



焼却灰由来の再生利用砂と石粉を用いた 植生土の性能評価

Performance Evaluation for the Vegetation Soil using
the Reuse Sand of Clinker Ash and the Sludge Cake of Stone Dust

今井忠男*・三浦卓弥**・木崎彰久***・近藤洋司****

by Tadao IMAI, Takuya MIURA, Akihisa KIZAKI and Yoji KONDO

原稿受理 2025 年 5 月 12 日 Received May 12, 2025

1. はじめに

一部の採石場では、発電所や工場から排出される焼却灰を、産業廃棄物の処分場として受け入れが進んでいる。さらに、受け入れた焼却灰は、破碎・分級処理し、再生利用砂として販売する試みも行われている。現在、再生利用砂の用途は、ほぼ建設用土に限られているが、著者らは、これに自社の砕砂プラント等から排出される石粉(脱水ケーキ)を配合し、植生土として活用する方法を検討してきた¹⁾。この植生土は、自社採石場の緑化用植生土として利用できることから、このように同一敷地内での再利用サイクルが確立されれば、廃棄物の処分量を減少させることができ、今後は、外部での利用も進められると考えられる。

著者らの研究によって、クリンカアッシュを原料とする再生利用砂に石粉を質量比で30% (以降は配合比10:3と表記)に配合すると、植生土としての物理特性(支持力、透水性、保水性)および土性が、適切な範囲となることがわかってきた¹⁾。本研究では、この植生土を用いて、これに中性化剤としてのピートモス(泥炭)および化学肥料を配合して、野芝を栽培し、植生土としての能力を評価するとともに、配合物の適切な配合条件を提案することを目的とした。以下にその詳細を述べる。

2. 法面緑化における野芝の栽培条件について

(1) 発芽および生育条件

日本では、以前から法面の緑化には、自然環境への耐性強い野芝(日本芝)が用いられてきており、この野芝についての最適な発芽および生育の条件については、詳細な研究がなされてきた²⁾。その条件を表1にまとめて示す^{2, 3)}。特に、発芽時期と育成時期とは、適切な土壌含水率に違いがあり、発芽時期は土中の水分が飽和し、種子が浸水した状態が良いが、発芽した

後の育成時期では、土壌飽和状態の70~60%の含水率が適している。また、栽培温度は、土壌温度が30℃程度が最も発芽・生育に良いことがわかっている。さらに、芝類は好光種子なので、発芽時期も光を当てると良い。また、芝は中性から弱酸性領域で生育しやすく、アルカリ性土壌には適していないため、アルカリ性土壌は中性化する必要がある。通常、野芝の種子は、適温に浸水してから5日程度で発芽が始まり、10日程度で発芽が完了する²⁾。ここで、野芝の最終発芽率は80%程度が見込まれる³⁾。本研究では、これらの条件を元に、栽培条件および観察条件を決定した。

(2) 植生土の条件

表2に、普通畑における植物栽培に関する力学的物性の諸基準値をまとめて示す^{4, 5)}。この表の基準値が示すように、畑作に適した土壌は、透水性と保水性が良いという、相反した物性を満たさなければならない。そのためには、土壌が団粒構造と呼ばれる、保水性の良い小さな塊を形成する必要がある。その特性を示す指標が土性であり、土性が砂壤土・壤土に分類される土壌が好ましい。この土性を決める要因は、粘土の含有率とその他の土壌粒子の粒度分布である。再生利用砂の粒度分布を適切にし、粘土分を含む石粉とを適量配合すれば、畑作に適した土壌を作製できる可能性がある¹⁾。

3. 実験方法

3.1 試料

本実験で作製した植生土は、表3および写真1に示すように、火力発電所での石炭の焼却灰として排出されたクリンカアッシュと、安山岩の砕石プラントの排水処理施設から排出される脱水ケーキ(石粉)の2つを原料とした。主原料のクリンカアッシュは、破碎プラントによって、粒度分布が0.1~5 mm(平均0.7 mm)となるように、破碎および分級したものを利用した¹⁾。石粉は、砕石の生産工程で排出される脱水ケーキを乾燥したものを、そのまま石粉(平均粒径0.18 mm、安山岩)として利用した。これらクリンカアッシュと石

* 秋田大学大学院 教授 国際資源学研究科 (〒010-0852 秋田市手形学園町 1-1)、** 元秋田大学 4 年生、*** 秋田大学大学院 准教授、**** 辻村建設株式会社

表1 野芝の発芽および生育条件^{2, 3)}

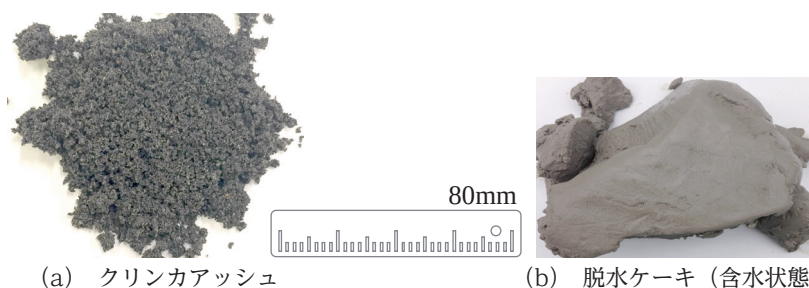
成長過程	土壌含水率(%)	土壌温度(℃)	土壌pH	照度 (lx)
発 芽	飽和状態	15～35	4.0～6.5	> 700
生 育	70～60%飽和状態	20～35	4.0～6.5	> 700

表2 植生土の基準物性値^{4, 5)}

植生土	土性	保水性 RAW(mm/40cm)	透水性 k(cm/s)	支持力 q _c (kPa)	pH
普通畑基準値	砂壤土・壤土	20	10 ⁻³ ～10 ⁻⁴	1078～2450	5.0～7.5

表3 植生土に利用した原料

試 料	排出場	原材料	pH	加工後の性状
クリンカアッシュ	火力発電所	石炭	8.3	砂状
石粉（脱水ケーキ）	砕石プラント	安山岩	8.3	粘土状



(a) クリンカアッシュ

(b) 脱水ケーキ（含水状態）

写真1 植生土の原料

表4 クリンカアッシュ内の肥料成分

窒素全量 (%)	リン酸全量 (%)	カリウム全量 (%)
0.010	0.052	0.016

表5 クリンカアッシュと石粉による配合土の基礎物性値と土性¹⁾

配合比	最適含水比 (%)	支持力 q _c (kPa)	透水係数 k(cm/s)	保水性 RAW(mm/40cm)	土性
10 : 3	14.1	1400	2.46×10 ⁻⁵	38	砂壤土
10 : 4	14.4	1400	8.82×10 ⁻⁵	32	砂壤土

粉は、両者ともに弱アルカリ性(pH8.3)であることから、植物栽培には、中性化の処理が必要と思われる。

次に、クリンカアッシュの肥料成分の分析を表4に示す。この分析表より、このクリンカアッシュには、窒素、リン酸、カリウムが非常に微量であるが成分として含まれることが確認できた。これら肥料成分が、土中に溶出しやすいかどうかは不明であるが、植物の肥料分として利用できる可能性はある。なお、このクリンカアッシュは、「環境庁告示46号」による溶出試験を行い、指定の29項目のうち、銅、クロロエチレン、1,4ジオキサンを除く26項目について分析し、基準値以下あるいは検出されないことを確認した。

3.2 植生土の作製

(1) 植生土の力学物性

著者らは、これまでクリンカアッシュと石粉を用いて、植生土に適した土壌の作製方法を研究してきた。その結果、表5のようなクリンカアッシュと石粉との配合比において、物理的に畑作に適した土壌が作製できることを示してきた¹⁾。配合比10:3および10:4の土壌を比較すると、10:3の方が透水性が良く、より植生土に適していると考えられる。本実験では、この2つの配合比の土壌を用いて野芝の栽培実験を行ない、両者の比較を行なった。

(2) 土壌pHの条件

本実験で用いる土壌は弱アルカリ性のため、野芝が生育しやすいように、ピートモス(泥炭、pH4.0±

0.5)を用いて、中和および酸性化させた。ピートモスは、土壌の酸性化に最も用いられる添加物である。図1に本植生土にピートモスを配合した時の土壌pHの変化を示す。ただし、配合比10:3と10:4の土壌pHは、ほぼ一致したので、その平均値を示した。図より、本土壌を野芝生育の適正pHにするには、ピートモスを約8%以上添加することが望ましい。

(3) 施肥量の条件

肥料の効果を調べるため、表6に示す化学肥料⁶⁾を用いて、施肥を行なった。本化学肥料の適正な施肥量は、9 g/m²とされているので⁶⁾、栽培用プランターの最大径に合わせて施肥量を算定し、土壌に配合した。

(4) 栽培用土壌の作製条件

野芝の栽培用土壌には、表7に示すように、クリンカアッシュ、石粉、ピートモス、化学肥料を、それぞれ配合・添加した32個の試料を用意し、それぞれ最適含水比で練り上げた。各土壌は、約950 g程度をそれぞれ4号プランター(最大径約10 cm)に1/3ずつ投入し、3層ごとに木槌を用いて締め固め、見掛け密度を同じくしてから、コーン貫入試験によって支持力を測定し、初期の硬さを統一した。その後、プランターに給水して十分に飽和させた。また、対照試料として芝の播種専用土壌(市販品)も用いて試験した。

3.3 植生環境および実験装置

(1) 播種条件

野芝の発芽数をカウントしやすくするため、1プラ

表6 芝用化学肥料の組成と適正施肥量⁶⁾

窒素全量 (%)	リン酸全量 (%)	カリウム全量 (%)	適正施肥量 (g/m ²)
15	15	10	9

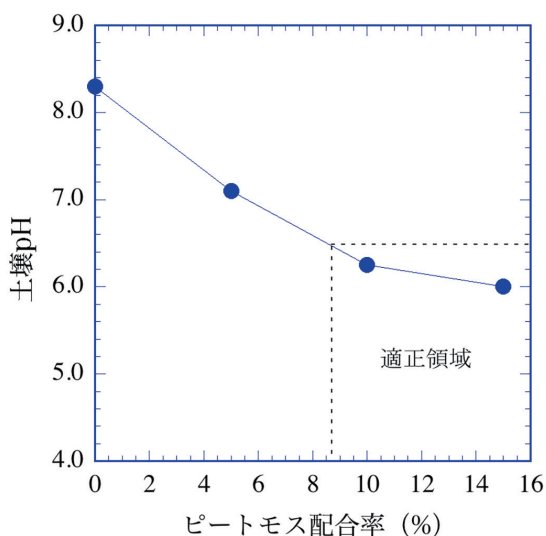


図1 ピートモスによる土壌 pH の改善

表7 植生土の配合条件

クリンカアッシュへの配合物	配合条件
石 粉	配合比 10:4、 10:3
ピートモス (%)	0、 3、 5、 10
化学肥料 (g/m ²)	0、 2.5、 12.5、 62.5

ンターあたり、播種数を50個とした。写真2に播種の状況を示す。50個の種子は、プランター中心部の直径約5 cmの範囲に播き、播種密度を約15,000個/m²として、芝の適切な播種密度18,000個/m²に近づけた。

(2) 恒温室による人工栽培環境

栽培環境については、表8に示す条件を一定に管理するため、恒温室を用いた人工的な栽培環境を作った。写真3(a)に示すように、8個のプランターを1セットとし、LEDライト(オーム電機社製、8 W)によって、1日12時間、700 lx以上の光を照射した。また、恒温室内は、1台のオイルヒーター(PHILIPS社製、1.3 kW)によって室温を管理した。さらに、写真3(b)に示すように、土壤中の温度および含水率をセンサー

(DECAGON社製、5 TM)によって測定および管理し、データロガーおよびPCによって記録した。各プランターは、発芽期には、透明ビニールで覆って乾燥を防ぎ、適宜、水分を供給して土壌含水率を管理した。

(3) 発芽および生育に関する測定方法

播種日を0日とし、その日からプランターに播種した50粒の種子の様子を毎日観察した。この他に、写真4に示すように発芽の観察用にビーカー内の含水させたガーゼに播種した試料も観察した。

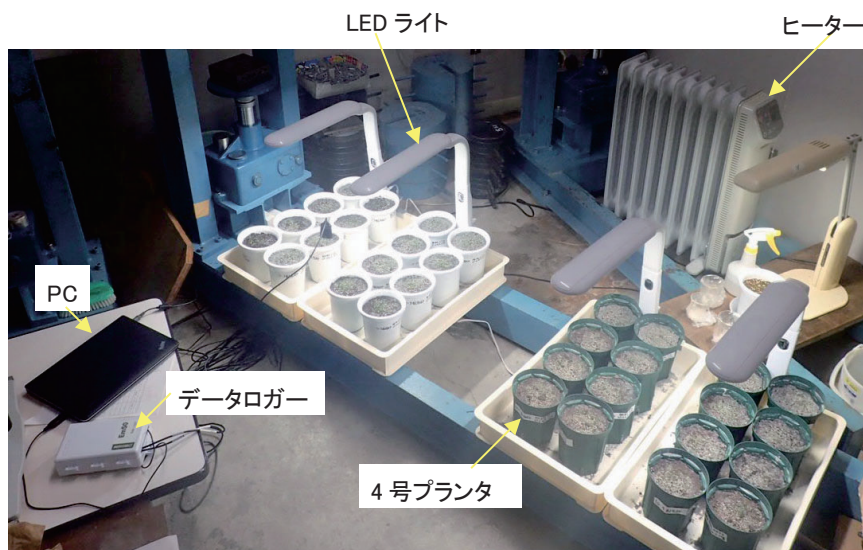


写真3(a) 恒温室内の野芝生育実験装置

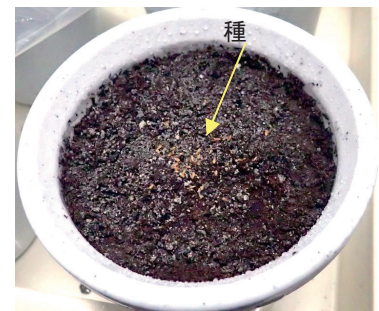


写真2 播種範囲（中心φ 5 cm、50 粒）

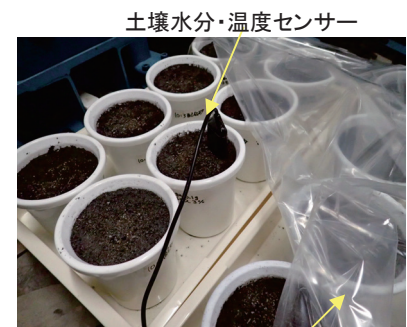


写真3(b) プランター周辺の拡大

表8 野芝の栽培実験の条件

土壌温度 (°C)	土壌含水率(体積率) (%)	播種量 (粒)	日照時間 (hour)	支持力 (kPa)	空気湿度 (%)	照度 (lx)
25	発芽期 約30%(飽和) 育成期 約21~18%	50	12	360	50%以上	700以上

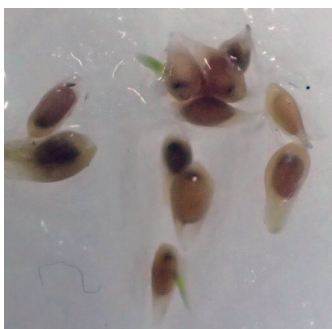


写真4 発芽個数の測定例
(ビーカー内)



写真5 草丈の測定例



写真6 根長の測定例
(28日目)

次に、種子が発芽した後は、写真5に示すように芝の草丈を毎日測定した。草丈は、バラツキが多いので、1プランターあたり任意に10本程度を測定し、その平均値をその土壌試料における草丈とした。また、写真6に示すように、根長の測定は、芝を引き抜いて測定しなければならないので、生育途中での測定はせず、実験終了時にまとめておこなった。

4. 実験結果および考察

4.1 生育環境のコントロール状況

本実験は、秋田市の厳寒期である、平成28年12月24日に開始し(播種)、平成29年2月21日に終了した。図2に、プランター中の土壌温度および恒温室内の室内温度について、実験開始日(播種日)から実験終了日までの経時変化を示す。図より、実験期間中、室温は最大26~33℃まで7℃程度変化したが、概ね平均値の28℃付近で制御できた。さらに、土壌温度も最

大23~30℃まで7℃程度変化したが、概ね平均値の26℃付近で制御できたことから、本実験では、実験期間中、土壌温度の設定値25℃で野芝を栽培できたといえる。

次に、図3に実験期間中における土壌含水率(体積率)の経時変化を示す。図より、土壌含水率について、発芽期は飽和状態(30%)に近い28%程度に保持でき、その後は、自然乾燥によって含水率を下げ、適正な範囲(21~18%)になるよう含水させた。ただし、通常、野芝の発芽期は最大で10~20日程度であるが、本実験では発芽率が低かったため、発芽期を長めにとり、発芽を促した。

4.2 発芽過程

写真7に、各土壌において芝が発芽したときの様子を示す。このときの土壌の条件は、石粉の配合比10:3、施肥量12.5 g/m²である。ピートモスの配合によって、各プランターの土壌pHはアルカリから酸性ま

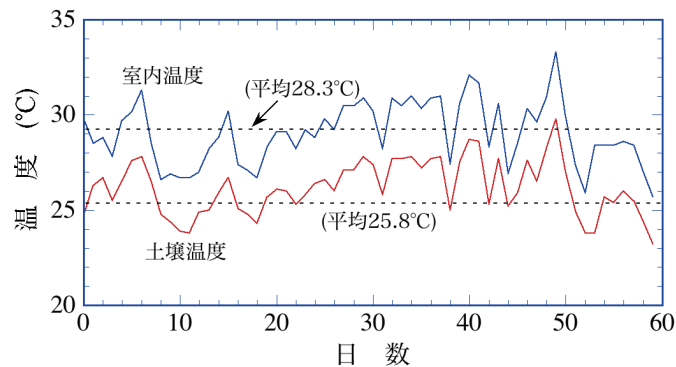


図2 土壌および恒温室内の温度制御過程

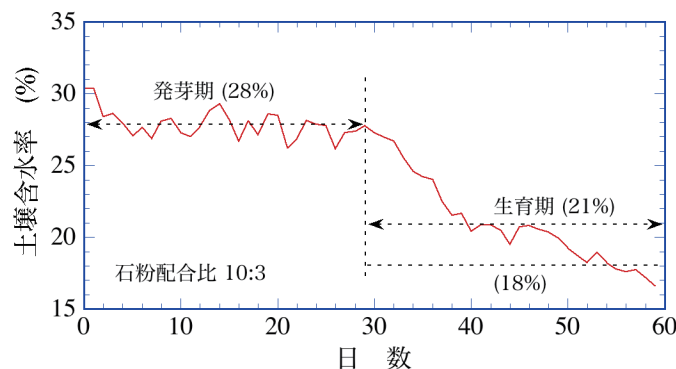


図3 土壌含水率(体積率)の制御過程



ピートモス 0% (pH8.3)



ピートモス 3% (pH7.6)



ピートモス 5% (pH7.1)



ピートモス 10% (pH6.3)

写真7 発芽初めの様子(配合比10:3、施肥量12.5 g/m²)

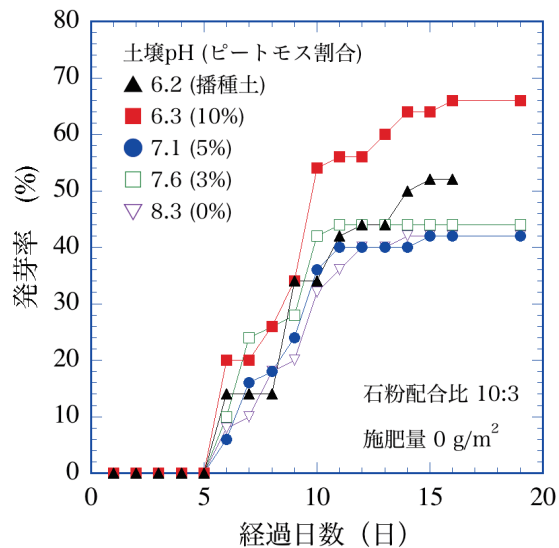
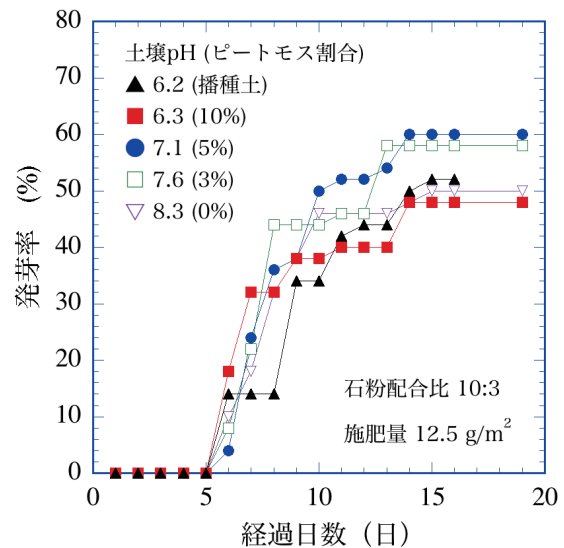
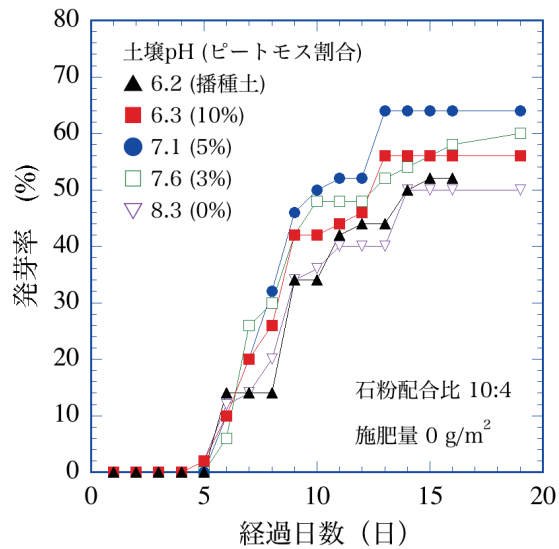
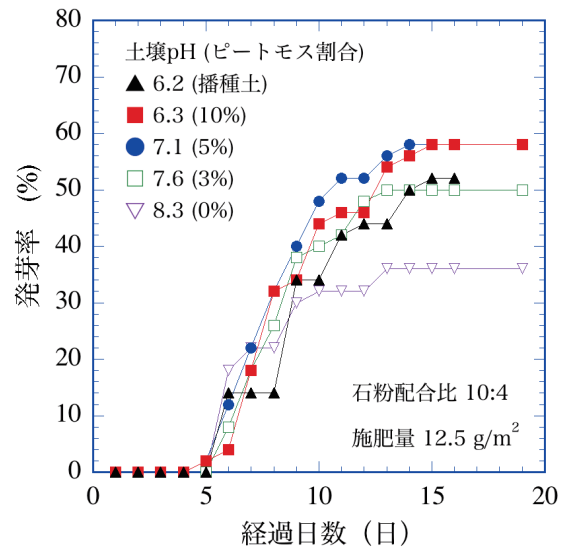
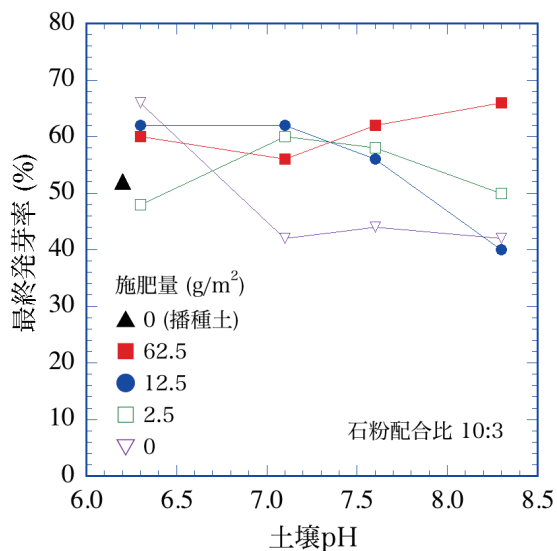
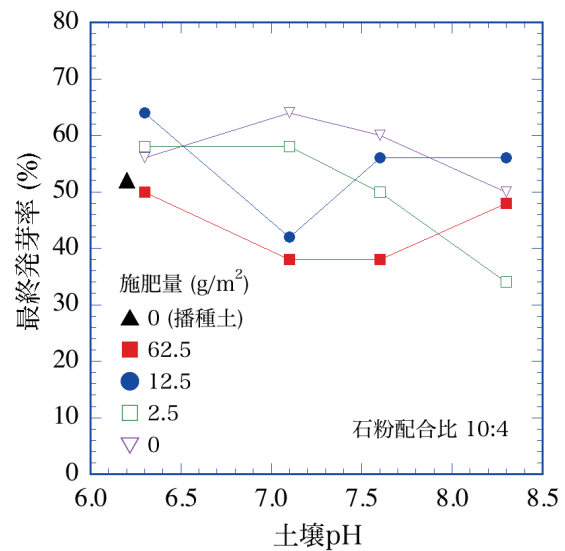
(1) 石粉配合比 10 : 3、施肥量 0 g/m²(2) 石粉配合比 10 : 3、施肥量 12.5 g/m²(3) 石粉配合比 10 : 4、施肥量 0 g/m²(4) 石粉配合比 10 : 4、施肥量 12.5 g/m²

図4 発芽率の経時間変化



(1) 石粉配合比 10 : 3



(2) 石粉配合比 10 : 4

図5 最終発芽率に及ぼす土壌 pH および化学肥料の影響

で異なるが、どのプランターからも発芽した。次に、図4(1)～(4)に、各土壌条件での発芽率の経時間変化を示す。図4(1)では(石粉配合比10:3、施肥量0 g/m²)、発芽は、6日目から開始し、11～15日目まで続いた。最終発芽率は、42～66%とプランターごとの差が大きかったが、土壌pHと強い関係は見られなかった。参考データとして、市販の播種土の最終発芽率は52%、ピーカーでは46%であることから、本種子の発芽率は低いと考えられる。次に、図4(2)のように(石粉配合比10:3、施肥量12.5 g/m²)、適量な施肥をした土壌においても、最終発芽率は48～60%とあまり変化しなかった。さらに、図4(3)および図4(4)においても(石粉配合比10:4)、最終発芽率は48～60%であり、施肥の有無で大差はなかった。これらのデータから、最終発芽率に対する土壌pHおよび施肥量の関係を図5(1)(2)に示す。石粉配合比10:3および10:4とも、土壌pHが低い方が、発芽率が良い傾向にあり、施肥量および石粉配合比は影響ないことがわかった。また、発芽率は個別の種子の違いが大きく、50粒ではバラツキが大きい結果となった。

以上のことから、再生利用砂を用いた植生土であっても、土壌pHを中性以下にすれば、市販の播種土と同程度の発芽率が得られることがわかった。

4.3 草丈の生育過程

写真8に、各土壌における播種から60日目(実験最終)の草丈の様子を示す。このときの土壌の条件は、石粉の配合比10:3、施肥量12.5 g/m²である。ピートモス0%で土壌pH8.3のプランターでは、他の土壌pH(7.6～6.3)のプランター内の野芝に比較し、色、草丈など、全体的に発育が悪く見える。他のプランター内の野芝にはあまり差はなく、十分に育成していると思われる。

次に、図6(1)～(4)に、各土壌条件での草丈の経時間変化を示す。図6(1)では(石粉配合比10:3、施肥量0 g/m²)、草丈の成長は、6日目の発芽日から始まり、16日目まで急成長したのち、35日目あたりまで緩やかな成長となり、その後、再び成長速度が増した。この成長曲線の変化は、土壌水分の変化に伴っていると考えられる。具体的には、図3に示したように、

土壌水分は、28日目まで発芽環境(土壌含水率約28%)としており、この水分環境では、芝は生育しにくかったと考えられる。その後、29日目から土壌を乾燥させ、含水率が生育の最適な環境(土壌水分率約21%)に変化できたのは、約38日目であることから、水分の生育環境が整ったのち、また成長が開始したものと考えられる。また、60日目の草丈を比較すると、土壌pHが高いプランターでは、生育が悪いことがわかる。参考データとして、市販の播種土の60日目の草丈は33 mmであり、中性～酸性の再生利用砂の芝と同程度である。

次に、図6(2)のように(石粉配合比10:3、施肥量12.5 g/m²)、適量な施肥をした土壌では、施肥量0に比較し、芝の発育が良いことがわかる。また、図6(3)および図6(4)に示す石粉配合比10:4の土壌においても、60日目草丈について、配合比10:3の土壌と大きな差は見られなかった。

これらのデータから、60日目草丈に対する土壌pHおよび施肥量の関係を図7(1)(2)に示す。石粉配合比10:3および10:4ともに、土壌pHが中性より低ければ、施肥量に関わらず、草丈は播種土の値より大きくなることがわかる。さらに、石粉配合比10:3では、化学肥料を施肥すると、草丈は大きくなる傾向にあるが、配合比10:4では、施肥量の効果はあまりないことがわかる。再生利用砂の土壌は、施肥しなくても、種蒔土と同程度の性能があると考えられる。また、配合比10:4において施肥量の効果がない理由は、不明である。

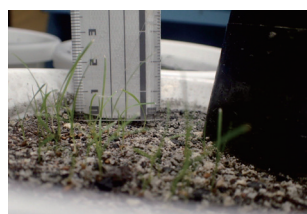
4.4 根長および土壌の固結について

草丈の測定例(写真5)より、栽培28日目では、草丈は約15 mm、根長は約20 mmに成長しており、土壌中の根も良い栽培環境にあることがわかる。28日目までは、土壌は飽和状態に近く軟弱なため、芝を根ごと引き抜くことは容易であったが、生育条件の含水率に変化させると、土壌表面は乾燥し、極めて硬くなることがわかった。そのため、簡単に引き抜くことができず、根は数mmで切れて、完全な状態の根を採取することができなかった。

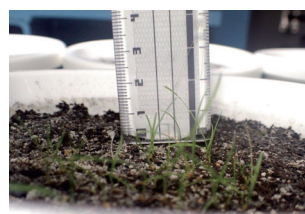
実験終了後、自然乾燥した状態の土壌試料の支持力



ピートモス 0% (pH8.3)



ピートモス 3% (pH7.6)



ピートモス 5% (pH7.1)



ピートモス 10%

写真8 生育60日目(配合比10:3、施肥量12.5 g/m²)

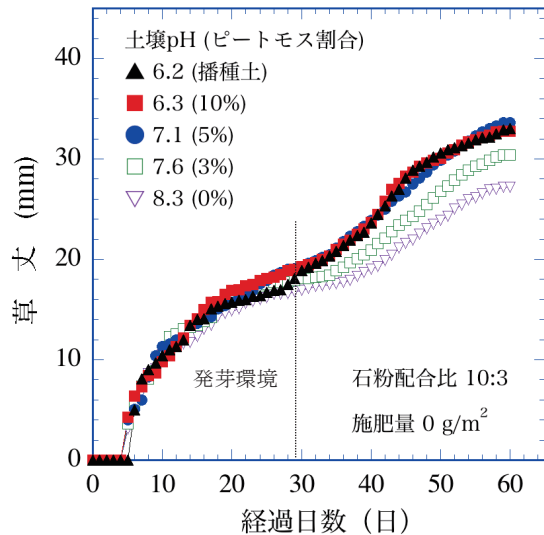
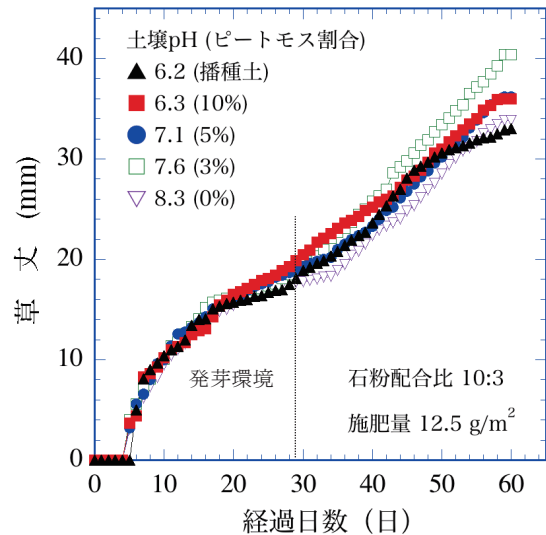
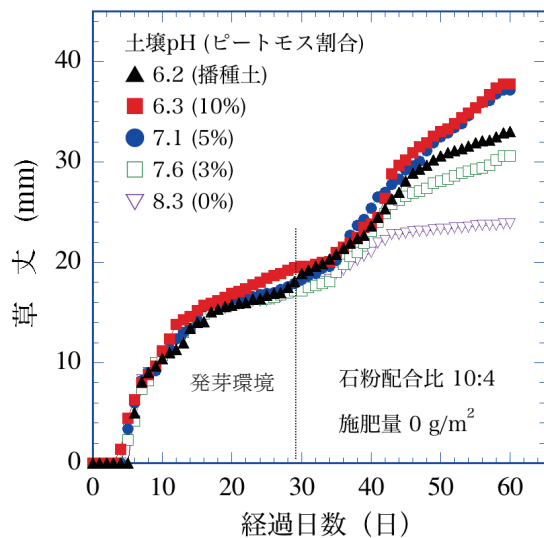
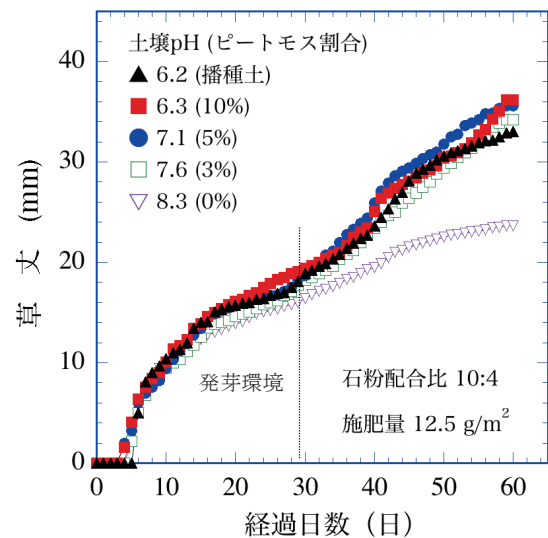
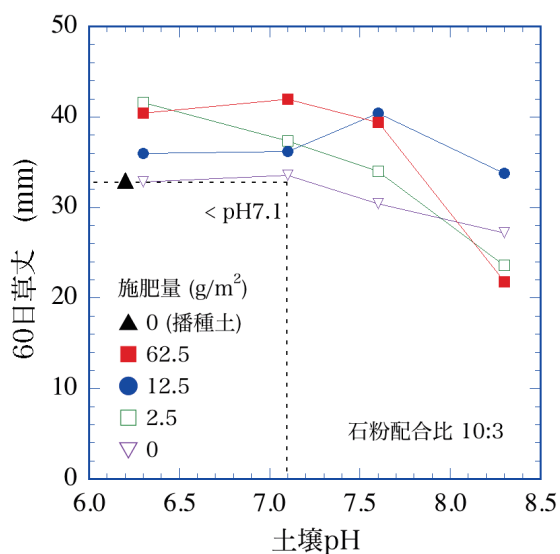
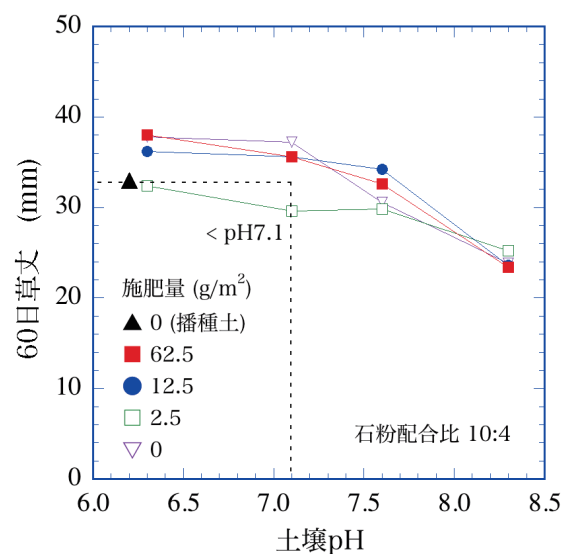
(1) 石粉配合比 10:3、施肥量 0 g/m²(2) 石粉配合比 10:3、施肥量 12.5 g/m²(3) 石粉配合比 10:4、施肥量 0 g/m²(4) 石粉配合比 10:4、施肥量 12.5 g/m²

図6 育成過程における草丈の伸長



(1) 石粉配合比 10:3



(2) 石粉配合比 10:4

図7 60日草丈に及ぼす土壌 pH および化学肥料の影響

表9 本植生土の基準配合条件

石粉配合比	育成評価	ピートモス配合率 (%)	施肥量 (g/m ²)	乾燥時支持力 (kPa)
10:3	播種土並	5% (pH7.1)	0	900
10:4	播種土並	5% (pH7.1)	0	480

を測定した。その結果、本植生土の支持力は、石粉配合比10:3では900 kPa、配合比10:4では480 kPaとなった。この値は、飽和含水状態の支持力(390 kPa)よりも高く、10:3配合土では2倍以上となった。この要因として、土壌の主原料であるクリンカアッシュは、酸化カルシウムを5.9%含んでいるため、乾燥時には粒子が結合して、土壌が強固になったことが考えられる。また、配合比10:4では、あまり支持力が上がらなかった理由は、石粉が多く含まれると、乾燥時の結合が進みにくいためと考えられる。このような本試料が固結しやすい性質を利用することで、本試料は土壌が流出しにくい法面緑化の植生土として、利用価値が高いと考えられる。

4.5 クリンカアッシュを主原料とする最適な植生土の条件

本実験における芝の発芽および生育結果から、再生利用砂を用いた植生土を製造する場合について、基準となる配合条件をまとめて表9に示す。ここでは、播種土と同程度の栽培結果が得られた条件を基準とした。石粉の配合比は10:3および10:4とも、同程度に発芽・育成することから、どちらでも良いと思われる。また、ピートモスを5%配合して、土壌pHを中性に下げた方が良く、施肥は必要ないと思われる。なお、乾燥時の支持力を考えるならば、急傾斜地での利用には、配合比10:3の土壌が良いと言える。

5. まとめ

本研究では、クリンカアッシュを主原料とする再生利用砂を用いて植生土を作製し、これに野芝を栽培して、植生土としての能力を評価するとともに、植生土

としての適切な条件を提案することを目的とした。具体的には、粘土成分としての石粉、中性化剤としてのピートモス(泥炭)および化学肥料を配合して、野芝の栽培実験を行ない、播種土による栽培との比較を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 石粉配合比10:3および10:4の植生土の両方とも、播種土での栽培結果と同程度に野芝は発芽・育成する。
- 2) 初期の本植生土のpHはアルカリ性のため、ピートモスを5%配合し中性化すると、野芝の生育は良い。
- 3) 本植生土は、乾燥すると結合固化するため、配合比10:3の土壌の支持力は高く、急傾斜地での利用にも適している。

引用文献

- 1) 今井忠男、山形悟、木崎彰久、近藤洋司(2023): 焼却灰由来の再生利用砂と脱水ケーキを用いた植生土の開発、建設用原材料、Vol.29、No.1、pp.15-20.
- 2) 新田伸三、小橋澄治(1960): 法面急速緑化工法の基礎的研究I 芝生の発芽生長について、造園雑誌、Vol.24、pp.47-51.
- 3) タキイ種苗(株)(2017): のしば芝太郎(仕様書)
- 4) 林野庁監修(1997): 自然をつくる緑化工ガイド、林業土木コンサルタンツ.
- 5) 農山漁村文化協会編(2009): 土壌診断・育成診断大辞典、pp.109-131.
- 6) (株)花ごころ(2017): まいてすぐ消える芝の肥料(仕様書)