多くなると何がか変わる

名古屋大学理学部
寺崎一郎

20 世紀の物理学の進歩

1905 年 アインシュタインの奇跡

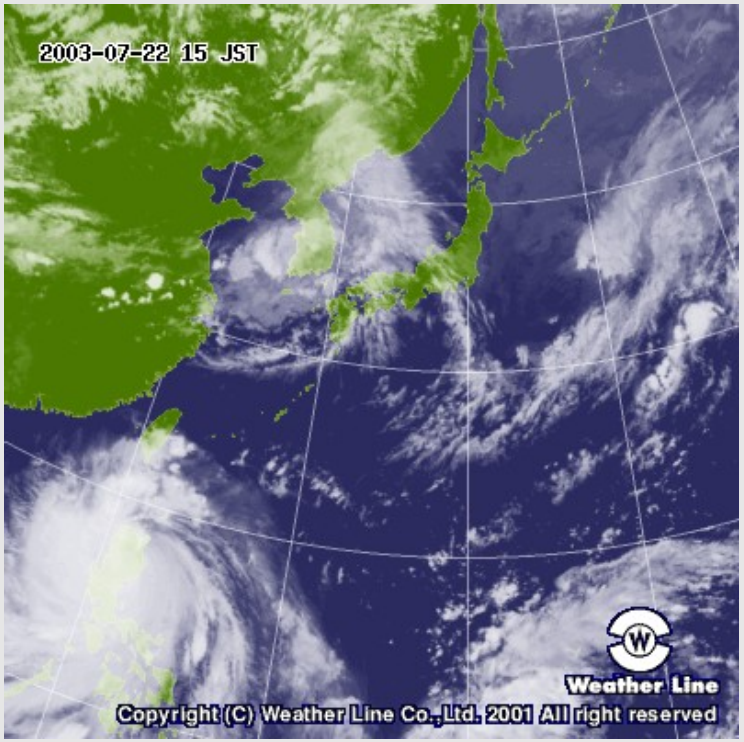
- 奇跡の年:アインシュタインの3つの発見から 100 年
  - 特殊相対性理論　時間の概念の変革
    “古典物理学の完成”
  - 生物物理学の基礎　ブラウン運動　「物理から生物へ」
  - 量子力学の基礎　光電効果
    「こたつで日焼けしないのはなぜ?」
- 20 世紀の物理学
  - マクロからミクロへ
  - 多様性から普遍性へ
  - 科学から技術へ

例として
量子力学とコンピュータ
を見てみよう

量子力学

- 光や電子は，あるときは粒子のように振る舞い，あるときは波のように振舞う（波動と粒子の二重性）
- すべての物理現象は，確率的にしか決まらない（不確定性原理）
- 超伝導現象を含む，物質の中で引き起こされる現象は量子力学で説明される
  （実用上の「万物の理論」）
- 物質の最小単位と考えられているクォークやレプトンにおいても量子力学は成り立っていると考えられている

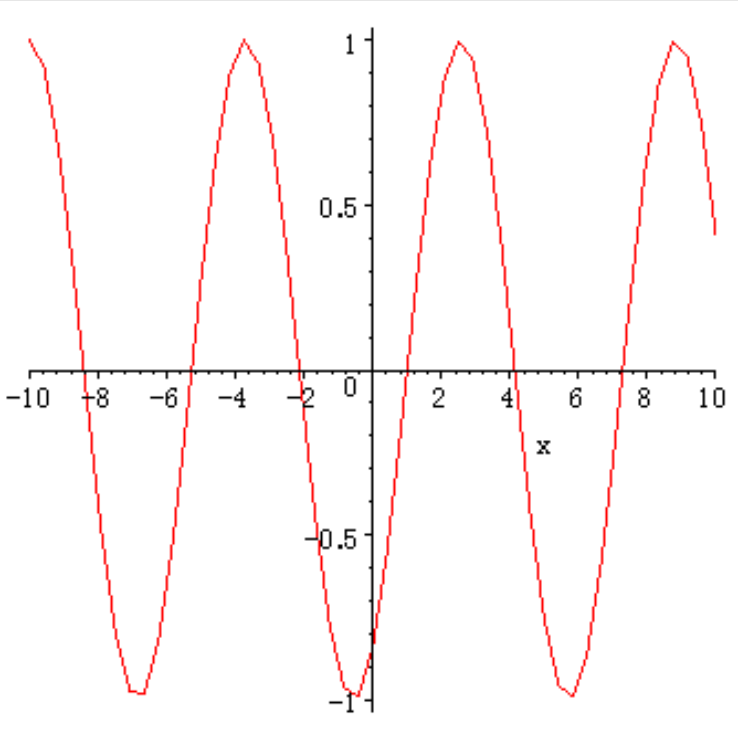
波を粒子としてみる

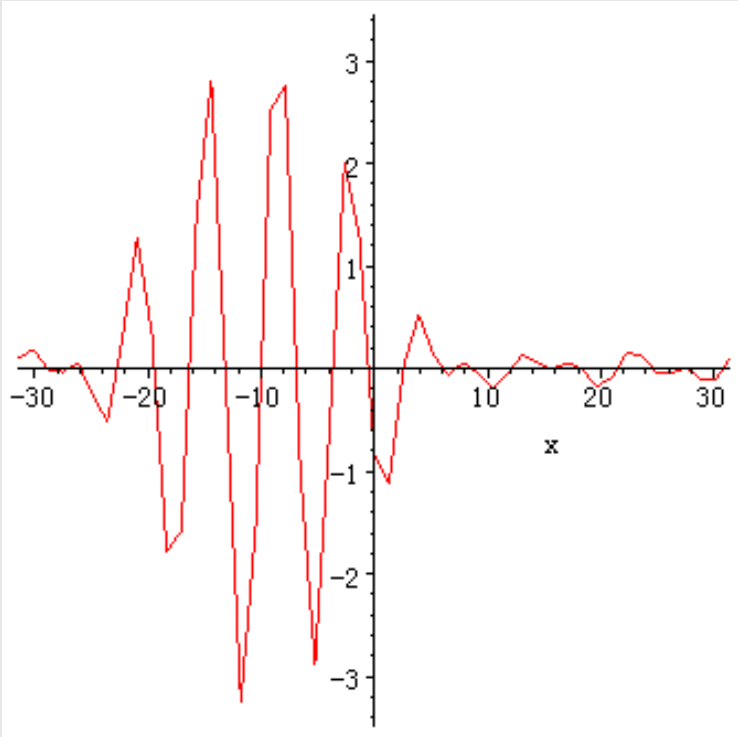


天気図上の台風は，あたかも粒子のように表現される

しかし，実際は，空気の渦（波動）
→　エネルギーが集中している部分を粒子に見立てる

真空中の電子





電子は波動のように振舞ったり，粒子のように振舞ったりする
波を集めて粒子のようなものを作る→「波束」

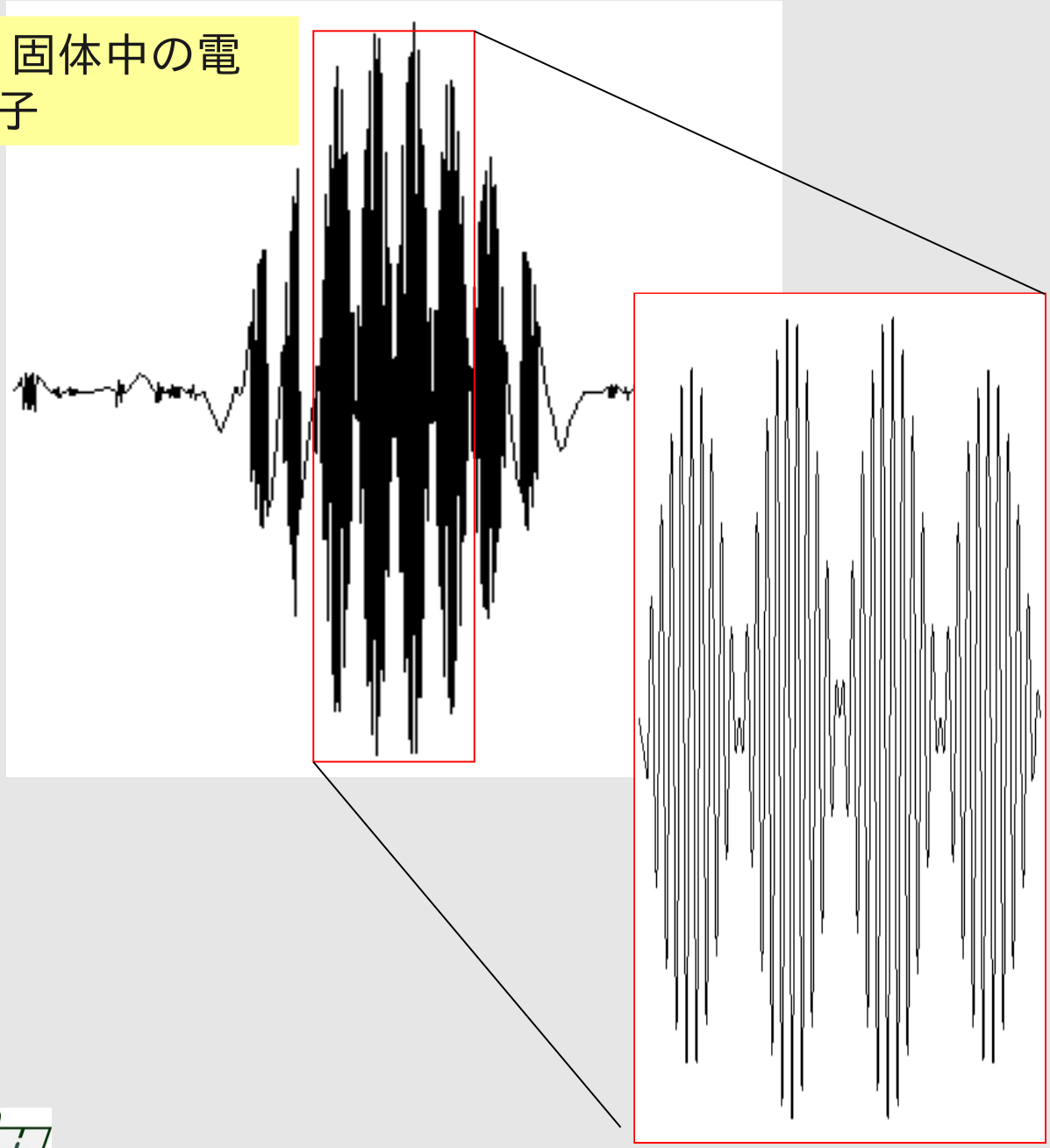
左図　正弦波　sin(x-t)

右図　波束 →　少しだけ波長の違う波を足した波

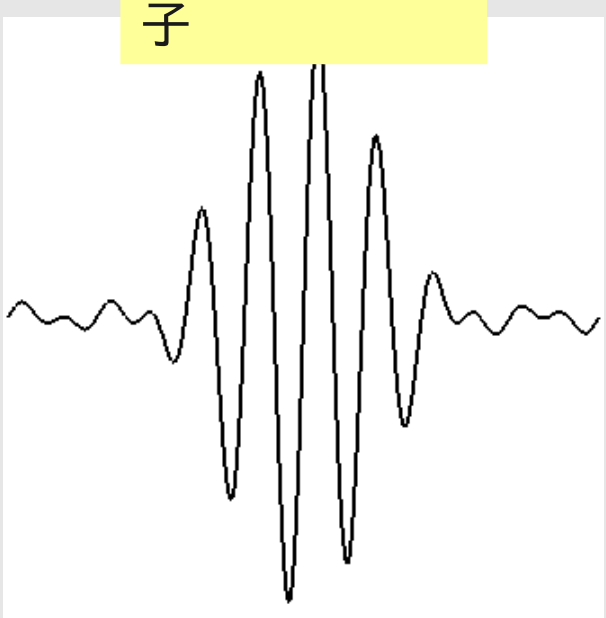
sin(x-t) + 0.8{sin(1.1(x-t))+sin(0.9(x-t))}+0.4{sin(1.2(x-t))+sin(0.8(x-t))}

固体の中の電子

固体中の電子



真空中の電子

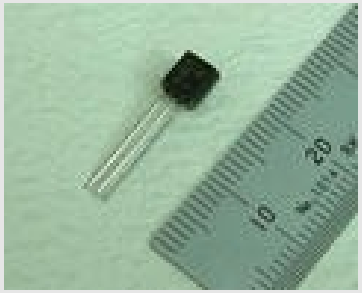


イオンの周期によって変調された波束

→ 変調されていることを除けば，真空中の電子と大変良く似ている！

真空を手のひらに

真空管



トランジスタ

ペンティアム4は 3000 万個のトランジスタを内臓

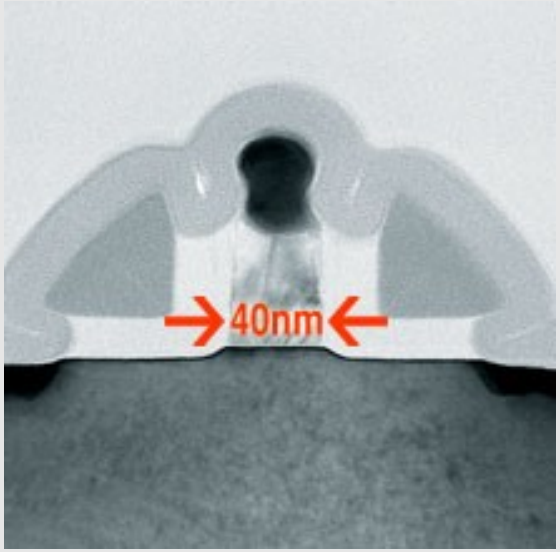
半導体技術

→　電子にとって，固体を真空と同じ環境にすること

真空管をトランジスタ，LSI へ

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



40nm のトランジスタ（富士通）

21 世紀の物理学とは?

物質の物理学を例に

リンゴかタマネギか

- リンゴ　→　“芯”がある
  - 芯を中心にして周りに果肉と皮ができる
  - 物質を細かく分割していくと，やがて多様な物質も単純な「原子」の組み合わせで表現できる
    →　還元主義
  - ギリシャ時代の「原子論」(デモクリトス)と同じ
- タマネギ　→　すべてが皮であって芯はない
  - 世界には階層がある
    宇宙，星，生命，物質，原子，原子核・電子，クォーク
  - 各階層は，独立の法則にしたがっている（生物を研究するためにクォークの勉強はいらない）

More is different

2002年(平成14年)12月24日　火曜日　41934号　(日刊)

朝日新聞

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ッハー氏が唱えたころ、環境保護に関心を持つ人の間で「モア・イズ・ワース（多いことは悪い）」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るために来日した。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ろう。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。

いま、そこにある謎

- 我々の世界が、100 に満たない種類の元素が膨大な数集まってできているならば、日常生活の全ての事柄が疑問となって浮上する
  - 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
  - 硬い柔らかい、電気を流す流さない、磁石になる ならない、は何で決まるのか

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る
  - 水は 1 分子 H_2O では凍らない, たくさん集めると凍る
  - たくさんの原子・電子を集めたときに何が起こるか?
    「創発性」(emergence) の物理学
- 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ない。
  - 物質の物理学には至る所に知のフロンティアがある

物質の物理学は発見の時代

- 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}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　原子ガスのボーズーアインシュタイン凝縮
- 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

これ以外に化学賞をもらった物理学者もいる

私たちの発見例

熱から電気を作る酸化物

廃熱の量

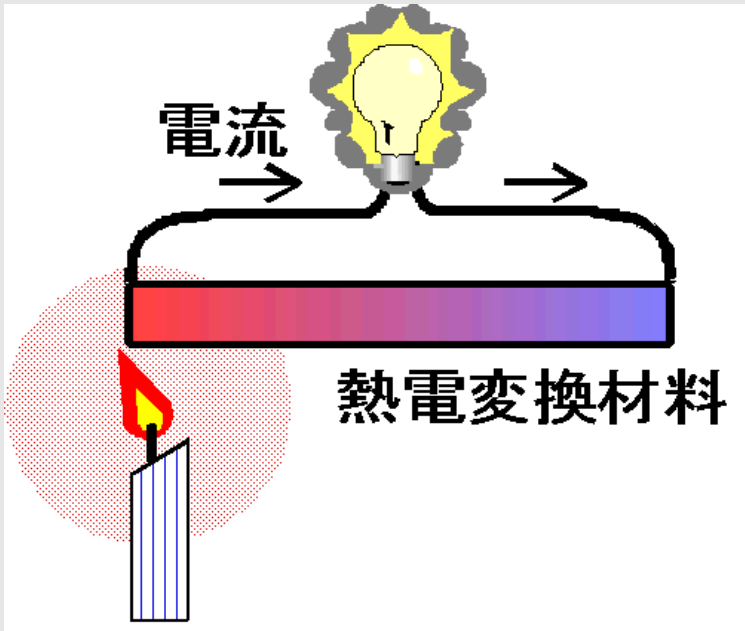
マテリアルインテグレーション 13(7) (2000) 53

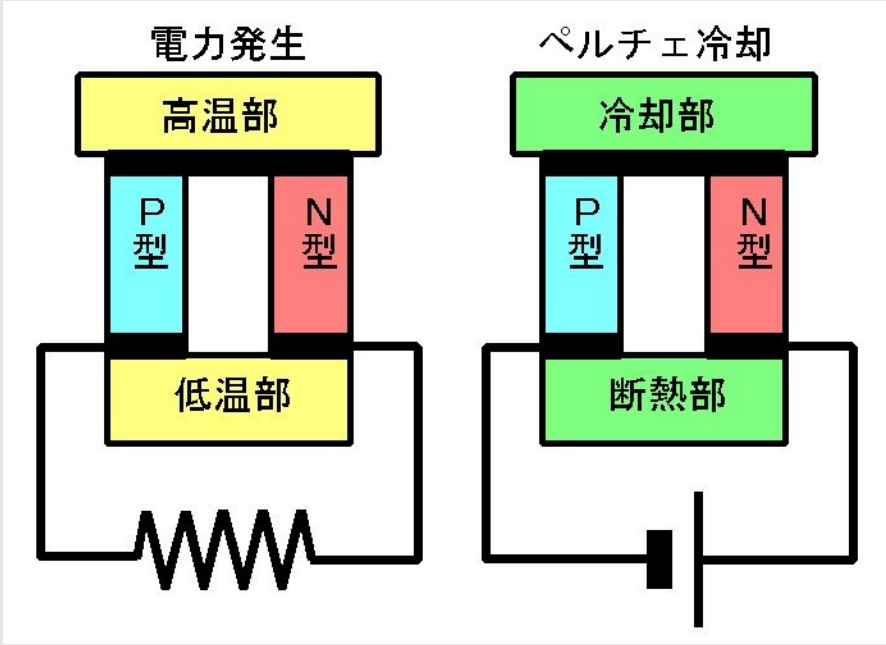
潜在的規模

200 万 Tcal/ 年 = 30 億人に必要な摂取カロリー

需要分野		排熱量 (Tcal/年)	熱電変換発電システム設備容量 (MW)
産業用工場プロセス※ 1		197,236	1,593
廃棄物焼却炉	清掃工場	66,000	800
	自家処理	4,400	107
	汚泥処理	4,800	58
	計	75,200	965
発電所	火力	858,631	11,400
	原子力	406,720	3,375
	計	1,265,351	14,775
分散化電源	コージェネレーションシステム	53,472	430
	燃料電池	175	3
	計	53,647	433
自動車用		458,184	455,324
自然エネルギー	太陽熱	1,145	76
	地熱	19,048	154
	計	20,193	230
合計		2,069,811	473,320

熱から電気を作る





- 熱電変換

  固体の熱電気現象で熱と電気を相互変換

- 熱電素子
  - 長寿命
  - メンテナンスフリー
  - 直接変換（老廃物なし）
  - 廃熱による発電
  - フロンなしの冷却

- エネルギー・環境問題に資する

熱電発電

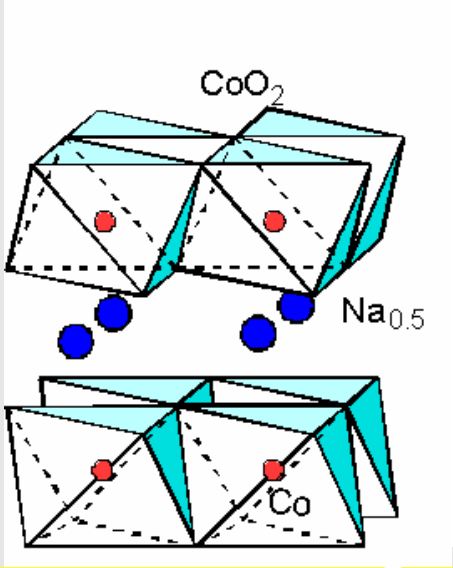
SNAP-27
Apollo Radioisotope Thermoelectric Generator and Fuel Cask

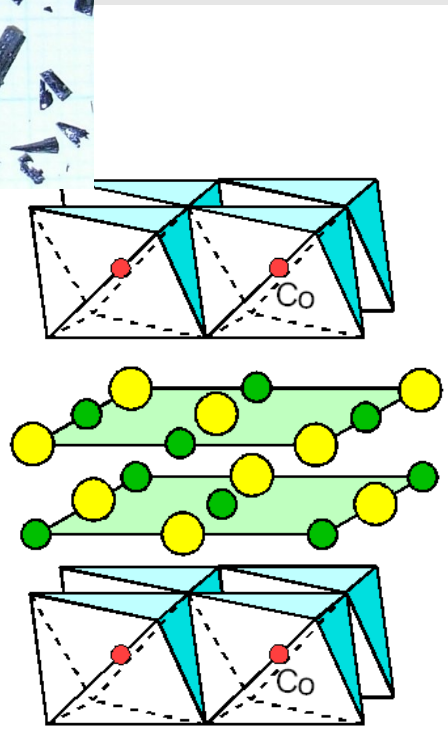
FeSi NRIM

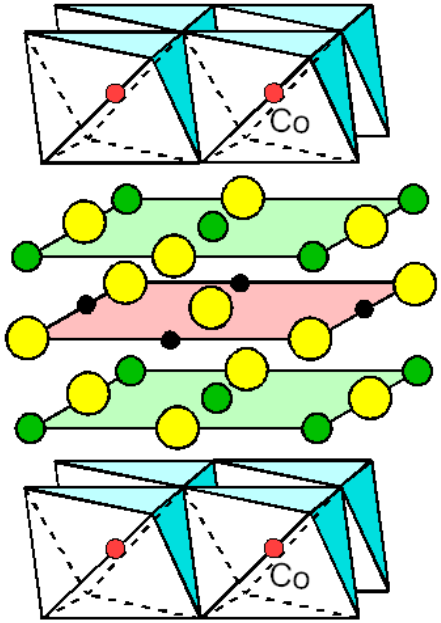
これまでの熱電変換材料の問題点

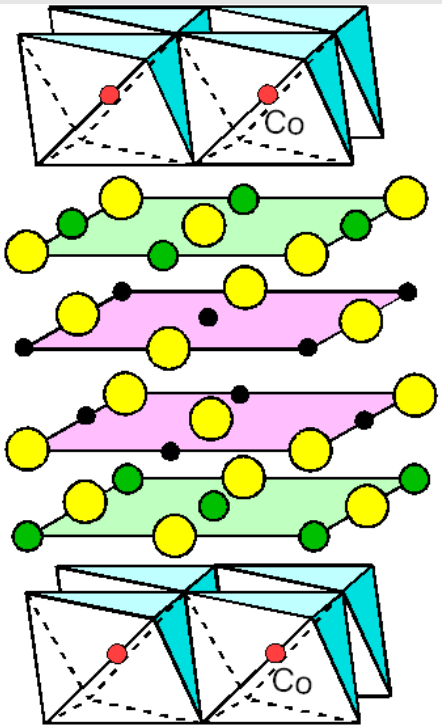
- 有毒な元素 Pb , Te , Sb を含む
- 大気中高温で酸化･蒸発しやすく安定でない
- Te は資源として埋蔵量が少ない
- 無害で, 安定で, 豊富な材料が必要
  → 酸化物が最適
- これまでは, 酸化物は熱電変換にはつかえないというのが常識だった

層状コバルト酸化物の発見









Na_xCoO_2

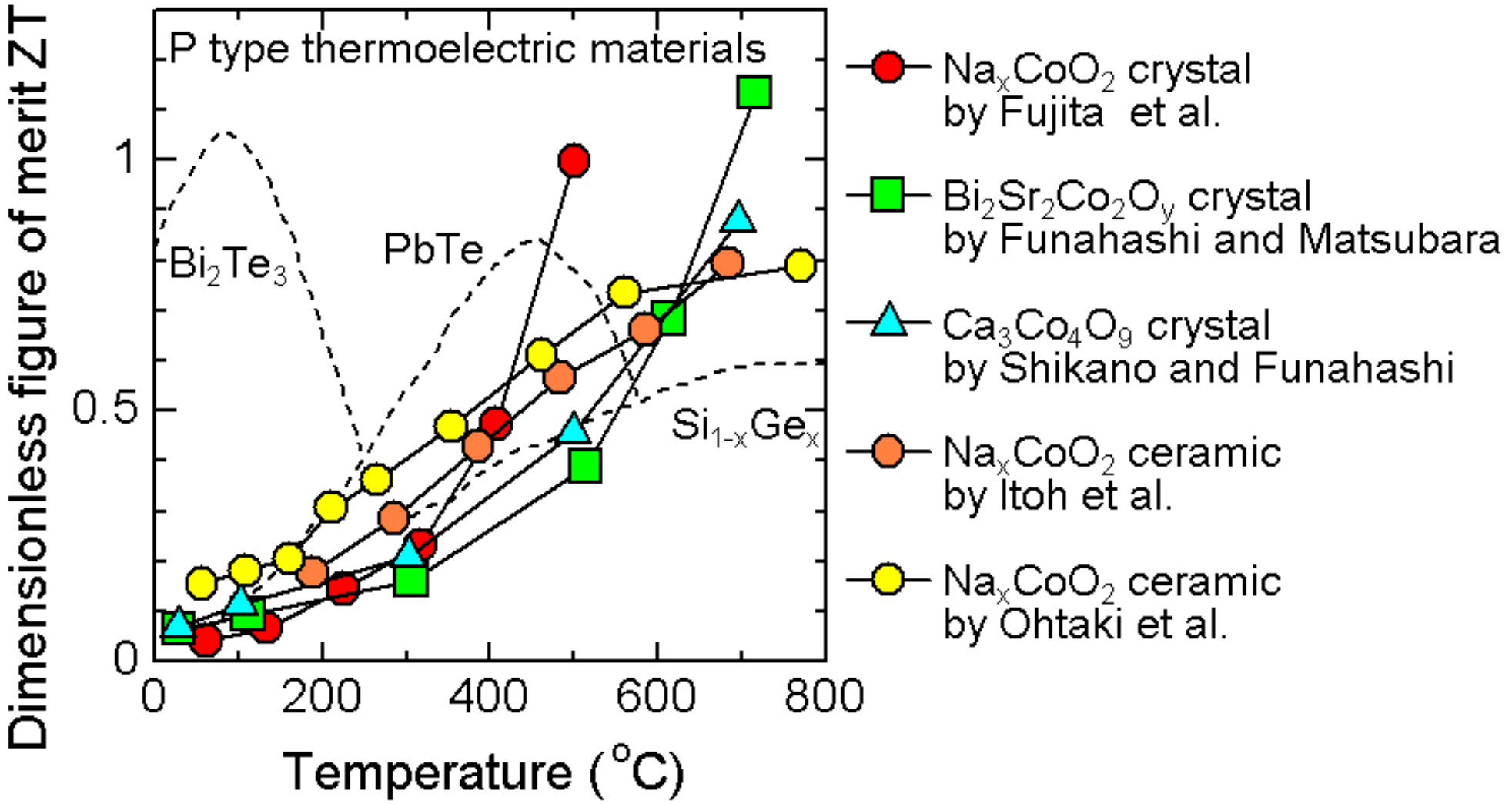
$[Sr_2O_{2-x}]CoO_2$

$[Ca_2CoO_{3-x}]CoO_2$

$[Bi_2Sr_2O_{4-x}]CoO_2$

$[Sr_2(Pb,Co)O_{3-x}]CoO_2$

層状コバルト酸化物の性能



IT, Proc. of ICT2005 (Clemson)

発見から 3 年 (2000 年)

究める

早稲田大理工学部応用物理学科助教授
寺崎 一郎さん (37)

環境にやさしい熱電変換素子を開発中

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と電流が流れるような物質のことだ。

こういう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に気づいた。「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でしかも実用化できそうな点が魅力」と話す。

【高木 昭午】

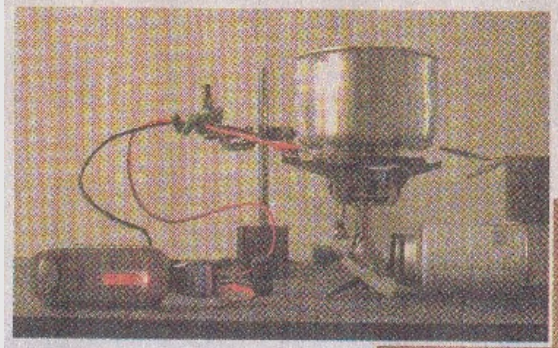
実証実験成功　（2005年）

東京新聞

コンロでは成功

廃熱利用の発電

工場や発電所では利用しきれない熱を冷却水を通して海に捨てている。自動車も熱いエンジンを冷やしながら走っている。この〝廃熱〟を生かそうと、温度の差から電気を起こす熱電素子の研究が進められている。実用は遠いと思われていたが、新しい材料の開発で、コンロの熱から携帯電話が充電できるところまでやってきた。（永井理）



㊤鍋の下に熱電モジュールを敷き、コンロでお湯を沸かしながら携帯電話を充電する実験（産業技術総合研究所提供）　㊦産業技術総合研究所で作られた板状の熱電変換モジュール

最終目標は体温

%を電気に換えているという。

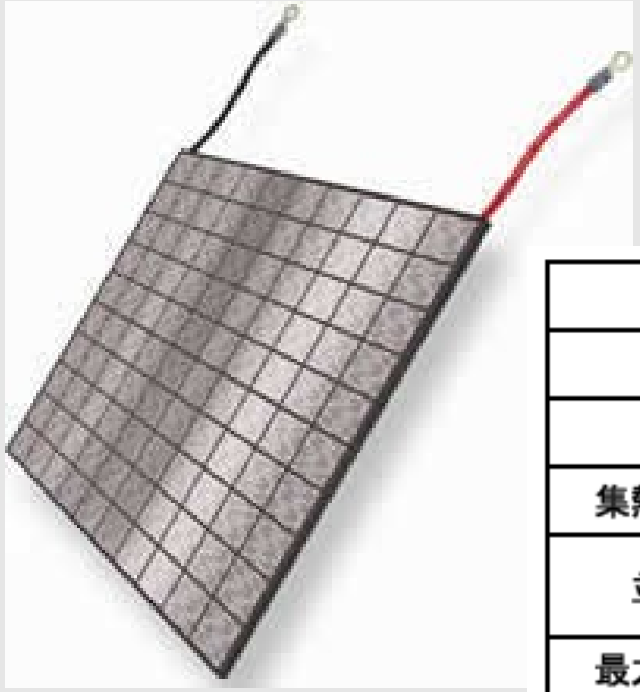
モジュールの心臓部は熱電変換材料だ。この材料を棒状にして片方を熱し、もう片方を冷やすと、棒の両端に電圧が生じて電池の働きをするようになる。この材料を板状に百四十対つな

舟橋さんは五年前、カシウムとコバルトの酸化で世界最高の性能を出す料を見つけ、今年、板状携帯充電のモジュールを作り上げた。

熱電変換の利点は一ス

2005 年 8 月 23 日　東京新聞

2010年　酸化物熱電素子、販売開始！

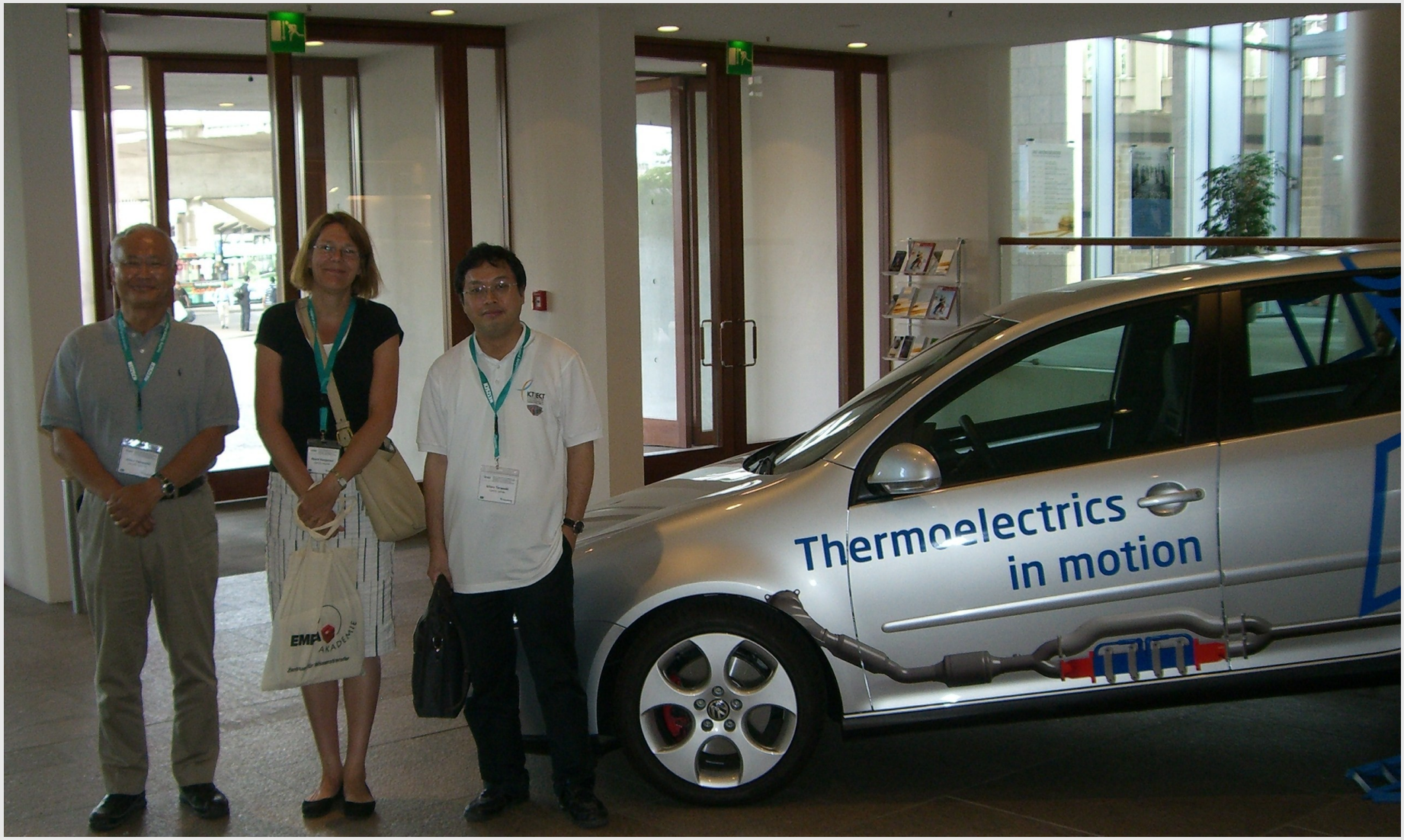


ベンチャー会社
TES ニューエナジー社

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	(℃)	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

http://tes-ne.com/Japanese/01_home.html

環境と共生するエネルギーを目指して



おわりにかえて

- 物質の物理学
  - 面白くて役に立つことが研究できる分野
  - 物理学はまだまだ幼稚、すべてを予言も制御もできない
  - 何げない日常にサイエンスのフロンティアがある
- コバルト酸化物の秘密を解くには・・・
  - 熱とは何か？
  - 電気とは何か？
  - 熱を電気に変える仕組みは？
  - なぜコバルト？（化学も必要）
  - 素子はどうやって作る？（工学も必要）