

青木賞 50 周年を迎えて

代表理事 中島 悦郎

青木賞は、日本時計学会の創立に尽力された、初代会長である青木保博士のご遺族より贈られた寄付金を基に 1966 年に創設されたもので、今年で創設より 50 周年を迎えました。日本時計学会では、故・青木保博士（東京大学名誉教授）の研究業績を記念し、日本時計学会誌上に発表された優れた論文に対し、青木賞を贈り、これを表彰しております。

青木元会長の略歴と青木賞創設の経緯については、青木賞 20 周年に当たる 1986 年日本時計学会誌 No.119 に当時の神保会長により詳細にわたり記載されておりますが概要は以下の通りです。



Fig.1 青木賞副賞のメダル

1908 年（明治 41 年）東京帝国大学卒業
1943 年（昭和 18 年）造兵学科教授退官
1948 年（昭和 23 年）日本時計学会創立
1965 年（昭和 40 年）日本時計学会会長辞任
1966 年（昭和 41 年）青木賞創設
1967 年（昭和 42 年）第 1 回青木賞
1986 年（昭和 61 年）青木賞 20 周年
2016 年（平成 28 年）青木賞 50 周年

Fig.1 は受賞論文の筆頭者に送られる副賞のメダルです。直径 58 ミリ、重さが 106 グラム、基材が銅で銀古美という表面処理を施しているのは過去から変わっておりません。

これまでの受賞論文名と著者については日本時計学会ホームページのトップ>各種活動>青木賞 (<http://hij-n.com/activity/aoki.html>) に掲載されておりますが、論文の著者の所属は大別して企業がおよそ 7 割で大学などの教育機関が 3 割という比率です。また 2012 年に行われた青木賞規定の改訂により、選考対象論文を学会誌に掲載された過去 2 年度分の論文に広げるなどの改善を図っております。最新の青木賞の規定についてはホームページの会員専用ページを参照ください。 (<http://hij-n.com/memberpage/>)

会員の皆様には毎年多くの優秀な論文を投稿いただいておりますが、名誉ある青木賞を受賞できるのは原則として年に 1 論文のみです。これからさらなる 50 年へと青木賞表彰が続くことで歴史を刻み、時計及びその周辺技術の発展に大いに寄与することを祈念しております。

技術報告

低周波振動切削技術「LFV*」の開発

北風絢子**, 野口賢次**, 村松正博**, 加藤聖子**

三宮一彦***, 中谷尊一***

**シチズンホールディングス株式会社, 東京都西東京市田無町 6-1-12, 〒188-8511

***シチズンマシナリー株式会社, 長野県北佐久郡御代田町御代田 4107-6, 〒389-0206

(2016 年 10 月 7 日受付, 2016 年 11 月 16 日再受付, 2016 年 11 月 21 日採録)

Development of Low Frequency Vibration-Cutting

Ayako KITAKAZE**, Kenji NOGUCHI**, Masahiro MURAMATSU**, Seiko KATO**

Kazuhiko SANNOMIYA***, Takaichi NAKAYA***

** Citizen Holdings Co., Ltd., 6-1-12, Tanashi-chou, Nishitokyo-shi, Tokyo 188-8511, Japan

***Citizen Machinery Co., Ltd., 4107-6, Miyota, Miyota-machi, Kitasaku-gun, Nagano 389-0206, Japan

(Received December 7, 2016, Revised November 16, 2016, Accepted November 21, 2016)

ABSTRACT

Low Frequency Vibration-Cutting (LFV) is a new machining technology developed to improve the turning process. Vibration applied to the feed drive in the feed direction can be synchronized with the rotation spindle. This technology has the significant feature of discharging the chips intermittently, because it has “air-cutting” times during cutting.

1. はじめに

旋削加工は、自動車部品などをはじめとする数多くの部品加工に用いられている加工法である。その旋削加工において、頻繁に問題となることの一つに、切りくずによるトラブルがある。旋削加工では、工具が常に材料に押し付けられた状態で加工が行われるため、連続した長い切りくずが発生しやすい。この長く連続した切りくずは、加工した製品に傷をつける、工具や工作機械に絡みついて生産を中断させる、といった問題を引き起こす。

この問題への対処法の一つとして、工具と材料間に工具送り方向の振動を加えながら加工することで断続切削を行い、切りくずを分断する方法が公知である。しかし、従来の方法では、振動を与えるために別の装置を取り付けていたため、加工機の制御に合わせて動作させることは難しく、テーパーや円弧などの加工には対応できていなかった。

* 「LFV」はシチズン時計株式会社の登録商標です。

そこで、加工機が元々備えている送り軸を用いて工具と材料を相対的に送り方向に振動動作させ、その振動を主軸回転と同期させて加工を行う、低周波振動切削技術 (LFV: Low Frequency Vibration-Cutting)を開発した。この方法であれば、別の装置を取り付ける必要はなく、テーパや円弧といった形状にも対応できる。

2. 低周波振動切削技術 (LFV) について

Fig. 1 は本方法の実施例を示す概略図である。材料は加工機の主軸にチャックされており、工具は刃物台に固定されている。主軸はZ軸方向、刃物台はX軸方向にそれぞれ送り軸をもっており、材料と工具の位置を相対移動させて加工を行う。LFV では、送り軸であるX軸Z軸がそれぞれの軸方向に主軸の回転と同期した振動動作を行うことができる。

Fig. 2 は、材料を回転させながら工具を材料の軸方向に相対移動させて加工を行う場合の、材料に対する工具の軌跡を示している。横軸が主軸 1 回転分の回転角度を示し、縦軸が材料の軸方向位置を示している。この図では主軸 1 回転に対して材料軸方向に 1.5 回の振動を行っている。点線が 1 周目、一点鎖線が 2 周目、実線が 3 周目の工具軌跡である。また、細い実線は 1, 2 周目の一周あたりの送りを示す。2 周目ですでに切削した部分を 3 周目の工具が通過する区間が、工具が空振りする区間となる。工具は図中”Chip”で示した範囲を切りくずとして削り取る区間と、材料から離れて空振りする区間を繰り返して加工を行う。この空振り区間を設けることにより、切りくずを分断する。

加工を終える最後の周まで振動しながら加工を行ってしまうと、目的とする位置を超えて切削する部分ができしまい、さらに加工面には振動動作による起伏が残ってしまう。このため、最後の周の数周前から、振動振幅を徐々に減衰させ、最後の周は慣用切削で加工を終える制御方法を用いている。

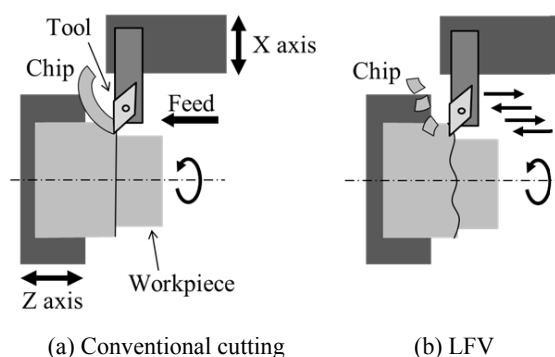


Fig. 1 Diagrammatic illustration of LFV.

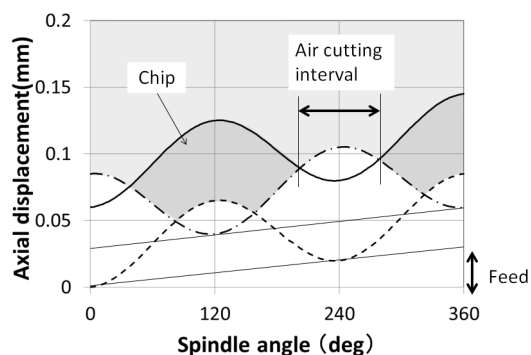


Fig. 2 Trajectory of tool in LFV.

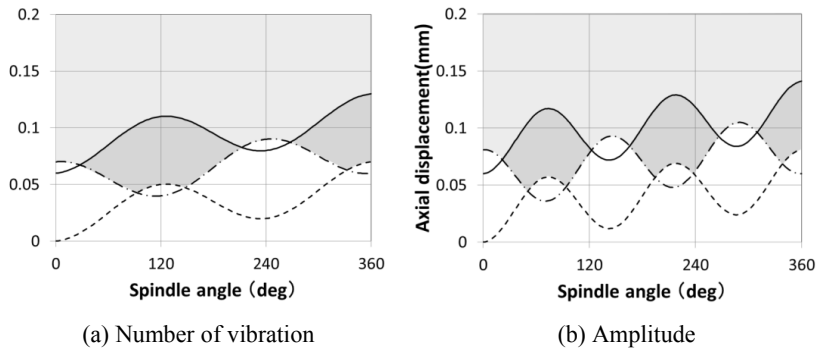


Fig. 3 Change of condition of vibration.

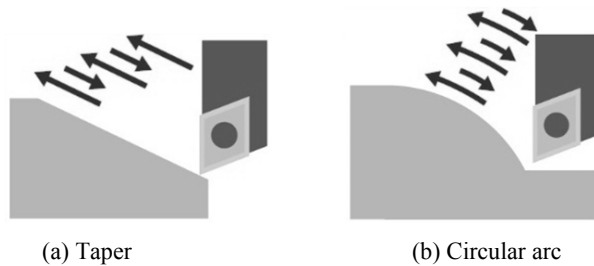


Fig. 4 Example of vibration direction by LFV.

また、振動する工具の送り速度は随時変化するが、平均した送り速度は慣用切削時の送り速度と同じ送り速度としている。そのため、慣用切削時と同じ時間で加工を終えることができる。

振動の回数は、Fig. 3(a)に示すように 2.5 回、あるいは 0.5 回などに変えることもできる。LFV では、主軸回転と送り軸による振動を同期させて加工を行うため、このような振動条件の変更が容易である。求める切りくず長さなどから適切な回数を選択する。

Fig. 3(b) に示すように波形の振幅も変更可能である。材料の性質などから適切な振幅を選択する。この時、1 回転あたりの振動回数を整数+0.5 にしておくと、ある周で工具が最も前進して切削した位置と、その次の周で工具が最も後退する位置が重なる。この条件にしておくことで、振動振幅が変わっても工具の空振り区間を維持しやすくなる。

また、今回開発した方法では、2 軸をそれぞれ同期制御している。そのため、Fig. 4 に示すようなテーパ部や、送り方向が変化する円弧部の加工であっても、常に送りと同じ方向に振動させることができ、形状を損なうことなく切りくずの分断が可能である。

3. 切りくず分断の効果

Fig. 5 に外径切削における慣用切削と低周波振動切削の切りくずの比較写真を示す。写真は SUS304 の切りくずであるが、銅や、Ni 基合金（インコネル、ハステロイ）といった切りくずが



(a) Conventional cutting



(b) LFV

Fig. 5 Chips produced by conventional cutting and LFV.

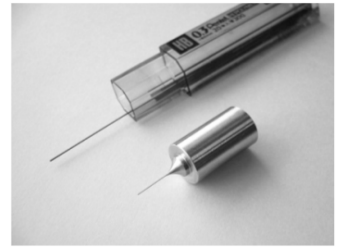


Fig. 6 Machined thin axes by LFV.

つながりやすい材料においても切りくずの分断が可能である。また、振動の回数を変えることで、切りくず長さが理論通りに変えられることも確認している。

Fig. 6 に示すような微細軸の加工も行った。写真は $\phi 0.2$ mm、長さ約 10 mm の微細軸である。切りくずの絡みや巻き込みなどが起こらないため、折れることなく加工ができる。

外径切削を中心に述べてきたが、ドリル加工においても効果を発揮できる。ドリル加工では、連続した切りくずが穴の内部で詰まることによってドリルの折損が起こる。これを防ぐため、一定量加工するごとにドリルを後退させるなどして切りくずを分断する、「ステップ加工」が一般的である。しかし、ステップのたびに一時的に加工が止まるため、加工時間が長くなる。LFV を用いれば、ステップをすること無しに切りくずを分断でき、加工時間を長くすることはしない。また、ドリル加工では特に高圧クーラントとの併用が効果的である。バラバラになった切りくずは高圧クーラントでスムーズに外部に排出される。これにより、切りくずによる穴内壁の傷も軽減できる。ドリル折損が起こりやすい $\phi 1$ mm 以下の細穴加工では、上記の効果が一層発揮できると考えている。

4. 工作機械としての展開

以上、開発した低周波振動切削技術について述べてきた。シチズンマシナリー株式会社では、これらの技術を搭載した低周波振動切削機 VC03 を発売している (Fig. 7)。シンプルな 2 軸の旋盤で、高精度加工機としての性能に加え、低周波振動切削機能による切りくずの分断が可能である。また、詳細は省略するが、低周波振動切削を行う操作は至って簡単である。プログラム中の振動させたい送り指令部



Fig. 7 Appearance of “VC03”.

分を挟み込むように、開始と終了を意味する専用のGコードを挿入すればよい。振動の条件は引数で指令できる。これまでの機械とあまり変わらない感覚で操作できる機械となっている。

同社では、この VC03 の他にも、主軸台移動型自動旋盤の L シリーズや 3 台の単軸旋盤を 1 台に集約したマルチステーションマシニングセルの MC20 シリーズにも低周波振動切削機能の搭載を予定しており、より多機能な複合旋盤への展開に取り組んでいる。

5. 最後に

本稿で紹介できなかったことも含めて、低周波振動切削に期待できる効果を述べる。

- ①切りくずを確実に切断することができる。
- ②切削抵抗が減少する。（平均切削抵抗）
- ③切削点の温度が上昇しにくい。（平均温度）
- ④構成刃先が付着しにくい。

上記の効果や、様々な加工方法で効果が発揮できる点を活かし、自動車部品や時計部品などの幅広い加工に応用していきたいと考えている。

参考文献

- 1)中谷尊一： 低周波振動切削技術「LFV」の原理と適用, 機械と工具, 4 巻, 10 号, pp. 70-75 (2014).
- 2)徳武信一郎： 高精度を具現化する最新加工技術, 機械技術, 64 巻, 8 号, pp. 36-39 (2016).

技術報告

高温圧電材料の機械的強度の検証

木下嘉将, 早田智史, 野々垣陽一, 赤羽隆志

シチズンホールディングス株式会社, 東京都西東京市田無町 6-1-12, 〒188-8511

(2016 年 10 月 7 日受付, 2016 年 11 月 21 日再受付, 2016 年 11 月 24 日採録)

Verification of the Mechanical Strength of the High-Temperature Piezoelectric Materials

Yoshitaka KINOSHITA, Satoshi SOUDA, Youichi NONOGAKI, and Takashi AKAHANE

R&D Department, Citizen Holdings Co., Ltd., 6-1-12, Tanashi-cho, Nishitokyo-shi, Tokyo 188-8511, Japan

(Received October 7, 2016, Revised November 21, 2016, Accepted November 24, 2016)

ABSTRACT

Using a piezoelectric single crystal having a piezoelectric performance to high temperature, it has been developed combustion pressure sensor for measuring the combustion pressure of the internal combustion engine directly. In this paper, the measurement of the compressive strength of $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ (CAS), one of the piezoelectric single crystal of a candidates for the combustion pressure sensor, and we confirmed the compressive strength improvement by element substitution of Ca to Sr, $\text{SrCaAl}_2\text{SiO}_7$ (SrCAS).

1. はじめに

日本の自動車産業はエンジンをはじめとする主要部品の技術革新を進め、燃費性能において世界をリードしてきた。近年、環境配慮の観点から、更なる燃費向上および低排ガス化がますます要求されるようになっている。この要求を満たすため、高温まで圧電性能を有する圧電材料を用いて、内燃機関の燃焼圧力を直接測定するための燃焼圧センサが開発されている。これらの燃焼圧センサをエンジン内に組み込めば、燃焼状況を直接モニタリングしてエンジン制御にフィードバックすることで、燃焼状態を常に最適に維持することができる。さらに、コストを抑えた燃焼圧センサが実現すれば、市販車のエンジンの各気筒の燃焼室すべてに燃焼圧センサを設置でき、排ガス規制や燃費向上に



Fig.1 Combustion pressure sensors.

大きく貢献することができる。

燃焼圧センサの方式としては単結晶の圧電素子を用いた方式¹⁾，シリコンのピエゾ抵抗効果による電気抵抗の変化を捉え圧力を検知する方式²⁾，圧電薄膜を積層した方式³⁾などが報告されている。我々が開発している燃焼圧センサは，ブロック状の圧電単結晶にダイヤフラムを介して燃焼時の圧力が伝達されることで発生する電荷を検出し，燃焼圧を検出する方式を採用している⁴⁾。Fig. 1 に燃焼圧センサの外観写真を示す。この燃焼圧センサには機械的な動きを必要とする小型精密部品が内蔵されており，時計の部品製造で培った小型精密部品の製造技術が活かされている。燃焼圧センサに内蔵されている圧電単結晶に要求される性能を以下にあげる。

- (1) 高温の燃焼にさらされるため高温で圧電性を保持すること
- (2) 発生した電荷の損失がないように高温で高抵抗を維持すること
- (3) 繰り返しの衝撃が加わるため機械的強度が高いこと

これらの特性を満たす高温圧電単結晶材料の候補として耐熱温度に違いはあるが，水晶¹⁾，ランガサイト系単結晶⁵⁾，ランガタイト系単結晶⁶⁾，リン酸ガリウム⁷⁾等が検討されている。

一方，近年 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ (CAS) が燃焼圧センサに有望な高温圧電材料であることが報告された⁸⁾。CAS 単結晶をセンサチップとして使用できれば，レアアース，レアメタルを含まず，ありふれた元素で構成されているため原料調達が容易であり，コストメリットのある材料となりうる。しかしながら，CAS 単結晶は(001)面に劈開を有することが知られており，(3)に挙げた圧縮破壊強度は燃焼圧センサを構成するにあたり設計上，把握すべき重要なパラメータになる。今回，CAS 単結晶の機械的強度の把握とさらに，CAS 単結晶の Ca サイトを Sr に元素置換した単結晶の機械的強度への効果について検証を行った。

2. 試料の作成

CAS 単結晶は，チョクラルスキー(Cz)法によって Ir ルツボを用いた高周波加熱炉にて，Ar 雰囲気下において，1 mm/h の引上げ速度にて直胴直径 1 インチ ϕ ，直胴長さ 40 mm の単結晶を作成した。Fig. 2 に CAS 単結晶の外観を示す。引上げ方向は $\langle 110 \rangle$ 方向でクラックおよびインクルージョンのない綺麗な結晶が引きあがった。単結晶インゴットの形状としては(001)面に平行なファセット面が形成されやすく（紙面に平行な面），大きな 2 面のファセットが観察された。

CAS 単結晶は正方晶に属し， $\bar{4}2m$ の対称性であり，対称性から圧電テンソルの形状が決まり，



Fig.2 A 1inch ϕ CAS single crystal by Czochralski method.

式(1)に示すように 0 ではない独立な圧電定数はシェアモードの d_{14} , d_{36} のみとなる⁹⁾．この 2 つの圧電定数を求めるため，CAS 単結晶から $0.5\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ の長辺振動子を作成した． $2\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ の面には表裏にスパッタ法にて電極を形成した．

$$\{d_{i,J}\} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{36} \end{bmatrix} \cdots (1)$$

$$(i = 1, 2, 3 \quad J = 1, 2, \cdots 6)$$

この CAS 単結晶切り出し角度は(XYt) 45° カットおよび(ZXt) 45° カットで行い，長辺伸び振動モードの共振反共振法⁹⁾で d 定数を求めた． d_{14} 定数および d_{36} 定数はそれぞれ， $d_{14} = 6.6\text{ pC/N}$ ， $d_{36} = 1.0\text{ pC/N}$ であった．

センサの検出子として立方体状の単結晶を切り出す際，感度の良いセンサを実現するためには，実効的な圧電定数が大きい方位で結晶を切り出す必要がある．Fig. 3 は結晶軸方位と実効的な圧電定数を圧電テンソルの回転操作から計算し，圧電定数が最大になる方位を求めたものである．Fig. 3(a)の X, Y, Z は結晶軸を表し，灰色の矢印は応力のかかる方向を示している．Fig. 3(b)は結晶を回転させた場合の実効的な圧電定数の変化を表すグラフである．

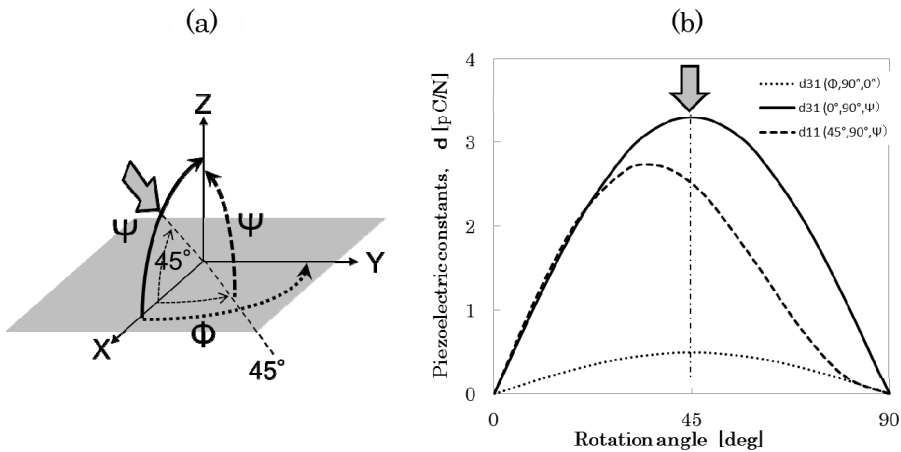


Fig.3 Effective piezoelectric constant and crystal orientation.

Fig. 3(b)のグラフの実線，破線，点線の曲線は，Fig. 3(a)の実線，破線，点線の矢印方向に回転させた場合の変化である．グラフの実線の曲線から解るように XZ 面内で X 軸を 45° 回転させた方向に応力がかかる場合において最大の実効的な圧電定数になる．Fig. 4 は圧縮試験を実施した CAS 単結晶試験片の形状，および劈開面の方位と圧縮方向を表す図である．圧電定数(センサの信号感

度)が最大になる方位は $\theta=45^\circ$ のときとなる. Fig. 4 に示すように CAS 単結晶は{001}面に劈開を有するため, 実効的な圧電定数が最大になるときに, 劈開面は圧縮方向と 45° をなす方向となる. このように圧電定数が最大となるような立方体形状を切り出して, 圧縮試験片とした. 圧縮試験片は $2.0\text{ mm}\times 2.0\text{ mm}\times 2.0\text{ mm}$ の立方体を用い, X線測定により 0.2° 以内の切り出し精度で切り出した. 圧縮力のかかる面は平坦性が重要なため CMP 研磨まで実施したものをを用いた.

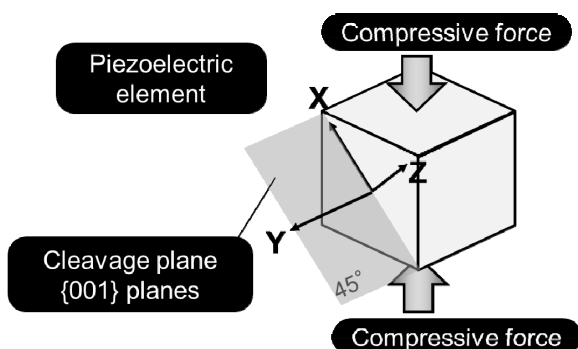


Fig.4 Crystal orientation of the compression test element.

3. 圧縮強度試験

圧縮試験は島津製作所製 AG-IS (ロードセル 50 kN) を用いて測定を行った. Fig. 5 に CAS の応力-ストローク曲線を示す. 平均 165 MPa で圧縮方向に対し 45° の劈開が発生しながら破壊が進行した. 個体差が小さく安定した曲線が得られた. 平均圧縮破壊強度は 165 MPa であるが, 高温圧電単結晶であるランガタイト系材料の圧縮破壊強度は 1000 MPa 以上であり, これらの材料と比較して低い値となった. 燃焼圧センサの測定可能な最大圧力としては 25 MPa が必要であり, 激しい繰り返し荷重と衝撃的な荷重

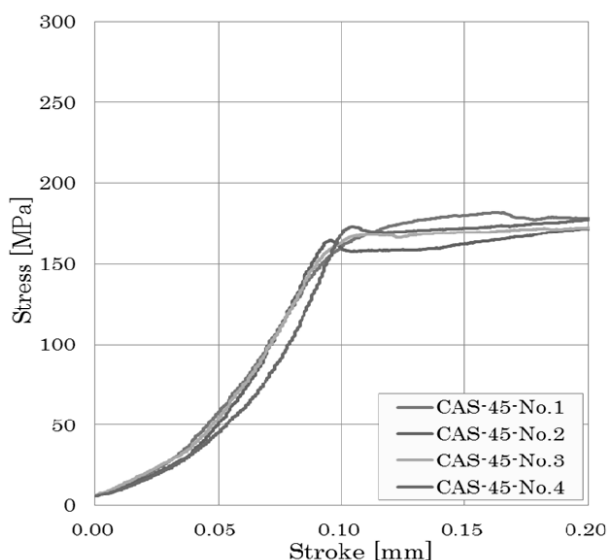


Fig.5 Stress-Stroke curves of $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$

がかかることを考慮して安全係数 10 とすると 250 MPa の圧力に耐える必要がある. CAS の安全係数は 6.6 になり, CAS をセンサ素子として使用する場合は安全係数が十分ではない可能性があ

るため、劈開の脆弱性について十分に考慮する必要がある。

4. 機械的強度の向上

CAS の機械的強度に劈開からくる脆弱性が確認されたことから、材料サイドからの機械的強度の改善ができないか検討を実施した。CAS の原子配列を結晶の X 軸からみた場合の 3 次元図を Fig.

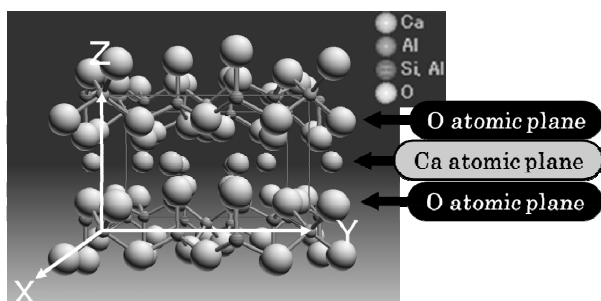


Fig.6 The atomic arrangement of CAS.

6 に示す。原子配列図からわかるようにダイヤモンドのような強固な立体網目構造ではなく、 Z 軸に垂直な面に同一元素が並んでいる黒鉛のような平面積層構造になっている。また、Ca 原子面と O 原子面の結合距離が離れており、原子構造的にこの原子面間で劈開が発生しやすいことが推測される。劈開強度に関して CAS の元素置換を検討した先行研究はなされていない。Ca の 8 配位のイオン半径は $1.12 \text{ \AA}$ ，Sr のイオン半径は $1.26 \text{ \AA}$ と 11% 程度の違いであり、15% 程度までの元素は置換できる可能性があると考えられているため、Ca 原子をイオン半径異なる原子で置換することで Ca 原子面の平面性が悪くなり、劈開の滑りに対しアンカー効果が発生することを期待して、Ca サイトを Sr で置換することで圧縮強度がどのように変化するかを調査した。CAS に対して Sr の濃度を上げていき、単結晶化するか確認したところ、75at% 以上の Sr 濃度では異相が発生し単結晶化が困難であったが、CAS の Ca サイトを 50at% 置換した $\text{SrCaAl}_2\text{SiO}_7$ (SrCAS) の単結晶育成については CAS と同一条件の Cz 法にて 1 インチ ϕ の単結晶が引きあがった。この単結晶組成については EPMA にて想定の組成になっていることを確認した。CAS 同様のカット方位で圧縮試験片を作成することが可能であった。

Fig. 7 に SrCAS の応力-ストローク曲線を示す。個体差が小さく安定した曲線が得られた。平均破壊強度は 210 MPa 以上を示しており、CAS と比較して明

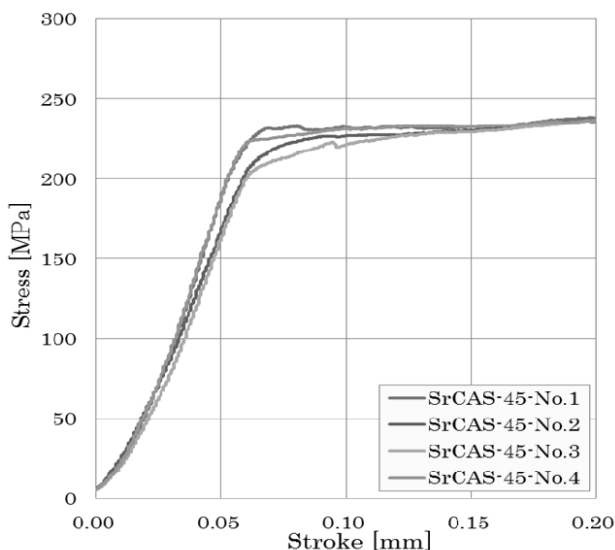


Fig.7 Stress-Stroke curves of $\text{SrCaAl}_2\text{SiO}_7$

瞭な破壊強度の向上が確認できた。また、CAS 同様に圧縮方向と 45° の方向の劈開方向にクラックが進行する形で破壊が進行した。安全係数としては 8.4 まで向上した。破壊強度が向上した理由は推測の域を出ないが、CAS 単結晶は Ca 原子面と O 原子面が平面構造を有しており、イオン半径の大きな Sr を Ca 平面に部分的に置換することによって Ca 平面は Sr が形成する厚い面と Ca が形成する薄い面で構成されるようになる。原子面に凹凸ができることによって劈開の滑りが抑制され、破壊強度を強くする方向に働いたと推測される。

5. まとめ

高温圧電材料として注目されている $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ 単結晶育成と圧縮強度評価を実施した。また CAS の圧縮破壊強度の改善を目指して、CAS 単結晶の Ca サイトを Sr に置換した $\text{SrCaAl}_2\text{SiO}_7$ の単結晶育成を行い、圧縮強度評価を実施した。SrCAS 単結晶は圧縮破壊強度において CAS 単結晶と比較して 1.3 倍程度の圧縮強度であることを実証した。SrCAS はセンサ素子の耐機械的強度において燃焼圧センサの有望な単結晶圧電材料の候補の一つであることを確認した。

参考文献

- 1) Piezoelectric gauge, US patent, US3171989A (1965).
- 2) M. Takeuchi, K. Tsukada, Y. Nonomura, Y. Omura and Y. Chujou.: A combustion pressure sensor utilizing silicon piezoresistive effect, *SAE Technical Paper*, 930351 (1993).
- 3) 大石康宣, 野間弘昭, 岸和司, 上野直広, 秋山守人, 蒲原敏浩: シリコン基板上に作製した配向性 AlN 薄膜の圧力応答性, *J. Ceram. Soc. Jpn.*, Vol. 113, pp. 700-702 (2005).
- 4) 圧力センサ, 特許公報, 特許第 5006695 号 (2007).
- 5) H. Fritze and H. L. Tuller: Languisite for high-temperature bulk acoustic wave applications, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 78, 976 (2001)
- 6) R. Yaokawa, S. Uda, H. Kimura and K. Aota: Electrical conduction mechanism in nonstoichiometric $\text{La}_3\text{Ta}_{0.5}\text{Ga}_{5.5}\text{O}_{14}$, *J. Appl. Phys.*, Vol. 108, 064112 (2010)
- 7) P. Kreml, G. Schleinzner and W. Wallnöfer: Gallium phosphate, GaPO_4 : a new piezoelectric crystal material for high-temperature sensorics, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 61, pp. 361-363 (1997).
- 8) H. Takeda, M. Hagiwara, H. Noguchi, T. Hoshina, T. Takahashi, N. Kodama and T. Tsurumi: Calcium aluminate silicate $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ single crystal applicable to piezoelectric sensors at high temperature, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 102, 242907 (2013).
- 9) 池田拓郎: 圧電材料学の基礎, オーム社 (1990).

電気機器製品開発における電磁界C A Eの最新技術動向

講師 たに 浩司 氏 (工学博士)

株式会社J S O L エンジニアリングビジネス事業部電磁場技術グループ R & Dチーム

参加者 14名 (正会員 9名, 非会員 5名)

個人会員	1名 (正会員)
日本時計協会	1名 (正会員)
シチズン時計株式会社	2名 (正会員 1名, 非会員 1名)
セイコーインスツル株式会社	4名 (正会員 2名, 非会員 2名)
セイコーエプソン株式会社	1名 (正会員)
リズム時計工業株式会社	1名 (正会員)
セイコークロック株式会社	4名 (正会員 2名, 非会員 2名)

司会 馬場 康治 セイコークロック株式会社 技術部

※2016年4月21日 中央大学 後樂園キャンパス新2号館7階2735号室にて開催

第1部 講演

1. はじめに

現在、電気電子機器の設計開発において電磁界シミュレーションは有用な技術として認知され多くのメーカーで実施されている。それら電磁界シミュレーションの多くは、ソフトウェアメーカーが提供するパッケージソフト上で行われている。パッケージソフトには定期的なバージョンアップを通じて最新の機能がその利用ノウハウと共に搭載され、それを利用することで利用者は等しく最新のシミュレーション技術を享受でき製品の研究開発に注力できる。弊社の開発する JMAG⁽¹⁾ もその1つであり、多くのユーザーに利用いただいている。そこで本稿では、電気機器製品開発のための電磁界 CAE の最新技術動向を JMAG の機能に見ることで俯瞰する。

2. 電気機器製品開発のためのパッケージソフト

製品開発において電磁界 CAE に要求される事は、詳細なシミュレーションが高速に出来ること、パラメータスタディ等の定型化されたシミュレーションが簡便に行えること、電磁界 CAE を様々なツールと組み合わせて使用できる柔軟性を持っていること、と考える (Fig. 1)。この様な要求に応えるため、JMAG は高速高精度ソルバ、自動メッシュ生成機能、形状作成ツール、使いやすい GUI (グラフィカル・ユーザー・インターフェース)、外部インターフェースをコア技術として開発を続けている。有限要素法をベースにした磁界解析ソルバはマルチコアやクラスタ環境にも対応し、並列処理により大規模高速計算が可能である。メッシュ生成については独自の技術開発を進めており、計算精度と計算効率を保証するような自動メッシュ生成が可能である。解析の対象となるモデル形状は CAD ライクな形状作成ツールで作成できる。また、テンプレート機能を備えており、複雑なコイルエンド形状等もパラメータを入力することで簡便に作成できる。計算のための各種条件は GUI 上でドラッグ&ドロップで設定でき、磁化特性などの材料特性は内蔵のデータベースより材料メーカーの材料名を選択することで定義できる。現在の電磁界 CAE では、当然のように構造、振動、熱、などとの複合現象をシミュレーションすることが要求され、構造解析ソルバ、熱解析ソルバなども内蔵し、マルチフィジックスにも対応する。製品設計においては形状寸法を振ったパラメータスタディをすることが多く、パラメトリック解析による多ケースの分散処理も可能である。さらに内蔵している最適化エンジンと組み合わせることで形状最適化も可能になっている。また、VB Script, Python などの汎用的なスクリプト言語を用いることで、自動化システムを構築することも可能である。JMAG の解析結果を専用のインターフェースを通して出力することで、その結果をユーザーにとって最適なサードパーティツールやインハウスシステムに取り込むことも可能となっている。

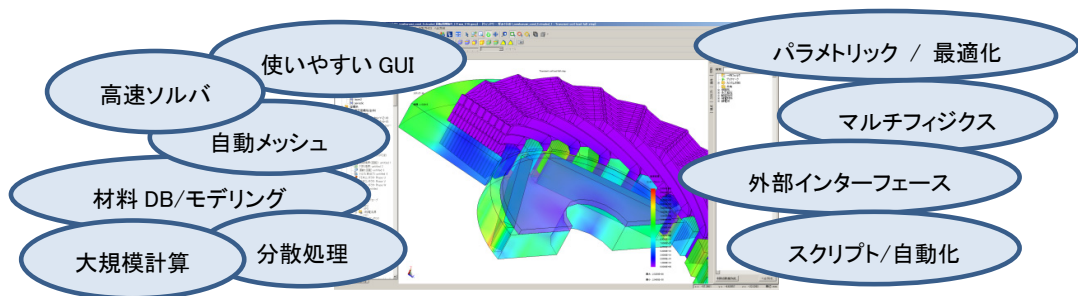


Fig. 1 電気機器製品開発のためのパッケージソフトウェアに求められる事

3. 電磁界 CAE の最新技術動

3.1 モータの損失計算高精度化

モータで消費される電力は日本国内の全消費電力の 50%以上を占めるとされており、モータの高効率化のための損失低減は重要な設計課題となっている。その為、メーカー各社では古くから電磁界 CAE を利用してモータの損失評価を行ってきた。損失は大きく鉄損、銅損、漂遊負荷損に分類されるが、このうち鉄損は磁気回路を構成するコア内で発生する。また、鉄損は主に磁気ヒステリシスによって発生するヒステリシス損、及び渦電流による渦電流損からなる。多くの場合、モータのコアは電磁鋼板を何層も積み重ねた積層構造をしており、その複雑さ故、数値解析上のモデリング方法に技術を要する。

これまで鉄損は、過渡応答磁界解析の結果の後処理としてスタインメッツの経験則と呼ばれる経験式を用いて計算していた⁽²⁾。その処理イメージを Fig. 2 に示す。この方法では、ヒステリシス損失は磁界解析の磁束密度履歴の振幅から計算し、渦電流損失は磁束密度履歴をフーリエ展開し周波数次数毎に計算する。この際必要となるヒステリシス損失係数及び渦電流損失係数は測定値である鉄損特性を用いて導出されるのであるが、この鉄損特性は JIS で測定方法が規格化されており材料メーカーより提供されているため入手が容易である。このためこの方法は鉄損を簡便に評価する方法として多くのユーザーに認知され使用されてきた。しかしながらこの方法は交流を仮定した方法であるため、磁界の動作点が正領域（あるいは負領域）に偏る場合、測定値との乖離が大きくなる。また、鉄損特性の測定範囲が 10kHz 程度に制限されることが多く、それを超える高いキャリア周波数を含むインバータ制御下では高周波数域での鉄損特性を何らかの方法で類推することが必要となり、問題を多く含む方法であった。

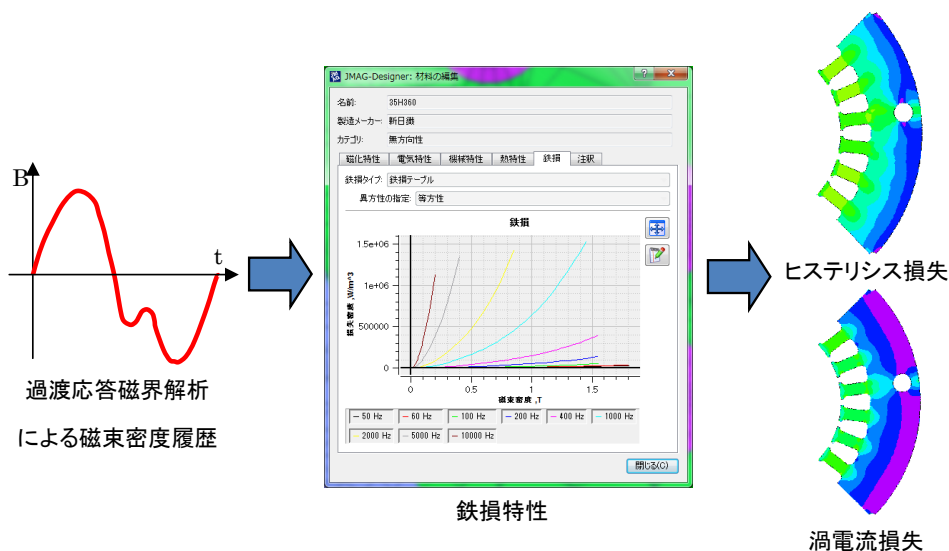


Fig. 2 スタインメッツの経験則を基にした鉄損計算

昨今の研究でこれに代わる新しい方法として、ヒステリシス現象を第1原理に即した方法で表現できる等方性ベクトルプレイモデルが⁽³⁾、積層鋼板中の渦電流を厚み方向の仮想メッシュを用いて求める方法が⁽⁴⁾、それぞれ実用化された。等方性ベクトルプレイモデルでは、材料特性を定義するデータとして初磁化曲線に代わり振幅の異なるメジャーループ群 (Fig. 3) を入力とする。プレイモデルは任意のマイナーループを表現する磁化モデルであり、ヒステロンと形状関数によって構成される。モデルの同定は入力されたメジャーループ群を用いて行われ、磁束密度 B が入力されれば、過去の履歴に基づいて磁界 H を決定する (Fig. 4)。さらにヒステリシス損失は B , H の動作履歴により描かれたマイナーループの面積として算出される。この計算方法を過渡応答磁界解析の中で利用すれば、過渡応答解析の中にヒステリシス損失による効果をフィードバックさせることができ、エネルギー収支の矛盾も解消される。もちろん簡便に過渡応答磁界解析の後処理として利用することも可能である。なお、プレイモデルの詳細については URL (5) に詳しく記載されているので参照されたい。

一方、渦電流を精度良く計算するには表皮効果を考慮したメッシュを用いて渦電流解析を行えば良い。しかしながら電磁鋼板を何枚も積層したモータコアを表皮厚さを考慮しメッシュ分割すれば膨大な要素数となり現実的な方法とは言い難い。そこでこれを代用する方法として、鋼板板厚方向に仮想的なメッシュを作成し、厚み方向への1次元有限要素解析により表皮効果を考慮した渦電流計算を行う方法が開発された (以下 1D FEA)⁽⁴⁾。本方法では、電磁鋼板の導電率 σ 、板厚 d 及びその板厚方向の分割数 N はユーザーが与え、二次元解析で得られた磁束密度を境界条件として各要素にて1次元過渡応答解析を行い渦電流分布を求める (Fig. 5)。本手法も過渡応答磁界解析の中に組み込みことで、

鋼板内部に発生する渦電流損失を出力にフィードバックさせることが可能である．もちろん簡便に過渡応答磁界解析の後処理として利用することも可能である．

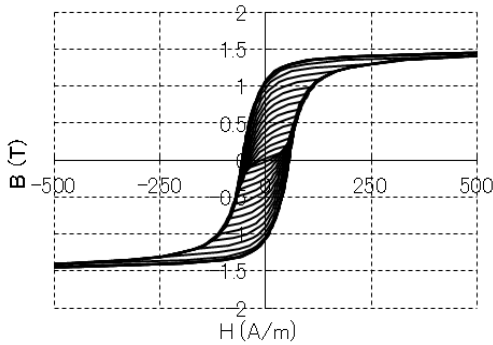


Fig. 3 振幅の異なるメジャーロープ群

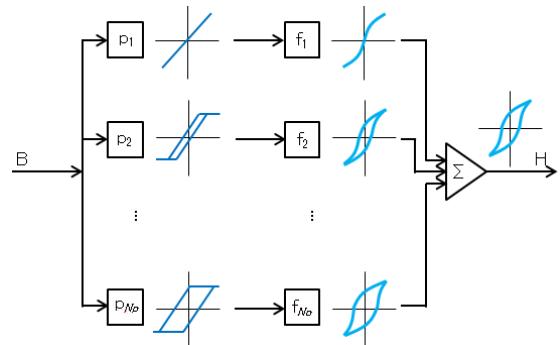


Fig. 4 プレイモデル

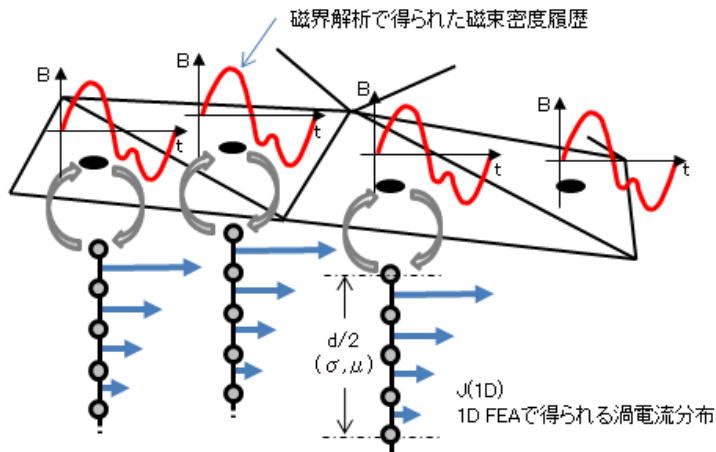


Fig. 5 厚み方向への1次元有限要素磁界解析 (1D FEA)

本手法の適用事例としてスイッチトリラクタンスモータ（以下，SRモータ）の損失解析を示す⁽⁶⁾．計算は形状対称性を考慮して1/4領域でモデル化し2次元過渡応答磁界解析を行った．Fig. 6にSRモータの断面形状と共に，メッシュ分割図，磁束密度コンタ図，磁束線図を重ねて示す．また，Fig. 7にロータ突極先端部での磁束密度履歴を示す．これを見ると，磁束密度波形は典型的な直流偏磁状態となっており，交流を前提としたスタインメッツの経験則（従来法）では鉄損の評価が困難であることが予想できる．Fig. 8に3000回転における鉄損計算結果を示す．図中，Measuredは実測，Conventionalは従来法，Newはプレイモデルと1D FEAを組み合わせた方法（新手法）での結果を示している．従来

法及び新手法の結果は、それぞれヒステリシス損失、渦電流損失の寄与がわかるよう示している。これら結果より、新手法は従来法に比べ、ヒステリシス損、渦電流損ともに増加し、実測結果とよく一致していることがわかる。Fig. 9 に固定子突極先端の回転方向後方での磁界、磁束密度の履歴を示す。新手法では磁束密度負域での偏磁によるマイナーループを良く再現していることがわかる。従来法では交番磁束を仮定して測定された鉄損特性を用いているため、原点まわりでのマイナーループとしか成りえず、ヒステリシス損失を過小評価したと考えられる。Fig. 10 に電磁鋼板内での渦電流密度分布を示す。横軸は鋼板表面からの厚さ方向への距離を表している。従来法では偏磁による透磁率分布を考慮することができず、結果として渦電流密度をも過小評価していることがわかる。これらの詳細な考察については文献 (6) を参照されたい。

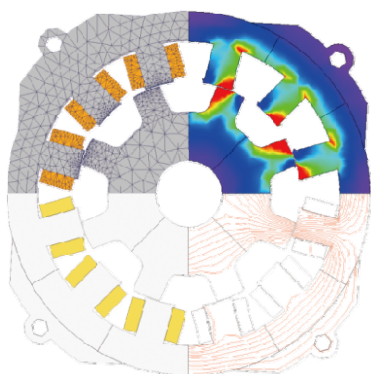


Fig. 6 SR モータの断面形状，メッシュ分割図，
磁束密度コンタ図，磁束線図

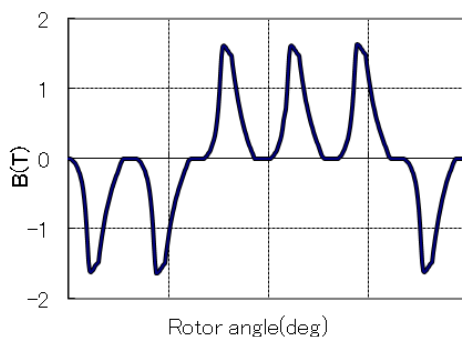


Fig. 7 固定子突極先端部での磁束密度履歴

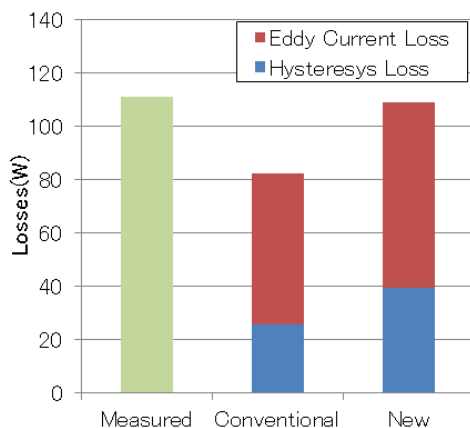


Fig. 8 鉄損値の比較

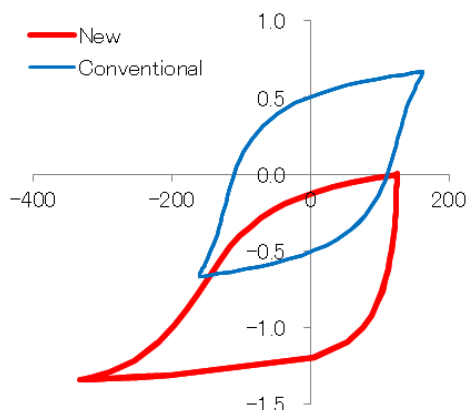


Fig.9 磁界，磁束密度の履歴

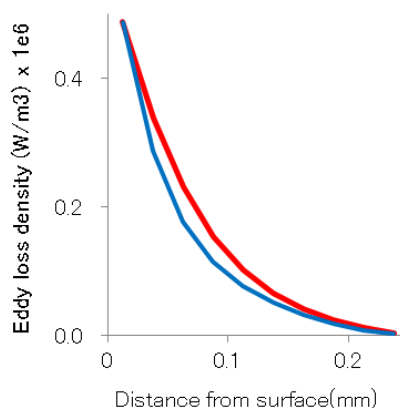


Fig.10 電磁鋼板内での渦電流密度分布

これまで，鉄損の主な要因としてヒステリシス損，渦電流損について述べてきたが，実はもう1つ異常渦電流損も考える必要がある．異常渦電流損の発生原理は磁壁の移動あるいは粒子内の渦電流が原因とされ，幾つかの研究成果が示されているが，未だ実用レベルには至っていない⁽⁷⁾．また，鉄損は電磁鋼板の打抜による加工歪による影響を受けることが知られており，そのモデリング手法も検討されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾．

3.2 クラスタ機を利用した大規模高速計算

損失を詳細に分析するためには，漂遊負荷損を高精度に評価することも重要である．漂遊負荷損とはモータのケースやプレスリング，大型変圧器のタンクなど，主磁気回路ではない部分に発生する渦電流損失の一種である．つまり，漂遊負荷損を高精度に解析するためには計算対象とすべき領域が増え，さらに表皮効果を考慮した詳細なメッシュ分割が必要となるため必然的に解析メッシュが肥大化することになる．従って，大規模メッシュを高速に出来ることが磁界解析ソルバに要求される．弊社では高速な電磁界解析実現のため，並列処理に関する技術開発を2005年頃より実施しており，スレッド並列処理やプロセス並列処理を行うことで高速化を実現してきた⁽¹⁰⁾．しかしながらこれらの並列処理は，要素係数マトリクスのアセンブル部と，解くべき大規模連立一次方程式の求解部に以外に適用することが困難であり，並列数が大きくなってもそれに見合う速度を発揮できないという課題があった．現在はこの課題を克服する方法として有限要素メッシュをパートと呼ばれる複数のグループに分割し，プロセス毎に各パートの処理を担当させるという方法を用いている⁽¹¹⁾．これにより，各プロセスはパート内要素での係数マトリクスのアセンブルやICCG法による連立一次方程式の求解に加えて，その後の物理量の算出なども並列処理することが可能となった．その結果，現在では100を超える並列度まで速度向上を達成している．

適用事例として、IPM モータの渦電流解析を取り上げる。Fig. 11 に計算に使用したメッシュ分割図を示す。渦電流を考慮するため、平角線コイル、プレスリング、および磁石には表皮厚さを考慮してメッシュ生成しており、総要素数は 128 万である。定常状態に至らせるために 145 ステップの計算を行った。Fig. 12 に計算結果として各部の（渦）電流密度分布図を磁束線と共に示す。平角線コイルでの電流密度分布の偏りが確認できる。計算時間は 128 並列で 20.5 時間であった。計算機環境としては最大 16 ノードの Linux クラスタシステムを用いた。ノードごとに Intel Xeon E5-2670 CPU を 2 つ、並びに 32[GB] のメモリを有する。ノード間ネットワークとして Infiniband(QDR) を使用し、プロセス間通信には Intel MPI ライブラリ 5.0 を用いた。今後の解析対象の複雑化・詳細化に伴い、扱うべきメッシュ規模は数千万要素にも達すると言われており、更なる大規模高速計算に対する技術革新が望まれている。

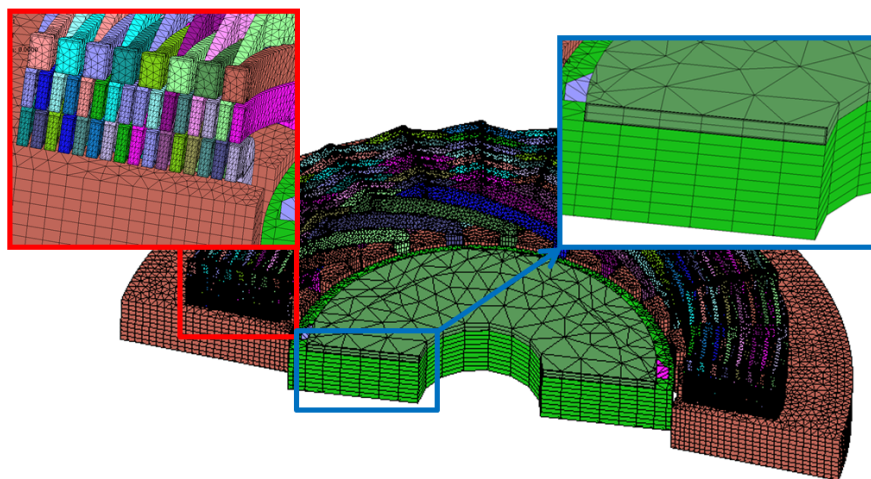


Fig. 11 メッシュ分割図

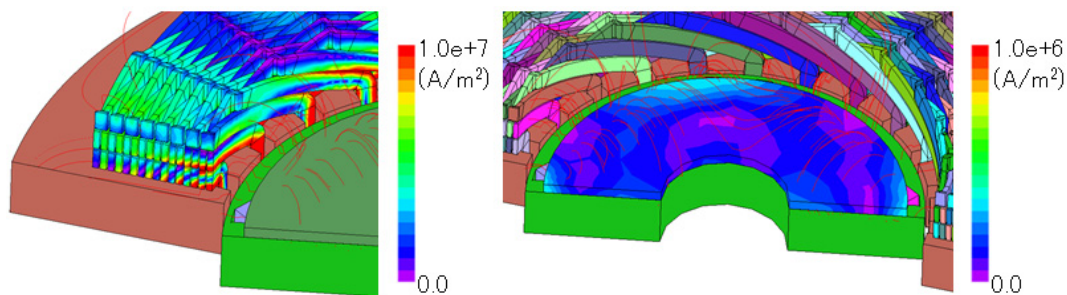


Fig. 12 各部での渦電流密度分布図（左：コイル、右：プレスリング）

3.3 モータ制御シミュレーションとの連携

モータの制御設計とモータ設計は独立したプロセスとなることが多く、モータ設計は電磁界シミュレーションを用いて詳細な設計をする一方で、制御設計においてはモータモデルを L_d 値、 L_q 値等を用いた定数モデルを用いて設計を行っている。しかしながら、更なる高効率制御が求められる今日では、制御設計においてもより詳細で実機に即した挙動を示すモータモデルが求められるようになってきた。このような要求に応えるため、モータの電磁界シミュレーションより得られる計算結果を数値テーブルのパッケージにし、制御シミュレーションにてそれを新たなモータモデルとして用いる手法が開発された。Fig. 13 にそのイメージを示す。弊社ではこのモータモデルを JMAG-RT モータモデルと称している。この新たなモータモデルは、有限要素法により求められた鎖交磁束、インダクタンス、トルクをテーブルとして持っており、定数のモータモデルでは考慮できない空間高調波の影響や磁気飽和の影響をも考慮された高精度なモデルと言える。

JMAG-RT モータモデルの有効性を示すため、電流ベクトル制御によるモータ駆動時のシミュレーションを行った。モータは 4 極 24 スロットの IPM モータである。制御回路シミュレータでは、モータを駆動するための制御回路、インバータを定義し、インバータが生成した電圧をモータモデルに印加する。駆動条件は、 $i_d=0$ 制御で、モータ負荷が 1.0(Nm) 時に速度 1800(rpm) になるように制御した。結果として得られる電流波形及びトルク波形を Fig. 14 に示す。JMAG-RT モータモデルを用いることで、定数モータモデルでは見られない電流やトルクのリップルを確認でき、より詳細な計算ができていることが伺える。この JMAG-RT モータモデルは SIL (Software-In-the-Loop) シミュレーションや HIL (Hardware-In-the-Loop) シミュレーションにおいても動作し、自動車走行シミュレーション⁽¹²⁾ やモータ制御 ECU のソフトウェア検証にも適用されている⁽¹³⁾。

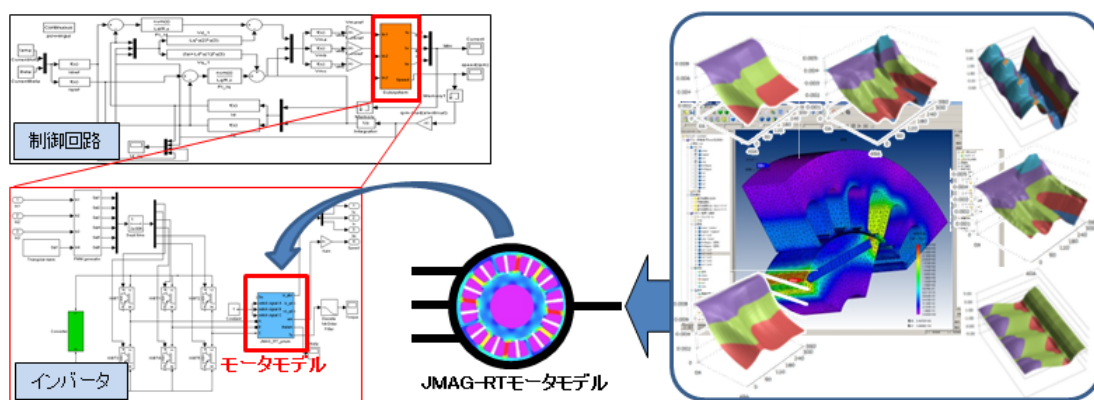


Fig. 13 JMAG-RT モータモデルを用いた高精度な制御シミュレーション

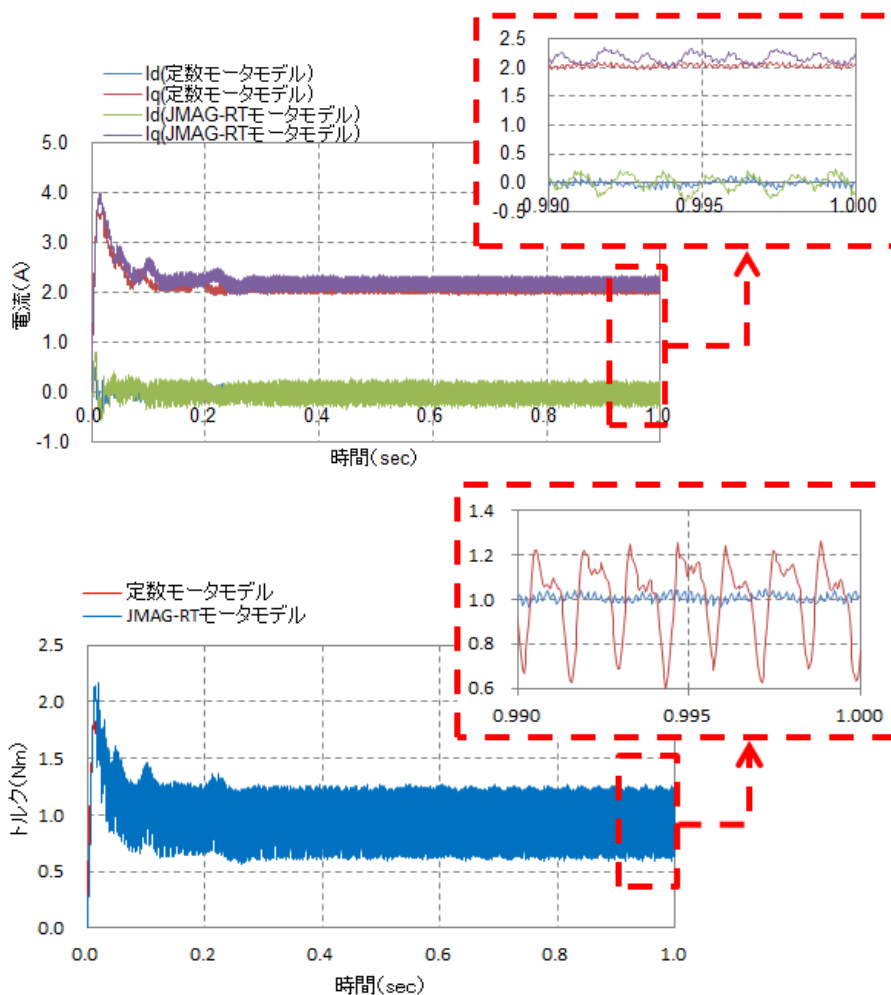


Fig. 14 JMAG-RT モータモデルを用いた電流ベクトル制御によるモータ駆動時のシミュレーション
(上：電流波形、下：トルク波形)

4. おわりに

本稿では、電気機器製品開発のための電磁界 CAE の最新技術動向として、モータの損失計算高精度化、大規模高速計算、及びモータ制御シミュレーションとの連携、について紹介した。しかしながらこれらが当たり前の技術として多くのユーザーに使って頂くには解決すべき課題がある。損失計算に関しては異常渦電流損の解明や加工歪みのモデリング手法の実用化が、大規模高速計算に関してはスケーラビリティの更なる向上に加え、大規模モデルをストレスなく扱える GUI の開発やデータ量の圧縮の技術開発が必要である。制御シミュレーション連携においては、JMAG-RT モータモデルが部門間で流通することを考えると、そのデータの秘匿化も課題の一つであると考えている。これら課題が克

服され、電磁界 CAE が設計現場で益々利用されることで、さらに優れた電気機器製品が開発される未来に期待したい。

参考文献

- 1) <http://www.jmag-international.com/jp/>, JMAG ホームページ
- 2) 山崎, 「固定子及び回転子の高調波電磁界を考慮した誘導電動機の損失算定」, 電気学会論文誌 D 123 巻 4 号, pp. 392-400 (2003)
- 3) J. Kitao, K. Hashimoto, Y. Takahashi, K. Fujiwara, Y. Ishihara, A. Ahagon and T. Matsuo, “Study on Magnetic Field Analysis Taking Account of Hysteretic Property Using Play Model”, IEEJ SA-12-16, RM-12-16, (2012)
- 4) J. Pippuri, A. Belahcen, E. Dlala, and A. Arkkio: “Inclusion of Eddy Currents in Laminations in Two-Dimensional Finite Element Analysis,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 46, No. 8, pp. 2915-2918 (2010)
- 5) http://www.jmag-international.com/jp/library/column/loss_analysis/column_ex_04_hw01.html, JMAG ホームページ「コラム：解析屋がみた損失評価 夏休み補講編 4」
- 6) K. Narita, et al., “An accurate iron loss evaluation method based on finite element analysis for switched reluctance motors”, Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015
- 7) 成田, 他: 「無方向性電磁鋼板の異常渦電流損失分離方法に関する一考察」, 電気学会静止器・回転機合同研究会資料 SA-16-59/RM-16-105 (2016)
- 8) 佐野, 他: 「加工歪の影響を考慮した材料モデリングの検討 (その 3)」, 電気学会静止器・回転機合同研究会資料 SA-16-61/RM-16-107 (2016)
- 9) 山口, 他: 「鉄心打ち抜き時の加工劣化を考慮したモータの磁界解析手法」, 電気学会論文誌 D, Vol. 135, No. 11, P1107-1115, (2015)
- 10) 仙波, 他: 「大規模電磁界解析における前処理付き並列反復解法の性能評価」, 電気学会静止器・回転機合同研究会資料 SA-09-70/RM-09-76 (2009)
- 11) 仙波, 他: 「電磁界有限要素解析における高並列処理速度の改善に関する検討」, 電気学会静止器・回転機合同研究会資料 SA-16-075/RM-16-121 (2016)
- 12) 今村, 他: 「高精度モデルを用いた自動車走行シミュレーション」, 電気学会回転機研究会資料, RM-13-110 (2013)
- 13) <https://decibel.ni.com/content/docs/DOC-37464>, “Advancing Subaru Hybrid Vehicle Testing Through Hardware-in-the-Loop Simulation”

第2部 質疑・応答

質問1：JMAG と JMAG EXPRESS の違いについて教えてほしい。

回答1：JMAG は有限要素法でメッシュを作成し計算するのに対し、JMAG EXPRESS は方程式ベースで計算を行う。

質問2：説明にあった「加工劣化特性を距離の関数で表す。」という点について詳しく教えてほしい。

回答2：切断面からの距離により透磁率等がどう変化するかを関数で与えて処理することが出来る。

質問3：処理を高速化するために JMAG を並列使用した場合のライセンス費用等はどうなるか。

回答3：費用についてはまだ実績が無いため検討中である。

質問4：JMAG の目指す方向は？

回答4：電磁界解析において、汎用性を維持しつつ特定の分野における材料データベースを充実させて専門性も兼ね備える方向を目指している。

質問5：ユーザーが JMAG を導入したことにより得られた効果の事例があれば紹介してほしい。

回答5：効果を定量化するのは難しいが、今まで出来なかった物が実現できたという話はよく聞く。

質問6：現時点でどの業界への導入が進んでいるか。

回答6：自動車メーカーとそのサプライヤが多い。

以 上

見学会報告

TEPIA 先端技術館

常葉輝久
カシオ計算機株式会社

見学先 : TEPIA 先端技術館
<http://www.tepia.jp/>
〒107-0061 東京都港区北青山 2-8-44
日 時 : 2016 年 7 月 7 日 (木) 13:40～15:00
スケジュール : 13:40 ～ 14:30 アテンダントツアー
14:30 ～ 15:00 ワークショップ
参加者 : 12 名

本年度も日本時計学会見学会が上記の要領で開催された。

見学先の TEPIA 先端技術館は、神宮球場と秩父宮ラグビー場に挟まれ、外苑前駅徒歩 4 分の抜群のロケーションにあり、先端技術を楽しく身近なものとして体感できる、新しいスタイルの展示施設である。最新の製品やサービス、「ちょっと未来」の私たちの社会やくらし等、先端技術を肌で感じる事が出来る 4 つのゾーンで構成されている。更に、ハイテク映像を無料で鑑賞できるビデオライブラリー、110 インチのスクリーンで TEPIA 収蔵の映像が楽しめるシアターを備える施設として、2014 年 4 月にリニューアルオープンした。



見学会は、まず初めにアテンダントの解説付きツアーによる館内見学からスタートした。

最初の見学は、テクノロジーラボ。ここは、ロボットの基本的な機能とそれを司る技術をわかりやすく体験できるゾーンであった。ロボットの「知覚」、「制御」、「動作」の観点から、各メーカーの最新のデバイス技術の展示がなされ、ロボットの動作原理の理解を深めることができた。

2 つ目のゾーンは、テクノロジーパスウェイ。生物のもつ優れた機能や形状を模倣して新たな発想で新技術を生み出す「バイオミメティクス」と呼ばれる技術を紹介するゾーンであった。ここで興味を惹いた展示が、クモ糸繊維を世界で初めて量産化した「QMONOS (Spiber)」。もし、太さ 1cm のクモの糸を作れたら、離陸するジェット機を止められるほどの強さをもつ世界で最も強靱な繊維になるとのこと。鋼鉄を上回る強度とナイロンを上

回る伸縮性を持つだけでなく、原料を石油に頼らない新素材としても注目を浴びている。

3つ目のゾーンは、テクノロジーショーケース。「時間・空間の制約」、「自然の制約」、「身体の制約」の3つの視点から、これまで超えられないと思われていた「人類を取り巻く様々な制約を打ち破る技術」を紹介していた。「時間・空間の制約を越える」技術として紹介されていた、鉄鋼の約20倍の引張強度を持つカーボンナノチューブを用いた「宇宙エレベーター（大林組）」。宇宙ステーションと地球を10万kmのケーブルでつなぎ、そのケーブルに昇降機をつけてエレベーターとして利用する。完成すれば宇宙との行き来が容易にでき、宇宙観光旅行への夢が広がる将来に向けて期待が高まる。

最後のゾーンは、テクノロジースタジオ。現在の先端技術が、未来の「暮らし」や「社会」にどのような製品やサービスになって入り込むかを体験できるコーナーである。閉鎖空間でなくても清浄度を保つ、「スーパークリーン生成装置“KOACH”（興研）」。向かい合わせた装置から清浄化された空気が吹き出して中央で衝突する事により、その気流が外側へ排出されるので、発塵したとしても素早く清浄空間を作り出すことが出来る。オープン環境でのクリーンルームの導入だけでなく、手軽な花粉症対策空間の実現を期待したい。



見学ツアーの後に、ワークショップを行った。テーマは、「自分の細胞からDNAを抽出する実験を行い、生き物の設計図としてのDNA抽出について学ぶ」。DNAは、アデニン、チミン、グアニン、シトシンの4種類の部品から作られ、その並び方に情報が記されている。実験は次の手順で行った。①食塩水を口に含み、頬をこする、軽く噛む事でDNAを取出す。②DNA入りの食塩水とSDS液をまぜ、細胞と核を覆う膜を破壊。③さらに食塩水を加え、DNAに付着する不純物を除去。④エタノールに③の溶液を注入しDNAを観察。この様にして、参加者が個人個人のDNAを抽出し、観察する事でワークショップが終了となった。人によって抽出されたDNAの様子が異なっている事が、面白い体験となった。

TEPIA先端技術館は、「先端技術を楽しく身近なものとして体感できる」というコンセプト通り、子供から大人まで楽しめる展示施設であった。まだこの施設を訪れたことがない方々には、是非、足を運んでいただきたい、おすすめの施設である。

最後にこの場をお借りして、見学コース、ワークショップの内容の調整や、丁寧に分かり易いご説明をしていただいた担当の方々に、深く感謝する。

日本の時計産業の概況

2015年

目 次

ウォッチ完成品（グローバルオペレーション）

- 1-1 日本のウォッチ完成品総出荷（輸出＋国内出荷）数量の推移 [機種別]
- 1-2 日本のウォッチ完成品総出荷（輸出＋国内出荷）金額の推移 [機種別]
- 1-3 日本のウォッチ完成品輸出の推移 [機種別]
- 1-4 2015 年の日本のウォッチ完成品輸出 [地域別構成比]
- 1-5 日本のウォッチ完成品国内出荷の推移 [機種別]

クロック完成品（グローバルオペレーション）

- 2-1 日本のクロック完成品総出荷（輸出＋国内出荷）数量の推移 [機種別]
- 2-2 日本のクロック完成品総出荷（輸出＋国内出荷）金額の推移 [機種別]
- 2-3 日本のクロック完成品輸出の推移 [機種別]
- 2-4 2015 年の日本のクロック完成品輸出 [地域別構成比]
- 2-5 日本のクロック完成品国内出荷の推移 [機種別]

注)

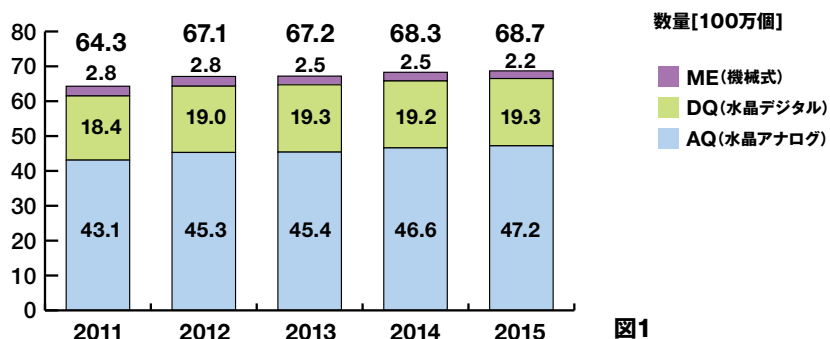
- 1. 日本のグローバルオペレーション：日本の時計企業の海外生産・出荷を含む事業活動
- 2. 図1～8、9～16は日本時計協会の統計データに基づく
- 3. 金額は、輸出はFOB、国内出荷は税抜き売り渡し価額
- 4. AQ は水晶コンピネーションを含む水晶アナログ、DQ は水晶デジタル、ME は機械式時計

2016年 3月

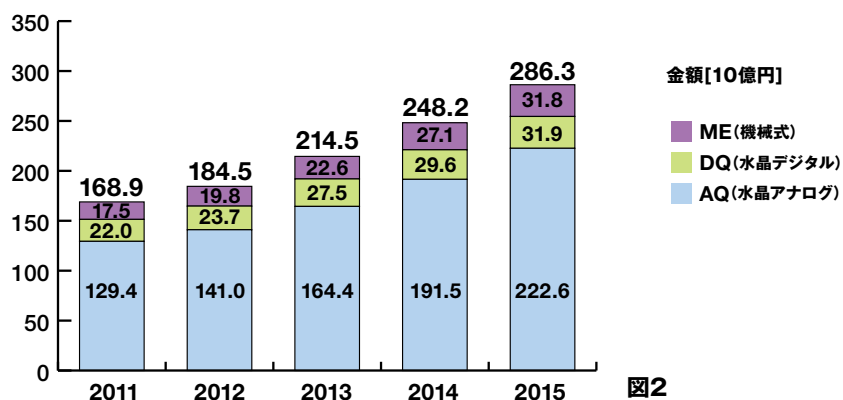
一般社団法人 日本時計協会

ウォッチ完成品（グローバルオペレーション）

1-1 日本のウォッチ完成品総出荷（輸出＋国内出荷）数量の推移 [機種別]



1-2 日本のウォッチ完成品総出荷（輸出＋国内出荷）金額の推移 [機種別]



- 2015年日本の時計メーカーによるウォッチ完成品の総出荷（海外からの出荷を含む）は、数量68.7百万個で前年比1%増、金額2,863億円の同15%増であった。
- 機種別数量では、水晶アナログが1%増、水晶デジタルが1%増、機械式は12%減であった。
- 参考値として、2015年の完成品とムーブメントの合計の出荷は、数量516百万個（前年比9%減）、金額3,612億円（同13%増）であった。

1-3 日本のウォッチ完成品輸出の推移 [機種別]

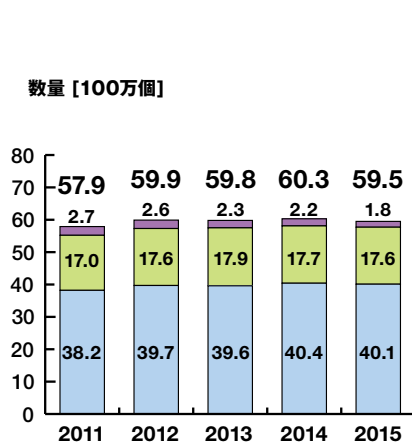


図3

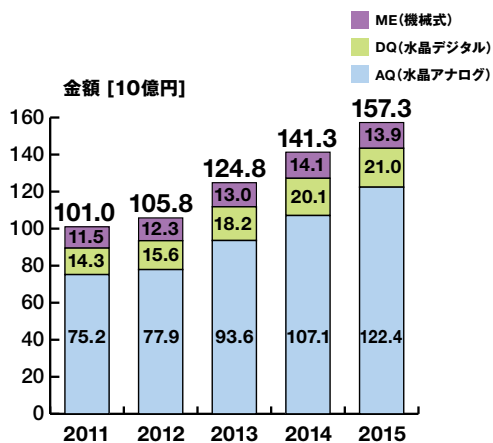


図4

1-4 2015年の日本のウォッチ完成品輸出 [地域別構成比]

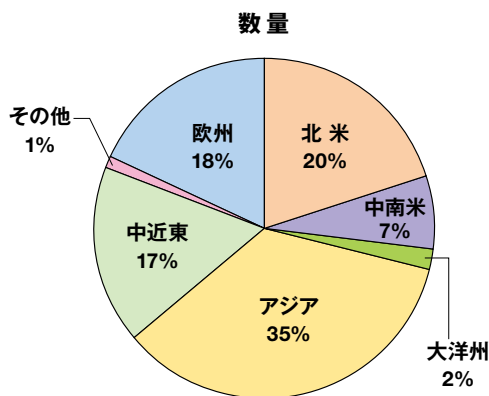


図5

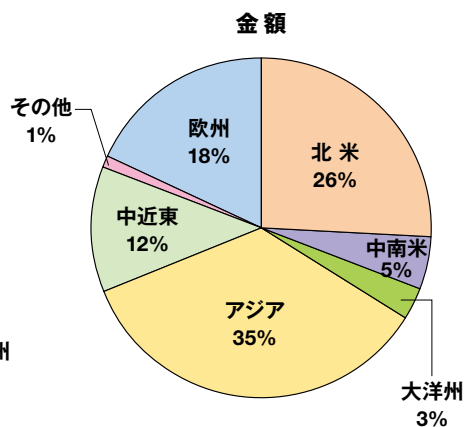
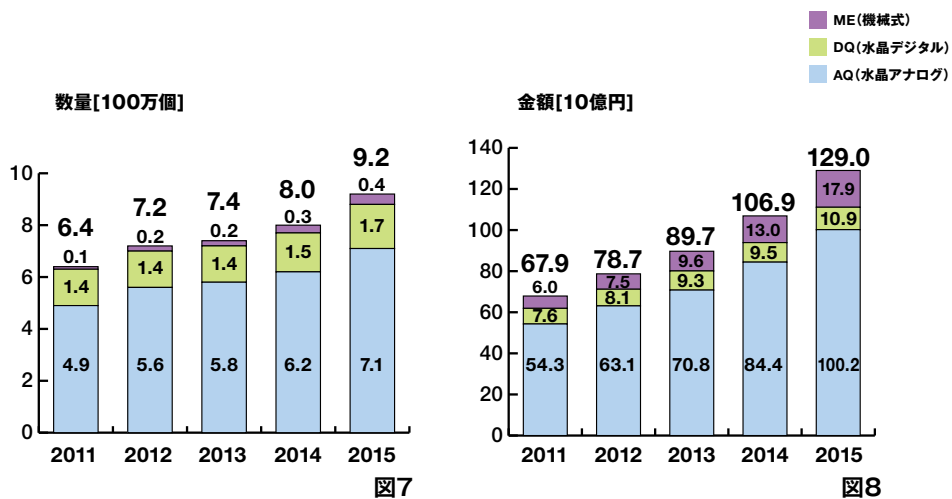


図6

- 2015年日本の時計メーカーによるウォッチ完成品の輸出は、数量59.5 百万個で前年比1%減、金額1,573億円で同11%増であった。
- 完成品の主な輸出先の対前年金額比較では北米・欧州・アジア向け共に増加した。

*輸出は海外からの出荷を含む。

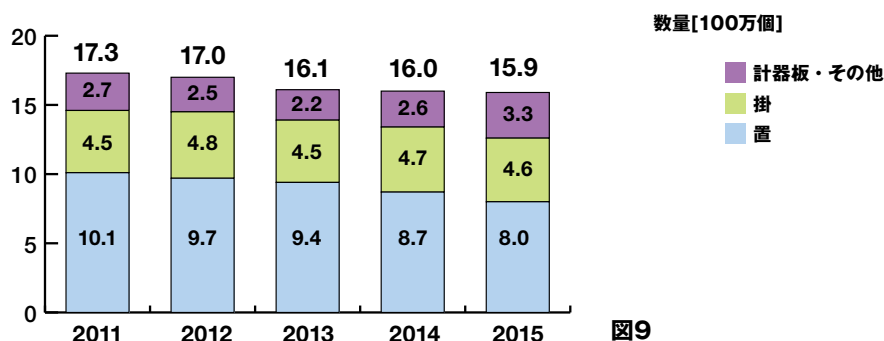
1-5 日本のウォッチ完成品国内出荷の推移 [機種別]



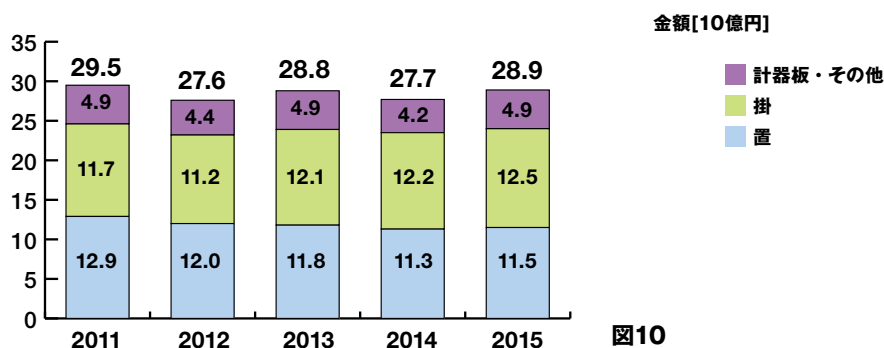
- 2015年日本の時計メーカーによるウォッチ完成品の国内出荷は、数量9.2百万個で前年比15%増、金額1,290億円で21%増であった。
- 国内出荷に占める電波修正時計の構成比は、数量で25%、金額で43%であった。

クロック完成品（グローバルオペレーション）

2-1 日本のクロック完成品総出荷（輸出+国内出荷）数量の推移 [機種別]

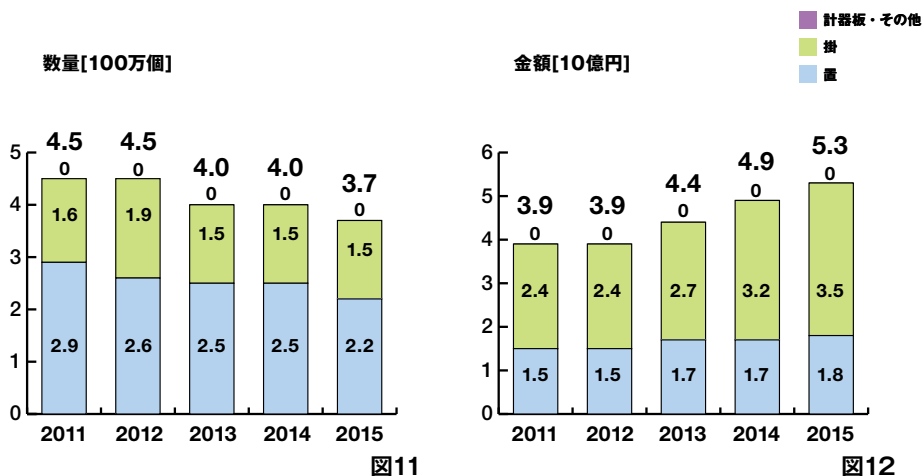


2-2 日本のクロック完成品総出荷（輸出+国内出荷）金額の推移 [機種別]

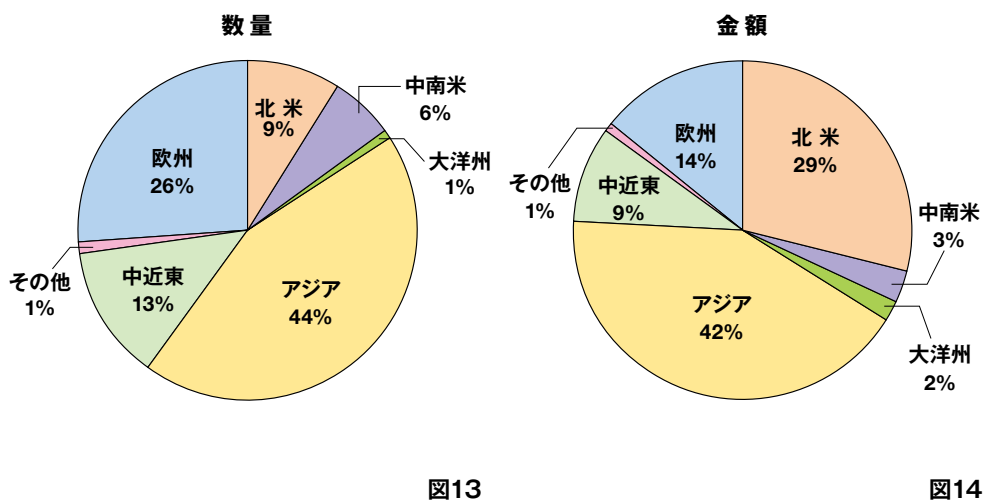


- 計器板・その他は、計器板及びその他のクロックを含む。
- 2015年日本の時計メーカーによるクロック完成品の総出荷（海外からの出荷を含む）は、数量が15.9百万個で前年比1%減、金額は289億円で同4%増となった。
- 機種別数量では、置時計が前年比8%減、掛時計が同2%減であった。
- 参考値として、2015年の完成品とムーブメントの合計の出荷は、数量18.7百万個（前年比7%減）、金額302億円（同5%増）となった。

2-3 日本のクロック完成品輸出の推移 [機種別]



2-4 2015年の日本のクロック完成品輸出 [地域別構成比]

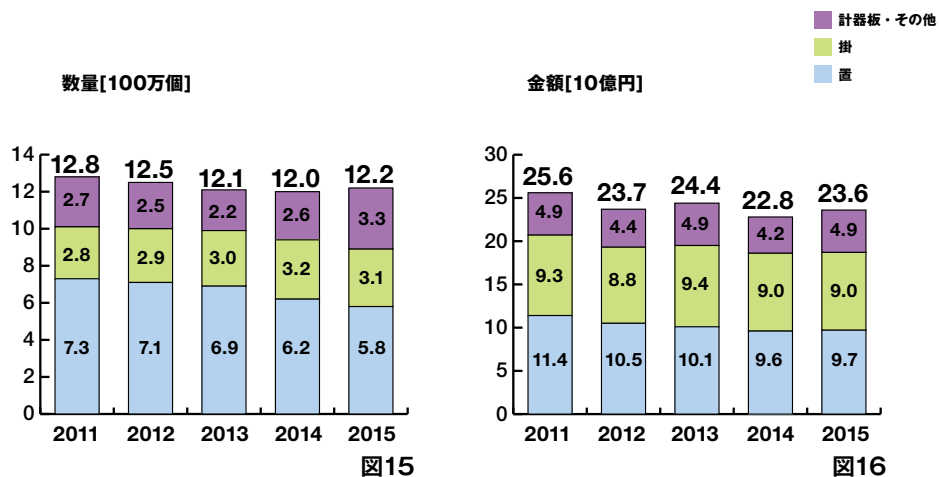


●2015年日本の時計メーカーによるクロック完成品の輸出（海外からの出荷を含む）は、数量3.7百万個で前年比8%減、金額53億円 で同8%増であった。

●完成品の主な輸出先の対前年金額比較では、北米・アジア向けが増加した。

*輸出は海外からの出荷を含む。

2-5 日本のクロック完成品国内出荷の推移 [機種別]



- 2015年日本の時計メーカーによるクロック完成品の国内出荷は、数量12.2百万個で前年比2%増、金額は236億円で同4%増であった。
- 国内出荷に占める電波修正時計の構成比は、数量で37%、金額で53%であった。

「時計技術解説」 クォーツ時計

－ IX.電池概論 －

樋口 晴彦

1. はじめに

本号では時計（特に腕時計）に搭載されている電池に関して説明を致します。

クォーツ式の腕時計が開発されてから半世紀の年月が経過しました。その間、計時と時刻の表示という時計の本質機能の向上に加え、付加機能の追加により時計自体は大きく進化を遂げてきましたが、その電源たる「電池」もクォーツ時計の進化の歴史と共に歩んできました。

一方で、世の中にあまた存在する電池で動作する電子機器に対して、「時計」という製品から生じる要求の特殊性に影響され、「時計」に搭載される電池は「時計専用」の色彩が強くなってきています。

クォーツ時計の歴史の中で、時計搭載の電池は種々製品化されてきましたが、以下現在主に使用されている品種に絞ってその特徴を説明致します。

2. 腕時計に使用される電池

腕時計に搭載される電池は、俗にコイン型、ボタン型電池と呼ばれ、使い切りの一次電池、充電して繰り返しが使用可能な二次電池に大別されます。一次電池については、国際規格（IEC）や各国の工業規格（日本ではJIS）において、発電に寄与する主たる材料、サイズ、電圧、形状が定められ、早い段階から標準化が進められました。一方で二次電池については、一次電池同様、規格化の動きはあるものの、現在のところ規格制定には至っておりません。

過去様々な電池が時計に採用されてきましたが、現在では以下の数種類の電池系に集約されています。

3. 腕時計用途の電池に求められる特性

電池そのものは、時計のみならず多種多様な電子機器に使用され広く普及してきました。「電池」に対する要求事項の多くは、小型、高容量、長期信頼性、耐環境性などであり、時計に限定されない共通する項目です。しかしながら腕時計に搭載されるという用途から、他の機器に比べそれぞれの項目に対する要求の度合いが異なってきます。

腕時計という非常に限られた容積の中に搭載され、かつ数年にわたる動作が求められることから、他の電子機器に対して、より小型、高容量が求められ、且つ数年にわたる長期の使用期間において特性の劣化や組み込まれた機器へ悪影響を与える症状（漏液、電池の膨らみ等）が発生しないことが要求されます。

使用環境については、腕時計を装着している使用状態での環境のみならず、非携帯時に放置された

環境においても計時動作を継続する必要上、民生機器としては比較的広い温度範囲での安定動作（－10℃～60℃程度）が求められています。

4. 一次電池

現在の腕時計に搭載されている一次電池は、概ね以下の3種類に集約されている状況です。日本製の一次電池については、JISにより規格化され電池の型番より電池の種類、概ねの大きさが判別できます。

記号	種類（電池系）	正極材料	負極材量	電解液
S	酸化銀電池	酸化銀	亜鉛	アルカリ水溶液
L	アルカリ電池	二酸化マンガ	亜鉛	アルカリ水溶液
C	二酸化マンガ リチウム電池	二酸化マンガ	リチウム	非水系有機電解液

Fig. 1 腕時計用途 一次電池の種類

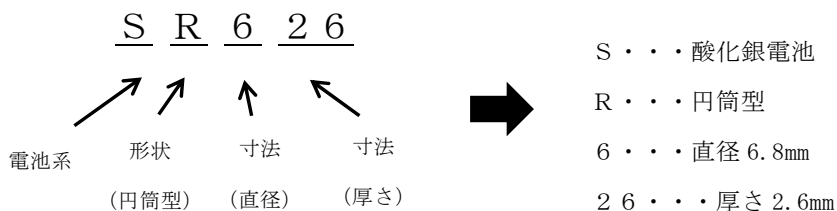


Fig. 2 一次電池の型番の一例

酸化銀電池は、現在ではほぼ腕時計に特化して使用され、他の電子機器には搭載される例はあまりありません。アルカリマンガン電池は、比較的大きなサイズの電池については腕時計以外の様々な小型電子機器で採用されていますが、小型サイズの電池ではやはり時計用途が主となります。一方で二酸化マンガシリチウム電池については、時計用途以外にも非常に多くの様々な用途に使用されています。以下、それぞれの電池についての特徴を述べます。

4. 1 酸化銀電池

1960年代前半に製品化された酸化銀電池は、体積当たりのエネルギー密度が高く、小型の電子機器への組込みに最適であったため、その後長く時計用途に使用されています。酸化銀電池は、その

名の通り、正極材に（酸化）銀が使用されているため、高性能ではあるものの他の電池とくらべて高コストであるため、用途が腕時計に限られてきました。また、電池の放電が進んでも電池電圧が低下しないことも特徴の一つと言えます。

初期の電気式時計は、電池の電圧変動がそのまま、時計の精度に影響することが多かったことから、電池の出力電圧が一定であることは、時計精度の安定化に大きく貢献しました。

（近年は I C 回路技術の進歩により定電圧回路の搭載などが進み影響は小さくなりました）

また酸化銀電池は、負極材に使用される亜鉛の腐食反応によって発生する水素ガスの影響で電池の膨らみ、特性の劣化、漏液等が生じるのを防止する為、微量の水銀を添加していました。しかしながら環境影響に対する配慮とこれに応じた技術の進歩により、2000年代半ばより、水銀を使用しない酸化銀電池が国内各電池メーカーから相次いで発売され普及が急速に進みました。

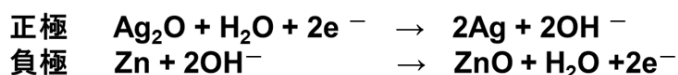


Fig. 3 酸化銀電池の反応

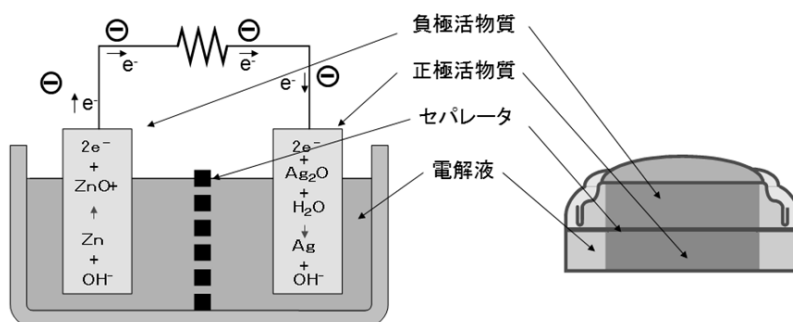


Fig. 4 酸化銀電池の構造

4. 2 アルカリマンガン電池

酸化銀電池が、正極材に貴金属の銀を使用していることで高コストであるのに対して、アルカリマンガン電池は材料コストの面では有利であることから、主に低価格の製品で使用されています。酸化銀電池に対しては同体積の電池に対して、電池容量は1/2～2/3程度しかなく、また電池の使用が進むと電圧が徐々に低下する点から、腕時計用途としては使い難い電池でした。時計の技術進歩（省電化、電池電圧変動の影響抑制）により以前に比べれば動作持続時間や精度への影響は少なくなったものの、酸化銀電池の性能面で優位性はゆるぎなく、現在でも比較的低価格の時計に限られて使用されています。また基本的な構造は酸化銀電池と同様です。

アルカリマンガン電池は、水銀未使用への技術的難易度が酸化銀電池に比べてさらに高く、信頼性を維持しつつ製品化に成功したメーカーは、極わずかです。

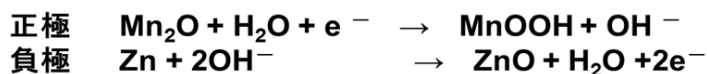


Fig.5 アルカリマンガン電池の反応式

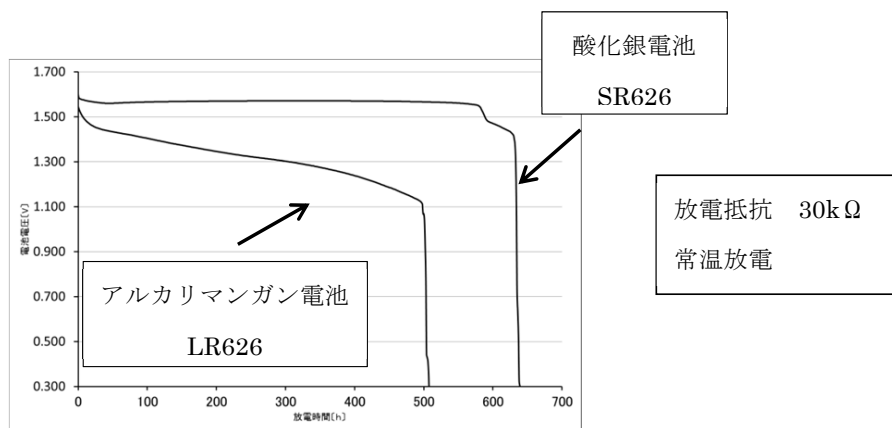


Fig.6 放電特性

4. 3 二酸化マンガンリチウム電池

時計用途としては比較的大型(φ 12 ～ 20 mm程度)の容量の高い製品が多く使用されています。

二酸化マンガンリチウム電池は酸化銀電池と比較して、電池電圧が高い、自己放電が小さく長期信頼性が高い、小電流での低温特性が良いなどの特徴を有しています。その特徴から電源電圧が高いほうが回路システムの利便性や長寿命(動作持続時間)の製品に多く使用されています。

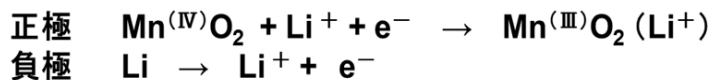


Fig.7 二酸化マンガンリチウム電池の反応式

4. 4 時計用途のコイン、ボタン電池

酸化銀電池、アルカリマンガン電池共、直径が 10mm 切るサイズを境に時計の専用の色彩が強まります。直径が 10mm を越える、また厚さが 4mm を越えるようなサイズの電池では酸化銀電池はコス

ト的に不利なため使用の頻度が低くなります。一方、アルカリマンガン電池については、LR41やLR44等のサイズの製品は価格的に優位な為、小型電子機器やクロックなどで幅広く使用されています。

酸化銀電池やアルカリマンガン電池では時計用途としては直径が4～11mm(主流はφ6～9mm)であるのに対して、二酸化マンガンリチウム電池は比較的直径の大きなサイズ(16mm～20mm)が多く使用されています。

5. 二次電池

電気式、電子式の時計は、機械式時計に比べ、精度面での圧倒的な優位性と技術開発による低価格化に特にクォーツ時計は急速に普及が進みました。しかしながら一次電池を使用の腕時計の宿命として定期的に電池交換をする必要があり、使用者の利便性や経済性の面では弱点を抱えていました。この弱点を払拭する為、クォーツ時計が世に出た数年後の1970年代半ばには、早くも太陽電池と二次電池を組み合わせ、定期的な電池交換が不要となる充電式の腕時計の開発、商品化が進みました。

初期のころに腕時計に搭載された蓄電手段としては、充電可能な酸化銀電池、Ni-Cd電池、または電気二重層などのキャパシタでした。酸化銀電池やNi-Cd電池は、長期的な信頼性や充放電の繰り返しによる特性劣化、キャパシタについては容量が小さく数日から1週間程度しか動作しないといった弱点を抱えていたため、充電式腕時計としての完成度は高くなく実用的とは言えませんでした。

時代を経て、1990年代に腕時計に搭載可能なサイズのリチウム二次電池が登場、採用が進むと充電式腕時計の性能が飛躍的に向上し、普及が加速しました。

腕時計に搭載される二次電池は現在では以下の3種類が主流となっていますが、いずれの電池もリチウム電池（リチウムイオン電池）です。二次電池については規格化されていない為、型番については製造メーカーが独自に命名しています。以下に略称と使用されている電極材料を記します。

略称	公称電圧 (V)	正極材量	負極材料
MT電池	1.5	リチウムマンガン酸化物	リチウムチタン酸化物
CTL電池	2.3	リチウムコバルト酸化物	リチウムチタン酸化物
CLB電池	3.7	リチウムコバルト酸化物	リチウム黒鉛化合物

Fig.8 時計用途 二次電池の種類

5. 1 充電式腕時計用二次電池に求められる特性

腕時計以外で二次電池を使用する製品は、比較的電気使用量が多い、カメラ、パソコン、携帯電話などで、一次電池での使用では頻繁な電池交換が必要となることより、経済性の面で同じ電池が繰り返し使用できる二次電池の利用が普及しました。これらの電子機器用途としては充放電が頻繁に繰り返される為、長期的な信頼性もさることながら、充放電の繰り返しにより特性劣化が少ないことや充放電の使用可能な回数が多いたことが求められました。

腕時計においては、一次電池を使用した製品でも酸化銀電池で2年～5年、二酸化マンガンリチウム電池では10年の動作を続ける製品があるなかで、数年程度の間隔で電池の交換が必要になった場合、使用者が享受できるメリットが大きくないため、他の電子機器に対してより長期にわたる信頼性が求められました。

腕時計では、たとえば、満充電状態から6か月動作を続ける製品では10年間の動作を保証するには20回分の充放電が可能な電池であればこれで賄えることになります。従来の充電式時計では、このような満充電ー完全放電が繰り返されるような使われ方はほとんどなく、常時充電／常時放電状態で使用される場合が多い状況でした。しかしながら近年、スマートウォッチのように消費電力の大きな機能を繰り返し充電して使用する製品が商品化されるに従って、以前は比較的注視されなかった充放電の繰り返しによる特性影響も改めて重要になってきています。

時計用の二次電池については、腕時計の機能に対してその電池の特徴に応じた使い分けがされています。以下、それぞれの電池の特徴と用途について記します。

5. 2 MT電池

1990年代前半より、ソーラー時計や自動巻発電時計に採用され、これにより充電式時計の性能、品質が大きく向上しました。MT電池の特徴としては長期的な信頼性や充放電の繰り返しによる特性劣化が少ないといった点があげられますが、電池電圧が公称1.5V（平均電圧は1.35V～1.40V程度）と、酸化銀電池用に開発された時計ムーブメントとの親和性もよく、またサイズのライオンナップも下表のように豊富で合ったため、様々な時計に採用され、充電式時計の普及、バリエーション拡大へ大きく貢献しました。MT電池の放電特性としては、出力電圧が平坦な区間が長く、またリチウム電池でありながら過放電状態でも電池の品質に影響がない、充電時の制約事項が少なく、複雑な充電制御回路を必要としない等、腕時計に対しては非常に適した電池です。この結果、付加機能が少ないシンプルな構成の腕時計においては今日でも広く採用され、数量面においては現在の充電式腕時計の主流となっています。

品番	電圧 (V)	容量 (mA h)	直径 (mm)	厚み (mm)	重量 (g)
MT416	1.5	0.6	4.8	1.6	0.10
MT516	1.5	1.15	5.8	1.6	0.15
MT616	1.5	1.5	6.8	1.6	0.20
MT621	1.5	2.5	6.8	2.1	0.25
MT920	1.5	5.0	9.5	2.0	0.50
MT1620	1.5	11.0	16	2.0	1.25

Fig.9 MT電池の品種

5. 3 C T L電池

MT電池は充電式時計用途として非常に優れた電池ですが、腕時計のバリエーション展開が進む中で様々な付加機能が搭載されはじめると、消費電力の増加により電池容量として十分とは言えなくなってきました。また大きな負荷がかかったとき（センサー動作、アラーム鳴り、モーターの連続動作等）の電圧降下による時計の誤動作等も課題となりました。

MT電池の場合は、定格電圧が低いことから他の電子機器向けに開発された電子デバイス（I C，照明、センサー等）を腕時計に搭載する際には、昇圧回路を搭載する、低電圧動作可能な専用回路を開発する等の工夫が必要でした。

このような中、2000年代半ばにC T L電池が登場します。C T L電池は、同サイズのMT電池に対し電力容量は2倍以上と高容量であり電池電圧も高い（公称電圧2.3 V）ことから、他の機器向けに開発された電子デバイスの使用が容易であったため、特に多機能の時計（長波の電波修正時計や各種センサー搭載の腕時計）への採用が進みました。

C T L電池は、MT電池と同様リチウム電池でありながら過放電への耐性、充電制御が容易であることなど点からも、腕時計用途に適した電池と言えます。

5. 4 C L B電池

2011年、GPS衛星からの電波を受信して時刻を修正する時計の登場に際して、電池に対する性能要求は大幅に高くなりました。GPS衛星からの電波を受信する場合に作動する受信システムは、受信時間は長波の電波時計が数分かかるのに対して十数秒と短いものの、動作中の電流値が長波電波時計の100 μ A程度に対して数10mAと非常に大きく、従来のMT電池やC T L電池の重負荷特性ではまったく足りない状況でした。この問題に対する解決手段として採用が始まったのがC L B電

池です。CLB電池は、MT電池、CTL電池では正極、負極の電極が1対であったのに対して、複数枚の電極が積層され内部で並列接続されています。その結果、正極、負極間の対向面積が大きく確保され同一サイズの二酸化マンガンリチウム電池に対しても流せる電流が飛躍的に向上しました。

負荷特性の良い電池としては、以前から携帯電話や音楽プレーヤー向けでアルミパックや角型形状ものは存在していましたが、腕時計への搭載において、サイズ、形状、長期信頼性という面で必ずしも適しているとは言えず、過去の採用事例はあまりありませんでした。

CLB電池については、市場導入後、サイズ展開が進んでいますが、今後さらに小型、薄型化されることが期待されます。

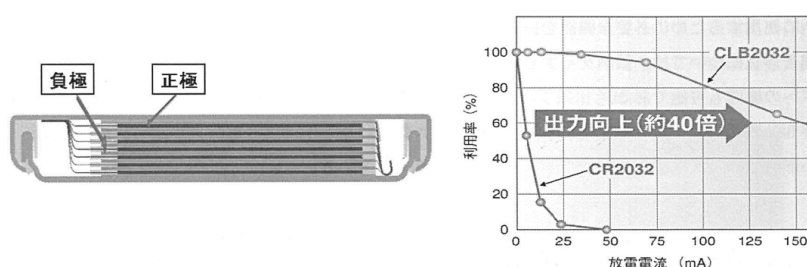


Fig.10 CLB電池の断面構成図及び出力特性

一方で、前述のMT電池、CTL電池とは異なり、過放電状態（0.7V以下）からの再充電禁止、充電環境(温度)の制限等、一般的なリチウム電池と同様の特性がみられます。また、高出力が得られることから、電池の外部ショートによる発熱、充電制御等、安全に対する設計的な配慮が従来の電池に対してより高いレベルで求められています。

6. 時計用電池に対する今後の展望

数量ベースではまだまだ圧倒的な比率を占める一次電池、特に酸化銀電池は、電池としての完成の域に達しており、今後も主流の電池としての使用は継続されます。一方で二次電池については、腕装着型の電子機器の代表格であった「時計」という商品がスマートウォッチにみられる「ウェアラブル機器」という範疇に拡大しつつあることから、今後の発展が大きく期待されています。

スマートウォッチとしての可能性は、生体モニタリング、ヘルスケア、モバイルホン連動機能、個人認証など用途を模索しながらまさに拡大している状況です。これらの機能が今後発展する為には、使用される電子デバイスの省電力化はもちろんのことですが、電力を供給する側の電池の高性能化も不可欠な内容です。今後、用途拡大における要求に対して新規の電池の開発や性能向上が図られていくことが望まれますが、このような開発が進むことで従来の腕時計においても、高性能な電池を使用

することで「正確な時を刻む」「長期間止まらない」といった本質的な時計性能、機能の向上（たとえば衛星電波時計のような）に対しても大きく貢献することも期待されます。

(参考文献)

- 1) 竹原善一郎 : 高密度リチウム二次電池 株式会社テクノシステム p310-p312 (1998)
- 2) 池田宏之助 他 :【図解】電池のはなし 日本実業出版社 p50-p67 (2001)
- 3) 川上他: 時計用 MT 系・CTL 系リチウム二次電池 Matsushita Technical Journal Vol. 52 No. 4 Aug, 2006
- 4) 研究会報告 : 「高出力コイン形リチウム二次電池の現状と今後の展望」 マイクロメカトロニクス Vol. 59 No. 213 p16-p33 (2015)
- 5) 座談会: 「小型リチウムイオン電池の最近の動向」, 時計学会誌 No. 156, p32-p50 (1996)
- 6) ソニーエナジー・デバイス ホームページ: <http://www.sonyenergy-devices.co.jp/>
- 7) パナソニックホームページ: <https://industrial.panasonic.com/jp/products/batteries/>
- 8) 日立マクセルホームページ: <http://biz.maxell.com/ja/>

製品紹介

製品紹介

スマートフォンとリンクする女性用ウォッチ“SHEEN”

アンバサダーに木村文乃さんを起用

カシオ計算機株式会社



SHEEN「VOYAGE TIME RING」シリーズ SHB-200(3モデル)

カシオ計算機は、女性用メタルウォッチ“SHEEN(シーン)”の新製品として、スマートフォンとリンクして世界中で正しい時刻を表示する新シリーズ「VOYAGE TIME RING」から『SHB-100』と『SHB-200』を9月16日より発売しました。また、“SHEEN”のアンバサダーに女優の木村文乃さんを起用しましたので、あわせてご案内します。

“SHEEN”は、輝く女性に向けたメタルアナログウオッチとして、1999 年に販売を開始しました。以来、電波受信機能やソーラー充電機能、簡単操作のシンプルワールドタイムなど実用性を高めながら、女性らしい輝きをデザインで表現してきました。

今回の新製品は、当社の女性用ウオッチで初めて Bluetooth 通信によるモバイルリンク機能を搭載しました。女性らしいデザインにこだわった専用アプリケーション「CASIO WATCH+」と連携することで、自動での時刻合わせが可能となり、ワールドタイムの設定もスマートフォン上から簡単に行うことができます。

フェイスデザインはつながりをテーマに、両モデルともリングをモチーフにしています。ワールドタイムを表示する 8 時側のインダイヤルは、『SHB-100』では色と大きさの異なる 2 つのリングを重ねたデザイン、『SHB-200』では 6 時側にきらめく 24 時間計を置いたダイヤモンドリングをイメージさせるデザインを採用しました。それぞれホームタイムとワールドタイムがひと目で把握できるよう配置しており、世界の時とのつながりや遠く海外にいる大切な人との絆を感じられるようなモデルに仕上げました。

今回、新開発のピーチゴールドの IP カラーを 4 モデルに採用しました。女性の肌を美しく魅せるオリジナルカラーで、上品さと華やかさを演出します。

型番	ピーチゴールド IP 処理	メーカー希望小売価格	発売日
SHB-100CG-4A	ケース、バンド	50,000 円＋税	9 月 16 日
SHB-100SG-7A	ケース	45,000 円＋税	
SHB-100D-4A	—	44,000 円＋税	
SHB-200CG-9A	ケース、バンド	50,000 円＋税	
SHB-200SG-7A	ケース	45,000 円＋税	
SHB-200D-7A	—	44,000 円＋税	

また、“SHEEN”のアンバサダーとして女優の木村文乃さんを起用いたします。

多くの映画、ドラマなどで活躍する多忙な日々でも、すべての時間をきちんと生きる木村さんの輝きが、“SHEEN”のコンセプトにぴったりと重なり起用に至りました。木村さんのように、いつでも自然体で自分らしい時を大切する女性は、“SHEEN”の理想のユーザー像でもあります。

木村さんが独自の感性で表現する“SHEEN”のあるライフスタイルを通じ、新たな女性用ウオッチの価値を創造していきます。



木村文乃プロフィール

1987 年 10 月 19 日、東京都生まれ。最近の主な出演作にドラマ「神の舌を持つ男」、「サイレン」、「マザー・ゲーム〜彼女たちの階級〜」、「銭の戦争」など。幅広い役柄を演じる実力派女優。料理、写真、音楽など幅広い趣味を垣間見ることのできるインスタグラムの公式アカウントはフォロワー数が 150 万人を超える。

新製品の主な特長

『SHB-100』と『SHB-200』は、無料の専用アプリケーション「CASIO WATCH+」をスマートフォンにダウンロード※することで、以下の「モバイルリンク機能」が使えます。

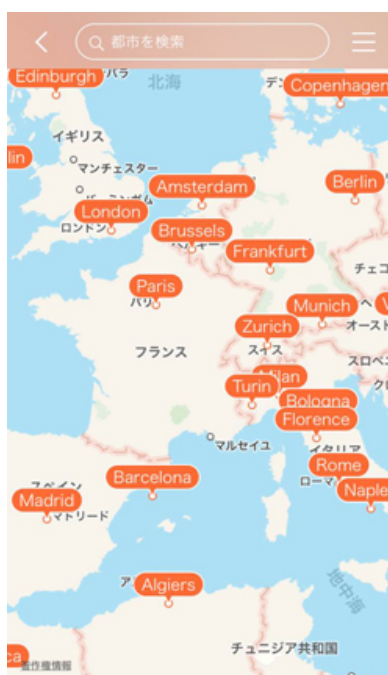
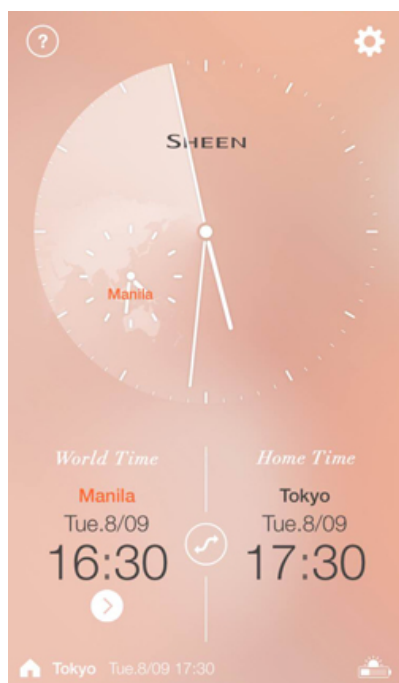
※*iPhone 用は App Store から、Android スマートフォン用は Google Play よりダウンロードできます。

対応機種は、後述する弊社サイトをご確認ください。

- アプリ上で世界約 300 都市からワールドタイムを簡単に設定
- 1 日 4 回自動的にホームタイムとワールドタイムの時刻を修正（サマータイム切替含む）
- 海外出張時等にワンプッシュですばやく現地時刻に修正できるワンタッチ時刻補正

- ホームタイム時刻とワールドタイム時刻の簡単入れ替え(時計のボタン操作でも可能)
- 時計のボタン操作でスマートフォンの音を鳴らす携帯電話探索

「CASIO WATCH+」アプリ



防水性		5 気圧防水
通信仕様	通信規格	Bluetooth® Low Energy※
	通信距離	～2m(環境により変化)
時計機能	デュアルタイム	ホームタイムとの時刻入替機能
	その他の機能	モバイルリンク機能(約 300 都市のワールドタイム設定機能、自動時刻修正、ワンタッチ時刻修正、携帯電話探索機能など)、フルオートカレンダー、日付表示、バッテリー充電警告機能
常温携帯精度		平均月差±15 秒(スマートフォンと連携しない場合)
使用電源		タフソーラー(ソーラー充電システム)
連続駆動時間		約 22 ヶ月(暗所で一定時間が経過すると運針を停止して節電するパワーセービングモード状態において)

大きさ	40.2 × 35.0 × 10.3mm (SHB-100) 41.6 × 34.9 × 10.0mm (SHB-200)
質量	約 85g (SHB-100) 約 84g (SHB-200)

ワードマークおよびロゴは、Bluetooth SIG, Inc.が所有する登録商標であり、カシオ計算機(株)はこれらのマークをライセンスに基づいて使用しています。

[動作確認済み端末] 最新の動作確認済み端末及び詳細は
(<http://support.casio.jp/information.php?cid=002&pid=1516>)をご覧ください。



SHEEN「VOYAGE TIME RING」シリーズ SHB-100(3モデル)

一般社団法人 日本時計学会 平成 28 年（2016 年）4 月度 理事会議事

－ 2016 年度 第 3 回理事会 －

（記録：小池 邦夫 2016 年 4 月 21 日）

1. 開催日時：2016 年 4 月 21 日（木）16:00-17:45

2. 場所：中央大学理工学部 後楽園キャンパス 2 号館 2735 号室

3. 出席者：〈理事〉中島，大隅，今村，大谷，木原，増田，吉澤，小池（以上 8 名）

理事総数 14 名の過半数に付き理事会成立

〈運営委員〉小水内，志村，重城，寺嶋，常葉，土肥，馬場，藤田（以上 8 名）

〈監事〉佐藤，吉村（以上 2 名）

4. 審議事項

（1）平成 28 年（2016 年）2 月度 第 1 回，第 2 回理事会議事録の確認

（2）新任の運営委員の選任

志村 穰 氏（東京工業高等専門学校）が新たに運営委員に選任された。

（3）出版編集関係（別紙資料配布：増田理事，寺嶋運営委員説明）

（4）春季研究会報告（速報）（馬場運営委員説明，幹事会社：セイコークロック）

（5）見学会について（常葉運営委員説明，幹事会社：カシオ計算機）

（6）青木賞について（大谷理事説明）

（7）学術講演会について（別紙資料配布：土肥運営委員説明）

（8）新入会員の承認

（9）企画委員会より（別紙資料配布：小池理事説明）

学術講演会特別講演の候補について

学会誌の充実に向けて

（10）新しい事業に関する提案について（中島代表理事説明）

学会活動の活性化案について

学会誌：マイクロメカトロニクスを表紙刷新について

（11）次回理事会開催日

2016 年 7 月 7 日（木）16:00～ 中央大学理工学部 後楽園キャンパス

5. 報告事項

（1）会員数状況（2016 年 4 月 21 日承認後）

正会員 152 名（±0）， 学生会員 4 名（±0）， 賛助会員 17 社（-1）（84 口（-1））

（2）スイス出張報告（中島代表理事より報告）

(3) その他(事務局からの報告事項他)

J-STAGE への移行について

以上

一般社団法人 日本時計学会 平成 28 年(2016 年)7 月度 理事会議事

－ 2016 年度 第 4 回理事会 －

(記録：小池 邦夫 2016 年 7 月 7 日)

1. 開催日時：2016 年 7 月 7 日(木) 16:00-18:15

2. 場所：中央大学理工学部 後楽園キャンパス 2 号館 2735 号室

3. 出席者：〈理事〉中島，大隅，今村，梅田，大谷，木原，竹中，増田，吉澤，小池(以上 10 名)

理事総数 14 名の過半数に付き理事会成立

〈運営委員〉小水内，志村，重城，寺嶋，常葉，土肥，馬場，藤田，古川 (以上 9 名)

〈監事〉佐藤 (以上 1 名)

4. 審議事項

(1) 日野須磨子氏ご逝去に対する学会の対応について

(2) 平成 28 年(2016 年)4 月度 第 3 回理事会議事録の確認

(3) 出版編集関係(別紙資料配布：増田理事，寺嶋運営委員説明)

(4) 学会誌「マイクロメカトロニクス」の表紙刷新について(寺嶋運営委員説明)

(5) 学術講演会特別講演について(竹中理事説明)

(6) 学会活動の活性化案について(別紙資料配布：馬場運営委員説明)

マイクロメカトロニクス学術講演会におけるネットワークキング充実の試みについて提案された。

(7) 春季研究会実施報告(別紙資料配布：馬場運営委員説明，幹事会社：セイコークロック)

(8) 秋季研究会について(寺嶋運営委員説明，幹事会社：シチズン時計)

(9) 見学会実施報告(速報)(常葉運営委員説明，幹事会社：カシオ計算機)

(10) 青木賞について(別紙資料配布：古川運営委員説明)

(11) 新入会員の承認

(12) 次回理事会開催日

2016 年 9 月 16 日(金) 中央大学理工学部 後楽園キャンパス

(マイクロメカトロニクス学術講演会の昼の休憩時に開催)

5. 報告事項

(1) 会員数状況 (2016 年 7 月 7 日承認後)

正会員 155 名 (+5-2) , 学生会員 4 名(+1-1), 賛助会員 18 社(+1)(85 口(+1))

(2) その他 (事務局からの報告事項他)

マイクロメカトロニクス学術講演会への講演申込み状況について (土肥運営委員説明)

以上

一般社団法人 日本時計学会 平成 28 年 (2016 年) 9 月度 理事会議事

－ 2016 年度 第 5 回理事会 －

(記録 : 小池 邦夫 2016 年 9 月 16 日)

1. 開催日時 : 2016 年 9 月 16 日 (金) 12:25-13:20

2. 場所 : 中央大学理工学部 後楽園キャンパス 5 号館 5133 号室

3. 出席者 : <理事> 中島, 大隅, 今村, 梅田, 大谷, 木原, 佐々木, 檜林, 増田, 吉澤, 小池 (以上 11 名)

理事総数 14 名の過半数に付き理事会成立

<運営委員> 重城, 寺嶋, 常葉, 土肥, 馬場, 藤田, 古川 (以上 7 名)

<監事> 佐藤, 吉村 (以上 2 名)

4. 審議事項

(1) 平成 28 年 (2016 年) 7 月度 第 4 回理事会議事録の確認

(2) 出版編集関係 (別紙資料配布 : 檜林理事説明)

(3) 学会誌「マイクロメカトロニクス」の表紙刷新について (寺嶋運営委員説明)

12 月号より刷新する学会誌の表紙のデザインと配色を決定した。

(4) 秋季研究会について (別紙資料配布 : 寺嶋運営委員説明, 幹事会社 : シチズン時計)

(5) 見学会実施報告 (別紙資料配布 : 常葉運営委員説明, 幹事会社 : カシオ計算機)

(6) 青木賞について (別紙資料配布 : 大谷理事説明)

第 50 回青木賞選考の経緯について説明があり青木賞表彰論文を決定した。

(7) 運営委員の退任について

運営委員 馬場 康治 氏 (セイコークロック) の退任が承認された。

(8) 新入会員の承認

(9) 次回理事会開催日

2016 年 11 月 18 日 (金) 16:00～ 中央大学理工学部 後楽園キャンパス

5. 報告事項

(1) 会員数状況 (2016 年 9 月 16 日承認後)

正会員 161 名 (+8-2) , 学生会員 4 名 (± 0), 賛助会員 18 社 (± 0)(85 口 (± 0))

(2) その他 (事務局からの報告事項他)

久保田 浩司 氏のご逝去に対する学会の対応について

日野 須磨子 氏のご逝去に対する学会の対応について

以上

2016 年 9 月 16 日

第50回 青木賞表彰委員会報告

第50回青木賞選考は、マイクロメカトロニクス平成26年度 Vol.58, No.210-No.211 及び平成27年度 Vol.59, No.212-213 に掲載された研究論文2編、技術報告9編、合計11編に対して行なわれた。選考は、選考委員による一次審査と表彰委員による二次審査との二段階で行なわれた。

選考に先立ち、選考委員9名、表彰委員5名の選出を行なった。

一次審査は、各選考委員がそれぞれ与えられた5編の論文を査読し、その評価を集計し数値化し、合計点数の高い4編について、二次審査を行う選考委員会へ推薦した。

二次審査は、選考委員の推薦を受け、表彰委員会による議論の結果、二次審査対象論文4編を了承した。

これら4編の論文を、表彰委員5名全員が査読し、その評価を一次審査と同様に集計し数値化した。この結果を基に、表彰委員にて議論した結果、最高点の評価を得た下記の論文を第50回青木賞表彰論文として推薦することに決定した。この結果を、後日開催された日本時計学会理事運営委員会で報告し、下記の論文が第50回青木賞表彰論文に決定した。

第50回青木賞表彰論文:3Dプリンターを用いた時計外装の鋳造, マイクロメカトロニクス, Vol.59, No.212, pp.27-35(2015)

執筆者:小林 資昭, 三浦 紗葵, 佐藤 雅浩, 木川 計介, 寺嶋 一彦, 山本 博邦

所属:シチズンホールディングス株式会社

推薦理由:「独創性」, 「有用性(貢献度)」, 「困難性(努力度)」という3項目に関して評価が行われ、各項目及び総合評価として、A, B, Cの3段階で採点された。その結果、独創性について特に高い評価を受け、総合評価でも最高得点を表彰委員から得たことによる。

第50回青木賞の受賞式は、2016年9月16日に開催された日本時計学会、マイクロメカトロニクス学術講演会会場で行なわれた。

(委員長 大谷, 幹事 重城, 古川)



写真:受賞者挨拶

2016年度 マイクロメカトロニクス学術講演会

主 催 : 一般社団法人 日本時計学会

協 賛 : 一般社団法人 エレクトロニクス実装学会, 公益社団法人 応用物理学会,
公益社団法人 計測自動制御学会, 公益社団法人 精密工学会, 一般社団法人 電気学会,
一般社団法人 電子情報通信学会, 公益社団法人 日本磁気学会, 一般社団法人 日本機械学会,
一般社団法人 日本ロボット学会, 公益社団法人 日本設計工学会

期 日 : 2016年9月16日(金)

会 場 : 中央大学理工学部校舎5号館 5134、5135、5136、5234号室 (後樂園キャンパス)

〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27

交 通 : 東京メトロ丸の内線・南北線「後樂園」駅下車徒歩3分,

都営三田線・大江戸線「春日」駅下車徒歩5分,

J R中央線(総武線直通各駅停車)「水道橋」駅下車徒歩12分

参加費 : 正会員 4,000円 非会員(一般聴講者) 6,000円 学生会員 2,000円 (いずれも予稿集代含む)

技術交流会(学術講演会参加者は無料)

・会員は個人会員に限ります。協賛学会員は正会員価格です。

・一般聴講者の方も、非会員価格で参加可能です。

マイクロメカトロニクス講演会 プログラム

学術講演会(5134号室)

第1セッション(9:40~10:40)

1. 9:40-10:00 3軸調節機構を持ったウェアラブル血圧脈波計測デバイス
中央大学 ○土肥 徹次
2. 10:00-10:20 Édouard Phillips によるヒゲゼンマイの理論の詳解およびその実際の効果
時計理論サロン 小牧 昭一郎, 笹谷 卓史, 菊野 昌宏, 居内 友宏, ○菊池 悠介
3. 10:20-10:40 時計外装への鍛造シミュレーションの応用
シチズンホールディングス ○三浦 紗葵, 小林 資昭, 小川 剛主, 佐藤 雅浩,
東北大学 黒須 恵美, 山中 謙太, 千葉 晶彦

10:40-11:00 休 憩

第2セッション(11:00~12:20)

4. 11:00-11:20 ソーラー発電ムーブメントの薄型化構造
シチズン時計 ○保坂 隆, 今村 和也
5. 11:20-11:40 薄型トゥールビヨンウォッチの開発
セイコーインスツル ○森 裕一
6. 11:40-12:00 Q U A Dセンサー搭載の多機能電波ソーラーアナログ時計の開発
カシオ計算機 ○橋田 典幸, 山崎 晋, 丸山 弘尚, 桜沢 正, 花田 剛

7. 12:00-12:20 wena wrist における電子部品の分散配置構造
ソニー株式会社 ○青野 達人, 對馬 哲平, 松永 健太朗
- 12:20-13:40 休 憩
- 13:40-13:55 青木賞授賞式

第3セッション(13:55～15:15)

8. 13:55-14:15 Bluetooth®無線通信技術に対応した ML7125-001 の開発
ラピスセミコンダクタ 大久保 雅彦, 高田 康弘, 山口 裕介, ○寺田 誠
9. 14:15-14:35 GPS と気圧センサーを用いた高精度標高計測技術
セイコーエプソン ○佐野 史和, 山形 整功, 前澤 秀和
10. 14:35-14:55 スマートラップ機能搭載ランニングウォッチの開発
セイコーインスツル ○野邊 哲也, 野村 隆幸
11. 14:55-15:15 ダイバー向けトリプルセンサー電波ソーラーデジタル時計の開発
カシオ計算機 ○大村 竜義, 山崎 晋, 三宅 毅

製品展示セッション (5 1 3 6 号室, 15:15～16:15)

- A-1. カシオ計算機 (株)
- A-2. シチズン時計 (株)
- A-3. セイコークロック (株)
- A-4. セイコーエプソン (株)
- A-5. セイコーインスツル (株)

16:15-16:30 休 憩

特別講演 (5 2 3 4 号室, 16:30-17:30)

「独立時計師の仕事」
講師 独立時計師 浅岡 肇 氏

技術交流会

18:00-20:00 理工学部 3 号館 1 階ホール

元日本時計学会理事 久保田 浩司さんを偲んで

竹中 雅人

盛岡セイコー工業株式会社

(一社) 日本時計学会理事



元日本時計学会理事で、長きに渡り時計技術の追究、時計産業史の研究を進め、時計産業の発展に貢献された久保田浩司さんが、2016年（平成28年）8月15日に享年90歳でお亡くなりになりました。

ここに謹んで哀悼の意を表しご冥福をお祈りいたします。

久保田浩司さんは1926年（大正15年）4月11日の生まれで1947年（昭和22年）桐生工業専門学校機械科を卒業後、同年株式会社第二精工舎（現セイコーインスツル株式会社）に入社、時計技術部長、時計設計部長、取締役、常務取締役などを歴任され、1985年（昭和60年）セイコー電子部品株式会社取締役社長就任、同社取締役相談役を経て、1990年（平成2年）6月同社を退任されました。

この間、時計事業の中枢を歩み、日本の時計産業が戦前の体制から近代産業に生まれ変わる時代に、精度・信頼性向上などの動きを主導され、スイスの天文台コンクールでの躍進など、日本の機械式時計技術を、世界トップを競える水準にまで引き上げられ、また、1970年代以降、時計の電子化を進められるなど、文字通り日本の時計産業を技術開発で発展させられました。

現役時代はとにかく資料魔で、事実に基づき原則を貫き追究する姿勢は、当時の開発陣を恐れさせたそうですが、OBとして我々を指導いただいた際は、元常務取締役という大先輩に、全くフラットな姿勢で接していただき、大きな驚きであったと同時に技術者のあるべき姿を見せていただきました。

退職後は、時計産業史研究、業界関係者との交流をリードされました。

1999年（平成11年）6月にセイコー時計資料館館長に就任され、館長退任後も名誉館長、研究員として、時計産業史、最新技術の研究を継続されました。ピエール＝イヴ・ドンゼ氏（現大阪大学、経済学研究科准教授）の産業史研究のサポートをされ、また、「時計産業史を語る会」（1992年10月29日発足）を主宰されました。本会は、セイコーG3社・日本時計協会・国際時計通信社・シチズン時計OB・通産省機械試験所OBのメンバーで月一回、2011年10月13日まで9年間で計128回開催され、その記録は現在、セイコーミュージアムに収蔵されています。

また、後進の指導も継続され、機械式時計の理論・構造に関する講義、修理技能者と一緒に理論だけでなく技能技術も習得できる講義を实践され、時計技術の継続的な発展の動きを推進されました。

人一倍探究心・向学心が強い方で、お亡くなりになるまで、夕食後はご自分の部屋で、遅くまで調べ物をされていたそうです。ご自身はまだ不足とおっしゃっているかもしれませんが、将に技術者としての一生を全うされました。

追 悼

日野須磨子さんを偲んで セイコーミュージアム 館長 渡邊 淳



国際時計通信社主・編集長として、月刊の国際時計通信誌を半世紀にわたって発行されてきた日野須磨子さんが、2016年6月27日に永眠されました。ここに謹んで哀悼の意を表します。

日野須磨子さんは1930年7月23日に高知県に生まれ、1951年1月26日に上京。1960年4月に国際時計通信社を創立し、1960年6月15日に国際時計通信・創刊号を発行されました。

1960年9月15日発行のNo.4号に掲載した「香港…東洋における国際時計市場」が日野須磨子さんの最初の署名記事でした。

1963年4月17日から4月26日まで、日本ジャーナリスト集団の一員としてスイス時計産業を視察。4月27日から7月6日までは単独でスイス時計産業各社を訪問し視察されました。

この時の印象は「スイス滞在日記」として国際時計通信 No.109号とNo.110号に掲載されています。ちなみに国際時計通信誌はその名の通り、毎号、海外主要国にも送られています。

日野須磨子さんは常に自ら時計の研究・設計・製造・商品企画やデザインの現場に足を運び、設計者や技術者やデザイナーに直接会って取材し、特集記事を執筆し続けました。

1990年代になり、印刷の方式が活版方式からオフセット方式へ、さらにDTP方式へと大きく変革し、それまでの手書き原稿が受け入れられなくなるや、日野須磨子さんはパソコンでの原稿作成を決意し、事務所とご自宅にパソコンを設置して操作習得に挑戦し、遂に74歳にして原稿作成をマスターされました。2004年5月1日発行のNo.438号からDTP方式となっています。

日本時計学会誌には「工業製品と一般大衆」、「世界のユーザーの時計選択における、ある一面」を寄稿されています。また、2011年9月2日には日本時計学会で「腕時計の半世紀」を講演されました。

2014年に入ってから体調優れず、遂に11月27日に事務所を閉鎖されました。

国際時計通信誌の総発行号数は442。日野須磨子署名記事は750に及びます。

日野須磨子さんが亡くなられ、日本時計産業の歴史を記録する業界誌はなくなりました。日本・世界の時計産業にとってまことに残念なことです。しかし、彼女の緻密な取材姿勢と時計への熱い想い・こだわりで綴られた国際時計通信誌の価値は、日本と世界の時計産業・技術発展の貴重な史料として、今後ますますその輝きを増していくことでしょう。

資料提供 田中太郎（服部時計店初のデザイナー）

講演募集

日本時計学会では毎年9月に学術講演会を開催しております。会誌発行が年2回のため適切な時期に講演の会告ができず、これまでは小範囲の方だけにお知らせして募集してまいりました。今後は常時講演募集を致しますので、研究発表を希望される方は下記へお申込みまたはお問い合わせください。

〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部 精密機械工学科 土肥 徹次

Tel : 03-3817-1824 Fax : 03-3817-1820 E-mail : dohi@mech.chuo-u.ac.jp

お詫びと訂正

本学会誌「Vol. 60, No. 214」の pp. 2-11 に掲載された論文「定荷重ばねの引き出し力に関する研究」の題目に関し、表紙目次に「定荷重ばね…」とすべきところ「荷重ばね…」と誤って記載してしまいました。著者諸氏並びに会員の皆様に深くお詫びして訂正させていただきます。なお、学会誌 web 版の目次は訂正済みとなっております。

編集後記

日本人選手の活躍に沸いたリオデジャネイロ オリンピック・パラリンピックが終わり、4 年後には東京でオリンピックが開催されます。2020 年には前回 1964 年の東京オリンピックにまさる感動を日本から世界中に発信してくれることを期待しています。

さて、時計学会では学会活動の活性化のため、今年度よりマイクロメカトロニクス学術講演会でコーヒーを飲みながら気軽に交流いただける雰囲気作りを始めました。また、昨年からプレスリリースをして学術講演会の内容や特別講演など学会の取り組みを多くの方に知っていただく活動をしています。また、本号より学会誌の表紙を刷新し、心機一転して未来に向けて情報を発信していく所存です。時計学会の活性化の取り組みが、時計およびウェアラブル技術の発展に寄与し、少しでも多くの人々の感動につながれば幸いです。

会員の皆様には、学術講演会での発表、論文の投稿、研究会、見学会などの学会行事へ積極的に参加いただき学会の活動に引き続きご協力をお願いいたします。

(小池 邦夫 記)