

Application and Consideration of Polylactic Acid Nano Non-woven Fabric Fibers with Improved Melt-blowing Method for Plant Culture Media

Marina YAMAMOTO*, Wei WU**, Toshiki HIROGAKI***, Eiichi AOYAMA⁺ and Hiroyoshi SOTA⁺⁺

(Received May 27, 2022)

In general, soil substitutes, such as rockwool and polyester fiber medium, are used as solid medium for plant cultivation. However, these media are not biodegradable and aggravate environmental pollution. Therefore, replacements with biodegradable materials are necessary. Hence, an improved melt-blowing method has been developed previously that facilitates a stable manufacturing process for the mass production of semi-microfiber nonwoven fabrics of lipophilic polypropylene. In addition, high oil adsorption was achieved based on the trial-produced nanofibers. In the present report, we focused on the hydrophilic and biodegradable features of polylactic acid (PLA) nano non-woven fabric produced by the improved melt-blowing method and examined its application as a fiber-aggregate-based culture medium. Several plants were cultivated using trial-produced PLA nanofibers, and the influence of different fiber diameters and bulk densities on moisture content and matric potential was also investigated. The results show that PLA fibers can be used to successfully cultivate plants.

Key words : improved melt-blowing method, nanofiber, polylactic acid, plant culture media

キーワード:改良型メルトブロー法, ナノファイバー, ポリ乳酸, 植物培地

改良型メルトブロー法によるポリ乳酸ナノ不織布繊維の 植物培地への応用と考察

山本 真梨菜, 呉 魏, 廣垣 俊樹, 青山 栄一, 曾田 浩義

1. 緒 言

ナノファイバーは、マイクロオーダーでは考えられなかった超比表面積効果, ナノサイズ効果, 超分子配列効果を有しており, 断熱材, エアフィルター,

吸音材, 医療分野, 農業分野¹⁻⁵⁾など幅広い分野で応用が期待される技術である.

農業分野では, 土壌代替培地として, ロックウール培地やポリエステル繊維培地が使用されており,

-
- * M-TEchX Inc, Kyoto
Telephone/Fax: +81- 774-74-8827/+81-50-3737-1497, E-mail: myamamoto@mtechx.co.jp
 - ** M-TEchX Inc, Kyoto
Telephone/Fax: +81- 774-74-8827/+81-50-3737-1497, E-mail: weiwu@mtechx.co.jp
 - *** Department of Mechanical Systems Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone: +81-774-65-6503, E-mail: thirogak@mail.doshisha.ac.jp
 - + Department of Mechanical Engineering and Science, Doshisha University, Kyoto
Telephone: +81-774-65-6506, E-mail: eaoyama@mail.doshisha.ac.jp
 - ++ M-TEchX Inc, Tokyo
Telephone/Fax: +81- 774-74-8827/+81-50-3737-1497, E-mail: sota@mtechx.co.jp

その有効性は確認されている⁶⁻⁹⁾。しかし、ロックウールは天然鉱物を繊維状に加工したもので、産業廃棄物として処理する必要がある。また、ポリエステルは重量が従来の土壌に比べて軽量であり代替培地として農業作業におけるハンドリング性の改善は期待できるものの、石油由来の繊維であることから自然環境下では分解されず、マイクロプラスチックになることで生態系の破壊および環境汚染を助長している。また近年、環境問題がますます深刻になっており、生分解性プラスチックの需要が伸びており、ポリ乳酸(PLA)も工業的に多用されているポリプロピレン(PP)に比べると、比較的親水性を有する生分解性プラスチックの1つとして注目されている^{10,11)}。

その一方で先行研究¹²⁾ではPPの親油性に着目して、改良型メルトブロー法を用いてその自重の約50倍の優れた油吸着性を有するナノファイバー不織布の量産に成功した。そこで本研究では、改良型メルトブロー法の新たな応用でポリ乳酸ナノファイバー不織布を作製し、異なる繊維径とかさ密度の繊維培地が吸水率とマトリックポテンシャルに与える影響などを検討した。また、作製したポリ乳酸ナノファイバーと土の両方を用いて、植物の栽培試験を行った。その結果、試作したポリ乳酸で栽培する場合も、土に近い効果を得て、植物の草丈の成長を確認できた。以上より、ポリ乳酸ナノファイバーが土壌代替の培地となる可能性が見られたため、結果を報告する。

2. 繊維の製造および実験方法

2.1 改良型メルトブロー法によるポリ乳酸繊維の製造

従来のメルトブロー方式は、溶融ポリマーを高圧ガス流と共に紡糸ノズルから噴射して延伸し、繊維化しながら絡ませることで不織布を製造する方法である。従来の生産方式において、エアの高速化では、繊維の短尺化や細分化が発生する。一方、溶融液の微量化では、著しい生産量の低下を伴う。よって、これらいずれにおいても、高品質なナノファイバーの大量生産は困難となる¹³⁾。そこで提案する改良型メルトブロー方式は、CFD解析で空間に噴射さ

れた高速エアの速度分布と温度分布を求め、高温かつ高い負圧領域を調べ、エアノズル噴射部近傍のポテンシャルコア域(高速層流域)と外気の境界に正確に微細径の溶融ポリマー供給用の紡糸ノズルを当該に配置するものである¹⁴⁾。

Fig. 1は、エア噴流の模式図とCFD解析の代表的な結果を示す。Fig. 1(a)中のグレー部がエアノズルでその上部に紡糸ノズルを配置している様子がわかる。

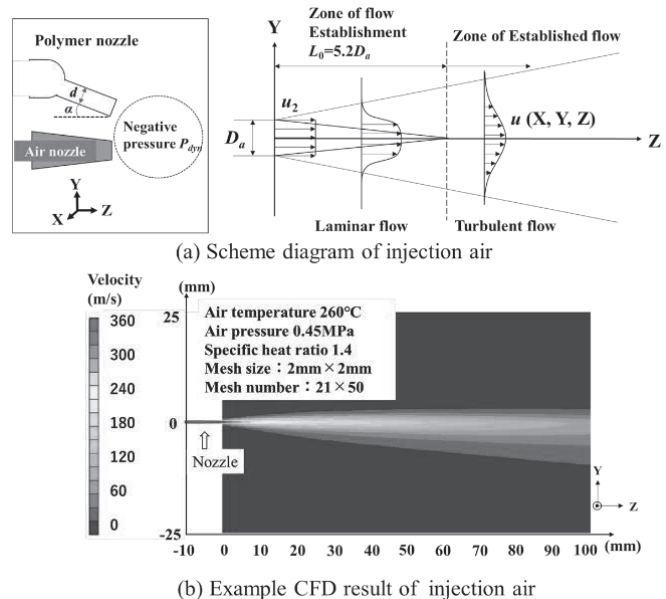


Fig. 1. Injection air velocity distribution.

エアノズルから噴射した高温高速エアはノズル極近傍では層流でY方向に均一な流速であるが、Z方向にノズルから遠くなるにしたがい中心流速が速く、Y方向に中心から外れると遅くなる速度分布を有し、さらにその外側には乱流域を生じる分布特性である。ここではY方向が鉛直軸であり、Fig. 1(b)のCFD解析の結果より、ノズルから遠い位置で実際には流速分布が重力の影響を受けることもわかる。

改良型メルトブロー方式によるポリ乳酸繊維の試作結果の例をFig. 2の(a)~(c)に示す。本報では改良型メルトブロー法の実験範囲はサブミクロンのナノオーダーである直径800nmからミクロンオーダーである19 μ mであり、それぞれの繊維の標準偏差は繊維径800nmが350nm、19 μ mが7.2 μ mの分布である。今回使用したポリ乳酸樹脂はハイケム株式会社製、FY201である。

2.2 繊維の含水率、マトリックポテンシャルの測定

本節では、試作したポリ乳酸繊維および市販品繊維（アースコンシヤス株式会社製，生産革命）の含水率およびマトリックポテンシャルの評価方法について検討してみた。まず，高精度電子天秤を用いてナノファイバーの乾燥質量 m を測定した。プラスチック容器に繊維を各水準同じ量を入れ，異なる量の水を含ませた後，全体質量 M を高精度電子天秤で測定し，水分吸着率を M/m として算出した。この際，同容器に同量の繊維を加えることでかさ密度は一定とした。

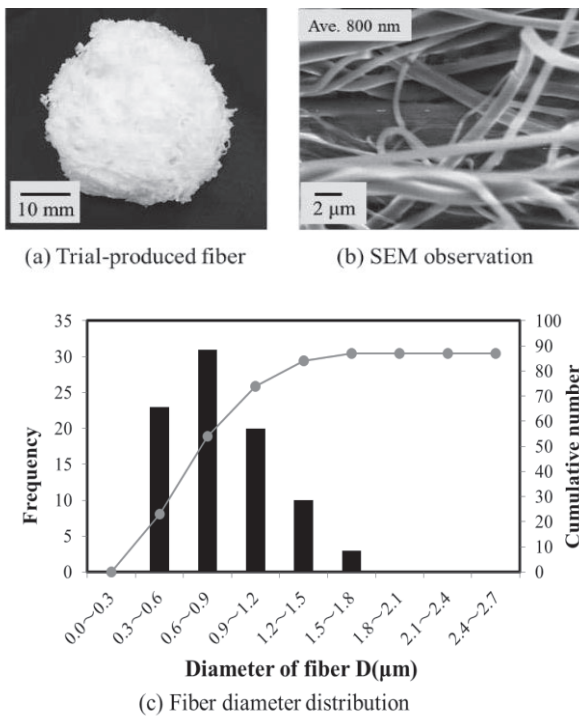


Fig. 2. Trial-produced nanofiber.

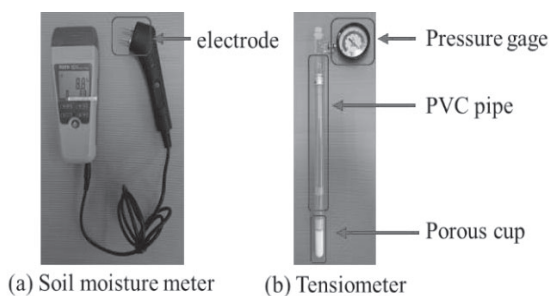


Fig. 3. Measuring equipment.

含水率 u (全体質量 M に対する水の質量の割合) の測定には，Fig. 3(a)の土壤水分計(株式会社FUSO製，M-70D)を用いた。土壤水分計の測定原理は電極による導電率測定で，電極間に流れる電流の流れやすさで水分量を測定する。測定結果は乾燥質量 m に対する水分の割合で含水比 w で表されている。すなわち含水率 u を含水比 w で表すと式(1)になる。

$$u = \frac{1}{1 + \frac{1}{w}} \quad (1)$$

一方，マトリックポテンシャルの測定は，Fig. 3(b)のテンシオメーター(株式会社竹村電機製作所製，DM-8)を用いた。テンシオメーターはポーラスカップのついた塩ビ管を土壤中に埋め，管内を水で充填する。管内の水が土壤中に吸引される圧力(Pa)を測定する。測定された圧力は式(2)により pF で表される。土壤水の水ポテンシャルは，単位体積当たりポテンシャル(圧力単位 kPa)あるいは吸引圧として扱い水頭 cmH₂O で表すのが一般的である。ただし，取り扱う値の範囲が非常に大きくなるため，吸引圧 h (cmH₂O)の常用対数 (\log_{10}) を取り pF 値で表されることが多い¹⁵⁻¹⁷⁾。

$$pF = \log_{10} h \quad (2)$$

ここで通常 pF 値は 1.5~2.7 で生育が良くなり，これ以下では水分過多，これ以上では水分不足となる。

2.3 栽培試験

本節では，試作した繊維の汎用性を確認するために，閉鎖型植物工場の代表で葉物のレタスと施設園芸の代表で実物のミニトマトの栽培試験の方法を説明する。Fig. 4 にレタス栽培で用いた栽培環境を示す。レタスの栽培試験には幅 875×奥行 450×高さ 450mm のスチールラック 2 段を栽培用として使用した。ラック使用部に農園芸用ビニールを巻くことで保温し，天井部に植物育成ライト(アズワン社製，補光用 LED，2-1410-01)を 3 本ずつ配置し

た。照明条件として明期 14 時間，暗期 10 時間とした。外径(181×69)×内径(171×59)×高さ 40mm のアルミカップに任意量の繊維を敷き詰め，その上部にレタスの種（アタリア農園製，トジョンマット）を播種した。本葉が確認された後，幅 400×奥行 150×高さ 140mm のプランターへと移し替えた。栽培実験期間は 2021 年 8 月 3 日～2021 年 10 月 8 日である。また，ミニトマトの栽培試験は，市販のミニトマトの苗を上記のプランターへ繊維と共に植え，比較のため野外（京都府京田辺市の同志社大学キャンパス内）での栽培も行った。栽培実験期間は 2021 年 6 月 8 日～2021 年 7 月 30 日である。灌水は自動灌水装置を用い，底部に水が 0～1cm の深さになるように保った。植物の地上部は外気温と同等程度の温度（25～35℃）である。また，データ採集方法として毎日写真を撮り，記録した。



Fig. 4. Cultivation Environment.

3. 実験結果および考察

3.1 繊維培地としての適性の評価

繊維径，かさ密度の異なる繊維培地を使用し，レタス種子の播種直後の様子と播種 14 日後のプランターを上視した様子を Fig. 5(a)と(b)に示す。使用した繊維径の平均は 1.0 μm と 2.7 μm であり，水分供給前のかさ密度は 0.05g/cm³ と 0.15g/cm³ である。Fig. 5(b)より播種後 2 週間で成長に差が見られた。太い繊維径かつ低かさ密度の培地が早い成長速度であることが確認された。また比較のため疎水性（親油性）のポリプロピレン（PP）の繊維も同様に培地として用いてみたが，水分保持が不十分で表面乾燥が顕著であるため発芽に至ることがなく，培地用としては

親水性が重要であることも確認できた。定植前のミニトマトの苗の様子と 52 日後のミニトマトの苗の様子を Fig. 6(a)と(b)に示す。また，ミニトマトの苗の成長速度を Fig. 6(c)に示す。Fig. 6(a)と(b)より着果も確認でき，Fig. 6(c)より 3 週目以後に十分な成長もみられた。以上より，PLA ナノ不織布繊維が土壌代替品の培地として有効となる可能性を定性的に示すことができた。

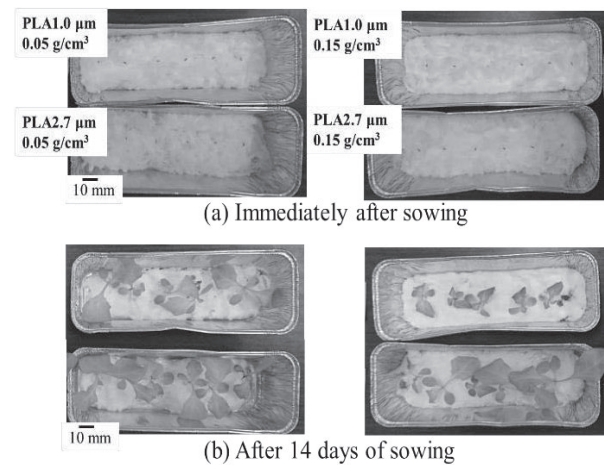


Fig. 5. Plant cultivation with different fiber diameter culture media.

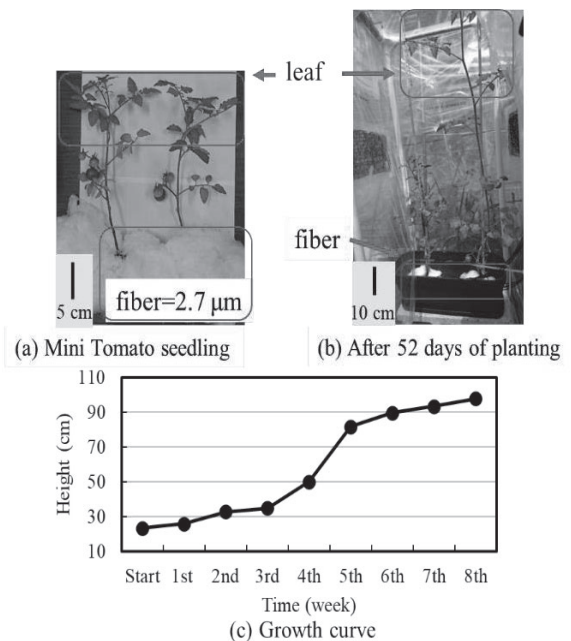


Fig. 6. Plant experiment of Mini tomato.

3.2 培地としてのマトリックポテンシャルと含水率

マトリックポテンシャルと含水率が植物の成長に与える影響を定量的に考察する。Fig. 7は、水分吸着率 M/m とマトリックポテンシャルとの関係を示しており、 M/m が低い場合、培地が水を引っ張る力が強いことを意味する。すなわち、2.2節で説明したように、植物の成長に最適な pF 値は一定の範囲で収めなければならない。その一方、pF 値の制御は重要であるため、その要因を考える。先行研究¹²⁾より、繊維径とかさ密度は M/m へ与える影響が大きいことが判明している。つまり、繊維径とかさ密度を調整すれば pF 値の制御が可能になると推察する。

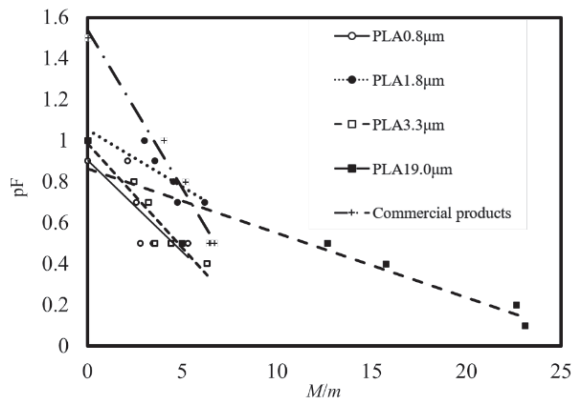


Fig. 7. Relations between M/m and pF.

そこで繊維径およびかさ密度と M/m の変化を Fig. 8に示す。本結果は繊維を水中に十分な時間入れた後、取り出して網上に設置し、水が自由落下した後のデータである。すなわち、水に対する吸着能力だけでなく重力に対する保持力も示している。図より、繊維径一定、かさ密度が小さい方が比較的大きい M/m を示している。また、かさ密度が一定の場合、比較的大きい繊維径が高い水分吸着率 M/m を有することがわかった。

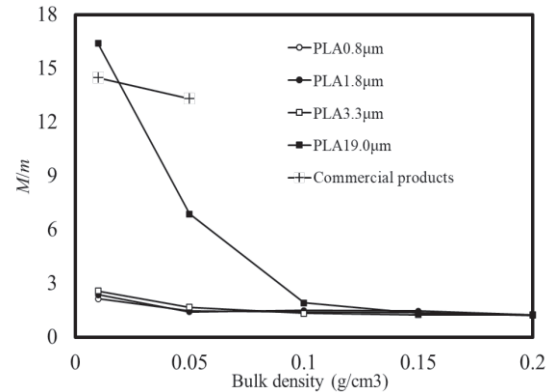


Fig. 8. Influence of bulk density on M/m .

3.3 繊維の単純配列モデルを用いた水の保持力の検討

理論上、かさ密度が一定の場合、繊維径と関係なく、水が繊維集合体に入れる空間が一定であるが、網上で静置する際、細い繊維は1本1本の剛性が弱いいため、水に対する保持力が弱いと考えられる。それに対して、Fig. 2(c)のような分布の中に存在する比較的大きい繊維は1本1本の剛性が高いため、早い段階で水の重力と繊維の保持力が釣り合うことで、保持力が高くなると考えられる。Fig. 9に繊維を2方向に配置した際のモデルを示す。実際の繊維集合体の配列はランダムであるため、モデル化は非常に困難である。したがって、繊維は空間の中に均一分布と一定な配列と仮定した。

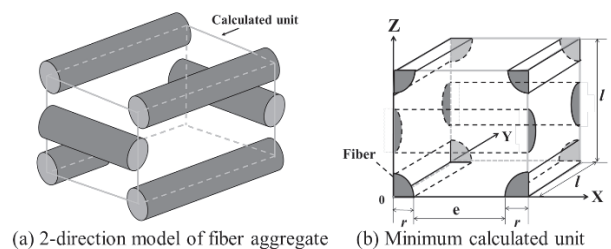


Fig. 9. Fiber model in two directions.

ここで、繊維半径を r 、繊維直径を d 、隣接する繊維間の最小隙間を e 、立方体1辺の長さを l 、材料の真密度を ρ とし、繊維のかさ密度 ρ_{bulk} と空隙率 η は式(3)と(4)で表すことができる。

$$\rho_{bulk} = \frac{2\pi r^2 \rho}{l^2} \quad (3)$$

$$\eta = 1 - \frac{2\pi r^2}{l^2} \quad (4)$$

また, Fig. 9 の(b)より最小隙間 e を求めると式(5)の関係になる. さらに, 式(4)を変形して式(5)に代入する繊維径, 空隙率と最小隙間 e との関係を式(6)で表すことができる.

$$e = l - 2r \quad (5)$$

$$e = d \left\{ \sqrt{\frac{\pi}{2(1-\eta)} - 1} \right\} \quad (6)$$

Fig. 10 は式(6)による繊維径と隣接する繊維間の最小隙間の関係の代表的な計算例を示す. ここで条件は $d=0.1\sim 20\mu\text{m}$, $\eta=0.1$ である.

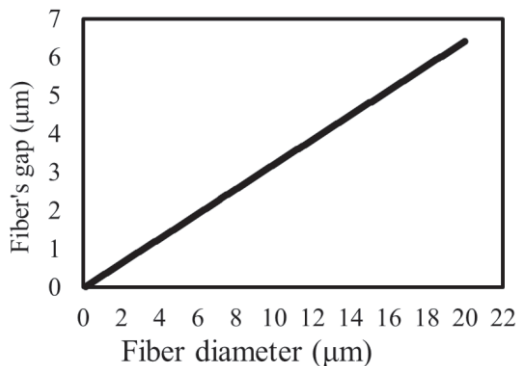


Fig. 10. Relationship between fiber diameter and fiber's gap.

Fig. 10 より, かさ密度が一定の場合, 細い繊維径では最小隙間が小さくなり, 太い繊維径の場合は最小隙間が大きくなるのがわかった. その一方, Fig. 9(b) に基づき, Fig. 11(a)と式(7)の毛細管現象の基本モデルを変形すると Fig. 11(b)と式(8)の実際の現象に近い吸着モデルが提案できる. ここで, Fig. 11(a)の基本モデルの液面の吸い上げ高さを h_a , Fig. 11(b)のモデルの液面の吸い上げ高さを h_b , 重力加速度を g , 液体の密度を ρ_{liquid} , 接触角を θ , 液面の表面張力を T , 実験値に基づいた補正係数を計算した値を $h_{suction}$ とした.

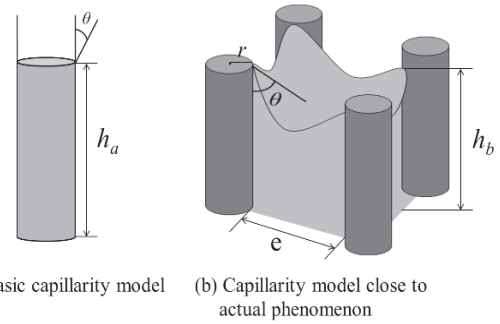


Fig. 11. Adsorption model of solution.

$$h_a = \frac{2T \cos \theta}{\rho g r} \quad (7)$$

$$h_b = \frac{(2\pi r + 4e)T \cos \theta}{\rho_{liquid} g [(\pi + 2r)^2 - \pi r^2]} \quad (8)$$

$$h_{suction} = (h_b - 2.4) \times 0.0026 \quad (9)$$

繊維原料は PLA(接触角 $\theta=80^\circ$ ¹⁸⁾, 表面張力 $T=72.75\text{mN/m}$)であり, PLA の水に対する接触角を実測しても $80\sim 90^\circ$ 程度であることを確認している. 先行研究¹²⁾で開発したナノファイバー不織布のポリプロピレン(PP)では水に対する接触角 100° 程度¹⁹⁾である. したがって PP に比べると PLA の親水性は良好である. この接触角を式(9)に代入すると Fig. 12 の計算例となる.

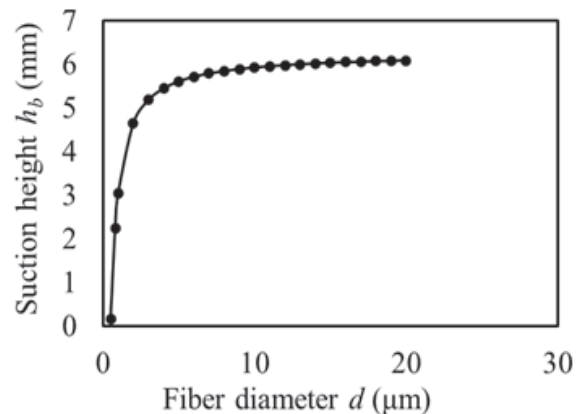


Fig. 12. Calculation example of relations between fiber diameter and suction height.

本来、式(8)の理論で計算すべきであり、式より繊維間の隙間が狭くなると値は大きくなる。しかし、実際の繊維集合体の繊維配列はランダムかつかさ密度もミクロ的にはランダムに変化しながら分布しており、同じ充填率の中でも、繊維径が細くなると繊維間の隙間も狭くなることがわかった。したがって局所的には PLA の板に近い状態が生じ、水がその表面に付着し、繊維間の隙間中に入りにくい現象も生じていることが予想される。したがって、均一なモデルである式(9)にその分の補正を適用することで実験値に近くなることがわかった。また、上記現象で繊維培地の吸水能力および保持能力は、繊維径と空隙率から影響された繊維間の最小隙間と接触角の両方に深く関係していることが確認できた。

3.4 植物培地としての含水率

Fig. 13 は、水分吸着率 M/m と含水率 u の関係である。

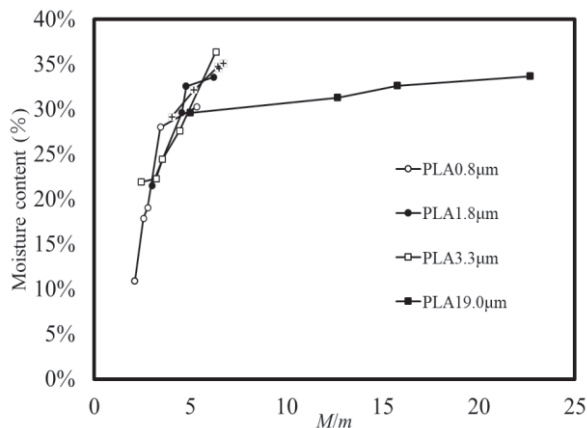


Fig. 13. Relationship between M/m and moisture content.

Fig. 12 の計算結果とほぼ同じ傾向を示している。図より、 M/m が増大すると高い含水率 u を示すこともわかる。したがって前節の結果とも総合すると、繊維径とかさ密度を調整することで繊維集合体培地の含水率と pF 値の制御ができることがわかった。すなわち、植物の種類に応じた pF 値から最適繊維径とかさ密度を決めることで、様々な植物に適した培地の作製が可能になると考えられる。

4. 結論

本報では改良型メルトブロー法で製造したポリ乳酸ナノファイバー不織布の植物培地への応用を検討して、栽培試験と基本性能の検討を遂行した。その結果は以下である。

- (1) 定性的であるが、提案する繊維が土壌代替培地として有効である可能性を確認できた。
- (2) 繊維を空間の中に均一分布と一定な配列と仮定し、2 方向に配置した際の繊維モデルで検討した。その結果、かさ密度が一定の場合、細い繊維径は繊維間の最小隙間が小さくなり、太い繊維径の場合は繊維間の最小隙間が大きくなることを確認した。
- (3) 繊維培地の吸水能力および保持能力は、繊維径と空隙率で定まる繊維間の最小隙間と接触角の両者に深く依存していることを確認した。
- (4) 数十 μm からサブマイクロのナノファイバーの不織布の製造が可能であり、植物の種類に応じた pF 値から最適繊維径とかさ密度を決めることで、様々な植物に適した培地の作製ができる可能性も確認できた。

参考文献

- 1) P. W. Gibson, C. Lee, F. Ko, and D. Reneker, "Application of Nanofiber Technology to Nonwoven Thermal Insulation", *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2[2], 32-40 (2007)
- 2) 呉魏, 卜部賢一, 廣垣俊樹, 青山栄一, 曾田浩義, "ポリプロピレンナノファイバー不織布の空気フィルター特性の予測", 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 333-334 (2019)
- 3) 呉魏, 青山栄一, 廣垣俊樹, 越前谷孝嗣, 曾田浩義, "ナノファイバー不織布の製造とその吸着と吸音特性の考察", 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 639-640 (2017)
- 4) H.プランク, "生体医療用マイクロおよびナノファイバー", 繊維と工業, 63[11], 376-379 (2007)
- 5) 加部泰三, 岩田忠久, "自然分解中で分解する繊維~微生物産生ポリエステル繊維の作製と酵素分解~, 繊維学会誌, 75[3], 162-168 (2019)
- 6) 田中和夫, 安井秀夫, "ロックウール栽培の実用化に関する研究", 野菜・茶業試験場研究報告, A(野菜・花き), 5, 2-37 (1992)
- 7) 島浩二, 川西孝秀, 矢部泰弘, 森下照久, 藤井一徳,

- 後藤丹十郎, “熱融着性ポリエステル繊維固化培地で育成したパンジーのプランター定植後の生育”, 和歌山県農林水産総合技術センター研究報告, 9, 15-16 (2008)
- 8) 鹿野弘, 高山詩織, 今野誠, “イチゴ養液栽培におけるヤシガラ培地の代替え資材の検討”, 東北農業研究, 70, 79-80 (2017)
 - 9) 山中捷一郎, “ロックウール培地の物理的特性-水分特性-”, 九州大学農学部学藝雑誌, 46[1/2], 1-7 (1991)
 - 10) 篠英之, 竹内志彦, 芦田道夫, “ポリ乳酸の光分解性ポリマーとしての可能性の検討”, 高分子論文集, 49[6], 527-533 (1992)
 - 11) 木村良晴, “ポリ乳酸の新展開”, 高分子, 57[6], 430-433 (2008)
 - 12) W. WU, T.Hirogaki, E.Aoyama, M.Ikegaya, and H.Sota, “Investigation of Oil Adsorption Performance of Polypropylene Nanofiber Nonwoven Fabric”, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 141[2], 021004-1-021004-8 (2019)
 - 13) 呉魏, 青山栄一, 廣垣俊樹, 池谷守彦, 越前谷孝嗣, 曾田浩義, “ナノファイバー不織布を用いたパフ加工の研磨特性”, 砥粒石加工学会誌, 61[11], 34-40 (2017)
 - 14) 呉魏, 青山栄一, 廣垣俊樹, 池谷守彦, 越前谷孝嗣, 曾田浩義, “綿状ナノファイバーの製造法とその応用に関する研究”, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 331-332 (2016)
 - 15) 関勝寿, “水分特性曲線の回帰プログラム SWRC Fit(1)-水分特性モデル-”, 東洋大学紀要自然科学篇, 61, 41-65 (2017)
 - 16) 長谷川周一, “水分の計測とその応用”, 農業機械学会誌, 59[5], 123-126 (1997)
 - 17) 牛島忠広, “植物の水ストレスと乾燥耐性”, 芝草研究, 8[2], 97-104 (1979)
 - 18) C.Y.Tham, Z.A.Abdul Hamid, Z.Ahmad and H.Ismail, “Surface Modification of Poly (lactic acid) (PLA) via Alkaline Hydrolysis Degradation”, *Advance Materials Research*, 97, 324-327 (2014)
 - 19) 羽田正紀, “プラスチックフィルムの表面改質”, 日本印刷学会誌, 47[2], 78-83 (2010)