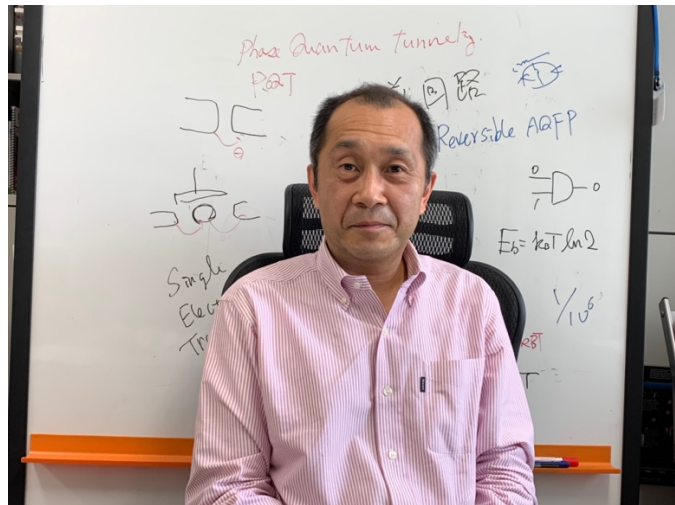


## 超伝導コンピュータ、極限省エネルギーへの旅



(中川撮影)

吉川 信行

横浜国立大学

先端科学高等研究院 副高等研究院長 教授

超省エネルギープロセッサ研究ユニット 主任研究者

半世紀以上むかし、アポロ 11 号が月面着陸を果たす前年の 1968 年、『2001 年宇宙の旅』の初回ロードショーが上映された。1978 にも二度目のロードショーが上映されたぐらいだから、かなり評価の高い映画だったのだろう。木星の近くを飛行する宇宙船を舞台にした SF 映画だ。

この映画は、観た人の感想が両極端に分かれるようだ。「細かい表現も深い内容も、ほんとうに素晴らしい映画だ」と絶賛する者と、「何がそんなに面白いの。さっぱりわからないじゃないの」と酷評する者に、くっきりと分かれる。

公開当時、高校生だった吉川（文中敬称略）は前者だった。そして、初デートにこの映画を選んだ。年齢から考えると二度目のロードショーだろう。相手の少女は後者だった。少女はつまらなそうに、言葉を返した。

「何がそんなに面白いの。さっぱりわからないじゃないの」と。

この話には後日談があるが、とりあえず脇に置いて本筋に戻ろう。

吉川はこの映画に引き込まれた。とくに、自らの意思を持って人間に反乱した HAL という高性能のコンピュータに、目を奪われた。

いつかは HAL のようなコンピュータを作りたい、という夢が芽生えた。そして、吉川は横浜国立大学（以下、横浜国大）に進学し、情報工学の道に進んだ。

これが、研究の起点である。このとき、HAL のようなコンピュータを作るための旅、『超伝導コンピュータ、極限省エネルギーへの旅』が始まった。

吉川は大学院に進学すると、ジョセフソン効果に双対するマクロな量子効果、位相量子トンネル（PQT: Phase Quantum Tunneling）効果の研究を始めた。

超伝導回路に作った狭い隙間を一つの電子が飛び越すときの性質を研究したものだ。この研究によって、吉川は 1989 年に博士号を取得した。博士論文のタイトルは『微小超伝導接合における新しい量子効果とその応用』[1]である。

大学院を修了すると、横浜国立大学の助手となって研究を続けた[2]。

後に、PQT が単一電子トランジスタ（SET: Single Electron Transistor）という、電子を一つだけ動かすトランジスタと本質的に同一であることが解明されると、吉川は SET の研究をはじめた。

ところが、研究するうちに一つの困難にぶつかった。SET は電子を一つしか動かさないから消費エネルギーは小さい。しかし、演算を確率的なトンネル効果に頼るので速度が遅かった。

単一電子のトンネル効果は確率的に決まる性質である。確率とって思い浮かべるのはコイン・トスだろう。コインを投げて表裏を当てるゲームだ。1 回目で表が出るかもしれないし、5 回待っても裏ばかりかもしれない。表を出すには、ある程度待つことは覚悟しないとイケない。だから、遅い。

トランジスタとしては、筋が悪い。こう考えた吉川は、新しい研究テーマの探索を開始した。この頃、単一磁束量子（SFQ: Single Flux Quantum）という新しい概念の超伝導回路の研究が萌芽期を迎えていた。1980 年代に年間 1~3 報だった論文発表が、90 年代には毎年のように増加し、1995 年には 86 報が公開されていた<sup>1</sup>。半導体回路に比べて高速動作と低消費電力が期待される新しい回路だ。演算を確率に頼るものではない単一電子トランジスタに代わる有望株だと思われた。

SFQ の大きな特徴は、電気の性質ではなく磁気の性質、電子ではなく磁束を演算に利用することだろう。

「すぐにでもやりたい」

心は先走っても製造装置がない。研究費をもらえれば買えるのだろうが、研究費をもらうためには、まず研究を始めて、次に成果を出さなければならない。しかしそのためには装置がない。今も昔も、この国は新しいことを始める者には冷淡だった。

---

<sup>1</sup> Web of Science にてキーワードを”single flux quantum”として検索。

悶々としていたところ、たまたま学会の席でアメリカのカリフォルニア大学バークレー校(UCB)の Van Duzer 教授を見かけた。UCB は、超伝導エレクトロニクス研究で世界を牽引していた大学だ。

こんなところでこんな人に会えるとは！ なんとという幸運！

「いっしょに SFQ の研究をしたい」

と持ちかけると、即座に

「来い」

話は決まった。

1995 年 2 月、吉川はサンフランシスコに飛び立った。大学のあるバークレーはサンフランシスコに近い。研究室を訪ねて自己紹介すると、一人の学生が握手を求めて来た。

「初めまして。私が一人で SFQ の研究をしています。John と呼んでください」

Zhong John Den, 博士号を取るために中国から来ている学生だった。物理学と経済学の修士を持っていた。

二人は協力して研究を始めた。指導したのは Van Duzer 教授だ。もう一人、ときどき手を貸してくれる Whiteley 博士が加わって総勢 4 人となったが、主に研究したのは吉川と John である。

John は、吉川ほど超伝導エレクトロニクス研究の経験が豊富というわけではなく、研究の知識とノウハウは吉川が指導することが多かった。反面、John は優秀で自信家だった。二人でディスカッションして研究を進める。研究費は潤沢なので、回路を作るのは製造受託会社への発注だ。出来てきた装置は受託会社のアドバイスも受けて動かし、一歩進めて再び製造委託する。研究はどんどん進んだ。

研究環境は日本と違って、驚いたことに毎日午前 9 時から夕方 5 時までで研究が終わる。それでも研究が滞らなかったのは、よほど研究の進め方が効率的だったのだろう。

驚きはそれだけではない。研究室は優秀な人の出入りが活発で、つねに自由なディスカッションが行われていた。たとえば、研究者のミーティングにノーベル賞の授賞者がゲストとして招かれると、学生と一緒に自由なディスカッションをする。学生は物怖じしないで意見を述べる。新しいアイデアは常に奨励された。そこでは、出る杭が尊重された。

この環境は吉川を刺激した。日本でも、人の出入りが活発で、自由に新しいアイデアを議論できる環境を作りたい、と言う思いは日増しに強くなった。この思いは今も消えることがない。吉川は若い研究者や学生に「どんどん海外に出よう」と勧めている。外国からの研究者や学生も喜んで受け入れている。

余談かもしれないが、当時の為替レートは 1 ドル 94-95 円だった。もともと住宅費が日本ほど高くない上に円高で、部屋からゴールデンゲートブリッジを眺めることのできるマンションを借りることができた。休日は、カリフォルニアの青い空の下で、これも日本よりはるかに安いゴルフ三昧だったという。知的生産の充実には、刺激と余裕が必要なのだろうか。

さて、年末に帰国した吉川は、4人で共著論文を2報仕上げた。この論文は、1997年12月に公開された[3],[4]。

論文が発表されると、すぐに日経産業新聞が興味を示した。3月には一本の記事が掲載された。冒頭のパラグラフを紹介する。

『横浜国大、論理回路、速度70倍に、米カリフォルニア大とー 超高速計算機に応用』  
横浜国立大学工学部の吉川信行助教授は米カリフォルニア大学のグループと共同で、超電導現象を利用した高速動作論理回路の試作に成功した。動作速度は一秒当たり二十ギガ(一ギガは十億)ビットと、実用化されている最速の論理回路の約七十倍。消費電力も格段に少なく、多数の超小型演算器を並列で動かすスーパーコンピューターへの応用が期待できそう[5]。

記事は、この次に論理回路がRSFQという高速のSFQであることを紹介し、それまでの超伝導回路やシリコン半導体回路に比べて高速であることを示していた。「消費電力はシリコン素子に比べて十万分の一程度に下げられる可能性があり、多数の回路を並列にして計算する用途に適している」と、低消費エネルギーについての言及で記事を結んでいる。

吉川のSFQ研究のデビューは成功だった。研究は着々と進んだ。そして、ミレニアムの変わる2000年、吉川は学術振興会から『1999年度超伝導エレクトロニクス第146委員会賞』を授賞された。

2004年には未踏科学技術協会から第8回超伝導科学技術賞を授与された。授与されたのは『科学技術賞』で、他の5名との共同受賞である。タイトルは『超伝導単一磁束量子回路設計インフラストラクチャの構築』である。

研究は追い風を受けた。2002年まで毎年10報以下だった論文発表数が、2003年には一気に23報に跳ね上がった。以後、2009年まで毎年20報以上を発表し続け、現在までも論文発表を続けている<sup>2</sup>。SFQの優れた特性が知られるにつれ、世界中で研究が行われるようになり、国際競争が激しくなった。学界全体盛り上がる環境の中で、気がつけば吉川はトップに立っていた。

それでも、一つだけ頭の片隅にこびりついて離れない問題があった。消費エネルギーである。SFQは半導体回路に比べると、演算で消費するエネルギーは小さい。しかし、半導体回路は室温で動作するのに対し、SFQは極低温で初めて動作し、しかも発熱が大きい。冷却エネルギーまで考慮すると、消費エネルギーは十分に小さいとは言えない。

---

<sup>2</sup> 論文数は、横浜国大ホームページ『研究者総覧』吉川信行 [https://er-web.ynu.ac.jp/html/YOSHIKAWA\\_Nobuyuki/ja.html](https://er-web.ynu.ac.jp/html/YOSHIKAWA_Nobuyuki/ja.html) に掲載された論文で、タイトルから研究テーマが判別できるものをカウントした。

吉川は2009年に「数十 mK（ミリ・ケルビン<sup>3</sup>）の極低温での発熱が問題」と指摘している[6]。それでも SFQ は超高速集積回路の雄であり、研究は熾烈な競争を伴って進んだ。

吉川はエネルギーの問題を頭の片隅に置いたまま、国際競争の先頭を走り続けた。

カタストロフは予告なしにやって来る。

満を持して応募した SFQ のプロジェクトが、最終選考まで残って不採択になった。

通知を見た時は、呆然とした。目の前が、露出過多の画面のような眩しい白色に覆われ、すべての脳細胞が働きを止めた。やがて、心が鎮まって視界が戻ったとき、底知れない無力感が襲った。

大きなショックを受けたとき、あるいは何かに行き詰まってどうしようもなくなったとき、人はどのように対処するのだろうか。それでも地道に壁に挑み続けるだろうか。どこか遠くに旅をするだろうか。静かな音楽に浸って心を白紙にするのもいいだろう。多くの人々は、経験を積む間に自分にあった処方箋を見つけている。吉川は、頭をリセットして本を読むようにしている。

このとき読んだのは『ファインマン計算機科学』だ。物理学者ファインマンの講義録をベースにした教科書で、著者ファインマン自身の言葉によると「（ファインマン自身が過去に著した『ファインマン物理学』と比べると）いくらかやさしいが、ほんの少しだけ」[7]というから、理系の学生に向けて書いたものだろうか。手に入りやすい本で、けっこう読みやすいから、物理やコンピュータが好きな人は、手に取ってみるのもいいだろう。パラパラめくだけでも、感触が掴めるかもしれない。公共図書館で借りることもできる。

一二月手を止めて基礎的な本を読むと、それまで拘泥していた何かが消える。空白になった頭に基礎的な知識をインプットすると、何かが生まれる。

とくに、『第5章 可逆計算と計算の熱力学』は、エネルギー消費や計算速度についての講義だった。読むうちに、ファインマンの講義と吉川の知識が結びついた。

頭の中に、閃光が走った。

SFQ では磁束を閉じ込めておくエネルギー障壁の井戸（ポテンシャル）が固定されていて、その磁束を出し入れすることで演算する。そうではなく、井戸の底の形を変えて底を二つ作り、左から右へと坂を転がすように磁束を動かして演算すると消費エネルギーはどのようになるだろう。井戸の底の形はローレンツ力を加えて変化させる。ゆっくりと形を変えてやれば、消費エネルギーは小さくてすむ。どんどん遅くして速度をゼロに近づければ、エネルギーもゼロに近づく。さらに遅くして速度が無限小になれば、エネルギーも無限小になる。これが断熱回路だ。実用に支障のない程度でゆっくりと動かせば消費エネルギーは格段に

---

<sup>3</sup> K（ケルビン）は絶対温度の単位。0 K（絶対零度）は-273.15°C、1Kは1°C。

小さくできるのではないか。SFQ の発熱=消費エネルギーの問題が解決できるかもしれない。

「行けるかも知れない！」

研究室で試作したら、希望の輪郭が見えた。

「これで行こう！」

吉川は研究プロポーザルをまとめた。横浜国大発祥の、吉川オリジナルの新しい回路、断熱的量子磁束パラメトロン(AQFP: Adiabatic Quantum Flux Parametron)の研究が、このとき始まった。

この研究は注目された。2012年、研究者、技術者向けの Web ジャーナル、『超伝導 Web21』で『極限的低消費電力動作を可能とする断熱型 QFP 論理回路の研究』として紹介された[8]。

翌 2013 年、吉川は AQFP についての論文を 7 報、立て続けに発表した[9],[10],[11],[12],[13],[14],[15]。

2019 年には AQFP で 8 ビットの加算器を製作し、冷却エネルギー込みで半導体 IC の 1/1000 のエネルギー消費を達成した[16]。これは日経産業新聞と日刊工業新聞で報道された[17],[18]。内容は次のようなものだ。

「横浜国立大学先端科学高等研究院の研究グループは、新型の超伝導回路を試作し、超低消費電力動作の実証試験に成功した。超伝導回路「断熱的量子パラメトロン(AQFP)」をゆっくりと動作させ、回路に流れる電流や電圧を小さくして回路の消費電力を極限まで減らす。これによりコンピュータの消費電力を従来の 1000 分の 1 以下に抑える」[17]

なお、ここでの「ゆっくり」は「5GHz」だ。

2020 年には AQFP を用いた演算消費電力 1.4zJ ( $10^{-21}$ J, ゼプト・ジュール) の集積回路を製作した[19]。そしてこの発表をもとにして 2021 年、『超伝導コンピュータが離陸へ スパコンの電力を 1/2000 に 量子コンピュータの制御にも利用』という記事が日経クロステックと日経エレクトロニクスに掲載された。両者は同一の記事だ[20], [21]。

こうなると、どこまでエネルギー消費を下げられるのか、下限はあるのか、という点が気になってくる。もし下限があるとして、そこに到達すれば、理論上の最低消費エネルギーコンピュータが実現するはずだ。ところが、どんな物にも熱雑音という消せないエネルギーがあって、これより小さなエネルギーでは回路を動かすことができない。

理論的には、論理回路を可逆回路にすれば熱雑音の壁を乗り越えられることがわかっている。可逆回路とは、演算する前の信号を入れるインプット側と結果の出るアウトプット側を入れ替えても計算できる回路だ。量子磁束パラメトロンを可逆にした『可逆 AQFP(RQFP: Reversible Quantum Flux Parametron)』の可能性は、すでに吉川らが明らかにしており[22]、

今は、これを実現するための研究を開始している。これが現在地だ。

吉川は現在、教授として先端科学高等研究院(IAS)の副高等研究院長を務める傍ら、主任研究者として超省エネルギープロセッサ研究ユニットを率いている。

ここで、吉川の研究テーマの変遷を、研究テーマ別の論文数で示した図を掲げる(図1)。

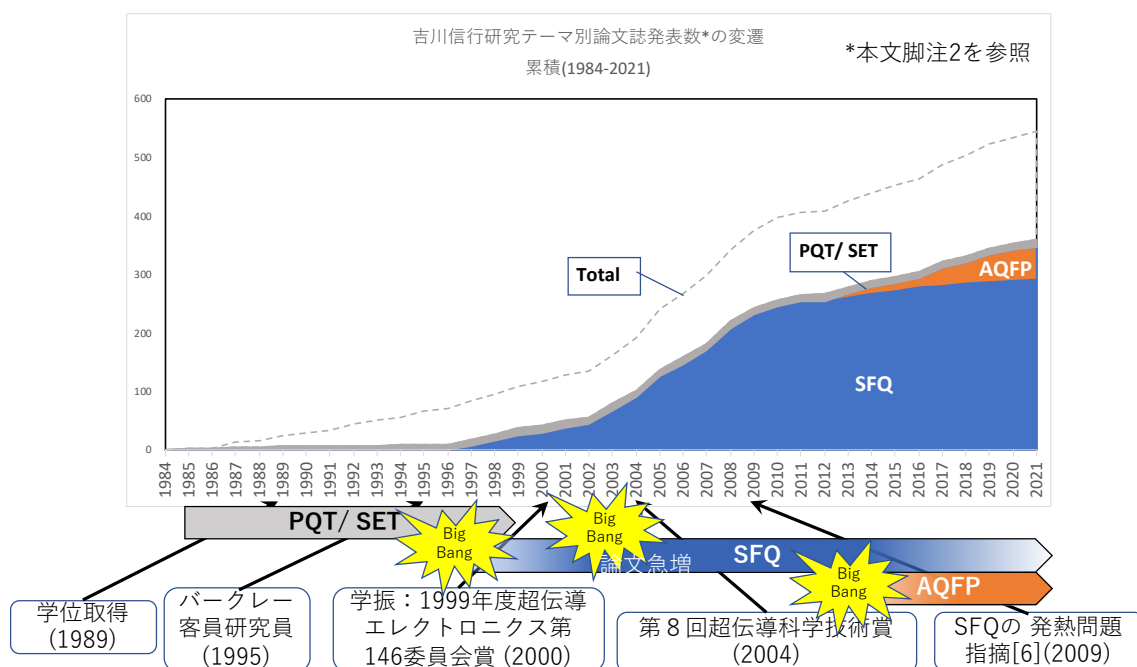
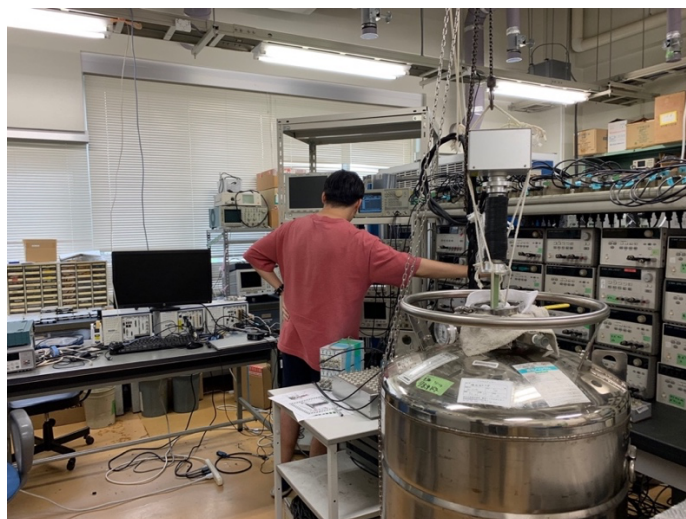


図1. 吉川信行 研究テーマ別論文発表数の変遷 累積(1984-2021)

また、次に IAS での研究風景を示す。



(写真1) IAS での研究風景 (中川撮影)

思えば、一人の高校生が『2001年宇宙の旅』に出会ってから44年。高校生はHALのようなコンピュータを作る、と言う夢を持って横浜国大で情報工学を学び始めた。ここまでの旅は長く、順風のときも逆風のときも、どのような風が吹いたときでも研究を続けて来られたのは「自分が好きなことをやる。いつも楽観的である」を実践してきたからだという。好きなことなら苦勞ができる。楽観的なら立ち直れる。何事かを為そうという若い人には参考にしてほしいと願っている。

今、吉川は、高速性能のSFQと低消費電力のAQFPを組み合わせたコンピュータシステムを思い描いている。スーパーコンピュータのような大掛かりなシステムではなく、データセンタなど普通の大型コンピュータや量子コンピュータの隣で、SFQとAQFPのコンピュータが動いているシステム。このようなシステムを10年後には実現したいという。

うまくいけば、超高速極低消費エネルギーの人工知能やデータセンタが横浜国大の技術で実現するだろう。ひとつ心配があるとすれば国際的な研究競争だ。これまでずっと日本＝横浜国大＝吉川がトップを走ってきたが、今や豊富な研究資金を投入する米国と中国に猛追されている。地球環境への関心が高まり、エネルギー価格が高騰する社会となった今、米国と中国が研究投資を急増させても不思議はない。日本も対抗して研究資金を確保するのか、できるのか。それとも共同研究で成果を分け合うのがいいのか。

答えを見つけたとき、横浜国大発の、地球に優しく人にも優しいサイバーフィジカルシステム、HALを凌ぐ高度な人工知能に手が届く。そのときを目指して『超伝導コンピュータ、極限省エネルギーへの旅』はまだまだ続く。

映画の話に戻った次いでに、初デートの後日談に触れておこう。

あのとき吉川が心をときめかせた少女は、今も同じ言葉を口にするそうである。「何がそんなに面白かったの。さっぱりわからなかったじゃないの」と、過去形にして。奥様にとっても、生涯忘れられない出来事だったのである。

#### 参考文献

- [1] 吉川信行 “微小超伝導接合における新しい量子効果とその応用” 博士論文, 横浜国立大学 (1989)
- [2] 横浜国立大学 HP 研究者総覧 吉川信行  
[https://er-web.ynu.ac.jp/html/YOSHIKAWA\\_Nobuyuki/ja.html](https://er-web.ynu.ac.jp/html/YOSHIKAWA_Nobuyuki/ja.html)
- [3] Zhong John Deng et al. “Data-Driven Self-Timed RSFQ Digital Integrated Circuit and System” IEEE Trans. Appl. Supercond., (7) pp. 3634 – 3637, June (1997).
- [4] Zhong John Deng et al. “Data-Driven Self-Timed RSFQ High Speed Test System” IEEE Trans. Appl. Supercond., (7) pp. 3830 – 3833, December (1997).



- [5] 日経産業新聞 “横浜国大、論理回路、速度 70 倍に、米カリフォルニア大とー超高速計算機に応用” 1997/03/05.
- [6] 吉川信行 “単一磁束量子回路を制御回路とする量子計算システム” 応用物理 78 (1), 22 – 26, 2009.
- [7] 「ファインマン計算機科学」(編) A.ヘイ, R. アレン; (訳) 原康夫, 中山健, 松田和典、岩波書店(1999).
- [8] “超電導デジタルデバイス「極限的低消費電力動作を可能とする断熱型 QFP 論理回路の研究” 超電導 Web21, 8 – 10, 2012 年 10 月
- [9] K. Inoue, N. Takeuchi, K. Ehara, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa “Simulation and Experimental Demonstration of Logic Circuits Using an Ultra-low-power Adiabatic Quantum-flux-parametron” “IEEE Trans. Appl. Supercond. 23 (3), 1301105, June (2013)
- [10] Takeuchi Naoki, Ozawa Dan, Yamanashi Yuki, Yoshikawa Nobuyuki “An adiabatic quantum flux parametron as an ultra-low-power logic device” Supercond. Sci. Tech., 26 (3), 035010, (2013).
- [11] Mukaiyama Takashi, Takeuchi Naoki, Yamanashi Yuki, Yoshikawa Nobuyuki “Design and demonstration of an on-chip AC power source for adiabatic quantum-flux-parametron logic” Supercond. Sci. Tech. 26 (3), 035018, (2013).
- [12] N. Takeuchi, Y. Yamanashi and N. Yoshikawa “Measurement of 10 zJ energy dissipation of adiabatic quantum-flux-parametron logic using a superconducting resonator” Appl. Phys. Lett. 102 (5), 052602, (2013).
- [13] N. Takeuchi, Y. Yamanashi and N. Yoshikawa “Simulation of sub-kBT bit-energy operation of adiabatic quantum-flux parametron logic with low bit-error-rate” Appl. Phys. Lett. 103 (6), 062602, (2013).
- [14] T. Mukaiyama, N. Takeuchi, K.Ehara,K.Inoue,Y. Yamanashi and N. Yoshikawa “Operation of an Adiabatic Quantum-Flux-Parametron Gate Using an On-chip AC Power Source” IEEE Trans. Appl. Supercond., 23 (4) 1301605, August (2013).
- [15] N. Takeuchi, K. Ehara, K. Inoue, Y. Yamanashi and N. Yoshikawa “Margin and Energy Dissipation of Adiabatic Quantum-Flux-Parametron Logic at Finite Temperature” IEEE Trans. Appl. Supercond., 23 (3), 1700304, June (2013).
- [16] Takeuchi Naoki, Yamae Taiki, Ayala Christopher L., Suzuki Hideo, Yoshikawa Nobuyuki “An adiabatic superconductor 8-bit adder with 24k(B)T energy dissipation per junction” Appl. Phys. Lett., 114 (4), 042602, (2019).
- [17] 吉川信行、“消費電力 1/1000 以下 コンピュータ 超電導集積回路で実証 横浜国大”、日刊工業新聞 2019/2/4.
- [18] 吉川信行、竹内尚輝、“集積回路に超電導チップ 消費電力 1000 分の 1 以下 横浜国大データ拠点に応用”、日経産業新聞、2019/3/28.

- [19] Christopher L. Ayala; Tomoyuki Tanaka; Ro Saito; Mai Nozoe; Naoki Takeuchi; Nobuyuki Yoshikawa “MANA: A Monolithic Adiabatic iNtegration Architecture Microprocessor using 1.4zJ/op Superconductor Josephson Junction Devices” IEEE J. Solid-st. circ., (56), 4, pp.1152-1165, 2021
- [20] “【NE Special Report】超電導コンピューターが離陸へ、スパコンの電力を 1/2000 に一量子コンピューターの制御にも利用” 日経クロステック 2021/04, pp18-21.
- [21] “【Hot News】超電導コンピューターが離陸へ、スパコンの電力を 1/2000 に一量子コンピューターの制御にも利用” 日経エレクトロニクス 2021/04.
- [22] N. Takeuchi, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa “Reversible logic gate using adiabatic superconducting devices” Scientific Reports (4) 6354, September (2014)

(先端科学高等研究院 研究戦略企画マネージャー 中川正広)