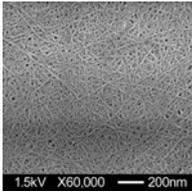


# ナノセルロースで実現する ペーパーエレクトロニクス

阪大産研 能木雅也 (のぎまさや)

## ナノセルロースとは？



幅4-15nmのとても微細な繊維であり、地球上すべての植物に含まれる無尽蔵な天然資源です。(セルロースナノファイバーとも呼ばれます)。

ナノセルロースは鉄のように強く、石英ガラスのように熱膨張率が小さく、プラスチックのように軽い材料です。

ナノセルロース研究開発は、2000年頃、世界に先駆け日本からスタートしました。日本発の技術です！！

## ナノセルロースで実現した「透明な紙」

2008年、私達はナノセルロースを使い「透明な紙(ナノペーパー)」を発明しました。透明な紙は、プラスチックやガラスなど従来の透明材料にはあり得ない優れた特性があります。



10-30ミクロン厚さ  
ヘイズ1%以下  
熱膨張率5-8ppm/K  
耐熱性150-250℃  
化学成分：セルロース100%  
異種材料、無添加

M. Nogi et al. Adv. Mater. (2009) DOI: 10.1002/adma.200803174  
M. Nogi et al. APL (2013) DOI:10.1063/1.4804361

## 進化する紙 ～ペーパーエレクトロニクスに向けて～

私たちの最終目的は、ナノセルロースを使った電子機器：ペーパーエレクトロニクスの実現です。これまでに「太陽電池・トランジスタ・アンテナ・透明導電膜」などペーパーデバイスの開発を行ってきました。

ペーパーエレクトロニクスは、ナノペーパーへ電子部品を印刷実装した電子機器です。ナノペーパーの原料は樹木であり、印刷実装技術は低エネルギー技術です。したがって、ペーパーエレクトロニクスは、低消費エネルギー・クリーン低炭素社会の実現に大きく貢献するでしょう。



ペーパーアンテナ  
Adv. Mater. 2014  
Nanoscale 2013

ワイヤレス通信

ペーパーメモリ  
Sci. Rep. 2014

情報の記憶

電力供給

ペーパー配線  
Nanoscale 2013  
ACS Appl. Inter. 2015

情報の入出力

ペーパー太陽電池  
Sci. Rep. 2015

ペーパー透明導電膜  
NPG Asia 2014  
Sci. Rep. 2015

ペーパートランジスタ  
Adv. Fuc. Mater. 2014

## 透明な紙、よくある10の質問

### Q1. どこまで透明になる？

透明性は、すでに理論透過率に到達しています。  
ヘイズ(曇値)1%以下も達成しています！

### Q2. どこまで厚くなる？

いつも、10-50ミクロンの厚みを作っています。  
厚さ1ミリ以上も可能ですが、今後の技術開発が必要です。

### Q3. 特徴は？

折り畳み可能・高耐熱性・ガラス並みの低熱膨張性・高耐薬品性  
しかも、カーボンニュートラル材料です。

### Q4. どうして透明？高性能？

ナノファイバーがびっしり詰まっています。  
光散乱する(白色になる)隙間がありません。  
しかも、このナノファイバー、高性能です。  
高性能な繊維がびっしり詰まっているので、透明な紙は非常に優れた特性になります。

### Q5. セロハンとの違いは？

セロハンは紙を溶かしてつくったフィルムです。  
セロハンは、とても強いナノセルロースを溶かしているため、「透明な紙」ほど丈夫ではありません。

### Q6. 燃えますか？

はい。その「炎」と「臭い」は、紙が燃えたときと全く同じです。  
もちろん、難燃化処理もできます。

### Q7. 水に強い？

白い普通の紙を水の中に入れるとグチャグチャになりますが、透明な紙はグチャグチャになりません。  
当然、耐水化処理もできます。

### Q8. 鉛筆で字を書けますか？

表面がツルツルしているので、鉛筆は無理です。  
サインペンならOKです。

### Q9. 透明な紙、入手できますか？値段は幾ら？

多くの企業が、セルロースナノファイバーの開発・サンプル提供を行っています。そちらに問い合わせ下さい。

<http://www.nogimasaya.com/webinfo/>

### Q10. 詳しい話を聞きたいのですが？

透明な紙に関してはコチラ  
<http://www.nogimasaya.com/research/transparent/>  
作り方はコチラ  
<http://www.nogimasaya.com/research/make/>  
講演会情報はコチラ  
<http://www.nogimasaya.com/publication/lecture/>

## アウトリーチ活動・マスメディア

ペーパーエレクトロニクスを実現するため、各方面にご協力頂きながら、私達はアウトリーチ活動ならびにマスメディア・講演会での研究成果紹介を積極的に行っています。  
リクエストがあれば、お気軽にお声かけ下さい。

アウトリーチ活動実績はこちら  
<http://www.nogimasaya.com/publication/outreach/>  
マスメディアでの研究紹介実績はこちら  
<http://www.nogimasaya.com/publication/media/>

## クローズアップ現代

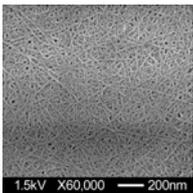
16年1月12日放送 NHKクローズアップ現代を見逃した方、  
下記URLで放送の一部を視聴できます。  
[http://www.nhk.or.jp/gendai/kiroku/detail\\_3751.html](http://www.nhk.or.jp/gendai/kiroku/detail_3751.html)



# 透明な紙（ナノペーパー） の性能と特徴

阪大産研 能木雅也（のぎまさや）

## ナノセルロースとは？



幅4-15nmのとて微細な繊維で、地球上すべての植物に含まれる無尽蔵な天然資源です。（セルロースナノファイバーとも呼ばれます）。  
ナノセルロースは鉄のように強く、石英ガラスのように熱膨張率が小さく、プラスチックのように軽い材料です。  
ナノセルロースは、アベノミクス（日本再興戦略 改訂2014）でも取り上げられています。

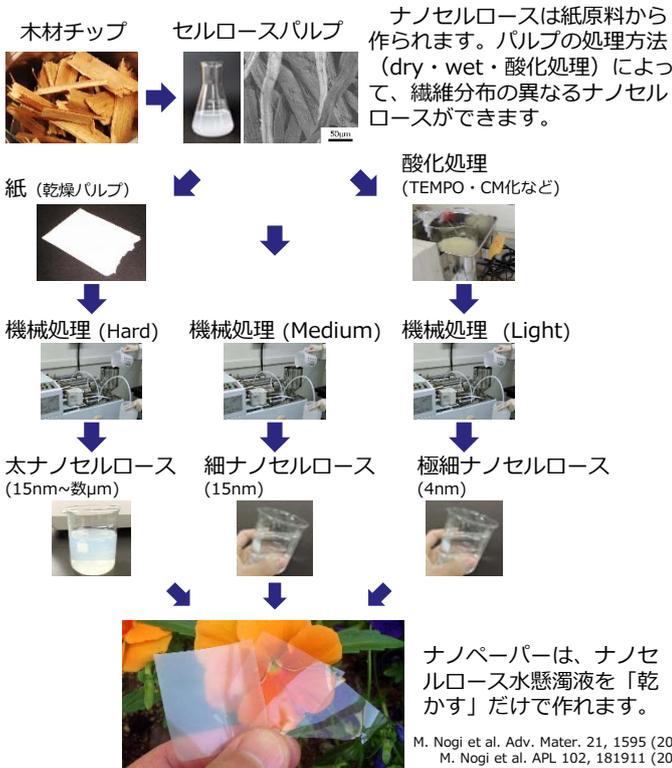
## 透明な紙：21世紀、紙は透明になった。



右は20世紀までの「白い紙」、左が21世紀からの「透明な紙」（ナノペーパー）。  
セルロースナノファイバーで紙を作ると、透明な紙ができます。接着剤やプラスチックなどは一切使っていません。

M. Nogi et al. Adv. Mater. (2009) DOI: 10.1002/adma.200803174

## ナノセルロース・透明な紙の作り方

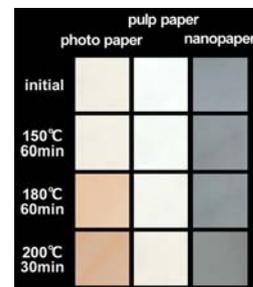


## 特徴1：すぐれた機械的特性



厚さ：10-50ミクロン  
弾性率：13 Gpa  
引張強度：223 MPa  
表面粗さ(Ra)：20nm以下@10um□  
誘電率：5以上  
絶縁性：極めて高い

## 特徴2：熱に強い・伸び縮みしない



熱膨張率：5-8ppm/K  
耐熱性：150-250℃

ナノペーパーは非常に高い耐熱性を有する材料です。例えば、多くのプラスチックは150℃程度で加熱すると変形・黄変しますが、ナノペーパーは大気中200℃程度で加熱しても変形・黄変しません。

## 特徴3：自然から生まれ、自然に還る

透明な紙は、石油資源に依存しない、「樹木」から生まれた材料です。  
この材料を用いたペーパーデバイスは、3つのメリットがあります。

- 樹木を切ったら、植えて育てる。切って植えれば、CO<sub>2</sub>削減効果up↑
- 紙を使ったら、チリ紙交換・リサイクル。リサイクルの技術とシステムが完備。「紙」は「紙」から作る。
- 紙は捨てても、自然に還る。ナノペーパーも生分解性材料です。トリリオンセンサなどに抜群の相性！

## 「くっきり透明」から「やわらか透明」まで



全光線透過率：90%  
ヘイズ：0.1~80%

高い透過率を保ったまま、多種多様な外観の透明ナノペーパーが製造できます。これらの材料は、LEDライトの明るさを保ったまま、目に優しい・柔らかな光へと調光できます。

# ナノペーパー・エレクトロニクス

## 阪大産研 能木雅也 (のぎまさや)

### 進化する紙 ～ペーパーエレクトロニクスに向けて～

私たちの最終目標は、ナノセルロースを使った電子機器：ペーパーエレクトロニクスの実現です。これまでに「太陽電池・トランジスタ・アンテナ・透明導電膜」などペーパーデバイスの開発を行ってきました。

ペーパーエレクトロニクスは、ナノペーパーへ電子部品を印刷実装した電子機器です。ナノペーパーの原料は樹木であり、印刷実装技術は低エネルギー技術です。したがって、ペーパーエレクトロニクスは、低消費エネルギー・クリーン低炭素社会の実現に大きく貢献するでしょう。



ペーパーアンテナ  
Adv. Mater. 2014  
Nanoscale 2013

ワイヤレス通信

ペーパーメモリ  
Sci. Rep. 2014

情報の記憶

電力供給

ペーパー配線  
Nanoscale 2013  
ACS Appl. Inter. 2015

情報の入出力

ペーパー透明導電膜  
NPG Asia 2014  
Sci. Rep. 2015

ペーパー太陽電池  
Sci. Rep. 2015

ペーパートランジスタ  
Adv. Fun. Mater. 2014

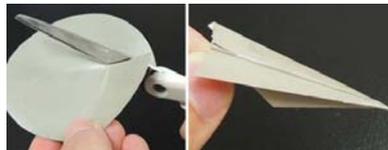
### 電気も流れる！



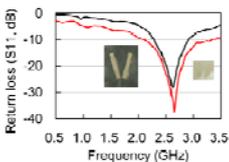
透明な紙に銀ナノワイヤを塗布すると、電気が流れるようになります。その透明性と導電性は、ITOガラスに匹敵します。  
この透明電極は、何回折り畳んでも電気を流し続けるので、ウェアラブルデバイスへの応用が期待されます。

M. Nogi et al., Scientific Reports (2015) doi:10.1038/srep17254  
H. Koga\*, M. Nogi\* et al. NPG Asia Materials (2014) doi:10.1038/am.2014

### フレキシブル高誘電率ナノペーパー



少量の銀ナノワイヤを加えたナノペーパーは、非常に高い高誘電率 ( $k=727$ ) を示します。この材料は、デバイスの小型化や薄膜化、さらにはリーク電流の削減を可能にします。  
この材料が、あらゆるモノをインターネットに接続させるトリリオンセンサを実現させるでしょう。



T. Inui et al. Adv. Mater (2014) DOI: 10.1002/adma.201404555

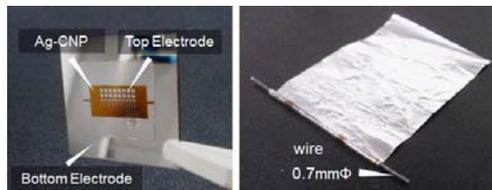
### ペーパー太陽電池



透明な紙と銀ナノワイヤを使うと、軽量で折り畳み可能な透明導電膜ができます。この材料を使って、透明配線やペーパー太陽電池を開発しました。将来の太陽電池は、ポケットやリュックに入れて持ち運べるようになるかも知れません。

M. Nogi et al., Scientific Reports (2015) doi:10.1038/srep17254

### ペーパーメモリ ～情報は紙に記録する～

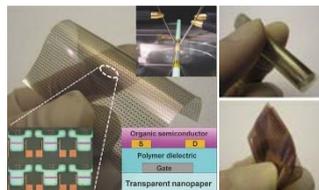


阪大産研 柳田・長島・古賀・九大農 北岡らとの共同研究において、不揮発性ペーパーメモリを世界で初めて開発しました。このペーパーメモリは、針金に巻き付けても記憶し続けることができ、まるで紙のように扱うことができます。

紙は、これからのデジタル情報化社会においても、記憶媒体として重要な役割を担い続けるでしょう。

K. Nagashima et al., Scientific Reports (2014), doi:10.1038/srep05532

### ペーパートランジスタ



NHK放送技術研究所との共同実験において、透明な紙に有機トランジスタアレイを搭載しました。将来は、ペーパースマートフォンが登場し、紙のうえでテレビや映画、インターネットが楽しめるでしょう。

Y. Fujisaki, et al. Adv. Fun. Mater. (2013), DOI: 10.1002/adfm.201303024

### 導電性ライン on ナノペーパー



ナノペーパーは、200℃@大気で加熱可能なので、金属ナノ粒子インク・金属塩インク・金属ナノワイヤインクなど多種多様な導電性インクで導電性配線を作製可能です(左)。

また、金属ナノインクを印刷したナノペーパーは、折り畳んでも導電性が失われません(中央)。

さらに、東大磯貝グループとの共同研究において、高透明性と高耐熱性を兼ね備えたナノペーパーを開発しました(右)。

H. Yagyu et al., ACS Appl. Mater. Interfaces, (2015), DOI: 10.1021/acsami.5b06915  
M. C. Hsieh et al. Nanoscale (2013) DOI:10.1039/C3NR01951A  
M. Nogi et al., Nanoscale (2013) DOI: 10.1039/c3nr00231d