FUJICO

技報「創る」

tsukuru

FUJICO Technical Report 2022

No.30

表紙の言葉

tsukuru［創る］

独創的な複合技術で総合エンジニアリング企業を目指す弊社の企業理念をフジコー技報『創る』に物づくりの原点に立ち返り表現してみました。表紙は卓越した技術で制作された作品で飾りました。“独創的な技術開発”という弊社の開発理念をこの作品に託し、メッセージといたします。

上野焼

■解説

上野焼の歴史は1602年にさかのぼります。野焼には、“質素で静かなもの”を意味する茶道の精神「侘び寂び」が色濃く反映されています。目立ちすぎず、それでいてどこか存在感はある。それが上野焼の一番の魅力です。藩制度がなくなった際、藩に守られていたことが逆に災いし、一度は途絶えかけた上野焼。そんな苦難を乗り越えてきただけに、現状に妥協せず、時代と向き合い、進化を続けてきているのは現在の上野焼の強みです。

（表紙写真　福岡県提供）

フジコー技報
創る
No.30
2022

目　　次

tsukuru

FUJICO Technical Report 2022

No.30
2022

CONTENTS

Homepage Address: http://www.kfjc.co.jp

巻　頭　言

株式会社西日本シティ銀行
代表取締役頭取

フジコー技報第 30 号によせて

富士の高嶺へ共に歩む

村上　英之
Hideyuki Murakami

はじめに

創業70周年という記念すべき年に、フジコー技報「創る」巻頭言に寄稿する機会を頂戴し、感謝申し上げます。また、日頃より弊行北九州営業部が大変お世話になり、この場をお借りして御礼申し上げます。

貴社は1952年（昭和27年）に故・山本秀祐氏が富士工業所を創業されて以来、鉄鋼業界において他の追随を許さない高い技術力を発揮し、社会に貢献されてきました。社名の由来通り、富士の高みを目指して歩み続けた歴史であり、私ども西日本シティ銀行も、メインバンクとして長年にわたり苦楽を共にし、多少なりともお役に立ってきたのではないかと自負しております。今回、この歴史を振り返りつつ、これから先のお話をしたいと存じます。

１合目から共に歩む

私どもは、2004年10月に西日本銀行と福岡シティ銀行が合併して誕生した地方銀行です。旧２行は、かつては「相互銀行」であり、さらに遡ると「無尽」と呼ばれた「中小企業専門金融機関」でした。こうした経緯から、これまで数多くの中小企業と共に成長してきました。西日本シティ銀行はその歴史を現在に至るまで脈々と受け継いでおり、「中小企業育成」は当行のＤＮＡであると考えております。

貴社と当行の関係は昭和30年代にさかのぼります。西日本相互銀行に勤めていた森高久夫さん（後にフジコー常務）が、創業間もない貴社の経理部長に就任したことがはじまりです。わが国が戦後復興から高度成長期にさしかかり、1960年（昭和35年）に発足した池田勇人内閣が「所得倍増計画」を本格化させた頃です。貴社も順調に業容を拡大していましたが、経理処理がそれに追いついていなかったと聞いています。

森高さんは入社早々、社長の右腕として経理全般を任されました。まずは経理・決算書類の整理に着手し、銀行員時代に身に付けた能力を存分に発揮されたそうです。その後、西日本相互銀行小倉支店（現在の西日本シティ銀行室町支店）の支店長と交渉し、貸出枠三千万円でお取引がスタートしました。現在の貨幣価値に換算すれば、かなり大きな金額になるのではないかと思います。当時はまだベンチャー企業であった貴社の潜在的な成長力を見極めた、当行の先輩方の「目利き力」を、誠に誇らしく思います。こうして当行は、登山でいえば一合目から貴社と共に歩むことになりました。

苦しい時もメインバンクとして

貴社70年の歴史の中では、厳しい時期も多々あったことでしょう。特にオイルショックの時代や、平成初めのバブル崩壊後には、貴社の主要取引先も生産設備の減少、転換や企業再編に追い込まれました。貴社にとっても冬の時代だったと拝察します。

そのような時に我々はメインバンクとして、資金面での支援だけでなく、財務上のアドバイスなど、業績立て直しに向けて共に取り組んでまいりました。時には厳しい事も申し上げたこともあったかと思いますが、貴社を支えたいという強い思いがあったからこそ、今日に至るまでの貴社との強い絆を築くことができたと信じております。これからも様々な試練があるものと思いますが、貴社の成長のお役に立てる良きパートナーであり続けたいと強く念じております。

「不可能を可能に」技術のフジコー

貴社は「不可能を可能に」を合言葉に、技術開発力の向上を追求してこられました。山本厚生会長が社長を務められた時代から、将来を見据えて売上高の３～４％を研究開発費に投資し、数多くの特許を保有されています。2012年にはメーカーの勲章である「ものづくり日本大賞特別賞」にも選ばれました。また2019年には研究開発の拠点として、北九州市若松区に技術開発センターを新築移転されましたが、同センター建設には当行も融資面でお手伝いを差し上げることができました。

貴社は現在、鉄鋼関連事業、エンジニアリング関連事業、環境関連事業を三本柱として成長を続けています。環境関連事業の主力である光触媒に進出された際には、当行新店舗のトイレに有害物質を除去する貴社の光触媒タイルを採用し、安全で快適な店舗作りに活用させていただきました。また、空気消臭除菌装置「ブルーデオ」は、機能面での高い評価に加え、有名俳優の向井理さんを起用した広告でも話題になりました。環境関連事業の商品は、新型コロナ禍によって注目を集めることになったと聞いています。これらは一例にすぎませんが、貴社の技術開発力は高い評価を得ており、業容拡大の原動力となっています。

貴社の成長を支える技術開発力の源泉は、社員の皆さまです。その一環として若手研究者に社会人大学院制度を活用して博士号の取得を推奨されていますが、山本会長自ら九州大学大学院で指導を受け、2021年３月、博士号（工学）を取得されたと伺いました。齢（よわい）80を超えての博士号取得には、ただただ感服するほかありません。

その山本会長には、当行お取引先で構成される後援会組織「ＮＣ北栄会」の会長職を2005年から８年にわたって務めていただきました。会長就任時は、当行が合併によって誕生したばかりの時期であっただけに、強いリーダーシップで新銀行を強力にバックアップしていただき、本当に心強く感じました。また在任期間中を通して、会の充実と会員数の増加にもご尽力いただき、ＮＣ北栄会の会員数は現在４５０社を超え、当行内で最も規模の大きな後援会になっております。当行と北九州の地元お取引先とのリレーション強化に多大なご貢献をいただき、改めて感謝申し上げます。

最後に

こうして改めて歴史を振り返ってみますと、貴社と当行の間には、お取引先とメインバンクという関係だけでなく、苦しい時に互いを支え合う固い結びつきを感じています。冒頭に触れた当行の「中小企業育成のＤＮＡ」は、貴社のようなお取引先との関係に恵まれたからこそ、培うことができたものです。

不確実性が高まる現代です。先の見えない環境だからこそ、貴社は萩尾寿昭社長が陣頭に立ち、ゆるぎない技術開発力をベースに更なる成長を目指されることでしょう。

富士の高嶺に登りきった後には、世界一のエベレストがあります。これからも西日本シティ銀行は貴社と共に山頂を目指して参ります。

最後に、貴社の益々の繁栄を祈念しまして、私のご挨拶といたします。ありがとうございました。

【履歴書】

むらかみ　ひでゆき
村上　英之

生年月日　昭和　３６年　　３月　　１４日

【略　歴】

昭和	５８年　３月	九州大学経済学部卒業
昭和	５８年　４月	㈱西日本相互銀行（現西日本シティ銀行）入行
平成	１９年　５月	博多駅東支店長
平成	２０年　５月	人事部長兼人材開発室長
平成	２２年　６月	執行役員人事部長兼人材開発室長
平成	２４年　５月	執行役員総合企画部長
平成	２４年　６月	常務執行役員総合企画部長
平成	２６年　５月	常務執行役員総合企画部担当
平成	２６年　６月	取締役常務執行役員
平成	２８年１０月	㈱西日本フィナンシャルホールディングス取締役執行役員
平成	３０年　６月	㈱西日本シティ銀行取締役専務執行役員
令和	３年　６月	㈱西日本フィナンシャルホールディングス取締役社長（代表取締役）（現職）
		㈱西日本シティ銀行取締役頭取（代表取締役）（現職）

随　想

公益財団法人北九州産業学術推進機構
自動車産業推進部長

フジコー技報第 30 号によせて

畑間　大一郎
Daiichirou Hatama

この度、フジコー技報第３０号に随想を書かせていただく機会をいただき、誠にありがとうございます。

現在、私は、公益財団法人北九州産業学術推進機構において、主に自動車産業に関わる地域の中小企業の皆様をご支援する業務に携わっております。

北九州市役所在職時には、中小企業振興課や雇用政策課で、東京で開催した UI ターンに関する事業や高度外国人材など人材確保に関する事業、そして、当財団では、円筒型太陽光パネルの研究開発に関する国プロ事業、など様々な職場で、フジコー様と接点を持たせていただきました。改めて、地域を牽引する企業として、様々な分野で革新的な挑戦を続けるフジコー様に敬意を表しますとともに、こうしたご縁から、今回、随想執筆のお話をいただいたものと理解しています。

先程、触れましたように、私は、元々、北九州市の職員で、２年前に市から当財団に派遣され、今年の３月に市役所を定年退職し、４月からは、当財団の職員として、引き続き勤務させていただいております。

私の定年と同じくして、フジコー様の技報が第３０号の節目の年にあたるのも、何かのご縁と考え、今回、市役所に３０有余年在籍した思い出の断片を随想として、紹介させていただこうと思います。なにぶん、素人の散文となりますことを、あらかじめ、ご容赦いただければと存じます。

市役所の場合、一般的に、３年から５年周期で異動を繰り返します。私も、３０数年あまりの在職時に１０か所の職場を経験しました。

１９８７年、市役所に入職し、まず、最初に配属されたのが、当時の経済局貿易課でした。市内企業の海外取引等を支援するのが主な業務でしたが、日々の業務をこなしつつ、西日本国際食品見本市や日韓親善交流フェスティバルといった、西日本総合展示場を使った国際的な大規模イベントも開催するなど、市役所時代で最も多忙な職場でした。

今ではあまり考えられませんが、残業が 100 時間を超えることもしょっちゅうで、店屋物をみんなで食べながら仕事をこなす日々でした。しかしながら、職場に悲壮感などは一切なく、忙しさを楽しむような、笑いの絶えない、和気あいあいとした雰囲気で、今になって思い起こしても、職員同士のつながりが最も深かった職場だったように思います。

特に、日々の忙しさのうっぷんを晴らすように、職場旅行や飲み会では、皆、羽目を外して大騒ぎで盛り上がり、ここでは紹介できないような、今でも、語り継がれ、思い出すだけで噴き出してしまう数々のエピソードが残っています。貿易課時代の多くの職員とは、今でも、年賀状のやり取りが続いています。

また、同じ時期には、わっしょい百万夏まつりがはじまり、経済局チームで、奇抜な仮装をして、百万踊りに参加しました。参加団体の中で多分一番の

盛り上がりを見せたほか（あまりのはしゃぎすぎに同じ市の主催者から注意を受けたことも）、経済局で山車をつくり、小倉祇園太鼓にも参加するなど、局全体としても、活気があり、局内の職員の課を超えたつながりも深かった時代でした。私の長い市役所職員時代の中で、最初の職場が、今でも、最も思い出深い職場となっています。

その後、小倉南区役所国保年課を経て配属されたのが、市の外郭団体である、（財）国際東アジア研究センター（現：アジア経済研究所）でした。このセンターは、北九州市がアメリカを代表する大学の一つであるペンシルベニア大学と共同で設立した、東アジア経済の研究機関で環黄海経済圏の提唱などで有名です。私が在籍した当時は、研究成果等を地域企業に還元するための国際会議なども活発に行っており、今では不可能な、日本、中国、韓国、台湾、香港など東アジア地域の財界人が一堂に会し、経済交流のあり方を忌憚なく意見交換する東アジア財界人フォーラム（座長は当時麻生セメントの麻生泰社長）を開催したり、ペンシルベニア大学のビジネススクールであるウォートンスクールの市内経営者向け講座を企画するなど、グローバルな体験をさせていただいことも、今では、大きな財産となっています。

さらに、北九州市男女共同参画センター事業課、当時の経済文化局農林課を経て、総務省の外郭団体である（財）地域創造（東京）に 2 年間派遣される機会を得ました。当財団は、全国 3000 以上ある公共ホールを対象に、公共ホールで行う芸術文化事業を支援するために設立された団体です。私は、コンテンポラリーダンサーを地方のホールに 1 週間派遣して、地域住民とのワークショップやホールでの公演を行う公共ホールダンス活性化事業を担当し、北海道斜里町、福島県会津若松市、岐阜県多治見市、兵庫県豊岡市など、全国津々浦々の公共ホールを巡業させていただきました。派遣後は、（財）北九州市芸術文化振興財団に戻り、響ホールを拠点に、クラシックの訪問コンサート（小学校等）やホールでの公演の企画を担当しました。特に、地域創造や市芸文財団にて、ワークショップや訪問コンサートを通してダンスや音楽に直接触れることで、参加者の表情が生き生きと変わっていく様子を間近で接することができ、芸術文化の持つ力を感じることができたのは、かけがえない経験となりました。

市役所時代の後半には、産業経済局中小企業振興課に、私の在職期間としては最も長い 5 年間、在籍しました。当課では、主に、製造業や建設業の支援を担当させていただきました。当時（今でも）の中小企業は、人材確保が喫緊の課題となっていたため、製造現場で生き生きと働く若手技能者を紹介することで、製造業で働くことの魅力を伝えるゲンバ男子事業や女性技能者の職場環境改善（女性トイレや更衣室等）を促進する職場環境改善助成金、また、事業承継促進事業など、新しい事業の立ち上げを担当することができました。施策に反映させるため、多くの経営者の方にお会いし、現場の声をお聞かせいただきましたが、こうしたネットワークが、現在の職場での活動にも大いに活かされています。

終わりに、現在、北九州産業学術推進機構では、自動車産業の支援に携わっていますが、自動車の電動化など新しい分野でのフジコー様の挑戦に再び関わることができる日を楽しみにしながら、フジコー様の今後ますますのご発展を祈念しています。

技術解説

計算状態図活用の勧め

Encouragement of Phase Diagram Calculation

国立大学法人九州工業大学
名誉教授

工学博士　長谷部 光弘
Mitsuhiro Hasebe

１．はじめに

状態図計算ソフトと呼ばれている熱平衡状態を計算し、且つその結果を作図する機能を備えた熱平衡計算ソフトウェアが広く公開されてから約 40 年が経過した。この間ソフトウェアには処理能力の向上やいろいろな付加的機能の追加が行われているが、熱平衡計算の基本的な機能はほとんど変わっていないと思われる。一つには、プログラミングは決して簡単ではないが、1800 年代後半の Gibbs による「異相平衡の熱力学」に基づいた単純な理屈を用いているからである。

ところで、このようなソフトウェアだけでは熱平衡計算は全く行えない。これらは合金系の Gibbs エネルギーを記述する熱力学パラメータが必要である。多くのソフトウェアでは複数のパラメータをまとめたデータベースを用いる。学術論文や講演において「計算には xxx ソフトウェアを用いた」というような表現がよくされている。計算結果の信用性を示したつもりのようだが、熱力学パラメータが同じであれば、どのソフトウェアを用いても同じ結果になるはずである。むしろ重要なのはどのような熱力学パラメータあるいはデータベースを用いたかを述べる方が重要である。

日本語では状態図は phase diagram(相図)の意味で用いられているが、現在の熱平衡計算ソフトウェアは本来の状態図(state diagram)を計算するソフトである。しかし実際には相図の計算に用いられることが多いと思われる。

相図も等圧条件下での二元系および三元系の等温断面状態図であまりは問題とならないが、多元系の場合は平衡する相の組成を結ぶ共役線が断面内になく、その見方、使い方に注意が必要である。

ここでは多元系への適用の一例としてNCF625合金を取り上げてみた。なお、熱平衡計算には(国研)産業技術総合研究所で開発された国産の CaTCalcXE ソフトウェアと熱力学パラメータにはサーメット系用の RICT-Cerm v2.0 データベースを用いた。

２．NCF625 合金の状態図

2.1　基本組成合金の状態図

NCF625 合金の成分は表１のようになっている。まず基準組成として濃度に幅のある成分はその中間濃度を、上限のみ制約がある成分はその上限濃度を選び、Ni-21.5%Cr-0.10%C-0.50%Si-0.50%Mn-0.015%P-0.015%S-5.0%Fe-9.0%Mo-0.40%Al-0.40%Ti-3.65%(Nb or Ta)とした。

表１　NCF625 合金の成分　　　mass%

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe	Mo	Al	Ti	Nb+Ta
0.10 以下	0.50 以下	0.50 以下	0.015 以下	0.015 以下	58.00 以上	20.00 ～ 23.00	5.00 以下	8.00～ 10.00	0.40 以下	0.40 以下	3.15～ 4.15

熱平衡計算の基本は合金の組成、圧力、温度という条件で行う一点計算である。条件の一つを変化させて連続計算を行うこともできる。一点計算や一軸に沿った連続計算では合金系全体の Gibbs エネルギー、エンタルピー、エントロピー等の熱力学的値のほか、平衡する相の種類、それぞれの存在量、組成、熱力学的値が計算結果として得られる。CaTCalc ではこれらが Excel 形式で取り出すことができる。ディスプレイに表示されるのはこれら結果の一部である。

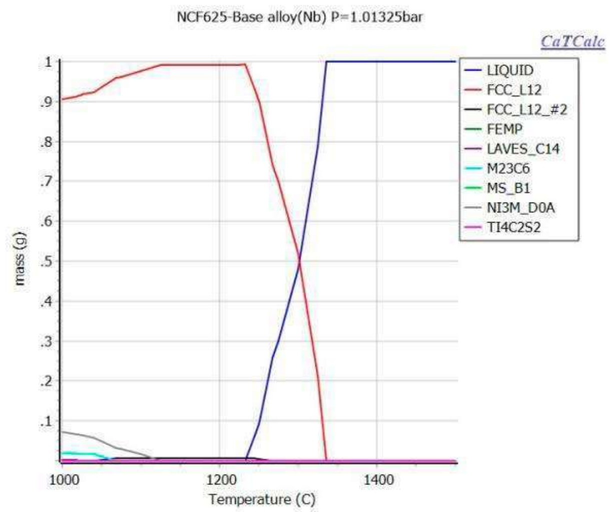


図１　NCF625(Nb)基本組成 (12 成分)における平衡相分率の温度変化

まずは上記の組成のうち Nb を含む NCF625(Nb) 合金について、圧力 101323Pa (1atm)、温度 1000～1500℃における平衡の連続計算を行った。図１はその結果一つで、平衡相の存在量を温度の関数として描いている。合金の総量を 1g として計算しているので、縦軸は平衡相の質量分率に等しい。この図は相境界を描いたものではないのでいわゆる状態図(相図)ではない。

図１中の FCC_L12 はわずかであるが規則化している Ni 固溶体相で、FCC_L12#2 は NaCl 型炭化物(Nb,Ti)C, FEMP は FeTiP, MS_B1 は MnS, NI3M_D0A は Ni3Nb である。このような詳しい情報は前述した Excel 形式の結果を見ることで知ることができる。

この 12 成分の合金について RICT-Cerm v2.0 データベース上では 200 種を超える相が関係するため、相当な計算時間を要する。図１から 1000～1500℃の範囲では液相(LIQUID)、Ni 固溶体相(FCC_L12)以外の平衡量は極めて少ない。そこで、12 成分のうち上限が 1mass%未満の成分は除外し、Ni-21.5%Cr-5.0%Fe-9.0%Mo-3.65%(Nb or Ta)の 5 成分系を小さくして計算を進めることにする。

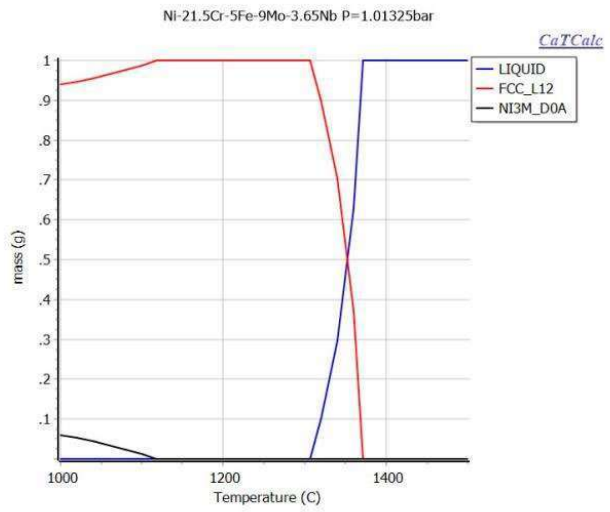


図２　NCF625(Nb)組成 (5 成分)における平衡相分率の温度変化

この減量した合金で Nb を含む場合の計算結果を図２に示す。図１と比べると 1000～1500℃の範囲での平衡相は 9 種から 3 種と激減しているが、主な相の平衡状態はほとんど同じであり、減量した系でも大きな問題はないと考えられる。

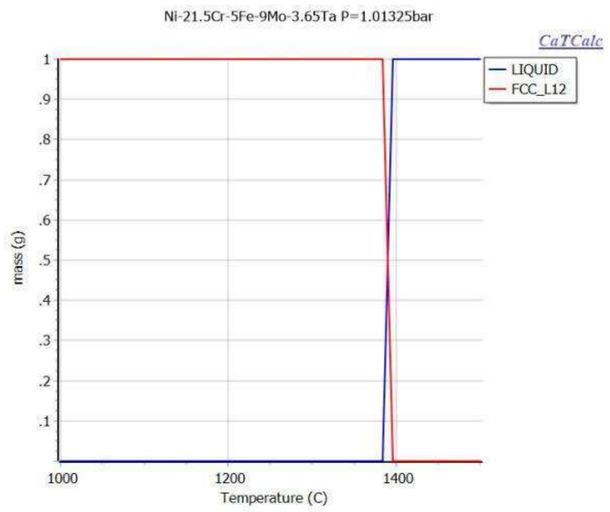


図３　NCF625(Ta)組成 (5 成分)における平衡相分率の温度変化

同じ減量した基本組成で Nb を Ta に置き換えた合金について計算した結果を図３に示す。これより Ta の場合、1000～1500℃では液相と Ni 固溶体のみが平衡相として現れ、固液二相領域の温度幅は Nb が約 70℃に対し Ta は約 10℃と狭くなっている。

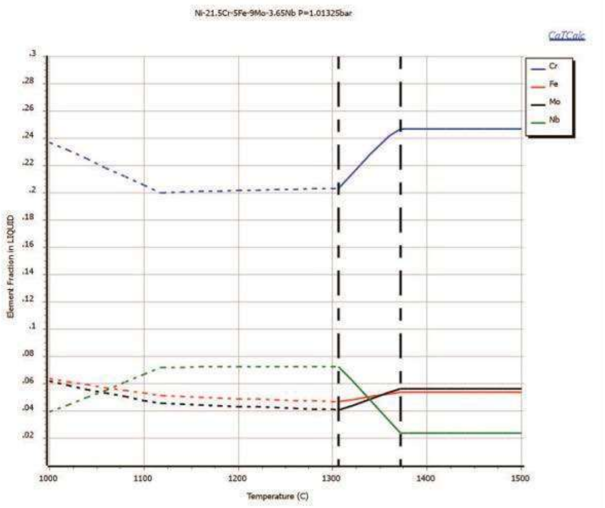


図４　NCF625(Nb)組成 (5 成分)における液相組成の温度変化

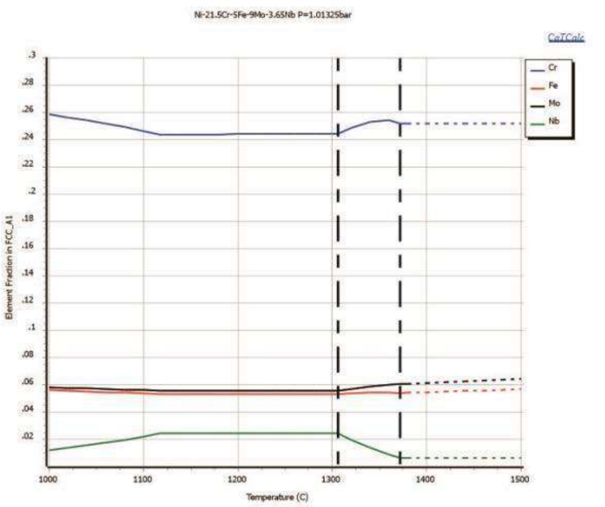


図５　NCF625(Nb)組成 (5 成分)における Ni 固溶体組成の温度変化

液相や Ni 固溶体のような溶体では平衡する相の種類や量によってその組成は変化する。図２に対応した液相(LIQUID)と Ni 固溶体(FCC_L12)の組成変化をそれぞれ図４、図５に示す。両図には Ni 以外の合金成分のみを描いている。固液共存域では組成が刻々変化している。なお、点線部は準安定状態での組成を表している。

2.2　Nb と Ta 置換の影響

つぎに Nb+Ta の濃度が 3.65mass%の条件で Nb と Ta の比率が変化した場合に相平衡がどのように変わるかを計算した。結果を図６に示す。これはいわゆる状態図(相図)である。

図２と図３から当然であるが Ta に置き換わるに伴って固液共存領域の温度幅が減少して行く。

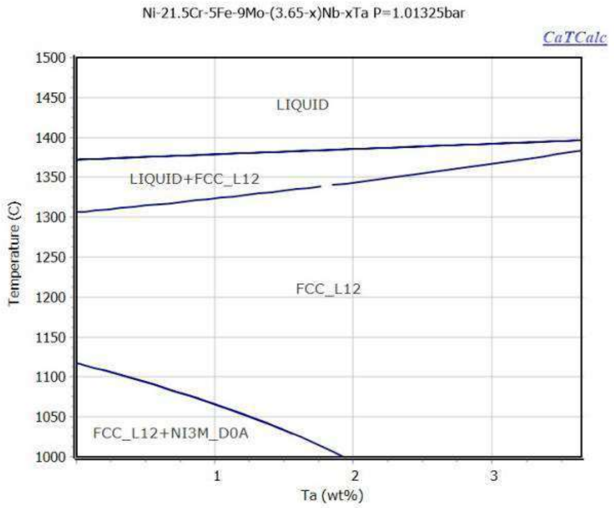


図６　NCF625 組成(5 成分)における Nb-Ta 置換の影響

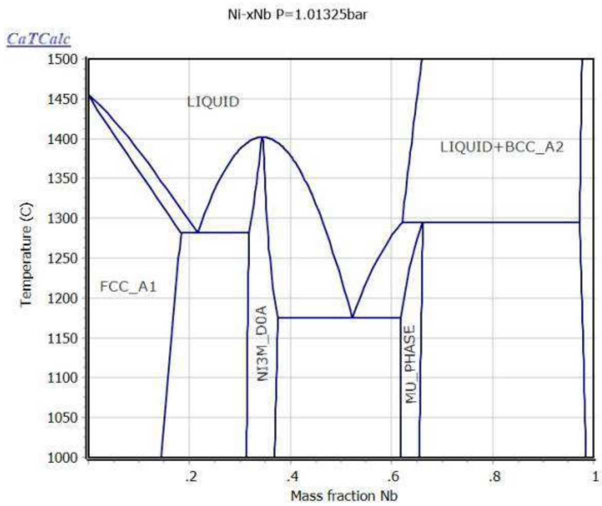


図７　Ni-Nb 二元系状態

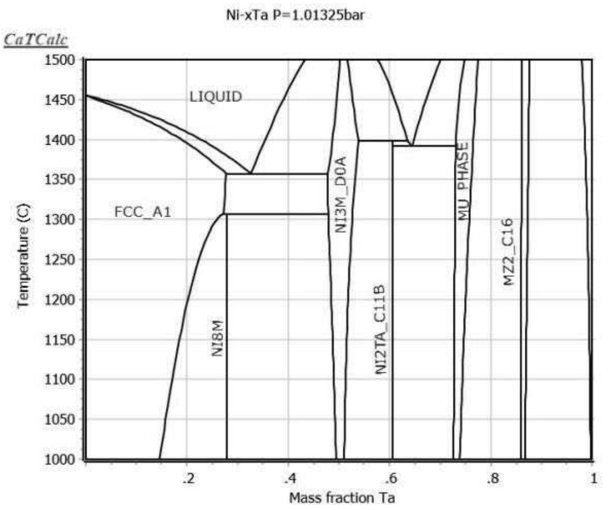


図８　Ni-Ta 二元系状態

この変化はそれぞれ図７、図８に示した Ni-Nb、Ni-Ta の二元系状態図を比較しても理解できる。どちらも同じ温度で見れば、相境界の組成幅はほぼ同じである。しかし Nb の方が Ta よりも液相線と固相線とも温度変化が大きい。そのため同じ濃度で比べれば Nb の方が液相線と固相線の幅が広くなる。この傾向が図６に表れている。

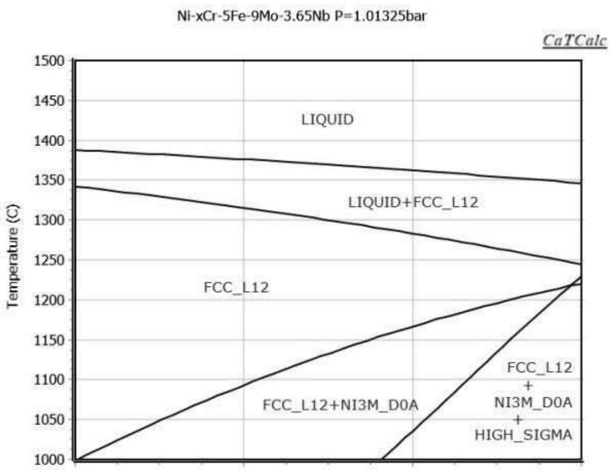


図９　NCF625(Nb)組成 (5 成分)における Cr 濃度の影響

2.3　濃度幅の影響

ここでは表１の濃度の許容幅が状態図にどのように変化するかを見てみる。計算では表１の濃度は幅より広げて計算している。したがって、表１の範囲を外れる濃度では Ni 濃度も範囲外となる場合もある。基本とする組成は Nb を含むものだけに絞った。

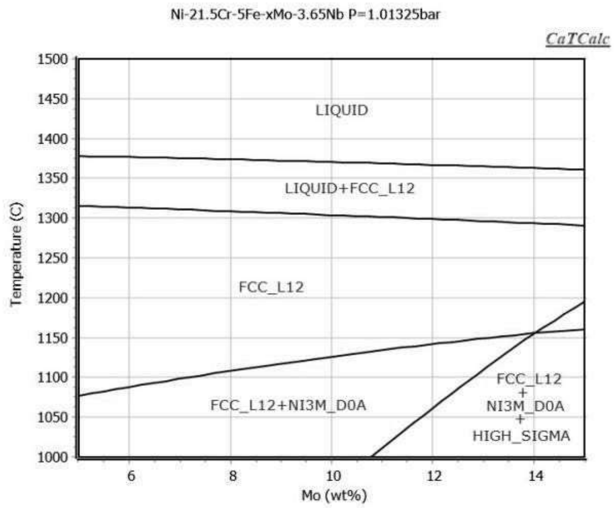


図１０　NCF625(Nb)組成 (5 成分)における Mo 濃度の影響

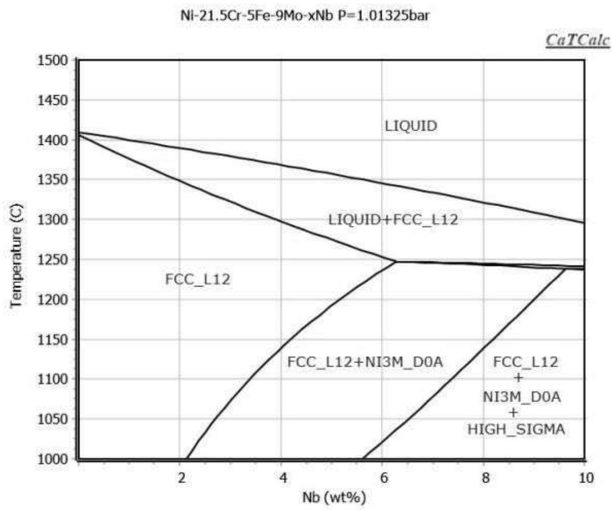


図１１　NCF625(Nb)組成 (5 成分)における Nb 濃度の影響

Cr、Mo、Nb についての計算結果をそれぞれ図９、図１０、図１１に示す。細かい温度域はことなるが、いずれも高濃度側になると低温でまず NI3M_D0A(Ni3Nb)、続いて HIGH_SIGMA が出現する。

３．おわりに

合金の平衡状態を調べる際、二元系については論文や状態図集の参照で問題はない。三元系も状態図

集が存在し、貴重な情報源である。しかしその多くは平衡相の種類と境界線が描かれただけの図であり、不完全である。一例を示すと、図１２は Ni-Cr-Nb 三元系の 1300℃における等温断面状態図である。例えばこの図から Ni-40%Cr-20%Nb 合金はこの温度で LIQUID と BCC_A2 の二相となることは分かる。しかし、これらの相の組成や各相の存在量は知ることができない。これら情報を状態図から得るためには図１３に加えた共役線が必要である。

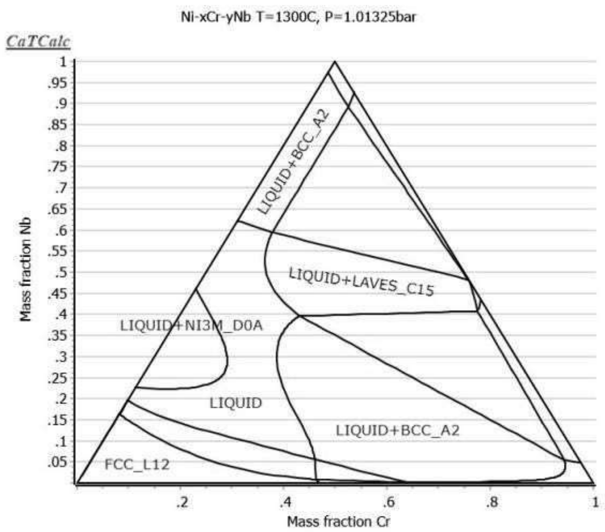


図１２　Ni-Cr-Nb 三元系等温状態図 (1)

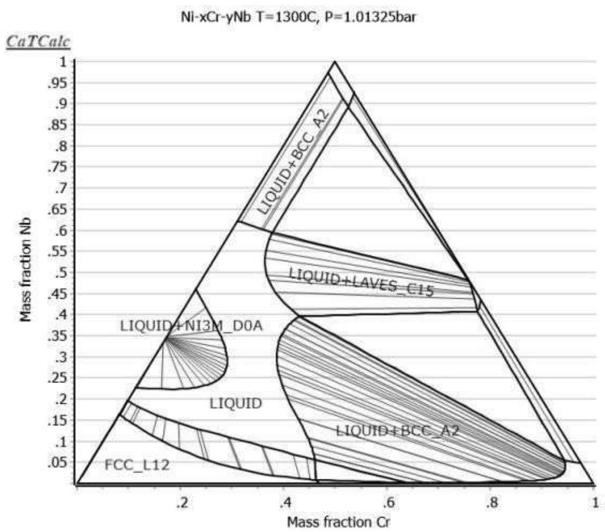


図１３　Ni-Cr-Nb 三元系等温状態図 (2)

三元系の縦断面状態図や今回のような四元系以上の多元系では二次元の図上に共役線を描くことが不可能で、残念ながら液相線や固相線など限られた情報しか読み取れない。

これらの問題は状態図計算によって解消される。本稿では不十分であるが計算状態図の活用にヒントとなれば幸いである。

技術解説

高効率フレキシブル光電変換層を用いた新太陽電池の研究開発動向

Research Trend of New Solar Cells Consisting of Flexible Photoconversion Layer with High Efficiency

国立大学法人電気通信大学
インフォ・パワードエネルギー・システム研究センター
特任教授
理学博士 早瀬　修二
Shuzi Hayase

1．はじめに

現在の電力供給システムは大規模発電・集中型エネルギーシステムと呼ばれ、原子力、火力、水力、風力、メガソーラー発電所から送電網を通して需要家に届けられる。今後需要と供給の最適化を図り、電力を効率よく利用する事を目的として、スマートグリッド、地産地消を目指したマイクログリッドシステムに移行すると考えられる。これに伴い再生可能エネルギーの一つである太陽光発電も小規模・分散的発電となる。つまり居住地に近いところでの小規模発電ができる太陽光発電システムが求められる。

大規模太陽光発電所として米国カルフォルニアの砂漠地帯に Sun Star と呼ばれる 0.8GW[1)]、Topaz Solar と呼ばれる 0.55GW の大規模太陽光発電所が建設されている。また Dubai の砂漠には 1GW の大規模太陽電池が建設されており、2030 年までに 5GW まで増設されるという報道がある。ちなみに火力発電所や原子量発電所のタービン発電容量は 0.5-1.0 GW であり、上記の大規模太陽光発電所は大型タービン発電機の発電容量に相当する。一方日本では 0.26GW の発電容量を有するパシフィコ・エナジー作東（さくとう）メガソーラー発電所（美作市(みまさか) 岡山県）[2)]が最大規模であり、海外に比較して小規模でありかつ丘陵地帯に設置されている。資源エネルギー庁資料によると[3)]、日本の累積太陽光発電容量は 56GW(2019 年)であり、中国の 175GW には及ばないものの米国の 63GW、ドイツの 45GW とほぼ同等である。一方、日本の国土面積当たりの発電容量は 147kW/km^2 であり、ドイツの 126kW/km^2、中国の 18kW/km^2、米国の 6kW/km^2 を上回り世界一の設置容量密度である。さらに平地に限定すると日本の設置容量密度は 426kW/km^2 と、ドイツの 184kW/km^2、中国の 24kW/km^2、米国の 10kW/km^2 を大きく上回る。日本では大規模太陽光発電所を設置する面積が少なくなっており、これが上記のスマートグリッド、マイクログリッドを利用して、居住地に近いところでの分散型太陽光発電システムが求められている理由である。

内閣府が主催する統合イノベーション戦略推進会議が 2020 年 1 月 21 日に策定した“地球温暖化等問題に対応する課題やニーズ”の一つとして、太陽光発電には従来の平板型シリコン太陽電池が設置しにくい場所に設置できる新しい太陽電池を開発することが求められている[4)]。すなわち、“設置場所の制約を克服する柔軟・軽量・高効率な太陽光発電”を実現することであり、菅元総理が表明した 2050 年温室効果ガス排出量ゼロ実現に貢献できる技術であると期待されている。これを実現するために今後 10 年間に 2 兆円規模のグリーンイノベーション基金が設置された[5)]。この中で５年間で 200 億円の予算規模で高効率、フレキシブル、軽量化を達成できるペロブスカイト太陽電池（鉛系）の開発が進んでいる[6)]。

NEDO の調査資料によると集合住宅のビルの壁面で 30GW、屋上で 15GW、民生業務でも壁面で 17GW、屋上で 12GW の潜在的太陽電池設置容量があるとされる[7)]。両者を合わせると壁面で 47GW、屋上で 27GW の潜在発電能力がある。一方ビル以外では耕作地があり 380GW、農作放置地で 34GW、湖、沼等の水面設置で 40GW、河川敷等で 34GW、駐車場で 23GW 等の潜在発電能力があるとされる。このように都市部、居住地の近くに設置でき、自然を破壊せず環境に調和した新しい太陽電池の出現

が待たれていた。

2．高効率フレキシブル光電変換層

上記の目的に合致した太陽電池として、塗布で作製できるフレキシブルペロブスカイト太陽電池が検討されている[8]。図 1 に一般的な太陽電池の構成を示す。太陽電池はホール（プラス電荷）を集めるホール輸送層、電子（マイナス電荷）を収集する電子輸送層、および光を吸収して電子とホールを発生する光吸収層からなる。太陽電池は光吸収層の材料名により単結晶シリコン太陽電池、多結晶シリコン太陽電池、CIGS(CuInGaSe(S))太陽電池、CdTe 太陽電池、色素増感太陽電池、有機薄膜太陽電池等に分類される。ペロブスカイト太陽電池とは光吸収層がハロゲン化ペロブスカイト（一般式 $APbI_3$、A は一価のカチオン）からなる太陽電池である。表 1 に現在よく用いられているシリコン単結晶太陽電池とハロゲン化ペロブスカイト太陽電池性能を比較して示す。ハロゲン化ペロブスカイト太陽電池はハロゲン化ペロブスカイトインク（黒色）を塗布した後に 100℃程度で加熱することにより作製することができる。

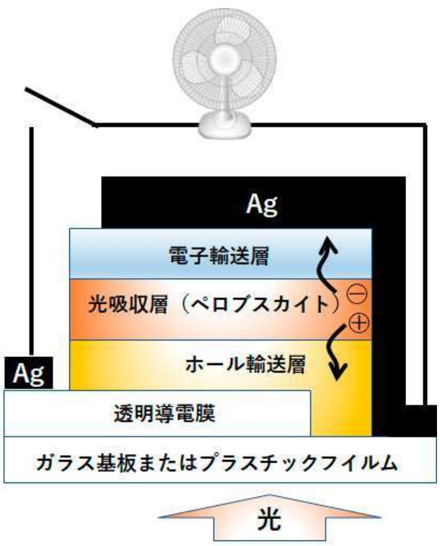


図 1　太陽電池の構造

一方、単結晶シリコン太陽電池は高純度化するために 1500℃程度の高温で結晶化する必要がある。ハロゲン化ペロブスカイト太陽電池の公認効率は低温塗布プロセスにもかかわらず25.7%と報告されており、単結晶シリコン太陽電池の公認効率の26.7%に肉薄している。単結晶シリコンは間接遷移型であるため吸光度が小さく光を有効に吸収するためには 200-300 ミクロンの厚みが必要である。一方ハロゲン化ペロブスカイト層は直接遷移型であるため吸光度が大きく、0.5 ミクロン程度の膜厚で光を有効に吸収することができる。ペロブスカイト太陽電池は低温塗布プロセスで作製できるために、プラスチック基板上に形成することができ、1-4 kg/m^2 と軽量化することが可能である。一方単結晶シリコン太陽電池は 12-15 kg/m^2 の重量がある。このようにハロゲン化ペロブスカイト太陽電池は“地球温暖化等問題に対応する課題やニーズ”の中の、太陽電池に関する課題を解決するポテンシャルを有している。ここで注意したいのは表 1 のハロゲン化ペロブスカイト太陽電池の 25.7%の効率は 0.096 cm^2 の小面積の太陽電池で測定されている。一方単結晶シリコン太陽電池の太陽電池サイズは 79 cm^2 である。面積が 1cm^2 のハロゲン化ペロブスカイト太陽電池の公認効率は23.7%であり大面積化により効率は低下する。現在、大面積化しても効率が低下しないプロセスの開発に焦点が絞られている。同じ程度の面積で比較すると他の市販多結晶太陽電池である CIGS 太陽電池の公認効率である 23.35%(1cm^2)、CdTe 太陽電池の公認効率である 21.0%(1.06cm^2)と同程度の公認効率であり、低温塗布プロセスで高効率が達成されていることは驚きである。 これらの公認効率の詳細は参照文献 9) にまとめられているので参照いただきたい。これまでもフレキシブル太陽電池は報告されていたが、高効率とフレキシブル化を両立した太陽電池は知られていなかった。

表 1　単結晶シリコン太陽電池とハロゲン化ペロブスカイト太陽電池の比較

種類溶液	光吸収層	効率	プロセス温度	基板
ペロブスカイト太陽電池（含鉛）	ペロブスカイト（インキ）(0.5μm)	25.7% (0.096 cm^2)	100℃（溶液塗布）	プラスチック基板（軽量・フレキシブル）(1-4kg/m^2)
シリコン太陽電池	シリコン(200-300μm)	26.7% (79 cm^2)	1500℃（溶融）	ガラス基板(12-15kg/m^2)

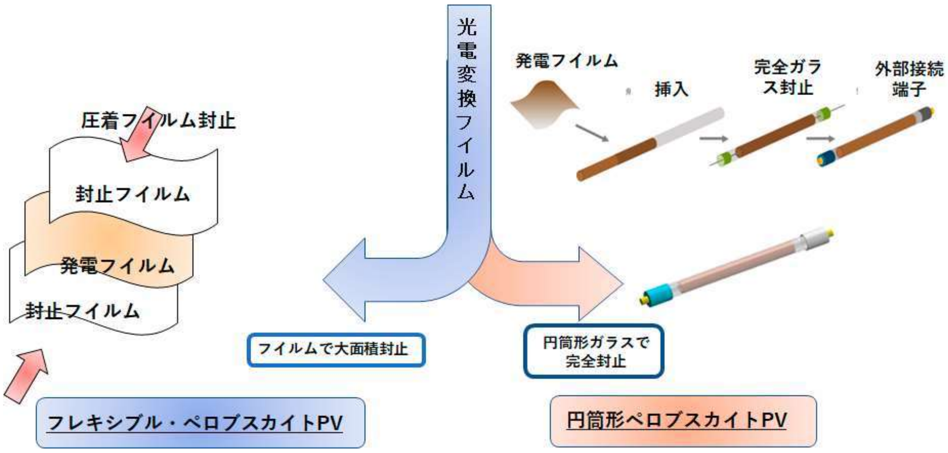


図２　フレキシブル光電変換層の封止
図作製協力：株式会社フジコー、CKD 株式会社、ウシオ電機株式会社

３．フレキシブル光電変換層の封止とフレキシブル太陽電池および円筒形太陽電池

ハロゲン化ペロブスカイト層は低温で結晶化して得られるため、水分、酸素の影響により分解が進みやすいという欠点があった。このため、図２に示すように光電変換フィルムを外部雰囲気から保護する必要がある。両面からプラスチックフイルムで保護する方法が一般的であり、これにより軽量フレキシブルペロブスカイト太陽電池が作製できる。重量制限のためこれまで平板型シリコン太陽電池が設置できなかった体育館の屋根等に設置できる。一方、プラスチックフイルムによる封止よりも有効に外部からの水分、酸素の侵入を防ぐことができる円筒形太陽電池を電通大、九州工業大学、株式会社フジコー、CKD 株式会社、ウシオ電機株式会社が共同提案してきた。フレキシブル発電フィルムを円筒形ガラスに挿入し、両端をガラスで封止するため完全封止できる。このため外部からの水分、酸素の侵入を完全に遮断することができ高い耐久性が期待できる。

４．円筒形太陽電池の利点

フィルムで封止したフレキシブル太陽電池はよく知られており、利点などは容易に推定できると思われるためここでは説明を省略する。図３に円筒形太陽電池の利点を列挙した。我々技術サイドからは容易に簡単に完璧に封止が可能になり、耐久性の高い太陽電池を作製することができる。一方消費者側には、一日の総発電量が多い、狭い場所でも縦型に設置できる、風圧が小さく固定台の軽量化が可能である、軽量であり運搬・設置が容易である、交換・修理・リサイクル・廃棄が容易である等の利点がある。

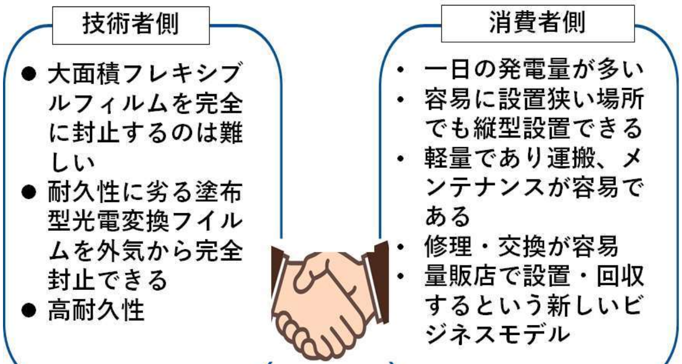


図３　技術者側、消費者側から見た円筒形太陽電池の利点

図４には株式会社フジコー、CKD 株式会社、ウシオ電機株式会社により実施されたソーラーシェアリングの実証実験、および IoT センサーネットワーク用電源実証実験の写真を示す。ソーラーシェアリングは和製英語であり、最近は agriphotovoltaics、agrisolar と呼ばれ注目を集めている。Dual-use solar の別名もある。太陽光エネルギーを植物育成と太陽光発電の両方に使うもので、隙間を空けて植物棚の上部に太陽電池を設置する。太陽電池で発電し、隙間から入射する光で植物を育成する。これまでは隙間を空けて小型の平板型単結晶シリコン太陽電池

を設置した実証実験が行われてきたが、光の照射が均一ではない、雨のしずくが落ちて植物育成に障害が起こる等の問題点が指摘されていた。円筒形太陽電池を設置すると太陽光の陰になる部分が少なく均一に植物に光が照射されるため、円筒形太陽電池はこれらの問題点を解決するあたらしい dual-use の太陽電池として期待できる。

ソーラーシェアリング実証実験　　IoT センサーネットワーク用電源実証実験

図４　円筒形太陽電池の実証実験風景
（株式会社フジコー、CKD 株式会社、ウシオ電機株式会社共同）

５．理論限界効率を超える新ペロブスカイト太陽電池

図１に示す単層太陽電池には 33%という理論限界(Shockley-Queisser limit)がある [10]。効率が 35%を超えれば電気自動車への車載用途が開けてくる。そこで検討されているのがタンデム太陽電池である。タンデムというのはもともと縦に二頭を配置した馬車の意味である。

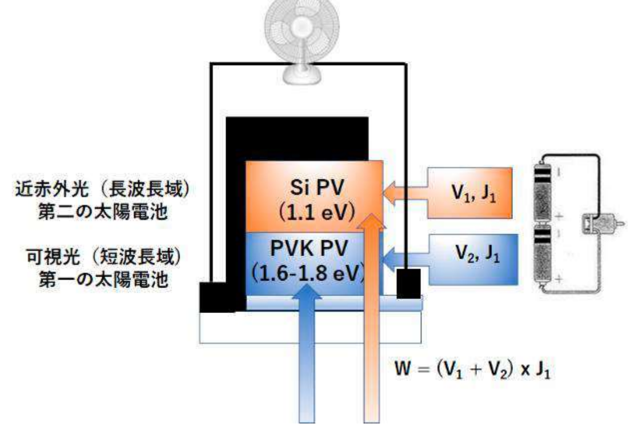


図５　タンデム太陽電池の構造
PVK PV: ペロブスカイト太陽電池

図５に示すように太陽電池を二層構造にする。可視光領域の短波長領域の光を吸収し光電変換する第一の太陽電池と、第一の太陽電池をすり抜けてきた近赤外域（長波長域）の光を光電変換する第二の太陽電池からなる。詳細は省略するが、SQ limit によれば理論効率は光吸収層のバンドギャップと関係があり 1.4eV 程度のバンドギャップの光吸収層を用いると 33%の最高効率が得られる。太陽電池を二階建てにすると第一の太陽電池で電圧 V_1、電流 J_1 が得られ、第二の太陽電池で電圧 V_2、電流 J_1 が得られる。得られる電力は $W = (V_1+V_2) \times J_1$ となり高い効率が得られる。これは 1.5 V の乾電池を直列に二本つないで 3 V の電圧が得られることと同じである。第一の太陽電池の電流と第二の太陽電池の電流を一致させないと、タンデム太陽電池の電流は低い太陽電池の電流に一致し、電流のロスが起こる。図５は例として第一の太陽電池にペロブスカイト太陽電池、第二の太陽電池にシリコン太陽電池を使った例を示す。結晶性シリコンのバンドギャップが 1.1eV であり、第一の電池と第二の電池の電流を一致させるためには、ペロブスカイトのバンドギャップが 1.6-1.8eV である必要がある。研究開発は第一の電池と第二の電池を結合し、電荷を有効に運ぶ中間層の開発、およびペロブスカイト層のバンドギャップの最適化に主眼が置かれている。表２にこれまでに報告された二層タンデムペロブスカイト太陽電池の公認最高効率をまとめて示す。ペロブスカイトタンデム太陽電池の最高効率は Pb-PVK と Si 単結晶を組み合わせたペロブスカイト/単結晶シリコン太陽電池で報告されており、効率は 31%を超えている。単結晶シリコン太陽電池の公認最高効率は 26.7%であり、この値よりも効率が 4-5%向上している。ペロブスカイト太陽電池を第一の太陽電池、第二の太陽電池に使ったペロブスカイト/ペロブスカイトタンデム太陽電池で、公認効率は 28%に達している。単接合ペロブスカイト太陽電池の最高公認記録は 25.8%でありタンデム化することにより 2.2%の効率向上が確認されている。

第一の可視光吸収ペロブスカイト太陽電池には可視光を吸収する鉛系ペロブスカイト太陽電池(バンドギャップ 1.77eV、$FA_{0.8}Cs_{0.2}Pb(I_{0.6}Br_{0.4})_3$)，第二の太陽電池には近赤外域を光電変換する錫鉛系ペロ

ブスカイト太陽電池(バンドギャップ 1.22eV、$FA_{0.7}MA_{0.3}Pb_{0.5}Sn_{0.5}I_3$)を用いている。ペロブスカイト/ペロブスカイトタンデム太陽電池はすべてのプロセスが低温プロセスで作製されるため、プラスチック基板上にフレキシブルなタンデム太陽電池を作製することができる[9]。

表２　ペロブスカイトタンデム太陽電池の公認最高記録

Tandem	Efficiency	Area	Institute
	%	cm^2	
Pb-PVK/Si (2-terminal)	31.25		CSEM/EPFL
Pb-PVK/CIGS	24.2	1.045	HZB
Pb-PVK/SnPb-PVK	24.2	1.04	Nanjin Univ.
Pb-PVK/SnPb-PVK	28.0	0.0495	Nanjin Univ.
Si(single) PV	26.7	79	
Pb-PVK PV	25.8		UNIST

Pb-PVK: 鉛系ペロブスカイト太陽電池、Si:単結晶シリコン太陽電池、CIGS:CuInGaSe(S) 化合物半導体太陽電、CSEM/EPFL:スイスの大学、HZB:ドイツ Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB), UNIST: 韓国 The Ulsan National Institute of Science and Technology.

ペロブスカイトタンデム太陽電池ではないが、30%を超えるタンデム太陽電池を使った車載実証実験が NEDO―シャープ―トヨタの共同プロジェクトとして行われその結果が公表されている[11]。車載用太陽電池は三層（トリプルジャンクション）でありInGaP/GaSs/InGaAs の構造を有している。これまでソーラー充填システム装着車としてプリウス PHV が市販されているがこの太陽電池セル効率は 22.5%（おそらくシリコン系太陽電池）であり定格発電電力は 180W であったと報告されている。この系ではカーナビに使用する補機バッテリー系統のみに電力を供給していた。一方、今回実証した太陽電池セル効率は 34%以上であり、定格発電容量は約 860W とされる。このため起動用バッテリーへの充電が可能になり、一日の発電で 44-56km に相当する電力量が得られると説明されている。このように 30%を超える太陽電池はカーボンニュートラル社会実現に大きく貢献できるが、上記トリプルジャンクション太陽電池はコストが高いと言われており、低コスト化への検討が行われている。一方、ペロブスカイトタンデム太陽電池は低温塗布プロセスで作製できるためコスト面でも利点があると考えられており、世界中で開発競争が激化している。

６．高効率大面積化に対する進捗状況

表１で説明した通り、小さい面積では鉛系ペロブスカイト太陽電池の効率は単結晶シリコン太陽電池の効率に肉薄している。小面積でさらに高効率化する試みも続けられているが、実用化に向けて高効率を維持しながら大面積化する応用研究も競争が激しくなっている。小面積セルのペロブスカイト層は半導体デバイスを作製するときに使用するスピンコーターを用いて形成されているが、大面積化するためにはメニスカスコーター、インクジェットプリンターのような大面積塗布に有利な塗布装置を使わなければならない。ペロブスカイト層作製の難しさは、塗布しながら結晶化し、平坦な結晶面を作製しなければならないというプロセスにある。大面積で均一・平坦な結晶面を有するペロブスカイト作製プロセス開発が必要である。現状の公認最高効率はガラス基板上にパナソニックが作製したペロブスカイト太陽電池で 17.9%である。面積は $804cm^2$ でモノリシック型であり 55 セルが直列に接続されている[9]。

７．鉛系ペロブスカイト太陽電池の後に期待される次世代ペロブスカイト太陽電池

ペロブスカイト太陽電池は鉛イオンを含んでいる。管理された設置条件で実用化が進むと考えられるが、居住地近く、農業分野に使用するためには、鉛フリー化が必要である。これまで多くの鉛フリーペロブスカイト太陽電池が報告されてきたが、鉛系ペロブスカイト太陽電池ほどの高効率化は達成されていない。鉛フリーペロブスカイト太陽電池の中では錫系ペロブスカイト太陽電池で比較的高い効率が報告されており、効率競争研究が激しくなってきた。図６に種々の太陽電池の中で鉛フリー錫ペロブスカイト太陽電池の効率の位置づけを示す。現状ではその効率は 15%程度であり鉛系ペロブスカイト太陽電池の効率に比較するとまだまだ低いが、

2015 年当時の錫系ペロブスカイト太陽電池の効率が数パーセントであったことを考えると確実に効率が向上している。錫ペロブスカイト層の結晶欠陥が鉛系ペロブスカイト層よりも多いことが前者の効率向上を妨げている。現在結晶欠陥を少なくするプロセス、ドーピング等が見出されており、今後の効率向上に期待したい。ちなみに我々の研究チームは 14%を超える効率を達成しており世界最高効率を目指して研究を進めている[12]。錫系ペロブスカイト太陽電池は鉛系ペロブスカイト太陽電池よりも外部から侵入する水分、酸素に弱く劣化しやすいため、円筒形太陽電池は錫ペロブスカイト太陽電池の高耐久性を実現するためにも必須の技術であり、大きな期待を寄せている。

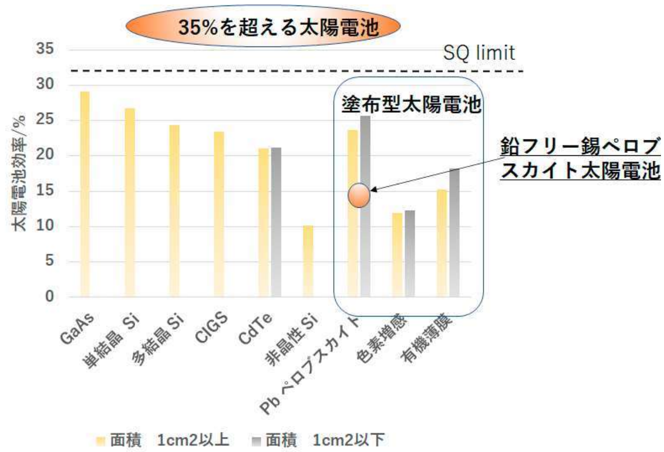


図６　太陽電池の中での錫ペロブスカイト太陽電池の効率の現状

くに設置できる都会型太陽電池であり、また dual use の太陽電池としても優れている。我々は agriphotovoltaic に加えて dual use solar cell である図７のような採光性、デザイン性に優れたデザインルーバー型太陽電池の普及を目指している。これらの技術が将来のカーボンニュートラル社会の実現に大きく貢献できることを確信している。

図７　都会型太陽電池の設置イメージ
（写真の円筒形部分を円筒形太陽電池で置換した設置イメージ）

８．まとめ

シリコン太陽電池は低コスト高効率化が達成できている素晴らしい太陽電池であるが、平地の少ない日本では設置しにくい状況になっている。軽量、高効率なフレキシブル光電変換層を使ったペロブスカイト太陽電池が期待されており、円筒形ペロブスカイト太陽電池の利点を説明してきた。鉛系ペロブスカイト太陽電池は量産化プロセス開発で競争が激化している。一方、ポスト鉛ペロブスカイト太陽電池として錫系ペロブスカイト太陽電池が注目を集めつつある。鉛フリーペロブスカイト太陽電池として円筒形錫ペロブスカイト太陽電池は高効率、高耐久性を持ち合わせた太陽電池として、居住地近

参考文献

1）http://tech.nikkeibp.co.jp/dm/article/COLUMN/20150630/425664/?P=2
2）https://project.nikkeibp.co.jp/ms/atcl/19/feature/00001/00053/?ST=msb
3）https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/070_01_00.pdf
4）https://www8.cao.go.jp/cstp/tougosenryaku/kankyo.pdf
5）https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/gifund/index.html
6）https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101501.html

7) https://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/juyoukadai/wg_nano/7kai/nano07_sankou2_10.pdf
8) Jin Young Kim, Jin-Wook LeeJin-Wook Lee, More by Jin-Wook Lee, Hyun Suk Jung, Hyunjung Shin, and Nam-Gyu Park, Chem. Rev. 2020, 120, 15, 7867–7918.
9) Martin Green, Ewan Dunlop, Jochen Hohl-Ebinger, Masahiro Yoshita, Nikos Kopidakis, Xiaojing Hao, Prog Photovolt Res Appl, 2022;30:687–701.. Efficiency Table 60.
10) Shockley W., Queisser, H., Journal of Applied Physics, 1961, 32, 510–519.
11) https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101150.html
12) Wang, Liang; Chen, Mengmeng; Yang, Shuzhang; Uezono, Namiki; Miao, Qingqing; Kapil, Gaurav; Baranwal, Ajay; Sanehira, Yoshitaka; Wang, Dandan; Liu, Dong; Ma, Tingli; Ozawa, Kenichi ; Sakurai, Takeaki; Zhang, Zheng; Shen, Qing; Hayase, Shuzi、"SnOx as Bottom Hole Extraction Layer and Top In-situ Protection Layer Yields over 14% Efficiency in Sn-based Perovskite Solar Cells" ACS Energy Letters、accepted.

技術解説

アンチエイジング食品の探索と機能性検証

Identification and Functional Evaluation of Anti-Aging Foods

国立大学法人九州大学大学院
農学研究院
生命機能科学部門
教授

博士（農学） 片倉 喜範
Yoshinori Katakura

1．はじめに

最近の研究により、老化や寿命の制御機構が明らかになるにつれ、老化や寿命の制御因子である、進化的によく保存された長寿遺伝子（サーチュイン）が同定された。サーチュインは、老化を遅らせ寿命を延ばす唯一の確実な方法であるカロリー制限に対する生体反応に必須であることが示され、そのNAD^+依存性脱アセチル化酵素活性をもとに、エネルギー代謝と老化を結びつける重要なメディエーターとして認識されてきた。最近になり、サーチュインに関する研究はめざましい進展を見せており、ここでは、老化と寿命の調節因子としてのサーチュインの機能性と、サーチュインを標的としたアンチエイジング食品の探索、およびその探索から得られた食品の機能性について紹介する。

2．アンチエイジング実現のためのターゲットとしての長寿遺伝子 サーチュイン

サーチュインは、古細菌、酵母、線虫、ショウジョウバエ、ヒトなど、様々な生物でその存在が報告されている。哺乳類のサーチュインは、SIRT1からSIRT7まで7種類が知られている（表1）。このうちSIRT1は、脱アセチル化酵素活性を持ちながらNAD^+依存的に標的因子を制御し、細胞内の代謝回転やエネルギー状態に応答して、細胞のホメオスタシスを制御するというユニークなものである。最近では、寿命延長にも寄与することが明らかとなっている。SIRT2は、細胞質に存在するタンパク質で、様々な因子を脱アセチル化し、細胞周期制御、運動性、ミエリン形成への関与が明らかにされてきた。SIRT3-5はミトコンドリアに存在するタンパク質であり、SIRT3はミトコンドリア内の活性酸素消去酵素を活性化し、細胞内活性酸素レベルを低下させ、SIRT4はADP転移酵素であり、グルコース負荷時の生理的インスリンレベルの維持に関与する。SIRT6はADPリボシル転移酵素活性および脱アセチル化活性を併せもち、ゲノム安定性に寄与することが知られている。

表1　哺乳類のサーチュイン

サーチュイン	局在	機能
SIRT1	核・細胞質	代謝・炎症・寿命延長
SIRT2	細胞質	細胞周期・運動性・ミエリン形成
SIRT3	ミトコンドリア	脂肪酸酸化・抗酸化
SIRT4	ミトコンドリア	インスリン分泌・脂肪酸酸化
SIRT5	ミトコンドリア	尿素回路
SIRT6	核	ゲノム安定性・寿命延長
SIRT7	核小体	rDNA転写

3．サーチュインのアンチエイジング活性

3.1 代謝系

カロリー制限処理したマウスの白色脂肪細胞、肝臓、骨格筋、脳、腎臓でSIRT1の発現が増強されていることがわかり、SIRT1が全身で機能してアンチエイジングや寿命延長を実現していることが示唆されている。また、SIRT1高発現マウスは、グルコース、コレステロール、脂肪代謝の改善、身体能力の向上、生殖期間の延長を示し、さらに高脂肪食下で炎症の減少、耐糖能の改善、脂肪肝の抑制を示すことから、SIRT1が代謝調節あるいは正常化に重要な役割を果たすことが明らかとなっている。また、SIRT1によって活性化されるPGC-1αは、ミトコンドリア生合成に必須であり、SIRT1によるミトコンドリア生合成の促進、ひいては活性酸素の生成抑制、

脂肪酸酸化遺伝子の活性化を誘導することが知られている。

3.2 脳神経系

SIRT1ノックアウトマウスやNmnat-1トランスジェニックマウスを用いた解析により、神経保護効果に対する SIRT1 の寄与については疑問が呈されているはいるが、アルツハイマー病モデルマウスを用いた研究において、SIRT1の機能を推察する結果が相次いで得られている。すなわち、SIRT1はアルツハイマー病の原因とされるアミロイドによって活性化されるミクログリアの炎症シグナルを抑制し、脳内の SIRT1 高発現はアミロイド病変を抑制するとともに、神経細胞の生存を促進することが示されている。さらに SIRT1 の標的因子の一つであるPGC-1αの活性化が、脳内でのミトコンドリア生合成を促し、神経変性疾患の抑制につながりうる可能性も示唆されている。

3.3 細胞老化

最近では、個々の老化現象の一部を説明すると考えられている細胞老化における SIRT1 の機能についての報告も相次いでいる。すなわち、細胞老化に伴い SIRT1 の発現が低下すること、また SIRT1 の強制発現により細胞増殖が促進され細胞老化が抑制されることなどの報告から、SIRT1の抗細胞老化活性が推察されている。特に筆者らは、SIRT1の活性化により、その下流因子としてテロメラーゼが活性化され、その結果として、細胞分裂に伴うテロメアの短縮が起こりにくくなり、細胞老化が抑制される現象を見いだしている。

3.4 ゲノム安定性

老化細胞では、二本鎖切断（DSB）などのDNA損傷が蓄積することが広く知られているが、SIRT6を過剰発現させると細胞内のDNA損傷修復機構である相同組換えや非相同DNA末端結合が活性化することが明らかにされている。つまりSIRT6の活性化は、加齢に伴うゲノム不安定性の抑制に有効であると考えられている。

3.5 サーカディアンリズム

近年、転写活性化因子CLOCKがヒストンアセチルトランスフェラーゼとして機能し、サーカディアン依存的な遺伝子発現制御に関与していることが明らかになるとともに、ヒストン脱アセチル化酵素活性を有する SIRT1 がサーカディアン依存的な遺伝子発現制御に関与することが明らかにされている。このことは、サーチュインに由来するシグナルがサーカディアンリズムの調節に寄与していることを示している。

3.6 炎症

SIRT1は、炎症反応惹起において中心的な役割を担う転写因子 NF-κB の p65 サブユニットの脱アセチル化を通じて NF-κB 活性を減弱させ、その結果として炎症を抑制させうることが明らかとなっている。SIRT1の示すこの抗炎症効果が代謝系疾患の治療、さらには抗老化に重要な寄与を果たしうるものと考えられている。最近では、SIRT6ノックアウトマウスが早老傾向を示すこと、これらのマウスではNF-κB依存性の遺伝子発現が亢進していること、SIRT6がヒストンの脱アセチル化を引き起こすことによって NF-κB シグナルを減弱させることも示されており、SIRT6がNF-κBシグナルの過剰活性化を抑制することによってアンチエイジングを実現できる可能性が推察されている。

3.7 皮膚老化

最近になり、皮膚におけるSIRT1による皮膚改善効果も明らかになりつつある。SIRT1 の活性化が、PGC-1αを活性化し、皮膚におけるミトコンドリアの生合成を誘導することで、シワ改善につながりうる可能性が示唆されている。さらに、SIRT1の活性化を通じて、皮膚内タンパク質（インボルクリン、ロリクリン）の増強を通じた外的バリアや、セラミド合成促進を通じた内的バリアの増強の可能性も明らかになりつつある。

4. サーチュインをターゲットとしたアンチエイジング食品探索系

筆者らは、長寿遺伝子であるサーチュインをター

ゲットに、アンチエイジング食品をスクリーニングすることのできるシステムを構築している。SIRT1の活性は、補因子として働く細胞内のNAD+レベルあるいはSIRT1プロモーターによる転写レベルで制御されていることが知られている。当研究室では、SIRT1プロモーターによる転写レベルでの制御機構に着目し、SIRT1プロモーターの制御下でEGFPを発現するレポーターベクターを作製した。当該レポーターベクターをヒト表皮角化細胞株（HaCaT）に導入し、安定発現株を樹立した。その後、各種食品成分を添加し培養後のSIRT1プロモーター活性の変化を、細胞内のEGFP蛍光強度の変化として検出・定量することのできるシステムを構築した（図１）。細胞内のEGFP蛍光強度の定量的測定は、イメージングサイトメーター（IN Cell Analyzer 2200, Cytiva）を用いて行った。これまでに、各種食品成分、ポリフェノール類、植物抽出物、エッセンシャルオイル等を用いて探索を行い、サーチュイン活性化効果を有する食品成分の同定に成功している。

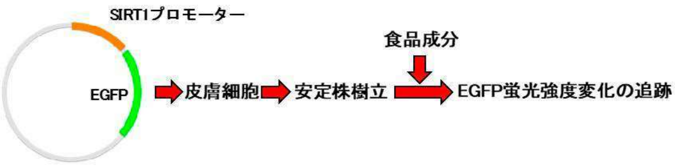


図１　アンチエイジング食品探索系

５．アンチエイジング食品の機能性

これまで上記システムを用いて探索・同定したアンチエイジング食品成分の機能性について紹介する。

5.1 紫外線傷害修復効果

SIRT1活性化食品として同定されたポリフェノール類は、皮膚細胞に対して、紫外線照射後のDNA傷害を修復しうる活性を有することが明らかとなった。これはこれまで知られているサンプロテクト効果とは異なり、ここで同定したポリフェノールが、紫外線を浴びて生じたDNA傷害を修復しうることを示している。

5.2 ミトコンドリア活性化効果

上記システムを用いて同定したSIRT1活性化効果を有するエッセンシャルオイルが、皮膚細胞において、SIRT1の下流因子PGC-1αの活性化を通じて、ミトコンドリアの生合成を誘導し、ミトコンドリアのアンチエイジングを実現しうることを明らかにしている。この効果はしわ抑制につながりうるものと考えている。

5.3 バリア増強効果

同様に、上記システムを用いて同定したSIRT1活性化効果を有するエッセンシャルオイルが、SIRT1の活性化を通じて、その下流因子である表皮分化マーカー（インボルクリン、ロリクリン）の発現増強を通じて外部バリアを、セラミドを構成する脂肪酸合成促進とセラミド合成酵素遺伝子の発現増強を通じてセラミド合成を増強することを通じて、内部バリアを増強する可能性を明らかにした。

5.4 酸化ストレス低減効果

上記システムにおいて、用いるプロモーターをSIRT3プロモーターに変換し、同様のシステムを構築し、SIRT3活性化食品探索系を構築した。この系を用いて同定したポリフェノールは、SIRT3の活性化を通じて、その下流因子であるSOD2を活性化し、細胞内活性酸素を低減させうることがあきらかになるとともに、この食品成分がメラニン抑制効果、つまりシミ抑制効果を示すことを明らかにした。

5.5 DNA損傷修復効果

上記システムにおいて、用いるプロモーターをSIRT6プロモーターに変換し、同様のシステムを構築し、SIRT6活性化食品探索系を構築した。この系を用いて同定したポリフェノールは、SIRT6の活性化を通じて、DNA損傷修復機構（相同組換え・非相同DNA末端結合）を活性化することで、DNA上の二本鎖切断を修復することが明らかとなるとともに、その修復を通じて、細胞老化を抑制することも明らかになった。ここで同定したポリフェノールは、細胞老化抑制に機能しうると考えることができた。

６．おわりに

本総説で紹介したように、サーチュインの様々な機能性が明らかになるとともに、その活性化を引き起こすアンチエイジング食品の可能性は広がり続けている。今後は、様々な個別の組織のアンチエイジングばかりでなく、体全体のアンチエイジングを実現できるような食品を開発していけたらと考えている。

技　術　論　文

連続鋳掛け法の開発及び高機能複合材料の実用化

Development of CPC Process and Practical Application of High-performance Composite Material

代表取締役会長
博士（工学）　山本　厚生
Atsuo Yamamoto

要　旨

連続鋳掛け法（CPC 法）は当社が独自に開発した高機能複合材料を製造する画期的な製造法であり、各種ローラー及びロールの製造に用いられている。とりわけ 1990 年代に日本で実用化された高速度工具鋼系（ハイス）ロールの開発において注目され、高機能材料を自由に製造でき、強靭な芯材を採用する理想的な複合ロールの製造法であるとの評価をいただいた。本ロールは従来比 5 倍以上の極めて優れた性能を発揮し、圧延製品の品質向上とともに圧延操業上のロール起因の制約が大幅に解消され、圧延技術の進歩に貢献した。さらに、溶接技術との連携により、使用済の同ロールを再生する技術を開発し、経済的なコストで高性能ロールを実現した。この結果、ロールの完全リサイクルシステムを構築し、CO_2 排出量を 55%削減して社会的要求に応えている。

Abstract:

The continuous pouring process for cladding (CPC process) is epoch-making manufacturing method for high-performance composite materials originally developed by FUJICO CO.,LTD., and it is used to various rollers and rolling mill rolls. Especially, it attracted attention in the development of high-speed tool steel type rolls that were put into practical use in Japan in the 1990's. it was evaluated as an ideal method for composite rolls that can freely manufacture high-performance materials and adopted a strong core material. CPC rolls display the excellent performances more than 5 times for the conventional rolls. As a result, the quality of the rolled product was improved and the constraints caused by the rolling mill roll were remarkably eliminated, and the roll contributed to the progress of the rolling technology. Recently we developed a new technology to re-birth the used CPC roll through cooperation with welding. As a result, we achieved high performance rolls at economical cost. This new roll has established a complete recycling system and the reduction of CO_2 emissions by 55%, and they are responding to social demands.
Keywords: rolling mill roll, cladding, high-speed tool steel, hot rolling, wear, toughness

1．はじめに

当社は製鉄工程における鋼塊製造に使われていた鋳鉄製鋳型の補修技術 [1]を開発して立社した。本技術は当時は困難とされていた鋳鉄の溶接を可能とし、鋳型関連コストを 1/3 程度に削減するとともに資源保護に貢献する画期的なものであった。その結果、国内の主要製鉄所より高い評価と信頼を得て招聘され、1952 年の創業以来グループ会社を含め事業を拡大した。一方、1970 年代に登場した連続鋳造法の急速な普及により、鋳型を用いた鋼塊製造が姿を消すことになり、新しい事業基盤の創出が急務となった。そこで、製鉄所構内の付帯作業やメインテナンス事業に業態を移行するとともに、難しい材料の溶接技術をもとに、耐摩耗性ならびに耐食性を高めた複合商品の製造に積極的に取り組む。この結果、肉盛溶接法、溶射法、鋳掛け法による種々の商品を開発し、提供することができた [2]。さらに、これらの複合化技術の蓄積を集約し、連続鋳掛け法（以下 CPC 法と称す）[3]を独自に開発し

た。この結果、熱延工程におけるランナウト・テーブルローラーをはじめ各種ローラーが実用化され高い評価を得た。また、1980年代末の熱間圧延分野において、耐久性（摩耗、肌荒れ）とともに高負荷圧延に耐える強靭性の兼備ならびに向上が要求され、多合金系白鋳鉄（いわゆるハイス）ロールが日本で開発され普及した[4]。その開発過程において多くの複合製造法が試みられた中で、CPC法は最も適した製造法とされ、高機能ロールが製造可能であると評価されている[5]。

そこで、本報では当社が独自に開発したCPC法を概説し、本法を用いて開発された製品について、品質および実機使用での性能を紹介する。さらに、近年の最大の社会ニーズである環境保護ならびにカーボン・ニュートラルへの貢献について紹介する。

２．CPC法の開発

2.1 歴史的背景と開発推移

ロールおよびローラーには耐摩耗性や耐食性が強く求められ、高炭素・高合金鋳鉄が広く使用されている。一方、強靭性を兼備することが望まれることも多いが、これまで実用化された材料ではこの両者を単一材料で兼備することが難しかった。そこで、これまで多くの複合化プロセスが試みられ、1960年代に実用化された遠心鋳造法[5]が普及した。同法はその後鋳鉄系に限ることなく、鋼系およびアダマイト系材料（C含有量が1.2%～2.2%程度の鋳鋼と鋳鉄の中間的材料）[6]に、さらには一体型ロールのみならず組立式ロール[7]の中空スリーブの製造にも広く適用され、現在もロール製造法の中核をなしている。しかしながら、複合材料の製造においては鋳鉄ならびに合金鋼を外層（肉盛）材として採用する場合には、健全な境界を形成するために芯材（内層）には融点の低い鋳鉄を採用せざるを得ず、強靭性において大きな制約があった。また、芯材が高Cであるため境界の組織偏析及び脆弱化が生じ易く、課題が残った。そこで、耐久性と強靭性を兼備する複合ロール製造法の開発要求が生じた。前述のとおり、ハイス系の複合ロールの実用化においては、耐摩耗性と強靭性の兼備ならびに向上が強く望まれ、新しいロール製造法への期待が高まった。

当社は前述したとおり実用化された鋳鉄製の鋼塊鋳型の補修技術の確立を経て、鉄鋼製造用ローラーへの鋳鉄材料の肉盛溶接による補修再生を実用化した。さらに、肉盛層の均質性及び肉盛効率の改善が強く望まれ，肉盛効率の向上と肉盛材料の自由度の拡大を目指して改善を進めた。その推移をFig.1[8]に示し時系列的に述べる。肉盛溶接は先ず横式(Fig.1a)でスタートした後、櫓式縦式肉盛溶接(Fig.2b)を採用した。次に自動回転降下式(Fig.1c)とし、さらにアーク熱を利用した鋳掛け肉盛方式(Fig.1d)に移行した。その後、連続鋳掛け方式(Fig.1e)とし、高周波誘導加熱装置を導入し(Fig.1f)、現在のCPC法の原型となった。

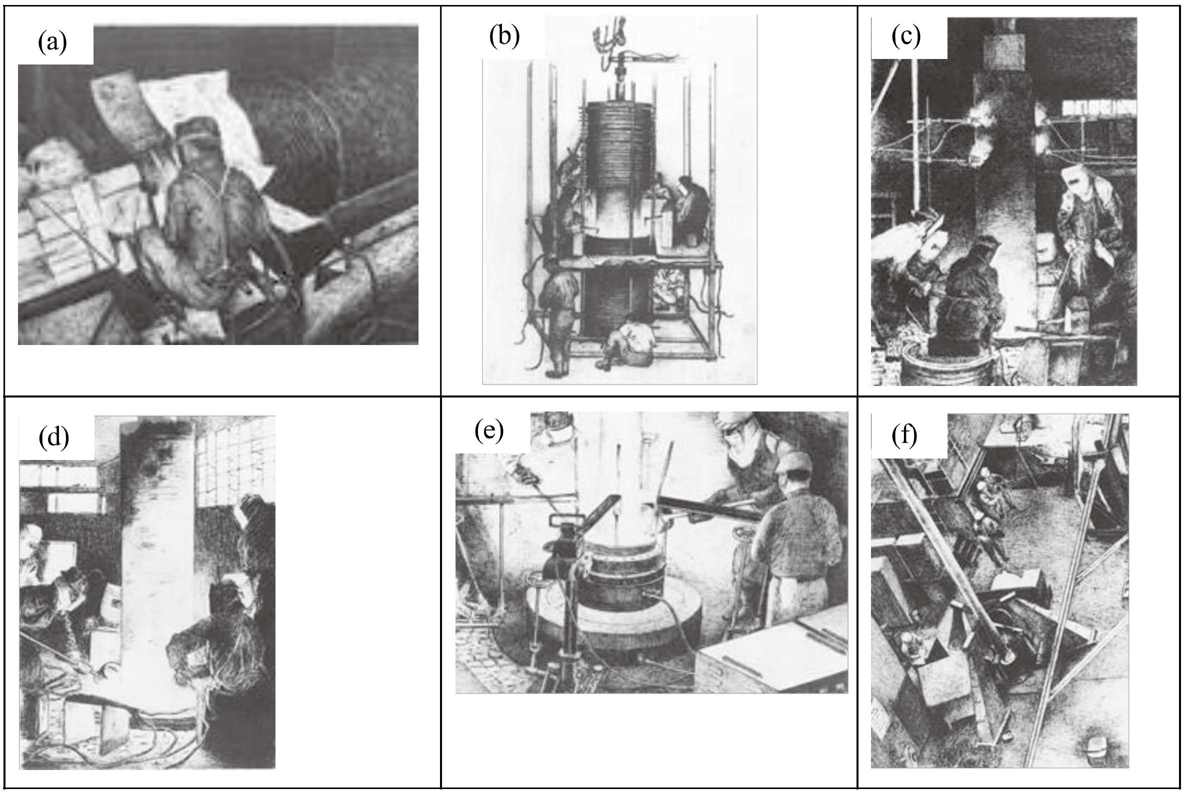


Fig.1 Development process of CPC-process, (a) conventional over-laying welding, (b) scaffold type vertical overlay welding, (c) rotation descent overlay welding, (d) rotation descent type cast welding, (e) same method cast welding with arc heating, (f) continuous pouring cast welding with induction heating.

2.2 CPC 法の理論的解説

2.2.1 溶湯の清浄性[8)]

肉盛材料（ロールおよびローラーの場合には外層材とも呼ばれる）は大別して鋳鉄系と鋼系の 2 種類があり、それぞれの溶湯の清浄性の確保について述べる。

先ず主に採用される鋳鉄溶湯の清浄性について述べる。鋳鉄には酸素との親和力が高い C，Si，Mn がかなりの量含まれている。したがって、溶湯中に侵入した酸素はこれらと反応して酸化物となりやすい。Ca, Mg, Al，Ti 等の強酸化性合金元素を含有していない通常の鋳鉄では、大気圧下において SiO_2 ならびに MnO の還元平衡温度より高い 1823K(1550℃)程度以上の高温では、溶融鋳鉄内には炭素（C）が飽和状態まで含有されている。したがって、酸化反応と還元反応が同時に起こり、飽和状態の C のため酸化反応で生成された酸化物は直ちに還元される。溶融鋳鉄内の Mn を引例する。

酸化反応により

$2Mn+O_2 \rightarrow 2MnO$（酸化物）　　・・(2.1)

還元反応により

$2MnO + 2C \rightarrow 2Mn + 2CO\uparrow$（ガス）　　・・(2.2)

上記の両反応が同時に起きるので、その和をとり両辺より重複する 2Mn および 2MnO を削除すると次のとおりである。

$O_2 + 2C \rightarrow 2CO\uparrow$（ガス）　　・・・(2.3)

したがって、

① 溶融鋳鉄内の C は常に酸化されて常時 CO↑ガスとなって燃焼している。

② CO ガス↑が常時発生するため、溶湯を高温に保持して湯の流動性を確保し、ガスを大気中に上昇させねばならない。なお、ガスが大気中に上昇し得ない場合は肉盛層中に鋳巣が発生する。

③ C 以外の Mn や他の合金成分には増減がない。Mn とともに鋳鉄中に多く含有される Si についても、同様である。

次に、鋼溶湯における清浄性について述べる。 鋼には鋳鉄のように飽和 C%ではなく少量の C しか含んでいないので、自己の C で酸化物を還元するいわゆる自己脱酸の力がない。したがって、溶融鋼の表面には溶融滓（スラグ）を構成して大気中の酸素と遮断する必要がある。また､溶融鋼は種々のガスを吸収しており、凝固時にこれ等のガスを吐き出すため、溶湯温度を高温に維持することにより酸化を促進するとともに流動性を良好にして、大気中に逃さなければ肉盛層内にガスによる鋳巣として残る。

2.2.2 凝固組織

肉盛速度の確保を目的に連続鋳造方式を採用する。連続鋳造法は一般の鉄鋼製造[9)]および一部鋳鉄材料の鋳造[10)]で採用されているが、いずれも単一材料の鋳造である。一方、本法においては二種の材料による複合材料の製造を行う。すなわち、溶湯下方に緩衝材の黒鉛を内挿した水冷鋳型を設置し、芯材との間隙に溶湯を補給しながら凝固させ、下方に引抜き複合材料を製造する。製品は断続的に引抜き、溶湯表面との間に相対運動を行い､オシレーションを製品表面に付与する。肉盛部については水冷鋳型と芯材両者による抜熱に加えて、凝固した下方の凝固肉盛層による抜熱により肉盛層を形成させていく。鋳型と芯材の間隙における肉盛材の凝固の模式図を Fig.2 に示す。Fig.2(a)に理想的な凝固形態を示すが、凝固界面を下方に凸状のなだらかな U 字曲線を形成し、維持することが望ましい。これは肉盛層内に最終凝固部を生成させず、常に上方の溶湯を凝固界面に補給することで押湯効果を付与し、凝固収縮巣やガス巣の生成を抑制させ、健全な肉盛層を形成させる。したがって、水冷鋳型、芯材、下方の凝固層からの冷却と十分な溶湯熱量、さらに引抜速度とのバランスにより良好な界面形状を維持させることが重要である。なお、引抜き速度には限界があり、これを超える高速で引き抜いた場合には、鉄鋼製造における連続鋳造と同様に凝固界面の形状は Fig,2(b_0)に示すような V 字状となり、肉盛層内部に最終凝固部が生じる。さらに、水冷鋳型からの抜熱に対して芯材の抜熱が十分でない場合には、最終凝固部が肉盛層中心付近から芯材側に移行し（Fig.2(b_1)，(b_2)）、顕著な場合には芯材表面近く（Fig.2(b_3)）になると考えられる。この場合には、凝固収縮巣に加えて芯材表面のコーティング材および酸化皮膜等の不純物の溶湯中での浮上分離ができず、これを咬み込むことにより鋳造欠陥を生じさせる危険がでてくる。

さて、本法は断続的に製品を引き抜くことにより、一般鋼材の連続鋳造法と同様に鋳型と製品間に相対運動を付与する。これにより凝固組織、一般的にはデンドライトの過剰な成長が抑制され、凝固割れが防止され、組織の微細化ならびに均質化がなされる。

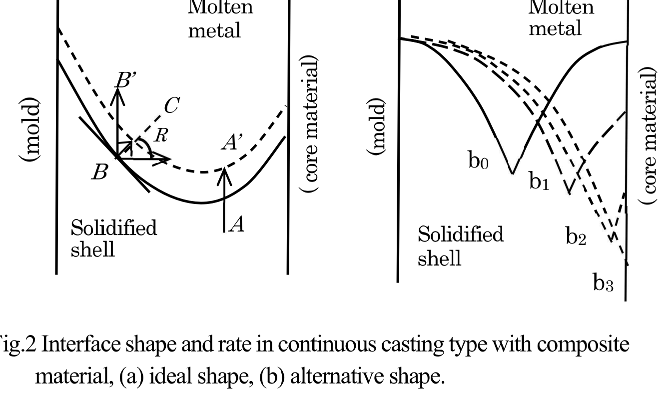


Fig.2 Interface shape and rate in continuous casting type with composite material, (a) ideal shape, (b) alternative shape.

2.2.3 肉盛材と芯材の溶着

本法は固相の芯材周囲に肉盛材を鋳掛けて複合材料を製作するものであり、使用時の機械的ならびに熱的負荷により境界部が破壊しないため、芯材と肉盛材は冶金的に完全に溶着していることが不可欠である。したがって、化学成分の拡散に加えて、十分な熱量による芯材表面の溶損を要する。このため、熱的には①芯材表面を 1173K(900℃)程度に加熱、②溶湯との接触時間の確保に加えて、③芯材表面に塗布したガラス質の高温溶融とともに、芯材の加熱によりその表面に生じた高融点の酸化皮膜、主に Fe_3O_4 もしくは Fe_2O_3 の還元を図り、溶着を容易にする。なお、溶着時の芯材の溶損は、肉盛材への希釈の観点から小さいことが望ましい。この観点で、本法は高融点の鋼系固相芯材を用いることで溶損量が抑制される。また、高炭素の鋳鉄が芯材として採用される遠心鋳造法の場合には、肉盛材料の合金元素と芯材の炭素の拡散及び混合によって富化が生じ、炭化物もしくは黒鉛の凝集した異常組織が生成されやすい。しかしながら、本法においては低 C の芯材の希釈であるため、この種の異常組織は全く生成されない利点がある。

2.2.4 誘導電流の利用

本法においては、肉盛金属の溶湯を高温に保持するとともに、芯材表面の一部を少量溶損させせつつ溶着させるために、溶湯および固相芯材表面への熱量の供給を要する。そこで、大容量の熱を効率よく均質に供給できる誘導電流を用いる。肉盛溶湯への誘導電流の負荷は加熱と同時に溶湯の撹拌効果を有し、いわゆる電磁撹拌による溶湯内不純物の浮上分離効果があり望ましい。誘導電流による芯材表面の加熱深さ(浸透深さ)ならびに溶湯の撹拌力は、いずれも周波数の平方根に逆比例する[11]。過度の溶湯撹拌は凝固界面での溶湯の流れを生じ、安定した凝固を損ない組織偏析を生ずる悪影響を及ぼし、芯材の表面加熱についても加熱浸透深さ浅く、溶損量が小さいことが望ましく、併せて熱効率の観点からも高い周波数が望ましい。

Fig.3 に本プロセスの概略図[12]を、Fig.4 に鋳造状況ならびに鋳造後の製品外観を示すが、連続鋳造方式により複合材料を製造するものである。溶湯の清浄性を確保して、厚肉の 1 層盛により健全な肉盛層を形成する。さらに、誘導電流を用いて芯材と完全に溶着させ、水冷鋳型と引抜き条件のバランスによって微細で均一な肉盛層を可能とした。また、芯材には鋼系の強靭材料を採用し、近年の高負荷圧延から要求される強靭性の確保に合致する。

このプロセスの最大の特徴は次の 3 点である。

①外層材の高合金化及び多合金化が偏析することなく可能である

②外層材の冷却速度が大きく、緻密な凝固組織が得られる

③芯材に強靭な鋼系材料を使用できる

これらはロールに要求される性質の中で最も重要な耐摩耗性、耐肌荒れ性及び強靭性の兼備ならびに向上の要求に合致する理想的なプロセスと言える。

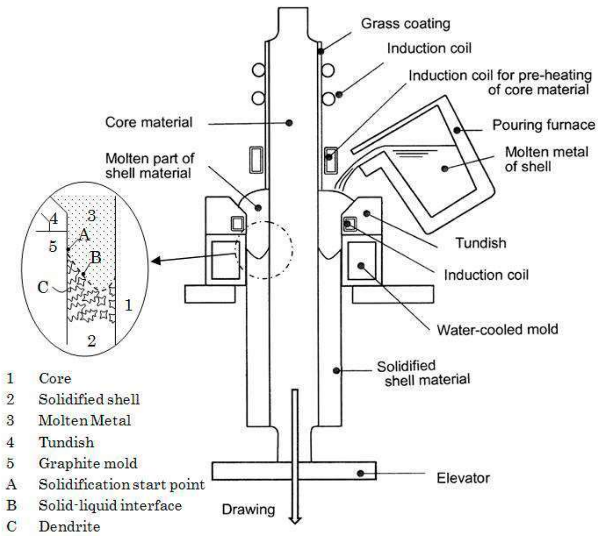
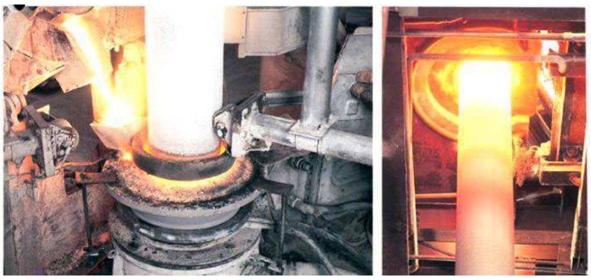


Fig.3 Illustration of CPC process.



(a) (b)

Fig.4 CPC process in operation, (a) Overview of pouring, (b) Appearance of just as-cast product.

3. CPC 法による代表製品の品質と性能

3.1 テーブルローラー

13%Cr 系材料を肉盛材料に採用し、鋼系中空母材の周囲に CPC 法を用いて複合スリーブを製造した[13]。その切断面の写真を Fig.5 に示す。薄肉であるにもかかわらず、外内面と境界はほぼ同心円で製造される。境界部の顕微鏡組織の例を Fig.6 に示すが、左側は肉盛材(Cr 系合金)、右側は母材(STKM13A)である。境界部には一般の遠心鋳造法による複合鋳鉄材料にみられるような炭化物や黒鉛の凝集や凝固収縮巣は全く認められず、健全な複合材である。

本ローラーと、遠心鋳造法で製造された代表的な従来材料である鋳鉄を実際の圧延作業に供して比較評価を行った。使用後の本ローラー表面の外観は Fig.7に示すとおり美麗な肌を呈す。Fig.8に示すとおり消耗は従来ローラーの1/5程度と極めて少なく、

中規模のホットストリップミルの年間生産量に当る400万トンの圧延で消耗量は0.5ｍｍ程度であった。一般に、この種のローラーの有効使用径は10mm程度であるので、10年以上の長期間使用される。近年においては自溶性合金（Ni基合金）を用いた溶射タイプのローラーが採用され、耐摩耗性ならびに耐焼付き性に限って言えば極めて良好である。一方、実際の操業では熱負荷の変動が大きく圧延操業が不安定な条件下、例えばステンレス鋼圧延時や仕上げ圧延機列直後の各種計測機器を設置した水冷抑制域、さらに高速で搬送される圧延製品との衝突部での表面欠損の危険が高い過酷な条件下で、本ローラーは高い耐久性を示し、評価をいただいている。

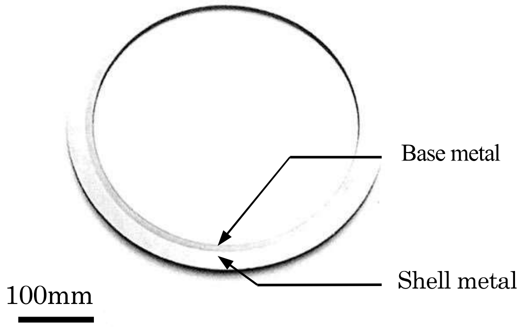


Fig.5 Sectional macrostructure of CPC roller.

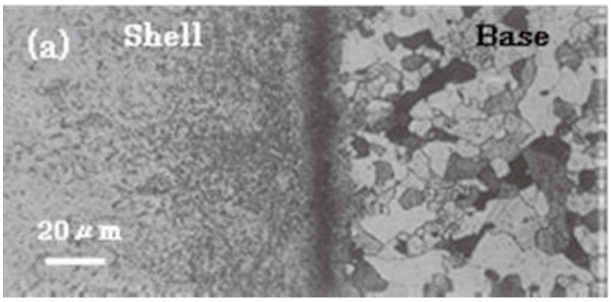


Fig.6 Microstructure of CPC roller boundary.

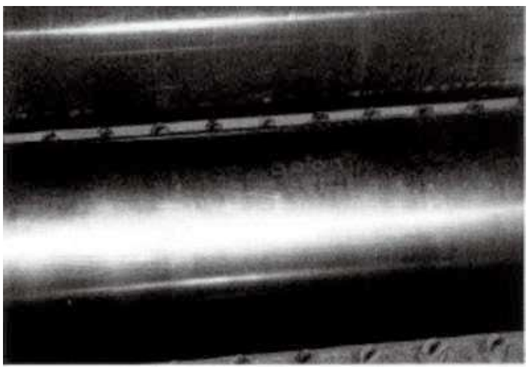


Fig.7 Surface texture of run-out table roller with 13%Cr steel shell material manufactured by CPC process.

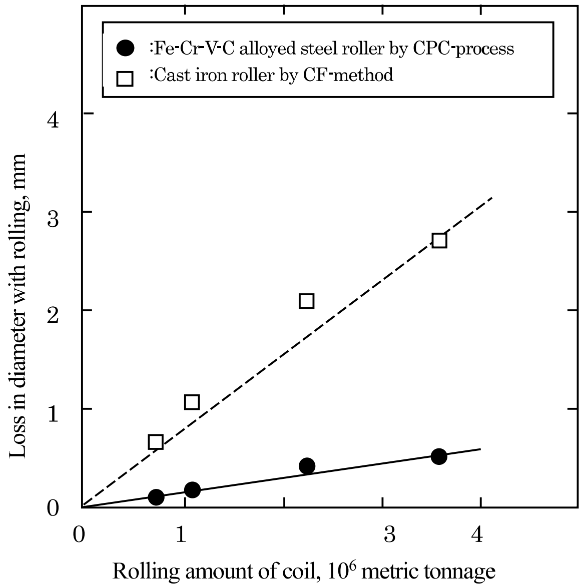


Fig.8 Wear of run-out table roller in hot strip mill.

3.2 ハイス系ロール

ロール材料は大きく分類すれば鋳鋼、鋳鉄及びその中間的なアダマイトがある。熱間圧延用ロールは高温鋼材を圧延するために、耐摩耗性の要求がとくに強く、硬い鋳鉄が一般に用いられてきた。19 世紀初頭に欧州でチルド鋳鉄が導入され、1924 年に米国で高速連続圧延のホットストリップミルが出現し、硬い炭化物と適度の黒鉛を有して耐摩耗性と耐焼付き性に優れた高合金グレン鋳鉄（インデフィニッド・チルド鋳鉄とも呼ばれる）ロール [6]が実用化され、現代も多く使用されている。一方、仕上げ前段圧延機列用には高クロム鋳鉄ロールが欧州では直接的に、日本ではアダマイトロールを経て導入された。さらに、高性能ロールの開発要求に応えて、CPC 法によるハイスロール（以下 CPC ロールと称す）が実用化された [14]。本材料は Cr,Mo,V,W 等を含有し、高硬度の合金炭化物（MC, M_2C, M_7C_3 等）を利用したもので、高温においても高い硬さを示す。Fig.9 に典型的なハイス系材料(2%C-5%Cr-5%Mo - 5%W-5%V-5%Co)の顕微鏡組織写真を示す。本系材料の凝固形態は次のとおりである [15]。

$$L_0 \rightarrow \gamma\,(\text{初晶}) + L_1$$

$$\rightarrow \gamma + MC\,(\text{第一共晶}) + L_2$$

$$\rightarrow \gamma + M_2C\,(\text{第二共晶})$$

初晶γ相に加えて第一共晶 MC(主に VC)と第二共晶 M_2C 炭化物(炭化物反応により M_6C に変化)が複雑に生ずる。また、本材料の主たる特徴をなす VC 炭化物は比重が小さいため遠心鋳造法では遠心力による偏析が、

さらに回転に伴う溶湯のスリップによる層状偏析が生じやすく製造に困難があり、抑制するために合金元素を制限する必要がある[16]。一方、本法はこの種の制約が全くなく、自由に製造できる。ハイス系材料を肉盛材料に採用し、鋼系中実母材（SCM440）の周囲にCPC 法を用いて複合ロールを製造し、切断面の写真を Fig.10 に、境界組織を Fig.11 に示すが、同心円の健全な複合材となっている。

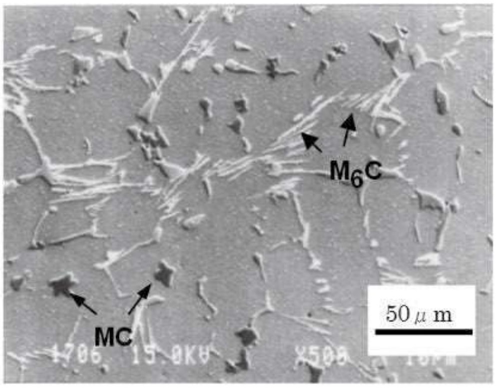


Fig.9 Typical microstructure of high speed steel tool type shell material manufactured by CPC process.

Fig.10 Sectional macrostructure of roll manufactured by CPC process.

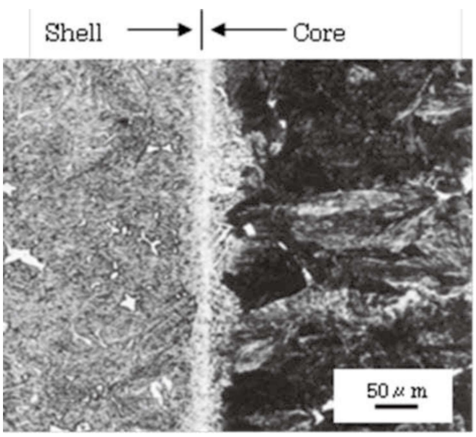


Fig.11 Microstructure of CPC roll boundary.

次に、CPC ロールが最も普及しているホットストリップミル及び棒鋼・線材ミルでの評価を述べる[17]。

先ず本ロールの普及の契機となったホットストリップミル仕上げ圧延用ロールについて、最も重要な摩耗について調査し、圧延負荷をパラメータ化して材質別の比較を Fig.12 に示す。CPC ロールの摩耗が従来ロールに比べて 1/5 程度と極めて少ないことが明瞭にわかる。もう一つの重要なロール肌について、前段ならびに後段圧延機列での使用後の典型的なロール肌例を従来ロールと比較して Fig.13 に示す。前段圧延機では高温の圧延材との接触によりロール表面に酸化皮膜（黒皮）が生成されるが、CPC ロールでは皮膜が薄く、成長が抑制されたため、剥離によるロールの損傷が少なく抑えられた。さらに、酸化膜の成長を抑える特殊潤滑油[18]の併用により長時間連続圧延を実現した。

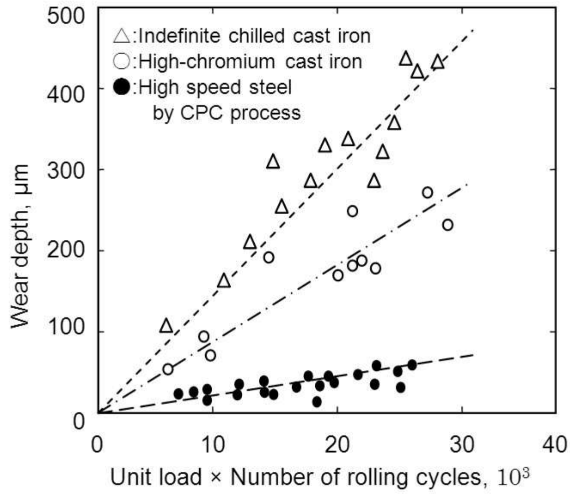


Fig.12 Wear of rolls during finish rolling in hot strip mill.

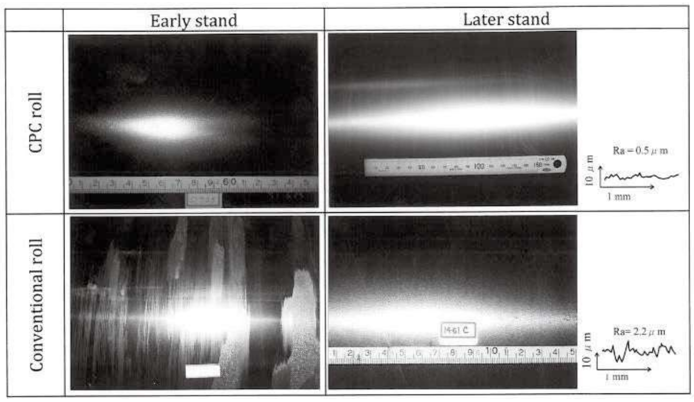


Fig.13 Comparison of surface appearance of rolls used in hot strip finishing mill, conventional roll: high-chromium cast iron (early stand) and indefinite chilled cast iron (later stand).

一方、アブレージョン摩耗の形態を示す後段圧延機においては、耐摩耗性の向上に加えて、CPC 法による微細な結晶組織により小さな表面粗度が安定的に維持された[14]。ロール性能は従来比で 5 倍以上の向上が達

成され、ロール研削間の圧延量はFig.14に示すとおり、2.5～10倍に増大した。これに伴いロール研削回数が減少し、コストが削減されるとともに生産性の向上が図れた。

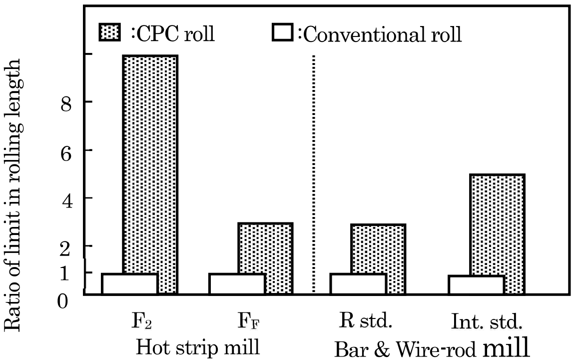


Fig.14 Change of roll performance CPC rolls for typical rolling mills.

本圧延機列での課題は前述のとおり圧延トラブル遭遇時に発生したき裂によるロール消耗であり、ロールの材質及び管理面での改善に加え、圧延操業の適正化を進めてきたが、さらなる改善が望まれる。

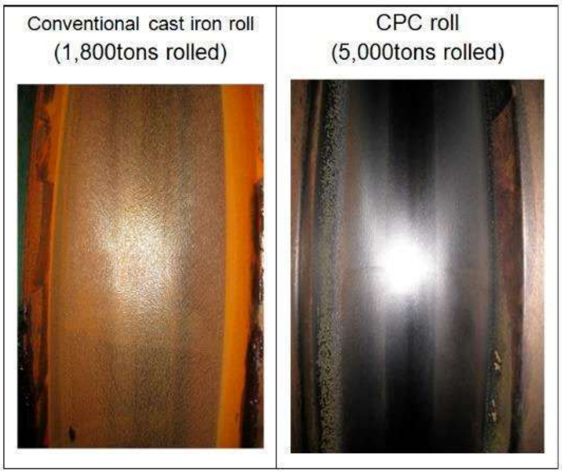


Fig.15 Comparison of surface appearance of rolls used in bar mill 10th stand.

次に棒鋼、線材圧延用ロールについて述べる。粗列後段から中間列にかけての課題は主として耐摩耗性であった。さらに、棒鋼・線材圧延では鋼板圧延以上に美麗な表面肌要求が高いため、摩耗に加えて使用後の孔型表面の粗度にも留意する必要があり、CPCロールの導入はこれらの要求に適したものであった。Fig.15には中間列でCPCロールを使用した際のロール肌写真を従来ロールと比較して示したが、従来ロールの3倍近い大量圧延にもかかわらず美麗なロール肌を呈している。Fig.14中に併示したとおり、性能向上による連続圧延の拡大がなされた。なお、高い性能を維持するには十分な冷却水が不可欠である。また、高負荷での過剰圧延時においては小突起状肌荒れの発生が課題であり、これまでの経験則に加えて圧延負荷の定量化による限界値の設定が望まれる。

４．最近の技術開発成果と社会的貢献

CPCロールは極めて優れた性能を発揮する一方、強靭な鍛鋼製芯材の採用はコスト増をもたらしていた。そこで、鋼系芯材は溶接が可能であることに着目し、CPC法と溶接技術の連携により、使用終了して廃棄されたCPCロールの再生技術[19]を開発した。Fig.16(a)に軸部の肉盛溶接の作業状況を示す。また、同図(b)には摩擦圧接法による軸部の接合[20]における加熱・負荷時の最終段階（アップセットと呼ばれる）の外観写真を示す。前者は軸部形状に沿って後工程の変形及び酸化を考慮して完成形状が確保できるように、軸部の全表面が高強度材で肉盛溶接される。一方、後者においてはCPC鋳造素材より多数本の胴部を採取し、軸部形状及び寸法が確保できる新規調達の軸部を接合し、最終的には所定の形状に加工される。軸部は胴部芯材に比較して小径であり、比較的安価な圧延鋼材を採用できる利点もある。生産性の向上に加えて製造コストの削減が可能となった。なお、再生された部分は欠陥のない健全で十分な強度を有する。

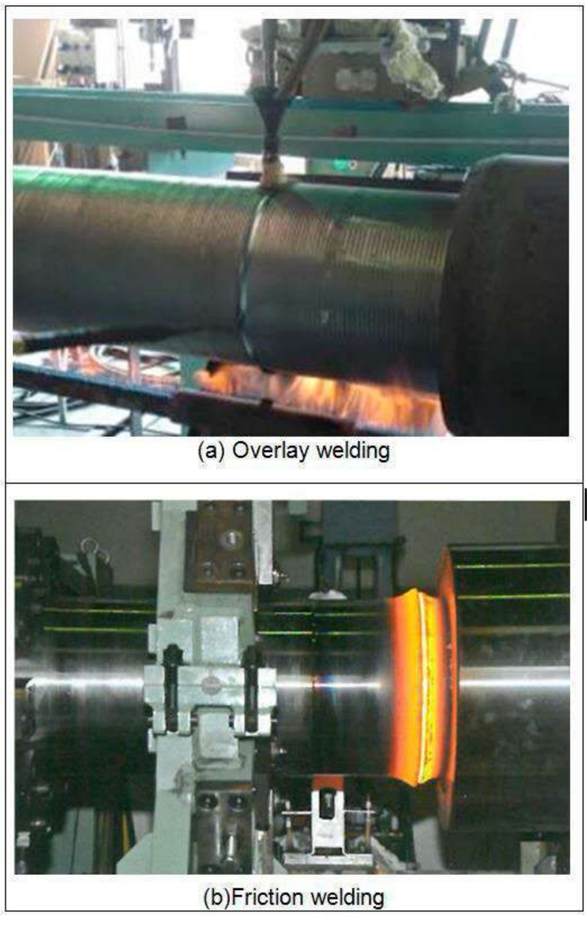


Fig.16 Overviews of re-birth operation in journal of CPC roll.

圧延鋼材と直接接触し圧延作業に供される胴部については、新規製造ロールと全く同一条件にて製造されるため性能は全く同じである。Fig.17 に再生ロールの外観を示す。製造コストはFig.18 に示すとおり本法の採用により約 20%が低減された。Fig.19 に再生によるCO_2排出量の削減を示すが、約 55%削減された [19]。

CPC ロールの再生は経済的なコストで高性能ロールを実現した。さらに、この技術は作働ロールの完全リサイクルシステムとCO_2排出量の著しい削減を確立し、新しいロールはまさに ECO タイプのロールである。

Fig.17 Apparatus of re-birthed CPC roll for hot strip rolling.

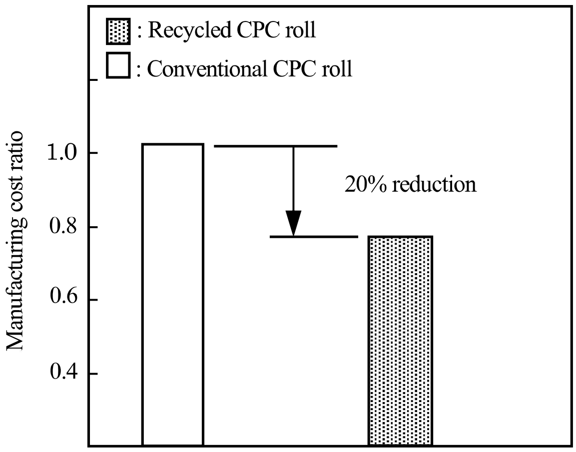


Fig.18 Change of manufacturing cost by re-birthing of CPC roll.

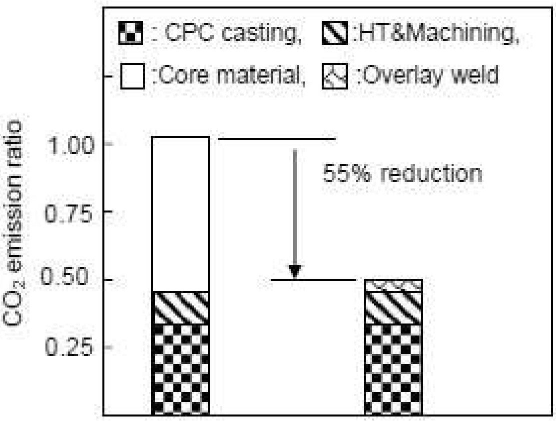


Fig.19 Reduction of CO_2 emission with re-birth of CPC roll.

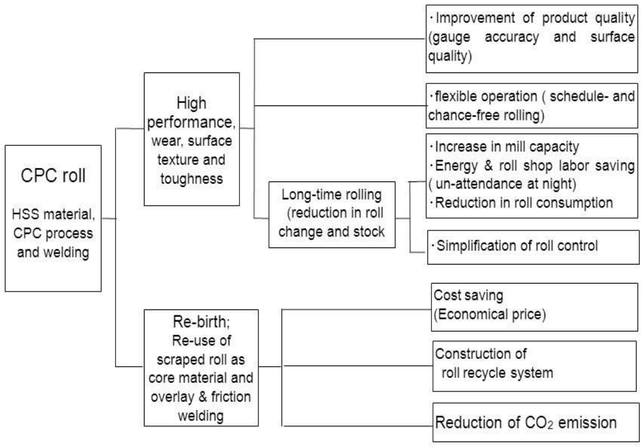


Fig. 20 Benefits obtained by introduction of re-birthed CPC rolls with re-birth into rolling mill.

５．得られた成果と今後の方向性

CPCロールの主な利点と得られた成果をFig.20に要約する。 CPCロールは優れた性能、特に極めて小さな摩耗及び美麗なロール表面肌を示す。CPCロールの出現により、ロール性能は著しく向上し、これにより、①長時間連続圧延、②圧延操業の自由度の拡大が可能になるなど圧延分野においても多くの成果が得られた。一方、大きな成果が得られたが圧延工場間で違いがあり、引続きロール材の更なる機能向上や、CPCロールの特性を活かした圧延技術が望まれる。また、当社の技術的特徴を生かした再生技術によるCO_2発生量の削減に代表されるように、社会的要求に応えつつ、高性能ロールを経済的に供給していきたい。

参考文献

1) 日本特許 241118 号
2) 実用新案第 830886 号
3) 日本特許 552637 号, US 特許 3455372
4) 倉橋隆朗ほか：塑性と加工 31-352(1990) 632
5) Rolls for the Metalworking industries, ISS (2002) 181
6) 宮下格之助：鉄と鋼 57-5(1971) 696
7) Rolls for the Metalworking industries, ISS (1990) 121
8) 富士工業所 20 年の歩み(1975) 163
9) 日本鉄鋼協会編：第 3 版鉄鋼便覧Ⅱ製銑・製鋼, 丸善(1979),pp611-670
10) 鋼鋳物・鋳鉄鋳物：地人書館(1979),pp36--371
11) 高橋勘次郎ほか : 高周波の基礎と応用、東京電機大学(1990) 4
12) 株式会社ﾌｼﾞｺｰ ﾊﾟﾝﾌﾚｯﾄ
13) 山本厚生ほか：鋳造工学 91-2 (2019) 94
14) Rolls for the Metalworking industries, ISS (2002) 187-189
15) 松原安宏ほか：鋳造工学 69(1997) 917

16) T.Tanaka et.al., 39th MWSP Conf. Proc. ISS,Vol. XXXV, (1998) 435-444
17) 山本厚生ほか：ﾌｼﾞｺｰ技報 No.26(2018)26
18) 伊原ほか：CAMP-ISIJ 15(2002) 309
19) A.Yamamoto et al: Mater.Trans.60(2019) 770
20) 国際公開特許 WO2014/168142

本報は著者が九州大学に提出し、学位（博士[工学]）を授与された論文の主たる内容に一部加筆したものである。また、写真は本法の開発及び実用化を協力して行った当社創業者である父山本秀祐（左）とともに、本法による製品の製造を行っている山陽工場の建設（岡山県浅口市 1974 年）に当たり、予定地を視察した折のものである。

技　術　論　文

鉄鋼熱間圧延用鋳造ロール材の破壊力学特性

Fracture Mechanics Characteristics of Cast Roll Materials for Steel Hot Rolling

常務取締役 製品事業本部長
石井　芳雄
Yoshio Ishii

製品事業本部　顧問
博士(工学)　橋本 光生
Mitsuo Hashimoto

要　旨

熱間圧延においてロールは正常な操業下では摩耗により消耗する。しかし、圧延操業中にトラブルが発生すると、機械的若しくは熱的き裂が生じ、進展成長し消耗する。そこで、熱間圧延用ロールの代表的な材料である合金鋳鋼（CS）、アダマイト（AD）、ニハード鋳鉄（IC）、高クロム鋳鉄（HCR）及び多合金白鋳鉄（HSS）について、COD 及び CT 試験片を用いて破壊じん性値とき裂進展特性を調査した。破壊じん性値は共晶炭化物が晶出するにつれて低下する。き裂の進展速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK_{I} の間には、Paris-Erdogan の関係式 $da/dN=C(\Delta K_{\mathrm{I}})^m$ が成り立ち、定数 C と m の間には $C=1.88\times10^{-5}/10.6^m$ の関係がある。定数 m は 2mass%C 以上の炭化物の晶出する範囲では大きな値となり、硬さが高いほど大きな値を示し、CS，AD，HCR，IC，HSS の順でき裂進展は速くなる。

Abstract:

In the hot rolling, the rolls are generally consumed by wear under normal operation. However mechanical or thermal cracks generate and propagate, when accidents occur in rolling operation. Therefore, fracture toughness and crack propagation characteristics were investigated using COD and CT test specimens for the typical materials of hot rolling rolls, such as alloy cast steel (CS), adamite (AD), nihard cast iron (IC), high chromium cast iron (HCR) and multi-component white cast iron (HSS). Fracture toughness decreases as eutectic carbides crystallized. The Paris-Erdogan relation, $da/dN=C(\Delta K_{\mathrm{I}})^m$ holds between the rate of crack propagation (da/dN) and the range of stress intensity factor (ΔK_{I}), and the relation between the constants C and m was expressed by $C=1.88\times 10\text{-}5/10.6^m$. The constant m has a large value over 2 mass% C where the carbides exist, and the higher hardness, the larger of constant m. Then, the crack growth becomes faster in the order of CS, AD, HCR, IC and HSS.

Keywords: rolling mill roll, cladding, high-speed tool steel, hot rolling, wear, toughness

1．緒言

鉄鋼圧延工程においては、ロールを介して鋼材に大きな荷重を負荷し、塑性変形能を利用して種々の寸法及び形状の製品に成形する。熱間圧延用ロールは高温に加熱した鋼材との接触による熱伝導並びに摩擦熱による加熱と水冷の繰返しを受けるので、表面には熱き裂が発生し、回転のたびに繰り返し加わる大きな機械的負荷はき裂の進展を促進する。鋼材と接触する作働ロール（以下ロールと称す）は耐久性の観点から鋳造ロールが使用され、力学的、熱的負荷条件に加えて、

腐食等の化学的条件から、化学成分、鋳造及び熱処理等の適切な製造条件が選択され、目的の金属組織並びに硬さを確保した材料が使用に供される。通常の操業下では、ロールは主に摩耗により消耗するが、圧延操業のトラブルに遭遇した際には機械的もしくは熱的き裂が生じ、さらに機械的な負荷によりき裂が進展成長して消耗に至る。従来より、鋳鉄、アダマイト及び鋳鋼が広く使用されてきた。その後、高クロム鋳鉄が導入され、さらに多合金系白鋳鉄が実用化された[1-4]。この結果、通常摩耗による消耗は飛躍的に減少したが、一方では、圧延作業時のトラブルによって生じるき裂の発生並びに進展に起因した消耗の比率が増大した。以上述べた理由により、従来の材料力学的強度に加えて破壊力学的特性を把握する研究が望まれている。そこで、代表的な熱間圧延用ロール材について調査・研究を行った。

２．実験方法

2.1 供試材

実験試料は実際の圧延作業に供されるロールの、圧延鋼材と接する表面近傍より採取した。Table 1 に化学成分、鋳造法、熱処理の概略を示す。材料は前記した従来材のニハード鋳鉄（米国では grain cast iron、欧州では indefinite chilled cast iron と呼ばれ、本報では IC と記す）、アダマイト（AD）、高クロム鋳鉄（HCR）及び最新材料の多合金系白鋳鉄(HSS : 一般的にはハイスと呼ばれる)について主に調査したが、さらに粗圧延機で使用されている合金鋳鋼（CS）も加えた。鋳鋼及びアダマイトは普通静置鋳造法（SC）、ニハード鋳鉄及び高クロム鋳鉄は遠心鋳造法（CF）、多合金系白鋳鉄は連続鋳掛け法（CPC）にて製造した。実験試料を採取したロールの寸法は直径 650～850mm、質量は 5～15ton 程度であった。

2.2 実験方法

破壊じん性値及び疲労き裂進展特性を調査した試験片及び試験の概要図を Fig.1 に示す。基本的には COD 試験片を用いた三点曲げ試験（Fig.1(a))を行い、試験片のサイズは HSS 材及び HCR 材は幅（W）25mm、厚さ（B）25mm，長さ 120mm（負荷スパン 100mm）に深さ（M）5mm の片側切欠きを設けた。延性を有する CS 及び AD については、幅（25mm）を除きほぼ 2 倍の寸法、厚さ 50mm、長さ 220mm（スパン 200mm）に深さ 10mm の片側切欠きを設けた試験片を使用した。なお、切欠き先端部は直径 0.1mm のワイヤーカットにて加工した。き裂の進展については試験片の両側の切欠き前方にクラックゲージを貼り、き裂長さの変化を測定した。最大荷重は HSS 及び HCR については 12,740N とし、応力比（R）を 0.3、CS 及び AD については 19,600N、R を 0.2 及び 0.5 の 2 水準の片振り条件のもとで 4Hz（240cpm）の交番曲げモーメントを負荷した。なお、代表的な従来材であるが脆い炭化物（セメンタイト）が多量に晶出しているニハード鋳鉄については、比較的精度よく試験ができるとされる Fig.1(b)に示した CT 試験片（W=50mm, B=25mm）を用いて試験を行った。ハイドロパルス疲労試験機を用いて、応力比（R）を 0.2 とした片振り引張条件のもとで 40Hz の交番荷重を負荷した。試験片の採取方向は、切欠きがロール表面から内部に向かう方向とし、き裂の進展方向、補強ロール及び圧延鋼材との接触面からかかる圧力方向及び凝固の進展方向と一致させた。

Table 1 Chemical composition of test specimens.

Material (process)	Chemical composition (mass%)							Heat treatment
	C	Ni	Cr	Mo	V	W	Oth.	
CS (SC)	0.6	1.9	1.4	0.5	Tr.	Tr.	-	DP+NT
AD (SC)	1.6	0.5	1.0	0.5	Tr.	Tr.	-	DP+QT
IC	3.3	4.4	1.7	1.5	Tr.	Tr.	-	St
HCR	2.7	1.3	17.	1.3	0.2	Tr.	-	A+NTT
HSS	2.0	Tr.	5.0	5.0	5.0	5.0	Co	A+NTT

Note1) Material; CS: Cast steel, AD: Adamite, IC: Indefinite cast iron, HCR: High-chromium cast iron, HSS: High speed steel type cast iron (Multi-component white cast iron),
Note2) Manufacturing process; SC: Static casting, CF: Centrifugal casting, CPC: Continuous poring process for cladding.
Note3) Heat treatment; D: diffusion annealing, P: spheroidizing annealing, N: normalizing, T: tempering, Q: quenching, St: stabilizing, A: annealing, N: normalizing.

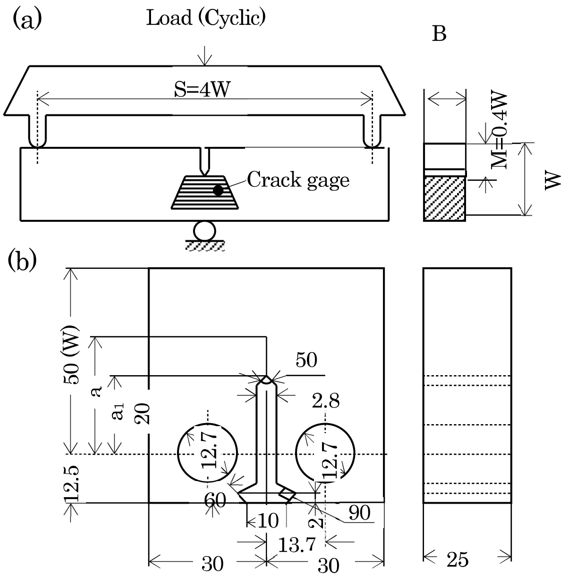


Fig.1 Schematic drawing of test specimen for fatigue crack propagation test.

き裂の進展速度（da/dN）は、き裂がクラックゲージのグリッドの間隔を成長するに要する荷重繰返し数で除して求め、応力拡大係数範囲（ΔK_I）との関係で整理した。さらに、疲労き裂から不安定破壊へ移行するときの ΔK_I より、応力比で換算して疲労破壊じん性

（K_{Ifc}）を求めた。

き裂進展試験に先立ち、同様の試験片並びに試験機を用いて静荷重を負荷し、破壊じん性値を求めた。また、参考のため最も代表的な機械的性質である引張強さは JIS4 号試験片を用いて万能試験機により求めた。

３．実験結果及び考察

3.1 金属組織及び機械的性質

Fig.2 に各材料の光学顕微鏡による金属組織写真を示す。Table 2 に金属組織の詳細及び硬さ、さらに代表的な機械的性質として引張強さを示した。

CS は遊離した晶出炭化物は認められず、パーライトと一部フェライトによる均質なミクロ組織を呈している。AD は１％程度の少量の遊離炭化物が晶出し、微細パーライト組織を呈している。HCR はクロムを主体とする共晶炭化物（M_7C_3）が晶出し、基地は大部分焼戻しマルテンサイトである。IC は 2%程度の遊離黒鉛とセメンタイトがレーデブライト共晶状に多量に晶出し、基地はベイナイトもしくはマルテンサイトを呈する。HSS は粒状の MC、棒状の M_2C 炭化物が共晶として晶出し、基地は焼戻しマルテンサイトである。なお、試料の C 及び合金量によっては M_7C_3 炭化物が晶出することがある [5)]。

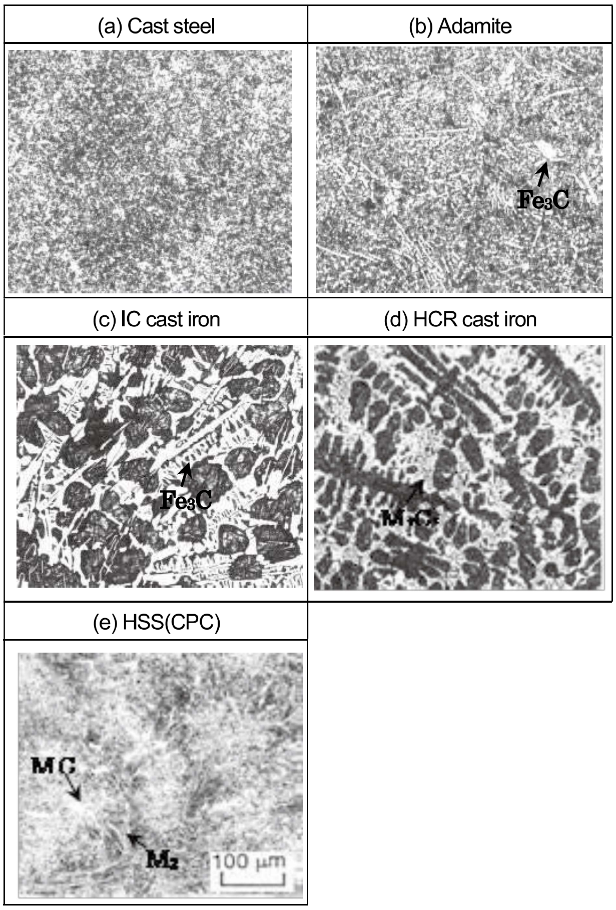


Fig.2 Microstructures of schematic materials for hot rolling mill roll.

Table 2 Metallurgical and mechanical properties of test specimens.

Mat. erial	Microstructure			Mechanical property			
	Car・bide (area%)	Gra・phite (area%)	Car・bide (area%)	Hardness HV(HB)	Hardness HS	T/S (MPa)	El. (%)
CS	none	none	Fine pearlite	HB260	HS36	804	0.5
AD	0.8	none	Fine pearlite	HV380	HS50	698	0.5
IC	30	2	Bainite	HV680	HS80	353	≦0.1
HCR	25	none	Marten.	HV620	HS75	854	≦0.1
HSS	15	none	Marten.	HV750	HS85	912	≦0.1

Note 1) Material; CS: Cast steel, AD: Adamite, IC: Indefinite chilled cast iron, HCR: High-chromium cast iron, HSS: High speed steel type cast iron (Multi-component white cast iron).
Note 2) Equivalent Vickers hardness of HB260 is HV274.

Table 3 Mechanical fracture properties of test specimens.

Material	Fracture toughness	Crack propagation property (m and logC are in Paris-Erdogan's equation)		
	K_{IC} (MPa・m$^{0.5}$)	logC	m	K_{Ifc} (MPa・m$^{0.5}$)
CS	n.a.(79<)	-7.6	2.64	73≦
AD	59.2	-8.8	4.0	53
IC	22.6	-12.6	8.0	19
HCR	24.5	-13.7	8.7	21
HSS	25.9	-19.4	14.2	19

Note1) Material; CS: Cast steel, AD: Adamite, IC: Indefinite cast iron, HCR:High-chromium cast iron, HSS: High speed steel type cast iron.

各材料の代表的な硬さを実機ロールの品質管理で最も一般的に使用されているショア硬度（HS）でみると、CS は HS36、AD は HS50、IC は HS80、HCR は HS75、HSS は HS85 である。試料の硬さは C 含有量が高くなり硬い炭化物の晶出量が増加するにつれて高くなり、加えて合金元素を多量、多種類含有した HCR 及び HSS は基地が硬質のマルテンサイト及び高硬度の特殊炭化物の二次析出によりさらに硬化し、それに伴ってマクロ硬さも高くなる。なお、表中には材料研究で使用される押込み型のビッカース硬さ（HV），軟らかい CS はブリネル硬さ（HB）を併示している。引張強さについては C 含有量が約 1%を超えると、脆い炭化物の晶出量が増加するので漸次低下するが、HCR 及び HSS はマルテンサイト基地が得られるので、硬さとともに強度も上昇し、高い引張強さを示す。

3.2 破壊じん性値

各ロール材の破壊じん性値を Table 3 に示す。K_{IC} 値は延性を有する CS は本試験では数値を特定できなかったが（79MPa・m$^{0.5}$ 以上)、C 含有量を増加させた AD（炭化物量 0.8%）では 59.2 MPa・m$^{0.5}$ であった。

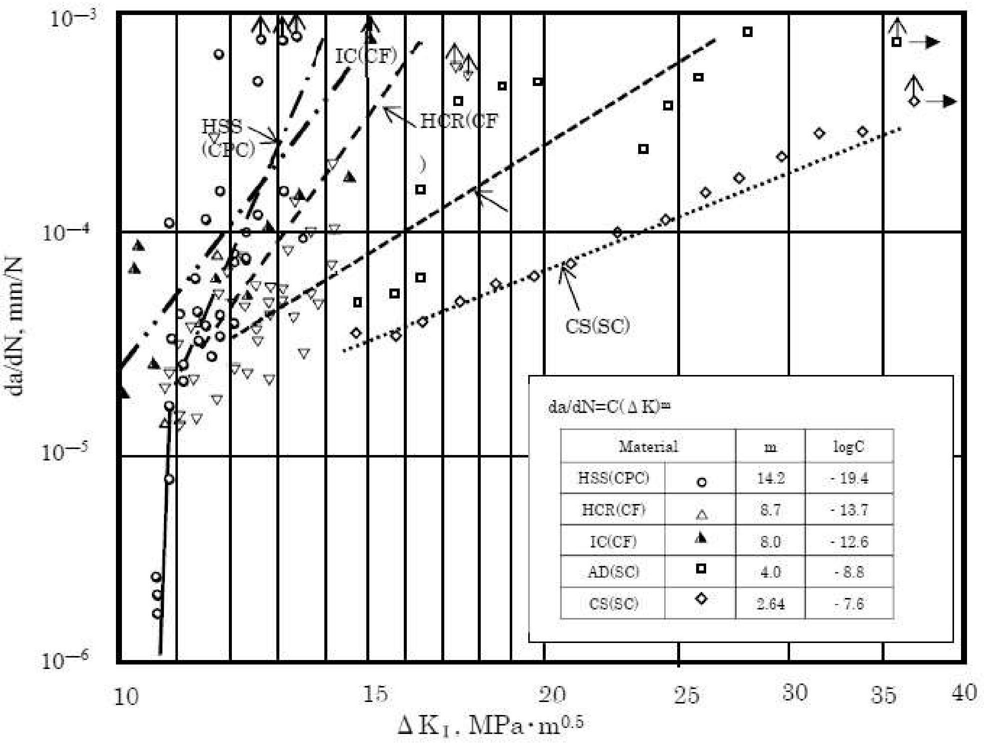


Fig.3 Relationship between fatigue crack propagation rate and stress intensity factor range.

さらに、C 含有量を高くして晶出炭化物量が増加すると、K_{IC}値は25MPa・$m^{0.5}$程度以下に著しく低下するが、HSS（炭化物量 15%）では 25.9 MPa・$m^{0.5}$、HCR（同 25%）では 24.5 MPa・$m^{0.5}$、IC（同 30%）では 22.8MPa・$m^{0.5}$ と減少し、破壊じん性値は炭化物量と関係が強い。

圧延ロールではせん断場（モードⅡ）での破壊も問題となるが、HSS 材での著者の試験では（K_{IIC}/K_{IC}）=1.19 とせん断場の破壊じん性値が大きかった[6]。

3.3 き裂進展特性

各ロール材の ΔK_I に対するき裂進展速度を Fig.3 に示し、Table3 にはき裂進展の特性値を併示する。三点曲げ試験片側壁に添付したクラックゲージの各グリッドあたりの進展速度を図中にプロットし、近似線で示した。進展速度にばらつきがあるが、各ロール材に晶出する炭化物は基地組織と著しい物性差があるため、それらの種類と量で材料のマクロ及びミクロ組織が異なり、それに伴ってき裂進展の形態、ひいては進展速度に差がでると考えられる。例えば低合金鋳鉄で一般的に晶出するセメンタイト（Fe_3C）の破断強度は 30MPa 程度以下[7]と、材料全体の強度（600～900MPa）及び基地の強度に比べて著しく低い。したがって、基地組織を進んでいるき裂が炭化物に遭遇した場合、分岐もしくは進展方向の変化により減速され、あるいは脆い炭化物中でき裂が加速されることも容易に想像できる。なお、黒鉛は本実験ではニハード鋳鉄のみに小量晶出しているが、黒鉛の破断強度も 20MPa 程度と著しく低く[8]、炭化物と同様にき裂の停止、方向転換を伴って進展の減速、あるいは逆に加速も考えられる。

炭化物及び黒鉛の影響については、黒鉛を有する高クロム鋳鉄材についての著者らによる同様の報告がある[9]。

さて、図中の進展速度、すなわち回帰線の傾き角度は CS、AD、HCR、IC 及び HSS の順に急になり、概して進展速度は大きくなる。なお、IC のき裂の進展は、ΔK_Iが小さい領域では比較的早く、例えば HCR に比べて進展速度が大きく、ΔK_I が大きい領域では若干小さくなる傾向にある。

き裂が進展を始める下限界応力拡大係数範囲（ΔK_{Ith}）は本実験では厳格に測定することができなかった。これは、前述のとおり強度の極めて低い脆弱な共晶炭化物が存在し、き裂の進展にばらつきがあることによる。加えて使用した試験片では厳密なき裂先端からの進展ではなく、ワイヤーカットによる人工切欠きからであるため、ある程度負荷が大きくなって初めてき裂が進展し始めるからと推定できる。実験結果からは、いずれの試験片も ΔK_I が 10MPa・$m^{0.5}$ 以上でき裂の進展が確認されており、このことより ΔK_{Ith} は 10MPa・$m^{0.5}$ 程度以下の値と考えられる。なお、CT 試験片を用いたニハード鋳鉄の試験では、5MPa・$m^{0.5}$ 程度という低い値でき裂が進展し始めることが確かめられている。

両対数軸で表される da/dN と ΔK_I は ΔK_{Ith} より大きなかなり広い範囲にわたって直線関係にあることが多く、その場合 Paris-Erdogan の関係式(1)が成り立つ[10]ことが知られており、本実験においても各試験片でその関係式が成り立つと考えられる。

$$da/dN=C(\Delta K_I)^m \quad \cdots(1)$$

Paris-Erdogan の式における定数 C と m との間には $C=A/B^m$ の関係が成立することもよく知られており、

越賀らは構造用鋼について A=5×10^{-5}, B=55（工学単位表示）となることを報告している[11)]。そこで，本実験結果から(1)式を求め、定数 LogC と m の関係を Fig.4 に示す。図から分るように本実験においても前記関係式を満足し、C と m の関係は次式(2)で表された。

$$C=1.88\times10^{-5}/10.6^{m} \quad \cdot\cdot\cdot(2)$$

そこで、き裂進展速度と組織並びに機械的性質との関係を考察する。先ず、鉄鋼材料で最も重要な合金元素である C 含有量並びに炭化物量と定数 m の関係を Fig.5 及び Fig.6 に示す。C は本実験材料中の IC では一部黒鉛の形態をとり少量(2 面積%程度)晶出するが、基本的には炭化物を形成し、C 含有量が増すほど晶出量は増大する。炭化物の量は炭化物の形態により多少影響されるが、MC 及び M_2C 炭化物が形成された HSS では炭化物は相対的に少なく, M_7C_3 炭化物を形成する HCR では増加し、Fe_3C 炭化物が形成される IC では形成される炭化物量が最も多い。極めて少量の 0.9%の炭化物が晶出した AD は一般の構造用鋼と同様に m=4 であった。C 含有量及び炭化物量の増加と共に HSS ではき裂進展速度が速くなり、m 値が 14.2 になる。続いて C 含有量が 2.75%に増加し M_7C_3 炭化物が多量に晶出した HCR ではき裂進展速度が遅くなるため, m=8.7 に低下する。さらに、高 C の IC ではこの傾向が強まり、炭化物は 32.6%、黒鉛は 2%晶出しており、き裂の進展はさらに遅くなった。この結果は、炭化物の増加がき裂の進展を抑制する方向を示す。このことは、前述した著者らの黒鉛を有する高クロム(7%Cr)鋳鉄での研究において、き裂は炭化物との衝突による境界での停留及び方向転換により、また少量の黒鉛ではストップホール的作用によりき裂進展を抑制するとした報告[9)]と対応する。本実験材料の範囲においては、炭化物及び黒鉛はき裂の進展を抑制する作用を有するといえる。

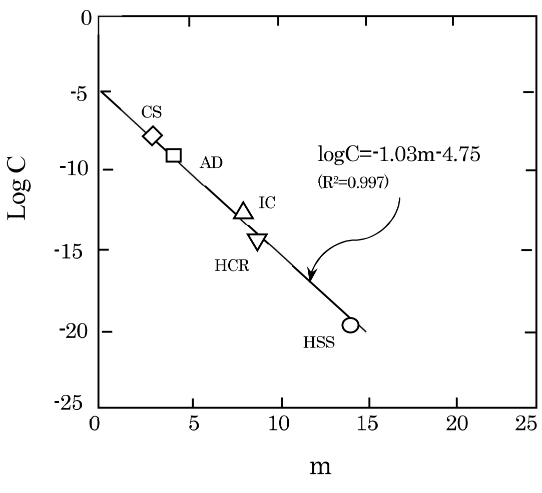


Fig.4 Relationship between constant m and logC in Paris-Erdogan equation of schematic hot rolling mill roll materials.

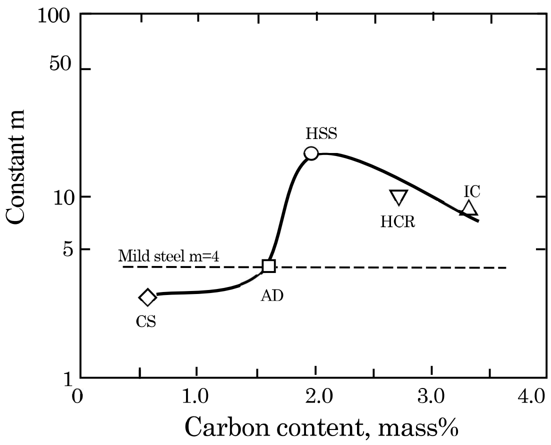


Fig.5 Relationship between constant m in Paris-Erdogan equation and carbon content of schematic hot rolling mill roll materials.

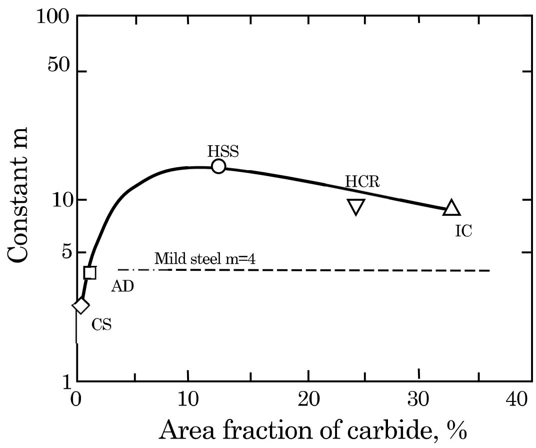


Fig.6 Relationship between constant m in Paris-Erdogan equation and carbide amount of schematic hot rolling mill roll materials.

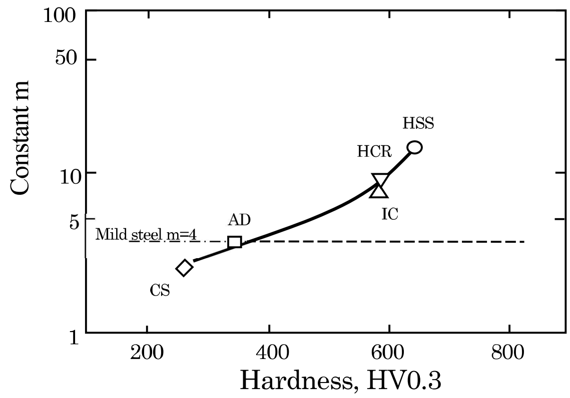


Fig.7 Relationship between constant m in Paris-Erdogan equation and micro-hardness of schematic hot rolling roll materials.

次に硬さとの関係を考察する。Fig.7 に定数 m とビッカース硬さとの関係を示す。基地硬さ(HV0.3)が高くなるにつれて定数 m は大きくなり、き裂の進展は速くなる。組織的には、基地が軟らかいパーライトから硬質のベイナイト、さらに硬いマルテンサイトに移行するにつれて速くなる。これは、パーライト中の延性を有するフェライトが塑性変形することにより、き裂の進展エネルギーが吸収、緩和されるものと推定される。

一方、塑性変形能が小さいベイナイト及びマルテンサイトを有する基地組織でもこの緩和作用はあるもののその効果は低下するものと考えられる。全体硬さ（HV30）との関係でみても、硬さが高くなるにつれてmは大きくなりき裂の進展が速まる。

ここで､他の代表的な機械的性質との関係を考える。最も代表的な引張強さとの関係をFig.8、K_{IC}値との関係をFig.9に示す。炭化物を有し高硬度の材料と、炭化物が極めて少量かそれを有さず比較的低硬度の材料では著しく傾向が異なる。前者のき裂進展は後者のそれより早く、定数mは大きな値を示す。これは基地硬さが上昇するほど延性が減少し、引張強さが増すことによるものと考えられる。一方、炭化物を有さず引張強さが高いCSが小さなm値を示したが、これは延性が高いフェライトの影響と考えればよい。

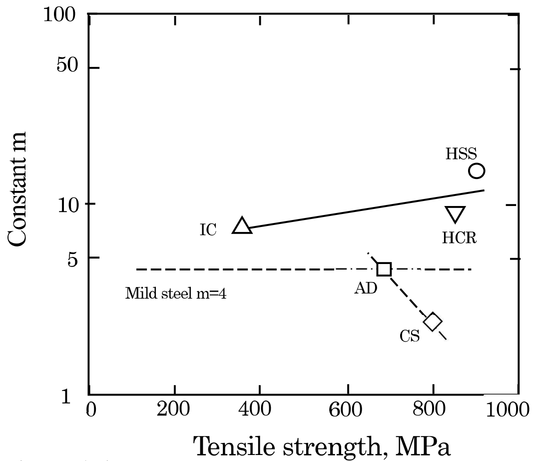


Fig.8 Relationship between constant m in Paris-Erdogan equation and tensile strength of schematic hot rolling mill roll materials.

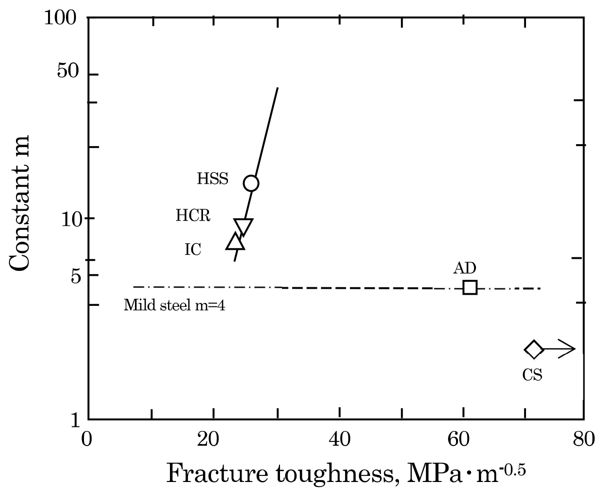


Fig.9 Relationship between constant m in Paris-Erdogan equation and fracture toughness of schematic hot rolling mill roll materials.

次に、K_{IC}値との関係は、引張強さと同様に炭化物の有無で異なる。炭化物の多い材料（IC，HCR，HSS）ではK_{IC}値が高くなると急激に定数mは大きくなるが、炭化物を有しない材料ではK_{IC}値が著しく大きいAD、もしくは延性が大きいCSでは小さな値を示し、き裂の進展は遅い。Table 3に示したとおり、いずれの材料も疲労き裂じん性（K_{Icf}）は破壊じん性値（K_{IC}）より小さい値を示し、HSS材の低下率が最も大きかった。なお、粉末冶金のHIP製HSS[2)]のmは148と著しく大きく、き裂の進展は極めて早い。これは極めて微細な組織が影響していると推定される。

４．結論

代表的な熱間圧延用ロール材について破壊じん性値及びき裂進展速度を調査し、次の結果を得た。

1）破壊じん性値ΔＫＩＣ は遊離炭化物が晶出すると著しく低下する。
2）き裂の進展速度 da/dN と応力拡大係数範囲ΔＫＩの間には、広い範囲で Paris-Erdogan の関係式 da/dN=C(ΔＫＩ)m が成り立ち、定数 C と m の間に C=1.88×10-5/10.6m の関係がある。
3）Paris-Erdogan の関係式中の定数 m は 2mass%C 以上の炭化物の晶出する範囲では大きな値となるが、その値は炭化物の量と形態の影響を受ける。また、同範囲では硬さが高いほど大きな値を示す。
4）定数mは炭化物の有無で傾向が異なり､炭化物の多い材料は大きな値を示す。
5）き裂進展は合金鋳鋼（CS）、アダマイト（AD）、高クロム鋳鉄（HCR）、ニハード鋳鉄（IC）及び多合金白鋳鉄（HSS）の順で速くなる。

本報は鋳造工学誌第63巻(2020)に掲載された内容に一部加筆した。

参考文献

1) 宮下格之助：鉄と鋼，57(1971) 696
2) 橋本ほか：新日鉄技報，345(1992) 59
3) 佐野義一：148,149 西山記念技術講座(日本鉄鋼協会)，(1993) 193
4) Rolls for the metalwork. industry., I&SS (2002) 181
5) 大城，小野，周，宮原：鉄と鋼，81(1995) 912
6) 内野，小田，鈴木，橋本：機論 A70-694(2004) 858
7) 岡本：鉄鋼材料，コロナ(1960) 36
8) 鋳造工学便覧，丸善(2002) 230
9) 久保ほか：機論，67-660，A(2001) 1350
10) P.C.Paris, et.al.：Trans.ASME，Ser.D，85-4(1963) 528
11) 越賀，川原：日本造船学会論文集，133(1973) 249

技　術　論　文

SiC セラミック複合材料の製造における品質安定化および歩留り向上

Reliability of Quality and Enhancement of Yield for SiC Ceramic Composite Materials in Fabrication Process

技術開発センター	技術開発センター	技術開発センター	技術開発センター	技術開発センター
第一開発室　主任技師	第一開発室　主任技師	第一開発室　主任技師	第一開発室　室長	第一開発室　技術顧問
博士（工学）肖　陽	博士（工学）牟　用煥	博士(工学)花田　喜嗣	博士（工学）園田　晃大	工学博士　恵良　秀則
Yang Xiao	Yong-Hwan Mo	Yoshitsugu Hanada	Akio Sonoda	Hidenori Era

要　旨

高い品質のSiCセラミック複合材料の安定的な製造を確立するため、また製品歩留りを向上させるため、温度管理システムを構築し適用した。製造プロセスの初期段階では、セラミック混合粉末を鋼製の金型に装填し仮プレスして120-150℃に加熱する。このプロセスは最終的に得られる製品の品質、寸法、歩留りに大きな影響を与えることを見出した。したがって、混合粉末の温度を直接的にコントロールする必要がある。混合粉末の温度は熱伝導解析により評価した。最初に混合粉末の熱拡散率（α_{powder}）を試行錯誤法で求め、比較的低い値（$\alpha_{powder}=\alpha_{steel}/15$）を得た。この得られた値を使って金型内の混合粉末の温度を計算した。計算結果から、製造プロセス中のクラックの発生状況や最終プロセス後のミクロ組織および溶融合金の浸透状況と混合粉体の温度とは密接な関係にあることがわかった。さらに、熱伝導計算プログラムを実際の製造プロセスに組込んだ。その結果、この温度管理システムにより高品質製品の安定製造が可能となり、また歩留りが著しく向上した。

Abstract:

In order to establish a reliable fabrication process of SiC ceramic composite materials in high quality and to enhance the product yield, temperature management system has been constructed and applied. At the early stage of the fabrication process, mixed powder of the ceramics is put into a steel mold, prepressed and heated at 120 to 150 degrees. This process was found to greatly affect the quality, gauge and yield of final products. Therefore, it is necessary to directly control the temperature of the mixed powder. The temperature of the mixed powder was evaluated by the heat conduction analysis. Firstly, the thermal diffusivity of the mixed powder (α_{powder}) was evaluated by the try and error method to get a relatively small value as $\alpha_{powder}=\alpha_{steel}/15$. Using the obtained value, the temperature of the mixed powder body in the mold was calculated. The calculated results indicated that generation behavior of cracks during fabrication processing, microstructure and melt alloy infiltration behavior that were observed after the final process, were closely related to the mean temperature and temperature distribution of the mixed powder inside. Furthermore, we incorporated the heat conduction calculation program into the actual fabrication process for in-situ temperature controlling. As a result, this temperature management system enabled the fabrication of high-quality products in a reproducible manner and also enhanced the product yield markedly.

1．背景

著者らは、SiC セラミック複合材料を開発し、棒鋼の熱間圧延時のガイドローラーへの適用を進めてきた。ガイドローラー製造には2段含浸焼結法を適用している。この工程は、粉末原料と樹脂を混合し、金型内において室温で仮プレス後、昇温して加熱状態でプレス

を再び施す。

この仮成形体を脱脂後、粗加工を施し、炭化焼結後、溶融 Si 合金を含浸させ炭化体と反応させて SiC 複合材料を製造する。最後に放電加工機により仕上げ加工を行う（Fig. 1）。

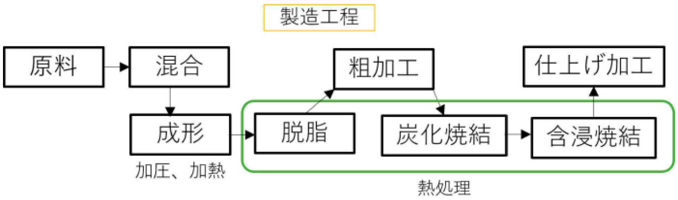


Fig. 1 Manufacturing process of SiC ceramic composite materials.

Fig. 2 Photograph showing mold being heated by gas flame.

SiC 複合材料の特性は粉末原料の種類、混合割合、溶融浸透合金の成分設計など多くの要因により変化するが、著者らはこれまでの研究で最適な合金設計、工程設計を行えば、耐摩耗性に著しく優れた SiC 複合材料が製造できることをすでに報告した[1)-4)]。そして、この優れた特性を有する SiC 複合材料の製造には多くのプロセスを経て達成されるが、特に、仮プレス後の成形工程は後の脱脂、炭化、焼結工程に大きな影響を与え、製造中のクラック発生や加工中の割れ、最終製品の組織（および均一性）、気孔の有無などを決定する重要な要因となる。当初は、製造工程の初期段階である仮成形体を作製するにあたって、

① 金型の外側をバーナーで加熱する方法

を用いた。バーナー加熱時の様子を Fig. 2 に示す。当初は粉末の成形が目的であったため本方法を採用したが、製造工程中にクラックが発生し半数以上の成形体に割れが生じるといった不具合が多発した。これは、成形工程における成形体の温度が制御されていないことによると考え、

② 加熱炉を用いて、より均一に加熱する方法

を採用した。Fig. 3 に用いた加熱炉の外観を示す。加熱炉を用いることにより粉体は比較的均一に加熱されクラックや割れの問題は解決されたが、加熱炉内の雰囲気温度により制御を行っていたため、外気温によって加熱速度や目標温度到達時間が異なり、成形体の寸法に大きなバラツキが生じ、歩留まりの向上が抑えられた。その後、温度制御用熱電対を金型表面に装着するとともに、金型表面の複数個所に熱電対を取り付けて温度を測定した。そして、金型表面温度と成形体のクラック発生の有無や組織（結晶組織の大きさや均一性など）を詳細に検討し、加熱速度及び到達温度（温度制御プログラム）の関係を調査した。これらを幾度も試行錯誤的に繰り返し製造を行った。しかし、品質評価は最終の含浸焼結工程後に行わざるを得ないので、温度制御プログラムへのフィードバックには多大な時間を要することになる。また、先にも述べたように、金型表面温度も外気温により左右されるので、その都度温度制御プログラムを修正変更する必要に迫られた。また、例えば、小径・中径のローラーへの適用や大径ロールへの適用を考慮すると、それに応じた金型が必要になるが、この場合も金型表面温度が異なり温度制御プログラムを変更せざるを得ない。そこで、外気温や金型の大きさが変化しても粉末成形体の温度を直接的に把握できれば、クラックの発生を抑えられ、寸法および組織が安定した SiC 複合材料が得られることから、歩留まりが飛躍的に向上すると考えられる。

Fig. 3 Photograph showing furnace for mold heating.

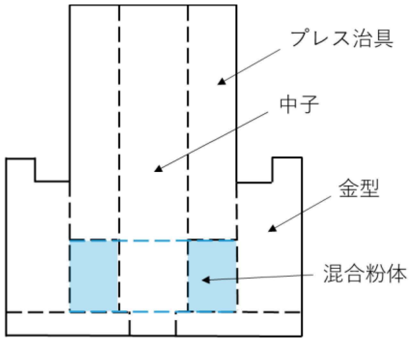


Fig. 4 Cross sectional view of ceramic powder (blue) in steel mold.

本稿では、ガイドローラー製造工程において最終工程まで重要な影響を及ぼす成形加熱工程の改善と寸法・品質安定化について述べる。

２．方法

目的とするガイドローラーの一例として概略図をFig. 4 に示す。内径 φ29mm, 外径 φ70mm, 高さ 27mm の円筒形（青色）である。Fig. 5 に加熱炉に投入した金型および粉末成形体（青色）の模式図を示す。斜線部分は加熱前の仮プレスおよび加熱後のプレスを行う治具を示している。また、仮プレス後の成形体の熱物性値を評価するために、仮プレス前の混合粉末を金型に投入し、Fig. 6 に示す位置で温度測定を行った。これは、熱伝導計算をある適当な熱物性値を想定して試行錯誤的に繰り返し、計算結果が測定結果に合うように物性値を定めるためのものである。

熱伝導計算は、次の熱伝導方程式が基礎となる。

$$\partial T/\partial t = \alpha(\partial^2 T/\partial x^2) \qquad \cdots\cdots\cdot \quad (1)$$

ここに、T は温度、t は時間、x は距離である。熱拡散率 α は

$$\alpha = k/(\rho C_p) \qquad \cdots\cdots\cdots \quad (2)$$

で表される。k は熱伝導率、ρ は比重、C_p は定圧比熱である。ここでは、金型は鋼材(S45C)を用いているのでこれらの値はおおよそ既知であり、粉体については少なくとも α の値が決定されれば熱伝導計算が可能となる。なお、熱伝導計算については離散化を行って前進差分法を適用し、軸対称問題（円柱）として取り扱った。計算安定化条件（$\alpha\Delta t/(\Delta x)^2 < 0.5$）を念頭において、刻み幅（Δx）を 0.5 または 0.25cm, 時間ステップ(Δt)を 1/20～1/500sec とした。なお、上記の範囲内で比較計算を行ったところ、すべての場合で誤差は 3%以内であった。

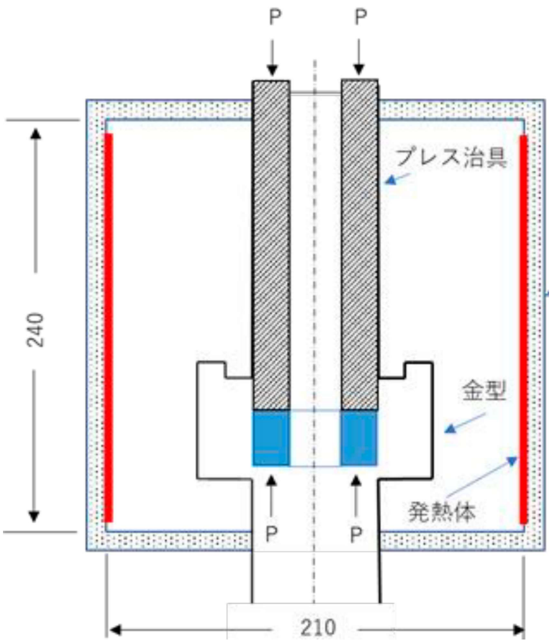


Fig. 5 Cross sectional view of ceramic powder (blue) and steel mold in furnace.

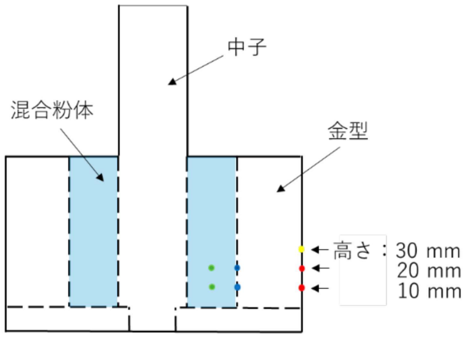


Fig. 6 Cross sectional view of ceramic powder and mold, indicating positions of thermocouple for temperature measurement.

３．結果および考察

3.1 SiC 粉体の熱拡散率

鋼(S45C)の熱伝導率を k=0.107 cal / (cm s ℃)、比重を ρ=7.84 g/cm^3、比熱を C_p=0.109 cal/(g ℃)とすると鋼の熱拡散率は、α_{steel}=0.125 cm^2/s となる。一方、粉体の熱拡散率を α_{powder} としていくつかの適当な値を用いて計算を行った。$\alpha_{powder}=\alpha_{steel}/20$ として計算した結果が Fig. 7 および Fig. 8 である。Fig. 7 に示すように、各要素における温度が求められ、熱電対は半径方向および高さを変化させた位置に装着している。いくつかの熱電対の位置における温度の測定値および計算結果を Fig. 8 に示す。

曲線は金型表面温度（赤）、金型/粉体境界の温度（青）、粉体内部の温度（緑）を示しており、実測値と計算値は概ね一致していることから、粉体を金型に投入したままの（仮プレス前の）粉体の熱拡散率は鋼の 1/20 とした。

ポーラス材料の熱伝導率 k は、固体部分の熱伝導率を k_0 とすると

$$k = k_0 (\rho/\rho_0)^n \qquad \cdots\cdots\cdot \quad (3)$$

ただし、$\rho/\rho_0 > 0.05$

で表される[5]。ここで、ρ はポーラス材料の密度（かさ密度）、ρ_0 は固体の密度（真密度）、n は定数で 1.65～1.8 の値である。

金型に SiC 粉末を充填した場合の熱伝導計算を行うにあたっては熱拡散率が必要となる。熱拡散率 α は式(2)で表され、比熱 C_p は固体部分の固有物性値であるので一定の値である（温度に依存しないとした）。空気は熱容量が非常に小さく熱の出入りに関しては極めて小さな影響しか与えないと考えられる。したがって、空気を含むポーラス材料の熱拡散率は固体部分の体積率、すなわち、密度（かさ密度）で表されることになる。式(2)、(3)から

$$\alpha = \alpha_0 (\rho/\rho_0)^{n-1} \qquad \cdots\cdots\cdots \quad (4)$$

が得られる。ここで、α_0 は空気の体積率（気孔率）が 0%のときの熱拡散率である。

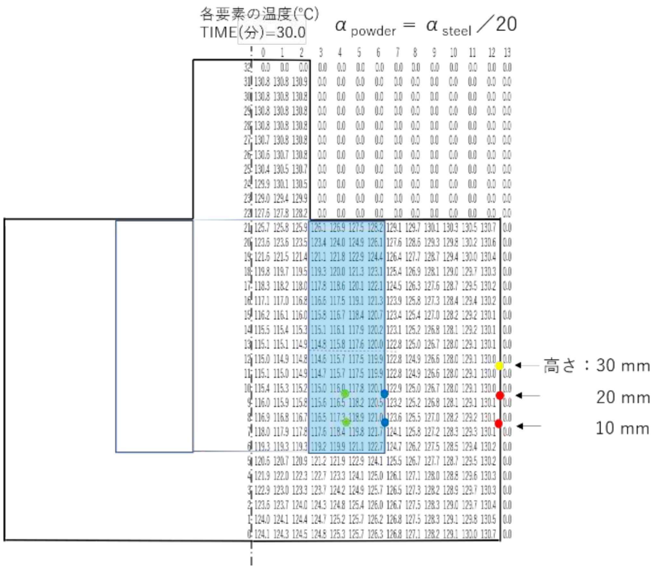


Fig.7 Illustration of ceramic powder body and mold before prepressing and calculated result during heating.

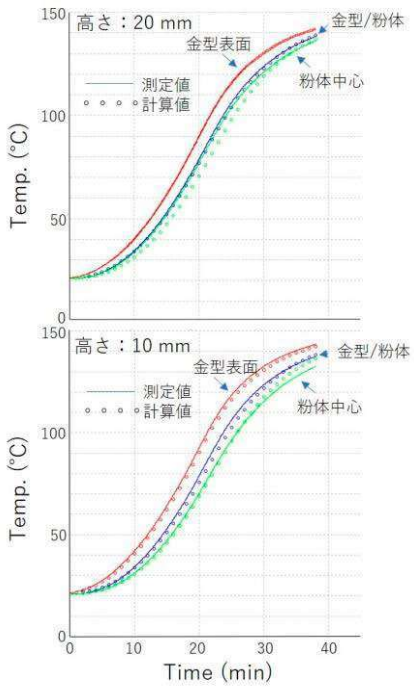


Fig. 8 Comparison of temperatures between measured and calculated. The temperatures were obtained at the positions shown in Figs. 6 and 7.

前述したように、原料は混合粉末および樹脂で構成されている。投入粉末重量は 180 g，粉体の真密度（ρ_0）は $2.48 g/cm^3$ である。金型に投入した粉体の高さから体積を求め、これらの値から粉体のかさ密度（ρ_{powder}）、空気の体積率（V_{air}）を見積もることができる。プレス治具（金型）内に固体粉末を充填した時（仮プレス前）のポーラス材料の密度は ρ=1.12 g/cm^3（V_{air}=54.9%）であった。また $\alpha_{powder}=\alpha_{steel}/20$（$\alpha_{steel}$=0.125 cm^2/s）としてこれらの結果を式(4)に適用すると、粉体のみの熱拡散率 $\alpha_0=\alpha_{steel}/11.5$ を得ることができる。α_0 と ρ_0 を式(4)に代入し、任意の気孔率（空気体積率）をもつポーラス材料の熱拡散率をグラフで表示すると Fig. 9 のようになる（ただし、ｎ=1.7 とした）。仮プレス後では ρ=1.71g/cm³（V_{air}=30.9%）であるので、この時の熱拡散率 α_{powder} は次のようになる。

$$\alpha_{powder} = \alpha_{steel}/15 \qquad \cdots\cdots\cdots \quad (5)$$

なお、ｎ=1.65～1.8 の範囲で変化させると、式(5)の分母の値は 15.2～14.2 まで変化する。また、粉体の熱拡散率 α_{powder} の値を 10%程度変化させても計算温度は１℃以内に収まるので、粉体密度の 10%の変化（すなわち仮プレス圧力の変化）は粉体（成形体）温度に大きな影響を及ぼさないと考えられる。

3.2　ガイドローラーへの適用

上述のように、成形工程は金型に粉末を充填した後、仮プレスを行ない、加熱に際しては加熱炉内の金型表面に装着した熱電対の温度を参照して（PID 制御）加熱プログラムにより金型表面温度の制御を行う。また複数個所に取り付けた熱電対から出力される電圧値、すなわち金型表面温度を熱伝導計算の境界条件とし、上述の熱物性値を用いて粉体内の温度計算を行った。

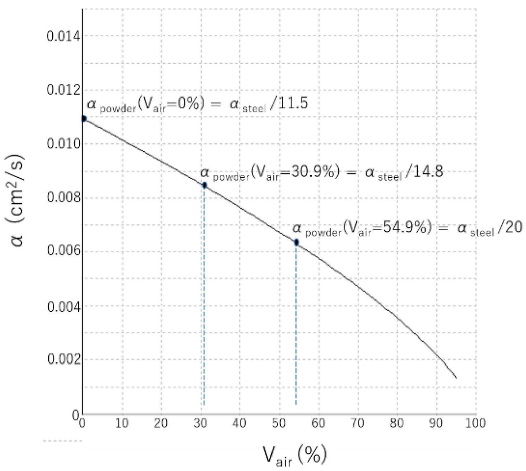


Fig. 9 Relationship between volume fraction of air, Vair, and thermal diffusivity, α.

Fig. 10 は最終工程（含浸焼結工程終了後）の組織と初期工程の仮プレス後加熱した時（成形工程）の粉体内温度を定性的に寒暖色で示したものである（Fig.1 参照）。粉体内温度が低いと（左下）組織がち密になり、反対に粉体内温度が高めの場合、SiC がやや大きくなるがその大きさは、50μm 以下である。左下のように温度が低い場合、最終の含浸工程で組織がち密すぎて溶融 Si 合金が浸透が難しくなる傾向にあった。このように、粉体内の温度制御は勿論のこと、粉体内における温度の均一性も安定的に製品を製造する重要な要素であることがわかる。

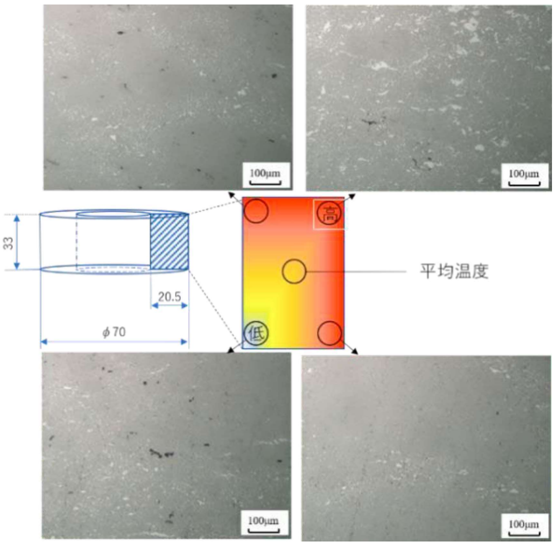


Fig. 10 Effect of temperature difference in ceramic powder body just after heating on microstructures finally processed.

粉体内の温度の不均一性を抑制するため、加熱炉内の雰囲気温度の不均一性を考慮しつつ新たに金型の設計変更などの改善策を施し、再実験を行った。

Fig.11 に初期の成形工程における粉体内温度分布（左側）、最終含浸焼結工程後の組織（中央）および CT スキャンによる含浸状況（右側）を示す。いくつかの温度条件で成形を行ったが、粉体内温度はいずれの金型表面温度においても金型表面側の円筒型粉体外周部（温度表示の右側、赤字）では高く、金型中央部に近い円筒粉体内縁部（温度表示の左側、青字）では比較的低い値となった。しかし、いずれ温度条件でも粉体内の均一性はほぼ達成されたと言って良いであろう（およそ 4℃以内）。また、加熱温度が低いと組織がち密であり、高いとやや粗大であるがせいぜい 50μm の大きさである。

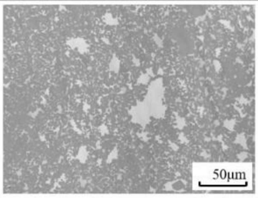
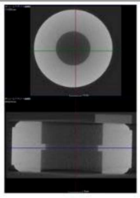
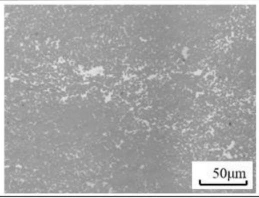
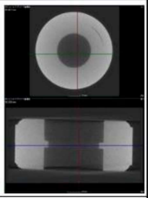
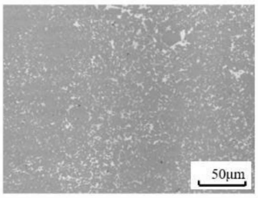
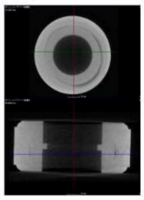
金型表面温度(°C)	粉体内温度(°C)	組　織	含浸状況
140	137.8 138.1 138.7 139.4 137.4 137.7 138.3 139.2 137.1 137.4 138.1 139.1 136.8 137.3 138.0 139.0 136.7 137.1 137.9 139.0 136.6 137.1 137.9 138.9 136.6 137.1 137.9 138.9 136.7 137.1 137.9 139.0 136.8 137.2 138.0 139.0 137.0 137.4 138.1 139.1 137.3 137.7 138.3 139.2 137.7 138.0 138.6 139.3	 50μm	
135	132.5 133.0 133.7 134.8 131.9 132.4 133.2 134.5 131.4 131.9 132.9 134.3 131.1 131.7 132.8 134.2 130.9 131.5 132.7 134.2 130.8 131.4 132.6 134.2 130.8 131.4 132.6 134.2 130.9 131.5 132.6 134.2 131.0 131.6 132.7 134.2 131.3 131.9 132.9 134.3 131.7 132.3 133.2 134.5 132.3 132.8 133.6 134.7	 50μm	
130	125.0 125.4 126.2 127.3 124.3 124.8 125.7 127.0 123.8 124.4 125.4 126.9 123.5 124.1 125.2 126.8 123.3 124.0 125.1 126.7 123.2 123.9 125.1 126.7 123.2 123.9 125.0 126.7 123.3 123.9 125.1 126.7 123.4 124.1 125.2 126.8 123.7 124.3 125.4 126.8 124.2 124.7 125.6 127.0 124.8 125.3 126.1 127.3	 50μm	

Fig. 11 Temperature distributions in ceramic powder body just after heating (left), microstructures after finally processed (center), and results of CT scanning (right).

さらに、含浸状況からみると粉体温度が低いと未含浸領域が形成されやすくなる。以上のように、成形工程における粉体の加熱温度及び粉体内の均一性は最終製品に大きな影響を与える。これらの結果から、適切な温度制御プログラムを設定し熱伝導計算を導入することによって製品品質が安定化し、歩留まりが飛躍的に向上することがわかった。さらに、目標とする成形体寸法のバラツキも小さく抑えられ、加工工程を大幅に短縮できるようになった。

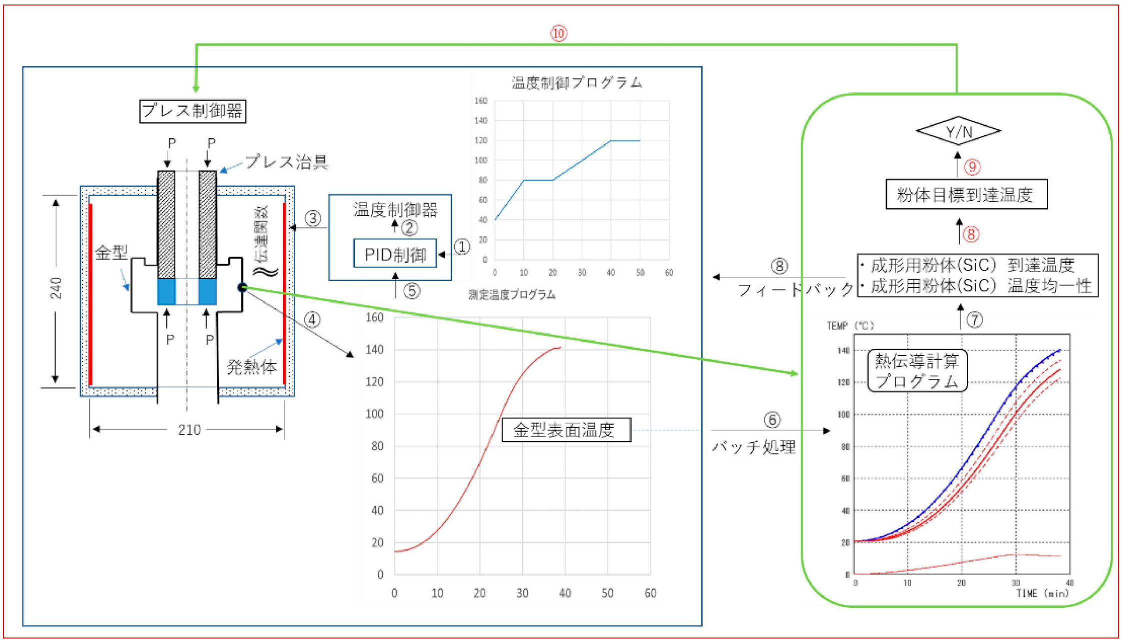


Fig. 12 Schematic diagram of flow of temperature measurement and its calculation for heat conduction.

3.3　成形工程における温度管理プログラムの適用

当初は、初期工程の成形加熱時に金型に装着した熱電対を通して温度制御プログラムにより出力を制御して加熱を行った。さらに温度測定用熱電対を金型表面に複数個所取り付けて時間～温度データをメモリーに蓄え、一連の工程が終了した後、測定データをコンピュータに移し熱伝導計算を行っていた（バッチ処理）。しかし、先にも述べたように雰囲気温度（例えば室温）が異なると、同じ温度制御プログラムで加熱しても金型の昇温速度が変化し、最終的には粉体内温度の均一性などに影響を及ぼす。また、組織や含浸状況は最終の含浸工程終了後に評価せざるをえないので、製造の初期段階で粉体自体の温度や均一性を評価できれば、製品品質や歩留まりがさらに向上すると考えられる。

Fig. 12 は製造工程における成形温度管理の概略図である。バッチ処理は温度測定データを取得し（左側、青枠で囲んだ部分）、このデータを用いて別途、熱伝導計算を行うことになる。一方で、温度測定を行いながら、取得温度をただちに計算に組込み、粉体内温度をその都度計算できれば、目標到達温度および均一性をその場で評価でき（赤枠部分）、最終工程の評価を待たずとも最終製品の品質評価の予測が可能となる。

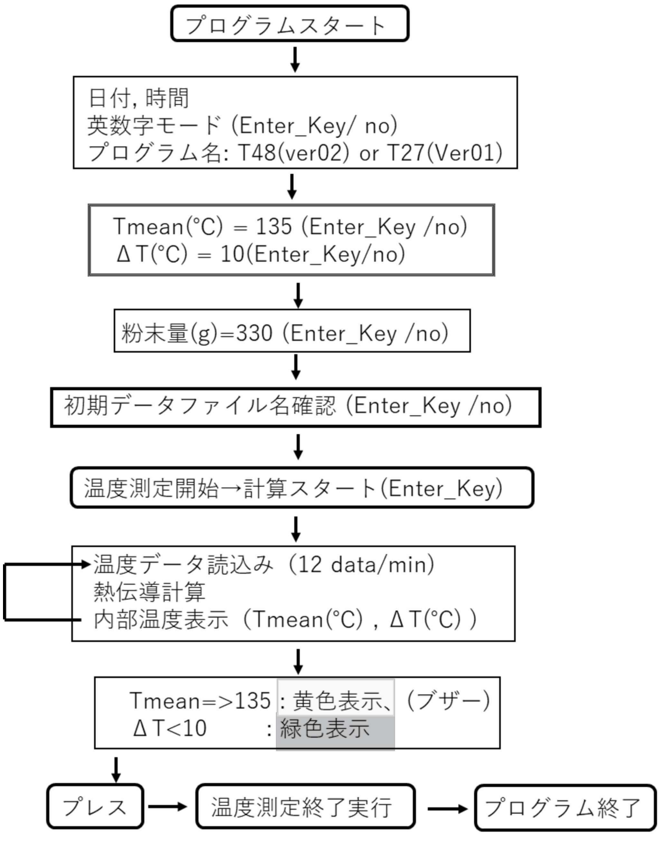


Fig. 13 Flowchart of program for measured temperature acquisition and heat conduction calculation.

そこで、従来の熱伝導計算プログラムに測定温度データ取込みの同期化や計算結果を表示させるプログラムコードを追加した。Fig. 13 は、成形工程における加熱時の管理プログラムのフローチャートである。なお、本稿では小型ガイドローラーを中心に述べてきたが、すでに中型ガイドローラーへの適用も行っている。おおよその手順は、まず、小型（T27）または中型（T48）用のプログラムを起動し、スタートさせる。目標とする粉体平均温度（T_{mean}）および粉体内温度均一度（ΔT）を設定し、投入粉末量を入力する。投入粉末量は、粉体部分の寸法や密度を決めるためのものである。その後、取得する温度データのファイル名を確認して、加熱を開始し、温度データを取得するのと同時に熱伝導計算が実行される。時間経過とともに、金型表面温度、粉体平均温度、粉体内最高温度、粉体内最低温度、粉体内温度均一度がグラフに表示され、粉体平均温度と粉体均一度が目標値になると表示数値が黄色と緑で点滅する。この時点でプレスを行い、仮成形体を得る。目標温度や投入粉末量は一度設定を行えば、記録に残され2回目以降は確認作業だけで済むようにプログラムされている。

4．結言

棒鋼の熱間圧延工程に使用されるガイドローラーの品質安定化、寸法精度向上および歩留まり向上を目的として温度管理システムの構築を試みた。金型内の粉体の加熱温度は熱伝導計算プログラムを適用し、粉体の到達温度および粉体内温度の均一性を評価した。また、この熱伝導計算を製造工程に組込み、その場で評価できる管理システムを構築した。結果は次のようである。

1）熱伝導計算に必要なセラミックス複合材料の原料となる混合粉末の熱拡散率の値を試行錯誤的に見積もった結果、鋼の 1/15 程度が妥当であると考えられた。

2）粉末成形用金型表面に熱電対を装着し、これらの測定温度を境界条件として熱伝導計算を行うことにより、金型内の粉体の平均温度及び温度分布を評価することができ、これらの温度が製品品質（組織）、寸法、含浸状況に多大な影響を与えることがわかった。

3）粉体温度（平均温度）および温度均一性を制御することによって、品質安定化および歩留まりが大幅に改善された。

4）加熱中の測定温度をただちに熱伝導計算に取り込むことにより、その場で粉体温度および温度均一性を評価できるシステムを構築し、品質安定化および歩留まりが飛躍的に向上した。

謝辞

本報告の作成にあたり、最終工程の加工を精密に行い、寸法精度のデータを取得して頂いた舛添太一氏に感謝します。また、粉末の混合から成形工程の実務を担当し、温度測定に多大な協力を頂いた山本和弥氏に感謝の意を表します。

参考文献

1) Y. Hanada, Y. Sho, A. Yamamoto, T. Tokunaga and H. Era: J. JFS 91 (2019) 710
2) Y. Hanada, Y. Sho, A. Sonoda, H.G. Kang, H. Nagayoshi, A. Yamamoto, T. Tokunaga: Arch. Metall. Mater., 64 (2019) 1645
3) Y. Hanada, Y. Sho, A. Yamamoto, T. Tokunaga and H. Era: J. JFS 92 (2020) 8
4) 花田、肖、恵良：フジコー技報 No.29 (2021) 21
5) 小林：軽金属：55 (2005) 327

技　術　論　文

光触媒フィルターへの紫外線 LED 照射条件検討
Investigation of UV LED Irradiation Conditions for Photocatalyst Filters

技術開発センター
第二開発室　リーダー
博士（工学）　坂口　昇平
Shohei Sakaguchi

技術開発センター
第二開発室　技師
日野　恵理子
Eriko Hino

技術開発センター
第二開発室　主任技師
森次　晋介
Sinsuke Moritsugu

技術開発センター
第二開発室　主任技師
博士（工学）裵　銀榮
Eunyoung Bae

要　旨

近年､紫外線 LED の開発が盛んに行われ､価格も安定しつつある｡紫外線 LED は､水銀ランプと比較すると、低電圧で小型、水銀フリーであり、光触媒フィルターを内蔵する空気清浄機の内部光源に適している。しかし、紫外線 LED を内部光源として用いるには、紫外線 LED の波長域、または、指向性等を考慮し、紫外線 LED の選定及び、配置を検討する必要がある。本稿では、評価に用いた可視光応答型光触媒に適した紫外線 LED の選定を行った。また、紫外線 LED の指向性を考慮し、光触媒フィルターへ照射される紫外線強度を算出した。紫外線 LED に流す電流値を可変させ、フィルター表面の紫外線強度を調整し、効率よく、ガス分解が行われる条件を検討した。その結果、本試験で用いた可視光応答型光触媒は、385nm をピークとする紫外線 LED が最も高い性能を示した。また、フィルター全面に 20mW/cm^2 の紫外線強度が照射される事で、アセトアルデヒドの分解速度定数は、最大となった。

Abstract:

In recent years, ultraviolet LED (UV-LED) development has been actively carried out and technology is increasing in efficiency and decreasing in price every year. UV-LED shows better quality in lower energy consumption, longer lifetime, smaller size and environmentally friendly than some conventional light source like mercury UV lamp. The UV-LED has been used in the internal light source of air purifier with built-in photocatalyst. However, in order to use an UV-LED as an internal light source, it is necessary to consider the wavelength range or directivity of the UV-LED, and to consider the selection and arrangement of the UV-LED.

In this paper, we have been selected a UV-LED suitable for the visible-light photocatalyst used in the evaluation. In addition, based on the directivity of the UV-LED, we calculated the intensity of the UV light irradiated to the photocatalyst filter. We investigated the conditions for efficient gas decomposition by adjusting the intensity of UV light on the surface of the filter by varying the current flowing through the UV-LED.

As a result, among the visible-light photocatalysts used in this paper, the UV-LED with a peak at 385 nm showed the highest photocatalytic activity. The decomposition rate constant of acetaldehyde was maximized when the entire surface of the filter was irradiated with an ultraviolet intensity of 20 mW/cm^2 or more.

１．緒言

紫外線は、UV-A (315~380nm)、UV-B (280~315nm)、UV-C（100~200nm）に分類される。紫外線 LED においても、これら UV-A~C の波長領域に対応するように開発が行われている。また、紫外線 LED は、青色 LED 以降に開発された比較的、新しい技術であり、水銀ランプに変わる次世代の技術として注目されている。紫外線 LED は、水銀ランプが主に使用されていた硬化や接着といった UV-A 分野の代替だけではなく、UV-C を用いた消毒 [1)2)]、水の浄化 [3)4)]、空気質の向上なども盛んに研究されている。また、除菌を目的とした UV-C（深紫外 LED）を用いた空気清浄機も各メーカーより発売されている。このように紫外線LEDは様々な分野で活用され始めている。同様に、二酸化チタンに照射する光源としても着目されている。二酸化チタンは、主に UV-A 領域を吸収し、電子が励起され、OH ラジカル、活性酸素を生成し、有機物を分解する [5)-11)]。本稿では、本試験で使用した光触媒が有する紫外線吸収帯域と整合した、波長域をもつ紫外線 LED（UV-A）の選定を行った。また、フィルターに照射する光強度を可変させ、その時のアセトアルデヒド分解性能を測定し、最適な光強度を検討した。

２．実験方法

2.1 紫外線 LED

・紫外線 LED の構造

紫外線 LED[12)-14)]は、一般的に LED 素子、保護ダイオード、パッケージ基材、レンズで構成されている。Fig.1 に構造図を示す。LED からフィルターに照射される光強度設計において、LED 素子形状やレンズ形状が大きく影響を与える。

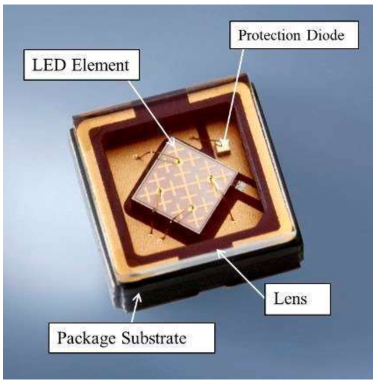


Fig.1 Structure of UV LED.

・紫外線 LED の指向性を考慮した光強度分布

試験に使用した日亜化学製 LED（NCSU276C）の相対放射強度を Fig. 2 に示す。放射強度分布は、0 度での強度を 100%とし、同一距離で角度のみを変化させた際の分布となる。フィルターと LED の位置関係を Fig.3 に示す。

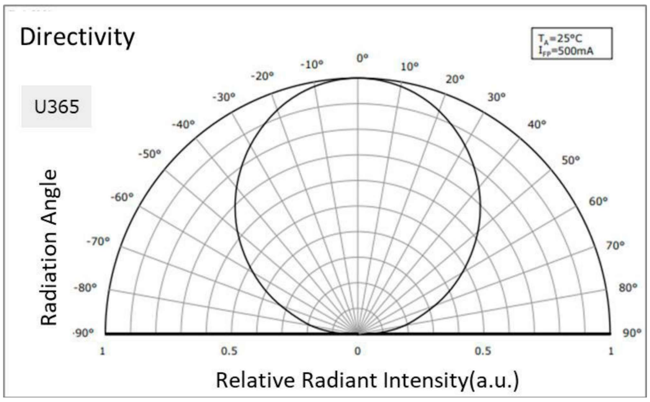


Fig.2　Relative Radiant Intensity of NCSU276C.

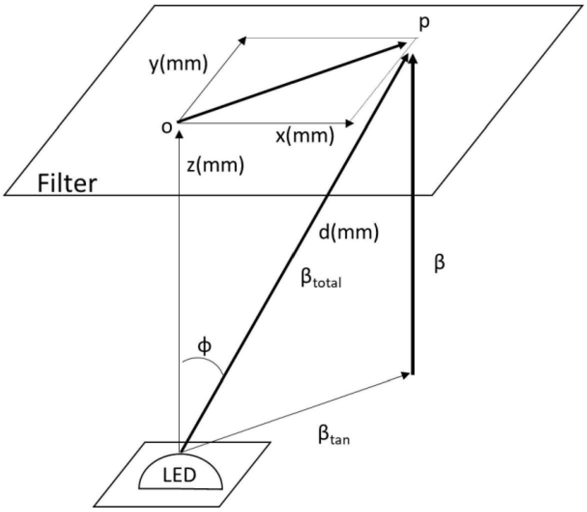


Fig.3 Positional relationship between filters and LED.

試験で使用するフィルターは平面構造であるため、実際にフィルター上での放射強度は Fig.2 の分布とは異なり、Fig.3 のようになる。そのため、下記の 1 式、2 式を使用し、Fig.3 のフィルター上での任意の点 P にあたる光強度 β を算出した。

$$\beta_{total} = \frac{\alpha \times z^2}{d^2} \quad \cdot\cdot\cdot (1)$$

$$d = \left\{ (x^2 + y^2)^{1/2} + z^2 \right\}^{1/2}$$

$$\Phi = arctan\left((x2 + y2)^{1/2} / z \right)$$

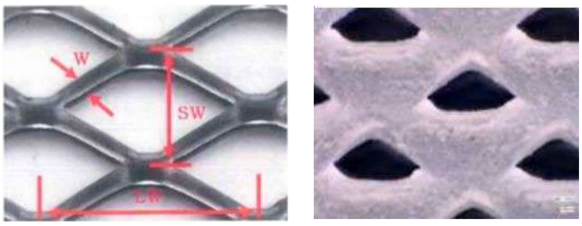
$$\beta = \beta_{total} \times cos\Phi \quad \cdot\cdot\cdot (2)$$

α ：読み取った任意の角度での放射強度
o ：LED の中心よりフィルターへ垂直に伸ばした点
x ：光が当たる任意の点と原点 o の横方向距離
y ：光が当たる任意の点と原点 o の縦方向距離
z ：原点 o と LED の距離

また、LED を複数個使用する場合は、それぞれ算出した β を足し合わせることで、算出することとした。

2. 2 使用材料

光触媒は、可視光応答型を用いた。フィルター基材は、アルミエキスパンド（SW:1.5±0.1mm, LW:2.1mm ±0.1mm, W:0.3mm～0.5mm, 板厚:0.3mm～0.5mm）を用いた(Fig.4(a))。光触媒の成膜は、当社特許技術である溶射工法を用いることで皮膜化した(Fig.4(b))。光触媒フィルターサイズは、95mm 角と 40mm 角を使用し、LED の選定試験は、95mm 角、照度分布試算と分解性能試験は、40mm 角を使用した



(a)　(b)

Fig.4 Microscope images of (a) uncoated expand filter, (b) photocatalyst coated expand filter.

紫外線 LED は日亜化学製を使用し、ピーク波長域は、365nm、375nm、385nm、395nm、405nm を用いた。本試験で用いた紫外線 LED の特性を Table 1 に示す。

Table 1 Characteristics of UV-LED.

Product No.		Current (mA)	Forward voltage (V)	Radiant flux (mW)	Peak Wavelength (nm)	Thermal Resistance (℃/W)	Directivity (degree)
NCSU276CT	U365	500	3.8	1050	365	3.6	115
NVSU119CT	U375	700	3.4	1160	375	3.4	135
	U385		3.35	1340	385	2.6	135
	U395		3.3	1340	395	2.6	135
	U405		3.1	1420	405	2.4	140

2. 3 照度測定

照度測定は、ウシオ電機社製、紫外線積算光量計（UIT-250）を用い測定した。また、測定治具を用い、測定器の受光部と垂直水平になるように LED を設置した。照射距離は 95mm 角のフィルター全域に光が当たる様に指向性を考慮し、31mm とした。

2. 4 ガス分解性能測定

評価ガスはアセトアルデヒドガスを用いた。試験チャンバーは 0.5 ㎥を使用した。初期ガス濃度の調整は、一旦、混合空気（窒素：約 78%、酸素：約 21%、アルゴン：約 1%）で 0.5 ㎥チャンバー内を置換する。その後、1,000ppm のアセトアルデヒドガスを所定量、注入する事で行った。ガス濃度は、マルチガスモニター（INNOVA 1412i/LUMASENCE TECHNOLOGYS）で測定を行った。また、試験環境温度 25℃、湿度 30%の環境下で測定を行った。

2. 5 評価試験機

試験機のガスがフィルターを通過する面風速は、0.74m/sec とした。また、LED の使用個数は、LED の波長選定の場合、1 個とし、フィルターサイズは、95mm 角の光触媒フィルターを用いた。LED への印加電流は、560mA とした。光強度と分解定数の関係を評価する試験では、フィルター面全体に均一な光強度となるように 4 個の LED を用い、フィルターサイズは 40mm 角とした。LED は、40mm 角のフィルターの 4 隅に配置した。フィルターと LED 間の距離は 31mm とし、印加電流を可変する事でフィルター面に照射される光強度をコントロールした。

３．実験結果及び考察

3. 1 各 LED 波長を用いた時のガス分解性能

Fig.5 に本試験で使用した可視光応答型光触媒に各ピーク波長を有する LED を用い、20±5mW/cm^2 程度の光強度を照射した時の分解速度定数を示す。その結果、385nm のピーク波長を有する LED が最も高い値を示した。一般的な光触媒は 365nm をピーク波長にもつ LED を用いた時の性能が高いとされている。本試験では、可視光応答型光触媒を用いたため、20nm 程度、LED のピーク波長がレッドシフトしたものが、最も高い分解速度定数を示したと考えられる。

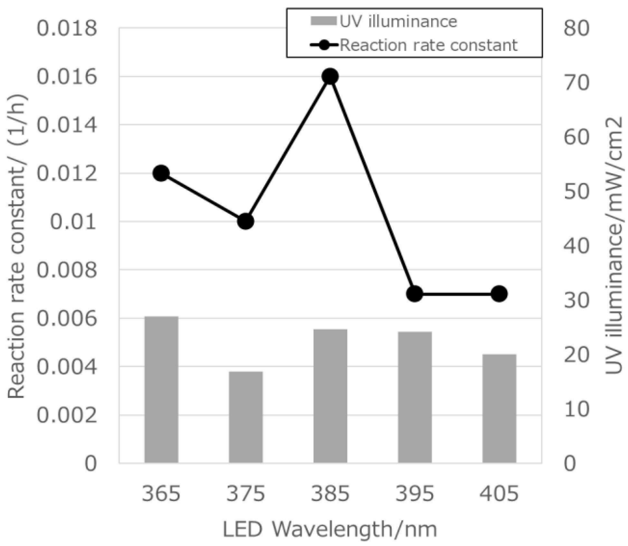


Fig.5 Wavelength-dependent photocatalytic rate constant of visible-light photocatalyst.

3. 2 LED へ印加する電流値と光強度分布の関係

Fig.6 に 40mm 角フィルターの 4 隅に設置した 4 つの LED の指向性を考慮し、光強度の β 成分のみを抽出

した光強度分布図を示す。Fig.6 の(a)〜(d)は、LED へ印加する電流を 140mA、230mA、350mA、560mA と可変させた時のそれぞれの光強度分布である。

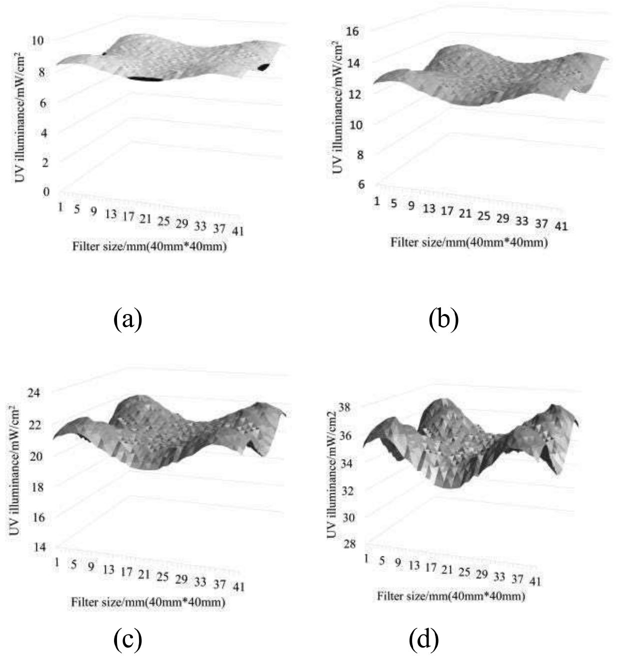


Fig.6 Light intensity distribution irradiated to the filter at each LED applied current value. a) 140mA, (b) 230mA, (c) 350mA, (d) 560mA.

各 LED 印加電流値におけるフィルター表面の光強度分布状況を Table2 にまとめた。LED を 4 個用いることで、40mm 角フィルター内の強度分布のギャップは、小さく抑えられた。560mA 印加時に最大最小値のギャップは、4.2mW/cm^2 程度に留まった。フィルター全面に比較的、均一に光を照射できていると考えられる。

Table2 Light intensity distribution on filter surface

Force current	Light intensity/mW/cm^2			
	max	min	|max-min|	average
140mA	8.9	7.9	1.0	8.4
230mA	13.4	11.8	1.6	12.6
350mA	22.3	19.7	2.6	21.0
560mA	37.0	32.8	4.2	35.0

3. 3 光強度と分解性能の関係

40mm 角のフィルターに対し、LED を 4 個内蔵した試験機に各電流値を印加した時のガス分解性能曲線を示す(Fig.7)。印加電流を増加するにつれて、0.5 m^{3}内のアセトアルデヒドの減少速度が向上していることが分かる。

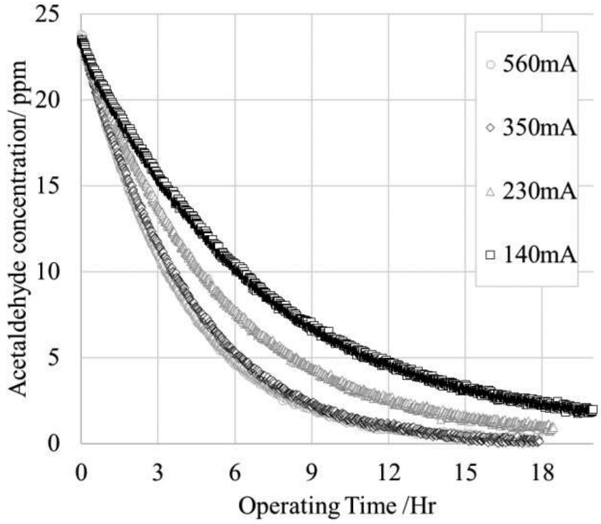


Fig.7 Acetaldehyde degradation under different current value.

また、Fig.8 に分解性能曲線より算出した分解速度定数とフィルター面に照射される光強度（平均値）の関係曲線を示す。分解速度定数は、フィルター面の光強度が約 20mW/cm^2 を境に一定値を示した。二酸化チタン界面では、試験ガスのアセトアルデヒドの他にアセトアルデヒドから生成される中間生成物が存在していると推定される。これらの中間生成物を含めた複数のガス種を二酸化チタン界面に存在する OH ラジカルで分解する。分解効率は二酸化チタンへ照射する光強度、または、その光を吸収する吸光度、さらに、反応効率によって決まる。本稿では、光強度を可変し、分解速度定数の変化を観察した。その結果、ある一定の光強度以上を二酸化チタンへ照射しても分解速度定数が向上しない結果となった。これは、二酸化チタン界面に生成される OH ラジカルの量と界面に存在するガス分子が均衡しているためと推定される。

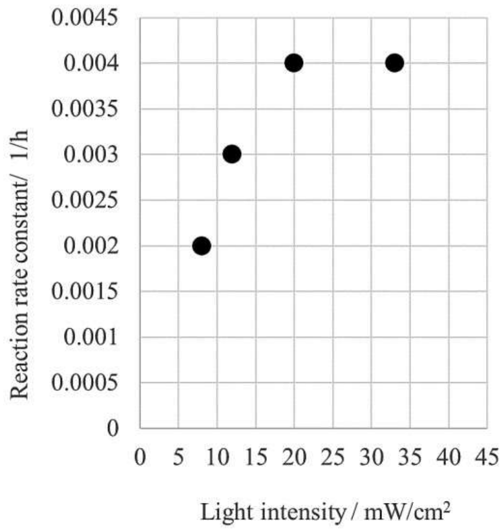


Fig.8 Dependence on light intensity of the reaction rate constant for the degradation of acetaldehyde.

４．結論

本稿では、本試験で活用した可視光応答型光触媒の最適波長について検討した。その結果、一般的な紫外光応答型が 365nm なのに対し、レッドシフトした 385nm のピーク波長をもった LED が最も高い分解性能を示した。また、フィルター面に均一な光強度を照射した時、光強度と分解性能の関係を調査した。アセトアルデヒドの分解速度定数は、照射光強度 20mW/cm^2 以上で飽和傾向を示した。本稿の結果は、今後、光触媒ユニット設計の目安となると考えられるが、光触媒は、高分子になるほど分解されにくい傾向があり、その他のガスの場合は、本試験結果の限りではない。

参考文献

1) Ibrahim, M. S. ,MacAdam, J.,Autin, O.,Jefferson, B: Environ Technol.,35(4),(2014),400-406
2) Song, K., Mohseni, M., Taghipour, F. :A review. Water Res.,94(2016)341-349
3) A. Hamamoto, M. Mori, A. Takahashi, M. Nakano, N. Wakikawa, T. Ikeda, Y. Nakaya, Y. Kinouchi: Journal of Applied Microbiology, Vol.103(2007) 2291-2298
4) Y. Aoyagi, M. Takeuchi, K. Yoshida, M. Kurouchi, N. Yasui, N. Kamiko, T. Araki, Y. Nanishi: Journal of Environmental Engineering, Vol.137(2011) 1251-1218
5) 藤嶋　昭、橋本　和仁、渡辺　俊也、光クリーン革命、シーエムシー（1997）
6) 藤嶋　昭、橋本　和仁、渡辺　俊也、入門ビジュアルサイエンス光触媒のしくみ、日本実業出版社（2000）
7) 橋本　和仁、藤嶋　昭、図解光触媒のすべて、工業調査会（2003）
8) 可視光応答型光触媒の最前線、エヌティーエス（2002）
9) 日本化学会編、季刊化学総説No.23、光がかかわる触媒化学-光合成から環境化学まで-、学会出版センター（1994）
10) 日本化学会編、季刊化学総説No.36、光化学の基礎と先端研究　気相・液相表面の光化学から光合成や地球環境光化学まで、学会出版センター（1998）
11) A. Fujishima, K. Honda, Nature, 37(1972) 238
12) 平山　秀樹、藤川　紗千恵、塚田　悠介、鎌田　憲彦、応用物理　80（2011）319
13) 平山　秀樹、オプトロニクス　19（2000）145
14) H. Hirayama: J. Appl. Phys. 97(2005)

技　術　論　文

養豚における成長率の計測技術の開発

Development of Measurement Technology for Growth Rate in Pig Farming

技術開発センター
第四開発室　リーダー
博士（工学）山本 清司
Kiyoshi Yamamoto

技術開発センター
第三開発室
原田　知典
Tomonori Harada

技術開発センター
第一開発室　主任技師
博士（工学）牟　用煥
Yong-Hwan Mo

要　旨

弊社では養豚分野における環境改善技術を長年研究開発しており、近年はハイクリーン・ウィンドレス豚舎という子豚の育成率向上を目指した豚舎開発を実施している。現在、宮崎県内の民間養豚場内で試験豚舎を用いた実証評価試験を行いながら、製品開発を進めている。特にハイクリーン・ウィンドレス豚舎の機能の一つとして、AI 技術を活用した豚の成長率を計測する技術の開発を㈱システムフォレストと共同で進めている。実証試験において蓄積された豚舎内の画像データをもとに面積率を算出し、この数値から豚の体重の推移を計測する技術を開発した。本稿ではこの技術に関して高精度の検証結果が示されていることから、その成果について報告する。

Abstract:

Our company has been researching and developing environmental improvement technology in the pig farming field for many years, and in recent years we have been developing a piggery called High Clean Windowless Piggery with the aim of improving the breeding rate of piglets. Currently, we are proceeding with product development while conducting demonstration evaluation tests using test piggeries at private pig farms in Miyazaki Prefecture. In particular, as one of the functions of the high-clean windowless piggery, we are jointly developing technology to measure the growth rate of pigs using AI technology with SystemForest inc. We calculated the area ratio based on the image data in the pigsty accumulated in the demonstration test, and developed a technology to measure the transition of the weight of the pigs from this value. In this report, we will report the results of the high-precision verification results for this technology.

1．緒言

養豚業における豚舎や排せつ物からの悪臭は豚舎規模の大型化に伴い、その影響も大きく悪臭対策が喫緊の課題となっている。2019 年、畜産経営に起因する苦情の発生戸数が 1,491 戸であり、この内の約 5 割、908 戸は悪臭関連によるものであった [1]。また、豚舎外へ

排出されるのは悪臭だけでなく、有害微生物も排出されている可能性があり、さらには豚舎内において、高密度飼育形態によって、悪臭ガスや有害微生物の滞留で、従業員や豚の健康被害や感染症の急速水平伝播が危惧されている。

弊社では、2013 年から 2015 年までの 2 年間、（国）宮崎大学と共同で豚舎由来の悪臭および微生物の低減化を目的として小型豚舎内において弊社が独自に開発した高殺菌素材(MaSSC)と脱臭装置(SR)を利用した予備試験を行った。その結果、SR による豚舎内の消臭効果および微生物数の低減化が確認された。[2),3),4),5)]

また近年、家畜の快適性に配慮した飼養管理を行うことにより、ストレスや疾病を減らし、畜産物の生産性や安全の向上にも繋げるアニマルウェルフェアという考えの下、家畜の飼養環境が大きく見直されている。例えば、豚舎内を清潔にすることで豚の成長が促進されるという研究結果が国内外で報告されている。しかし現状では、菌が増殖し臭気等を発生させる排泄物を洗浄し一時的に豚舎内を清潔しているが、除菌・消臭した快適な飼養環境を長期間維持できる豚舎は無い。養豚における生産性向上の鍵の一つは、豚にとって、最適な環境を提供することである。

これらを踏まえて、弊社では近年ハイクリーン・ウィンドレス豚舎(Fig. 1)の開発を進めている。ハイクリーン・ウィンドレス豚舎の特徴は以下の 6 点が挙げられる。

① 空調機を用いて年間を通じて、一定温度に管理可能
② 垂直気流制御により、底面からの汚染物の巻き上げを抑制
③ 臭気成分を空気浄化装置で処理し、換気量を抑制し、周辺への臭気拡散が低減可能
④ 清潔な環境下での飼育により、子豚の成長促進効果を期待
⑤ センサー等を用いて、IoT 管理を行うことで豚舎内環境を最適管理
⑥ 成長の悪いひね豚を通常飼育に戻す保育豚舎

Fig. 1 Appearance of high clean windowless piggery.

特にハイクリーン・ウィンドレス豚舎の開発において、アニマルウェルフェアで提唱されている適切な飼育状況で管理することが、生産性向上に結びつきやすくなる。仮に密飼い等の不適切な環境で飼育を行った場合、成長が悪くなる等の弊害が発生する恐れがあるため、適切に管理できるツールの開発は必要不可欠である。そのためには、上記の⑤の IoT 管理を活用して、豚の成長率を管理することは非常に有効な手段であると考えられる。

また通常、離乳期の子豚は 100 頭ほどの群で飼育され、決められた日数を経過すると、肥育豚舎へと移動される。その際の目安は、飼育員の目視による観察または週単位で管理されることが通常である。しかしながら、ハイクリーン・ウィンドレス豚舎においてはひね豚を対象としている点から、通常の豚と違う飼育日数で管理する必要があるが、都度子豚の体重を測定することは非常に手間となる。

そのため、本報の主題となる画像を用いた豚の体重および成長率を測定する技術が実現出来れば、密飼いになる前に子豚を移動させることが可能となり、加えて、IoT システムを駆使して、人手を割いた豚の飼育が可能となる。

本研究は、宮崎県内の農場で実施しているハイクリーン・ウィンドレス豚舎の実証評価試験を通して、子豚の成長率を計測する AI システムの構築のために、実証試験を通してビッグデータの蓄積に重点を置いている。また、質の高いデータサンプリング方法の検討と学習モデルの構築を実施しており、この点において技術支援を受けており、本開発は㈱システムフォレストと共同で開発した技術である。

本稿では主に豚の増体重に着眼した成長率の測定ツールの開発内容について解説し、実証試験を通して得られた開発成果について報告する。

２．実験方法

2.1 実証評価試験

宮崎県内の農場内に設置したハイクリーン・ウィンドレス豚舎内に対象となる子豚約 80 頭を飼育して試験を実施した。豚舎内部は柵で 4 つの部屋に区切られており、20 頭ずつ区分けした。(Fig. 2)

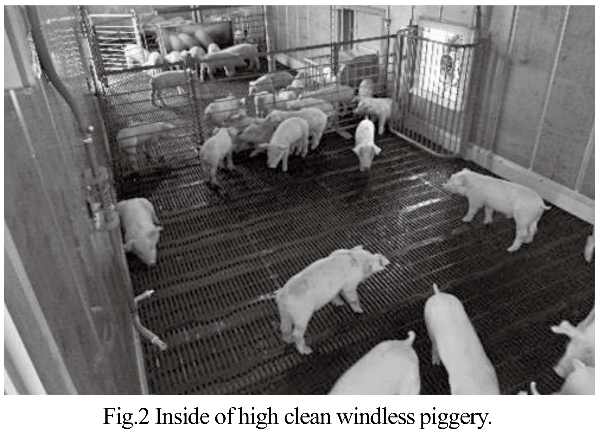


Fig.2 Inside of high clean windless piggery.

成長率の検証は、2020 年 11 月 10 日から 12 月 28 日の 47 日間で実施した。この試験では、子豚の半数(40 頭)を 1 週間ずらして搬入しており、第 1 群は 11 月 10 日搬入、12 月 22 日搬出、第 2 群は 11 月 17 日搬入、12 月 28 日搬出という方法で行なった。

この試験の対象となる豚は、通常の豚に比べて小さいサイズのひね豚と呼ばれる豚であり、同時期の通常豚は 10.8 ㎏であるのに対し、搬入時の体重は第 1 群で平均 8.3 ㎏、第 2 群で平均 10.0 ㎏であった。

2.2 実証評価時の記録画像

豚舎内部の子豚の状況を確認するツールとして、静止画像用カメラ(Fig. 3)が備え付けられている。カメラの設置位置は天井部であり、実証試験時点では豚舎内の 4 部屋の内、2 部屋の観察が可能な仕様となっている。静止画像用カメラは Fig. 4 のように豚舎内の 1 部屋全体を写すことができ、この画像は 10 分おきに自動で撮影され、クラウド上に保存される。豚が豚舎内で飼育されている全期間で画像は記録されている。

Fig. 3 The camera inside the piggery.

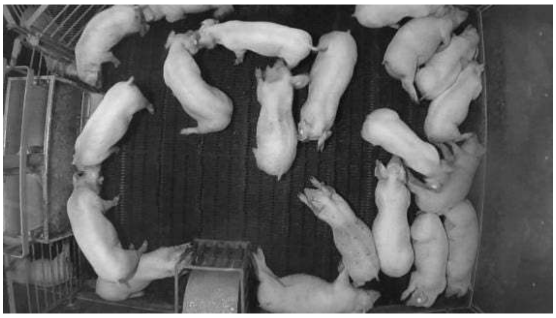


Fig. 4 The Image taken by the camera on the ceiling.

3. 成長率の解析

3.1 画像を用いた解析

前章に示した豚舎内部の静止画像を活用して、豚の成長率を測定する方法として、通常の静止画像を白黒の 2 値化画像(Fig. 5)に変換することで豚の占める面積の割合から体重を推算する手法を検討した。

通常、豚は群で管理されることから 1 頭ずつの計測ではなく、20 頭程度の平均値での管理でも十分に管理指標として活用できると考えた。

3.2 2 値化画像への変換

2 値化画像に変換するための方法として、1 日につき 144 枚の画像を処理する必要があることから、AI 解析の活用を試みた。本工程では、元の画像から豚の部分のみを白く判定させる AI 解析を実行するアノテーション(教師データ)を実施する必要がある。

アノテーションについては、子豚の成長過程を検出する必要があることから、11 月 10 日から 12 月 8 日までの任意の日時の画像を複数枚用いて実施した。

アノテーションで処理する画像数を 2 枚、4 枚、6 枚、8 枚、10 枚と変化させたモデルの 2 値化画像の変換結果を Fig. 6 に示す。教師データが多いほど精度は向上する結果が示されるが、10 枚追加時点で精度に大きな変化は見られないことが分かった。

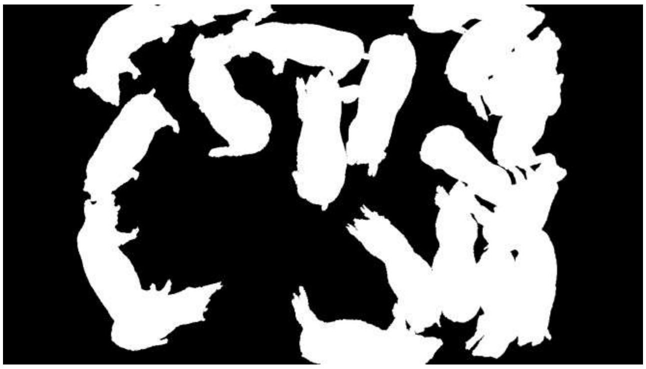
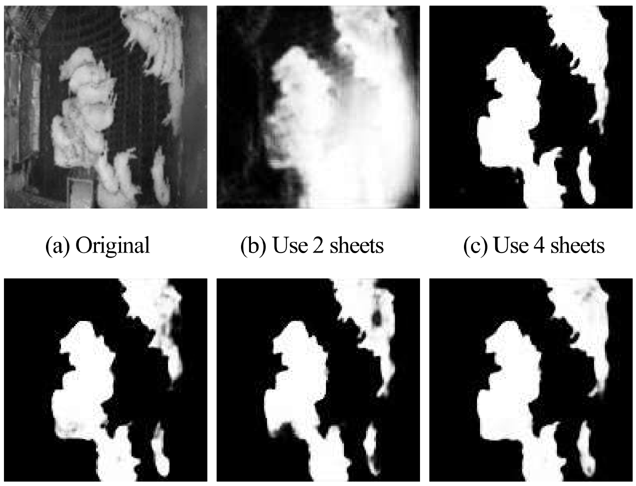


Fig. 5 Binarized image of Fig. 4.



(a) Original (b) Use 2 sheets (c) Use 4 sheets

(d) Use 6 sheets (e) Use 8 sheets (f) Use 10 sheets

Fig. 6 The AI analysis binarized image for each model.

3.3 面積率の解析

前項で変換した 2 値化画像の白部分の面積率を AI で算出し、飼育頭数(1 群；20 頭、2 群 18 頭)で割った

面積率の推移を Fig. 7 に示す。飼育日数が経過するほど、豚の占める白部分の面積が増加していく結果が示された。また、搬入時の体重(1 群：8.3 kg、2 群：10.0 kg)、と搬出時の体重(1 群 : 34.6 kg、2 群 : 37.4 kg)と解析結果の面積率の数値との比較を実施した。

面積率は 2 次元であり、重量は 3 次元であることから、面積率を 1.5 乗した数値に置き換え、この数値から算出した体重と実体重の比較を Table 1 にまとめた。

搬入、搬出時の実際の平均体重と比較して、面積率から算出された体重は高い相関がある結果が示された。

これにより、面積率を解析することにより、搬出する日時が予測することが可能になると考えられる。

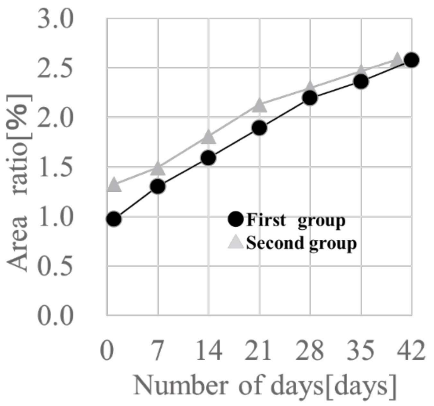


Fig. 7 Transition of area ratio by number of breeding days.

Table 1 Comparison between actual and calculated weight

		Actual weight [kg]	Calculated weight [kg]	Area ratio [%]
First group	Carry-in	8.3	8.6	0.97
	Carry-out	34.6	35.8	2.57
Second group	Carry-in	10.0	13.2	1.32
	Carry-out	37.4	36.0	2.59

4．改良ポイント

前章で 2 値化画像から算出された面積率を用いることで、子豚の体重予測(成長率の計測)が可能であることが示されたが、実仕様を想定した場合に以下の 3 点の課題があることも判明した。

本章では、3 点の課題について改良を行った結果について考察する。

4.1 飼育頭数の検出

現状、豚舎内部は柵で区切られているため、各部屋間での豚の移動はない状況であるため、1 頭当たりの豚の面積率の算出は、全面積率から搬入時の頭数を割ることで容易に算出することが可能である。しかしながら、各部屋を自由に豚が移動できるような飼養環境や事故等で飼育頭数が途中で変化してしまった場合、面積率の数値が大幅に変動してしまう恐れがある。

これらを想定した場合、画像内に写っている豚の頭数を自動で算出する AI の開発も必要となった。

解析に使用する画像は、2 値化画像の解析した画像と同様の静止画像を活用した。頭数を検出する手法としては、画像内の豚 1 頭ずつの位置を矩形の範囲で探し出し、ラベリングを行なう方法で検討した。この解析のアノテーションについては成長過程を検出することを考慮し、日付けを分散し、活動時間で豚の体勢も変化することから時間帯も不定期に採用した。合計 125 枚の画像を教師データに使用することで、Fig. 8 に示すように画像内の豚を検出することが可能となった。画像内の数値は不確かさを示す数値であり、0.3 以上のものを豚の頭数として検出する仕様とした。

これにより、各画像内に写る豚の頭数を高精度で検出することが可能となり、1 頭当たりの面積率を算出する際の精度を向上させることが可能となった。

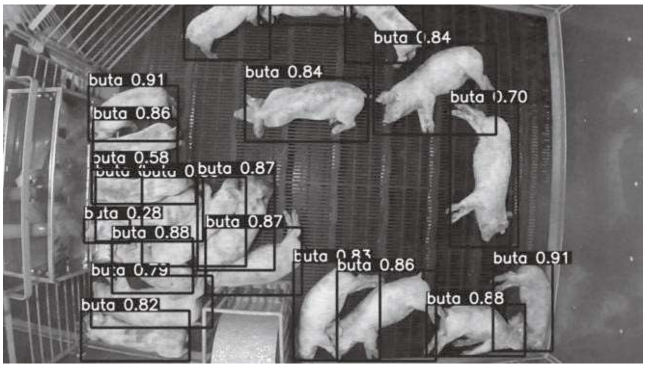


Fig. 8 The count calculation image by AI analysis.

4.2 カメラの増設

現状、豚舎内部の 4 部屋の内、2 部屋のみカメラが設置されている状況である。飼育状況により、柵を開放して全ての部屋を豚が自由に移動できる場合、一つの部屋に子豚が集中することがある。(Fig.9)

多くの豚が写っている場合は問題ないが、数頭しか写っていない状況が続くと、面積率の解析精度が著しく低下してしまう。これを補う上で、可能な限り全ての豚を撮影可能な状況を創出するためにカメラを増設することで、面積率の解析精度の低下を抑制することを可能とした。

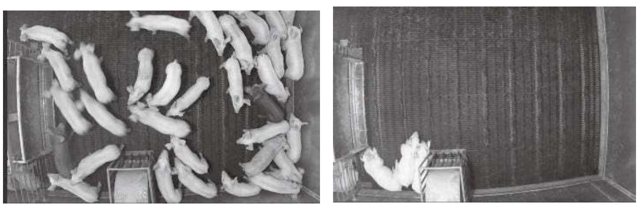


Fig. 9 Image of the inside of a pigsty with pigs biased.

4.3 特殊豚のアノテーション

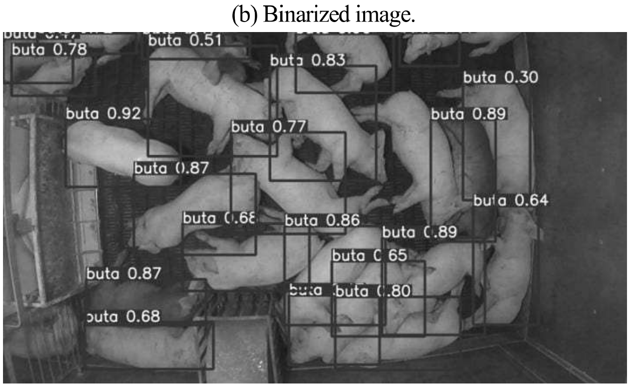
今回開発した AI の課題として、特殊な豚については、豚と認識しない事例が確認されている。具体的には、Fig. 10 に示すような茶色の豚や Fig. 11 に示すような汚れが付着した豚である。これらの豚については、豚の頭数としては、検出されているものの、体の部分が黒に反転しているため、本来の面積率の数値より低く算出される問題が発生している。

この要因は、2 次化画像のアノテーション時に使用した画像内に汚れの付着した豚や茶色の豚が含まれていなかったことから、AI が間違った判断をしてしまっているためである。

そのため、これらを解決するために上記の豚を含む画像を教師データとして、追加学習を実施する必要がある。

(a) Original data.

(b) Binarized image.



(c) Count calculation image.

Fig. 10 AI analysis results including brown pigs.

(a) Original data.

(b) Binarized image.

Fig. 11 AI analysis results including dirty pigs.

(a) Original data.

(b) Binarized image.

Fig. 12 AI analysis results by new model.

追加学習に使用する教師データとして、茶色の豚を含む画像 50 枚、汚れた豚を含む画像 50 枚を選定し、再度アノテーションを実施した。

追加学習したモデルを用いた解析結果を Fig. 12 に示す。この結果が示すように、茶色の豚及び汚れた豚についても AI が正しく判定できるようになり、高精度で豚の成長率を予測できるようになった。

５．結論

本開発で得られた結果を要約すると、次の通りである。

１）豚舎内部の画像を用いて豚の成長率(増体重)の予測可能な AI 技術の開発を実施した。
２）2 値化画像に変換することで、豚の面積率を算出し、面積率から高精度な体重の推移が計測できることを確認した。
３）画像内の頭数を検出する仕様を組み込むことで、事故等で頭数が変化した場合も高精度で解析を行うことが可能となった。
４）豚舎内部のカメラを増やすことで少数の豚しか写らない状況を回避し、解析精度の低下を抑制することが可能となった。
５）追加学習を実施することで、茶色の豚や汚れた豚が含まれる場合でも高精度で面積率を算出することが可能となった。

参考文献

1) 農林水産省生産局畜産部畜産振興課「畜産経営に起因する苦情発生状況(令和2年)」 https://www.maff.go.jp/j/chikusan/kankyo/taisaku/pdf/kujyou_R1.pdf
2) Sato S. et al. : The proceeding of 23rd International Pig Veterinary Society Congress., (2014) P.218, (p.212).
3) 佐藤俊介ら.：平成26年度日本産業動物獣医学会(九州)要旨集（2014）p.70
4) 佐藤俊介ら.：第101回日本養豚学会大会講演要旨集（2014）p36
5) 末吉益雄ら.：獣医畜産新報 68(6)（2015）p425 - 431

技　術　論　文

農地発電用途に最適化された円筒形太陽電池の開発

Development of Cylinder-Shaped Photovoltaics Designed for Agriphotovoltaics Applications

技術開発センター
第三開発室　リーダー
野村　大志郎
Daishiro Nomura

技術開発センター
第三開発室
博士(工学)　廣谷　太佑
Daisuke Hirotani

技術開発センター
開発管理室
園　勇哉
Yuya Sono

技術開発センター
第三開発室
武谷　利広
Toshihiro Takenoya

要　旨

我が国において、平板太陽電池の適切な設置場所の減少は、森林伐採による環境破壊や乱開発による景観破壊などを引き起こす原因となっている。耕作地やビニールハウス・ガラス室、耕地けい畔、耕作放棄地への太陽電池導入ポテンシャルは436GWと試算され、太陽電池の新しい設置場所として期待されている。一方、農作物の上に平板太陽電池を設置した場合、下部に日陰が発生するため、農作物に十分な光が当たらず、農作物の収量低下につながる懸念がある。本実証では、円筒形状の太陽電池と平板形状の太陽電池を農作物の上部にそれぞれ設置し、太陽電池下で育てられた農作物の収穫量および、太陽電池で得られた発電量を比較評価することで、円筒形太陽電池の農地発電用途に関するポテンシャルを評価した。

Abstract:

In Japan, the decrease in suitable flat PVs installations is causing environment destruction due to deforestation and landscape destruction due to overdevelopment. The potential for the introduction of PVs on cultivated land, vinyl houses/glasshouses, arable fields and abandoned land is estimated to be 436 GW, which is expected to become a new location for PVs installations. In contrast, when flat PVs are installed on top of crops, there is concern that the lack of light below the PVs could lead to lower crop yields. In this study, cylindrical PVs and flat PVs were installed on top of crops, and the potential of cylindrical PVs for agriphotovoltaics applications was assessed by comparing the yield of crops grown under the PVs and the quantity of electricity generated by the PVs.

1．はじめに

2012 年導入の再生可能エネルギーの固定買取制度(FIT 法)により、我が国の太陽光発電所は 2020 年の 9GW/年をピーク [1]に急増した結果、国土平地面積当りの太陽光設備容量は世界一となった [2]。国内では太陽電池の適切な設置場所が減少しており、森林伐採や廃棄による環境汚染、住民の意向を無視した乱開発による争いの増加、景観破壊、また発電パネルによる太陽光の反射による QOL(Quality of Life)低下等が問題視されている [3][4]。

「太陽光発電における新市場拡大等に関する検討」では耕作地、ビニールハウス・ガラス室、耕地けい畔と耕作放棄地を合計した土地の太陽電池導入ポテンシャルは 436GW と試算されており [5]、農地の有効活

用により新規太陽光発電設置場所が確保できることが期待されている。営農型太陽光発電設備を設置するための農地転用許可件数は2014年の351件から2020年には3,474件と約10倍に増加され、累計面積は872.7ha(8.73km^2)であり[6]、年々市場は拡大されている。一方で、平板形状の太陽電池パネルを農地上部空間に設置した際、平板パネルの下部に日陰が発生するため作物に十分な日光が当たらず、農作物の収穫量低下につながる懸念がある[7]。円筒形太陽電池は細長い円筒形状であるため適切な間隔を設けることで太陽光の透過と発電の両立が期待できる。Fig.1は、頭上に円筒形太陽電池を設置した場合と平板太陽電池を設置した場合の陰の出来方の違いを示している。円筒形太陽電池下では、木漏れ日のような光透過が実現出来る。

本実証では、環境制御可能な施設園芸ビニールハウス内に、円筒形状の太陽電池、平板形状の太陽電池を投影面積当りの開口率が50%になるように設置し、太陽電池下で育てられる農作物の収穫量および、太陽電池で得られた発電量を比較することで、円筒形太陽電池を評価した。

a)Cylindrical PVs　　b) Flat PVs

Fig.1 Landscape with PVs on top of crops.

２. 実験方法

2.1 評価に使用した太陽電池

太陽電池は、円筒形、平板形ともアモルファスシリコン型のフレキシブル発電シートを用いて作製した。

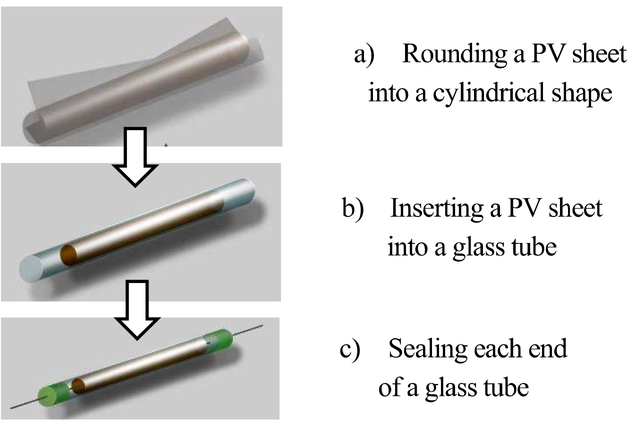


Fig.2　Fabrication Procedure for Cylindrical PV.

円筒形太陽電池の作製手順をFig.2に示す。フレキシブル発電シートをガラス管に封入して、配線を設けた後、ガラス管両端部を封止することで、作製した。更に円筒形太陽電池を20本接合することでモジュール化した。Fig.3 a)は作製したモジュールを2台並べたものである。

平板太陽電池はフレキシブル発電シートを封止材およびバリアフィルムでラミネート封止することで作製した。作製したフィルムはアルミシートに固定することで、モジュール化した。作製したモジュールをFig.3 b)に示す。

作製したモジュール1台のTSC条件での特性をTable1に示す。

a)Cylindrical PV　　b)Flat PV

Fig.3 PV fabricated for testing.

Table 1 Power properties of each PV

	Cylindrical PV	Flat PV
Voc(V)	65.8	72.8
Isc(A)	0.79	0.59
Vpm(V)	51.6	54.5
Ipm(A)	0.60	0.49
Pmax(W)	32.5	26.7

2.2 評価に使用した施設園芸ハウス

農作物の育成・収穫量を再現性良く評価するために、ビニールハウス内で実証試験を行った。農作物の栽培方法として、連作障害が起きにくいとされる高床式砂栽培法を選定した。導入した施設園芸ハウスの外観をFig.4に示す。同サイズのビニールハウスを3棟製作し、太陽電池を設置しない基準棟、円筒形太陽電池を農作物上に設置した円筒形太陽電池評価棟、平板太陽電池を農作物上に設置した平板太陽電池評価棟を建設した(Fig.5)。施設園芸ハウスに設置した太陽電池は、平板、円筒とも、投影面積当りの開口率が50%になるように設置した。また、自動育苗装置、自動灌水装置による栽培時の液肥供給量の自動化、自動側窓カーテンによる室内温度調整を導入することで、太陽電池による遮光および日陰の影響以外の農作物育成条件を、各棟で同一になるように調整した。

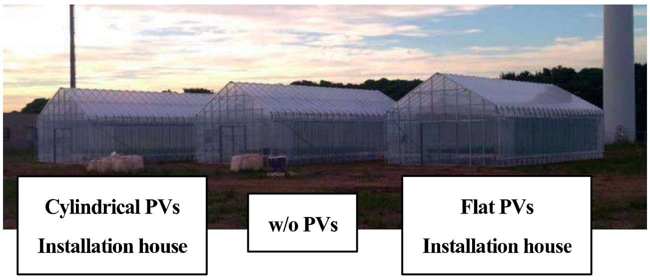
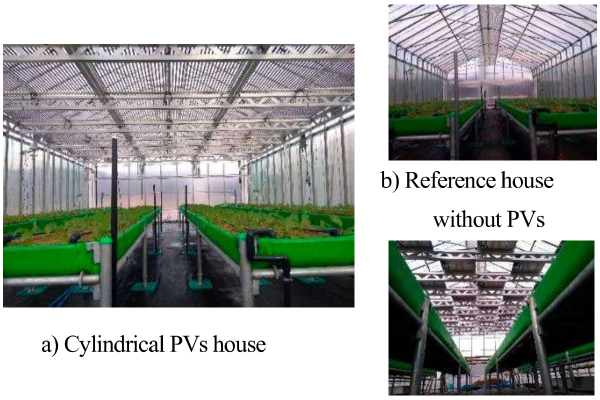


Fig.4 External view of horticultural greenhouses.



a) Cylindrical PVs house

b) Reference house without PVs

c) Flat PVs house

Fig.5 Constructed Agriphotovoltaics facilities.

2.3 農作物収穫量の評価方法

農作物はチンゲン菜を選定した。年間9作程度の収穫が可能であり、繰り返し評価が可能である。チンゲン菜は光飽和点が高い葉物野菜であり、ソーラーシェアリングに向いている農作物とは言い難いが、農作物上にある太陽電池による遮光・日陰の影響を受けやすい点で、太陽電池の形状の違いによる比較評価に適していると判断した。

各ビニールハウス内には600mm×1800mmの高床式砂栽培ベッドを16ベッド設置した。その中で、太陽光が側面から入射される割合が少ない中央～北側の6ベッドで栽培されたチンゲン菜のみを評価に使用した(Fig.6)。Fig.7のように、1ベッドに36株栽培することで、評価棟ごとに216株のチンゲン菜を栽培した。

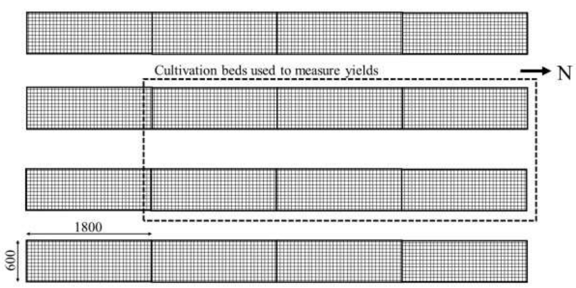


Fig.6 Arrangement of growing beds used in studies.

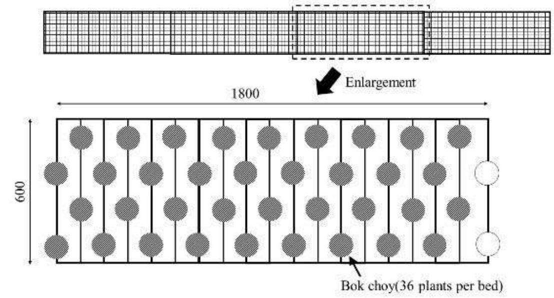


Fig.7 Location and quantity of Bok choy cultivated

12月から8月までの冬～夏の期間において、4回の育苗、定植、栽培、収穫を行い、収穫時に216株全てのチンゲン菜の重量を測定した。太陽電池を設置していないビニールハウスを基準として、平均重量を比較評価した。また、3作目、4作目においては、太陽電池を設置しない基準棟のみ、透過率50%の遮光シートをチンゲン菜上部に設置した。

2.4 太陽電池発電量の評価方法

円筒形太陽電池および平板太陽電池の発電量評価方法をFig.8に示す。円筒形太陽電池は6モジュールを並列接合したものを一組として、マイクロPCS(パワーコンディショナーシステム)に接続することで、AC100/200V出力可能とした。6モジュールのSTC(標準試験条件)下の出力はDC195Wである。平板太陽電池は8モジュールを並列接合したものを一組として、DCコンバータで降圧した後にマイクロPCSに接続した。8モジュールのSTC下の出力はDC197Wである。得られた電力はゲートウェイの監視システムにより、モニタリング可能である。円筒形太陽電池アレイと平板太陽電池アレイの発電量を比較評価した。

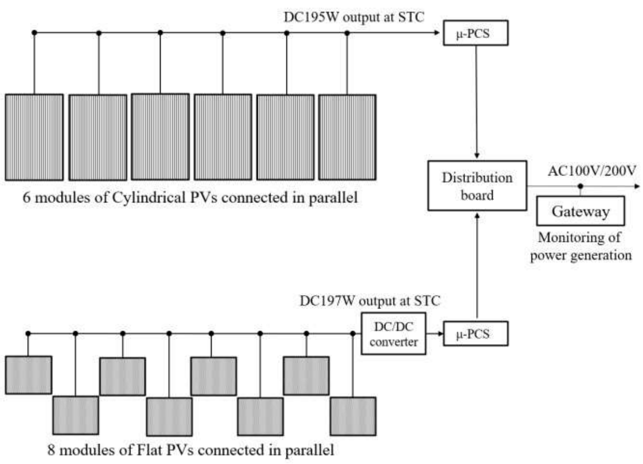


Fig.8 Methods for evaluating the quantity of electricity generated by PVs.

3．実験結果および考察

3.1 農作物の収穫量

Table2 に、太陽電池未設置エリアのチンゲン菜栽培条件を示す。1,2,3 作目については、積算温度が 550～600 時間で収穫可能であったが、夏場の 4 作目については、積算温度 994 時間での収穫となった。4 作目のビニールハウス内平均気温は 29.2℃であったが、チンゲン菜の適正な生育温度は 15～25℃であり、35℃を超えると生育が抑制されるため[8]、Fig.9 の通り、チンゲン菜にはカッピング(葉の湾曲症状)と呼ばれる育成障害が観察された。

Table 2 Cultivation conditions without PVs in a greenhouse

Times	Period.	Days	Avg. Temp.	Total Temp.	Total Solar Radiation
1	17 Dec - 13 Feb.	59	9.9	584	89.3
2	27 Feb - 6 Apr.	39	14.0	545	123.1
3	27 May - 20 June.	25	22.8	570	61.1*
4	6 Jul – 8 Aug.	34	29.2	994	79.5*

*Shading curtains were used only in buildings without PVs

Fig.10 に太陽電池未設置棟、円筒形太陽電池設置棟、平板太陽電池設置棟の栽培期間内の室内平均温度を示す。3 棟とも、同等の気温であり、太陽電池設置による、室内温度の変化は季節に関わらず、観察されなかった。

Fig.9 Bok choy with deformed leaves.

Fig.11 に 3 棟の室内の栽培期間内の平均相対湿度を示す。4 作目の平均湿度は、太陽電池未設置棟で 85.6%、円筒形太陽電池設置棟で 83.6%、平板太陽電池設置棟で 83.2%であり、太陽電池未設置棟が太陽電池設置棟よりも 2%程高い結果であった。これは、太陽電池の有無の影響ではなく、太陽電池未設置棟にのみ、自動育苗装置および液肥供給用の貯水タンクを設置しており、装置に貯めた液肥中水分の揮発の影響と考えられる。

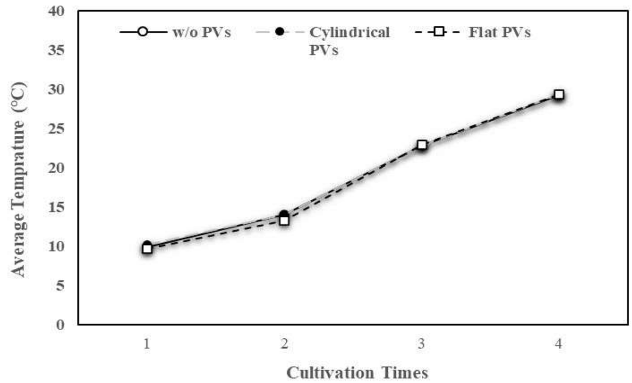


Fig.10 Average indoor temperatures.

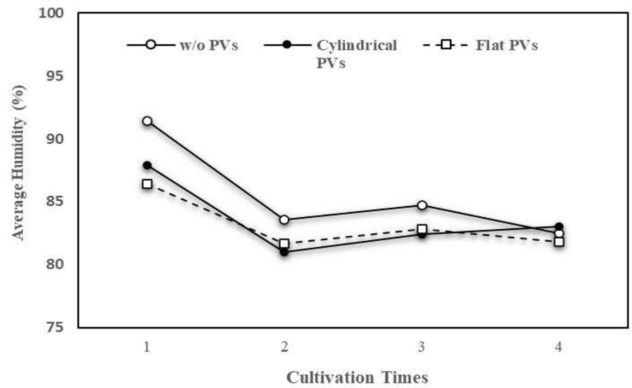


Fig.11 Average indoor relative humidity.

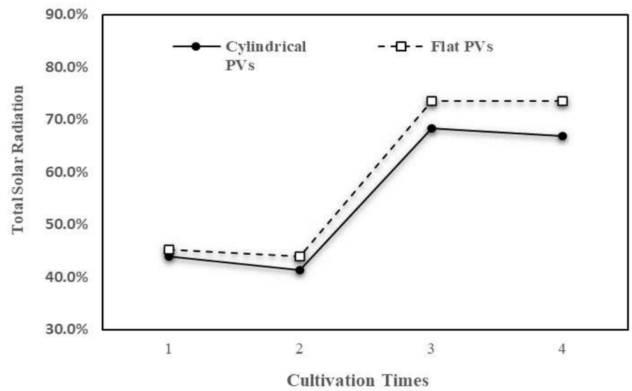


Fig.12 Cumulative solar radiation ratio based on uninstalled Greenhouses.

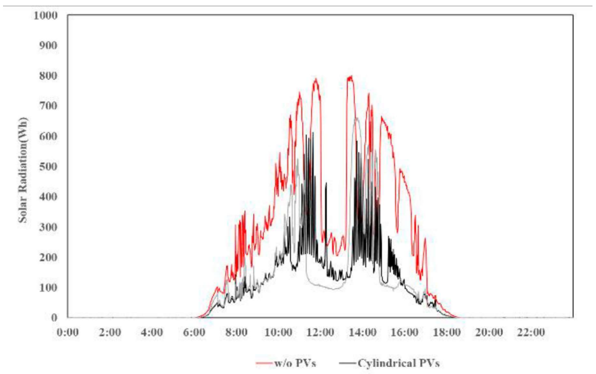
Fig.12 に太陽電池未設置棟の積算日射量を 100%とした時の、太陽電池設置棟の積算日射量比率を示す。1、2 作目は、太陽電池による光の遮光により、積算日射量は 50%を想定していたが、1、2 作目の平均は、円筒下で 42.7%、平板下で 44.6%となっており、想定値よりも低い光透過率であった。太陽電池を支える架台構造において、長尺となった梁の強度を保つために梁

にトラス形状を設けた。梁部により、一部の光が遮断された結果、積算日射量の低下が生じたと考えられる。、

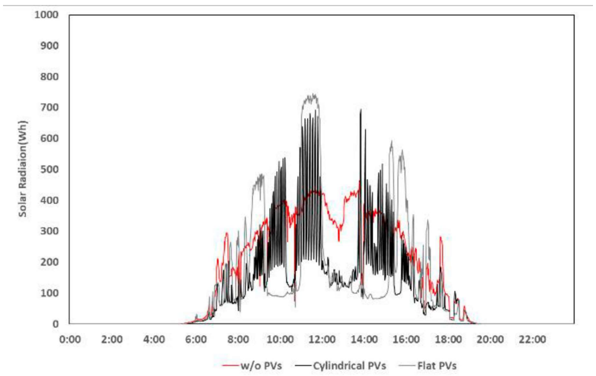
3 作目、4 作目は太陽電池未設置エリアに透過率 50%の遮光シートが設置しており、1、2 作目の透過率より、太陽電池設置棟の積算日射量は未設置棟の 85%(円筒形下)、89%(平板下)を想定した。実際の 3、4 作目の平均積算日射量は、円筒下で 67.7%、平板下で 73.5%であり、どちらの棟も想定値よりも低い積算日射量であった。

Fig.13 に太陽電池未設置棟に遮光シートを使用していない 3 月 27 日と、遮光シートを使用した 7 月 28 日の一日の日射量の推移を示す。いずれも晴天日であった。3 月 27 日において、3 棟とも、12 時～13 時に著しく日射量が低下していることが分かる。

一方、7 月 28 日においては、太陽電池設置棟においては、同様に 12 時～13 時に著しく日射量が低下しているものの、太陽電池未設置棟については、日射量の低下が、3 月 27 日に比べて、顕著に少なくなっていることが分かる。このことが、3 作目、4 作目における太陽電池設置棟の積算日射量が低下した原因であると考えられる。



27 March (without shading curtains)



28 July (with shading curtains)

Fig.13 Trends in solar radiation on a daily basis.

その後の点検で、12 時～13 時の日射量低下が、遮光シート要因であることが分かった。Fig.14 の通り、シート使用時は遮光率 50%となる反面、シートを使用しない場合は、ビニールハウス中央に畳んで収納されており、この部分が遮光部となった。太陽電池設置棟は夏場においても、遮光カーテンを広げないため、太陽電池未設置棟に比べ、積算日射量が低下する結果となった。

a) Folded up　　b) Extension

Fig.14 Situation with shading curtains.

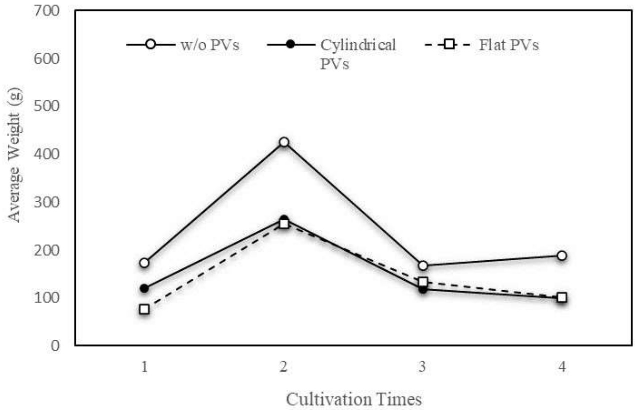


Fig.15　Average weight of Bok choy.

Fig.15 に 3 棟の 1 作目から 4 作目までに収穫したチンゲン菜の平均重量を示す。円筒形太陽電池設置棟、平板太陽電池設置棟とも、太陽電池未設置棟に比べ、平均重量が低下している。これは、光飽和点の高いチンゲン菜を栽培しているため、太陽電池の遮光による日射量の低下が大きな要因である。

平板太陽電池と円筒形太陽電池下での平均重量を比較評価した。平均重量を積算日射量で除した後、太陽電池未設置棟の値を 100%として、相対比較評価した(Fig.16)。太陽電池未設置棟に遮光シートを広げていない 1 作目、2 作目は、円筒形太陽電池設置棟で、それぞれ 157%、150%、平板太陽電池設置棟でそれぞれ、98%、136%であり、太陽電池による遮光率を同一にした場合、平板に比べ、円筒形太陽電池設置下で高い収量が得られる結果であった。単純計算では、円筒形下の場合、遮光率 35%未満、平板下の場合、遮光率 15%未満にすることで、太陽電池未設置棟と同等の収量が得られる計算となる。

太陽電池未設置棟で、遮光シートを広げた 3 作目、4 作目において、円筒形太陽電池設置棟でそれぞれ 103%、78%、平板太陽電池設置棟で 109%、73%であっ

た。3 作目の結果は、遮光率 50%の太陽電池は、遮光率 50%の遮光シートと同等の役割を示すものであった。一方、4 作目においては、太陽電池設置棟の積算日射量あたりの重量は太陽電池未設置棟を 20%以上、下回る結果となり、太陽電池の遮光率を変えても、太陽電池未設置棟と同等の収量を得ることが出来ないことを示す結果であった。夏場の高温時において、太陽電池を遮光シートの代わりに使用することで収量を確保することは実現出来なかった。

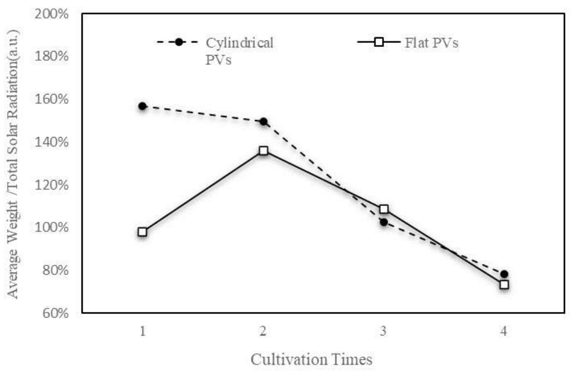


Fig.16　Average weight per total solar radiation of Bok choy based on greenhouses without PVs.

夏場に遮光のない直射日光下で栽培不良が生じた例は、光飽和点のないトウモロコシにおいても報告がある。太陽光の直射により葉が高温になり、根から吸い上げた水分が蒸散・冷却のみに使用された結果、光合成に必要な水不足により成長が阻害されたと推測されている [9]。

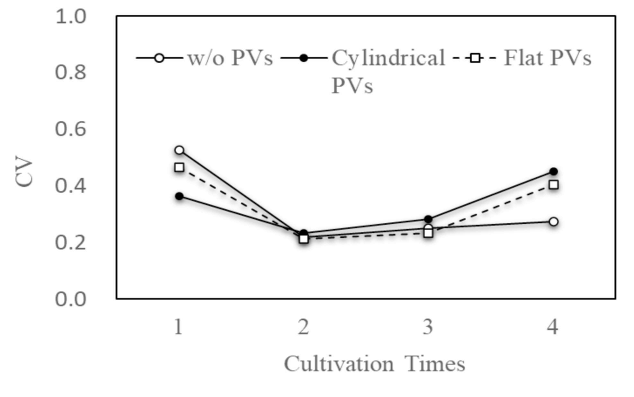


Fig.17 Comparison of coefficients of variation.

最後に、収穫されたチンゲン菜の重量のばらつきを評価した。太陽電池の設置の有無により平均重量が異なるため、平均重量を標準偏差で除した、変動係数(CV)で比較評価した(Fig.17)。重量のばらつきは、1 作目(冬)と 4 作目(夏)に、大きくなる傾向があった。太陽電池下で上手く栽培が出来なかった 4 作目を除くと、1、2、3 作目の変動係数は円筒形下でそれぞれ、0.365、0.233、0.281、平板下でそれぞれ、0.464、0.213、0.232 であり、3 作目を通すと、円筒形太陽電池下で育成することで、チンゲン菜重量のばらつきが小さい結果が得られた。場所毎の光むらを作り難いことが、重量ばらつきの低減に寄与していると考えられる。

3．2 太陽電池の発電量

7 月 12 日から 8 月 15 日までの一日ごとの発電量を Fig.18 に、累積発電量を Fig.19 に示す。円筒形太陽電池、平板太陽電池とも投影面積 50%になるよう設置した時、曇・雨天時の発電量に差は見られない反面、晴天時は円筒形太陽電池で高い発電量が得られた。累積発電量において、円筒形太陽電池は平板太陽電池の 1.23 倍高い発電量が得られた。

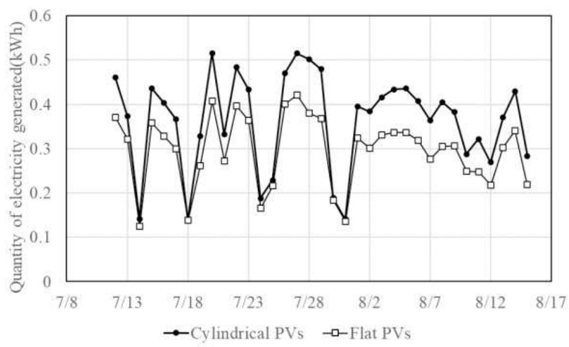


Fig.18 Daily electricity generated from 12 July to 15 August.

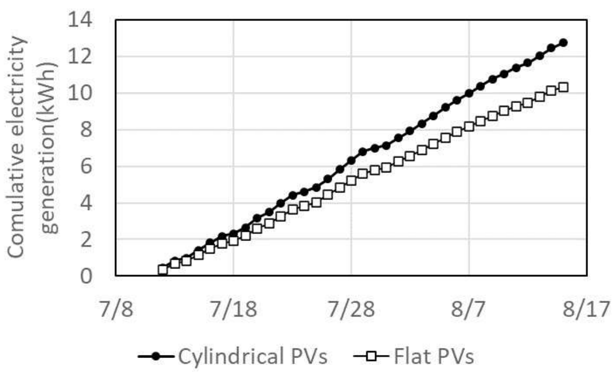


Fig.19 Total electricity generated between 12 July and 15 August.

晴天日であった 7 月 28 日の発電量の推移を Fig.20 に示す。円筒形太陽電池は平板太陽電池に比べて、7 時から 10 時 30 分、14 時から 18 時の朝・夕の期間で特に発電量が高いことが分かる。一日の発電量について円筒形太陽電池は平板太陽電池の 1.25 倍であった。

屋外設置した円筒形太陽電池とビニールハウス内に設置した円筒形太陽電池の発電量について、比較した。Fig.21 に 7 月 26 日から 8 月 15 日までの累積発電量を示す。円筒形太陽電池をビニールハウス内に設置することで屋外設置に比べて、発電量が、45%に低減した。

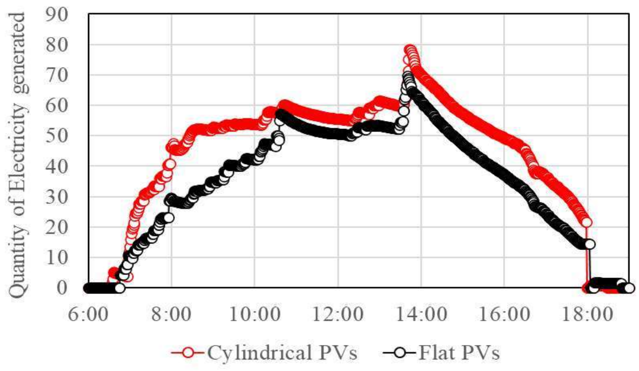


Fig.20 Daily electricity generated between cylindrical PVs and Flat PVs on 28 July.

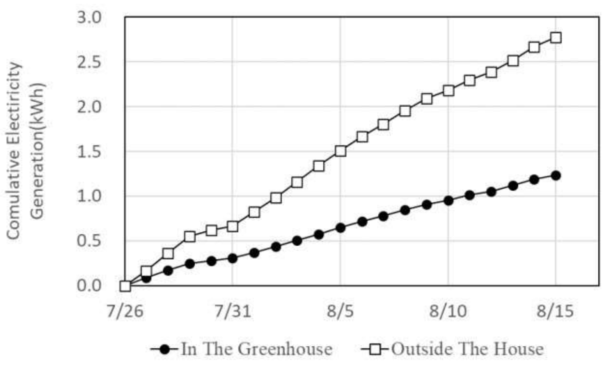


Fig.21 Total electricity generated between 26 July and 15 August.

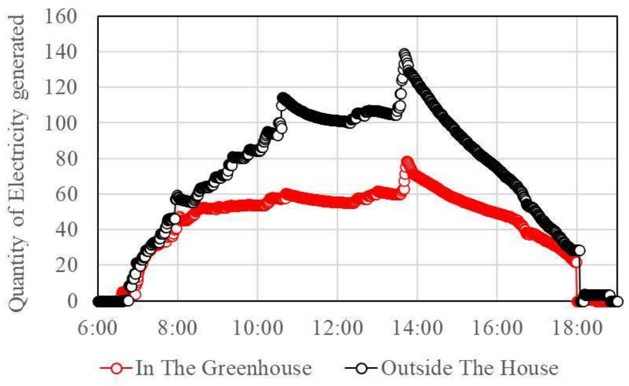


Fig.22 Daily electricity generated by cylindrical PVs at different installation sites on 28 July.

Fig.22 に 7 月 28 日の発電量推移を示す。ビニールハウス内に設置することで、一日を通して、発電量が低下していた。発電量の低下は、ビニールハウスを構成する梁で生じる陰の影響が大きいと考えられる。

今回の実証試験においては、太陽電池の形状により生じる陰が農作物に与える影響を主眼に置いて、太陽電池をビニールハウス内に設置したが、実用の際には、太陽電池をビニールハウス外枠に取り付けるような設置工法が必要である。

４．結論

これまでに得られた実験結果を要約すると、次の通りである。

1）チンゲン菜に遮光シートを広げる必要のない 1 作目～2 作目(冬～春)において、遮光率を同率にした時、平板太陽電池に比べて、円筒形太陽電池下で高い収量が得られる試算を得た。

2）チンゲン菜に遮光シートを広げた時、適正な生育温度環境下では、太陽電池と遮光シートの遮光率が同率の場合、同等の収量が見込まれる結果を得た。

3）夏場の生育限界近くでチンゲン菜を育てた時、太陽電池と遮光シートの遮光率が同率の場合でも、太陽電池下で収量が低下する結果であった。遮光されない強い直射日光が連続的に照射されることで、チンゲン菜の育成不良が生じた。

4）夏場以外の 1 作目から 3 作目において、平板太陽電池下に比べて、円筒形太陽電池下で育てることで、チンゲン菜の重量ばらつきを低減することが出来た。平板に比べ、円筒形の方が場所毎の光むらを作り難いことに起因すると考えられる。

5）投影面積下の開口率を 50%に統一した時、円筒形太陽電池の発電量は、平板太陽電池の 1.23 倍高かった。特に朝と夕方に高い発電量が得られた。

6）円筒形太陽電池をビニールハウス内に設置した場合、屋外設置に比べて、発電量は45%に低減した。実用化の際には、円筒形太陽電池をビニールハウス外枠に取り付けるような設置工法が必要である。

謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業(JPNP10020)の結果得られたものです。

共同開発機関として、電気通信大学、協力機関として、CKD 株式会社、ウシオ電機株式会社に参画頂きました。また、ビニールハウスの設計・製作は、株式会社茂広組、チンゲン菜の育成指導は、株式会社グリーンファームのご支援の下、実施いたしました。

関係者の皆様に、深く感謝申し上げます。

参考文献

1) IEA-PVPS : Snapshot of Global PV Markets 2022, T1-42(2022), 10-11

2) 資源エネルギー庁：国内外の再生可能エネルギーの現状と今年度の調達価格等算定委員会の論点案, 70(2021), 5

3) Akita Noriko : Journal for Interdisciplinary Research on Community Life, 7(2016), 72-76
4) 環境省：太陽光発電事業の環境保全対策に関する自治体の取組事例集, 4(2016), 1-14
5) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)：NEDO再生可能エネルギー技術白書, 2(2013), 30
6) 農林水産省 : 営農型太陽光発電について, 8(2022), 6
7) 千葉大学倉阪研究室, NPO法人地域持続研究所 : ソーラーシェアリング全国調査結果報告書, 2(2019), 9-23
8) 秋田県農林水産部：あきたブランド野菜づくりの手引き, 3(2007), 210
9) 長島　彬 : ソーラーシェアリングのすすめ,1(2015), 82-93

新　製　品	新　技　術

空気清浄機　　ポータブル機
「AkariAir　－アカリア－」

１．はじめに

光触媒は光が当たることにより、水分と酸素から酸化力の強いフリーラジカルを発生させ、水や空気中の有害物質を分解し、水処理や空気浄化、抗菌、脱臭を行うことができる。その光触媒をアルミ不織布やアルミエキスパンドなどのフィルターに独自の技術（低温高速溶射技術）で成膜した光触媒フィルターを適用した商品開発を行っている。

2019 年 1 月から弊社は光触媒フィルターを搭載した、推奨適用床面積８畳（当社基準）タイプの小型の空気消臭除菌装置ブルーデオＳ型（ 図1）の販売を開始し、新型コロナウイルスによる需要増加もあり、2022年７月までに約４万台を出荷している。Ｓ型は推奨適用床面積８畳（当社基準）となっているが、お客様より、ウィズコロナの観点から、持ち運びが可能なパーソナルな除菌機を切望されていた。

そこで、2021 年６月から卓上タイプで、USB 給電で持ち運びが可能なパーソナル機である AkariAir（アカリア）Ｐ型の開発をスタートした。

図１　ブルーデオＳ型

２．製品コンセプト

製品コンセプトを以下の４点に定めて、開発を進めた。

①　ウィズコロナ時代のパーソナル除菌機

新型コロナウイルスの蔓延により、人々の除菌に対する考えは変わった。そんな中で、新型コロナウイルスとどう向き合っていくかも大切になってきており、ウィズコロナ時代のパーソナル機として、バッグに入れてどこでも持ち歩ける製品を目指した。

②　デザインを最大の「売り」とする

AkariAir（アカリア）のデザインには、新しいデザイナーを起用している。光と空気で、安心かつ上質な癒しの空間を持ち運ぶというデザインコンセプトを掲げ、シンプルでありながらアートの要素を備えたフォルムと高品質感、また当社独自の技術である光除菌にフォーカスした、空気清浄機×照明×インテリアを満足するようなデザインを目指し開発をスタートさせた。

フォルムに関しては、持ち運びやすい形を追求した結果、奇数の多角形を採用するデザインが浮かび、最もシンプルな五角形が相応しいとなり、空気清浄機の形ではあまり見ない五角形の形状となっている。吸排気口の形状も、外観フォルムの五角形に因んだペンタローズパターンを応用した幾何学的なデザインを用いることで、シンプルで柔らかいフォルムに対比し、デコラティブなアクセントを加えている。（図2）

③　活性炭フィルターの採用

光触媒フィルターに加えて、活性炭フィルターを採用することで、卓上パーソナルタイプのコンパクトサイズでありながら、急速かつ高い脱臭性能の実現を図った。

④　光源のLED化

ブルーデオ Ｓ 型では光触媒用の光源として CCFL 管を使用しているが、SDGS の観点および、低消費電力化を図るために、Ｐ型においては光源をLED化している。

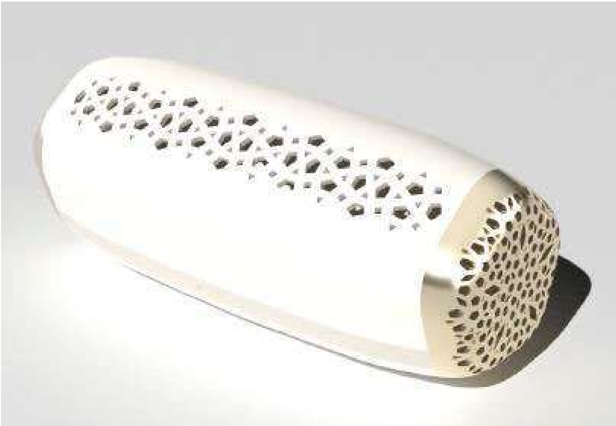


図２　AkariAir のデザイン

４．製品仕様

主な製品仕様を表１に記載する。

表１　製品仕様

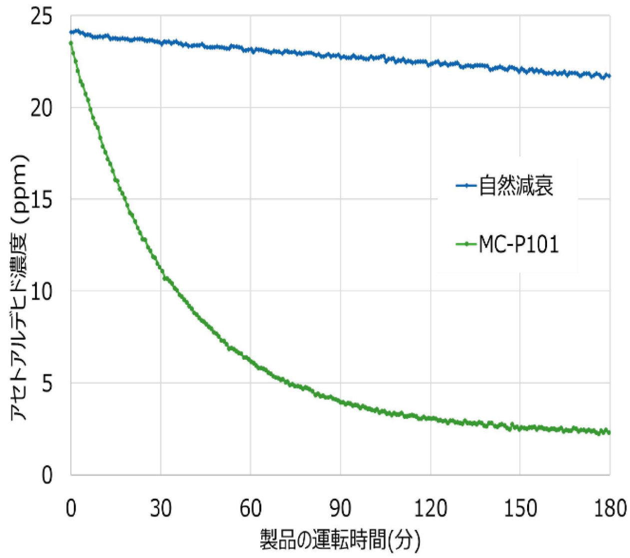
品名	空気清浄機	
ペットネーム	AkariAir　アカリア	
型名	MC-P101-N/BK（ブラック） MC-P101-N/WT（ホワイト）	
製品寸法	幅	74　mm
	奥行き	73　mm
	高さ	179　mm
重量	約0.25　kg（USBケーブルを除く）	
運転モード	弱	強
風量	0.03　m^3/分	0.05　m^3/分
消費電力	0.8　W	1.1　W
騒音値	24　dB	29　dB
コード長さ	約1.2　m	

５．性能

１）ガス分解性能（アセトアルデヒド）

アセトアルデヒドの分解性能は、初期濃度約23ppm が約180 分で3ppm まで落ちている（図3）。

アセトアルデヒドは体臭や口臭に含まれる代表的な臭いガスであり、そのガスを約3時間で大幅に低減させることが可能である。



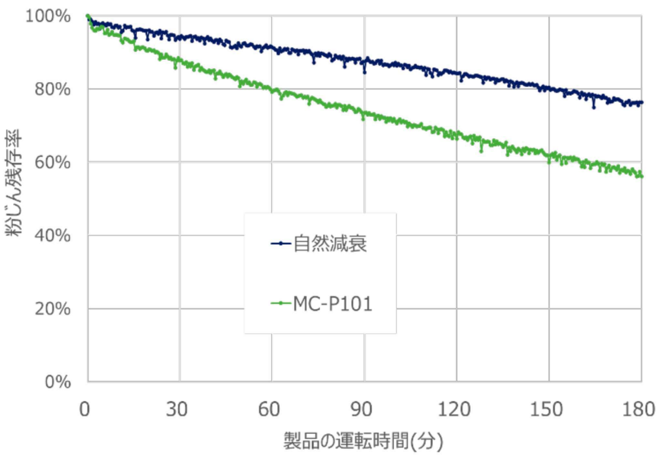
試験機関：（株）フジコー　若松響工場試験室
試験ガス：アセトアルデヒド
測定装置：INNOVA 光音響マルチガスモニタ
　　　　　LumaSense Technologies 製
試験方法：0.5m³アクリルチャンバー内で本体を
　　　　　強モードで稼働

図３　ガス分解性能（アセトアルデヒド）

２）集塵性能（たばこ試験）

集塵性能向上を目的として、使用する活性炭フィルターはハニカム形状のものを採用している。また、活性炭フィルターの両面に不織布を貼り付けることで更なる集塵性能の向上を目指した。

集塵性能は180 分で粉塵残存率が約60%以下となっていることから、約40%以上の集塵性能となり、コンパクトサイズながら、高い脱臭性能だけでなく集塵も可能である（図4）。



試験機関　　：(株) フジコー　若松響工場試験室
測定対象　　:たばこ(メビウスオリジナルタール 10mg)
測定機　　　：LD-5R (SIBATA 製粉塵計)
試験方法　　：JEM1467 に準拠
$1m^3$ アクリルチャンバー空間内で吸煙機に設置したたばこを燃焼させ、強モードで本体を稼働させて、粒子減少数を測定

図 4　集塵性能（ウイルス試験）

６．まとめ

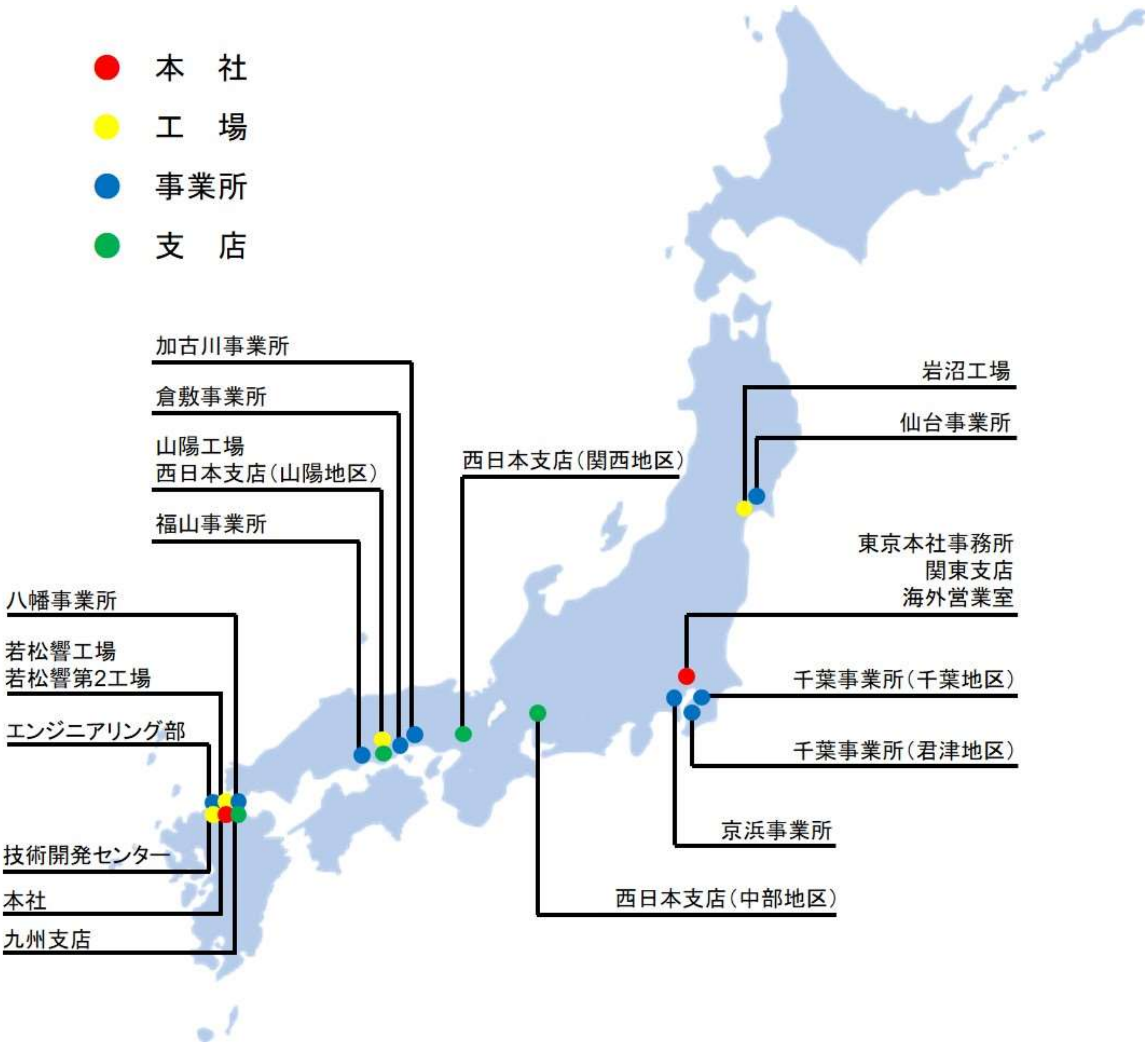
ブルーデオシリーズはＳ型を 2019 年 1 月から、M 型を 2021 年 11 月から販売を開始しており、今回新たに P 型を 2022 年 12 月から販売を開始する。光触媒製品としても、空気消臭除菌装置としても認知度はまだ低いが、今後、たくさんの方に購入して頂き、効果を実感して頂けることを、開発者として願っている。

問い合わせ先

技術開発センター
担当：柴田　将貴
TEL　093-701-4500
FAX　093-701-4501

FUJICO　工場・事業所・営業拠点

令和4年10月1日現在



□本　社
〒804-0011
福岡県北九州市戸畑区中原西2丁目18-12
☎ 093-871-3724　FAX 093-884-0009/093-884-0048

□東京本社事務所
〒103-0027
東京都中央区日本橋2丁目16番2号
KDX日本橋216ビル3階
☎ 03-6665-6721　FAX 03-6665-6723

□技術開発センター
〒808-0021
福岡県北九州市若松区響町1丁目110-10
☎ 093-701-4500　FAX 093-701-4501

■エンジニアリング部
□戸畑地区
〒804-0011
福岡県北九州市戸畑区中原西2丁目18-12
☎ 093-871-3724　FAX 093-884-0009

□若松地区
〒808-0021
福岡県北九州市若松区響町1丁目110-5
☎ 093-701-4034　FAX 093-701-4035

■工　場

□山陽工場
〒719-0253
岡山県浅口市鴨方町鳩ヶ丘 1-1298
☎ 0865-44-5151　FAX 0865-44-5154

□若松響工場
〒808-0021
福岡県北九州市若松区響町 1 丁目 110-5
☎ 093-701-6245　FAX 093-701-6849

□若松響第２工場
〒808-0021
福岡県北九州市若松区響町 1 丁目 110-1
☎ 093-701-6671　FAX 093-701-6672

□岩沼工場
〒989-2421
宮城県岩沼市下野郷字新南長沼 87-1
☎ 0223-24-2450　FAX 0223-29-2084

■事業所

□仙台事業所
〒983-0001
宮城県仙台市宮城野区港 1 丁目 6-1
JFE スチール株式会社　棒線事業部　仙台製造所構内
☎ 022-258-4182　FAX 022-258-4183

□千葉事業所　君津地区
〒299-1141
千葉県君津市君津 1 番地
日本製鉄株式会社 東日本製鉄所 君津地区構内
☎ 043-952-0497　FAX 043-952-0498

□千葉事業所　千葉地区
〒260-0826
千葉県千葉市中央区新浜町 1 番地
JFE スチール株式会社 東日本製鉄所 千葉地区構内
生浜ラボ 2F
☎ 043-262-4864　FAX 043-262-4329

□京浜事業所
〒210-0868
神奈川県川崎市川崎区扇島 1－1
JFE スチール株式会社　東日本製鉄所　京浜地区構内
☎ 044-288-5565　FAX 044-288-5563

□加古川事業所
〒675-0137
兵庫県加古川市金沢町 1 番地
株式会社神戸製鋼所　加古川製鉄所構内
☎ 079-435-0393　FAX 079-435-9641

□倉敷事業所
〒712-8074
岡山県倉敷市水島川崎通 1 丁目
JFE スチール株式会社　西日本製鉄所 倉敷地区構内
☎ 086-448-3035　FAX 086-448-3037

□福山事業所
〒721-0931
広島県福山市鋼管町 1 番地
JFE スチール株式会社　西日本製鉄所　福山地区構内
☎ 084-941-0924　FAX 084-941-0937

□八幡事業所
〒803-0803
福岡県北九州市小倉北区許斐町 1 番地
日本製鉄株式会社　九州製鉄所　八幡地区(小倉)構内
☎ 093-561-2081　FAX 093-561-2083

■営業拠点

□九州支店
〒804-0011
福岡県北九州市戸畑区中原西 2 丁目 18-12
☎ 093-871-3724　FAX 093-884-0009

□西日本支店（関西地区）
〒530-0001
大阪府大阪市北区梅田 2 丁目 5 番 6 号
桜橋八千代ビル 4F B 号室
☎ 06-6440-1305　FAX 06-6440-1306

□西日本支店（山陽地区）
〒719-0253
岡山県浅口市鴨方町鳩ヶ丘 1-1298 山陽工場内
☎ 0865-45-9255　FAX 0865-45-9657

□西日本支店（中部地区）
〒460-0008
愛知県名古屋市中区栄 2 丁目 1 番 10 号
伏見フジビル 501 号室
☎ 052-218-7747　FAX 052-218-7748

□関東支店 （含海外営業室）
〒103-0027
東京都中央区日本橋 2 丁目 16 番 2 号
KDX 日本橋 216 ビル 3 階
☎ 03-6665-6721　FAX 03-6665-6723

フジコー技報ーtsukuru No.30　令和4年12月1日

発行人　永吉英昭
発行所　株式会社フジコー
技術開発センター
〒808-0021　北九州市若松区響町１丁目110-10
☎093-701-4500　FAX093-701-4501

シンボルマークは、富士山の形とフジコーのFをデザイン化したものです。小ブロックが右上がりのHOP、STEP、JUMPと飛躍、拡大していく状態を表現しております。

独創的技術と信頼で世界に拡がる
FUJICO

本社　福岡県北九州市戸畑区中原西２丁目１８ー１２
PHONE 093(871)3724(代) FAX 093(884)0009