



Title	酵母プラスミドpSR1の部位特異的組換えの染色体工学への応用
Author(s)	松崎, 浩明
Citation	大阪大学, 1989, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/479
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

酵母プラスミド pSR1 の
部位特異的組換えの染色体工学への応用

1989年
松崎浩明

目次

第1章 緒論	4
第2章 pSR1プラスミドの分子内組換え機構	7
第1節 緒言	7
第2節 実験材料と実験方法	8
2.1 供試菌株とプラスミド	8
2.2 使用培地と培養方法	9
2.3 生化学的方法	11
第3節 実験結果	19
3.1 <u>S. cerevisiae</u> におけるpSR1プラスミドの分子内組換え	19
1) 分子内組換え部位の限定	19
2) 分子内組換えに伴う遺伝子変換	26
3) 分子内組換えおよび遺伝子変換へのRAD52 遺伝子の関与	30
3.2 大腸菌におけるpSR1プラスミドの分子内組換え	32
1) pSR1プラスミドの分子内組換えへの酵母宿主因子の関与	32
2) 分子内組換えへの大腸菌の普遍的組換え遺伝子の関与	34
3.3 RタンパクのDNA への結合	34
第4節 考察	37
第5節 要約	42
第3章 pSR1プラスミドの部位特異的組換えを利用した <u>S. cerevisiae</u> 染色体の改変	44
第1節 緒言	44
第2節 実験材料と実験方法	45
2.1 供試菌株とプラスミド	45
2.2 使用培地	47
2.3 遺伝学的方法	47

2. 4 生化学的方法	5 1
第3節 実験結果	5 4
3. 1 pSR1プラスミドの部位特異的組換え系の染色体上での働き	5 4
3. 2 染色体上の大きな欠失と逆位の誘発	5 8
3. 3 非相同染色体間の相互転座	6 4
第4節 考察	6 8
第5節 要約	7 1
第4章 総合考察と要約	7 3
参考文献	7 8
本論文に関係のある報告	8 8
謝辞	8 9

第 1 章 緒論

近年、生物学では、遺伝子レベル、染色体レベル、細胞レベルの基礎的な研究が急激に進み、これらの知見を応用した遺伝子工学、染色体工学、細胞工学が生れた。これらのうち、遺伝子工学、細胞工学では、形質転換法あるいは細胞融合法などの生物を改良する技術が開発された。遺伝子工学的手法を用いると、特定の遺伝子を取り出し、他の生物に導入することが可能である。しかし、現在の技術で操作可能なDNAのサイズは小さく、せいぜい100 kbまでで、代謝系を構成する多数の遺伝子や、高等生物の巨大な遺伝子を宿主細胞に導入するのは困難である。また、遺伝子を染色体に組込むと安定に保持されるが、プラスミドやウイルスなどのベクターを使用すると、導入遺伝子は細胞内で安定に保持されず、生物を改良するための実用性に欠ける。この様に、遺伝子工学的手法では、計画的に生物の性質を改変できるが、巨大DNAの導入、導入DNAの安定保持に問題がある。一方、細胞融合法では、2種類の細胞を融合するので、多くの遺伝子や巨大な遺伝子を導入することが可能である。しかし、縁の遠い生物間での融合では、細胞複製装置に互換性がないため、融合した2種類の細胞の染色体は同時に保持されず、目的とする性質すなわち遺伝子を備えた生物を得ることは大変困難である(43)。そこで、多数の遺伝子や大きい遺伝子を用いて生物を計画的に改良するためには、十分に巨大で、しかも細胞内で安定に保持される染色体を利用する方法、すなわち染色体工学的手法が有効である。例えば、多数の遺伝子や巨大な遺伝子を連結した人工染色体を作製して細胞に導入するか、多数の遺伝子、あるいは大きい遺伝子をもつ巨大DNAまたは他種生物の染色体を細胞に導入後、染色体に組込ませるか、染色体の一部と置き換える方法である。このためには、染色体の構造と機能に関する十分な知見と、染色体を思い通りに改変、操作する技術が必要である。

それでは染色体工学の現状はどうであろうか。植物ではコルヒチンなどの薬剤を使用して染色体数を増加させることが、花粉の葯培養を利用して染色体数を減少させることが、また、放射線照射によって起こる欠失、逆位、転座を利用して染色体の切りはりを行うことが可能である。そして、これらの方法を用いて染色体を操作することにより、三倍体の種なしスイカあるいは転座染色体を内在する種なしスイカ、野草の耐病性を導入したコムギが作製された(95)。したがって、生物の品種改良、育種に染色体工学を利用することは有効であり、さらに多くの改変、操作技術を開発することは意義がある。最近、8塩基

認識の制限酵素を使用して数十から数百キロ塩基対 (kb) のDNA 断片を調製し (50)、この様な巨大DNA や染色体DNA をパルスフィールドゲル電気泳動を用いて分離することにより (16, 17, 73)、染色体の構造解析が可能になった。本研究で使用する酵母 *Saccharomyces cerevisiae* では、古くから遺伝解析が行われ、多数の遺伝子の染色体上での配列が分かっている。また、組換えDNA 技術が発達し、様々な遺伝子がクローニングされ、遺伝子DNA を細胞に導入したり、染色体に組込むことも可能である。既に染色体の複製、分配に必須なDNA 領域であるARS 配列 (自律複製配列) (80)、セントロメア (22, 79) がクローニングされ、これらのDNA 断片およびテトラヒメナ由来のテロメアを連結して人工染色体が作製され (33, 59)、巨大DNA のクローニングベクター (13)、あるいは染色体の構造と機能の研究材料 (33, 58, 59) として利用されている。さらに多くの改変、操作技術を開発することは、基礎面でも応用面でも重要である。このように酵母では様々な技術を利用できること、染色体の構造と機能に関する多くの知見が得られていることから、酵母は染色体工学技術を開発するに格好の材料であると言えよう。

染色体の改変は、細胞内では遺伝的組換えによって起こる。すなわち、生物では遺伝的組換えにより、遺伝情報の交換や添加が行われ、新しい配列をもつ遺伝情報のセットができる。このことから、遺伝的組換えを操作することにより染色体を思い通りに改変することができると考えられる。しかし、これまで、遺伝的組換えに関してその機構を解明する研究は多くなされてきたが、これを工学的に応用する研究はあまりなされていない。これは遺伝的組換えは、DNA レベルではDNA 鎖の切断と再結合という一見、単純な機構で起こるが、実は組換えに働くタンパクが複雑に絡む反応で、組換えを操作できるだけの基礎的な知見が乏しかったからである。遺伝的組換えは、組換え部位の持つ特異性から、相同的組換え (普遍的組換え)、部位特異的組換え、非相同的組換えに分類される。相同的組換えはDNA 上の相同な領域の間で起こる組換えである。部位特異的組換えは特定のDNA 領域でのみ起こる組換えである。非相同的組換えは、全く相同性のない領域でも起こる組換えである。これらの組換え機構のうち、部位特異的組換えでは、組換えの機構がかなり解明された。部位特異的組換えは遺伝情報の交換様式によって、交叉型の組換えと遺伝子変換型の組換えに分類される。前者はお互いの情報が相互に交換される組換えであり、後者は遺伝情報が一方向に移される組換えである。交叉型の組換えには、 λ ファージのInt タンパクによる組換え (94)、P1ファージのcre-lox 系 (78)、*S. cerevisiae* の内在性プラスミド 2 μ m DNA の分子内組換え (9) などがある。これらの組換えについては、*in vitro* で組

換えを行わせる系が開発された結果、そこに働く酵素が発見され、組換え部位DNA 配列と組換え酵素の性質およびそれらの相互作用から、組換え機構が詳細に解析された。その結果、部位特異的組換え酵素がDNA 上の特定の塩基配列を認識してDNA 鎖を切断、再結合して組換えを起こすという共通の機構が提案されている (69)。遺伝子変換型の部位特異的組換えには、*S. cerevisiae* の接合型変換の組換え (46, 81) および *S. cerevisiae* ミトコンドリアに存在するイントロンの転移 (24, 25, 37) などがある。この系の特徴は、部位特異的エンドヌクレアーゼがDNA 上の特定の塩基配列を認識して、二重鎖切断を行うことによって開始されることである。このように部位特異的組換えは鍵となるタンパクによってDNA の特定の部位で起こるから、部位特異的組換えを操作して、染色体を自由に改変することができるのではないかと考えられる。そこで本研究では、酵母 *Zygosaccharomyces rouxii* 由来の環状プラスミド pSR1 が行う分子内組換えを利用して、*S. cerevisiae* 染色体の改変技術を開発することを試みた。酵母 *Z. rouxii* 由来環状プラスミド pSR1 は、一对の逆向き反復配列をもち、この部分を介して分子内組換えを行う (2, 90)。

第2章では、この分子内組換えを染色体の改変に利用するために、分子内組換えの機構を解析した。まず、逆向き反復配列に変異をもつ pSR1 プラスミドを用いて、組換えの開始部位を *S. cerevisiae* 宿主内で 58 塩基対 (bp) 配列内に限定した。また、変異部位では、高頻度の遺伝子変換により両反復配列が同一配列となることがわかった。次に、*R* 遺伝子が大腸菌内で発現させることにより、分子内組換えを起こし、この組換えに必要な酵母タンパクは *R* タンパクのみであることを示した。さらに、*R* タンパクが組換え部位内に存在する 14 bp の逆向き反復配列とそれに続く 4 個の同じ 14 bp の反復配列に結合することを示した。以上の結果から、遺伝子変換を伴う部位特異的組換えの機構として、一本鎖 DNA がお互いに交換して形成された交叉中間体が逆向き反復配列上を移動し、ヘテロデュープレックスが形成されるが、これは DNA 複製により解離されるという機構が考察された。また、2 個の組換え部位を染色体に組込ませた後に、*R* タンパクのみを生産するとこの組換え部位間の組換えにより染色体を改変できる可能性が示唆された。第3章では、この方法で染色体上の欠失と逆位および非同源染色体間の組換えの実験を行い、この手法が実施可能であることを示した。第4章では、これらの結果を総合して考察を行った。

第2章 pSR1プラスミドの

分子内組換え機構

第1節 緒言

pSR1プラスミドは、醤油、味噌の醸造に重要な耐塩性酵母の *Zygosaccharomyces rouxii* で検出された6,251 bpの環状二本鎖DNA プラスミドである(2,90)。その構造は酒の醸造、パン製造に使用される *Saccharomyces cerevisiae* 由来の2 μ m DNA (8)と多くの共通点をもつが、DNAの塩基配列には相同性がない。分子中に一方が959 bpからなる一対の逆向き反復配列 (IR) をもち、IRにより1,679 bpと2,654 bpの2つのユニーク領域に分けられる。このIRを介して分子内組換えを起こす結果、2つのユニーク領域の相対的な向きが異なるA型とB型の異性体として存在する。この分子内組換えには、pSR1プラスミドにコードされている P、S および R 遺伝子のうち、R 遺伝子の産物であるRタンパクが必須である(2,40)。pSR1は、*S. cerevisiae* 細胞内でも安定に複製し、分子内組換えも起こることから、それらの機構は、*S. cerevisiae* 内と *Z. rouxii* 内とは同じであろう。この分子内組換えの機構を解明することは、それ自体興味あることだが、組換えを人為的に操作し、染色体の改変などに利用するためにも重要である。分子内組換えはIR内で起こること、組換えにはRタンパクが特異的に関与することから、pSR1の分子内組換えは部位特異的組換えであると考えられる。そこで、本章では、組換え部位とそれに伴う遺伝子変換および組換えに働くタンパク質を中心に、分子内組換えの機構を解明することにした。

第一に、一方のIRに変異をもつpSR1プラスミドを用いて、*S. cerevisiae* 宿主内で分子内組換え部位を限定した。その結果、分子内組換え部位は、見かけ上、IR内の58 bp 配列内に限定されたが、組換えに伴って、IR全域で変異部位の遺伝子変換が観察されたことから、分子内組換えは、この58 bp 配列内で開始され、交叉はIR全域で起こることがわかった。また、これらの現象は *rad52* 変異細胞中でも起こった。第二に、分子内組換えへの酵母宿主因子の関与を検討するために、R 遺伝子が大腸菌内で発現させ、分子内組換えの有無を調べた。その結果、大腸菌内でも分子内組換えが起こり、組換えには酵母宿主因子は必要でないことが分かった。第三に、部分精製したRタンパクを用いて、DNase I フットプリンティング法によりRタンパクのDNAへの結合を調べたところ、Rタンパクは58 bp

配列内に存在する14 bp の逆向き反復配列と、それに続く4個の同じ14 bp の反復配列部に結合することがわかった。これらの観察から、遺伝子変換を伴う分子内組換えの機構として、58 bp 配列内で一本鎖が交換して形成される交叉中間体がIR内を移動し、ヘテロデュープレックスが形成されるが、これはDNA 複製によって解離されるという機構が考察された。また、染色体に2個の58 bp 配列 DNAを持たせ、R 遺伝子を発現すると、組換え部位間の組換えにより染色体を改変することが可能であると考えられた。

第2節 実験材料と実験方法

2. 1 供試菌株とプラスミド

3. 1で分子内組換え部位を限定するための酵母宿主として、S. cerevisiae 二倍体株、NA-87-11A-D (MAT α /MAT α leu2-3.112/leu2-3.112 his3/his3 trp1/trp1 pho5-1/pho5-1 [cir $^{\circ}$][2]) および、一倍体株、NS1-2C (MAT α trp1 leu2-3.112 his3 rad52-1 [cir $^{\circ}$]) を使用した。NS1-2C株は小川英行(大阪大学、理学部)より分譲を受けたrad52-1 変異株より、本研究に適合する他の遺伝子符号を付与して育成した。プラスミド DNAの調製には、大腸菌Escherichia coli RR1株 (F $^{-}$ r $_{B}^{-}$ m $_{B}^{-}$ ara14 proA2 lacY1 galK2 rspL20 xyl-5 mtl-1 supE44 hsdS20 [6]) を使用した。また、DNA 塩基配列決定に際しては、M13mp8およびM13mpl1 ファージ(52) DNAの調製のため、大腸菌 JM103株 (Δ lacpro thi strA supE endA sbcB hsdR $^{-}$ F $^{-}$ traD36 proAB lacI * Z Δ M15 [53]) を使用した。

3. 2では、プラスミドの構築および大量調製のために、大腸菌 JA221株 (F $^{-}$ leuB6 Δ trpE5 lacY hsdR hsdM $^{+}$ recA [21]) を、大腸菌内での分子内組換えを調べるために、大腸菌 JM103株、JM109 株 (recA1 Δ lacpro endA1 gyrA96 thi hsdR17 supE44 relA1 F $^{-}$ traD36 proAB lacI * Z Δ M15 [18])、JC8679 株 (recB $_{21}$ recC $_{22}$ sbcA $_{23}$ his60 thr-1 leuB6 thi-1 lacY1 galK2 ara14 xyl5 mtl1 proA2 argE3 rpsL31 tsx33 supE44 [77]) を使用した。

3. 3では、プラスミドの構築および大量調製のために、大腸菌 JA221株をRタンパクの生産のために、大腸菌 JM103株を使用した。

pSR1プラスミドの組換え部位の限定のためにpSR1プラスミドとYIp32Sプラスミド

(YIp32 プラスミド [7]のSalI部位末端を平滑化した後、連結してSalI切断点を破壊し

た) とが HindIII 部位で連結されている pSRT301 プラスミドを野生型プラスミドとして、このプラスミドに 8 bp SalI リンカー (5'-GGTCGACC-3') を挿入して作製された種々の変異プラスミド (40) を用いた。これらの変異プラスミドのうち、pSRT308、pSRT309、pSRT321、pSRT326、pSRT327 では、291 塩基から 1,249 塩基におよぶ逆向き反復配列 (IR1) に SalI リンカーが 1 個挿入され、pSRT306 および pSRT322 では、2,929 塩基から 3,887 塩基におよぶ逆向き反復配列 (IR2) に SalI リンカーが 1 個挿入されている (Fig. 2-1; pSR1 プラスミドの塩基番号は、逆向き反復配列に最も近い EcoRI 部位の G を 1 として付けた [2])。tac プロモーター (26) を含む 91 bp の HindIII - BamHI 断片は pDR540 (68) から調製した。大腸菌の rrnB オペロン (rRNA 遺伝子; [12]) のターミネーターを含む 3.0 kb の PstI - SalI 断片は pKK175-6 (11) から調製した。

pSRT108A は R 遺伝子の Bgl II 部位に、BamHI で切断した YIp32 (7) を挿入して R 遺伝子を破壊したプラスミドである (2)。pNN225 は pSR1 の 453 塩基から 677 塩基にあたる

HaeIII - TaqI 断片 (2) の両端を各々 HindIII 部位、XbaI 部位に変換後、pUC18 (18) の大きい HindIII - XbaI 断片と連結して作製したプラスミドである。

2. 2 使用培地と培養方法

酵母用最少培地 (SGlu 培地) は 1 liter あたり グルコース 20 g と Yeast Nitrogen Base w/o amino acids (Difco Laboratories, Detroit, Mich., U.S.A.) 6.7 g を含み、必要あれば アミノ酸 および 核酸 [トリプトファン (最終濃度 20 mg/l)、ヒスチジン (20 mg/l)、アルギニン (20 mg/l)、メチオニン (20 mg/l)、チロシン (30 mg/l)、ロイシン (30 mg/l)、イソロイシン (30 mg/l)、リジン (30 mg/l)、バリン (150 mg/l)、フェニルアラニン (60 mg/ml) と ウラシル (20 mg/l)、アデニン (100 mg/l)] を加えた。酵母の栄養培地には YPAD 培地 [1 liter あたり 酵母エキス (大五栄養株式会社) 10 g、ポリペプトン (大五栄養) 20 g、アデニン (和光純薬株式会社) 100 mg、グルコース 20 g] を用いた。大腸菌の完全培地として通常は 改変 Luria-Bertani 培地 [LB 培地 (48); 1 liter あたり Bactotryptone (Difco) 10 g、Yeast Extract (Difco) 5 g、NaCl 5 g (pH 7.0)] を、JM103 株で R タンパクを大量生産するときには 2xYT 培地 [1 liter あたり Bactotryptone (Difco) 16 g、Yeast Extract (Difco) 10 g、NaCl 5 g (52)] を用いた。また、必要に応じて アンピシリン (viccillin; 50 μ g/ml; 明治製菓株式会社) および isopropyl- β -D-thiogalactopyranoside (IPTG; 1 mM; Sigma Chemical Company, St

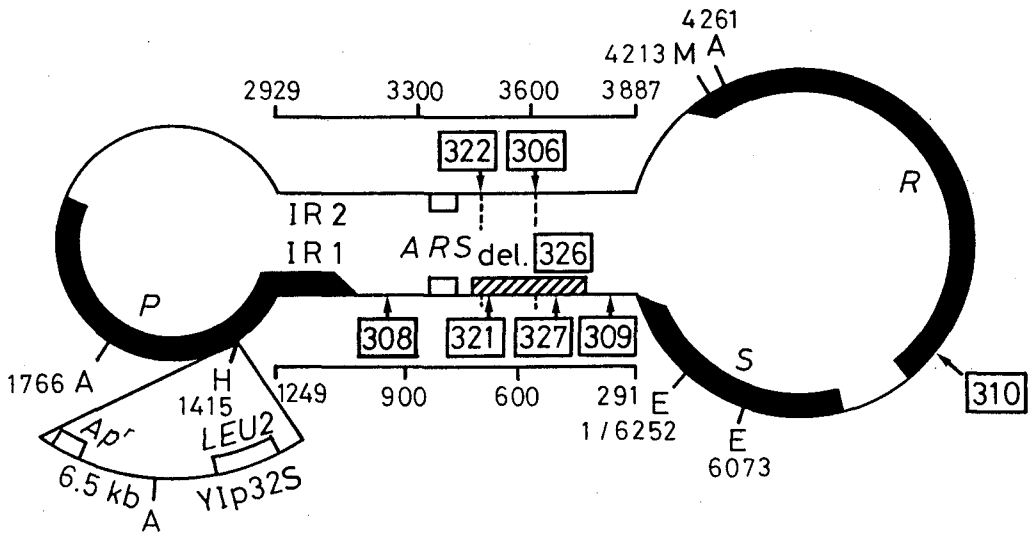


Fig. 2-1 Structure of the mutant plasmids created by the SalI linker insertion. Mutant plasmids were constructed by linker mutagenesis of pSRT301 (12.8 Kb, lacking SalI site) which consisted of the type A isomer of pSR1 (6,251 bp) and the Yip32S molecule (6.5 kb) (40). The location and orientation of the protein-coding regions on pSR1 are indicated by thick lines, and the tapered end indicates the 3' end of the coding region. The horizontal lines are marked to indicate the inverted repeats. The lower inverted repeats denoted by IR1 are stretched for the nucleotide positions from 291 to 1,249, and the upper one denoted by IR2 are stretched for the nucleotide positions from 2,929 to 3,887. Open boxes with ARS represent the autonomously replicating sequences. Open boxes with LEU2 and Ap^r on the Yip32S moiety represent the coding regions of the LEU2 gene of S. cerevisiae and the ampicillin-resistant gene of pBR322, respectively. The numbers at the restriction sites and on the inverted repeats in the pSR1 moiety represent the positions with respect to G of the EcoRI site as position 1. The approximate position of each insertion site is indicated by an arrow with the boxed number on the pSRT301 molecule. In pSRT326, the region shown by the hatched box with del.326 is a 311 bp deletion. Abbreviations for restriction enzyme sites are: A, AvaI; E, EcoRI; H, HindIII; and M, MluI.

Louise, U.S.A.) を加えた。大腸菌の最少培地として用いたM9培地(48)は1 liter あたり Na_2HPO_4 6 g、 KH_2PO_4 3 g、 NaCl 0.5 g、 NH_4Cl 1 gを含む溶液を滅菌後、別に殺菌した10 mlの20% (w/v) グルコースと1 mlの1 M $\text{Mg}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ と1 mlの0.1 M CaCl_2 とを加えたものである。ビタミンB1 (半井化学薬品株式会社) は最終濃度1 mg/l、カザミノ酸 (Difco) は5 g/l を必要に応じて加えた。M13 ファージのブランク形成用平板培地として、下層にB培地 [1 liter あたりBactotryptone (Difco) 10 g、 NaCl 8 g、ビタミンB1 (半井) 0.1 g、寒天 2 g] を、上層にH-上層寒天培地 [1 literあたりBactotryptone 10 g、 NaCl 8 g、Bacto-agar (Difco) 8 g] を用いた。平板培地を調製するときは、断わらない限り1 liter あたり20 gの寒天を加えた。殺菌は1 kg/cm²で15分間の条件でオートクレーブ滅菌した。酵母は30℃で、大腸菌は37℃で静置培養または振とう培養を行った。

2. 3 生化学的方法

大腸菌からのCsCl- エチジウムブロマイド (EB) 平衡密度勾配遠心分離法によるプラスミドDNAの調製： 本研究で使用したプラスミドは、いずれも大腸菌宿主内での複製能が与えられており、プラスミドDNAの大量調製は、大腸菌からClewell とHelinskiの方法(23)で行った。抗生物質を含むLB培地で37℃一晚振とう培養した5 mlの培養液をカザミノ酸 5 g/l、トリプトファン20 mg/l を含むM9培地150 mlに植菌して振とう培養し、培養液の600 nmでの吸光度 ($A_{600 \text{ nm}}$) が0.8 に達したときに、最終濃度が200 mg/lとなるようにクロラムフェニコール (和光純薬株式会社) を添加し、さらに16時間培養を続けた。4℃で集菌 (8,000 rpm 5分; 久保田 Model KR-200A、RA-6ローター) し、25% (w/v) シュークロースを含む50 mM トリス (ヒドロキシメチルアミノメタン) - 塩酸緩衝液 (pH 8.0) 2 ml に懸濁した。同緩衝液に10 mg/mlの濃度で溶かしたリゾチーム (Sigma) 0.3 mlを加え、水中で5分間放置した後、0.5 mlの0.5 M エチレンジアミン四酢酸 (EDTA, pH 8.0) を加え混合した。2.6 mlの62.5 mM EDTA、2% (v/v) Triton X-100 (和光純薬) を含む50 mM トリス-塩酸緩衝液 (pH 8.0) を加え、水中で10分間放置して溶菌させた。溶菌後、0℃で遠心分離 (30,000 rpm、90分; 日立 Model 55P-7、RT65T ローター) し上澄液を得た。上澄液4.5 mlに対し、CsCl 4.55 g、0.5 ml の5 mg/ml EB水溶液 (Sigma) を加え、分離用遠心管 (5PA シールチューブ; 日立計測器サービス) にCsCl溶液を移し、シールした後、18℃で遠心分離 (50,000 rpm、16時間; 日立 Model 55P-7、RPV65Tローター) した。遠心分離後、プラスミドDNAを注射器 (テルモシリンジ; テルモ

株式会社)により抜き取り、Corex 遠心管に移した。2 倍容の水を加えた後、さらにその 2 倍容の99%エタノールを加え、-20℃で3時間放置した後、遠心分離(10,000 rpm、10分;久保田 Model KR200-A、RA-3ローター)した。DNA を含む沈殿を0.4 mlのTE緩衝液[10 mMトリス-塩酸緩衝液 (pH 8.0)、1mM EDTA]に溶かし、これをエッペンドルフ遠心管に移し、40 μ l の3 M 酢酸ナトリウム水溶液を加えた。さらに、1 mlの99%エタノールを加え、-80℃で10分間放置した後、遠心分離(12,000 rpm、10分;Tomy、Microfuge MC-15A)し、DNA を沈殿として回収した(エタノール沈殿)。DNA を99%エタノールで1回洗浄した後、減圧下で乾固した。DNA を適量のTE緩衝液に溶かし4℃で保存した。

大腸菌からのアルカリ変性法によるプラスミドDNA の調製: 少量のプラスミドDNA を簡便に調製するために、BirnboimとDolyによるアルカリ変性法(5)を用いた。抗生物質を含むLB平板培地上で一晩培養した大腸菌の菌体を、2 mg/ml リゾチーム (Sigma)を含む0.1 mlの第1液[50 mM グルコース、10 mM EDTA、25 mM トリス-塩酸緩衝液 (pH 8.0)]の入ったエッペンドルフ遠心管にかき取り、氷中に放置した。0.2 mlの第2液[0.2 N NaOH、1% (w/v) ドデシル硫酸ナトリウム (SDS; 和光純薬)]を加え、氷中で5分間放置した。0.15 ml の第3液[3 M 酢酸ナトリウム (pH 4.8)]を加えて、攪拌後、1時間氷中に放置した。遠心分離(12,000 rpm、5分;Microfuge MC15A)し、上澄を別のエッペンドルフ遠心管に移した。2 倍容の99%エタノールを加え、-80℃で10分間放置後、遠心分離(12,000rpm、10分)し、DNA を沈殿として回収した。このDNA を0.1 mlの第4液[0.1 M 酢酸ナトリウム、50 mM トリス-塩酸緩衝液 (pH 8.0)]に溶かした後、0.2 mlの99%エタノールを加え、-80℃で10分間放置後、遠心分離(12,000 rpm、10分)し、DNA を沈殿として回収した。DNA を99%エタノールで1回洗浄した後、減圧下で乾固し、エタノールを除いた。DNA を0.05 ml のTE緩衝液 (pH 8.0) に溶かし4℃で保存した。

S. cerevisiae からのプラスミドDNA の調製: S. cerevisiae からのプラスミドDNA の調製はCameron らの方法(15)に従った。最少平板培地に生育しているS. cerevisiae 菌体をかきとって、0.4 mlのプロトプラスト緩衝液[0.1 mg/ml Zymolyase 100T (生化学工業株式会社)、1 μ l/ml β -メルカプトエタノール (半井化学薬品株式会社)、1.2 M ソルビトール、50mMリン酸緩衝液 (pH 7.5)]に懸濁し、30℃で30分間放置した。80 μ l のSDS 溶液[2.5% (w/v) SDS、0.5 M トリス、0.25 M EDTA]および2 μ l のジエチルピロカルボン酸(Aldrich Chemical Company, Inc., Milwaukee, Wis., U.S.A.)を加え、65℃で30分間放置して溶菌した。0.1 mlの5 M 酢酸カリウムを加え、氷中で1時間放置した。遠

心分離 (12,000 rpm、10分; Tomy, Microfuge MC15A) し、上澄を別のエッペンドルフ遠心管に移した。2 倍容の99%エタノールを加え、-80 °Cで10分間放置後、遠心分離 (12,000 rpm、10 分) し、DNA を沈殿として回収した。回収したDNA を0.4 mlのTE緩衝液 (pH8.0) に溶かし、等量のTE緩衝液で飽和したフェノールを加え、よく攪拌して遠心分離 (12,000 rpm、10分) し、上層を回収した (フェノール抽出)。これにTE緩衝液で飽和したフェノール-クロロホルム混合液 (1:1, v/v) を加え、よく攪拌して遠心分離 (12,000rpm、10 分) し、上層を回収した (フェノール-クロロホルム抽出)。これにクロロホルムを加え、攪拌して遠心分離し上層を回収した (クロロホルム抽出)。これらの操作をもう一度繰り返した後、最後に得られた上層にエーテルを加え、よく攪拌して遠心分離 (12,000 rpm、1分) し、下層を回収した。エタノール沈殿を2 回繰り返し、得られたDNA 沈殿を99 %エタノールで洗浄後、減圧下で乾固した。DNA をTE緩衝液に溶かし4 °Cで保存した。

酵素反応： 制限酵素は宝酒造株式会社、東洋紡績株式会社またはニッポンジーン株式会社から購入した。制限酵素SalIの反応は高塩濃度緩衝液 [50 mM トリス-塩酸 (pH 7.5)、100 mM NaCl、10 mM MgCl₂、1 mM dithiothreitol (DTT; Sigma)] 中で行った。その他の制限酵素反応は、TA緩衝液 [33 mM トリス-塩酸緩衝液 (pH 7.9)、66 mM 酢酸カリウム、10 mM 酢酸マグネシウム、0.5 mM DTT、100 µg/ml bovin serum albumine (BSA; Sigma)] 中で行った。断わらない限り、いずれも37°Cで1 ないし2 時間反応させた。T4リガーゼ (宝酒造) の反応は1 µg のDNA を含むライゲーション緩衝液 [66 mMトリス-塩酸緩衝液 (pH 7.6)、1 mM ATP、1 mM spermidine (Sigma)、0.01 M MgCl₂、15 mM DTT、0.2 mg/ml BSA] 中で10 unit のT4リガーゼを加え、16°Cで3 時間反応させた。大腸菌DNA polymerase IのKlenow断片 (東洋紡績) は、Maniatisらの標準的な方法 (48) に従って使用した。

ゲル電気泳動： アガロースゲル電気泳動法はTanakaらの方法 (88) に従い、1 %アガロース [Agarose L03 (宝酒造)] スラブゲルを使用し、10倍濃度の泳動用緩衝液 [0.4 M トリス-酢酸緩衝液 (pH7.4)、0.2 M 酢酸ナトリウム、10 mM EDTA] を使用前に希釈して用いた。試料は通常、DNA 溶液に1/5 容量の6 倍濃度泳動用染色液 [60% (w/v) シュークロース、10 mM EDTA、0.25% (w/v) プロモフェノールブルー (BPB)] を加えて調製した。泳動は定電圧100Vで40分または1 時間行った。泳動後、ゲルをEB水溶液 (5 µg/ml) で染色し、トランスイルミネーター (Ultra Violet C62) でDNA バンドを観察した。写真はUVフィルター (Kenko SL-39) および赤色フィルター (Kenko R-60) を使い、ボラロイド

カメラ (MP-4) でフォトラマPB300 フィルム (富士フィルム株式会社) によって撮影した。また、DNA 断片の分子量の推定には λ c1857S7 ファージDNA (宝酒造) の HindIII 断片 (23.1 kb, 9.4 kb, 6.6 kb, 4.4 kb, 2.3 kb, 2.0 kb, 0.6 kb [71]) を標準にした。

ポリアクリルアミドゲル電気泳動はManiatisらの方法 (48) に従い、4 %、6 %、8 % のポリアクリルアミドスラブゲルを使用した。30% アクリルアミド-0.8 % メチレンビスアクリルアミド混合液、10 ml の10倍濃度のTBE 緩衝液 [890 mM トリス、890 mM ホウ酸、25 mM EDTA] および20 mg/mlの過硫酸アンモニウム水溶液5 mlに脱イオン水を加え、全量を100 mlとした。この混合液を減圧下で脱気し、100 μ l のテトラメチレンジアミンを加え、ゲルを重合させた。試料は、DNA 溶液に1/5 容量の6倍濃度ポリアクリルアミドゲル電気泳動用染色液 [40 % (w/v) シュークロース、10 mM EDTA、0.25% (w/v) BPB、0.25% (w/v) キシレンシアノール (XC)] を加えて調製した。泳動は50V から150Vまでの範囲で定電圧で行った。泳動後の操作はアガロースゲル電気泳動の場合と同様に行った。また、DNA 断片の分子量の推定にはpBR322の HpaII 断片 (86) を標準にした。

大腸菌の形質転換： 大腸菌の形質転換はMorrisonの方法 (55) に従った。LB培地で37℃一晩培養した培養液10 ml を1 liter のLB培地に植菌し、 $A_{600\text{ nm}}$ が0.5 から0.6 になるまで振とう培養した。培養液を氷中で冷却し0℃で遠心分離 (8,000 rpm、5分；久保田 Model KR-200A、RA-6 ローター) し、菌体を250 mlの 0.1 M MgCl_2 水溶液で洗浄後、250 mlの0.1 M CaCl_2 水溶液に懸濁し氷中に20分放置した。0℃で遠心分離 (8,000 rpm、5分) した後、菌体を42.5 ml の0.1 M CaCl_2 と7.5 mlのグリセロール混合液に懸濁し、コンピテント細胞とした。菌体懸濁液0.2 mlにDNA 溶液 (0.1 ~1 μ g) を加え、氷中で30分間放置後、37℃で5分間加熱した。1 mlのLB培地を加え、37℃で60分間静置培養した後、適当量を選択培地に塗布した。

S. cerevisiae の形質転換： S. cerevisiae の形質転換は酢酸リチウムを用いたItoらの方法 (35) に従った。S. cerevisiae を50 ml YPAD培地で3時間振とう培養し、集菌 (8,000 rpm、5分；久保田 Model KR-200A、RA-6 ローター) した。菌体をTE緩衝液 (pH 8.0) で2回洗浄後、5 mlのLA溶液 [TE緩衝液に0.1 M 酢酸リチウム (和光) を溶かした溶液] に懸濁した。30℃で1時間振とう培養後、集菌し、菌体を5 mlのLAG 溶液 [TE緩衝液に0.1 M 酢酸リチウム、15% (v/v) グリセロールを溶かした溶液] に懸濁して受用菌とした。0.3 mlの受用菌と1 ~10 μ g のDNA と0.7 mlのPEG 水溶液 [50% (w/v) ポリエチレングリコール 4,000 (和光)] とを混合後、30℃で1時間放置した。このうちの適当量を

選択培地に塗布した。

DNA 塩基配列の決定： DNA 塩基配列の決定はM13 ファージによるクローニング技術 (52)とダイデオキシチェーンターミネーションシーケンス法 (72)を組合わせて行った。

(1) 大腸菌 JM103株のM13 ファージmp系プラスミドによる形質転換

先の大腸菌の形質転換法と同様の方法で調製したコンピテント細胞懸濁液0.2 mlに0.1 ~1 μ g のプラスミドDNA を加え、氷中で30分間放置した後、37℃で5分間加熱した。この液に、融解した3 mlのH-寒天上層培地、0.2 mlの対数増殖期大腸菌 JM103株の培養液、50 μ l の2% 5-bromo-4-chloro-3-indolyl- β -D-galactopyranoside (Sigma)のジメチルホルムアミド溶液、10 μ l の0.1 M IPTGを混合後、B-平板培地に重層した。37℃で一晩培養後、白色半透明のプラークを形質転換体のプラークとみなした。

(2) M13 ファージからの一本鎖DNA の調製

2xYT液体培地で培養した大腸菌JM103 株培養液にM13 ファージを接種後、さらに、37℃で4 ~5 時間培養した。培養液を遠心分離 (12,000 rpm、5分; Tomy、Microfuge MC15A) 後、上澄液0.8 mlをエッペンドルフ遠心管に移し、2.5 M NaClを含む20%ポリエチレングリコール6,000 溶液0.2 mlを加え、混合した。室温で15分間放置後、遠心分離 (12,000 rpm、5分) して、ファージ粒子を沈殿として集めた。ファージ粒子をTE緩衝液 (pH 8.0) に懸濁し、フェノール抽出、フェノール-クロロホルム抽出でタンパク質を除去後、エタノール沈殿を行い、一本鎖DNA を集めた。DNA を乾固後、20 μ l のTE緩衝液 (pH 8.0) に溶解した。

(3) M13 一本鎖DNA とプライマーDNA とのアニーリング

10 μ l のM13 一本鎖ファージDNA 溶液と1 μ l のプライマーDNA と1.5 μ l の10倍濃度アニーリング緩衝液 [70 mM トリス-塩酸緩衝液 (pH 7.5)、1 mM EDTA、200 mM NaCl、70 mM MgCl₂]を混合し、60℃で20分間加温後、室温に放置して、冷却し、アニーリングさせた。

(4) ポリメラーゼ反応

4種類のdNTP-ddNTP混合液 (組成は、Table 2-1 に示す) を各々2 μ l ずつ、マイクロフュージ遠心管に分注した。次に、(3)で調製したM13 一本鎖DNA-プライマーDNA 混合液に2 μ l の[α -³²P]dCTP (400Ci/mmol) と1 μ l の DNA polymerase I Klenow断片 (2 units) を加え、混合した。この液を3.5 μ l ずつ4本のdNTP-ddNTP混合液入エッペンドルフ遠心管に分注し、混合した。25℃で20分間放置後、チェース混合液 [1 mM dATP、

1 mM dCTP、1 mM dGTP、1 mM dTTP]を1 μ l ずつ加え、さらに20分間放置した。これに、6 μ l のホルムアミド停止液 [95% (v/v) ホルムアミド、0.1 % (w/v) XC、0.1 % (w/v) BPB]を加え、95℃で3分間加熱した後、急冷した。

Table 2-1. dNTP-ddNTP mix solution (dddNTP)

	dddA (μ l)	dddC (μ l)	dddG (μ l)	dddT (μ l)
0.5 mM dGTP	20	15	1	20
0.5 mM dATP	1	15	20	20
0.5 mM dTTP	20	15	20	1
100 mM Tris-HCl (pH 7.5),				
1.0 mM EDTA	20	15	20	20
H ₂ O	45	45	52	30
	(ddA)	(ddC)	(ddG)	(ddT)
1.0 mM ddNTP	15	15	8	30
	121	120	121	121

(5) ポリアクリルアミドゲル電気泳動およびオートラジオグラフィー

8%の変性ポリアクリルアミドスラブゲル (200x400x0.35mm) を使用し、次のように作製した。3.8 g のアクリルアミド、0.2 g のメチレンビスアクリルアミド、25 gの尿素、および5 mlの10倍濃度のTBE 緩衝液 [890 mM トリス、890 mM ホウ酸、25 mM EDTA] に脱イオン水を加え、全量を50 ml にした。この混合液を減圧下で脱気し、0.35 ml の10% (w/v) 過硫酸アンモニウム水溶液と100 μ l のテトラメチレンジアミンを加え、ゲルを重合させた。(4)でポリメラーゼ反応を行ったDNA 試料2 μ l をゲルに乗せ、2,000Vで電気泳動を行った。電気泳動後のゲルを乾燥させ、X線フィルム (X-Omat AR, Eastman Kodak Company, Rochester, N.Y., U.S.A.) を用いてオートラジオグラフィーを行った。

合成DNA の作製： DNA 合成機 (アプライドバイオシステム社) を用いて目的DNA を相補一本鎖ごとに作製した。担体に結合しているDNA 鎖を濃アンモニア水で洗浄して切り出した。アンモニアを除去した後、DNA 鎖を濃縮乾固した。2本の相補DNA 鎖をアニーリング緩衝液 [70 mM トリス-塩酸緩衝液 (pH 7.5)、1 mM EDTA、200 mM NaCl、70 mM MgCl₂]に溶解し、60℃で20分間放置後、自然冷却させて2本鎖合成DNA を調製した。

Rタンパクの in vitro組換え活性の測定： Vetterらの方法 (93)を改変して行った。

0.6 μ g の pSRT108A 基質プラスミド DNA (A 型分子) と試料タンパクを反応液 [50 mM トリス-塩酸緩衝液 (pH 7.4)、10 mM $MgCl_2$; 全量 100 μ l] に加え、30°C で 30 分間反応後、この反応液に、100 μ l の A 溶液 [0.83% (w/v) N-ラウリルサルコシン (Sarkosyl NL-97, ICN Biomedicals, Inc., Plainview, N.Y., U.S.A.)、42 mM EDTA、8.3 mg/ml プロナーゼ (アクチナーゼ E ; 科研製薬株式会社)] を加え、37°C で 30 分間放置した。これに 200 μ l の B 溶液 [10 mM トリス-塩酸緩衝液 (pH 7.4)、50 mM NaCl、1 mM EDTA、50 μ g tRNA] を加えた後、フェノール抽出でタンパクを除去後、エタノール沈殿を行い、DNA を回収した。この DNA を減圧下で乾固した。この DNA を HindIII で切断後、アガロースゲル電気泳動を行った。B 型分子のバンドが観察されたとき、試料タンパクに組換え活性があると判断した。

R タンパクの精製 : tac プロモーターの下流に R 遺伝子を繋いだプラスミド pNN115 をもつ大腸菌 JM103 株をアンピシリンを含む 2xYT 培地で 37°C で $A_{660} = 0.5$ まで培養後、IPTG (最終濃度 1 mM) を加え、さらに 2 時間培養した。菌体 (約 1 g) を 25% (w/v) シュークロースを含む 0.25 M トリス-塩酸緩衝液 (pH 7.5) に懸濁した。これに、0.32 ml のリゾチーム溶液 [5 mg/ml リゾチーム、0.25 M トリス-塩酸緩衝液 (pH 7.5)] を加え、氷中で 10 分間放置後、2.67 ml の溶菌液 [25 mM EDTA、1% (w/v) Brij-58 (和光)、トリス-塩酸緩衝液 (pH 7.5)、2 mM DTT] を加え、さらに、10 分間放置して溶菌した。溶菌液を遠心分離 (40,000 rpm、30 分 ; 日立 Model 55P-7、RP65T ローター) し、上澄液 (抽出液) を得た。抽出液をカラムにかけ、in vitro 組換え活性を指標にして精製を行った。まず、抽出液を DEAE セルロースカラム (DE52 ; Whatman International Ltd., Kent, England) にかけ、D 緩衝液 [50 mM トリス-塩酸緩衝液 (pH 7.4)、50 mM $(NH_4)_2SO_4$ 、1 mM EDTA、0.5 mM DTT、10% (v/v) グリセロール、0.1 mM PMSF (Sigma)] で洗浄した。組換え活性のあった通過画分を Bio-Rex70 カラム (Bio-Rad Laboratories, Richmond, Calif., U.S.A.) にかけ、B 緩衝液 [50 mM リン酸ナトリウム緩衝液 (pH 7.0)、1 mM EDTA、0.5 mM DTT、10% (v/v) グリセロール、0.1 mM PMSF] で洗浄後、0.4 M NaCl を含む B 緩衝液で溶出した。組換え活性のあった 0.4 M NaCl 溶出画分を ハイドロキシアパタイトカラム (DNA-Grade Bio-Gel HTP ; Bio-Rad Laboratories) にかけ、H 緩衝液 [0.1 M リン酸カリウム緩衝液 (pH 7.5)、2 mM DTT、10% (v/v) グリセロール、0.1 mM PMSF] で洗浄後、0.2 M リン酸カリウム緩衝液を含む H 緩衝液で溶出した。組換え活性のあった溶出画分を Bio-Rex70 カラムにかけ、B 緩衝液で洗浄後、0.4 M NaCl、33% (v/v) グリセロ

ールを含むB緩衝液で溶出した。組換え活性のあった溶出画分をRタンパクの精製標品として使用した。この精製標品をSDS-ポリアクリルアミドゲル電気泳動にかけた結果、多くのタンパクバンドが認められ、この標品はRタンパクの部分精製標品であった。また、この標品にはヌクレアーゼ活性は認められなかった。

DNase I フットプリンティング解析: Andrews らの方法 (1) を改変して行った。まず、Maniatisらの方法 (48) に従って、制限酵素切断で5'突出末端をもつDNA断片とDNA polymerase I Klenow断片および [α - 32 P]dCTPをdATP、dGTP、dTTPを含む反応液に加え、25℃で30分間反応させて、3'末端が 32 Pで標識されたDNA断片を調製した。このDNA断片を適当な制限酵素で切断し、ポリアクリルアミドゲル電気泳動にかけ、目的のDNA断片を回収し、一端のみが 32 Pで標識されたDNA断片を得た。このDNA断片とRタンパク部分精製標品とを50 μ lの反応液 [50 mM トリス-塩酸 (pH 7.5)、5 mM MgCl₂、50 mM NaCl、1 mM DTT、5 % (v/v) グリセロール、100 μ g/ml子牛の胸腺のDNA (Sigma)]に加え、30℃で30分間反応させた。その後、適当量のDNase I 溶液 [子牛のすい臓由来のDNase I (Sigma) を50 mM KCl、10 mM トリス-塩酸緩衝液 (pH 7.4)、10 % (v/v) グリセロール、2 mM CaCl₂、0.1 mg/ml BSA を含む溶液に溶かした] を加え、30℃で7分間処理した。これに、150 μ lの停止溶液 [50 mM EDTA、0.2 % (w/v) SDS、50 μ g/ml tRNA] を加えてDNase I 処理を停止させた後、フェノール抽出、エタノール沈殿を行った。このDNA試料をDNA変性用色素液 [80 % (w/v) 脱イオン化ホルムアミド、10 mM NaOH、1 mM EDTA、0.1 % (w/v) XC、0.1 % (w/v) BPB] に溶かし、90℃、5分間熱変性した後、8 %の変性ポリアクリルアミドゲルに乗せ、2,000Vで電気泳動した。ゲルを乾燥後、X線フィルムを用いてオートラジオグラフィーを行った。また、タンパクの結合領域の推定はDNase I 処理したDNA断片の泳動パターンと、同じDNA断片をMaxam とGilbertの方法 (49) でGとAまたはTとCで部分分解したDNA断片との泳動パターンを比較して行った。

第3節 実験結果

3. 1 *S. cerevisiae* におけるpSR1プラスミドの分子内組換え

1) 分子内組換え部位の限定

大腸菌宿主内での複製能を与えるため、pSR1 プラスミド A 型の小ユニーク領域に YIp32S プラスミドを連結した雑種プラスミド pSRT301 を構築し、この雑種プラスミドを用いて、その pSR1 区分に 1 か所 SalI リンカーが挿入された種々の変異プラスミドが多数分離されている (40)。また、pSR1 プラスミドの分子内組換えは IR を介して起こることがわかっている (2, 90)。そこで、種々の SalI リンカー挿入変異プラスミドのうち、制限酵素解析から、その pSR1 区分の一方の IR に 1 か所 SalI リンカーが挿入された変異プラスミド (Fig. 2-1 の矢印で示す位置に SalI リンカーが挿入されている) を用いて分子内組換えに必須な領域の限定を行った。挿入 SalI 部位の位置をさらに詳細に限定するために、挿入 SalI 部位付近の DNA を M13 ファージにクローニング後、ダイデオキシシーケンス法を用いて DNA 塩基配列を決定した結果、SalI リンカーは Fig. 2-2 に示す位置に挿入されていた。いずれの変異プラスミドも 1 個の SalI リンカーを含んでいたが、多くのプラスミドでは、変異部位に塩基欠失 (最大 311 bp) または重複を伴っていた。すなわち、pSRT309、pSRT326、pSRT306、pSRT308 では、各々、21 bp、311 bp、4 bp、22 bp の欠失が生じており、pSRT321、pSRT322 では、各々、9 bp、14 bp の重複が生じていた。また、pSRT327 では、5 bp の欠失が生じており、さらに、新しく AvaI 部位が形成されていた。

まず、これらの SalI リンカー挿入変異プラスミドで分子内組換えが起こるかを調べるために、これらの変異プラスミドを *S. cerevisiae* NA87-11A-D (*leu2-3, 112* [*cir*°]) に導入した。30°C で 4 日間培養後、各々の変異プラスミドごとに、平板培地上に生育した *Leu*⁺ 形質転換体からプラスミド DNA を調製した。調製したプラスミド DNA で大腸菌 RR1 株をアンピシリン耐性に形質転換することにより、酵母宿主内の各プラスミド分子を 1 分子 (クローン) ずつに分別した。各々のアンピシリン耐性形質転換体から調製したプラスミド DNA クローンを制限酵素 AvaI で切断後、アガロースゲル電気泳動法で、DNA 断片の大きさを調べ、A 型 (原型) 分子か B 型 (組換え型) 分子かを判断した (A 型分子および B 型分子が取ると予想された構造を、Fig. 2-3B に示す)。pSR1 プラスミドの分子内組換えは、R 遺伝子に適当なプロモーターを結合しない限り、大腸菌内では起こらないので、B 型分子

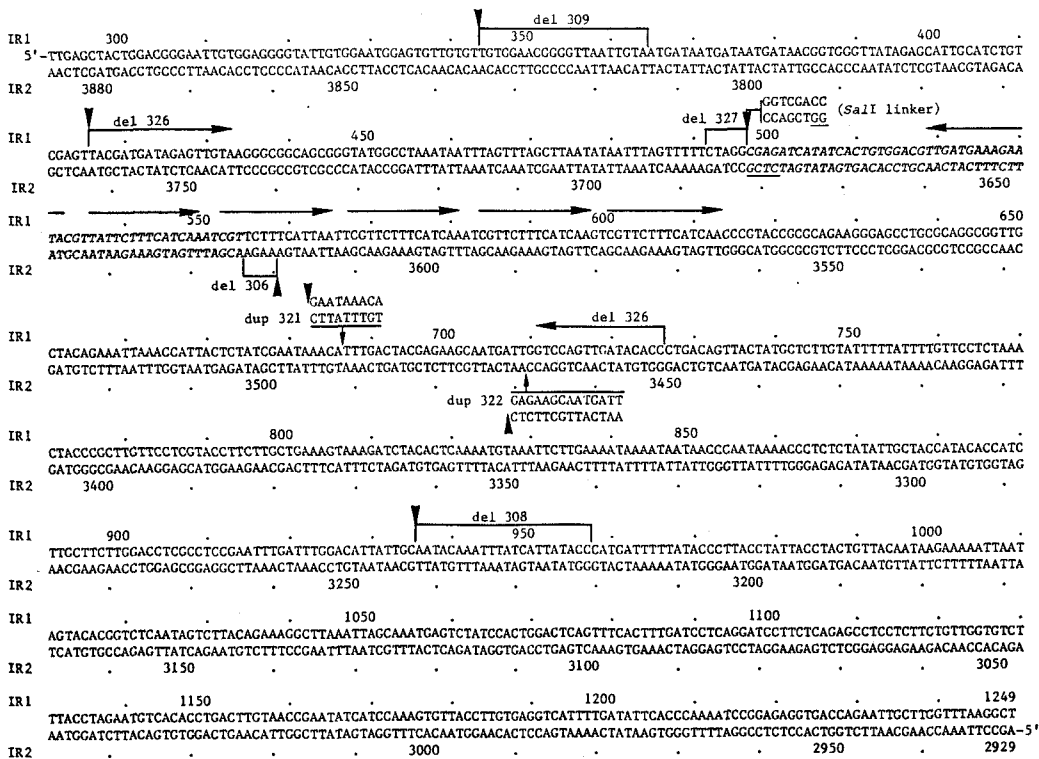


Fig. 2-2. Exact insertion sites of the SalI linker in the mutant plasmids. Insertion sites of each 8-bp SalI linker on mutant plasmids determined by sequencing the nucleotides are indicated with arrowheads bearing the mutant number (description of pSRT was omitted from the plasmid symbols) for the IR1 (upper) and IR2 (lower) sequences of the inverted repeats. del and dup represent the deletion and duplication, respectively, which occurred accidentally by mutagenesis with the linker insertion. The new AvaI site, 5'-CCCGAG-3', created by the linker insertion in the pSRT327 is underlined. The italicized nucleotide sequence between the insertion sites of pSRT327 and pSRT306 indicates the 58 bp region containing the essential sequence for the intramolecular recombination. Horizontal arrows indicate the 14-bp repeated sequences.

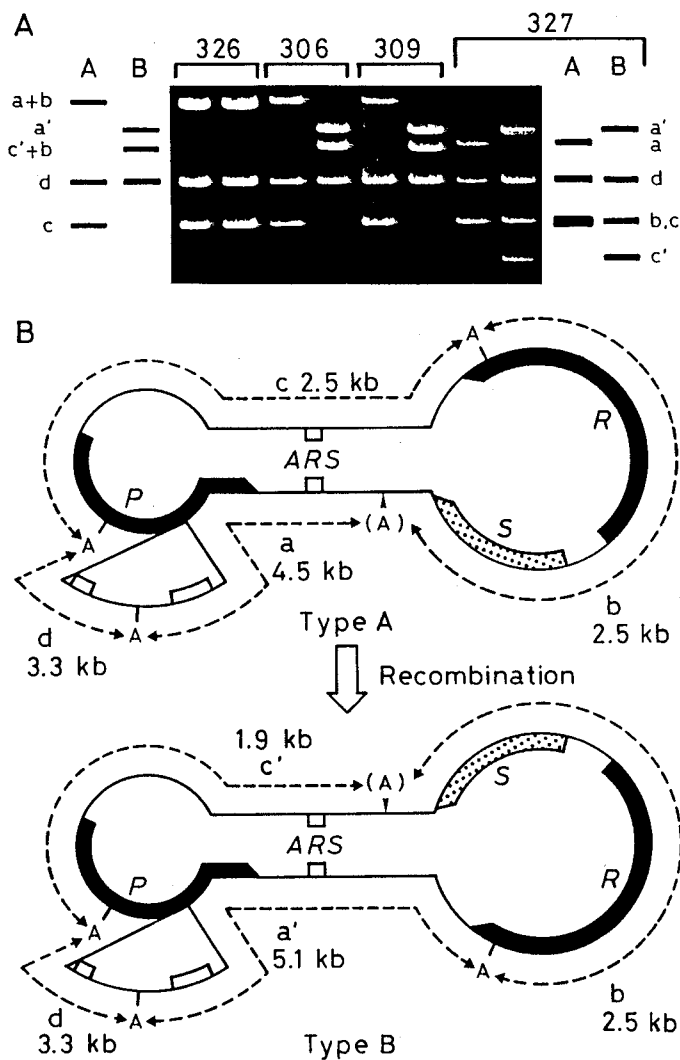


Fig. 2-3. Clonal analysis of the mutant plasmids. The DNA of each plasmid clone prepared from the *E. coli* transformant was restricted with *Ava*I and electrophoresed on agarose gel. Panel A shows the migration patterns and possible migration patterns of the restriction fragments of type A (lane A) or B (lane B) configuration of the plasmid molecules of pSRT306 (indicated as 306), pSRT309 (309), pSRT326 (326), and pSRT327 (327) as illustrated in panel B. pSRT327 has an additional *Ava*I site indicated by an arrowhead with (A). The a, a', b, c, c', and d bands shown in panel A correspond to the DNA fragments of the plasmid molecules as shown in panel B.

は、酵母内での組換えによって生じたと考えられる。この結果、pSRT326 では、調べたプラスミドクローンは全てA型分子であったが（35個；Fig. 2-3A に調べたクローンのうちの2クローンのゲル写真を示した）、pSRT306、pSRT308、pSRT309、pSRT321、pSRT322、pSRT327 では、A型分子とB型分子がほぼ同数ずつ得られた（Fig. 2-3A およびTable 2-2）。したがって、pSRT326 以外のプラスミドでは、*S. cerevisiae* 宿主内で分子内組換えが起こったと考えられる。これらの結果から、pSRT326 プラスミドが欠失している311 bpの領域（IR1 の416 塩基から726 塩基）に分子内組換えにとって必須な領域が含まれており、他のSalIリンカー挿入変異は分子内組換えに影響を及ぼさないことが示唆された。また、pSRT327 では、予想されたA型分子およびB型分子以外のクローンも得られたが、これらのクローンの解析結果は、次の「分子内組換えに伴う遺伝子変換」の項で述べる。

Table 2-2. Frequencies of gene conversion associated with intramolecular recombination

Plasmid	Host <u>RAD52</u> genotype	No. of plasmid clones				
		Total	Recombinant ^a	Gene convertant		
				Total ^b	<u>SalI</u> / <u>SalI</u> ^c	+/ ^d
pSRT308	+	36	11	3 (1)	2	1
pSRT322	+	33	18	10 (5)	2	8
pSRT321	+	25	13	12 (4)	8	4
pSRT306	+	38	21	5 (1)	3	2
pSRT327	+	62	24	18 (11)	10	8
pSRT309	+	33	18	1 (1)	0	1
pSRT327 (R ⁻)	+	13	0	0	0	0
pSRT2709	+	50	34	19 (5)	3	16
pSRT0627	+	35	0	1 (1)	0	1
pSRT0609	+	38	1	0	0	0
pSRT327	<u>rad52-1</u>	33	17	5 (2)	4	1
pSRT327 (R ⁻)	<u>rad52-1</u>	42	0	0	0	0

^aRecombinant class of plasmid clones, discriminated by the relative orientation of two unique regions, which involves both the gene-convertant and nonconvertant clones.

^bNumbers in parentheses indicate the number of plasmid clones showing the original configuration of two unique regions among the plasmid clones showing the gene conversion.

^cSalI/SalI represents the plasmid clones having the SalI site on both copies of the inverted repeats.

^d+/+ represents the plasmid clones having the wild type or without the SalI site for both copies of the inverted repeats.

次に、個々の変異プラスミドの挿入SalI部位に対して、左右どちら側で組換えが起こったかを調べ、組換え部位をさらに詳細に限定した。組換え部位の限定はFig. 2-4に示した方法で行った。たとえば、Fig. 2-4B に示した構造のSalIリンカー挿入変異プラスミドを *S. cerevisiae* 細胞内で増殖させた後、*S. cerevisiae* 細胞から回収したプラスミドを大腸菌に導入し、*S. cerevisiae* 細胞に存在した個々のプラスミドクローンを分別する。各クローンを制限酵素MluIとSalIで二重切断する。もしも、SalI部位よりも左側 (Fig. 2-4BにおいてLで示した位置) で組換えが起こったならば、プラスミド分子はB-I型の構造 (Fig. 2-4A)に変化し、A型分子と同じDNA断片が生じる。組換えがSalI部位よりも右側 (Fig. 2-4BにおいてRで示した位置) で起こったならば、B-II型の構造 (Fig. 2-4C)に変化し、A型分子と異なるDNA断片が生じる。プラスミドクローンを制限酵素MluIとSalIで二重に切断後、アガロースゲル電気泳動で切断パターンを調べることで、挿入SalI部位の左右どちら側で組換えが起こったかを定めることができる。

Fig. 2-3の実験のAvaI切断パターンから、組換え型 (B型) と決まったプラスミドクローンを制限酵素MluIとSalIで二重切断後、アガロースゲル電気泳動にかけた (Fig. 2-5)。この結果、SalI部位が両方のIRの相対する位置に存在したり、IRから消失しているクローンも観察されたが、このような予想外のクローンは除外して考えた。このような予想外のクローンについては、後ほど述べる。種々の変異プラスミドのうち、pSRT309 (21 クローンを調べたが、そのうちの11クローンを示した)、pSRT327 (24クローンのうち5 クローンを示した) では、調べたクローンは全てA型分子と同じ切断パターンを示し、B-I型分子であったが、pSRT306 (20 クローンのうち12クローンを示した)、pSRT321 (2クローン; 結果省略)、pSRT322 (6 クローン; 結果省略) では、全てA型分子と異なるパターンを示し、B-II型分子であった。したがって、pSRT309、pSRT327の挿入SalI部位よりも左側で、pSRT306、pSRT321、pSRT322の挿入SalI部位よりも右側で組換えが起こった。このことから、組換え部位はpSRT306のSalI部位とpSRT327のSalI部位の間にあるといえる。pSRT306とpSRT322の挿入SalI部位はIR2に他の変異プラスミドの挿入SalI部位はIR1に存在するので、pSRT306とpSRT327のSalIリンカー部位の位置から、組換え部位は、IR1上の497塩基から554塩基の間、IR2上の3,624塩基から3,681塩基の間の58 bp配列内 (Fig. 2-2のイタリック文字で示した領域) に限定された。58 bp配列内には3 bpのスペース部を挟む14 bpの逆向き反復配列が存在する。また、これに続いて4個の同じ14 bp反復配列が存在するが、これらは58 bp配列に含まれていない。

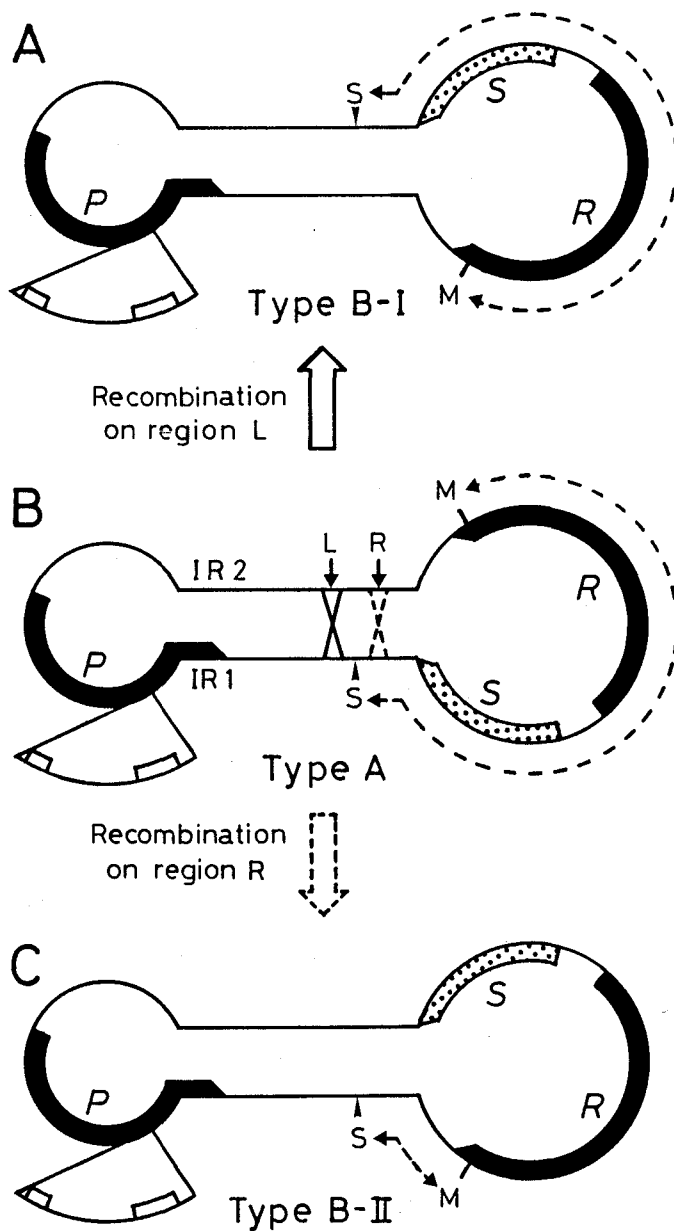


Fig. 2-4. Strategy for determination of the recombination site on the pSRT plasmids by examination of the SalI-MluI fragments. Symbols are described in the legend to Fig. 2-1.

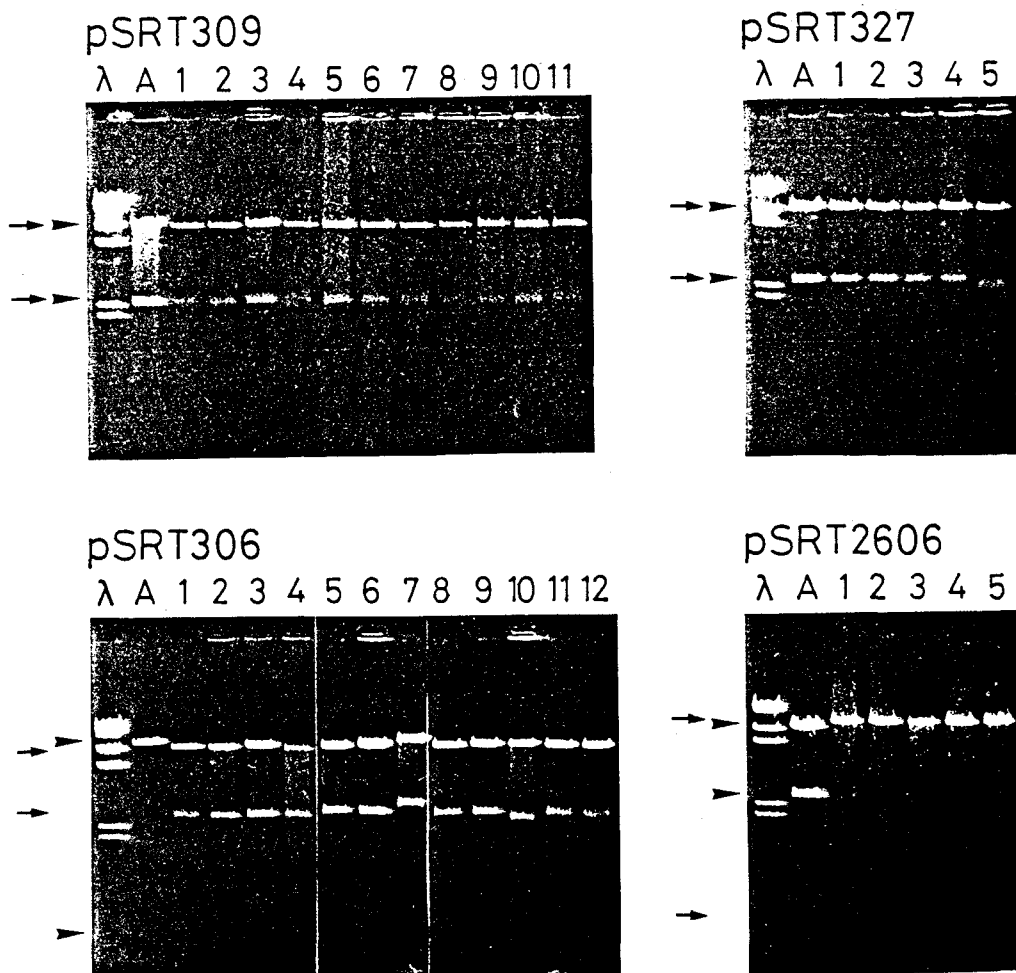


Fig. 2-5. Restriction analyses of pSRT309, pSRT327, pSRT306, and pSRT2606. Several type B (recombinant) molecules of each mutant plasmid discriminated by AvaI digestion (Fig. 2-3) were double digested with SalI and MluI and electrophoresed on an agarose gel according to the strategy shown in Fig. 2-4. Each original type A molecule of the mutant plasmids was electrophoresed on lane A of each panel, and lane λ contained the λ phage DNA restricted with HindIII. Arrowheads on the left margin of each panel indicate the migration sites of the original type A plasmid, while those indicated by arrows are the bands of type B plasmid molecules.

次に、分子内組換えに必須な領域を限定することを行った。このために、SalIリンカー挿入変異プラスミドの小さいほうのMluI-SalI断片と、他のリンカー挿入変異プラスミドの大きいほうのMluI-SalI断片とを連結し、Fig. 2-6に示す種々の欠失変異プラスミドを作製した。これら欠失変異プラスミドをS. cerevisiae NA87-11A-D株に形質転換法で導入した。この形質転換体を用いてSalIリンカー挿入変異プラスミドの場合と同様の方法で分子内組換えの有無を調べた。この結果、Fig. 2-6に示すように58 bp 配列を含む領域を欠失したpSRT2627、pSRT0627およびpSRT0609では、原型分子ばかりが観察されたが、58 bp 配列の外側の領域のみを欠失したpSRT2606およびpSRT2709では、ほぼ同数の原型分子と組換え型分子が観察された。したがって、58 bp 配列の外側の領域のみを欠失したプラスミドでは分子内組換えは起こるが、58 bp 配列を含む領域を欠失したプラスミドでは分子内組換えは起こらない。このことから、先に組換え部位として限定した58 bp 配列内のDNAが分子内組換えにとって必須である。R遺伝子を欠損したpSRT310 および58 bp 配列を欠失したpSRT0609では、各々1個の組換え型分子が観察されたが、これらの分子は宿主の持つ普遍的組換え系によって生じたと考えられる。

2) 分子内組換えに伴う遺伝子変換

前項目で述べたように、S. cerevisiae から回収したpSRT327 プラスミドを大腸菌で1分子ずつに分別し、AvaIで切断後、アガロースゲル電気泳動を行うと、A型分子とB型分子に相当する2種類の切断パターンが観察されると予想されたが、Fig. 2-7A の上側に示した5種類の切断パターンが観察された。aレーンのパターンとbレーンのパターンは、各々A型分子（62クローンを調べたうちの27クローン）とB型分子（62クローンのうち17クローン）に一致するが、他のプラスミドの示す切断パターンは分子内組換えだけでは説明できない。pSRT327 プラスミドではSalIリンカーの挿入により新しくAvaI部位が形成されている（Fig. 2-2）。AvaI切断パターンから、遺伝子変換によりIR1 上のAvaI部位が、IR2 上の相対する位置にも移り、両方のIRにAvaI部位が形成されている場合（cレーン：62クローンのうち10クローン）と、IR1 上のAvaI部位が消失して、両方のIR上からAvaI部位が失われた場合（dレーンおよびeレーン：62クローンのうち8クローン）とが考えられる（Fig. 2-7B）。これらの変化を隣接する挿入SalI部位で確かめるために、各レーンのプラスミドクローンを制限酵素SalIで切断してSalIリンカー部位の変化を調べた（Fig. 2-7A 下側の写真）。この結果、aレーンおよびbレーンのプラスミドでは1か所

Plasmid	Recombinant Total
pSRT309	$\frac{18}{33}$
pSRT310(R ⁻)	$\frac{1}{33}$
pSRT326	$\frac{0}{35}$
pSRT2606	$\frac{8}{21}$
pSRT2627	$\frac{0}{30}$
pSRT0627	$\frac{0}{35}$
pSRT0609	$\frac{1}{38}$
pSRT2709	$\frac{34}{50}$

Fig. 2-6. Effect of the deletion in the inverted repeats on the intramolecular recombination of pSRT plasmids. The deletion plasmids were constructed by ligation of the appropriate SalI-MluI fragments originating from the mutant plasmids. pSRT2606 was constructed from those fragments of pSRT326 and pSRT306, pSRT2627 from pSRT326 and pSRT327, pSRT0627 from pSRT306 and pSRT327, pSRT0609 from pSRT306 and pSRT309, and pSRT2709 from pSRT327 and pSRT309. The hatched box on the scale represents the 58 bp region, and the boxes with numbers indicate the approximate insertion sites of the SalI linker in each mutant plasmid. Verification of intramolecular recombination was carried out by using the same procedure as described in the legend to Fig. 2-3.

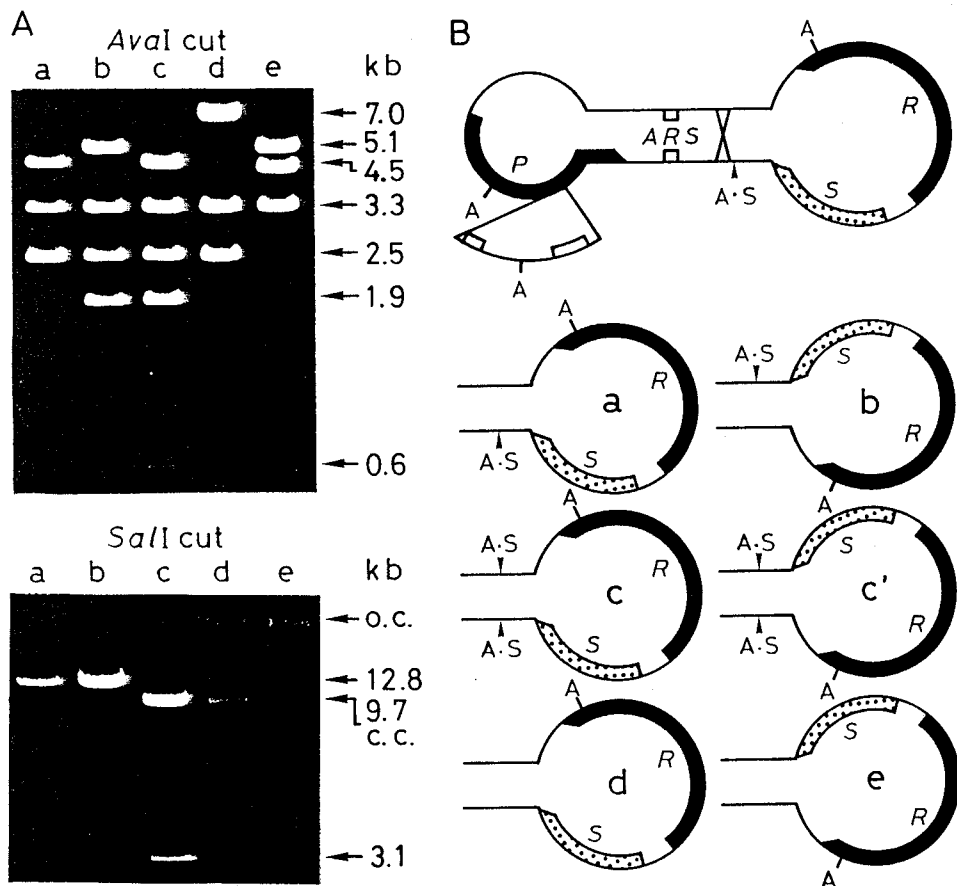


Fig. 2-7. Occurrence of variant molecules from pSRT327. Plasmid DNA of pSRT327 was prepared from the *S. cerevisiae* host. This DNA was used for the transformation of *E. coli* to the *Amp^r* phenotype. (A) Several independent samples of pSRT327 DNA prepared from the *E. coli* transformants were examined for their structure on agarose gel after restriction with *AvaI* and *SalI*. DNA samples showing five different classes of migration patterns (lanes a through e) are illustrated in these panels. The molecular sizes of the DNA fragments were estimated by comparison with the λ phage DNA digested with *HindIII*. (B) Structures of the pSRT327 variant molecules, assuming that gene conversion took place at the *AvaI-SalI* (A·S) site.

で切断され、SalI部位に変化はなかった。c レーンのプラスミドは2断片に切断され、両方のIRの相対する位置にSalI部位が生じていた。d レーンおよびe レーンのプラスミドは切断されず、両方のIRからSalI部位が消失していた。このように、SalI部位の変化はIRのAvaI部位で考えられた変化と一致することから、IRのAvaI・SalI 部位では遺伝子変換が起こると言える。以上の現象をまとめると、pSRT327 プラスミドのAvaI・SalI 部位では遺伝子変換が起こる結果、AvaI・SalI/+ 型のIRをもつプラスミドから、AvaI・SalI/AvaI・SalI 型のIRまたは+/+ 型のIRをもつプラスミドが生じる (Fig. 2-7B)。また、+/AvaI・SalI 型のプラスミドは生じなかった。

次に、種々のSalIリンカー挿入変異プラスミドおよび欠失変異プラスミドで、遺伝子変換が起こることを調べた。S. cerevisiae から回収した変異プラスミドを、大腸菌を使用して個々のクローンに分別した後、制限酵素SalIで切断し、アガロースゲル電気泳動を行った。切断パターンから、遺伝子変換の有無および種類 (+/+ 型またはSalI/SalI 型) を判断した。その結果、R 遺伝子を欠損したpSRT327 (R⁻) および58 bp 配列を欠くpSRT0609 とpSRT0627では遺伝子変換はほとんど観察されなかったが、他のプラスミドでは、+/+ 型およびSalI/SalI 型の遺伝子変換が高頻度で観察された (Table 2-2) 。pSRT0627では遺伝子変換を起こしたクローンが1個観察されたが、これは宿主の普遍的組換え系によって生じたと考えられる。また、大きい欠失 (pSRT2709では153 bpが欠失している) でも、58 bp 配列に対しARS 配列 (自律複製配列) よりも遠い部位 (pSRT308) でも、高頻度で遺伝子変換が観察された。したがって、遺伝子変換は分子内組換えに伴ってIR全域で起こっている。これらの変異部位は両方のIRに形成されたり、両方のIRから消失したりするが、元の変異IRから消失して、他方のIRに変異が転移することはなかった。

遺伝子変換は大腸菌内で起こった可能性もあるが、S. cerevisiae から回収したpSRT327 を直接AvaIで切断し、アガロースゲル電気泳動を行った後、³²P で放射能ラベルしたpSR1プラスミドをプローブとしてサザン解析を行うと、遺伝子変換型プラスミドのバンドも観察されたこと (結果省略) から、遺伝子変換は大腸菌内で起こったのではなく、S. cerevisiae 宿主内で起こったといえる。

以上の結果から、S. cerevisiae 宿主内においてIR内の変異部位では分子内組換えに伴ってIR全域で遺伝子変換が起こることがわかった。

3) 分子内組換えおよび遺伝子変換へのRAD52 遺伝子の関与

S. cerevisiae において体細胞分裂時の遺伝的組換えおよび遺伝子変換にはRAD52 遺伝子の働きが必須である(36, 47, 65)。そこで、pSR1プラスミドの分子内組換えおよび遺伝子変換にRAD52 遺伝子の働きが必要であるかを調べた。まず、*rad52-1* 変異株NS1-2CをpSRT327 で形質転換した。形質転換体を30℃で4日間培養後、NA-87-11A-D 株と同様の方法で分子内組換えと遺伝子変換の有無を調べた。この結果、*rad52* 変異株でも野生株と同じ頻度で分子内組換え(野生株では62クローン中24クローンに対し、変異株では33クローン中17クローン)と遺伝子変換(野生株では29%に対し、変異株では15%)が起こった(Table 2-2)。このことから、これらの現象にはRAD52 遺伝子の働きは必要でないと言える。

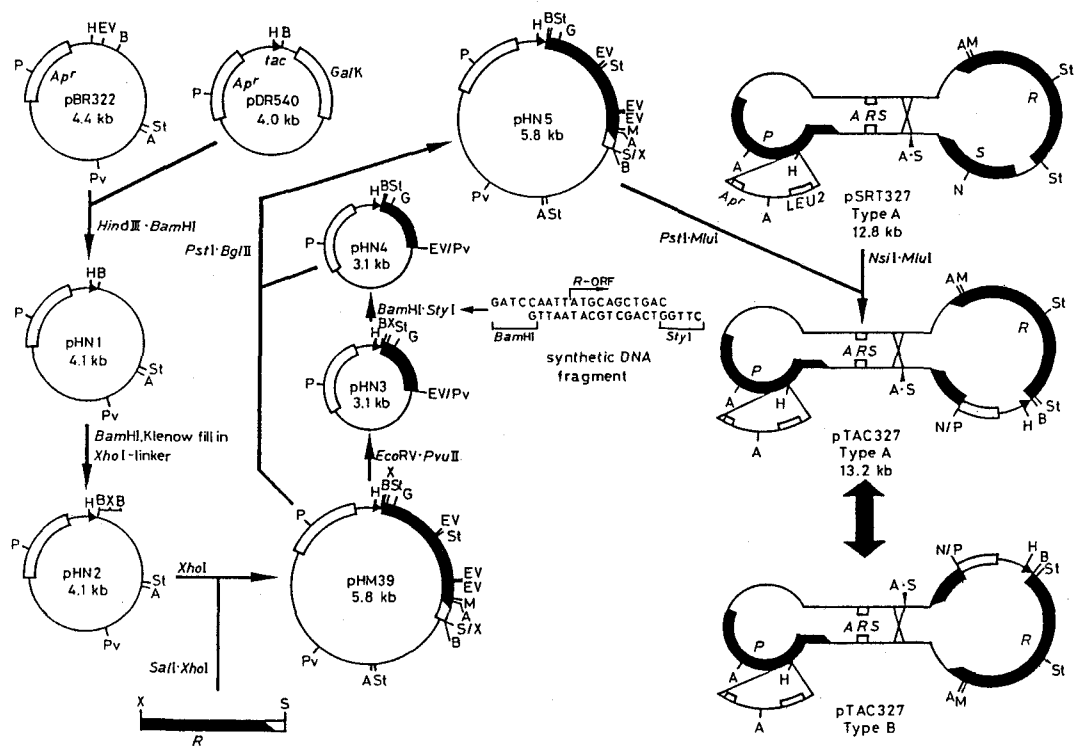


Fig. 2-8

Fig. 2-8. Construction and intramolecular recombination of pTAC327 plasmid. Plasmid pHN1 was constructed by ligation of a small HindIII-BamHI fragment of pDR540 (68) containing tac promoter and a large HindIII-BamHI fragment of pBR322 (6). XhoI linker was inserted at a BamHI site of pHN1 after fill-in reaction. To clone R gene, plasmid pSRT303 (40) was restricted partially with PvuII and linearized at 152 bp upstream from ATG of the R gene and digested with BAL31 exonuclease and was ligated with XhoI linker. Consequently, XhoI linker was positioned at 16 bp upstream from the ATG of R gene on pSRT303. The XhoI-Sall fragment containing R gene was inserted into the XhoI site of pHN2 to generate pHM39. A small PvuII-EcoRV fragment of pHN39 was deleted and the small BamHI-StyI fragment was replaced with a BamHI-StyI 24 bp synthetic duplex DNA fragment to generate pHN4. A large PstI-BglII fragment of pHN4 was replaced with a large PstI-BglII fragment of pHM39 to generate pHN5. Plasmid pTAC327 was constructed by connecting a large MluI-NsiI fragment of pSRT327 with a small PstI-MluI fragment of pHN5. pTAC327 recombines to isomer as illustrated by thick arrow. Open boxes with Galk indicates the Galk gene of E. coli. The approximate position of AvaI-Sall site generated by the Sall linker insertion is indicated by an arrowhead. The tac promoter is indicated with a closed triangle. Abbreviations for the restriction sites are; A, AvaI; B, BamHI; EV, EcoRV; G, BglII; H, HindIII; M, MluI; N, NsiI; P, PstI; Pv, PvuII; S, Sall; St, StyI; and X, XhoI.

3. 2 大腸菌におけるpSR1プラスミドの分子内組換え

1) pSR1プラスミドの分子内組換えへの酵母宿主因子の関与

pSR1プラスミドの分子内組換えに酵母宿主因子が関与しているかを調べるために、大腸菌内でR遺伝子を発現することを試みた。第1部で示したように、pSRT327はS. cerevisiae 宿主内で分子内組換えを行うが、pSRT326は組換え部位を欠失しているために、pSRT327(R⁻)はR遺伝子が欠損しているために、分子内組換えを行わない。これらのプラスミドは大腸菌内で複製することはできる。しかし、pSRT327は大腸菌内では分子内組換えを行わず、R遺伝子プロモーターが大腸菌内で機能していないのではないかと考えられた。そこで、R遺伝子プロモーターをIPTGの誘導により大腸菌内で発現可能なtacプロモーター(26)に置き換えた。Fig. 2-8に示すように、pSRT327、pSRT326、pSRT327(R⁻)プラスミドのNsiI-StyI断片(543 bp)をtacプロモーターを含むPstI-BamHI断片(877 bp)と24 bpのBamHI-StyI合成2本鎖DNAで置き換えて、pTAC327、pTAC326、pTAC327(R⁻) (いずれもA型分子である)を作製した(Fig. 2-8ではpTAC327の作製方法を図示した)。pTAC326、pTAC327(R⁻)はそれぞれpSRT327をpSRT326、pSRT327(R⁻)に置き換えて作製した)。これらプラスミドでは、tacプロモーターのSD配列とR遺伝子のATGの間隔は大腸菌での発現に最適とされる7 bpである。大腸菌JM103株をpTAC327、pTAC326、pTAC327(R⁻)で形質転換し、得られたアンピシリン耐性形質転換体を1 mM IPTGおよびアンピシリンを含むLB液体培地で37℃で2日間培養した。大腸菌からプラスミドDNAを回収し、HindIIIで切断後、アガロースゲル電気泳動を行い、A型分子のバンドおよびB型分子のバンドを観察した(Fig. 2-9)。その結果、pTAC327ではほぼ同じ濃度でA型分子のバンドとB型分子のバンドが観察されたが、pTAC326、pTAC327(R⁻)ではA型分子のバンドだけが観察された(Fig. 2-9; 9レーン、3レーン、5レーン)。したがって、大腸菌内でも、Rタンパクの働きでpSR1プラスミドの分子内組換えが起こる。IPTGを含まないLB液体培地で培養した大腸菌からpTAC327を回収し、分子内組換えの有無を調べるとA型分子とB型分子のバンドが観察され、分子内組換えが起こっていた(8レーン)。これは、IPTGを含まない培地で培養してもR遺伝子が弱く発現し、それで十分組換えが生じたと考えられる。これらのことから、pSR1プラスミドの分子内組換えには酵母宿主因子は関与していないといえる。

2) 分子内組換えへの大腸菌の普遍的組換え遺伝子の関与

大腸菌の普遍的組換えに働く recA 遺伝子、recBC 遺伝子 (20) が大腸菌内で起こる分子内組換えに関与しているかを調べた。大腸菌 JA221 株 (recA⁻) および JC8679 株 (recB⁻C⁻sbcA⁻) を pTAC327 プラスミドで形質転換した。この形質転換体を用いて、前項目の JM103 株と同様の方法で分子内組換えの有無を調べた。この結果、JA221 株の場合 (Fig. 2-9; 11 レーン) でも、JC8679 株の場合 (結果省略) でも、ほぼ同じ濃度で A 型分子のバンドと B 型分子のバンドが観察された。したがって、pSR1 プラスミドの分子内組換えは recA⁻ 株 (JA221 株) でも、recB⁻C⁻ sbcA⁻ 株 (JC8679 株) でも起こる。このことから、pSR1 プラスミドの分子内組換えには、大腸菌の普遍的組換えに関与する遺伝子のうち少なくとも recA 遺伝子と recBC 遺伝子の働きは不必要であると考えられる。

3. 3 R タンパクの DNA への結合

pSR1 プラスミドの分子内組換えに R タンパクが必須であることから、R タンパクの組換え部位 DNA への結合が示唆される。そこで、R タンパクの 58 bp 配列を含む DNA への結合を検討するために DNase I フットプリンティング実験を行った。

まず、R タンパク標品を得るために大腸菌内で R タンパクを生産させ、この大腸菌から in vitro 組換え活性を指標にして R タンパクを精製した。tac プロモーターの下流に R 遺伝子を繋いだプラスミド pNN115 (Fig. 2-10) をもつ大腸菌 JM103 株をアンピシリンを含む 2xYT 培地で 37℃ で A₆₅₀ = 0.5 まで培養後、IPTG (最終濃度 1 mM) を加え、さらに 2 時間培養した。菌体を溶菌後、抽出液を DEAE セルロースカラム (通過画分)、Bio-Rex 70 カラム (0.4 M NaCl 溶出画分)、ハイドロキシアパタイトカラム [0.2 M (KH₂PO₄, K₂HPO₄) 溶出画分]、Bio-Rex 70 カラム (0.4 M NaCl 溶出画分) にかけて精製し、R タンパク標品とした。この R タンパク標品を SDS-ポリアクリルアミドゲル電気泳動にかけたところ、多くのタンパクバンドが認められ、部分精製標品であった (結果省略)。

部分精製 R タンパクの 58 bp 配列を含む DNA への結合を DNase I フットプリンティング法で調べた。58 bp 配列を含むプラスミド pNN225 を HindIII で切断後、3' 末端を

[α -³²P] dCTP で放射能ラベルした。この DNA 断片を XbaI で切断後、ポリアクリルアミドゲル電気泳動を行い、放射能ラベルされ、58 bp 配列を含む 225 bp の HindIII - XbaI DNA 断片を調製した (Fig. 2-11B では、HaeIII 部位が HindIII 部位に TaqI 部位が XhoI 部位に相当す

る)。このDNA断片をRタンパク部分精製標品と30℃、30分反応後、DNase I で処理した。DNA断片を一本鎖に変性後、変性ポリアクリルアミドゲル電気泳動を行った。DNA断片のサイズは、同じ225 bp DNA断片をMaxam-Gilbert 法で部分分解して得られたDNA断片の移動度と比較して決めた (Fig. 2-11AのG+A レーンおよびT+C レーン)。この結果、58 bp 配列内に存在する一対の14 bp の逆向き反復配列とその隣に続いて存在する4個の同じ14 bp 配列がDNase I による切断から保護され (Fig. 2-11)、Rタンパクが14 bp の繰り返し配列に結合することが示唆された。

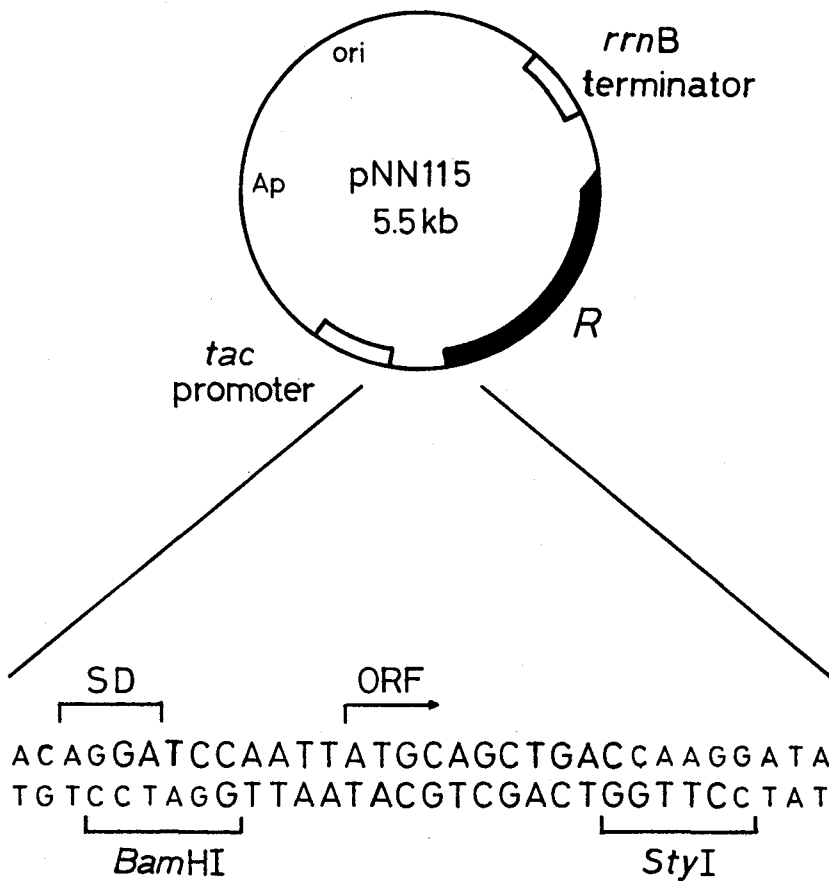


Fig. 2-10. Structure of plasmid pNN115. Plasmid pNN115 was used for production of R protein in *E. coli*. pNN115 was constructed with the DNAs of tac promoter-R fused-gene (Fig. 2-8) and rrnB ribosomal RNA transcription terminators (12).

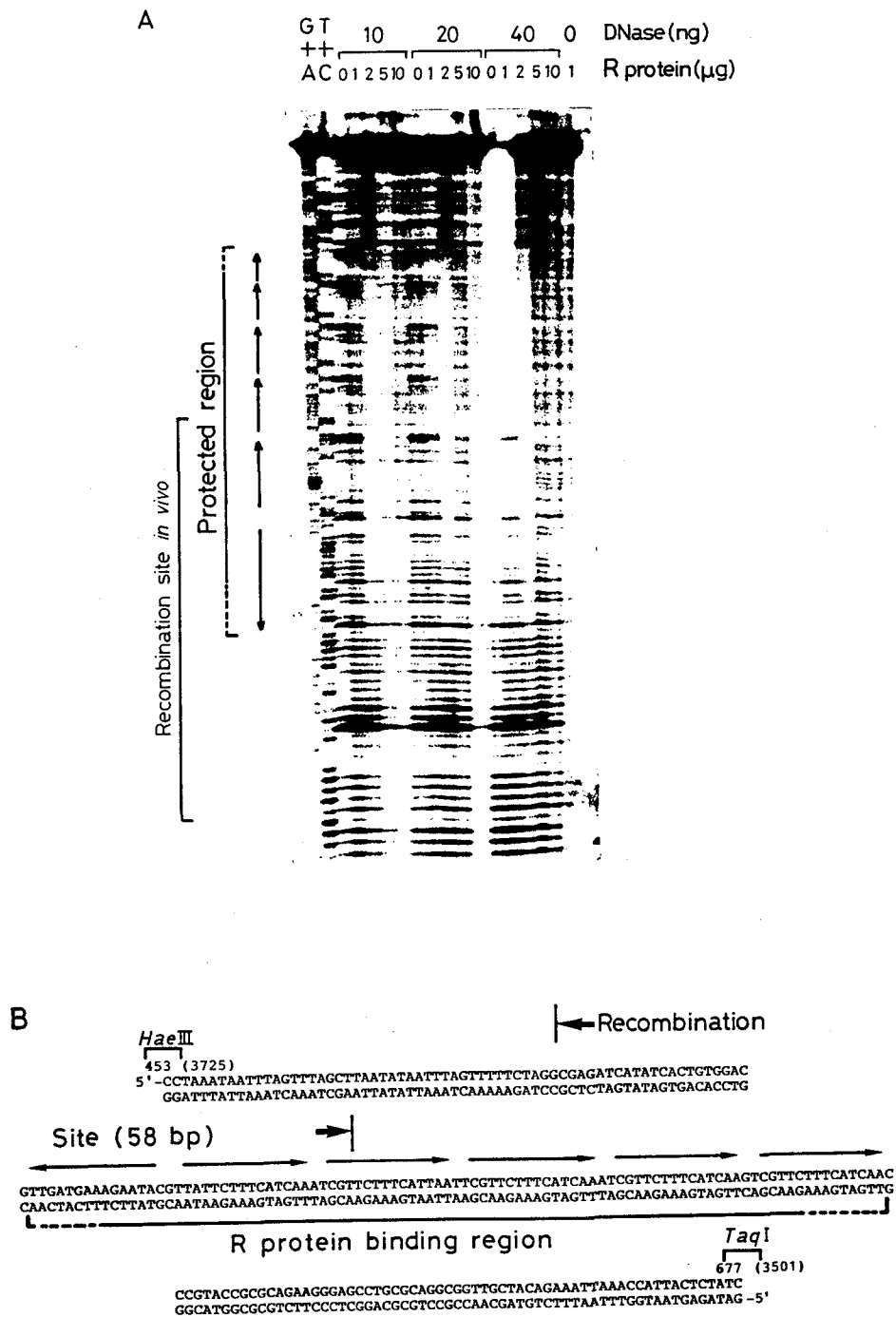


Fig. 2-11

Fig. 2-11. DNase I footprints of R protein on the 225 bp DNA fragment containing recombination site. (A) 3'-End-labeled fragments corresponding to the bottom strand of 225 bp fragment (B) containing recombination site were incubated with 1, 2, 5, or 10 μ g of partially purified R protein preparation or without it (0). Samples were then treated with 10, 20, 40 ng of DNase I or without it (0) and electrophoresed on 8% denaturing acrylamide gel. Lanes G+A and T+C contain DNA sequence markers, G+A and T+C, respectively, prepared by the method of Maxam and Gilbert (49). Protected regions are indicated by bracket, and dashed lines of bracket indicate a region of partial protection. Arrows indicate the 14 bp repeated sequences. (B) Binding region of R protein. The DNA sequence of 225 bp DNA fragment containing recombination site is indicated. For DNase I footprinting experiment, the DNA fragment, in which HaeIII and TagI site are converted to HindIII and XhoI site, respectively, was used.

第4節 考察

3. 1でpSR1プラスミドの分子内組換えに必須な領域を、*S. cerevisiae* 宿主内で限定した結果、組換えに必須な部位はIR1の497塩基から554塩基までの、IR2の3,624塩基から3,681塩基までの58 bp配列内に限定され、この58 bp配列の外側の領域を欠失しても分子内組換えの頻度に影響はなかった。しかし、一方のIRに生じた変異部位ではIR全域で分子内組換えに伴って遺伝子変換が起こることから、pSR1プラスミドの分子内組換えの開始にはこの58 bp配列が必須であるが、交叉そのものは、IR全域で起こると考えられる。このようなIR内の変異部位で起こる遺伝子変換は2 μ m DNAにおいても観察されている(51)。58 bp配列は組換え開始部位であるが、便宜上、組換え部位と呼ぶことにする。

58 bp配列には、3 bpのスペースを置いて隔てられた14 bpの逆向き反復配列が存在する。また、逆向き反復配列の片方の配列に続く4個の同じ14 bpの反復配列は58 bp配列に含まれなかった。2 μ m DNAにおいても同様にIRには8 bpのスペースを置いて13 bpの

逆向き反復配列および片方の13 bp 配列に続く1個の13 bp の配列が存在する(8)。そして、組換え部位は8 bpのスペース部と14 bp の逆向き反復配列の中央部を含む28 bp に限定されている(74)。また、フットプリンティング実験の結果、RタンパクおよびFLP タンパク(1)は、それぞれの反復配列に結合することがわかった。これらのことから、58 bp 配列内の14 bp の逆向き反復配列が、分子内組換え開始部位の認識配列として働いていると考えられる。Z. rouxii、S. cerevisiae 以外の4種類の酵母、Zygosaccharomyces bailii(89)、Zygosaccharomyces bisporus(91)、Zygosaccharomyces fermentati(92)、Kluyveromyces drosophilorum(19)からも環状プラスミドが見つかった。これらのプラスミドは塩基配列が大きく異なるにもかかわらず、いずれも一对のIRを持ち、IRを介して分子内組換えを起こす。これらのプラスミドのIR内にはいずれも3 bpまたは5 bpのスペースに隔てられた14 bp から29 bp の逆向き反復配列が存在する(19,91,92)。このことから大きな一对の逆向き反復配列内にあるこの短い逆向き反復配列構造が、分子内組換え部位の認識配列として働いていると思われる。

14 bp の逆向き反復配列に続く14 bp の繰り返し配列にもRタンパクが結合することから、これらの繰り返し配列も分子内組換えに何らかの機能を持つと考えられる。しかし、これらの繰り返し配列を欠くpSRT2606プラスミドでも他のプラスミドと同様に分子内組換え(Fig. 2-6)および遺伝子変換(15クローンのうち3クローン)が起こることから、組換えおよび遺伝子変換にはこれらの繰り返し配列は必要ない。また、結果は示していないが、この繰り返し配列を欠いたIRをもつpSR1プラスミドの組換えを*in vitro*で行うと、ユニーク領域の逆位は起こるが、欠失は起こらないことから、この繰り返し配列が組換え反応の方向性を決定しているのではない。現在もなお、これらの繰り返し配列の機能はわからない。この研究で行った組換えの検出方法では、組換え頻度の微妙な差を検出できない可能性もあり、繰り返し配列が組換え頻度に及ぼす影響を、今後さらに詳細に調べる必要がある。

大腸菌内でR遺伝子を発現させると、一对のIRをもつプラスミドでは分子内組換えを起こすことから、分子内組換えには酵母宿主因子の働きは必要ないと考えられる。また、S. cerevisiae宿主で体細胞分裂時の普遍的組換えおよび遺伝子変換に必須なRAD52 遺伝子(36,47,65)を欠損しても分子内組換えが起こること、大腸菌宿主で普遍的組換えに働くrecA遺伝子またはrecBC 遺伝子(20)を欠損しても分子内組換えが起こることから、pSR1プラスミドの分子内組換えは、宿主の組換え系とは無関係に行われると考えられる。さら

に、部分精製したRタンパクもin vitroで分子内組換えを行う。したがって、pSR1プラスミドの分子内組換えは、おそらくRタンパクのみで行われると考えられる。また、大腸菌内あるいはin vitroでも分子内組換えが起こることから、組換え部位DNAは真核生物に特有のヌクレオソーム構造を取る必要はないと考えられる。

2 μ m DNAの分子内組換えは、FLP タンパクによって行われる(9)。FLP タンパクをin vitroの組換え活性(54, 70, 93)を指標として精製し(4)、組換え反応およびFLP タンパクの性質が調べられている。その結果、2 μ m DNAの組換え部位はIR内の28 bpに限定された(74)。この領域は、8 bpのスペース部を置いて存在する13 bpの逆向き反復配列の中央部である(8)。FLP タンパクは13 bpの繰り返し配列に結合し(1)、8 bpスペース部の両端に1本鎖あるいは2本鎖の切断を行った後(1, 74)、3'末端に、 α -ホスホチロシル基を介して共有結合する(30)。組換えは、FLP タンパクのみで起こることから、FLP タンパクは両IR間でFLP タンパク結合領域のDNA鎖を交換すると考えられている(51)。pSR1プラスミドの分子内組換えでも、組換え開始部位は14 bpの逆向き反復配列を含む58 bp内に限定された。Rタンパクが14 bpの繰り返し配列に結合する。このように、pSR1の分子内組換えと2 μ m DNAの分子内組換えは類似していることから、RタンパクはFLP タンパクと同様の機構で分子内組換えを行うと考えられる。すなわち、Rタンパクは、13 bpの逆向き反復配列に結合した後、スペーサー配列の両端で1本鎖または2本鎖のDNAを切断し、DNA鎖を交換すると考えられる。

先に述べたように、pSR1プラスミドの遺伝子変換は分子内組換えに伴って起こる。したがって、遺伝子変換は分子内組換えと共役するか、分子内組換えによって開始されと考えられる。2 μ m DNAでもこの様なIRに存在する変異部位の遺伝子変換が観察されている(51)。また、Jayaramは2 μ m DNAの小ユニーク領域に大腸菌トランスポゾンTn5を挿入すると*S. cerevisiae*細胞内では、Tn5の反復配列と2 μ m DNAのIRとで挟まれた領域の遺伝子変換が起こることを観察した(38, 39)。この遺伝子変換には、FLP タンパクとRAD52遺伝子の働きおよび組換え部位が必要である。pSR1プラスミドの遺伝子変換には、RAD52遺伝子の働きが必要でない点から、これら2つの遺伝子変換の機構は異なると考えられる。これまでに述べてきたことから、遺伝子変換を伴う分子内組換えの機構として2つのモデルが考えられる(Fig. 2-12)。1つはSzostakらにより提唱された二重鎖切断修復モデル(87)である(Fig. 2-12A)。RタンパクはFLP タンパクと同様に一方のIRの58 bp配列内でDNAを二重鎖切断する(Fig. 2-12A, bステップ)。切断末端がエキソヌクレ

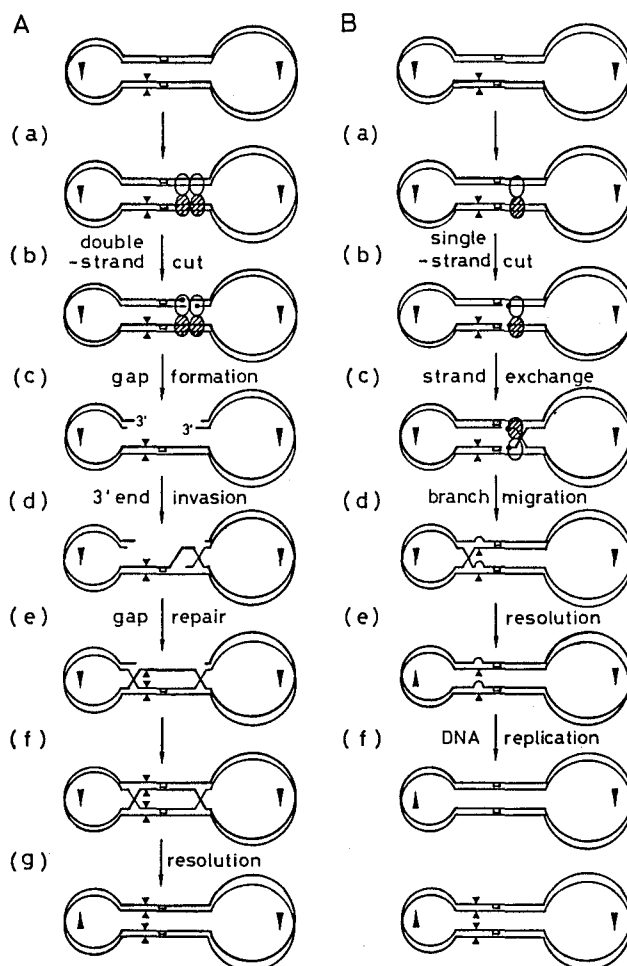


Fig. 2-12. Possible models for explaining gene conversion in the pSR1 molecule. The parallel regions of the pSR1 molecules are the inverted repeats, and the arrowheads illustrated inside the unique sequences distinguish the type A and B configurations of the plasmid molecules. Open boxes on the inverted repeats represent the approximate position of the sequences necessary for the autonomous replication of pSR1. Closed triangles on the inverted repeats indicate the marker site (i.e., inserted SalI linker). Ellipses with and without hatching represent each individual R protein which binds to the recombination initiation sites. A detailed explanation is presented in the text.

アーゼで消化され、3'末端が突出したギャップを生じる（cステップ）。3'末端部DNAがもう一方のIRの相補DNA部分にアニーリングする（dステップ）。この3'末端をプライマーとして、もう一方のIRを鋳型としてDNA合成が起こる（eステップ）。もう1つの3'末端でも同じ反応が行われる（fステップ）。このようにして、ギャップが修復される結果、2個のホリデー構造が形成される。ホリデー構造はブランチャイグレイションにより移動した後、DNA鎖の切断・再結合により解離される（gステップ）。2個のホリデー構造が同じDNA鎖で解離されても、分子内組換えは起こらないが、異なるDNA鎖で解離されると分子内組換えが起こる。変異部位が修復合成の領域に存在すれば、変異部位では遺伝子変換が生じる。この二本鎖切断修復モデルでは、*S. cerevisiae* のRAD52 遺伝子の働きを含めて考えられているが、pSR1の分子内組換えおよび遺伝子変換にはRAD52 遺伝子の働きは必須でない。このモデルに従うと、RタンパクがRAD52 遺伝子産物と同じ機能を持っているか、他の宿主因子がRAD52 遺伝子産物のかわりの働きをしているのかもしれない。

もう1つのモデルは、本研究結果に基づいて提案した一本鎖切断によって開始されるモデル（一本鎖切断交換モデル）である（Fig. 2-12B）。RタンパクがFLPタンパクと同様に両方のIRの58 bp 配列内で一本鎖切断を行う（Fig. 2-12B, bステップ）。同じ塩基配列を持つDNA一本鎖がお互いに交換され、ホリデー構造が形成される（cステップ）。ブランチャイグレイションによりホリデー構造が移動し変異部位を通過すると、変異部位ではヘテロデュープレックスが形成される（eステップ）。IR内の変異では、本来存在したIRから消失して他方のIRに転移する変化（+/- 型から-/+ 型への変化）は認められなかったため、ヘテロデュープレックスが形成されてもミスマッチ修復は行われないと考えられる。ARS から複製が開始された後ヘテロデュープレックスが解離されるか、ヘテロデュープレックスが解離された後複製が行われると、両方のIRが変異型になった分子および両方のIRが野生型になった分子が1分子ずつ生じる（fステップ）。ホリデー構造が最初に切断されたDNA鎖で解離されても、分子内組換えは起こらないが、切断されなかったDNA鎖で解離されると分子内組換えが起こる。ブランチャイグレイションが変異部位に達しないときには遺伝子変換は起こらない。

二重鎖切断修復モデルでも、また一本鎖切断交換モデルでも、変異部位が58 bp 配列から遠くなるほど遺伝子変換の頻度は低くなるという極性が予想される。Table 2-2 の結果でpSRT306 のSalI部位を除いて考えると、このような極性の存在が示唆される。

また、一本鎖切断交換モデルでは、一回の遺伝子変換で+/+ 型分子と-/- 型分子が1分

子ずつ生じ、二重鎖切断修復モデルでは、+/+ 型分子のみまたは-/- 型分子のみが生じると考えられる。Table 2-2 の結果では、+/+ 型分子の数と-/- 型分子の数は等しい場合も、差のある場合も認められる。これは検定したプラスミドクローンの数が少なく、観察値に誤差があること、+/+ 型分子プラスミドと-/- 型分子プラスミドの宿主内安定性に差があること、二重鎖切断修復モデルにおいて切断されるIRに偏りがあること、などが考えられるから、どちらのモデルが正しいかは、現在では判断できない。λファージのInt タンパク質 (45, 61) およびP1ファージのcre-loxPシステム (34) の部位特異的組換えではin vitro 組換え反応でホリデー中間体が観察され、部位特異的組換えでブランチャマイグレーションが起こることが示唆されていることに加え、二重鎖切断修復モデルではRAD52 遺伝子の働きを必要とすることから、遺伝子変換を伴う分子内組換えは一本鎖切断交換モデルで起こっているのではないと思われる。

pSR1プラスミドの分子内組換えは58 bp 配列内で開始される部位特異的組換えである。また、この組換えには酵母宿主因子の働きは必要なく、組換えは宿主の普遍的組換えとは無関係に起こる。これらの特徴から、pSR1プラスミドの組換え部位を染色体上の組換え標的部位に組み込み、別のプラスミドに乗せたR 遺伝子からR タンパクの生産を促すことにより、染色体上で任意の組換えを行うことができると考えられる。

第5節 要約

pSR1プラスミドの分子内組換えの機構を解析するために、組換え部位の限定と組換えに必要な因子の限定を行った。まず、*S. cerevisiae* 宿主内で一方のIRにSalIリンカーの挿入あるいは欠失をもつ変異プラスミドの組換えと変異部位の動きを調べ、分子内組換えに必要な領域を58 bp 配列内に限定した。部位特異的組換えに伴い、IR全域で変異部位の遺伝子変換が起こる。このことから、組換えは、58 bp 配列内で開始されるが、交叉はIR全域で起こることがわかった。また、この分子内組換えおよび遺伝子変換にはRAD52 遺伝子の働きは必要なかった。次に、大腸菌内でtac プロモーターを用いてR 遺伝子を発現させると、IR間で組換えを起こすことから、組換えには酵母宿主因子は必要なく、R タンパクのみで可能であると思われた。また、recAおよびrecBC 遺伝子は大腸菌内での分子内組換えには必要なかった。さらに、大腸菌で生産し、部分精製したR タンパクを用いて、R タ

ンバクのDNA への結合をDNase I フットプリンティング実験により調べた。この結果、Rタンバクは、58 bp 配列内に存在する14 bp の逆向き反復配列とそれに続く同じ14 bp の繰り返し配列に結合した。以上の結果から、遺伝子変換を伴う分子内組換えの機構として、58 bp 配列内で組換えが開始された後、ブランチマイグレーションによりヘテロデュープレックスを形成するが、ミスマッチ修復を伴うことなく、DNA 複製によりヘテロデュープレックスが解離される機構が示唆された。また、2個の58 bp 配列を染色体DNA に組み込み、Rタンバクの生産を制御することにより染色体の組換えを人為的に操作できると考えられた。

第3章 pSR1プラスミドの部位特異的組換えを利用した *S. cerevisiae* 染色体の改変

第1節 緒言

プラスミドまたはウイルスなどのベクターを使用する現在の組換えDNA技術では、操作可能なDNAのサイズは小さく、せいぜい100 kbまでであり、代謝系を構成する多数の遺伝子や高等生物の巨大遺伝子(29, 44)を導入することは困難である。しかも選択圧をかけない状態では、ベクターは容易に脱落する。これらの問題を解決する方法として、直接導入遺伝子を染色体に組込むか、染色体の一端をこれら巨大DNAで置き換えることなどが考えられる。また、このような染色体異常を導入することで、細胞に不稔性などの諸形質を付与することができるであろう。これらのためには、染色体レベルで、しかも、目的の位置で、必要な時に効率良く組換えを行う技術、すなわち、染色体改変技術が必要となる。染色体の改変は、細胞内では、遺伝的組換えによって起こり、しかも部位特異的組換えは特定のタンパクの働きでDNAの特定の部位で起こることから、このような染色体改変技術に部位特異的組換え系を応用することが考えられる。そこで、*S. cerevisiae*をモデル系とし、部位特異的組換えを利用して染色体を改変する技術の開発を行った。*S. cerevisiae*細胞には、接合型変換を起こす部位特異的組換え(62, 81)、2 μ m DNAの逆向き反復配列での部位特異的組換え(8)、ミトコンドリアDNAに存在するイントロンの転移の部位特異的組換え(37)がある。しかし、これらの組換え系は*S. cerevisiae*細胞に本来備わっているために、かえって、*S. cerevisiae*における染色体工学に応用することは不適當である。そこでは、*S. cerevisiae*と全く特異性を異にする部位特異的組換え系を利用する必要がある。そのためには、類縁の異種酵母のそれらを利用することが考えられる。

酵母 *Z. rouxii* 由来環状プラスミド pSR1は、一対の逆向き反復配列(IR)をもち、このIRを介して分子内組換えを行う(2)。この組換えは本来の宿主である *Z. rouxii* のみならず、*S. cerevisiae* 宿主でも起こる。第2章でpSR1プラスミドの分子内組換え機構を解析した結果、この組換えはプラスミドにコードされているRタンパクにより、pSR1のIRの58

bp 配列内で開始される部位特異的組換えであった。しかも、この組換えには、酵母宿主因子の働きは必要なく、この組換えは宿主の組換え系とは無関係に起こることがわかった。また、pSR1は、*S. cerevisiae* には存在せず、そのDNA塩基配列は、*S. cerevisiae* 染色体および2 μ m DNAのDNA塩基配列と相同性はない(2,31,90)。これらのことから、pSR1の部位特異的組換え系を応用して細胞に悪影響を及ぼすことなく、*S. cerevisiae* の染色体を改変することができると考えられる。

S. cerevisiae 染色体の改変を行うには、次の操作が考えられる。まず、pSR1の組換え部位を、YIp型ベクター（組込み型ベクター）を用いて同一もしくは異なる染色体上の2か所に組込む。次に、この細胞に、調節可能なプロモーターを結合したR遺伝子をもつプラスミドを導入する。プロモーターとしては、例えばガラクトース信号を認識できるGAL1遺伝子などのプロモーター部が利用できる。この導入細胞をガラクトース培地で培養すれば、R遺伝子が発現する。その結果生じたRタンパクが2つのRS間で組換えを起こし、染色体が改変される。この方法を用いると、組換え部位の挿入位置と方向に応じて、染色体上での欠失や逆位あるいは非相同染色体間での相互転座、または環状DNAの染色体への挿入を起こすことが可能である（Fig. 3-1）。2個の組換え部位を同一染色体上に同方向に挿入すると、組換え部位に挟まれた領域を欠失することができる。相互に逆方向に挿入するとその2個のRS間で逆位を起こすことができる。2本の非相同染色体に組込むと相互転座を起こすことになる。また、大きな環状DNAと染色体にそれぞれ1個ずつ組換え部位を挿入すると、大きな環状DNAをその染色体に挿入することができる。

本章では、このような染色体改変技術の可能性を検討した。その結果、2個の組換え部位を染色体に組込み、GAL1プロモーターの下流にR遺伝子を連結したプラスミドを用いてRタンパクを生産させると、染色体上の大きな欠失と逆位および非相同染色体間の組換えを高頻度で起こすことができた。

第2節 実験材料と実験方法

2.1 供試菌株とプラスミド

本章で染色体の改変のために使用した*S. cerevisiae* 菌株は、NBW5（一倍体 MAT α ade2^{ochre} leu2-3,112 ura3-1,2 his3-532 trp1-289 pho3-1；我々の保存菌株）、NA87-11A（一倍体 MAT α leu2-3,112 his3 trp1 pho5-1；我々の保存菌株[2]）および

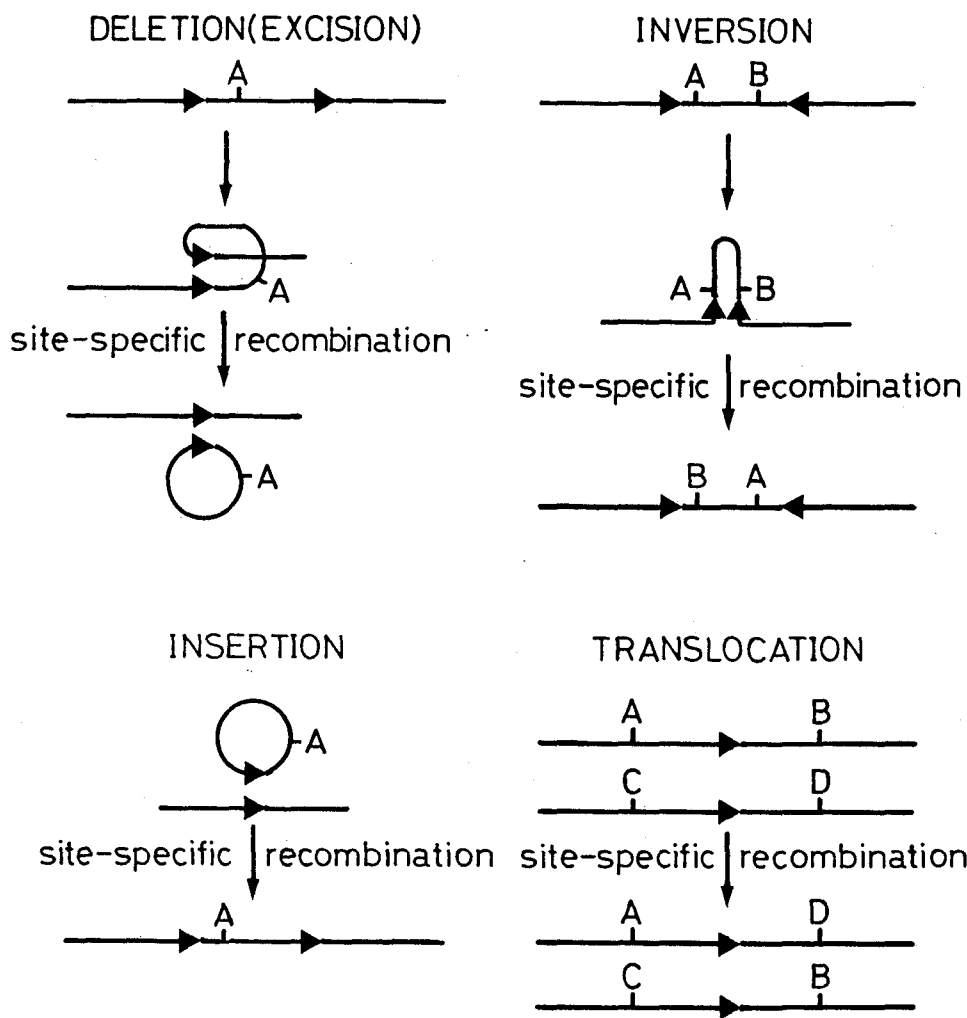


Fig. 3-1. Various modification of chromosomes by using a site-specific recombination system of pSR1. Two recombination sites (RS; arrowheads) of pSR1 are integrated into a single or two different chromosomes. Recombination between two RSs yields deletion (when two RSs are integrated in the same direction relative to each other on a single chromosome), inversion (in the opposite direction), or reciprocal translocation (two different chromosomes). When one RS is integrated on chromosome and another one is integrated on circular DNA, recombination between these two RSs yields insertion of the circular DNA into chromosome.

SH986 (一倍体 MATa ade2-201^{ochre} leu2-3,112 ura3-52 trpΔ1 hisΔ3; 我々の保存菌株)である。プラスミドの調製には大腸菌JA221株を使用した。その遺伝子型は第2章の第2節で示した。

本章の研究に使用したプラスミドをFig. 3-2およびTable 3-1に示す。p286は S. cerevisiae のGAL1遺伝子プロモーターをもつ685 bpのEcoRI-BamHI断片(42)を含むプラスミドであり、A. G. Hinnebush (National Institutes of Health, U.S.A.)より分譲を受けた。pRAS1プラスミド(Fig. 3-2)は S. cerevisiae のRAS1遺伝子(27)をもつプラスミドであり、山本正幸(東京大学、医科学研究所)より分譲を受けた。p237(Fig. 3-2)は、S. cerevisiae のURA3遺伝子(66)とSUP11遺伝子をもつプラスミドであり、P. Hieter (Johns Hopkins University, School of Medicine)より分譲を受けた。組換え部位の染色体への組込みのために使用したプラスミドをTable 3-2に示す。

2. 2 使用培地

酵母の栄養培地(YPAD)、最少培地(SGlu)、大腸菌の増殖用培地(LB)および最少培地(M9)は第2章の第2節で示した。必要に応じて、添加したアミノ酸、アンピシリンも第2章の第2節で示した。R遺伝子を発現させるための酵母のガラクトース培地として、SGlu培地にグルコースのかわりに、1 literあたり20 gのガラクトースを加えた培地を使用した。アデニンの表現型を調べるためには、アデニンを加えていない栄養培地[YPD: 1 literあたりYeast Extract (Difco) 10 g、ポリペプトン(大五栄養)20 g、グルコース20 g]を用いた。

2. 3 遺伝学的方法

酵母の接合による雑種二倍体の作製: 接合に用いる2株の菌体をほぼ等量ずつ2 mlのYPAD培地に混合して植菌し、30℃で一晩静置培養した。培養液を遠心分離(3,000 rpm、5分; 久保田、Model KN-80)し、上澄を除き、0.2 mlの無菌水に懸濁して選択培地に塗布した。

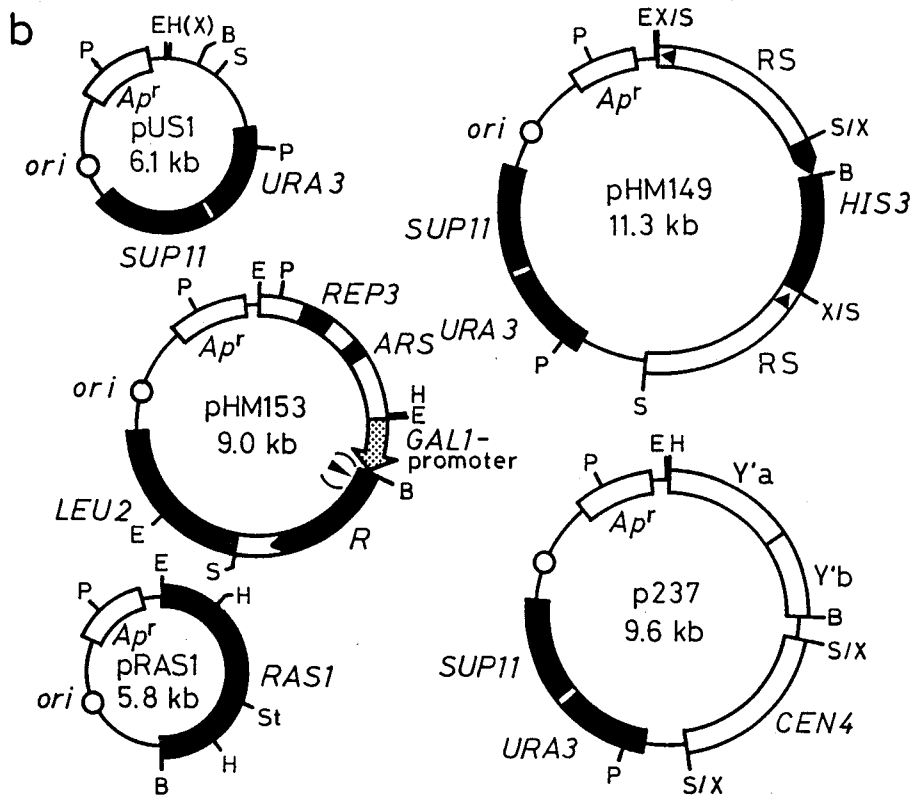
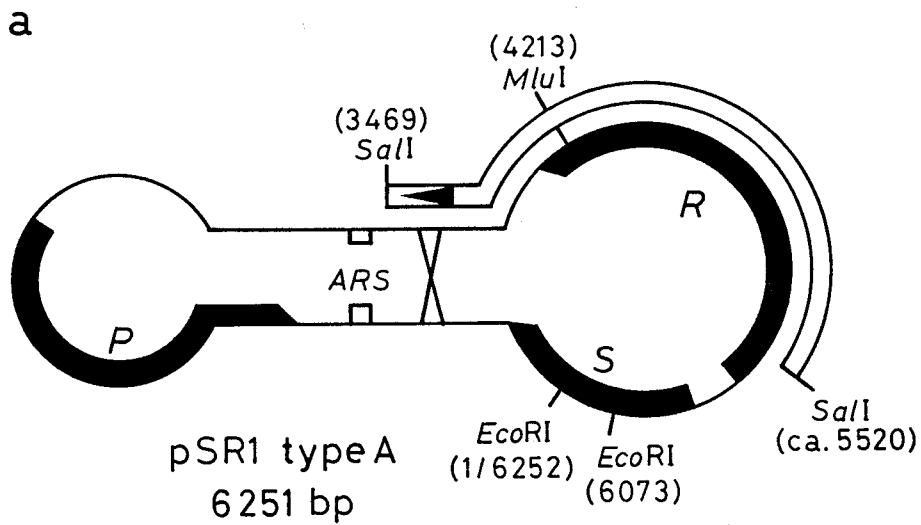


Fig. 3-2

Fig. 3-2. Structure of pSR1 and the principal plasmids used. (a) Structure of pSR1 and of 2.1-kb RS fragment. The linear portions of pSR1 represent inverted repeats, the thick lines marked P, R, and S indicate the open reading frames and the tapered ends indicate the 3' ends of the frame (2). Open boxes with ARS represent autonomously replicating sequences. A cross connecting the inverted repeats shows the approximate position of the specific recombination site (RS) which is localized within a 58-bp sequence (chapter 2). Numbers at the restriction sites represent their positions with respect to G of the EcoRI site as position 1. The 2.1-kb SalI fragment extending from nucleotide position 3469 to ca. 5520 (exact position is not determined) was used as the RS fragment and the arrowhead in the fragment indicates the specific RS site. Both the SalI ends of the RS fragment were created by linker insertion (40).

(b) Structure of the principal plasmids used. Plasmid pRAS1 was used as the source of the RAS1 DNA. Plasmid pUS1 was constructed by ligation of the shorter PstI fragments of p237 and YIp5. pHM153 was constructed with the DNAs from YIp32, YEpl1, p286, and pSR1 (details not shown) and used for generation of R protein. An arrowhead in parentheses on the pHM153 molecule represents the site of the R gene disruption made by restriction of a BglII site, filling in with Klenow fragment and ligation. pHM149 was constructed from pUS1 and the other DNA fragments as described in the legend of Fig. 3-3 and used for integration of the RS-URA3::SUP11-RS fragment at the his3 locus. The thin lines with a box marked Ap^r and a circle marked ori are the DNA fragments of pBR322, except for that of pBR327 of pRAS1. Double lines with closed boxes marked HIS3, LEU2, RAS1, SUP11, URA3, and GAL1-promoter are the DNAs from S. cerevisiae, R from pSR1, and REP3 and ARS from 2 μ m DNA. An open box with a closed triangle marked RS is the 2.1-kb RS fragment. Those marked Y'a::Y'b and CEN4 are chromosomal fragments of S. cerevisiae bearing, respectively, telomere and centromere. Abbreviations for restriction endonuclease sites are: B, BamHI; E, EcoRI; H, HindIII; P, PstI; S, SalI; St, StuI; and X, XhoI.

Table 3-1. Principal plasmids used in this study

Plasmid ^a	Characteristics	Source or reference
YIp1	<u>HIS3</u> , 9.8 kb	Struhl et al. (83)
YIp5	<u>URA3</u> , 5.4 kb	Struhl et al. (83)
YIp32	<u>LEU2</u> , 6.7 kb	Botstein et al. (7)
YEp51	<u>LEU2</u> , <u>GAL10</u> -promoter, 2 μ m DNA replicon, 7.3 kb	Broach et al. (10)
YRp7	<u>TRP1</u> , <u>ARS1</u> , 5.7 kb	Botstein et al. (83)
p286	<u>GAL1</u> - <u>GAL10</u> -divergent-promoter, <u>URA3</u> , <u>CEN4</u> , <u>ARS1</u> , 8.3 kb	A. G. Hinnebusch
pRAS1*	<u>RAS1</u> , 5.8 kb	M. Yamamoto
p237*	<u>URA3</u> - <u>SUP11</u> , <u>CEN4</u> , telomere, 9.6 kb	P. Hieter

^aGross structures of the plasmids with an astrisk are illustrated in Fig. 3-2.

Table 3-2. Plasmids used for integration of RS fragment into chromosomes

Plasmid	Integration locus	Relative direction of gene ^a			
pHM71-1	<u>his3</u>	<u>Amp</u> ^r (←)	RS (←)	<u>HIS3</u> (→)	
pHM71-3	<u>his3</u>	<u>Amp</u> ^r (←)	RS (→)	<u>HIS3</u> (→)	
pHM162	<u>his3</u>	<u>Amp</u> ^r (→)	RS (→)	<u>HIS3</u> (→)	
pHM163	<u>his3</u>	<u>Amp</u> ^r (→)	RS (←)	<u>HIS3</u> (→)	
pHM172	<u>RAS1</u>	<u>Amp</u> ^r (←)	RS (←)	<u>RAS1</u> (→)	
pHM173	<u>RAS1</u>	<u>Amp</u> ^r (←)	RS (→)	<u>RAS1</u> (→)	
pHM147	<u>ura3</u>	<u>Amp</u> ^r (→)	RS (←)	<u>URA3</u> (←)	

^aRelative direction of gene represents the relative direction of transcripts of ampicillin-resistant gene, HIS3 gene, RAS1 gene, and URA3 gene and that of RS site on these plasmids.

2. 4 生化学的方法

DNA の調製： 大腸菌JA221 株よりのCsCl-EB 平衡密度勾配遠心分離法およびアルカリ変性法によるプラスミドDNA の調製は第2章の第2節で示した。プラスミドDNA は全てJA221 株から調製した。酵母からの染色体DNA の調製は、Herefordらの方法(32)に従った。8 mlのYPAD培地で30℃、一晚培養した酵母細胞を集菌(3,000 rpm、5分；久保田、Model KN-80)後、0.5 mlの0.2 M トリス(ヒドロキシメチルアミノメタン)溶液(pHは未調整)に懸濁し、エッペンドルフ遠心管に移した。25 μ l の β -メルカプトエタノールを加え、30分間室温で放置した後、遠心分離(3,000 rpm、5分；Tomy、Microfuge MC-15A)し、0.5 mlのサイモリエース溶液[1.25 mg/ml Zymolyase 100T(生化学工業)、1.0 M ソルビトール、0.04 M リン酸緩衝液(pH6.8)]に細胞を懸濁し、30℃で1時間放置した。遠心分離(3,000 rpm、5分；Microfuge)し、溶菌緩衝液[0.2 M NaCl、0.1 M EDTA、5% (w/v) SDS、50 mM トリス-塩酸緩衝液(pH8.5)]に懸濁し、5 μ l のプロナーゼ(アクチナーゼE；科研製薬株式会社)を加えて60℃で30分間放置し、溶菌させた。この溶菌液に、TE緩衝液(pH8.0)で飽和したフェノール-クロロホルム混合液(1:1, v/v)を0.5 ml加え、攪拌した。遠心分離(12,000 rpm、10分；Microfuge)後、上層を別のエッペンドルフ遠心管に移し、タンパクを除いた。もう一度同じ除タンパク操作を繰り返し、上層液に2倍容の99%エタノールを加え、穏やかに攪拌した後、上澄液を捨て、DNAを回収した。DNAを70%エタノールで一度洗浄後、減圧下で乾固した。DNAを300 μ lのTE緩衝液に溶かした後、30 μ lのribonuclease A水溶液(1 mg/ml；Sigma Chemical Company, St. Louise, U.S.A.)を加え、37℃で30分間放置後、さらに3 μ lのプロナーゼ(1 mg/ml)を加えて37℃で30分間処理した。フェノール抽出で除タンパクを行った後、2倍容の99%エタノールを加え、沈殿するDNAを回収した。DNAを70%エタノールで一度洗浄後、減圧下で乾固した。DNAを適当量のTE緩衝液に溶かし、4℃で保存した。

形質転換： 大腸菌および酵母の形質転換法は第2章の第2節で示した。DNAの酵母染色体への組込みはOrr-Weaverらの方法(63)またはRothsteinの方法(67)に従い、目的DNAを線状にして形質転換を行った。

パルスフィールドゲル電気泳動による酵母染色体DNAの分離： パルスフィールドゲル電気泳動(73)で染色体を分離するためのDNA試料の調製は、CarleとOlsonの方法(17)に従った。5 mlのYPAD培地で培養した酵母細胞を集菌(3,000 rpm、5分；久保田、Model KN-80)し、TE緩衝液[50 mM EDTA、10 mM トリス-塩酸緩衝液(pH7.5)]で2回洗浄後、

150 μ l のTE緩衝液に懸濁し、エッペンドルフ遠心管に移した。5 μ l の β -メルカプトエタノールと2 μ l のサイモリエース懸濁液 [20 mg/ml Zymolyase 100T, 0.01 M リン酸緩衝液 (pH 7.5)] を加えた。これに37℃で保温した250 μ l の1%低融点アガロース溶液 (SeaPlaque Agarose ; FMC BioProducts, Rockland, ME, U.S.A.) を加え、ゲル形成器に流し込み氷上でゲル化した。ゲル断片を小試験管に移し、400 μ l のLET 溶液 [0.5 M EDTA, 0.01 M トリス-塩酸緩衝液 (pH 7.5)] と30 μ l の β -メルカプトエタノールを加え、37℃で一晩放置した。上澄液を8 mgの proteinase K (Boehringer Mannheim GmbH, W. Germany) を含む400 μ l のNDS 溶液 [0.5 M EDTA, 1% (w/v) N-ラウリルサルコシン (Sarkosyl NL-97, ICN Biomedicals, Inc., Plainview, N.Y., U.S.A.), 0.01 M トリス-塩酸緩衝液 (pH 9.5)] と交換し、50℃で2日間放置した。上澄液を捨て、0.2ml のTE緩衝液で1時間ごとに4回洗浄した。ゲル断片を半分に分断してDNA 試料として使用した。電気泳動装置はPulsaphor System (Model 2015 Pulsaphor System, LKB-Produkter AB, Bromma, Sweden) を使用し、泳動は使用説明書の記載を一部改変して行った。サイズ 10 x 10 x 0.5 cmの1%アガロース (Seakem LE Agarose; FMC BioProducts) ゲルを使用し、0.5 倍濃度のトリス-ホウ酸緩衝液 [45 mM トリス、45 mM ホウ酸、1.25 mM EDTA (pH 8.3)] を使用した。冷却装置の温度は5℃に調整し、泳動は定電圧450V、パルスタイム55秒で16時間行った。泳動後、ゲルを約0.5 μ g/mlのEB水溶液に30分浸して染色し、水道水で余分のEBを洗い流した後、トランスイルミネーター (Ultra Violet C62) でDNA バンドを観察した。写真はUVフィルター (Kenko SL-39) および赤色フィルター (Kenko R-60) を用いボラロイドカメラ (MP-4) でフォトラマPB300 フィルム (富士写真フィルム株式会社) によって撮影した。

³²P でラベルされたDNA の調製およびサザンハイブリダイゼーション: ³²P でラベルされたDNA の調製はAmersham (Amersham International plc, UK) のマルチプライムDNA 標識システムを用いた。調製は以下の方法で行った。反応緩衝液 [MgCl₂、 β -メルカプトエタノール、トリス-塩酸 (pH 7.8)] を5 μ l とヌクレオチド/緩衝液 [5 mM トリス-塩酸緩衝液 (pH 8.0)、0.5 mM EDTA、それぞれの液中にdATP、dGTP、dTTPを含んでいる。] を各4 μ l とプライマー溶液 [ランダムヘキサヌクレオチド、BSA] とプラスミドDNA (25 ng ; 100℃で5分間放置後、氷につけて変性させた) を22 μ l と酵素溶液 [1 unit/ μ l Klenow断片、50 mM KH₂PO₄ (pH 6.5)、10 mM β -メルカプトエタノール、50% グリセロール] を2 μ l と [α -³²P]dCTP (10 mCi/ml) を4 μ l とを混合して、25

℃で3時間、反応させ、プローブとして用いた。

アガロース上のDNAをフィルターへ移行するためにはSouthernの方法(76)によった。アガロースゲル電気泳動後、0.25 M HClで30分室温でゲルを処理した。この後、1.5 M NaCl-0.5 M NaOH 溶液に30分間、ゲルを放置し、アルカリ変性を行い、0.5 M トリス-塩酸緩衝液 (pH 7.5)-1.5 M NaCl溶液中で30分ゲルを浸して中和させた。ガラス板を20 x SSC 溶液 (1 SSC は0.15 M NaCl、0.015 M クエン酸ナトリウム)を入れたバットに渡し、20 x SSC溶液に浸したろ紙 (3 mm chr, Whatman Ltd., England) をガラスの上に2枚置いて、両端が20 x SSC溶液に漬かるようにした。そこにゲルを置き、両端に、アクリル板を置いた。あらかじめ、水に浸したナイロンメンブレン (Pall Biodyne Transfer Membranes, Pall BioSupport Division, Glen Cove, N.Y., U.S.A.) をゲル上に置いた。その両脇に水に浸したろ紙を置いてフィルターを押えた。フィルター上にほぼ同じ大きさのろ紙を4枚重ね、ペーパータオルを5 cmほど積んでからガラス板をのせ、約500 g の重しを置いて、この状態で一晩放置した。その後、フィルターを80℃で2時間焼き付けた。

フィルターをハイブリダイゼーション液 [0.9 M NaCl、0.05 Mリン酸ナトリウム緩衝液 (pH 8.3)、5 mM EDTA、0.1 % (w/v) Ficoll (分子量400,000; Pharmacia Fine Chemicals AB Uppsal, Sweden)、0.1 % (w/v) Polyvinylpyrrolidone (分子量360,000, PVP; 和光)、0.1% (w/v) BSA (Sigma)、0.2 % (w/v) SDS、100 μ g/ml CT DNA 溶液 (0.02 M トリス-塩酸緩衝液 (pH 8.0)-1 mM EDTAに溶かした1 mg/ml の子牛の胸腺のDNAを30秒間6回超音波処理し、100℃で5分間加熱したものを希釈して使用)] に浸して、65℃3時間保温した。その後、ビニールバッグのなかにフィルターとハイブリダイゼーション液と³²PでラベルしたプローブDNA (100℃で5分間加熱後、氷中で急冷して変性させた) とを入れ、65℃で一晩放置して、フィルター上のDNAとプローブDNA間のハイブリダイゼーションを行った。その後、フィルターを取り出し、洗浄用緩衝液 [5 mM リン酸ナトリウム緩衝液 (pH 7.0)、1 mM EDTA、0.2 % (w/v) SDS] で4回洗浄し、サランラップに包んだ後、カセットに固定し、X線フィルム (Kodak Diagnostic Film X-Omat AR, Eastman Kodak Company, Rochester, N.Y., U.S.A.) と増感スクリーンを入れ、-80℃で感光させた。現像と定着はX線フィルムプロセッサ (Model FPM60; 富士写真フィルム株式会社) を使用した。

その他のDNA操作： プラスミドDNAの制限酵素による切断と結合、Klenow断片による粘性末端の平滑化、電気泳動の方法は第2章の第2節で示した。

第3節 実験結果

3. 1 pSR1プラスミドの部位特異的組換え系の染色体上での働き

pSR1プラスミドの部位特異的組換え系が、染色体に組込まれた状態で行われるかは調べられていない。また、この組換え系を染色体の改変に利用するためには、その働きをON-OFF制御する必要がある。そこで、RタンパクをON-OFF生産するプラスミドを作製し、これを用いて染色体上に組込んだ組換え部位間で実際に組換えが起こることを調べた。Fig. 3-3a に示すように、BamHI 切断により線状にしたpHM149でNBW5株 (MAT α ade2^{ochre} ura3 leu2-3,112 his3) を形質転換し、URA3およびSUP11 遺伝子の左右両側に同方向になるように組換え部位を含むRS断片 (Fig. 3-2a で矢印をもつ太線) を2個連結したDNA断片 (RS-URA3:SUP11-RS) をXV番染色体のhis3座 (57) に組込んだYHM201株を作製した。YHM201株では、ade2^{ochre} 変異はSUP11 遺伝子によって抑圧される (33)。この株では、Rタンパクの働きで2個の挿入RS間で組換えが起こると、挿入DNA断片からURA3およびSUP11 遺伝子を含む7.6 kbの領域が切り出される。この断片は選択圧をかけない状態では自律複製能を持たないので細胞から脱落し、細胞はAde⁻ Ura⁻ の表現型を示す。したがって、Rタンパクによる組換えは、これら細胞のアデニンとウラシルの要求性を調べるとわかる。次に、Rタンパクを細胞内で供給するために、ガラクトースで発現が誘導されるGAL1またはGAL10 遺伝子のプロモーター下流にR遺伝子を繋いだYE_p 型プラスミドpHM153 (Fig. 3-2b) およびpHM152を作製した。YHM201株をpHM153またはpHM152で形質転換し、Leu⁺形質でこれらプラスミドを保有する株を選び、ロイシン非含有のSGal平板培地に拡げ、30℃で4日間培養した。生育した各コロニーをロイシンおよびアデニンを含まないSGlu平板培地または、ロイシンおよびウラシルを含まないSGlu平板培地にレプリカして、アデニンとウラシルの要求性を調べた。その結果、3種類のコロニーが生じた。すなわち、コロニーを形成する細胞が、全てAde⁻ Ura⁻ であるコロニー (クラスIコロニー) とレプリカした細胞の一部が生育するコロニーつまり、Ade⁻ Ura⁻ の細胞とAde⁺ Ura⁺ の細胞が混在するコロニー (クラスIIコロニー)、およびAde⁺ Ura⁺ の細胞からなるコロニー (クラスIIIコロニー) が生じた。しかし、Ade⁺ Ura⁻ またはAde⁻ Ura⁺ の細胞から成るコロニーは生じなかった。

クラスIコロニーとクラスIIコロニーの細胞で染色体からURA3-SUP11遺伝子領域が切り

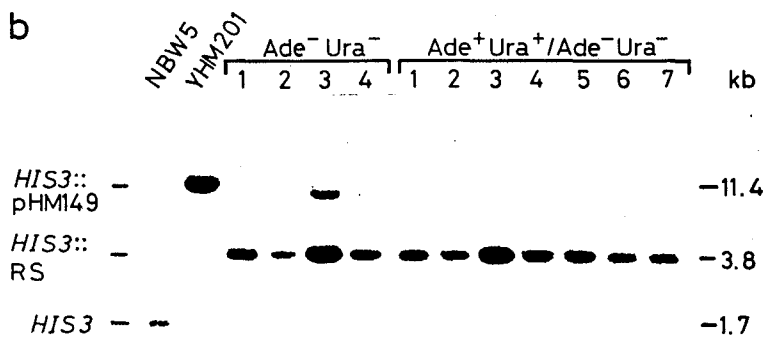
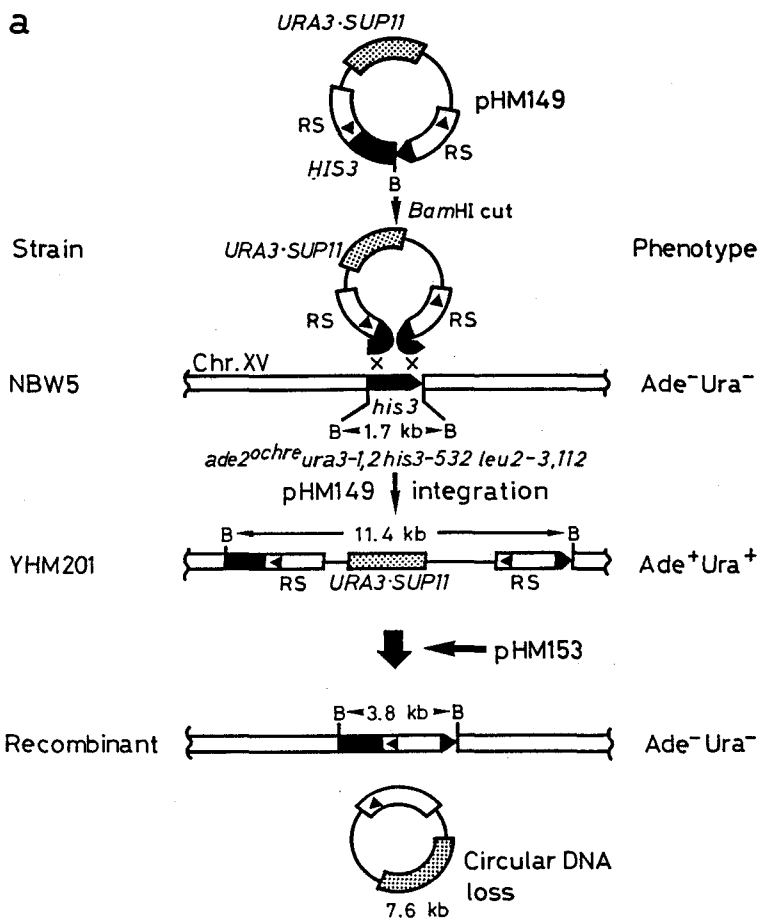


Fig. 3-3

Fig. 3-3. Excision of a short DNA fragment from a chromosome. (a) The construction procedure of strain YHM201 used for the excision experiment. Plasmid pHM149 bearing two copies of the 2.1-kb RS fragment (Fig. 3-2a) in the same direction and two HIS3 DNA fragments, derived from a 1.7-kb S. cerevisiae DNA bearing a single complete HIS3 gene prepared from YIpl, but ligated at the BamHI ends to form the head to tail arrangement after cutting at the XhoI site in the gene, was constructed by the following procedure. The 1.7-kb BamHI HIS3 fragment prepared from YIpl was split at the XhoI site in the his3 locus and each fragment was connected with the 2.1-kb RS fragment by XhoI/SalI ligation. Thus the 5'-HIS3-RS and RS-HIS3-3' chimeric DNA fragments were obtained. Both the chimeric fragments have the same relative nucleotide directions of the RS fragment as that of HIS3, and have the BamHI end at the HIS3 side and the SalI end at the RS side. These two fragments were inserted into the modified pUS1 (Fig. 3-2b; the HindIII site was converted to a XhoI site by restriction with HindIII, filling in with Klenow fragment and ligation with the XhoI linker); the 5'-HIS3-RS fragment was inserted at the SalI-BamHI gap of the modified pUS1, and the RS-HIS3-3' fragment at the XhoI-BamHI gap. The resultant plasmid, pHM149, has a structure in which the URA3 and SUP11 genes of S. cerevisiae derived from p237 are located between the direct repeats of two RS fragments and the head to tail configuration of the HIS3 gene is located on the other side of the RS direct repeats. Thus, the BamHI (B) restriction of pHM149 results in a linear DNA molecule having the 5' terminal region of the HIS3 DNA at one end and the 3' terminal end of HIS3 at the other end. This configuration is favorable for single-copy insertion of pHM149 at the his3 locus in chromosome XV. The linearized pHM149 molecule was integrated at the his3 locus of strain NBW5 as described in the text. The resultant strain, YHM201, having the Ade⁺ Ura⁺ phenotype was then transformed with pHM153 (Fig. 3-2b) and cultivated in SGal medium to excise the 7.6-kb fragment between the two RSs. (b) Genomic DNAs prepared from four class I clones showing the Ade⁻ Ura⁻ phenotype and seven class II clones having the mixed population of Ade⁺ Ura⁺ and Ade⁻ Ura⁻ cells were restricted with BamHI, electrophoresed, blotted on a nylon membrane and hybridized with the ³²P-labeled 1.7-kb HIS3 fragment.

出されていることを確かめるために、各クラスのコロニー細胞の $his3$ 座付近の制限酵素解析を行った。各クラスのコロニーの染色体DNAをBamHIで切断後、アガロースゲル電気泳動を行った。DNA断片をフィルターに移し、 ^{32}P で放射能ラベルしたHIS3 DNAをプローブとしてハイブリダイゼーションを行った (Fig. 3-3b)。クラスIコロニーとクラスIIコロニーでは、調べたコロニー (4コロニーおよび7コロニー) 全てにおいて11.4 kbのバンドが消失して3.8 kbのバンドが生じたことから、これらの細胞では、2個のRSによって挟まれた7.6 kbのURA3遺伝子およびSUP11 遺伝子を含む領域が染色体から切り出されている。クラスIIIコロニーでは全て、11.4 kbのバンドが生じ、切り出しは起こっていなかった (6コロニー：結果省略)。したがって、コロニーの表現型はRS間の組換えを反映していると言える。

Table 3-3. Recombination between RSs on chromosome

Plasmid	Medium	No. of colonies showing the following class:				Frequency of recombination (%)
		I	II	III	Total	
pHM153	SGlu	112	0	6	118	5
	SGal	2	38	81	121	98
pHM160	SGlu	123	0	0	123	0
	SGal	122	0	0	122	0
pHM152	SGlu	65	2	52	119	45
	SGal	0	13	103	116	100
pHM161	SGlu	131	0	0	131	0
	SGal	128	0	0	128	0

Cells of Strains YHM201 transformed with each plasmid were spread on SGal or SGlu plates supplemented with necessary nutrients but not leucine from the SGlu plates with the same nutrients after appropriate dilution. After 4 days' incubation at 30°C, colonies were examined for their growth by replicating on SGlu plates lacking leucine and adenine or leucine and uracil. Class I colony represents the colony showing the Ade⁻ Ura⁻ phenotype, class II colony represents one having the mixed population of Ade⁺ Ura⁺ and Ade⁻ Ura⁻ cells, and class III colony represents one showing the Ade⁺ Ura⁺ phenotype. We judged class I and class II colonies as recombinant colonies. pHM153 and pHM160 carry the R gene or disrupted R gene on downstream of the GAL1-promoter (Fig. 3-2b), respectively, but pHM152 and pHM161 carry each one on downstream of the GAL10-promoter in stead of GAL1-promoter, respectively (details not shown).

SGal培地で培養すると、pHM153でもpHM152でも90%以上のコロニーがクラスIコロニーまたはクラスIIコロニーであった (Table 3-3)。したがって、染色体に組込まれたRS間でも効率良く組換えが起こる。YHM201株をpHM153またはpHM152で形質転換して得られたLeu⁺形質転換体をSGlu平板培地に拡げ、4日間培養するとSGal培地よりも低頻度だが、クラスIコロニーとクラスIIコロニーが生じた (pHM153では5%のコロニーが、pHM152では45%のコロニーがクラスIコロニーまたはクラスIIコロニーであった)。しかし、R遺伝子を破壊したpHM153またはpHM152 (各プラスミドの名前はpHM160およびpHM161) でYHM201株を形質転換し、形質転換体をSGal平板培地で4日間培養してもクラスIコロニーおよびクラスIIコロニーは生じなかった (pHM160では122コロニーを、pHM161では128コロニーを調べた)。したがって、URA3-SUP11遺伝子領域の切り出しは、pHM153プラスミドあるいはpHM152プラスミドで生産されたRタンパクの働きで高頻度で起こるが、SGlu培地でもpHM153プラスミドあるいはpHM152プラスミド上のR遺伝子は弱く発現していると考えられた。pHM153とpHM152はともに染色体上で高頻度で組換えを起こすために十分なプラスミドであるが、今後、Rタンパクの生産には、ON-OFF制御がより良く効いているpHM153を使用することにした。

3. 2 染色体上の大きな欠失と逆位の誘発

pSR1プラスミドの組換えを染色体上で効率良く働かすことが可能であることがわかったので、この組換え系を用いて染色体上に大きな欠失と逆位を作ることを試みた。まず、クローン化HIS3 DNA内部のXhoI部位で切断し、直線状としたpHM71-1, pHM71-3, pHM162またはpHM163プラスミド (HIS3 DNAとRS断片をもつYIp型プラスミド; Table 3-2) で ADE2⁺ 一倍体株NA87-11A (MAT α leu2-3,112 his3 trp1 pho5-1) を形質転換後、形質転換体をさらに、クローン化RAS1 DNA内部のStuI部位で切断したpHM172またはpHM173 (RAS1 DNAとRS断片をもつYIp型プラスミド; Table 3-2) で形質転換し、XV番染色体のhis3座とRAS1座に各々1コピーのRS断片を組込んだ (Fig. 3-4a)。RAS1座とhis3座とは約60 cM (57)すなわち、約180 kb (56) 離れており、この間にADE2⁺ 座が存在する。RS断片の組込みにより作製された4種類の株 (組込まれたプラスミドの組み合わせはpHM71-1とpHM172, pHM71-3とpHM173, pHM162とpHM172, pHM163とpHM173である) をRタンパク生産プラスミドpHM153を内在するade2変異一倍体株SH986 (MAT α ade2 leu2-3,112 his3 trp1) と交雑し

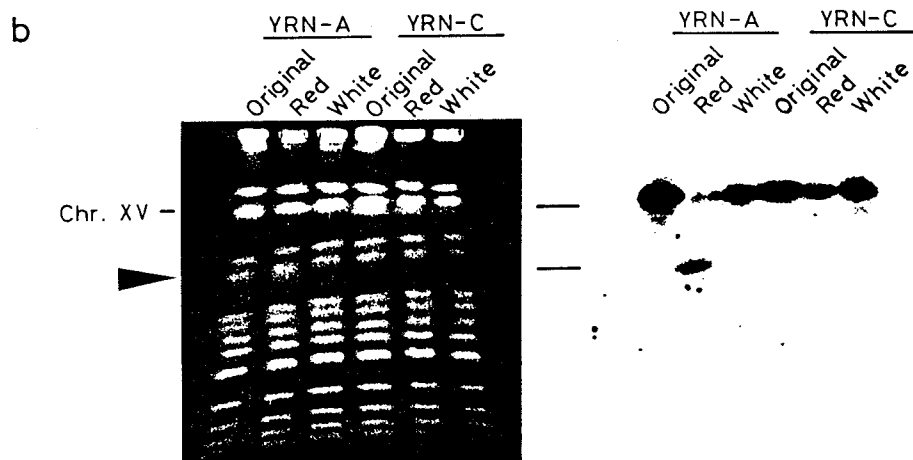
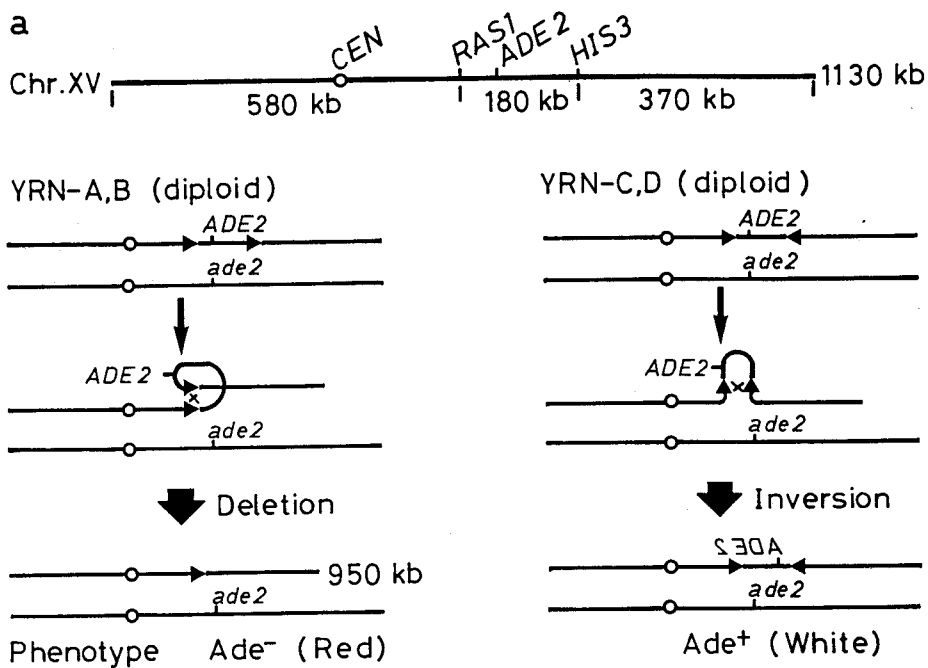


Fig. 3-4

Fig. 3-4. Deletion and inversion of a chromosomal segment. (a) Strategies to delete or invert the RAS1-HIS3 region of chromosome XV. The RS fragments were inserted at the RAS1 and HIS3 loci of chromosome XV by using pBR322-based YIp plasmids. For insertion of the RS fragment at the RAS1 locus, a YIp plasmid was constructed by insertion of a 2.9-kb EcoRI-BamHI fragment bearing the RAS1 gene (27) derived from pRAS1 (Fig. 3-2b) at the short EcoRI-BamHI gap of pBR322. Then the chimeric plasmid was ligated with a 1.6-kb PstI fragment of YRp7' (i.e., the 1.4-kb EcoRI fragment bearing ARS1 and TRP1 from *S. cerevisiae* of YRp7 was inverted) bearing the TRP1 gene at the PstI site as selection marker, and the RS fragment at the Sall site of the pBR322 moiety. For insertion of the RS fragment at the HIS3 locus, another YIp plasmid was constructed by ligation of a 1.7-kb BamHI fragment bearing the HIS3 gene prepared from YIp1 and the RS fragment, respectively, at BamHI and Sall sites of pBR322. Two types of plasmids were constructed for RAS1 plasmid and four types of plasmids for the HIS3 plasmid with the different relative orientations of RS to the RAS1 or HIS3 DNA. DNAs of these chimeric plasmids were prepared in *E. coli* and linearized by restriction at the StuI site of the RAS1 DNA and at the XhoI site of the HIS3 DNA of the respective plasmids. These StuI and XhoI sites are, respectively, unique in these chimeric plasmids. (b) PFGE patterns of chromosomes. One clone each showing the red (Ade⁻) or white (Ade⁺) phenotype was isolated at random from YRN-A (having two RSs in the same direction) and YRN-C (having two RSs inverted). Slots were added with DNA prepared from equivalent amounts of cells. The chromosomal bands (left) were hybridized with the ³²P-labeled 1.7-kb HIS3 fragment (82) after blotting onto a nylon membrane (right). The arrowhead on the left margin indicates the site of a new chromosomal band.

た。作製された4種類の雑種二倍体は $ADE2^+/ade2^-$ 遺伝子型をもつので、YPD 平板培地上では白色 (Ade^+) コロニーを形成する。4種類の株のうちYRN-A (pHM71-1とpHM172) およびYRN-B (pHM71-3とpHM173) 株では2個の挿入RS断片が染色体上に同方向に組込まれているため、SGal培地で培養するとRタンパクの働きにより、2個のRS間で組換えが起こり、RAS1座からhis3座間の領域が欠失する。このクローンは野生型 $ADE2$ 遺伝子を失うので、YPD 平板培地上で赤色 (Ade^-) コロニーを形成する。また、YRN-C (pHM162 とpHM172) およびYRN-D (pHM163 とpHM173) 株では、2個の挿入RS断片が染色体上で逆方向に組込まれているために、それらのRS間で組換えが起こると、RAS1座-his3 座間の領域で逆位が生じる。このクローンは遺伝子型に変化がないのでYPD 平板培地上で白色コロニーを形成する。これら4種類の株をロイシンを含まないSGluまたはSGal液体培地で30℃ 2日間培養後、YPD 平板培地に塗布し、さらに、4日間培養してコロニーの色を調べた。この結果、SGal培地で培養するとYRN-A およびYRN-B 株では高頻度 (約80%) で、YRN-C およびYRN-D 株では低頻度 (約5%) で赤色コロニーが生じた。しかし、SGlu培地で培養すると

Table 3-4. Appearance of red and white colonies in cells having the RS insertion at the RAS1 and HIS3 loci of chromosome XV

Strain	Relative direction of RS		Medium	No. of colonies			Red (%)
	<u>RAS1</u>	<u>HIS3</u>		Red	White	Total	
YRN-A	←	←	SGlu	2	280	282	0.7
			SGal	318	53	371	85.7
YRN-B	→	→	SGlu	1	312	313	0.3
			SGal	259	34	293	88.4
YRN-C	←	→	SGlu	0	296	296	0
			SGal	12	279	291	4.1
YRN-D	→	←	SGlu	0	267	267	0
			SGal	16	294	310	5.2

Cells of each strain were inoculated from SGlu medium supplemented with necessary nutrients but not leucine to the SGlu or SGal broth supplemented with the same nutrients and cultivated at 30℃ for 2 days. The cells were then spread on YPD plates after appropriate dilution and all the colonies that appeared on three plates were scored for their red (Ade^-) and white (Ade^+) phenotypes after 4 days' incubation at 30 °C.

いずれの株も殆どが白色コロニーであった (Table 3-4)。このことから、YRN-A および YRN-B 株では R タンパクの働きにより RAS1座-his3 座間の領域で欠失が起こると考えられる。実際に欠失が起こっていることを検討するために、YRN-A 株および YRN-C 株由来の赤色クローンと白色クローンの染色体パターンを、パルスフィールドゲル電気泳動法 (PFGE) で調べた。しかし、両株とも欠失染色体は認められなかった (Fig. 3-4b 左側)。欠失染色体が他の染色体と重なっている可能性があるので、HIS3 DNA断片をプローブとしてサザン解析を行った。PFGEで分離した染色体DNA をゲルからフィルターに移した後、 ^{32}P で放射能ラベルしたHIS3 DNAをプローブとしてハイブリダイゼーションを行った。この結果、Fig. 3-4b (右側) に示すように、YRN-A 株から生じた赤色クローンでは、XV番染色体とXV番染色体よりも速く移動する染色体にプローブDNA が結合したが、他のクローンではXV番染色体にのみ結合した。したがって、YRN-A 株由来の赤色クローンではXV番染色体に欠失が生じ、欠失染色体はXII番染色体と重なっていると考えられた。YRN-C 株由来の赤色クローンでは欠失は認められず、2本あるXV番染色体のうち、野生型ADE2 遺伝子をもつ染色体が細胞から失われたか、遺伝子変換により ADE2/ade2 遺伝子型から ade2/ade2 遺伝子型に変換されていると考えられる。

YRN-C 株と YRN-D 株を SGal培地で培養すると、RAS1座-his3座間の領域で逆位が起こると考えられる。しかし、逆位が生じて、XV番染色体のサイズは変化しないので、パルスフィールドゲル電気泳動法で確認することはできない。そこで、SGal培地で培養したYRN-C 株のクローンの染色体に組込まれたRS断片を含む領域の制限酵素解析を行い、逆位が生じていることを検討した。Fig. 3-5a で示すようにRS断片付近では、MluI部位はRS断片の内部に1か所存在するが、XhoI部位、XbaI部位はRS断片の外側にのみ存在する。2個のRS間の組換えによりRAS1座-his3 座間の領域の欠失が起こると、2個の挿入RSによって挟まれたMluI-XhoI 断片およびMluI-XbaI 断片は消失するが、両挿入RSの外側にあるMluI-XhoI断片およびMluI-XbaI 断片は組換え後も残る。また、XhoI断片、XbaI断片は1個に減少する。RAS1座-his3 座間の領域で逆位が起こると、MluI-XhoI 断片およびMluI-XbaI 断片は全て残るが、XhoI断片およびXbaI断片は組換えの後では変化する。SGlu培地またはSGal培地で培養したYRN-A およびYRN-C 株のクローンの染色体DNA をMluIとXhoIの二重切断で、あるいはXhoI単独で、またXbaI単独で切断後、アガロースゲル電気泳動を行い、RS DNA断片をプローブとしてハイブリダイゼーションを行った (Fig. 3-5b)。この結果、YRN-C 株をSGal培地で培養したクローンのなかには、MluI-XhoI 断片に変化はないが、

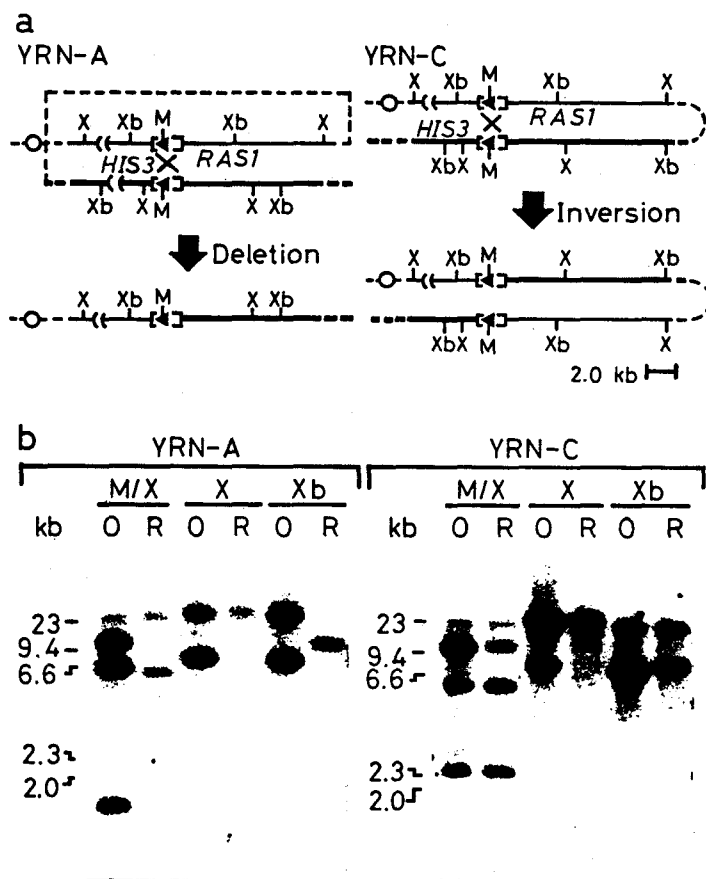


Fig. 3-5. Restriction analysis of modified chromosome XV. (a) Restriction maps of *Mlu*I, *Xba*I and *Xho*I sites flanking the RS fragment inserted at the *RAS1* and *HIS3* loci of chromosome XV, and of the modified chromosomes resulting from the recombination between two RSs. [◀▶] represents the 2.1-kb RS fragment. Abbreviations for restriction sites are: M, *Mlu*I; X, *Xho*I; Xb, *Xba*I.

(b) Results of restriction analysis of the region flanking the RS insertion sites of chromosome XV. The genomic DNAs were prepared from cells showing the original chromosomal pattern (O) and the clone showing the recombinant chromosome (R) determined by preliminary experiments of strains YRN-A and YRN-C, respectively. The DNA samples were double digested with *Mlu*I and *Xho*I (M/X), or singly with *Xho*I (X) or *Xba*I (Xb), electrophoresed on an agarose gel, blotted, and hybridized with the 32 P-labeled RS fragment as probe. The molecular sizes of the DNA fragments were estimated with λ phage DNA digested with *Hind*III.

XhoI断片およびXbaI断片が変化したクローンが得られた。また、YRN-A 株をSGal培地で培養すれば、欠失で予想された制限酵素地図を示すクローンが得られた。したがって、YRN-C 株をSGal培地で培養すると、2 個の2.1 kbのRS断片の間で組換えを起こして、RAS1座-his3座領域の逆位が起こり、YRN-A 株をSGal培地で培養すると2 個のRS断片の間で組換えを起こしてRAS1座-his3 座間の領域で欠失が起こる。以上の結果から、pSR1の部位特異的組換え系を用いて、染色体上の大きな欠失と逆位を造成することが可能である。

3. 3 非相同染色体間の相互転座

pSR1プラスミドの部位特異的組換え系を利用した非相同染色体間での組換えの可能性を検討するために、V番染色体のura3座とXV番染色体のhis3座との間で組換えを行い、これらの遺伝子座で区分される左右領域を互いに交換することにより、相互転座を起こすことを試みた。まず、クローン化URA3 DNAの内部に1か所存在するNcoI部位で切断し直線状としたpHM147 (RS断片とURA3-SUP11 DNAをもつYIp 型プラスミド ; Table 3-2) で一倍体NBW5 株 (MAT α leu2-3,112 ura3-1,2 his3-532) を形質転換し、ura3座にRS断片を挿入した。さらに、この形質転換体をクローン化HIS3 DNA内部に1か所存在するXhoI部位で切断して直線状としたpHM71-1 またはpHM71-3 (RS断片とHIS3 DNAをもつYIp 型プラスミド ; Table 3-2) で形質転換し、染色体のhis3座に1コピーのRS DNA断片が組込まれたYRN-1 株 (pHM147とpHM71-1 が組込まれている) およびYRN-2 株 (pHM147とpHM71-3 が組込まれている) を作製した (Fig. 3-6) 。染色体上でのセントロメアに対するURA3遺伝子およびHIS3遺伝子の転写方向は既知であり (41)、YRN-1 株では2 個の挿入RS DNAが各々の染色体のセントロメアに対し共に同方向に組込まれ、YRN-2 株では互いに逆方向に組込まれている。したがって、2 個のRS間で組換えが起こると、YRN-1 株ではV番染色体とXV番染色体からはセントロメアを1 個持つ新しい組換え型の染色体2本が得られると考えられる。しかし、YRN-2 株では、組換えの結果、セントロメアを2 個持つ染色体とセントロメアを全く持たない染色体が得られると考えられる。この結果、YRN-2 株では組換え型染色体が失われやすいため、細胞増殖が阻害されるが、YRN-1 株では細胞は正常に増殖すると考えられる。また、染色体地図から染色体の物理的なサイズを計算すると (56, 57) 、V番染色体は710 kbでXV番染色体は1130kbであるが、YRN-1 株のように組換えが起こると新しい染色体は910 kbと930 kbになると予想される。YRN-1 株およびYRN-2 株にRタンパク生産ブラ

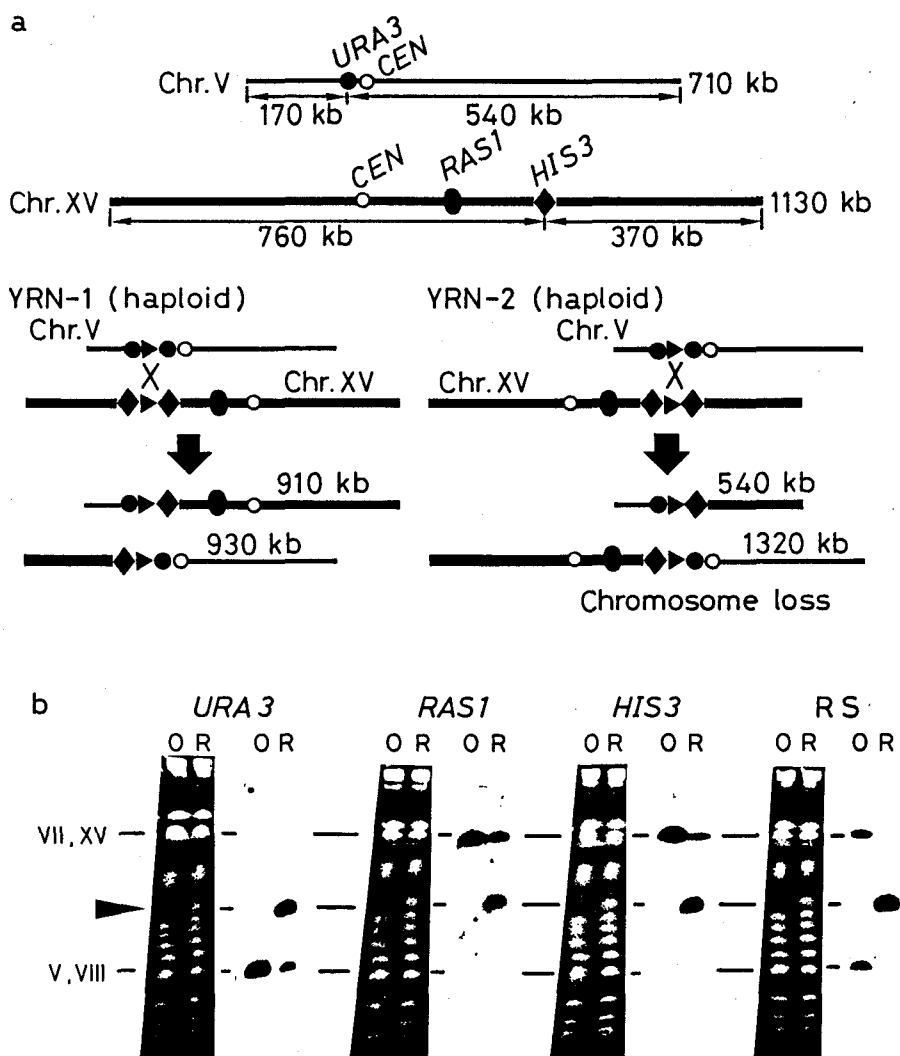


Fig. 3-6

Fig. 3-6. Recombination between non-homologous chromosomes. (a) strategy of recombination between chromosomes V and XV. For insertion of the RS fragment at the ura3 locus on chromosome V, a YIp type chimeric plasmid was constructed with a modified pUS1, which the HindIII site was converted to XhoI in the preparation of pHM149 (Fig. 3-3a). The RS fragment was connected at the XhoI site of the modified pUS1. Two HIS3 plasmids constructed in the deletion and inversion experiments (Fig. 3-4) were used for integration of the RS site on chromosome XV. Since these two HIS3 plasmids have the RS fragment in opposite direction to each other, one of the transformants, YRN-1, has two RS fragments at URA3 and HIS3 in the same direction relative to the respective centromeres; and the other, YRN-2, has them in the opposite directions. The plasmid DNAs were linearized by restriction before transformation at the unique NcoI site in the URA3 DNA for the URA3 plasmid and at the XhoI site in the HIS3 DNA as described (Fig. 3-4a). (b) Detection of recombinant chromosomes by PFGE and Southern hybridization with a ³²P-labeled 0.85-kb PstI-NsiI fragment (66) of YIp5 (83) bearing URA3, a 1.8-kb HindIII fragment of pRAS1 bearing RAS1, the 1.7-kb BamHI fragment of YIp1 bearing HIS3, and the RS fragment as probes. Four sets of the same PFGE gels as for chromosome separation were prepared. Each slot on the gels was charged with a DNA sample prepared from the cells having the original configuration of chromosomes V and XV (O), or from the galactose-grown cells having the recombinant chromosomes and cured for pHM153 (R). These gels were blotted and hybridized with the four individual probes as indicated. The arrowhead on the left margin indicates the site of a new chromosomal band.

スミドpHM153を形質転換で導入し、SGlu平板培地上で得られたLeu⁺形質転換体（各々YRN-1[pHM153]、YRN-2[pHM153]と名付ける）をロイシン非含有のSGalまたはSGlu液体培地で一晚培養後、ロイシン非含有のSGlu平板培地に塗布した。生育してきたコロニーから任意に選択したクローンの染色体パターンをバルスフィールドゲル電気泳動で調べた。YRN-1[pHM153]株をSGal培地で培養すると約20%のクローン（55クローン中11クローン：これらのクローンのうち、1クローンの染色体パターンをFig. 3-6bのRレーンに示す）で970 kbに相当する新しいバンドが認められた。しかし、NBW5株では、この方法を使用すると、V番染色体にはVIII番染色体が、XV番染色体にはVII番染色体が重なって移動するため、もとのV番染色体とXV番染色体の消失を泳動パターンから確かめることはできない。そこで、YRN-1[pHM153]株のSGlu培地で培養した元のクローンおよびSGal培地で培養して得られた新しいクローンからRタンパク生産プラスミドpHM153を除去し、染色体DNAをバルスフィールドゲル電気泳動で分離した後、DNAをフィルターに移し、³²Pで放射能ラベルしたV番染色体上のURA3遺伝子、XV番染色体上のHIS3、RAS1遺伝子またはRS DNAをプローブとしてサザンハイブリダイゼーションを行った（Fig. 3-6b）。新しいクローンでは何れのプローブでも新しい染色体バンドに強い結合シグナルを示し、RS DNA以外のプローブでは元のV番染色体、XV番染色体のバンドにも弱く結合した（Rレーン）。元のクローンでは何れのプローブでも元のV番染色体、XV番染色体バンドにのみ結合した（Oレーン）。また、RS DNAをプローブとすると新しいクローンの新しい染色体バンドの濃さは、元のクローンのV番染色体バンドの濃さとXV番染色体バンドの濃さを合せたものにほぼ等しい。したがって、新しい染色体バンドにはV番染色体のura3座とXV番染色体のhis3座との間の組換えで生じた2本の新しい染色体が重なっていると考えられた。さらに、YRN-1[pHM153]株をSGlu培地で培養した場合には、新しいクローンの出現頻度は低かった（54クローン中2クローン）。したがって、YRN-1株では、V番染色体とXV番染色体は予想通り（Fig. 3-6a）、Rタンパクの働きでura3座とhis3座との間で組換えを起こし、セントロメアを1個持つ組換え型染色体2本が生じている。

新しいクローンでも、V番染色体およびXV番染色体とプローブDNAとの結合シグナルが認められる。結果を示さないが、pHM153を除去した後、単一コロニー分離を繰り返した株でもこれらの結合シグナルは認められ、この細胞をYPAD培地で培養すると結合シグナルがさらに増加することから、Rタンパクの働きとは無関係に、新しい染色体から元の染色体が再生されると考えられる。

YRN-2[pHM153] 株をロイシンを含まないSGlu培地またはSGal培地で培養しても、新しい組換え型染色体バンドを持つクローンは得られなかった(52クローンを調べた)。また、YRN-2[pHM153] 株をSGlu培地で培養しても正常に増殖したが、SGal培地で培養すると著しい増殖阻害が起こった(結果省略)。したがって、YRN-2 株では予想通り(Fig. 3-6a)、Rタンパクの働きにより、セントロメアを2個持つ染色体と全く持たない染色体に組換えわったと考えられた。

次に、YRN-1 株の転座染色体では、実際に2個の挿入RS DNA断片間で組換えが起こったことを確認するために、YRN-1 株の転座前のクローンと、転座後のクローンの染色体上のRS DNA断片挿入付近の制限酵素地図を調べた。RS DNA断片にはMluI部位が1か所存在する(Fig. 3-2a)が、BamHI 部位、PstI部位、SalI部位は存在しない。したがって、組換えがRS断片間で起こったならば、組換えの前後でMluI-MluI 断片および MluI-BamHI 断片は変化しないが、PstI-PstI 断片およびSalI-SalI 断片は変化する(Fig. 3-7a)。YRN-1 株の転座前のクローンと転座後のクローンの染色体DNA をMluIとBamHI との二重切断、PstI単独切断あるいはSalI単独切断後、アガロースゲル電気泳動を行い、RS DNA断片をプローブとしてハイブリダイゼーションを行った。その結果、Fig. 3-7b に示すように組換えの前後でMluI、BamHI 二重切断の断片のサイズは変化しなかったが、PstI断片およびSalI断片のサイズは変化した。このことから、YRN-1 株で生じた転座染色体は染色体に組込んだ2個のRS断片間の組換えでできたと言える。以上の結果から、pSR1の部位特異的組換えを利用して非同相染色体間での組換えにより相互転座を高頻度で起こすことが可能である。

第4節 考察

第3章では、pSR1プラスミドの部位特異的組換えを利用して、*S. cerevisiae* 細胞の染色体を効率良く改変する方法を開発した。この方法を用いて染色体上での逆位と欠失および非同相染色体間の組換えを80%および20%という高頻度で起こすことができた。この様にpSR1の組換えは線状DNA の組換え、環状DNA の組換え、同方向に反復する組換え部位間の組換え、逆方向に反復する組換え部位間の組換え、分子内組換え、分子間組換えなどを起こすことから、この組換えでは、組換え部位DNA の高次構造、2個の組換え部位の相対的な位置による組換えの阻害はないと考えられる。したがって、この系を用いてさらに環

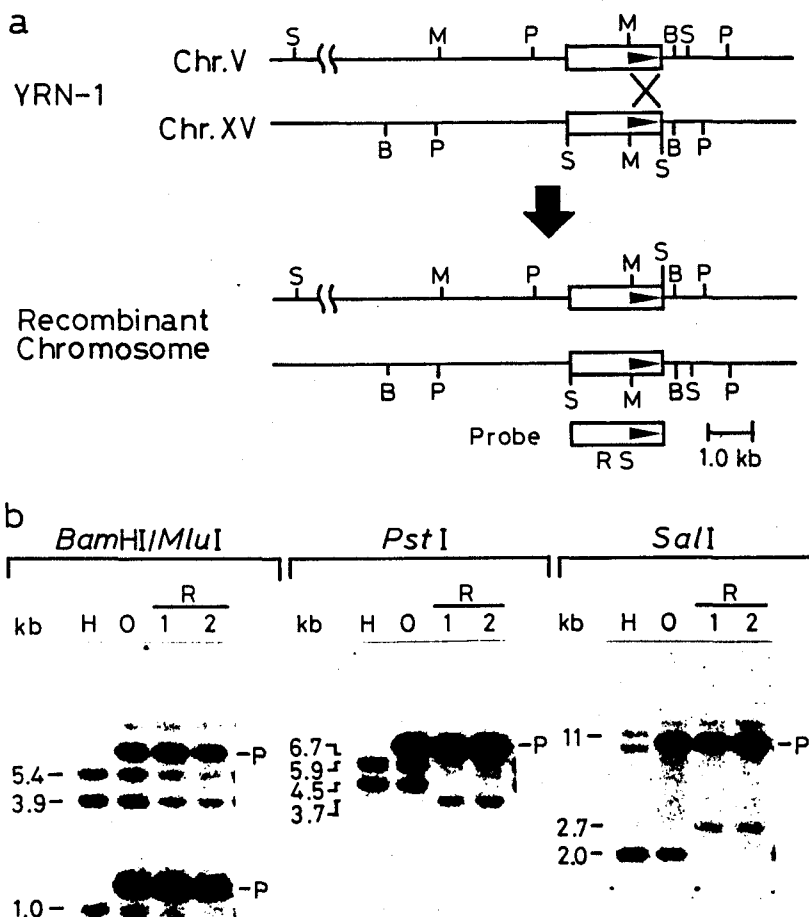


Fig. 3-7. Restriction analysis of the recombinant chromosomes created by the recombination between chromosome V and XV. (a) Restriction maps of the *Bam*HI, *Mlu*I, *Pst*I and *Sal*I sites flanking the RS fragments inserted at the *ura3* and *his3* loci on chromosome V and XV. The abbreviations for restriction sites are as in Fig. 3-2 and Fig. 3-5. (b) DNA samples were prepared from the host cells (strain YRN-1) without pHM153 (H); from the cells of YRN-1 harbouring pHM153 but having the original configuration of chromosomes (O); and from those having the recombinant chromosomes (R). The DNA samples were double digested with *Bam*HI and *Mlu*I, or singly with *Pst*I and *Sal*I, electrophoresed on an agarose gel, blotted, and hybridized with the 32 P-labeled RS fragment as probe. The migration site of pHM153 (linear molecule) (P) is indicated on the right-hand margin of the gels. The molecular sizes of the DNA fragments were estimated with λ phage DNA digested with *Hind*III.

状DNA を染色体に組込むことも可能であろう。また、染色体に逆向きに反復させた組換え部位を多コピー挿入し、Rタンパクを生産させると2 μ m マッピング (28) と同様の原理で染色体を脱落させることもできると考えられる。このように、pSR1の部位特異的組換えを利用した染色体改変技術は、染色体の繋ぎ換え、染色体へのDNA の挿入、特定の染色体の消去などの種々の染色体操作に応用でき、染色体レベルでの生物の育種、品種改良のための有力な手段となるであろう。*S. cerevisiae* では、クローン化遺伝子ライブラリーを利用して、また、例えば、染色体に約100 コピー存在するTy因子の δ 反復配列 (14) を利用して、染色体の様々な位置に組換え部位 (RS) を組込むことが可能であり、上記の各操作を幅広く行うことが可能である。酵母では、pSR1と2 μ m DNA 以外にも、5種類の環状プラスミドが良く知られており (19, 89, 91, 92)、これらのプラスミドの持つ分子内組換えを利用することもできる。

pSR1プラスミドは、細胞内ではA型分子とB型分子がほぼ同数存在することから、pSR1の部位特異的組換えは可逆反応である。したがって、単純に考えると、この組換えを染色体の改変に利用すると、最終的には、元のクローンと組換え体クローンが同数存在する平衡状態に達し、50%以上の組換え体クローンを得ることは不可能であると予想される。しかし、染色体からのURA3-SUP11遺伝子の切り出し、RAS1座-his3 座間の領域の欠失では、分子内組換えが分子間組換えよりも効率良く起こること、生成環状DNA に自律複製能がないこと、生成環状DNA のサイズが大きく細胞内で不安定であることなどの理由から90%、80%の高頻度で組換え体クローンに変換されたと考えられる。他の染色体改変操作でも、一度利用された組換え部位が不活化され、組換え反応が不可逆になるなどの工夫をすることにより全クローンを組換え体に変換することが可能になるであろう。

本研究で作製したRタンパク生産プラスミドを使用するとグルコース培地でR遺伝子の発現を抑制した状態でも、ガラクトース培地でR遺伝子を誘導した状態よりも低頻度だが、RS間で組換えが起これ、R遺伝子が弱く発現していると考えられた。グルコース培地条件下での組換えを低く抑えるためには、さらに発現が抑制されるプラスミドを構築する必要がある。また、グルコース培地条件下で、pHM153を使用した場合と、pHM152を使用した場合との間で認められた組換え頻度の差は、それぞれのGAL プロモーターの機能の差と考えられる。

URA3座とRAS1座間での相互転座染色体を作製したとき、相互転座染色体が本来の構造の染色体に戻りやすいという現象が観察された。この現象は、Rタンパクが生産されなくて

も起こり、Rタンパクの働きがないとき本来の染色体から転座染色体が生じる頻度よりも相互転座染色体から本来の染色体に戻る頻度のほうが高い。これらの観察から、S. cerevisiae 細胞には、構造的に異常な染色体を本来の染色体に再生する機構が備わっている可能性が考えられる。また、本来の染色体は、組換え型より、安定性、機能などの点で優れていることが示唆される。しかし、他の研究者により多くの相互転座染色体 (41, 64, 84)、欠失染色体 (56, 85) が作製されているが、この様な再生現象が観察された報告は 1 つしかない (84)。さらに、この報告では、XV 番染色体の his3 座と XII 番染色体の RDN1 座 (rRNA 遺伝子座) との間で組換えを起こし、相互転座により、rRNA 遺伝子の繰り返し配列が 2 本の転座染色体に分配され、分配された rRNA 遺伝子の相同性を介した組換えにより再生が起こったと考え、特別な再生機構は考えていない。本研究で観察された再生現象は、ura3 座 - his3 座間での転座染色体に特異的なものかもしれないが、その機構を研究することは、再生現象を防ぎ、改変染色体の構造を安定に維持するために重要である。

第 5 節 要約

pSR1 プラスミドの部位特異的組換えを利用して S. cerevisiae 染色体を人為的に改変する技術の開発を試みた。その技術として次のような方法を考案した。酵母染色体の任意の 2 か所に YIp 型ベクターを用いて pSR1 の組換え部位を含む RS 断片を組込む。この細胞にガラクトース代謝系遺伝子プロモーターの下流に R 遺伝子を連結したプラスミドを導入した後、ガラクトース培地で培養して、R タンパクを生産させ、2 個の RS 間で組換えを行う。この方法を用いて染色体上の欠失と逆位、非同源染色体間の相互転座、巨大環状 DNA の染色体への組込みが可能である。まず、染色体に組込んだ RS 間で組換えが起こるかを調べるために同方向に向いた 2 個の RS の間に SUP11 および URA3 遺伝子を挟む DNA を染色体に組込み、R 遺伝子を発現させた。約 95% の細胞で SUP11 および URA3 遺伝子の切り出しが起こったことから、染色体に組込んだ RS 間でも組換えが起こることがわかった。つぎに、欠失、逆位、相互転座を起こすことを試みた。二倍体細胞の一方の XV 番染色体上約 180 kb 離れた RAS1 座と his3 座とに RS 断片を組込み、R 遺伝子を発現させると、RS 断片が同方向に挿入されている細胞では約 80% の細胞で欠失が、逆方向に挿入されている細胞では逆位が起こった。一倍体細胞の V 番染色体の ura3 座と XV 番染色体の his3 座とに RS 断片を組込み、R

遺伝子を発現させると約20%の細胞で相互転座が起こった。したがって、この技術を用いて欠失、逆位、相互転座のような染色体の改変を起こすことが可能であることがわかった。この技術は生物の品種改良、育種に利用できると考えられる。

第4章 総合考察と要約

本論文では、まず、pSR1プラスミドの分子内組換えの機構を理解するために、組換えに必須な領域の限定、組換えに働く因子の限定、組換え部位領域DNA とRタンパクの結合を調べ、次に、pSR1プラスミドの分子内組換えを用いて、染色体上の欠失と逆位、非相同染色体間の組換えを起こす染色体の改変技術を開発した。

第2章では、pSR1プラスミドの分子内組換えの機構を解析した。pSR1の一方のIRに変異をもつプラスミドの分子内組換えと変異部位の挙動から組換え部位はIR内の58 bp の配列内に限定された。この58 bp 配列内には、3 bpのスペース部を置いて隔てられた14 bp の一対の逆向き反復配列が存在する。この部位特異的組換えは、宿主の普遍的組換え系とは無関係に起こり、酵母宿主因子の働きを必要としない。また、Rタンパクは、組換え部位に存在する14 bp の逆向き反復配列およびそれに続く4個の同じ14 bp の繰り返し配列に結合する。これらの観察から遺伝子変換を伴う分子内組換えの機構として、二重鎖切断修復モデルと一本鎖切断交換モデルを提案した。部位特異的組換えには*S. cerevisiae* の接合型変換の組換え(46,81)、*S. cerevisiae* ミトコンドリアに存在するイントロンでの転移(24,25,37)などのように大領域の遺伝子変換を伴う部位特異的組換え（遺伝子変換型組換え）とλファージのInt タンパクの組換え(94)、P1ファージのcre-lox 系の組換え(78)、MuファージのCin タンパクによる組換え(75)、サルモネラ菌のHin タンパクによる組換え(75)、2 μ m DNA の分子内組換え(9)の様に交叉を行う組換え（交叉型組換え）が存在する。遺伝子変換型組換えの特徴は、部位特異的エンドヌクレアーゼがDNA 鎖を二重鎖切断することにより開始されることである。また、接合型変換の組換えには普遍的組換えおよび修復に働く遺伝子の働きが必要である(47)。しかし、これらの特徴は、pSR1の組換えとは異なる。また、交叉型組換えの特徴は、1) 組換えは組換えタンパクによって行われ、他の宿主因子の働きを必要としないこと（Int タンパクによる組換えは例外で宿主因子を必要とする）、2) 宿主の組換えとは無関係であること、3) 組換え部位に逆向き反復配列が存在し、この配列に組換えタンパクが結合すること、などであり(69)、pSR1プラスミドの組換えと一致する。また、Rタンパクとこれらの組換えタンパクのC末端には弱い相同領域が存在する(2,3,31)。よって、pSR1の分子内組換えは交叉型の組換えに属

し、その組換えモデルとして、一本鎖切断交換モデルが適切であると考えられる。また、Int タンパクの組換え (45, 61) および cre-loxP の組換え (34) では、in vitro 組換え反応でホリデー中間体が観察されていることから一本鎖切断交換モデルの可能性が示唆される。pSR1 プラスミドの組換えにおいても in vitro 反応でホリデー中間体の存在を調べることにより組換えモデルを検証できるであろう。

第3章では、pSR1 プラスミドの部位特異的組換えを利用して染色体を改変する技術を開発した。この技術の大きな特徴は部位特異的組換えを人為的に操作して染色体の改変を行ったことである。このことにより、指定した部位で指定した種類の改変、効率良い改変、改変のON-OFF制御が可能である。本研究以外にも、染色体へのテロメアの挿入とその解離による欠失染色体の作製 (60)、染色体上の大きな領域を小ベクターDNA で置換することによる欠失染色体の作製 (85)、クローン化DNA を染色体に挿入し、それらDNA 間の相同的組換えによる相互転座染色体の作製 (41, 64, 84) などの染色体改変技術が開発されている。これらの方法はいずれも、宿主が持つ相同的組換え（普遍的組換え）の機構や形質転換を利用するため、組換え体クローンを栄養要求性の相補などで選択する必要がある。ところが、pSR1の部位特異的組換えを利用した方法では、組換え開始部位を染色体へ組込む際に、形質転換と相同的組換えを利用するが、改変自体は部位特異的組換えで起こすので、無作為選択でも組換え体クローンを得ることが十分可能である。たとえば、V 番染色体の ura3 座と XV 番染色体の his3 座との相互転座クローンの出現頻度は相同的組換えを利用すると1細胞あたり、1世代あたり 1×10^{-7} と低い (41)、pSR1の部位特異的組換えを利用すると約 1×10^{-2} （第3章の結果で1世代を2時間として計算した）と高く、組換え体をバルスフィールドゲル電気泳動で選択することが可能である。また、部位特異的組換えを停止することができるので、組換え後に染色体に残る2個の組換え開始部位間で起こる組換えを普遍的組換えの頻度まで下げることができ、改変染色体を安定に維持することが可能である。さらに、改変を細胞内で行い、巨大DNA を試験管内で操作することを避けることができるので、DNA が剪断される確率が低く、染色体の改変を容易に行える。また、指定した部位で指定した種類の組換えを起こすことができるので、高等生物のように、非正統的組換えの多い細胞でも、思い通りの改変、DNA の染色体の指定部位への組込みが可能である。

この染色体改変技術をさらに広範囲に利用するためには、染色体上の任意の位置に組込んだRS間で高頻度で組換えが起こる必要がある。本研究では、XV 番染色体の RAS1 座と his3

座間での組換えおよびV番染色体のura3座とXV番染色体のRAS1座間での組換えが起こることを示した。この様に、pSR1プラスミドの部位特異的組換えを用いて、染色体上の欠失と逆位、非相同染色体間の相互転座を起こすことが可能であるので、組換えには、RS DNAが存在するDNAが環状か線状か、また、分子内組換えか分子間組換えかは影響を及ぼさないと考えられる。第2章に示したpSR1の分子内組換え機構に基づくと、pSR1の分子内組換えは、1) Rタンパクによる組換え部位の認識とその組換え部位DNAへの結合、2) 2個の組換え部位DNAの対合、3) RタンパクによるDNA鎖の切断と再結合、の3段階の過程を通じて起こる。1)の段階には、クロマチン構造のような染色体の高次構造が、2)の段階には、染色体全体の高次構造と核内での組換え部位の配置が、その効率に影響を及ぼすと考えられる。現時点では、これらが、染色体の改変に及ぼす影響については分らず、今後の検討を必要とする。

pSR1プラスミドの部位特異的組換えを利用して、染色体上での欠失と逆位、非相同染色体間の相互転座を起こすことができた。この染色体改変技術を用いて、染色体を繋ぎ変えたり、染色体にDNAを挿入したり、特定の染色体を消去して、染色体を自由に操作して染色体レベルでの生物の品種改良、育種を行うことが可能である。この染色体改変技術を用いると、約200 kbのDNAの挿入が可能と考えられるから、約100個の遺伝子を導入できることになる。したがって、窒素固定や光合成などの数段階から数十段階の反応からなる代謝系を移植することが可能である。相互転座染色体ad,cb (2本の染色体をab,cdで表現すると、相互転座染色体はad,cbとなる)と本来の染色体ab,cdをもつ雑種二倍体ab,cd/ad,cbが減数分裂を行うと、ab,cb、ab,cd、ad,cb、ad,cdなどの染色体をもつ配偶子が形成される(動原体はa領域とb領域に存在すると仮定した)。しかし、これらのうち、ab,cbとad,cdの染色体をもつ配偶子は染色体の一部を欠くために生育できず、一回の転座で稔性は半分に減少する。さらに多くの転座染色体を形成すると稔性をさらに減少させることができるであろう。このような相互転座染色体を染色体改変技術を利用して構築すると不稔生物を作製することが可能である。pSR1の部位特異的組換えを利用してベクターを染色体に挿入することにより、育種株に増殖可能なプラスミドを残さずに生物を改良することが可能である。また、この技術を用いて、染色体から、特定のDNA領域を環状DNAとして、切り出すことが可能なことから、切り出されたDNAに宿主の自律複製配列および大腸菌の複製起点を連結しておくと、切り出されたDNA断片のコピー数が数十倍に増加し、染色体の指定した領域のDNAを直接または大腸菌を利用して容易に回収できる。しか

も、この方法では、最低200 kbの切り出しが可能であるから、人間の血液凝固因子Ⅷ遺伝子（最低180 kb）(29)やキイロショウジョウバエのbithorax複合体遺伝子（約320 kb）(44)などの高等生物の巨大遺伝子および原核生物のオペロンを形成する遺伝子群を一挙に回収できるであろう。さらに、pSR1の部位特異的組換えを利用して、染色体上に欠失や逆位を起こして、また、これらの改変染色体を8塩基認識の制限酵素で切断して、パルスフィールドゲル電気泳動にかけることにより染色体構造を解析することも可能である。

要約

酵母 *Z. rouxii* 由来の環状プラスミド pSR1 は、959 bp からなる一対の逆向き反復配列をもち、この部分を介して分子内組換えを行う。この分子内組換えにはプラスミド自身がコードする Rタンパクが関与し、組換えは *S. cerevisiae* 宿主でも起こる。この pSR1 プラスミドの分子内組換え機構を利用した酵母 *S. cerevisiae* の染色体改変技術の開発について述べたのが本論文である。

第2章では、pSR1 プラスミドの分子内組換えの機構を解析することを行った。分子内組換え部位を限定するために、pSR1 プラスミドの一方の IR に *Sal*I リンカーが挿入された種々の変異プラスミドおよび欠失変異プラスミドを *S. cerevisiae* 宿主に導入し、変異プラスミドの組換えと変異部位の動きを調べ、組換え部位を 58 bp の配列内に限定した。この配列内には一対の 14 bp の逆向き反復配列が存在する。この部位特異的組換えに伴い、IR 全域で変異部位の遺伝子変換が高頻度で起こる。このことから、組換えは、58 bp 配列内で開始されるが、交叉は IR 全域で起こることがわかった。また、分子内組換えおよび遺伝子変換には普遍的組換えに関与する *RAD52* 遺伝子の働きは不要であった。大腸菌内で *tac* プロモーターを用いて *R* 遺伝子を発現させると、普遍的組換えに関与する *recA* 遺伝子および *recBC* 遺伝子を欠損しても IR 間で分子内組換えが起こることから、分子内組換えには、酵母宿主因子は関与することなく、Rタンパクのみで起こると思われた。さらに、大腸菌で大量生産し、部分精製した Rタンパクを用いて、Rタンパクの組換え部位 DNA への結合を DNase I フットプリンティング実験により調べたところ、Rタンパクは 58 bp 配列に存在する一対の 14 bp の逆向き反復配列とそれに隣接する4個の同じ14 bp の繰り返し配列に結合することがわかった。この結果は、2 μ m DNAでの観察と同様である。これらのこと

から、58 bp 配列内で組換えが開始された後、ブランチマイグレーションによりヘテロデュープレックスを形成するが、ミスマッチ修復を伴うことなくヘテロデュープレックスがDNA複製により解離されることが示唆され、この組換えは特異な部位特異的組換えであると考えられた。また、2個の58 bp 配列をDNAに組み込み、Rタンパクの生産を制御することによりpSR1の組換えを人為的に操作できると考えられた。

第3章では、pSR1プラスミドの部位特異的組換えを利用したS. cerevisiae 染色体の改変技術の開発を試みた。染色体改変方法として次のような方法を考案した。

S. cerevisiae の遺伝子および組換え開始部位 (RS) を含むRS断片を連結したYIp 型ベクターを用いて組換え開始部位をS. cerevisiae 染色体の任意の2か所に組み込む。この細胞にGAL1遺伝子プロモーターの下流にR遺伝子を繋いだYE_p 型プラスミドを導入した後、ガラクトース培地で培養して、Rタンパクを生産させ、2個のRS間で組換えを行わす。この方法を用いて染色体上の欠失と逆位、非同源染色体間の相互転座、巨大環状DNAの染色体への組み込みが可能である。まず、染色体に組み込んだRS間で組換えが起こるかを調べるために同方向に向いた2個のRS断片の間にSUP11-URA3遺伝子を挟むDNAを染色体に組み込み、R遺伝子を発現させた。約95%の細胞でSUP11-URA3遺伝子の欠失が起こったことから、染色体に組み込んだRS間でも組換えが起こることがわかった。次に欠失と逆位の可能性を調べるために、二倍体細胞の一方のXV番染色体上約180 kb離れたRAS1座とhis3座とにRS断片を組み込みR遺伝子を発現させるとRS断片が同方向に挿入されている細胞では約80%の細胞で欠失が逆方向に挿入されている細胞では逆位が起こった。さらに、転座の可能性を調べるために、一倍体細胞のV番染色体のura3座とXV番染色体のhis3座とにRS断片を組み込み、R遺伝子を発現させると約20%の細胞で相互転座が起こった。したがって、この技術を用いて欠失、逆位、相互転座のような染色体の改変を効率良く起こすことが可能であることがわかった。この技術は生物の品種改良、育種に利用できると考えられる。

参考文献

1. Andrews, B. J., G. A. Proteau, L. G. Beatty, and P. D. Sadowski. 1985. The FLP recombinase of the 2 μ circle DNA of yeast: interaction with its target sequences. *Cell* 40:795-803.
2. Araki, H., A. Jearnpipatkul, H. Tatsumi, T. Sakurai, K. Ushio, T. Muta, and Y. Oshima. 1985. Molecular and functional organization of yeast plasmid pSR1. *J. Mol. Biol.* 182:191-203.
3. Argos, P., A. Landy, K. Abremski, J. B. Egan, E. Haggard-Ljungquist, R. H. Hoess, M. L. Kahn, B. Kalionis, S. V. L. Narayana, L. S. Pierson III, N. Sternberg, and J. M. Leong. 1986. The integrase family of site-specific recombinases: regional similarities and global diversity. *EMBO J.* 5:433-440.
4. Babineau, D., D. Vetter, B. J. Andrews, R. M. Gronostajski, G. A. Proteau, L. G. Beatty, and P. D. Sadowski. 1985. The FLP protein of the 2-micron plasmid of yeast: purification of the protein from Escherichia coli cells expressing the cloned FLP gene. *J. Biol. Chem.* 260:12313-12319.
5. Birnboim, H. C. and J. Doly. 1979. A rapid alkaline extraction procedure for screening recombinant plasmid DNA. *Nucleic Acids Res.* 7:1513-1523.
6. Bolivar, F., R. L. Rodriguez, P. J. Greene, M. C. Betlach, H. L. Heyneker, H. W. Boyer, J. H. Crosa, and S. Falkow. 1977. Construction and characterization of new cloning vehicles. II. a multipurpose cloning system. *Gene* 2:95-113.
7. Botstein, D., S. C. Falco, S. E. Stewart, M. Brennan, S. Scherer, D. T. Stinchcomb, K. Struhl, and R. W. Davis. 1979. Sterile host yeasts (SHY): a eucaryotic system of biological containment for recombinant DNA experiments. *Gene* 8:17-24.

8. Broach, J. R. 1981. The yeast plasmid 2μ circle, p.445-470. In J. N. Strathern, E. W. Jones, and J. R. Broach (ed.), The molecular biology of the yeast saccharmyces: life cycle and inheritance. Cold Spring Harbor Laboratory, Cold Spring Harbor, N.Y.
9. Broach, J. R., V. R. Guarascio, and M. Jayaram. 1982. Recombination within the yeast plasmid 2μ circle is site-specific. Cell 29:227-234.
10. Broach, J. R., Y.-Y. Li, L.-C. C. Wu, and M. Jayaram. 1983. Vectors for high-level, inducible expression of cloned genes in yeast, p.83-117. In M. Inouye (ed.), Experimental manipulation of gene expression. Academic Press Inc., New York, N. Y.
11. Brosius, J. 1984. Plasmid vectors for the selection of promoters. Gene 27:151-160.
12. Brosius, J., T. J. Dull, D. D. Sleeter, and H. F. Noller. 1981. Gene organization and primary structure of a ribosomal RNA operon from Escherichia coli. J. Mol. Biol. 148:107-127.
13. Burke, D. T., G. F. Carle, and M. V. Olson. 1987. Cloning of large segments of exogeneous DNA into yeast by means of artificial chromosome vectors. Science 236:806-812.
14. Cameron, J. R., E. Y. Loh, and R. W. Davis. 1979. Evidence for transposition of dispersed repetitive DNA families in yeast. Cell 16:739-751.
15. Cameron, J. R., P. Philippsen, and R. W. Davis. 1977. Analysis of chromosomal integration and deletions of yeast plasmids. Nucleic Acids Res. 4:1429-1448.
16. Carle, G. F., and M. V. Olson. 1984. Separation of chromosomal DNA molecules from yeast by orthogonal-field-alternation gel electrophoresis. Nucleic Acids Res. 12:5647-5664.
17. Carle, G. F., and M. V. Olson. 1985. An electrophoretic karyotype for yeast. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 82:3756-3760.
18. Celeste Y.-P., J. Vieira, and J. Messing. 1985. Improved M13 phage

- cloning vectors and host strains: nucleotide sequences of the M13mpl8 and pUC19 vectors. *Gene* 33:103-119.
19. Chen, X. J., M. Saliola, C. Falcone, M. M. Bianchi, and H. Fukuhara. 1986. Sequence organization of the circular plasmid pKD1 from the yeast Kluyveromyces drosophilae. *Nucleic Acids Res.* 14:4471-4481.
 20. Clark, A. J.. 1973. Recombination deficient mutants of E. coli and other bacteria. *Ann. Rev. Genet.* 7:67-86.
 21. Clarke, L., and J. Carbon. 1978. Functional expression of cloned yeast DNA in Escherichia coli: specific complementation of arginosuccinate lyase (argH) mutations. *J. Mol. Biol.* 120:517-532.
 22. Clarke, L., and J. Carbon. 1980. Isolation of a yeast centromere and construction of functional small circular chromosomes. *Nature (London)* 287:504-509.
 23. Clewell, D. B., and D. R. Helinski. 1969. Supercoiled circular DNA-protein complex in Escherichia coli: purification and induced conversion to an open circular DNA form. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 62:1159-1166.
 24. Colleaux, L., L. d'Auriol, M. Betermier, G. Cottarel, A. Jacquier, F. Galibert, and B. Dujon. 1986. Universal code equivalent of a yeast mitochondrial intron reading frame is expressed into E. coli as a specific double strand endonuclease. *Cell* 28:521-533.
 25. Colleaux, L., L. d'Auriol, F. Galibert, and B. Dujon. 1988. Recognition and cleavage site of the intron-encoded omega transposase. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 85:6022-6026.
 26. de Boer, H. A., L. J. Comstock, and M. Vasser. 1983. The tac promoter: A functional hybrid derived from the trp and lac promoters. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 80:21-25.
 27. DeFeo-Jones, D., E. M. Scolnick, R. Koller, R., and R. Dhar. 1983. ras-related gene sequences identified and isolated from Saccharomyces cerevisiae. *Nature (London)* 306:707-709.

28. Falco, S. C., Y. Li, J. R. Broach, and D. Botstein. 1982. Genetic properties of chromosomally integrated 2μ plasmid DNA in yeast. *Cell* 29:573-584.
29. Gitschier, J., W. I. Wood, T. M. Goralka, K. L. Wion, E. Y. Chen, D. H. Eaton, G. A. Vehar, D. J. Capon, and R. M. Lawn. 1984. Characterization of the human factor VIII gene. *Nature (London)* 312:326-330.
30. Gronostajski, R. M., and P. D. Sadowski. 1985. The FLP recombinase of the *Saccharomyces cerevisiae* 2μ m plasmid attaches covalently to DNA via a phosphotyrosyl linkage. *Mol. Cell. Biol.* 5:3274-3279.
31. Hartley, J. L., and J. E. Donelson. 1980. Nucleotide sequence of the yeast plasmid. *Nature (London)* 286:860-864.
32. Hereford, L., K. Fahrner, J. Woolford Jr., M. Rosbash, and D. B. Kaback. 1979. Isolation of yeast histon genes H2A and H2B. *Cell* 18:1261-1271.
33. Hieter, P., C. Mann, M. Snyder, and R. W. Davis. 1985. Mitotic stability of yeast chromosomes: a colony color assay that measures nondisjunction and chromosome loss. *Cell* 40:381-392.
34. Hoess, R., A. Wierzbicki, and K. Abremski. 1987. Isolation and characterization of intermediates in site-specific recombination. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 84:6840-6844.
35. Ito, H., Y. Fukuda, K. Murata, and A. Kimura. 1983. Transformation of intact yeast cells treated with alkali cations. *J. Bacteriol.* 153:163-168.
36. Jackson, J. A., and G. R. Fink. 1981. Gene conversion between duplicated genetic elements in yeast. *Nature (London)* 292:306-311.
37. Jacquier A., and B. Dujon. 1985. An intron-encoded protein is active in a gene conversion process that spreads an intron into a mitochondrial gene. *Cell* 41:383-394.

38. Jayaram, M. 1986. Association of reciprocal exchange with gene conversion between the repeated segments of 2- μ m circle. J. Mol. Biol. 191:341-354.
39. Jayaram, M. 1986. Mating type-like conversion promoted by the 2 μ m circle site-specific recombinase: implications for the double-strand-gap repair model. Mol. Cell. Biol. 6:3831-3837.
40. Jearnpipatkul, A., H. Araki., and Y. Oshima. 1987. Factors encoded by and affecting the holding stability of yeast plasmid pSR1. Mol. Gen. Genet. 206:88-94.
41. Jinks-Robertson, S., and T. D. Petes. 1986. Chromosomal translocations generated by high-frequency meiotic recombination between repeated yeast genes. Genetics 114:731-752.
42. Johnston, M., and R. W. Davis. 1984. Sequences that regulate the divergent GAL1-GAL10 promoter in Saccharomyces cerevisiae. Mol. Cell. Biol. 4:1440-1448.
43. Kao, F.-T., and T. T. Puck. 1970. Genetics of somatic mammalian cells: linkage studies with human-Chinese hamster cell hybrids. Nature (London) 228:329-332.
44. Karch, F., B. Weiffenbach, M. Peifer, W. Bender, I. Duncan, S. Celniker, M. Crosby, and E. B. Lewis. 1985. The abdominal region of the bithorax complex. Cell 43:81-96.
45. Kitts, P. A., and H. A. Nash. 1987. Homology-dependent interactions in phage λ site-specific recombination. Nature (London) 329:346-348.
46. Kostriken, R., J. N. Strathern, A. J. S. Klar, J. B. Hicks, and F. Heffron. 1983. A site-specific endonuclease essential for mating-type switching in Saccharomyces cerevisiae. Cell 35:167-174.
47. Malone, R. E., and R. E. Esposito. 1980. The RAD52 gene is required for homothallic interconversion of mating types and spontaneous mitotic recombination in yeast. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 77:503-507.
48. Maniatis, T., E. F. Fritsch, and J. Sambrook. 1982. Molecular cloning:

- a laboratory manual. Cold Spring Harbor Laboratory, Cold Spring Harbor, N. Y.
49. Maxam, A. M., and W. Gilbert. 1980. Sequencing end-labeled DNA with base-specific chemical cleavages. *Methods Enzymol.* 65:499-560.
 50. McClelland, M., L. G. Kessler, and M. Bittner. 1984. Site-specific cleavage of DNA at 8- and 10-base-pair sequences. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 81:983-987.
 51. McLeod, M., S. Craft, and J. R. Broach. 1986. Identification of the crossover site during FLP-mediated recombination in the Saccharomyces cerevisiae plasmid 2 μ m circle. *Mol. Cell. Biol.* 6:3357-3367.
 52. Messing, J. 1983. New M13 vectors for cloning. *Methods Enzymol.* 101: 20-78.
 53. Messing, J., R. Crea, and P. H. Seeburg. 1981. A system for shotgun DNA sequencing. *Nucleic Acids Res.* 9:309-321.
 54. Meyer-Leon, L., J. F. Senecoff, R. C. Bruckner, and M. M. Cox. 1984. Site-specific genetic recombination promoted by the FLP protein of the yeast 2-micron plasmid in vitro. *Cold Spring Harbor Symp. Quant. Biol.* 49:797-804.
 55. Morrison, D. A.. 1977. Transformation in Escherichia coli: cryogenic preservation of competent cells. *J. Bacteriol.* 132:349-351.
 56. Mortimer, R. K., and D. Schild. 1981. Genetic mapping in Saccharomyces cerevisiae, p.11-26. In J. N. Strathern, E. W. Jones, and J. R. Broach (ed.), *The molecular biology of the yeast Saccharomyces: life cycle and inheritance*. Cold Spring Harbor Laboratory, Cold Spring Harbor, N. Y.
 57. Mortimer, R. K., and D. Schild. 1985. Genetic map of Saccharomyces cerevisiae, edition 9. *Microbiol. Rev.* 49:181-212.
 58. Murray, A. W., N. P. Schultes, and J. W. Szostak. 1986. Chromosome length controls mitotic chromosome segregation in yeast. *Cell* 45:529-536.

59. Murray, A. W., and Szostak, J. W. 1983. Construction of artificial chromosomes in yeast. *Nature (London)* 305:189-193.
60. Murray, A. W., and J. W. Szostak. 1986. Construction and behavior of circularly permuted and telocentric chromosomes in Saccharomyces cerevisiae. *Mol. Cell. Biol.* 6:3166-3172.
61. Nunes-Düby, S. E., L. Matsumoto, and A. Landy. 1987. Site-specific recombination intermediates trapped with suicide substrates. *Cell* 50: 779-788.
62. Orr-Weaver, T. L., and J. W. Szostak. 1985. Fungal recombination. *Microbiol. Rev.* 49:33-58.
63. Orr-Weaver, T. L., J. W. Szostak, and R. J. Rothstein. 1983. Genetic applications of yeast transformation with linear and gapped plasmids. *Methods Enzymol.* 101:228-245.
64. Potier, S., B. Winsor, and F. Lacroute. 1982. Genetic selection for reciprocal translocation at chosen chromosomal sites in Saccharomyces cerevisiae. *Mol. Cell. Biol.* 2:1025-1032.
65. Prakash, S., L. Prakash, W. Burke, and B. A. Montelone. 1980. Effects of the RAD52 gene on recombination in Saccharomyces cerevisiae. *Genetics* 94:31-50.
66. Rose, M., P. Grisafi, and D. Botstein. 1984. Structure and function of the yeast URA3 gene: expression in Escherichia coli. *Gene* 29:113-124.
67. Rothstein, R. J. 1983. One-step gene disruption in yeast. *Methods Enzymol.* 101:202-211.
68. Russel, D. R., and G. N. Bennett. 1982. Construction and analysis of in vivo activity of E. coli promoter hybrids and promoter mutants that alter the -35 to -10 spacing. *Gene* 20:231-243.
69. Sadowski, P.. 1986. Site-specific recombinases: changing partners and doing the twist. *J. Bacteriol.* 165:341-347.
70. Sadowski, P. D., D. D. Lee, B. J. Andrews, D. Babineau, L. Beatty, M. J. Morse, G. Proteau, and D. Vetter. 1984. In vitro system for

- genetic recombination of the DNAs of bacteriophage T7 and yeast 2-micron circle. Cold Spring Harbor Symp. Quant. Biol. 49:789-796.
71. Sanger, F., A. R. Coulson, G. F. Hong, D. F. Hill, and G. B. Petersen. Nucleotide sequence of bacteriophage λ DNA. 1982. J. Mol. Biol. 162:729-773.
 72. Sanger, F., S. Nicklen, and A. R. Coulson. 1977. DNA sequencing with chain-terminating inhibitors. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 74:5463-5467.
 73. Schwartz, D. C., and C. R. Cantor. 1984. Separation of yeast chromosome-sized DNAs by pulsed field gradient gel electrophoresis. Cell 37:67-75.
 74. Senecoff, J. F., R. C. Bruckner, and M. M. Cox. 1985. The FLP recombinase of the yeast 2- μ m plasmid: characterization of its recombination site. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 82:7270-7274.
 75. Silverman, M., and M. Simon. 1983. Phase variation and related systems. p.537-557. In J. A. Shapiro (ed.), Mobile genetic elements. Academic Press, Inc., New York, N. Y.
 76. Southern, E. M. 1975. Detection of specific sequences among DNA fragments separated by gel electrophoresis. J. Mol. Biol. 98:503-517.
 77. Stahl, M. M., I. Kobayashi, F. W. Stahl, and S. K. Huntington. 1983. Activation of Chi, a recombinator, by the action of an endonuclease at a distant site. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 80:2310-2313.
 78. Sternberg, N., and R. Hoess. 1983. The molecular genetics of bacteriophage P1. Ann. Rev. Genet. 17:123-154.
 79. Stinchcomb, D. T., C. Mann, and R. W. Davis. 1982. Centromeric DNA from Saccharomyces cerevisiae. J. Mol. Biol. 158:157-179.
 80. Stinchcomb, D. T., K. Struhl, and R. W. Davis. 1979. Isolation and characterization of a yeast chromosome replicator. Nature (London) 282:39-43.

81. Strathern, J. N., A. J. S. Klar, J. B. Hicks, J. A. Abraham, J. M. Ivy, K. A. Nasmyth, and C. McGill. 1982. Homothallic switching of yeast mating type cassettes is initiated by a double-stranded cut in the MAT locus. *Cell* 31:183-192.
82. Struhl, K., and R. W. Davis. 1980. A physical, genetic and transcriptional map of the cloned his3 gene region of Saccharomyces cerevisiae. *J. Mol. Biol.* 136:309-332.
83. Struhl, K., D. T. Stinchcomb, S. Scherer, and R. W. Davis. 1979. High-frequency transformation of yeast: autonomous replication of hybrid DNA molecules. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 76:1035-1039.
84. Sugawara, N., and J. W. Szostak. 1983. Recombination between sequences in nonhomologous positions. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 80:5675-5679.
85. Surosky, R. T., and B.-K. Tye. 1985. Construction of telocentric chromosomes in Saccharomyces cerevisiae. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 82:2106-2110.
86. Sutcliffe, J. G.. 1979. Complete nucleotide sequence of the Escherichia coli plasmid pBR322. *Cold Spring Harbor Symp. Quant. Biol.* 43:77-90.
87. Szostak, J. W., T. L. Orr-Weaver, R. J. Rothstein, and F. W. Stahl. 1983. The double-strand-break repair model for recombination. *Cell* 33: 25-35.
88. Tanaka, T., and B. Weisblum. 1975. Construction of a colicin El-R factor composite plasmid in vitro: means for amplification of deoxyribonucleic acid. *J. Bacteriol.* 121:354-362.
89. Toh-e, A., H. Araki, I. Utatsu, and Y. Oshima. 1984. Plasmids resembling 2- μ m DNA in the osmotolerant yeasts Saccharomyces bailii and Saccharomyces bisporus. *J. Gen. Microbiol.* 130:2527-2534.
90. Toh-e, A., S. Tada, and Y. Oshima. 1982. 2- μ m DNA-like plasmids in the osmophilic haploid yeast Saccharomyces rouxii. *J. Bacteriol.* 151: 1380-1390.
91. Toh-e, A., and I. Utatsu. 1985. Physical and functional structure of a

- yeast plasmid, pSB3, isolated from Zygosaccharomyces bisporus. Nucleic Acids Res. 13:4267-4283.
92. Utatsu, I., S. Sakamoto, T. Imura, and A. Toh-e. 1987. Yeast plasmids resembling 2 μ m DNA: regional similarities and diversities at the molecular level. J. Bactriol. 169:5537-5545.
 93. Vetter, D., B. J. Andrews, L. Roberts-Beatty, and P. D. Sadowski. 1983. Site-specific recombination of yeast 2- μ m DNA in vitro. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 80:7284-7288.
 94. Weisberg, R. A., and A. Landy. 1983. Site-specific recombination in phage lambda, p.211-250. In R. W. Hendrix, J. W. Roberts, F. W. Stahl, and R. A. Weisberg (ed.), Lambda II. Cold Spring Harbor Laboratory, Cold Spring Harbor, N. Y.
 95. 改造される植物, p.70-109, 藤巻宏, 鵜飼保雄 (共著), 培風館株式会社.

本論文に関係のある報告

1. Gene conversion associated with site-specific recombination in yeast plasmid pSR1.

Hiroaki Matsuzaki, Hiroyuki Araki, and Yasuji Oshima.

Molecular and Cellular Biology 8:955-962 (1988).

2. Chromosome engineering in Saccharomyces cerevisiae using a site-specific recombination system of a yeast plasmid.

Hiroaki Matsuzaki, Ryoichi Nakajima, Junko Nishiyama, Hiroyuki Araki, and Yasuji Oshima. (投稿中)

謝 辞

本研究の遂行にあたり、終始御懇篤なる御指導と御鞭撻を賜りました大阪大学工学部、大嶋泰治教授に衷心より謝意を表します。また、本論文の作成に際し、有益なる御助言と御教示を賜りました大阪大学工学部、岡田弘輔教授、山田靖宙教授、高野光男教授、菅健一教授、吉田敏臣教授、ならびに大阪大学産業科学研究所、二井将光教授に厚く感謝の意を表します。

さらに、本研究を遂行する過程において適切なる御助言をもって御指導頂きました大阪大学工学部 荒木弘之先生に深く感謝の意を表します。

本研究に対し、有益な御助言と激励を下された大阪大学工学部 高田信男先生、原島俊先生、関達治先生に厚く感謝致します。

本研究に御協力下さった中西規之氏（鐘紡株式会社）、中島亮一氏（オリエンタル酵母株式会社）、西山淳子先生（大阪女子大学）、名田茂之氏に深く感謝致します。

合成DNA の作製に際し、御指導頂きました大阪大学工学部 根来誠司先生、菌株を供与して頂きました大阪大学理学部 小川英行教授、プラスミドを供与して頂きました東京大学医科学研究所 山本正幸先生に深く感謝致します。多種類のプラスミドを提供して頂きましたAmornrat Jearnpipatkul博士、技術協力および実りある討論をして頂きました中出真嗣氏（現、小野薬品工業株式会社）に深く感謝致します。

吉田和哉先輩、黄龍逸氏、改正善彦氏（現、武田薬品工業株式会社）を初め、大嶋研究室の皆様には、種々の御助言、御激励を頂き、深く感謝致します。