人工種子技術の開発の現状と問題点

鎌田 博*
立川佳伸

植物の組織培養技術や遺伝子組換え技術の進歩により、これまでにない新しい植物を育成し、それを大量繁殖することが可能になりつつある。特に、組織培養による植物個体再分化を利用した優良種苗の大量繁殖とその農業での利用においては、人工種子の開発が強く望まれている。理想的な人工種子が開発されれば、種苗の流通ばかりでなく、農業のさまざまな場面に大きな変革をもたらすものと予想される。人工種子技術の現状とその問題点を概説し、その解決に向けて進められている研究、特に不定胚形成機構について解説する。

植物の繁殖法は植物種により多様であるが、種子により繁殖するもの（種子繁殖）と、塊茎・塊根などの栄養器官で繁殖するもの（栄養繁殖）の2つに大別できる。一般的に、種子は大量に得られ、乾燥に耐えるなど貯蔵性・輸送性に優れていることから、農業や園芸に広く利用されている。商業的に用いられる種子には、高い発芽率と遺伝的形質の安定性が求められるが、利用価値の高い種子を生産するためには、安定した母本となる品種の育成や隔離した環境での交配など、長い年月と特殊な採種体系が必要であり、種子利用の簡便さとは裏腹にその作出には多大な労力が要求される。また、自家不和合性を示す植物では純系の維持がきわめて困難であるといった問題も抱えている。

一方、栄養繁殖を行なう植物種では、優れた形質を持つ個体が発見されれば品種改良を行なうことなく、それらのクローンを得ることができる。しかし、栄養繁殖ではその繁殖率は一般的に低く、クローン個体の効率的な生産はあまり期待できない。また、このような栄養繁殖性植物では、一定以上の大きさの栄養繁殖器官を輸送する場合が多く、大量輸送には適さないなど、産業的にも不利な点が多い。

ところで、植物組織培養を中心とするバイオテクノロジー技術は近年飛躍的に進歩し、細胞融合

や遺伝子組換え技術と組み合わせることにより、新品種の開発や優良品種の作出とその大量増殖が可能となってきた。植物の組織培養では、一般的に、植物ホルモン、特にオーキシンとサイトカイニンの量的なバランスが器官分化の制御に関係していると考えられており、実際、適切な植物ホルモン処理を行なうことで個体再分化がみられる例が多い。

個体再分化には、不定胚によるものと不定芽によるものがある。後者の場合、処理するサイトカイニン濃度が高いときには高頻度で不定芽形成が起こる傾向があるが、高濃度の植物ホルモン処理や長期間の培養は遺伝的変異（ソマクロン変異）をひき起こす原因となっており、均質な種苗の生産には不適と考えられる。一方、不定胚はソマクロン変異が少なく、遺伝的あるいは形態的に均質な材料を大量に得ることができる利点があり、優良種苗の大量繁殖に利用可能と考えられる。

植物組織培養を利用した優良種苗の大量繁殖については、すでに実用化されているものもあり、イチゴやカーネーションにおけるウイルスフリー株の作出とその繁殖、あるいはランのメリクロン培養などは一般にも広く知られている。しかし、組織培養を行なうためにはクリーンベンチや培養室などの無菌操作のための機器や施設ばかりでなく、インキュベーターやシェーカーなどの培養機器も必要であり、生産コストが高くなってしまい、実際に商業化に成功しているものは、商品価

Present Situation and Problems in Artificial Seed Technology

* Hiroshi KAMADA, Yoshinobu TACHIKAWA, 筑波大学遺伝子実験センター

図 1 ■ 理想的な人工種子の構造

A：乾燥に耐えられる外膜，B：ゲル（アルギン酸カルシウムなど），C：不定胚の発達に必要な成分や発芽調節剤などを含む部分（人工胚乳），D：植物体へと発達する不定胚

値の高い高価な植物に限定されている。また、組織培養によって育成した植物体は一般的に乾燥に弱く、培養器からの鉢出しに際しては、徐々に湿度を下げて外部環境に馴らすための順化処理が必要である。この順化処理が難しいために、組織培養によって多くの植物体が分化するものの苗の供給ができない例、また順化処理に手間暇がかかるおかげでコスト高となり商業化できない例も多い。

このような現状の中で注目されているのは、植物体に再生できる能力を持つ組織片や器官などを適切なカプセル化剤で包埋することによって作出される人工種子であり、商業化への応用も期待されている。人工種子は通常の種子と同様にコンパクトにまとめることができ（図1）、輸送性に富むばかりでなく、組織培養技術を利用することで交配による採種を行なうことなく優良クローン的大量繁殖が可能となるなど、種子繁殖と栄養繁殖の長所を併わせ持たせることができる。理想的な人工種子が作出され、一般市場で利用されるような実用段階に至れば、農業生産に大きな革命をもたらすと思われる。そこで本稿では、人工種子開発の現状とその問題点について概説するとともに、理想的な人工種子を作製するために行なわれている研究の現状を紹介することとする。

人工種子開発の現状

人工種子とは、組織培養によって作製した不定

胚や不定芽などの将来植物体へと発達する組織・器官を、アルギン酸カルシウムなどのゲル中に包埋し、種子の機能を持たせることで圃場に直接播種できるようにしようとするものであり、1978年に米国カリフォルニア大学の Murashige 教授によってその概念が初めて提唱された⁽¹⁾。その後、米国のプラントジェネティックス社が特許を申請し、わが国ばかりでなく世界中で活発な研究が行なわれている⁽²⁾。わが国では、1986年にライオン（株）が人工種子の製法・封入剤・保湿剤などに関する特許を申請したのをはじめとし、キリンビール（株）もプラントジェネティックス社と技術提携し、1988年にはレタスとセロリに関する人工種子の成果が公表された。

このような人工種子開発の流れの中では、プラントジェネティックス社が開発したアルギン酸カルシウムゲル中に不定胚を封入した人工種子が研究の主流となった（図2）。しかし、開発当初に作製された人工種子は乾燥にきわめて弱く、高湿度条件下でも発芽率が低いなどの問題点があった。このため、後述するような不定胚の誘導条件や不定胚の成熟を促す条件などさまざまな検討を進めるとともに、アルギン酸カルシウムの外側にさらに適当なコーティング剤で覆うなどの処理により乾燥に耐えるための工夫がなされた。不定胚の発芽率を高める試みは、当初より用いられていたアルファルファを用いて行なわれ⁽³⁾、湿度を保った温室中で発芽率の高い不定胚を得ることに成功したが、他の植物種にも適用可能か否かについては報告がない。

一方、乾燥耐性を得るための最外層のコーティング剤としては、Elvax 460 ポリマーが用いられ、1日間は確実に乾燥を防止できるまでには至ったが、圃場での使用においては発芽率が低く⁽³⁾、実用的な段階には未だ至っていない。わが国においても、乾燥を防ぐためのコーティング剤の開発は多くの研究者によって進められているが、乾燥耐性を強くするあまり物理的強度が増しすぎると、内部で発達してきた植物自身の力ではこの膜を破れなくなり、発芽しなくなるなどの問題点もあり、未だに実用的なものは開発されていない。

図 2 ■ 不定胚をアルギン酸カルシウムゲル中に包埋する人工種子の簡便な作製法

これまでの研究例を見てくると、不定胚の発芽率の向上と乾燥耐性獲得の問題が人工種子開発の上からは最も大きな課題であることが明らかである。不定胚の発芽率の向上のためには、後述するように不定胚の誘導条件そのものの検討が進められている。また、コーティング剤を用いず、不定胚自身に乾燥耐性を持たせることで人工種子の乾燥耐性を達成しようとする試みも行なわれている⁽⁴⁾。不定胚自身が耐乾性を示すようになれば、従来のゲル化剤を用いた方法とはまったく異なる組成の人工種子を開発できる可能性もある。後述するように、実際、ニンジン不定胚をアブシジン酸で処理した後、polyox WSR-N 750 でコート（ウエハー状に）し、乾燥させた後に再度吸水させたところ、40% の不定胚が生き残ったとする報告もある⁽⁵⁾。

このように、人工種子の開発にはさまざまな問題点が残されており、その解決に向けた多くの研

究が進められている。表 1 に実用的な人工種子を開発するために必要な課題とその解決のための研究方向を示したが、以下にその最も大きな課題と

表 1 ■ 実用的な人工種子を開発するための課題と今後の研究方向

研究課題	今後の研究方向
有用植物や有用品種での効率的な不定胚誘導技術の開発	不定胚形成機構の解明
不定胚形成能を保持する細胞の簡便な検出法の開発	マーカータンパク質の同定あるいはマーカー遺伝子のクローニング
不定胚形成能を保持する細胞の長期維持	凍結保存法の開発および不定胚形成能の解明
不定胚の成熟や乾燥耐性の獲得などの不定胚の質の改善	アブシジン酸の作用機作の解明および種子形成機構の解明
工業化のための不定胚の同調化と高密度培養法の確立	新しいファーマンターの開発およびコンディショニングなどの阻害要因の解明
人工種子自身の乾燥耐性の獲得	コーティング剤の開発
作製した人工種子の保存および輸送の簡便化	容器開発および発芽制御物質
付加価値の付与	根粒菌など

なっている不定胚に関する研究の実状を述べることにする。

不定胚形成に関する研究の現状

不定胚とは、本来胚になるはずではない組織や器官などから、受精することなく受精胚と類似の形態変化を経て形成されるものであり、種子中で形成される受精胚とは区別される。1958年にアメリカの Steward らとドイツの Reinert がニンジン根の培養細胞から不定胚誘導に成功して以来、さまざまな植物種において不定胚の誘導系が確立され、1989年現在、56科161属243種の植物で成功したと報告されている。不定胚誘導系は、一度特定の機能を持つように分化した体細胞が、培養によって脱分化し、さらに新たな胚発生を開始していく様子を直接観察できる系であり、植物における分化全能性を如実に示すものとして注目されてきた。また、こうした不定胚では均一な材料を大量に得ることができるため、胚発生研究のモデル系として利用されているほか、大量増殖、特に人工種子の開発に向けた研究が活発に行なわれている。

最もよく研究されているニンジン根の不定胚誘導においては、発見当初、不定胚形成に有効な因子ははっきりとはわからず、ココナッツミルク中には含まれる未知の因子が不定胚誘導に働いているのではないかと考えられていた。しかし、その後の研究により、植物ホルモンの一種であるオーキシンが有効であり、不定胚形成能を持った細胞 (embryogenic cell, 以下 EC と略す) を誘導する際、その存在が不可欠であることが判明した。さらに、EC が胚としての形態分化を開始するためには、オーキシンを除く（あるいは低濃度にする）ことが必要であることも確かめられた。

不定胚は受精胚と類似の特徴的な形態変化を示すが、不定胚の形成に至る一連の過程は、EC の誘導期と胚としての形態が分化・発達する過程に大別できる (図3)。後者はさらに、細胞分裂が盛んに行なわれて球状胚が形成される段階、外見的变化が顕著に見られる球状胚から心臓型胚へと発達する段階、および心臓型胚から魚雷型胚へと発達する段階、魚雷型胚が成熟して発芽していく段階に分けて考えることができる。そこで、以下に各過程における研究の現状を紹介する。

図3 ■ ニンジンにおける不定胚形成能を持つ細胞 (EC) の誘導と EC からの不定胚の発達の模式図

1. 効率的な不定胚誘導に必要な不定胚形成能の獲得に関する研究の現状

これまでに数多くの植物種において不定胚の形成が報告されているものの、実際の農業で現在使われている作物や品種では不定胚が誘導されていないものも多く、不定胚形成が報告されているものであっても形成される不定胚の数が少ないものも多い。人工種子技術を実用的なものとするためには、このような実用的な植物における効率的な不定胚誘導法の開発が必要不可欠であり、そのためには、これまでに報告された効率的な不定胚誘導系を詳細に解析し、不定胚の誘導の一般的な機構を解明する必要がある。

不定胚形成能を有する EC を誘導する際にはオーキシンが必要不可欠であると先に述べたが、オーキシンの中でも除草剤として用いられる 2,4-D や 2,4,5-T、あるいは Dicamba などの合成オーキシンはその誘導活性が強いものの、伸長成長などのいわゆるオーキシン活性の強い天然オーキシンであるインドール酢酸 (IAA) は 10 mg/l 程度の高濃度でなければ EC を誘導できない。このようなオーキシンの種類による EC 誘導活性の違いは、IAA が分解されやすいのに対し、上述した合成オーキシンが分解されにくいことによるとする説明がなされている。

この点に関して、Ti プラスミド T-DNA 上に存在する IAA 合成酵素遺伝子を導入することで生体内オーキシン含量を高めたニンジン細胞の EC 誘導能が調べられた。このようなニンジン細胞では、トリプトファンからの IAA 合成活性はきわめて高いものの、合成された IAA がすぐに結合型 (IAA-aspartate) へと転換されてしまい、遊離の IAA 含量は高まらず⁽⁶⁾、結局、生体内で IAA 含量が高まるのが EC の誘導に直接影響するかどうかは不明のままである。しかし、細胞外からとり込ませた IAA もすばやく結合型 IAA へと転換されることから、高濃度 IAA で処理することが生体内 IAA 含量を高めるとは考えにくく、他の説明が必要であろう。

ところで、先述したように、強い除草作用を持つ 2,4-D のような物質が強い EC 誘導活性を示

すことから、2,4-D のような物質はオーキシンとしてではなくストレスとして働き、その結果、EC が誘導されると考えることもできる。そこで、さまざまなストレスの不定胚誘導に対する効果が検討された⁽⁷⁾。その結果、オーキシンなどの植物ホルモンを含まず、高濃度のショ糖や食塩あるいは塩化カドミウムのような重金属を含む培地で、ニンジン実生の成長点を含む頂芽領域あるいは子葉切片を一定期間培養した後、植物ホルモンを含まない通常の培地に移植したところ、不定胚が形成された。さらに、ニンジン種子を高濃度の次亜塩素酸溶液で長時間滅菌した後、植物ホルモンを含まない培地に置床したところ、種子あるいは発芽した実生上に不定胚が形成された。また、未熟花粉からの半数性不定胚形成系においても、西洋ナタネでは高温処理が、タバコにおいては栄養飢餓処理と高浸透圧処理が、不定胚形成能の獲得に重要であることが知られている⁽⁸⁾。このような結果は、不定胚形成能の獲得、すなわち特定の機能を持つようにすでに分化した細胞が脱分化して新たに胚発生の能力を獲得する過程において、ストレスが重要な因子となっていることを示唆している。

植物種によっては、オーキシン以外の植物ホルモンが不定胚の誘導に有効であるとする報告もあり、コーヒーやサツマイモなどではサイトカイニンの単独処理で不定胚が誘導される。このような例では、ストレスの効果が調べられておらず、不定胚形成能の誘導機構を探り、一般的な結論を得ることは今後の重要な研究課題である。

植物ホルモンを用いる不定胚誘導系においては、誘導に用いる植物ホルモンが不定胚形成ばかりでなく、細胞の他の生理作用にも大きな影響を及ぼすことから、不定胚形成能の獲得に関与する変化のみを検出することは困難であった。しかし、上述したような各種ストレス処理による不定胚形成が可能となったことより、今後は不定胚形成能の獲得に直接関与するタンパク質や遺伝子を単離・解析することも可能である。

ところで、このような各種方法で誘導したニンジン不定胚をアルギン酸カルシウム中に包埋して

図 4 ■ 人工種子とその発芽

左：ニンジン不定胚をアルギン酸カルシウムゲル中に包埋した人工種子。中：2,4-D で誘導した不定胚で作製した人工種子の発芽。発芽が悪く、正常な実生にならない。右：塩化カドミウムで誘導した不定胚で作製した人工種子の発芽。発芽が良好であり、子葉や根が伸びている。

作製した人工種子を無菌条件下で播種したところ、2,4-D 処理によって作製した不定胚では正常な実生へと発達する率（実生への転換率）が低く、逆に塩化カドミウムや高濃度ショ糖などで誘導した不定胚では実生への転換率が高かった（図 4）⁽⁹⁾。また、アルファルファでは、高濃度の 2,4-D 処理によって培養片当たりの不定胚形成数が増加するものの、このような不定胚を用いて作製した人工種子の実生への転換率は低い。一方、不定胚形成数は少ないものの低濃度 2,4-D によって作製した不定胚を用いた場合には実生への転換率は高い。不定胚形成能の誘導に用いた条件の違いが、どのような機構を介してその後の不定胚の発達に影響を及ぼすかについてはまったく解明されておらず⁽¹⁰⁾、今後の重要な研究課題であるが、不定胚形成能の誘導、すなわち EC の誘導に用いる条件は EC から発達する不定胚の質に大きな影響を及ぼすものであり、人工種子の開発に際しては十分考慮する必要がある。

2. EC の維持・増殖の制御

人工種子を商業的に利用するためには不定胚を工業的に大量に育成するための技術開発が必要となり、現在研究者の目と勘で処理している部分を

機械化あるいは一般的に検出できるものとする必要がある。なかでも、EC は不定胚の原材料であり、EC であることを検出する方法を確立することはきわめて重要である。これまでの研究では、EC であることの目安として細胞塊の色や形態（たとえば、ニンジンでは細胞質に富んだ細胞からなる黄色粒状カルス）など曖昧な指標を用いており、このような指標は植物種によってはまったく異なるため、あてにはならない。また、EC を長期間継代培養していると徐々に不定胚形成率が低下し、不定胚の発達も悪くなり、最後には不定胚がまったく形成されなくなってしまう。このような不定胚形成能の低下もこれまでは研究者の経験に基づく勘で判断し、一定期間の継代培養後には古い EC を捨て、新たな EC を植物組織から再誘導して用いていた。このような状況では不定胚形成を工業化することは困難であり、EC を特徴づける何らかの一般的な指標が必要である。

不定胚形成能に関する分子生物学的な研究が進むにつれ、EC にのみ検出され、不定胚形成能を持たない細胞（non-embryogenic cell, 以下 NC と略す）・組織・器官では検出されないタンパク質が見いだされている。ニンジンでは 31 kD の分子量を持つタンパク質が EC でのみ検出され、

ECP 31 と名づけられた⁽¹¹⁾。この ECP 31 に対応する cDNA もすでにクローン化されており⁽¹²⁾、その機能は現在不明であるものの EC を検出するマーカーとして利用することは可能である。類似の研究は他の植物種でも進められており⁽¹⁰⁾、近い将来には EC に特徴的なタンパク質や遺伝子をプローブとして用いることで誰でも容易に EC を検出でき、不定胚形成の工業化に向けた制御が可能となる。

不定胚形成能に関与していると思われるタンパク質は、上述の例以外にも、細胞外タンパク質として培地中に検出されるものもある⁽¹³⁾。しかし、このようなタンパク質の真の生理機能は現在でも不明であり、今後のさらなる研究が待たれる。

一方、EC で特異的に転写されている遺伝子のクローニングも活発に行なわれているが、EC と EC から発達してくる不定胚の間で本質的な違いが検出されない例が多い⁽¹⁰⁾。このことは、EC においてすでに不定胚形成のプログラムが進行しているのではないかとの疑問を抱かせるものであり、胚発生の分子機構を解明するためにも明らかにしなければならない重要な問題である。

3. 不定胚の発達の制御

EC から不定胚を分化・発達させるためには植物ホルモンなどを含まない通常の培地に移植する必要があるが、多くの植物では、培地中に還元型窒素を添加しておく必要がある。EC の維持には必ずしも還元型窒素を必要としないが、不定胚の発達時に還元型窒素を必要とする理由は完全には明らかにされていない。ニンジンでは、不定胚発達の初期に硝酸還元酵素の活性

が著しく低下し、窒素源として硝酸を利用できなくなるためであると説明されている。しかし、アンモニウムイオンよりもグルタミン、グルタミン酸、アラニンなどのアミノ酸を添加したほうが不定胚の形成数ばかりでなく、不定胚の発達も促進されることから⁽¹⁴⁾、グルタミン合成酵素なども関与していると考えられ、不定胚発達時の窒素代謝を解明することが必要であろう。いずれにしても、窒素源を適切に組み合わせて利用することで不定胚の発達を人為的に制御でき、不定胚の質も高めることができるため、窒素源の選択は人工種子の開発においては重要な課題である。

一方、液体培地を用いて EC から不定胚を発達させる場合、EC の大きさや植え込む EC の細胞

図 5 ■ ニンジンにおける不定胚の誘導法

密度は不定胚の発達に大きな影響を及ぼす。継代培養している EC は大きさの異なる細胞塊となっており、大きな細胞塊を用いると、一細胞塊から多数の不定胚がつながった（多胚）状態で形成され、苗の生産上は利用しにくい。このため、20～60 μm 程度の小さな細胞塊を用いるのが一般的であり、このような細胞塊を用いると一細胞塊から一つの不定胚が形成されてくる（図 5）。

また、このような小さな EC の細胞塊であっても高密度（1 ml packed cell volume at $100\times\text{g/l}$ 以上程度）で懸濁すると不定胚の形成が著しく抑制され、不定胚の発達がまったく見られない例もある。この場合、高密度培養を行なった培地中に不定胚の発達を阻害する物質が蓄積していることが最近明らかにされた。小さなスペースでより多くの不定胚を作り出し、コストを可能な限り低減するためには高密度培養が必要となるが、このような高密度培養による抑制的なコンディショニング因子はこの妨害となるため、その機構を解明し、高密度培養を可能とする低コスト培養法の開発が必要である。培地中に蓄積する不定胚発達の阻害因子の実体は未だ明らかではないが、このよ

うな因子を明らかにしていく過程で高密度培養や同調化が可能となろう。

4. 不定胚の質の改善

種子胚と不定胚は外見的には類似の形態を持つが、その内部の生理機能も類似しているかどうかは重要な問題である。一般的に、組織培養によって作製した不定胚は休眠しないことが知られている。また、不定胚を乾燥させると枯死してしまう、再度吸水させてもはや成長しない。このような事実は、種子胚と不定胚では質的に大きな違いがあることを示している。なかでも、乾燥にきわめて弱い性質は、不定胚を人工種子の材料として利用する際の大きな問題点となっている。

種子胚と不定胚の質的な違いを生み出す大きな原因の一つは、植物ホルモンの一種であるアブジン酸（ABA）によるものと考えられる。ABA は落葉、組織・器官の老化、気孔の開閉などの種の生理作用に関与する植物ホルモンとして知られており、種子の登熟過程でも、種子成熟の直前に一時的に増加し、種子の乾燥に伴って減少することが知られている⁽¹⁵⁾。種子中での ABA のこの

図 6 ■ ABA 処理の有無による不定胚の成長と枯死
ニンジン不定胚を ABA で処理した後に乾燥させ、吸水させると再び成長を開始する（左）。しかし、ABA を処理せずに乾燥させると枯死してしまう（右）。

増加は、種子胚そのものによるものではなく、種子胚を取り囲む母系組織に由来するものと考えられている。また、組織培養で作られる不定胚自身は、ABA をほとんど合成しないことが知られている⁽¹⁶⁾。したがって、種子胚と不定胚の質的な違いは ABA の有無によるものと考えられ、最近では、不定胚の成熟や乾燥耐性の獲得に対する ABA の効果が活発に調べられている。

セイヨウナタネやテードマツなどいくつかの植物では、種子貯蔵タンパク質や貯蔵型脂質が不定胚でも少量蓄積されるが、ABA 処理を行なうことでその含量が増加することが明らかにされた⁽¹⁷⁾。一方、アルファルファでは、低濃度の 2,4-D で誘導した不定胚を人工種子に用いると実生への転換率が増加することを先に述べたが、この場合、実生への転換率の高い不定胚では天然の種子と同等の貯蔵タンパク質が蓄積されており、高濃度 2,4-D で誘導した実生への転換率の低い不定胚と大きく異なっている。

一方、ニンジン不定胚を ABA で処理すると乾燥耐性が高まり、ABA の処理時期や処理濃度などを適切にすることで 80% 程度の高率で乾燥耐性を示すようになる (図 6)。このような高い乾燥耐性を持つ不定胚が多くの植物種で作製できるようになれば、人工種子開発の大きな障壁の一つであった乾燥に弱い性質が改善されることになり、今後の人工種子開発の大きな一歩となろう。また、このような乾燥に強い不定胚が一般的に作製されるようになってくると、人工種子そのものの構成を変えることも可能になると考えられる。すなわち、乾燥させた不定胚をゲルに包み込むのではなく、先にも述べたような適切な二重膜の間に挟み込み (ウェハー状にし)、これを切り取ってそのまま利用することも可能となろう。人工種子をこのような構成にするためには、発芽に必要な栄養物などを不定胚自身に蓄積させることも必要と考えられ、今後のさらなる技術開発が必要である。

*

人工種子が天然種子と同様に流通・利用されるようになるためには、天然種子と同等の取り扱い

ができるばかりでなく、天然種子以上の利用価値を付与するとともに、コストの低減化も必要である。このためには、良質の不定胚を大量に作製するための技術開発や人工種子とするための工業化プロセスの開発など残された問題も多い⁽¹⁸⁾。上述したように、人工種子の主たる内封物である不定胚に関する研究が近年飛躍的に進歩しており、その研究成果が人工種子の改良に生かされるものと信じている。先にも述べたように、理想的な人工種子が育成されれば、農業への貢献はきわめて大きなものがあると予想され、そのためにも、多くの研究者が基礎・応用の両面から活発に研究に参加してくれることが望まれる。なお、紙数の関係もあり省略した問題もあるが、本稿が人工種子開発の一助になれば幸いである。

文献

- 1) T. Murashige: "Frontiers of Plant Tissue Culture", The Intern. Assoc. Plant Tissue Culture, 1978, p. 15.
- 2) 鎌田 博, 小林克徳: 細胞, 21, 551 (1989).
- 3) J. A. Fujii, D. Slade & K. Redenbaugh: *In Vitro Cell. Dev. Biol.*, 25, 1179 (1989).
- 4) T. Senaratna, B. D. McKersie & S. R. Bowley: *In Vitro Cell. Dev. Biol.*, 26, 85 (1990).
- 5) J. Janick, S. L. Kitto & Y.-H. Kim: *In Vitro Cell. Dev. Biol.*, 25, 1167 (1989).
- 6) K. Ishikawa, H. Kamada & H. Harada: *Plant Cell Physiol.*, 31, 777 (1990).
- 7) 清末知宏, 鎌田 博: 植物細胞工学, 5, 659 (1990).
- 8) 京 正晴: 細胞工学, 7, 932 (1988).
- 9) H. Kamada, K. Kobayashi, T. Kiyosue & H. Harada: *In Vitro Cell. Dev. Biol.*, 25, 1163 (1989).
- 10) 鎌田 博, 原田 宏: 蛋白質 核酸 酵素, 臨時増刊 5, 37, 1257 (1992).
- 11) T. Kiyosue, J. Nakayama, S. Satoh, A. Isogai, A. Suzuki, H. Kamada & H. Harada: *Planta*, 186, 337 (1992).
- 12) T. Kiyosue, K.-Y. Shinozaki, K. Shinozaki, K. Higashi, S. Satoh, H. Kamada & H. Harada: *Plant Mol. Biol.*, in press (1992).
- 13) S. C. de Vries, H. Booij, P. Meyerink, G. Huisman, H. D. Wilde, T. L. Thomas & A. van Kammen: *Planta*, 176, 196 (1988).
- 14) 東 克己, 飯田義晴, 鎌田 博: *BioIndustry*, 8, 374 (1991).
- 15) 鳥居啓子, 鎌田 博: 組織培養, 16, 208 (1990).
- 16) H. Kamada & H. Harada: *Plant Cell Physiol.*, 22, 1423 (1981).
- 17) R. Finkelstein & C. Somerville: *Plant Sci.*, 61, 213 (1989).
- 18) S. Nishimura, K. Higashi & H. Kamada: "SynSeeds: Application of Synthetic Seeds to Crop Improvement", CRC Press Inc., in press (1992).