

## TODAY

量子スピントロニクスセンサの開発  
— 仲間の想いととともに —

東北大学大学院工学研究科  
応用物理学専攻  
教授 大兼 幹彦

この春に、東北大学応用物理学専攻の教授職を拝命しました。新しい気持ちで研究、教育に取り組んでおりますが、同時に大きな責任も感じています。

私は、1994年に東北大学工学部に入学し、1997年に同応用物理学科の宮崎照宣教授の研究室に配属されました。宮崎教授は、言わずと知れた“室温トンネル磁気抵抗効果（TMR効果）”の発見者であり、磁性（スピン）とエレクトロニクスを融合した研究分野である、スピントロニクスのパイオニアです。大学4年次の研究室選択の際、私は他の研究室を第一志望としていましたが、成績が振るわなかったために一次配属は叶わず、二次配属を決めるじゃんけんにも負けた結果、宮崎研究室に配属されたのです。これが、現在も続けているスピントロニクス研究に携わることになったきっかけです。

宮崎教授に与えられた卒業研究のテーマは、TMR効果に関するものでした。学部卒業後、修士、博士ともに関連する研究テーマで学位を取得し、博士課程修了後も20年近く同テーマの研究を続けています。卒業研究のテーマを、キャリアを通じて行う研究者は非常に稀であり、ややもすると、新しいテーマを考えることができない研究者であると、落第の烙印を押されてしまうのかもしれませんが、しかし、このTMR効果は、未だに学術的にも工学的にも深耕が必要な物理現象なのです。そのようなテーマに巡り合えたことは、私の人生の最も大きな幸運であり、宮崎先生には感謝しきれません。

博士課程修了後は、宮崎研の助教を務め、宮崎先生と准教授の安藤康夫先生とともに、TMR効果を磁気ランダムアクセスメモリ（MRAM）やハードディスク（HDD）の磁気ヘッドに応用するための研究を

推進しました。宮崎先生のご退職後、2007年に安藤先生が教授に昇任され、私も2010年に准教授へと昇任しました。当時のミッションは、MRAMやHDDヘッドの次の世代のスピントロニクスデバイスを、いかに創出するかということでした。安藤先生は、当時は誰もが実現不可能と考えていた、非常に微弱な生体磁場をTMR効果で検出するという目標を掲げたのです。目標実現のために、ユニカミノルタ社、東北大学の医学部とともにJSTのプロジェクトを2011年に立ち上げ、約10年におよぶ研究開発を実施しました。その結果、TMR効果を利用した磁気センサ（量子スピントロニクスセンサ）の感度は格段に向上しました。現在では、研究開始当初に掲げた生体磁場を検出するという目標を達成しており、ヒトの心臓磁場はリアルタイムで測定が可能になり、脳磁場も積算処理は必要であるものの室温下での検出に至っています。安藤先生からは、大きく一步を踏み出す勇気の大切さを学びました。

今年度からは、私が伝統ある研究室を引き継ぐことになりました。宮崎先生が芽を出し、安藤先生が育てた苗を、開花させる役が回ってきたわけです。TMR効果を利用したデバイスを社会実装することが私の果たすべき役割です。最近では、お弟子さんが研究室を引継ぐことも少なくなっていますが、研究の継続性という観点では良い面もあると感じています。一方、物事を継続することの難しさは、我々自身が強く感じているところです。自分が変化し続けることで初めて継続が可能になるという、松尾芭蕉の不易流行の精神を大事にしたいと考えています。

TMR効果の発見から約30年もの歳月が経ち、これまでに研究に関わった数多くの学生、共同研究者の想いや夢を背負っています。幸いにして、5月にNEDO先導研究プロジェクト「量子スピントロニクス脳磁計の開発」が採択され、量子スピントロニクスセンサを脳情報取得デバイスに製品応用するチャンスが与えられました。「いつでも、どこでも、誰でも」脳磁信号を取得可能にするデバイスは、我々のみが実現可能な夢の素子です。皆の想いととともに、この夢を叶えたいと思っています。

## チタン合金の低温線形摩擦接合（低温 LFW） — 航空産業での巻き返しの一助として —

大阪大学 接合科学研究所

副所長・教授 藤井英俊、特任講師 青木 祥宏  
特任教授 潮田 浩作、招へい教授 川井 昭陽

Ti 合金の新規接合技術として、図 1 に示す線形摩擦接合（LFW: Linear Friction Welding）が注目を浴びている。線形摩擦接合は、被接合材を互いに押し付け、片方の被接合材を接合界面に沿って線形運動させて、擦りあわせた際に生じる摩擦熱を熱源とした固相接合法である<sup>1)</sup>。

このプロセスの歴史は古く、LFW プロセスを最初に提案した特許は、1929 年に登録されたが<sup>2)</sup>、1980 年代初期になって、主に航空機材料である Ti、Ni 合金を中心に本接合法の開発が進められた。現在、航空機用エンジン部品である翼 (blade) ディスク (Disk) を一体化したブリスク (Blisk) として採用されている<sup>3, 4)</sup>。この方法を用いると、ブリスクの修復も可能となるのが大きなメリットになる<sup>5)</sup>。

LFW を使用したニアネット形状の部品製造のコンセプトがボーイング社によって提案され<sup>6)</sup>、このコンセプトを用いると、単純な形状の部品から多数の構造を組み立てることが可能となる。これに対し、中実部品から機械加工する場合、ニアネットシェイプの鍛造品が非常に高価であるとともに、その多くの部分を削り出し消失することになる。

LFW は、従来の加工法と比較して最大 90% の材料費の節約をもたらす可能性があり、少量のニアネットシェイプコンポーネントの製造が LFW の次の有望なアプリケーションとなる<sup>7)</sup>。図 2 に示すように、ブレードの部分に近い形状を LFW で接合し、その部分のみを加工することで大幅なコスト削減につながる。

Ti 合金の LFW に関するこれまでの研究は、すべて界面温度が  $\beta$  相変態温度を超える条件下で実施されてきた。 $\beta$  相変態点以上の温度で接合を行うと、冷却時にマルテンサイト ( $\alpha'$ ) あるいはウィドマ

ンシュテッテン構造の組織形成を引き起こし、等軸組織と比較すると、継手の延性、韌性、および弾性率を低下させると言われている。

最近、筆者らによって、界面温度は LFW 中に加えられた圧力によって制御できることが明らかにされた。圧力を上昇させると、温度が低下するため、界面温度を  $\beta$  相変態温度以下に制御することが可能である<sup>8-10)</sup>。



図 2 Ti-6Al-4V 合金一体型ブレードディスク

図 3<sup>11)</sup> は、筆者らが健全な接合部を製造するために、さまざまな圧力と周波数を変化させ、接合温度に及ぼす影響を調査した結果である。横軸は周波数である。この時、振幅は 2mm であるが、振幅を変化させても周波数と同様な効果がある。

図 3(a) に示すように、周波数、振幅を変化させても温度は変化しない。変化するのは、図 3(b) に示すように昇温速度である。周波数、振幅を増加させると、昇温速度が増加する。この時、短時間で接合が完了し、界面以外の部分はほとんど昇温しないため、接合後の冷却速度も同時に大きくなる。

接合部組織について、低印加圧力 (50 MPa) の場合には、界面温度が  $\beta$  相変態温度を超えるため、動的再結晶した  $\beta$  相から  $\alpha$  相への相変態が生じ、図 4(a) に示すように、主に接合中心部に  $\alpha$  ラメラ組織が形成される。一方、550 MPa の高印加圧力では、界面温度が  $\beta$  トランザス変態温度よりはるかに低いいため、図 4(b) に示すように、 $\alpha$  相の動的再結晶によ

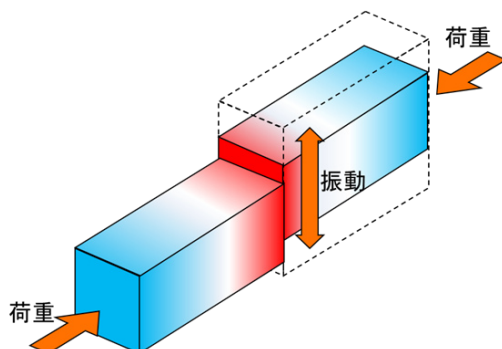


図 1 線形摩擦接合 (LFW)

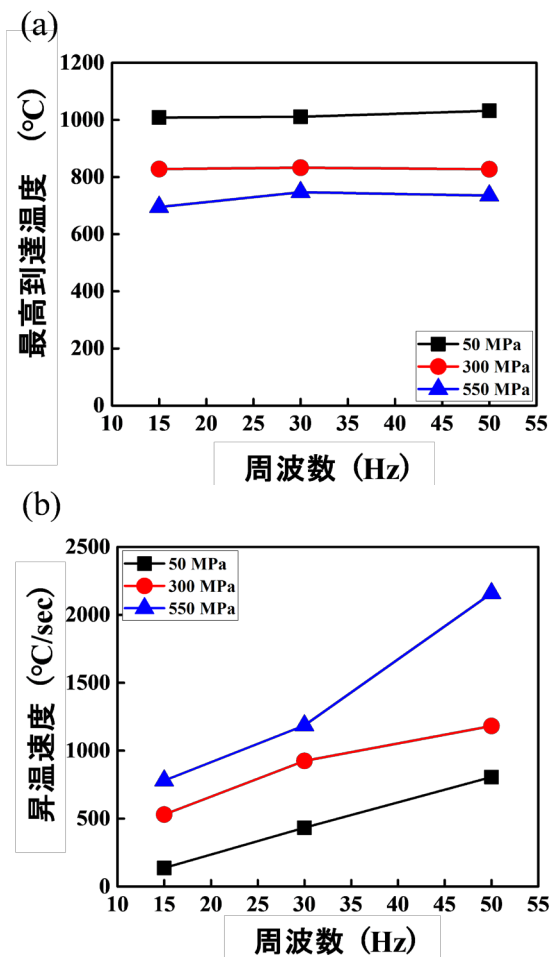


図3 接合中の (a) 最高到達温度および (b) 昇温速度に及ぼす印加圧力、周波数の影響<sup>11)</sup>

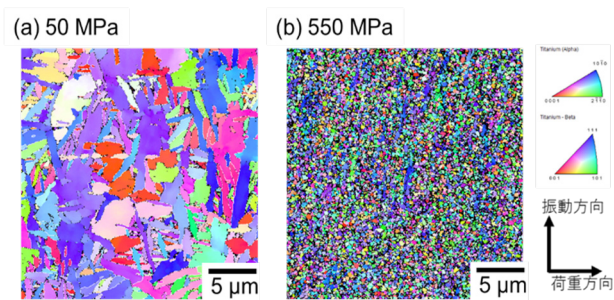


図4 LFW 接合部断面マイクロ組織のIPF像<sup>10)</sup>

りランダムな方位を持つ  $0.2 \mu\text{m}$  の超微細な  $\alpha$  等軸結晶粒が形成される。これは、低温 LFW で得られる特徴的な組織である。

一般に、チタン合金では、室温～200℃程度において、引張応力が一定時間保持される Cold Dwell 疲労によって、疲労寿命が著しく低下することが報告されている。これは、引張方向に  $\alpha <0001>$  が配向した (コロニー、あるいは micro-texture) 組織の存在により、疲労破壊が生じるためと考えられている。

2017年、グリーンランド上空を飛行中に起こったファンハブの破損という飛行機事故が起こったことで、再発を防止するため、Cold Dwell 疲労に大い

に注目が集まっている。このような問題を解決するために、Ti-6Al-4V 合金を用い低温 LFW を行い、接合体の Cold Dwell 疲労特性を調査した。

同時に、母材の疲労特性についても検討を加え、Cold Dwell 疲労特性を  $\alpha <0001>$  コロニーの観点から考察した。

供試材には、厚さ 6 mm と 50 mm の Ti-6Al-4V 圧延材を用いた。後述するように、厚さ 6 mm の方が加工度が高く、 $\alpha$  コロニーが少ない材料となっている。それぞれの母材から 5 mm 厚×20 mm 幅×64 mm 長の試験片を製作し、印加圧力 50 MPa と 550 MPa (周波数 15 Hz、振幅 2 mm) の 2 つの条件で LFW を実施した。

荷重制御の疲労試験を、Cold Dwell 疲労 (2 s 負荷 / 120 s 保持 / 2 s 除荷の台形波) と cyclic 疲労 (2 s 負荷 / 2 s 除荷の三角波) のモードで、母材と継手に対して実施した。最大応力  $\sigma_{\text{max}}$  を、引張試験で得られた 0.2% 耐力  $\sigma_{0.2\%}$  の 97~100% とした。

厚さ 6 mm の母材と継手の S-N 線図を図 5 に示す。縦軸には、最大応力を 0.2% 耐力で規格化した値を用いた。Cold Dwell 疲労寿命は、規格化応力 100% の時には、cyclic 疲労と比較していずれも 1/10 程度に低下した。一方で、継手の Cold Dwell 疲労寿命は接合条件 (印加圧力) に依らず、母材のそれと基本的に同じであった。破断位置もすべて母材部であり、接合によって Cold Dwell 疲労寿命が影響を受けることがない。これは極めて有用な結果である。

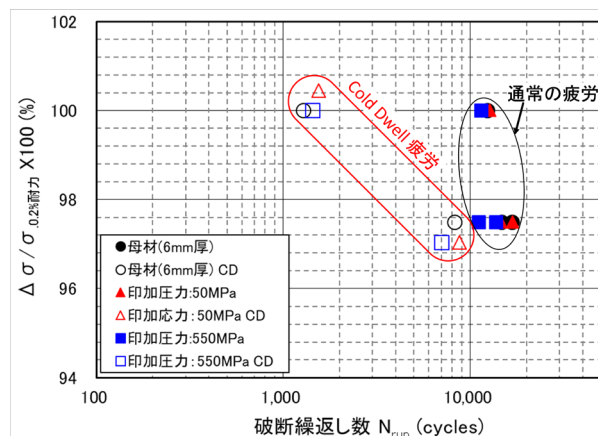


図5 厚さ 6 mm の母材と継手の S-N 線図

一方、図 6 に厚さ 50 mm の圧延材の板厚中央部、板厚表層部から切り出した母材、および厚さ 6 mm の圧延材の中央部から切り出した母材の S-N 線図を示す。通常の疲労 (cyclic 疲労) 寿命 (中実のプロット) は、板厚 50 mm と板厚 6 mm 材で、それぞれの規格化応力に対して、ほぼ同等の結果が得られた。これに対して、Cold Dwell 疲労寿命は、板厚 50 mm 材の中央部から切り出した母材は、規格化応力 100% の時に、板厚 6 mm 材のそれより、さらに 1/3 ~

1/4 程度に低下した。一方で、板厚 50 mm 材の表層部から切り出した母材は、板厚 6 mm 材とほぼ同等であった。

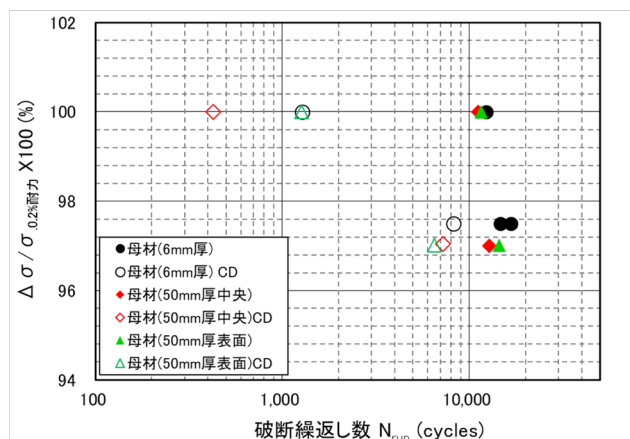


図 6 厚さ 50 mm の圧延材母材の S-N 線図

図 7 に、厚さ 50 mm と厚さ 6mm の母材の中央部の EBSD 解析による 3 次元 IPF(inverse pole figure) マップ（結晶方位は観察面に依らず RD(圧延方向)で色付け)を示す。(a)の 50mm 母材では、赤い  $\alpha <0001>$  コロニーが圧延方向に伸長した扁平な組織が確認されており、(b)の 6mm 母材と比較してその差は顕著である。参考までに、厚さ 50 mm 材の表層部のミクロ組織は、厚さ 6 mm の母材のミクロ組織と類似しており、 $\alpha <0001>$  コロニーのサイズは小さくランダム化する傾向であった。したがって、Cold Dwell 疲労特性も優れていたと推察される。

以上の結果から、航空機エンジン部材の製造を行う際には、日本の得意とする熱間圧延のような、部材全体に対して十分に加工を加えることのできる方法を用いて配向性を弱めた部材を生産し、それらを用いて LFW 接合によって部材を製造することにより、Cold Dwell 疲労の低下の問題を根本的に解決できると考えられる。繰り返しとなるが、この時、LFW によって全く Cold Dwell 疲労が低下しないことが特徴である。

本稿では、Ti-6Al-4V 合金等を用いた LFW 継手において、Cold Dwell 疲労試験を実施し、母材破断を達成するとともに、母材の配向性の重要性を見出し、航空機エンジンのブリスクの長寿命化に繋がる新しい製造法を示した。これまで、日本の航空機産業は、アメリカやヨーロッパに遅れをとり、主導権を奪われているのが現状である。上述のように、日本の得

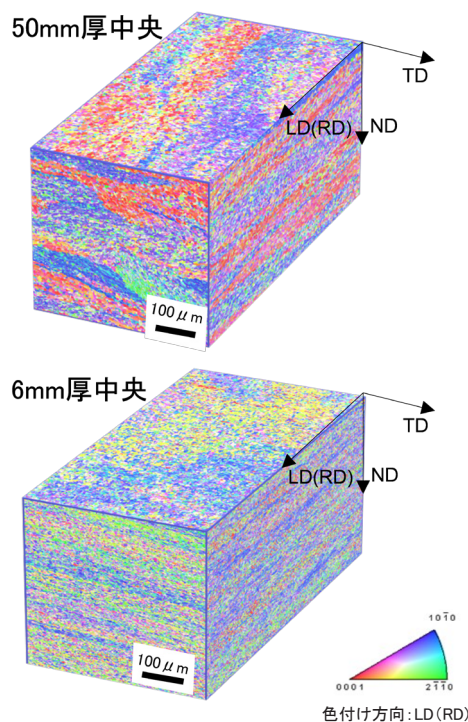


図 7 厚さ 50 mm と厚さ 6mm の母材の中央部の EBSD 解析による 3 次元 IPF(inverse pole figure) マップ（結晶方位は観察面に依らず RD(圧延方向)で色付け)

意とする、熱間圧延、摩擦接合などの技術を組み合わせることにより、Cold Dwell 疲労特性や製造コストなどの問題が一気に解決できる技術を核として、日本が少しでも、当該分野において巻き返すきっかけとなることを望んでいる。

- 1) 藤井 英俊, “LFW (線形摩擦接合)”, 溶接学会誌, 90, 7 (2021) 507-516.
- 2) I. Bhamji, M. Preuss, P. L. Threadgill and A. C. Addison: Solid state joining of metals by linear friction welding, a literature review, Materials Science and Technology, 27(2011), 2-12.
- 3) M. M. Shtrikman: Linear friction welding, Weld Int., 24 (2010), 563-569.
- 4) A. M. M. Garcia: “BLISK fabrication by linear friction welding”, Advances in Gas Turbine Technology, (2011), 411-34.
- 5) A. Mateo, M. Corzo, M. Anglada, J. Mendez, P. Villechaise, J. P. Ferte and O. Roder: Welding repair by linear friction in titanium alloys, Mater. Sci. Technol., 25, 7 (2009), 905-913.
- 6) K. T. Slattery: The Boeing Company: Structure assemblies and preforms therefor formed by linear friction welding, US Patent 7225967B2, published 5 June 2007.
- 7) A. C. Addison: Linear friction welding information for production engineering, TWI Industrial Member Report Summary 961/2010, TWI, Granta Park, UK, 2010.
- 8) Yasuhiro Aoki, Ryosuke Kuroiwa, Hidetoshi Fujii, Gen Maruyama and Masanori Yasuyama: Linear friction welding of medium carbon steel at low temperature, ISIJ Int., 59, 10 (2019), 1853-1859.
- 9) Ryosuke Kuroiwa, Huihong Liu, Yasuhiro Aoki, Sungook Yoon, Hidetoshi Fujii, Gen Maruyama and Masanori Yasuyama: Microstructure control of medium carbon steel joints by low-temperature linear friction welding, Sci. Tech. Weld. Join., 25, 1 (2020), 1-9.
- 10) Jeong-Won Choi, Yasuhiro Aoki, Kohsaku Ushioda and Hidetoshi Fujii: Linear friction welding of Ti-6Al-4V alloy fabricated below  $\beta$ -phase transformation temperature, Scripta Mater., 191 (2021), 12-16.
- 11) Jeong-Won Choi, Yasuhiro Aoki, Kohsaku Ushioda and Hidetoshi Fujii: Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of linear friction welded Ti-6Al-4V alloy, J. Manuf. Proc. 75 (2022) 651-663.

The Japan Research and Development Center for Metals  
JRCM NEWS / 第 432 号

内容に関するご意見、ご質問は JRCM 総務企画部までお寄せください。  
本書の内容を無断で複写・複製・転載することを禁じます。

発行 2022 年 12 月 1 日  
 発行人 小紫 正樹  
 発行所 一般財団法人 金属系材料研究開発センター  
 〒 105-0003 東京都港区西新橋一丁目 5 番 11 号 第 11 東洋海事ビル 6 階  
 T E L (03)3592-1282 (代) / FAX (03)3592-1285  
 ホームページ URL <http://www.jrcm.or.jp/>  
 E-mail [jrcm@oak.ocn.ne.jp](mailto:jrcm@oak.ocn.ne.jp)