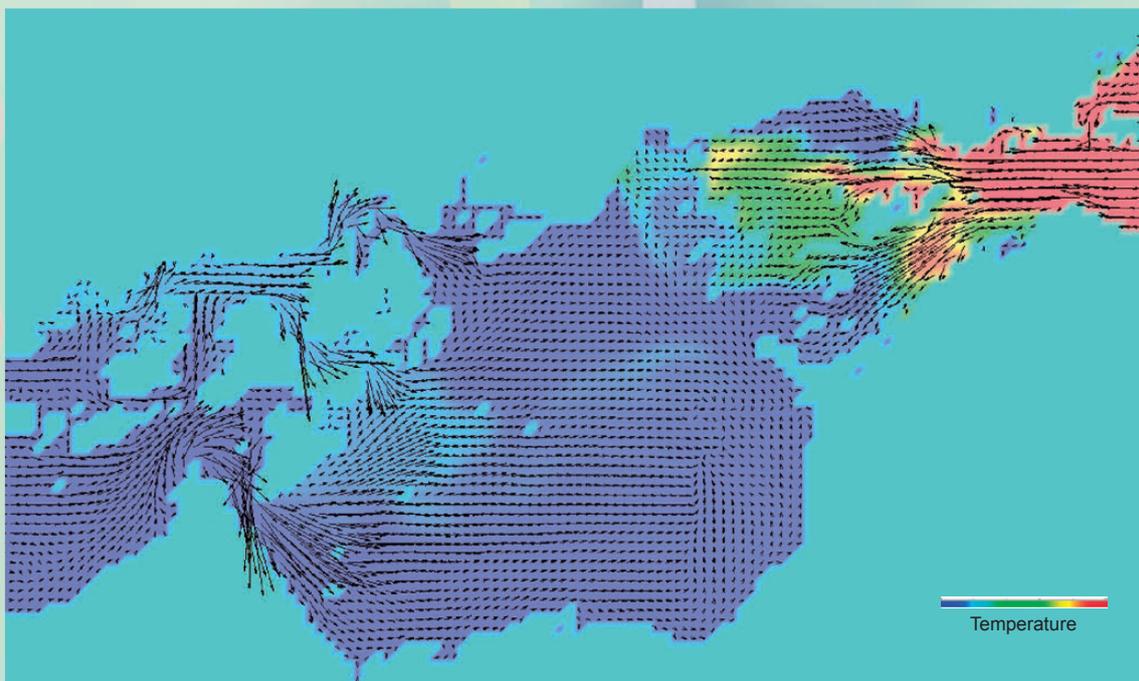


住友化学

2017 技術誌



瀬戸内海域の潮流シミュレーション



住友化学

目次

2017

随 想

壁の効用

住友化学株式会社 常務執行役員 新沼 宏 2

総 説

樹幹害虫防除剤 ロビンフッド®の開発 4

極低消費電力集積回路のための

次世代デバイス向けエピタキシャル基板の研究開発 17

業務革新に向けた人工知能活用の考察 26

技 術 紹 介

炭素鋼鋼管の高速検査技術

—磁束抵抗法 (MFR:Magnetic Flux Resistance)— 35

幹細胞を利用した代替法開発 —in vitro 神経毒性評価法— 40

患者由来 iPS 細胞を用いた進行性骨化性線維異形成症 (FOP) の病態解明 45

抗体部位特異的 RI 標識技術 49

有機 EL デバイス製造におけるプロセス汚染評価の重要性

—真空チャンバー由来の不純物評価— 53

車両用 ABS 樹脂の開発動向 58

製 品 紹 介

エアゾールタイプの園芸殺虫剤 ロビンフッド® 62

意匠性樹脂フィルム WAPO® 62

化合物半導体ウェハ 窒化ガリウム (GaN) 自立基板 63

トピックス

ポリプロピレンコンパウンド事業の更なるグローバル化に向けた

インド・メキシコでの拠点新設 64

千葉工場でポリエーテルサルホンの第二プラントを建設 64

ブラジルに農薬などの研究開発拠点を開設

—「ラテン・アメリカ・リサーチ・センター」始動— 65

モンサント社と雑草防除分野の次世代技術について

新たなグローバル協力関係を構築 65

展示会などへの出展 66

外部表彰受賞紹介

..... 68

外部発表紹介

..... 71



住友化学 抄録

■ 樹幹害虫防除剤 ロビンフッド®の開発

佐藤 隆士、佐藤 直樹 …………… 4～16

ロビンフッド®は、フェンプロパトリン (fenpropathrin) 0.02%を有効成分とし、果樹などの樹の中を加害する「樹幹害虫」の孔道内に薬液を噴射して防除する新規エアゾール剤である。本製剤はコンパクトな形状ながら多岐に渡る樹幹害虫に対して広く防除効果を示し、操作性よく、簡易かつ効率的に樹幹害虫を防除することができるという特長を兼ね備える。本稿では、近年、被害が拡大する樹幹害虫の防除技術の開発につき、2016年に本製剤を上市するに至るまでの開発経緯と実用効果および使用上の注意点などについて紹介する。

■ 極低消費電力集積回路のための次世代デバイス向けエピタキシャル基板の研究開発

横山 正史、山本 武継 …………… 17～25

近年の情報の高速化・大容量化により、情報処理における低消費電力化が大きな課題となっている。そこで、従来の動作原理に基づくトランジスタに代わり、新しい動作原理に基づいて、より低消費電力で動作可能なトランジスタの開発が期待されている。そのような次世代トランジスタとして注目されているのがトンネルトランジスタである。本稿では、近年研究開発が進んでいるIII-V族化合物半導体をベースとしたトンネルトランジスタ等、次世代デバイス向けの化合物半導体エピタキシャル基板に関し、その開発動向を紹介する。

■ 業務革新に向けた人工知能活用の考察

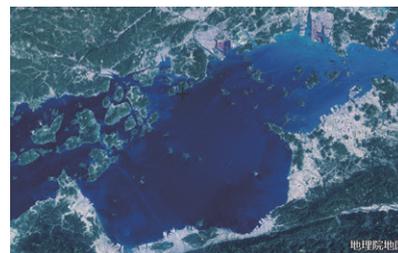
本田 仁…………… 26～34

近年、人工知能の発展が目覚ましい。化学業界においても、医療分野における人工知能を活用した創薬をはじめ、人工知能を活用した業務革新の波が来ている。住友化学(株)は、今中期計画において、「IoT時代に対応したデジタル化による抜本的な業務革新の実現」を目指している。この中においても、人工知能もデジタル化技術の一つとして検証を進めている。本稿では、人工知能の現状および住友化学(株)での取り組みをもとに、今後の業務革新に向けた人工知能の活用について考察する。

表紙画像「瀬戸内海域の潮流シミュレーション」について

当社は2008年11月に「エコ・ファーストの約束」を宣言し、環境先進企業として地球環境保全に取り組んでいます。ここでは、生物環境科学研究所と生産安全基盤センターが協力して最先端の計算技術を活用した事例をご紹介します。

表紙画像は、ある時刻における瀬戸内海域（右の衛星写真に該当する部分）の温度分布と潮の流れをコンピュータで予測して、それぞれ色と矢印で表したものです。瀬戸内海域は衛星写真でもわかるとおり多くの島が点在し、潮の満ち引きも大きいため、複雑で激しい潮流が発生することで知られています。これほど広域な領域を水深まで考慮して温度および潮流を予測するには、既存の手法では長時間の現象でも何日も要していました。当社が開発した高効率な計算技術を用いると、1ヵ月間の現象を数日で予測することが可能になります。今後、この技術を環境影響評価に適用し、環境保全活動に活用してまいります。



瀬戸内海域の衛星写真
出典：国土地理院
(<http://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>)
データソース：
Landsat8画像 (GSI, TSIC, GEO Grid/AIST),
Landsat8画像 (courtesy of the U.S. Geological Survey),
海底地形 (GEBCO)

壁の効用

住友化学株式会社
常務執行役員

新 沼 宏

Hiroshi NIINUMA



本稿の依頼を受け、諸先輩方の随想の記録を拝見し、最初は技術系役員からの所感であったものが、途中から技術屋・事務屋の別なしの寄稿文となったことを初めて知ったところである。そこで、技術誌への寄稿というプレッシャーからも少し解き放たれ、しかも今は長いゴールデンウィークの真ただ中ということで、日頃の総務や人事等というお堅い？立場からも離れて、徒然なるままに駄文を弄させていただくこととしたい。

話題は「壁」である。壁というと、最近の出来事では何ととっても、トランプ大統領の国境の壁の公約であるが、そうした物理的なものでなくとも、障壁という意味で壁を使った日本語は非常に多い。もしかすると日本人は壁好きなのかもしれないが、民族の壁、言葉の壁、宗教の壁、組織の壁、制度の壁、そして技術の壁、さらにはゴルフでも100の壁などなど枚挙に暇が無い。皆さんも仕事の上で乗り越えてきた壁、今乗り越えようとしている壁、近い将来乗り越えねばならない壁、沢山の壁に直面しているのではないかと思う。

私の入社（1981年）したての頃、今の大阪工場の勤労部（当時）時代の話である。この時代は、数々のエピソードに満ち満ちた時代であり、今でも時折、当時のメンバーや関係者が集まると「あの頃は……」から始まり、長い時間の経過と共に多少の誇張も入ったの伝説が語られることとなる。その辺の楽しい？エピソードの紹介はまたの機会に譲るとして、自分にとってその後の会社生活に非常に役立った「壁」の経験をご披露したい。

それは、「壁に貼った真っ赤な事務連（正確には「事務連の下書き」）」である。今でも社内にある、あの「事務連絡書・処理伺」である。入社翌年にはワープロなるものが登場したが、当時は未だ手書き、

いや手書きかどうかは事の本質ではなく、その中身が問題であった。私は子供の頃から、中身の薄さを長い文章でお化粧することだけは自信があり、いわゆる「作文」は得意な方であった。しかし、このことが入社して大変な災厄を呼ぶようになるとは思ってもよらぬことであった。

兎に角、毎日毎日、色々なことが起きる。それを何故か、逐一、「事務連を書け」と言われる。「ここは役所か」と驚きながらも、新人の身には抗う術もなく、どんどん事務連を量産しようと試みた。しかしである、一向に上司の承認が得られない。しかも、どこが悪いとも言われずに、ただ突き返される。2度、3度と修正して提出しても、また突き返される。だんだん迷路に入ってどこが悪いのか自分では全く理解できない。

ならばと、書庫に行って、諸先輩の事務連を穴のあくほど見てみた。そこにはパターンがあることに気付いた。そこで、今度は模写の如く、パターン化した事務連を作ることにした。そうしたら、幸いなことに上司も承認してくれるではないか。そうか、形式だけの問題だったのかと思った。これで簡単な案件は処理できるようになった。しかし、次第に複雑な案件、とりわけ背景や理由が込み入ったケースを担当するようになると、上司は私が作った事務連をじっと読んだ後、半分諦めにも似た表情で「もういいから」と言って預かってしまうようになった。変だとは思ったが、取りあえず自分の手は離れて良かったと思って翌朝に出社すると、自分の机の上に、真っ赤な字で埋まった紙があるではないか。黒字で残っているのは「掲題の件・・・伺います」の前文と、僅かな文章の破片のみ。後は上司の癖のある赤い字で埋め尽くされている。読み取ることすら難しい。かろうじて前後の脈絡から文字を推定しながら全文を書き直して提出した。

同じ悲劇は、他の先輩・上司との間でも何度となく起きた。正直悔しかった。「小学生の書道教室でもあるまいし、なんでここまで添削されるのか？」との思いが強く、恐らくは当時の諸先輩には大変申し訳ないが、ふて腐れた態度もとったのだと思う。何度か故郷の東北に帰ろうと真剣に悩んだこともあった。しかし、このままでは余りに情けないぞと思いつつ、独身寮（桜泉寮というのが箕面にあった）の部屋にその真っ赤な事務連を持ち帰るようになった。会社に置いておくのも恥ずかしいというのが理由だったように思う。でも悔しくて眠れない。ある夜をきっかけに、壁にそれらの事務連を貼って、ぶつぶつ言いながら読み返すようになった。誰かが見たら、呪いの護摩なのか、壁に五寸釘なのか、怪談ものだったと思う。しかし、奇妙なことに、毎夜毎夜、飽かずにじっと見つめていると、自分が書いた原文と先輩・上司が書いた文章との違いが見えてくるようになった。なるほど、先輩・上司が書いた文章は、筋立てが論理的である、書かれている事実と判断理由に全く齟齬がない、万人が読んでも誤解されることがない、そして何より説得力がある。眼を見開かされる思いだった。この「壁問答」は翌年春まで続いた記憶がある。

技術の壁をブレイクスルーすることに日々挑戦されている技術者・研究者の皆さんに、かようなエピソードでは参考にもなるまいとは思う。しかし、私にとっては、今も様々な出来事が起きる中で、自分の考えや判断をもう一度見つめ直してみることを、相手に分かり易く考えや思いを伝えるかがいかに大切であるかということ、そして何よりも、直面した壁を自ら乗り越えていくところにこそ成長があるということ、正に「体験した日々であったと懐かしく思うのである。

樹幹害虫防除剤 ロビンフッド®の開発

住友化学株式会社

健康・農業関連事業研究所

佐藤 隆 士

アグロ事業部

佐藤 直 樹

Development of New Insecticide “Robinhood”

Sumitomo Chemical Co., Ltd.

Health & Crop Sciences Research Laboratory

Takashi SATO

AgroSolutions Division-Japan

Naoki SATO

“Robinhood” is a novel insecticide developed to control the wood boring insects which inhabit tree trunks and branches, by spray-injection of the pesticide from the entrance of the pest tunnel to beat them directly. This product contains fenpropathrin, a broad spectrum insecticide, 0.02% as an active ingredient and it has a compact product form so that it can be sprayed easily on the damage points situated at complex structures of living trees.

“Robinhood” was launched in June 2016 and it has shown good efficacy for a wide range of wood boring insects, including serious pests such as *Cossus insularis* and *Anoplophora chinensis malasiaca* in domestic orchards.

The developmental history and insecticidal properties of “Robinhood” are described in this report.

はじめに

除虫菊の殺虫成分ピレトリン (pyrethrins) をリードとし、構造展開されてきた合成ピレスロイド剤は、殺虫スペクトラムが広くかつ速効性に優れる薬剤として農業分野・防疫薬分野で長年にわたり害虫防除に活用されている。住友化学株式会社は国内農業用として fenvalerate (混合剤としてベジホン®乳剤・ハクサップ®水和剤等)、permethrin (アディオオン®乳剤・水和剤・フロアブル剤)、cypermethrin (アグロスリン®乳剤・水和剤)、fenpropathrin (ロディー®乳剤・水和剤) の各剤を開発・農薬登録を取得し、農作物の安定生産に貢献している。fenpropathrinは、一般的な農業害虫に加えダニ類の成虫に対して殺虫効果を示すユニークな性質を持つ当社独自開発の合成ピレスロイド剤であり¹⁾、カンキツなど果樹類のダニ類、チョウ目害虫、カメムシ目害虫を主な防除対象に国内のみならず海外においても広く使用されている。

ロビンフッド® (S-1675エアゾール) は、fenpropathrin 0.02%を有効成分とするエアゾール剤であり、ノズルを樹幹害虫の穿入孔に直接挿入して噴霧し、樹内部の害虫に直接薬液を曝露させ防除するというコンセプトの

元に開発された製品であり、リンゴおよびナシを対象に2016年3月2日に農薬登録された (Fig. 1)。本剤は、多岐にわたる樹幹害虫に対して簡便かつ効率的な処理で高い防除効果を示す特長を備えており、果樹の安定生産に大きく貢献できるものと期待している。

本稿ではロビンフッド®の開発経緯、実用効果、使用上の注意点などについて紹介する。



Fig. 1 “Robinhood”

開発の経緯

1. 国内農業分野の合成ピレスロイド剤の現状

国内農業分野では、抵抗性害虫の出現、天敵・訪花昆虫などの有用生物に影響の低い「選択性殺虫剤」への指向性の高まりにより、1990年代以降合成ピレスロイド剤の使用量は減少傾向にある。しかし、リンゴやナシなどの果実を加害するシンクイムシ類防除など他系統殺虫剤では十分な防除効果が得られない場面もあり、合成ピレスロイド剤が持つノックダウン効果、即効性、残効性などの優れた特性を活かした新たな適用場面を見出すことで既存製品の拡販や販売維持、新製品を開拓できる可能性が残されていた。

2. 樹幹害虫の種類とその被害

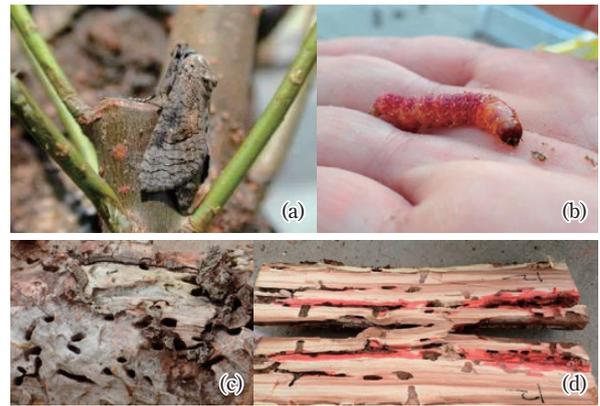
樹幹害虫とは、ボクトウガ科やコウモリガ科、スカシバガ科、メイガ科などのチョウ目やカミキリムシ科、タマムシ科、クイムシ科、ナガクイムシ科、ゾウムシ科などのコウチュウ目、キバチ科などのハチ目などを中心とした樹木の内部を摂食加害する害虫種の総称であり、その多くが森林昆虫に含まれる²⁾。果樹類³⁾以外でも、街路樹・庭木などに対して被害を与えることが知られている^{4), 5)}。

これら樹幹害虫の成虫は、果樹などに飛来して産卵し、孵化した幼虫が樹の内部に潜り込んで幹部・枝などの維管束形成層を摂食する。この穿孔や摂食により、樹木内部に大きな空洞が生じ、樹勢の低下や強風等による幹折れ・枝折れの発生、加害部への病原菌の侵入・発病による2次的被害の発生、さらに維管束からの水分供給が断たれることで樹木自体が枯死するなど、様々な被害を樹木に与える。これら様々な被害は果樹生産者に対して、農産物の減収にとどまらず、病害虫防除回数の増加、枯損木の改植、ひいては樹園地放棄など極めて大きな経済的損害を与える。

3. 国内果樹分野における樹幹害虫の発生状況と防除方法

国内の果樹分野では、ゴマダラカミキリ *Anoplophora chinensis malasiaca* やキボシカミキリ *Psacotha hilaris hilaris* などのカミキリムシ科昆虫が古くから樹幹害虫として知られていた。

最近になり、ナシ、リンゴを中心に急速に被害が拡大し、全国的に問題となっているのがヒメボクトウである。ヒメボクトウ *Cossus insularis* は、ボクトウガ科 Cossidae に属する夜行性のガであり (Fig. 2)、2005年に徳島県で報告されて以降⁶⁾、リンゴ生産地の東北6県、本州中部の長野県や群馬県、ナシ生産地の佐賀県、徳島県、山口県など北海道、沖縄を除く日本各地で甚大な被害を生じさせている⁷⁾。



Many holes and tunnels bored by the larvae were observed on the surface and inside of apple tree, *Malus domestica*.

Fig. 2 Adult (a) and larvae (b) of *Cossus insularis*

一方、樹幹害虫に対する防除法としては、成虫を対象とした樹全体もしくは特定部位への予防的な薬剤散布、成虫の産卵を抑制するための性フェロモンを利用した交信攪乱、害虫の生息部位となる樹幹表面に薬剤を施用する樹幹散布や樹幹塗布、幹部に穿たれた害虫の孔道に対して薬剤を注入する樹幹注入、浸透移行性を利用した根部への粒剤処理などの方法が挙げられるが、登録薬剤が少なく抜本的な解決法がないのが現状である。特に、ヒメボクトウに対しては、本剤開発に着手した2013年時点では、他社ジアミド系殺虫剤が樹幹散布剤として農業登録を取得したのみであり、樹木内に穿入した幼虫そのものを防除するための技術がなかった。加えて、カンキツで問題となっていたゴマダラカミキリについても6-7月の成虫の発生時期に果樹園全体に薬剤散布する予防的防除は広く普及していたものの、一旦樹内に穿入した幼虫を防除するための手段が極めて少なく、生産者や現場を指導する府県の指導者層から樹内の幼虫を防除するための手段や薬剤が渴望されていた。

樹幹害虫防除に向けて—初期検討—

1. 薬剤選抜

これまで述べてきた経緯をふまえ、樹幹害虫に対する新たな防除技術・防除薬剤への要望に応えるべく、当社殺虫剤の樹幹害虫防除への適用可能性について検討を開始した。

薬剤処理方法の検討のための第一段階として、樹幹害虫に対して殺虫効果の高い当社薬剤の選抜を行った。樹幹害虫防除に好適な薬剤としては、重要害虫種が含まれるチョウ目やコウチュウ目の双方に対して高い殺虫効果を有することが好ましいことは言うまでもない。加えて、生きた樹木に直接散布、または、樹幹内に薬液注入する可能性があるため、広い樹木種に対して薬害リスクが低いことも重要な条件となる。

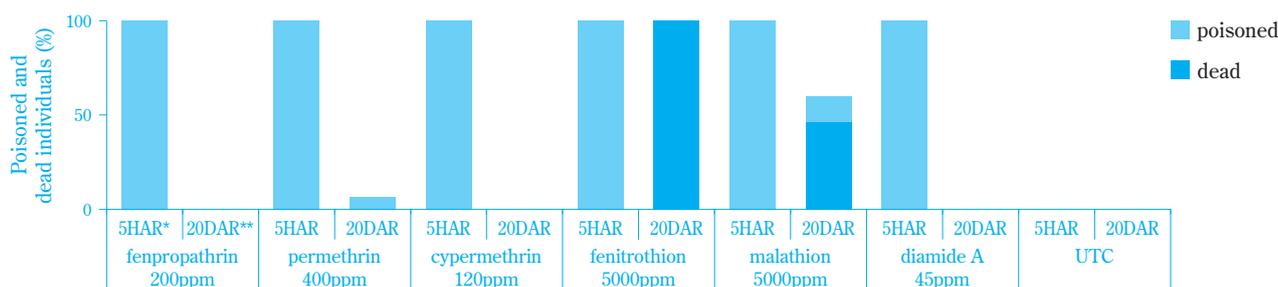
評価害虫種としては、近年果樹生産場面での被害が顕著かつ問題解決が急務とされているヒメボクトウとカミキリムシ類を選択した。ヒメボクトウについては被害が多発している東北地方より幼虫を入手し、カミキリムシ類については当社加西試験農場において冬季に比較的大量に幼虫が得られるマツノマダラカミキリ *Monochamus alternatus* を、枯損したアカマツを伐倒したのちに割材し幼虫を採集して供試した。処理法は、各害虫種ともに薬液が虫体に直接曝露されたときを想定した虫体浸漬（薬液に20秒間幼虫を直接浸漬する）と、孔道内の幼虫の生息場所付近まで薬液が到達した場合を想定した濾紙浸漬（飼育カップ内で薬液を含浸させた濾紙上に幼虫を放飼する）の2通りを試み、それぞれ処理後に幼虫を薬剤に曝露させることなく、人工飼料にて飼育し生死を調査した。

ヒメボクトウの中齢幼虫を虫体浸漬処理した結果、いずれの供試薬剤も処理直後は中毒症状を引き起こしたが、処理20日後までに殺虫効果を示したのは有機リン剤のfenitrothion（スミチオン®乳剤等）、malathion

のみで、合成ピレスロイド剤は200~400ppmの高濃度でも大半の個体が生き残った（Fig. 3）。一方、濾紙浸漬処理では、cypermethrinは処理直後より中毒症状を引き起こしたが、その殺虫効果は120ppmでも80%程度と高くなく、fenpropathrin、permethrin、fenitrothionは、cypermethrinほど速やかに中毒症状を引き起こすことはなかったものの、その後、殆どの幼虫を死亡させた（Fig. 4）。同様の傾向は、一般的に薬剤の感受性が低下する老齢幼虫でも確認され（Fig. 5）、ヒメボクトウの幼虫防除にはfenpropathrin、permethrin、fenitrothionが有望であると判断された。

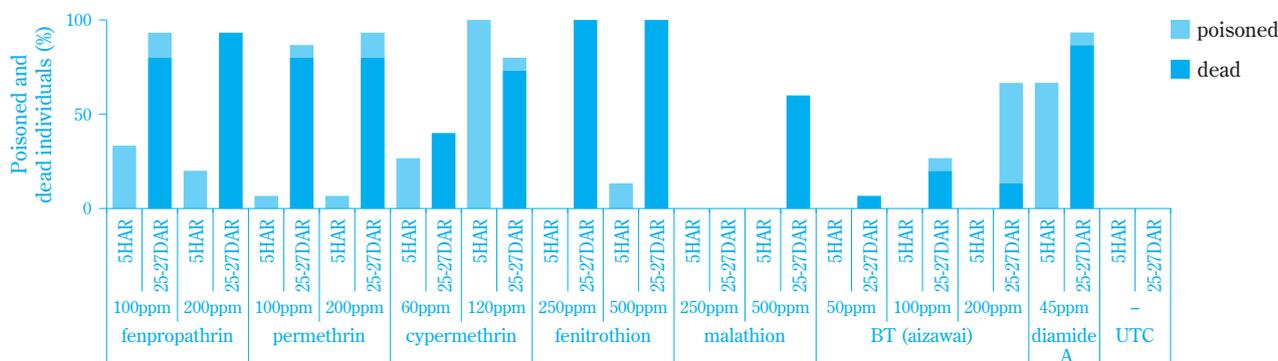
次に、マツノマダラカミキリに対しては、虫体浸漬でclothianidin（ダントツ®水溶剤等）とpermethrinがfenpropathrinに優る殺虫効果を示したが（Fig. 6）、濾紙浸漬ではfenpropathrinも200ppmで100%の殺虫効果を示しており（Fig. 7）、clothianidin、fenpropathrin、permethrinの3剤が有望視された。

それぞれの害虫種に対する殺虫効果から選抜された薬剤について、適用可能な害虫種および樹木種の広さ



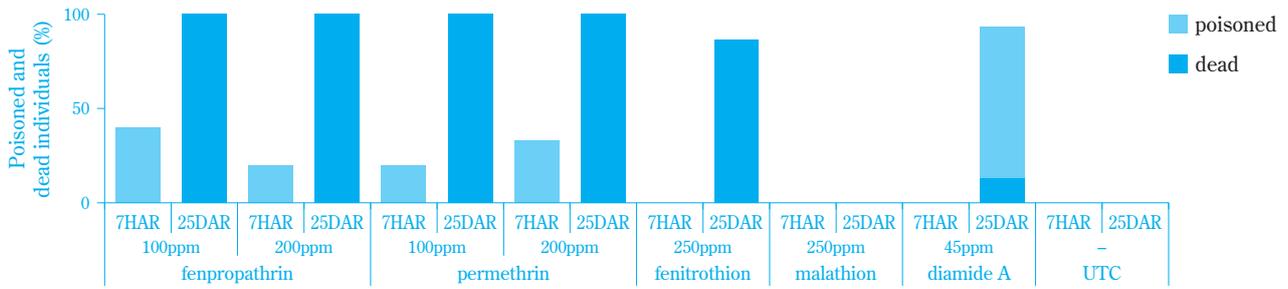
Insect : Carpenter moth (*Cossus insularis*)
 Method: Larvae were dipped into diluted solution of insecticides and mortality of larvae were recorded by rearing with artificial diet.
 *HAR: hours after release, **DAR: days after release

Fig. 3 Insecticidal activity of various insecticides on middle aged larvae of Carpenter moth, *Cossus insularis*, by dipping of larval body



Insect : Carpenter moth (*Cossus insularis*)
 Method: Mortality of larvae were recorded by rearing with filter paper of which was dipped into diluted solution of insecticides and with artificial diet.

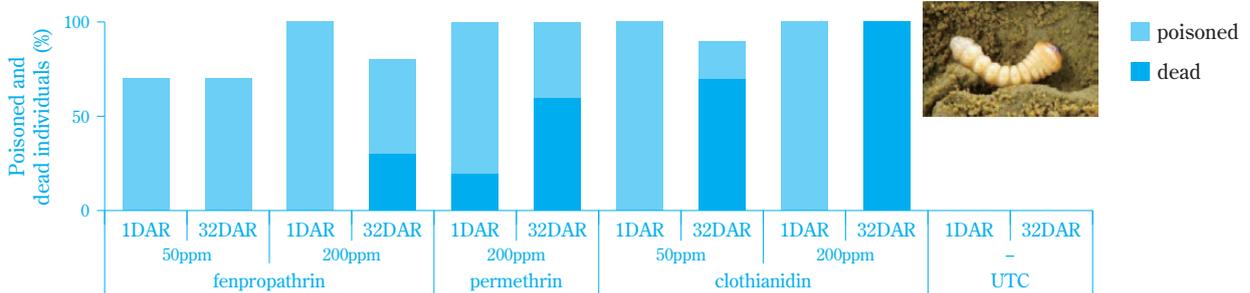
Fig. 4 Insecticidal activity of various insecticides on middle aged larvae of Carpenter moth, *Cossus insularis*, by the dipping of filter paper of rearing cage



Insect : Carpenter moth (*Cossus insularis*)

Method: Mortality of larvae were recorded by rearing with filter paper of which was dipped into diluted solution of insecticides and with artificial diet.

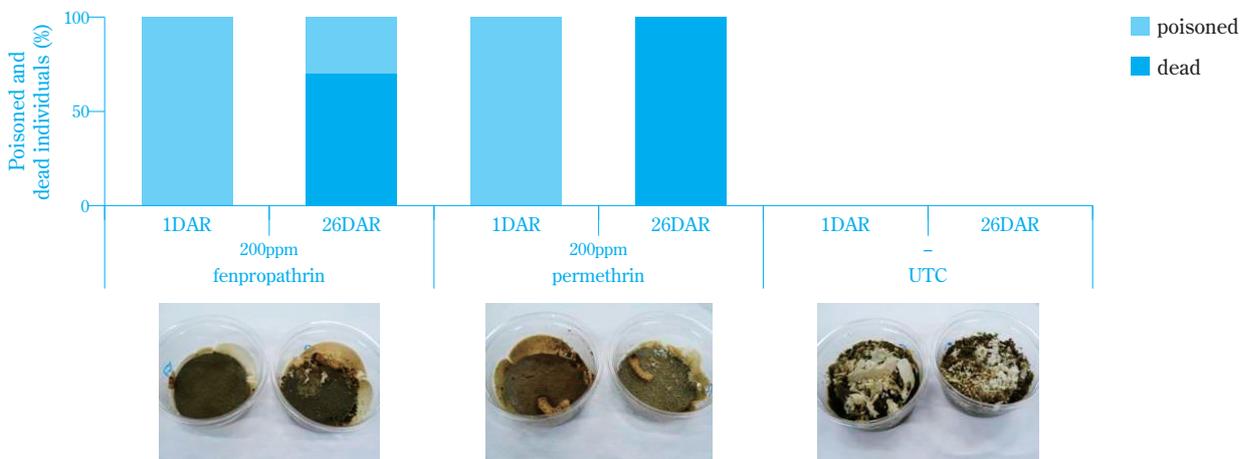
Fig. 5 Insecticidal activity of various insecticides on old aged larvae of Carpenter moth, *Cossus insularis*, by the dipping of filter paper of rearing cage



Insect : Japanese pine sawyer (*Monochamus alternatus*)

Method: Larvae were dipped into diluted solution of insecticides and mortality of larvae were recorded by rearing with artificial diet.

Fig. 6 Insecticidal activity of various insecticides on old aged larvae of *Monochamus alternatus*, by dipping of larval body



Insect : Japanese pine sawyer (*Monochamus alternatus*)

Method: Mortality of larvae were recorded by rearing with filter paper of which was dipped into diluted solution of insecticides and with artificial diet.

Photos were views of rearing cage of the larvae at 18 days after release.

Food and filter paper were broken by the larval feeding in untreated cage.

Fig. 7 Insecticidal activity of various insecticides on old aged larvae of *Monochamus alternatus*, by the dipping of filter paper of rearing cage.

を考慮すると、clothianidinはチョウ目害虫に対して一般的に殺虫効果が高くない、fenitrothionはリンゴ等に対する薬害リスクが低くない、というマイナス点を有

する。従い、実使用場面を想定した薬剤処理法の検討は、fenpropathrinおよびpermethrinの合成ピレスロイド2剤を中心に実施した。

さらに、薬剤選抜試験の結果から、防除効率を高めるための薬剤処理方法に関するヒントが得られた。代表的な樹幹害虫であるヒメボクトウ、マツノマダラカミキリの両種において虫体浸漬処理よりも濾紙浸漬処理の方が高い殺虫効果を示したが、これは樹幹害虫の幼虫が硬い木材の中を穿入するために丈夫な皮膚を持つため、経皮経路では薬剤の取り込みが少なくなるためと思われた。一方、幼虫の生息環境付近に薬剤が存在することを仮定した濾紙浸漬処理では、薬剤への曝露時間が延長することに加えて、経口経路でも薬剤が取り込まれることから、より効果的に殺虫効果が発揮されたものと推察した。このため、樹幹害虫の幼虫防除時には、幼虫の生息部位付近に薬剤を到達させるような処理方法、即ち穿入孔付近に薬剤散布する方法や樹幹注入がより効率的であると推察した。

このため、樹幹害虫防除への適用薬剤としてはpermethrin、fenpropathrinの合成ピレスロイド2剤が有望視されるが、ヒメボクトウに対してはfenpropathrinの方が低濃度でもノックダウン効果や殺虫効果が高い傾向があり、マツノマダラカミキリに対してはpermethrinの方が効果は高い。一方、fenpropathrinもマツノマダラカミキリの幼虫の摂食を完全に抑制することから(Fig. 7)、チョウ・コウチュウの主要2目に対する防除効果は十分期待できると判断される。樹幹害虫防除に向けて重要な対象となる果樹分野では、リサージェンスが生じにくいfenpropathrinの特性はpermethrinよりも好適であると判断されるため、以後、fenpropathrinでの展開を念頭に処理方法の改善を試みた。

2. 樹幹散布

樹幹害虫に対する防除方法として最初に検討したのが樹幹散布である。樹幹散布とは、樹の幹や枝などに対して直接薬液を噴霧することで樹内に穿孔している幼虫や蛹、産卵に飛来した成虫の密度を抑制する、または、

産下された次世代の食入を阻止する防除方法である。当社加西試験農場のモモ樹に重要な樹幹害虫であるスカシバガ科のコスカシバ*Synanthedon Hector*の被害が多発していたため(Fig. 8)、この幼虫に対する各種薬剤の樹幹散布による防除効果について検討した。

基礎的な効力を把握する目的で、加害する幹・枝表面に十分量の薬液を一様に散布し、樹内の幼虫に対する防除効果を調査した。結果、fenpropathrinおよびcypermethrinの2剤は本種の幼虫密度を処理前よりは抑制したものの、3割強の幼虫が生き残った(Fig. 9)。ただし、合成ピレスロイド2剤の防除効果は、比較・対照としたfenitrothionおよび他社ネオニコチノイド系殺虫剤や他社有機リン系殺虫剤よりも高い値を示した。

次に、コスカシバの幼虫が放出したフラス(木屑、糞等)により樹内での幼虫の生息箇所を特定し、生息部位の樹皮上に集中的に薬剤を散布するスポット処理による防除効果を調査した。結果、被害樹の樹幹全体に散布したときよりも防除効果は向上し、かつ合成



Fig. 8 Feeding damage of Cherry treeborer, *Synanthedon Hector* on peach tree (a, b), Larvae of the species inhabit beneath the bark (c)

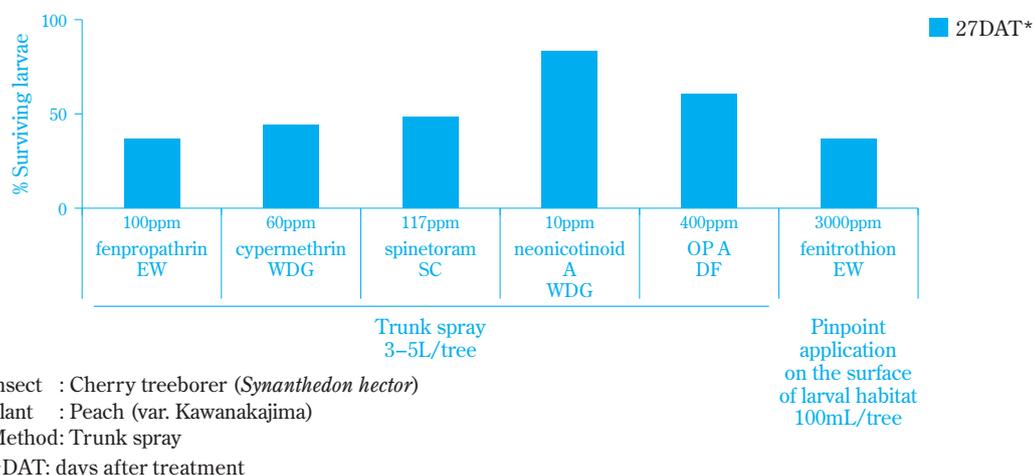


Fig. 9 Efficacy of trunk spray on Cherry treeborer, *Synanthedon Hector*, on peach tree

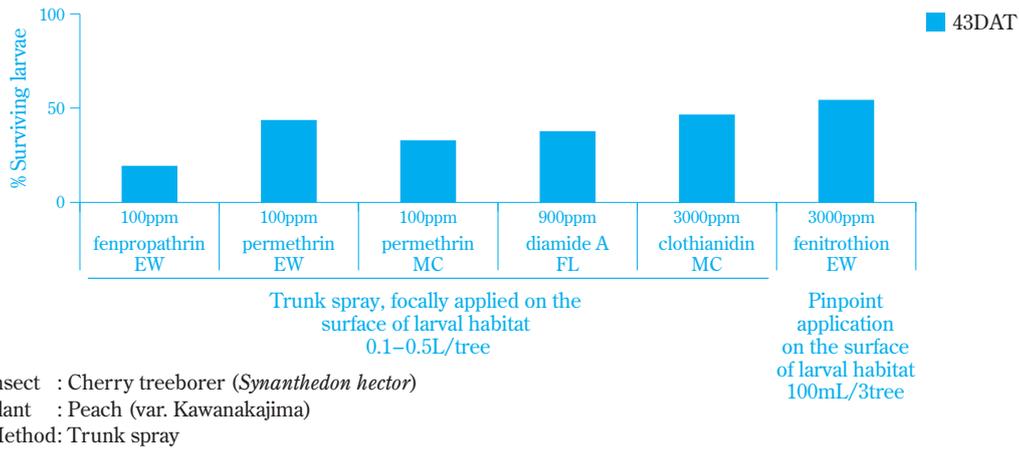


Fig. 10 Efficacy of trunk spray of focally sprayed on the larval habitat of Cherry treeborer, *Synanthedon hector*, on peach tree

ピレスロイド剤2剤の防除効果はfenitrothion・clothianidinや他社ジアミド系殺虫剤よりも高いことが示された (Fig. 10)。ただし、高殺虫活性の薬剤においても、樹皮上スポット処理では、未だ2-3割程度の幼虫が生き残ったことから、幼虫密度を一定のレベルまで抑制することは可能であるが、樹内の幼虫を完全に防除するのは困難であると判断された。このため、樹幹害虫を実用に足るレベルで防除するには、害虫種の孔道内に直接注入するなどして、幼虫の生息部位にまで薬剤を到達させる必要があると考えられた。

3. 樹幹注入

人為的に樹幹害虫を樹木に侵入させ、その孔道内に薬液を注入し、どの程度の防除効果が得られるかを検討した。

ヒメボクトウの中齢幼虫もしくは老齢幼虫をナシの剪定枝に多数穿入させた後に、シリンジにより穿孔孔の入口から0.5~1mLの薬液を注入し、枝を解体して幼虫の生死を判別した (Fig. 11)。試験には径の異なる枝 ($\phi 1\sim 1.5\text{cm}$ と $\phi 4\sim 6.5\text{cm}$) を準備し、小径枝の試

験では薬液の注入量を変えた場合の効果差についても調査した。

小径枝での検討結果では、fenpropathrinは50ppmでは殺虫効果は低かったが、100ppmでは大半の幼虫が死亡した (Fig. 12)。また、50ppm処理でのみ検討した薬液量と殺虫効果については、当然ながら薬液量が多いほど殺虫効果は向上した。本試験では、fenpropathrin濃度が100ppmでも死虫率が100%に至らなかったが、こ



(a): larvae infested branch of pear
 (b): dissected branch for evaluation

Fig. 11 Views of branch injection test

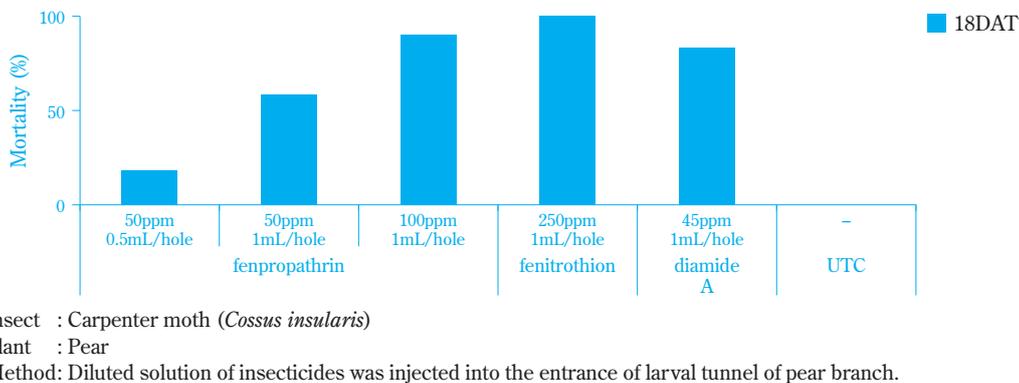
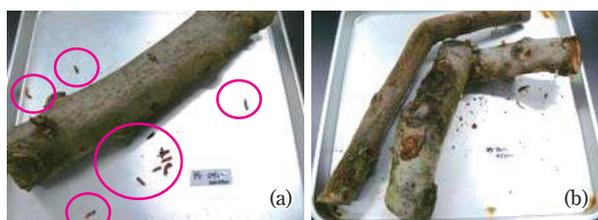
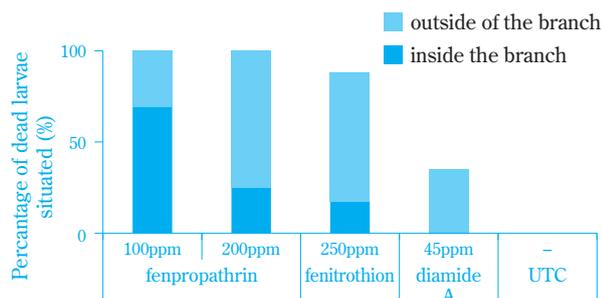


Fig. 12 Insecticidal activity of various insecticides on middle aged larvae of Carpenter moth, *Cossus insularis*, by the liquid injection into the larval tunnel of pear branch ($\phi 1\sim 1.5\text{cm}$)



(a): fenpropathrin 200ppm
(b): diamide A 45ppm

Fig. 13 Flushing out effect of synthetic pyrethroid on Carpenter moth larvae



Insect : Carpenter moth (*Cossus insularis*)
Plant : Pear
Method: One ml of diluted solution of insecticides was injected into the entrance of larval tunnel boring on pear branch.

Fig. 14 Insecticidal activity of various insecticides on old aged larvae of Carpenter moth, *Cossus insularis*, by the liquid injection into the larval tunnel of pear branch (ϕ 4–6.5cm)

れは処理時に穿入孔の見落としがあったためであり、樹幹害虫の穿入孔への薬液注入では処理時に穿入孔を見落とさないことが重要であることが判明した。

大径枝を用いた試験では穿入孔に確実に薬液を注入した。結果、fenpropathrin処理区では100、200ppmともに薬剤処理直後より幼虫の多くが苦悶症状を呈して穿入孔から脱出するフラッシングアウト効果が認められ (Fig. 13)、すべての幼虫が速やかに枝の内外で死亡した (Fig. 14)。

以上の結果より、樹幹害虫の幼虫の孔道内への薬液注入処理は少なくともヒメボクトウ防除には非常に有効であること、fenpropathrinの100、200ppmにより確実な幼虫の致死やフラッシングアウト効果が狙えることが判明し、実際の防除現場で使用者に防除実感が得られるアピール度の高い技術として仕上がるのが期待された。

エアゾール剤の開発へ

fenpropathrinの樹幹注入により樹幹害虫を防除する、というコンセプトで防除技術を仕上げることは決まったが、実際の被害現場では樹種や樹齢、樹形などが大

きく異なるため、作業効率のよい汎用性の高い技術に仕上げる必要がある。既に果樹分野で汎用されているfenpropathrinを成分とする「ロディー®乳剤」を動力噴霧器などの散布機を利用して幼虫の穿孔部に注入するといった方法も想定されたが、2014年に他社がヒメボクトウ防除に適用拡大した昆虫寄生性線虫を用いた製品は、樹内で迷路状となったヒメボクトウの孔道内に薬液を注入するため動力噴霧機などに特別なアタッチメントを装着する加圧噴霧の手法を採用していた。この方法では、実際の使用場面では生産者に特別な装置の購入・装着を強いることへの煩雑さがあった。また、既存散布機の使用では、主枝の下面など複雑な部位に発生した被害部に薬剤処理する際にノズルやホース部などが邪魔になる可能性があるなどハンドリング面での懸念が残されていた。これらの懸念に対して、コンパクトな形状のエアゾール剤であれば葉や枝が入り組んだ樹幹部の被害に対しても速やかに到達でき、枝の下面に生じた被害などに対しても適切に処理することが可能となる。こうした製剤型を含めた実際の被害現場で当該技術に求められる製品性能に関しては、ヒメボクトウやゴマダラカミキリの激発地である福島、秋田、山形、徳島、愛媛などの県の試験研究機関の指導者層が当社の試みに強い関心を寄せてくださり、強固なサポート体制のもと、適切かつ有用な情報をいただいた。これら情報は、製品開発の加速化における大きなアドバンスとなった。

結果、当社の防除技術は実際の使用現場で生産者が容易かつ効率的に防除に専念できるように噴霧ノズルを穿孔部に差し込んで噴霧するfenpropathrin 0.02%を有効成分とする480mL缶のエアゾール剤とし、ノズル形状は、①穿入孔にノズルを差し込んで樹内に薬液噴霧を行う場合と、②ノズルを収容したままケムシなどの樹上の害虫種などに対して噴射する場合の2通りの処理方法で使用可能なように2ウェイノズルを採用した (Fig. 1)。

製品製造については、エアゾール剤の開発に造詣が深い住友化学園芸株式会社の協力を仰ぎ、各種エアゾール剤の製造実績が豊富な東洋エアゾール株式会社にて薬剤の充填、加圧を行い、製品化するという製品開発の方針が決まり、2016年上市という最速の開発スケジュールで被害地からの需要に対応することが決定した (開発コード番号: S-1675エアゾール)。

実用性評価

1. 防除効果

2013年より当初から本剤の重要ターゲットに挙げていたヒメボクトウに対する実用性を各地の試験研究機関に委託評価するとともに、複数の害虫種に対して実

Table 1 Results of contract trials of “Robinhood” by trunk injection

| Crops | Target Pests | No. of trials | Degrees of the test results* | | | | Application method |
|--------|--------------------|---------------|------------------------------|------|----------|-------------|--------------------|
| | | | Excellent | Good | inferior | no efficacy | |
| Apple | Carpenter moth | 6 | 2 | 3 | 1 | 0 | trunk injection |
| Pear | Carpenter moth | 4 | 2 | 2 | 0 | 0 | trunk injection |
| Apple | Cerambycid beetles | 6 | 5 | 1 | 0 | 0 | trunk injection |
| Fig | Cerambycid beetles | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | trunk injection |
| Citrus | Cerambycid beetles | 4 | 4 | 0 | 0 | 0 | trunk injection |
| Loquat | Cerambycid beetles | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | trunk injection |
| Grape | Sesiids moth | 3 | 3 | 0 | 0 | 0 | trunk injection |
| Peach | Sesiids moth | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | trunk injection |
| Grape | Swift moth | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | trunk injection |

Results at March 10th, 2017

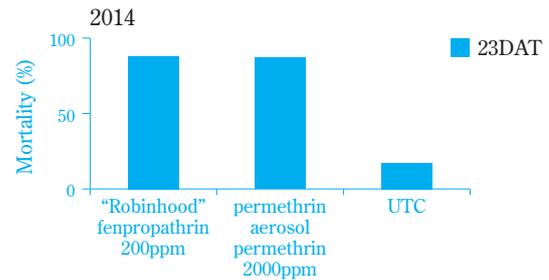
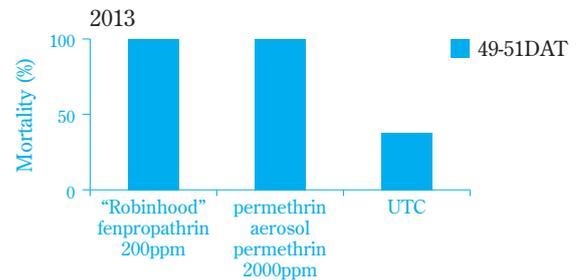
*Degrees of the results was followed on the basis of Japan Plant Protection Association.

用性評価を実施した。処理薬量（噴霧量）については、樹上の害虫種に対しては対象に向けて十分量噴霧することとし、樹内の害虫種に対しては穿入孔から樹内の幼虫の生息部位にまで十分量の薬液を到達させられるよう、「穿入孔からノズルを差し込み、入口から薬液が逆流するまで十分量噴霧する」とした。

結果、ロビンフッド®は、ヒメボクトウ他の各種樹幹害虫に対し、総じて高い防除効果を示し、高い実用性を持つことが示された（Table 1）。当社加西試験農場で実施した試験でもルリカミキリ、ゴマダラカミキリなどのカミキリムシ類やコスカシバやゴマフボクトウなど各種チョウ目害虫に対して高い防除効果を示した（Fig. 15~20）。同様にノズル収容時の通常噴射でも、各種樹木のケムシ類やゲンバイムシ類、各種花卉類へのアブラムシ類に対して概ね高い効果を示した（Table 2）。



Fig. 15 Feeding damage of larvae of *Bacchisa fortunei japonica* on apple tree (a, b), Branches which fenpropathrin was sprayed into larval tunnel were collected from the field (c) and dissected (d: Untreated, e: “Robinhood” treated)



Insect : Pear borer, *Bacchisa fortunei japonica*

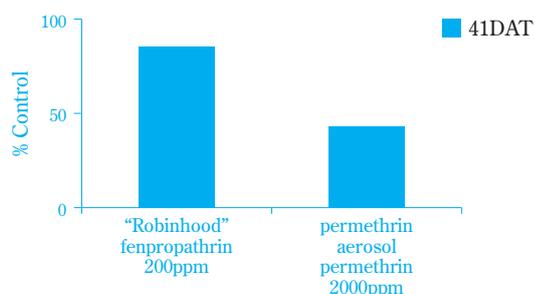
Plant : Apple

Method: Enough volume of insecticides were sprayed into the entrance of larval tunnel of *Bacchisa fortunei* inhabit on the apple trees.

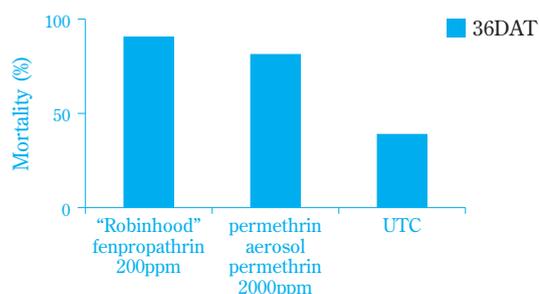
Fig. 16 Efficacy of “Robinhood” against *Bacchisa fortunei* by spray injection from the entrance of larval tunnel on the apple tree



Fig. 17 Adult of *Zeuzera multistrigata leuconota* (a) and feeding damage of the larvae on the trunk of apple tree (b)



Insect : Oriental leopard moth, *Zeuzera multistrigata leuconota*
 Plant : Apple
 Method: Enough volume of insecticides were sprayed into the entrance of larval tunnel.

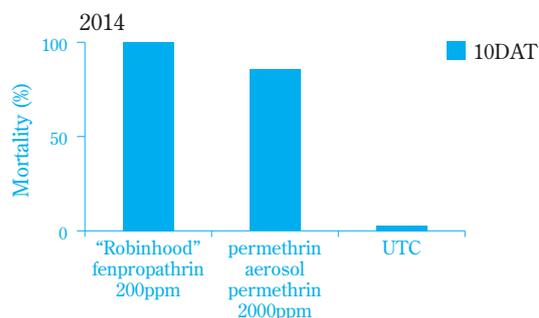


Insect : Cherry treeborer *Synanthedon hector*
 Plant : Peach
 Method: Enough volume of insecticides were sprayed into the entrance of larval tunnel.

Fig. 18 Efficacy of "Robinhood" against *Zeuzera multistrigata leuconota* and *Synanthedon hector*



Fig. 19 Adult of *Anoplophora malasiaca* (a) and feeding damage of the larvae on the trunk of citrus tree (b, c)



Insect : White-spotted longicorn beetle, *Anoplophora malasiaca*
 Plant : Citrus
 Method: Enough volume of insecticides were sprayed into the entrance of larval tunnel of white-spotted longicorn beetle which inhabit on the citrus trees.

Fig. 20 Efficacy of "Robinhood" against *Anoplophora malasiaca* by spray injection from the entrance of larval tunnel on the citrus tree

Table 2 Results of contract trials of "Robinhood" by foliar spray

| Plants | Target Pests | No. of trials | Degrees of the test results* | | | | Application method |
|------------------------|--------------|---------------|------------------------------|------|----------|-------------|--------------------|
| | | | Excellent | Good | inferior | no efficacy | |
| Cherry tree | Moth larvae | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | foliar spray |
| Sycamore | Moth larvae | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | foliar spray |
| Camellia | Moth larvae | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | foliar spray |
| Azalea | Lace bugs | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | foliar spray |
| Sycamore | Lace bugs | 3 | 3 | 0 | 0 | 0 | foliar spray |
| <i>Pieris japonica</i> | Lace bugs | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | foliar spray |
| Chrysanthemum | Aphids | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | foliar spray |
| Salvia | Aphids | 3 | 3 | 0 | 0 | 0 | foliar spray |
| Pansy | Aphids | 3 | 0 | 2 | 1 | 0 | foliar spray |

Results at March 10th, 2017

*Degrees of the results was followed on the basis of Japan Plant Protection Association.

2. 薬害

委託試験を含むすべての試験地で、樹内に薬剤を噴霧した場合には薬害は確認されなかった。

しかし、ノズルを介さず樹上部害虫や花卉害虫に対

して噴霧した時には2例のみ処理葉部に縮れや葉枯れなどが確認され、いずれも処理時に植物体に噴霧穴を近接させたことが明らかとなった。この現象は、本剤がエアゾール剤であるがゆえに植物体に近接した状態で

噴霧すると高圧で噴霧された薬液の氷結により対象作物に「冷害」が生じたものと判断され、使用時には植物体から30cm程度離れた場所から1~3秒間ずつ断続して噴霧することで冷害を回避する必要があることをラベルに明記した。

効力・薬害評価の結果は良好であったものの、委託試験にて実施したヒメボクトウの評価のうちのごく一部では防除効果が十分に得られなかった事例が認められたことから、登録取得・上市までに詳細が不明である樹内での薬剤動態などを明らかにし、使用時に生じる諸問題や不効事例を生じさせる要因を抽出・整理し、それぞれに対する解決法を見出す必要があった。

処理時に発生する問題点と対処法

1. 幼虫の発育ステージと効力

樹幹害虫には、たとえ同一シーズンに産卵された卵であったとしても摂食する樹木の状態や産下された時期などに従い、個体ごとに大きな発育差が生じることが知られている⁸⁾⁻¹⁰⁾。このため、同一被害木の中にも

発育ステージの異なる幼虫が混在している場合が多く、こうした処理木内の幼虫の発育ステージにより防除効果に差が生じる可能性がある。ロビンフッド®をヒメボクトウとマツノマダラカミキリの若齢幼虫と中~老齢幼虫の虫体に直接噴霧し、その後の死亡率を比較した結果、いずれの幼虫に対しても高い殺虫効果を示し (Fig. 21, 22)、樹内の幼虫の発育ステージに拘わらず高い防除効果が期待できると判断された。

2. 樹内への薬液の到達性

樹幹害虫の中にはヒメボクトウのように幼虫の孔道が複雑に入り組んでいるものがあり、こうした種では各孔道の長さには大きな差がある上に、内部に幼虫が排出したフラスや脱皮殻などが蓄積している場合も多い。こうした多様な条件の孔道内に、樹皮表面に開いた穿入孔から薬液噴霧するのみで、幼虫やその生息部位まで薬剤が到達するか否かが、その後の防除効果に大きな影響をおよぼすことが容易に想像できる。

このため、薬液を赤色に着色した製剤を試製し、ヒメボクトウの被害地である秋田県と福島県、ゴマダラカミキリの被害地である愛媛県で実際の被害樹（大径

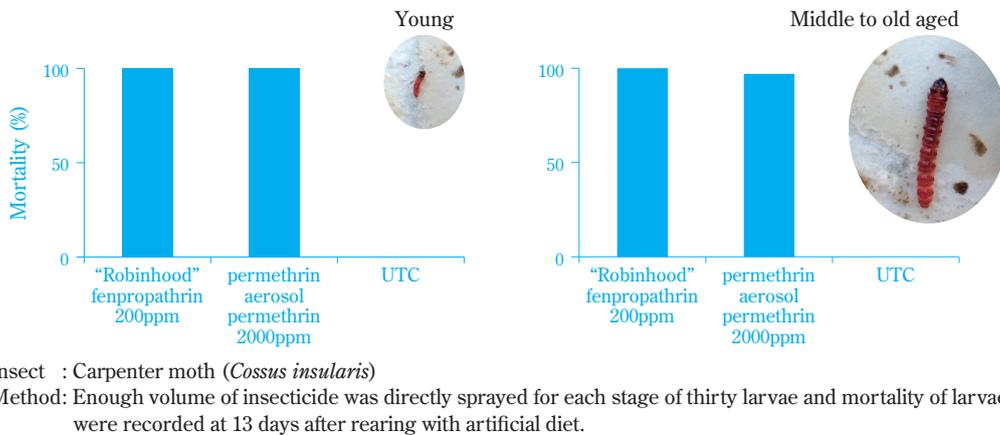


Fig. 21 Efficacy of “Robinhood” on different developmental stages of larvae of Carpenter moth

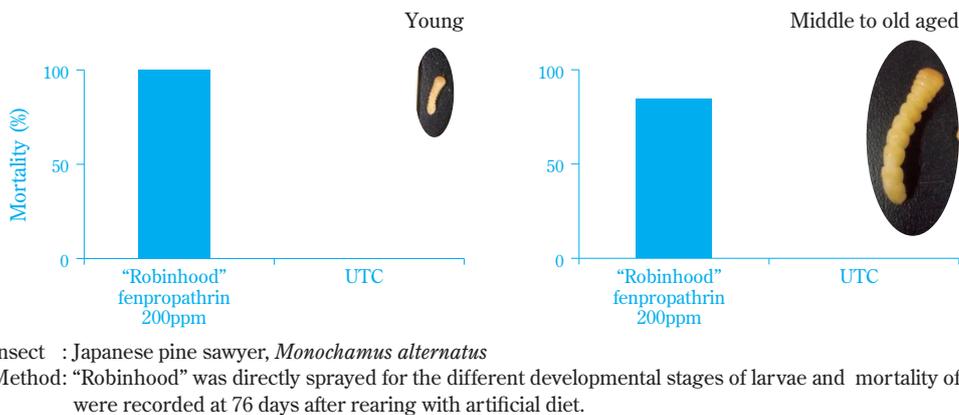


Fig. 22 Efficacy of “Robinhood” on different developmental stages of larvae of Japanese pine sawyer, *Monochamus alternatus*



Enough volume of liquid solution of red-colored products were sprayed in all entrance of the larval tunnel of Carpenter moth, which infested inside apple trees before (a) and after stripping the bark (b), respectively. Treated trees were split by the log cutter (c) and the red-stained portion were investigated focusing on whether the liquid could reach to the larvae or not (d).

Fig. 23 Evaluation method of achievement of “Robinhood” to the larval tunnel of Carpenter moth, *Cossus insularis*

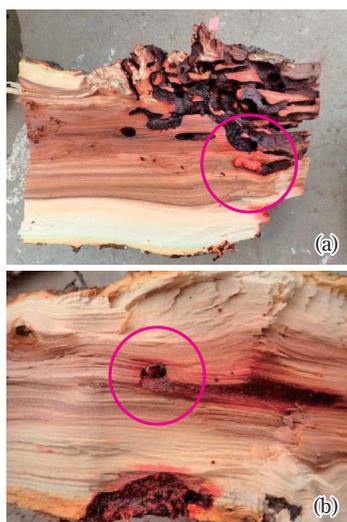
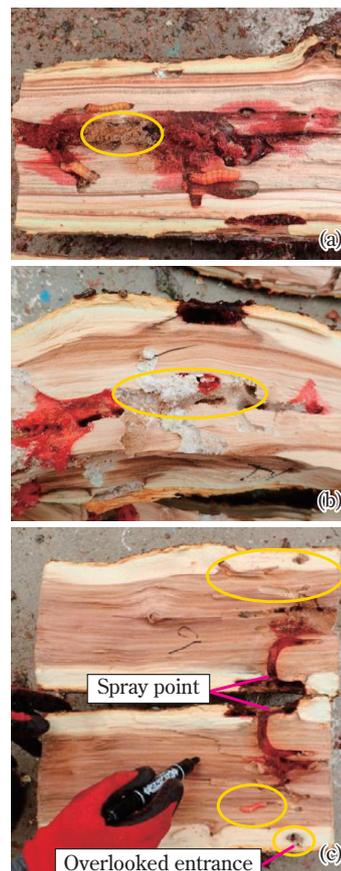


Fig. 24 Achievement of the solution of “Robinhood” to the tunnel of larvae of Carpenter moth which infested in the apple trees (a, b)

木)に薬剤処理を行い、各樹を伐採後に解体して孔道内での染色部位の到達程度を確認した (Fig. 23)。いずれの試験地においても、薬剤処理前に加害部の樹皮剥ぎを行わずに目視で確認できた穿入孔すべてに薬剤を処理した場合と、樹皮剥ぎを行い穿入孔を見やすくした後に薬剤処理した場合の2通りの方法の処理を試みた (Fig. 23)。

リンゴのヒメボクトウでの試験では、穿入孔すべてに十分量の薬剤を噴霧した場合には、薬剤が高確率で幼虫の生息域にまで到達し、直径20cmほどの樹で



(a): Firm frass mass was stacked inside the tunnel.
(b): Wood decaying fungi was infested inside the tunnel.
(c): Entrance of tunnel was overlooked at application.

Fig. 25 Cases of unachievement of solution of “Robinhood” to the larvae of Carpenter moth in apple trees

あっても多岐に分岐した孔道や材の中心部にまで薬剤がまんべんなく行き渡っていることが確認された (Fig. 24)。

一方、ごく一部ではあるが、薬剤が幼虫の生息部位まで達していない事例が数例確認され、これらの要因は、次の通りであった (Fig. 25)。

- (a) 幼虫が排出したフラスが孔道内に固く詰まっていたことにより薬剤処理部から先の孔道にまで薬剤が到達しなかった場合。
- (b) 孔道内に木材腐朽菌などの菌糸が繁茂したことにより薬剤処理部から先の孔道にまで薬剤が到達しなかった場合。
- (c) 穿入孔の見落としによる薬剤未処理部の発生。

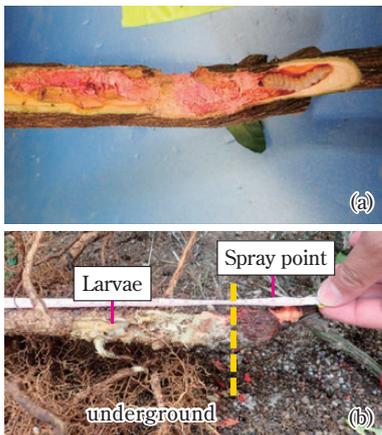
これらのうちの(a)、(b)については樹幹害虫の生態上不可避であるため、抜本的な解決法はなく、幼虫の発育が進み孔道内に大量のフラスが放出される、または、菌糸が蔓延する前の害虫発生初期に防除を行うよう普及を行うことが重要である。(c)については処理前に加害部周辺のみではなく、範囲を広げて樹皮を剥いだ場合には穿入孔の見落としが大幅に軽減できることから、

本剤を処理するには事前に加害部の樹皮剥ぎを行うことが重要である。

カンキツのゴマダラカミキリについても処理前の樹皮剥ぎにより薬剤の幼虫・幼虫生息部位までの到達性が増すことが示され、同分野での使用時にも樹皮剥ぎは重要となる。ただし、ゴマダラカミキリの場合には本種の生態に伴う特有の事例がある。本種はカンキツの莖葉部や幹に産卵を行う場合と地際部に産卵する場合があります (Fig. 19, 26)、地上部に加害した場合には高確率で幼虫に薬液が到達するものの、地際部被害に対しては幼虫が根部にまで食入することもあり、幼虫への薬液到達は期待できない (Fig. 27)。



Fig. 26 Feeding damage of the larvae of White-spotted longicorn beetle, *Anoplophora malasiaca* on basal part of citrus tree



Liquid solution can achieve to the larvae inhabited at stem and/or trunk of the tree (a), but it cannot reach to the larvae which dug to the root from basal part of the tree.

Fig. 27 Achievement of solution of “Robinhood” to the larvae of White-spotted longicorn beetle, *Anoplophora malasiaca*

3. ノズル詰まり

樹木内に穿入した幼虫は、穿入時や孔道の拡張時に出たフラスを樹の外に排出する。このフラスの放出が

樹幹害虫の加害部位や穿入孔を特定する際の大きな目印となるが、本剤を処理する際、ノズルが詰まる原因となることが明らかとなった。ノズル詰まりは、事前に行える限りフラスを除去することや、噴霧を行いつつながら穿入孔にノズルを差し込むなどにより軽減できることから、その旨を製品容器に明記した。

推奨処理時期

ヒメボクトウは、成虫が6月～7月にかけて羽化ピークを迎え、樹皮の割れ目などに産下された卵塊から孵化した幼虫が樹内に食入する^{6),7)}。幼虫が樹内深くに潜り込む前に早期防除することが好ましいが、上述したように本剤は樹内深くの穿孔部にも高確率で到達できるうえに幼虫の発育ステージを選ばず効果を発揮することが示されている。このため、ヒメボクトウに対しては農繁期～農閑期を選ばずに、適宜防除することで密度抑制が可能と考えられる。

ゴマダラカミキリは、成虫が5月下旬～7月上中旬にかけて羽化ピークを迎え、各種樹木に飛来し、卵巣を発達させるために葉部や新梢の樹皮を摂食（後食）、交尾を経て、雌は樹皮下に産卵する。幼虫は孵化後に樹内を穿孔しながら盛んに形成層を摂食し、冬季近くなると根部付近にまで到達する個体も存在する。このため、本種の幼虫に対する防除効果を高めるには、幼虫が樹内の深い場所や根部に到達する前に防除することが重要であり、幼虫のフラスを盛夏～初秋までに早期発見し、防除することを推奨している。

登録内容

ロビンフッド®の登録内容（2017年3月10日現在）は、Table 3の通りである。本剤は、各県の指導者層から強い要望を受けていたリングゴヤナシのヒメボクトウ防除分野で早急に使用できるように最速のスケジュールで開発を進めたため、現時点での適用作物および害虫登録内容は少ないが、多岐にわたる樹種を加害する多くのカミキリムシ類の被害に使用できるように、果樹類での検討を進めており、またその他の樹幹害虫に対する新たな検討も試みている。さらに将来的には造林木から庭園木、街路樹に至るまでカミキリムシ類が発生する樹木類のすべてに対して本剤が使用可能となることも目指している。

本剤は収穫前日まで使用可能と使用時期の幅が極めて広いため、繁忙な農作業のスケジュールの合間を縫って樹幹害虫を防除できるという利点があり、各地域で生産者の作業スケジュールに応じた使用適期を推奨できるよう鋭意検討を継続する。

Table 3 Domestic registration of “Robinhood”

| Crops | Target Pests | PHI* | Maximum number of applications per year | Application method |
|-------|--------------------------------------|-------|---|-----------------------|
| Apple | Carpenter moth Cerambycid beetles | 1 day | 2 | trunk injection spray |
| Pear | Carpenter moth | 1 day | 2 | trunk injection spray |
| Trees | Moth larvae | — | 6 | Foliar spray |

Registration situation at March 10th, 2017

*Pre-harvesting interval

おわりに

ロビンフッド®は、近年被害が深刻な樹幹害虫の樹内の幼虫に対して直接、薬剤を到達させて防除することをコンセプトとするエアゾール剤である。本剤は、製品形状がコンパクトな上に噴霧ノズルを穿孔部に挿し込んで噴霧するのみという取扱い面での簡便さを持つため、繁茂した枝葉内や枝の分岐部や下部といった複雑な加害部位に対しても容易に使用でき、被害発生後は防除が困難であった樹内の樹幹害虫を効率的に狙い打ち、防除することができる。このため、現場で実際に活用される使用者の方々には、その生産基盤である樹木自体を自身の手で守り、長期にわたって栽培できるようになるという利点がある。「大事な樹を樹の内側からも守る」という新たな防除概念が広く生産者の方々に浸透し、生産物の安定的生産に貢献できることを期待している。

今後、更なる適用拡大と適用場面の探索を進め、生産地域の防除事情に合った本剤の活用法を見出し、提案していきたい。

謝辞

ロビンフッド®の開発にあたり、実用性評価試験を実施いただいた一般社団法人日本植物防疫協会、各県の植物防疫協会や試験研究機関の方々に深く感謝いたします。特に樹幹害虫の激発地域である福島、秋田、山形、徳島、愛媛の各県の試験研究機関の方々には、検討初期から貴重なご助言をいただき、各種試験のアレ

ンジや実施、さらに登録までのご支援等、本剤の開発に深く関わって下さり温かい励ましをいただきました。さらに本稿を執筆するに際し、ヒメボクトウ成虫の写真を提供していただいた千葉大学の中牟田 潔教授には、幾度とはなく温かい励ましをいただきました。これらの皆様方に、深く感謝の意を表します。

引用文献

- 1) 笠松 紀美, 松尾 憲忠, 津田 重典, 奥野 泰由, 住友化学, **1989-II**, 19 (1989).
- 2) 小林 富士雄, 竹谷 昭彦 (編著), “森林昆虫 総論 各論”, 普賢堂 (1994).
- 3) 坂神 泰輔, 工藤 晟 (編著), “ひと目でわかる果樹の病害虫 第3巻”, 社団法人日本植物防疫協会 (1995).
- 4) 上住 泰, 鍵渡 徳次, “原色 庭木・盆栽の病害虫診断”, 社団法人農山漁村文化協会 (1972).
- 5) 奥野 孝夫, 田中 寛, 木村 裕, “原色 樹木病害虫図鑑”, 保育社 (1977).
- 6) 中西 友章, 日本応用動物昆虫学会誌, **49** (1), 23 (2005).
- 7) 中牟田 潔, 伊藤 慎一, 佐々木 正剛, 中西 友章, 南島 誠, 植物防疫, **54** (12), 779 (2010).
- 8) I. Adachi, *Appl. Entomol. Zool.*, **29** (4), 485 (1994).
- 9) T. Nakanishi, T. Kaneda and K. Nakamuta, *Appl. Entomol. Zool.*, **52** (1), 29 (2017).
- 10) 富樫 一巳, 日本応用動物昆虫学会誌, **33** (1), 1 (1989).

PROFILE



佐藤 隆士
Takashi SATO

住友化学株式会社
健康・農業関連事業研究所
主席研究員
博士 (学術)



佐藤 直樹
Naoki SATO

住友化学株式会社
アグロ事業部
主任部員

極低消費電力集積回路のための 次世代デバイス向け エピタキシャル基板の研究開発

住友化学株式会社

情報電子化学品研究所

横山 正史

山本 武継

Trends in Development of Epitaxial Wafers for Emerging Devices Applied to Ultra-low Power-Consumption Integrated Circuits

Sumitomo Chemical Co., Ltd.

IT-related Chemicals Research Laboratory

Masafumi YOKOYAMA

Taketsugu YAMAMOTO

With recent dramatic increases in information, power consumption is an important issue for data processes, and ultra-low power switching devices are required. The emerging transistors with lower power consumption operation are required instead of the conventional ones. Tunnel field-effect transistors have attracted much attention as ultra-low power operating devices. We report the recent progress in tunnel field-effect transistors based on the III-V compound semiconductors and in the III-V epitaxial wafers for next generation devices.

極低消費電力デバイスとしての トンネルトランジスタ

データストレージセンターに象徴されるように、近年の情報システムは高速化・大容量化しており、それに伴い情報処理にかかる消費電力も増加傾向にある。また、モバイル機器の爆発的な普及に加え、全てのモノがインターネットにつながるInternet of Things (IoT) 時代を迎え、情報処理における低消費電力化の重要性がますます高まっている。このような背景から、低消費電力で動作可能なプロセッサが世の中から求められている。

従来、プロセッサには、シリコン (Si) をチャンネル材料とする金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor: MOSFET) が用いられてきた。トランジスタの消費電力は、駆動電圧 (V_{DD}) の2乗に比例するため、駆動電圧の低減は低消費電力化に有効である。Si MOSFETにおける駆動電圧の低減には、デバイスの微細化が進められている¹⁾。また、Siに代わる高い電子 (あるいは正孔) 移動度のチャンネル材料を利用することも検討されている²⁾⁻⁴⁾。

これまで、デバイスの微細化により、デバイスの処理速度の高速化と低消費電力化が実現されてきた。現在、10 nm程度まで微細化が進んできており、微細化の限界に近づきつつあり、2024年までに2次元構造での微細化は終焉を迎えることが予想されている¹⁾。

一方、Siに代わるチャンネル材料として、III-V族化合物半導体やゲルマニウム (Ge) といった高移動度材料を利用することが検討されている²⁾⁻⁴⁾。しかし、MOSFETの場合、電流電圧特性の立ち上がりの急峻さの逆数であるS値 (S factor) は、動作原理上、室温において60 mV/decadeが限界となるため、高移動度材料をチャンネルに利用しても、駆動電圧は0.5 V程度が限界となる。更なる低消費電力化には、従来のMOSFETとは異なる動作原理により、60 mV/decadeよりも小さなS値を実現でき、より小さな駆動電圧で動作可能となるトランジスタが望まれている。

そこで、新しい極低消費電力デバイスとして、トンネルトランジスタ (Tunnel Field-Effect Transistor: TFET) に注目が集まっている⁵⁾⁻⁹⁾。住友化学株式会社でも、平成25年度から、独立行政法人科学技術振興機構 (現在は、国立研究開発法人) の戦略的創造研究推進事業「素材・デバイス・システム融合による革新的ナノエレクトロニクスの創成 極低消費電力集積回路のためのトンネルMOSFETテクノロジーの構築」(以下、TFET-PJと記載する) に参画し、TFETを開発している。本稿では、当該PJの成果とともに、関連技術動向について紹介する。

1. TFETによる低消費電力化

TFETは、ソースとチャンネルの間において、トンネル電流を電界効果により制御することで、60 mV/decade以下のS値が実現可能なため、0.5 V以下の駆動

電圧が達成可能である。これにより、従来のMOSFETよりも急峻な立ち上がり特性を有する電流電圧特性が実現可能な画期的な新規デバイスとして、その開発が期待されている^{1),5)-9)}。Fig. 1は、TFETとMOSFETの電流電圧特性 (I - V 特性) の概念図を示す。S値が小さくなる、すなわち傾きが急峻になると、同じオン電流 (I_{ON}) を得るための駆動電圧が低くなるため、低消費電力化が可能になる。さらに、傾きが急峻になると、オフ電流 (I_{OFF}) も低下傾向にあり、待機時の消費電力を抑制することも期待できる。

Fig. 2は、n型TFETの構造と動作原理の概念図を示す。ここで、 E_G はバンドギャップ、 E_c は伝導帯の底のエネルギー、 E_v は価電子帯の頂上のエネルギーである。TFETは、電子のバンド間トンネル (Band-To-Band Tunneling: BTBT) を利用する。ソース領域には、 p^+ 領域を、ドレイン領域には、 n^+ 領域をそれぞれ形成する。ゲート電界効果により、ソースからチャネルにBTBTによりトンネルした電子によるトンネル電流を制御する。

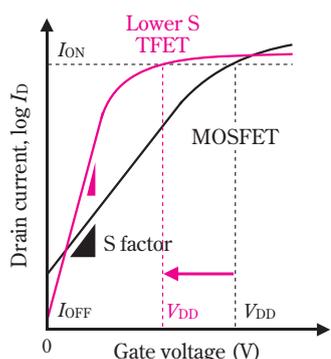


Fig. 1 Schematic illustration of I - V characteristics of a TFET and a MOSFET. A TFET can achieve lower S factor than a MOSFET.

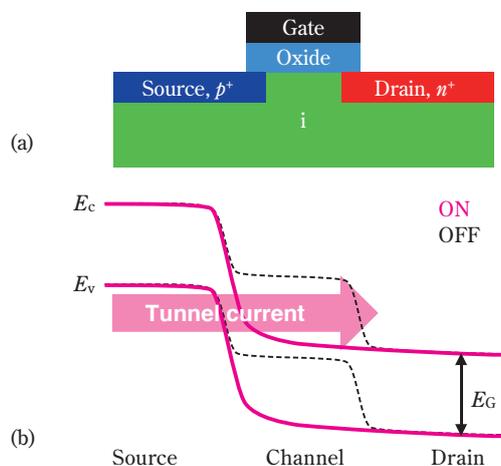


Fig. 2 Schematic illustration of (a) structure and (b) principle of operation of an n-type TFET

OFF状態では、エネルギー障壁が高く、トンネル電流が抑制されている。ON状態では、ゲート電界効果によって、エネルギー障壁を低くすることにより、トンネル電流が流れる。これにより、従来のMOSFETよりも急峻な電流の立ち上がり特性を有する電流電圧特性を実現することができる。

一方で、トンネル抵抗の影響により、TFETの駆動電流が制限されるという課題がある。高い駆動電流を実現するため、トンネル抵抗がSiより小さい狭バンドギャップの材料をTFETのチャネル材料に利用することが検討されている⁵⁾⁻¹³⁾。Fig. 3は、代表的な半導体材料におけるトンネル電流密度 (J) を、式(1)を用いて計算した結果を示している。最大電界強度は十分高いとし、計算に用いた各半導体におけるバンドギャップと有効質量 (m_r^*) をTable 1に示す¹⁴⁾。ここで、 m_r^* は、電子の有効質量 (m_e^*) と正孔の有効質量 (m_h^*) を用いて、 $m_r^* = m_e^* m_h^* / (m_e^* + m_h^*)$ として求めた。 V_R は逆方向電圧、 ξ は電界強度、 q は電気素量、 m_0 は電子の質量、 $\hbar = h/2\pi$ 、 h はプランク定数である。Fig. 3で示される通り、InSb、InAs、 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ など、狭バンドギャップのIII-V族化合物

$$J = \frac{\sqrt{2m_r^*} q^3 \xi V_R}{8\pi^2 \hbar^2 E_G^{1/2}} \exp\left(-\frac{4\sqrt{2m_r^*} E_G^{3/2}}{3q\xi\hbar}\right) \quad (1)$$

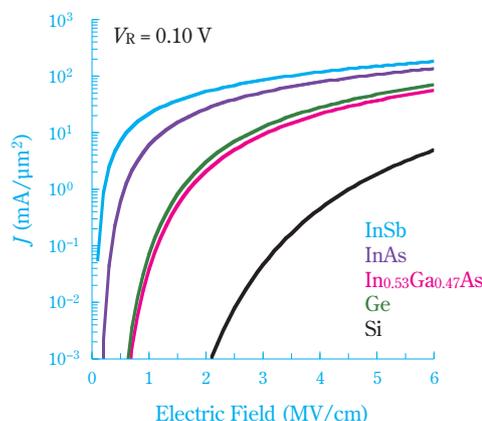


Fig. 3 Calculated tunneling current density versus electric field properties of semiconductors at a V_R of 0.10 V at 300 K

Table 1 Material physical parameters of energy band gap and tunneling effective mass of semiconductors

| Semiconductors | E_G (eV) | m_r^* |
|---|------------|-------------|
| InSb | 0.17 | 0.007 m_0 |
| InAs | 0.35 | 0.012 m_0 |
| $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ | 0.74 | 0.023 m_0 |
| Ge | 0.66 | 0.028 m_0 |
| Si | 1.12 | 0.087 m_0 |

半導体をチャネル材料に利用することで、大きな駆動電流の実現が期待される。

III-V族化合物半導体をチャネル材料として利用した TFET

1. InGaAs TFETの開発

良好なS値と高いオン電流を同時に実現する高性能なTFETの実現に向けて、狭バンドギャップを有するIII-V族化合物半導体がチャネル材料として検討されている^{8),9),11)-13)}。III-V族化合物半導体の中でも、InGaAsは、In組成が0.53のとき室温において、0.74 eV程度のバンドギャップを有する狭バンドギャップの材料である。また、In組成が0.53のInGaAsは、InPと格子整合するため、InP (100) 基板上において良質な結晶品質でのエピタキシャル成長が可能である。Fig. 4は、InP (100) 基板上に作製したInGaAs TFETの構造の概念図である。TFETは、まず、有機金属化学気相堆積 (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition: MOCVD) 法を用いてInP基板上にInGaAs層を成長してエピタキシャル基板を得て、続いて、ソース領域、ゲート酸化膜、ゲート電極、およびドレイン領域を形成して作製した。ここで、エピタキシャル基板の作製には、商用生産炉を用いている。

一般に、TFETのソース領域はドーピングにより形成され、ソース領域の高いドーピング濃度とソース端における急峻なドーピングプロファイルが、小さいS値を実現する上で重要となる。TFET-PJでは、チャネル層がInGaAsのTFETにおいて、p型のドーパントである亜鉛 (Zn) をスピノングラス (Spin-On-Glass: SOG) 法によりドーピングして、ソース領域を形成した^{11),12)}。熱処理条件を最適化することで、 2×10^{19} 原子/cm³の高いZnのドーピング濃度を達成した。また、Znの拡散は、ドーピング濃度の2乗に比例した急峻なドーピングプロファイルとなるため、3.5 nm/decadeの急峻なドーピングプロファイルも達成できた^{11),12)}。ソース領域をZn拡散により形成した後、ゲート酸化膜、ゲート電極を形成し、Ni-InGaAs合金化プロセス¹⁵⁾によりドレイン領域のNi-InGaAsを形成し、TFETを作製した。

Fig. 5は、SOGによるZnの固相拡散を利用してソース領域を形成したInGaAs TFETのデバイス特性である。ドレイン電圧 (V_D) が0.15 Vの時の、ゲート電圧 (V_G) に対するドレイン電流 (I_D) の変化である。ここで、InGaAsチャネルにおけるIn組成は0.53である。室温において、64 mV/decadeのS値と 10^6 を超える高いオン電流/オフ電流比を達成した。良好なオフ電流特性は、SOGを用いたZnの固相拡散による接合形成プロセスが、結晶欠陥の発生を抑制できるプロセスであることを示唆している。ソースおよびドレイン

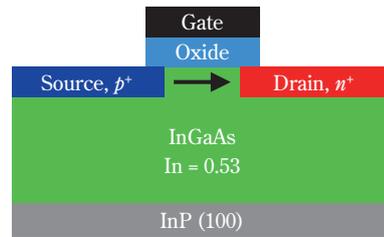


Fig. 4 Schematic illustration of the InGaAs TFET with In_{0.53}Ga_{0.47}As channel grown on InP (100) substrate. A source region can be formed by Zn diffusion and a drain region can be formed by Ni-InGaAs alloy formation.

Figure created by using data provided by collaborators (Ref. 11)

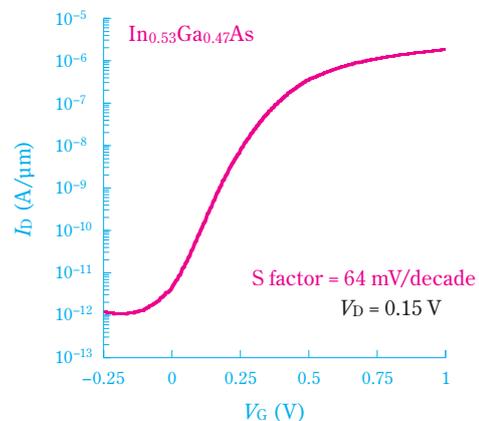


Fig. 5 Measured I_D - V_G characteristic of an In_{0.53}Ga_{0.47}As TFET with the source region formed by Zn diffusion at 500 °C. Figure created by using data provided by collaborators (Ref. 11)

領域を狙い通りに形成できたことで、高品質にエピタキシャル成長されたInGaAsチャネル層の良質な結晶性を活かすことができている。

Znの固相拡散によるソース領域の形成技術は、その後、他機関によっても報告されており¹⁶⁾、また、気相拡散を利用したソース領域形成でも、深さ方向に対してZnのドーピング濃度 2×10^{19} 原子/cm³で、4.7 nm/decade程度の急峻性を持つドーピングプロファイルの実現が報告されている¹⁷⁾。

2. 高In組成InGaAsチャネル層の検討

InGaAsのIn組成を高くすることにより、InGaAsのバンドギャップを狭くすることで、トンネル電流の増加が期待される。そのため、InGaAs TFETにおいて、InGaAsチャネル層のIn組成を0.53より高くすることで、高いオン電流を実現することが期待される。Fig. 6は、In組成が0.53のInGaAsから、In組成が1.00のInAsまでの電界に対するトンネル電流密度変化の計算値を示し

ている。In組成を高くすることにより、トンネル電流密度が増加している。しかし、In組成が高いInGaAsチャンネルを利用する場合、InP基板と成長層の格子不整合が問題となる。InPと格子整合するIn組成が0.53のInGaAs層をInP基板上にエピタキシャル成長する場合、

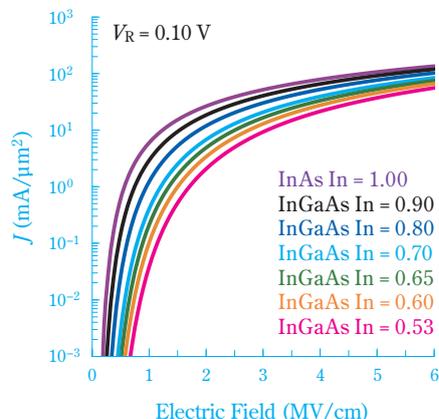


Fig. 6 Calculated tunneling current density versus electric field properties of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ with In content of 0.53–1.00 at a V_R of 0.10 V at 300 K

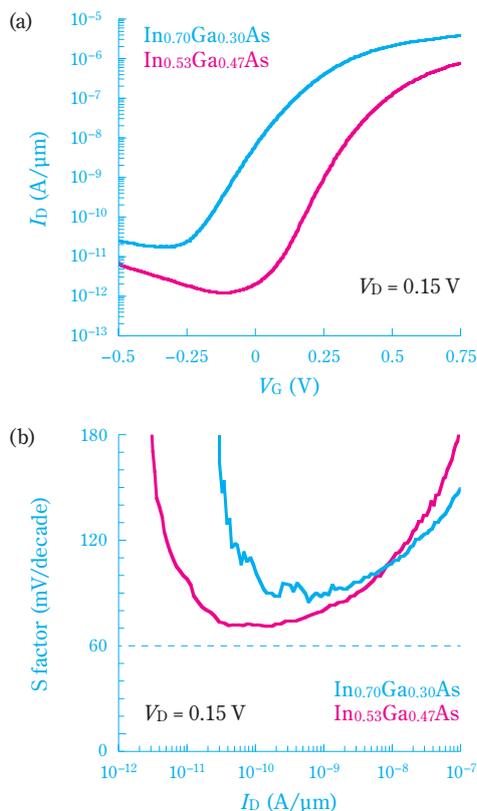


Fig. 7 (a) Measured I_D - V_G characteristics and (b) measured S factor as a function of I_D for InGaAs TFETs with In content of 0.53 and 0.70. Here, the thickness of InGaAs is 100 nm. Figure created by using data provided by collaborators (Ref. 12)

十分厚い膜厚でも高い結晶性を保持したまま成長することが可能である。一方、基板と成長層の間に格子定数差が存在する場合、成長層が格子緩和せずに成長可能な膜厚は制限される^{18)–21)}。InP基板上のInGaAs層のエピタキシャル成長においては、In組成が高くなるにつれて、InP基板との格子不整合が大きくなるため、格子緩和せずに成長可能な膜厚の臨界膜厚が制限される。また、格子緩和により発生した結晶欠陥は、リーク電流の原因となり得る。Fig. 7は、InP (100) 基板上にIn組成が0.53と0.70のInGaAs層を成長した基板を利用して作製したInGaAs TFETのデバイス特性である¹²⁾。ここで、InGaAs層の膜厚は100 nmである。InGaAs層のIn組成を高くすることで、オン電流が増加していることが確認された。一方で、オフ電流の増加やS値の増加が確認された。高In組成のInGaAs層とInPとの格子不整合により生じた結晶欠陥によるデバイス特性への影響が示唆される。高In組成のInGaAs層を成長する場合、結晶欠陥の抑制が重要である。

3. 高In組成InGaAs量子井戸構造チャンネルの検討

TFETにおいて、高いオン電流と同時に、低いオフ電流を実現することが重要である。なぜならば、オフ電流を抑制することで待機時の消費電力を抑制できるため、デバイスの低消費電力に重要となるためである。そして、そのためには欠陥を介したリーク電流を抑制する必要があり、高In組成のInGaAs層を利用したTFETにおいては、チャンネル層の結晶性の改善が必要である。そこで、TFET-PJでは、格子緩和による結晶欠陥を抑制するために、高In組成のInGaAs層の膜厚が10 nm以下の量子井戸 (Quantum Well: QW) をチャンネルとするTFETを開発した^{8),13)}。QWチャンネル層にキャリアを閉じ込めることで、電氣的制御性を高めることができる。Fig. 8は、高In組成のInGaAs QWチャンネルを有するInGaAs QW TFETの概念図である。高In組成のInGaAs層をIn組成が0.53のInGaAs層で挟み込んだ構造としている。これにより、良好な結晶性を有する高In組成のInGaAsチャンネル層の形成が期待される。また、ソース領域において基板側との接合は、In組成が0.53のInGaAsとの接合となるため、接合リーク電流の抑制が期待される。Fig. 9は、QW層の厚さが3 nmでIn組成が0.70のInGaAs QWチャンネル層を有するTFETの電流電圧特性である。 V_D が0.15 Vの時の、 V_G に対するソース電流 (I_S) の変化である。比較として、In組成が0.53のInGaAs単層のTFETの電流電圧特性も示している。高In組成のInGaAs QWチャンネル構造を利用することにより、In組成が0.53のInGaAs TFETと比べてオン電流を増加させることと同時に、Fig. 7 (a)に示した膜厚が100 nmでIn組成が0.70のInGaAs TFETに比べてオフ電流の最小値を1桁以上低減させることに成功した。S値は、62 mV/decade

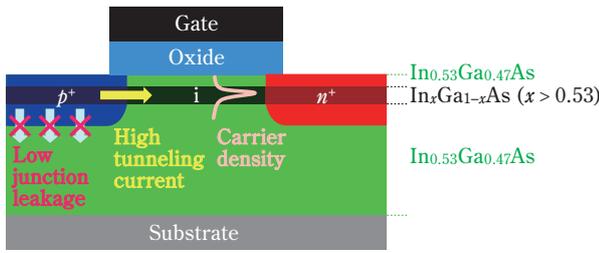


Fig. 8 Schematic illustration of the $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ QW TFET with high In content
 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ QW structure
 Figure created by using data provided by collaborators (Ref. 13)

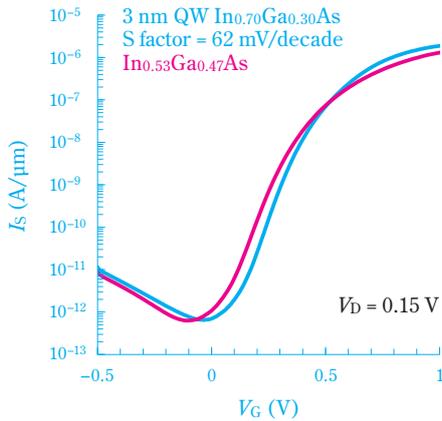


Fig. 9 I_s - V_G characteristics of a 3-nm-thick $\text{In}_{0.70}\text{Ga}_{0.30}\text{As}$ QW TFET and a control bulk $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ TFET
 Figure created by using data provided by collaborators (Ref. 13)

を達成した。このように、高度なエピタキシャル成長技術を利用してチャネル層を形成することにより、TFETのデバイス特性を改善することが可能となる。

4. ゲート酸化膜のスケーリングによるTFETのデバイス特性改善

TFETにおけるオフ特性やS値の改善には、ゲート酸化膜のスケーリング（薄膜化）も有効である^{8),9),11)-13),17)}。Fig. 10は、In組成が0.53のInGaAs TFETにおいて、ゲート酸化膜のスケーリングを行った結果を示している。ここで、ゲート酸化膜の膜厚は、容量換算膜厚（Capacitance Equivalent Thickness: CET）で示している。TFET-PJにおいて、CETのスケーリングにより、S値の改善を確認した。In組成が0.53のInGaAs TFETにおいて、CETを1.7 nmにスケーリングすることにより、室温において、57 mV/decadeのS値を実現した¹³⁾。さらに、高In組成のInGaAs QW TFETにおいて、ゲート酸化膜の薄膜化を適用することにより、室温において、55 mV/decadeのS値を達成した⁸⁾。

以上TFET-PJにおいて、商用生産炉を用いて世界最

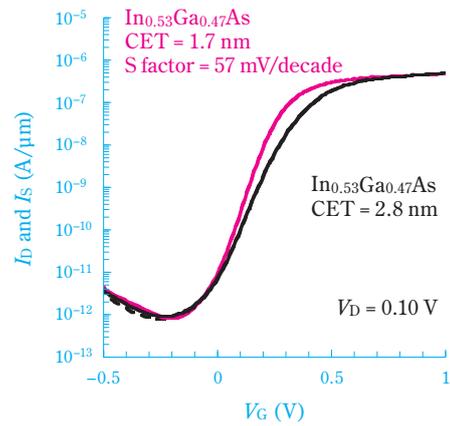


Fig. 10 I_D - V_G (solid) and I_s - V_G (broken) curves of bulk $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ TFETs with CET of 1.7 and 2.8 nm
 Figure created by using data provided by collaborators (Ref. 13)

高水準のTFETを実現できたことの意義は大きい。今後、結晶成長の応用とデバイスプロセスの開発が必要である。

5. ヘテロ接合を利用したTFET

異種材料の接合によるヘテロ接合を利用することにより、実効的なバンドギャップを狭くすることが可能であり、ヘテロ接合を利用したTFETにおいて、高いデバイス性能の実現が期待されている^{5)-9),22)-32)}。Fig. 11は、ヘテロ接合系TFETの概念図である。異なる材料の組み合わせにより、実効的なバンドギャップ (ΔE_G) を制御することができる。ここで、 $E_{G,1}$ は材料1のバンドギャップ、 $E_{G,2}$ は材料2のバンドギャップ、 ΔE_C は伝導帯のバンド不連続量、 ΔE_V は価電子帯のバンド不連続量である。ヘテロ接合系のTFETにおいても、材料や組成を変えることによって多様なバンドギャップが設計可能なIII-V族化合物半導体の利用が期待されている。その中でも、InAs/SiやInAs/GaSbといったヘテロ接合が注目されている。Si (111) 基板上に成長したInAs/Siのヘテロ構造を利用したTFETで、21 mV/decadeのS値が報告されている²²⁾。一方、Si (111)

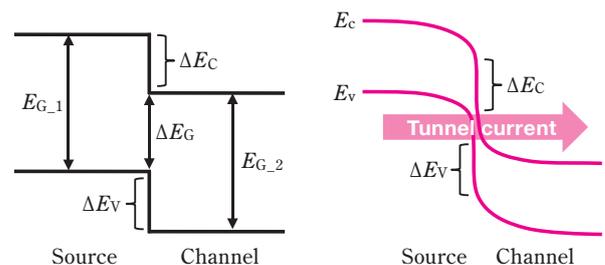


Fig. 11 Schematic illustration of the heterostructure for TFET with the effective narrow band gap

基板上に成長したInAs/GaAsSb/GaSbのヘテロ構造を利用したTFETにおいて、48 mV/decadeのS値と10 $\mu\text{A}/\mu\text{m}$ のオン電流が報告されており、さらに、0.2 V付近の低いゲート電圧において、Si MOSFETよりも高いオン電流が報告されている²⁷⁾。今後、III-V族化合物半導体を利用したヘテロ接合系TFETの開発に期待がもたれる。また、ヘテロ接合を利用することにより、p型TFETの開発も期待されている^{22),25),30)-32)}。

III-V族化合物半導体のSiテクノロジーとの融合

1. III-V族化合物半導体の300 mm Si基板上への集積化に向けた検討

ここまで、InP基板上のInGaAs TFETの特性について解説してきた。実用化に向けては、大口径化の必要や従来のSi MOSFETのプロセスに対応する必要がある、III-V族化合物半導体のSi基板上への集積化が望まれる。しかし、III-V族化合物半導体とSiでは、材料特性の違いが集積化の課題となる。Siテクノロジーに適應させるためには、III-V族化合物半導体デバイスが性能を發揮できる状態で、Si基板上へIII-V族化合物半導体チャネルを集積化させる手法が重要となる。Si基板上へのIII-V族化合物半導体チャネルの集積手法として、直接エピタキシャル成長する手法³³⁾⁻⁴⁰⁾、選択成長を利用する手法^{22),25),27),32),41)-46)}、基板貼り合わせ手法⁴⁷⁾⁻⁵⁸⁾などが報告されている。

直接成長を利用する手法においては、300 mm Si基板上に成長したInGaAsチャネル層を利用して、InP基板上と同等のトランジスタ特性が報告されている^{37),38)}。300 mm Si基板全面へのIII-V族化合物半導体チャネルの集積化が可能となりつつあり、今後の商用製品への搭載が期待される。

選択成長においては、Si基板上への加工プロセスが必要ではあるものの、任意の場所にIII-V族化合物半導体チャネルを形成することが可能である^{22),25),27),32),41)-46)}。異なるチャネル材料の集積化が可能であり、プロセス条件によりチャネル形状を制御できるため、今後の進展が期待される。

基板貼り合わせは、III-V族化合物半導体基板上に成長した良好な結晶性のエピタキシャル層をSi基板上に転写する手法である。直接基板貼り合わせ (Direct Wafer Bonding: DWB) 法を用いて、良好な結晶性を有するInGaAs-On-Insulator (InGaAs-OI) 基板の作製が可能である⁴⁷⁾⁻⁵¹⁾。ここで、InGaAs-OI基板は、Si基板上に埋め込み酸化膜を介してInGaAsチャネルを集積した構造である。一方で、転写用基板となる化合物半導体基板の口径が小さいことが、InGaAs-OI基板の大口径化への課題であった。一つの解決法は、大口径のSi基板上に直接成長したIII-V族化合物半導体層を、

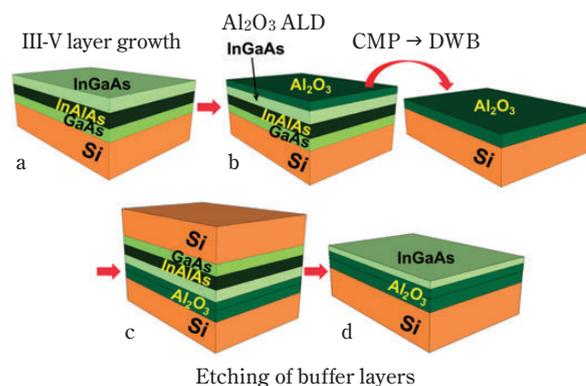


Fig. 12 Schematic illustration of fabrication of InGaAs-OI wafer by developed DWB techniques using Si donor wafer with 300 mm scalability
Figure created by using data provided by collaborators (Ref. 9, 55, 56)

DWB法を用いて大口径のSi基板に転写する方法であり、Fig. 12を用いて説明する^{55),56)}。まず、InGaAsチャネル層の転写に用いるInGaAsエピタキシャル基板を製作する。Si基板上に、結晶性を改善するためのGaAs層とInAlAs層からなるバッファ層を成長し、その上にInGaAs層を成長する (Fig. 12-a)。次に、その転写用基板となるInGaAsエピタキシャル基板と転写先のSi基板のそれぞれの表面に、原子層堆積法 (Atomic Layer Deposition: ALD) によりAl₂O₃を成膜する。転写用基板においては、バッファ層を介していてもAl₂O₃層上の表面粗さが大きくなる場合があり、次工程の基板貼り合わせに影響が生じる。そのような場合は、化学機械研磨 (Chemical Mechanical Polishing: CMP) による表面の平坦化が必要となる (Fig. 12-b)。その後、基板貼り合わせを行う (Fig. 12-c)。最後に、転写用基板からバッファ層までを除去し、転写先基板となるSi基板上にAl₂O₃層を介してInGaAsチャネル層を形成することで、InGaAs-OI基板とする (Fig. 12-d)。この手法において、300 mm Si基板を利用することにより、InGaAs-OI基板の大口径化が可能となる。

大口径化およびプロセスの高速化のための別の手法として、転写用基板にチャネル層をエピタキシャル成長し、転写先基板となる300 mm Si基板への基板貼り合わせ後に、エピタキシャルリフトオフ (Epitaxial Lift-Off: ELO) を利用して、チャネル層を転写用基板から剝離する手法を開発した^{57),58)}。転写用基板には、GaAs基板を用い、ELOで選択エッチングするAlAs層を成長した後、チャネル層となるGaAs層を成長する。成長したGaAs/AlAs層に周期的な溝を形成し、AlAs層をHClを用いて選択エッチングすることにより、GaAs層のELOを行う。Si基板上に転写したチャネル層の表面粗さは、0.4 nmと、平坦であることが確認されている。Fig. 13は、

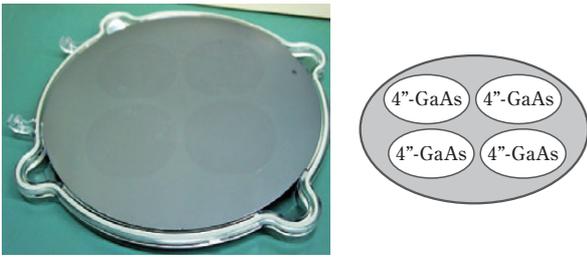


Fig. 13 Photograph of GaAs on 300 mm Si wafer ⁵⁷⁾

ELO法を利用して300 mm Si基板上に転写したGaAs層の写真である。転写したGaAs層の直径は100 mmである。Si基板上への転写後においても、X線回折測定やフォトルミネッセンス測定などの評価により、GaAs層が高い結晶品質を保っていることが確認されている。基板貼り合わせは、各種の材料の選択が可能であり、必要な領域にチャンネルを形成することが可能なため、異種材料の集積化において今後の進展が期待される。

2. 極低消費電力化に向けた技術展開

更なる低消費電力デバイスの開発に向け、上述したIII-V/Siのハイブリッド構造において、光デバイスの集積化も期待されている^{59)–61)}。基板貼り合わせ等により集積されたIII-V族化合物半導体層を利用することで、Siだけでは実現の困難な優れた光学特性を実現することが可能となるため、それらのデバイスを組み合わせることにより、従来よりも極低消費電力のシステムの実現が期待されている。

III-V族化合物半導体の特性を活かしたデバイスとしては、面発光レーザー (Vertical Cavity Surface Emitting Laser: VCSEL)、テラヘルツデバイスなども研究開発が盛んである。VCSELは、光通信やセンシングで利用されており、車載用途への応用も期待されている。テラヘルツデバイスは、InGaAsやInAsをチャンネルとするInP系高電子移動度トランジスタ (High Electron Mobility Transistor: HEMT) や、MOS-HEMT、量子カスケードレーザー、共鳴トンネルダイオードなどが注目されており、通信やセンシング、セキュリティ、医療などへの応用が期待されている。上述のように、機能の異なるデバイスと極低消費電力回路を集積化することにより、移動端末における多機能化を飛躍的に向上できるものと期待される。

本稿で述べてきたように、化合物半導体を利用した新構造の低消費電力デバイスや、大口径基板上における異種材料やデバイスの集積化技術を用いることで、極低消費電力で動作可能な回路を実現できることが実証されてきている。

デバイスの低消費電力技術開発を通じて、さまざまな端末における通信やセンシング技術を基盤とし

た各種のアプリケーションやサービスが可能となり、社会の発展に貢献できることを願っている。

謝辞

本稿をまとめるに当たり、データを提供して戴くとともに有益なご助言を戴いた、東京大学 大学院工学系研究科 電気系工学専攻 教授 高木 信一 先生、准教授 竹中 充 先生に深謝いたします。

引用文献

- 1) International Roadmap for Devices and Systems, “INTERNATIONAL ROADMAP FOR DEVICES AND SYSTEMS 2016 EDITION MORE MOORE WHITE PAPER”, http://irds.ieee.org/images/files/pdf/2016_MM.pdf (参照 2017/5/19).
- 2) S. Takagi, R. Zhang, J. Suh, S.-H. Kim, M. Yokoyama, K. Nishi and M. Takenaka, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **54**, 06FA01 (2015).
- 3) J. A. del Alamo, *Nature*, **479**, 317 (2011).
- 4) R. Pillarisetty, *Nature*, **479**, 324 (2011).
- 5) A. C. Seabaugh and Q. Zhang, *Proc. IEEE*, **98**, 2095 (2010).
- 6) A. M. Ionescu and H. Riel, *Nature*, **479**, 329 (2011).
- 7) H. Lu and A. Seabaugh, *J. Electron Devices Soc.*, **2**, 44 (2014).
- 8) S. Takagi, D. H. Ahn, M. Noguchi, T. Gotow, K. Nishi, M. Kim and M. Takenaka, *IEDM Tech. Dig.*, **2016**, 516.
- 9) S. Takagi, M. Noguchi, M. Kim, S.-H. Kim, C.-Y. Chang, M. Yokoyama, K. Nishi, R. Zhang, M. Ke and M. Takenaka, *Solid-State Electronics*, **125**, 82 (2016).
- 10) G. Dewey, B. Chu-Kung, J. Boardman, J. M. Fastenau, J. Kavalieros, R. Kotlyar, W. K. Liu, D. Lubyshev, M. Metz, N. Mukherjee, P. Oakey, R. Pillarisetty, M. Radosavljevic, H. W. Then and R. Chau, *IEDM Tech. Dig.*, **2011**, 785.
- 11) M. Noguchi, S. H. Kim, M. Yokoyama, S. M. Ji, O. Ichikawa, T. Osada, M. Hata, M. Takenaka and S. Takagi, *IEDM Tech. Dig.*, **2013**, 683.
- 12) M. Noguchi, S. H. Kim, M. Yokoyama, O. Ichikawa, T. Osada, M. Hata, M. Takenaka and S. Takagi, *J. Appl. Phys.*, **118**, 045712 (2015).
- 13) D. H. Ahn, S. M. Ji, M. Takenaka and S. Takagi, *Symp. VLSI Tech. Dig.*, **2016**, 224.
- 14) Ioffe Physico-Technical Institute, Electronic archive New Semiconductor Materials. Characteristics and

- Properties, <http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/> (参照 2017/5/19).
- 15) S. H. Kim, M. Yokoyama, N. Taoka, R. Iida, S. Lee, R. Nakane, Y. Urabe, N. Miyata, T. Yasuda, H. Yamada, N. Fukuhara, M. Hata, M. Takenaka and S. Takagi, *IEDM Tech. Dig.*, **2010**, 596.
 - 16) A. Alian, J. Franco, A. Vandooren, Y. Mols, A. Verhulst, S. El Kazzi, R. Rooyackers, D. Verreck, Q. Smets, A. Mocuta, N. Collaert, D. Lin and A. Thean, *IEDM Tech. Dig.*, **2015**, 823.
 - 17) A. Alian, Y. Mols, C. C. M. Bordallo, D. Verreck, A. Verhulst, A. Vandooren, R. Rooyackers, P. G. D. Agopian, J. A. Martino, A. Thean, D. Lin, D. Mocuta and N. Collaert, *Appl. Phys. Lett.*, **109**, 243502 (2016).
 - 18) T. Sato, M. Mitsuhashi and Y. Kondo, "NTT Technical Review, January 2009 Vol. 7 No. 1", <https://www.ntt-review.jp/archive/ntttechnical.php?contents=ntr200901sf2.html> (参照 2017/5/19).
 - 19) J. W. Matthews and A. E. Blakeslee, *J. Cryst. Growth*, **27**, 118 (1974).
 - 20) R. People and J. C. Bean, *Appl. Phys. Lett.*, **47**, 322 (1985).
 - 21) A. Fischer, H. Kühne and H. Richter, *Phys. Rev. Lett.*, **73**, 2712 (1994).
 - 22) K. Tomioka, M. Yoshimura and T. Fukui, *Symp. VLSI Tech. Dig.*, **2012**, 47.
 - 23) U. E. Avci and I. A. Young, *IEDM Tech. Dig.*, **2013**, 96.
 - 24) R. Pandey, N. Agrawal, V. Chobpattana, K. Henry, M. Kuhn, H. Liu, M. Labella, C. Eichfeld, K. Wang, J. Maier, S. Stemmer, S. Mahapatra and S. Datta, *IEDM Tech. Dig.*, **2015**, 354.
 - 25) D. Cutaia, K. E. Moselund, H. Schmid, M. Borg, A. Olziersky and H. Riel, *Symp. VLSI Tech. Dig.*, **2016**, 226.
 - 26) T. Gotow, M. Mitsuhashi, T. Hoshi, H. Sugiyama, M. Takenaka and S. Takagi, *Ext. Abstr. Solid State Devices and Materials*, **2016**, 21.
 - 27) E. Memisevic, J. Svensson, M. Hellenbrand, E. Lind and L.-E. Wernersson, *IEDM Tech. Dig.*, **2016**, 501.
 - 28) A. Afzal, M. Passlack and Y.-C. Yeo, *IEDM Tech. Dig.*, **2016**, 738.
 - 29) I. A. Young, U. E. Avci and D. H. Morris, *IEDM Tech. Dig.*, **2015**, 600.
 - 30) R. Pandey, H. Madan, H. Liu, V. Chobpattana, M. Barth, B. Rajamohanam, M. J. Hollander, T. Clark, K. Wang, J.-H. Kim, D. Gundlach, K. P. Cheung, J. Suehle, R. Engel-Herbert, S. Stemmer and S. Datta, *Symp. VLSI Tech. Dig.*, **2015**, T206.
 - 31) R. Pandey, C. Schulte-Braucks, R. N. Sajjad, M. Barth, R. K. Ghosh, B. Grisafe, P. Sharma, N. von den Driesch, A. Vohra, B. Rayner, R. Loo, S. Mantl, D. Buca, C.-C. Yeh, C.-H. Wu, W. Tsai, D. Antoniadis and S. Datta, *IEDM Tech. Dig.*, **2016**, 520.
 - 32) H. Schmid, D. Cutaia, J. Gooth, S. Wirths, N. Bologna, K. E. Moselund and H. Riel, *IEDM Tech. Dig.*, **2016**, 71.
 - 33) Y.-C. Lin, M.-L. Huang, C.-Y. Chen, M.-K. Chen, H.-T. Lin, P.-Y. Tsai, C.-H. Lin, H.-C. Chang, T.-L. Lee, C.-C. Lo, S.-M. Jang, C. H. Diaz, H.-Y. Hwang, Y.-C. Sun and E. Y. Chang, *Appl. Phys. Express*, **7**, 041202 (2014).
 - 34) T. Orzali, A. Vert, R. T. P. Lee, A. Norvilas, G. Huang, J. L. Herman, R. J. W. Hill and S. S. Papa Rao, *J. Cryst. Growth*, **426**, 243 (2015).
 - 35) T. Orzali, A. Vert, T.-W. Kim, P. Y. Hung, J. L. Herman, S. Vivekanand, G. Huang, M. Kelman, Z. Karim, R. J. W. Hill and S. S. Papa Rao, *J. Cryst. Growth*, **427**, 72 (2015).
 - 36) T. Orzali, A. Vert, B. O'Brien, J. L. Herman, S. Vivekanand, R. J. W. Hill, Z. Karim and S. S. Papa Rao, *J. Appl. Phys.*, **118**, 105307 (2015).
 - 37) M. L. Huang, S. W. Chang, M. K. Chen, C. H. Fan, H. T. Lin, C. H. Lin, R. L. Chu, K. Y. Lee, M. A. Khaderbad, Z. C. Chen, C. H. Lin, C. H. Chen, L. T. Lin, H. J. Lin, H. C. Chang, C. L. Yang, Y. K. Leung, Y.-C. Yeo, S. M. Jang, H. Y. Hwang and Carlos H. Diaz, *Symp. VLSI Tech. Dig.*, **2015**, T204.
 - 38) M. L. Huang, S. W. Chang, M. K. Chen, Y. Oniki, H. C. Chen, C. H. Lin, W. C. Lee, C. H. Lin, M. A. Khaderbad, K. Y. Lee, Z. C. Chen, P. Y. Tsai, L. T. Lin, M. H. Tsai, C. L. Hung, T. C. Huang, Y. C. Lin, Y.-C. Yeo, S. M. Jang, H. Y. Hwang, Howard C.-H. Wang and C. H. Diaz, *Symp. VLSI Tech. Dig.*, **2016**, 16.
 - 39) R. Alcotte, M. Martin, J. Moeyaert, R. Cipro, S. David, F. Bassani, F. Ducroquet, Y. Bogumilowicz, E. Sanchez, Z. Ye, X. Y. Bao, J. B. Pin and T. Baron, *APL Materials*, **4**, 046101 (2016).
 - 40) M. Martin, D. Caliste, R. Cipro, R. Alcotte, J. Moeyaert, S. David, F. Bassani, T. Cerba, Y. Bogumilowicz, E. Sanchez, Z. Ye, X. Y. Bao, J. B. Pin, T. Baron and P. Pochet, *Appl. Phys. Lett.*, **109**, 253103 (2016).
 - 41) N. Waldron, S. Sioncke, J. Franco, L. Nyns, A. Vais, X. Zhou, H. C. Lin, G. Boccardi, J. W. Maes, Q. Xie, M. Givens, F. Tang, X. Jiang, E. Chiu, A. Opdebeeck,

- C. Merckling, F. Sebaai, D. van Dorp, L. Teugels, A. S. Hernandez, K. D. Meyer, K. Barla, N. Collaert and Y.-V. Thean, *IEDM Tech. Dig.*, **2015**, 799.
- 42) X. Zhou, N. Waldron, G. Boccardi, F. Sebaai, C. Merckling, G. Eneman, S. Sioncke, L. Nyns, A. Opdebeek, J. W. Maes, Q. Xie, M. Givens, F. Tang, X. Jiang, W. Guo, B. Kunert, L. Teugels, K. Devriendt, A. Sibaja Hernandez, J. Franco, D. van Dorp, K. Barla, N. Collaert and A. V.-Y. Thean, *Symp. VLSI Tech. Dig.*, **2016**, 166.
- 43) L. Czornomaz, E. Uccelli, M. Sousa, V. Deshpande, V. Djara, D. Caimi, M. D. Rossell, R. Erni and J. Fompeyrine, *Symp. VLSI Tech. Dig.*, **2015**, T172.
- 44) H. Schmid, M. Borg, K. Moselund, L. Gignac, C. M. Breslin, J. Bruley, D. Cutaia and H. Riel, *Appl. Phys. Lett.*, **106**, 233101 (2015).
- 45) L. Czornomaz, V. Djara, V. Deshpande, E. O'Connor, M. Sousa, D. Caimi, K. Cheng and J. Fompeyrine, *Symp. VLSI Tech. Dig.*, **2016**, 94.
- 46) M. Borg, H. Schmid, J. Gooth, M. D. Rossell, D. Cutaia, M. Knoedler, N. Bologna, S. Wirths, K. E. Moselund and H. Riel, *ACS Nano*, **11**, 2554 (2017).
- 47) M. Yokoyama, M. Takenaka, T. Yasuda, H. Takagi, H. Yamada, N. Fukuhara, M. Hata, M. Sugiyama, Y. Nakano and S. Takagi, *Symp. VLSI Tech. Dig.*, **2009**, 242.
- 48) M. Yokoyama, T. Yasuda, H. Takagi, H. Yamada, N. Fukuhara, M. Hata, M. Sugiyama, Y. Nakano, M. Takenaka and S. Takagi, *Appl. Phys. Express*, **2**, 124501 (2009).
- 49) M. Yokoyama, T. Yasuda, H. Takagi, N. Miyata, Y. Urabe, H. Ishii, H. Yamada, N. Fukuhara, M. Hata, M. Sugiyama, Y. Nakano, M. Takenaka and S. Takagi, *Appl. Phys. Lett.*, **96**, 142106 (2010).
- 50) M. Yokoyama, R. Iida, S. H. Kim, N. Taoka, Y. Urabe, T. Yasuda, H. Takagi, H. Yamada, N. Fukuhara, M. Hata, M. Sugiyama, Y. Nakano, M. Takenaka and S. Takagi, *IEDM Tech. Dig.*, **2010**, 46.
- 51) M. Yokoyama, R. Iida, S.-H. Kim, N. Taoka, Y. Urabe, H. Takagi, T. Yasuda, H. Yamada, N. Fukuhara, M. Hata, M. Sugiyama, Y. Nakano, M. Takenaka and S. Takagi, *IEEE Electron Device Lett.*, **32**, 1218 (2011).
- 52) T. Irisawa, M. Oda, Y. Kamimuta, Y. Moriyama, K. Ikeda, E. Mieda, W. Jevasuwan, T. Maeda, O. Ichikawa, T. Osada, M. Hata and T. Tezuka, *Symp. VLSI Tech. Dig.*, **2013**, T56.
- 53) T. Irisawa, M. Oda, K. Ikeda, Y. Moriyama, E. Mieda, W. Jevasuwan, T. Maeda, O. Ichikawa, T. Osada, M. Hata, Y. Miyamoto and T. Tezuka, *IEDM Tech. Dig.*, **2013**, 28.
- 54) T. Irisawa, K. Ikeda, Y. Moriyama, M. Oda, E. Mieda, T. Maeda and T. Tezuka, *Symp. VLSI Tech. Dig.*, **2014**, 118.
- 55) S. H. Kim, Y. Ikku, M. Yokoyama, R. Nakane, J. Li, Y. C. Kao, M. Takenaka and S. Takagi, *Symp. VLSI Tech. Dig.*, **2014**, T32.
- 56) S. H. Kim, Y. Ikku, M. Yokoyama, R. Nakane, J. Li, Y.-C. Kao, M. Takenaka and S. Takagi, *Appl. Phys. Lett.*, **105**, 043504 (2014).
- 57) E. Mieda, T. Maeda, N. Miyata, T. Yasuda, Y. Kurashima, A. Maeda, H. Takagi, T. Aoki, T. Yamamoto, O. Ichikawa, T. Osada, M. Hata, A. Ogawa, T. Kikuchi and Y. Kunii, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **54**, 036505 (2015).
- 58) T. Maeda, E. Mieda, H. Ishii, T. Itatani, H. Hattori, T. Yasuda, A. Maeda, Y. Kurashima, H. Takagi, T. Aoki, T. Yamamoto, O. Ichikawa, T. Osada, T. Takada, M. Hata, J. Yugami, A. Ogawa, T. Kikuchi and Y. Kunii, *ECS Transactions*, **64** (6) 491 (2014).
- 59) A. W. Fang, H. Park, O. Cohen, R. Jones, M. J. Paniccia and J. E. Bowers, *Opt. Express*, **14** (20), 9203 (2006).
- 60) M. Takenaka, M. Yokoyama, M. Sugiyama, Y. Nakano and S. Takagi, *Appl. Phys. Express.*, **2**, 122201 (2009).
- 61) J.-H. Han, M. Takenaka and S. Takagi, *IEDM Tech. Dig.*, **2016**, 620.

PROFILE



横山 正史
Masafumi YOKOYAMA
住友化学株式会社
情報電子化学品研究所
研究員
工学博士



山本 武継
Taketsugu YAMAMOTO
住友化学株式会社
情報電子化学品研究所
主席研究員

業務革新に向けた 人工知能活用の考察

住友化学システムサービス株式会社
IT戦略室
本田 仁

Consideration of Utilization of Artificial Intelligence for Business Innovation

Sumitomo Chemical Systems Service Co., Ltd.
IT Strategy Office
Hitoshi HONDA

In recent years, the growth of artificial intelligence (AI) has been remarkable. In the chemical industry, a wave of business innovation utilizing AI has arrived, including drug development that utilizes AI in the medical field. Sumitomo Chemical Co., Ltd. aims to realize dramatic business innovation through digitization corresponding to the IoT era in its medium-term plan. As a part of this AI is also being examined as a digitalization technology. In this paper, we will consider the utilization of AI for future business innovation based on the present state of artificial intelligence and efforts at Sumitomo Chemical Co., Ltd.

はじめに

近年、人工知能の発展が目覚ましい。目新しいところでは、AlphaGo™*1の登場により、不可能とも言われていた囲碁において、とうとうコンピューターが人間に勝ってしまった。身近なところでは、スマートフォンに搭載されている、Google® NowやApple®のSiri®、Microsoft®のCortana®などの仮想パーソナルアシスタント*2など、身近にも人工知能が普及してきている。

化学業界においても、医療分野における人工知能を活用した創薬をはじめ、人工知能を活用した業務革新の波が来ている。

住友化学株式会社では、今中期計画において、IT推進部を中心に、「IoT*3時代に対応したデジタル化による抜本的な業務革新の実現」を目指している。この中では、様々な最新技術によるデジタル化を推進しているが、人工知能もその一つの技術として検証を進めている。

本稿では、人工知能の現状および住友化学株式会社での取り組みをもとに、今後の業務革新に向けた人工知能の活用について考察する。

人工知能とは

知能とは、物事を学習し、理解したり判断したりする力のことである。人工知能は、人間の知能そのものを機械*4で実現したもの、または、人間が知能を使って行うことを機械で実行するものである。人工知能は、機械学習、ディープラーニングなど、複数の技術の組み合わせで成り立っている。

人工知能は、その言葉の生まれた1956年からこれまでの50年に渡って研究され続けてきている。近年、インターネットの普及による膨大なデータの蓄積、機械学習、ディープラーニングなどの人工知能技術の進展、ハードウェアスペックの劇的な向上によって、人工知能の精度が飛躍的に向上し、改めて注目を集めている。

*1 AlphaGo™は、Google®によって開発された人工知能を活用した囲碁ソフトウェアである。

*2 仮想パーソナルアシスタント (Virtual Personal Assistants) は、個人の活動をサポートするサービスの総称である。最近では、スマートフォンに搭載された、Google® NowやMicrosoft®のCortana®, Apple®のSiri®といった、人工知能を活用したインテリジェントなアプリが、フォームやボタンなどを操作することなく、音声で指示を出すだけで、ユーザの要望に応えられるようになってきている。

*3 Internet of Things の略

*4 機械は、特にコンピューターに限ったものではないが、特に断りのない限り、本稿ではコンピューターによる人工知能について取り扱う。

1. 人工知能の歴史

人工知能は、2度の冬の時代を越え、現在3回目のブームを迎えている。人工知能の歴史年表をFig. 1に示す。

(1) 第一次ブーム (1956年～1960年代)

ダートマス大学にて1956年に開催された会議（通称、ダートマス会議）で、人類史上初めて「人工知能 (Artificial Intelligence)」という用語が使われたとされる。この会議の提案書には「学習のあらゆる面または知能の他のあらゆる機能は正確に説明できるので、機械でそれをシミュレートすることができる」と書かれていた¹⁾。この会議以降、企業、政府における人工知能研究が過熱した。

現在のディープラーニングの原型ともなるニューラルネットワークの「パーセプトロン」が、1958年に発明される。また、1960年代に、コンピューターが、文字、図形、シンボルなどの記号を扱えるようになると、これを活用し、人間が行う「推論」や「思考」を数式化、プログラム化しコンピューターで再現しようとする記号処理の研究も進んでいった。

しかし、これら人工知能の実現に期待を寄せた技術であったが、パーセプトロンでは、簡単な論理式である排他的論理和^{*5}が解けないことが発覚し、また、記号処理は、ルールを全て人間が記述しなければならず、人工知能の限界が見え始めた。

その結果、企業、政府も人工知能に対する熱が冷め、人工知能研究は、最初の冬の時代を迎える。

(2) 第二次ブーム (1980年代)

1980年代になると、特定分野の専門家の意思決定能力をエミュレートした「エキスパートシステム」が商用化され、広く利用されるようになった。

日本の通産省は、1982年にエキスパートシステムの中核である、「推論エンジン」^{*6}の開発を推進するため、570億円を投資し、「第五世代コンピュータプロジェクト」をスタートさせた。このプロジェクトでは、コンピューターの進化を第一世代（真空管）、第二世代（トランジスタ）、第三世代（IC：集積回路）、第四世代（LSI：大規模集積回路）と分類し、次に来るべき第五世代コンピューターは人工知能（AI：Artificial Intelligence）を実現するものとして定義した。このことから、日本では、官民一体となった汎用的な人工知能開発が始まったとの勘違いもあり（実際は、推論エンジンの開発が中心）、これに対抗するように、イギリスや米国でも同様のプロジェクトが始まった。

また、ニューラルネットワークの研究においても、「誤差逆伝播法」が開発され、パーセプトロンの課題を克服することができ、新たな研究成果を上げるようになった。

しかし、エキスパートシステムは、「知識やルールを沢山入れれば賢くなるが、知識すべてを書ききれない」というフレーム問題^{*7}があり、また、ニューラルネットワークについても期待した性能が得られなかった。そこで、またしても、人工知能の限界が見え、人工知能研究は、2度目の冬の時代を迎える。

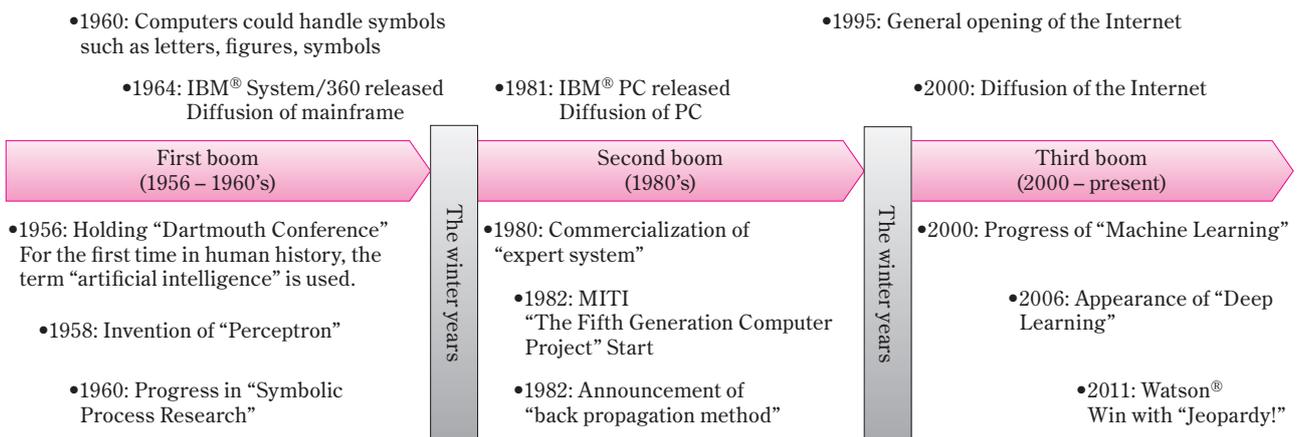


Fig. 1 History of artificial intelligence

*5 排他的論理和とは、論理演算の一つで、二つの命題のいずれか一方のみが真のときに真となり、両方真や両方偽のときは偽となるものである。
 *6 推論エンジンは、エキスパートシステムにおける、専門家の知識を蓄積したデータベースから答えを導き出すための仕組みである。第五世代コンピュータプロジェクトの結果、1秒間に5億回の三段論法を実行するコンピューターが完成した。
 *7 エキスパートシステムは、条件に基づいて実行するルールベースで構築されている。例えば、風邪をひいていたら風邪薬を渡すといった、条件に基づく行動をすべてプログラミングする。このような場合、すべての条件を記載したり、情報や状況の変化に応じてルールを逐一変えることは、現実的に不可能である。

(3) 第三次ブーム (2000年～現在)

1995年頃から一般に開放されたインターネットは、2000年ごろには、爆発的な広がりを見せていた。インターネット上では、これまでのシステムとは異なり、企業だけでなく一般消費者が商取引や情報交換を行うことになったため、これまでとは桁違いのデータを取り扱うことになった。人工知能は、原則的にデータ量が多いほど学習効果を得られる。このような状況から人工知能の研究が再び過熱化していく。

まずは、インターネットに蓄積される購買履歴や検索履歴を元に顧客の嗜好を読み取って商品をリコメンドするといった、刻々と蓄積されるデータの分析や処理の自動化において、ベイズ統計*8を中心とした、「機械学習」の研究が発展した。

2006年に、「オートエンコーダー」が開発され、また、コンピューターの性能が格段に向上したことにより、ニューラルネットワークの多層化が可能となった。このことにより、多階層のニューラルネットワークである「ディープラーニング」が登場し、人工知能の性能は、格段に向上した。

2011年、IBM®の質問応答システムであるWatson®が、米国のクイズ番組「Jeopardy!」において人間と対戦し優勝したり、2012年、Google®は、大量の画像データをインプットし、ディープラーニングを用いてコンピューターに自ら猫を識別させることに成功するなど、これまででは考えられないような、人工知能による成果が見られるようになった。

また、近年、スマートフォンに搭載されるApple®のSiri®などの仮想パーソナルアシスタントが普及し、人工知能を身近に感じられるようなことも相まって、現在の人工知能ブームを引き起こしている。

2. 人工知能の現在

(1) 強い人工知能と弱い人工知能

人工知能は、一般的に強い人工知能 (Strong AI) と弱い人工知能 (Weak AI) に分類される。

強い人工知能とは、人間と同様の知能を持つ機械のことである。具体的には、汎用的な学習アルゴリズムを持っていて、特に人間が何も教えなくても、世の中にあふれているインターネット上の情報や本、もしくは視覚的・聴覚的に得られる情報を勝手に学んで、様々な知能を得ていくような人工知能である。まさしく、SFの世界に描かれる人間と同様もしくは、それ以上の知能を持つ機械である。

弱い人工知能とは、部分的に人間の知能の代わりにする機械のことである。具体的には、囲碁をする、クイズに答える、需要予測をする、人の感情を見分けるなど、特定の課題解決のために、それ専用の学習アルゴリズムを持ち、それ専用の学習データによって作られる人工知能である。すなわち、特定の課題解決用に個別の人工知能があり、その人工知能は特定の課題解決以外には、活用することができない。

なお、現在の人工知能は、すべて弱い人工知能であり、強い人工知能の開発の目途はたっていない。

(2) 人工知能の技術

人工知能の代表的な技術として、機械学習がある。近年、人工知能を進展させているディープラーニングは、機械学習の一種である。

機械学習とは、人間が自然に行っている学習能力と同様の機能をコンピューターで実現しようとする技術・手法のことである。機械学習は、データを基に、機械がモデル (規則性、法則性、類似性) を導き出す仕組みである。この導き出されたモデルに新たなデータを投入することにより、推測される答えを返すことができる。

機械学習においてモデルを導き出すための学習アルゴリズムには、線形回帰分析、ロジスティック回帰分析、ベイズ統計など統計解析手法が用いられる。学習アルゴリズムは、単体で用いてもよいが、データの特長や解決したい課題に応じて、複数の学習アルゴリズムを多段で組み合わせて用いる。

機械学習の代表的な学習方法には、Table 1に示す通り、「教師あり学習」および「教師なし学習」の大きく2つがある。教師あり学習とは、人間が正解となる

Table 1 Learning methods and Learning algorithms

| Learning methods | Learning algorithm examples |
|-----------------------|---|
| Supervised learning | <ul style="list-style-type: none"> • Linear regression • Logistic regression • Naive Bayes • Perceptron • AR,MA,(s)ARIMA model |
| Unsupervised learning | <ul style="list-style-type: none"> • Hierarchical clustering (Ward system etc.) • Non-hierarchical clustering (K-means clustering etc.) • Topic model (Latent Dirichlet allocation etc.) |

*8 ベイズ統計は、ベイズの定理を基にした統計学の一つ。ベイズの定理は、ある事象が起こるという条件下で別の事象が起こる確率に関する定理である。ベイズ統計は、入ってくる情報をもとに自動的に確率を推測でき、少ないデータでも推測が可能で、データが多くなればより推測が正確になる性質を持つ。

データを準備し（教師データ）、そのデータを元に学習することによってモデルを導き出すことである。一方、教師なし学習は、データの集合の中からコンピューター自身でモデルを導き出す学習方法で、特にディープラーニングで用いられる。

ディープラーニングは、多層構造のニューラルネットワークを用いた機械学習のことである。ニューラルネットワークは、脳機能に見られるいくつかの特性を計算機上のシミュレーションによって表現することを目指した数学モデルのことである。

第一次ブーム時に研究された、パーセプトロンもニューラルネットワークである。パーセプトロンは、3層構造（入力層、中間層、出力層）を持っていたが、「中間層の結合荷重^{*9}は変わらない」ということから、実質的に2層の構造しか持つことができなかった。そのため、線型分離可能問題しか解決できないという証明がされ、例えば排他的論理和のような、単純な線型不可分な問題ですらパーセプトロンでは解くことができないことが分かった（1回目の冬の時代）。

しかし、その後、逆誤差伝搬法（Backpropagation）が提案され、中間層の結合荷重も学習によって変えられるようになり、3層構造を持つニューラルネットワークを構築できるようになった。これで、さらに多重のニューラルネットワークの構築が可能になったが、以下の問題から、性能が出なかった（2回目の冬の時代）。

- ・勾配消失（Vanishing gradients）：層を増やすにつれて、逆誤差伝搬法では、徐々に最初の層に近づくにつれて情報を伝達できなくなる。
- ・過学習（Overfitting）：訓練データに対しては正しく予測できるが、未知のデータに対しては、予測ができない。学習期間が長すぎたり、訓練データに特異なデータが紛れ込んでしまった場合、そのデータに過剰に適合してしまい、汎用的に使えなくなる。

現在のディープラーニングでは、「オートエンコーダー」^{*10}などの発明により、逆誤差伝搬法の課題を克服し、多階層を構築できるようになったことに加え、ハードウェアスペックの向上、特に近年では、GPUを利用することにより、計算スピードが格段に向上し、実用的な速度でモデルを導き出すことができるようになった。このことにより、ディープラーニングが、改めて脚光を浴びることになった。

(3) 現在の人工知能の可能性

現在の人工知能の技術を応用すると、Table 2に示すことが可能である。

3. 人工知能の将来的な可能性

画像認識に関しては、ディープラーニングを応用したことにより、この数年で大きく発展し、プレイクス

Table 2 Possibilities for current Artificial Intelligence

| Possibility | Description | Application example |
|--|--|--|
| Trend modeling and forecast | Modeling (formulas) based on past data, predicting the future from past trends. | •Demand forecast |
| Aggregation in multidimensional space | Mapping data in multidimensional order, grouping highly relevant data, and deriving similar trends that can not be predicted by humans. | •Spam classification •Repositioning of products / materials |
| Discovery of combinations of high relevancy | Visualizing the relevance of a large amount of data items (variables), grasping the situation such as work environments and detecting changes. | •Anomaly detection •Predictive Maintenance |
| Image recognition / speech recognition | By using the neural network method, we achieve something similar to the senses of living things, the ability to reproduce the motor system on a machine and recognize images and sounds. | •Human recognition •Emotion analysis •Voice recognition (Speech to text) |
| Understanding and responding to human empirical knowledge and language | Recognizing the human language and making appropriate responses and controlling according to the intention. | •Virtual Personal Assistant •Machine translation |

* 9 ニューロンは相互に信号伝達を行うが、その信号伝達効率は一律ではない。そこで、それぞれの入力に対し結合荷重を設定する（0～1の実数値）。ニューラルネットワークは、入力値の総和が、ある閾値を超えたときに、他のニューロンに対して信号を出力する。ニューラルネットワークの学習は、結合荷重および閾値を学習によって正しい結果を出せるように調整する。

*10 オートエンコーダーは、ニューラルネットワークを使用した次元圧縮のためのアルゴリズム。ニューラルネットワークのパラメーターの初期値をランダムではなく、オートエンコーダーで訓練したものをを用いるというアイデアを試すことによって、勾配消失問題が起こる可能性が小さくなり、層を深くしても学習がうまく進むことが分かった。

ルーを起こしている。2012年にGoogle®が大量の画像データをディープラーニングで学習し、「猫」を識別することができた。その後、国際的な画像認識コンテスト「ILSVRC」*11においても、ディープラーニングが利用されるようになり、これまでのコンテストでの認識率よりも格段に性能が向上*12され、2015年には、人間の認識力を上回ってしまった。

AlphaGo™についても、これまでの人工知能が打ち手のロジックを解析して再現する手法を使用していたのに対して、ディープラーニングによる画像認識を応用した手法を採用している。これにより、人間では思いもつかなかった打ち手を見出すことに成功し、人間に勝利することができている。

現在、言語解析にもディープラーニングの応用が進んできており、2016年に、Google®翻訳において、ディープラーニングを活用して改良したところ、翻訳の性能が格段に向上している（主観的な感覚により、数値的な根拠はない）。

これらの進歩は、そもそもは10年から20年かかると予想されていたもので、それがこの5年の間に実現されてきている。今後ともディープラーニングの応用による様々なブレイクスルーに期待できる。

なお、2045年には技術的特異点（シンギュラリティ）*13を迎え、人間の知性をはるかに超えた、強い人工知能が世の中を根底から変えてしまうといった情報もある。2045年のハードウェアスペックは、現在からは全く想像もできないくらい進歩していることは間違いない。しかし、現状のディープラーニングは、あくまで弱い人工知能であり、強い人工知能を実現するための理論は確立していない。このような現状では、技術的特異点の訪れは、想像の域を超えることはないと考えられる。

業務革新に向けた人工知能活用の考察

1. 人工知能を活用した業務革新の可能性

これまでシステム化は、決まった業務プロセスおよび判断ロジックに基づいた範囲しか自動化ができなかった。人工知能を活用することにより、人の経験や勘に頼ってきたものや、人の目や耳で認識した結果をもとに判断・行動してきたものなど、人間にしかできない

と思われてきた業務を自動化することができ、高速かつ正確に業務を遂行することにより、大きな生産性向上を見込むことができる。

住友化学グループにおいても、人工知能を活用することにより、以下のような業務革新の可能性がある。

- ・需要予測に基づく生産・販売計画
- ・他社に先駆けた新規素材の発見
- ・素材のリポジショニングによる研究資産の有効活用
- ・機器の故障予測に基づく予知保全
- ・監視画像から火災など危険な状況の自動検知および警告
- ・人材特性・スキルを基にした、組織・業務とのマッチング予測に基づく最適人材配置
- ・業務に必要な情報の自動収集およびリコメンド
- ・音声による同時自動翻訳によるグローバルコミュニケーション

2. 住友化学株式会社における人工知能の検証状況

住友化学株式会社では、IT推進部を中心に、「IoT時代に対応したデジタル化による抜本的な業務革新の実現」に向けたプロジェクトが進んでいる。この中では、最新のITテクノロジーを活用したデジタル化をもとにした、業務革新を進めているが、その一つとして、人工知能の活用も検討されている。

人工知能については、まだ実績の少ない技術であることから、その正確性や投資効果などを見極めるためにも、まずは実データを基にした検証から始めている。さらには、検証する中で、人工知能に関する技術習得を行い、業務への人工知能の適用に向けた準備を進めている。

(1) 人的ネットワーク解析ツール

新規素材・製品の研究開発および販売においては、社内外の知見者や新製品の見込み顧客とのネットワーク（人脈）が非常に重要である。これまでは、個人の経験に基づくネットワークを通じて、社内外の知見者や新製品の見込み顧客にたどり着いてきた。これを可視化することで、誰でもが社内外の知見者や新製品の見込み顧客にコンタクトすることが可能になる。さら

*11 ILSVRC (ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge) は、2010年から始まった、スタンフォード大学の「ImageNet」が主催する、大規模画像認識コンテストである。飛行機や人、ピアノなど様々なものが映っている写真データから、コンピューターに「何が映っているか」を検出・識別させる。

*12 2012年にディープラーニングが使用されるようになってから、それまでのエラー率25.7%から16.4%に一気に低下した。その後、2015年2月時点で、4.9%になり、人間のエラー率である5.1%を追い抜いた。現在では、3.5%まで低下している。

*13 技術的特異点（シンギュラリティ）は、レイ・カーツワイルによって提唱されたもの。人工知能の開発が一定の度合いを超えると、機械が人間の制御を凌駕し、人間の生活を恐ろしいまでに変容させてしまう、と言われている。2045年に訪れるとされており、「2045年問題」とも呼ばれる。2016年頃からメディアでも多く取り上げられるようになった。

に、直接関連のある素材・製品だけでなく、まったく別の角度ではあるが、実は関連する素材・製品の知見を元に、素材・製品の開発効率向上につながったり、新たな販売ルートの開拓に結び付く場合がある。

このようなネットワーク構築および関連する素材・製品をリコメンドする人工知能について、検証を行った。検証の概念図をFig. 2に示す。

ネットワーク構築については、特許情報、論文および名刺交換データを元に自然言語解析を行い、人名と素材・製品との関連を抽出し、その結果をグラフデータベース化した。関連する素材・製品のリコメンドについては、特許情報、論文の中に出現する素材・製品の情報を、LDA (Latent Dirichlet Allocation) *14を応用し、グルーピングすることを試みた。

検証の結果、グラフデータベース化*15によりネットワークを可視化することが可能になり、素材・製品を指定すると、自分を中心に関連する社内外の知見者や新製品の見込み顧客を検索するといった効果が見込め

るようになった。ただし、関連する素材・製品のリコメンドについては、思ったほどの成果は出せず、改良の必要が見られた。

ネットワーク情報については、社内外の情報を追加していくことにより、さらに実用的なネットワークを構築していくことができるため、住友化学株式会社内でのニーズを踏まえながら展開を検討する予定である。関連する素材・製品をリコメンドは、人工知能のアルゴリズムを変えるなどして、精度向上を目指していく予定である。

(2) 自然言語による問い合わせ回答

ヘルプデスクなどにおける電話やメールで行われる問い合わせは、現状では人間が対応している。当然のことながら、日本語や英語などの自然言語を用いて、問い合わせおよび回答を行っている。この業務について、人工知能を使って、自動化が可能かどうか、検証を行った。

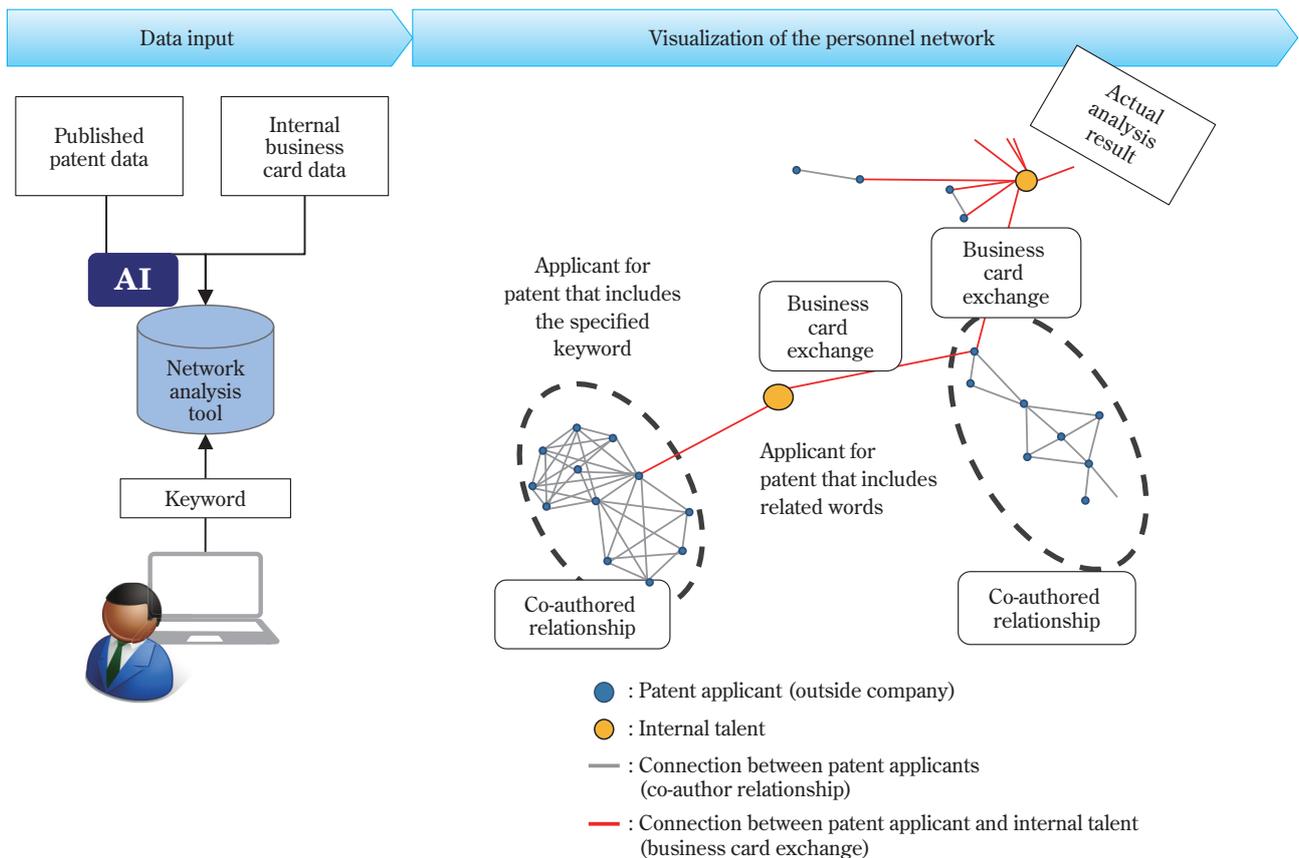


Fig. 2 How the personnel network analysis tool works

*14 LDAは、一つの文書が、複数のトピック（話題、カテゴリーなど）から生成されていると仮定して、そのトピックを文書から教師なし学習で推定する言語モデルの一種である。

*15 グラフデータベースは、ノード（頂点）群とノード間の関係性を表すエッジ（枝）群で構成されるデータ構造を持つデータベースである。

IBM®のWatson® API*16のNLC (Natural Language Classifier) *17を利用し、連結経営情報システム*18におけるFAQ*19のデータベースを元に、自然言語での質問をもとに回答する仕組みを検証した。なお、Watson®は、アメリカのクイズ番組であるJeopardy!で優勝したことから、情報（データ）を投入すれば、勝手に学習して結果を返すようになるイメージを持っている人も多いと考える。ただ、実際には、Jeopardy!で優勝したWatson®とサービスとして提供されているWatson®は、全くの別物である。Watson®に限らず、Microsoft®やGoogle®などが提供する、人工知能サービスは、一つもしくは複数の人工知能に関連した機能が提供されており、それらを組み合わせて利用することにより、何らかの課題解決ができるようになってきている。

問い合わせ回答の精度を高めるためには、問い合わせにあたる日本語文を複数パターン用意し、学習させる必要がある。本検証では、622の元となる問い合わせ文ごとに、各10パターンの関連する問い合わせ文を用意し、合計6220のデータを読み込ませた。

結果を、Table 3に示す。通常の問い合わせであり得るような普通の問い合わせに対して、70%程度の正答率であり、検証時点では利用可能とは言いがたい結果であった。

Table 3 Result of inquiry response using natural language

| Level | Definition | Correct answer rate |
|-----------|--|---------------------|
| Easy | Questions close to the original | About 95% |
| Normal | Simple sentence (Less than 40 characters), including complex words* Compound sentence (40 characters or more), no complex words | About 70% |
| Difficult | Compound sentence (40 characters or more), including complex words | About 50% |

* Complex words are words that combine words. For example, the management information system is composed of three words “management”, “information” and “system”. In Japanese processing, meaning differs depending on how words are delimited, so processing becomes difficult if complex phrases are included in sentences.

現在、当社では、CDC*20と連携し、ヘルプデスク対応などにおいて運用の自動化を検討している。この中で、ヘルプデスクにおける人工知能を活用した自動的な問い合わせ回答の実現を検討している。本検証で得られた自然言語処理の知見も活かして、自動化の実現に取り組んでいく予定である。

(3) 需要予測

「いつ」「どの製品に」投資するか、「いつ」「誰に」「いくらで」売るべきかのインプットとすべく、将来の需要・供給のバランスを予測する検証を行った。

LDPE (Low Density Polyethylene:低密度ポリエチレン) の1989年1月～2014年12月の国内生産量実績をもとに、ARモデルに基づく機械学習によって予測モデルの検証を行った。2015年1月～2015年12月を対象に、実績値と予測値を比較した結果、概ね実績を再現するような傾向を示す検証結果が得られた。

ARモデルは、パラメーターの過去の挙動が、近い将来に影響を与える事象の解析に用いられる。例えば、株価予測や経済予測等に用いられる。なお、実際の需要・供給のバランスは、原油・ナフサ、為替、各国GDP等の影響によっても左右されると考えられる。今回の検証では、国内生産量実績のみのデータを使用したため、ARモデルが最適と判断したが、ARモデル以外にも、MAモデル、ARMAモデル、ARIMAモデル、SARIMAモデルなどのアルゴリズムがあり、データの特性やデータの組み合わせによって、使い分けることにより、最適な予測が可能になる。

今後、さらにデータの組み合わせやアルゴリズムの最適化などを行い、さらに精度の高い予測や、LDPE以外への適用を検討する予定である。

3. 人工知能の活用に向けた課題

人工知能は、現在急速に発展してきているが、まだまだ誰もが簡単に活用できる技術ではなく、利用に向けての課題が大きい。

(1) 人工知能の適用領域に応じた個別開発

現状の人工知能は、弱い人工知能であるため、汎用的には使えず、特定の課題を解決するための専用の人

*16 Watson®は、IBM®が提供する人工知能の機能を提供するサービスである。IBM®は、人工知能とは呼称せず、コグニティブ (認知) ・コンピュータリングと呼んでいる。Watson®は、複数のAPI (Application Program Interface) と呼ばれるマイクロサービスで構成されている。
 *17 NLC (Natural Language Classifier) は、Watson® APIの一つで、NLCは、自然言語を解析し、同じ意図の質問をグルーピングすることができる。これにより与えられた質問が、どの分野に対する質問なのか判別でき、別の処理へ誘導したり、返答を行うなどが可能となる。
 *18 連結経営情報システムは、住友化学株式会社の基幹系業務を担う情報システムである。
 *19 FAQ (Frequently Asked Questions) は、よくある質問と回答をまとめたものである。
 *20 CDC (China Delivery Center) は、アクセンチュア®のシステム開発・保守の拠点。住友化学株式会社は、経営情報システムなどのヘルプデスクおよびシステム運用を委託している。

人工知能が必要である。この数年で、人工知能を搭載した製品・サービスが多く世に出回ってきたが、業務で活用しようとする、製品・サービスをそのまま適用することが難しい（パッケージシステムのように、システムを購入し、マスターやパラメーター設定だけで使えるイメージではない）。したがって、現状では特定の業務課題を人工知能で解決する場合、個別にプログラミングが必要になる可能性が高い。

現状の人工知能の発展から考察するに、この5年以内には、人工知能の活用事例が多くなり、人工知能を搭載した製品・サービスは、いずれある程度、パッケージシステムのように汎用的に利用できるようになると考える。しかし、将来的にそのような製品・サービスを利用するにしても、そのものの中身がわかっていなければ、より適切に活用したり、価値を判断したりすることはできない。

特にITの機能展開会社である当社は、現在のうちから、人工知能を活用した課題を個別開発しつつ、人工知能に関する技術を習得し、将来、より人工知能の製品・サービスが汎用化した際に、より効果的に導入が可能となるように備えていく必要がある。

(2) データの整備と人材育成

人工知能の根源となるものは、データである。人工知能の性能を上げていくためには、まずは、大量のデータを準備しなければならない。ただし、単純にデータがあれば良いというわけでは無い。正しい結果を導くためには、正しいデータが必要である。正しいデータは、人工知能を適用する目的や学習のための技術、プログラム、アルゴリズムなどの性質によって異なってくる。

なお、自動的に正しいデータを整備することはできない。逆に言えば、正しいデータを機械が自動的に整備できるようになれば、強い人工知能の実現に一步近づくことになる。自動的に正しいデータを整備する強い人工知能の開発については、まったく目途が立っていないため、正しいデータを整備するためには、人間の力が必要である。

正しいデータを整備するためには、人工知能の技術的背景を熟知しているだけでなく、データそのものの特性（いわゆる業務知識）にも精通している必要がある。これを兼ね備えられる人材を早急に得ることは非常に難しい。地道に人材を育成していく必要がある。

(3) 人工知能活用に向けたリテラシー

人工知能（特にディープラーニング）は、ロジックが見えないため（自動生成されているため）、どのような因果関係によって、答えが導き出されているかを知ることができない。なお、答えの確からしさについて

は、予測データ（人工知能が出した答え）と過去のデータを突き合わせることによって確認することはできる。ただし、将来も正しいとは限らない。また、人工知能は、100%正しいという答えも導き出すことは無く、常に間違ふ可能性がある（間違ふことに関しては、人間も変わらない）。

人工知能は、この前提を踏まえて活用する必要がある。

このとき、逐一人工知能が出した答えに根拠を求めよう活動をしていては、せっかく自動化して、業務効率を上げている意味がなくなる。人工知能を使う際には、その確からしさと、業務に求められる正確性とを比べて、人工知能が間違ふ際のリスクに対して対策をあらかじめ検討したうえで利用していく必要がある。

4. 活用に向けた今後の取り組み

「IoT時代に対応したデジタル化による抜本的な業務革新の実現」に向けたプロジェクトでは、前記の検証に加えて、研究素材の妥当性検証、素材のリポジショニングおよび予知保全など取り組みが予定されている。

また、今後とも人工知能の発展に応じて、業務ニーズを踏まえながら適用範囲を広げていく予定である。当社としても、このような機会を最大限生かしながら、社内に人工知能に関する技術を持った人材を育て、住友化学グループに人工知能による業務改革をより早期に実現できるように活動を進めていく。

おわりに

人工知能の活用は、これまで人でしか行えなかった業務を自動化することで、人員削減につながるようにもとれがちではある。

ただし、特に日本では、この先少子高齢化が進む中で労働人口がますます減少していく。結果的には、住友化学グループにおいても人材の確保が難しくなり、少ない人員で、技術継承をスムーズに行いつつ、より一層の業務効率化、生産性向上を目指していく必要に迫られていく。

このような状況を考慮すれば、人間はより人間にしかできないことに注力し、人工知能で自動化できることを人工知能に任せていくことが住友化学グループを発展させていくことにもつながると考える。

そういった意味からも、十分に人工知能が成熟し、業務に活用できるようなるであろう、この5年の間には、人工知能の技術を住友化学グループに取り込み、より一層の業務効率化、生産性向上が可能となる状況を作り出していくことが重要である。

引用文献

- 1) J. McCarthy, M. L. Minsky, N. Rochester and C. E. Shannon, "A PROPOSAL FOR THE DARTMOUTH SUMMER RESEARCH PROJECT ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE (August 31, 1955)", <http://www-formal.stanford.edu/jmc/history/dartmouth/dartmouth.html> (参照2017/4/6).

PROFILE



本田 仁
Hitoshi HONDA

住友化学システムサービス株式会社
IT戦略室
担当部長

炭素鋼鋼管の高速検査技術

—磁束抵抗法 (MFR: Magnetic Flux Resistance)—

住友化学株式会社 生産安全基盤センター

末次 秀彦 多田 豊和

はじめに

化学プラントでは冷却水（淡水）で冷却する炭素鋼製多管式熱交換器が多数使用されているが、伝熱管の冷却水側から孔食状の腐食が発生し、最終的には貫通して漏れに至るケースもある。これを抑制するためには、設計段階、運転段階および検査・診断段階で様々な注意が必要である。設計段階では熱交換器の設置方向（縦型、横型）、冷却水の流路（管内・管外）、流速、温度等について検討される。また、運転段階では冷却水水質の管理範囲を定めて継続的に監視するとともに、冷却水の流速の維持に努めている。そして検査・診断の段階では開放検査において錆の発生状況や付着物の状況を目視で確認するとともに、検査周期を定めて伝熱管の肉厚測定を行い、漏れに至るまでの寿命の予測、漏れた場合のリスク等を評価して、熱交換器の次回検査時期や更新時期を決定している。

炭素鋼製熱交換器伝熱管の肉厚測定方法としては、水浸回転式超音波厚さ測定法（IRIS: Internal Rotary Inspection System）が世界の主流検査技術として適用されている。これは±0.1mmという従来の検査診断技術の中で最も高い肉厚測定精度を有しているためである。一方で1日あたりの検査本数が100本程度と少なく抜取検査にならざるを得ないため、測定値を全体の代表値とする、あるいは極値統計法を組合せた最大腐食減肉量の推定値を用いて、その後の評価を実施しているのが実状である。このような中で、炭素鋼製伝熱管の高速検査と高精度評価を両立することをコンセプトとして技術開発を進めた結果、磁束抵抗法（MFR: Magnetic Flux Resistance）という新しい概念の検査技術の開発に成功した^{1), 2)}。本技術を実機検査に採用して検証を重ねた結果、IRISと比較して検査速度で5倍以上のスピードを実現しながら、メンテナンス計画の立案に必要な肉厚情報として十分な評価精度（±0.2mm）を有していることが確認された。本稿ではMFRの原理や特徴について紹介する。

測定原理

MFRの原理をFig. 1に示す。永久磁石とヨークおよび炭素鋼製伝熱管によって形成される磁気回路中の磁束密度をホール素子で測定する。炭素鋼製伝熱管の肉厚が減少して断面積が減少すると、磁気回路の流路が狭まることにより、磁気抵抗が増加して磁束の流れが減少する。特に炭素鋼製伝熱管が磁気飽和に近くなるような強い磁化領域では、炭素鋼製伝熱管の肉厚に応じて、磁気回路中の磁束密度が線形的に変化する。このとき、ホール素子を通過する磁束と出力電圧には比例関係があるので、ホール素子の出力電圧から素子部の局所的な肉厚を評価できる。具体的にはプローブが空中にある状態（Fig. 1左側）では最も磁気抵抗が大きくなり、管の肉厚が最も厚い健全部（Fig. 1右側）では磁気抵抗は最小になる。そして管の肉厚が減少すると（Fig. 1中央）その肉厚に比例して磁気抵抗が変化する。また、管内に挿入するプローブの周方向にホール素子を複数配置し、ホール素子の出力電圧値の分布を計測することで、管の周方向の減肉形状を推定することができる。

評価方法と測定精度

Fig. 2は管内面に深さと角度を変えて扇型の模擬減肉を加工した試験片を、周方向にホール素子を8個設置した8チャンネル型のMFRプローブで測定した結果である。縦軸に断面欠損率、横軸にホール素子の出力電圧の合計値を取って示しているが、良好な線形的な関係が認められている。このように、プローブの周方向に配置した8個全てのホール素子の電圧出力値を合計した値は、減肉形状に関係無くホール素子を配置した位置の管の断面欠損率に比例することがわかる。次にFig. 3に示した様に各チャンネルのホール素子からの電圧信号の強度分布に注目する。電圧信号の強度分布は減肉形状に対応しているため、減肉の形状を扇型と仮定して、減肉の周方向の発生範囲を決定する。全

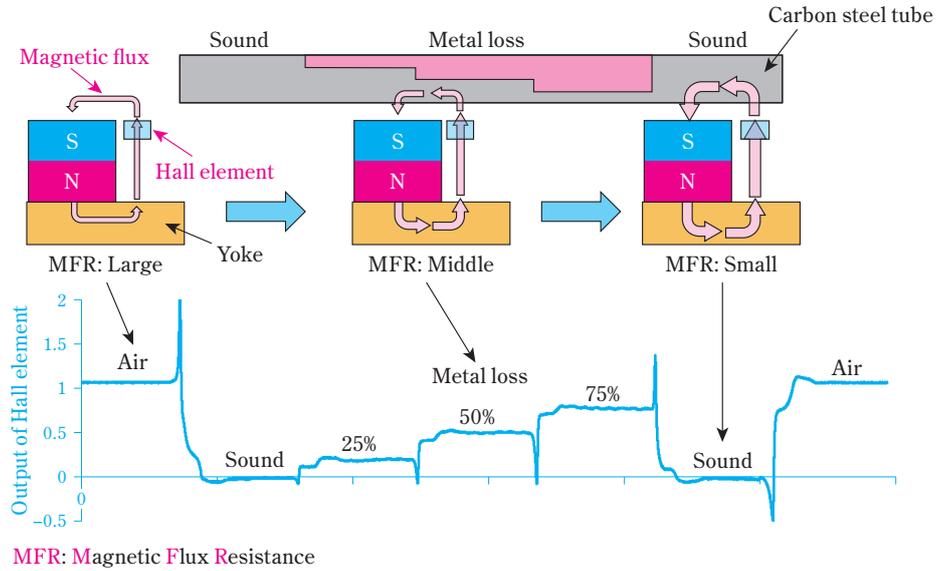


Fig. 1 Measurement principle of MFR

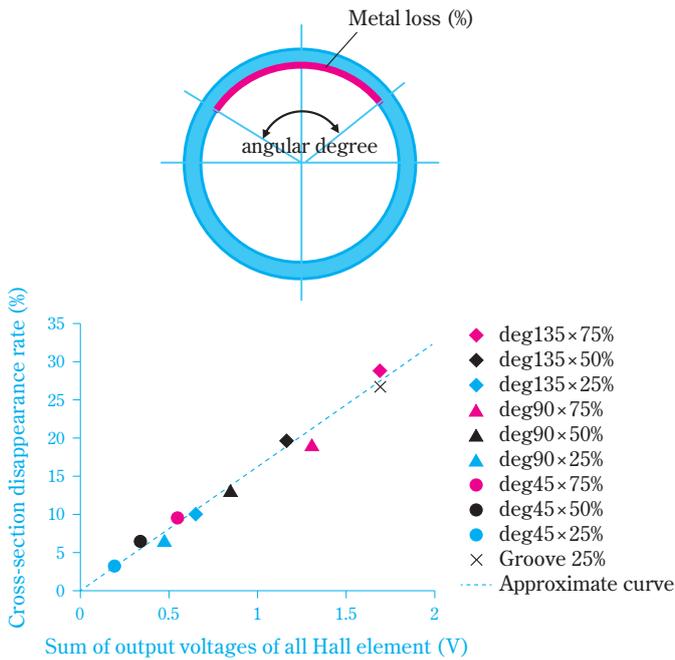


Fig. 2 Evaluation of cross-section disappearance rate by MFR

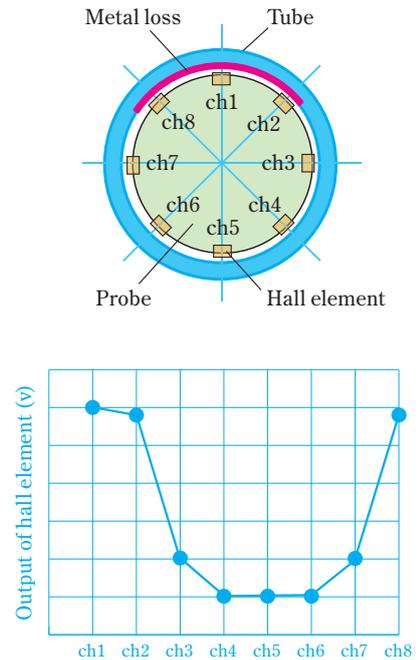


Fig. 3 Hall element location and signal distribution

ホール素子の電圧出力の合計値から求めた断面欠損率と全ホール素子の出力電圧の分布から求めた扇型形状の減肉範囲 (角度) から減肉深さを計算で求める。

開発した MFR で炭素鋼製伝熱管の検査を実施して肉厚評価精度を検証した結果を Fig. 4 に示す。横軸に

MFR による肉厚の評価値、縦軸に肉厚の実測値をとって比較した。冷却水通水環境で使用される炭素鋼製伝熱管の腐食形態は Fig. 5 に示した様な全面減肉と局部減肉が混在した複合減肉となるが、MFR の測定精度は概ね $\pm 0.2\text{mm}$ を達成している。これは、熱交換器の

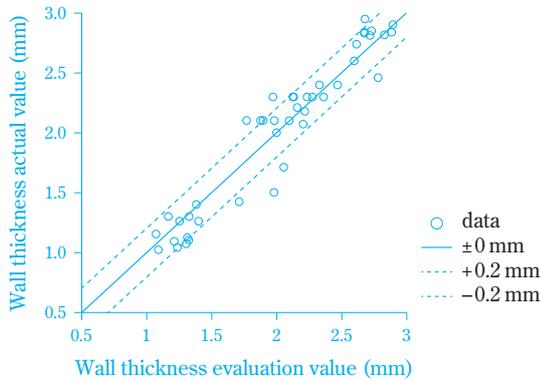


Fig. 4 Accuracy of thickness evaluation by MFR

メンテナンス計画の立案に必要な肉厚情報として十分な評価精度である。

従来技術との比較

炭素鋼製伝熱管の検査は先述のIRISに加えて、国内ではRFECT (Remote Field Eddy Current Testing: リモートフィールド渦流探傷試験) が適用されており、海外ではこれらの手法に加えてMFL (Magnetic Flux Leakage: 漏洩磁束法) が採用されている。これら従来の方法とMFRについて様々な視点から比較した結果をTable 1に示す。

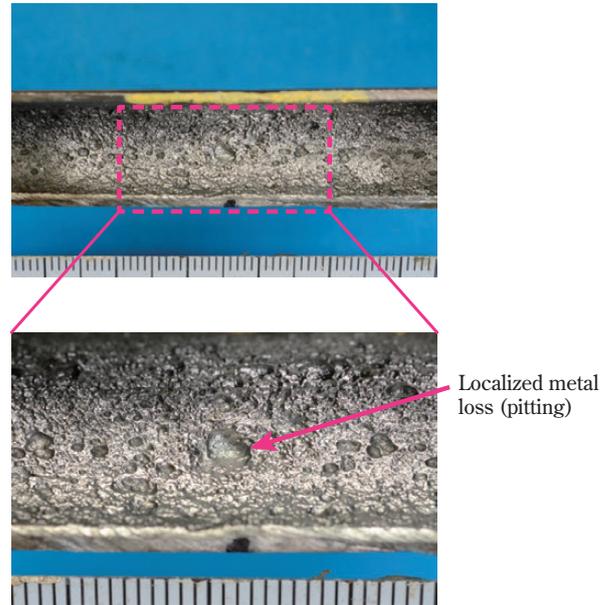


Fig. 5 Typical corrosion of carbon steel tubes in cooling water service

1. 測定原理と評価精度

各手法の測定原理はFig. 6に示した様にIRISが伝熱管への超音波の反射や透過に要した時間を計測し、MFLは伝熱管を磁化して減肉部から漏れ出た磁束を計測し、RFECTは減肉部によって変化した渦電流を間接

Table 1 Characteristics of MFR

| Method | IRIS | MFL | RFECT | MFR |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------------------|
| Measurement principle | Ultrasonic | Magnetic Flux Leakage | Eddy Current | Magnetic Flux Resistance |
| Accuracy | ○ ±0.1mm | × | × | ○ ±0.2mm |
| Speed | × | ○ | ○ | ○ |
| | 100tube/day | 500tube/day | 500tube/day | 500tube/day |
| Small DIA tube | ○ | ○ | ○ | △* |
| | ≤ φ19.05 | ≤ φ19.05 | ≤ φ19.05 | ≥ φ25.4 |
| Influence of scale | × | △ | △ | ○ |
| | Inspection impossible | Reduced accuracy | Reduced accuracy | Ensured accuracy |
| Medium | Water | Unnecessary | Unnecessary | Unnecessary |
| Remarks | Low sampling rate | Screening inspection | Screening inspection | 100% inspection High sampling rate |

IRIS: Internal Rotary Inspection System
 MFL: Magnetic Flux Leakage
 RFECT: Remote Field Eddy Current Testing
 MFR: Magnetic Flux Resistance

* φ19.05: Under development

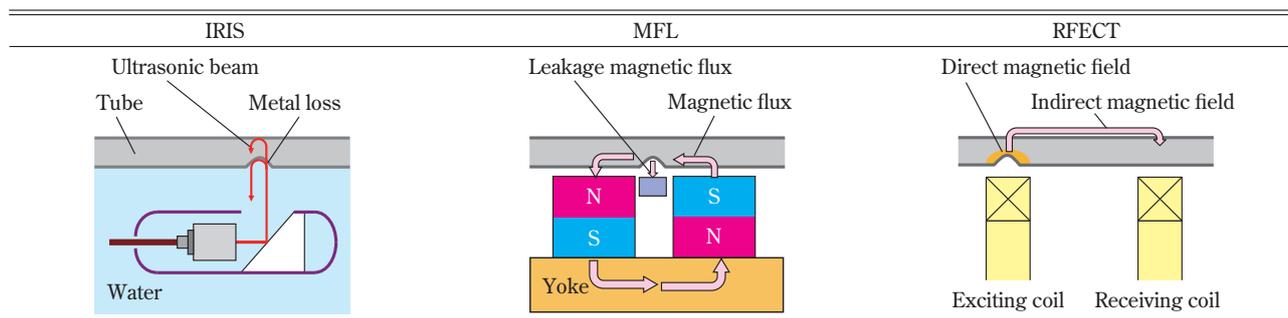


Fig. 6 Measurement principle of each method

磁場の変化として計測している。IRISについては、超音波を効率よく伝熱管に伝播させるために水を媒質として使用する必要があるが、その他の方法は電磁気を利用しているため特別な媒質は必要ない。測定精度を比較すると、IRISは肉厚の変化を超音波の伝播時間の変化として計測しているため $\pm 0.1\text{mm}$ という高い測定精度を達成している。MFRは前述したように伝熱管の断面積を磁束抵抗の変化として正確に計測しているが、肉厚を求める段階で扇型モデルを仮定して計算しているため若干測定精度が低下し、 $\pm 0.2\text{mm}$ となっている。MFLとRFECTについては、肉厚の変化に伴って相対的に変化する事象を計測しているため、検査対象物の腐食状況（腐食形態）に影響されやすく、高い測定精度を確保することは難しい。

2. 検査速度とスケールの影響

検査速度については長さが4~5mの伝熱管の場合、IRISが1日あたり100本程度であるのに対してMFL、RFECT、MFRについては500本程度が可能である。スケールの影響についてはIRISではスケールが管肉厚方向への超音波の伝播阻害要因となる。スケールの付着量の増加は測定データ数の減少をもたらし、同時に最大減肉深さの評価値の信頼性を低下させる。MFL、RFECTについてはスケール中への磁気の漏洩や渦電流の発生が考えられ、評価値に影響を及ぼすものと思われる。このような中でMFRは非常に強力な磁場を伝熱管に与える関係で、比透磁率が低い腐食スケール程度であれば磁気飽和させてしまうため、測定精度に全く影響しないことを確認済みである。従って、検査の前処理として行われるジェット洗浄の程度はプローブが伝熱管内に挿入できる程度でよく、前処理時間を含め

てより一層の検査時間の短縮が期待できる。

3. 検査可能な管サイズ

小径管への対応という面ではIRIS、MFL、RFECTは管外径が $\phi 19\text{mm}$ 以下の管に対しても適用が可能である。これに対してMFRは原理上、管に強い磁場を与える必要があるが、プローブの小径化に伴って磁化力が低下し、必要な磁場を与えることが困難になる。よって、現状はJIS G 3461のSTB規格（ボイラ・熱交換器用炭素鋼管）による外径 $\phi 25.4\text{mm}$ で肉厚2.6mmの伝熱管（公称内径 $\phi 20.2\text{mm}$ ）が適用可能な最小サイズとなる。なお、外径 $\phi 19\text{mm}$ の伝熱管に対応するプローブについては鋭意開発中である。

装置構成とデータ解析

MFRを用いて炭素鋼製熱交換器（管寸法： $\phi 25.4 \times 2.0\text{t} \times 2495\text{L}$ ）の検査を実施する場合の装置構成をFig. 7に示した。MFRプローブ、それを駆動するMFR装置、データ処理を行うPC（Personal Computer）で構成される。MFR装置は単三型バッテリー4本で駆動し、約4時間の連続検査が可能である。Fig. 8には炭素鋼製伝熱管のMFRによる検査状況を示した。現場検査で取得したデータは、解析ソフトがインストールされたPCで自動解析され、伝熱管1本ごとの最小肉厚値が一覧表の形式で出力される。なお、データ解析に要する時間は1本あたり10秒程度である。

まとめ

当社ではMFRという新しい概念の炭素鋼管の高速・高精度な検査技術を開発した。その特徴を次の通りまとめる。

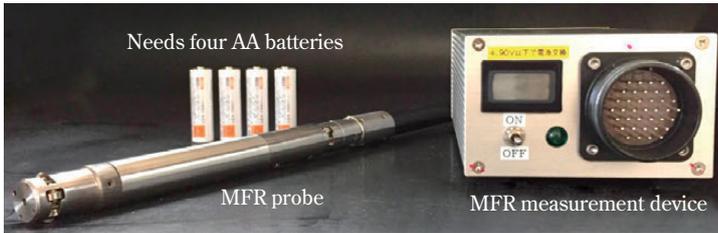


Fig. 7 Configuration of measurement device

- ・肉厚測定精度：±0.2mm
- ・検査速度：500本／日（4～5m長さの伝熱管、作業時間8時間の場合）
- ・管内清掃程度：プローブが通過できる程度（腐食スケールの影響なし）

MFRの高速で高精度な検査性能を活かして、伝熱管の全数検査あるいは抜取率の向上を実現するとともに、腐食速度評価、余寿命予測精度の向上につなげることができる。これは炭素鋼製熱交換器のメンテナンス時期



Fig. 8 Inspection status of heat exchanger by MFR

の最適化につながり、メンテナンスコストとプラントの安全・安定操業を高次元でバランスさせることが可能となる。

引用文献

- 1) 住友化学(株), JP 2017-026353 A.
- 2) 住友化学(株), JP 2017-026354 A.

幹細胞を利用した代替法開発 — *in vitro* 神経毒性評価法 —

住友化学株式会社 生物環境科学研究所

小林 久美子

はじめに

近年、欧州REACH (Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals) や日本の化審法 (化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律) では、既存化学物質を含む全ての化学物質を対象として、数量に応じたリスク評価を行う事が求められている^{1), 2)}。従って、膨大な数の化学物質の安全性評価が必要となり、動物福祉や評価の効率化の観点から実験動物を用いない各種代替法の開発が進められている。代替法開発の一環として当社は2011年から5年間、経済産業省のプロジェクト「石油精製物質等の新たな化学物質規制に必要な国際先導的有害性試験法の開発」に参画し、*in vitro*神経毒性試験法の開発を行った。

ところで、神経細胞により構成される脳は運動・記憶・思考などの情報伝達機能を制御する組織であり、化学物質の神経細胞への影響 (神経毒性) を調べることはヒト健康影響を評価する上で重要な項目の一つと

なっている。その神経毒性は、化学物質の「神経細胞の形態 (構造)」と「神経細胞の情報伝達機能」に対する影響を調べる事で評価できる³⁾。

胎児期から幼児期頃における神経回路形成期に、神経細胞は、その産生 (神経への分化)、増殖、神経突起の伸長・結合などを活発に行う事で神経回路を形成する。化学物質への曝露がこの時期に起こると、神経細胞の産生や神経突起の伸長等の「神経細胞の形態」に影響を及ぼす一方、神経回路形成後での曝露では加えて「神経細胞の情報伝達機能」にも影響を及ぼすと考えられている⁴⁾。

そこで、*in vitro* (試験管内) で上記の多様な神経毒性を幅広く捉える為に、マウスES細胞 (embryonic stem cells) を活用し、*in vivo* (生体内) の神経発達過程を*in vitro*で再現した。神経回路形成期の「神経細胞の形態」への影響を評価する為に、①神経分化、及び、②神経突起伸長を指標とし、又、神経回路形成後の「神経細胞の情報伝達機能」への影響評価では、

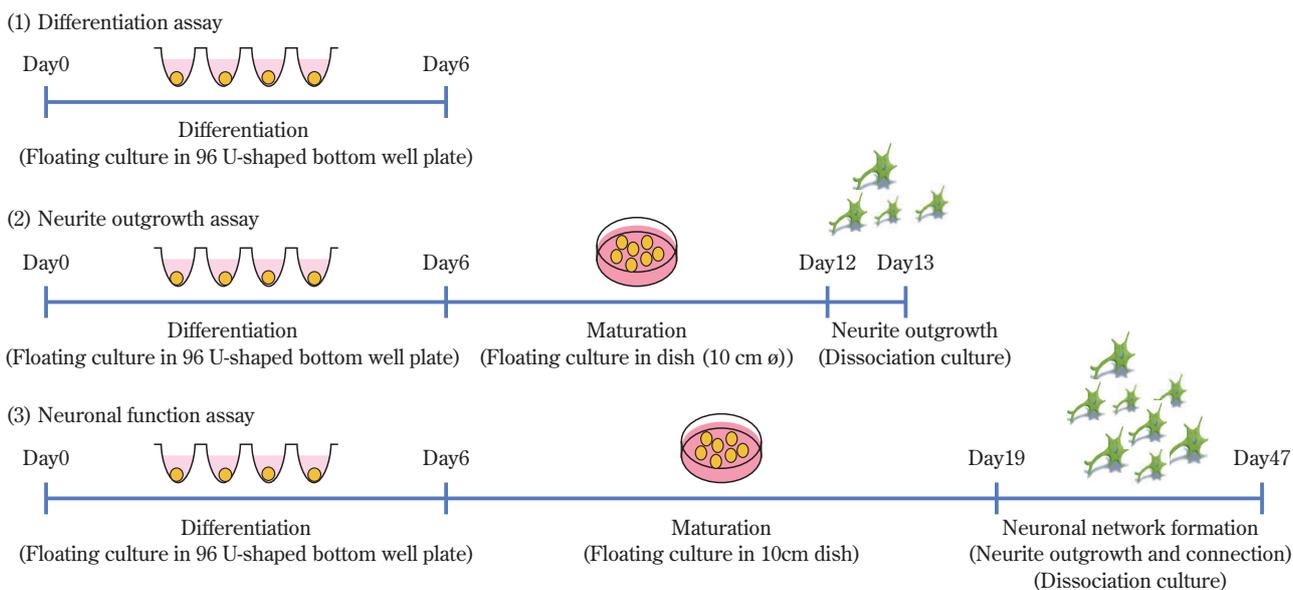


Fig. 1 Three *in vitro* neurotoxicity assays using mouse ES-induced neurons

③神経細胞の電気活動機能を指標に用いる事とした。

マウスES細胞からの神経細胞作製

ES細胞は試験管内でさまざまな細胞に分化する能力を持っている。我々はマウスの受精卵から作製したES細胞から、球状の細胞塊（胚様体）を経て神経細胞へと分化する神経細胞作製方法を確立した。本分化誘導法を基盤技術として、以下の各評価法の開発を行った（Fig. 1）。

「神経細胞の形態」評価法1：神経分化への影響評価法の開発

神経細胞への分化に重要な役割を果たす遺伝子の発現量の変化を指標として分化への影響を評価した。我々は、神経分化の際に発現が誘導されるTubb3及びReIn遺伝子に着目し、その発現量と相関して発光量が変化する「光るES細胞（Tubb3_Luc細胞及びReIn_Luc細胞）」を作製した。この「光るES細胞」を用いた種々の検討により、化学物質による神経分化への影響を迅速かつ簡便に評価できる方法を構築した。具体的には、前述の分化誘導法で培養した「光るES細胞」に化学物質を添加し、分化開始後6日間、細胞からの発光量を測定するという簡便な方法である。神経回路形成期の神経細胞に毒性を引き起こすことが報告されているホウ酸では、本評価法で低濃度から発光量の低下が認められ、毒性がないとされているエチレングリコールエチルメチルエーテルでは発光量に影響は認められず、期待通りの結果が得られた（Fig. 2）。神経毒性の15陽性

物質、17陰性物質について同様の評価を行った結果、Tubb3_Luc細胞及びReIn_Luc細胞での全体の予測率（陽性・陰性物質を正しく判定した割合）は、それぞれ72%及び80%と良好であった。

「神経細胞の形態」評価法2：神経突起伸長への影響評価法の開発

細胞イメージアナライザーにより神経細胞の形態を高速かつ簡便に自動測定し、神経突起伸長への影響を評価する手法の開発を行った。まず、複雑な神経細胞の形態を自動認識させる為に細胞密度や染色方法を最適化した。次いで、神経細胞の染色像を自動撮影し、神経突起と細胞体を区別するパラメータを神経細胞の線の連続性、長さ、太さ等から設定し、神経突起の長さを自動定量できる方法を開発した。この自動定量法を用い、ES細胞分化開始後12日目に化学物質を添加し、24時間後に伸長した神経突起の長さから毒性の有無を判定する評価法を構築した（Fig. 3）。本手法を用いて、ヒトの疫学的調査で子供の脳の成長に影響を及ぼすことが報告されている（メタ）亜ヒ酸ナトリウムや塩化メチル水銀（II）を含めた神経毒性を有する化学物質、及び、サッカリンやドデシル硫酸ナトリウム等の神経毒性を示さない化学物質について評価した。塩化メチル水銀（II）では、神経突起の長さの低下から神経突起伸長の抑制が示唆されたが、サッカリンでは神経突起の長さへの影響は認められなかった（Fig. 4）。14陽性物質及び11陰性物質について評価した結果、全体の予測率は84%であった。

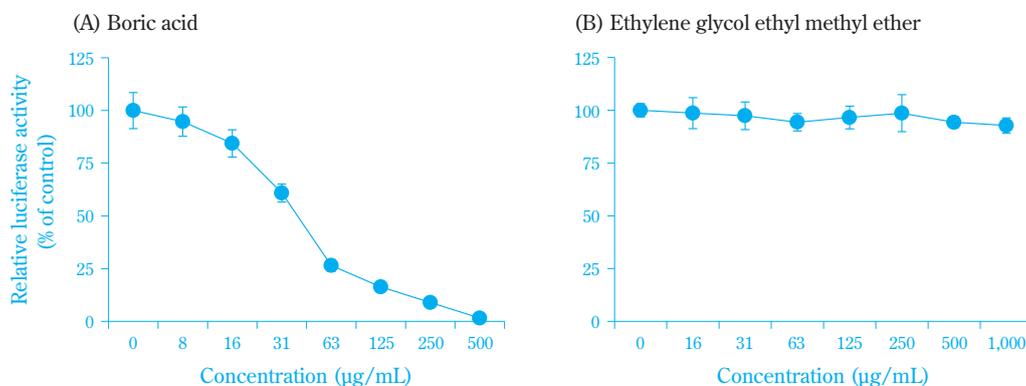


Fig. 2 Luciferase activity of ReIn-Luc cells treated with boric acid (A: positive chemical) and ethylene glycol ethyl methyl ether (B: negative chemical) during the differentiation period day 0 to 6. Data represent the mean \pm S.D. (n=6). Control: non-treated cells

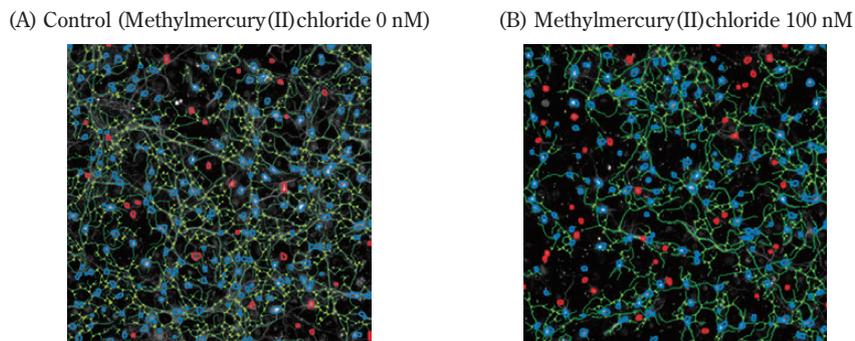


Fig. 3 Automatically discerned mouse ES-induced neurons using an imaging analyzer
Representative images treated with methylmercury(II)chloride 0 nM (A) and 100 nM (B), respectively.
Blue circle: alive neurons, red circle: dead cells, green lines: neurites

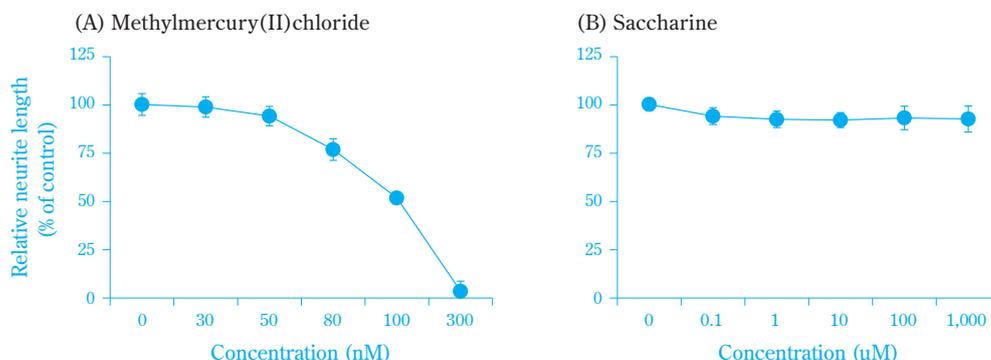


Fig. 4 Total neurite length treated with methylmercury(II)chloride (A: positive chemical) and saccharine (B: negative chemical)
Data represent the mean \pm S.D. (n=6). Control: non-treated cells

「神経細胞の情報伝達機能」評価法：神経細胞の電気活動機能への影響評価法の開発

神経細胞は電気活動により情報を伝達する為、多点電極アレイ (multi electrode array) を利用して、「神経細胞の情報伝達機能」を神経細胞の電気活動 (シグナル) として捉えて評価する手法を構築した。多点電極アレイとは64点の平面電極が装着された培養皿 (Fig. 5) のことで、この中で神経細胞を培養すると、平面電極に接触した神経細胞のシグナルを簡便に記録できるものである。

神経細胞は周りの神経細胞と結合する事で神経回路を形成し情報を伝達する。神経回路の形成には、神経細胞だけでなくグリア細胞 (神経組織を構成する神経細胞ではない細胞) が重要な役割を果たすことが知られている為、まず、両細胞を同時に誘導する培養方法を確立した (Fig. 6)。ところで、多点電極で記録され

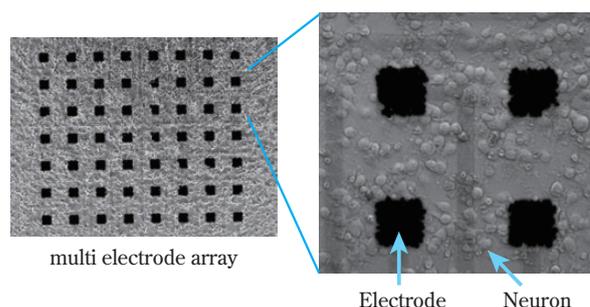


Fig. 5 Neuronal culture on multi electrode array

るシグナルは、神経回路の未形成下では、個々の細胞で独立して観測されるが、一旦、神経回路が形成されると各細胞のシグナルが同調 (同期) して観測される。この現象を利用し、培地中に添加する栄養因子や培養日数などの条件検討を通して神経回路の形成方法を

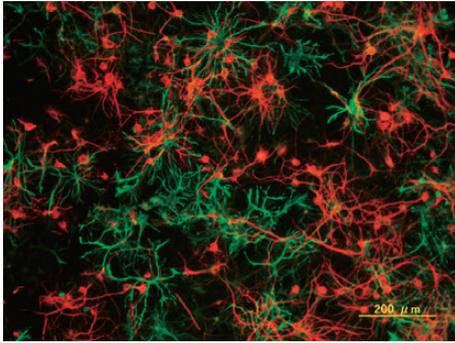


Fig. 6 Neurons and glia cells derived from mouse ES cells
Red: neurons, green: glia cells

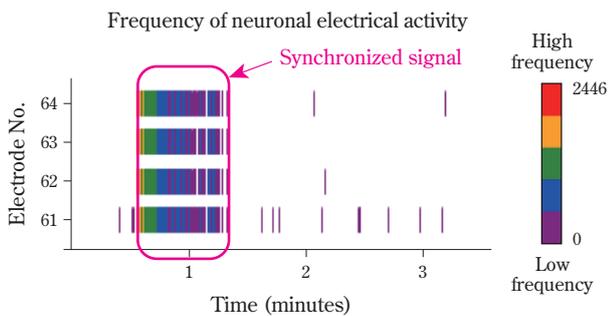


Fig. 7 Graphic representation of neuronal electrical activity occurrences on multi-electrode array
Synchronized electrical activity was observed.

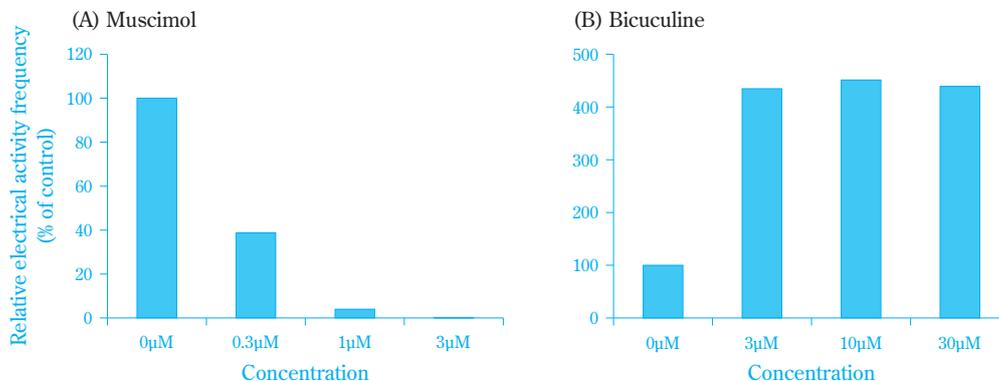


Fig. 8 Neuronal electrical activity treated with muscimol (A: neuronal activity depressant) and bicuculline (B: neuronal activity stimulant)
Control: non-treated cells

確立した。同条件下、グリア細胞が産生し始める分化開始後19日目の細胞を多点電極アレイ上で3-4週間培養しシグナルを観測した結果、神経細胞同士が結合して情報伝達機能を発現していることを示唆する「同期した電気活動」を確認することができた (Fig. 7)。神経細胞の情報伝達を抑制する化学物質ムシモール、あるいは、その情報伝達を亢進させる化学物質ビククリンを添加し、シグナルを測定した。その結果、前者では神経細胞の電気活動の減少が、後者では増加が認められた (Fig. 8)。以上の様に、マウスES細胞から作製した神経細胞を用いた化学物質による情報伝達機能への影響評価法を構築することができた。

おわりに

これまで、神経毒性評価法としては動物を用いた *in vivo* 評価法が主流であったが、近年、米国や欧州を中心に *in vitro* 評価法の構築や整備が盛んになってきている。当社でも、この技術革新の潮流に乗り遅れることなく、マウスES細胞から分化誘導した神経細胞を用いて、各種神経毒性の *in vitro* 評価法を開発した。

一般的に *in vitro* 評価法では、動物福祉に加えて、多数検体の処理、経費削減及び時間短縮など様々なメリットがある。従って、既存化学物質の規制強化への対応だけでなく、製品開発段階においても効率的に安全性の高い化学物質を見出すことに活用できる。今後、更なる検証を通して予測率の向上に努め、当社製品の開発・維持の為に、今回開発した *in vitro* 神経毒性評価法を活用してゆきたい。

引用文献

- 1) 経済産業省, “化審法におけるスクリーニング評価・リスク評価”, http://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/kasinhou/information/ra_index.html (参照2017/3/30).
- 2) 田中 弘幸, NEW GLASS, **22** (4), 48 (2007).
- 3) “Guidelines for Neurotoxicity Risk Assessment”, *Federal Register*, **63** (93), 26926 (1998).
- 4) B. Z. Schmidt, M. Lehmann, S. Gutbier, E. Nembo, S. Noel, L. Smirnova, A. Forsby, J. Hescheler, H. X. Avci, T. Hartung, M. Leist, J. Kobilák and A. Dinnyés, *Arch. Toxicol.*, **91**, 1 (2017).

患者由来iPS細胞を用いた進行性骨化性線維異形成症 (FOP) の病態解明

大日本住友製薬株式会社

先端創薬研究所

ゲノム科学研究所

京都大学

iPS細胞研究所

日野 恭介*¹

海老瀬 速雄

池谷 真

堀込 一彦*¹

戸口田 淳也*³

池田 篤史*²

はじめに

iPS細胞 (induced Pluripotent Stem cell、人工多能性幹細胞) は、山中4因子と呼ばれる4つの転写因子を線維芽細胞等の体細胞に導入することにより作製されるES細胞と同様の能力を持つ多能性幹細胞であり、2006年にマウスiPS細胞¹⁾、2007年にはヒトiPS細胞の作製が報告された²⁾。2017年はヒトiPS細胞の作製から10年の区切りの年となるが、iPS細胞から作製した網膜色素上皮細胞の加齢黄斑変性患者への移植がすでに行われるなど、iPS細胞を用いた再生医療は臨床応用の段階に入っている。また、本邦においてはパーキンソン病や網膜色素変性症及び脊髄損傷についても治験や臨床研究が計画されており、iPS細胞を用いた移植治療はますます発展していくものと思われる。

一方、基礎研究や創薬におけるiPS細胞の有用性についても多数報告されている。患者からの採取が難しい組織の細胞をiPS細胞から作製し、これを簡便な解析や薬剤スクリーニングに用いる試みは多くの製薬会社やアカデミアで精力的に行われている。また、ヒトでの薬効や毒性をより正確に予測するため、iPS細胞由来の細胞とデバイス等を組み合わせることで心臓や肝臓といった臓器の構造や機能を再構成することを目指した“Organ-on-a-chip”技術や、ヒトの臓器・組織の立体構造を*in vitro*で再現する“オルガノイド”技術の研究もさかに行われており、疾患の原因や病態の解明、治療薬の探索などに活用可能な試験系として大きく期待されている³⁾。近年、モデル動

物で有効であった薬剤がヒトでの臨床試験では無効であった例が多数報告されている⁴⁾。このような事情からも、iPS細胞は今後ますます、ヒトでの薬効や副作用を予測できる必須なツールとなっていくことが予想される。今回、患者由来iPS細胞を用いた研究の事例として、京都大学iPS細胞研究所との共同研究の成果を紹介する。

FOP患者由来iPS細胞を用いたFOP病態の解明

1. 進行性骨化性線維異形成症 (FOP) とは？

筆者らは、患者由来iPS細胞を用いることにより、FOP (Fibrodysplasia Ossificans Progressiva、進行性骨化性線維異形成症) の病態解析を行ってきた⁵⁻⁷⁾。FOPは、罹患率は約200万人に1人とされ、本邦での患者数は70-80人程度と考えられている非常に稀な遺伝子疾患である。臨床的には、筋、筋膜、腱、靭帯といった通常は骨が形成されない軟部組織に小児期から徐々に骨化巣が出現する、進行性の異所性骨化を特徴とする⁸⁾。また、外傷や外科的侵襲、感染などの炎症を惹起するエピソードにより骨化が劇的に進行する“フレアアップ”と称される現象が起こることが本疾患の特徴である。異所性骨の出現には強い痛みや炎症が伴い、また患者は脊柱、胸郭、四肢関節等の可動性が失われ、その結果、開口や喀痰排出や運動など、日常生活における動作が著しく障害される。BMP (Bone Morphogenetic Protein、骨形成因子) のI型受容体の1つであるACVR1の経配偶子点突然変異がFOPの原因であることが2006年に報告されている⁹⁾。この変異の存在により、ACVR1がリガンドであるBMPの非存在下でも恒常的に活性化される、またはBMPによって過剰に活性化されることがFOPの病因であると考えられてきた。

*1 京都大学 iPS細胞研究所 民間等共同研究員

現所属: 大日本住友製薬株式会社 研究本部 疾患iPS創薬ラボ

*2 現所属: 大日本住友製薬株式会社 研究本部 疾患iPS創薬ラボ

*3 京都大学 ウィルス・再生医科学研究所、大学院医学研究科 兼務

しかしながら、外傷などの炎症を惹起するエピソードで骨化が劇的に進行する“フレアアップ”をうまく説明できないなど、詳細なメカニズムに関してはまだ不明な点が多く、治療薬の開発のためにはさらなる研究が必要であった。FOP患者と同じ変異を持つ遺伝子組み換えマウスの存在も知られていたが、出生後致死となることから、ヒトとマウスの病態に種差があることが示唆されていた¹⁰⁾。このような背景からFOP患者由来の組織を用いた解析が有効であると思われたが、外科的手術の刺激により、病状の悪化を引き起こす恐れがあることから、患者の異所性骨化部分からの試料採取は禁忌である。一方、FOP患者由来のiPS細胞は、一度作製すればほぼ無限に増殖することが可能であり、さらに理論的にはほぼすべての細胞に分化できる。このような特徴から、FOPの病態解析研究において患者由来iPS細胞とその分化細胞を活用することには非常に大きなメリットがある。

2. FOP特異的シグナルの同定

筆者らはまず、FOP患者の90%以上で見ついているR206H変異ACVR1 (FOP-ACVR1) を有する患者由来の体細胞からiPS細胞 (FOP-iPSCs) を樹立した。さらに、このiPS細胞から相同組換えによりFOP-ACVR1を野生型に修復した、遺伝子背景が同一のコントロール細胞 (Rescued FOP-iPSC、以下resFOP-iPSCs) を作製した。また、iPS細胞から骨や軟骨の起源細胞の一つである間葉系間質細胞 (induced Mesenchymal Stromal Cells、以下iMSCs) を経由してstep by stepに骨あるいは軟骨を分化誘導する実験系を構築した¹¹⁾。この実験系を用いてFOP-iPSCsからiMSCs (以下、FOP-iMSCs) を作製したところ、これまでに別の実験系で見出されていたBMPシグナルの亢進や骨軟骨への

分化能亢進が再確認された⁶⁾。しかし、FOP-iMSCsにおけるBMPシグナルの亢進はごくわずかであり、一般的なアッセイ条件における骨軟骨への分化能の亢進も顕著ではなかった。

このような背景から、FOPの本質的な原因は上記のBMP応答性の亢進以外にあると着想し、野生型のACVR1には作用しないが、FOP-ACVR1に対してはシグナルをonにする作用を持つリガンドがあるという仮説を立て、BMP同様にTGF- β スーパーファミリーに属するリガンド約30種類について、FOP-iMSCs及びresFOP-iMSCsへのBMPシグナル活性化能を検討した。その結果、本来はTGF- β シグナルを伝達するが、BMPシグナルは伝達しないActivin-Aが、FOP-iMSCsに対してのみBMPシグナルをonにするを見出した⁷⁾ (Fig. 1)。

3. FOP特異的シグナルの*in vitro*での解析

次に「Activin-AがFOP-ACVR1特異的にBMPシグナルを伝達する」という現象が、実際に病態に関与する表現型 (フェノタイプ) に影響するかどうか、*in vitro*で検討を行った。FOPにおける異所性骨化は、まず異所性に軟骨が出現し、続いてこの軟骨が骨組織へと置換される“内軟骨性骨化”という様式で形成される。そこで、骨化の最初のステップである軟骨分化に対するActivin-Aの作用を*in vitro*で解析した。まずは簡易なアッセイ系である2Dの軟骨分化アッセイを用いて、軟骨分化に重要なことがすでに知られているTGF- β 3やBMP-7の作用とActivin-Aの作用を比較検討した。その結果、TGF- β 3はFOP-iMSCsとresFOP-iMSCsではほぼ同様の分化誘導能を示し、BMP-7ではややFOP-iMSCsで分化亢進が認められたのに対し、Activin-AはresFOP-iMSCsと比較しFOP-iMSCsにおいて顕著な軟骨分化誘導能を示した (Fig. 2)。さらに、より成熟し

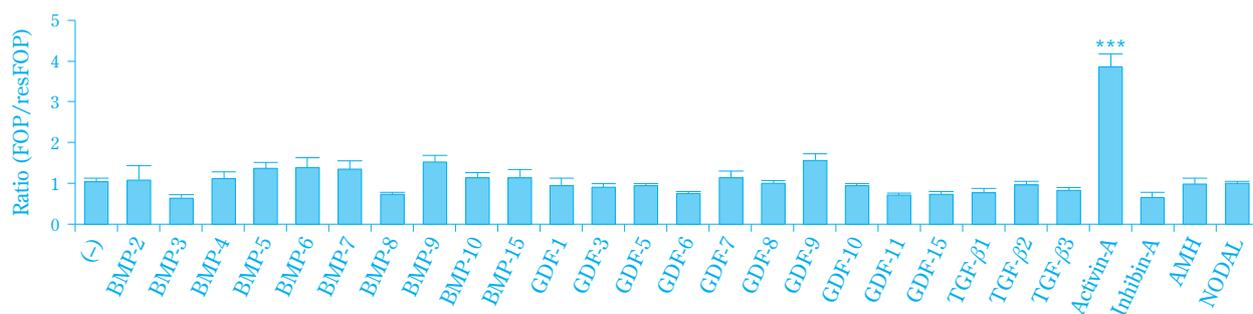


Fig. 1 FOP-ACVR1 specific ligand screening⁷⁾

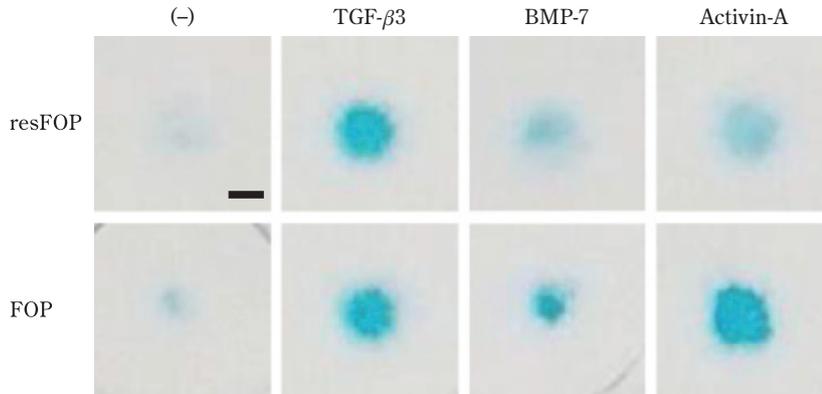


Fig. 2 Enhanced chondrogenesis of 2D chondrogenic micromass of FOP-iMSCs by Activin-A stimulation⁷⁾

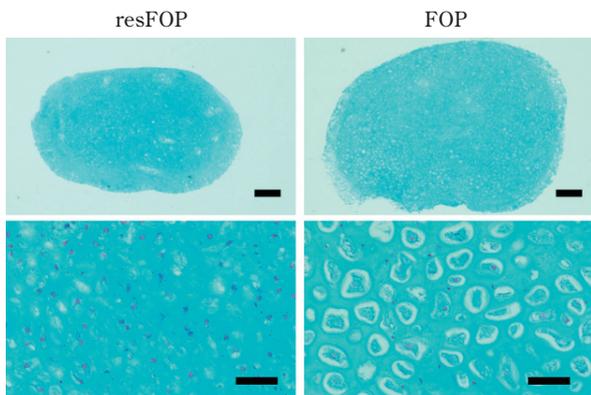


Fig. 3 Enhanced chondrogenesis of 3DCI pellets of FOP-iMSCs by Activin-A stimulation⁷⁾

た軟骨を作製することが可能な3Dの軟骨ペレットアッセイでもActivin-Aの作用を検討したところ、FOP-iMSCs由来の軟骨ペレット内の細胞は肥大軟骨細胞の像を呈しており、より成熟した軟骨へと分化していることがわかった (Fig. 3)。また、GAG/DNA比 (軟骨基質であるグリコサミノグリカン量とDNA量の比であり、この値が高いほど軟骨分化が亢進していることを示す) やCOL10A1、MMP13及びVEGFAなどの後期の軟骨分化マーカーの発現も同様にFOP-iMSCs由来の軟骨ペレットで高い値を示していた。これらの結果から、*in vitro*において、Activin-AはFOP-iMSCsの軟骨分化を顕著に促進することが示された。

4. FOP特異的シグナルの*in vivo*での解析

最後に*in vivo*でのActivin-Aの作用を検討するため、

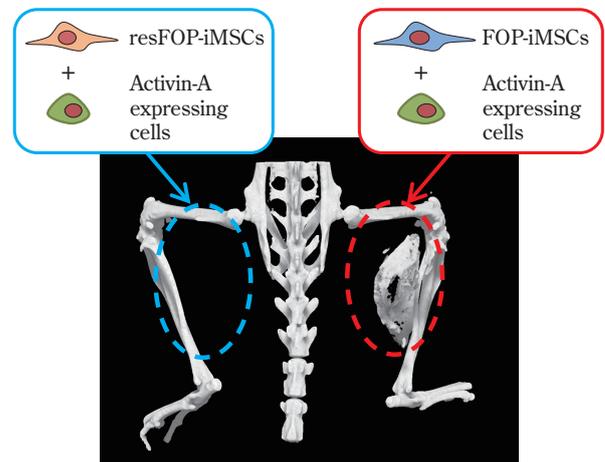


Fig. 4 Transplanted FOP-iMSCs were ossified *in vivo* by Activin-A stimulation

Press conference presentation of Center for iPS Cell Research and Application (CiRA)

FOP-iMSCsあるいはresFOP-iMSCsをDoxycyclineに反応してActivin-Aを産生するC3H10T1/2細胞株と共に免疫不全マウス (NOD/SCID) に移植し、6週間観察した。その結果、FOP-iMSCsを移植し、かつDoxycyclineでActivin-Aを誘導した部位でのみ、顕著な異所性骨が認められた (Fig. 4)。この結果より、Activin-Aが*in vivo*でFOP患者iPS細胞由来の異所性骨形成を促進することが示された。

おわりに

FOP患者由来のiPS細胞を用いた検討により、Activin-AがFOPに特異的なシグナル伝達を惹起すること

を見出した。さらに *in vitro* 及び *in vivo* で異所性骨形成の最初のステップである軟骨分化を Activin-A が強力に促進することを明らかにした。この発見は、これまでの通説を覆す予想外の結果であり、患者由来 iPS 細胞の疾患研究における有用性を示す成果である。また、筆者らの報告とほぼ同時期に、別のグループから FOP-ACVR1 ノックインマウスの異所性骨形成が抗 Activin-A 抗体で抑制されるという報告もされており¹²⁾、FOP 型の変異を導入したマウス個体において Activin-A が病態に関与することが示されている。一方、今回筆者らによって得られた知見は、患者由来細胞を用いた検討であることから、FOP 患者の骨化においても実際に Activin-A が寄与している可能性が高いと考えられる。Activin-A は炎症や創傷に関与するとの報告が多く、フレアアップ時の骨化に実際に寄与している可能性が高い。今回、*in vitro* 及び *in vivo* で FOP 病態を反映した実験系が構築できたことから、iPS 細胞を用いた新規 FOP 治療剤のスクリーニング、ヒット化合物の薬効評価を進めていきたいと考えている。

謝辞

本研究は、京都大学 iPS 細胞研究所 戸口田 淳也 教授及び池谷 真 准教授と大日本住友製薬株式会社との共同研究で成し得た成果であり、日野及び堀込の派遣先である京都大学にて行われました。また、本研究に用いた iPS 細胞樹立のために、ご協力頂きました患者様とご家族の皆様には厚く御礼申し上げます。最後になりますが本研究において多くのご支援を頂いた共同研究者の先生方に厚く御礼申し上げます。

引用文献

- 1) K. Takahashi and S. Yamanaka, *Cell*, **126**, 663 (2006).
- 2) K. Takahashi, K. Tanabe, M. Ohnuki, M. Narita, T. Ichisaka, K. Tomoda and S. Yamanaka, *Cell*, **131**, 861 (2007).
- 3) Y. Shi, H. Inoue, J. C. Wu and S. Yamanaka, *Nature reviews Drug discovery*, **16**, 115 (2017).
- 4) S. Aggarwal and M. Cudkowicz, *Neurotherapeutics*, **5**, 516 (2008).
- 5) Y. Matsumoto, Y. Hayashi, C. R. Schlieve, M. Ikeya, H. Kim, T. D. Nguyen, S. Sami, S. Baba, E. Barruet, A. Nasu, I. Asaka, T. Otsuka, S. Yamanaka, B. R. Conklin, J. Toguchida and E. C. Hsiao, *Orphanet J. Rare Dis.*, **8**, 190 (2013).
- 6) Y. Matsumoto, M. Ikeya, K. Hino, K. Horigome, M. Fukuta, M. Watanabe, S. Nagata, T. Yamamoto, T. Otsuka and J. Toguchida, *Stem Cells*, **33**, 1730 (2015).
- 7) K. Hino, M. Ikeya, K. Horigome, Y. Matsumoto, H. Ebise, M. Nishio, K. Sekiguchi, M. Shibata, S. Nagata, S. Matsuda and J. Toguchida, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **112**, 15438 (2015).
- 8) E. M. Shore and F. S. Kaplan, *Nature reviews. Rheumatology*, **6**, 518 (2010).
- 9) E. M. Shore, M. Xu, G. J. Feldman, D. A. Fenstermacher, T. J. Cho, I. H. Choi, J. M. Connor, P. Delai, D. L. Glaser, M. LeMerrer, R. Morhart, J. G. Rogers, R. Smith, J. T. Triffitt, J. A. Urtizberea, M. Zasloff, M. A. Brown and F. S. Kaplan, *Nat. Genet.*, **38**, 525 (2006).
- 10) S. A. Chakkalakal, D. Zhang, A. L. Culbert, M. R. Convente and R. J. Caro, *J. Bone Miner. Res.*, **27**, 1746 (2012).
- 11) M. Fukuta, Y. Nakai, K. Kirino, M. Nakagawa, K. Sekiguchi, S. Nagata, Y. Matsumoto, T. Yamamoto, K. Umeda, T. Heike, N. Okumura, N. Koizumi, T. Sato, T. Nakahata, M. Saito, T. Otsuka, S. Kinoshita, M. Ueno, M. Ikeya and J. Toguchida, *PLoS ONE*, **9**, e112291 (2014).
- 12) S. J. Hatsell, V. Idone, D. M. A. Wolken, L. Huang, H. J. Kim, L. Wang, X. Wen, K. C. Nannuru, J. Jimenez, L. Xie, N. Das, G. Makhoul, R. Chernomorsky, D. D'Ambrosio, R. A. Corpina, C. J. Schoenherr, K. Feeley, P. B. Yu, G. D. Yancopoulos, A. J. Murphy and A. N. Economides, *Science translational medicine*, **7**, 303ra137 (2015).

抗体部位特異的RI標識技術

日本メジフィジックス株式会社

創薬研究所 中田 徳仁

事業開発部 正山 祥生*

はじめに

抗体医薬品の開発では候補となる抗体を選定するために、抗体を放射性核種で標識することで抗体の薬物動態や薬力学的作用を評価する手法が汎用されている。その際¹²³Iなどの放射性核種を直接導入する場合と、キレーターを抗体に導入し、後から⁸⁹Zrや¹¹¹Inなどの放射性金属核種で標識する場合がある。いずれにおいても、その導入法は抗体のアミノ酸残基などを介した化学的な導入であり、その導入部位や導入数を制御することが困難であるため、薬物動態や薬力学的作用への影響が懸念される。一方で、抗体医薬品の開発の方向性の一つとして抗体を薬剤送達システムに利用する場合がある。抗体薬物複合体（ADC：antibody drug conjugate）を医薬品として開発する場合、化学的に薬物を導入することは品質製造管理の観点から最適ではない。そのため、様々な部位特異的な導入方法が開発されているが、その導入方法が簡便であるとは言いがたいのが現状である。例えば、遺伝子工学的なアプローチにより部位特異的に導入できる抗体の作製や、薬剤の導入に際して酵素処理が必要な手法などがあり、これらの製造工程は煩雑である。そのため、抗体に対して容易に部位特異的に導入できる技術が注目されている。

抗体への部位特異的修飾技術

鹿児島大学の伊東 祐二教授は、IgG抗体のFc領域の特定部位に結合するペプチド（IgG結合ペプチド）を見出しており、IgG結合ペプチドを介して種々の化合物を抗体に修飾する新規技術（CCAP法：chemical conjugation by affinity peptide）の開発に成功している¹⁾。日本メジフィジックス株式会社は鹿児島大学と共同で、CCAP法を用いた抗体のRI標識法を開発し、部位特異的にRI標識した抗体の製造に成功した。抗体へ

のRI導入はキレートを経して行うため、IgG結合ペプチドの末端にキレートを配位したものを抗体に修飾する（Fig. 1）。IgG結合ペプチドを介したキレーターの導入条件は簡便且つ迅速であり、IgG結合ペプチドは最終的に架橋剤により抗体中の特定のリジン残基と共有結合を形成するため、ペプチドを介したキレーターが容易に外れない仕組みである。なお、IgG結合ペプチドの結合部位は2か所あるため、反応後にはペプチドが1分子または2分子結合したものが含まれるが、イオン交換カラムにより抗体にペプチドが1分子結合した抗体のみを分離・精製することが可能である。

CCAP法による抗体のRI標識

抗体へのキレート修飾に広く利用されている amine coupling法では、抗体中に存在するリジン残基にランダムにキレートが修飾されるため、抗体の抗原認識部位にもキレートが修飾される可能性がある。それに対してCCAP法では抗体のFc領域特異的にキレートを修飾するため、抗体の抗原認識能に影響がないと考えられる。そこで、標識法の違いによる抗体の結合活性及び特異性への影響を明らかにするために、鹿児島大学伊東教授と共同研究を実施した。

1. SPECTイメージングによる抗体の抗原結合活性の *in vivo* 評価

HER2高発現細胞株（SK-OV-3）とHER2低発現細胞株（MDA-MB-231）を移植した担癌マウスを用いてSPECTイメージングを実施した。CCAP法又はamine coupling法で¹¹¹In標識した抗体を担癌マウスに投与し、SPECTイメージングを実施した結果をFig. 2に示す。両標識抗体ともに投与後6時間から投与後3日までHER2高発現部位に集積しており、またHER2低発現部位には集積しなかった。本イメージング結果は、定性的に *in vivo* での抗体の特異性を評価しているものであるが、CCAP法又はamine coupling法で¹¹¹In標識した

* 現所属：研究・事業開発部

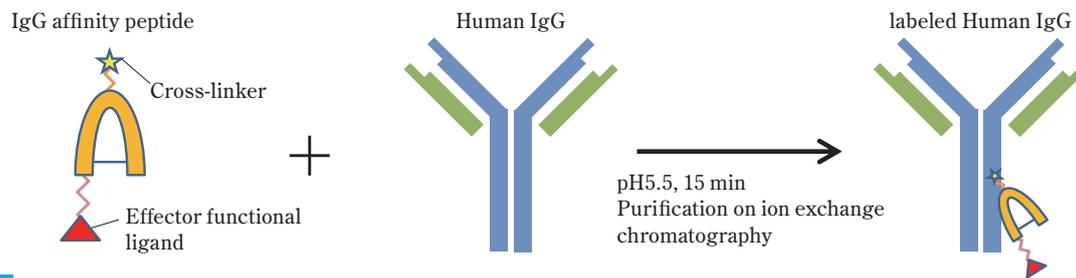
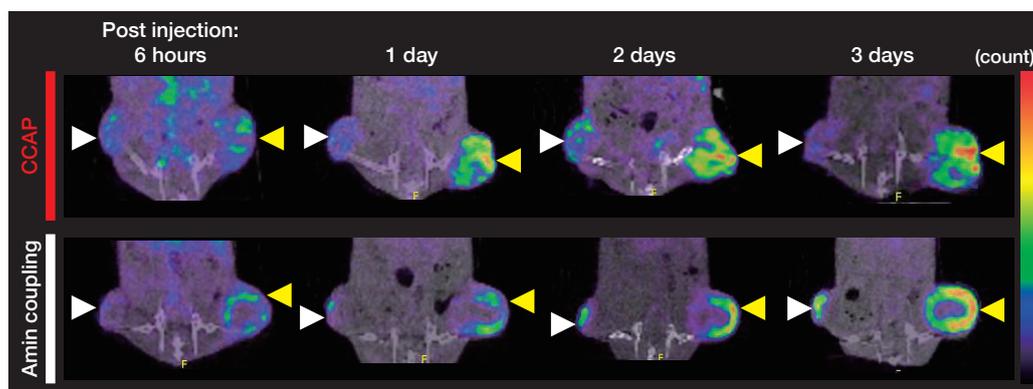


Fig. 1 Overview of CCAP method



All images display on coronal slice images and an optimal scale.
yellow arrowhead: HER2 overexpressing tumor
white arrowhead: HER2 low-expressing tumor

Fig. 2 SPECT images of different HER2 expression tumors

抗体はいずれも生体内で抗原を特異的に認識していることが示唆された。

2. Immunobinding assayによる各種抗体の抗原結合活性の*in vitro*評価

CCAP法又はamine coupling法で¹¹¹Inを標識した抗体を使用し、各抗体の抗原結合活性を評価した。各標識法で¹¹¹Inを標識した抗体を、HER2高発現細胞株又はHER2低発現細胞株にそれぞれ添加し、各細胞に対して結合した抗体量を放射能によって測定した。細胞に結合した抗体及び遊離した抗体の割合から結合率を算出し、標識法による抗体の結合活性を評価した。各標識法での結合率の結果をTable 1に示す。CCAP法又はamine coupling法で標識した抗体のHER2高発現細胞株への結合率は、それぞれ114.0±1.2%又は48.0±1.0%であり、amine coupling法は抗体の約50%が抗原への結合活性を失っているのに対して、CCAP法は抗原への結合活性にまったく影響を及ぼさなかつ

Table 1 Evaluation of the immunoreactivity

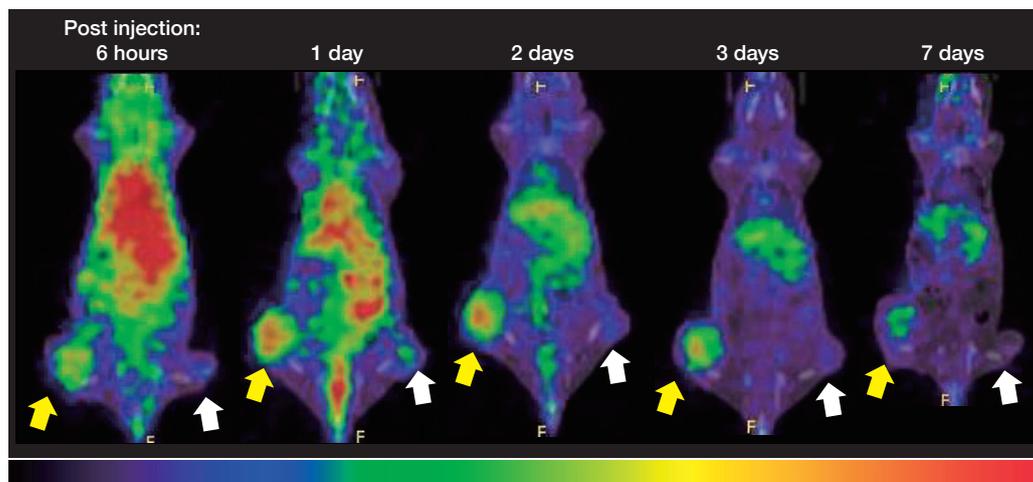
| Labeling method | CCAP | Amine coupling |
|----------------------|--------------------------------|----------------|
| Radiochemical purity | 100% | 95.8% |
| Binding ratio (%) | HER2 overexpressing tumor cell | 114.0±1.2* |
| | HER2 low-expressing tumor cell | 2.1±0.2 |

Mean±SD, n = 3, *p<0.01 (SK-OV-3 vs MDA-MB-231, Student t-test)

た。なお、HER2低発現細胞株に対してはCCAP法及びamine coupling法で標識したどちらの抗体もほぼ結合性を示さないことから、細胞に対する非特異的な結合の影響は見受けられない。

3. 標識核種及びキレートによる抗体の抗原特異性への影響

抗体標識には様々な放射性核種が利用されており、



All images display on coronal slice images and an optimal scale.
 yellow arrowhead: HER2 overexpressing tumor
 white arrowhead: HER2 low-expressing tumor

Fig. 3 PET images of different HER2 expression tumors

標識する核種によって使用するキレートを変更する必要がある。SPECTイメージングにて使用した ^{111}In 標識抗体はキレートにDTPA (diethylenetriaminepentaacetic acid) を使用している。そこで、PET核種である ^{89}Zr 及びそのキレートとしてDFO (deferoxamine) を使用し、CCAP法にて抗体標識を行い、SPECTイメージングと同様の担癌マウスを用いたPETイメージングを実施した。PETイメージングの結果をFig. 3に示す。SPECTイメージングに用いた担癌マウスと同様の担癌マウスを使用して、PETイメージングを実施したところ、投与後6時間から投与後7日までHER2高発現部位に集積が確認でき、またHER2低発現部位には集積が検出されなかった。本結果から放射性核種及び

キレートによらず、*in vivo*での抗体の抗原特異性は保持されていることが示唆された。

抗体標識プラットフォーム技術への応用

CCAP法はIgG結合ペプチドをIgG抗体のFc領域に部位特異的に定量的に結合する技術であり、IgG結合ペプチドの末端に様々な化合物を導入可能である。つまり、抗体の結合能を保持した高品質な修飾抗体の提供が可能な技術である。また、CCAP法の利点として同一の方法で様々な化合物(例: 蛍光物質、高分子 etc.)を導入できるため、条件検討が不要であることも挙げられる。今回紹介したイメージングに使用される放射性核種を標識した抗体以外にもIgG結合ペプチドに付

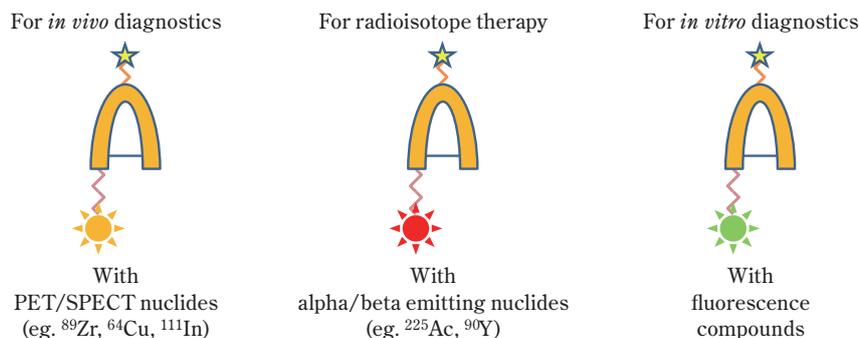


Fig. 4 Platform technology by CCAP for antibody labeling

与する物質を変えることで様々な場面に応用できる (Fig. 4)。例えば、PET/SPECTイメージングにより病変部 (特に腫瘍領域) に存在する特定の生体分子の発現量を評価し、正常組織に対して過剰に発現していると判断できれば、治療に使用される放射線核種で抗体を標識し、治療薬として応用することも可能である。また、前述と同様に、術前に腫瘍組織内の生体分子の発現をイメージングで確認できれば、蛍光物質を導入した抗体を用いることで、蛍光ガイド下手術への応用が可能である。

おわりに

CCAP法は、抗原認識能を損ねることなく様々な分子を抗体に結合させることが可能となる。また、ペプチドと抗体を定量的に結合させ、均質な修飾抗体を製造することが可能であるため、高品質な修飾抗体医薬品を容易に製造する技術として期待できる。

当社は、CCAP法に関する特許について、放射性核種の標識の範囲で独占的に、蛍光物質の修飾の範囲で非独占的に実施権を獲得している。また、当社は、株式会社住化分析センターと共同で実施している非臨床

PET分子イメージング試験や当社独自で提供するPET治療薬の受託製造といった受託サービスを実施しており、これらの受託サービスで本技術を提供中である。当社は受託サービスを通じて、抗体医薬品を開発する製薬企業等にCCAP技術を提供することで、抗体医薬品の創薬に貢献する。

謝辞

本研究は、鹿児島大学 大学院 理工学研究科 生命化学専攻 伊東 祐二教授と日本メジフィジックス株式会社との共同研究で成し得た成果であり、研究で使用したCCAP法を用いた抗体は、本共同研究先から入手しました。本研究に向けて多くのアドバイスを戴いた共同研究者の皆様に感謝いたします。

引用文献

- 1) N. Nakata, Y. Shoyama, A. Hayashi, A. Tsujii, S. Hashimoto and Y. Ito, “日本薬物動態学会第31回年会 PROGRAM & ABSTRACTS” (2016), p.227 (P-20).

有機ELデバイス製造におけるプロセス汚染評価の重要性 —真空チャンバー由来の不純物評価—

株式会社住化分析センター 技術開発センター
末包 高史* 今西 克也

はじめに

有機ELデバイス製品のさらなる普及のためには、デバイスの長寿命化が必須である。デバイスの長寿命化を妨げる因子の一つとして、デバイス内部に混入した不純物による影響が知られている。中でも、ITO基板表面の有機不純物や発光素子に使われる有機材料中の微量のハロゲン化合物など、デバイス材料に由来する不純物の影響がよく知られており^{1),2)}、材料の不純物評価が重要とされている。さらに、不純物はデバイスの製造プロセスで混入することがある。最もよく知られている成分としては水が挙げられ、過去の研究では、真空蒸着プロセスにおいて、真空チャンバー内に残留している水が正孔輸送層と発光層の界面に混入して有機膜と反応することにより、デバイス寿命を著しく低下させることが示されている³⁾。

水以外にもデバイス製造時には様々な不純物が混入する可能性がある。例えば、真空チャンバーのステンレス部分を加工した際に使用したオイルは、その後の洗浄工程を経てもチャンバー内に残留し、真空中で放出されることが知られている⁴⁾。また、チャンバー内部にはOリングや絶縁用の樹脂などが用いられることがあるが、一般的に樹脂材料からは内部に溶解している気体の拡散・脱離および材料そのものからの未反応物質（可塑剤、硬化剤など）や分解生成物の放出があるとされている⁵⁾。これらの物質は水と同様にデバイス中に混入する可能性が考えられるものの、寿命への影響はこれまでにほとんど報告されてこなかった。

本稿では、当社が九州大学の研究グループと共に明らかにした、デバイスの寿命に影響を及ぼす真空チャンバー由来の有機不純物の評価事例⁶⁾を元に、プロセス汚染評価の重要性について紹介する。

プロセス汚染評価事例

1. デバイスに混入する不純物の模擬評価

(1) 真空チャンバー内の有機不純物

チャンバー内にシリコン基板を一定時間暴露し、基板上に付着した不純物を測定することにより、デバイス中に混入する可能性のある真空チャンバー由来の不純物を模擬的に評価できる。不純物は有機物、金属、イオンに大別できるが、ここでは有機物に着目した評価事例を紹介する。

Table 1には、室温状態で真空引きのみ行ったチャンバー内に、0.5 h（時間）および15 hと、暴露時間を変えて基板を暴露させたときの有機不純物の評価結果を示す。基板上の有機不純物は、溶媒で回収した後に液体クロマトグラフィー-フーリエ変換型質量分析計（LC-FTMS）により測定した。いずれの試料からも多数の有機不純物が検出され、暴露時間が長くなるにしたがって検出数は増加した。また、両試料から検出された12化合物について化合物ごとの検出強度比を比較す

Table 1 Impurities on silicon wafers stored in the vacuum chamber

| Compound No. | Ratio of ion count | |
|--------------|--------------------|--------------|
| | 0.5 h stored | 15 h stored |
| 1 | 1.0 | 140 |
| 2 | 1.0 | 1,900 |
| 3 | 1.0 | 53,000 |
| 4 | 1.0 | 100 |
| 5 | 1.0 | 2.3 |
| 6 | 1.0 | 8.2 |
| 7 | 1.0 | 1.1 |
| 8 | 1.0 | 450 |
| 9 | 1.0 | 16 |
| 10 | 1.0 | 1.7 |
| 11 | 1.0 | 14 |
| 12 | 1.0 | 10 |
| 13 | Detected | Not Detected |
| 14 ~ 48 | Not Detected | Detected |

* 現所属：愛媛ラボラトリー

ると、12化合物すべてが15 h暴露したときに高い値を示した。本結果は、チャンバー内には多数の有機不純物が浮遊しており、それらがデバイス作製時間に応じてデバイス中に混入する恐れがあることを示している。

(2) 有機不純物と水が寿命に及ぼす影響

デバイス中には、有機不純物に加えてチャンバー内に残留している微量の水が混入することは明らかであり、水が寿命に影響を及ぼすことは前述のとおりよく知られている。そのため、有機不純物が寿命に及ぼす影響について、水の影響との切り分け評価を行った。

有機不純物は、チャンバー内部の壁や部材などに付着した化合物が多く含まれると推測される。そこでチャンバー内部の洗浄によりそれらの除去を図った際の、デバイスの寿命、チャンバー内の有機不純物量、および水の量の変化を調査した。洗浄作業では、チャンバー内部を大気開放後にアセトンで拭き取った後に乾拭きし、防着板を洗浄した清浄品と交換した。その後、チャンバー内部に残存するアセトンや水などの高揮発性の成分を可能な限り除去するために、内部を高真空

排気した後に蒸発源を最高温度で加熱した。有機不純物量は、前項と同様の基板暴露試料について接触角およびLC-FTMSを用いて評価し、水の量はチャンバーに接続した四重極型質量分析計を用いて水分圧にて評価した。デバイスの寿命はFig. 1に示す低分子の有機材料で構成された有機ELデバイスについて、1000 cd/m²開始で発光強度が初期特性の90%に低下するまでの時間 (LT90) を評価した。このとき、デバイスの作製時間の差による寿命への影響を排除するために、各材料の蒸着レート調整時間および成膜時間はすべてのバッチで統一した。また、材料はすべて同一のロットを使用した。

Fig. 2に、チャンバー洗浄前 (Before)、洗浄後に一晚高真空排気後 (Cleaning I)、さらに2日間高真空排気後 (Cleaning II) におけるデバイスの寿命、水の分圧、接触角の結果を示す。チャンバー内部の洗浄により、水の分圧が上昇したにもかかわらず、寿命は大幅に改善した。その後、水の分圧は洗浄前とほぼ同等まで減少したが、寿命に大きな変化は見られなかった。一方で、チャンバー内に30分間設置したITO基板上的の接

| | |
|---------------------------|---|
| Al (100 nm) | |
| LiF (0.8nm) | |
| Bpy-TP2 (40 nm) | : 2,7-Bis(2,2'-bipyridine-5-yl)triphenylene |
| T2T (10 nm) | : 2,4,6-Tris(biphenyl-3-yl)-1,3,5-triazine |
| 15% 4CzIPN / mCBP (30 nm) | : 3,3-Di(9H-carbazol-9-yl)biphenyl / (4s,6s)-2,4,5,6-Tetra(9H-carbazol-9-yl)isophthalonitrile |
| Tris-PCz (30 nm) | : 9,9',9''-Triphenyl-9H,9'H,9''H-3,3':6',3''-tercarbazole |
| HAT-CN(10 nm) | : 1,4,5,8,9,11-Hexaazatriphenylenehexacarbonitrile |
| ITO Substrate | |

Fig. 1 OLED (Organic Light Emitting Diode) architecture

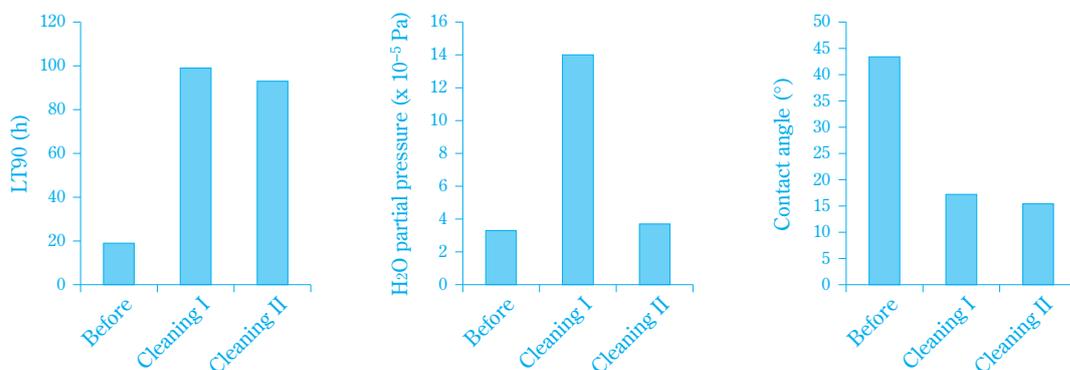


Fig. 2 Effect of cleaning on lifetime and vacuum environment

触角は、洗浄後に大幅に減少し、真空引きを続けた後も同等の値を示した。また、BeforeおよびCleaning Iのタイミングで15 h暴露した試料のLC-FTMS評価では、重複する78物質を含む約80物質がそれぞれで検出されたが、Cleaning Iでは55物質のイオン強度が減少し、検出化合物の合計イオン強度は15%以上も減少した。これらの結果から、洗浄後の寿命の向上は、有機不純物の低減効果によるものと考えられ、換言すると、寿命には有機不純物が大きく影響している可能性があると言える。なお、過去に水の分圧 3×10^{-7} Paの超高真空領域でデバイスを作製する際、水の入射量を4桁程度増加させると寿命が低下することが報告されている³⁾。一方で、本実験における水の分圧は約4倍程度の変化にとどまったため、水による寿命への影響は小さかったものと推測される。

(3) 有機不純物の詳細解析

前項のチャンバー内の洗浄実験にて検出された有機不純物の詳細について、LC-FTMSの精密質量測定結果を元に解析を行った。

Fig. 3にはチャンバー内の洗浄前後のいずれかで検出された有機不純物について、質量数100ごとの検出化合物数のヒストグラムおよび累積相対度数を示す。驚くべきことに、チャンバー内は蒸発源を加熱せず室温に保ったにもかかわらず、高揮発性と予想される低分子量の化合物のみならず、比較的高分子量の化合物が浮遊していることがわかる。

Fig. 4に、精密質量の組成演算により有機不純物の分子式を推定し、その結果から構造を推定した一例を

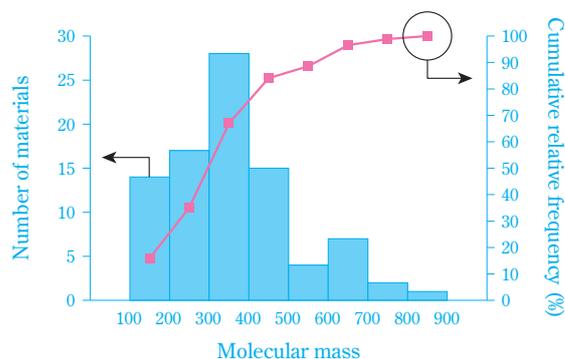


Fig. 3 Molecular masses of impurities

示す。直前のデバイス作製で使用した化合物 (T2T) や過去に使用した化合物 (TPBi: 2,2',2''-(1,3,5-Benzinetriyl)-tris(1-phenyl-1-H-benzimidazole))、さらにはその分解物と推測される化合物など、チャンバー内の残留が疑われる発光素子材料由来の化合物が推定された。さらに興味深いことに、アジピン酸化合物やフタル酸化合物などの発光素子材料としては使用されないと思われる化合物も検出された。これらの化合物は一般的に樹脂の添加剤として使用される。チャンバー内には絶縁チューブ、コネクタ、Oリングなどがチャンバーの構成部材として使用されていることから、それらが放出源となっている可能性がある。

2. 発光層界面に混入した有機不純物が寿命に及ぼす影響

前述の現象が実際のデバイスにおいても生じていることを検証するために、デバイスと同時に有機不純物

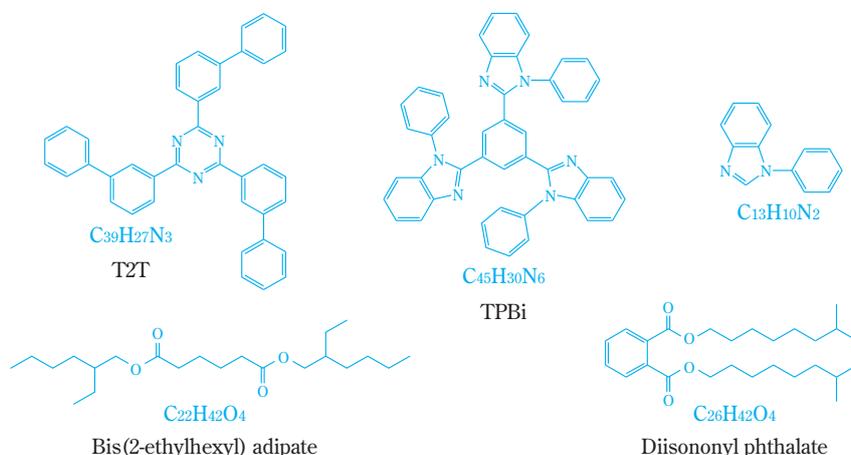


Fig. 4 Structures of some of the materials that could be tentatively assigned to LC-FTMS results

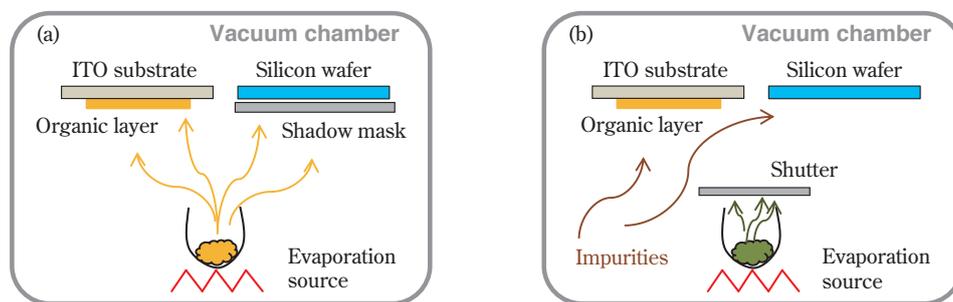


Fig. 5 Schematic diagram of how to make wafer sample at the same time of device fabrication: (a) During deposition, (b) During rate adjustment

評価用の試料を作製した。Fig. 5に作製の模式図を示す。蒸着時にはシリコン基板の下側にマスクを設け (Fig. 5 (a))、蒸着レート調整時にはマスクを外すことにより (Fig. 5 (b))、レート調整時、つまり有機膜界面に混入すると考えられる有機不純物のみをシリコン基板に付着させた。このとき、文献や著者らの知見を参考にして、デバイス性能への影響が大きいと考えられる発光層前後のレート調整時間を変化させることにより、チャンバー内の暴露時間が異なる複数の試料を準備した。デバイスはFig. 1に示す構造で作製し、前項とは異なる材料ロットで統一した。

Fig. 6に、デバイス作製時間に対するデバイス寿命およびLC-FTMSを用いた有機不純物量の評価結果を示す。デバイス作製時間、すなわち発光層の蒸着前後の待機時間が長くなるにしたがって寿命は低下し、有機不純物量が増加する傾向が明確に認められた。本結果は、デバイス作製中に発光層界面に混入した有機不純物が、寿命に大きく影響していることを示唆している。検出された化合物を前節と同様に解析すると、模

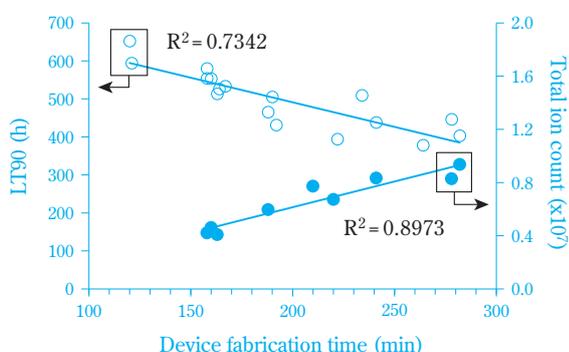


Fig. 6 Effect of fabrication time on lifetime and vacuum environment

擬評価で検出された化合物と同様の化合物に加えて、酸素を多数含む化合物 ($C_{22}H_{44}O_5$ 、 $C_{22}H_{42}O_5$)、酸素とりんを含む化合物 ($C_{11}H_{17}OP$)、酸素とハロゲンを含む化合物 ($C_{10}H_{20}ONCl$) など、デバイス性能への悪影響が懸念される化合物が多数含まれることが判明した。

おわりに

本稿では真空チャンバー由来の有機不純物の評価事例を元に、それらがデバイス作製時にデバイス内に混入することで、寿命低下を引き起こすことを説明した。製造プロセスに由来する不純物の種類や混入量は、装置構成によって異なるばかりでなく、たとえ同一装置であっても使用環境により大きく変化すると予想される。デバイス材料の特性を最大限に発揮させ、安定的かつ低コストに高性能なデバイスの製造を継続していくためには、材料の不純物管理と同様に、デバイス製造時のプロセス汚染管理を日々注意深く行う必要がある。これまで当社が蓄積してきた評価技術が、有機ELを始めとする有機エレクトロニクス分野のさらなる発展の一助となれば幸いである。

謝辞

本稿の評価事例は、九州大学最先端有機光エレクトロニクス研究センター (OPERA) 安達 千波矢センター長、公益財団法人福岡県産業・科学技術振興財団 有機光エレクトロニクス実用化開発センター (i³-OPERA) 藤本 弘研究室長 (九州大学 客員准教授)、公益財団法人九州先端科学技術研究所 (ISIT) 八尋 正幸研究室長 (九州大学 客員教授) の研究グループとの共同研究により得られた成果です。改めて厚く御礼申し上げます。

引用文献

- 1) Y. Fukushi, H. Kominami, Y. Nakanishi and Y. Hatanaka, *Appl. Surf. Sci.*, **244**, 537 (2005).
- 2) H. Fujimoto, M. Yahiro, S. Yukiwaki, K. Kusuhara, N. Nakamura, T. Suekane, H. Wei, K. Imanishi, K. Inada and C. Adachi, *Appl. Phys. Lett.*, **109**, 243302 (2016).
- 3) H. Yamamoto, C. Adachi, M. S. Weaver and J. J. Brown, *Appl. Phys. Lett.*, **100**, 183306 (2012).
- 4) R. S. Barton and R. P. Govier, *Vacuum*, **20**, 1 (1970).
- 5) R. J. Elsey, *Vacuum*, **25**, 347 (1975).
- 6) H. Fujimoto, T. Suekane, K. Imanishi, S. Yukiwaki, H. Wei, K. Nagayoshi, M. Yahiro and C. Adachi, *Sci. Rep.*, **6**, 38482 (2016).

車両用ABS樹脂の開発動向

日本エイアンドエル株式会社 研究所
吉田 治一郎

はじめに

ABS樹脂は、A（アクリロニトリル）、B（ブタジエン）、S（スチレン）を構成単位に含む非晶性の熱可塑性樹脂であり、1940年代の終わりから1950年代にかけて商業化された¹⁾。剛性と耐衝撃性のバランスが良く、かつ射出成形等の成形加工性や、塗装、めっき等の二次加工適性に優れることから、今日でも幅広い用途で使用されている。これらの諸特性は、主としてアクリロニトリル・スチレン樹脂からなる連続相に、ブタジエンゴムが分散した「海島構造」の多様性に由来すると考えられている。Fig. 1にABS樹脂の電子顕微鏡写真を示すが、黒く見える部分がブタジエンゴム（オスミウムで染色）である。一般的に、ABS樹脂の製造方法

は「海島構造」の設計が比較的容易な乳化重合プロセスが多く採用されているが、乳化剤や塩析剤を使用しない塊状重合プロセスもある。

ABS樹脂の世界需要は、2015年で約770万トンと推定されており、引き続き中国や東南アジアなどの経済発展地域での需要が拡大していくと考えられる。実際に、中国、インド、サウジアラビアなどでABS樹脂の生産設備が増強されており、奇美実業股份有限公司、INEOS Styrolution Group GmbH（旧 INEOS Industries Holdings LimitedとBASF SEの事業統合会社）を筆頭とした大規模生産メーカーがABS樹脂の世界需要のおよそ50%を占めていると推定される²⁾。一方、ABS樹脂の国内出荷実績は、2013年以降は23万トン前後で推移しており、全体としては横ばいである³⁾。このような状況の下で、国内ABS樹脂業界では事業の再編、再構築や、グローバル展開を加速する動きが見られる。旭化成ケミカルズ株式会社（当時）は、2015年末に水島製造所でのABS樹脂の生産を停止した。また、テクノポリマー株式会社（JSR株式会社の完全子会社）とUMG ABS株式会社（宇部興産株式会社、三菱レイヨン株式会社（当時）が折半出資）の両親会社は、ABS樹脂事業統合の交渉に関して基本合意したと発表している。日本エイアンドエル株式会社は、車両用部品などに使用されるABS樹脂を中心に、既に進出している中国、タイ、インドに加えて米国（北米）でも現地供給を拡大し、海外での事業基盤を強化する方針である。ここでは、最近の車両用ABS樹脂の開発動向と当社の取り組みについて紹介したい。

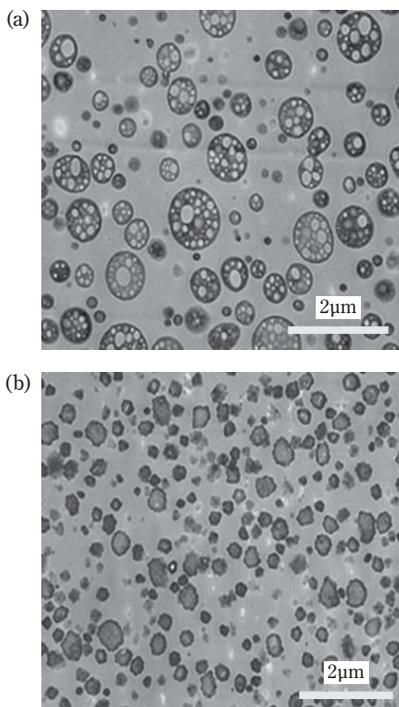


Fig. 1 Photographs of typical ABS morphology by transmission electron microscope
(a) Continuous bulk polymerization
(b) Emulsion polymerization

車両用ABS樹脂の開発動向

ABS樹脂は、物性バランスと二次加工適性に優れることから車両の内装および外装部品に広く適用されている。主に射出成形で得られた部品を塗装、転写、めっきなどの二次加工により表面加飾して使用されることが多い。このうち塗装はABS樹脂の代表的な二次加工と言える。従来は、黒色やグレー色が内装部品

では一般的であったが、最近では、赤色や青色などのライン加飾を多用して意匠性を高めたデザインや、シルバーマトリックなどの高輝性塗料が使用される傾向がある。外装部品では、空力特性によって燃費向上効果があるとされるABS樹脂製リアスポイラーを採用する車種が増えている。ABS樹脂製リアスポイラーは射出成形やブロー成形で樹脂を成形した後、塗装され製品となる。最近では意匠性を重視して形状がより複雑になったり、軽量化のため薄肉化を求められるようになってきている。また塗料も種類が増えている。このため従来問題なく使用されていた材料でも塗装後に外観不具合を生じることがあり、塗装性に優れたABS樹脂の開発が求められている。

また、車内で発生する雑音への配慮も重要視されている。自動車メーカーでは、軽量化やHV（ハイブリッド車）、EV（電気自動車）、さらにはFCV（燃料電池車）の普及による燃費改善に努めている。軽量化やモーター駆動化により、例えば、走行時に複数の樹脂部品が擦れあって発生するきしみ音や、カップホルダーを摺動させた時の異音などの雑音がより一層意識されるようになったと考えられ、材料面からの低減も検討されている。

一方で、非塗装化の動きもある⁴⁾。一般的にABS樹脂は、太陽光に含まれる紫外線によって連続相に分散しているブタジエンゴムが劣化し、樹脂の色相が変化することが知られている。樹脂部品の表面に塗装することで太陽光が遮られるため、このような劣化は軽減されるが、非塗装の場合は樹脂の耐候性が重要である。耐候性が求められる非塗装の外装部品には、ブタジエンゴムの代わりにエチレン・プロピレンゴム（EPR）を用いたAES樹脂や、アクリルゴム（ACR）を分散相としたASA樹脂などの耐衝撃性を備えた耐候性材料が適用されている。

当社の取り組み

1. 良塗装性ABS樹脂

代表的な塗装外観不良の一つに、塗膜が膨れたように変形する事象がある（Fig. 2）。塗膜が膨れた箇所の断面を観察すると、塗膜の下の基材（ABS樹脂）表面に微細なクラックが発生していることが多い。これは、塗料中の有機溶剤と塗装面の残留応力によるストレスクラックと考えられる。塗装後の乾燥工程でクラックに浸透した有機溶剤が揮発して塗膜が押し上げられ、

気泡状の塗装外観不良になると考えられる。ストレスクラックは、応力の存在下、溶剤が樹脂表層から浸透して樹脂が脆性破壊に至る現象であり、応力と溶剤の2つの因子が共存する環境で発生することが多い。応力としては、外部から加わる応力の他、射出成形時に発生する残留ひずみに起因する内部応力が考えられる。成形条件の変更やゲート形状等の金型構造の見直しにより残留ひずみを低減する方策は有効であるが、一方の溶剤成分は、顧客によって塗装環境が異なるため溶剤の組成も多岐に渡る。このため、樹脂材料には多様な溶剤成分に耐えうる塗装適性が要求される。当社では、アクリロニトリル組成比率を高めることで極性を付与して耐溶剤性を改善したり、耐溶剤性に優れた他の樹脂成分を連続相に分散させることで塗装性を改善する提案を行っている。当社のクララスチック®「SHシリーズ」は、良塗装性を追求したABS樹脂である。

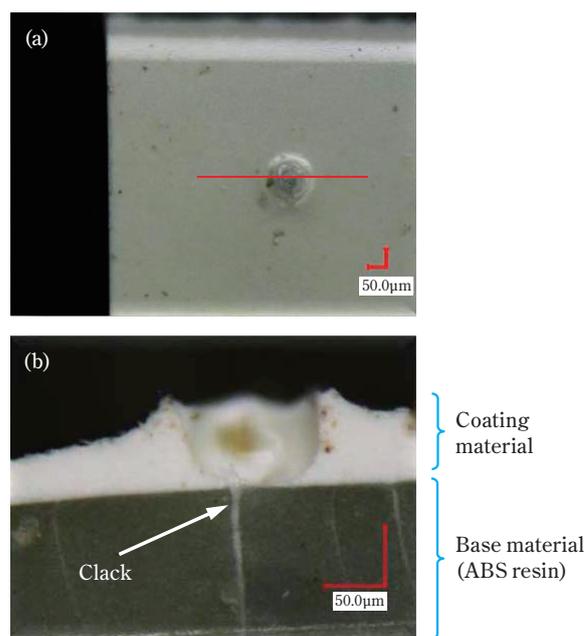


Fig. 2 Photographs of the defect by painting (a) top-view (b) cross-section

また、高輝性顔料を含むマトリック調の塗装では、部分的に塗装ムラのような外観不良が発生することがある。この外観不良部の断面を観察すると、基材の樹脂表面近傍が平坦でなく、Fig. 3 (a)のように不規則な凹凸面となっていることが多い。高輝性顔料は一般的に不定形の無機物を含み、塗膜中に一様に存在する

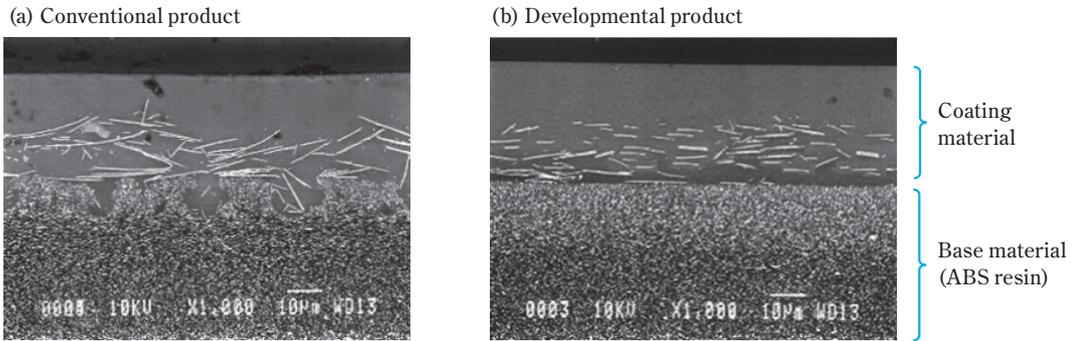


Fig. 3 Photographs of the difference between conventional product and developmental product

ことで、均質な高輝感を得ることができる。しかし、**Fig. 3 (a)**のように部分的な配列の乱れが生じると、周辺と比べて反射光が異なるため、視覚的に塗装ムラがあるように見えると考えられる。基材表面近傍が凹凸になる原因は様々な要素があるが、塗装前の基材表面には凹凸が見られないことから、直接的には塗料に含まれる溶剤成分により、基材表面が変形していると考えている。一般的には基材表面に残る過度の成形ひずみが、溶剤成分によって樹脂が膨潤することでひずみが緩和され、不規則な凹凸を形成すると思われる。したがって、有効な対策としては、過度の成形ひずみを抑制する、または、樹脂を膨潤させにくい溶剤成分を使用することが考えられるが、成形条件の制限や塗料変更による密着強度低下などが懸念されるため、対策は容易ではない。そこで、当社では、独自の重合技術により、基材表面の凹凸生成を抑制する「Sシリーズ」を提案している。「Sシリーズ」は、既存グレードの一般物性を大きく損なうことなく、上述の外観不良が軽減できることから高い評価を得ている。

2. きしみ音対策材料の開発

一般的に、きしみ音は樹脂部品と樹脂部品の表面が互いに接触した状態で、外部応力によって接触面がスティック・スリップ現象を起こすことで発生すると考えられている。接触する部品と部品の形状や寸法によって、接触面に発生する応力が異なるため、一概には言えないが、素材として比較した場合、剛性の高い材料ほど、固着～滑り時の加速力が大きくなるため、きしみ音が発生しやすい傾向があると考えられる。当社では、剛性を維持したまま、スティック・スリップ現象を軽減する方法として、表面改質によるきしみ音

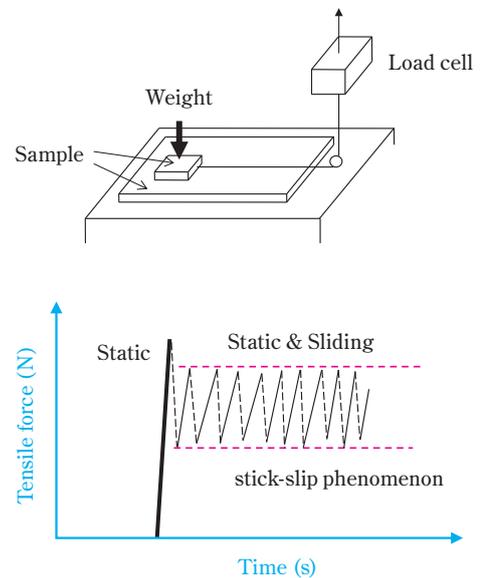


Fig. 4 Stick-slip test and stick-slip phenomenon

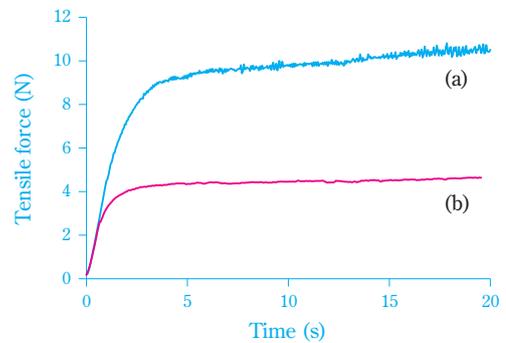


Fig. 5 Stick-slip test result
(a) Conventional product
(b) Developmental product

対策材「Nシリーズ」を開発した。上述したように、きしみ音は素材以外にも多くの要因が複数関連するため、完全にきしみ音を解消するのは容易ではないが、素材として、きしみ音の発生リスクを低減する創意工夫は今後も必要であると考えている。「Nシリーズ」は、既存グレードの一般物性を大きく損なうことなく、スティック・スリップ現象を改善する材料である (Fig. 4、Fig. 5)。

3. 耐候性材料の開発

車両内装部品のうち、太陽光に含まれる紫外線による直接的な影響が少ない部位では、ABS樹脂に着色材を練り込むことで非塗装化が進められてきた。最近では、さらに深みのある漆黒調やメタリック調といった特殊外観の非塗装部品が望まれており、一般的なABS樹脂に比べて光線透過率を高めて発色性を改善した材料提案を行っている。一方、外装部品ではABS樹脂ではなく、耐候性改善のためブタジエンゴムの代わりにエチレン・プロピレンゴム (EPR) を用いたAES樹脂またはアクリルゴム (ACR) を用いたASA樹脂による材料設計が必須である。このような非塗装の高外観部品は傷が目立ちやすいため、現在当社では、ASA樹脂やAES樹脂によるポリマーアロイを含めた耐擦傷性の材料開発も行っている。

4. 塊状重合ABS樹脂

塊状重合プロセスによるABS樹脂は、乳化重合プロセスによるABS樹脂とは異なり、乳化剤や塩析剤を使用しない点に特徴がある。国内では、日本エイアンドエル株式会社が唯一この塊状重合プロセスによるABS樹脂「サンタック®」を製造販売している。従来から、ポリカーボネート樹脂の低温衝撃特性や成形加工性を改質する目的でABS樹脂を混合したポリマーアロイが広く使用されている⁵⁾。汎用的なポリカーボネート樹脂は、分子構造中にエステル結合を有するため、高温

高湿下で加水分解し、分子量が低下する。乳化重合プロセスによるABS樹脂には、ポリカーボネート樹脂の加水分解を促進する成分が含まれることがあり、ポリマーアロイとして要求される品質水準によっては注意が必要である。一方、塊状重合プロセスによるABS樹脂は、ポリマー成分以外の残留物が極めて少ないため、ポリカーボネート樹脂の改質には好適である。ポリカーボネート樹脂は、優れた耐熱性、強靱性、自己消火性を有しており、今後も様々な分野で拡大すると考えられる。乳化重合プロセスによるABS樹脂では満足できない要求品質水準に対しては、塊状重合プロセスによるABS樹脂のさらなる用途展開が期待される。

おわりに

ABS樹脂の需要は、世界の経済発展地域における人口の増加やインフラ整備に伴い、今後も拡大していくと考えられる。国内企業の海外進出も引き続き拡大が予想されることから、国内ABS樹脂メーカーとしても、グローバルな事業展開が急務となっている。世界の巨大樹脂メーカーとコストで競合することは容易ではないが、現地での対応力を強化し、顧客が本当に必要としている品質水準を正確に理解し、迅速かつ的確な提案を行うことが重要であると考えている。

引用文献

- 1) “ABS樹脂”, 高分子学会高分子機械材料委員会 編, 丸善 (1970), p.4.
- 2) 化学経済 編集部, 化学経済, **63** (4), 129 (2016).
- 3) CHEMNET TOKYO, “ABS樹脂出荷実績 (日本ABS樹脂工業会)”, <http://www.chem-t.com/link/data/abs/> (参照2017/2/27).
- 4) 岩野 昌夫, プラスチックエージ, **63** (9), 85 (2016).
- 5) 阪野 元, 高橋 和則, 青木 寛, 藤原 隆祥, 成形加工, **8** (9), 604 (1996).

エアゾールタイプの園芸殺虫剤 **ロビンフッド®**

ロビンフッド®は、2016年3月2日付で農薬登録を取得し、販売を開始しました。当薬剤は、住友化学株式会社が開発した合成ピレスロイド系の殺虫成分である「フェンプロパトリン」を有効成分とするエアゾールタイプの殺虫剤で、りんご、なしの害虫であるヒメボクトウやカミキリムシ類等の穿孔性害虫*が適用対象です。

(* 幼虫の時に樹木に食入し、樹の内部で成育する難防除害虫)

穿孔性害虫の幼虫は樹の中に潜んでいるため、これまで一般的であった散布剤では防除が難しく、各県の指導機関からも、当社に対し、対策剤の開発要望が挙がっていました。これに応える形で当社が開発したのがロビンフッド®です。樹の中に直接ノズルを差し込めるため、樹幹に潜む幼虫に対して、直接処理することのできる画期的な薬剤となりました。また、携帯性にも優れているので、果樹栽培の管理作業の間にも処理が可能となり、現地の生産者からも好評をいただいております。(本製品の技術詳細は、本誌p.4~をご参照ください。)



製品外観



ヒメボクトウの幼虫
(写真提供: 福島県農業総合センター)



ヒメボクトウの虫糞



カミキリムシの幼虫



虫糞を取り除きノズルを樹の中に差し込んで噴射



携帯性にも優れます。

コンタクト先：住友化学株式会社 アグロ事業部 お客様相談室
〒104-8260 東京都中央区新川2丁目27番1号

ナビダイヤル：0570-058-669

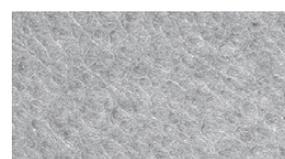
農業支援サイト i-農力：http://www.i-nouryoku.com/

意匠性樹脂フィルム **WAPO®**



WAPO®は、当社独自の原料配合と新たなフィルム加工技術によって、樹脂本来の特性である耐水性、耐薬品性などはそのままに、手づくりのような自然な風合いを工業的に再現した樹脂フィルムです。顧客の用途に応じて、フィルム表面の凹凸形状や光沢、色をカスタマイズし、提供することができます。プロダクトデザイナー柴田 文江氏とグラフィックデザイナー佐藤 卓氏の監修のもと、WAPO®を開発し、発売しました。

WAPO®の市場投入第一弾として、ブラックとシルバーの2つのグレードを開発し、コクヨ株式会社のデザイン文具ブランドである「trystrams」(トライストラムス)のケースシリーズの表地に採用されました。今後、文具に加えて、住宅内装、自動車、家電、ファッションなど幅広い分野への用途展開を目指します。



WAPO®第一弾発売グレード
しなやかな風合いとマット感のあるブラックとシルバー



WAPO®を表地に採用したtrystramsケースシリーズ
(写真提供：コクヨ株式会社)

コンタクト先：住友化学株式会社 ポリオレフィン事業部
〒104-8260 東京都中央区新川2丁目27番1号
TEL：03-5543-5465 FAX：03-5543-5995

化合物半導体ウエハ 窒化ガリウム (GaN) 自立基板

株式会社サイオクスでは、化合物半導体材料の一つである、窒化ガリウム (GaN) の自立基板の開発に成功し、製造販売しております。

現在、白色LEDにはサファイア基板の上にGaN結晶層を形成した基板が使用され、光源の一つとして広く普及していますが、LEDよりもさらに高い電流密度を必要とするレーザーには、GaNのみで形成され転位密度の低いGaN自立基板が必要とされていました。当社が開発したGaN自立基板は、ブルーレイのピックアップ用レーザーとしてだけでなく、各種高効率光源用のレーザー用などにも幅広く用いられています。従来、データプロジェクター光源には水銀を用いたランプが用いられていましたが、GaNを用いたレーザー光源への代替が進んでおり、環境負荷物質の削減に寄与できると期待されています。

コンタクト先：株式会社サイオクス 技術部基板技術課
〒319-1418 茨城県日立市砂沢町880番地
TEL：0294-42-5025 FAX：0294-42-6410
URL：<http://www.sciocs.com/>



当社量産品 (2インチ径導電性GaN基板) と、
開発品 (4インチ径導電性GaN基板)



ポリプロピレンコンパウンド事業の更なるグローバル化に向けたインド・メキシコでの拠点新設

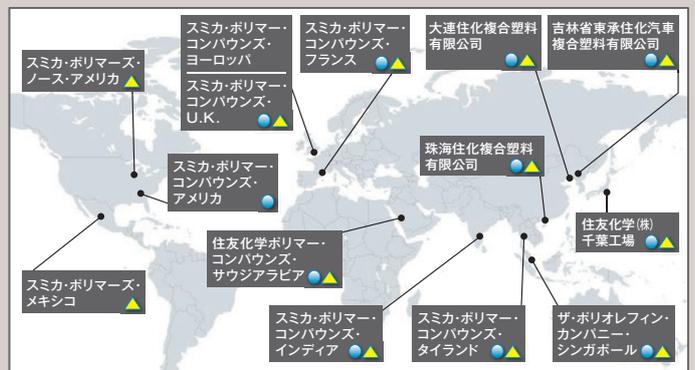
当社は、2005年5月の珠海住化複合塑料（中国）の設立を皮切りに、現在、海外9か国12拠点にポリプロピレン（以下、PP）コンパウンドの拠点を構え、グローバルに成長する自動車向けPP系材料の製造販売を行っています。世界の自動車生産台数は2020年に1億台を超え、中でも中国・インド・メキシコ等の新興国が大きく生産台数を伸ばすと予測されています。この伸長が続く海外の自動車向けPP需要を捉えるべく、昨年当社は新たに2拠点において工場・営業法人を開設いたしました。

2016年8月にはメキシコでの自動車向け樹脂原料販売を強化すべく、同国の営業法人としてSumika Polymers Mexico, S.de R.L.de C.V.を開設いたしました。また同年9月には当社・東洋インキSCホールディングス(株)・伊藤忠商事(株)のPPコンパウンド合弁事業会社であるSumika Polymer Compounds Europe Ltd.の子会社として、インドにおいてSumika Polymer Compounds (India) Private Limitedを開業いたしました。

近年、部材のPP化による車体重量の軽量化が進展しており、例えば、比重がPPより高く高価なナイロン等のエンジニアリングプラスチックが用いられていた自動車の一部構造体に当社が得意とするガラス繊維強化PPを用いるケースが広まりつつあります。当社PPコンパウンド事業は、引き続きPPの更なる高付加価値化、事業の高度化を追求しつつ、世界のモビリティ需要を原料供給面からグローバルに支えてまいります。



インド開所式にて



PPコンパウンド事業拠点一覧

●・・・生産拠点 ▲・・・販売拠点

千葉工場でポリエーテルサルホンの第二プラントを建設

当社は、ポリエーテルサルホン（以下、PES）の第二プラントを千葉工場姉崎地区に建設することを決定し、工事を開始いたしました。新設するプラントは2018年3月末完成を予定しています。増強後の生産能力は愛媛工場の既存設備と合わせると約6,000トン／年となります。今回の第二プラント建設により製造工場の複数拠点化が実現し、安定供給体制の強化が図れます。

当社は、PESが有する靱性付与特性・難燃性・寸法安定性・人体適合性を活かし、航空機、医療用途を中心に展開しています。これらの分野での堅調な需要と更なる需要増加に加え、自動車分野（構造材、機構部品）や電気・電子分野での成形材やフィルムの用途開発による需要拡大に対応する計画です。

当社は、高い成長が見込まれる環境・エネルギー分野の事業拡大を進めています。これからも顧客密着型のマインドセットに基づいた製品・サービスの提案を通じて、PESをはじめとするスーパーエンジニアリングプラスチック事業の強化を図ってまいります。



PES第一プラント（愛媛工場）



PES第二プラント（千葉工場で建設中）の3Dモデル

ブラジルに農薬などの研究開発拠点を開設 —「ラテン・アメリカ・リサーチ・センター」始動—

当社は2016年11月に、農薬などのアグロソリューション製品の効力評価、開発、分析を行う「ラテン・アメリカ・リサーチ・センター」(以下、LARC)をブラジルに開所いたしました。

LARCは、当社グループが初めて中南米に設置する研究開発拠点で、約48ヘクタールの敷地に、試験圃場、研究棟、温室などを備え、当社100%子会社である住友化学ブラジル社が運営します。LARCの開設により、アグロソリューション事業の戦略地域である中南米を対象とした、精密かつ信頼性の高い評価試験の実施が可能となり、現地に最適な製品の開発が加速されます。また、当社がすでに研究開発拠点を持つ北半球と逆の季節である南半球に拠点を置くことで、最適な気候条件の地域を選び、効率的な屋外試験を実施することができます。

中南米の農薬市場は近年急速に成長し、現在、世界市場の約1/4を占めており、特にブラジルは米国を抜いて世界最大の市場です。また、同地域には、世界有数の農業国であるアルゼンチン、大規模なプランテーションを有する中米諸国もあり、新興国などの食糧需要の増加を背景に、農業生産、ひいては農薬等の農業関連資材市場の更なる拡大が見込まれています。

LARCは、アグロソリューション関連だけではなく飼料添加物など他事業での活用も図っていきます。当社は、LARCの開設を契機に、中南米地域での事業拡大をこれまで以上に推進してまいります。

＜ラテン・アメリカ・リサーチ・センターの概要＞

名称：Latin America Research Center

所在地：ブラジル・サンパウロ州 Mogi Mirim 市郊外



ラテン・アメリカ・リサーチ・センター

モンサント社と雑草防除分野の次世代技術について 新たなグローバル協力関係を構築

当社は、2016年6月に米国の種子・バイオ大手であるモンサント社との間で、雑草防除において新たなグローバル協力関係を構築することに合意しました。

この合意は、両社で次世代の雑草防除体系の創出・普及を目指すもので、当社は新規剤を含むPPO*阻害型除草剤の開発を担います。

当社は、2010年にモンサント社と米国における雑草防除分野での戦略的協力関係を築き、2014年にはブラジル、アルゼンチンで当社の除草剤であるフルミオキサジンとモンサント社の雑草防除体系に組み込むことに合意し、同社の除草剤ブランドRoundup®の有効成分グリホサートに抵抗性を示す難防除雑草の抑制に大きな成果を上げてきました。

当社は、高い成長が見込まれるライフサイエンスを重点分野の一つと位置付けています。今回の協力関係による除草剤製品群の拡充を含め、グローバルに農業事業の拡大に進めるとともに、農作物の安定生産と世界の人口増加に対応した食糧増産の要請に応えるべく貢献してまいります。

*PPOは、葉緑素(クロロフィル)の生合成に関与する酵素「プロトポルフィリノーゲンオキシダーゼ」のこと。

展示会などへの出展

◆第4回 [関西] 高機能プラスチック展

会期：2016年10月5日～7日

会場：インテックス大阪

主催：リード エグジビション ジャパン株式会社

「[関西] 高機能プラスチック展」は、高機能プラスチック・複合材の成形、加工から材料技術に至るあらゆる樹脂関連技術の専門展であり、2013年から毎年開催されています。

当社は部門横断的に一丸となって、さまざまな開発品や製品を出展いたしました。当社ブースは新しい機能を求めるお客様にぎわい、約750人の方々にご来訪いただきました。展示会後は、興味をお持ちいただいた多くのお客様と、展示した開発品・製品の用途開発を進めています。

■展示内容

超高純度アルミニウム SUPRAL®
 耐熱性改良EPR
 耐油改良エラストマー材料
 液状ガラス（高UV耐性透明シリコン樹脂）
 撥水撥油／防汚コーティング
 抗菌性樹脂材料
 樹脂製蓄熱材料
 ハロゲンフリー難燃エラストマー



◆ライティング・フェア 2017

会期：2017年3月7日～10日

会場：東京ビッグサイト

主催：一般社団法人 日本照明工業会、日本経済新聞社

「ライティング・フェア」は、一般照明器具からLED、有機ELなど最新技術に至る照明に関する日本最大級の総合展示会であり、今回は7万人を超える来場者がありました。建築建材や店舗等に関する展示会も同時開催されており、建築設計や商業施設に関わる方々も多く来場されました。

当社は、有機EL照明にスポットを当て、建材一体化照明や施設照明、表示板などの実際の使用イメージを提案し、来場された方が具体的に使用環境を発想できるような展示を行いました。展示した照明パネルは、従来型照明では達成が難しい鮮やかな色彩と驚異の薄さを特徴としており、なかでも、株式会社キシマ他2社と協同した、有機ELでしか実現しえない器具を創出する「RE-EL PJ」の成果から生まれた「Layer Light」、「Halfull Light」は、商品化された照明器具として初めて展示され、多くの注目を集めていました。

当社ブースには3,000人を超える方々にご来訪いただき、展示会後も多くのお問い合わせを頂戴しています。



Layer Light(左)とHalfull Light(右)

◆自動車技術展：人とくるまのテクノロジー展2017 横浜

会期：2017年5月24日－26日

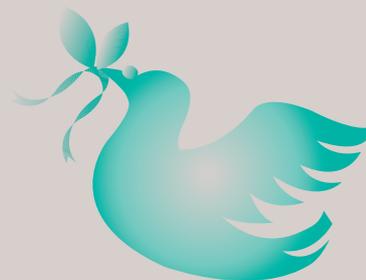
会場：パシフィコ横浜

主催：公益社団法人 自動車技術会

「人とくるまのテクノロジー展」は自動車業界の第一線で活躍する技術者・研究者のための自動車技術の専門展として1992年より開催されている国内最大規模の展示会です。国内の四輪自動車メーカーをはじめ、部品、材料、測定、CAEソリューションなどの企業各社や関係協会など自動車産業にかかわるあらゆる業界から出展があり、年々その規模が拡大しており、今年は横浜会場で約9万人の来場者がありました。

当社は2010年に出展を開始し、今年で8年目の参加となりました。「あしたの地球に会いに行こう」のコンセプトのもと、自動車の技術革新、持続可能な社会の発展への貢献を目指し、未来のくるまの「安心」につながる製品・技術という観点で展示を行いました。

くるまの進化に伴い需要が期待される用途への新しい材料提案、既存の金属・ガラス材料を代替し新たな付加価値も提案できる材料、部品製造工程の削減や合理化に貢献できる材料の提案など幅広い内容を出展いたしました。約5,000人の方々に当社ブースにご来訪いただき、さまざまな情報・意見交換を活発に行い、交流を深めました。



外部表彰受賞紹介

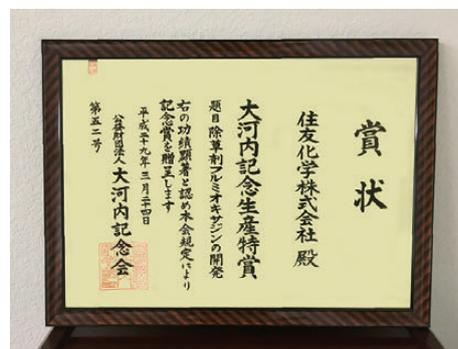
◆第63回(平成28年度)大河内記念生産特賞

住友化学株式会社

業 績

「除草剤フルミオキサジンの開発」

フルミオキサジンは、住友化学株式会社において独自に見出した母核構造を改良、最適化して発明された除草剤であり、その優れた除草活性に加え、低感受性雑草ができていくという性質も有する。また、高い生産性と安全性を満たす生産工程の確立にも成功している。現在もダイズ生産国を中心に使用実績を伸ばしており、今後も継続的に増大するものと予想される。除草剤抵抗遺伝子組み換え作物が浸透しつつある状況を踏まえると、より大きな市場規模に成長することが期待される。



◆2016 STAM Best Paper Award (STAM: Science and Technology of Advanced Materials)

筑波開発研究所
(現所属：先端材料開発研究所)

関根 千津

筑波開発研究所
(現所属：先端材料開発研究所)

津幡 義昭

筑波開発研究所
(現所属：有機EL事業化室)

山田 武

筑波開発研究所
(現所属：(一社)日本国際知的財産保護協会)

北野 真

筑波開発研究所
(現所属：技術・研究企画部 兼
(株)住化技術情報センター)

土居 秀二

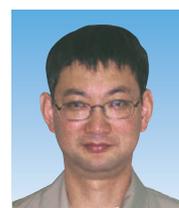
論 文

「Recent progress of high performance polymer OLED and OPV materials for organic printed electronics」

プリンテッドエレクトロニクスの代表的用途である有機ELと有機薄膜太陽電池につき、開発の歴史から最近の開発状況を俯瞰した。材料そのものの物性だけでなく、この分野の材料開発を特に難しくしている、デバイス物性やデバイス劣化要因に着目し、数十の既報からの情報を合わせてまとめるとともに、今後の材料開発トレンドについても言及した。2014年から2年間の被引用数が最も多かったことが評価され、受賞論文に選出された。



Chizu SEKINE



Yoshiaki TSUBATA



Takeshi YAMADA



Makoto KITANO



Shuji DOI

◆平成29年度 日本農薬学会 業績賞(技術)

| | |
|--|-------|
| 健康・農業関連事業研究所 | 木村 教男 |
| 健康・農業関連事業研究所 (現所属：Sumitomo Chemical (U.K.), plc.) | 橋爪 雅也 |
| 健康・農業関連事業研究所 (現所属：住化テクノサービス(株)) | 草場 友之 |
| 健康・農業関連事業研究所 (現所属：国際アグロ事業部) | 田中 創一 |

業 績

「殺菌剤『フェンピラザミン』の開発」

一般名「フェンピラザミン」は、住友化学株式会社が独自に発明、開発した新規殺菌剤である。本剤は、予防効果、浸達性、治療効果、残効性等を有しており、果樹や野菜の灰色かび病、菌核病、灰星病等に対して高い防除効果を示す。標的酵素は、ステロール生合成経路の3-keto reductaseであり、他の作用機作の剤に感受性が低下した菌にも効果がある。これまでに、本剤は日本、EU諸国等、30以上の国において農薬登録を取得しており、今後さらに登録国を拡大予定である。



Norio KIMURA



Masaya HASHIZUME



Tomoyuki KUSABA



Soich TANAKA

◆2016年度 日本毒性病理学会 JTP学術賞

JTP奨励賞

生物環境科学研究所 緒方(井澤) 敬子

論 文

「Alteration of microRNA expressions in the pons and medulla in rats after 3,3'-iminodipropionitrile administration」

近年、機能性RNAの一種であるmicroRNAが化学物質による毒性発現に関与することが報告されている。本研究では、神経軸索障害を引き起こす3,3'-イミノジプロピオニトリル (IDPN) を投与したラットモデルを用い、microRNAの発現変動解析を行ったところ、軸索病変の程度が強い神経組織においてmiR-547*の発現が増加し、IDPNによる神経病変形成にmiR-547*が関与することを見出した。



Keiko OGATA

◆平成29年度 日本農薬学会 論文賞
平成28年度 望月喜多司記念賞 論文賞

| | | |
|---------------------------------------|-----|----|
| 生物環境科学研究所 | 富ヶ原 | 祥隆 |
| 生物環境科学研究所 (現所属：エネルギー・機能材料品質保証室) | 樽井 | 弘和 |
| 生物環境科学研究所 | 永堀 | 博久 |
| 株式会社LSIメディエンス | 杉本 | 健二 |
| 株式会社新日本科学 | 茂木 | 正行 |
| 生物環境科学研究所 (現所属：健康・農業関連事業業務室) | 西岡 | 和彦 |
| 生物環境科学研究所 | 川村 | 聡 |
| 生物環境科学研究所 | 磯部 | 直彦 |
| 生物環境科学研究所 (現職：(株)住化技術情報センター 客員研究員) | 奥野 | 泰由 |
| 生物環境科学研究所 (退職) | 金子 | 秀雄 |



Yoshitaka TOMIGAHARA



Hirokazu TARUI



Hirohisa NAGAHORI



Kazuhiko NISHIOKA



Satoshi KAWAMURA



Naohiko ISOBE

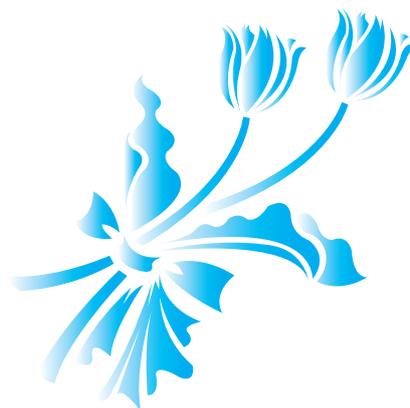


Yasuyoshi OKUNO

論文

「Species differences in the developmental toxicity of procymidone
—Remarkable variation in pharmacokinetics, metabolism, and excretion—」

殺菌剤プロシミドンは、発生毒性をラットでは示すがウサギでは示さない。この種差の主要因の1つが、生体内での代謝反応により生成する代謝物の種類及びそれらの代謝物の排泄経路の種差であることを、化合物の吸収、分布、代謝、排泄という生体内での挙動の面から明らかにした。本論文は農薬の科学・技術の面で優れた研究論文であると評価され、日本農薬学会ならびに公益財団法人 食品農医薬品安全性評価センターから表彰された。



主な投稿論文・口頭発表

(2016年4月1日～2017年3月31日)

高分子材料

Stabilization of polystyrene thin films by introduction of a functional end group

下村 信一郎*, 犬束 学*, 田島 宏一郎, 並河 正明, 森富 悟, 松野 寿生*, 田中 敬二* (エネルギー・機能材料研究所, *九州大学)

Polymer Journal, **48** (9), 949 (2016)

Development in polymer-type semiconducting material for organic thin film transistor

金坂 将 (先端材料開発研究所)

International Conference on Flexible and Printed Electronics 2016 (ICFPE 2016) (山形), 2016年9月6日～8日

The first international standards for IEC/TC119 printed electronics materials substrate and conductive ink

小田 正明*¹, 前田 郷*², 佐藤 忠伸*³, 関根 千津 (先端材料開発研究所, *¹次世代プリンテッドエレクトロニクス技術研究組合, *²東洋紡(株), *³富士フイルム(株))

Printing for Fabrication 2016 (イギリス), 2016年9月12日～16日

New halogen-free flame retardant TPEs (ESPOLEX HFFR-TPEs)

黒川 良介, 夏山 延博 (石油化学品研究所)

SPE Automotive TPO Engineered Polyolefins Global Conference 2016 (米国), 2016年10月2日～5日

EPDM's outdoor exposure test under real environmental conditions over a forty year period

渡部 健太, 中野 貞之 (エネルギー・機能材料研究所)

IRC 2016 Kitakyusyu (国際ゴム技術会議 北九州) (福岡), 2016年10月24日～28日

World first international standard for printed electronics materials

関根 千津, 小田 正明*¹, 前田 郷*², 佐藤 忠伸*³ (先端材料開発研究所, *¹次世代プリンテッドエレクトロニクス技術研究組合, *²東洋紡(株), *³富士フイルム(株))

The 23rd International Display Workshops in conjunction with Asia Display 2016 (IDW/AD '16) (福岡), 2016年12月7日～9日

反応性高分子による高分子製品の高性能、高機能化
森富 悟 (エネルギー・機能材料研究所)

高分子学会 第25回ポリマー材料フォーラム (愛知), 2016年11月10日～11日

無機・金属材料

Design concept for intelligent filter substrate on aftertreatment application – hexagonal-based channel geometry and performance

Andrzej Sieminski*, 岩崎 健太郎*, 黒田 友也, 貞岡 和男 (エネルギー・機能材料研究所, *Sumika Ceramics Poland Sp. z o.o.)

SAE 2016 World Congress and Exhibition (米国), 2016年4月12日～14日

Development of innovative ceramics particulate filter for aftertreatment application

Andrzej Sieminski*, 岩崎 健太郎*, 黒田 友也, 貞岡 和男 (エネルギー・機能材料研究所, *Sumika Ceramics Poland Sp. z o.o.)

6th International MinNOx Conference, Berlin (ドイツ), 2016年6月22日～23日

Size effect in the thermal conductivity of high purity aluminium

永田 章, 久保 雄輝, 須安 祐子, 星河 浩介 (情報電子化学品研究所)

1st Asian ICMC and CSSJ 50th Anniversary Conference (石川), 2016年11月7日～10日

六角形セル構造ディーゼル微粒子フィルターInlet/Inlet壁面におけるスス堆積に及ぼすバイパス流の影響

坂間 理*, 中川 順達*, 洪田 匠, 花村 克悟* (エネルギー・機能材料研究所, *東京工業大学)

日本機械学会 第27回内燃機関シンポジウム (東京), 2016年12月5日～7日

精密化学 (有機ファイン) 関連製品

Novel coupling agents for NR compositions with carbon black (CB) filler

井山 浩暢, 渡邊 要介, オズトゥルク オルハン, 上北 泰生, 徳田 修, 世古 信三 (エネルギー・機能材料研究所)

IRC 2016 Kitakyusyu (国際ゴム技術会議 北九州) (福岡), 2016年10月24日-28日

加硫ゴムのカーボンブラック分散性改良に向けた取組み～新規カーボンブラックカップリング剤の紹介～

徳田 修 (エネルギー・機能材料研究所)

日本ゴム協会 第124回配合技術研究分科会 (東京), 2016年9月7日

加硫ゴムのカーボンブラック分散性改良に向けた取組み～新規カーボンブラックカップリング剤の紹介～

信岡 俊宏 (エネルギー・機能材料研究所)

日本ゴム協会 第234回ゴム技術シンポジウム (東京), 2017年3月10日

農業化学関連製品

Sustained-release microsphere formulation containing an agrochemical by polyurethane polymerization during an agitation granulation process

寺田 貴俊*^{1,2}, 田上 学*¹, 大坪 敏朗*¹, 岩尾 康範*², 野口 修治*², 板井 茂*² (*¹健康・農業関連事業研究所, *²静岡県立大学)

International Journal of Pharmaceutics, **509**, 328 (2016)

Evaluation of the thermosensitive release properties of microspheres containing an agrochemical compound

寺田 貴俊*^{1,2}, 大坪 敏朗*¹, 岩尾 康範*², 野口 修治*^{2,3}, 板井 茂*² (*¹健康・農業関連事業研究所, *²静岡県立大学, *³東邦大学)

Chemical and Pharmaceutical Bulletin, **65**(1), 49 (2017)

Mode of entry of a vaporized pyrethroid knockdown agent into the body of the housefly, *Musca domestica* (Diptera:Muscidae)

住田 雄亮*^{1,2}, 川田 均*², 皆川 昇*² (*¹健康・農業関連事業研究所, *²長崎大学)

Applied Entomology and Zoology, **51**(4), 653 (2016)

流動層を用いた農薬懸濁液の直接顆粒化法における顆粒生成機構および顆粒物性の検討

柳澤 和幸, 綿野 哲* (アグロ事業部, *大阪府立大学) 粉体工学会誌, **53**(11), 710 (2016)

農薬の製剤・施用技術の最新動向⑦ マイクロカプセル製剤 ～利用の現状と今後の課題～

植田 展仁 (健康・農業関連事業研究所)

植物防疫, **70**(11), 37 (2016)

新規殺菌剤フェンピラザミンの創製と開発

木村 教男 (健康・農業関連事業研究所)

月刊ファインケミカル, 2016年5月号, 33 (2016)

Technical monograph No.2 –The international coding system and formulation categorization–

上月 由美子 (健康・農業関連事業研究所)

CIPAC Symposium (東京), 2016年6月14日

Introduction of 3 new formulation types

上月 由美子 (健康・農業関連事業研究所)

CIPAC Symposium (東京), 2016年6月14日

Extension of CIPAC method MT 46.3 to MR (accelerated storage procedure) small scale collaborative trial

佐々木 崇*, 上月 由美子 (健康・農業関連事業研究所, *生活環境事業部)

CIPAC Technical Meeting (東京), 2016年6月15日

New matrix-release formulation, SumiLarv®2MR containing pyriproxyfen for long lasting control of *Aedes aegypti* larvae

大橋 和典, Yousif E. Himeidan*², 鷹野 実, 中谷 逸作*³, 西山 利正*³, John F. Invest*⁴, John R. Lucas*⁴, 庄野 美徳*¹ (健康・農業関連事業研究所,

*1生活環境事業部, *2Vector Health International Ltd., *3関西医科大学, *4Sumitomo Chemical (U.K.), plc.)

65th Annual Meeting of the American Society of Tropical Medicine and Hygiene (米国), 2016年11月13日-17日

Larval control of *Aedes aegypti* using SumiLarv[®] 2MR, a new long lasting matrix-release formulation containing pyriproxyfen

庄野 美徳*1, 大橋 和典, 鷹野 実, Yousif E. Himeidan*2, 中谷 逸作*3, 西山 利正*3, John F. Invest*4, John R. Lucas*4 (健康・農業関連事業研究所, *1生活環境事業部, *2Vector Health International Ltd., *3関西医科大学, *4Sumitomo Chemical (U.K.), plc.)

International workshop on "Insecticide resistance in vectors of emerging arboviruses: challenge and prospects for vector control", (ブラジル), 2016年12月5日-7日

FRAC working group Mandestrobin monitoring status

植村 一平 (国際アグロ事業部)

FRAC (Fungicide Resistance Action Committee) QoI Working Group (ドイツ), 2016年12月15日

FRAC working group Fenpyrazamine monitoring status

植村 一平 (国際アグロ事業部)

FRAC (Fungicide Resistance Action Committee) SBI Working Group (ドイツ), 2016年12月16日

新規ピレスロイド系殺虫剤モンフルオロトリン (スミフリーズ[®])

岡本 央 (健康・農業関連事業研究所)

第68回日本衛生動物学会大会 (栃木), 2016年4月15日-17日

新規殺虫原体モンフルオロトリンのイエバエに対する効力

田中 嘉人*2, 山田 将弘, 庄野 美徳*1, 西岡 史雄 (健康・農業関連事業研究所, *1生活環境事業部, *2住化エンバイロメンタルサイエンス(株))

第68回日本衛生動物学会大会 (栃木), 2016年4月15日-17日

フタトゲチマダニ両性生殖系統に対する各種殺虫剤・殺ダニ剤の基礎効力

奥田 彩子, 早稲田かおり, 大橋 和典, 齋藤 茂, 西岡 史雄 (健康・農業関連事業研究所)

第68回日本衛生動物学会大会 (栃木), 2016年4月15日-17日

アゾリルピリミジン系殺虫剤の探索研究

伊藤 舞衣, 野倉 吉彦, 高岡 大介, 鈴木 竜也, 村上 美紀*, 池上 宏 (健康・農業関連事業研究所, *住化テクノサービス(株))

新規素材探索研究会 第15回セミナー (神奈川), 2016年6月3日

新規ピレスロイド系殺虫剤モンフルオロトリン

岡本 央 (健康・農業関連事業研究所)

第23回日本環境動物昆虫学会セミナー (大阪), 2016年8月30日

ベクターコントロール用蚊発生源対策製品の開発

寺田 貴俊, 梶原 知紘, 大橋 和典, 鷹野 実 (健康・農業関連事業研究所)

日本農薬学会 第36回農薬製剤・施用法研究会 (神奈川), 2016年10月6日-7日

蒸散したノックダウン型ピレスロイドのイエバエ体内への侵入経路

住田 雄亮*1,2, 川田 均*2, 皆川 昇*2 (*1健康・農業関連事業研究所, *2長崎大学)

日本環境動物昆虫学会 第28回年次大会 (長野), 2016年11月12日-13日

企業における探索研究-ピレスロイド系殺虫剤を例にして-

森 達哉 (健康・農業関連事業研究所)

平成28年度 有機合成化学研究所講演会 (第31回) (京都), 2016年11月22日

殺菌剤「フェンピラザミン」の開発 (学会賞受賞者講演)

木村 教男, 橋爪 雅也*2, 草場 友之*3, 田中 創一*1

(健康・農業関連事業研究所, *¹国際アグロ事業部,
*²Sumitomo Chemical (U.K.), plc., *³住化テクノ
サービス(株))
日本農薬学会 第42回大会 (愛媛), 2017年3月6日-8日

光学・表示関連製品

平滑で透明なはっ水・はつ油コーティング材料の開発
竹厚 流, 櫻井 彩香 (情報電子化学品研究所)
表面技術, 67 (9), 485 (2016)

Latest progress and its fundamentals for polymer-OLED material

山田 武 (先端材料開発研究所)
Society for Information Display, Display Week 2016 International Symposium (米国), 2016年5月24日-27日

Latest development of polymer light-emitting material for printed OLED

山田 武 (先端材料開発研究所)
The 16th International Meeting on Information Display (IMID 2016) (韓国), 2016年8月23日-26日

Latest development of high-performance OLED material suitable for printing fabrication

山田 武 (先端材料開発研究所)
2017 International Conference on Display Technology (ICDT) (中国), 2017年2月18日-20日

有機合成

Research and development of an efficient synthesis of a key building block for anti-AIDS drugs by diphenylprolinol-catalyzed enantio- and diastereoselective direct cross aldol reaction

林 裕美, 相川 利昭, 島崎 泰治, 岡本 裕晃, 富岡陽介*, 三木 崇, 竹田 昌央, 池本 哲哉 (健康・農業関連事業研究所, *医薬化学品事業部)
Organic Process Research & Development, 20, 1615 (2016)

プロリン誘導体を触媒とする直截的不斉アルドール反応を利用した抗エイズ薬中間体のプロセス開発
池本 哲哉 (健康・農業関連事業研究所)
月刊ファインケミカル, 2017年3月号, 42 (2017)

光学活性なシクロプロパンスルホン酸塩の工業的プロセス開発

田仲 洋平, 安岡 順一, 相川 利昭, 池本 哲哉 (健康・農業関連事業研究所)
日本プロセス化学会 2016サマーシンポジウム (愛知), 2016年7月28日-29日

有機分子触媒の発展と医薬品合成への応用

池本 哲哉 (健康・農業関連事業研究所)
日本化学会 近畿支部北陸地区講演会 (福井), 2016年11月25日

触 媒

New process for propylene oxide derivatives ~On-purpose technology for dipropylene glycol/tripropylene glycol~

石原 慎二郎, 吉井 政之*¹, 池田 翔子, 篠原 浩二*¹, 村田 誠*² (石油化学品研究所, *¹千葉工場, *²先端材料開発研究所)
7th Asia-Pacific Congress on Catalysis (APCAT-7) (インド), 2017年1月17日-21日

化学工学

塩酸を取り扱う蒸留プロセスの設計事例

大本 宣仁 (工業化技術研究所)
分離技術会 蒸留フォーラム2017 (東京), 2017年2月24日

分析物性関連

シリコン系材料に対するX線光子相関分光法によるダイナミクス測定

西田 理彦, 池内 淳一, 松見 志乃, 篠原 佑也*, 雨宮慶幸* (先端材料開発研究所, *東京大学)

フロンティアソフトマター開発専用ビームライン産学
連合体 成果報告書集 (2015年度), 21 (2016)

ポリプロピレンの配向構造形成過程に関する検討

板東 晃徳, 鈴木 知也, 濱松 浩, 篠原 佑也*, 雨宮
慶幸* (先端材料開発研究所, *東京大学)

フロンティアソフトマター開発専用ビームライン産学
連合体 成果報告書集 (2015年度), 23 (2016)

高分子の階層構造ならびに構造形成機構に関する検討
西田 理彦, 松見 志乃, 犬飼 洋志, 板東 晃徳, 鈴木
知也, 濱松 浩, 篠原 佑也*, 雨宮 慶幸* (先端材料開
発研究所, *東京大学)

SPring-8利用報告書, 課題番号: 2016A7208 (2016)

高分子の階層構造ならびに構造形成機構に関する検討
西田 理彦, 松見 志乃, 篠原 佑也*, 雨宮 慶幸* (先
端材料開発研究所, *東京大学)

SPring-8利用報告書, 課題番号: 2016B7258 (2017)

Operand photoelectron spectroscopic study of elec- tronic structure of polymer-cathode interface of an operating organic light-emitting diode

山下 良之*, 吉川 英樹*, 池内 淳一, 濱松 浩, 宮本
剛志, 田中 慎也 (先端材料開発研究所, *(国研)物質・
材料研究機構)

32nd European Conference on Surface Science (フラ
ンス), 2016年8月28日-9月2日

高分子有機半導体材料の電気的光学的特性の計算科 学的研究

石田 雅也, 秋野 喜彦 (先端材料開発研究所)

第3回「京」を中核とするHPCIシステム利用研究課題
成果報告会 (東京), 2016年10月21日

コンピューター利用・情報関連

複雑な形状を取り扱った流体計算法の研究動向

島田 直樹 (生産安全基盤センター)

化学工学, 2016年4月号, 257 (2016)

制御診断システムを用いたプラント制御性の見える化 と最近の取り組み

児林 智成 (生産安全基盤センター)

化学工学会 システム・情報・シミュレーション部会
プラントオペレーション分科会 第137回研究会 (大阪),
2016年4月14日

プラント運転を目的とした運転訓練シミュレータの開発

稲田 翔吾 (生産安全基盤センター)

化学工学会 第48回秋季大会 (徳島), 2016年9月6日-
8日

ダイナミックシミュレーションを用いたプラント制御 系設計と Predictive Functional Controlを用いた制 御高度化

橋爪 悟, 吉田 周平* (生産安全基盤センター, *千葉
工場)

第50回日本芳香族工業会大会 (北海道), 2016年10月
12日-14日

装置における分散系気液二相流シミュレーションの実際

島田 直樹, 仙田 早紀 (生産安全基盤センター)

化学工学会 東海支部 第50回化学工学の進歩講習会
「気液固分散系現象の基礎と応用」(愛知), 2016年11
月9日-10日

界面計算モデルおよび平均化モデルの適用性向上に関 する研究

島田 直樹, 仙田 早紀, 内橋 祐介 (生産安全基盤セン
ター)

化学工学会 第22回流動化・粒子プロセッシングシン
ポジウム (東京), 2016年12月8日-9日

流体シミュレーションの適用性向上に関する動向と将 来のニーズ

島田 直樹 (生産安全基盤センター)

日本学術振興会 プロセスシステム工学第143委員会
平成28年度第4回研究会 (東京), 2017年2月17日

生物環境安全性評価

Metabolism, bioaccumulation, and toxicity of pes- ticides in aquatic insect larvae

片木 敏行, 田中 仁詞 (生物環境科学研究所)

Journal of Pesticide Science, 41 (2), 25 (2016)

Pesticide behavior in modified water-sediment systems

片木 敏行 (生物環境科学研究所)

Journal of Pesticide Science, 41 (4), 121 (2016)**Alteration of microRNA expressions in the pons and medulla in rats after 3,3'-iminodipropionitrile administration**緒方 敬子*^{1,2}, 串田 昌彦*¹, 宮田 かおり*¹, 住田 佳代*¹, 武田 周二*¹, 井澤 武史*², 桑村 充*², 山手 丈至*² (*¹生物環境科学研究所, *²大阪府立大学)*Journal of Toxicologic Pathology*, 29 (4), 229 (2016)**A comparison of potency differences among thyroid peroxidase (TPO) inhibitors to induce developmental toxicity and other thyroid gland-linked toxicities in humans and rats**元永 耕三, 太田 美佳*¹, 小田原 恭子, 齋藤 昇二*², Frank Welsch*³ (生物環境科学研究所, *¹住化テクノサービス(株), *²(株)住化分析センター, *³Orbitox, International Toxicology Consultants)*Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 80, 283 (2016)**Molecular dynamics mechanism to generate species differences in inhibition of protoporphyrinogen oxidase by flumioxazin**

荒川 晶彦*, 大谷 光弘, 岩下 勝将, 山崎 一人* (生物環境科学研究所, *大日本住友製薬(株))

Computational Toxicology, 1, 12 (2017)**Novel phototoxicity assay using human embryonic stem cell-derived retinal pigment epithelial cells**

森 剛志, 東 清史, 中野 徳重, 安藤 覚, 桑原 篤, 鈴木 紀之, 斎藤 幸一 (生物環境科学研究所)

Toxicology, 378, 1 (2017)**Risk assessment of workers exposed to poorly soluble low toxic nanomaterials**

河合 里美, 庭野 将徳, 堀江 宣行, 的場 好英, 小田原 恭子, 佐藤 雅之 (生物環境科学研究所)

8th International Nanotoxicology Congress (米国), 2016年6月1日-4日**Investigation of modified ready biodegradability test for poorly water soluble organic chemicals**

竹腰 沙紀, 高野 光太郎, 的場 好英, 佐藤 雅之 (生物環境科学研究所)

5th International Conference on Emerging Contaminants and Micropollutants in the Environment (オーストラリア), 2016年9月20日-23日**フタル酸ビス (2-エチルヘキシル) およびフェノルビタール反復投与による生体内ホルモン変動の作用機序検討**

山口 尊史, 前田 稔, 生田 雄也, 内藤 義一, 緒方 敬子, 安部 潤, 樋口 敏浩, 川村 聡 (生物環境科学研究所)

第43回日本毒性学会学術年会 (愛知), 2016年6月29日-7月1日

ナノ材料の作業環境リスク評価-難溶性低毒性粒子の例

河合 里美, 庭野 将徳, 堀江 宣行, 的場 好英, 小田原 恭子, 佐藤 雅之 (生物環境科学研究所)

第43回日本毒性学会学術年会 (愛知), 2016年6月29日-7月1日

Vaginal threadを有するラットの繁殖性に関する検討

森田 優香, 細川 義典, 宮本 太樹, 谷口 輝政, 大谷 光弘, 伊原 良, 岩下 勝将, 樋口 敏浩 (生物環境科学研究所)

第56回日本先天異常学会学術集会 (兵庫), 2016年7月29日-31日

作物中のマンデストロビン残留分析法の検討

高橋 美知, 福島 雅雄, 門岡 織江 (生物環境科学研究所)

日本農薬学会 第39回農薬残留分析研究会 (兵庫), 2016年10月13日-14日

トリメチルスズ誘発神経毒性ラットモデルにおける血清miRNAバイオマーカー探索緒方 敬子*^{1,2}, 武田 周二*¹, 串田 昌彦*¹, 桑村 充*², 井澤 武史*², 山手 丈至*² (*¹生物環境科学研究所, *²大阪府立大学)

第33回日本毒性病理学会総会及び学術集会（大阪），
2017年1月26日－27日

安全工学

ゼロ災継続を目指した研究所での安全文化の深化活動
木田 泰孝（先端材料開発研究所）
安全工学会 第30回安全管理の最新動向講習会（東京），
2016年6月6日－7日

設備材料工学

化学装置材料の非破壊評価技術の開発と適用
末次 秀彦，多田 豊和，楠本 達也（生産安全基盤セン
ター）
検査技術，2016年10月号，18（2016）

**Development of magnetic eddy current testing tech-
niques**

多田 豊和（生産安全基盤センター）
*43rd Review of Progress in Quantitative Nondestructive
Evaluation (QNDE2016)*（米国），2016年7月16日－
22日

化学会社における材料問題への対応
中田 幹俊（生産安全基盤センター）
化学工学会 第48回秋季大会（徳島），2016年9月6日－
8日

化学プラントでの腐食問題とその対応
藤田 和夫（生産安全基盤センター）
腐食防食学会 中国・四国支部 第22回材料と環境講習
会（香川），2016年10月21日

炭素鋼管の高速検査技術の開発
多田 豊和（生産安全基盤センター）
化学工学会 第82年会（東京），2017年3月6日－8日

ライフサイエンス

**Generation of rat monoclonal antibodies against
human pancreatic ductal adenocarcinoma cells**

東 清史，藤井 伸彰*¹，串田 昌彦，山田 佳太*²，鈴木
紀之，斎藤 幸一，立花 太郎*¹（生物環境科学研究所，
*¹大阪市立大学，*²大阪大谷大学）

*Monoclonal Antibodies in Immunodiagnosis and Im-
munotherapy*, 35 (3), 148 (2016)

**Application of monoclonal antibodies against mouse
dermokine**

東 清史，Cai-Xia Wang*¹，横山 智哉子*²，山田 佳太*³，
斎藤 幸一，立花 太郎*¹（生物環境科学研究所，*¹大阪
市立大学，*²山形大学，*³大阪大谷大学）

*Monoclonal Antibodies in Immunodiagnosis and Im-
munotherapy*, 36 (1), 15 (2017)

**Prediction of *in vivo* developmental toxicity by com-
bination of Hand1-Luc embryonic stem cell test and
metabolic stability test with clarification of meta-
bolically inapplicable candidates**

永堀 博久，鈴木 紀之，Florian Le Coz，大森 崇*，斎藤
幸一（生物環境科学研究所，* 神戸大学）
Toxicology Letters, 259, 44 (2016)

第23回技術研修会 肺・気管の標本作製全般について
アンケート集計結果およびグループミーティングのま
とめ

齋藤 美佐江*¹，位坂 清継*²，勝山 清加*³，木村
正美*⁴，澤多 美和*⁵，島田 美千代*⁴，萩原 孝*⁶，永田
百合子*⁷，前田 圭子，宮本 由美子*⁸，三好 貴子*⁹，
望月 貴治*¹⁰，山口 肇*¹¹，中野 健二*¹²（生物環境科
学研究所，*¹日本バイオアッセイ研究センター，*²扶桑
薬品工業(株)，*³(株)中外医科学研究所，*⁴(株)サンプラ
ネット，*⁵ゼリア新薬工業(株)，*⁶(公財)食品農医薬品安
全性評価センター，*⁷(株)ヤクルト本社，*⁸武田薬品工
業(株)，*⁹塩野義製薬(株)，*¹⁰参天製薬(株)，*¹¹(一財)食
品薬品安全センター，*¹²アステラスリサーチテクノロ
ジー(株)）

実験病理組織技術研究会誌，25 (1), 41 (2016)

**Hand1-Luc Embryonic stem cell test (Hand1-Luc
EST): A reporter gene assay using engineered mouse
ES cells to evaluate embryotoxicity *in vitro***

Florian Le Coz，鈴木 紀之，永堀 博久，斎藤 幸一
（生物環境科学研究所）

17th Annual Congress of EUSAAT (European Society for Alternatives to Animal Testing) (オーストリア), 2016年8月24日-27日

International validation study on the Hand1-Luc Embryonic stem cell test (Hand1-Luc EST): A reporter gene assay using engineered mouse ES cells to evaluate embryotoxicity *in vitro*

小島 肇*¹, 斎藤 幸一, 永堀 博久, 鈴木 紀之, Florian Le Coz, 大森 崇*², 小林 眞弓*², 森 梓*², 伊藤 勇一*³, 劉舒捷*³, 柳 和則*⁴, 泉川 健*⁴, 渡辺 美香*⁵, 生悦住 茉友*⁵, Andrea Seiler*⁶, Michael-Wilhelm Schaeffer*⁷, Warren Casey*⁸, David Allen*⁸, Eui-Bae Jeung*⁹, 近江谷 克裕*¹⁰, 松本 一彦*¹¹, 桑形 麻樹子*⁵, 山崎 晶次郎*⁵, 田中 憲穂*⁵ (生物環境科学研究所, *¹国立医薬品食品衛生研究所, *²神戸大学, *³花王(株), *⁴(株)住化分析センター, *⁵(一財)食品薬品安全センター, *⁶ZEBET, *⁷ECVAM, *⁸ICCVAM, *⁹KoCVAM, *¹⁰(国研)産業技術総合研究所, *¹¹名古屋市立大学)

5th Annual Meeting of the ASCCT (American Society for Cellular and Computational Toxicology) (米国), 2016年9月29日-30日

Odorant sensor using an insect olfactory receptor reconstructed in artificial cell membrane

三澤 宣雄*¹, 藤井 聡志*¹, 神谷 厚輝*¹, 大崎 寿久*^{1,2}, 三山 友希子, 高久 朋之, 高橋 康彦, 斎藤 幸一, 竹内 昌治*^{1,2} (生物環境科学研究所, *¹(公財)神奈川科学技術アカデミー, *²東京大学)

The 20th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences, μ TAS 2016 Conference (アイルランド), 2016年10月9日-13日

マウスES細胞を用いた*in vitro*神経毒性試験

小林 久美子, 鈴木 紀之, 斎藤 幸一 (生物環境科学研究所)

第43回日本毒性学会学術年会 (愛知), 2016年6月29日-7月1日

Hand1-Luc ESTによる発生毒性の予測: 代謝および体内動態の影響

永堀 博久, Florian Le Coz, 鈴木 紀之, 大森 崇*, 斎藤 幸一 (生物環境科学研究所, *神戸大学)

第43回日本毒性学会学術年会 (愛知), 2016年6月29日-7月1日

***In vitro*発生毒性試験 - Hand1-Luc Embryonic Stem Cell Test (Hand1-Luc EST) -**

鈴木 紀之, Florian Le Coz, 永堀 博久, 斎藤 幸一 (生物環境科学研究所)

第29回日本動物実験代替法学会 (福岡), 2016年11月16日-18日

マウスES細胞を用いた*in vitro*神経毒性試験

小林 久美子, 鈴木 紀之, 斎藤 幸一 (生物環境科学研究所)

第29回日本動物実験代替法学会 (福岡), 2016年11月16日-18日

お詫びと訂正

本誌2016号に記載誤りがございました。関係者の皆さま、ならびに読者の皆さまにご迷惑をおかけしましたことを深くお詫び申し上げますとともに、以下のように訂正いたします。

p38 Table 3

(誤)

Kinki University
Faculty of Agriculture

(正)

Kindai University
Faculty of Agriculture



薄層化が進む光学多層フィルムをナノオーダーで深さ解析ができる Ar ガスクラスターイオン銃を搭載した表面分析装置 (GCIB-XPS) (情報電子化学品研究所)

SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS

世界を変えるための 17 の目標



2015年9月25日-27日、ニューヨーク国連本部において、「**国連持続可能な開発サミット**」が開催され、「我々の世界を変革する：持続可能な開発のための2030アジェンダ」が採択されました。本アジェンダは、人間、地球および繁栄のための行動計画として、宣言および目標を掲げました。この目標が、ミレニアム開発目標 (MDGs) の後継であり、17の目標と169のターゲットからなる「**持続可能な開発目標 (SDGs)**」です。住友化学グループも、これらの持続可能な開発のための諸目標の達成に向けた取り組みに貢献していきます。

住友化学 2017 発刊にあたって

住友化学2017をお届けいたします。

本誌は住友化学グループが常々お世話いただいている方々へ、最近の新製品、新技術を紹介申し上げ、より一層のご理解とご協力をいただくよう編集したものです。

本誌の内容につきましては、さらに充実するよう努めたいと考えますが、なにとぞご批判賜りたく、今後ともよろしくご指導くださるようお願いいたします。

2017年7月

(無断転載を禁ず)

住友化学 2017

発行 平成29年7月31日

発行所 住友化学株式会社・編集兼発行人 小川 育三

住友化学

住友化学株式会社

技術・研究企画部

〒104-8260 東京都中央区新川2丁目27番1号

東京住友ツインビル(東館)

Phone:(03)5543-5272 Fax:(03)5543-5909

〒541-8550 大阪市中央区北浜4丁目5番33号 住友ビル

Phone:(06)6220-3396 Fax:(06)6220-3494

URL <http://www.sumitomo-chem.co.jp>

