บทที่ 6

การกลายของโครโมโซม

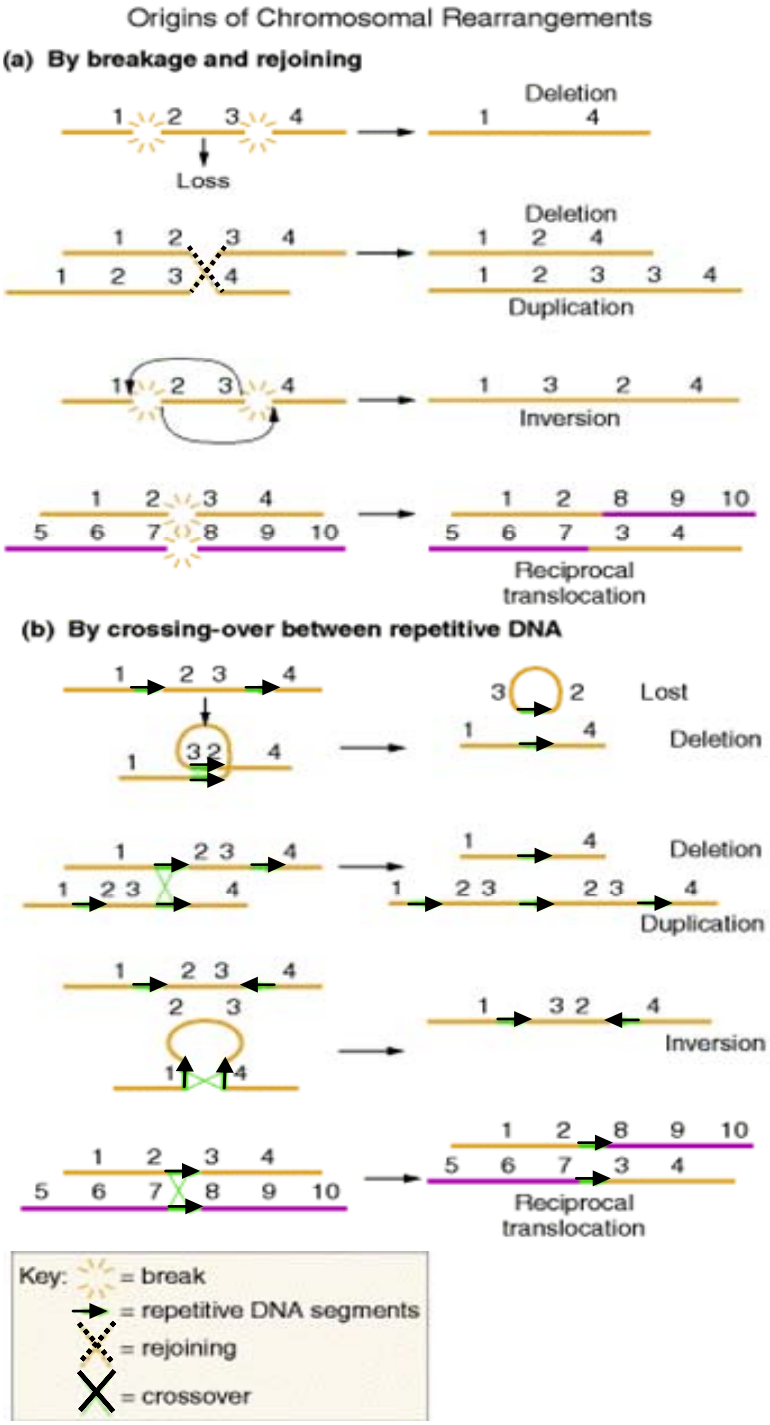
Chromosome Mutation

ในกระบวนการแบ่งเซลล์แบบไมโทซีสจะมีการจำลองตัวของโครโมโซมอย่างถูกต้องและแม่นยำเพื่อการดำรงลักษณะทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิต อย่างไรก็ตามอาจมีปรากฏการณ์ที่เกิดการแตกหักและการเชื่อมต่อกันของโครโมโซมเกิดขึ้นได้ในธรรมชาติ (ภาพที่ 6.1) ทั้งนี้การกลายที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโครโมโซมจำแนกออกเป็น 2 รูปแบบ คือ การผันแปรด้านโครงสร้างและการผันแปรด้านจำนวนซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวจะมีผลต่อการแสดงออกของฟีโนไทป์ หากมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นและสิ่งมีชีวิตนั้นสามารถดำรงชีวิตต่อไปได้จะทำให้มีวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตเกิดขึ้น

การผันแปรเกี่ยวกับโครงสร้างของโครโมโซม

การผันแปรของโครโมโซมด้านโครงสร้างแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่

1. เดฟิเชียนซีหรือดีลีชัน (deficiency; deletion) คือ การขาดหายไปของชิ้นส่วนโครโมโซม
2. ดูพลิเคชันหรือแอดดิชัน (duplication; addition) คือ การมีชิ้นส่วนของโครโมโซมเพิ่มเข้ามาจากปกติ
3. อินเวอร์ชัน (inversion) คือ การที่ชิ้นส่วนโครโมโซมสลับตำแหน่งโดยยังมีชิ้นส่วนของโครโมโซมครบเท่าเดิม
4. ทรานสโลเคชัน (translocation) คือ การแลกเปลี่ยนชิ้นส่วนกันของโครโมโซมที่ไม่ใช่คู่เหมือน



ภาพที่ 6.1 การผันแปรโครงสร้างของโครโมโซมแบบต่าง ๆ

(ที่มา : http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/bv.fcgi?rid=mga.figgrp.1213)

เดฟิเชียนซี (deficiency) หรือ ดีลีชัน (deletion)

คือ การที่โครโมโซมส่วนใดส่วนหนึ่งขาดหายไป รวมถึงทีโลเซนทริกซึ่งมีแขนข้างเดียวส่วนอีกข้างหนึ่งสั้นมากจนมองไม่เห็นจึงจัดว่าเป็นส่วนที่ขาดหายไป จำแนกเดฟิเชียนซีตามตำแหน่งที่เกิดขึ้นได้ 2 พวก ดังนี้

1. อินเทอร์คาลารี เดฟิเชียนซี (intercalary deficiency) หมายถึงส่วนที่ขาดหายไปไม่ใช่ส่วนปลายของโครโมโซม จะเห็นการเกิดลูป (loop) ในระยะแพไคนีมา

2. เทอร์มินอล เดฟิเชียนซี (terminal deficiency) หมายถึงส่วนที่ขาดหายไปอยู่ช่วงปลายของโครโมโซม จะเห็นโครโมโซมมีส่วนปลายสั้นกว่าโครโมโซมปกติ

การสังเกตว่ามีเดฟิเชียนซีเกิดขึ้น

1. เกิดไมโครนิวคลีไอ (micronuclei) คือ ส่วนของโครโมโซมที่ขาดมารวมตัวกันเกิดเป็นนิวเคลียสเล็กๆ อยู่ในไซโทพลาสซึม ติดสีได้

2. เกิดลูปในระยะแพไคนีมา

3. เกิดซูโด โดมิแนนซ์ (pseudo dominance) คือ การที่ยีนแฝงสามารถแสดงลักษณะได้เพราะยีนที่เป็นคู่กันหายไป

4. มีส่วนของโครโมโซมเกิดดูพลิเคชัน (duplication) และทราบว่าส่วนใดที่ใช้ทดแทนส่วนที่ขาดหายไปได้

5. พบโครโมโซมวงแหวนปลายปิดขนาดต่างๆ

ผลที่เกิดจากเดฟิเชียนซี

1. หากส่วนที่ขาดหายไปมีขนาดใหญ่หรือยีนที่ควบคุมลักษณะสำคัญต่อการดำรงชีวิตขาดหายไปอาจเกิดการตาย (lethal effect)

2. ยีนที่อยู่ชิดบริเวณเดฟิเชียนซีมีโอกาสเกิดครอสซิงโอเวอร์เพิ่มขึ้น

3. เกิดสภาพเฮมิไซกัส (hemizygous) เมื่อยีนที่อยู่บนโครโมโซมขาดหายไปจึงเป็นโอกาสให้ยีนแฝงที่อยู่บนโครโมโซมปกติได้แสดงลักษณะอย่างเต็มที่

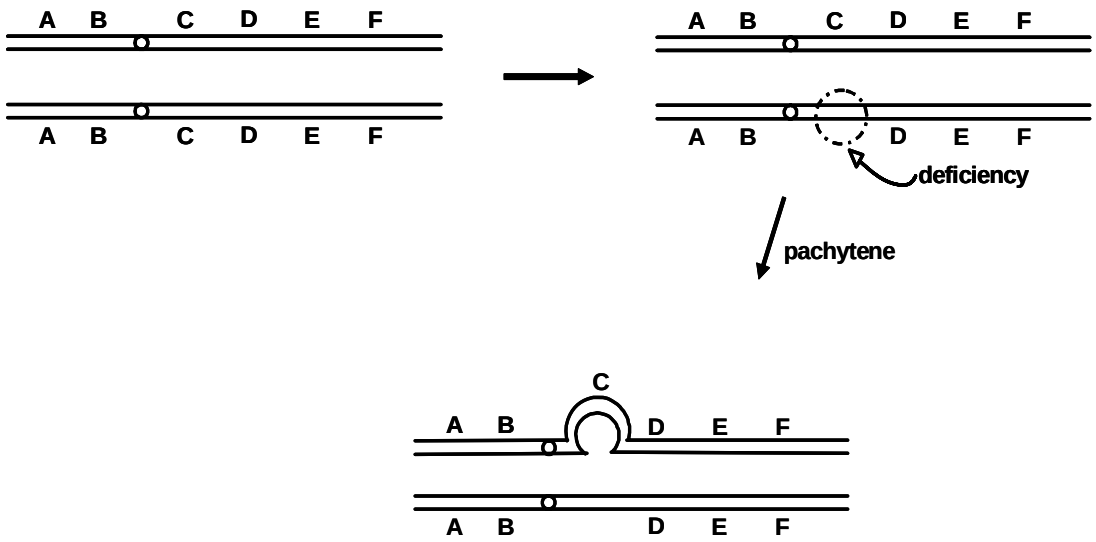
ประโยชน์ของเดฟิเชียนซี

1. ใช้ในการบอกตำแหน่งของยีนแฝงในพืช เช่น ข้าวโพด มะเขือเทศ

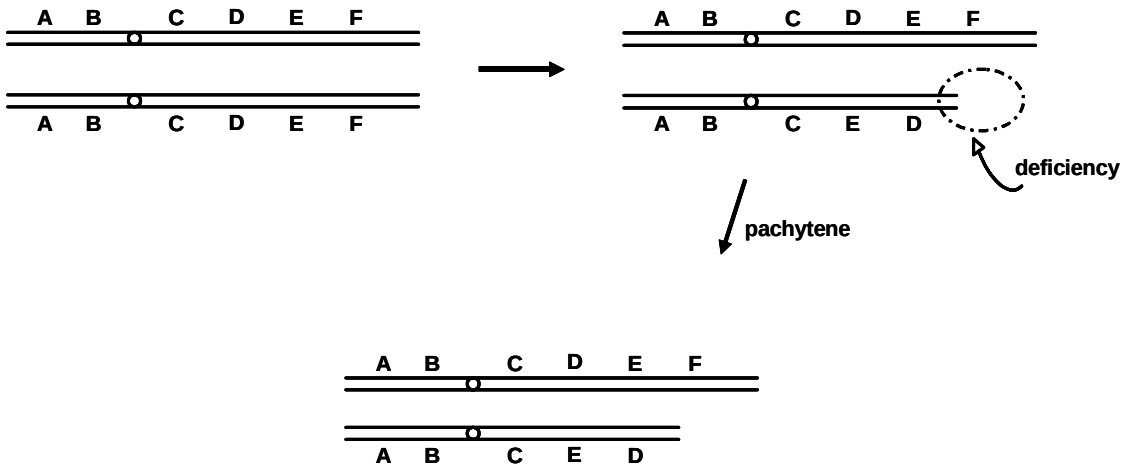
2. ใช้ในการศึกษาวิวัฒนาการของพืช เช่น ในสกุล Crepis

วิวัฒนาการกับเดฟิเชียนซี

โดยทั่วไปการเกิดเดฟิเชียนซีจัดว่าเป็นโครโมโซมที่มีมิวเทชันแต่มักไม่ค่อยมีผลต่อวิวัฒนาการเพราะโฮโมไซกัส เดฟิเชียนซี (homozygous deficiency) มักเกิดการตายเสมอ แต่สำหรับในพืชสกุล Crepis การมีโครโมโซมลดลงเนื่องจากเดฟิเชียนซีมักเป็นการขาดหายในส่วนเฮเทอโรโครมาทินที่อยู่ใกล้กับเซนโทเมียร์ซึ่งมีความเสียหายน้อยกว่าการขาดหายของส่วนยูโครมาทินจึงมีโอกาสเกิดสิ่งมีชีวิตใหม่ๆ ขึ้นได้



ภาพที่ 6.2 การเข้าคู่และการเกิดลูปของโครโมโซมเมื่อเกิดอินเทอร์คาลารี เดฟิเชียนซี



ภาพที่ 6.3 การเข้าคู่โครโมโซมเมื่อเกิดเทอร์มินอล เดฟิเชียนซี

ดูพลิเคชัน (duplication)

คือ การที่มีส่วนใดส่วนหนึ่งของโครโมโซมเพิ่มขึ้นมา จำแนกตามตำแหน่งที่มีชิ้นส่วนของโครโมโซมเพิ่มขึ้นมาได้ 5 แบบ ดังนี้

1. แทนเดม ดูพลิเคชัน (tandem duplication) คือการที่ชิ้นส่วนเพิ่มขึ้นแทรกตรงตำแหน่งเดิมและมีลำดับของยีนเหมือนกับที่มีอยู่เดิม เช่น

ABCDE**CDE .** FG

2. รีเวอร์สแทนเดม ดูพลิเคชัน (reverse tandem duplication) คือการที่ชิ้นส่วนเพิ่มขึ้นตรงตำแหน่งเดิมแต่มีลำดับสลับกับยีนเดิม เช่น

ABCDE**EDC .** FG

3. ดีสเพลสดูพลิเคชัน (displace duplication) คือการมีชิ้นส่วนเพิ่มขึ้นมาอยู่บนแขนข้างเดียวกับที่มียีนนั้นอยู่ (homobrichial displacement) เช่น

A**CDE**BCDE **.** FG

ชิ้นส่วนที่เพิ่มขึ้นอยู่บนแขนคนละข้างกับที่มียีนนั้นอยู่ (heterobrichial displacement) เช่น

ABCDE **.** FG**CDE**

4. ทรานส์โพซิชัน ดูพลิเคชัน (transposition duplication) คือการมีชิ้นส่วนเพิ่มขึ้นอยู่บนแขนข้างใดก็ได้และเป็นชิ้นส่วนที่มาจากโครโมโซมใดๆ ก็ได้ที่ไม่ใช่คู่กัน เช่น

JK**CDE .** LMNO

การสังเกตว่ามีดูพลิเคชันเกิดขึ้น

1. การเกิดลูปจากชิ้นส่วนโครโมโซมที่ไม่มีคู่ในระยะแพไคนีมา

2. จะพบบริดจ์ (bridge) ในระยะแอนาเฟส I และคลอสซิงโอเวอร์ทำให้เกิดบริดจ์ในระยะแอนาเฟส II รวมทั้งการเกิดไดเซนทริกโครโมโซมซึ่งเป็นผลจากการแยกเข้าสู่ขั้วทั้งสองของบริดจ์ในระยะแอนาเฟส I

ผลจากการเกิดดูพลิเคชัน

1. โพซิชันเอฟเฟก (position effect) เป็นผลจากการแสดงออกของยีนที่อาจกล่าวว่าการแสดงออกของยีนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโครโมโซมที่เปลี่ยนแปลงไป

2. วัฏจักรบริดจ์เบรกฟิวชัน (bridge-break-fusion cycle) และโครโมโซมวงแหวนทำให้เกิดทั้งดูพลิเคชันและเดฟิเชียนซีเป็นวัฏจักรอย่างต่อเนื่อง มี 2 ชนิด ได้แก่

2.1 โครโมโซมไทป์ (chromosome type) โครโมโซมวงแหวนจำลองตัวเองได้ 2 วง เกิดการแลกเปลี่ยนชิ้นส่วนโครโมโซมระหว่างซิสเทอร์โครมาทิดได้เป็นโครโมโซมที่มี 2 เซนโทรเมียร์ ในระยะแอนาเฟส I เรียกว่าไดเซนทริกโครโมโซมมีขนาดเพิ่มขึ้นอีกเท่าตัว แต่ละเซนโทรเมียร์ถูกดึงไปที่แต่ละขั้วของเซลล์มีสภาพคล้ายสะพานเชื่อมเรียกว่าไดเซนทริกบริดจ์ (dicentric bridge) แล้วขาดออกจากกันซึ่งการขาดของโครโมโซมอาจจะเท่าหรือไม่เท่ากันก็ได้ ต่อจากนั้นในระยะทีโลเฟส I จะเกิดการเชื่อมปลายทั้งสองได้เป็นวงแหวนปลายปิดขนาดต่าง ๆ กันเป็นวัฏจักรบริดจ์เบรกฟิวชันอย่างต่อเนื่องไม่จำกัด

2.2 โครมาทิดไทป์ (chromatid type) โครโมโซมที่เป็นวงแหวนมี 2 เซนโทรเมียร์จะขาดออกจากกันในระยะแอนาเฟสและเกิดการเชื่อมของปลายที่ขาดในระยะโพรเฟสของการแบ่งเซลล์ครั้งต่อไป ทำให้เกิดโครโมโซมที่เป็นวงมี 2 เซนโทรเมียร์

อีกและจะเป็นเช่นนี้เสมอในไมโทซีสของแกมีโทไฟต์ ยกเว้นกรณีที่เกิดการสูญเสียชิ้นส่วนของโครโมโซมขนาดใหญ่มากทำให้เซลล์แฮพลอยด์ตายได้ นอกจากนี้ยังพบได้ในนิวเคลียสของไข่และการแบ่งไมโทซีสของเอนโดเสปิร์ม เมื่อโครโมโซมที่เป็นวงมี 2 เซนโทรเมียร์เข้าไปในเนื้อเยื่อที่เป็นสปอโรไฟต์โดยผ่านทางไข่หรือเสปิร์มแล้วปลายที่ขาดออกจากกันเกิดการเชื่อมกันวัฏจักรนี้จะหยุดเนื่องจากโครโมโซมมีความคงตัวมากขึ้น

ผลที่เกิดจากดูพลิเคชันและการนำไปใช้

1. มีผลต่อการเกิดครอสซิงโอเวอร์และการเข้าคู่กันของโฮโมโลกัสโครโมโซมคล้ายกับในเดฟิเชียนซี

2. ใช้ในการตรึงเฮเทอโรซีสที่มียีนเดียวควบคุมลักษณะนั้นซึ่งลูก F1 จะไม่คงที่ ถ้าต้องการตรึงลักษณะเฮเทอโรซีสทำได้โดยการเพิ่มยีน เช่น

(VV) ข้าวบาเลย์ 2 แถว X ข้าวบาเลย์ 6 แถว (vv)

↓

F1 ข้าวบาเลย์มากกว่า 6 แถว (Vv)

↓

VVvv

3. ใช้ในการตรึงสภาพที่เป็นโฮโมไซกัสของยีนแฝง เช่น ในข้าวโพด ยีน def (deficiency) และ Dp (duplication) ถ้ามีจีโนไทป์ def/def พืชไม่สามารถสร้างคลอโรฟิลด์ได้จะเกิดการตาย (lethal) แต่ถ้ามียีนเพิ่มขึ้นมาเป็น def/def/Dp จะสร้างคลอโรฟิลด์ได้ แสดงให้เห็นว่าถ้ายีนแฝงที่ทำให้เกิดการตายอยู่ในสภาพโฮโมไซกัสพืชจะยังสามารถมีชีวิตอยู่ได้หากมีสมดุลของยีนในสภาพดูพลิเคชัน กล่าวได้ว่าสามารถใช้ดูพลิเคชันเพื่อศึกษารีคอมบิเนชันระหว่างยีนแฝงที่ทำให้เกิดการตายได้

วิวัฒนาการกับดูพลิเคชัน

การเกิดดูพลิเคชันเป็นความผันแปรที่มีความสำคัญต่อวิวัฒนาการเนื่องจากการที่สิ่งมีชีวิตมีบางส่วนของโครโมโซมเพิ่มขึ้นจากปกติมักสามารถอยู่รอดได้มากกว่าการขาดหายไปของชิ้นส่วนโครโมโซม นอกจากนี้การมีชิ้นส่วนโครโมโซมเพิ่มขึ้นยังเป็นวิธีหนึ่งที่จะได้ยีนใหม่ๆ ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงโดยผ่านกระบวนการมิวเทชันและต่อมาทำหน้าที่แตกต่างกันไปซึ่งอาจจะเป็นได้ทั้งลักษณะที่ดีและไม่ดี ซึ่งหากลักษณะที่ไม่ดีเหล่านั้นมีการปรับตัวได้ก็อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆ จนกว่าจะได้ลักษณะที่ดี การเพิ่มจำนวนยีนที่ละเล็กละน้อยเช่นนี้เป็นผลให้สิ่งมีชีวิตเปลี่ยนแปลงไปจากบรรพบุรุษเกิดเป็นสิ่งมีชีวิตชนิดใหม่ขึ้นได้

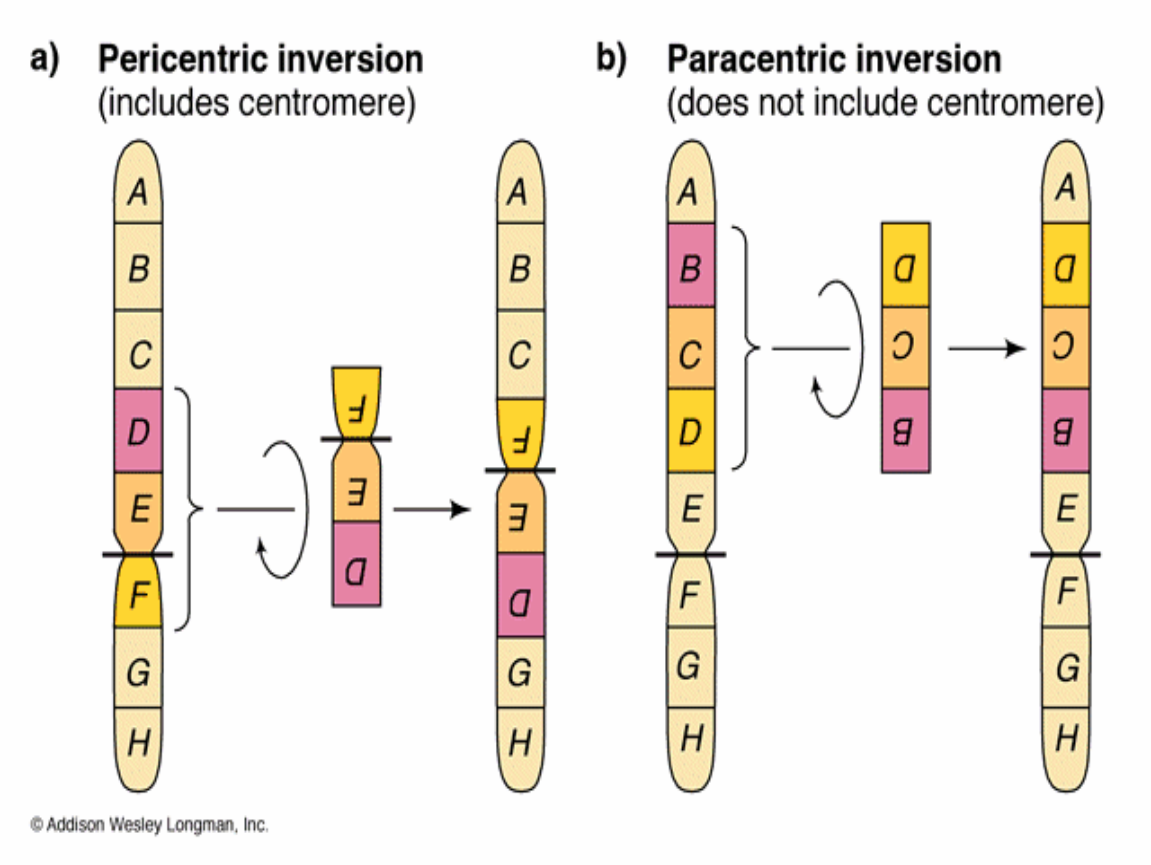
อินเวอร์ชัน (Inversion)

คือ การสลับตำแหน่งของยีนบนโครโมโซม เป็นกระบวนการที่เกิดอย่างแพร่หลายและเกิดได้ตามปกติทั่วๆ ไปในกระบวนการวิวัฒนาการ จัดว่าอินเวอร์ชันมีบทบาทต่อวิวัฒนาการมากกว่าการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแบบอื่นๆ เนื่องจากชิ้นส่วนของโครโมโซมยังคงอยู่ครบเท่าเดิม

จำแนกตามตำแหน่งที่เกิด เป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. พาราเซนทริกอินเวอร์ชัน (paracentric inversion) คือ ตำแหน่งที่เกิดไม่เกี่ยวข้องกับเซนโทรเมียร์ เซลล์สืบพันธุ์ที่ได้หลังเกิดครอสซิงโอเวอร์จะได้ทั้งโครโมโซมที่มี 2 เซนโทรเมียร์ โครโมโซมที่ไม่มีเซนโทรเมียร์และชิ้นส่วนโครโมโซมที่ไม่ทำหน้าที่

2. เพอริเซนทริกอินเวอร์ชัน (pericentric inversion) คือ ตำแหน่งของการเกิดอินเวอร์ชันมีส่วนของเซนโทรเมียร์มาเกี่ยวข้องด้วย เซลล์สืบพันธุ์ที่ได้หลังการเกิดครอสซิงโอเวอร์จะไม่พบโครโมโซมที่มี 2 เซนโทรเมียร์



ภาพที่ 6.4 การเกิดเพอริเซนทริกอินเวอร์ชันและพาราเซนทริกอินเวอร์ชัน

(ที่มา : http://amscampus.cib.unibo.it/archive/00001304/01/11_mutazioni_cromosomiche.)

ในระยะที่มีการเข้าคู่กันถ้าลำดับของยีนเหมือนกันทุกประการจะเกิดการเข้าคู่ตามความยาวของโครโมโซมจุดต่อจุด (synapsis) แต่ถ้าโครโมโซมเป็นเฮเทอโรไซกัสที่เกิดจากอินเวอร์ชันอาจจะเกิดพฤติกรรมการเข้าคู่ได้ 3 แบบ ดังนี้

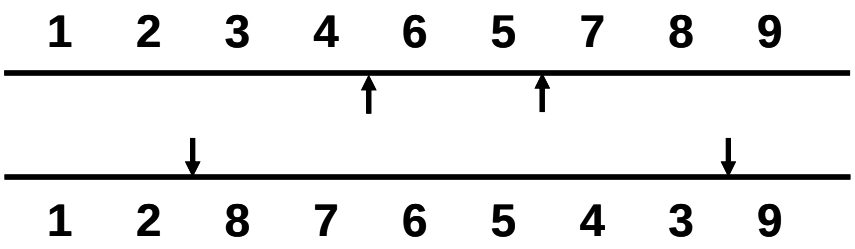
1. ช่วงของโครโมโซมที่มีการเกิดอินเวอร์ชันยีนจะไม่เข้าใกล้กันพบใน 20 เปอร์เซ็นต์ ของพอลเลน มาเธอร์เซลล์ (pollen mother cell;PMC) เรียกว่ากระบวนการแพร์ริ่ง เฟเลอร์ (pairing failure)

2. ช่วงของโครโมโซมที่เกิดอินเวอร์ชันมีบางช่วงที่ยีนมาเข้าคู่กันได้บางจุดพบ 45 เปอร์เซ็นต์ ของ PMC เรียกว่ากระบวนการรอด แพร์ริ่ง (rod pairing)

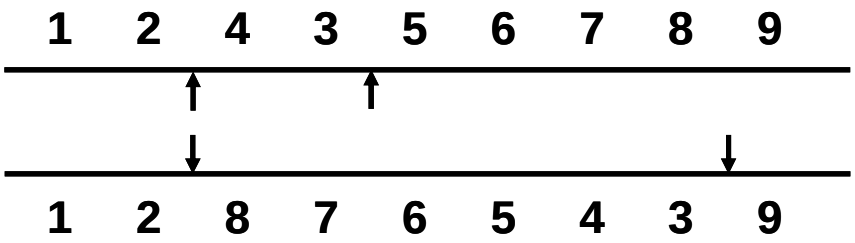
3. ช่วงของโครโมโซมที่เกิดอินเวอร์ชันจะมีการเข้าคู่แบบยีนต่อยีนแต่เกิดในทิศตรงข้ามจะสร้างเป็นลูปขึ้นเรียกว่ารีเวอร์ส ซินแนพซีส (reverse synapsis) พบ 33 เปอร์เซ็นต์ ของ PMC

อินเวอร์ชันนอกจากจะเกิดหนึ่งตำแหน่ง ยังเกิดได้หลายตำแหน่งพร้อมๆ กัน เรียกว่ามัลติเปิลอินเวอร์ชัน (multiple inversion) จำแนกเป็น 4 แบบ ดังนี้

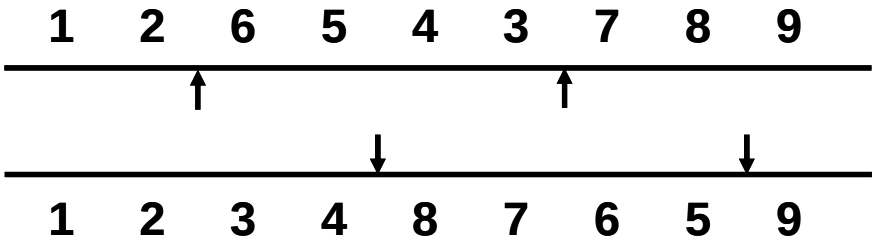
1. อินคลูด อินเวอร์ชัน I (Included inversion I) คือ การเกิดอินเวอร์ชันที่มีบริเวณหนึ่งครอบคลุมอินเวอร์ชันของอีกโครโมโซมหนึ่ง



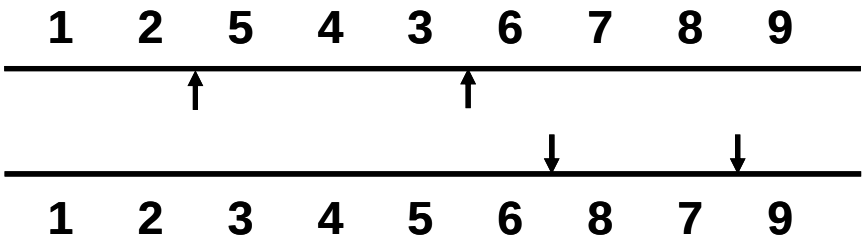
2. อินคลูด อินเวอร์ชัน II (Include inversion II) คือ การเกิดอินเวอร์ชันของต่างโครโมโซมที่มีจุดเริ่มต้นของการหักร่วมกัน



3. โอเวอร์แลปปิง อินเวอร์ชัน (Overlapping inversion) คือ การเกิดอินเวอร์ชันบนโครโมโซมทั้งสองที่มีส่วนหนึ่งซ้อนทับกัน

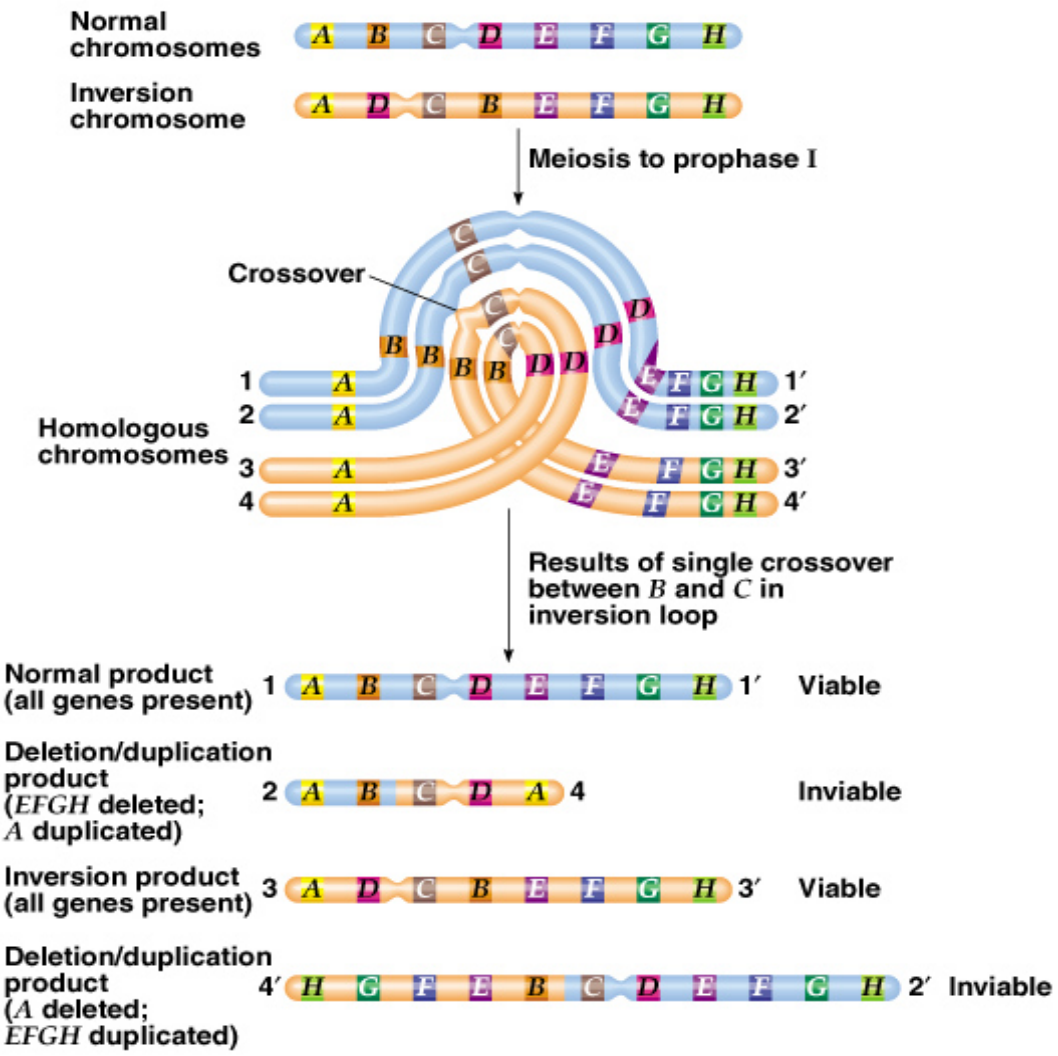


4. เอจาเซนต์ อินเวอร์ชัน (Adjacent inversion) คือ การเกิดอินเวอร์ชันบนโครโมโซมทั้งสองที่มีตำแหน่งต่อเนื่องกัน



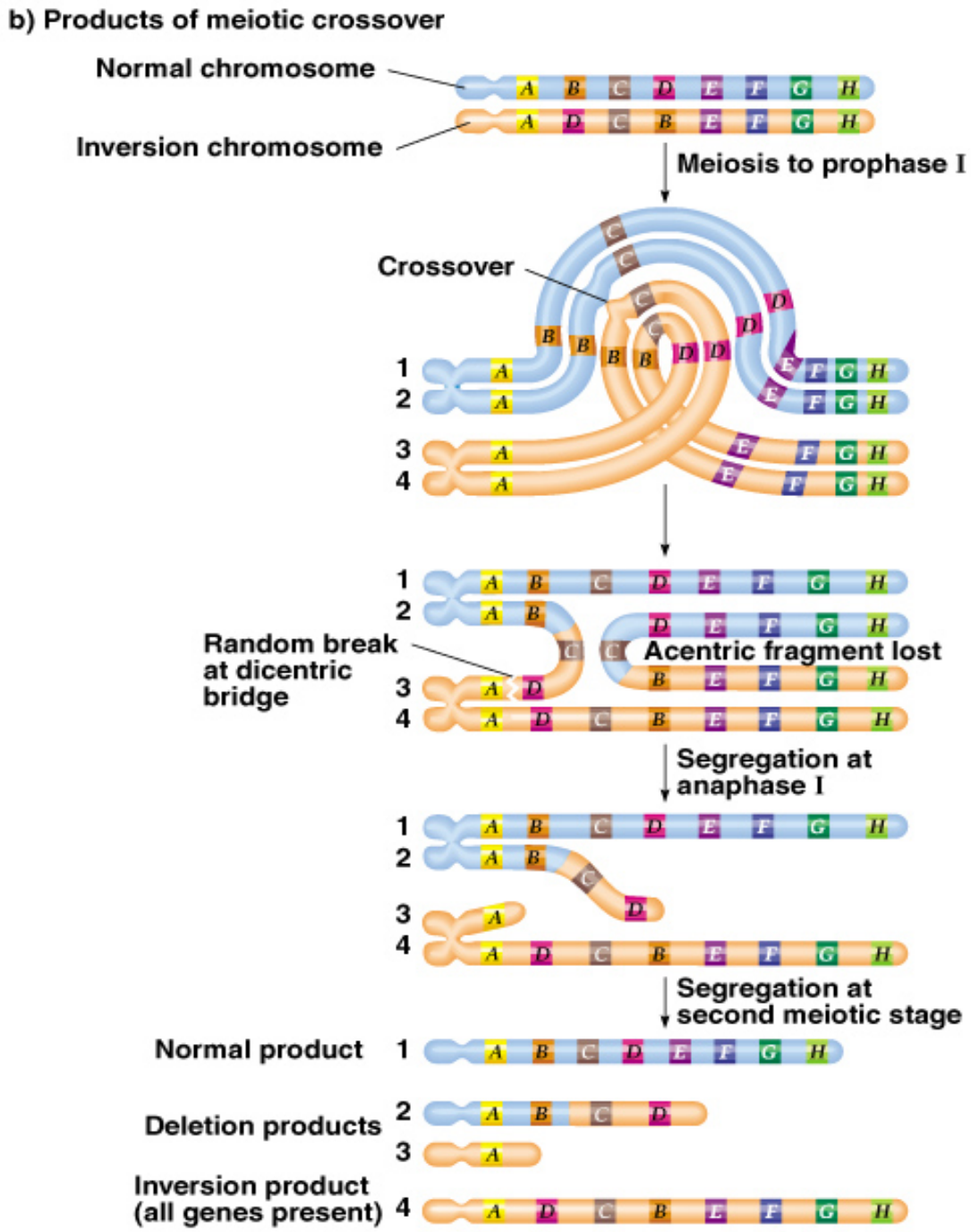
การตรวจสอบอินเวอร์ชัน

1. การเกิดลูปในระยะแพไคนีมา ส่วนที่เห็นเป็นลูปคือ ส่วนที่เกิดอินเวอร์ชัน ซึ่งไม่สามารถเข้าคู่กับโครโมโซมได้ตามปกติจึงเกิดเป็นลูปขึ้น



ภาพที่ 6.5 การเกิดลูปของเพอริเซนทริก อินเวอร์ชัน

(ที่มา : http://amscampus.cib.unibo.it/archive/00001304/01/11_mutazioni_cromosomiche)



ภาพที่ 6.6 การเกิดลูปของพาราเซนทริก อินเวอร์ชัน

(ที่มา : http://amscampus.cib.unibo.it/archive/00001304/01/11_mutazioni_cromosomiche)

2. ความสัมพันธ์ของลิงเกจ (linkage) จะมีการเปลี่ยนแปลง เช่น

A B C D E ⟶ A B **D C** E

เมื่อเกิดอินเวอร์ชัน (inversion) แล้วยีน C จะอยู่ห่างจากยีน B มากกว่าเดิมจึงมีโอกาสเกิดครอสซิงโอเวอร์ ระหว่าง B กับ C มากขึ้น

3. การเกิดโครโมโซมที่มี 2 เซนโทรเมียร์ และชิ้นส่วนที่ไม่มีเซนโทรเมียร์ของพาราเซนทริก อินเวอร์ชัน

4. เซลล์สืบพันธุ์ที่ได้จากการเกิดครอสซิงโอเวอร์ภายในลูปไม่สามารถทำหน้าที่ได้

5. ยับยั้งการเกิดครอสซิงโอเวอร์ (crossover suppressor) เนื่องจากเมื่อเกิดครอสซิงโอเวอร์ 1 ตำแหน่ง ภายในลูปของเฮเทอโรไซกัสอินเวอร์ชันผลจากการแบ่งเซลล์แบบไมโอซีสจะได้เซลล์สืบพันธุ์ 4 เซลล์ ซึ่งใช้ผสมพันธุ์ไม่ได้ 2 เซลล์เพราะมาจากโครมาทิด 2 สาย ที่เกิดครอสซิงโอเวอร์ ดังนั้นจึงไม่มีลูกจากเซลล์สืบพันธุ์ประเภทนี้

6. ยีนในช่วงที่มีการเกิดอินเวอร์ชันจะทำหน้าที่เป็นเสมือนเป็นยีนเพียงยีนเดียว (block of genes) โดยจะมีการแยกของยีนทั้งกลุ่มในเซลล์สืบพันธุ์เดียวกันเสมอ

วิวัฒนาการกับอินเวอร์ชัน

อินเวอร์ชันเป็นสาเหตุให้เกิดการลดหรือจำกัดการเกิดครอสซิงโอเวอร์โดยเก็บรักษาส่วนของโครโมโซมที่เกิดอินเวอร์ชันนั้นไว้ซึ่งมีความยาวแตกต่างกันไปโดยส่วนที่ยาวมักจะแตกหักจากรีคอมบิเนชันจึงอาจสูญเสียส่วนที่มีคุณค่าต่อการดำรงชีวิตไปในขณะที่ส่วนสั้นอาจมียีนไม่เพียงพอต่อปัจจัยการคัดเลือกต่าง ๆ ที่จะทำให้เกิดมิวเทชันสำหรับช่วงความยาวของโครโมโซมที่พอเหมาะจะสามารถผ่านการคัดเลือกตามการเปลี่ยนแปลงสภาพนิเวศวิทยาที่แตกต่างกันไปได้

ในธรรมชาติพาราเซนทริก อินเวอร์ชันมีโอกาสเกิดได้บ่อยกว่าเพอริเซนทริก อินเวอร์ชันและมีการกระจายไม่เป็นแบบสุ่มโดยยีนช่วงที่เกิดพาราเซนทริก อินเวอร์ชันจะทำหน้าที่เสมือนเป็นยีนเดียวสามารถแสดงออกในกระบวนการวิวัฒนาการได้รวดเร็วมากกว่ายีนที่เกิดจากรีคอมบิเนชัน

ทรานสโลเคชัน (Translocation)

คือ การแลกเปลี่ยนชิ้นส่วนระหว่าง 2 โครโมโซมขึ้นไปที่ไม่ใช่โฮโมโลกัสโครโมโซม ถ้าเปรียบเทียบการแลกเปลี่ยนชิ้นส่วนของโฮโมโลกัสโครโมโซมที่เกิดขึ้นระหว่างโครโมโซมที่ไม่ใช่คู่เหมือน (non-sisterchromatid) กับ ทรานสโลเคชัน จะแยกให้เห็นความแตกต่างได้ดังนี้

ตารางที่ 6.1 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างครอสซิงโอเวอร์และทรานสโลเคชัน

ครอสซิงโอเวอร์	ทรานสโลเคชัน
1.เกิดขึ้นระหว่างโครโมโซมที่มาเข้าคู่อย่างแม่นยำ 2.ปริมาณของโครมาทินที่มาแลกเปลี่ยนเท่ากัน 3.ต้องมีเอนไซม์เป็นตัวช่วย เช่น ไลเกส	1.เกิดขึ้นระหว่างโครโมโซมที่ไม่สามารถเข้าคู่กันได้อย่างน้อย 2 โครโมโซม 2.ปริมาณโครมาทินที่แลกเปลี่ยนอาจเท่าหรือไม่เท่าก็ได้ 3.เกิดจากสารเคมี รังสี หรือสารที่มีการแตกตัวได้

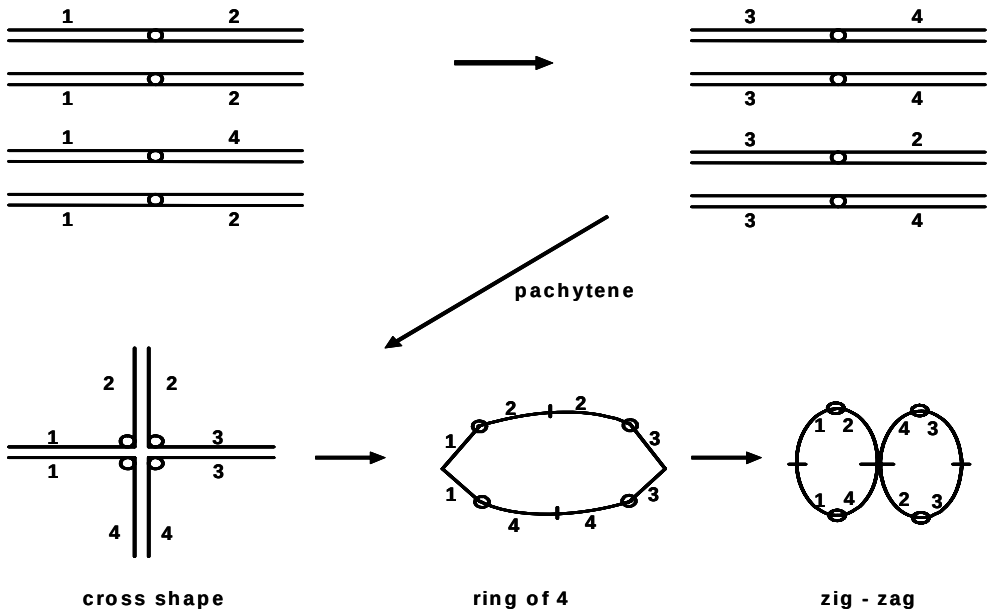
ทรานสโลเคชันจำแนกได้เป็น 2 ชนิด ดังนี้

1. ซิมเปิลทรานสโลเคชัน (simple translocation) คือ การที่ชิ้นส่วนของโครโมโซมหนึ่งย้ายไปเกาะติดกับอีกโครโมโซมหนึ่งเพียงฝ่ายเดียว

2. รีซิโปรคอล ทรานสโลเคชัน (reciprocal translocation) คือ การสลับชิ้นส่วนระหว่างโครโมโซม 2 คู่ แบ่งเป็น 2 ชนิด ดังนี้

2.1 โฮโมไซกัสรีซิโปรคอลทรานสโลเคชัน (homozygous reciprocal translocation) คือ โครโมโซมเหมือนกันทั้ง 2 โครโมโซมมีการแลกเปลี่ยนชิ้นส่วนกับอีก 2 โครโมโซมที่เหมือนกันเป็นผลให้โครโมโซมมีการแลกเปลี่ยนชิ้นส่วนซึ่งกันและกันเข้าคู่กันได้ตามปกติในระยะแพไคนีมา

2.2 เฮเทอโรไซกัสรีซิโปรคอลทรานสโลเคชัน (heterozygous reciprocal translocation) คือ โครโมโซมหนึ่งมีการแลกเปลี่ยนกับอีกโครโมโซมหนึ่งที่ไม่ใช่คู่กัน ผลที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนจะได้โครโมโซมสภาพเฮเทอโรไซกัส เมื่อโครโมโซมมีการเข้าคู่กันได้เป็นรูปกากบาท (cross shape configuration) แล้วเปลี่ยนเป็นรูปวงแหวน (ring configuration) หรือรูปซิกแซก (zig-zag configuration) หรือรูปเลขแปดซึ่งจะเห็นได้ชัดในระยะเมทาเฟส



ภาพที่ 6.7 การเข้าคู่กันของโครโมโซมเมื่อเกิดเฮเทอโรไซกัสรีซิโปรคอลทรานสโลเคชัน (ดัดแปลงจาก นิตย์ศรี, 2542)

จากการจัดเรียงตัวดังกล่าวโครโมโซมจะถูกดึงไปที่ขั้วทั้ง 2 ของเซลล์ มีโอกาสแยกตัวได้ 3 แบบ ดังนี้

1. แอดจาเซนท์-I เซกรีเกชัน (adjacent-I segregation) โครโมโซมที่มีการจัดเรียงตัวแบบวงแหวน โครโมโซมที่ไม่ใช่คู่กันจะถูกดึงไปยังขั้วเดียวกัน เซลล์สืบพันธุ์ที่ได้ทั้งหมดไม่ทำหน้าที่

2. แอดจาเซนท์-II เซกรีเกชัน (adjacent II segregation) โครโมโซมที่มีการจัดเรียงตัวแบบวงแหวนที่เป็นคู่กันถูกดึงไปยังขั้วเดียวกัน เซลล์สืบพันธุ์ทั้งหมดไม่ทำหน้าที่

3. อัลเทอร์เนท เซกรีเกชัน (alternate segregation) โครโมโซมที่จัดเรียงตัวในรูปซิกแซกจะถูกดึงไปยังขั้วทั้งสองเกิดได้แบบเดียวเท่านั้น เซลล์สืบพันธุ์ทั้งหมดทำหน้าที่ได้

การเกิดเฮเทอโรไซกัสรีซิโปรคอลทรานสโลเคชันจะมีโอกาสสร้างเซลล์สืบพันธุ์ที่มีความสมบูรณ์พันธุ์เพียง 50 เปอร์เซ็นต์ เรียกว่า เซมิ ซเทริลิตี้ (semi – sterility) เป็นลักษณะสำคัญของ ทรานสโลเคชัน

ทรานสโลเคชันอาจเกิดได้มากกว่า 1 ตำแหน่ง เรียกว่าทรานสโลเคชันคอมเพล็กซ์ (translocation complex) จะพบว่าทำให้เกิดเป็นรูปวงแหวนที่มีขนาดต่างๆ กัน เช่น ว่านกาบหอย (*Rhoeo discolor*) จะเป็นวงของ 12 คือ มีการจัดเรียงโครโมโซมที่เป็นวงปลายปิดประกอบด้วย 12 โครโมโซมในระยะแพไคนีมา

การตรวจสอบทรานสโลเคชัน

1. สังเกตการเข้าคู่ของโครโมโซมในระยะแพไคนีมาจะเห็นเป็นรูปกากบาท

2. ตรวจสอบโดยใช้การทดสอบลิงเกจ

3. โดยการสังเกตลักษณะเซมิ ซเทริลิตี้ที่เกิดขึ้น

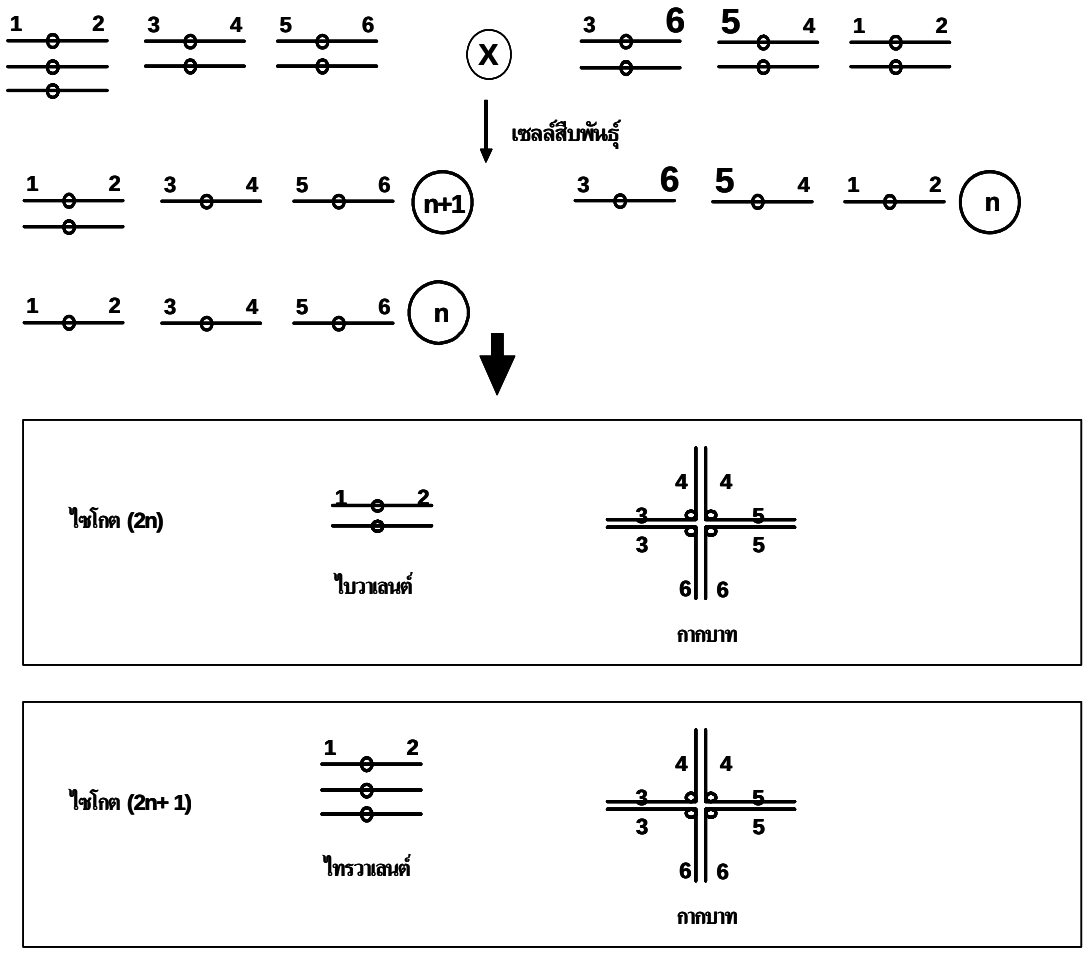
นอกจากนี้ยังสามารถตรวจสอบทรานสโลเคชันได้โดยวิธีการอื่นๆ เช่น ไทรโซมิก ซึ่งนิยมใช้ในพวกธัญพืช โดยเฉพาะข้าวฟ่างสามารถเลือกใช้ได้ 2 วิธี ดังนี้

1. ไทรโซมิกที่ใช้ตรวจสอบไม่เป็นโครโมโซมที่เกิดทรานสโลเคชัน

2. ไทรโซมิกที่ใช้ตรวจสอบเป็นโครโมโซมที่เกิดทรานสโลเคชัน

1. ไทรโซมิกที่ไม่เป็นทรานสโลเคชัน

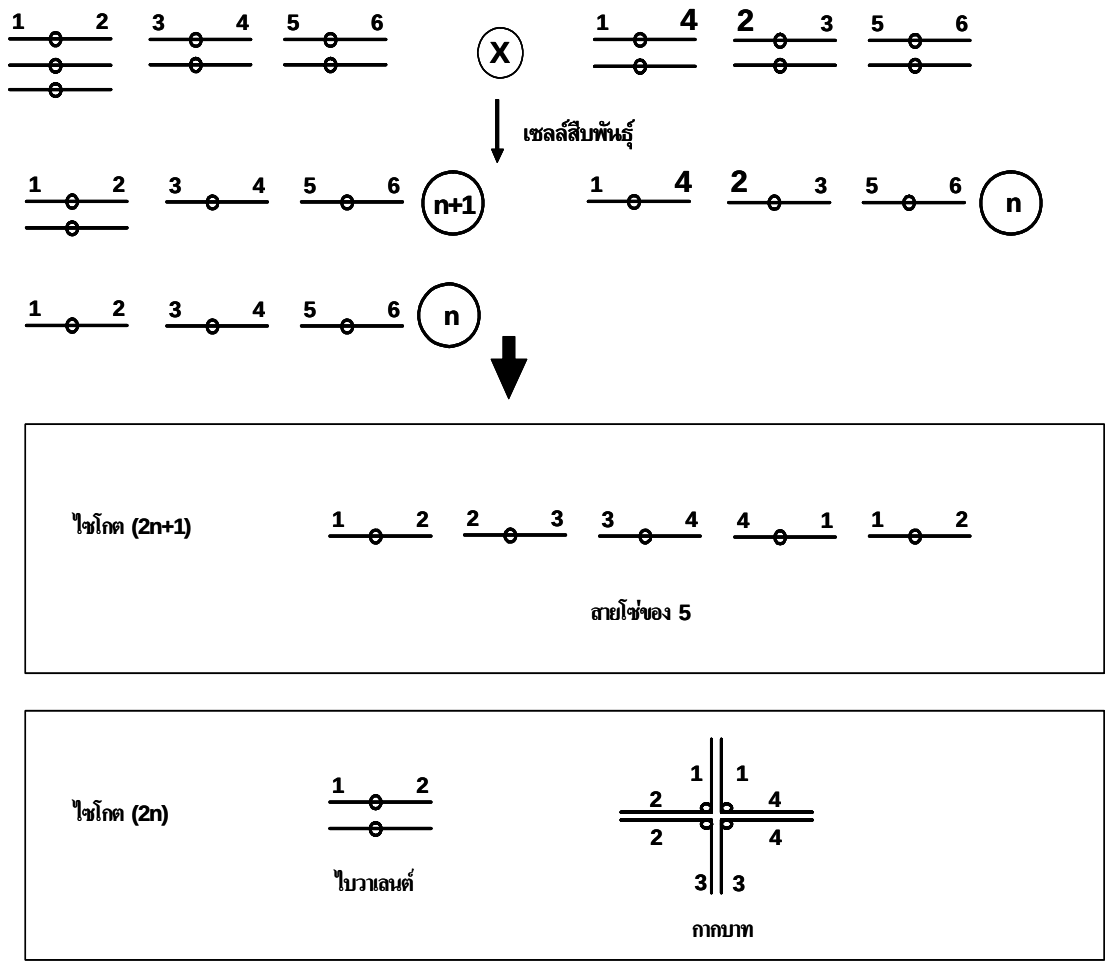
โครโมโซมที่เป็นไทรโซมิกมีการจัดเรียงตัวเป็นไบวาเลนต์หรือไทรวาเลนต์ ส่วนโครโมโซมที่เกิดทรานสโลเคชันมีการจัดเรียงตัวรูปกากบาทหรือวงของ 4 (ring of 4) ดังนี้



ภาพที่ 6.8 การใช้ไทรโซมิกในการตรวจหาทรานสโลเคชันเมื่อไทรโซมิกไม่ใช่โครโมโซมที่เกิดทรานสโลเคชัน (ดัดแปลงจาก นิตย์ศรี, 2542)

2. ไทรโซมิกที่เป็นทรานสโลเคชัน

การเกิดทรานสโลเคชันบนโครโมโซมเดียวกับที่เป็นไทรโซมิก จะได้รูปสายโซ่ของ 5 (chain of 5) แทนการเกิดวงของ 4 ในไซโกตที่เป็น 2n + 1 ดังนี้



ภาพที่ 6.9 การใช้ไทรโซมิกในการตรวจหาทรานสโลเคชันเมื่อไทรโซมิกเป็นโครโมโซมที่เกิดทรานสโลเคชัน (ดัดแปลงจาก นิตย์ศรี, 2542)

การนำทรานสโลเคชันไปใช้ประโยชน์

สามารถนำไปใช้ร่วมกับเทคนิคการปรับปรุงพันธุ์ เช่น องุ่นในแคลิฟอร์เนีย ซึ่งมีคุณสมบัติดีแต่ขนาดผลเล็กจึงทำให้ผลองุ่นเป็นหมันจากทรานสโลเคชันจำนวนผลจะลดลง ทำให้ได้ผลที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

วิวัฒนาการกับทรานสโลเคชัน

การเกิดทรานสโลเคชันจะมีบทบาทต่อการเกิดพืชชนิดใหม่ๆ ในพืชพวกที่มีวัฏจักรชีวิตยาวๆ เช่น ลำโพง ว่านกาบหอย และโบตั๋น เป็นต้น ในการเกิดทรานสโลเคชันจะทำให้เกิดการลดลงของกลุ่มลิงเกจ เช่น เดิม 2n = 10 จะมีกลุ่มลิงเกจอยู่ 5 กลุ่ม เมื่อเกิดทรานสโลเคชันจะเหลือกลุ่มลิงเกจ 4 กลุ่ม

นอกจากนี้ทรานสโลเคชันยังทำให้เกิดสิ่งมีชีวิตชนิดใหม่ เช่น ในกรณีของ *Crepsis fulignosa* เกิดจากกระบวนการที่เรียกว่า dysploid decrease หรือ "aneuploid decrease" คือโครโมโซมที่มียีนไม่สำคัญสูญหายไป จำนวนโครโมโซมลดลง เช่น เกิด translocation จากโครโมโซม C ไปติดกับ B ทำให้เกิดโครโมโซม B ที่มีส่วนของ C อยู่ด้วย (Bc) ดังนี้

AABBCCDD ⟶ AABcBcDD

จาก *Crepis neglecta* (n = 4) จะได้เป็น *C. fuliginosa* (n = 3)

การผันแปรเกี่ยวกับจำนวนโครโมโซม

การผันแปรของโครโมโซมด้านจำนวนจำแนกเป็น 2 แบบ คือ ยูพลอยดี (euploidy) เป็นการเพิ่มหรือลดของจำนวนโครโมโซมแบบเป็นชุดและอนิวพลอยดี (aneuploidy) คือ การที่มีจำนวนโครโมโซมเพิ่มหรือลดทั้งโครโมโซม โดยมีตัวอย่างการเรียกชื่อดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 การผันแปรด้านจำนวนของโครโมโซมประเภทต่างๆ

ประเภท	จำนวนโครโมโซม	โครโมโซมที่มีอยู่
Aneuploidy		
disomic (normal)	2n	AABBCC
monosomic	2n-1	AABBC_
nullisomic	2n-2	AABB_ _
trisomic	2n+1	AABBCCC
double trisomic	2n+1+1	AABBBCCC
monosomic-trisomic	2n-1+1	AAB_CCC
tetrasomic	2n+2	AABBCCCC
Euploidy		
monoploid	1n	ABC
diploid (normal)	2n	AABBCC
triploid	3n	AAABBBCCC
autotetraploid	2n+2n	AAAABBBBCCCC
allotetraploid	2n+2n’	AABBCCDDEEFF
pentaploid	5n	AAAAABBBBBCCCCC
hexaploid (6n), heptaploid (7n), octaploid (8n), etc.		

อนิวพลอยดีย์ (aneuploidy)

อนิวพลอยด์ชนิดต่างๆ จะมีประโยชน์ในการศึกษาทางพันธุศาสตร์ เช่น ใช้ระบุตำแหน่งของยีน ทดสอบลิงเกจ บอกความสัมพันธ์ระหว่างยีนกับโครโมโซม เป็นต้น อนิวพลอยด์ที่นิยมใช้กันมี 3 แบบ ได้แก่

1. โมโนโซมิก (monosomics)

2. ไทรโซมิก (trisomics)

3. นัลลิโซมิก (nullisomics)

โมโนโซมิก (monosomics ; 2n - 1)

โมโนโซมิกที่เกิดขึ้นในพวกดิพลอยด์นั้นในสภาพปกติจะเป็นพวกที่ไม่สามารถมีชีวิตอยู่ได้อาจเนื่องจากสูญเสียยีนที่มีหน้าที่ควบคุมการอยู่รอดของสิ่งมีชีวิตนั้น ในทางกลับกันการที่ไซโกต 2n - 1 สามารถมีชีวิตอยู่ได้ก็เนื่องจากอาจจะมียีนอื่นๆ ที่อยู่บนโครโมโซมทำหน้าที่ชดเชยหรือทดแทนยีนที่ขาดหายไปได้

สาเหตุที่ทำให้เกิดโมโนโซมิก

1. เกิดได้ตามธรรมชาติ เช่น ข้าวสาลี และ ข้าวโอ๊ต

2. การใช้รังสีต่างๆ เช่น การใช้รังสีเอกซ์ปริมาณต่ำ

3. การผสมข้ามชนิด (interspecific cross)

4. การผสมพวกโพลีพลอยด์ด้วยละอองเรณูจากพวกปกติ

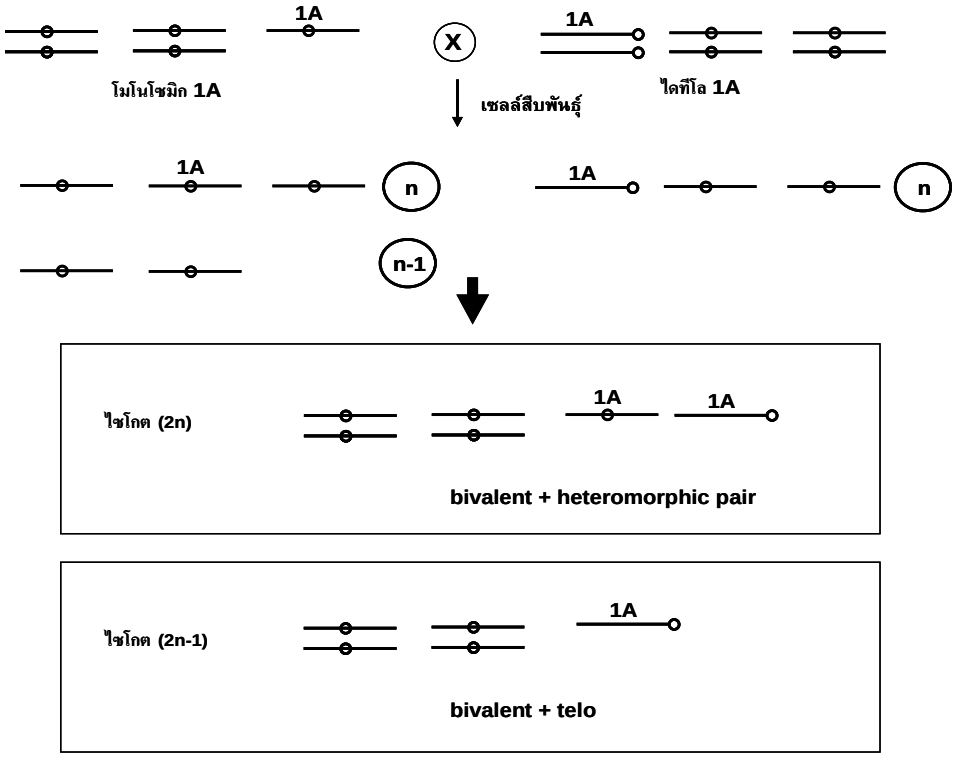
5. โครมาทิดไม่แยกออกไปที่ขั้วทั้งสองข้างในระหว่างการแบ่งเซลล์ (non-disjunction) หรือผลของยีนที่ป้องกันการเข้าคู่ของโฮโมโลกัสโครโมโซม (asynaptic gene)

ในการใช้โมโนโซมิกบอกตำแหน่งของยีนบนโครโมโซมให้มีความแม่นยำและถูกต้องนั้นโมโนโซมิกจะต้องสามารถรักษาเอกลักษณ์ของยูนิวาเลนท์ (univalent) ไว้ได้ คือไม่เกิดยูนิวาเลนต์ ชิฟ (univalent shift) จึงต้องตรวจสอบโมโนโซมิกเป็นระยะสม่ำเสมอ

วิธีตรวจสอบโมโนโซมิก

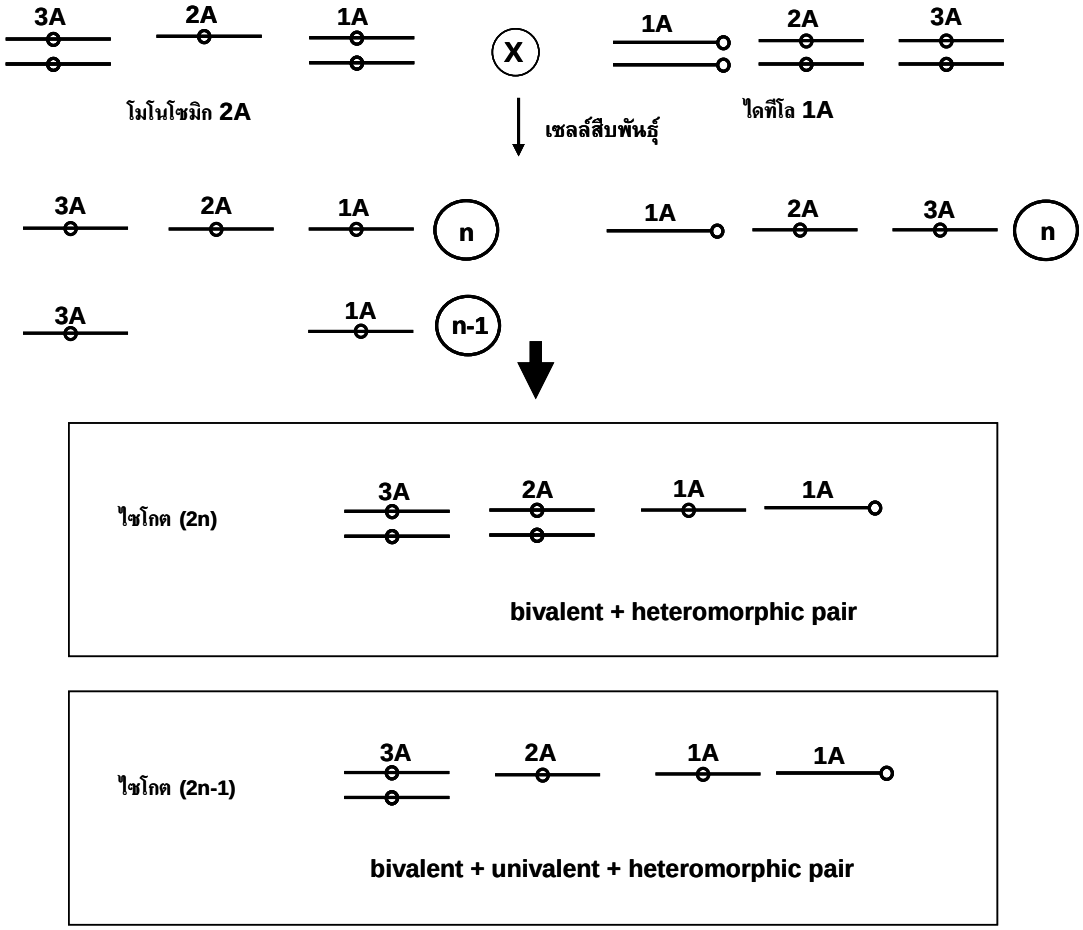
1. สังเกตยูนิวาเลนท์ที่สูญหายไประหว่างที่โครโมโซมแยกไปที่ขั้วทั้งสองและมักจะพบว่ายูนิวาเลนท์ที่สูญหายไปนั้นจะรวมตัวเกิดเป็นไมโครนิวคลีไอในระยะเทแทรด

2. ผสมพืชโมโนโซมิกกับไดทีโล ถ้าโมโนโซมิกและทีโลเป็นโครโมโซมเดียวกันลูก 2n - 1 จะได้ไบวาเลนท์ (bivalent) และทีโล (telo) ดังนี้



ภาพที่ 6.10 การตรวจสอบโมโนโซมิกเมื่อโมโนโซมิกและทีโลเป็นโครโมโซมเดียวกัน (ดัดแปลงจาก นิตย์ศรี, 2542)

ถ้าโมโนโซมิกและทีโลเป็นคนละโครโมโซมลูก 2n - 1 จะประกอบด้วยไบวาเลนท์ ยูนิวาเลนท์ และ เฮเทอโรมอร์ฟิกแพร์ (heteromorphic pair) ดังนี้



ภาพที่ 6.11 การตรวจสอบโมโนโซมิกเมื่อโมโนโซมิกและทีโลไม่ใช่โครโมโซมเดียวกัน (ดัดแปลงจาก นิตย์ศรี, 2542)

ประโยชน์ของโมโนโซมิก มีหลายประการ เช่น

1. ใช้ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างยีนกับโครโมโซมในโพลิพลอยด์
2. ใช้ระบุตำแหน่งของยีนบนแขนของโครโมโซมโดยใช้โมโนทีโลไดโซมิก
3. ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างยีนกับเซนโทรเมียร์
4. ใช้ตรวจหาทรานสโลเคชันโดยโมโนโซมิก
5. ใช้หายีนของพ่อแม่โดยการผสมโมโนโซมิกกับไดโซมิก
6. ใช้ในโครงการปรับปรุงพันธ์พืชและสัตว์ได้

ไทรโซมิก (trisomics ; 2n+1)

พืชที่มีโครโมโซมเพิ่มขึ้น 1 โครโมโซม แบ่งเป็น 3 ชนิด ได้แก่ ไพรมารีไทรโซมิก (primary trisomics) เซกันดารีไทรโซมิก (secondary trisomic) และเทอเทียรีไทรโซมิก (tertiary trisomic) ดังนี้

1. ไพรมารีไทรโซมิก (primary trisomic ; 2n+1 = AABBCCC)

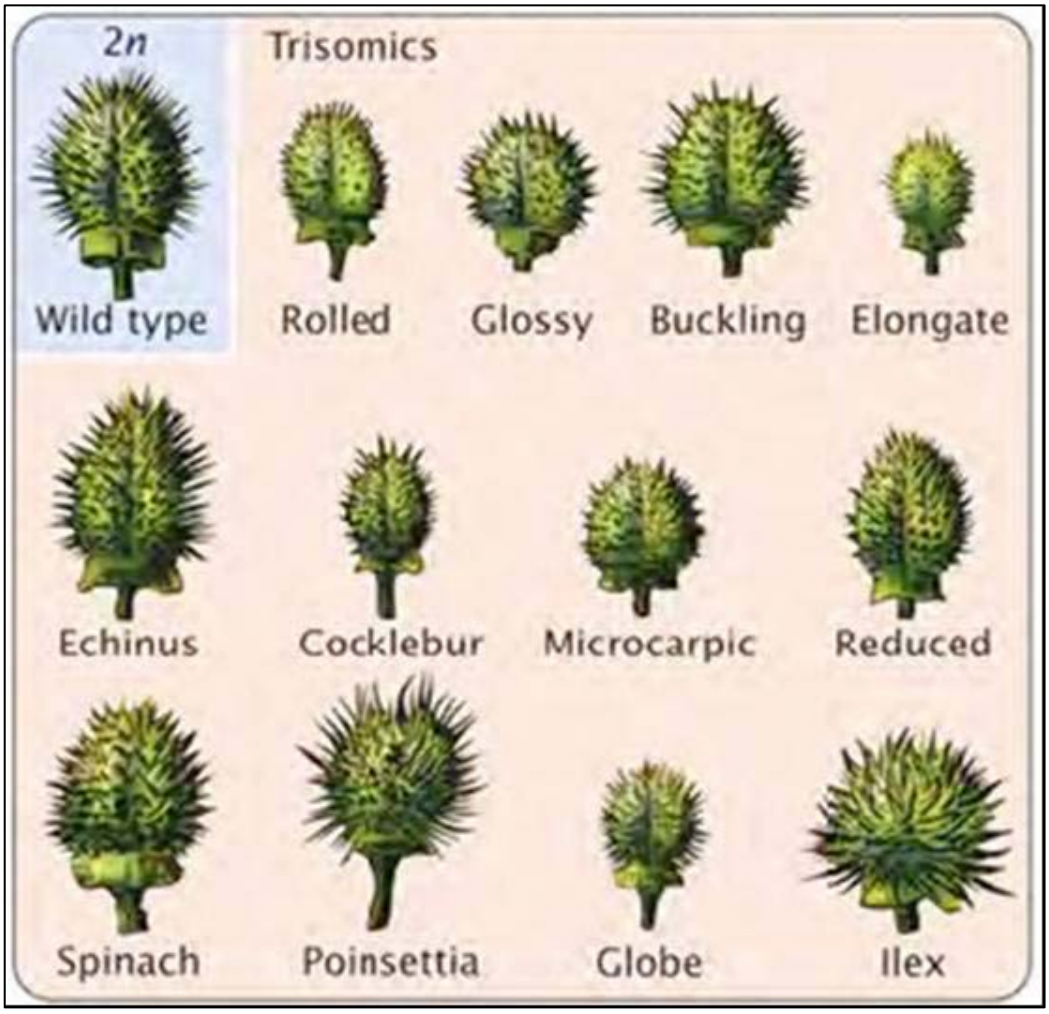
เช่น ต้นลำโพง (*Datura stramonium*) มีโครโมโซม 12 คู่ มีไทรโซมิกชนิดต่างๆ ได้ 12 แบบ แต่ละแบบมีลักษณะแตกต่างกันและแยกจากกันได้ (ภาพที่ 6.7)

สาเหตุการเกิด primary trisomics ได้แก่

1. การผสมระหว่างทริพลอยด์และดิพลอยด์
2. การผสมตัวเองของพวกทริพลอยด์

3. พืชที่มีอซิแนพทิกยีน (asynaptic gene) เช่น ข้าวสาลี ข้าวโพด ข้าวบาเลย์ และ ฝ้าย เป็นต้น

4. พืชที่มีการย้ายส่วนของโครโมโซมแล้วตามด้วยการแยกโครโมโซม 3 - 1 ในพวกที่มีการจัดเรียงโครโมโซมเป็นวงของ 4



ภาพที่ 6.12 ผลของต้นลำโพงที่เป็นดิพลอยด์และไทรโซมิกทั้ง 12 โครโมโซม
(ที่มา : http://www.biol.vt.edu/faculty/esen/Biology_2004/Variations%20In%20Chromosome%20Number.pdf)

2. เซกันดารีไทรโซมิก (secondary trisomic ; 2n + iso-chromosome)

พืชที่มีโครโมโซมเพิ่มขึ้นอาจพบเป็นไอโซ-โครโมโซม (iso-chromosome) ได้ในลูกของพืชปกติแต่จะพบบ่อยขึ้นในลูกไทรโซมิกที่มีการแบ่งตัวผิดปกติ พวกเซกันดารีไทรโซมิกจะเข้าคู่กันในไมโอซีสแตกต่างจากไพรมารีไทรโซมิกซึ่งพบการจัดเรียงตัวเป็นวงของ 3 ในขณะที่ไพรมารีไทรโซมิกจะเป็น รอด-เชพยูนิวาเรนต์ (rod-shaped univalent)

3. เทอเทียรีไทรโซมิก (tertiary trisomic; 2n+translocated chromosome)

พืชไทรโซมิกที่มีโครโมโซมเพิ่มขึ้นเป็นโครโมโซมที่เกิดจากการเคลื่อนย้ายส่วนของโครโมโซม ถ้าโครโมโซมที่เพิ่มขึ้นเป็นยูนิวาเรนต์โครโมโซมอื่นที่เป็นไบวาเรนต์จะไม่จับกันเป็นวง การสร้างส่วนเซลล์สืบพันธุ์จะทำหน้าที่หรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับการแยกของโครโมโซมทั้งหมด ถ้ามีจำนวนโครโมโซมปกติ (n) จะทำหน้าที่ได้ แต่สำหรับเซลล์สืบพันธุ์ที่มีโครโมโซม (n - 1) จะไม่ทำหน้าที่

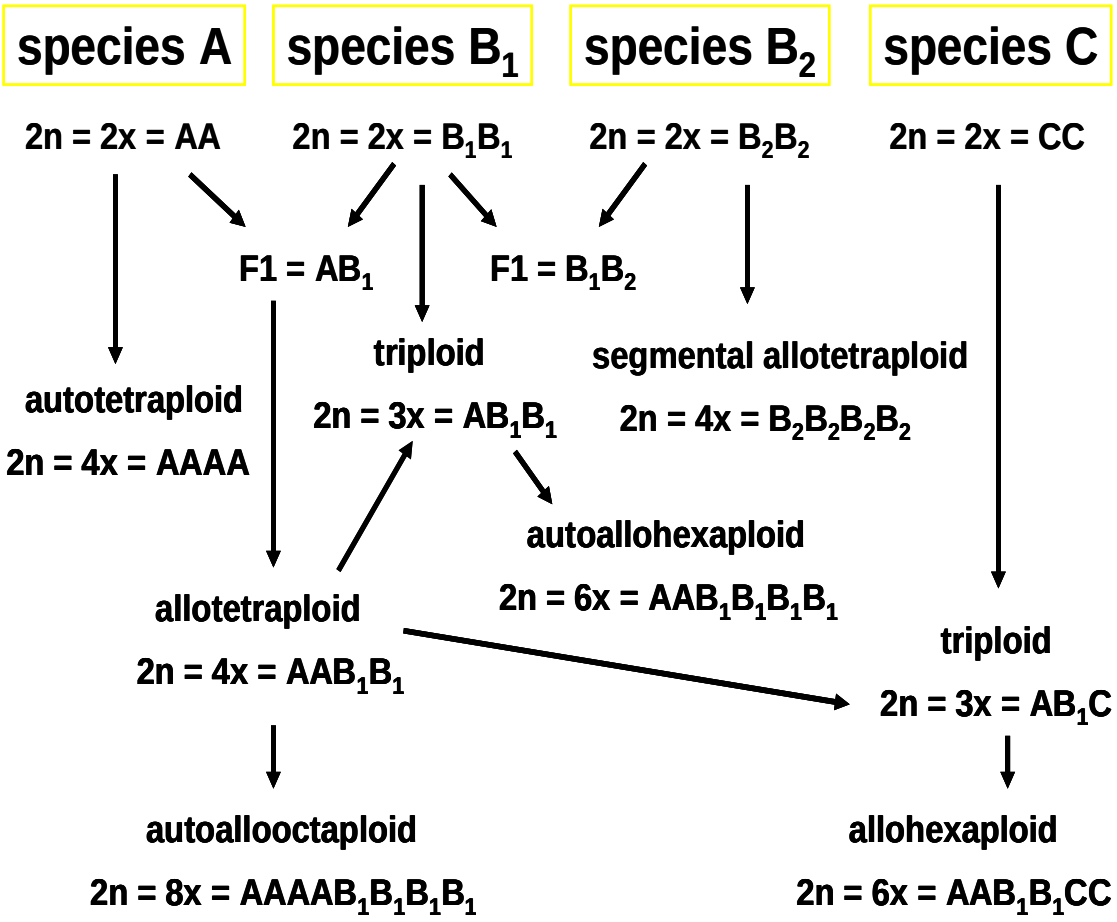
นัลลิโซมิก (nullisomics ; 2n-2 = AABB_ _)

ในพืชที่มีโครโมโซมน้อยกว่าปกติ 1 คู่ การเข้าคู่ของโครโมโซมที่เหลือจะปกติ นอกจากกรณีโครโมโซมที่หายไปนั้นมียีนควบคุมการเข้าคู่ของโครโมโซม โดยทั่วไปพืชสามารถทนทานต่อการสูญเสียโครโมโซมได้มากกว่า 1 คู่ ขึ้นอยู่กับการจัดเรียงโครโมโซมที่ขาดหายไป พวกนัลลิโซมิกส่วนมากเกิดมาจากโมโนโซมิกแต่มีความถี่ต่ำมาก

ส่วนใหญ่พวกนัลลิโซมิกมักจะมีขนาดเล็กและไม่แข็งแรง ประมาณครึ่งหนึ่งจะเป็นเพศผู้หรือเพศเมียที่เป็นหมันและไม่สามารถคงสภาพพันธุ์ที่เป็นนัลลิโซมิกได้ ในบางกลุ่มของโครโมโซมที่คล้ายกันซึ่งทำหน้าที่ทดแทนกันได้ (homoeologous chromosome) นัลลิโซมิกจะคล้ายกันมาก ในข้าวสาลีสามารถแยกนัลลิโซมิกออกจากไดโซมิกและโมโนโซมิกโดยอาศัยลักษณะต้นอ่อนและช่อดอก นอกจากนี้นัลลิโซมิกของโครโมโซม 2A 3B หรือ 5B ยังทำให้ไมโอซีสไม่คงที่เนื่องจากยีนเหล่านี้ทำหน้าที่เกี่ยวกับการเข้าคู่

ยูพลอยดี (euploidy)

โดยทั่วไปพืชปกติจะมีจำนวนโครโมโซมเป็นดิพลอยด์ (2n) แต่ก็มีพืชอีกเป็นจำนวนมากที่เป็นโพลีพลอยด์ คือ มีจำนวนโครโมโซมมากกว่า 2 ชุด สำหรับยูพลอยดี หมายถึง สภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงจำนวนโครโมโซมเพิ่มหรือลดเป็นชุดของโครโมโซม ดังนี้



ภาพที่ 6.13 การสร้างยูพลอยดีชนิดต่างๆ (ดัดแปลงจาก นิตย์ศรี, 2542)

ยูพลอยดี จำแนกออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่

1. ออโทโพลีพลอยด์ (autopolyploid) เป็นโพลีพลอยด์ที่มีจีโนมชุดเดียวกัน เช่น AAA, BBB เกิดจากการผสมระหว่างสิ่งมีชีวิตชนิดเดียวกัน มีตัวอย่างพืชที่เป็นออโทโพลีพลอดย์ได้แก่ มอส มะเขือเทศ ข้าวโพด ลำโพง ข้าวไรน์ กล้วย อัลฟาฟา มันฝรั่ง กาแฟ และ ถั่วลิสง เป็นต้น

2. อัลโลโพลีพลอยด์ (allopolyploid) เป็นโพลีพลอยด์ที่มีจีโนมคนละชุด เช่น AABB, AABBDD เกิดจากการผสมระหว่างสิ่งมีชีวิตต่างชนิดหรือต่างสกุล พบในพืชหลายชนิด เช่น ยาสูบ กล้วย มันฝรั่ง กาแฟ และ พืชดอกจำนวนมาก เป็นต้น

3. ออโทอัลโลโพลีพลอยด์ (autoallopolyploid) เป็นโพลีพลอยด์ที่มีจีโนมทั้งชุดเดียวกันและคนละชุด เช่น AAABBB

4. เซกเมนทัล อัลโลโพลีพลอยด์ (segmental allopolyploid) เป็นโพลีพลอยด์ที่แต่ละจีโนมอาจจะเหมือนกันเพียงบางส่วนหรือมีความสัมพันธ์กันหรือมีกำเนิดจากบรรพบุรุษเดียวกัน

ยูพลอยดีที่มีการนำมาใช้ประโยชน์มากกลุ่มหนึ่งคือ โมโนพลอยด์ (monoploid) คือ การที่พืชมีชุดของโครโมโซมในแต่ละจีโนมเพียง 1 ชุด เท่านั้นในพืชปกติที่มีสภาพเป็นดิพลอยด์ โมโนพลอยด์หรือแฮพลอยด์จะเหมือนกันแต่ถ้าในสภาพโพลีพลอยด์จะแตกต่างกัน โดยทั่วไปโมโนพลอยด์จะอ่อนแอและมีขนาดเล็กกว่าดิพลอยด์รวมทั้งนิวเคลียส เซลล์ เนื้อเยื่อ หรืออวัยวะก็จะมีขนาดเล็กกว่า ถ้าโมโนพลอยด์สามารถมีชีวิตอยู่ถึงระยะสืบพันธุ์จะสังเกตเห็นละอองเรณูไม่ทำหน้าที่ อับละอองเรณูเหี่ยวและลีบลง

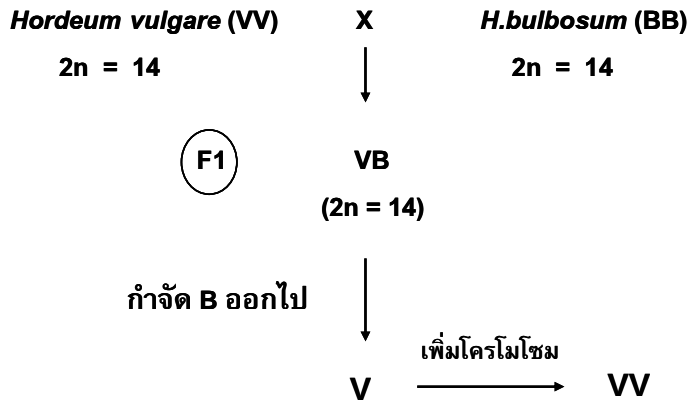
การเกิดโมโนพลอยด์ มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

1. การเกิดโดยไม่ผสมพันธุ์ (pseudogamy หรือ parthenogenesis) เกิดจากไข่ที่เติบโตโดยได้รับการกระตุ้นแต่ไม่ได้รับการผสมกับละอองเรณู ส่วนโพลาร์นิวคลีไอทั้งสองจะผสมกันแล้วพัฒนาเป็นเอนโดเสปิร์ม ในข้าวโพดเกิดจากเซลล์สืบพันธุ์เพศผู้ผสมกับ

โพลาร์นิวคลีไอแต่ไม่ผสมกับไข่ ดังนั้นไข่จะถูกกระตุ้นและพัฒนาไปเป็นตัวอ่อนโดยมีเอนโดเสปิร์มที่มีจำนวนโครโมโซม 3 ชุด (3n) นอกจากนี้โมโนพลอยด์อาจเกิดจากเซลล์ภายในถุงเอ็มบริโอแทนที่จะเกิดจากเซลล์ไข่หรือซิเนอร์จิด (synergids)

นอกจากนี้สามารถชักนำให้เกิดพาร์ทีโนเจเนซีสโดยการกระตุ้นส่วนของไข่ด้วยสารควบคุมการเจริญเติบโตหรืออุณหภูมิสูงประมาณ 40 – 50 องศาเซลเซียส การฉายรังสีละอองเรณู การผสมข้ามสกุล การผสมด้วยละอองเรณูที่เป็นเททราพลอยด์หรือทำให้การผสมละอองเรณูเกิดช้ากว่าปกติ

2. เกิดจากการผสมข้ามระหว่างพืชชนิดต่างๆ เช่น การผสมระหว่าง *Hordeum vulgare* และ *H. bulbosum* ซึ่งมีรายงานการศึกษาเกี่ยวกับจีโนม B ของ *H. bulbosum* พบว่ามีแนวโน้มที่จะถูกกำจัดออกไปเมื่อมีการผสมตัวเองในรุ่นต่อไป ดังนี้



3. จากการเพาะเลี้ยงอับเรณูหรือละอองเรณู เช่น *Datura sp. Atropa sp. Nicotiana sp*. เป็นต้น

การนำโมโนพลอยด์ไปใช้ประโยชน์

1. เป็นเครื่องมือในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการกระจายของโครโมโซมที่ไม่เข้าคู่กันในไมโอซีส

2. ใช้ศึกษาความสัมพันธ์ในการเข้าคู่กันของนอน-โฮโมโลกัสโครโมโซม

3. ใช้ปรับปรุงพันธุ์โดยการสร้างโฮโมโลกัสดิพลอยด์และโพลีแฮพลอยด์ซึ่งมีข้อดีคือ มีความสม่ำเสมอ คงตัวและสามารถเกิดมิวเทชันได้มากกว่าพันธุ์แท้