

標準物質協議会

# 会報

2018・11  
第 81 号

Japan Association of Reference Materials

## 目次

1. 平成30年度 標準物質協議会 講演会について・・・・・・・・・・ 1
2. 最近のトピックスから・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 43
3. 編集後記・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 44

## 平成30年度 標準物質協議会 講演会について

標準物質協議会 事務局

平成30年11月9日(金)13時30分から東京工業大学 キャンパス・イノベーションセンター多目的会議室2において、平成30年度標準物質協議会 講演会が開催されました。

当日は、千葉光一 会長はじめ、松本保輔 顧問にもご参加いただき、参加者数35名(講師含む)での講演会となり、盛会のうちに終えることができました。

講演会は、開会にあたっての千葉光一 会長の挨拶で始まり、2題の講演がありました。本号では、講演会に参加できなかった会員の皆様にも情報を提供することを目的に、講演者のご許可のもと、当日の資料を掲載しました。当日は、2題で3時間程度の講演時間となりましたが、活発な質疑応答があり、大変有意義な講演会となりました。

講演プログラムは、「講演1 改定国際単位系における電気標準」と題して、(国研)産業技術総合研究所 計量標準総合センター 物理計測標準研究部門 首席研究員 応用電気標準研究グループ長の金子晋久 様、「講演2 ISO/IEC 17025:2017 の改正内容について」と題して、(独)製品評価技術基盤機構 認定センター 計量認定課 主任 高澤解人 様にそれぞれご講演いただきました。

本号では、誌面の都合上、金子 晋久 様の資料を掲載します。なお、高澤解人 様の資料は、次号に掲載します。



金子晋久 様 ご講演の様子



高澤解人 様 ご講演の様子

# 改定国際単位系における電気標準

産業技術総合研究所 金子晋久

標準物質を巡る最近の動向  
標準物質協議会主催講演会 SI改定：電気  
11月9日 13:30 - 15:00  
東京工業大学キャンパスイノベーションセンター  
多目的会議室2

2018年11月09日 (金)

NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST)

1

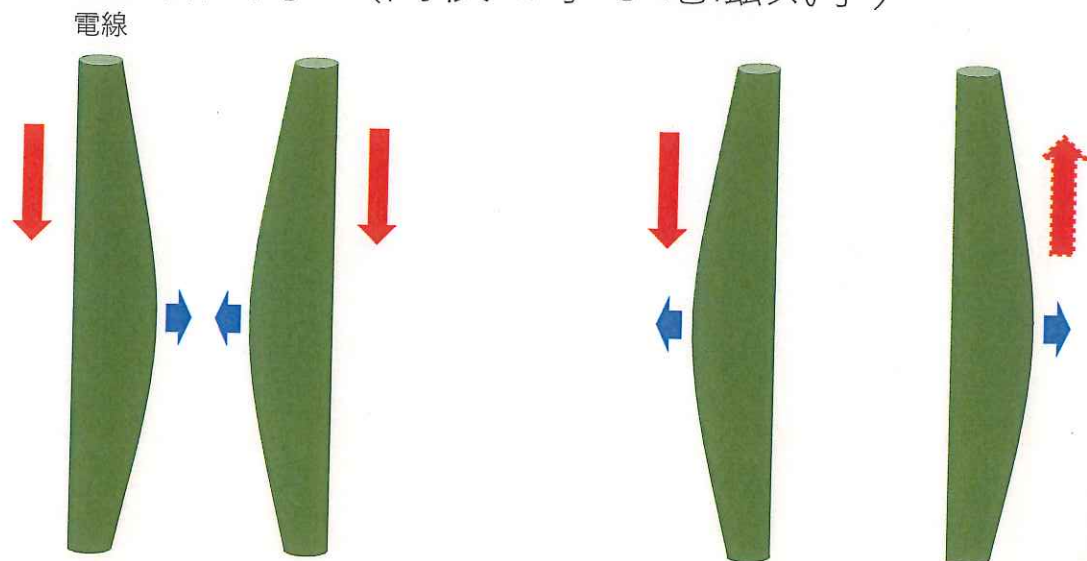
## 要旨

- 国際単位系 (SI) は、量子力学に基づき、かつ器物に依存しない形へと改定され2019年5月20日から適用される。電流の単位であるアンペアは、改定前のSIにおいては2本の平行電流間に働く力の大きさにより定義されていたが、改定後のSIにおいては、電気素量と周波数により定義される。また、この電気素量に加えてプランク定数が定義値となることにより、これまで国際的に合意された「協定値」をもとに電気標準として利用されてきたジョセフソン効果電圧標準、量子ホール効果抵抗標準も完全にSIに準拠することとなる。これらについて解説し、さらにそのメリットと改定の具体的な手続きについて述べる。

## 今の電流（アンペア）の定義

電磁気学での定義

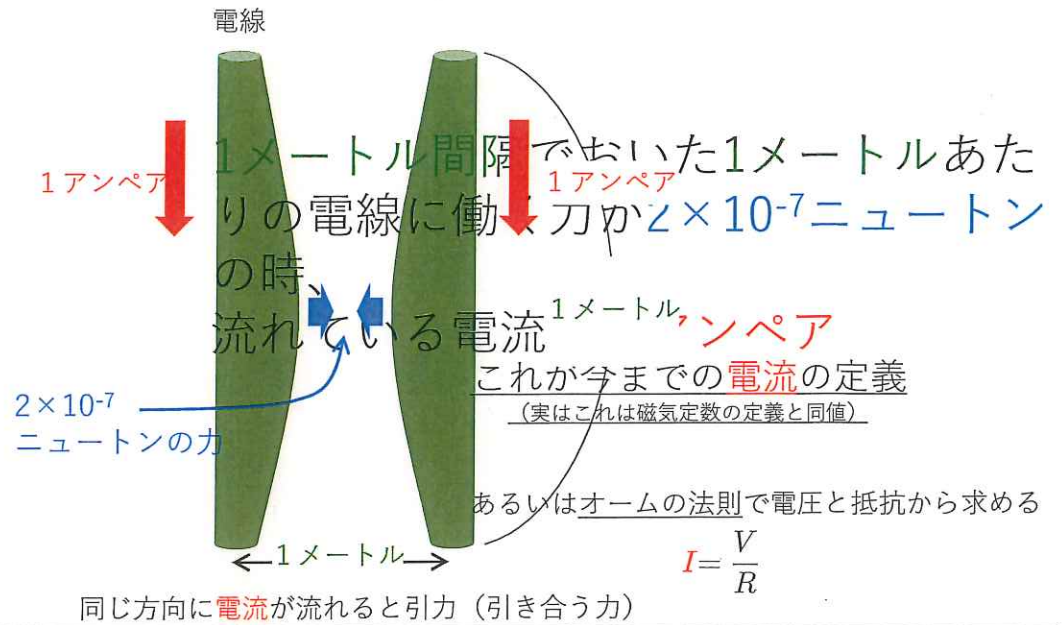
## 古典電磁気学（高校で学ぶ電磁気学）



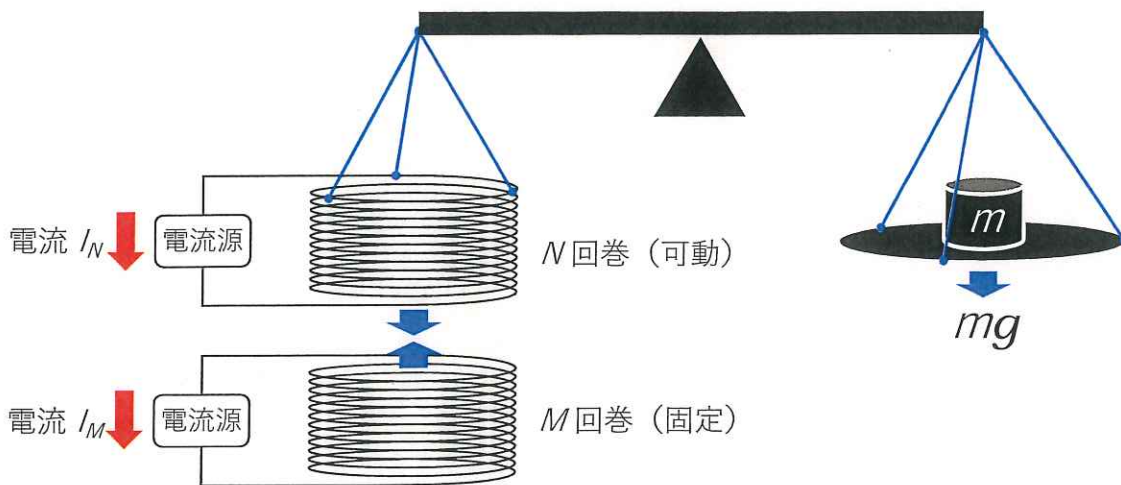
同じ方向に電流が流れると引力（引き合う力）

反対方向に電流が流れると斥力（反発する力）

# 古典電磁気学と今の電流（アンペア）の定義



# 電流天秤（てんびん）



力から電流の定義を通じて電流を導出

旧電気試験所 電流天秤  
画像提供：国立科学博物館

というのでは精度が出ない

オームの法則で電圧と抵抗から求める

$$I = \frac{V}{R}$$

← ジョセフソン効果
← 量子ホール効果



全く別の量子現象から間接的に決めてしまう

あららら、、、アンペアは基本単位なのに、、、  
アンペアの定義はどうなるの、、、残念

これからの電流（アンペア）の定義

電子の時間当たりの移動で直接定義

これからは電子でアンペアを定義します！

電子の電荷（電気の量、電気量） = 電気素量

最も小さな電気量の粒



電子

電子の電荷（電気の量、電気量） = 電気素量

$1.6 \times 10^{-19}$  「クーロン」



## 電子

電子の電荷（電気の量、電気量） = 電気素量 

$1.6 \times 10^{-19}$  「クーロン」



## 電子

電子の電荷（電気の量、電気量） = 電気素量 

$1.6 \times 10^{-19}$  「クーロン」

||

$1.6 \times \frac{1}{10\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000}$  クーロン

0 が 19 個!!

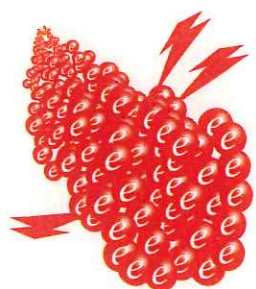


# 電子

$$1.6 \times \frac{1}{10\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000} \text{ クーロン}$$

$$= \frac{1}{1.6} \times 10\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000 \text{ 個}$$

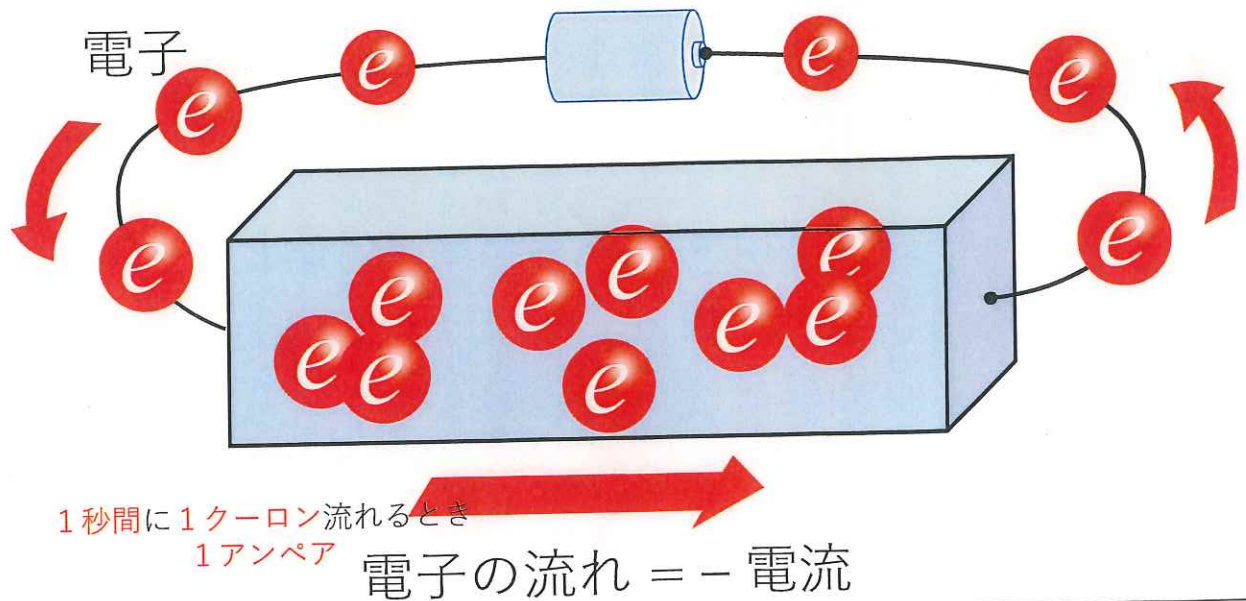
$\approx 0.624$ 
 $\approx 1000$  京

$$\text{電子} 624 \text{ 京個} = 1 \text{ クーロン}$$


これからの電流（アンペア）の定義

電子の時間当たりの移動で直接定義

金属中の電子の流れ = 電流 (負)



金属中の電子の流れ = 電流 (負)

1秒間に1クーロン流れるとき  
1アンペア

つまり、、、

1秒間に電子が624京個流れるとき  
1アンペア

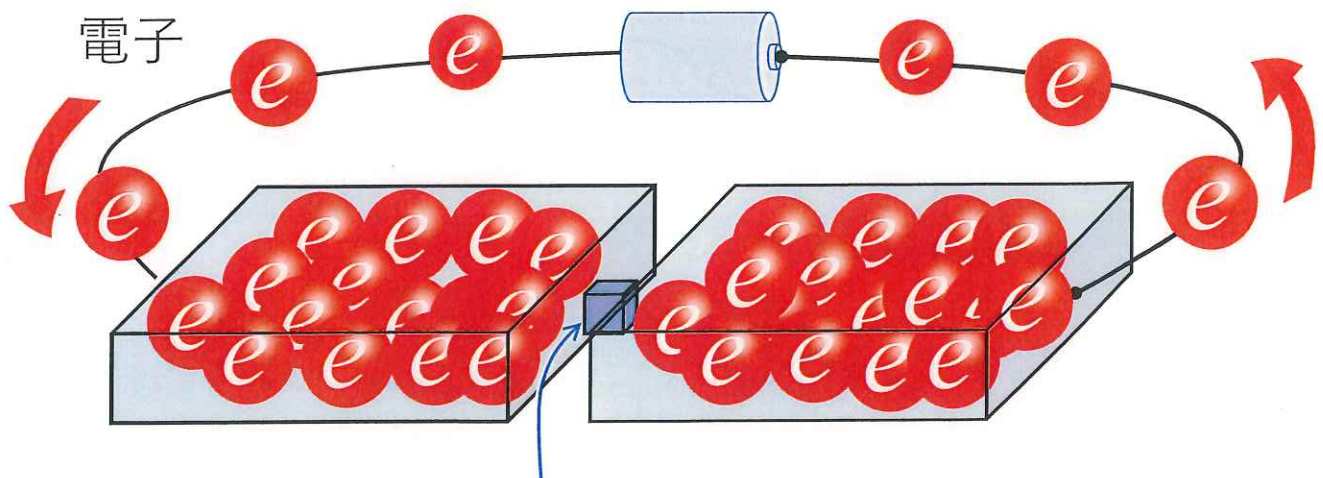
1秒間にそんなたくさん測れませんし制御できません。。

# 単一電子の制御・計測

1秒間にそんなたくさん測れませんし、制御できません。。

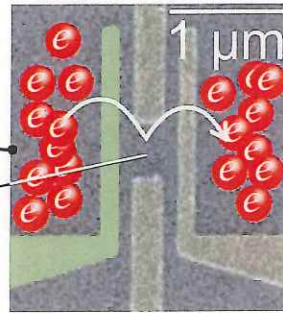
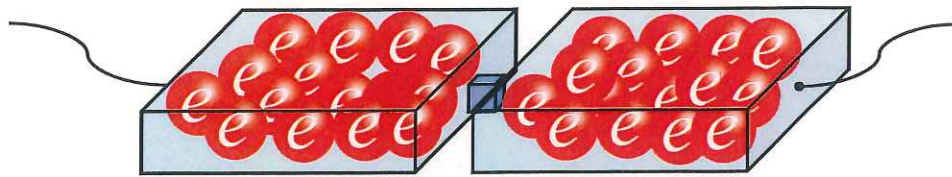
でも、**一つ一つ**なら、そして**ゆっくり**なら**正確**に制御できます!!

## 単一電子の流れ = 量子電流



電子が一個しか入らない箱を作る  
箱の大きさを周期的に変えて、電子を一つ一つ制御する!!

# 単一電子ポンプによる量子電流

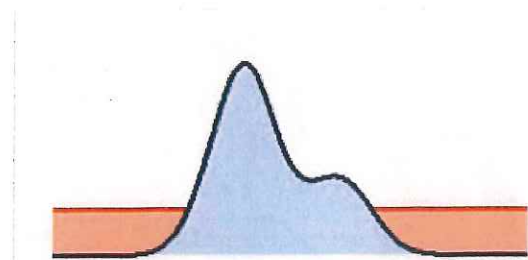
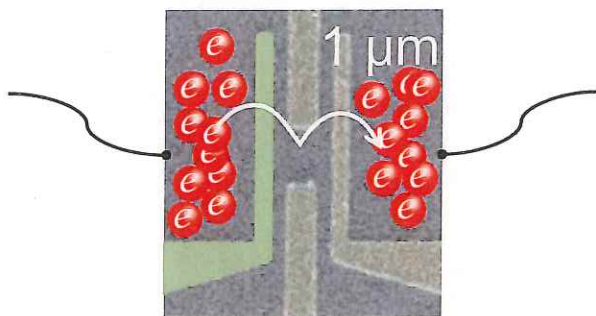


電子が一つしか入らない箱  
= 量子ドット

量子ドットの前後の電圧を変動させる  
= 箱の大きさをかえる

半導体で作った微小な単一電子ポンプ

# 単一電子ポンプによる量子電流



電子を一つ一つ制御しながら作り出す量子力学的電流

電流 = 電気素量 × 一秒間に移動させる電子の個数

$$I = ef$$

# 単一電子ポンプによる量子電流

$$\text{電流} = \text{電気素量} \times \text{一秒間に移動させる電子の個数}$$

$$I = ef$$

実は今のSI単位では電気素量は定義値ではないので別に測定してあげなければいけません。。。残念

## 電子

電子の電荷 (電気の量、電気量) = 電気素量

$$1.6 \times 10^{-19} \text{ 「クーロン」}$$

正確には

$$(1.602\ 176\ 6341 \pm 0.000\ 000\ 0083) \times 10^{-19} \text{ クーロン}$$

今の測定技術での不確かさ

つまり電子の電荷 (電気素量) は定義値ではなく測定される量です！！

# 電子

電子の電荷（電気の量、電気量） = 電気素量

$(1.602\ 176\ 6341 \pm 0.000\ 000\ 0083) \times 10^{-19}$  クーロン

?

来年から正確に  $1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$  クーロン

定義

## 新しい1アンペアの測り方

電流 = 電気素量 × 一秒間に移動させる電子の個数

$$I = ef$$

改定されるSIでは定義値になります！！

$$e = 1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19} \text{ クーロン}$$

新しい1アンペアの測定法・生成法 = 電子を正確に一つ一つ制御すること

# おまけ：新しい1アンペアの測り方

電流 = 電気素量 × 一秒間に移動させる電子の個数

$$I = ef$$

- 小さい電流が正確に発生できる！！多くの用途があります
- 今は高々数 nA しか発生、制御できません  
 ↖ 10<sup>-9</sup> アンペア（頑張ってます！並列動作させれば、より多くの電流が流せます）

オームの法則で電圧と抵抗から求めることも可能  $I = \frac{V}{R}$  ← ジョセフソン効果  
 ← 量子ホール効果  
 しかし、従来の電磁気学による定義は破棄

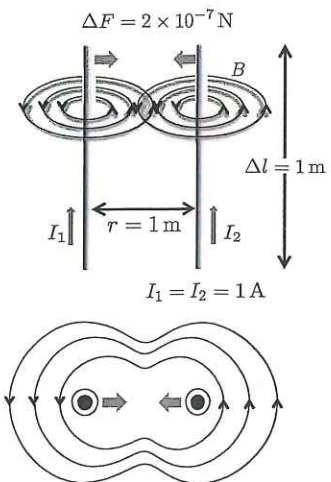
## 現在の電気標準～電流：アンペアの定義～

アンペアは真空中に1メートルの間隔で平行に配置された無限に小さい円形断面積を有する無限に長い二本の直線上導体のそれぞれを流れ、これらの導体の長さ1メートルにつき2 × 10<sup>-7</sup>ニュートンの力を及ぼし合う一定の電流 (1948年 第9回CGPM)

$$\Delta F = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r} \Delta l$$

↓  $2 \times 10^{-7} = \frac{\mu_0 \times 1 \times 1}{2\pi \times 1} \times 1$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$



現在の電流の定義 =  $\mu_0$  (磁気定数、真空の透磁率) の定義

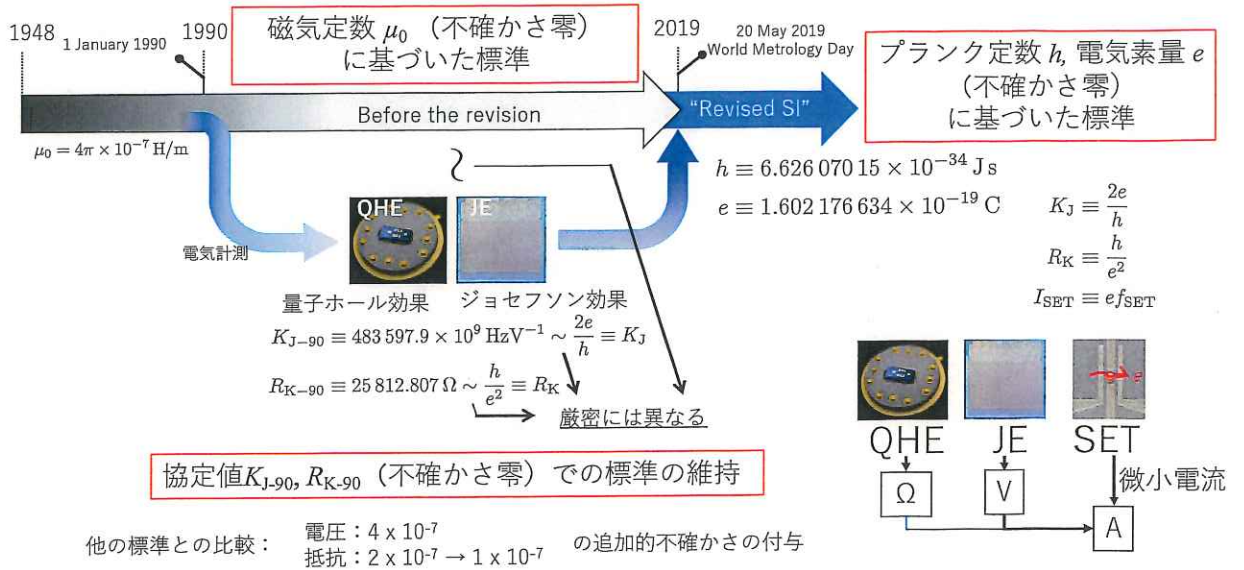
過去・現在・これからの電気標準  
 ~古典電磁気学から協定値そして完全に量子力学的な標準~



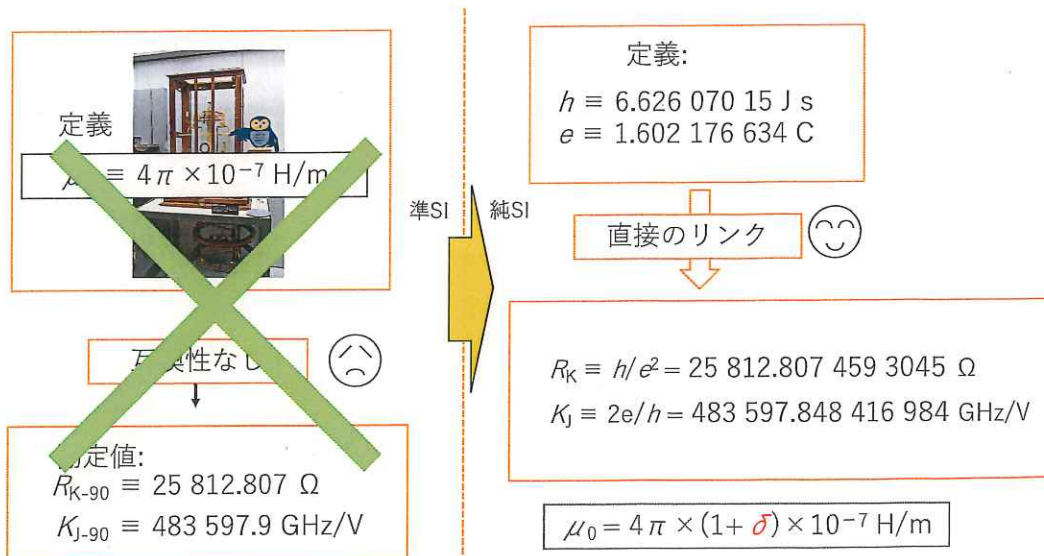
電流天秤：絶対アンペア  
 (写真提供：国立科学博物館)



相互誘導器：絶対オーム



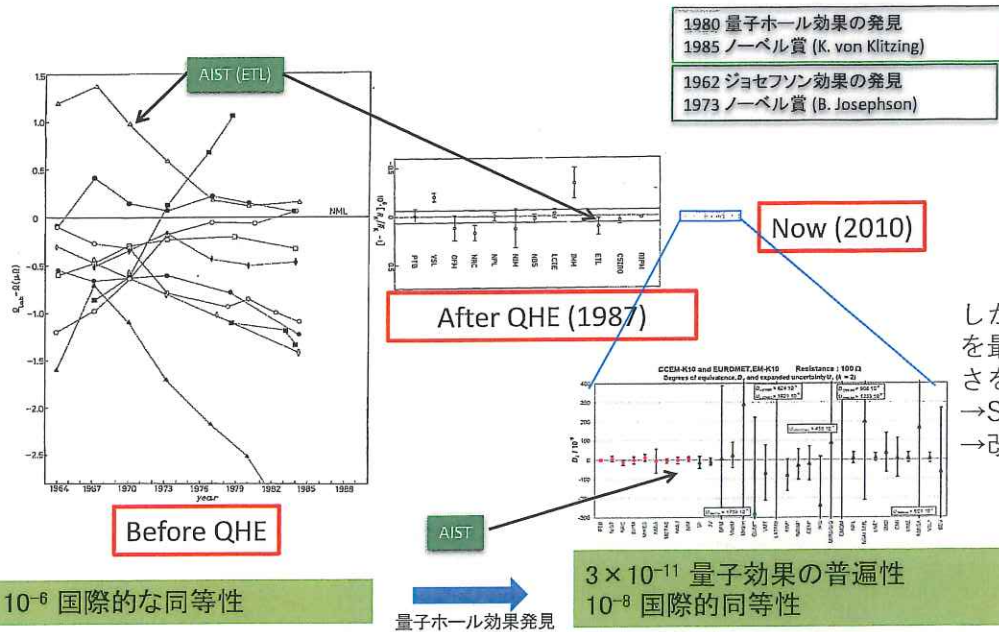
現在そして改定後の電気標準 ~1990年協定値 (妥協案) への終止符~





量子標準による不確かさ低減・国際整合性の劇的向上 ~抵抗の場合~

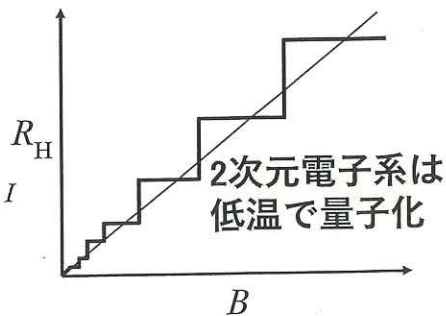
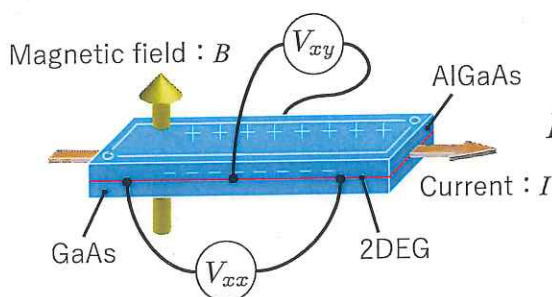
電圧についても同様



しかし：電気測定の利便性を最大化するため、不確かさを零とする協定値を設定  
 →SIとの連携が切れる  
 →改定SIでSIとの連携復活

量子ホール効果抵抗標準

# 古典的ホール効果 高温（室温）、3次元系

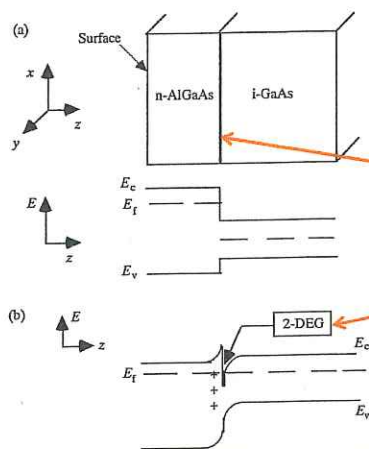


$$R_H = \frac{B}{ne}$$

2次元電子系の場合ホール効果が量子化： $h/e^2$

キャリア密度 ( $n$ ) を測定するのに用いられる

# 量子化ホール抵抗素子の作成



二つの半導体  
(共に低温で絶縁体) の界面

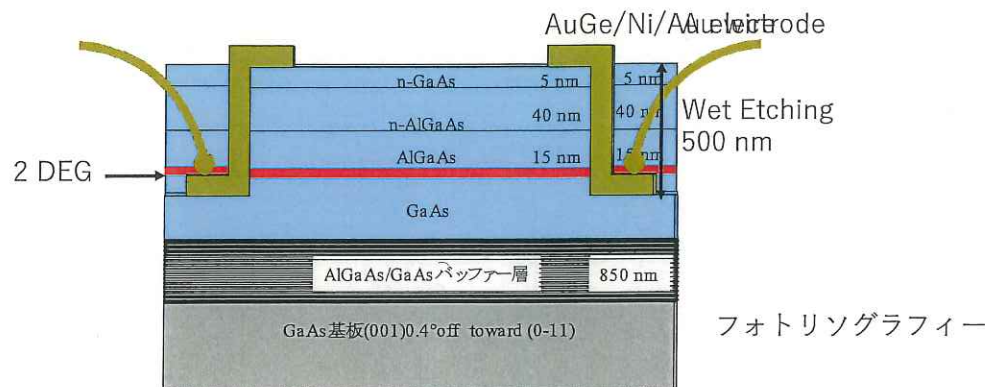
バンドが界面で曲がり電子が2次元的に  
閉じ込められる  
(2-dimensional electron gas, 2DEG)

異種半導体の界面（ヘテロ構造、HEMT）の電子  
電界効果トランジスタ（FET）の電子

強い2次元性を持つ

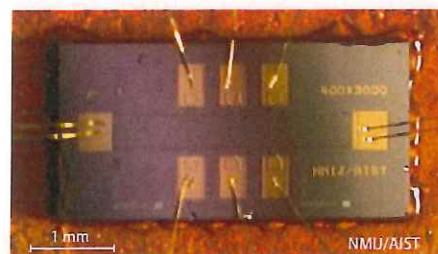
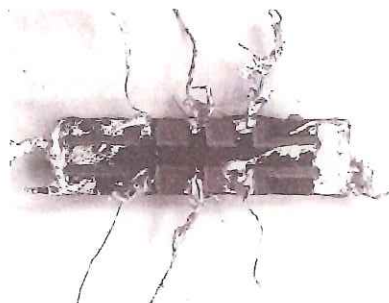
# 量子化ホール抵抗素子の作成

1. ホールバー素子形状をウエットエッチで形成する
2. AuGe/Ni/Au電極蒸着
3. 電極部をアニールしオーミック電極とする（合金化）
4. サンプルホルダにマウントしワイヤボンディングする



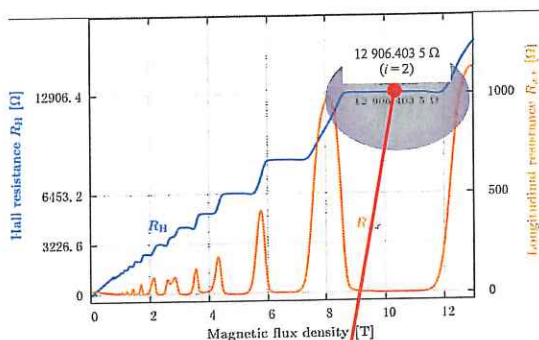
GaAs/GaAlAsヘテロ構造、High Electron Mobility Transistor (HEMT)、Heterostructure FET (HFET)

# 量子化ホール抵抗素子



サンプルのサイズ、作成方法、質にはよらない  
→しかし標準等高精度測定には十分高品質な試料が必要

# 量子ホール効果



$$R_H = \frac{B}{ne}$$

↓ 冷却

$$R_H(i) = \frac{h}{ie^2}$$

25812.807 Ω for  $i=1$   
: von Klitzing Constant  $R_K$

抵抗標準には  $i=2$  のプラトーを用いる

$$R_H(i=2) = \frac{R_{K-90}}{2} = \frac{25\,812.807\ \Omega}{2} = 12\,906.4035\ \Omega$$

標準供給では  $R_K$  のかわりに  $R_{K-90}$  を用いる

# 微細構造定数 $\alpha$ とフォン・クリッツィング定数 $R_K$

THE PHYSICAL REVIEW  
AND  
PHYSICAL REVIEW LETTERS  
PUBLISHED FOR THE AMERICAN PHYSICAL SOCIETY  
BROOKHAVEN NATIONAL LABORATORY, UPTON, LONG ISLAND, NEW YORK 11973  
TELEPHONE (516) 335 2245  
(516) 335 9313

OUR NEW ADDRESS:  
1 RESEARCH ROAD  
BOX 1000  
RIDGE, NEW YORK 11961

June 25, 1980

Dr. K.v. Klitzing  
Physikalisches Institut der  
Universität Würzburg  
D-8700 Würzburg  
Federal Republic of Germany  
Dear Dr. Klitzing:  
The manuscript by  
K.v. Klitzing, G. Dorda, and N. Harper

Most important application  
of QHE (METROLOGY)

entitled:  
Realization of a resistance standard based on  
fundamental constants

REPLY REFER TO  
12459

has been reviewed by our referee(s). On the basis of the resulting report(s), we judge that the paper is not suitable for publication in Physical Review Letters in its present form, but might be made so by appropriate revision. Pertinent criticisms extracted from the report(s) is enclosed. While we cannot make a definite commitment, the probable course of action if you choose to resubmit is indicated below.

- Acceptance, if the editors can judge that all or most of the criticism has been met.
- Return to the original referee(s) for judgement.
- Submittal to new referee(s) for judgement.

# 微細構造定数 $\alpha$ とフォン・クリッツィング定数 $R_K$

VOLUME 45, NUMBER 6 PHYSICAL REVIEW LETTERS 11 AUGUST 1980

## New Method for High-Accuracy Determination of the Fine-Structure Constant Based on Quantized Hall Resistance

K. v. Klitzing

Physikalisches Institut der Universität Würzburg, D-8700 Würzburg, Federal Republic of Germany, and Hochfeld-Magnetlabor des Max-Planck-Instituts für Festkörperforschung, F-38042 Grenoble, France

and

G. Dorda

Forschungslaboratorien der Siemens AG, D-8000 München, Federal Republic of Germany

and

M. Pepper

Cavendish Laboratory, Cambridge CB3 0HF, United Kingdom (Received 30 May 1980)

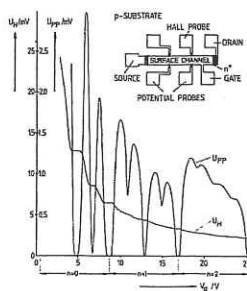
Measurements of the Hall voltage of a two-dimensional electron gas, realized with a silicon metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, show that the Hall resistance at particular, experimentally well-defined surface carrier concentrations has fixed values which depend only on the fine-structure constant and speed of light, and is insensitive to the geometry of the device. Preliminary data are reported.

PACS numbers: 73.25.+i, 06.20.Jr, 73.20.Mr, 73.40.Qy

In this paper we report a new, potentially high-accuracy method for determining the fine-structure constant,  $\alpha$ . The new approach is based on the fact that the degenerate electron gas in the inversion layer of a MOSFET (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor) is fully quantized when the transistor is operated at helium temperatures and in a strong magnetic field of order 15 T.<sup>1</sup> The inset in Fig. 1 shows a schematic diagram of a typical MOSFET device used in this work. The electric field perpendicular to the surface (gate field) produces subbands for the motion normal to the semiconductor-oxide interface, and the magnetic field produces Landau quantization of motion parallel to the interface. The density of states  $D(E)$  consists of broadened  $\delta$  "functions"; minimal overlap is achieved if the magnetic field is sufficiently high. The number of states,  $N_L$ , within each Landau level is given by

$$N_L = eB/h, \quad (1)$$

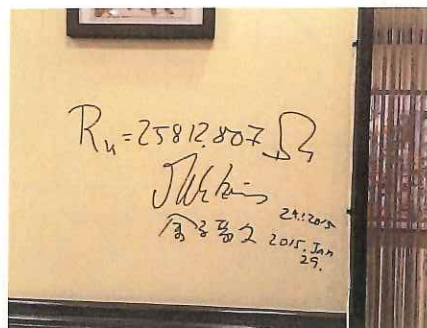
where we exclude the spin and valley degeneracies. If the density of states at the Fermi ener-



## フォン・クリッツィング教授



量子ホール効果発見 (1975、ノーベル賞1985) : フォン・クリッツィング教授

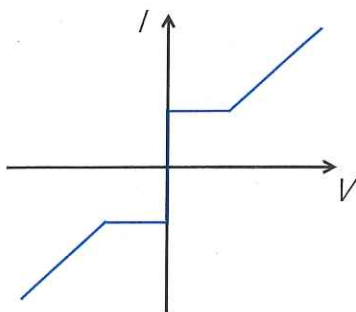


ブラッスリー ドゥ・プラ (つくば駅前) : 閉店しました。。。

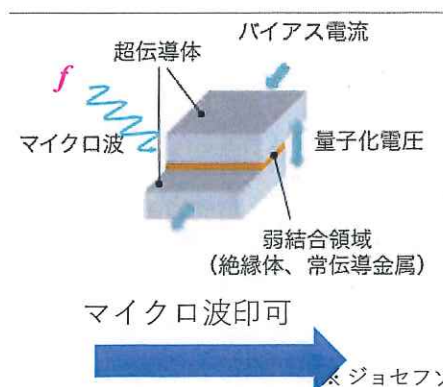
# ジョセフソン効果電圧標準

## ジョセフソン接合のマイクロ波応答特性

電流-電圧特性

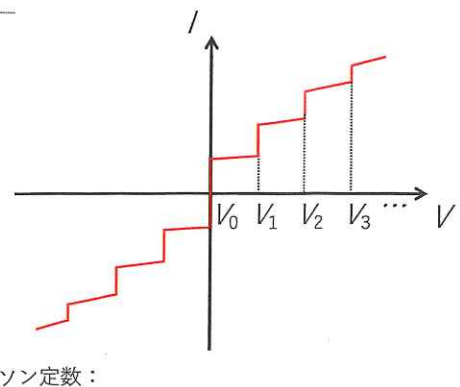


$$V_n = n f \cdot \frac{h}{2e} = n f / K_J$$



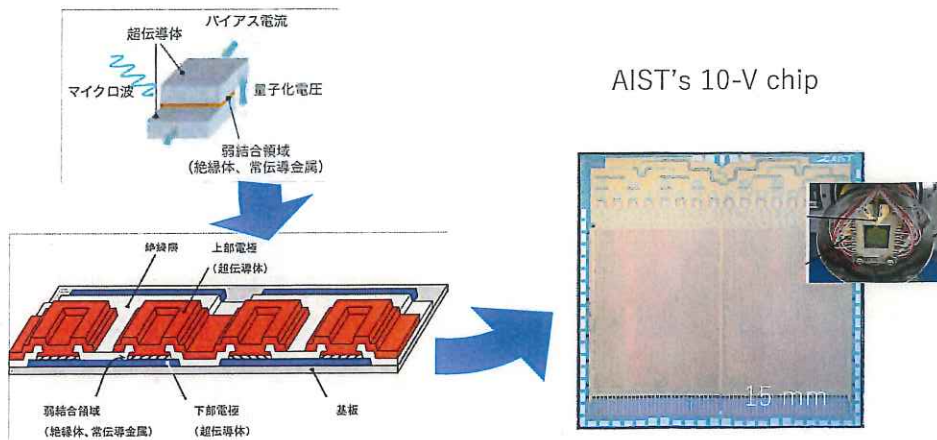
$$K_J = \frac{1}{\Phi_0} = \frac{2e}{h}$$

$$K_{J-90} = 483597.9 \text{ [GHz/V]}$$



振動周波数が印加したマイクロ波の周波数にロックされる  
 ⇒ 量子化された定電圧ステップ

# ジョセフソン接合アレー素子構造



327,680個のNbN/TiNx/NbN接合を集積( $f = 16 \text{ GHz}$ )

# ジョセフソン定数

$$V = n \frac{\hbar}{2e} \omega_r = n \frac{h}{2e} f = n \frac{1}{K_J} f$$

$$K_J = 483\,597.891 \times 10^9 \text{ Hz V}^{-1}$$

CODATA基礎物理定数推奨値

標準不確かさ:  $0.012 \times 10^9 \text{ Hz V}^{-1}$

$$K_{J-90} = 483\,597.9 \times 10^9 \text{ Hz V}^{-1}$$

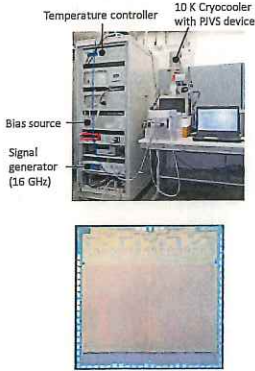
ジョセフソン定数協定値

不確かさをゼロとし国際的な比較も含めすべての基準

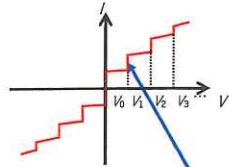
*e*や *h*などの不確かさよりジョセフソン効果の再現性が高い!  
*e*や *h*などの不確かさによらない、電気関係量の校正、測定を実現  
 改定後のSIでは*e*や *h*は定義量となる→純粋にSIトレーサブルへ

# 現行のジョセフソン電圧標準

・ 直流電圧： (超伝導) ジョセフソン効果



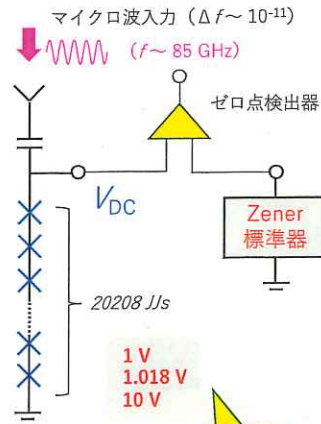
327,680個のNbN/TiNx/NbN接合を集積 (f = 16 GHz)



$$V_n = n f \cdot \frac{h}{2e}$$

16桁まで確認済 (Tsai et al. 1983)

ジョセフソン電圧標準  
(Josephson Voltage Standard: **JVS**)  
(Conventional JVS: **CJVS**)



不確かさ ~ 10^-9

# ジョセフソン素子は電流-電圧の量子変換器 (量子化器)

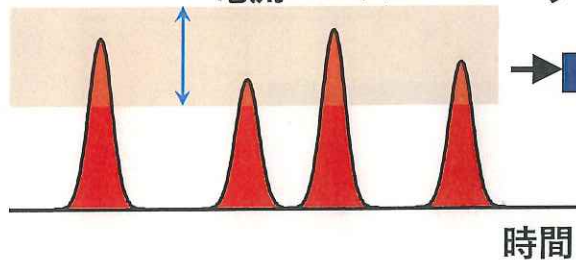
$$V_n = n f \cdot \frac{h}{2e}$$

↓  
f(t)

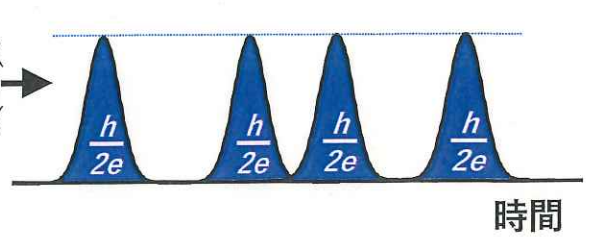
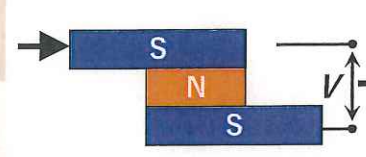
電流パルス

ジョセフソン接合

量子化電圧パルス

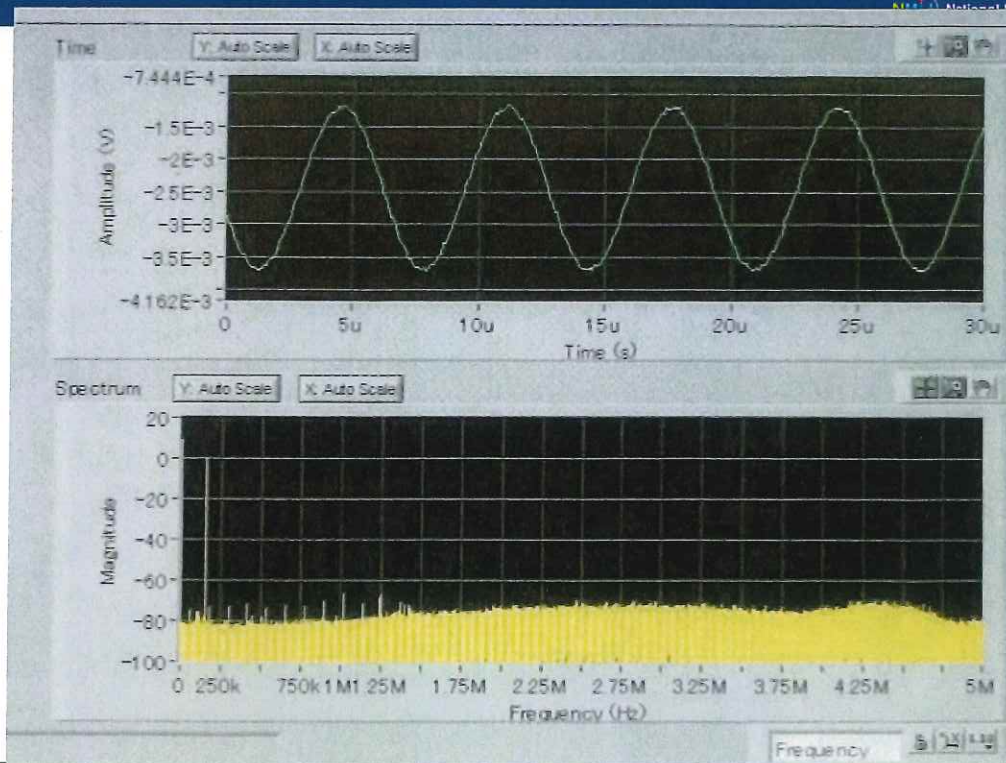


時間



時間



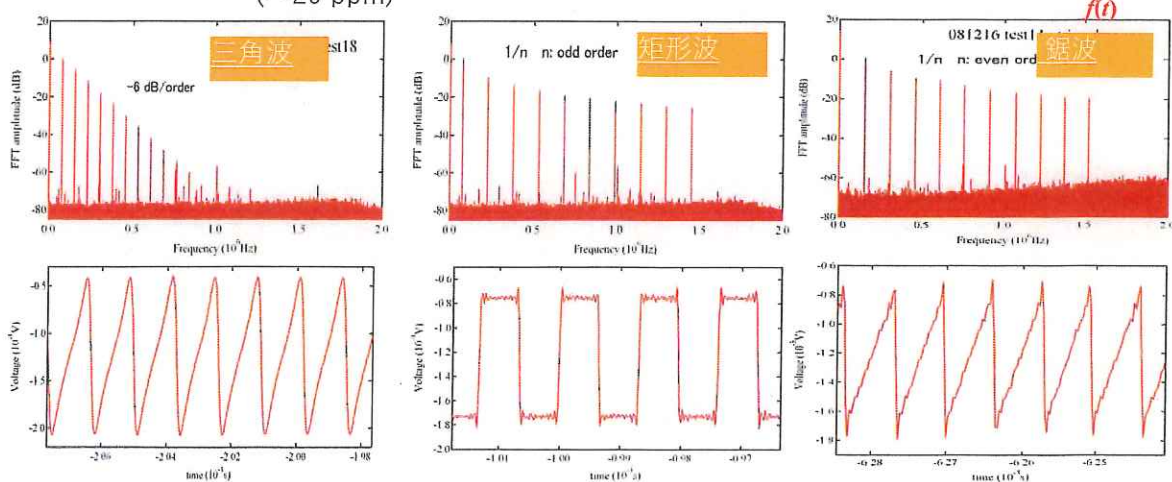


2018年11月09日 (金)

## パルス駆動型ジョセフソン量子交流電圧標準

- 任意波形の生成
- 10 mVrms / -93 dBc  
(~20 ppm)

$$V_n = n f \cdot \frac{h}{2e}$$



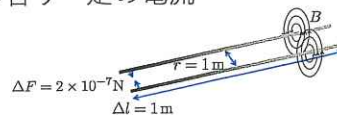
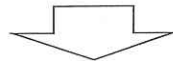
2018年11月09日 (金)

## 従来の電流の定義 そして改定SIでの電気素量の定義と電流の定義

### 改定後の電気標準 ～アンペアの定義～

アンペアは真空中に1メートルの間隔で平行に配置された無限に小さい円形断面面積を有する無限に長い二本の直線上導体のそれぞれを流れ、これらの導体の長さ1メートルにつき  $2 \times 10^{-7}$  ニュートンの力を及ぼし合う一定の電流

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ (H/m)}$$



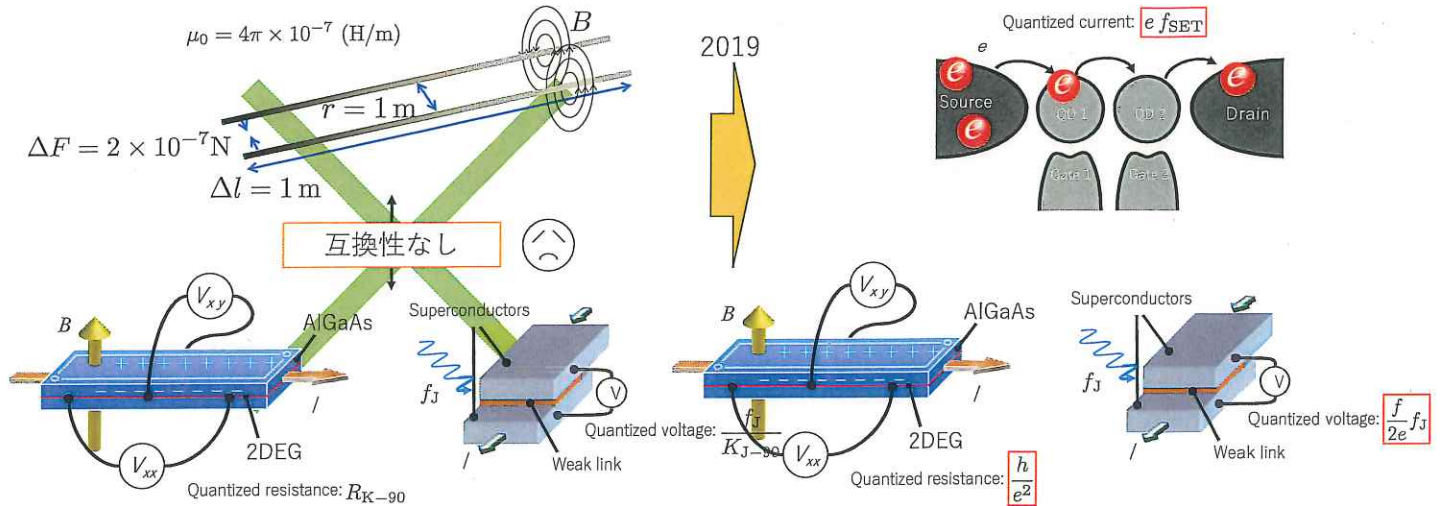
#### 改定SI

アンペア(記号は A)は、電流の SI 単位である。これは、単位 C (As に等しい) による表現において、電気素量  $e$  を正確に  $1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$  と定めることによって設定される。ここで、秒は  $\Delta\nu_{Cs}$  により定義されている。

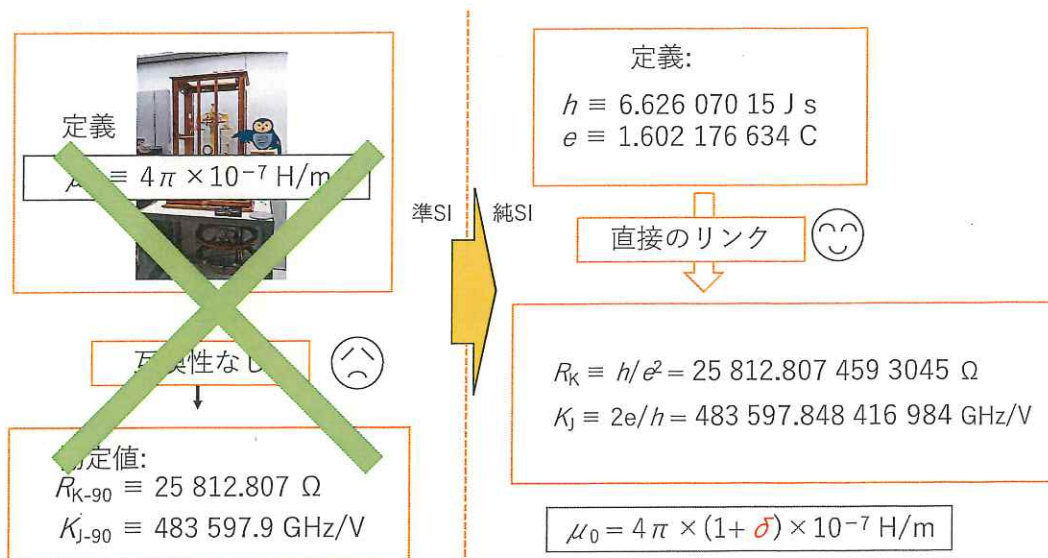


電気素量  $e$  と周波数  $f$  で決める!

現在そして改定後の電気標準 ~1990年協定値 (妥協案) への終止符~



現在そして改定後の電気標準 ~1990年協定値 (妥協案) への終止符~



## 定義される基礎物理定数

CODATA 2017 and proposed defined values for the revision

$$h = 6.626\,070\,150(69) \times 10^{-34} \text{ J s} \\ [1.0 \times 10^{-8}], \quad (10)$$

$$e = 1.602\,176\,6341(83) \times 10^{-19} \text{ C} \\ [5.2 \times 10^{-9}], \quad (11)$$

$$k = 1.380\,649\,03(51) \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1} \\ [3.7 \times 10^{-7}], \quad (12)$$

$$N_A = 6.022\,140\,758(62) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} \\ [1.0 \times 10^{-8}], \quad (13)$$

Measurement results with uncertainties

$$h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}, \quad (14)$$

$$e = 1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}, \quad (15)$$

$$k = 1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}, \quad (16)$$

$$N_A = 6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}, \quad (17)$$

Proposed defined values

Measurements: done before June 2017

CODATA analysis: 2017

CIPM: 2017

CGPM: 2018

Start: May 20 2019

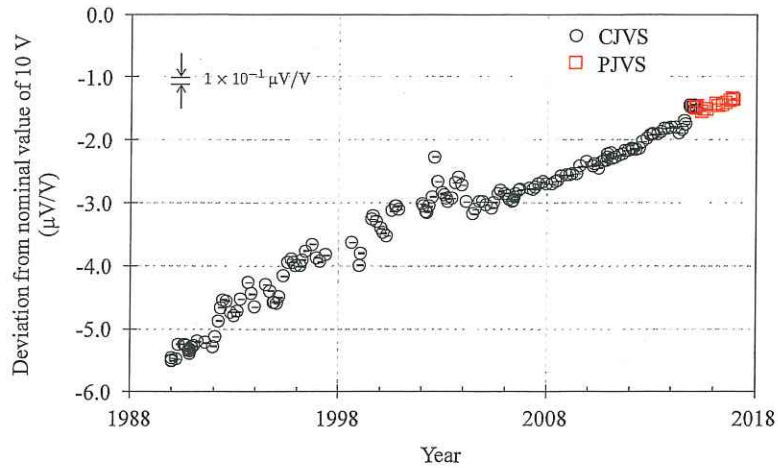
SIの改定 ～ $h, e$ の定義導入～

1990年の値の置き換えつまり、小さな変化は不可避

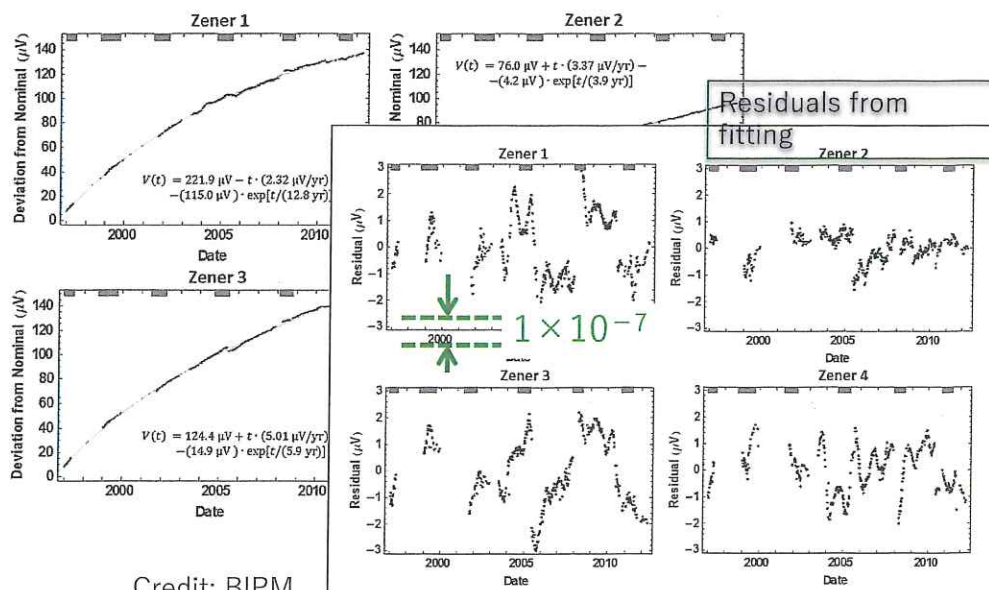
$$\begin{aligned} \text{抵抗相対変化: } +1.779 \times 10^{-8} & \quad \because R_{K-90} \rightarrow R_K = h/e^2 \\ \text{電圧相対変化: } +1.067 \times 10^{-7} & \quad \because K_{J-90} \rightarrow K_J = 2e/h \end{aligned}$$

この影響は?

SI改定の影響 ～標準電圧発生器：10 Vの経年変化の観点から～

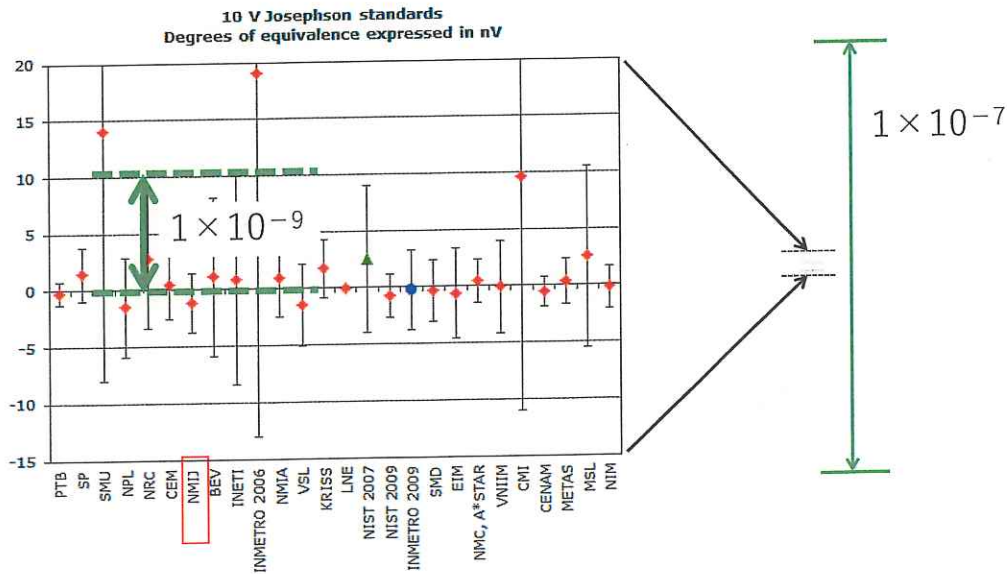


SI改定の影響 ～標準電圧発生器：10 Vの経年変化の観点から～

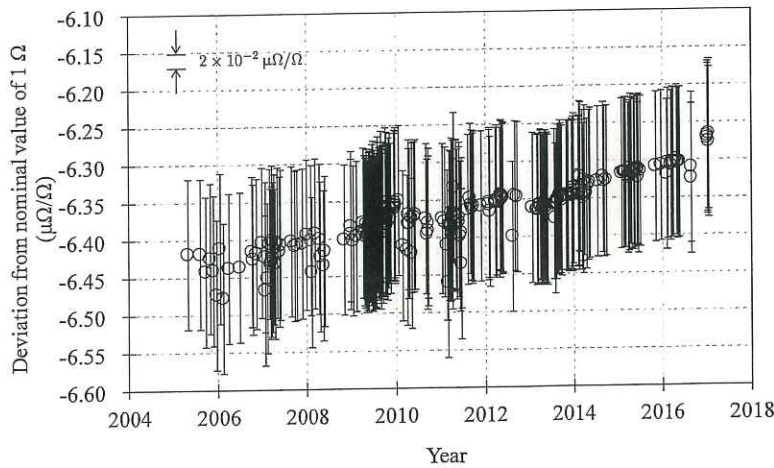


Credit: BIPM

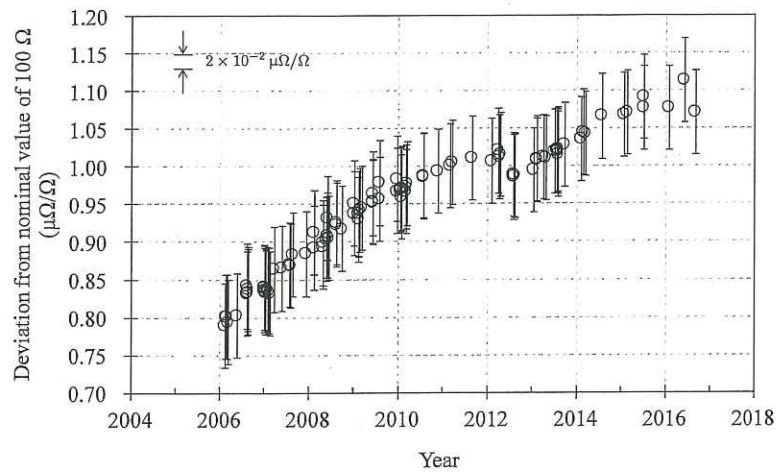
# SI改定の影響 ~ 国際比較の観点から



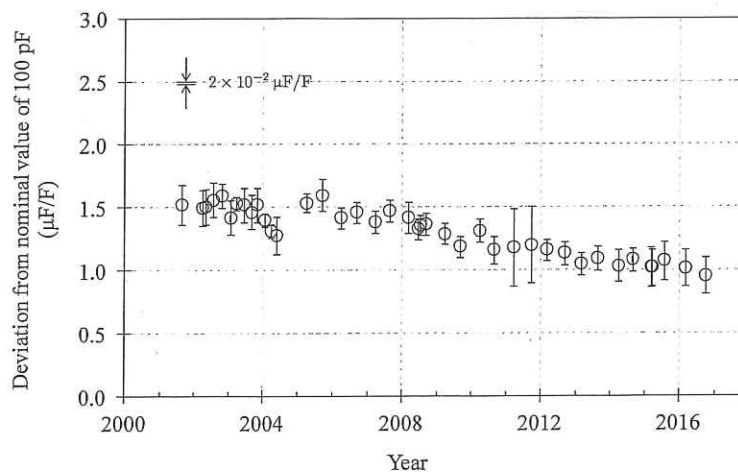
# SI改定の影響 ~ 抵抗標準器：1 Ωの経年変化の観点から～



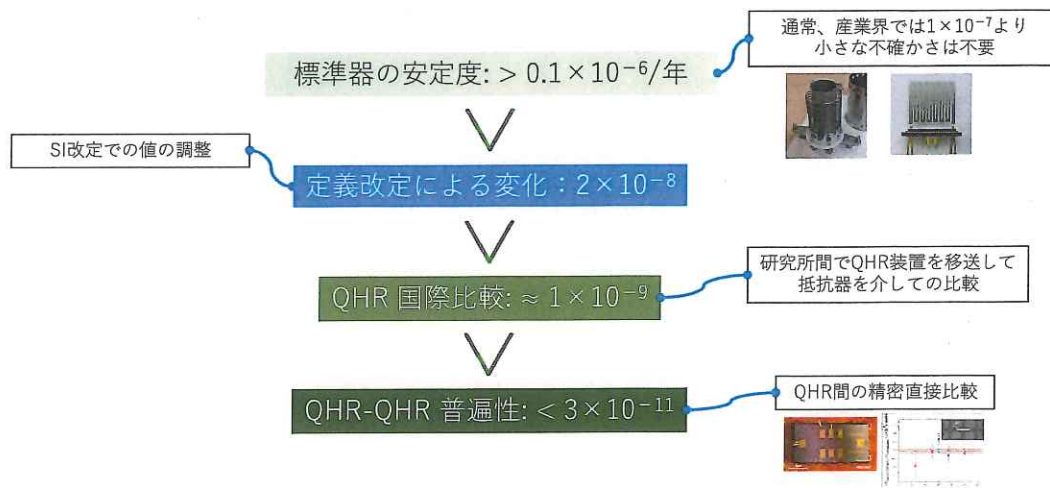
SI改定の影響 ~抵抗標準器：100 Ωの経年変化の観点から~



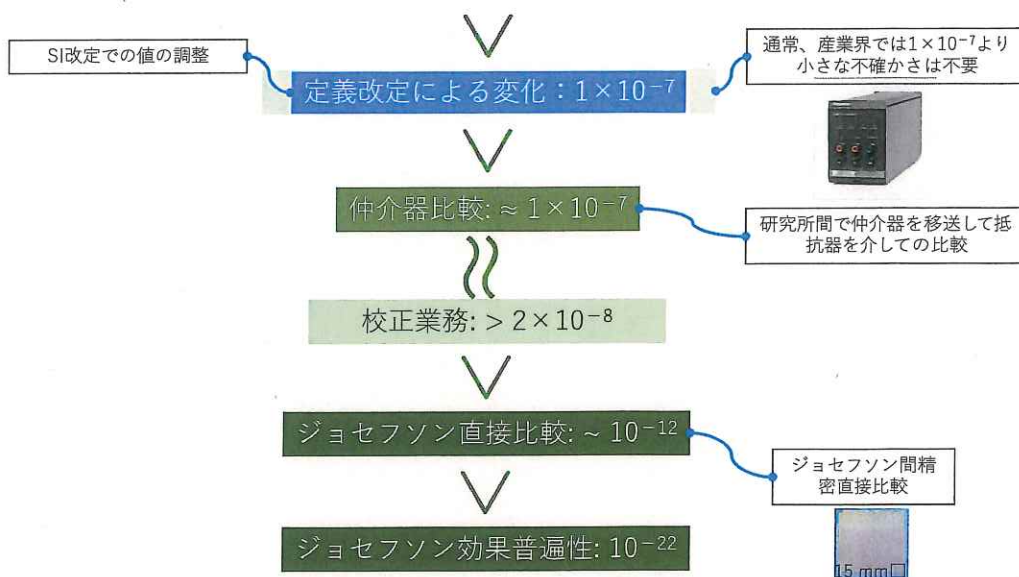
SI改定の影響 ~キャパシタンス標準器の経年変化の観点から~



# 抵抗



# 電圧





## 他の電気量への影響

- ジョセフソンと、QHR（共にプライマリー）が抵抗、電圧全ての出発点となる。
  - キャパシタンス一次標準（ $10^{-8}$  level）：抵抗と同じレベルの影響
  - 二次標準器への影響はほぼなし。
  - 電力測定など多くの電気測定は1ppmを切ることはまれであり影響なし。
- **結論: 広範な再測定、再校正、値の調整の必要なし（プライマリーを除く）**

## 1990年電気量協定値からの変化量

物理量	数式	相対拡張不確かさ ( $k=2$ , ppb*)	産総研の不確かさ ( $k=2$ , ppb)
電圧	$V_{SI} = V_{90} [1 + (106.7 \times 10^{-9})]$	106.7 ppb	4.5 ppb
抵抗	$\Omega_{SI} = \Omega_{90} [1 + (17.79 \times 10^{-9})]$	17.79 ppb	56 ppb
電流	$A_{SI} = A_{90} [1 + (88.87 \times 10^{-9})]$	88.87 ppb	
電荷	$C_{SI} = C_{90} [1 + (88.87 \times 10^{-9})]$	88.87 ppb	
電力	$W_{SI} = W_{90} [1 + (195.5 \times 10^{-9})]$	195.5 ppb	
キャパシタンス**	$F_{SI} = F_{90} [1 - (17.79 \times 10^{-9})]$	-17.79 ppb	72 ppb
インダクタンス	$H_{SI} = H_{90} [1 + (17.79 \times 10^{-9})]$	17.79 ppb	

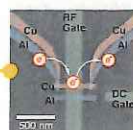
\* ppb =  $10^{-9}$ 

\*\*量子化ホール抵抗を用いた場合の変化。カリキュラブルキャパシタ (calculable capacitor)を用いた場合はキャパシタンスの変化はない

## SIの実現法

## 電気量の実現

- 抵抗と電圧は変更なし
  - 抵抗：量子化ホール抵抗素子
  - 電圧：ジョセフソン接合素子
- 電流も基本的に変更なし
  - $A = V/\Omega$  (ジョセフソン/量子ホール)
  - 「しかし」： $I = ef$  つまり、単一電子トンネリング効果素子を用いて、新SIに完全に準拠した微小電流が発生、測定できる!!



電流標準 ～将来：単電子移送量子電流標準～

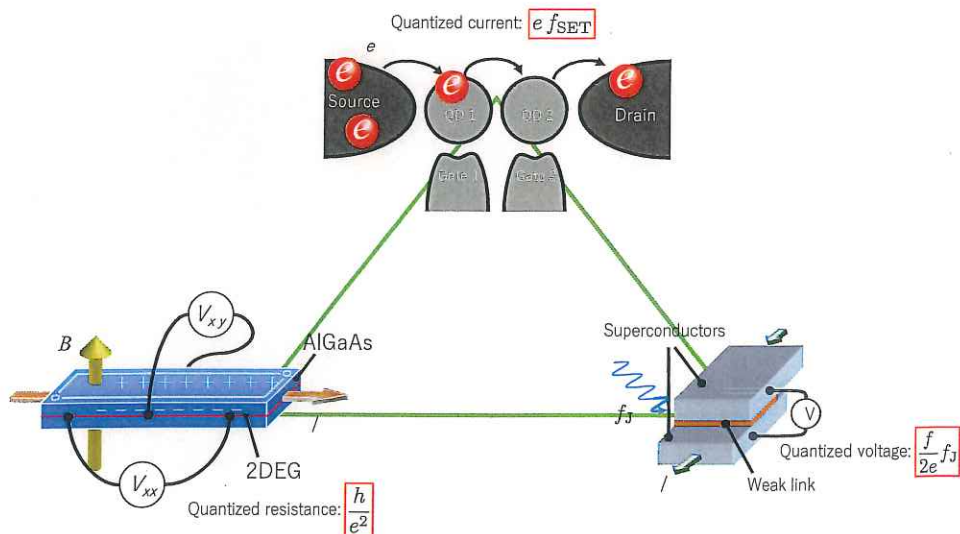
Dilution refrigerator    Operating devices



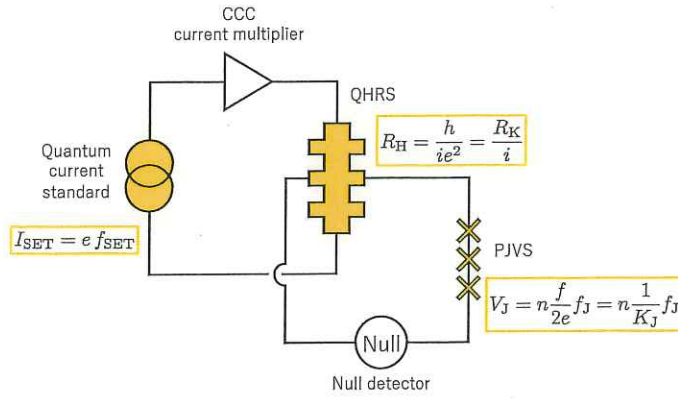
Superconducting magnet (12 T)

単一の電子のコントロール：  
ほとんど一部屋を占有する冷凍機と多くの高周波機器が必要

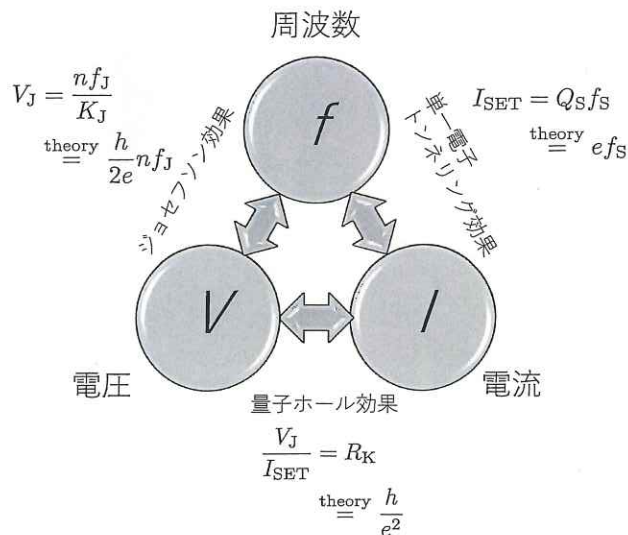
量子メトロロジートライアングル ～量子力学的にオームの法則は成り立つか～



量子メトロロジートライアングル ～量子力学的にオームの法則は成り立つか～

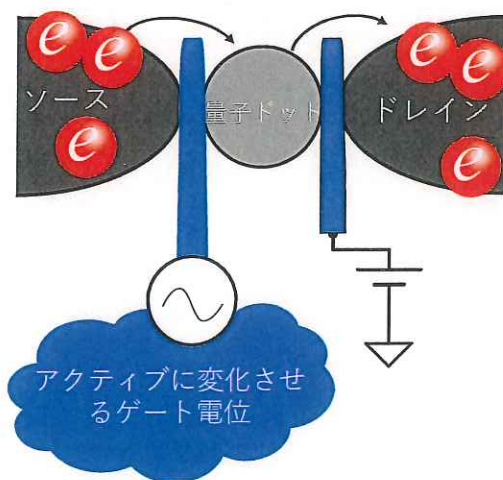


量子メトロロジートライアングル ～量子力学的にオームの法則は成り立つか～



# 単一電子センシング・発生を利用した応用

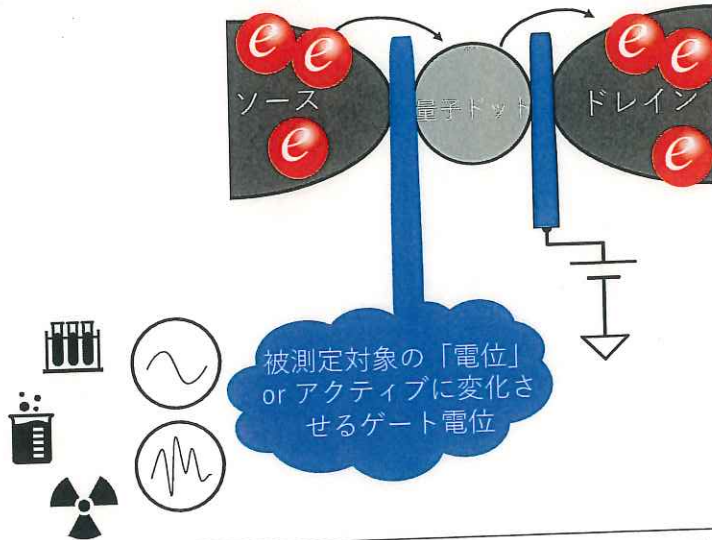
# 単一電子トランジスタ・単一電子移送素子



電子を「バケツリレー」のように一つづつ一秒間に  $f$  個移動させる

$$I_{\text{SET}} = e f_{\text{SET}}$$

# 単一電子トランジスタ・移送素子・センサ



2018年11月09日 (金)

NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST)

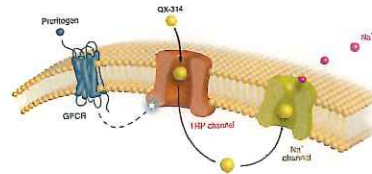
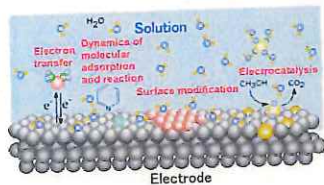
72

# 単一電子レベルでの電流計測を目指す

アトアンペア ( $10^{-18}$  A) = 電子数個 / 1 秒の電流が測れると、、、

単一イオンの化学反応

単一細胞におけるイオン電導



単一分子レベルでの  
触媒メカニズム解明

生体现象のメカニズム解明

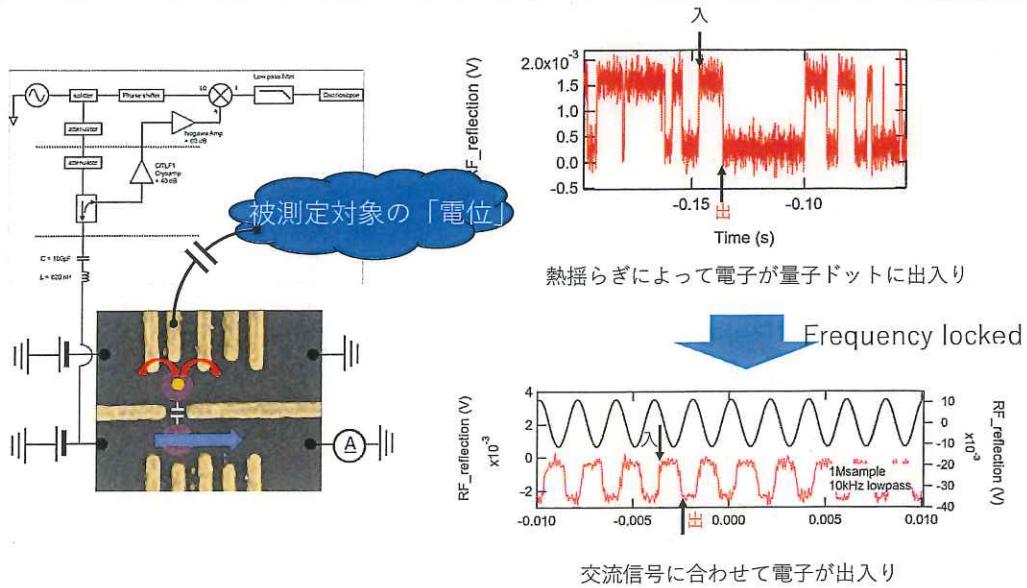
究極の電流感度に加え実時間 (交流電流) の測定が必要不可欠

2018年11月09日 (金)

NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST)

73

# 高速実時間単一電子センシングの実現



熱揺らぎによって電子が量子ドットに出入り

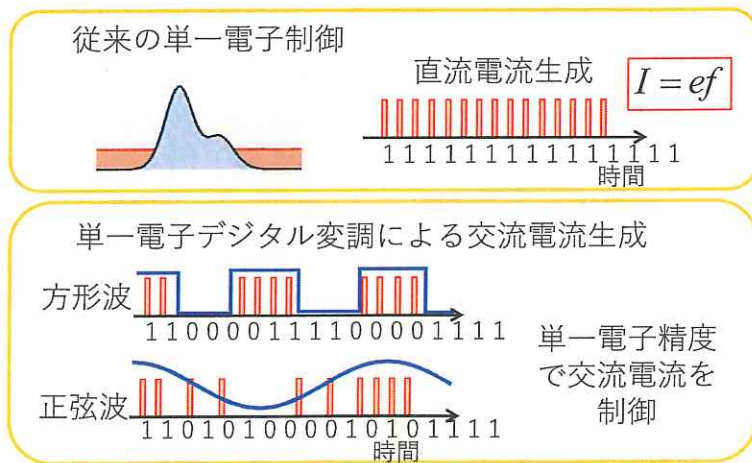
Frequency locked

交流信号に合わせて電子が出入り

半導体素子中の電子1個の動きを交流で制御し、リアルタイムで計測することに成功。

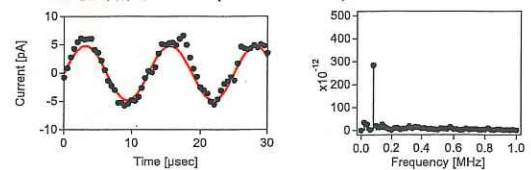
# 単一電子ポンプによる任意波形電流生成

パネル・展示 B7-05

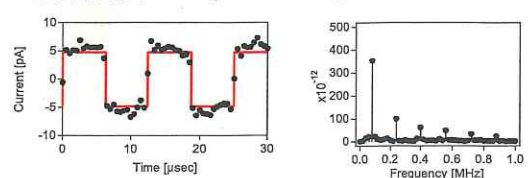


たった一つの電子でビット列を制御する  
究極のデジタル変調

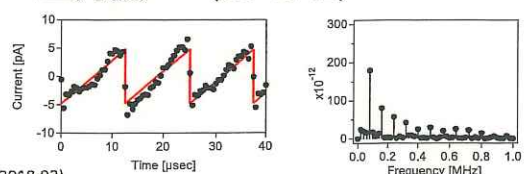
## • 正弦波 (80 kHz)



## • 方形波 (80 kHz)

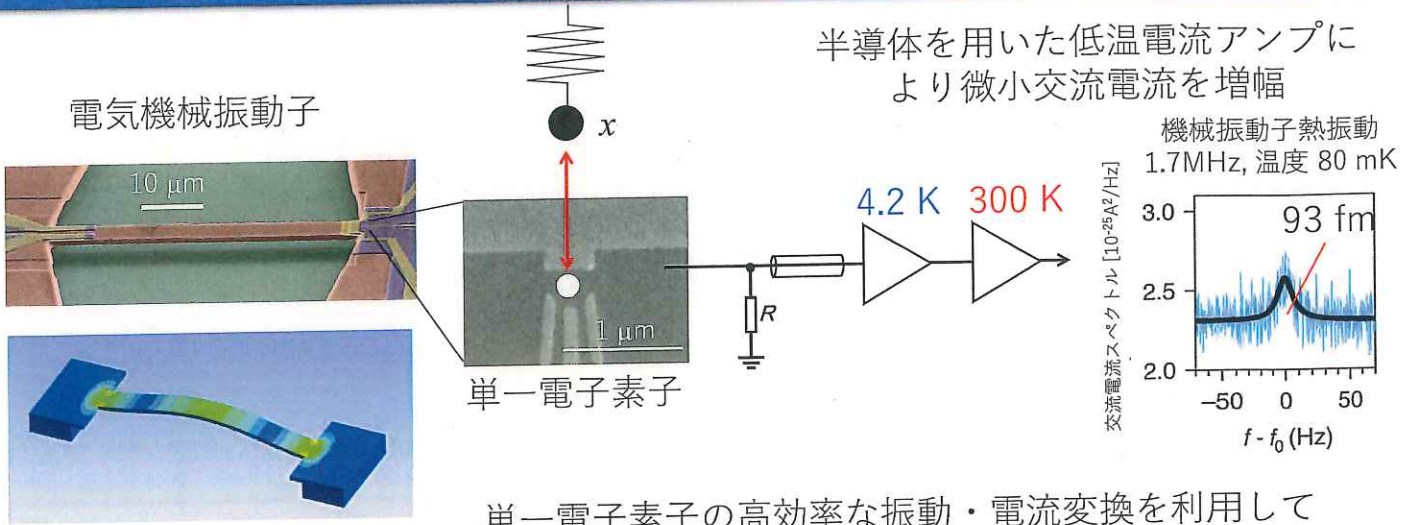


## • 三角波 (80 kHz)



Okazaki et. al., Applied Physics Express 11, 036701 (2018.02).

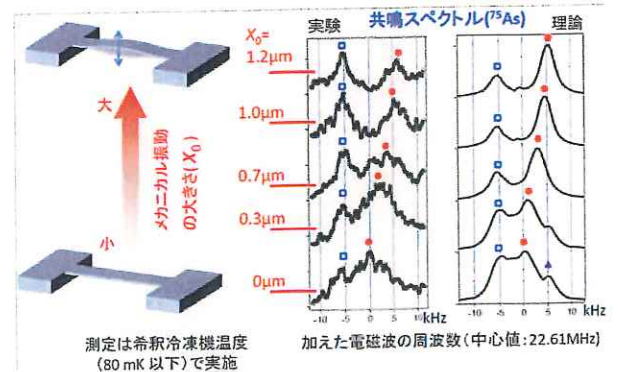
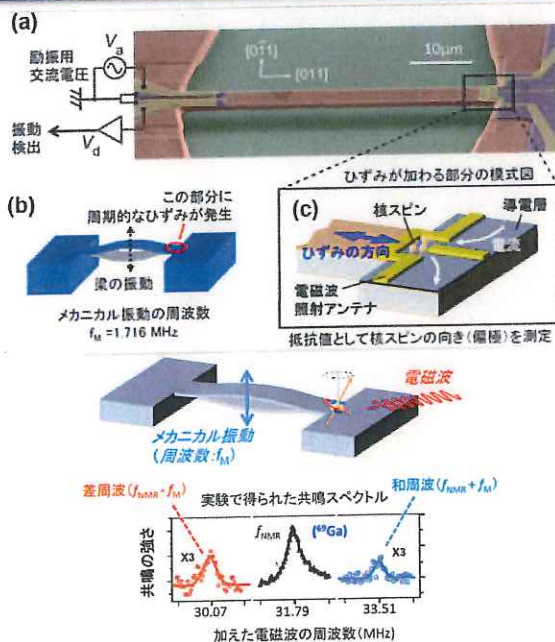
# 単一電子素子を用いたMEMSの熱振動計測



単一電子素子の高効率な振動・電流変換を利用して  
fmレベルの振動変位を高感度測定  
世界で初めて半導体単一電子素子を用いて振動検出

Okazaki *et. al.* Nature Communications 7, 11132 (2016.04)

# 電流検出NMRによるナノ領域のNMR



赤丸で示された共鳴ピークの位置が、メカニカル振動が大きくなるとともに変化



## 定義改定のスケジュール

- 2017年7月1日  
科学技術データ委員会 (CODATA) のCODATA2017基礎物理定数特別調整実施に用いるプランク定数、電気素量、ボルツマン定数、アボガドロ定数の値の論文報告の締め切り (要アクセプト)
- 2017年7月～  
CODATAがプランク定数、電気素量、ボルツマン定数、アボガドロ定数の推奨値を決定
- 2017年9月  
単位諮問委員会 (CCU) がCODATAの推奨値を用いたSI定義改定案を審議
- 2017年11月  
国際度量衡委員会 (CIPM) が第26回国際度量衡総会 (CGPM) での決議案を決定
- 2018年11月13日～16日  
第26回国際度量衡総会 (CGPM) 開催、SI定義改定案を審議・決議
- 2019年5月20日：World Metrology Day  
改定されたSIの定義を施行

## SI改定についての結論 (電気)

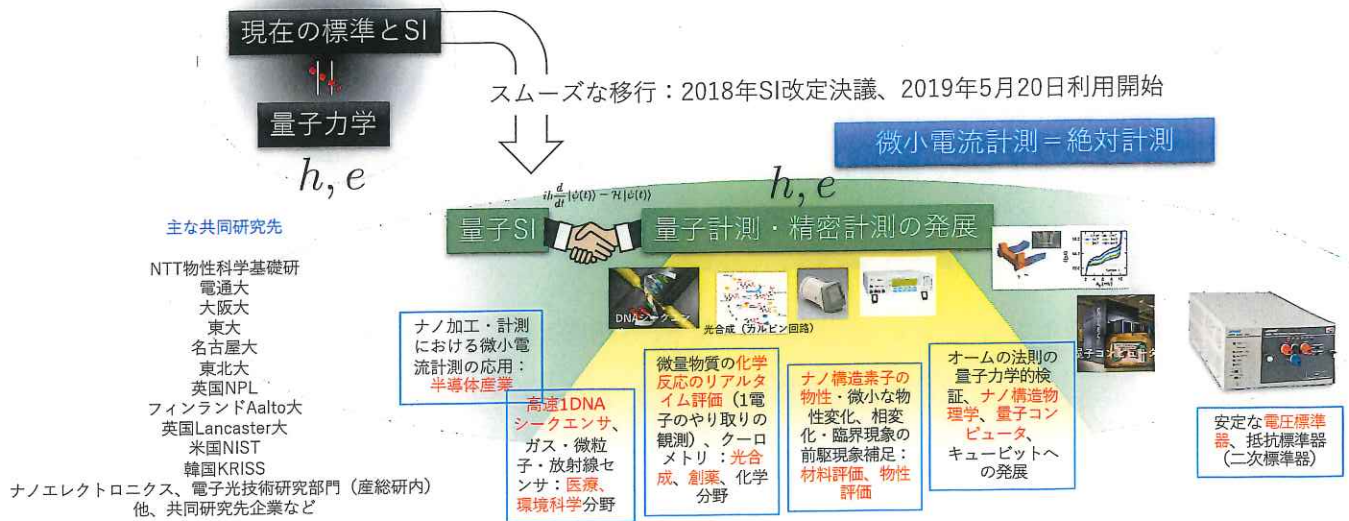
- 1990協定値の変更に伴い、**小さな変更**は不可避  
抵抗相対変化： $2 \times 10^{-8}$  ( $R_{K-90} \rightarrow R_K = h/e^2$ )  
電圧相対変化： $1 \times 10^{-7}$  ( $K_{J-90} \rightarrow K_J = 2e/h$ )
- この変化は、量子一次標準を運用している場所でしか見えない程度  
ほとんどの**二次標準器**では (最も安定な機器でも) **影響なし**。
- **SIへ直接トレーサブル**となる長期的利便性は極めて重要 : 多くの応用

校正事業者・産業界とは調整済み

ステップチェンジはあるが、標準供給には影響なし

# SI改定と単一電子制御・観測技術の応用

- 現在の標準から障害なくスムーズに、**純粋に量子力学に基づく体系へ移行**
- 量子力学・精密**量子計測の発展に完全にリンク**：長期的に重大なメリット



## 編集後記

例年と比べると寒さを感じないような気がします。季節は間もなく師走です。今年も残り少なくなってきましたが、皆さま いかがお過ごしでしょうか。会報第 81 号をお届けいたします。

本号では、11 月 9 日に開催されました標準物質協議会講演会の資料を掲載しました。諸事情により、当日ご参加いただけなかった会員の皆様方にも当日のご講演内容をお知らせいたします。誌面の都合で、今号は、金子様のご講演資料を掲載しました。金子様のご講演は、電気標準に関する内容ですが、日ごろ電気や電流、電圧をそれほど意識せず、仕事をしています。化学分析も電流や電圧と大きく関連しており、あらためて、定義改定の意義を考えさ

せられました。電気にそれほどなじみのない私にも大変やさしくわかりやすい資料で説明いただき、理解が深まりました。

高澤様のご講演については、次号掲載とさせていただきますが、最近、特に話題となっております、ISO/IEC 17025 の改定の内容を詳しくご紹介いただき、マネジメントシステムの品質マニュアル等の改訂に大変役立つ内容であったと思います。

皆様方のご協力によりまして第 81 号を発行することができました。引き続き、皆様からのご寄稿をいただきたく、よろしく願い申し上げます。

(四角目)



(ピンクアイスバーグ 埼玉県宮代町)

〒345-0043

埼玉県北葛飾郡杉戸町下高野 1600 番地

一般財団法人化学物質評価研究機構内

標準物質協議会 事務局 四角目和広

Tel. 0480-37-2601 Fax. 0480-37-2521

E-mail shikakume-kazuhiro@ceri.jp