⁰⁰に関するものであった.

Table 14 にワクチン抗原に関する情報の内容を示す. ワクチン抗原は抽出精製後の使用を目的とするため, GM 植物の作出が容易なタバコの使用件数が多く使用作物 36 件中 24 件²³⁰⁻²⁵³がタバコである (Table 10 非食用作物別集計参照). またタバコは, 組換え遺伝子が挿入された GM 植物ウイルスの感染によるタンパク質の生産方法 (植物の葉に植物ウイルスを感染させるとウイルスの感染に伴い, 組換えタンパク質が植物の葉内で生産される. 植物はかならずしも GM 植物でなくてもよく, 非 GM 植物も用いられる) が確立されているため, 上記 24 件中, 12 件^{222,231-233,236,239,243-245,247,249,251}は GM 植物ウイルスによる生産である. この GM 植物ウイルスによる組換えタンパク質生産は, 厳密に言えば GM 植物での生産ではないが, 組換え遺伝子が用い

Table 12. Summary of Genetically Modified Plants for Human and Livestock Health and Phytoremediation from 2006 to 2010 (Oral Vaccines)

作物 Crop	生産物・機能 Products・Function	開発国 Country	文献 Reference
アルファルファ Alfalfa	トリレオウイルス構造タンパク質 SigmaC Avian reovirus σ C protein	台湾 Taiwan	127
アルファルファ Alfalfa	<i>Mannheimia haemolytica</i> A1 (ウシ肺炎性パスツレラ症の原因菌) GS60 (54) 外膜リポタンパク質 Calf pneumonic pasteurellosis <i>Mannheimia haemolytica</i> A1GS60 (54) outer membrane lipoprotein	カナダ Canada	128
アルファルファ Alfalfa	エキノコッカス Eg95-EgA31 融合タンパク質 <i>Echinococcus granulosus</i> Eg95-EgA31 fusion protein	中国 China	129, 130
イネ Rice	ニューキャッスル病ウイルス融合タンパク質 Newcastle disease virus fusion glycoprotein	中国 China	131
イネ Rice	インフルエンザウイルスヘマグルチニン HA1+コレラ毒素 B サブユニット (CTB), CTB Influenza virus hemagglutinin HA1+cholera toxin B subunit, CTB	日本 Japan	132, 133, 135, 140
イネ Rice	ライム病ボレリア菌外膜タンパク質 A (OspA) Lyme disease <i>Borrelia</i> OspA proteins	米国 USA	134
イネ Rice	コレラトキシン B サブユニット (CTB) Cholera toxin B subunit (CTB)	日本 Japan	136-139
オオムギ Barley	トリインフルエンザウイルス Avian Influenza virus HA1-m	ドイツ Germany	141
ジャガイモ Potato	ロタウイルスワクチン Rotavirus subunit vaccine	中国 China	142
ジャガイモ Potato	ニワトリロイコチトゾーン原虫病ワクチン Chicken leucocytozoonosis vaccine	日本 Japan	143
ジャガイモ Potato	高病原性トリインフルエンザウイルス (HPAI) ヘマグルチニン (HA) 及び核タンパク質 (NP) Highly pathogenic avian influenza virus (HPAI) hemagglutinin (HA) and nucleoprotein (NP)	日本 Japan	144, 145, 150
ジャガイモ Potato	B型肝炎ウイルス表面抗原 (HBsAg) Hepatitis B virus (HBV) surface protein antigen (HBsAg)	米国 USA	146-149
植物 Plant	腸管毒素産生性大腸菌フィンブリア附着因子 FaeG Enterotoxigenic <i>Escherichia coli</i> fimbrial adhesin FaeG	中国 China	151
植物 Plant	トリインフルエンザウイルスヘマグルチニン (NAIVHA) Avian influenza virus hemagglutinin	中国 China	152
植物 Plant	ウサギ出血病ウイルス (RHDV) 構造タンパク質 VP60 Rabbit haemorrhagic disease virus structural protein VP60	インド India	153
植物 Plant	アメーバ赤痢病原体 LecA タンパク質 Amebiasis <i>Entamoeba histolytica</i> LecA protein	米国 USA	154
植物 Plant	豚腸毒素産生性大腸菌 (987P) 線毛末端タンパク質 Pig enterotoxigenic <i>Escherichia coli</i> (987P) fimbrial terminal protein gene (FasG)	韓国 South Korea	155
植物 Plant	トリインフルエンザウイルスヘマグルチニン (HA), ノイラミニダーゼ (NA) Avian influenza virus hemagglutinin (HA), neuraminidase (NA)	韓国 South Korea	156
植物 Plant	ペスト菌フラクション 1 外被膜タンパク質 (抗原 F1), ペスト菌低カルシウム反応性 V (LcrV 又は V 抗原) Plague (<i>Yersinia pestis</i>) fraction 1 outer capsular protein (antigen F1) F1, low-calcium response V (LcrV or V antigen)	米国 USA	157

Table 12. (Continued)

作物 Crop	生産物・機能 Products・Function	開発国 Country	文献 Reference
シロイヌナズナ Thale-cress	イヌバルボウイルス (CPV) VP2 タンパク質抗原ペプチド (2L21) + p53 転写因子 4 量体ドメイン (TD, 41 アミノ酸) Canine parvovirus (CPV) VP2 protein highly immunogenic peptide (2L21), 41-aminoacid long tetramerization domain (TD) from the transcriptional factor p53	スペイン Spain	158
タバコ Tobacco	腸管出血性大腸菌不活化志賀型毒素 A サブユニット Enterohemorrhagic <i>Escherichia coli</i> inactivated Shiga toxin type 2 A subunit	米国 USA	159
タバコ Tobacco	ピロリ菌熱ショックタンパク質 A <i>Helicobacter pylori</i> heat-shock protein A (HspA) protein	中国 China	160
タバコ Tobacco	ブタ胸膜肺炎菌外毒素 ApxIIA Porcine pleuropneumonia bacterial exotoxin ApxIIA	韓国 South Korea	161
タバコ Tobacco	狂犬病ウイルスキメラ G タンパク質 Rabies virus chimeric G protein	インド India	162
タバコ Tobacco	コレラトキシン B サブユニット-ヒト免疫不全ウイルス 1 (HIV-1) gp41 膜近位融合タンパク質 (CTB-MPR649-684) Cholera toxin B subunit (CTB)-human immunodeficiency virus 1 (HIV-1) membrane proximal (ectodomain) region of gp41	米国 USA	163
タバコ Tobacco	ブタ豚繁殖・呼吸障害症候群ウイルス (PRRSV) 外膜糖タンパク質 5 (GP5) Porcine reproductive and respiratory syndrome virus (PRRSV) envelop glycoprotein 5 (GP5)	台湾 Taiwan	164
タバコ等 Tobacco, etc.	B 型肝炎表面抗原 (HBsAg) + ヒト免疫不全ウイルス (HIV-1) ポリエピトープ Hepatitis B surface antigen (HBsAg) + human immunodeficiency virus 1 (HIV-1) poly-epitope	フランス, イタリア France, Italy	165
トウモロコシ Corn	ニューキャッスル病ウイルス融合タンパク質 Newcastle disease virus fusion protein	メキシコ Mexico	166
トウモロコシ Corn	大腸菌易熱性腸管毒素 B サブユニット (LT-B) <i>Escherichia coli</i> heat-labile holotoxin (LT) B subunit	米国 USA	167, 168
トウモロコシ Corn (sweet corn)	ブタ熱ウイルス (CSFV) 外核グライコプロテイン E2 Swine fever virus (CSFV) envelope glycoprotein E2	中国 China	169
トマト Tomato	ヒト免疫不全ウイルス (HIV-1) ENV, GAG エピトープ + B 型肝炎ウイルス表面抗原 Human immunodeficiency virus 1 (HIV-1) ENV and GAG epitopes + hepatitis B virus (HBV) surface protein antigen (HBsAg)	ロシア Russia	170
トマト Tomato	ロタウイルス VP2, VP6 Rotavirus capsid proteins VP2, VP6	メキシコ Mexico	171
トマト Tomato	ペスト菌 F1-V 抗原 Plague F1-V antigen fusion protein	米国 USA	172
トマト Tomato	エンテロウイルス 71 (手足口病) VP1 Enterovirus 71 (EV71) (hand-foot-and-mouth disease) VP1 protein (coat protein)	台湾 Taiwan	173
トマト Tomato	B 型肝炎ウイルス表面抗原 Hepatitis B surface antigen (HBsAg)	中国 China	174
トマト Tomato	マラリアメロゾイト表面タンパク質抗原 (MSP-1, MSP-2, MSP-3) Malaria merozoite surface protein (MSP-1, MSP-2, MSP-3)	米国 USA	175
トマト Tomato	腸管出血性大腸菌 O157 : H7 インチミン Enterohemorrhagic <i>Escherichia coli</i> O157 : H7 intimin	米国 USA	176
トマト他 Tomato, etc.	C 型肝炎ウイルスワクチン Hepatitis C virus vaccine	中国 China	177
ナガバクコ <i>Lycium barbarum</i> L.	ヒト免疫不全ウイルス (HIV) カプシドタンパク質 (CA) Human immunodeficiency virus (HIV) capsid protein (CA)	中国 China	178

Table 12. (Continued)

作物 Crop	生産物・機能 Products・Function	開発国 Country	文献 Reference
ニンジン Carrot	コレラトキシン B サブユニット (CTB) Cholera toxin B subunit (CTB)	韓国 South Korea	179
ニンジン等 Carrot, etc.	ヒト免疫不全ウイルス 1 (HIV-1) サブタイプ Cp24 タンパク質 Human immunodeficiency virus 1 (HIV-1) subtype C p24 capsid protein	スウェーデン Sweden	180
ミヤコグサ <i>Lotus corniculatus</i> L.	トリインフルエンザワクチン抗原 Avian influenza vaccine antigen	中国 China	181
レタス Lettuce	ブタ浮腫病ワクチン (志賀毒素 2e 型) Swine edema disease vaccine (Shiga toxin 2e, Stx2e)	日本 Japan	182
レタス Lettuce	大腸菌易熱性腸管毒素 B サブユニット (LT-B) <i>Escherichia coli</i> heat-labile enterotoxin B subunit	韓国 South Korea	183
レタス Lettuce	麻疹ウイルスヘマグルチニン (MV-H) Measles virus hemagglutinin (MV-H) protein	オーストラリア Australia	184
レタス Lettuce	ブタ浮腫病ワクチン (腸管出血性大腸菌毒素 B サブ ユニット) Swine edema disease vaccine (enterohemorrhagic <i>Es-</i> <i>cherichia coli</i> Shiga toxin 2e B subunit, Stx2eB)	日本 Japan	185-191
レタス等 Lettuce, etc.	SARS-Cov スパイクタンパク質 (S1) SARS-CoV spike protein (S1)	中国 China	192

られているため、本研究の対象の情報とした。生産物・機能で最も多いのはインフルエンザワクチンの9件^{222,226-229,234,236,240,248}であった。

Table 15 に抗体医薬に関する情報の内容を示す。ワクチン抗原と同様に、抗体医薬も抽出精製後の使用を目的とするため、タバコの使用件数が多く使用作物 37 件中 22 件^{251,263-282,287}がタバコである (Table 10 非食用作物別集計参照)。このうち、ワクチン抗原と同様に、GM 植物ウイルスのタバコへの感染を利用したものが4件^{251,276,279,280}である。生産物・機能で最も多いのは抗腫瘍効果を示す抗体の7件^{254,255,258,260,261,265,288}であった。なお、抗ダイオキシン単鎖抗体^{279,280}やキュウリモザイクウイルス組換え抗体及びトマトスポットウイルス組換え抗体²⁸⁷は、試薬としての利用を目的とされていたが、生産物が抗体であるため、この範囲に分類した。

Table 16 に治療薬に関する情報の内容を示す。前述と同様に治療薬も抽出精製後の使用を目的とするためタバコの使用件数が多く、使用作物 81 件中 29 件^{280,281,302,321-346}がタバコである (Table 10 非食用作物別集計参照)。このうち、ワクチン抗原と同様に、GM 植物ウイルスのタバコへの感染を利用したものが7件^{280,321,326,336,337,340,344}である。生産物・機能が動物由来の高機能タンパク質 (ホルモン、酵

素、オータコイドなど)ではなく、薬用植物が元来生産する薬用成分 (二次代謝物) 生産のため、薬用植物が使用された件数は14件^{292,295-298,303,304,317,350,351,355,356,358,360}であり、このうち7件^{295,296,298,317,350,355,360}の開発国は、薬用植物資源が豊富な中国であった。

Table 17 に診断薬・試薬に関する情報の内容を示す。本カテゴリーでの使用頻度が高い作物はイネ3件³⁶¹⁻³⁶³シロイヌナズナ3件³⁷³⁻³⁷⁵タバコ3件^{363,374,375}である (Tables 9 and 10 作物別集計参照)。本カテゴリーには、GM 植物により生産された酵素、タンパク質などを診断薬・試薬として用いる目的だけでなく、GM 植物そのものが診断薬・試薬として機能するように研究・開発されたものも含めた。^{367,373-375}例えば文献 367 は、生育環境にダイオキシンや芳香族炭化水素誘導体などの環境負荷化学物質があると花の色が変化する植物で、それらの検出に有用な植物の研究・開発である。同様に、文献 373 はアルキルフェノール等の内分泌攪乱物質のレベルをモニターするシロイヌナズナ、文献 374 と 375 は残留性有機汚染物質 (POPs) による環境汚染、特にダイオキシン類による汚染実態をモニターするタバコ等の研究・開発である。これらは環境浄化に関連した研究・開発であるが、直接環境を浄化する目的ではないため、本カテゴリーとした。