

トピックス

ビタミンCを用いた抗菌繊維の開発

Development of antimicrobial textile using vitamin C

現在、世界中の繊維産業では、合成繊維と天然繊維の需要が急速に拡大しており、抗菌生地など様々な用途に利用されている¹⁾。2020年に新型コロナウイルス感染症が拡大して以来、医療施設においてウイルス拡散防止のためのマスクやベッドカバーなどの製品に抗菌性や滅菌性を有する生地の需要が高まってきている²⁾。しかし、これまでの繊維産業において抗菌作用を付与する手法は、合成低分子化合物を散布またはグラフト重合によって、繊維に固定化する方法である。そのため、天然由来の無毒な分子を利用した抗菌繊維の開発に関心が高まっている。

以前、健康志向の高まりからビタミンC (VC) を用いることでスキンケア機能をうたった繊維製品が開発されている。これは、スキンケア成分としてVC誘導体を繊維に固定化することで、通常の洗濯では落ちにくい、皮膚との接触によるVC誘導体の徐放を期待した製品である。VC誘導体は少量で長時間細胞内に蓄積されることが明らかとなり、また、メラニン産生抑制効果、コラーゲン分解活性阻害効果と合成促進効果、光毒性緩和効果もみられ、十分にスキンケア素材として有効であることが示されている³⁾。VCは酸化防止、栄養強化の目的で食品添加物として用いられており、さらに、抗がん作用⁴⁾、抗菌作用⁵⁾、抗ウイルス作用⁶⁾も有している。その中で、抗がん作用はフェントン反応を介した酸化ストレスによって示され、VC

は鉄イオンを還元することでフェントン反応を促進する。その還元された鉄イオンが過酸化水素と反応することでヒドロキシラジカルを生成する。これらにより、がん細胞は強力な酸化ストレスを受け、細胞死を引き起こす。つまり、過酸化水素はその作用本体である。過酸化水素は、創傷治癒や細菌の増殖抑制といった作用を有しており、天然繊維中には過酸化水素を生成する成分が含まれている⁷⁾。VCは銅イオンとともに天然繊維に配合されることで過酸化水素量を増加させ、抗菌作用を示すことも知られている。このことから、繊維にVCを配合することで、天然由来の無毒な分子を利用した抗菌繊維の開発につながるとEdwardsらは考えた。そこで、本稿では抗菌作用を示すVC処理したспанレース不織布の開発に関するEdwardsらの報告⁸⁾を紹介する。

過酸化水素は殺菌剤として広く用いられている⁹⁾ため、生地が産生する過酸化水素量を測定した。表1に示すように、生地としてTGz, BGz, TGz-VC, 漂白綿, 綿(VC+塩化銅(II))を使用し、過酸化水素生成量とその蓄積量を短期間(1日)と長期間(3日)で評価した。短期間では、BGz, TGz-VC, 綿(VC), 綿(VC+塩化銅(II))のそれぞれの過酸化水素生成量は、漂白綿やTGzと比較して有意に高かった。さらに、長期間において、TGz-VCは1日目しか過酸化水素を生成しないが、BGzは3日間継続的に過酸化水素を生成し

表1 生地の説明

| 名前 | 生地の処理 |
|---------------|----------------------------------|
| TGz | 市販の止血生地(TACGaze)(未処理のспанレース不織布) |
| BGz | パイロットスケールでTGzにVCをパッド乾燥法により処理した生地 |
| TGz-VC | TGzにクエン酸を介してVCを共有結合させた生地 |
| 漂白綿 | 漂白した綿 |
| 綿(VC) | 綿にVCを噴霧乾燥させた生地 |
| 綿(VC+塩化銅(II)) | 綿にVCと塩化銅(II)噴霧乾燥させた生地 |

ていた。つまり、VCを直接結合させるよりもパッド乾燥処理の方が効果的であった。次に、TGz, BGz, 綿(VC), 綿(VC+塩化銅(II))の抗菌作用を評価した。TGzはグラム陰性菌とグラム陽性菌の両方に対して抗菌作用を全く示さなかったが、BGzは両方の菌に対して99.99%の抗菌作用を示した。また、綿(VC)は抗菌作用を示さなかったが、綿(VC+塩化銅(II))はグラム陽性菌に対して94.8%の阻害率を示した。このことからVCと塩化銅(II)を共添加することで、生じる過酸化水素が重要であると考察している。また、これらの結果から過酸化水素生成量と抗菌作用には相関があると考察されている。以上の結果から、抗菌作用を持続的に示すためにはBGzが有用であることが示された。これを受けて、BGzのSARS-CoV-2ウイルスに対する効果を確認するためにTGzを対照として抗ウイルス作用を評価している。評価にはSARS-CoV-2ウイルスと同種性のあるウイルスを用いた。その結果、TGzは1時間後にウイルス量を34.09%減少させたのに対し、BGzは99.99%減少させた。3時間後にはTGzのウイルス量の減少はみられなかったが、BGzは99.999%減少させた。これまでの全ての結果を簡単にまとめたものが表2となる。良好な結果の得られたBGzについて、さらにヒトコロナウイルス229E株における抗ウイルス作用も評価している。その結果、BGzはウイルス量を90%減少させたが、TGzや市販のN-95マスクサンプルは減少させなかった。これらのことから、商業化を目的として開発されたBGzは抗菌作用及び抗ウイルス作用を有することが示された。

TGzにVCをパッド乾燥処理すると99.99%の抗菌作用が得られることが示された。さらに、抗ウイルス作用を示すことも明らかとなった。これらは、配合された生地における過酸化水素の生成によるものと考えられた。抗菌作用の作用機序は、まず、VCが繊維中に存在する金属イオンを還元する。次に、還元された金属イオンが酸素と反応してスーパーオキシドを生成

する。さらに、スーパーオキシドは天然繊維由来のスーパーオキシドジスムターゼによって過酸化水素に変換される。最終的に、生成された過酸化水素が細菌の細胞膜を破壊することで抗菌作用を示すと推測されている。また、抗ウイルス作用は過酸化水素がウイルスの複製を阻害することで示されると推察している。本研究において、生地からの過酸化水素生成量は、SARS-CoV-2などのウイルスを無効化するのに十分であると考察されている。したがって、Edwardsらは、VCをспанレース不織布に添加することで長期的に生成される過酸化水素が、抗菌作用および抗ウイルス作用を発揮すると結論付けている。このVCを配合した不織布を製造することで、救急医療や軍事活動において必要となる頑丈な止血被覆材への応用やSARS-CoV-2による医療危機に対処できるフェイスマスクへの応用が可能であると述べられている。

現在まで、商業的な繊維製品でVCを抗菌剤として用いた報告はなかった。すなわち、VCは低コストであり、健康増進効果があり、非毒性であるにも関わらず、繊維製品において抗菌剤として使用されていなかった。しかし、Edwardsらは市販の止血生地にVCを配合することで、商業利用可能なレベルでグラム陰性菌およびグラム陽性菌の活動を完全に抑制できることを実証した。また、SARS-CoV-2などのウイルスを無効化するのに十分な抗ウイルス作用を示すことも実証した。これらより、天然由来の無毒な低分子化合物を利用した抗菌繊維の開発に成功している。このVCを配合したспанレース不織布を用いることで抗菌性・抗ウイルス性を有した創傷被覆材の開発につながると期待される。この開発は医療用繊維といった健康や衛生分野での新たな用途に応用可能である。今後、VCを繊維へ導入した製品の開発に期待する。

Key words: vitamin C, antimicrobial, antiviral, cotton, textile

表2 各生地の過酸化水素生成量、抗菌作用、抗ウイルス作用の結果

| | 過酸化水素生成量 | | 抗菌作用 | | 抗ウイルス作用 |
|---------------|----------|----|--------|--------|---------|
| | 短期 | 長期 | グラム陰性菌 | グラム陽性菌 | |
| TGz | × | × | × | × | △ |
| TGz-VC | ◎ | △ | — | — | — |
| BGz | ◎ | ○ | ◎ | ◎ | ◎ |
| 綿(VC) | ○ | — | × | × | — |
| 綿(VC+塩化銅(II)) | ○ | — | × | ○ | — |

¹Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Tokushima University, 770-8513, Japan

²Graduate School of Technology, Industrial and Social Sciences, Tokushima University, 770-8513, Japan

Yugo Ito¹, Takeru Koga², Akihiro Tai²

¹徳島大学大学院創成科学研究科

²徳島大学大学院社会産業理工学研究部

伊藤 勇悟¹, 古賀 武尊², 田井 章博²

利益相反自己申告：申告すべきものなし

(2024.5.21 受付)

文 献

- 1) Morais DS, Guedes RM, Lopes MA (2016) Antimicrobial approaches for textiles: from research to market. *Materials* **9**, 498
- 2) Antimicrobial Textile Market Size, Share and COVID-19 Impact Analysis, By Active Agents (Synthetic Organic Compounds, Bio-Based Compounds, Metal & Metallic Salts and Others), By Fabric (Cotton, Polyester and Others), By Application (Home, Commercial, Medical, Apparel, Industrial, and Others), and Regional Forecasts (2021–2028)
<https://www.fortunebusinessinsights.com/antimicrobial-textiles-market-102307> (2024-05-19)
- 3) 糸山光紀, 谷辺博昭, 橋本悟 (2002) 着るビタミンCの開発. *ビタミン* **76**, 102–103
- 4) Chen Q, Espey MG, Sun AY, Lee J-H, Krishna MC, Shacter E, Choyke PL, Pooput C, Kirk KL, Buettner GR, Levine M (2007) Ascorbate in pharmacologic concentrations selectively generates ascorbate radical and hydrogen peroxide in extracellular fluid *in vivo*. *Proc Natl Acad Sci USA* **104**, 8749–8754
- 5) Varvara M, Bozzo G, Celano G, Disanto C, Pagliarone CN, Celano GV (2016) The use of the ascorbic acid as food additive and technical-legal issues. *Ital J Food Saf* **5**, 4313
- 6) Manning J, Mitchell B, Appadurai DA, Shakya A, Pierce LJ, Wang H, Nganga V, Swanson PC, May JM, Tantin D (2013) Vitamin C promotes maturation of T-cells. *Antioxid Redox Signal* **19**, 2054–2067
- 7) Edwards JV, Prevost NT, Santiago M, Von Hoven T, Condon BD, Qureshi H, Yager DR (2018) Hydrogen peroxide generation of copper/ascorbate formulations on cotton: Effect on antibacterial and fibroblast activity for wound healing application. *Molecules* **23**, 2399
- 8) Edwards JV, Prevost NT, Yager D, Mackin R, Santiago M, Chang S, Condon B, Dacorta J (2022) Ascorbic acid as an adjuvant to unbleached cotton promotes antimicrobial activity in spunlace nonwovens. *Int J Mol Sci* **23**, 3598
- 9) Linley E, Denyer SP, McDonnell G, Simons C, Maillard J-Y (2012) Use of hydrogen peroxide as a biocide: New consideration of its mechanisms of biocidal action. *J Antimicrob Chemother* **67**, 1589–1596