

# 面白くて役に立つ物質の科学

排熱から電気を生み出すセラミックスの発見

理学部物理学科

理学部長・理学研究科長

寺崎 一郎

引用のない写真・肖像画などはwikipediaから

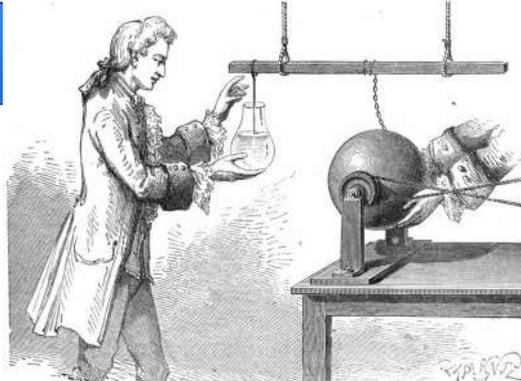


- 物質の科学の魅力
- 面白くて役に立つ物質 半導体を例として
- 排熱から電気を生み出すセラミックスの発見
- まとめ

- 物質の科学の魅力
- 面白くて役に立つ物質 半導体を例として
- 排熱から電気を生み出すセラミックスの発見
- まとめ



磁鉄鉱と磁気



琥珀と静電気

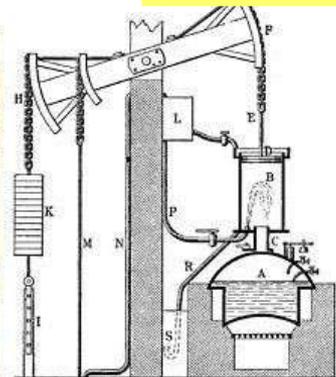


電池と電磁気

蒸気機関の発展

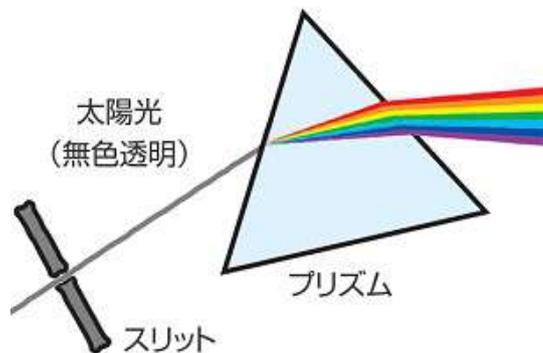


ワットの蒸気機関  
(出典: Wikipedia)



Revolvens Damboldhine.  
ニューコメンの蒸気機関

気体と蒸気機関



ニュートンは虹色の帯をスペクトルと名付けた

ガラスと光学

科学の発展は常に物質開発とともにありました。

- 宇宙物理学 もっと遠くには何があるのか
- 素粒子物理学 世界は何からできているか
- この2つは、根源的な疑問に直結する、面白さが「自明な問題」  
→ **子供の疑問**と定義します
- 物理学はひとにぎりの根本原理と少数の素粒子で世界が記述できると考えます。では世界はそんなに単純なのかということ・・・

- 空が青く、木々が緑なのはなぜか
- 水は蒸気になったり凍ったりするのはなぜか
- 金属はぴかぴかでガラスは透明なのはなぜか
- 物質によって、硬い・柔らかい、電気を流す・流さない、磁石につく・つかないのはなぜか

世界が少数の素粒子と少数の法則で記述できるなら、なぜ私達の世界が複雑で、豊かで、美しいのかが疑問となって浮かび上がります。

→これを**大人の疑問**と定義します。物質の科学は大人の疑問を扱います。



# More Is Different

Broken symmetry and the nature of the hierarchical structure of science.

P. W. Anderson

*Science* **177**, 393 (1972)

one may array the sciences roughly linearly in a hierarchy, according to the idea: The elementary entities of science X obey the laws of science Y.

X	Y
solid state or many-body physics	elementary particle physics
chemistry	many-body physics
molecular biology	chemistry
cell biology	molecular biology
⋮	⋮
⋮	⋮
⋮	⋮
psychology	physiology
social sciences	psychology

But this hierarchy does not imply that science X is “just applied Y.” At each stage entirely new laws, concepts, and generalizations are necessary, requiring inspiration and creativity to just as great a degree as in the previous one. Psychology is not applied biology, nor is biology applied chemistry.



## 天声人語

「スモール・イズ・ビューティフル」と英国の経済学者シューマツハー氏が

唱えたところ、環境保護に関心を持つ人の間で「モア・イズ・ワース」という表（多）ことは悪い」という表現も流行した。大量生産大量消費を戒める標語だ▼ノーベル物理学賞学者のP・アンダーソン氏はこれをもじり「モア・イズ・ディファレント（多）いと様相が変わる」と言った▼物理学は万物の基本法則を求め、極微の世界に入り込んだ。少数の基本粒子が理解できればすべてわかると信じたからだ▼だが、日常接する物質には基本粒子が気の遠くなるほどたくさん詰まっている。軟らかい、硬い、重い、軽い、磁石につく、つかないなど、性質もさまざまだ。基本粒子の種類は少ないのに、膨大な数が集まると想像を超える多様性が

現れてくる。基本粒子をいくら調べても、物事はわからない。簡潔な言い回しにこんな主張が込められていた。それが、新しい研究領域を生み出す呼び水にもなった▼アンダーソン氏は、先日、東京大学から名誉博士号を受け、来日した。貧困の研究でノーベル経済学賞を受けたアマールティア・セン博士に続き、2人目の東大名誉博士だ。79歳の誕生日が目前だったが、かくしゃくとしたものだった▼数が増えると変わるのは、物質に限ったことではなからう。例えば、政治や経済の世界の女性や若手はどうだろう。ある程度の数が集まって初めて、全体の質に変化が出るのではないか。「多くなると何かが変わる」。魅力的な言葉だ。物理の世界にとどめておくのは惜しい。

2023年学問の面白さを知る 寺崎一郎

# 多くなると何かが変わる

- ✓ アンダーソンの言葉
  - ひとつひとつが理解できても, たくさん集まるとすべてが変わります。
  - 水は1分子 $\text{H}_2\text{O}$ では凍るかどうかわかりません。たくさん集めると凍ります。
  - たくさんの原子・電子を集めたときに何が起こるか、は最先端の科学です。
- ✓ 物質の性質を決めているのは電子だけなのに・・・
  - 磁性体 (ビデオテープ)
  - 誘電体 (携帯電話)
  - 超伝導体 (リニアモーターカー)
  - 半導体 (コンピュータ)
  - 光学材料 (DVD)
- ✓ 私たちは, 物質の機能のすべてを予言できていません。至る所にフロンティアがあるのです。



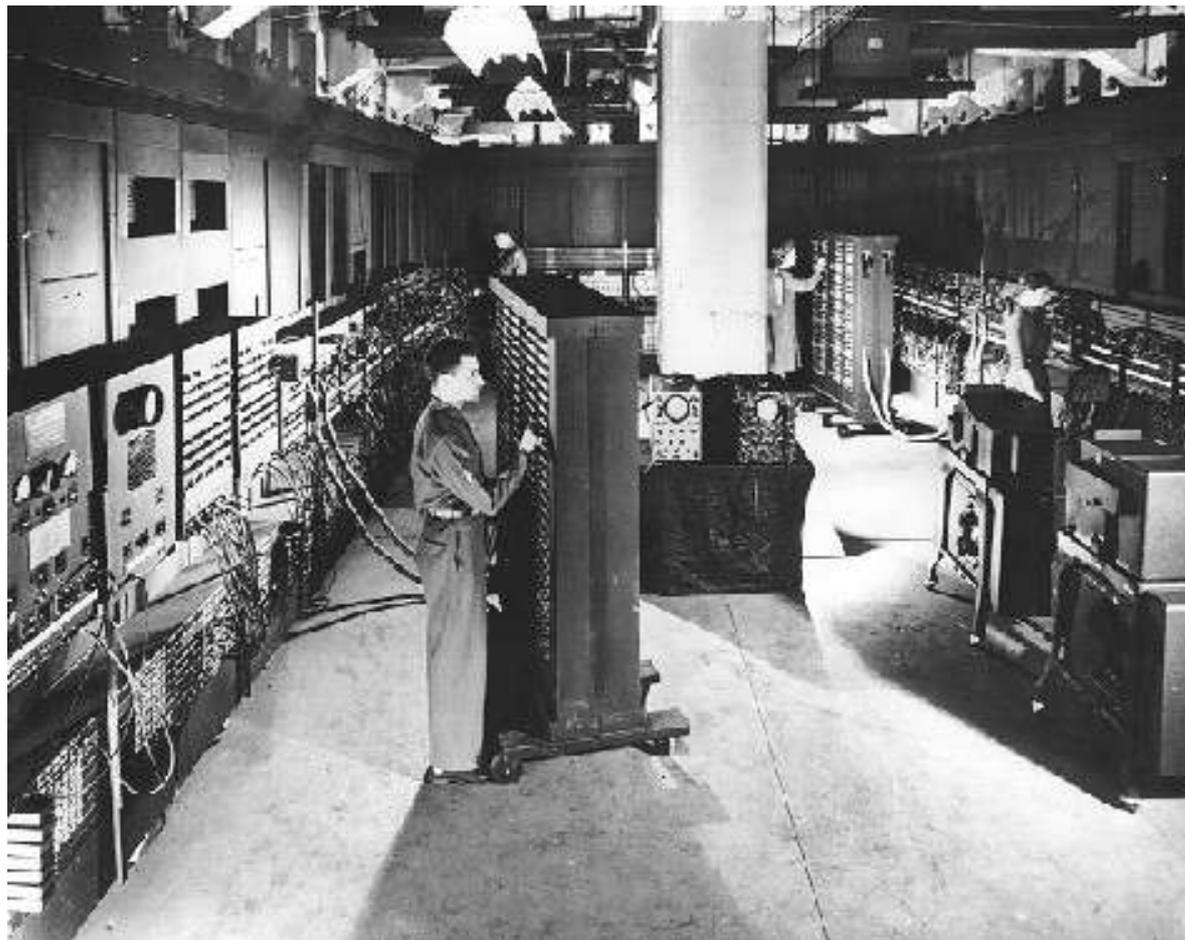
# 物質の科学は各年にノーベル賞がでています。

- 1985 量子ホール効果
- 1986 電子顕微鏡と走査トンネル顕微鏡
- 1987 高温超伝導
- 1989 イオントラップ
- 1991 ソフトマター
- 1994 中性子散乱
- 1996  $^3\text{He}$ の超流動
- 1997 レーザー冷却
- 1998 分数量子ホール効果
- 2000 半導体LSI
- 2001 原子ガスのボーズ凝縮
- 2003 超伝導の理論
- 2005 量子光学
- 2007 巨大磁気抵抗
- 2009 光通信
- 2010 グラフェン
- 2011 准結晶※
- 2012 量子計算の基礎
- 2014 青色LED
- 2016 トポロジカル物質
- 2018 光ピンセット・パルスレーザー
- 2019 リチウム電池※
- 2021 無秩序と変動の相互作用
- 2022 量子もつれ



- 物質の科学の魅力
- 面白くて役に立つ物質 半導体を例として
- 排熱から電気を生み出すセラミックスの発見
- まとめ

# 真空管コンピュータ



<https://www.computerhistory.org/revolution/birth-of-the-computer/4/78>

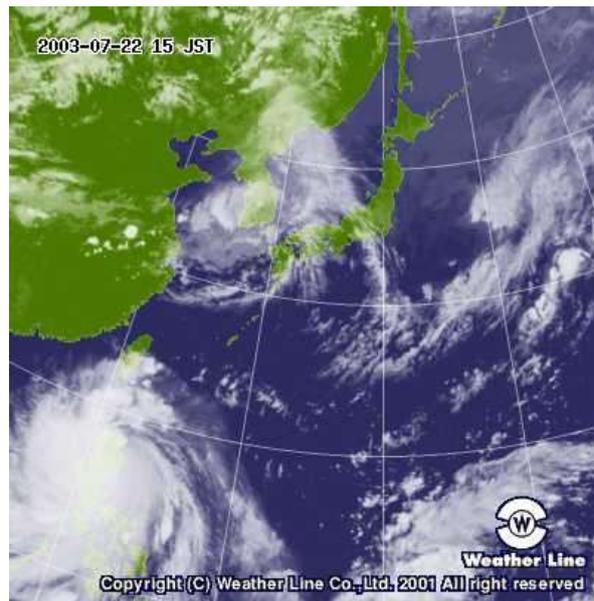
ENIAC (1946)  
18000個の真空管



名古屋大学  
NAGOYA UNIVERSITY

2023年学問の面白さを知る 寺崎一郎

# 量子力学： 粒子と波の二重性



天気図上の台風は、あたかも粒子のように表現されます

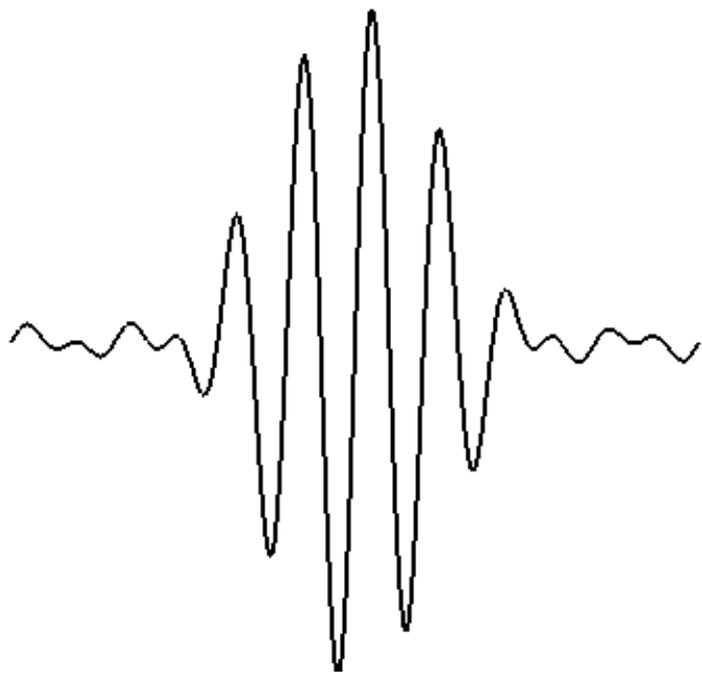
しかし実際の台風は、空気の渦(波)にすぎません。  
→エネルギーが集中している部分を粒子に見立てることは理にかなっていません。



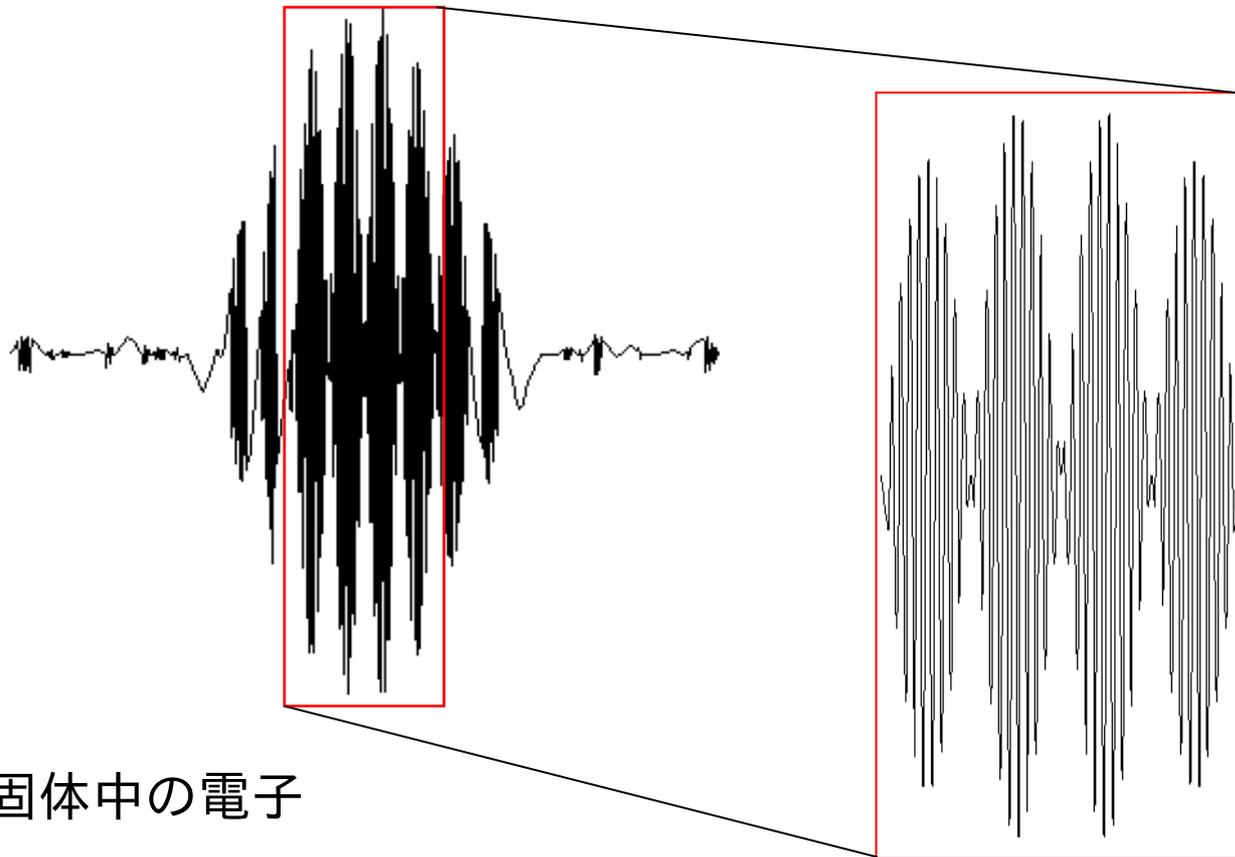
名古屋大学  
NAGOYA UNIVERSITY

2023年学問の面白さを知る 寺崎一郎

# 真空中の電子と固体中の電子



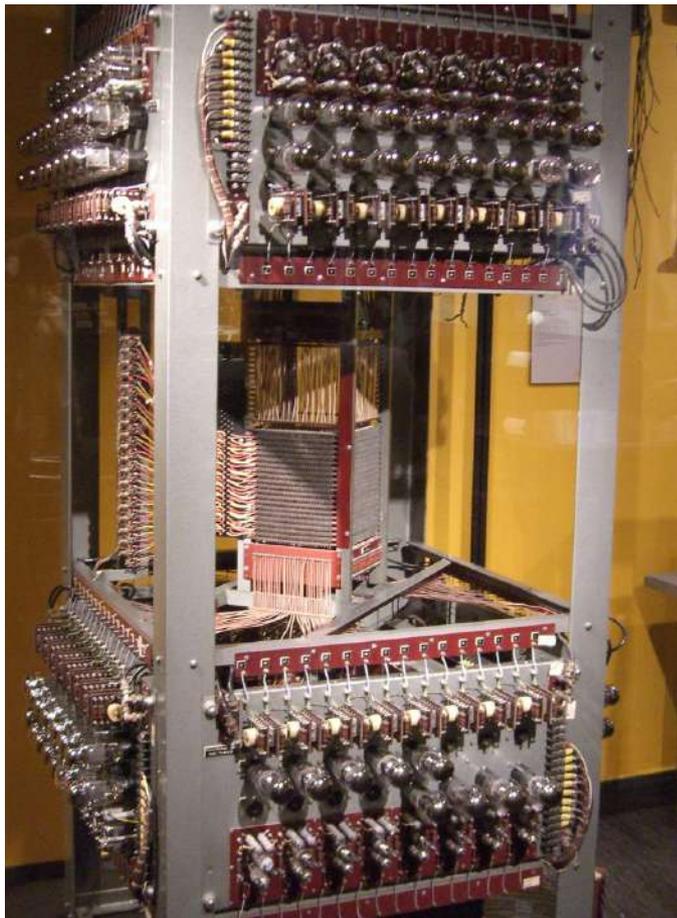
真空中の電子



固体中の電子

固体の中の電子と真空中の電子は細かい振動部分を除くと良く似ています。

# 半導体コンピュータ



## TX-0 Computer

MIT Lincoln Laboratory

1953-1957

Engineers at Lincoln Laboratory led by MIT and Whirlwind alumnus Kenneth Olsen built "Tix Oh," the TX-0 computer, an experimental high-speed digital computer for testing transistor circuitry and very large magnetic core memory. Transistors were expensive (\$30-\$80 each compared with \$3-\$10 per tube), and TX-0 used 3,600 total. The Lincoln



TX-0 (1953)  
3600個のトランジスタ  
と磁気メモリを装備



名古屋大学  
NAGOYA UNIVERSITY

2023年学問の面白さを知る 寺崎一郎

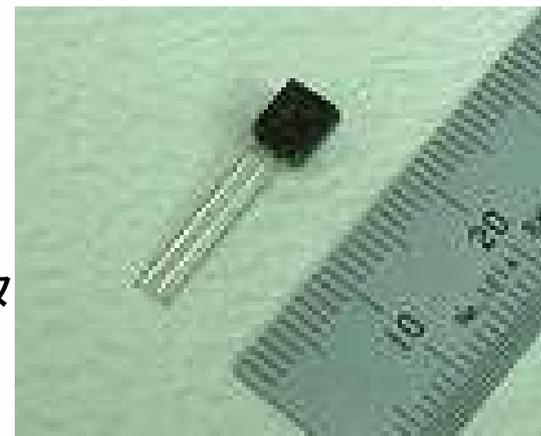
## 半導体技術

電子にとって固体を真空と同じ環境にすることです

超高純度  
超精密制御  
ナノ技術

そして手のひらにスーパーコンピュータを

トランジスタ



[https://www.zea.jp/audio/swr/tamr\\_02.htm](https://www.zea.jp/audio/swr/tamr_02.htm)

Athron64  
(PCのCPU)  
1億個のトランジスタ



<https://www.amazon.co.jp/-/en/OSA246CEP5AU/dp/B003L9GC2C>

- 物質の科学の魅力
- 面白くて役に立つ物質 半導体を例として
- 排熱から電気を生み出すセラミックスの発見
- まとめ

# 熱について中学校で学んだこと

## 熱の伝わり方



<https://futabagumi.com/archives/377.html>

中学校では、熱の伝わり方とか、電気で水が何度温まるかとか、化学反応に伴う熱を学びました。でも熱の正体はまだ習っていません。実は高校でも学ばないのです。



名古屋大学  
NAGOYA UNIVERSITY

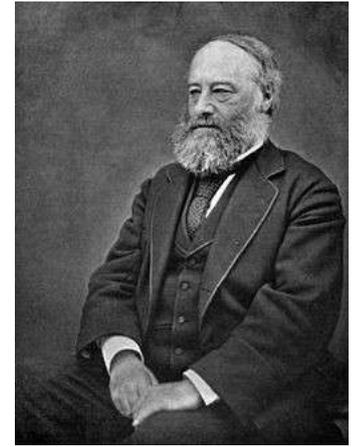
2023年学問の面白さを知る 寺崎一郎

# 熱の正体とは何でしょうか

- かつては熱は粒子(熱素)であると考えられていました。
- 18世紀、産業革命で発展した熱機関は応用が進みますが、熱の本質は謎のままでした。
- 19世紀半ばになって、電気と磁気の物理学の発展が熱の物理学の発展を促します。
- やがて熱力学の第二法則と第一法則がほぼ同時に確立します。



ファラデー

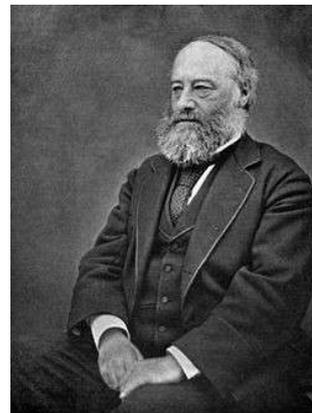


ジュール

# 第一法則 熱はエネルギーの一種です



ヘルムホルツ



ジュール

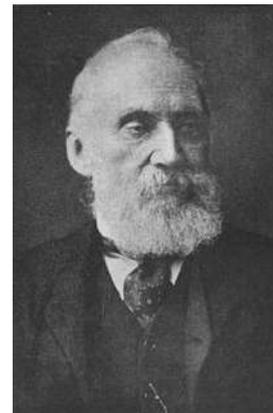
<http://www.club.t-fal.co.jp/>

<https://www.komeri.com/f/dsd-001033002001-->

電気ポットや電気ストーブは電気エネルギーを100%熱エネルギーに変換しています

多くのエネルギーは100%熱エネルギーに変換できます。

ケルビン



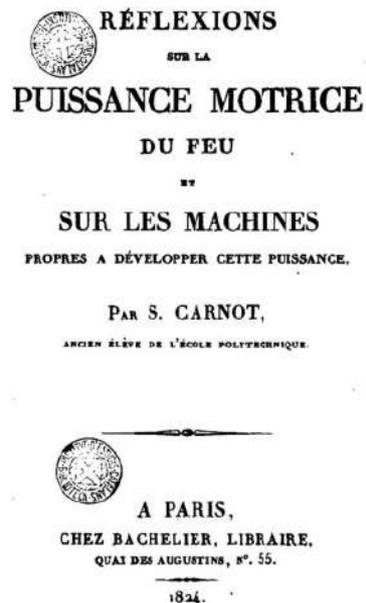
名古屋大学  
NAGOYA UNIVERSITY

2023年学問の面白さを知る 寺崎一郎

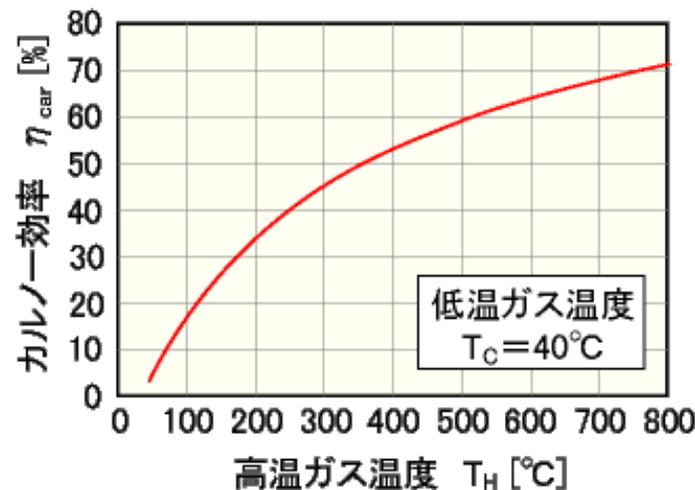
## 第二法則 熱は100%他のエネルギーに変換できません



カルノー



カルノーは28歳でたった1本の論文「火の動力」を書いて第二法則を示しました。しかし、20数年後にケルビン卿に再評価されるまでその成果は無視されました。



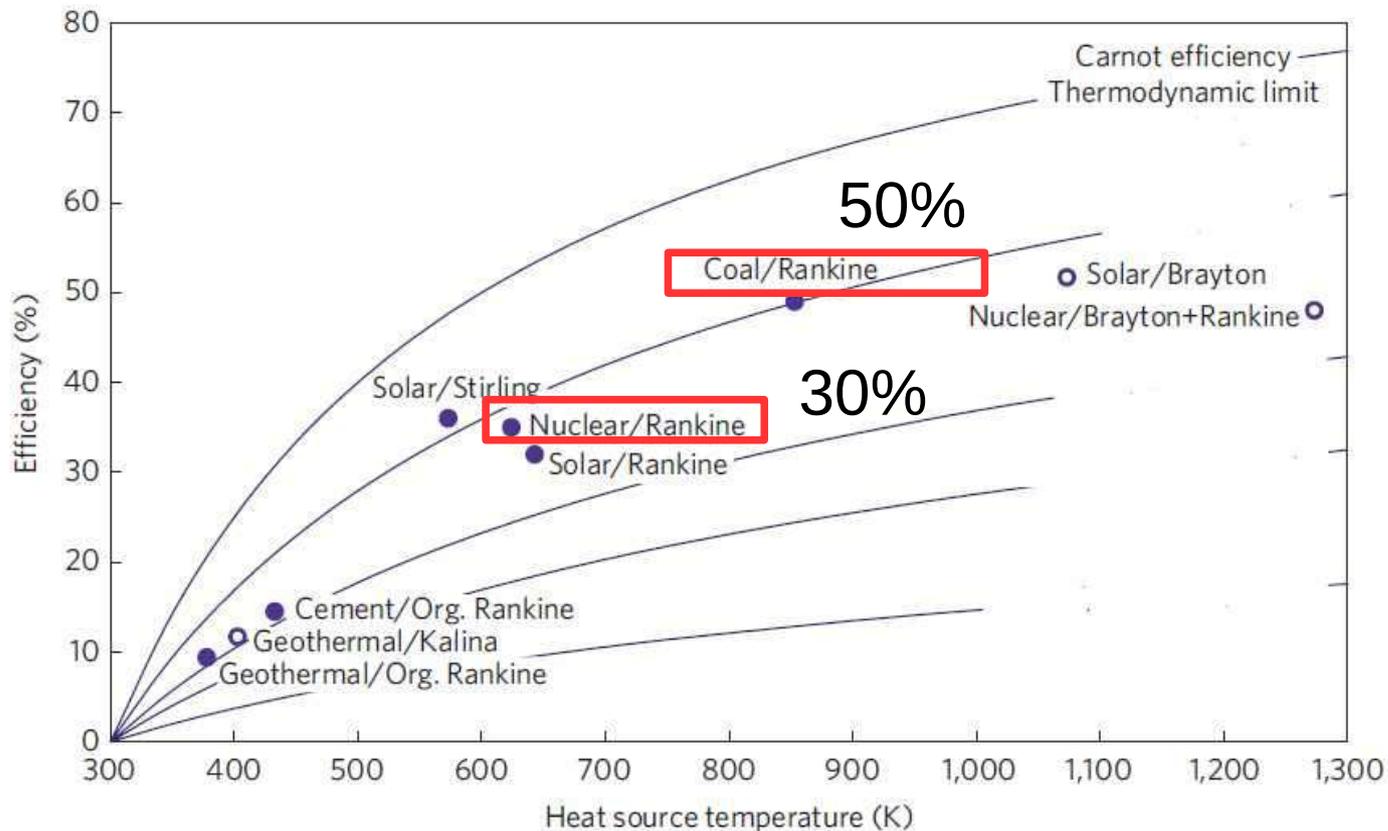
低温部分に熱を捨てない限り、熱は他のエネルギーに変換できないことがカルノーによって明らかにされました。100°Cの熱源からは20%くらいしかエネルギーを取り出せません。



名古屋大学  
NAGOYA UNIVERSITY

2023年学問の面白さを知る 寺崎一郎

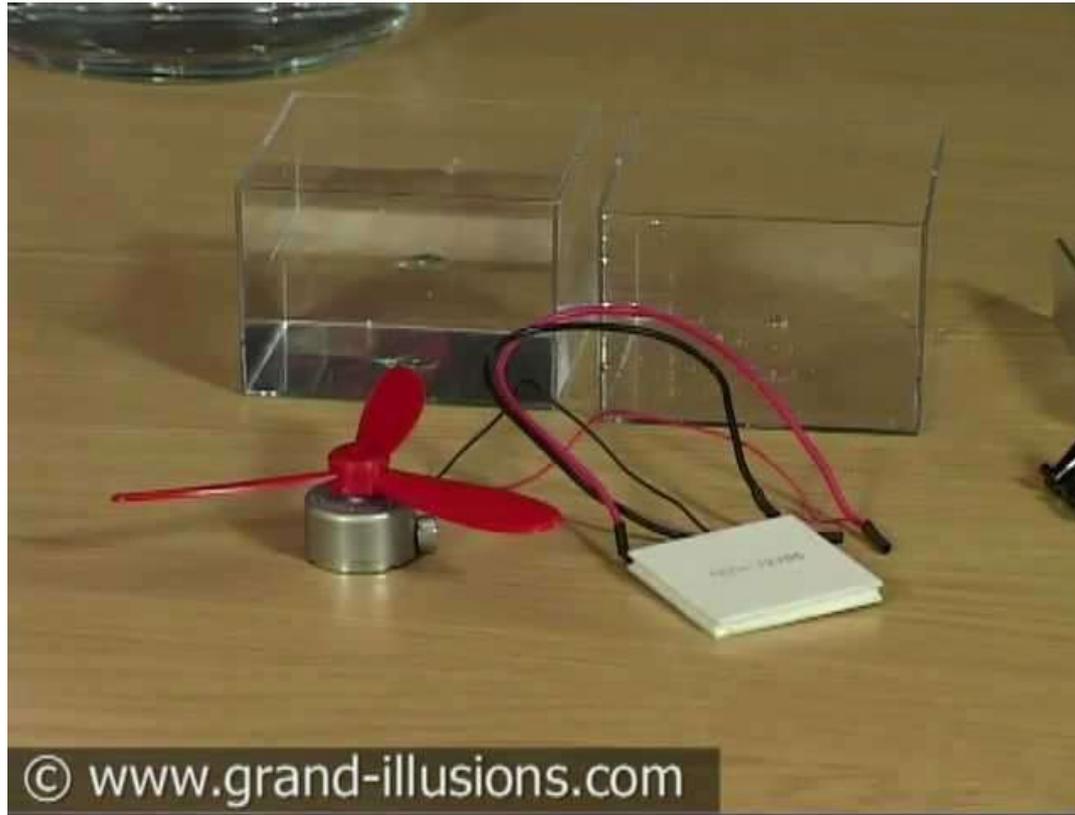
# 発電所の効率はどうくらいでしょうか



Vining,  
Nat. Mater. **8** (2009) 83

原子力発電で30%、火力発電で50%くらいです。残りは排熱(廃熱)です。発電温度が高ければ高いほど効率が高いこともわかります。

この動画を見てください!



<https://www.youtube.com/watch?v=6JH-GgLe1xs>



名古屋大学  
NAGOYA UNIVERSITY

2023年学問の面白さを知る 寺崎一郎

# 応用例



立消え安全装置

点火プラグ

## 立ち消え防止センサー

<https://gourmet-note.jp/posts/13842>



## ワインセラー

<https://www.enoteca.co.jp/article/archives/966/>



## ネッククーラー

[https://www.biccamera.com/bc/i/topics/osusume\\_neck\\_cooler/index.jsp](https://www.biccamera.com/bc/i/topics/osusume_neck_cooler/index.jsp)



## エンジンの排熱で発電 (名工大 西野)

- 有毒な元素Pb,Te,Sbで出来てます。
- 大気中高温で酸化・蒸発しやすく安定ではありません。
- Teは資源として埋蔵量が希少です。
- 無害で, 安定で, 豊富な材料が必要  
→ 酸化物が最適です。
- これまでは, 良い熱電変換特性を示す酸化物はなく、むしろ問題外だと思われていました。

<https://novelty.raksul.com/products/305>



<https://4travel.jp/travelogue/10811039>



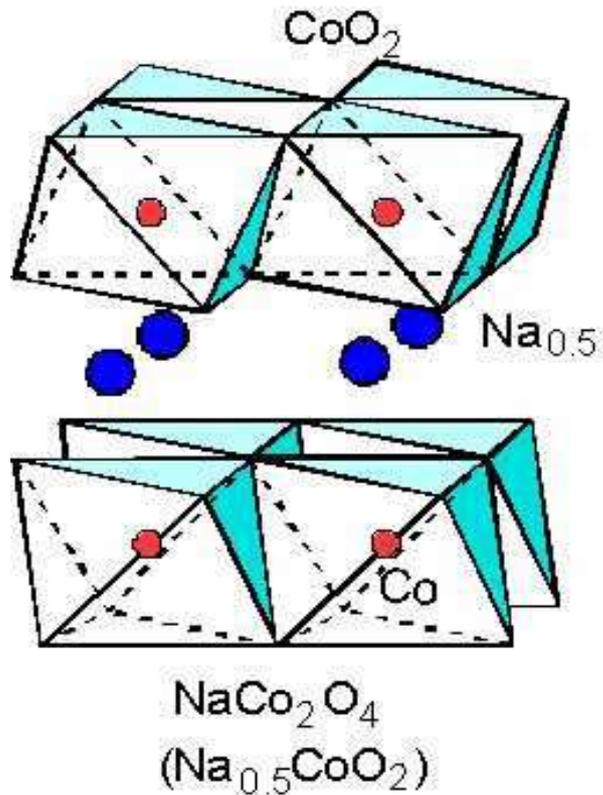
ルビー



サファイア

[https://onsuku.jp/blog/color\\_knowledge\\_005](https://onsuku.jp/blog/color_knowledge_005)

# 層状コバルト酸化物 $\text{NaCo}_2\text{O}_4$ の熱電効果の発見



Bi-Sr-Co-O  
単結晶

ナトリウムNaとコバルトCoと酸素Oは豊富な元素、高温で安定、無毒です。  
私たちは、実用材料 $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ と同程度の性能があることを発見しました。  
この論文が酸化物熱電変換の一里塚になりました。

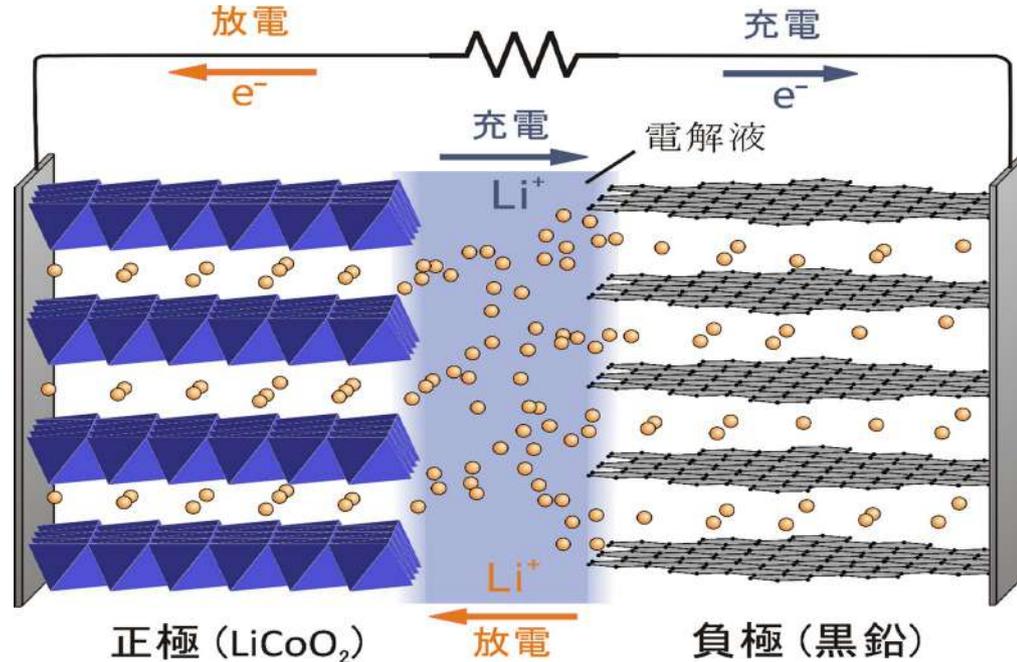
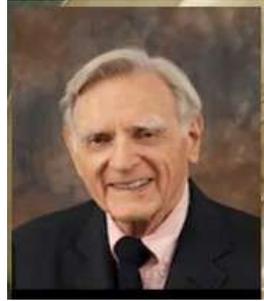
Terasaki et al,  
Phys. Rev. B (1997)

2023年学問の面白さを知る 寺崎一郎



名古屋大学  
NAGOYA UNIVERSITY

発見された熱電材料はLi電池材料の親戚でした。



<https://www2.kek.jp/imss/news/2015/topics/0609Li-ion/>

毎日新聞 2019/10/10

<https://mainichi.jp/articles/20191010/ddm/001/040/141000c>

NaCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub>はLiCoO<sub>2</sub>と同じ結晶構造を持っており、Liが電気を運ぶかわりに、電子が熱をよく運ぶ物質でした。

環境にやさしい熱電変換素子を開発中

早稲田大理工学部応用物理学科助教

寺崎 一郎さん (37)



自動車の排ガスは約400度。この熱を発電に利用できないか。こんな発想で、熱を電気に変える「熱電変換素子」の開発を進める。両端に温度差ができることで電流が流れるような物質のことだ。新しい素子は従来も



あったが、比較的効率よく電気を起こせる素子は、鉛など重金属を含むものばかりだった。発電のため加熱すると、重金属が揮発して環境に漏れ出しかねない。空気中で酸化すると変質して発電能力を失う恐れもあった。

研究過程で、ナトリウムとコバルトの酸化物で従来の素子の約8割の発電効率を持つ物質を見つけた。「無害だし、最初か

ら酸化物だから変質の心配もない」と説明する。効率を上げるため素子の成分を少し変えるなどさらに研究中だ。別の専門家の試算では、うまくいけば乗用車排ガスで5キロワットの発電ができ、ごみ焼却の余熱での発電も可能。火力・原子力発電所でも排熱利用で発電効率を1%上げられるという。

元々は超電導を研究。超電導物質と似た構造のナトリウム酸化物が超電導にならない理由を調べていて偶然、温度差で大きな電流を生じること気がついた。「従来の素子は主に電気を通しにくい半導体だったが、この素子は金属なみに抵抗が小さい。物理的に興味深い物質だからこそ実用化できそうな点が魅力」と話す。

【高木 昭午】



# コバルト酸化物による熱電素子の販売(2010年)

800°Cで動作する素子は酸化物がなければ実現しませんでした。



モデル名		ACP-12	ACPO-12	
サイズ		幅 142mm × 縦 142mm × 厚さ 237~250mm		
重量		約8Kg		
集熱フィン温度	(°C)	400	600	800
並列系統数		15V × 4系統	15V × 4系統 4.6V × 4系統	15V × 4系統 9.2V × 4系統
最大出力時電圧	(V)	15	13	16
最大出力時電流	(A)	2.3	3.0	3.2
最大出力	(W)	34	39	51
定格電圧	(V)	12V (24V以上の出力も可能)		
定格電流	(A)	2.7	3.2	4
定格出力	(W)	33	39	48
インピーダンス	(Ω)	6.6	4.4	5.0
AC100V時出力	(VA)	28	31	41

[https://colocal.jp/topics/think-japan/kaijirushi/20131015\\_25034.html](https://colocal.jp/topics/think-japan/kaijirushi/20131015_25034.html)

# 発電鍋の販売(2011年)



[https://www.youtube.com/watch?v=H\\_\\_-S7R0vBY](https://www.youtube.com/watch?v=H__-S7R0vBY)

TESニューエナジーは東日本大震災の後に、防災グッズとして鍋底に熱電素子を備えた発電鍋を販売しました。直接火で炙っても大丈夫です。



名古屋大学  
NAGOYA UNIVERSITY

2023年学問の面白さを知る 寺崎一郎

# 漫画になった発電鍋



集英社  
少年ジャンプ 2011年37号

秋本治「こちら葛飾区亀有公園前派出所」



名古屋  
NAGOYA UNI

## 予想外の展開 (2013-2014年)



<https://senmon.ochabi.ac.jp/2015/10/9444/>

発電鍋をNGOを通じてウガンダの村に配ったら、白色ダイオードと組み合わせてアフリカの子どもたちが、夜に勉強ができるようになりました。  
熱電酸化物がアフリカの教育と未来を変えられたら素晴らしいと思います。

# 日本の物理学者の顕著な業績に選ばれました

## 領域8：強相関電子系

## 代表的な研究者・グループ

160	遷移金属合金の抵抗極小の理論的解明	近藤淳
161	伝導電子と局在スピンの結合した系の基底状態の解明	芳田圭、吉森昭夫、山田耕作
162	電子ドープ型銅酸化物高温超伝導体の発見	十倉好紀、高木英典、内田慎一
163	重い電子系のフェルミ面に関する研究	長谷川彰、大貫惇睦
164	スピンパイエルス物質CuGeO <sub>3</sub> の発見	長谷正司、寺崎一郎、内野倉国光
165	ルテニウム酸化物での超伝導の発見	前野悦輝
166	遷移金属酸化物の巨大磁気抵抗の発見	十倉好紀
167	重い電子系における多極子秩序の研究	酒井治、斯波弘行、山口泰男
168	コバルト酸化物の巨大熱電効果の発見	寺崎一郎
169	MgB <sub>2</sub> の超伝導の発見	秋光純
170	コバルト酸化物における超伝導の発見	高田和典
171	マルチフェロイック物質(磁性強誘電体)の発見	木村剛
172	鉄ニクタイト系高温超伝導の発見	神原陽一、細野秀雄
173	一次元フェルミ多粒子系の理論	朝永振一郎
174	配位子場理論の構築	田辺行人、菅野暁
175	松原グリーン関数の構築	松原武生
176	RKKY相互作用の発見	糟谷忠雄、芳田圭

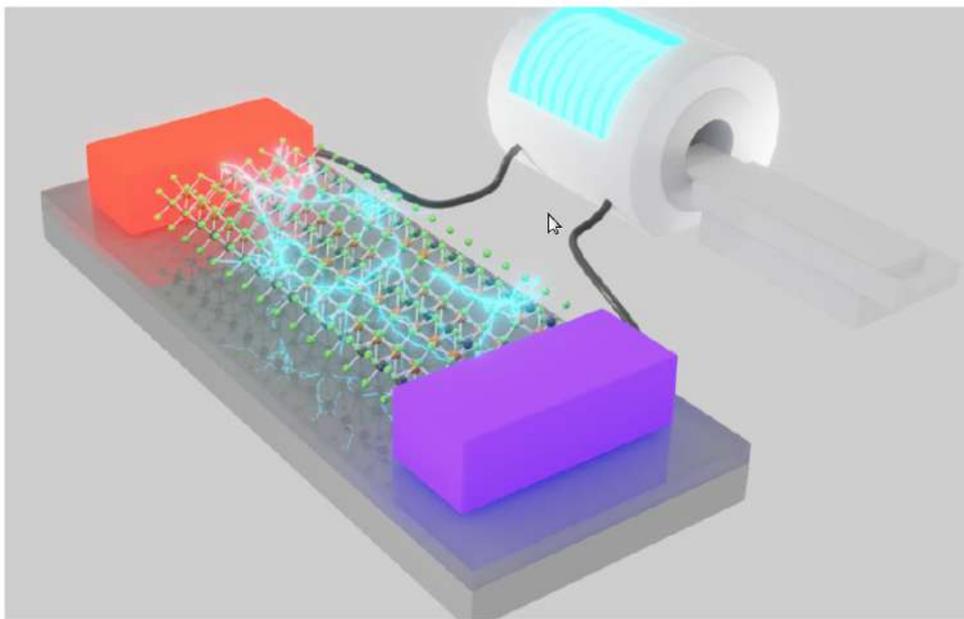
2016年3月 日本物理学会年会

2023年学問の面白さを知る 寺崎一郎



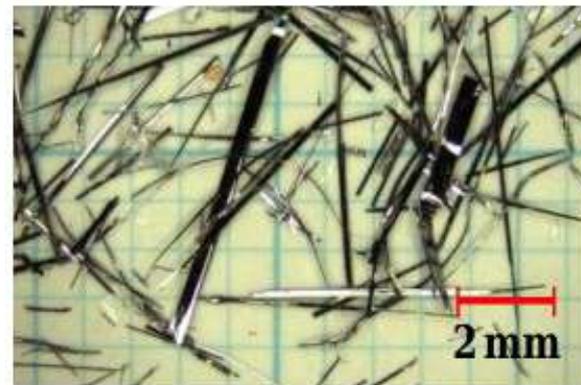
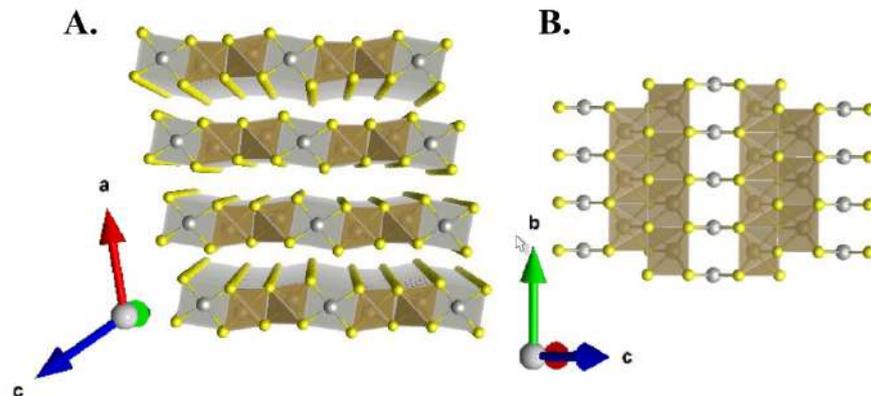
名古屋大学  
NAGOYA UNIVERSITY

# 最近発見した新物質 (2020年)



体積 1cc で 100A の電流を生み出す「熱電半金属」を発見！  
～コンパクトで強力な電流源開発の可能性～

[https://note.com/nagoya\\_ura/n/nf4c4a16e5fdd](https://note.com/nagoya_ura/n/nf4c4a16e5fdd)



低温で巨大な電流を温度差から生み出すことができる物質 $\text{Ta}_2\text{PdSe}_6$ を発見しました。

# まとめ

