

第2世代精英樹等を用いた採種園設計： 北海道松前町大沢トドマツ採種園造成の事例から

石塚 航*・今 博計*・黒沼幸樹**・中田了五**

Planting design of a seed orchard using the next generation plus-trees: a case study in a seed orchard of *Abies sachalinensis* planted in Osawa, Matsumae town, Hokkaido

Wataru ISHIZUKA*, Hirokazu KON*, Kouki KURONUMA**, and Ryogo NAKADA**

要旨

採種園新規造成の際には、植栽するクローン個体の配植設計をする必要があり、近交弱勢リスクを低く、かつ、高い遺伝的多様性を担保させられるような、適正配置となる配植設計が求められる。第2世代精英樹を用いた採種園の設計においては、交配親が共通することで血縁関係が生じるため、近交弱勢リスクの少ない適正配置を得るには交配親の情報を考慮しなければならない。このような事情から既存プログラムによる配植設計ができないため、本報告では、適正配置のためにどのような手順で設計したらよいかについて、松前町大沢トドマツ採種園造成において、第2世代精英樹等計138系統、のべ490個体を植栽した事例より報告する。

キーワード：採種園，配植設計，トドマツ，血縁，近交弱勢

はじめに

成長や材質といった遺伝的特性の優れた精英樹を選抜する事業が1954年林野庁立案の「精英樹選抜による育種計画」に従って進められ、60年が経過した（林野庁 1987, 白石 2016）。この精英樹選抜育種事業によって森林収穫量は15%増加したともいわれ（藤澤 2012）、今後、木材資源の循環利用を推進していく上で、このような林木育種のさらなる取り組みとその普及の重要性が増している。北海道における主要樹種の1つ、トドマツ *Abies sachalinensis* Mast. においては、近年の取り組みによって、精英樹の次代集団からさらに優れた個体を選抜する第2世代精英樹の選抜と、既存精英樹集団からの選抜による改良（1.5世代化）が、育種区または需給地域区分ごとに実施された（田村ら2012, 2013, 2015, 大谷ら2015, 石塚ら2015, 森林総合研究所林木育種センター 2017, 中田ら 投稿中）。トドマツはそれぞれの地域の環境に

適応するような遺伝的変異があり、ある地域で優れた成績（成長や生残）を示す精英樹が他で同様な成績を残すわけではないことが知られる（廣澤ら 2001, 石塚 2016）。そのため、続く普及の段階で採種園を造成する必要があるが、その造成は、需給地域区分の単位ごとに適切な精英樹を用いて実施する必要がある（黒丸 1998, 永田・西岡 1997）。このような採種園で事業的に種子を生産することによって、より優れた種苗を各需給地域に配布していくことが可能となる。

北海道では人工林の多くが成熟期を迎え、更新のための種苗の需要増加が今後見込まれることから、2015年の北海道採種園整備方針において、まずは西南部育種区に属する松前町大沢にてトドマツの採種園約1 haを新規造成する計画が策定された（北海道 2015）。造成においては、第2世代精英樹選抜事業の中で選抜されたトドマツ第2世代精英樹候補木と優良木が植栽される運びとなった。ここで「第2世代精英樹候補木」とは、精英樹間の人工交配由来の種子や、精英樹で構

* 北海道立総合研究機構林業試験場 Forestry Research Institute, Hokkaido Research Organization, Bibai, Hokkaido

** 国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所林木育種センター北海道育種場

Hokkaido Regional Breeding Office, Forest Tree Breeding Center, Forestry and Forest Products Research Institute, Ebetsu, Hokkaido

[北海道林業試験場研究報告 第55号 平成30年3月 Bulletin of the Hokkaido Forestry Research Institute, No. 55, March, 2018]

成される採種園にて得た種子で造成した次代検定林から選抜された個体を指す。一方、「優良木」とは、精英樹そのもの（原木）より採種して造成した準次代検定林から選抜された個体等を指し、第2世代精英樹候補木とは区別されることに留意されたい。以降、本稿ではこれらを合わせて第2世代精英樹“等”，と呼ぶこととする

採種園造成に先立ち、2011年から2013年にかけて選抜木からの採穂と接ぎ木によるクローン増殖が図られた。続いて、園内のクローン配植を決めるが、その際には主に2つの条件を検討する必要がある（藤澤 2014）。1つ目の条件は、同一系統のクローン間での交配，すなわち自殖が生じにくいようにすることである（White et al. 2007, 藤澤 2014）。これは、一般的に林木において強い近交弱勢がはたらくためである。クローン個体同士での交配が増えると生産される種子全体の自殖率が高まり、得られた種苗の成績が悪くなることが懸念される。それを避けるには近隣に同一系統のクローン個体を配置しないような配植設計が重要であり、9型、25型、49型設計と呼ばれる採種園の仕様が用いられる（図-1）。

9型は3×3の9マスの格子状配置において、25型は5×5の25マス格子状配置において、49型は7×7の49マスの格子状配置において適正配置を考える仕様となる。最小単位のマスの数が少ない9型ほど、少ない系統数で配植設計が可能だが、将来の採種園管理の中で間伐を1回でも行うと適正配置が満たされなくなる可能性がある。一方、最小単位のマスの数が多い49型では間伐等が繰り返されても同一クローンが

並びにくいいため、管理によって適正配置が崩れる可能性は低くなるが、造成の際に必要な系統数は多くなるため、実現可能性に課題を残す。必要系統数や今後の管理の面でバランスのよい設計が、その間の25型設計である。図-1の区画を用いて考えると、25型設計では、図中央の基準系統Mとは異なる24種類の系統のクローン個体を系統Mのクローン個体の近隣に配置させれば適正配置の条件が満たされることとなり、たとえ区画のすぐ外のマス（たとえば系統Oの右隣）に系統Mの別クローン個体が配植されたとしても、1回の定量間伐（たとえば2残1伐の列状間伐）で適正配置が崩れることはない。

2つ目の条件は、できる限り任意交配を促し、高い遺伝的多様性が担保された種苗が得られる配植となっていることである（White et al. 2007, 藤澤 2014）。採種園全体の配植設計の際に、図-1で得られた格子状の適正配置のセット（25型ならば系統Aから系統Yで構成される最小単位のセット）をそのままタテ・ヨコに拡張していった大きな配植を完成させる設計の仕方は望ましくない。なぜならば、ある系統のクローン個体は、採種園の中である特定の系統のクローン個体と常に隣り合わせになっていることになり、偏った交配相手との間で種苗が生産されやすくなるからである。このように特定組み合わせの頻度が高くなると、高い遺伝的多様性を担保させにくくなるために望ましくない。この2つ目の条件を満たすためには、クローンの配置が一様にならないよう、配置の無作為化を行って設計することが重要である。

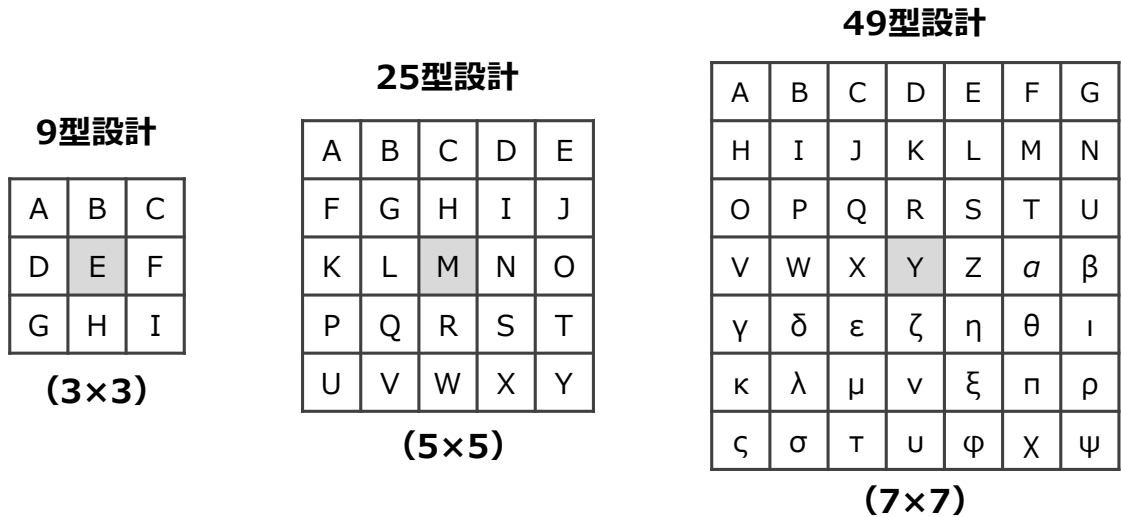


図-1 採種園への配植を考える際の仕様

代表的な9型、25型、49型の仕様を示す。図のマスは採種園で個体が配置される区割りを示し、各設計型それぞれの最小単位で図に示す。マス内にクローン個体の系統名を例として示す。実際は系統がランダム配置されるのだが、重複する系統が配置されていないことを示すためにアルファベット順の並びとなっている。それぞれの設計型の中央に配置される個体（9型であれば系統E、25型であれば系統M、49型であれば系統Y）を基準系統として配植を考えた場合、採種園設計における適正配置の条件の1つは、この個体の近隣に同じ系統が配置されないこと、となる。ここでいう“近隣”とは図に示す区割りの最小単位のこと、9型であればタテ、ヨコ、ナナメ全方位で1つ隣まで、25型であれば2つ隣まで、49型であれば3つ隣までをいう。

これら2つの条件を同時に満たすような適正配置を25型設計で実現させるには、概ね30以上の系統数を用いる必要があるといわれる。また、条件が満たされる採種園を設計する作業には煩雑かつ多大な労力がかかるため、労力軽減のための専用プログラムも開発されている（高橋 2002, 千葉 2014）。

今回、松前町大沢に造成する採種園でも、今後の管理を考えて25型設計でクローン配置を検討することとした。しかし、配植の検討過程において、上述の既存プログラムをそのまま使うことができないことが発覚した。第2世代精英樹等の間には“兄弟”（両親の組み合わせが同じ場合を全兄弟、どちらかの片親のみが同じ場合を半兄弟という）といった明確な血縁構造がみられる場合があるが、既存プログラムでは、この血縁構造を考慮することができないのである。交配に同じ親が用いられた兄弟のクローンが隣接してしまうと、得られる種苗に近交弱勢が生じやすくなると懸念される。これは同一クローンが隣接する場合と同様で、先に述べた1つ目の条件が満たされないことを意味する。適正配置を実現するためには、既存プログラムの使い方を工夫、もしくは配植位置を工夫する必要がある。そこで本稿では、適正配置の実現のためにどのような手順で採種園を設計したらよいかについて、血縁構造のある精英樹を植栽した大沢トドマツ採種園の事例を用いて報告する。

この検討を経て完成した配植情報に基づいて、2017年10月3～4日にクローン個体が植栽され、大沢トドマツ採種園の新規造成が滞りなく完了した。最終的な配植情報を残すことは、造成された採種園における今後の管理（採種や間伐等）にも資するものと考えられるため、本報告の末尾に、現場状況を反映させた保存版の配植図も併せて掲載することとした。

採種園概要と配植設計の方法

1) 採種園と植栽区画の概要

大沢トドマツ採種園の用地は北海道松前郡松前町大沢(41°26'6"N, 140°8'14"E)に位置する道有林渡島西部管理区33林班48・50小班である。2017年に用地の地拵えを行い、採種園の面積を1.15haとした。この用地は中央を分断するように敷かれている作業道によって2つに区分されており、北西側の区画（面積0.576ha）を1区、南東側の区画（面積0.579ha）を2区とした。作業道は1区、2区間の1本だけでなく、両区の南西側に沿って隣接するものもありT字に交差する。これら2つの作業道沿いにはかつて防風帯としてスギが植栽されていたが、採種園造成前に伐採されたため、採種園へは現在、作業道のどの位置からでもアクセスできる。また、用地の北東側、北西側はスギ林や雑木林となっているため、日照条件等を考慮すると、実際に植栽可能な面積は総面積1.15haよりやや小さい。

採種園用地はほぼ長方形に近い形のため、用地の形状に沿って植栽することとした。この報告では、南西から北東にか

けた短辺方向（図面上は縦方向、図-2参照）に沿って「行」を、北西から南東にかけた長辺方向（図面上は横方向、図-2参照）に沿って「列」を定義し、以降で使う。今後の管理のしやすさを考え、4m間隔での植栽を基本としつつ、行は4m、6m間隔を交互に展開し、2条植えに近い形の植栽区画を設定することとした（図-2）。幅6mの行間は、今後の管理において作業用機械（車両）の走行路として使うことを想定した。同様に、列は1区、2区それぞれの中間位置に非植栽列を設け、幅8mの列間となる箇所を設けた（図-2）。ここも今後の管理において車両の走行路を想定した。用地の端では形状に合わせて植栽区画を変更した。最終的に、1区に254本、2区に236本、のべ490本（配植密度約430本/ha）が植栽される設計となった。

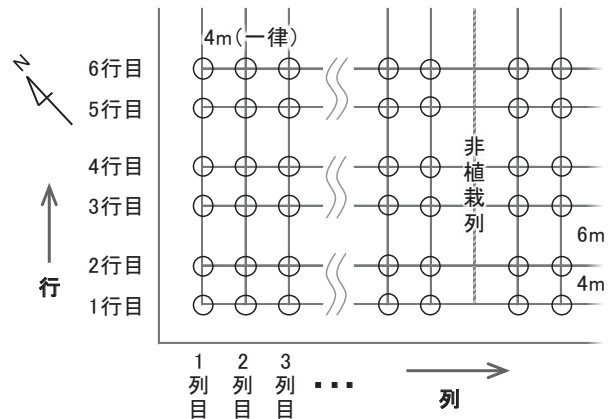


図-2 大沢トドマツ採種園の植栽区画の模式図

○印で植栽される位置を示す。行（縦）間の植栽間隔は4mと6mの交互で、2条植えに近い植栽区画設定とした。列（横）間の植栽間隔は4m一律とした。ただし、区画の中間に非植栽列を1列設けた。

2) 植栽クローン個体の概要

植栽する第2世代精英樹等の（接ぎ木）クローン増殖は森林総合研究所林木育種センター北海道育種場が担い、接ぎ木は2012年と2013年に実施された。本採種園はトドマツ需給地域区分（林業研究・技術開発推進北海道ブロック会議育種分科会 2017）の西南部需給地域（西南部育種区と一致する）への種苗供給を目的とするため、西南部育種区で選抜された第2世代精英樹等が増殖された。植栽する490本のクローン個体は延べ138系統の第2世代精英樹等によって構成され、1系統あたりのクローン個体数は平均3.6個体だった。ただし、接ぎ木数、活着数といったクローン増殖時の系統間差ゆえに、実際は系統によって1個体から10個体と異なる（詳細は配植図を示した図-13参照）。この138系統は選抜個体の交配様式によって大きく3つの群に区分することができる。1つ目が「第2世代精英樹 人工交配家系」で、23系統が含ま

表一 第2世代精英樹人工交配家系の交配親情報

クローン系統名	母樹	花粉木	クローン系統名	母樹	花粉木
トドマツ北育2-1	親精英樹01	親精英樹02	トドマツ北育2-16	親精英樹02	親精英樹03
トドマツ北育2-2	親精英樹03	親精英樹04	トドマツ北育2-17	親精英樹08	親精英樹09
トドマツ北育2-3	親精英樹04	親精英樹02	トドマツ北育2-18	親精英樹10	親精英樹11
トドマツ北育2-4	親精英樹05	親精英樹04	トドマツ北育2-19	親精英樹10	親精英樹12
トドマツ北育2-6	親精英樹04	親精英樹06	トドマツ北育2-20	親精英樹10	親精英樹09
トドマツ北育2-7	親精英樹07	親精英樹03	トドマツ北育2-21	親精英樹11	親精英樹13
トドマツ北育2-8	親精英樹02	親精英樹05	トドマツ北育2-22	親精英樹14	親精英樹09
トドマツ北育2-9	親精英樹05	親精英樹04	トドマツ北育2-23	親精英樹14	親精英樹11
トドマツ北育2-11	親精英樹02	親精英樹05	トドマツ北育2-24	親精英樹09	親精英樹11
トドマツ北育2-13	親精英樹07	親精英樹03	トドマツ北育2-25	親精英樹11	親精英樹12
トドマツ北育2-14	親精英樹07	親精英樹03	トドマツ北育2-26	親精英樹08	親精英樹13
トドマツ北育2-15	親精英樹07	親精英樹04			

表二 第2世代精英樹採種園産openならびに優良木の母樹情報 (花粉木は不明)

クローン系統名	母樹	クローン系統名	母樹	クローン系統名	母樹
トドマツ北育2-28	親精英樹15	トドマツ北育2-92	親精英樹41	トドマツ優良木-15	親精英樹67
トドマツ北育2-29	親精英樹16	トドマツ北育2-93	親精英樹42	トドマツ優良木-16	親精英樹68
トドマツ北育2-34	親精英樹17	トドマツ北育2-94	親精英樹43	トドマツ優良木-17	親精英樹69
トドマツ北育2-35	親精英樹18	トドマツ北育2-95	親精英樹44	トドマツ優良木-18	親精英樹70
トドマツ北育2-36	親精英樹19	トドマツ北育2-96	親精英樹23	トドマツ優良木-19	親精英樹58
トドマツ北育2-38	親精英樹20	トドマツ北育2-98	親精英樹18	トドマツ優良木-20	親精英樹71
トドマツ北育2-41	親精英樹21	トドマツ北育2-99	親精英樹45	トドマツ優良木-21	親精英樹63
トドマツ北育2-42	親精英樹22	トドマツ北育2-100	親精英樹32	トドマツ優良木-22	親精英樹72
トドマツ北育2-50	親精英樹21	トドマツ北育2-101	親精英樹46	トドマツ優良木-23	親精英樹65
トドマツ北育2-51	親精英樹23	トドマツ北育2-102	親精英樹35	トドマツ優良木-24	親精英樹59
トドマツ北育2-52	親精英樹24	トドマツ北育2-103	親精英樹47	トドマツ優良木-25	親精英樹71
トドマツ北育2-53	親精英樹25	トドマツ北育2-104	親精英樹18	トドマツ優良木-26	親精英樹63
トドマツ北育2-55	親精英樹26	トドマツ北育2-105	親精英樹08	トドマツ優良木-27	親精英樹73
トドマツ北育2-56	親精英樹24	トドマツ北育2-106	親精英樹48	トドマツ優良木-29	親精英樹70
トドマツ北育2-58	親精英樹27	トドマツ北育2-107	親精英樹40	トドマツ優良木-30	親精英樹72
トドマツ北育2-59	親精英樹20	トドマツ北育2-108	親精英樹49	トドマツ優良木-31	親精英樹74
トドマツ北育2-60	親精英樹28	トドマツ北育2-109	親精英樹50	トドマツ優良木-32	親精英樹59
トドマツ北育2-62	親精英樹29	トドマツ北育2-111	親精英樹51	トドマツ優良木-33	親精英樹75
トドマツ北育2-66	親精英樹30	トドマツ北育2-112	親精英樹21	トドマツ優良木-34	親精英樹74
トドマツ北育2-67	親精英樹19	トドマツ北育2-114	親精英樹52	トドマツ優良木-35	親精英樹76
トドマツ北育2-68	親精英樹27	トドマツ北育2-115	親精英樹47	トドマツ優良木-36	親精英樹76
トドマツ北育2-69	親精英樹25	トドマツ北育2-116	親精英樹53	トドマツ優良木-37	親精英樹65
トドマツ北育2-70	親精英樹31	トドマツ北育2-117	親精英樹54	トドマツ優良木-38	親精英樹65
トドマツ北育2-71	親精英樹31	トドマツ北育2-118	親精英樹30	トドマツ優良木-39	親精英樹77
トドマツ北育2-72	親精英樹32	トドマツ北育2-119	親精英樹39	トドマツ優良木-40	親精英樹78
トドマツ北育2-73	親精英樹33	トドマツ北育2-122	親精英樹44	トドマツ優良木-41	親精英樹79
トドマツ北育2-74	親精英樹29	トドマツ優良木-01	親精英樹55	トドマツ優良木-42	親精英樹79
トドマツ北育2-75	親精英樹34	トドマツ優良木-02	親精英樹56	トドマツ優良木-43	親精英樹80
トドマツ北育2-77	親精英樹35	トドマツ優良木-03	親精英樹57	トドマツ優良木-44	親精英樹81
トドマツ北育2-78	親精英樹36	トドマツ優良木-04	親精英樹58	トドマツ優良木-45	親精英樹82
トドマツ北育2-79	親精英樹27	トドマツ優良木-05	親精英樹59	トドマツ優良木-46	親精英樹64
トドマツ北育2-82	親精英樹37	トドマツ優良木-06	親精英樹55	トドマツ優良木-47	親精英樹62
トドマツ北育2-83	親精英樹34	トドマツ優良木-07	親精英樹60	トドマツ優良木-48	親精英樹62
トドマツ北育2-84	親精英樹38	トドマツ優良木-08	親精英樹61	トドマツ優良木-49	親精英樹63
トドマツ北育2-85	親精英樹39	トドマツ優良木-10	親精英樹62	トドマツ優良木-50	親精英樹83
トドマツ北育2-86	親精英樹19	トドマツ優良木-11	親精英樹63	トドマツ優良木-51	親精英樹83
トドマツ北育2-88	親精英樹40	トドマツ優良木-12	親精英樹64	トドマツ優良木-52	親精英樹84
トドマツ北育2-90	親精英樹23	トドマツ優良木-13	親精英樹65		
トドマツ北育2-91	親精英樹25	トドマツ優良木-14	親精英樹66		

れる。これらは第1世代精英樹間の人工交配で作出された次代集団内から選抜されたものである（親の組み合わせは表-1参照）。

2つ目の群が「第2世代精英樹採種園産open」で、ここには65系統が含まれる。これらは採種園にて、自然条件下で雌花が花粉を受け取って結実する交配様式、すなわち開放受粉（open pollination）によって作出された次代集団から選抜されたものである。採種した母樹が第1世代精英樹であることは明確であるが（表-2参照）、花粉親は採種園内の不特定多数の第1世代精英樹クローンと期待されるものの明確でない点で人工交配家系と異なる。

3つ目の群が「優良木」で、残りの50系統が含まれる。これらは、第1世代精英樹原木からの開放受粉種子による次代集団より選抜されたものである。採種した母樹は第1世代精英樹そのものなので明確だが（表-2参照）、花粉親に関しては第1世代精英樹選抜林分内の他個体とみられ、不明である。

3) 配植設計における留意点

植栽される第2世代精英樹等には血縁関係のある系統が混在するため、適正配置となる配植を設計するには特別な検討が必要となる。たとえば、トドマツ北育2-13と北育2-14は両親の組み合わせが等しい“全兄弟”の血縁関係がある（表-1）。また、これらトドマツ北育2-13や北育2-14と北育2-15との間では、交配親のうち「親精英樹07」が共通する。他にも、たとえばトドマツ北育2-70や北育2-71は「親精英樹31」が共通する（表-2）。これらは片親が等しい“半兄弟”の血縁関係がある。以下に、配植設計における留意点を示す。

まず、人工交配家系における配植設計の例である（図-3）。この場合、人工交配の組み合わせによっては、1号と2号のような全兄弟や、親精英樹Aが共通する1号、3号、4号、6号のように半兄弟の血縁関係が認められる。全兄弟・半兄弟間での交配による近交弱勢を避けるためにも、これらの近隣への配置は避けたい。すると、1号を基準系統として25型設計で適正配置を検討した場合（図-3）、5号のみしか近隣に配植できないことになる。そのため、5号のように交配親が共通しない次代個体を、少なくとも他に23系統揃える必要がある。

続いて、採種園産open家系における配植設計の例を示す（図-4）。開放受粉で次代が作出されるため花粉親は不明だが、母樹が共通する系統間では半兄弟の血縁関係が認められる。25型で適正配置を検討した場合には、近交弱勢リスクを考慮し、これらを近隣に配置しないことが求められる。図-4の中で基準系統とした1号のクローン個体と、半兄弟の2号、3号については、1号周囲のマス内に植栽することができない。母樹側しか考慮しないため、人工交配家系の場合よりは

植栽可否についての基準が緩いものの、特別な検討が必要なのは同じである。

4) 適正配置を目指した配植設計

前述の通り、植栽する138系統は第2世代精英樹人工交配家系、第2世代精英樹採種園産open、優良木の3群に分けられる。その交配様式によって血縁関係有無の検討手順に違いがあるため（図-3、図-4）、各群で独立して配植を検討することとした。これは138系統を一律にして配植設計する場合と比べ、植栽作業や管理の面でも煩雑さを軽減させられる利点がある。また、より高い遺伝的多様性を担保するという面では劣るかもしれないが、25型での適正配置ができれば、少なくとも近交弱勢リスクは回避できるため、十分実用に耐えうると考えた。以降、各群の配植設計方法を述べる。

パターン1：人工交配の場合

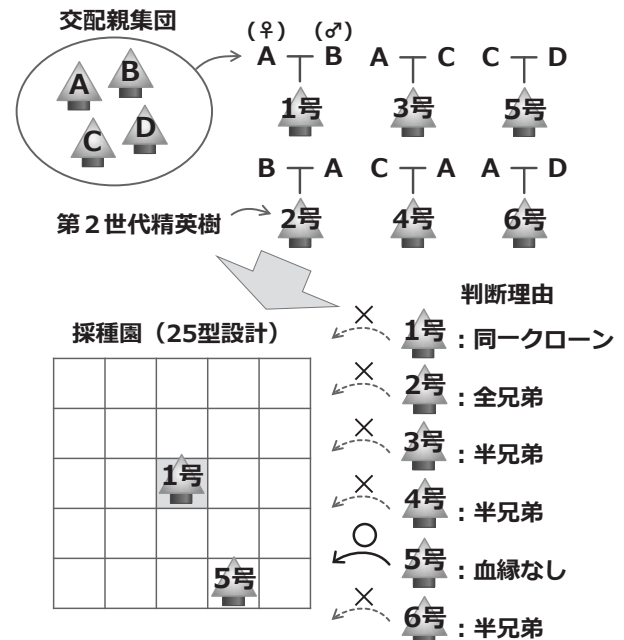


図-3 第2世代精英樹を用いた採種園における配植の難しさ（パターン1：人工交配家系の次代個体からの選抜の場合）

精英樹A, B, C, Dの4親の間で相互に人工交配を行って作出した次代集団を検定し、1~6号の第2世代精英樹を選抜したとする。また、選抜された精英樹の両親は明確で、図に示す通りとする。25型設計でこの6系統のクローンを採種園に配植しようと試みる。1号を基準に、図の5x5マス（25型最小単位）内への配植を考えた場合、近交弱勢のリスクが高くなることから、1~4号、および6号クローンの配置は不適正と判断され（図中の×印）、5号しか適正配置ができない（図中の○印）。採種園造成のためには、5号のように精英樹AとBの両方もが交配親として寄与していない次代個体を、少なくとも他に23系統揃える必要がある。

パターン2 : open実生 (開放受粉) の場合

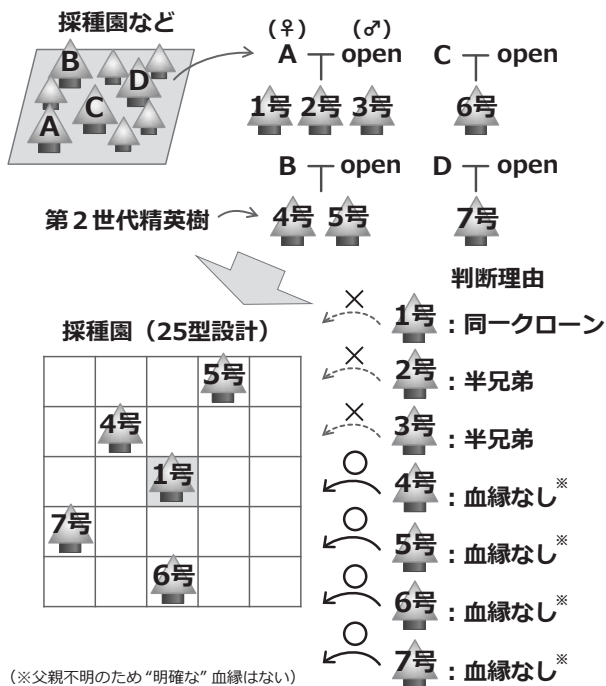


図-4 第2世代精英樹を用いた採種園における配植の難しさ (パターン2 : 開放受粉由来の次代個体からの選抜の場合)

採種園などにおいて精英樹A, B, C, Dから開放受粉由来の次代集団を検定し, 1~7号の第2世代精英樹を選抜したとする。選抜された精英樹の花粉親(父親)は不明だが, 母樹は明確で, 図に示す通りとする。図2と同様, 25型設計でこの7系統のクローンを採種園に配植しようと試みる。1号を基準に, 図の5×5マス(25型最小単位)内への配植を考えた場合, 近交弱勢のリスクが高くなることから, 1号に加え, 半兄弟の2号と3号クローンの配置は不適正と判断される(図中の×印)。明確な血縁構造が認められない4~7号については適正配置ができる(図中の○印)。採種園造成のためには, 少なくとも他に1号と血縁のない20系統を揃える必要がある。

ア) 第2世代精英樹人工交配家系

全23系統85個体が含まれる。これらの系統内には, 血縁関係がない単一の系統が存在せず, 非常に複雑な血縁構造が認められる(図-5)。系統数の少なさと血縁関係の存在から, この群のみでは5×5マスを用いた25型の適正配置はもとより, 3×3マスの9型での適正配置すらも実現できない。例えば最上段に位置する配植番号3(トドマツ北育2-3)を適正配置の際の基準に考えると, 配植番号で7, 13, 14と17~26の13系統が近隣に植栽可能なのだが, 7, 13, 14は全兄弟同士であるため, このうち1系統しか植栽することができないことになる。また17~26のうち, 24を近隣に植栽したとしたら, 同じ近隣のマス内には, 24と血縁関係のない19と26のみしか植栽ができないことになる。そこで5×5マスを用いた配植設計を行わず, 1列形状で配植設計することとし

た。こうすることで, 25型設計時には, 列の両隣とその1つ隣の4マスにおいて適正配置が満たされるか検討するだけで良くなり, 行方向の検討が不要になる。ただし, 採種園内に1列で植栽することはできないので, [85本-1列]の配植を[17本-1列]×5行に分割し, 採種園1区内で2行おきに5行を使用することとした。こうすれば, 1列形状での配植において適正配置が満たされてさえいれば, 5行へ分割した後の配植においても適正配置が満たされていることになる。

配植設計を行う既存プログラム(高橋2002, 千葉2014)には図-5のような血縁構造を反映させることができず, 使用できなかった。また, 表計算ソフトの乱数式を用いて無作為化を行っても, 両親とも血縁を排除させる解に到達できなかった。そこで, 植栽する85個体の親として最も貢献した(最多数の)親系統から順番に適正配置となるように植栽位置を決め, 該当する系統のクローン個体がこの中のどこに植栽されるかは, 表計算ソフトの乱数式で無作為に順番をつけて配植させていく方式をとった。次点の親で検討していくたびに, 既に近隣に配植された個体と半兄弟であるがゆえに, たとえ空いている植栽位置があっても配植できないケースが増えていく。そのため, 手順の後半では無作為化をする余地なく配植されることが大半となった。

イ) 第2世代精英樹採種園産open

全65系統209個体が含まれ, 半兄弟の血縁関係が生じる群である。人工交配家系のように両親とも検討を行う必要がない。そこで, 血縁関係のある系統をグループ化して「作業番号」を付与し, 血縁関係のない系統の配植番号とこの作業番号との間で適正配置を完成させることとした。そうすれば, その後, 同じ作業番号内に属するクローン個体を無作為に並べて完成した配植も同様に適正配置が満たされることになる。作業番号付与の後, 採種園の無作為化配植プログラム「MIX-WEX」を使用し(高橋2002, 千葉2014), それぞれの作業番号に該当する系統を無作為に割り当て, 配植を完成させた。

なお, 植栽位置は, 第2世代精英樹人工交配家系が配植された1区の残り(全169個体)と, 1区の第2世代採種園産openの植栽位置から連続するように延長させた2区の一部(全40個体)とした。

ウ) 優良木

全50系統196個体が含まれ, 半兄弟の血縁関係が生じる群である。上述の第2世代精英樹採種園産openにおける配植設計と同様に, 血縁関係のある系統をグループ化し, 作業番号を付与したのち, 既存プログラム「MIX-WEX」を使用して無作為の配植設計を行った(高橋2002, 千葉2014)。しかし, 1つの作業番号内に含まれる個体数が多い(9~15個体)ものが複数あったため, これが原因となりプログラムをそのまま実行させても収束しなかった。そこで, プログラムは全個体に対して使用しないこととし, 個体数が多い作業番号のグループについて, その一部(4~5個体)を先行配植してか

系統名	配植番号	3	4	9	2	15	6	8	11	16	1	7	13	14	24	18	21	23	25	20	22	17	19	26
トドマツ北育2-3	3	×	△	△	△	△	△	△	△	△	△													
トドマツ北育2-4	4	△	×	▲	△	△	△	△	△															
トドマツ北育2-9	9	△	▲	×	△	△	△	△	△															
トドマツ北育2-2	2	△	△	△	×	△	△			△		△	△	△										
トドマツ北育2-15	15	△	△	△	△	×	△					△	△	△										
トドマツ北育2-6	6	△	△	△	△	△	×																	
トドマツ北育2-8	8	△	△	△				×	▲	△	△													
トドマツ北育2-11	11	△	△	△				▲	×	△	△													
トドマツ北育2-16	16	△			△			△	△	×	△	△	△	△										
トドマツ北育2-1	1	△						△	△	△	×													
トドマツ北育2-7	7				△	△				△		×	▲	▲										
トドマツ北育2-13	13				△	△				△		▲	×	▲										
トドマツ北育2-14	14				△	△				△		▲	▲	×										
トドマツ北育2-24	24														×	△	△	△	△	△	△	△	△	
トドマツ北育2-18	18														△	×	△	△	△	△	△			△
トドマツ北育2-21	21														△	△	×	△	△					△
トドマツ北育2-23	23														△	△	△	×	△		△			
トドマツ北育2-25	25														△	△	△	△	×					△
トドマツ北育2-20	20														△	△				×	△	△	△	
トドマツ北育2-22	22														△			△		△	×	△		
トドマツ北育2-17	17														△					△	△	×		△
トドマツ北育2-19	19															△			△	△			×	
トドマツ北育2-26	26																△					△		×

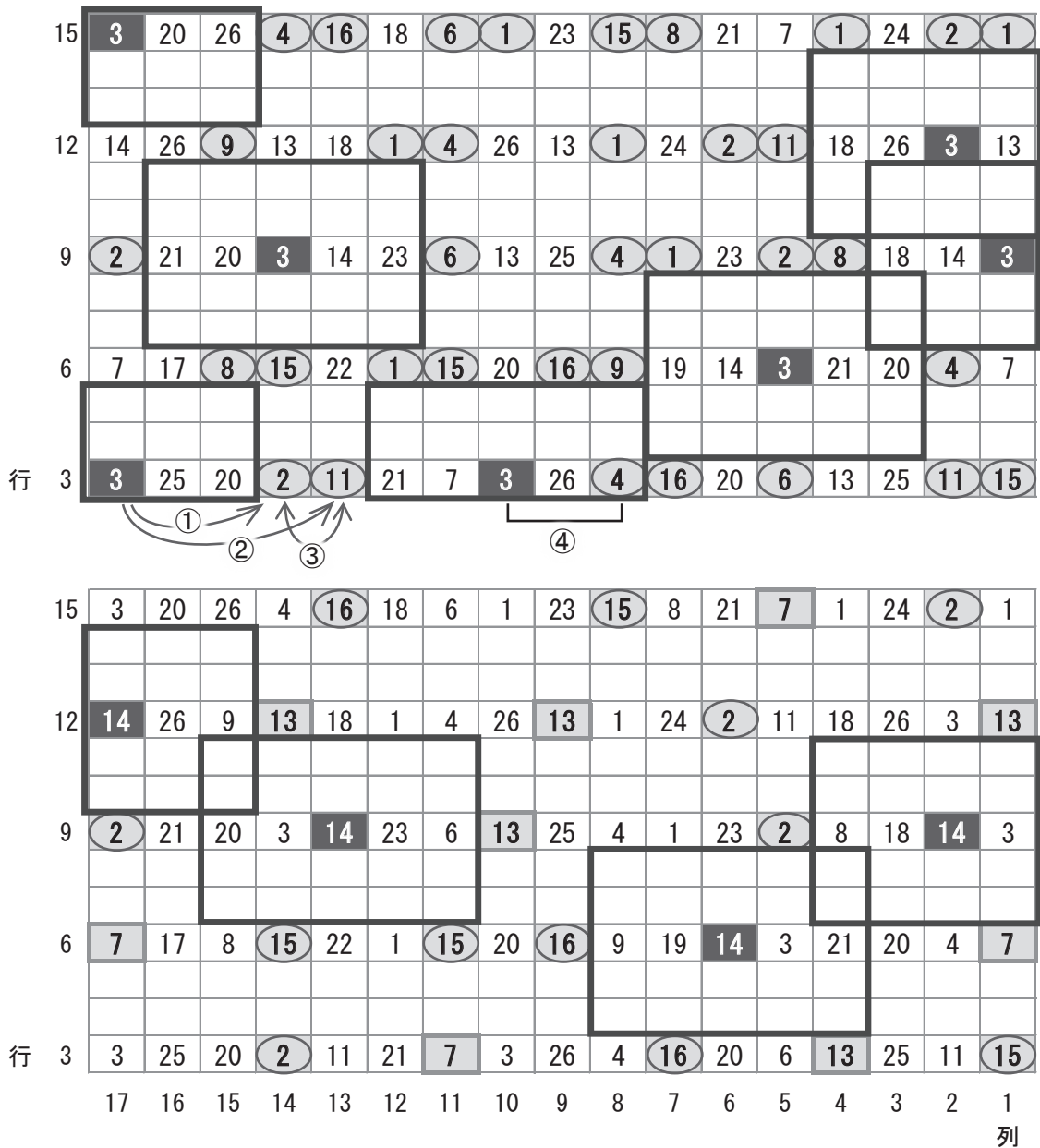
図-5 第2世代精英樹人工交配家系の血縁関係

全系統について、対戦表形式で行列上に並べた。図中、対角線上（灰色塗りのマス）に並ぶ×印は同一系統であることを、▲印は両親の組み合わせが同じ全兄弟の血縁関係があることを、△印は片親に同じ系統が使われた半兄弟であることを示す。これらの印がついた系統同士は血縁関係があるため、採種園の適正配置を考える際に考慮が必要である（図3参照）。

15	3	20	26	4	16	18	6	1	23	15	8	21	7	1	24	2	1							
12	14	26	9	13	18	1	4	26	13	1	24	2	11	18	26	3	13							
9	2	21	20	3	14	23	6	13	25	4	1	23	2	8	18	14	3							
6	7	17	8	15	22	1	15	20	16	9	19	14	3	21	20	4	7							
行 3	3	25	20	2	11	21	7	3	26	4	16	20	6	13	25	11	15							
	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1							
																								列

図-6 第2世代精英樹人工交配家系の配植

1マスに1個体を植栽するとして、25型で設計した配植図。番号は配植番号で、表-1の系統名の末尾につけられる1桁か2桁の番号と同一である。図面の右下、配植番号15の個体が、採種園1区の3行1列目に該当する。



図一 7 第 2 世代精英樹人工交配家系における適正配置確認の具体例

(上段) 最も半兄弟の数が多い配植番号 3 の系統を基準にした場合、(下段) 全兄弟・半兄弟をもつ配植番号 14 の系統を基準にした場合。基準とした系統のクローンが配植されるマスは黒塗り白文字で示した。また、基準系統とは全兄弟の血縁関係がある系統、半兄弟の血縁関係がある系統はそれぞれ灰色塗り印と、灰色塗り印付きのマスで示した。さらに、基準系統を中心とした 5×5 マスの外周を太線で囲った(採種園の区画外へ出るときは区画端までとする)。25 型設計では、この 5×5 マスの内側に血縁個体が配植されないことが適正配置の条件である。例えば上段を例にとると、配植番号 3 と半兄弟の配植番号 2 と 11 の系統は 5×5 マスの外側に配植され、適正配置である(図中の①、②)。さらに 2 と 11 との間にも血縁関係がないため、隣同士で配植されていても適正配置である(図中③)。ただ一例(図中④)のみ、都合上どうしても、半兄弟家系が 5×5 マス内側に不適正配置されるものがあった。

ら、残りをプログラムで配植設計することとした。先行配植の際には、表計算ソフトの乱数式で無作為に順番をつけて配植させていく方式をとった。プログラムでの配植設計が済んだ後、先行配植の結果と重ね合わせ、無作為に各作業番号の該当系統を割り当てて配植を完成させた。なお、植栽位置は

2 区の残り部分とした。

5) 統合

以上の検討方法で作成されたそれぞれの配植を統合させ、採種園全体の配植を完成させた。なお、配植の決定から、現

地植栽までの間に、苗木枯損の都合で入れ替えの必要性が生じた。入れ替えた個体の詳細は省略するが、再配植には、著者が1個体ずつ適正配置となっているか確認しながら実施した。以降の結果においては、最終的な（植栽時の）配植図のみを示す。

結果

1) 第2世代精英樹人工交配家系

図-6に、採種園1区における第2世代精英樹人工交配家系の植栽位置と配植図を示した。また、このうち半兄弟となるクローン個体数が最も多い配植番号3を具体例として用い、この系統を基準とした場合の適正配置の検討結果を図-7上段に示した。同様に、半兄弟に加えて全兄弟もみられる配植番号14の系統を基準とした場合について、その適正配置の検討結果を図-7下段に示した。

図-7上段では、第一に、配植番号3を中心とした5×5マス内に同じ配植番号3のクローン個体が配植されないことが必須であるが、複数の5×5マスの外周の一部が交差することはあっても、中心を含んで重なることはなく、全個体においてこの条件は満たされていた。第二に、血縁関係のある系統(1, 2, 4, 6, 8, 9, 11, 15, 16)が配植されないことが求められるが、図中左下(1区3行17列)の3に注目すると、①、②で示すように、半兄弟の2と11が確かに5×5マスの外側に配植されている。また、2と11については、3と共通する親が異なり血縁関係はない。そのため、③のように隣接するような配植でも条件が満たされる。結果として、1ケースを除き全個体は血縁関係の考慮の点からも適正配置の条件が満たされていた。不適正配置されたケース(図中の④)は、植栽直前の再配植の際に生じたもので、不可避だった。

同様に図-7下段においても、同一系統(配植番号14)のクローン個体や全兄弟、半兄弟の系統のクローン個体がすべて適正配置の条件を満たしていることが確認された。他の系統もすべて、適正配置の条件を満たしていることが確認された。

2) 第2世代精英樹採種園産open

採種園1区、2区における、第2世代精英樹採種園産openの植栽位置とともに、作業番号対応表、設計した配植図を図-8に示した。図-8上段が、作業番号を用いた状態での配植図、下段は各作業番号へと該当する系統を割り当てて完成させた配植図である。また図-9には、配植番号69と102を基準系統とした場合を例として用い、それぞれの適正配置の検討結果を示した。

前述した人工交配家系(図-7)と同様、第2世代精英樹採種園産open家系でも、同一系統のクローン個体が5×5マスの内側に配植されることはなかった。また、半兄弟となる

系統に関しても、常に基準系統の5×5マスの外側に配植された。ここで示した2系統のように、他の系統もすべて、適正配置の条件を満たしていることが確認された。

3) 優良木

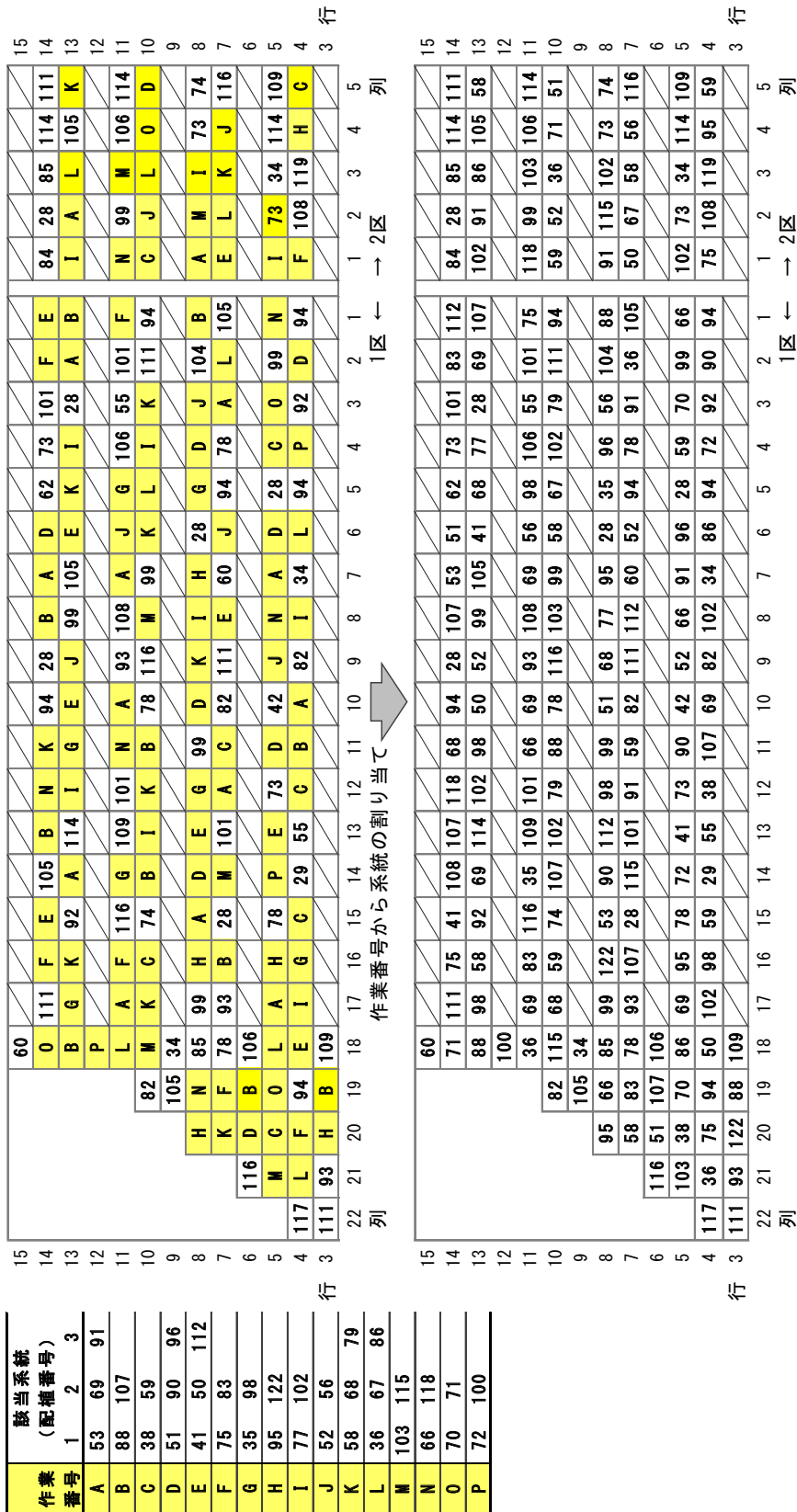
採種園2区における、優良木の植栽位置とともに、作業番号対応表、設計した配植図を図-10に示した。なお、優良木の配植番号に関しては、系統名の末尾につけられる数字に200を加算し、第2世代精英樹候補木と重複しないようにした。

図-10上段は作業番号を用いた状態での配植図で、下段が各作業番号へと該当する系統を割り当てて完成させた配植図である。先行配植は、第2世代精英樹採種園産openの植栽位置の間の空地を埋める設計とした(図-10上段の濃色)。また図-11には、配植番号242と226を基準系統とした場合を例として用い、それぞれの適正配置の検討結果を示した。これらはともに先行配植の対象となった作業番号に属する系統でもあった(配植番号242は作業番号Eに、配植番号226は作業番号Hに属する、図-10参照)。図-11の上下段に示される通り、同一系統のクローン個体が5×5マスの内側に配植されることはなかった。半兄弟となる系統についても同様に、5×5マス内側には配植されていなかった。なお、図-10上段では、先行配植した領域に該当する作業番号が偏っているようにも見えるが、その後の系統の割り当てを経ることで1つの作業番号に含まれる2~4の系統が分散して配植された(図-10下段)。このように、配植設計の際にある程度の偏りが生じたとしても、その後に、血縁関係のある系統の考慮が入ることによって、偏りが緩和され、図-11に示すような結果が得られることがわかった。第2世代ならではの手間のかかる部分ではあるがメリットでもあった。

まとめ

1) 今後の指針

本報告では、既存の採種園設計プログラムをそのまま使うことが不可能な場合でも、適正配置を満たす配植を実現させるための代替手順があることを示した。たとえば片親のみが共通する場合には、共通親でグループ化することで既存プログラムの活用が可能となり、プログラムでの配植設計後に、各グループ内の該当系統を無作為に割り当てる手順を加えることで、次代の遺伝的多様性も配慮した適正配置が可能であることを示した。ただし、両親が共通する系統が含まれる場合にはこの方法は活用できなかった。最も影響力の大きい(数の多い)親から順に無作為に配植させることで適正配置を実現させられると考え実施したが、実際には適正配置のための選択肢が非常に限られ、さらに植栽直前の個体の入れ替えが生じたことで適正配置が崩れるなど、限界があることもわかった。次代の遺伝的多様性を高く保つためには、第2世代精英樹選抜の時点で、親系統の多様性を確保しておく必要がある



図一 8 第2世代精英樹採種園産openの配植

1マスに1個体を植栽するとして、25型で設計した配植図。上段は、無作為化プログラム出力データを視覚化したもので、配植番号を示す番号と、プログラムを実行する際に付した作業番号が混じる。下段は、各作業番号に該当する系統を無作為に割り当てて完成させた配植図。図中、斜線マスには採種園産openの系統を植栽しない。植栽区画の外側に行列番号を付した。

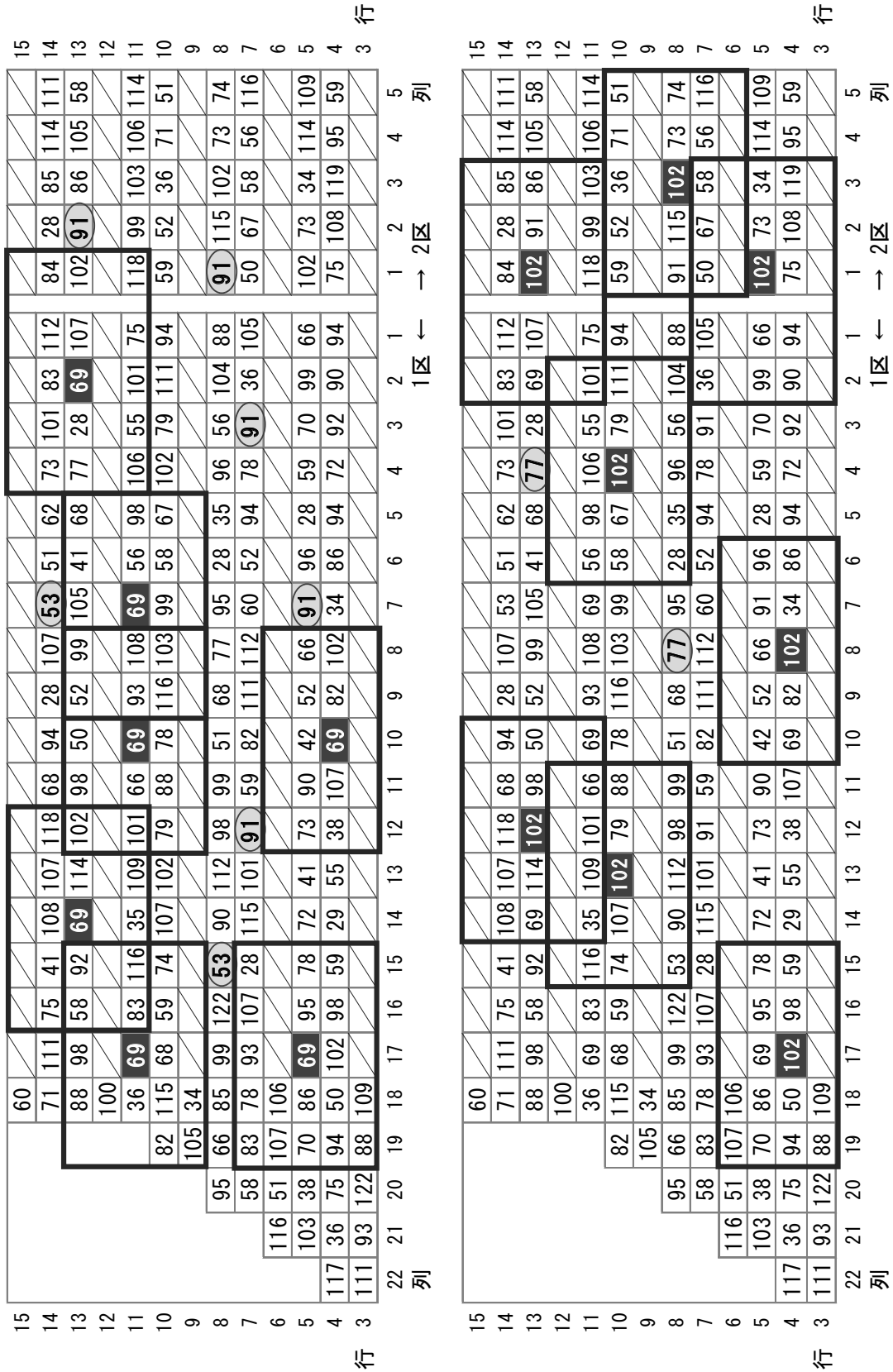


図-9 第2世代精英樹採種園産openにおける適正配置確認の具体例
 (上段) 配植番号69の系統を基準にした場合、(下段) 配植番号102の系統を基準にした場合。図の示し方は図8と同じ。上段では作業番号Aに属し半兄弟同士の3系統について配植が視覚化され、下段では作業番号Iに属し半兄弟士の2系統について配植が視覚化される。ともに5×5マス内側に半兄弟家系が植栽されないため、25型設計での適正配置ができています。

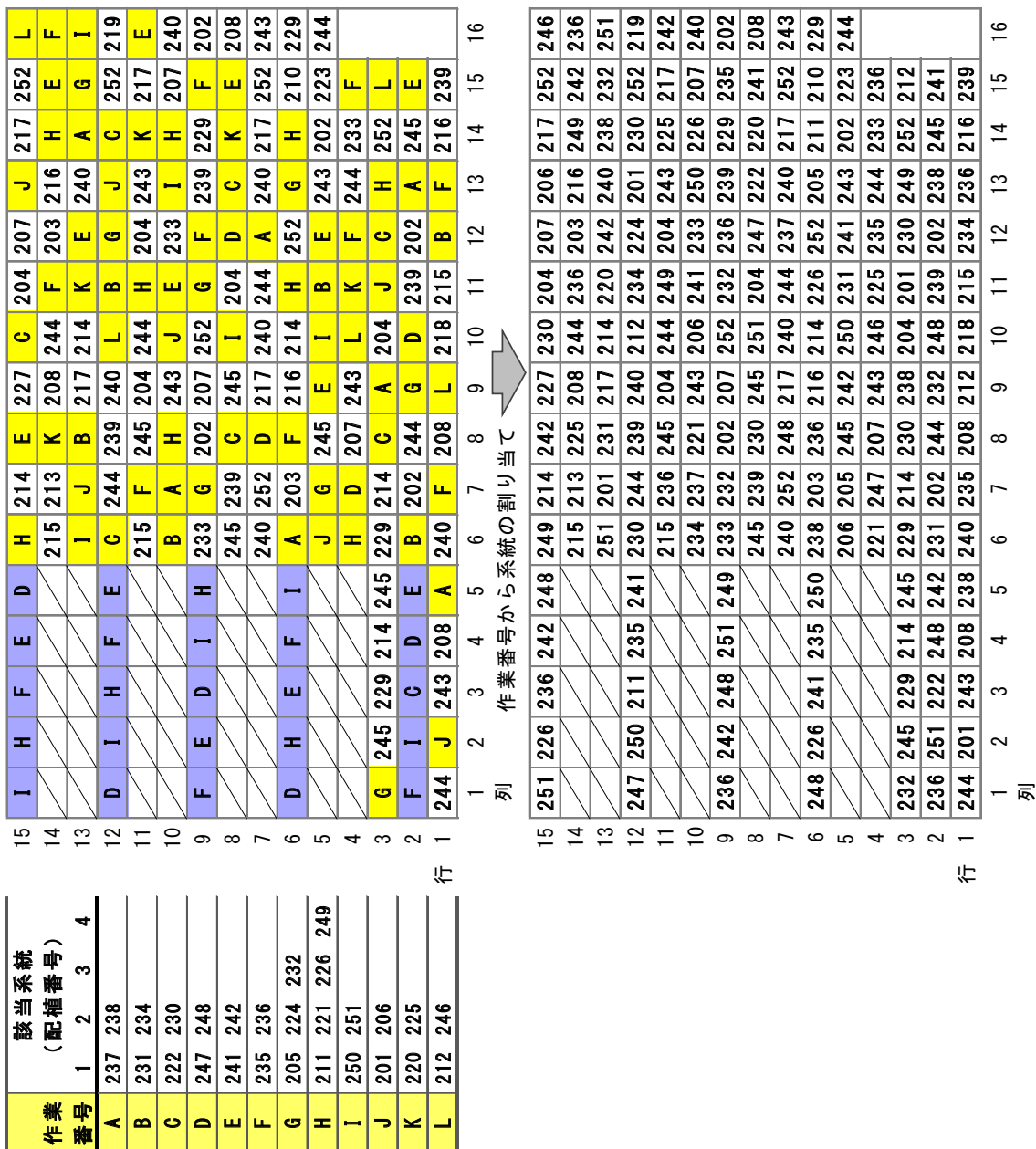


図-10 優良木の配植

1マスに1個体を植栽するとして、25型で設計した配植図。上段は、無作為化プログラムを実行する際に付した作業番号と、配植番号を示す番号が混じる。なお、優良木の配植番号は、系統末尾の番号に200を足して200番台の番号で表される。下段は、各作業番号に該当する系統を無作為に割り当てて完成させた配植図。また、濃色で示されるマスはプログラムでの設計ができなかったために、先に無作為配植を済ませた植栽位置を示す。植栽区画の外側に行列番号を付した。

るだろう。

今後、既存採種園の更新に伴って、第2世代精英樹を用いた採種園の新規造成が少なからずあると見込まれる。その際には、今回示したように、近交弱勢のリスクが高い採種園となってしまうまいよう、交配親の情報を踏まえて適正配置を考える手続きが必ず追加されることとなる。第2世代精英樹名は連番で付され、その「名前」によって家系情報を類推することができないため、うっかり親の考慮を忘れないようにせねばならない。また、本報告にて示した通り、配植設計に

は煩雑な手続きも含まれ、効率の点では課題が残った。たとえば、既存の配植プログラムに血縁構造の考慮を実装するという取り組みも有効であると考えられ、今後の発展に期待したい。

2) 大沢トドマツ採種園の今後の管理

最後に、今回新規造成された大沢トドマツ採種園の配植図(保存版)を図-12, 13に掲載する。なお、1区と2区とで横並びになる行番号が等しくないが、現地でも配植図の通り

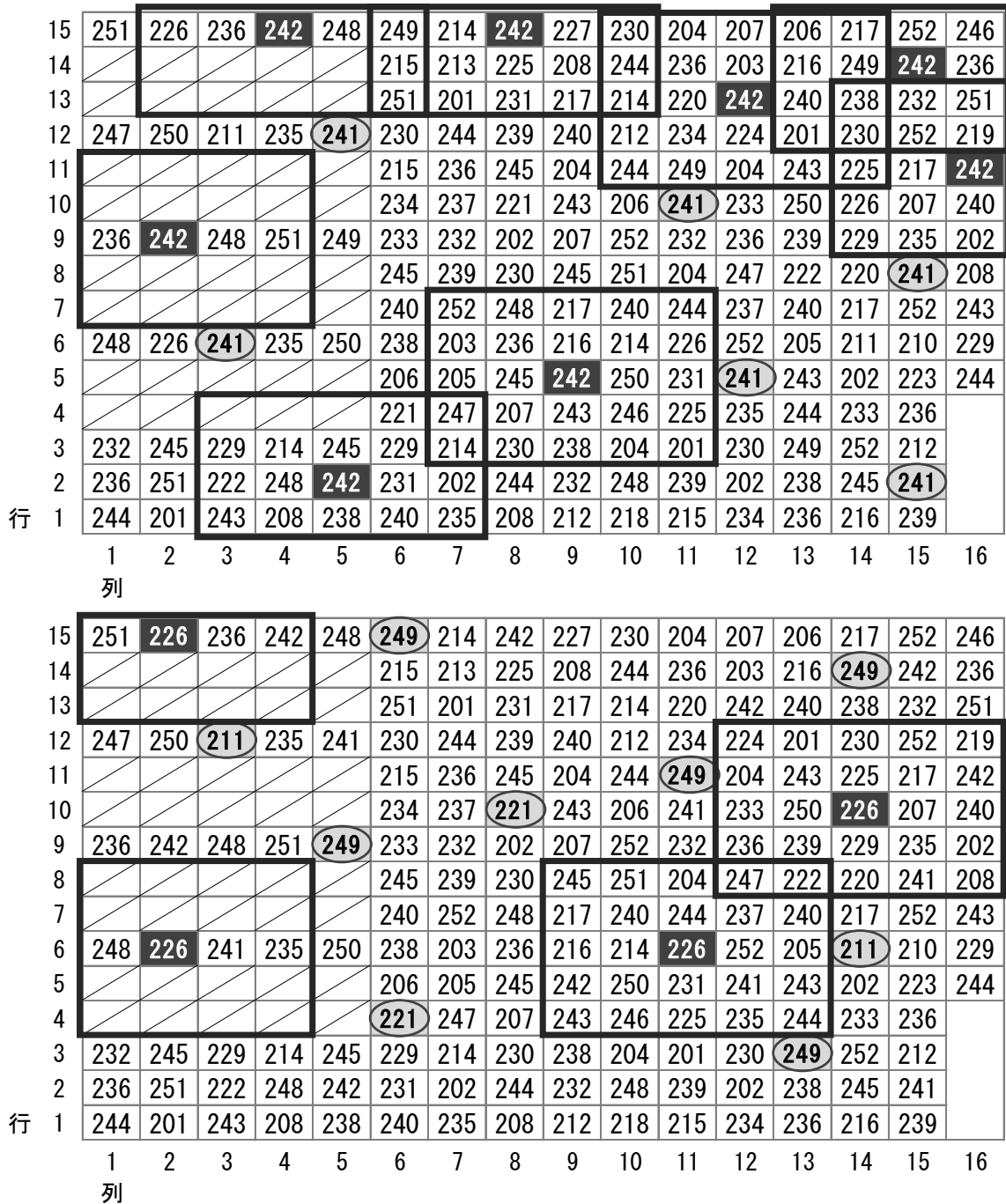


図-11 優良木における適正配置確認の具体例

(上段) 配植番号242の系統を基準にした場合、(下段) 配植番号226の系統を基準にした場合。図の示し方は図10と同じ。上段では、最も配植される個体数の多い作業番号Eの2系統について配植が視覚化され、下段では、最も半兄弟となる系統の数の多い作業番号Hの4系統について配植が視覚化される。ともに5×5マス内側に半兄弟家系が植栽されないため、25型設計での適正配置ができています。

となっており、設置した看板(地番と配植番号を記す)も行番号がずれている点は留意すべきである。図-12, 13には加えて、作業道や非植栽の空き列、看板の位置や、トドマツ系統名と配植番号の対応表、植栽本数も併せて示した。また、造成後の採種園の様子を写真-1に示した。なお、配植設計の中で唯一、不適正配置となった例(図-7中の④)については、該当する1区3行8列目の個体と1区3行10列目の個

体との間に非植栽の空き列が存在し、実際の空間的距離は配植設計上よりも十分に確保できたため、今後大きな懸念事項としなくても良いと思われた。

この採種園の役割は、将来の森づくりを担う優良種子の生産にある。そのためには、着果に合わせた事業的採種が必須事項となる。配植図に示される通り、2区画に分割された採種園の両区では、配植される系統の構成に大きな違いがある。

配植早見図

1	~	26	第二世代精英樹 人工交配家系
28	~	122	第二世代精英樹 採種園産open
201	~	252	優良木

大沢トドマツ採種園 配植図

樹種：トドマツ(第二世代成英樹, 優良木)
 造成：2017年10月

1 (太枠囲い) 看板設置個体

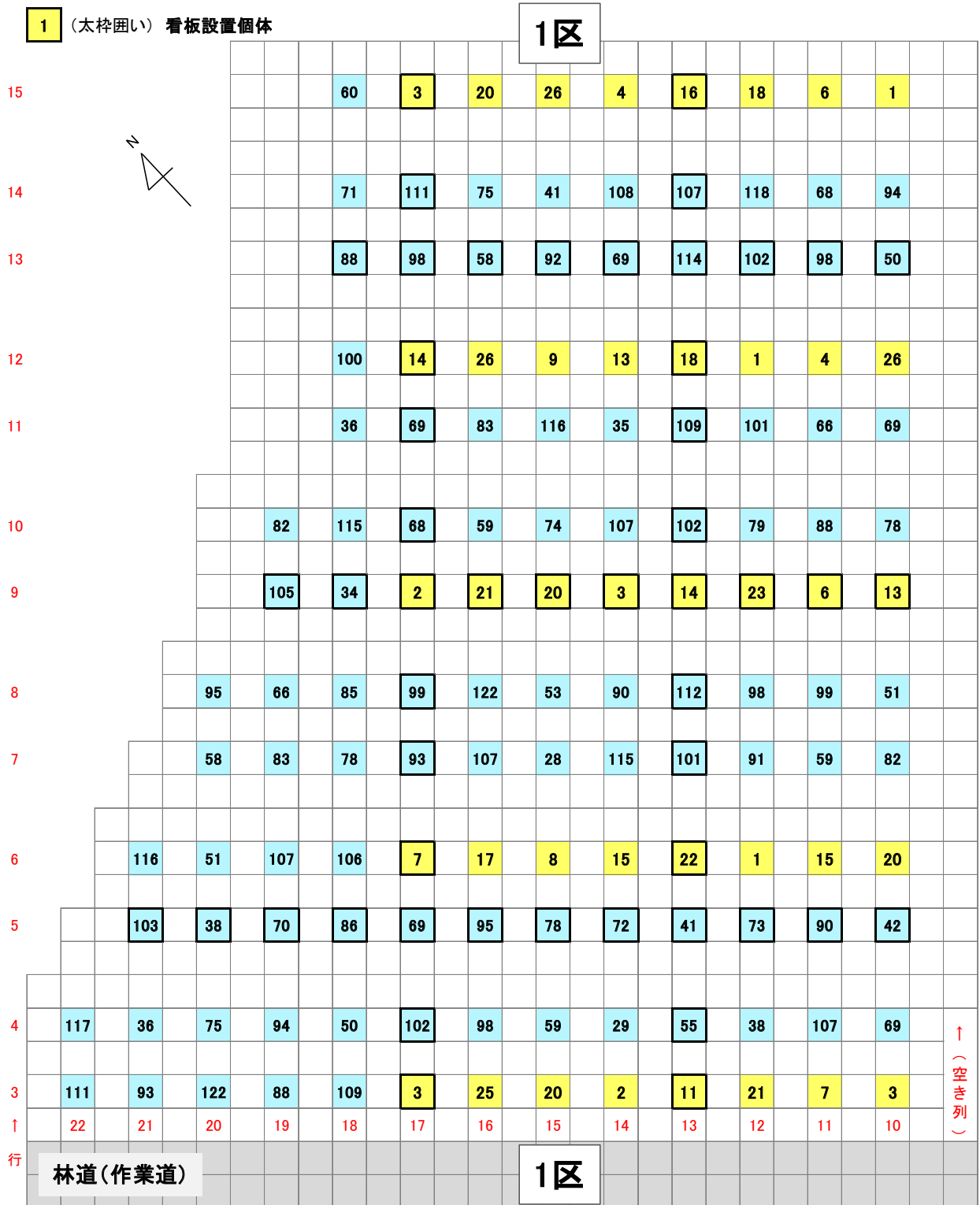
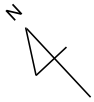


図-12 大沢トドマツ採種園の配植図 (保存版)

1マスを2mの縮尺で表す。配植図の凡例は図中左上に示す通り。外縁に付した数字は、図面縦方向の連番が行番号、横方向の連番が列番号を示す。



面積：1.15ha (1区 0.576ha, 2区 0.579ha)
 植栽数：490本(1区 254本, 2区 236本)
 植栽仕様：苗間 4m, 植栽幅 4m, 6m
 配植仕様：25型, 全138クローン系統

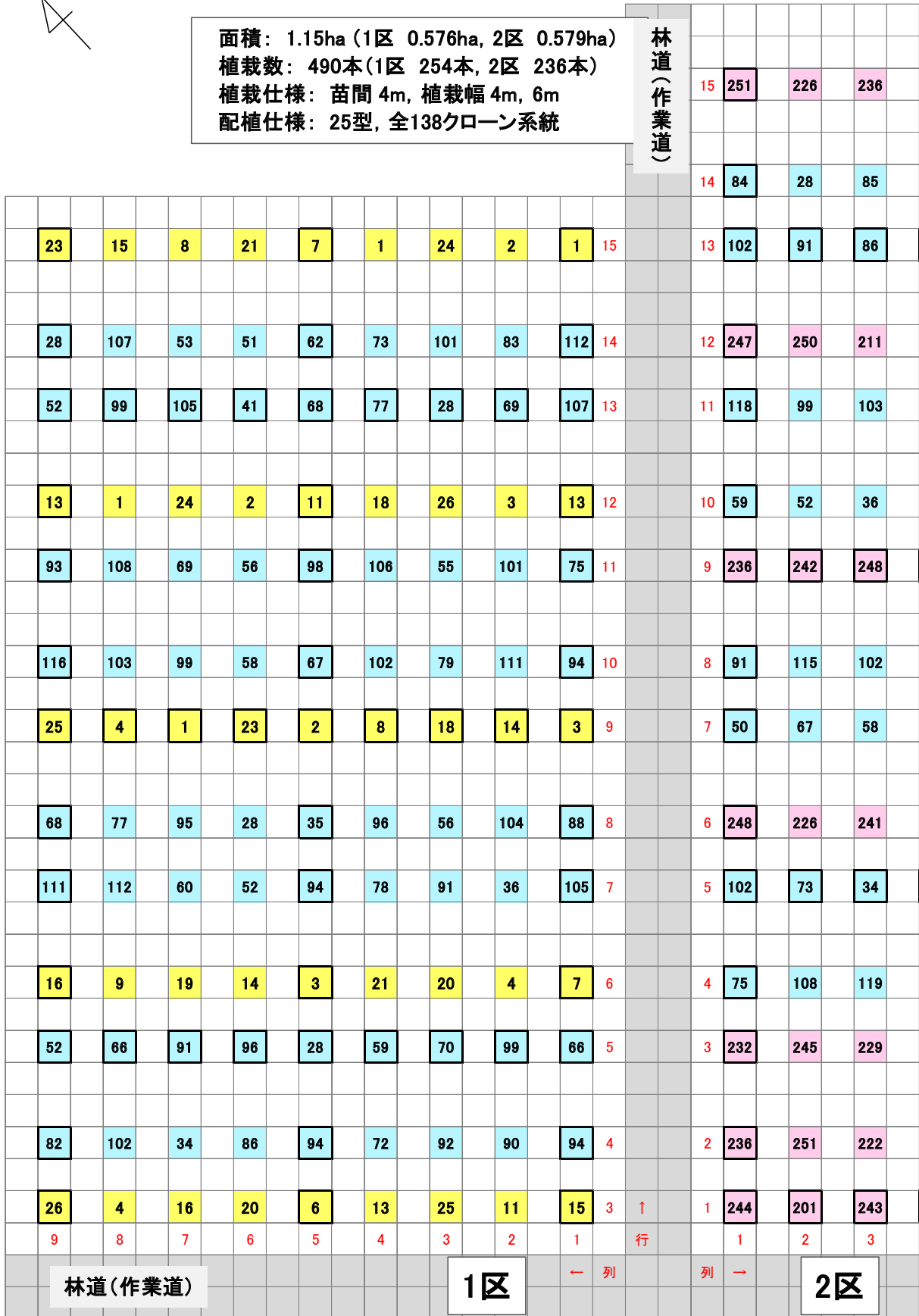


図-12

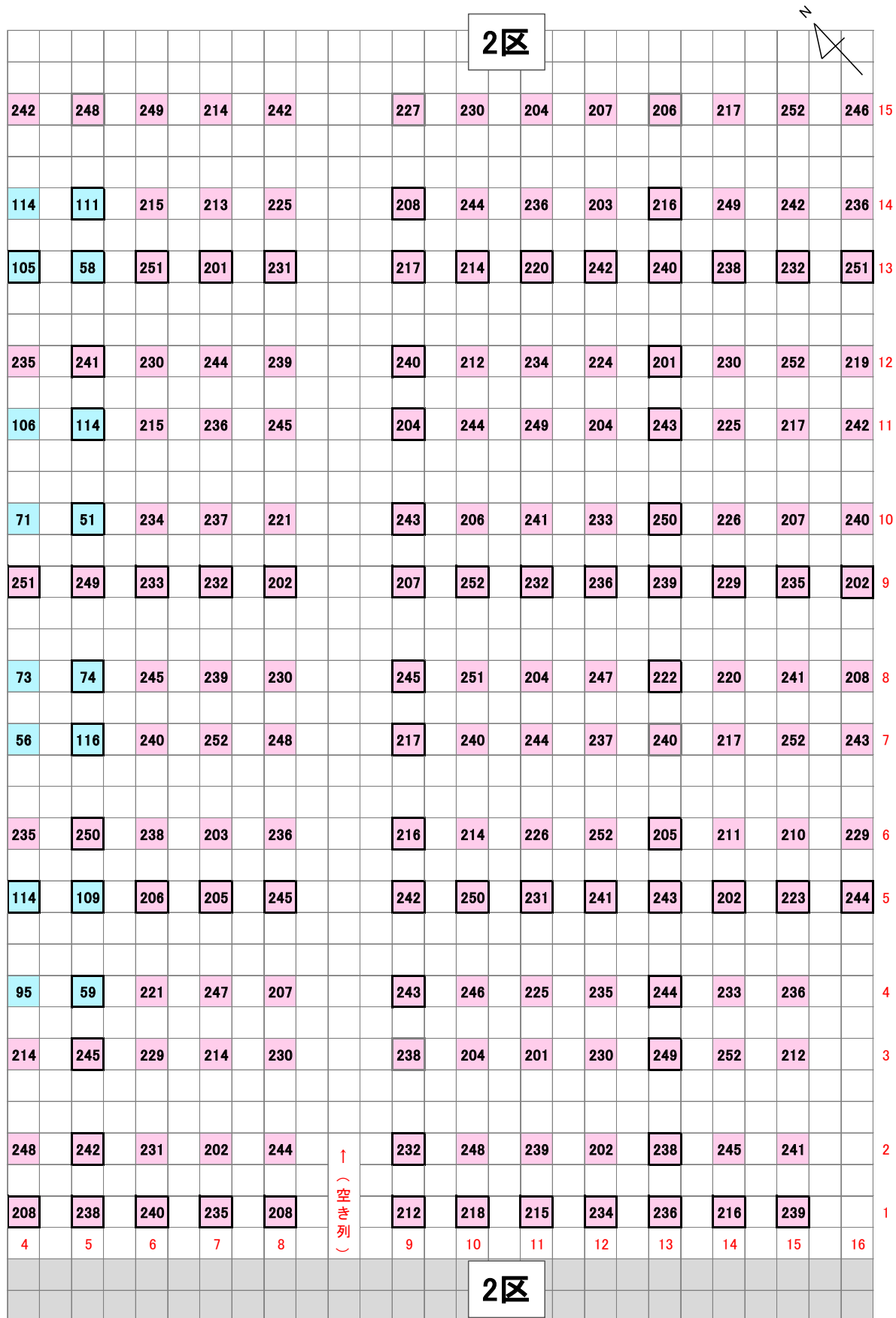


図-13 大沢トドマツ採種園の配植図の続き
配植番号の対応表と植栽数も合わせて掲載する。

配植番号対応表

第二世代(人工交配)

#	クローン	数
1	トドマツ北育2-1	7
2	トドマツ北育2-2	5
3	トドマツ北育2-3	7
4	トドマツ北育2-4	5
6	トドマツ北育2-6	3
7	トドマツ北育2-7	4
8	トドマツ北育2-8	3
9	トドマツ北育2-9	2
11	トドマツ北育2-11	3
13	トドマツ北育2-13	5
14	トドマツ北育2-14	4
15	トドマツ北育2-15	4
16	トドマツ北育2-16	3
17	トドマツ北育2-17	1
18	トドマツ北育2-18	4
19	トドマツ北育2-19	1
20	トドマツ北育2-20	6
21	トドマツ北育2-21	4
22	トドマツ北育2-22	1
23	トドマツ北育2-23	3
24	トドマツ北育2-24	2
25	トドマツ北育2-25	3
26	トドマツ北育2-26	5
合計		85

※全て 1区に配植

第二世代(採種園産open)

#	クローン	数	1区	2区
28	トドマツ北育2-28	6	5	1
29	トドマツ北育2-29	1	1	0
34	トドマツ北育2-34	3	2	1
35	トドマツ北育2-35	2	2	0
36	トドマツ北育2-36	4	3	1
38	トドマツ北育2-38	2	2	0
41	トドマツ北育2-41	3	3	0
42	トドマツ北育2-42	1	1	0
50	トドマツ北育2-50	3	2	1
51	トドマツ北育2-51	4	3	1
52	トドマツ北育2-52	4	3	1
53	トドマツ北育2-53	2	2	0
55	トドマツ北育2-55	2	2	0
56	トドマツ北育2-56	3	2	1
58	トドマツ北育2-58	5	3	2
59	トドマツ北育2-59	6	4	2
60	トドマツ北育2-60	2	2	0
62	トドマツ北育2-62	1	1	0
66	トドマツ北育2-66	4	4	0
67	トドマツ北育2-67	2	1	1
68	トドマツ北育2-68	4	4	0
69	トドマツ北育2-69	7	7	0
70	トドマツ北育2-70	2	2	0
71	トドマツ北育2-71	2	1	1
72	トドマツ北育2-72	2	2	0
73	トドマツ北育2-73	4	2	2
74	トドマツ北育2-74	2	1	1
75	トドマツ北育2-75	4	3	1
77	トドマツ北育2-77	2	2	0
78	トドマツ北育2-78	4	4	0
79	トドマツ北育2-79	2	2	0
82	トドマツ北育2-82	3	3	0
83	トドマツ北育2-83	3	3	0

優良木

#	クローン	数	#	クローン	数		
84	トドマツ北育2-84	1	0	1	201	トドマツ優良木-01	4
85	トドマツ北育2-85	2	1	1	202	トドマツ優良木-02	5
86	トドマツ北育2-86	3	2	1	203	トドマツ優良木-03	2
88	トドマツ北育2-88	4	4	0	204	トドマツ優良木-04	5
90	トドマツ北育2-90	3	3	0	205	トドマツ優良木-05	2
91	トドマツ北育2-91	5	3	2	206	トドマツ優良木-06	3
92	トドマツ北育2-92	2	2	0	207	トドマツ優良木-07	4
93	トドマツ北育2-93	3	3	0	208	トドマツ優良木-08	4
94	トドマツ北育2-94	6	6	0	210	トドマツ優良木-10	1
95	トドマツ北育2-95	4	3	1	211	トドマツ優良木-11	2
96	トドマツ北育2-96	2	2	0	212	トドマツ優良木-12	3
98	トドマツ北育2-98	5	5	0	213	トドマツ優良木-13	1
99	トドマツ北育2-99	6	5	1	214	トドマツ優良木-14	5
100	トドマツ北育2-100	1	1	0	215	トドマツ優良木-15	3
101	トドマツ北育2-101	4	4	0	216	トドマツ優良木-16	3
102	トドマツ北育2-102	8	5	3	217	トドマツ優良木-17	5
103	トドマツ北育2-103	3	2	1	218	トドマツ優良木-18	1
104	トドマツ北育2-104	1	1	0	219	トドマツ優良木-19	1
105	トドマツ北育2-105	4	3	1	220	トドマツ優良木-20	2
106	トドマツ北育2-106	3	2	1	221	トドマツ優良木-21	2
107	トドマツ北育2-107	7	7	0	222	トドマツ優良木-22	2
108	トドマツ北育2-108	3	2	1	223	トドマツ優良木-23	1
109	トドマツ北育2-109	3	2	1	224	トドマツ優良木-24	1
111	トドマツ北育2-111	5	4	1	225	トドマツ優良木-25	3
112	トドマツ北育2-112	3	3	0	226	トドマツ優良木-26	4
114	トドマツ北育2-114	4	1	3			
115	トドマツ北育2-115	3	2	1			
116	トドマツ北育2-116	4	3	1			
117	トドマツ北育2-117	1	1	0			
118	トドマツ北育2-118	2	1	1			
119	トドマツ北育2-119	1	0	1			
122	トドマツ北育2-122	2	2	0			
合計		209	169	40			

※全て 2区に配植

事業的採種にあたっては、①両区にまたがって採種を行い、②多くの母樹から採種を行うこと、③収穫したすべての種子を均等に混合して保管・配布すること、の3点に配慮すべきである。また、高所作業車等を用いて採種する場合、④走行路の両側の母樹から採種すること、も配慮したい。こうすることで高い遺伝的多様性が担保された優良種子の配布につながるだろう。とくに④の項目は、1区の間伐（図面の横方向）に沿って車両を用いる場合に必須の方策である。

将来、植栽個体の成長に伴い、間伐の必要性が生じるが、25型設計の採種園のため、最も伐採本数が多い初回間伐を定量間伐で済ませることができる。ここでは図面の縦方向に間伐列を設定し、30%間伐を想定した場合には2残1伐の列状間伐を、50%間伐を想定した場合には1残1伐の列状間伐を行うことを推奨したい。設計上、図面の横方向（行）の間伐は系統の構成を著しく改変する恐れがあるために向かない。初回の定量間伐以降は、千鳥配置に向けて斜め方向の定量間伐を行っても良いし、樹勢と近隣のクロンの現存状況を加味しながら定性間伐を繰り返しても良いだろう。もしくは、将来のさらなる検定結果によっては、改植や排除などの採種園改良も検討可能である。

上述のような事業・管理をしていくために重要なことは、常に採種園内の個体の配置が明確で、各クロンの系統情報が正確にわかることである。植栽木の一部に看板は設置したが、これもいずれ更新・補強を図る必要があるだろうし、全木に設置する必要もあるだろう。また、現在の看板は、苗木が小さいため植栽木付近へ設置しているが（写真-1参照）、将来、植栽木が大きくなった後には、幹へ直接設置するのが望ましい。また、採種園自体の維持管理はことさらに重要であり、とくに下刈り、除伐や獣害・雪害対策の継続実施が求められる。



写真-1 造成後の採種園1区（2017年10月5日撮影）

謝辞

配植設計にあたり、北海道立総合研究機構林業試験場の黒丸亮氏に助言をいただいた。クロン苗増殖と植栽にあたり、森林総合研究所林木育種センター北海道育種場の千葉信隆氏およびその他スタッフに協力賜った。採種園の用地整備から造成にかけて、北海道庁水産林務部森林整備課、渡島総合振興局西部森林室、渡島総合振興局林務課のスタッフに協力賜った。この場を借りてお礼申し上げる。

引用文献

- 千葉信隆（2014）ランダム配置ソフト「MIX-WEX」のご紹介。東北の林木育種, 206:5.
- 藤澤義武（2012）林木育種の実践。井出雄二・白石進編, 森林遺伝育種学 9-62. 文永堂, 東京.
- 藤澤義武（2014）林木育種の現場のABC（8）採種園（造成準備）。森林遺伝育種 3:179-184.
- 廣澤忠・佐々木啓二・渡辺弘二・井本正幸・黒丸亮（2001）多雪地帯におけるトドマツの産地による造林成績の違い。北海道の林木育種, 43(2):9-11.
- 北海道（2015）北海道採種園整備方針。札幌.
- 石塚航（2016）長期移植試験が語る北方針葉樹トドマツの局所適応。森林科学, 78:32-35.
- 石塚航・今博計・来田和人（2015）根釧地域におけるトドマツ第2世代精英樹の選抜。光珠内季報 176:9-16.
- 国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所林木育種センター 編（2017）主な開発品種。平成29年版2017年報 森林総合研究所林木育種センター, <https://www.ffpri.affrc.go.jp/ftbc/business/issue/nenpou/2017/documents/zentaiban.pdf>（2017.11/15確認）.
- 黒丸亮（1998）造林木の品種改良はここまで進んだトドマツ。カラマツ育種種苗の評価と改良。光珠内季報, 110:1-4.
- 永田義明・西岡利忠（1997）北海道林木育種協会創立40周年記念座談会。北海道の林木育種, 40(1):13-28.
- 中田了五・坂本庄生・西岡直樹・花岡創・来田和人・今博計・石塚航・黒丸亮（2018）次代検定林の成績によるトドマツ精英樹集団からの優良系統の選抜。森林総合研究所研究報告, 印刷中.
- 大谷雅人・田村明・矢野慶介・西岡直樹・上田雄介・坂本庄生・植田守・佐藤亜樹彦・湯浅真・井上晃・来田和人・今博計・黒丸亮（2015）北海道育種基本区における第2世代精英樹候補木の選抜－平成26年度の実施結果－。平成27年版2015年報 森林総合研究所林木育種センター, <https://www.ffpri.affrc.go.jp/ftbc/business/issue/nenpou/2015/2015.html>（2017.11/15確認）.
- 林業研究・技術開発推進北海道ブロック会議育種分科会

(2017) 北海道育種基本区林木育種推進計画.

林野庁 (1987) 林木育種協会・日本造林協会編集 林木育種事業30年の歩み. 208pp. 林木育種協会刊, 東京.

白石進 (2016) 森林の更新方法—林木育種—. 丹下健・小池孝良編, 造林学第四版, 124-136. 朝倉書店, 東京.

高橋誠 (2002) 採種園設計のためのVisual Basicプログラム「Mixed」の開発・評価と設計の作業効率に影響する要因, 日本森林学会誌, 84:239-245.

田村明・山田浩雄・福田陽子・矢野慶介・阿部正信・竹田宣明・上田雄介・来田和人・今博計 (2012) 北海道育種基本区における第2世代精英樹候補木の選抜—平成23年度の実施結果—. 平成24年版2012年報 森林総合研究所林木育種センター, 26-30.

田村明・山田浩雄・福田陽子・矢野慶介・植田守・阿部正信・竹田宣明・大城浩司・佐々木洋一・佐藤亜樹彦・織田春樹・小園勝利・渡邊謙・来田和人・今博計 (2013) 北海道育種基本区における第2世代精英樹候補木と準次代検定林からの優良木の選抜—平成24年度の実施結果—. 平成25年版2013年報 森林総合研究所林木育種センター, <https://www.ffpri.affrc.go.jp/ftbc/business/issue/nenpou/2013.html> (2017.11/15確認).

田村明・山田浩雄・福田陽子・矢野慶介・竹田宣明・大城浩司・上野義人・植田守・佐藤亜樹彦・湯浅真・上田雄介・佐藤新一・織田春樹・黒丸亮・来田和人・今博計 (2015) 北海道育種基本区における第2世代精英樹候補木と優良木の選抜—平成25年度の実施結果—. 平成26年版2014年報 森林総合研究所林木育種センター, <https://www.ffpri.affrc.go.jp/ftbc/business/issue/nenpou/2014.html> (2017.11/15確認).

White T.L., Adams W.T., Neale D.B. (2007) Deployment - open-pollinated varieties, full-sib families and clones. *In* White et al. Forest genetics, 439 - 477. CAB International, London, UK.

keywords

seed orchard, planting design, *Abies sachalinensis*, full-sib, half-sib, inbreeding depression