

# 「スーパー材料」で 「電波」を操る



鈴木 健仁

東京農工大学 大学院工学研究院 准教授

JST さきがけ研究者



# まずは

## 皆さんのことを聞かせてください。

- ① 高校生・中学生
- ② ご家族・高校の先生・  
その他の方

# 私は

**情報通信の源の電波の振る舞いを**  
**研究しています。また、熱の振る舞い**  
**を上手に操ることにも興味を持って**  
**います。現在、国から「さきがけ」とい**  
**う研究費の支援を受けています。**



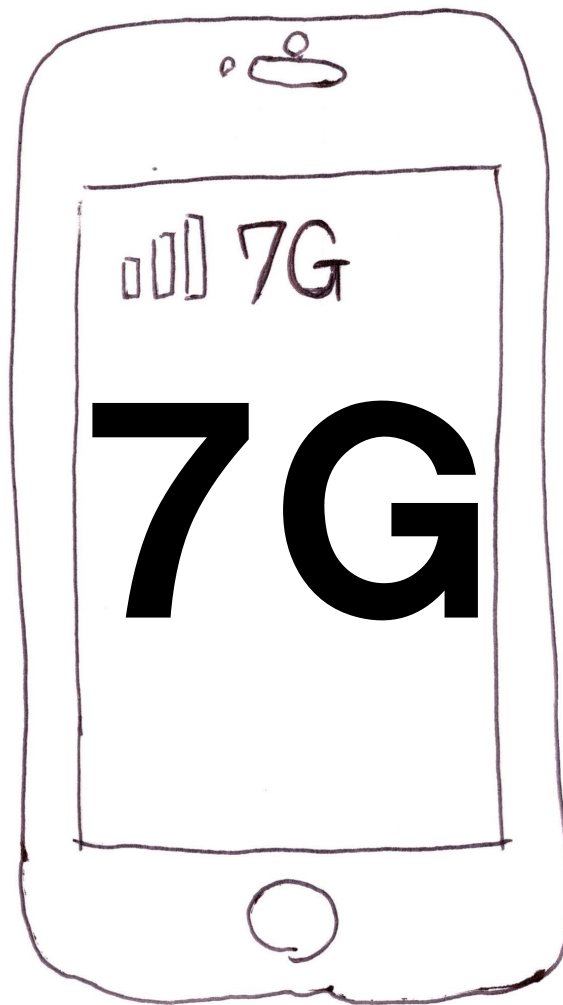
**農工大は情報や通信、その他たくさんの分野の**  
**有力な先生方の研究室が集まっており、私自身**  
**もとても触発(学問ではこれが大事)されます。**

**入学後、皆さんもレポートや実験をする中で、**  
**先輩や同期からとても触発されると思います。**

# 2つ、キーワードを説明します。

7G

# 2つ、キーワードを説明します。



**第7世代の通信を目指しています。今は4G、まもなく5G**

# 2つ、キーワードを説明します。

**T**


# 2つ、キーワードを説明します。

# T

テラと呼びます。

10の12乗という意味です。

1000000000000



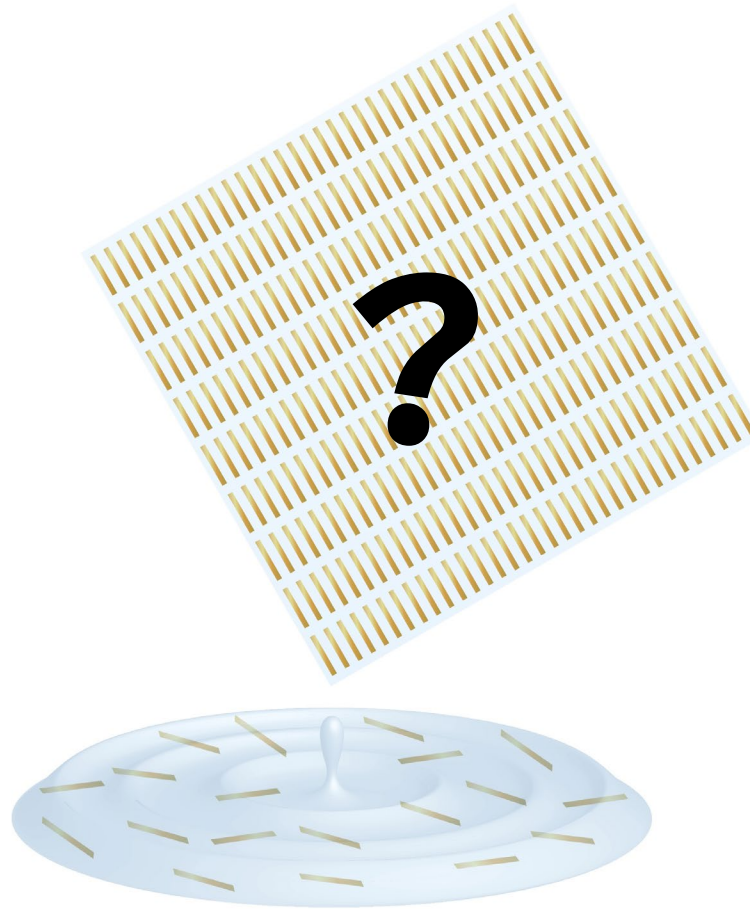
2つ、キーワードを説明します。

---

**テラヘルツ = 1兆回振動**  
**1秒で1兆回振動する電波です。**

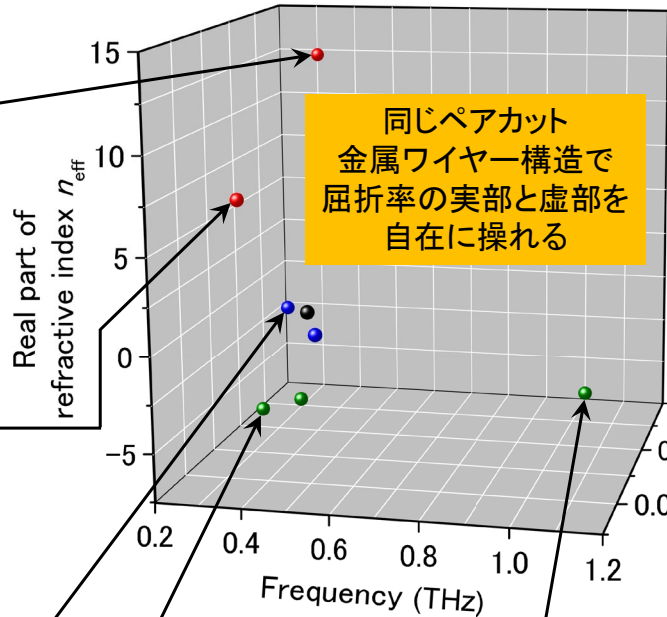
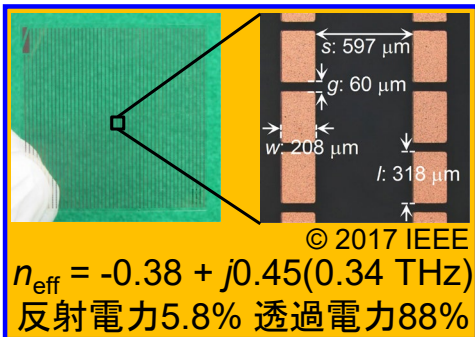
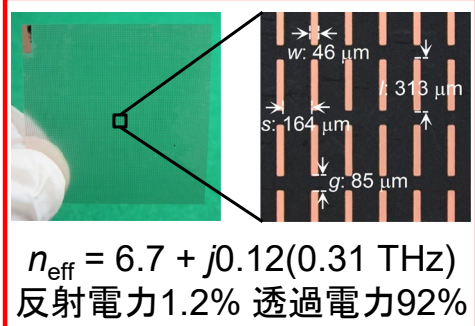
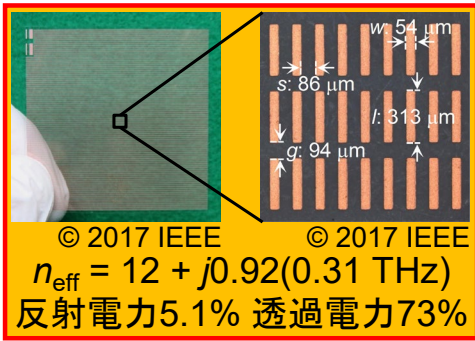


# スーパー材料



**自由自在に電波を操れる自然界にはない材料です。  
本名はメタ(=超)・マテリアル(=材料)といいます。**

# スーパー材料



- 高屈折率材料
- ゼロ屈折率材料
- 負の屈折率材料
- 自然界の材料 (シクロオレフィンポリマー)

研究紹介 極限屈折率材料の探索とテラヘルツ波帯への応用  
 鈴木 健仁

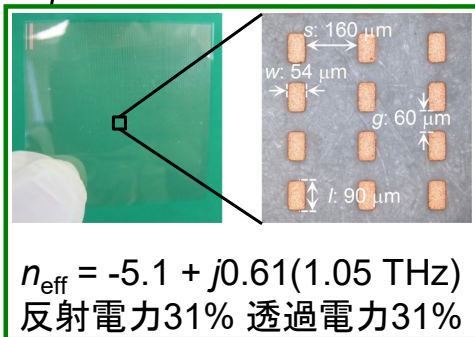
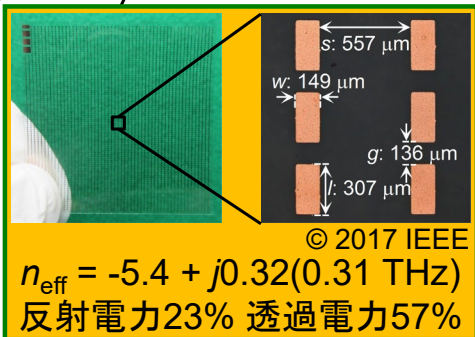
産業に用いられる電磁波の用途が時代と共に高周波帯へと移ってきており、無線通信や医療にも使われている高周波帯の電磁波をより有効に利用している。そのためには、正確に電磁波の伝播特性を制御できる材料が必要である。超伝導材料や半導体材料、さらには、材料に固有な材料も存在している。本研究では、

1. 実効的  
 電磁波の伝播特性を制御する材料として、テラヘルツ波帯に用いられる電磁波の用途が時代と共に高周波帯へと移ってきており、無線通信や医療にも使われている高周波帯の電磁波をより有効に利用している。そのためには、正確に電磁波の伝播特性を制御できる材料が必要である。超伝導材料や半導体材料、さらには、材料に固有な材料も存在している。本研究では、

テラヘルツ波帯の用途が時代と共に高周波帯へと移ってきており、無線通信や医療にも使われている高周波帯の電磁波をより有効に利用している。そのためには、正確に電磁波の伝播特性を制御できる材料が必要である。超伝導材料や半導体材料、さらには、材料に固有な材料も存在している。本研究では、

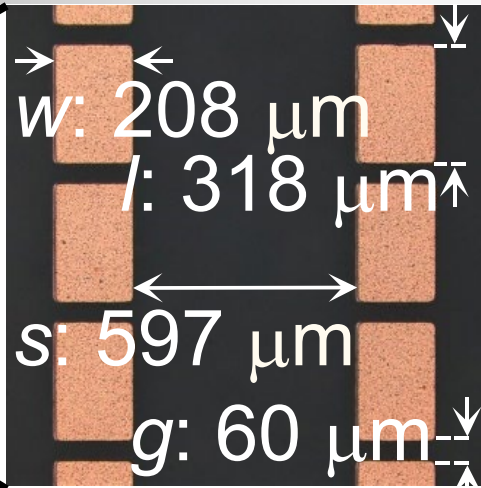
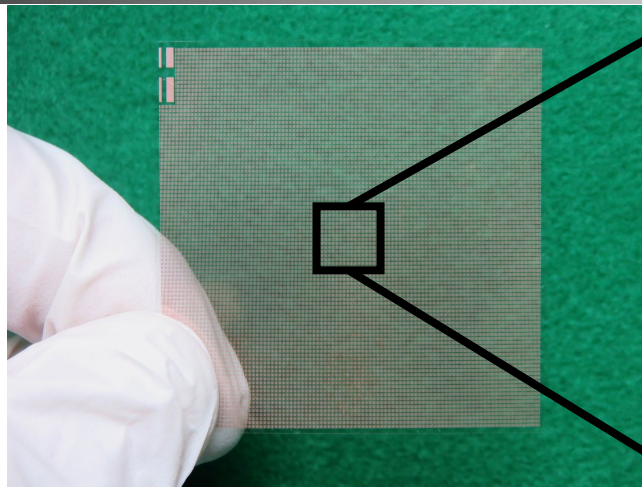
© 2017 IEEE

- ・応用物理 2017年10月号
- ・電気学会誌 2017年6月号
- ・電子情報通信学会誌 2016年2月号
- ・特開2017-157975
- ・特開2017-034584



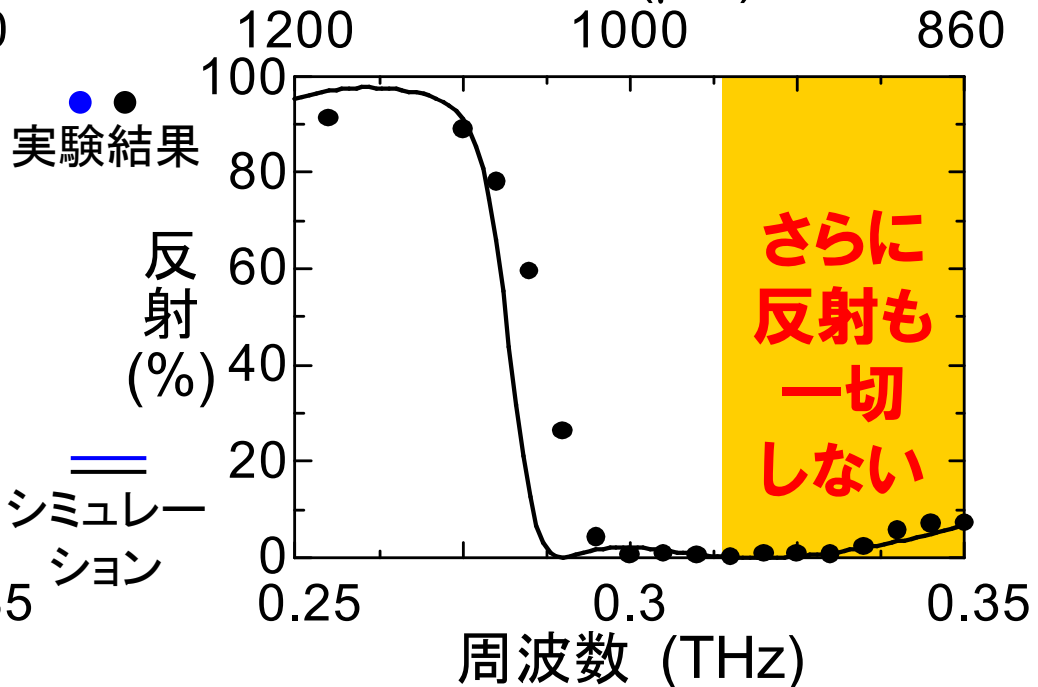
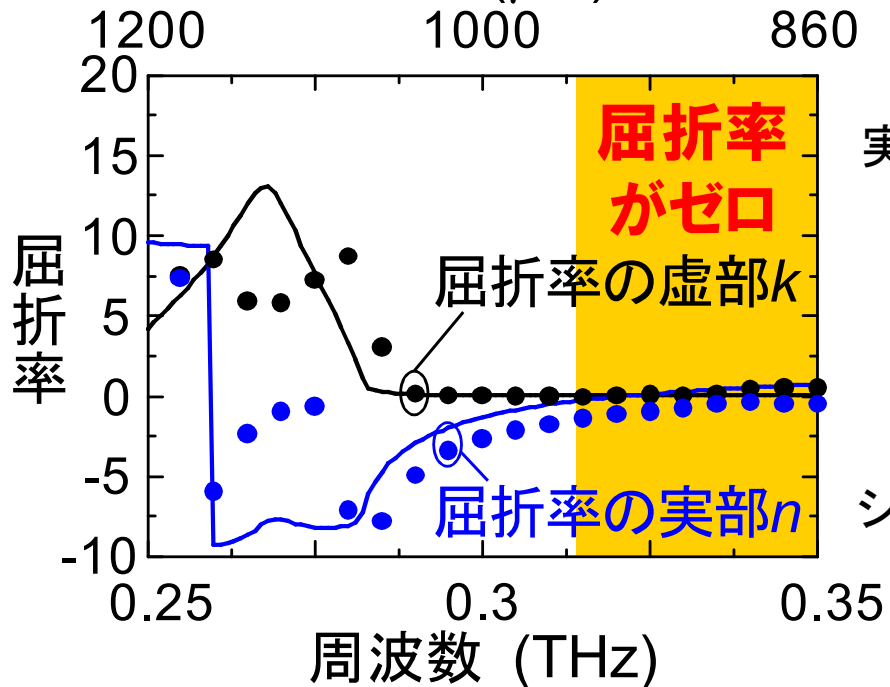
・T. Suzuki and S. Kondoh, Optical Materials Express, vol. 8, no.6, 2018.  
 ・T. Suzuki, M. Sekiya, T. Sato, and Y. Takebayashi, Optics Express, vol. 26, no.7, pp.8314-8324, Apr. 2018.  
 ・K. Ishihara (研究室指導学生) and T. Suzuki, Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, vol. 38, no. 9, pp. 1130-1139, Sep. 2017. (招待論文)

# スーパー材料



波長 (μm)

波長 (μm)

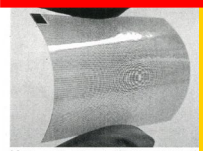


# ちょっと寄り道

8月21日(金) 2015年(平成27年) 日刊工業新聞

テラヘルツ波のメタマテリアル

## 反射抑え屈折率2倍



### 独自の材料を発見

独自の屈折率、反射率を制御する材料を開発。従来の材料とは異なり、屈折率を2倍以上に高め、反射率を抑制する。これは、テラヘルツ波のメタマテリアルを用いた実験の結果である。この材料は、通信や医療分野での応用が期待されている。

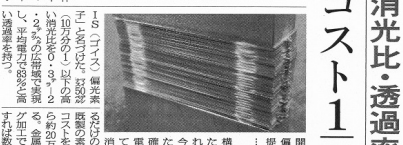
**花に貢献**

この材料は、花の色素を保護し、その色を長持ちさせるのに役立つ。また、紫外線を遮断することで、花の寿命を延ばす効果がある。これは、農業分野での応用が期待されている。

## テラヘルツ波で最高感度

信号取り出す偏光素子

### 超高感度な実験も



積層構造で高消光比・透過率 製造コスト1/5

この材料は、積層構造によって高消光比と高透過率を実現している。また、製造コストが従来の1/5に抑えられている。これは、産業化に向けた重要な進展である。



小泉先生



文部科学大臣

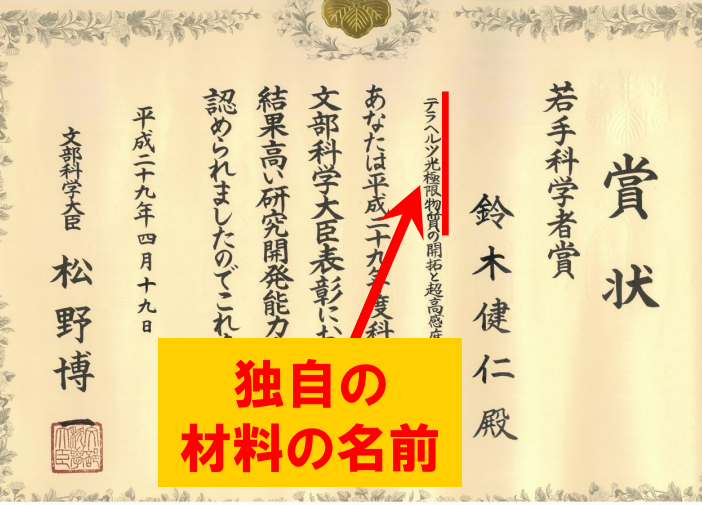
### 独自の材料について説明



鈴木

研究室の学生さん

## 文部科学大臣賞



### 賞状

若手科学者賞

鈴木健仁殿

あなたは平成二十九年度文部科学大臣表彰に、結果高い研究開発能力認められましたので、これを

テラヘルツ光極物質の開拓と超高感度

### 独自の材料の名前

平成二十九年 四月十九日

文部科学大臣 松野博



**2016年に独自の材料を発見しました。現在、研究と産業化に励んでいます。**

## 天皇皇后両陛下へ拝謁



日本国際賞

# 簡単な実験

高校物理の基礎の基礎レベル

# まずは基礎の基礎

物体の変化していく様子を知りたい。

$$\overset{\text{結果}}{ma} = \overset{\text{原因}}{F}$$

ニュートン先生(江戸時代)が見つけた  
運動方程式。とても有名な式。

$m$ :質量  $a$ :加速度  $F$ :力  $v$ :速度

# もう少しちゃんと書くと

物体の変化していく様子を知りたい。

結果

$$m \frac{dv}{dt} = F$$

原因

$dt$ の意味は「時間によって変化すると」

$m$ :質量  $a$ :加速度  $F$ :力  $v$ :速度



---

# 高校の物理と数学はとても大切

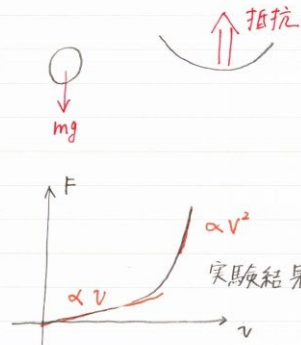
**教科書を一步超えて、  
物理や数学の原理の勉強が大切**



# 私の浪人時代のノート

NO. \_\_\_\_\_  
DATE \_\_\_\_\_

4



運動方程式

$$m \frac{dv}{dt} = mg - kv$$

空気抵抗は  $v$  に依存するとして解いている



$$m \frac{dv}{dt} = mg \sin \theta - kv$$

運動方程式  
 $m \frac{dv}{dt} = m g \sin \theta - kv$   
 $m \cdot 0 = N - mg \cos \theta$   
 $\frac{dv}{dt} = g(\sin \theta - \mu \cos \theta) - kv$

定数  $v$  の時間変化

NO. \_\_\_\_\_  
DATE \_\_\_\_\_

$$= -\lambda \left\{ v - \frac{g(\sin \theta - \mu \cos \theta)}{\lambda} \right\}$$

$$= -\lambda (v - v_0)$$

$v_0$  (定数)

$$\Leftrightarrow \int \frac{dv}{v-v_0} = \int (-\lambda) dt$$

$$\Leftrightarrow \log |v-v_0| = -\lambda t + C_1$$

( $C_1$ : 積分定数)

$$\Leftrightarrow v-v_0 = e^{-\lambda t + C_1} = \pm e^{C_1} \cdot e^{-\lambda t}$$

$$\pm e^{C_1} = C_2 \text{ (定数)}$$

$$\Leftrightarrow v = v_0 + C_2 e^{-\lambda t}$$

初期条件  $t=0$  のとき  $v=0$

$$0 = v_0 + C_2 \cdot 1 \quad \therefore C_2 = -v_0$$

$$v = v_0 (1 - e^{-\lambda t}) \leftarrow \text{無次元}$$

微分方程式の解き方

$e = 2.718$

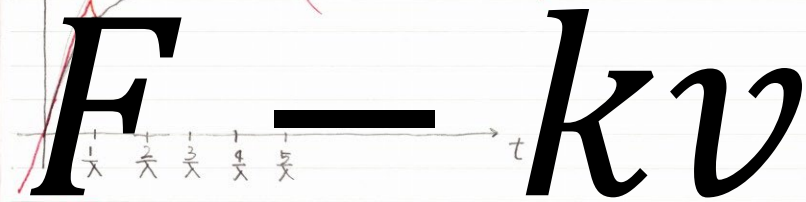
$t = \frac{1}{\lambda}$  (時定数)  $\frac{1}{e} = 0.37 \quad 1 - \frac{1}{e} = 0.63$

$v_0$

$0.37v_0, 0.14, 0.05, 0.02$

(充分時間がたつた後)  $v \rightarrow v_0$

$t = \frac{2}{\lambda} \quad \frac{1}{e^2} = 0.14 \quad 1 - \frac{1}{e^2} = 0.86$



$v=0$  のときの加速度

# ちよつと実験

電波はとっても面白い振る舞いをします

# 電波を出す身近なものは？

そうです、皆さんの自宅にも必ずある



**こちら。**

ではなく・・・

# 電子レンジ

中のアンテナから電波が出てきます。

# もう少し発展して

情報を伝える電波の様子を知りたい。

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \iint_S \left( \mathbf{i} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{S}$$

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{\partial}{\partial t} \iint_S \mu \mathbf{H} \cdot d\mathbf{S}$$

**マクスウェル先生(明治前)の方程式。  
大学3年生の講義で学びます。**

# マクスウェル先生(明治前)の論文

<http://rstl.royalsocietypublishing.org/content/155/459.full.pdf+html>

J. C. Maxwell, “A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field”, vol.155, pp.459-512, Jan. 1865.



# ざっくりと簡単にして

情報を伝える電波の様子を知りたい。

$$\int \overset{\text{結果}}{H} \cdot dl \doteq \int \frac{d\overset{\text{原因}}{E}}{dt} \cdot dS$$

$$\int \overset{\text{結果}}{E} \cdot dl \doteq - \int \frac{d\overset{\text{原因}}{H}}{dt} \cdot dS$$

$dt$ の意味は「時間によって変化すると」

$E$ は電気力で、 $H$ は磁石の力です。

# ざっくりと簡単にして

情報を伝える電波の様子を知りたい。

$$\int \overset{\text{結果}}{H} \cdot dl \doteq \int \frac{d\overset{\text{原因}}{E}}{dt} \cdot dS$$

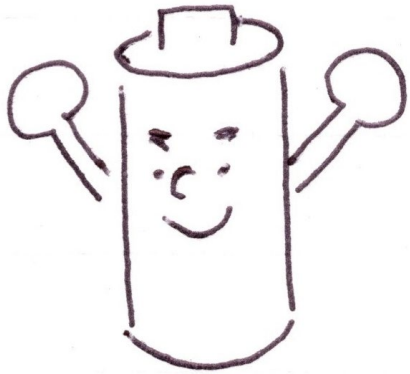
$$\int \overset{\text{結果}}{E} \cdot dl \doteq - \int \frac{d\overset{\text{原因}}{H}}{dt} \cdot dS$$

$dt$ の意味は「時間によって変化すると」

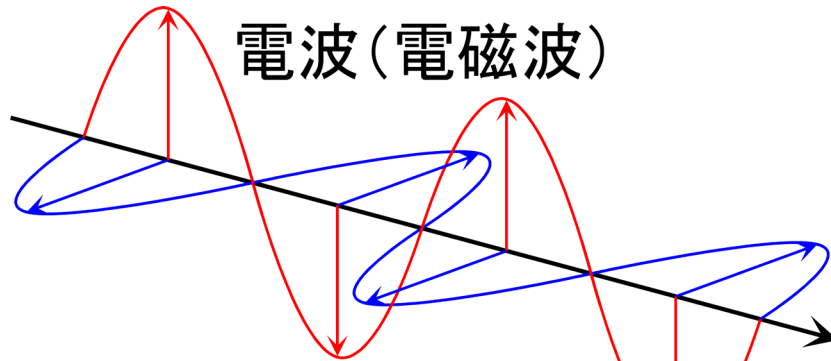
$E$ は電気力で、 $H$ は磁石の力です。

# 何が起きているのか？

## 電気の力



電波(電磁波)

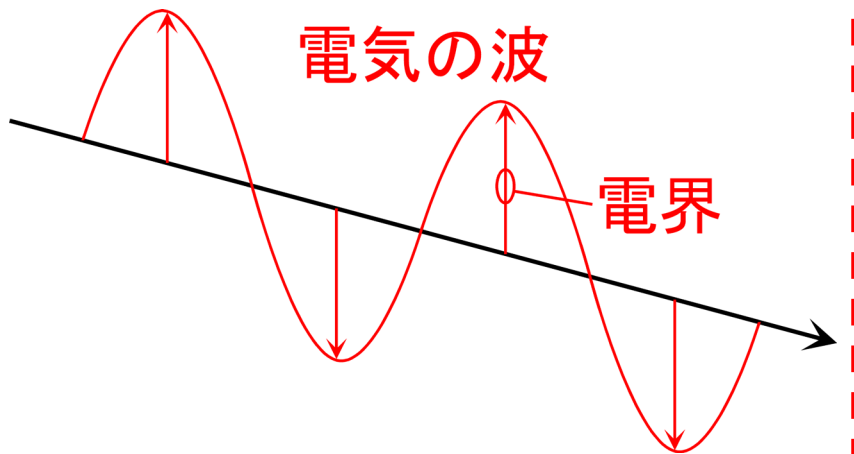


## 磁石の力

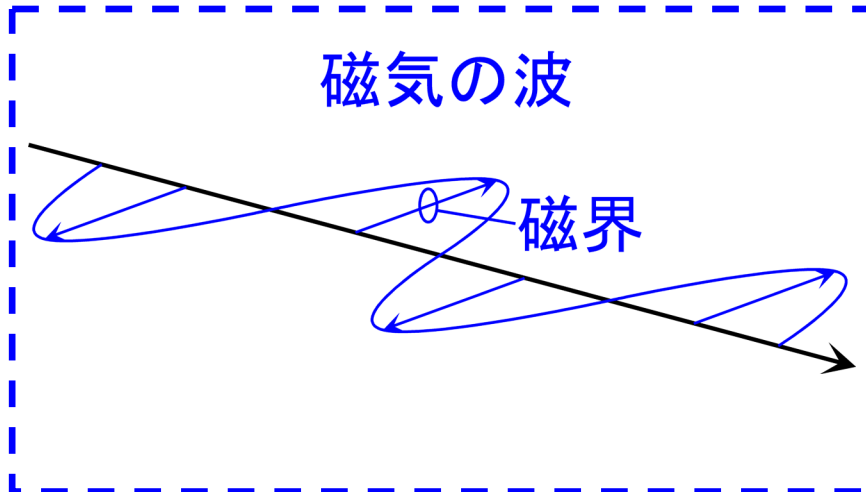


**電波(電磁波) = 電気の波 + 磁気の波**

電気の波



磁気の波



+

# 1コマ目

ある時 $E$ (電界)が生まれたら、

$$\int H \cdot dl \doteq \int \frac{d\textcircled{E}}{dt} \cdot dS \text{原因(バチツと放電...)}$$

$$\int E \cdot dl \doteq - \int \frac{dH}{dt} \cdot dS$$

$dt$ の意味は「時間によって変化すると」  
 $E$ は電気力で、 $H$ は磁石の力です。

## 2コマ目

ちょっとしたしたら  $E$  (電界) は消えかけ、

$$\int H \cdot dl \doteq \int \frac{d(E) \text{原因}}{dt} \cdot dS$$

$$\int E \cdot dl \doteq - \int \frac{dH}{dt} \cdot dS$$

$dt$  の意味は「時間によって変化すると」  
 $E$  は電気ので、 $H$  は磁石の力です。

# 3コマ目

そうしたら **$H$** (磁界)が出現して、

$$\int \textcircled{H} \cdot dl \doteq \int \frac{dE}{dt} \cdot dS$$

$$\int E \cdot dl \doteq - \int \frac{dH}{dt} \cdot dS$$

$dt$ の意味は「時間によって変化すると」  
 $E$ は電気力で、 $H$ は磁石の力です。

## 4コマ目

そうしたらこっちの **$H$ (磁界)**が生まれた

$$\int H \cdot dl \doteq \int \frac{dE}{dt} \cdot dS$$

$$\int E \cdot dl \doteq - \int \frac{d\textcircled{H}}{dt} \cdot dS$$

$dt$ の意味は「時間によって変化すると」  
 $E$ は電気力で、 $H$ は磁石の力です。

# 5コマ目

次は $H$ (磁界)は消えかけ、

$$\int H \cdot dl \doteq \int \frac{dE}{dt} \cdot dS$$

$$\int E \cdot dl \doteq - \int \frac{d\textcircled{H} \text{原因}}{dt} \cdot dS$$

$dt$ の意味は「時間によって変化すると」  
 $E$ は電気力で、 $H$ は磁石の力です。



# 6コマ目

そうしたらこっちの **$E$** (電界)が生まれた

$$\int H \cdot dl \doteq \int \frac{dE}{dt} \cdot dS$$

**結果**

$$\int \textcircled{E} \cdot dl \doteq - \int \frac{dH}{dt} \cdot dS$$

$dt$ の意味は「時間によって変化すると」  
 $E$ は電気力で、 $H$ は磁石の力です。

# 7コマ目

元に戻ってきた、**どうも繰り返そう。**

$$\int H \cdot dl \doteq \int \frac{d\textcircled{E} \text{原因(元に戻ってきた)}}{dt} \cdot dS$$

$$\int E \cdot dl \doteq - \int \frac{dH}{dt} \cdot dS$$

$dt$ の意味は「時間によって変化すると」  
 $E$ は電気力で、 $H$ は磁石の力です。



---

**もっともっと簡単にすると**

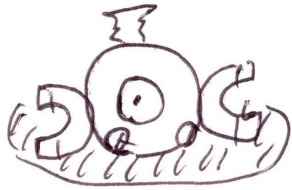
てっかー!



てっか<sub>2</sub>!



てっか!



**こちら。**

電界  $E \rightarrow$



電界  $E \rightarrow$



磁界  $H \rightarrow$

これはあくまでイメージ(明治時代の仮説)です。

「ダンスみたいな」ファインマン先生(昭和・ノーベル賞)講義より



---

# 仮説を証明したいので

ヘルツ先生(明治時代)の  
実験のようなことをしてみる。



---

**実験により仮説は証明される。**

**けれど仮説が間違っていることも日常茶飯事。**

**自分で原理に立ち返って考えることが大切。**

# 電波は操れるらしい。ならば

「工学部」なので、何かに応用できることが  
とても大切です。それが遠い未来でも全然良いです。

“ぶっとんだ”未来の時代を論理的に創造できるのが  
「研究」の面白さです。



**面白いことに応用できないか。**

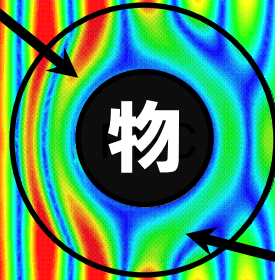
**東京農工大学 工学部**  
**知能情報システム工学科**

**「透明マントが作れるんじゃないか？」**

**アメリカのスミス先生(2006年)が  
4Gで初めて実現。スーパー材料開発が  
世界中でスタートしました。**

# 透明マント・テクノロジー

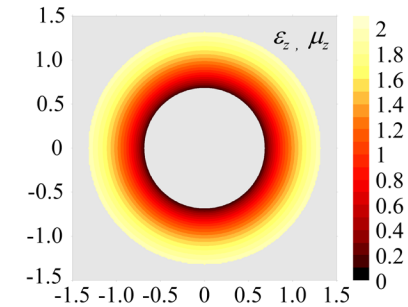
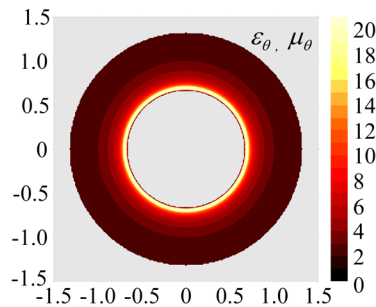
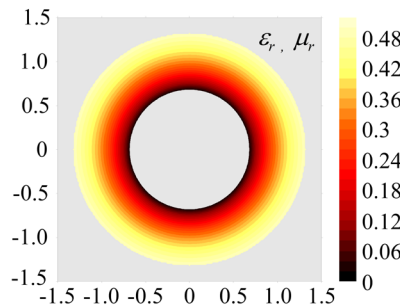
スーパー材料で物をくぐるむと



反射せず電波が物を迂回する

[1] D. Schurig et al.,  
Science **314**, 977 (2006)

H  
↑  
E ⊗ → k



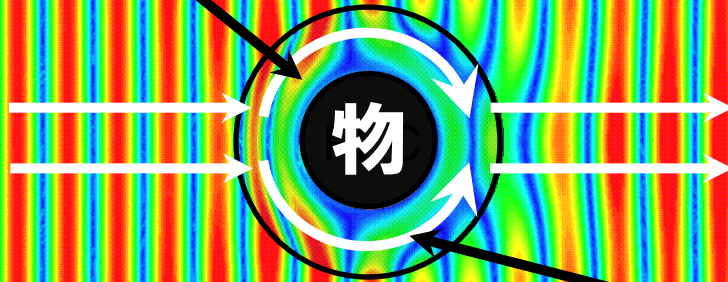
[2] D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr, and D. R. Smith,  
Science **314**, 977 (2006).

[3] L. Zhang, M. Yan and M. Qiu, J. Opt. A: Pure Appl. Opt. **10**, 095001 (2008).

**アメリカのスミス先生(2006年)が4Gで初めて  
実現。世界中でスーパー材料開発がスタートしました。**

# 透明マント・テクノロジー

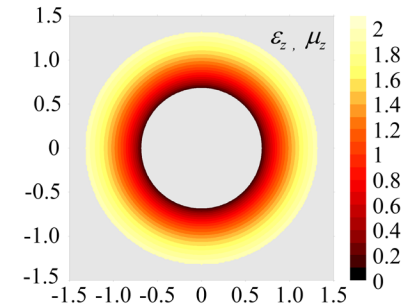
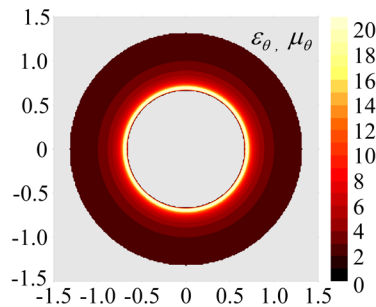
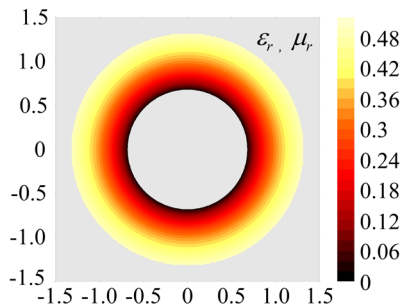
スーパー材料で物をくぐるむと



反射せず電波が物を迂回する

[1] D. Schurig et al.,  
Science **314**, 977 (2006)

H  
↑  
E ⊗ → k



[2] D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr, and D. R. Smith,  
Science **314**, 977 (2006).

[3] L. Zhang, M. Yan and M. Qiu, J. Opt. A: Pure Appl. Opt. **10**, 095001 (2008).

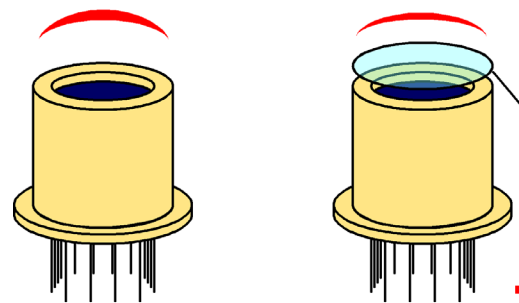
**アメリカのスミス先生(2006年)が4Gで初めて  
実現。世界中でスーパー材料開発がスタートしました。**

**情報をたくさん乗せて遠くに送りたい。**

**東京農工大学 工学部**  
**知能情報システム工学科**

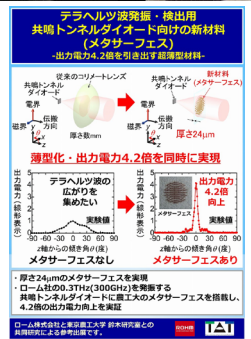
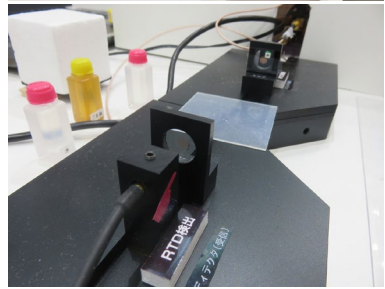
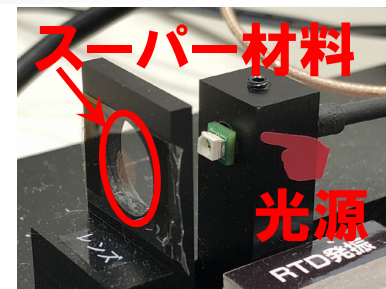
# 研究室独自のスーパー材料

鈴木, テラヘルツ  
応用システム研究会,  
Aug. 2019.より

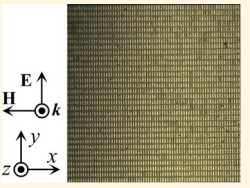
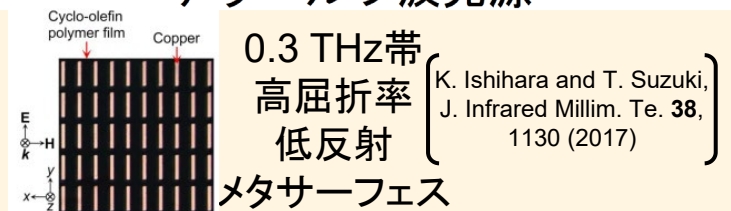


この部分に載せて  
いるのが、  
スーパー材料です。

室温動作・連続発振  
テラヘルツ波光源

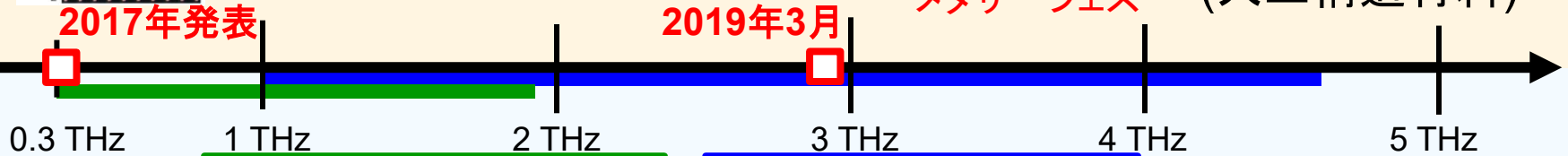


2018年展示会



3.0 THz帯  
高屈折率  
低反射  
メタサーフェス

テラヘルツ波帯  
メタサーフェス  
(人工構造材料)



室温動作・連続発振  
共鳴トンネルダイオード

室温動作・連続発振  
量子カスケードレーザ

テラヘルツ波帯  
連続発振光源

T. Maekawa et al.,  
Appl. Phys. Express 9,  
024101 (2016)

M. Razeghi et al.,  
Opt. Express 23,  
8462 (2015)

# 研究室の学生さん

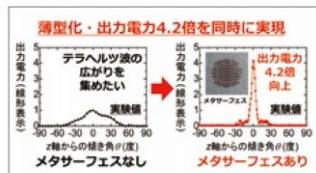
## Manipulation of EM Waves

工学部 電気電子工学科 鈴木研究室 (2019年4月から工学部知能情報システム工学科に所属)

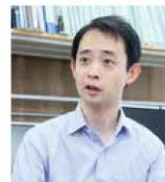
### 未来の通信を支える新材料「メタサーフェス」を開発

私たちがスマホで利用している「4G」の次世代にあたる「5G」通信は、周波数28GHz（ギガヘルツ）帯を利用するとされています。当研究室で扱うのは、300GHzや3THzなどの周波数帯の電磁波で、通称「テラヘルツ波」と呼ばれています。私たちは、企業と共同で5Gの次の次くらいに実用化されると期待されている「テラヘルツ波帯」に用いるアンテナやそれに用いる新材料の研究に取り組んでいます。

研究テーマは、自然界には存在しない電磁的性質を持つ人工物質を使って、電波や熱の輸送を制御すること。メタサーフェス（超表面）と名付けた新材料を用いて、未来の通信や発電を支える基盤技術の開発に挑んでいます。この研究の面白さは、まだ誰も知らない電波や光のフロンティアに書き出して、世の中を変えてしまう可能性があること。開発した新材料を実用化するのが私たちの目標です。



メタサーフェスの特長を示した概念図



工学部 電気電子工学科

鈴木健仁 准教授

東京工業大学大学院電気電子工学専攻 博士課程修了。博士(工学)。独立行政法人 日本学術振興会特別研究員。茨城大学工学部講師などを経て、2017年から東京農工大学で指導にあたる。

ただ、そこへ向けた研究の日はひたすら地道です。私は学生たちに、研究は「各駅停車」だとよく言っています。確実に前進していけば、必ず終着駅にたどり着く——。そこまでは、言わば「九転十起」でいいのです。不可能といわれるような壁にぶつかっていかないと本当の成功は待っていません。

東京農工大学には、地道に頑張る学生を

しっかり応援する風土があります。これは、研究者である教員にとっても同様で、私も2017年に現職に着任し、恵まれた研究環境を実感しています。現在の研究テーマは、JST（科学技術振興機構）「さきがけ」の採択も受けています。未来の通信を変えるような新材料をこの研究室から世界に向けて発信したいと思っています。



2017年にできたばかりの鈴木研究室。少人数の環境で1人1人研究テーマを持つことができます。



工学部電気電子工学科 4年  
朝田晴美さん  
山口県立防府高等学校出身

メタサーフェスを構成する材料の研究をしています。現在は素材となる金属のテラヘルツ波帯の導電率を測定しています。将来は、研究で得た専門知識を新たな応用技術につなげたいと思っています。



工学部電気電子工学科 4年  
遠藤孝太さん  
国立長野工業高等専門学校出身

メタサーフェスの動作原理を理解する研究を担当しています。パソコンを何台も使い、自然界に存在しない新材料の挙動を何日もかけて解析する大変な作業です。大学院でもこの研究を続ける予定です。



工学部電気電子工学科 4年  
中尾春咲さん  
国立木更津工業高等専門学校出身

メタサーフェスの薄膜を用いてテラヘルツ波を上手に操るのが私のテーマ。開発した材料を応用し、改善していく研究です。企業との共同研究で、産業界を身近に感じられるのがこの研究室の魅力です。

# 未来の学生の皆さんへ

## 九転十起

僕の好きな言葉です。  
江戸から昭和を駆け抜けた横浜の実業家の言葉です。  
研究生活にも通じるような気がしています。



# 謝辞

ご清聴

ありがとうございました。

