

薄板複雑形状の構造物に関する自動溶接システムの開発

Development of an Automatic Welding System for the Thin Plate Structures with Complex Geometries



落岩 崇*
Takashi Ochiwa



福士 雄祐**
Yusuke Fukushi



小林 将己***
Masaki Kobayashi



森 貴之***
Takayuki Mori



小林 泰幸***
Yasuyuki Kobayashi



博士(工学) 武藤 厚俊****
Dr. Atsutoshi Muto

要 旨

世界規模での気候変動の影響が指摘されており、パリ協定をはじめとした国際的な気候変動対策が取り組まれている。気候変動対策に対する機運を受けて、各種電気自動車の車載用電子部品やバッテリー等に用いられる各種フィルム製品の需要が拡大している。当社では、フィルム製造装置を手掛けており、その生産活動におけるCO₂排出量の削減や、生産能力の向上が求められる。これらの実現のため製造工程の自動化に取り組み、横延伸機で用いられるファンの溶接工程の自動化システムを開発した。自動溶接システムによりCO₂排出量の削減と製造時間の短縮の可能性が示唆された。

— Synopsis —

Since the impact of global climate change has been pointed out, several international engagements on climate change migration have been established, including Paris agreement. In order to the mitigation, particular film products for electronic components and batteries are mounted on electric vehicles are focused, demand for such film increases. Hence, as a manufacturer of film producing equipment, Japan Steel Works have to raise production efficiency of the equipment, reducing CO₂ emissions during its manufacturing process. To achieve the objective, we are currently working on automating various manufacturing processes. As part of the activities, an automation system for welding process of fan for laterally stretching machine was developed. By applying the developed system, it is found that CO₂ emissions and manufacturing times of welding processes of fan may reduce.

*: イノベーションマネジメント本部 先端技術研究所 /Advanced Technology Laboratory, Innovation Management Headquarters

** : 元 イノベーションマネジメント本部 先端技術研究所 /former Advanced Technology Laboratory, Innovation Management Headquarters

*** : 日鋼テクノ(株) /Nikko Techno Co., Ltd.

**** : イノベーションマネジメント本部 /Innovation Management Headquarters

1. 緒言

近年、世界規模での温室効果ガス排出による気候変動の影響が指摘され、気候変動抑制の取り組みが重要となってきた。気候変動抑制の取り組みとして、2015年にパリ協定が採択され、「1.5℃目標」が掲げられた。COP26で世界各国は2050年から2070年までのカーボンニュートラル(CN)実現を目標として表明している。さらに、2023年UAEドバイにて開催されたCOP28では、パリ協定の長期目標達成に向けた世界全体の進捗状況を5年おきに確認し、各国の取り組みを強化するための情報提供を行う仕組み(GST)の実施や温室効果ガスの排出削減目標(NDC)強化が合意された。これに伴い、世界各国ではNDC目標を掲げている(表1)⁽¹⁾。日本では2050年までにCN実現に加え、2030年までに2013年基準で、温室効果ガスを46%削減する目標を掲げている。この目標に対し2021年では2013年比で25%削減を達成しており、着実にCO₂削減を進めている(図1)^{(2)・(3)}。この中で、当社は2022年に気候関連財務情報開示タスクフォース(TCFD)に賛同を表明し、気候変動に係るリスクが企業活動にどのように影響を与えるかの情報開示に取り組んでいる。この取り組みの中で具体的な目標として、生産活動においてCO₂排出量を2013年度比で2025年までに45%削減、2030年までには60%削減を目指し、活動を行っている(表2)⁽⁴⁾。

	NDC目標 (2030年目標)		(参考) 2013年比の 2030年目標の水準	カーボンニュートラル目標 (ネットゼロ達成時期)
	削減率	基準年		
英国	68%以上	1990年	54.6%減	2050年
ブラジル	50%	2005年	48.7%減	2050年
日本	46%	2013年	46.0%減	2050年
米国	50~52%	2005年	45.6%減	2050年
EU	55%	1990年	41.6%減	2050年
韓国	40%	2018年	23.7%減	2050年
中国	65%	2005年	14.1%増	2060年
インド	45%	2005年	99.2%増	2070年

表1 世界各国のNDC目標・CN目標

また、気候変動抑制対応のため、ガソリン車からxEVへ移行する機運が高まっている。これに伴いリチウムイオン電池(LiB)やフィルムコンデンサ、光学フィルム等の高性能フィルムの市場が拡大すると予測されている。特に電子機器用途のフィルム市場は2026年までに2兆円を超えると予測されており⁽⁵⁾、各種フィルム製造装置の需要が考えられる。こうした需要に対応するため、当社の生産性の向上・改善を検討している。フィルム製造装置の中で、部品点数が多く製造に時間を要するものとして横延伸機のオープンに用いられるファンが挙げられる。このファンは曲面状の翼を複数接合する必要があり、この組立に要する時間も少なくない。加えて、溶接手順は複雑であり、このスキル習得にかかる期間も同様であるため、この溶接工程を自動化し、属人性のない工程とする

ことが望ましい。さらに自動化を実現すれば、深夜や休日などの人の稼働しない時間帯における生産の可能性が生じる。品質の観点では、自動化による品質のばらつきの抑制も期待される。こうした自動化のメリットとともに、工程の時間短縮を目的に本稿では、溶接工程の自動化システムを開発した。以下に詳細を報告する。

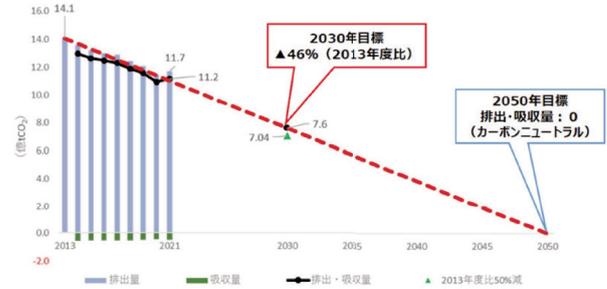


図1 日本の温室効果ガス削減目標とその進捗

分類	管理指標	目標値 (年度末)	
		2025年	2030年
生産活動におけるCO ₂ 排出量削減 (Scope1,2)	CO ₂ 排出量削減率 (2013年度比)	45%削減	60%削減
再生可能エネルギーの導入促進	全ての使用エネルギーに対する再生可能エネルギーの割合 (Scope1, 2)	25%以上	40%以上

表2 当社の気候変動抑制に関する目標

2. 横延伸機オープンの構造

図2に横延伸機オープン構造の模式図を示す。当社オープンではモジュールと呼ぶユニットを複数連ねた構造をしている。このモジュールは幅方向互い違いの対に配置され、片面にはオープン内部にアクセスするための扉があり、もう一面にはファンとそのモータが設置される。ファンとそのモータは1モジュールにつき2セットあり、上下に取り付けられている。このファンはヒータにて加熱された空気をオープン内に所定の風速で供給する。この供給される熱風により、各モジュール内はフィルムの延伸に必要な設定温度に調整される。

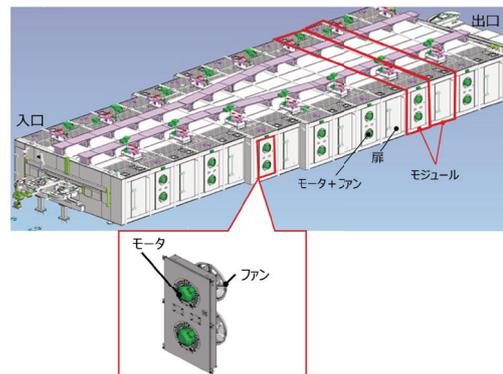


図2 オープン構造の模式図

3. 自動溶接システム

3.1 従来の溶接方法

上記の通り、当社のオープンには1ラインに対し数十のファンが必要になる。これらのファンは図3のような複数の複雑な形状をした翼を有しており、溶接にて組み立てられる。このファンの製造工程は①段取り工程 ②リング溶接工程 ③翼溶接工程 ④ひずみ取り工程の大きく4つに分けられる。

①段取り工程では、各部品の洗浄と孔あけ等の機械加工を施し、リングと呼ぶ皿状の部品1対を接合し治具を用いて仮固定する。②リング溶接工程では、①で仮固定したリングの外周部分をCO₂溶接にて溶接する。③翼溶接工程では、②で溶接したリングに複数の翼を取り付け、専用の治具にて仮固定する。その後、翼に対して片面ずつCO₂溶接を行う。④ひずみ取り工程では、溶接により薄板である翼にひずみが生じるため、この生じた変形をプレス機にて除去する。

今回開発したシステムは、特に①～③の溶接工程の自動化に該当する。

翼
(平板ではなく複雑な形状)

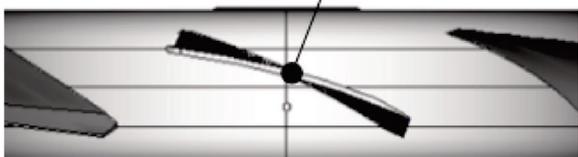


図3 ファンの翼の形状(側面)図

従来の溶接工程では、表3に示すようにファン1つの製造に30分以上を要するため、1ラインのフィルム製造装置に必要なファンの製造には多くの時間を必要とする。また、この翼の溶接は、溶接の相変化などに伴う体積変化による応力が生じ、大きな変形が発生する。これにより、後工程のひずみ取りや動バランス調整の工程にも多くの時間が必要となる。その結果、フィルム製造1ライン分のファンの製造には相応の時間が必要となり、溶接時間に応じた電力も加え、多くのCO₂排出相当の時間とエネルギーを要する。

工程		時間 (min)
リング 溶接工程	仮付け	5
	溶接	10
翼 溶接工程	仮付け	2
	溶接	17
合計時間		34

表3 溶接工程の所要時間

ファンの溶接は薄板かつ複雑な曲率が連続的に変化する形状の翼に対し、図3のような曲線のエッジに沿った溶接を行う必要がある。この動作と溶接による変形の抑制が自動化の課題である。本開発では、ロボットアームによる自動溶接を採用した。

3.2 開発した自動溶接システム

図4に自動溶接システムの模式図を示す。本システムでは、ファンの製造段取り工程から翼溶接工程までを自動化した。構成は、部品供給部と溶接部に分かれている。部品供給部は、段取りと溶接部への部品供給や仮固定したアセンブリ品の供給を行う。一方、溶接部はリング溶接と翼溶接を行う。溶接部にはロボットアームが3台配置され、2台は溶接を担い、もう1台はワークの固定・搬送を行う。溶接は溶着速度に優れリードタイムが短く、かつ薄板溶接と相性が良く、ランニングコストが低いCO₂溶接を採用する。ロボットアームの溶接動作は予め動作を記憶させ、その動作をトレースするように動作制御を行っている。これにより、必要部材をセットすることで、段取り工程から溶接工程までが自動化される。

図4に示す部品供給部と溶接部のリング溶接工程では、一般的なロボットアームを用いた自動溶接システムを採用している。一方で、溶接部の翼溶接工程では、薄板かつ複雑な曲率を持つ形状の翼を溶接するため、独自の手法を導入しており、以降は上記溶接工程の自動化について述べる。

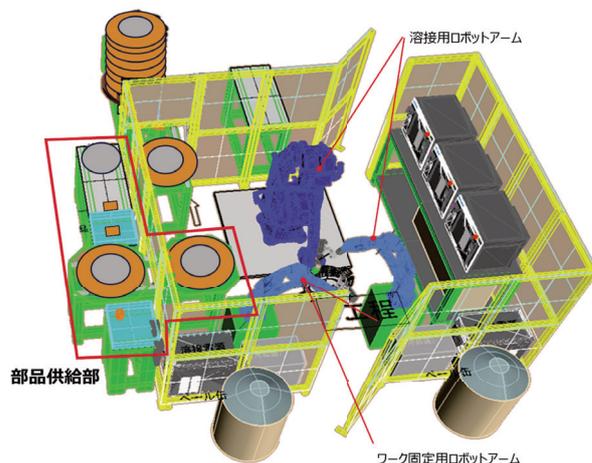


図4 自動溶接システムの模式図

当社で採用しているファンの翼は、単純な平板ではなく、風速や風量の最適化のため、複数の曲率が組み合わさった複雑な曲面形状である(図3)。そのため、従来のようにファンの片側ごとに溶接を行うと大きなひずみが生じる。このような溶接に対して、アーク溶接にてT継手を両側から同方向に溶接することで溶接のひずみが抑えられることが報告されている⁽⁶⁾。

そこで、当社では上記手法を改良し、ロボットアームを用いて複雑な曲率を持つ薄板に適用可能な独自の自動溶接システムを開発した。図5に溶接手法の模式図を示す。図に示す通り2台のロボットアームを協調動作させ、ファンの両面から同方向に溶接を行う。その際、溶接による変形の抑制を実現するには、溶接位置が両面で一致している必要がある。そこで、ファン外側曲率を内側曲率に合わせ、溶接速度を調整しながら協調制御することとした。ロボットアームの動作はオフラインティーチングにて制御しており、事前に三次元モデルを用いてロボットアーム動作の学習を行った。

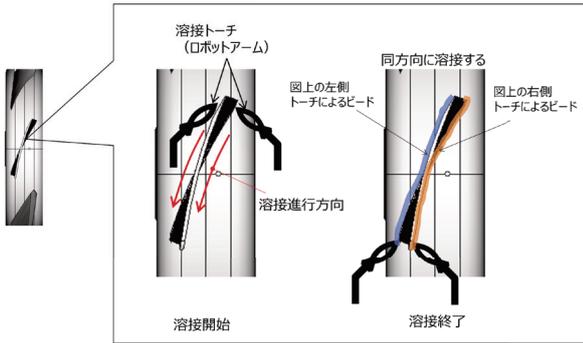


図5 溶接のひずみを抑える溶接手法の模式図

4. 開発した自動溶接システムの評価

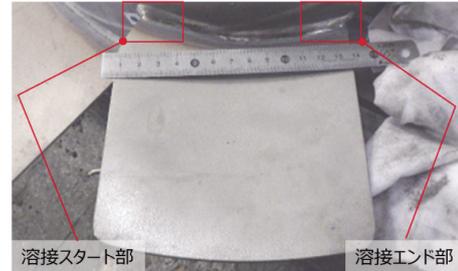
自動溶接システムにて製造したファンの品質評価を行った。評価試験は①溶接部の外観観察、②断面マクロ観察、③ひずみ量の測定、④実稼働時の振動測定、⑤溶接時間とCO₂排出量の算出を実施した。表4に本試験で使用したファンの製造条件(溶接条件)を示す。従来の手動による手法では、設定電流、電圧、ガス流量を表の通り固定し、平均溶接速度を平均40 cm/minとした。一方で、今回開発した自動溶接システムは電流、電圧、ガス流量は表の通り固定するが、溶接速度を可変にしており、両面の2つのトーチが溶接スタートから溶接エンドで同時に完了するように溶接パス内で速度を変更する方法で各ロボットアームのティーチングを行った。これらの条件で製造したファンに対し各種項目の評価を実施した。

	従来手法	本手法 (自動溶接システム)
溶接法	CO ₂	CO ₂
電流(A)	170	130
電圧(V)	26.5	22.1
ガス流量(L/min)	15	16
速度(cm/min)	40	可変(事前にティーチング)

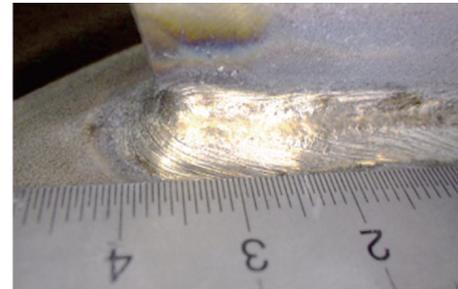
表4 溶接工程の所要時間

4.1 溶接部の外観観察

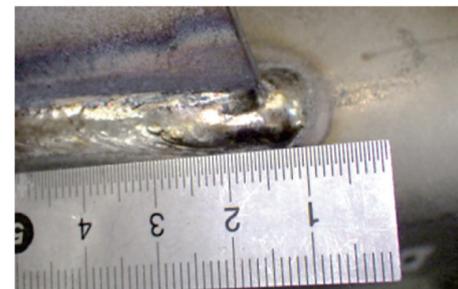
本システムで製造した溶接後の外観写真を図6に示す。ここで、(a)は翼の全体図、(b)は溶接スタート部の拡大図、(c)は溶接エンド部の拡大図である。結果はアンダーカット等の重大な欠陥はなく、溶接ビード形状は良好であった。また、スパッタやスケールも少なく全体的に良好な溶接であった。



(a) 翼の全体図



(b) 溶接スタート部の拡大図



(c) 溶接エンド部の拡大図

図6 溶接後の外観写真図

4.2 断面マクロ観察

図7に断面位置と、従来の手動による手法と本手法の溶接部断面のマクロ組織を示す。断面位置は図の通りであり、溶接した翼の中央部である。観察に使用した試験片はこの切断した部分を樹脂埋めし、研磨後にエッチングすることで作製した。従来の手動の手法と本手法は両者ともに融合不良はなかった。また、溶け込み量は、従来の手動による手法では良好な溶け込み量であることを確認できる。しかし、本手法で製造したものは内部の母材まですべて溶け込んでいる。翼の溶接部の強度には改善の余地があるものの、変形の抑制による後工程の短縮が本開発の目的である。最適な溶接条件の探索は実用化のための将来の課題とする。

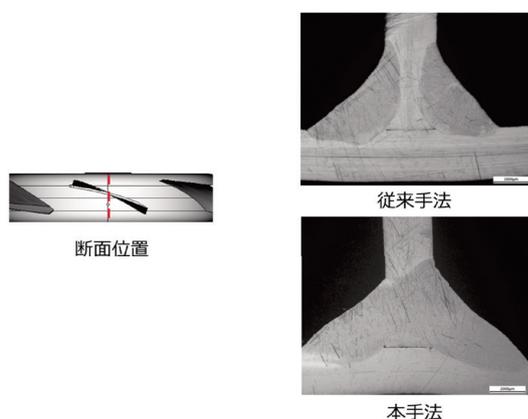


図7 断面位置とその断面マクロ観察画像

4.3 ひずみ量の測定

図8に、従来の手動による手法と自動溶接システムについて、溶接工程直後(ひずみ取り工程前)の三次元測定結果を示す。三次元測定は、ATOSを用いて実施し、三次元CADモデルを基準としてひずみ量を測定した。ATOSとは、2台のカメラを用いて非接触で3次元スキャンを行うシステムである。また、図中の青色部は、三次元CADモデルに対し紙面奥側への変形を示しており、赤色は紙面手前側に変形していることを示している。この結果から、溶接直後では従来品は最大4 mm、本システムは最大2 mmの変形が生じていることがわかる。また、手動による溶接では翼全体が変形しているのに対して、本システムでは翼の先端部のみに変形が生じている。従来に比べて溶け込み量が多く相変化領域が多いことに対し原因は不明だが、根元部分のひずみが少ないことが確認できた。従来の手動による手法に比べ変形量が小さいため、本システムの導入により後工程のひずみ取りと動バランス調整の作業時間の短縮につながるものと考えられる。

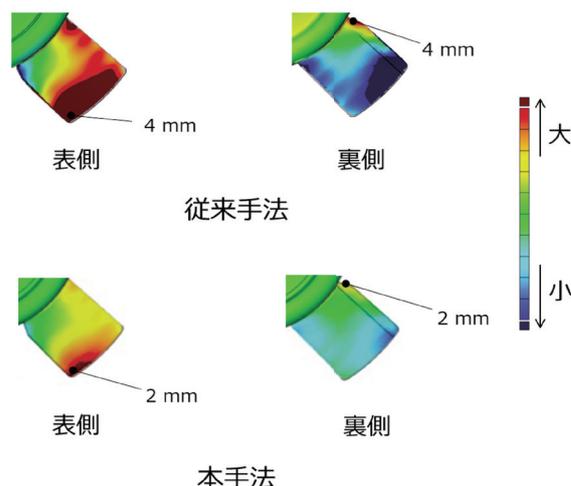


図8 三次元測定の結果

4.4 実稼働時の振動測定

ここでは、手動による溶接と本システムにて製造したファンをオープンに取り付けて振動測定を行った。測定風景を図9に示す。この時、3軸の振動センサを用いて、鉛直方向(図中のX方向)、フィルム搬送方向(図中の左方向<Y方向>)、フィルム延伸方向(図中の紙面手前方向<Z方向>)の3方向の振動を測定した。測定条件はモータ出力を50%、70%、90%、100%とした。本測定で得られた3方向の時系列振動データを合成し、時系列データの大きさの指標であるRoot Mean Square (RMS)演算を行った。測定結果を図10に示す。ここで、図10(a)は本システムの所定のモータ出力での3軸振動センサのデータ、図10(b)は(a)にて取得した各データを合成しRMS演算した結果で、横軸にモータ出力、縦軸にRMS値をプロットした図を示している。丸マークは従来の手動による手法を、三角マークは本システムを示している。

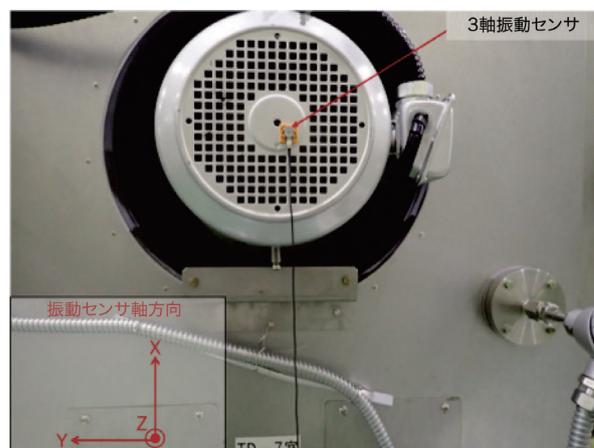


図9 振動値の測定風景

この結果より、モータ出力が大きくなると振動センサの値も大きくなることからわかる。また、従来の手動による手法と本システム間で大きな RMS 値の差はなく、同等の値であった。このことから本システムにて製造したファンは、振動特性が従来の手動によるファンと同等程度であることがわかる。

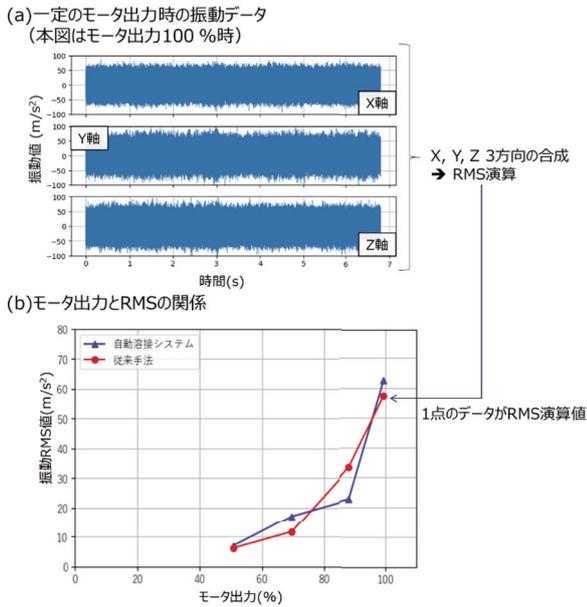


図 10 振動測定の結果

4.5 溶接時間と CO₂ 排出量の算出

従来の手動による手法と自動溶接システムの溶接に係るファン1つ当たりの製造時間と消費電力、CO₂ 排出量を表5に示す。この表の値は、実際のファン製造時の溶接条件から時間と消費電力および CO₂ 排出量を算出した。ここで、CO₂ 排出量の換算は、中国電力(株)の CO₂ 排出係数を基に算出した⁽⁷⁾。この結果より、本システムを活用した場合、製造時間は 55.9 % の短縮、消費電力と CO₂ 排出量は 43.7 % と大幅な削減が見込めることがわかる。

	時間 (h)	消費電力量 (Wh)	CO ₂ 排出量 (kg)
従来の手動による手法	0.57	2552.8	1.39
自動溶接システム	0.25	1436.5	0.783

表 5 溶接時の消費電力と CO₂ 排出量

5. 結 言

本稿では、環境対応と生産能力向上を目的としたフィルム製造装置の横延伸機オープンファンの製造に関する自動溶接システムの開発について報告した。自動化により製造時間短縮や人の非稼働時間の有効活用、省エネによる CO₂ 排出量削減の可能性を示した。

当社では CN 実現に向け、フィルム製造装置全般のさらなる省エネや CO₂ 削減を通して、付加価値や性能向上、環境性向上に取り組んでいく所存である。

参 考 文 献

- (1) 経済産業省：“令和 4 年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書 2023）”，(2023)
- (2) 経済産業省：“2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略”，(2021)
- (3) 環境省：“地球環境部会 国内外の最近の動向について（報告）”，(2024)
- (4) 日本製鋼所, 2024/05/08 access：“気候変動対応” <https://www.jsw.co.jp/ja/sustainability/environment/climatechange.html>
- (5) 富士キメラ総研, 2024/05/08 access：“プレスリリース『2023 年版 機能性高分子フィルムの現状と将来展望 エレクトロニクスフィルム編』まとまる (2023/3/1 発表 第 23024 号)” <https://www.fcr.co.jp/pr/23024.htm>
- (6) 藤山将士, 西海博行, 阿部真哉, 村川英一, 田中学, 堤成一郎：“T 継手すみ肉マグ溶接におけるプロセスの選択とひずみの低減効果”，溶接学会, 平成 26 年度秋季全国大会予稿集, 2014 巻 (2014), p. 376
- (7) 中国電力, 2024/05/08 access：“当社の電源構成・CO₂ 排出係数” <https://www.energia.co.jp/elec/free/co2/index.html>