

半導体ひずみセンサ「STREAL」の開発と事業化

岡田亮二^{*1}
(1958 年生)

宮嶋健太郎^{*2}
(1977 年生)

太田裕之^{*3}
(1961 年生)

相馬敦郎^{*4}
(1968 年生)

芦田喜章^{*5}
(1976 年生)

1. 概 要

機器やインフラのひずみを直接的に、しかも長期間継続的に計測する事は産業界の長年の課題であった。1930 年代に実用化されたひずみゲージは、その使い勝手の良さから、現在でも産業用途の主要手段であるが、耐久性、システムの大きさ、消費電力のため、機器やインフラに組み込むことが困難だった。

受賞者らは上記課題を解決すべく、2.5 mm 角の CMOS 半導体に計測ブリッジ、アンプ、A/D コンバータ、補正回路、温度センサなどを集積した半導体ひずみセンサを開発した。主な性能はひずみ分解能 $1\mu\epsilon$ 、消費電力 3mW である。これらは 産業界の長年の課題を解決できる性能だが、実用化のためには様々なアプリに適したモジュール化、使いこなし技術、コンポーネント化、周辺機器の開発等が必要であった。これらの課題を解決し、原理開発から約 10 年の期間を経て、「STREAL」の名称で上市することができた。現在、インフラ、加工機械、運搬機器など、様々な分野で応用が検討されている。

2. 技術の内容

(1)半導体技術

ひずみ計測システムを 2.5 mm 角チップに集積させた(図 1 参照)。高密度半導体はひずみを受けると特性が変化するが、様々な補正回路、ブリッジ回路のレイアウト等の工夫で解決した。またブリッジ回路を形成するピエゾ抵抗素子は温度依存性が大きい、近傍に温度計素子を配置し、自動の温度補正機能を実現した。

(2)実装技術 (モジュール化)

容易に使いこなすためには、ひずみを的確に IC チップに伝え、容易に取り扱えるモジュールが必要だった。試行錯誤の末、金属薄板に IC チップを接合する構造とした。モジュール外観を図 2 に、主な仕様を表 1 に示す。12mm^L×5mm^Wの金属薄板に IC チップを接合し、FPC を介して出力する構造である。アナログとデジタルの両方で出力できる。内臓の温度センサも出力でき、簡易の温度計としても利用できる。また、金属薄板上の IC チップの配置によって、引張圧縮ひずみ計測モデルとせん断ひずみ計測モデルをラインナップしている。

(3)使いこなし技術

図 3 にモジュールの使用方を示す。基本的には、接着剤を用いて金属薄板を被計測体に接着する。高強度、長寿命の接着剤の選定は難しく、用途に適した接着剤のデータベースを構築中である。

(4)今後の予定

独自の起歪体と STREAL を組合せ、様々なコンポーネント^{*1}や、分解能を $0.1\mu\epsilon$ まで向上した次世代 IC^{*2}を開発中である。



図 1 ひずみ計測システムの IC 集積化イメージと IC チップ外観

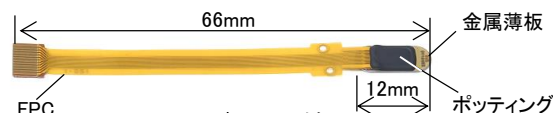


図 2 モジュール外観

表 1 モジュール(SRMS300NB0001)仕様

貼り付け対象	鉄・アルミニウム他金属推奨
端子数	12
電源電圧	3.3V or 5.0V
内蔵ADコンバータ	12bit、最大10ksps
センサ部ゲージ率	50×内蔵可変アンプ (8~1016倍)
消費電力	3mW (@電源=3.3V)
最小分解能	1 $\mu\epsilon$ (マイクロストレイン)
内蔵温度センサ	精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$
デジタル通信方式	SPIインターフェース



図3 モジュールの使用イメージ

3. まとめ

従来にない特性を有する「STREAL」によって、産業機器、インフラを対象に、制御の高度化、状態監視・故障予兆モニタリングが可能となりつつある。性能、安全性の画期的改善、保全費用の最適化、安全安心な社会の構築に期待されている。

#1: 日刊工業新聞記事(2019. 11. 15) 他軸感度 0.5%以下のトルクセンサ

#2: 日刊工業新聞記事(2019. 12. 4) 分解能 10 倍のひずみセンサ

^{*1} フェロー, (株)グローセル(〒101-0048 千代田区神田司町 2-1)

^{*2} (株)日立製作所, IT プロダクツ統括本部(〒244-0817 横浜市戸塚区吉田町 292)

^{*3} フェロー, (株)日立製作所研究開発 Gr(〒185-8601 国分寺市東恋ヶ窪 1-280)

^{*4} 日立オートモティブシステムズ(株)(〒312-8503 茨城県ひたちなか市高場 2520)

^{*5} 正員, (株)日立製作所研究開発 Gr(〒319-1292 茨城県日立市大みか町 7-1-1)

1. 概要

日本農業は、農業従事者の高齢化による「大量離農」が深刻化している。そのような状況下、担い手農家への農地集積と規模拡大が加速しており、担い手農家は人手不足や作業効率の向上、省力化に対応するため、次世代農業である ICT を活用したスマート農業への取り組みを進めている。

コンバインは、稲や麦などの穀物の収穫と脱穀を同時に行う農業機械であるが、運転操作には熟練のスキルが必要なことから、担い手農家の方々からは、未熟練者などを含めた誰もが「簡単操作」で「楽」に「無駄の無い収穫ができる」コンバインの開発が求められていた。これら要求に応えるため、RTK-GNSS を利用した自動運転アシスト機能付きコンバインを開発した (図 1)。作業者は、作業監視と安全監視のために搭乗する必要はあるが、運転操作が不要なハンズフリーで収穫作業が行えるため、未熟練者の利用が可能となる。また、熟練者にとっても労働負荷の高い収穫作業から解放され、大幅な軽労化が図れる。



図 1. 自動運転アシスト機能付きコンバイン WRH1200A

2. 開発技術

2・1 圃場マップ自動生成技術

手動運転で畦の内側に沿って収穫するときの走行軌跡 (RTK-GNSS の位置と方位から求める) と、収穫中か否かを判定する作業情報から得た正確な走行軌跡を基に、圃場の重心点を求める。次に、最小二乗法を用いて走行軌跡の直線近似を行い、圃場外形 (重心点から離れた軌跡) と内側の未刈り領域 (重心点から近い軌跡) を判断し、圃場マップを自動生成する (図 2)。

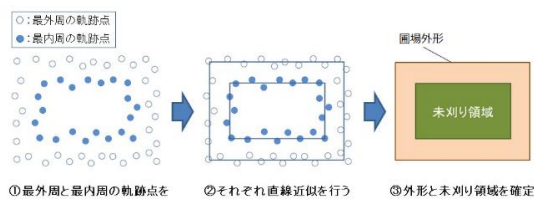


図 2. 圃場マップの自動生成

2・2 最適ルート算出技術

未刈り領域の各辺を基準として、コンバインの刈取り幅を考慮した格子状の走行可能ラインを準備し、刈取り幅/旋回径/車両サイズをパラメータとして、空走距離が少なくなる効率的な走行ラインを逐次自動判断するアルゴリズムとした。

また、穀物貯留タンクの重量を測定する収量センサを用いて単位面積当たりの収穫重量を測定し、タンク満タンまでの刈取り可能走行距離を予測。穀物を排出する排出位置を基準に、次周回できるかを判断し、最適タイミングで排出位置へ移動する。

2・3 自動走行制御技術

慣性計測装置 (IMU) 内蔵の RTK-GNSS ユニットから得られる高精度な位置と方位情報から、目標経路に対する位置偏差と方位偏差を算出し、それぞれが最小となるように操舵制御を行う (図 3)。

コンバインの旋回性は、圃場の硬さや穀物貯留タンクの重量による左右ウェイトバランス変化に対しても大きく影響を受けるため、旋回するごとに操舵指令量の過不足を検出し、指示量を増減するオートゲイン機能を加えることで、条件適応範囲を広げた。

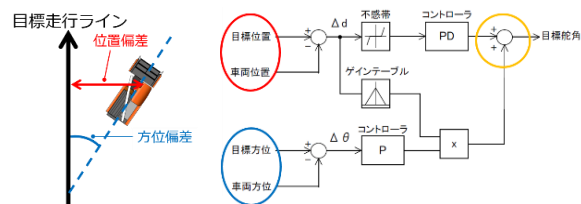


図 3. 操舵制御

3. あとがき

業界初の RTK-GNSS を活用した自動運転アシスト機能付きコンバインであり、熟練者不足という担い手農家が抱える課題を解決すると共に、担い手農家自身の作業省力化に貢献する。最適ルート算出機能により、作業時間を約 10%短縮できるため、余剰時間を経営規模拡大に充てることもできる。

自動運転アシストコンバインの市場投入により、スマート農業を推進し、食料安全保障を担う日本農業復興の一助になると確信している。

* 掲載：日本機械学会論文集, 77-777, A 編(2012-12), 1234 ページ.

*1 正員, 株式会社クボタ (〒556-8601 大阪市浪速区敷津東 1 丁目 2 番 47 号)

*2 会員外, 株式会社クボタ (〒556-8601 大阪市浪速区敷津東 1 丁目 2 番 47 号)

アクティブトルクロッドの開発

金堂 雅彦^{*1}
(1957 年生)

谷村 浩史^{*2}
(1976 年生)

山内 亮佑^{*3}
(1991 年生)

植木 哲^{*4}
(1972 年生)

藤井 隆良^{*5}
(1967 年生)

1. 概要

世界的に自動車の燃費向上が急務となる中、エンジンのダウンサイジング化 (DST) が進み、大排気量の V 型 6 気筒エンジンから高出力 4 気筒エンジンへの置換が加速している。その一方、4 気筒化や高トルク化に伴い、エンジン加振力が増大し、従来技術では、マウント重量増による対策が不可避であり、燃費効果が減少する(図 1)。

受賞者は、高周波で増大した加振力をトルクロッド本来の防振機能で低減し、その結果、周波数が低下したロッド共振を、アクティブに制振することにより、これを解決した。アクティブ機能においては、線形特性に優れた世界初の慣性マスキュータを開発した。このアクチューータそのものに、加速度センサから速度への変換機能を持たせることで、速度比例の減衰付与を加速度で実現する制御システムとし、燃費対応による加振力増大を軽量マウントで対応可能なアクティブトルクロッドを世界初で開発した。

2. 技術の内容

2.1 システム構成と振動低減原理

従来のペンデュラムマウントは、エンジントルクを受け止め、その揺動を抑え込むことを目的に、車体側のインシュレータ剛性が高く、トルクロッドの共振が 700Hz 前後に存在していた。このため、大トルクを発生する DST では、加速時騒音が課題となり、ペンデュラムマウントの大型エンジンへの適用例は少ない。

今回、V 型 6 気筒並みの大トルクを支えつつも、高周波域での防振性能向上を目的に、ロッド固有値を低周波へ低下させることで、加速時騒音領域のエンジン振動を遮断した。また、こもり音領域に低下させたロッド共振は、新規開発したリニアアクチューータによって、ロッドの振動速度に比例する制御力を用いて、ロッド振動を制振した。ロッド振動を計測するのは、加速度センサを用いたが、その電圧出力をアクチューータへの印加電圧とすることで、こもり音周波数領域では、アクチューータそのものを、加速度を速度に変換する積分器として機能させることで、コントローラの簡素化も達成した(図 2,3)。

2.2 新規リニアアクチューータの開発

こもり音領域に低下させたロッド共振は、ゴム減衰を増大させて、ピークレベルを低減させると、そのトレードオフとして、高周波の防振特性が失われる。そこで、ロッドの振動速度に比例する制御力を与えることで、防振性能への影響無く、ロッド振動を抑制することを可能にした。しかし、周波数を落とすとはいえ、ロッド共振は、170Hz 程度と高周波であり、これまでに実用化されていたアクティブコントロールマウントで用いられるソレノイドでは、その非線形や効率の悪さに課題があった。そこで、新しい駆動原理に基づく、リニアアクチューータを新規に開発した。このアクチューータは、可動部を板バネと、磁気バネの両者で支持することで、コンパクト化を図った。また、磁気回路に電磁鋼板を用いることで、高周波までの線形性を高く維持できた(図 4)。

2.3 公理的設計の活用

MIT の Dr. Nam Pyo Suh らが提唱した公理的設計は、相反する機能を効率良く解く設計手法で、本開発にも適用した。前述する様に、トルクロッドでは剛性を高めて、しっかりエンジントルクを支える機能と、剛性を落として、ロッド共振を低下させ、防振機能を向上する機能が求められ、相反している。前者に関係するロッド静剛性は、エンジン側、車体側の各インシュレータの直列剛性で決まり、後者の固有値は、各インシュレータの並列剛性が支配すると言う関係性を見出したことで、それぞれの機能を独立して設計可能とできた。

2.4 騒音低減効果

図 5 に直列 4 気筒ターボエンジンにアクティブトルクロッドを適用した加速時騒音(車室内音)を、V 型 6 気筒搭載車との比較で表す。250Hz~800Hz (および広い周波数領域において、高い静粛性を実現できたばかりか、従来のマウントシステムと比較して、約 40% の軽量化を実現できた。

3. まとめ

地球温暖化を抑止するための、エンジン熱効率向上に伴う加振力増大を、アクティブトルクロッドシステムによって成立可能であることを実証できた。本技術は、こもり音と加速時騒音の広い周波数領域を一つのシステムで対応できる技術であり、今後ニーズの高まる車両の軽量化や低燃費化など、高次元での多性能両立の可能性を高めるものである。

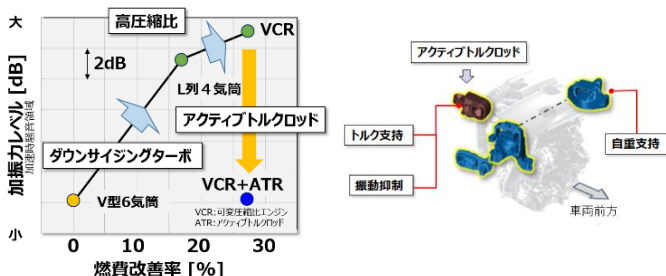


図 1 燃費向上とトレードオフになる加振力増大

図 2 マウントに求められる機能

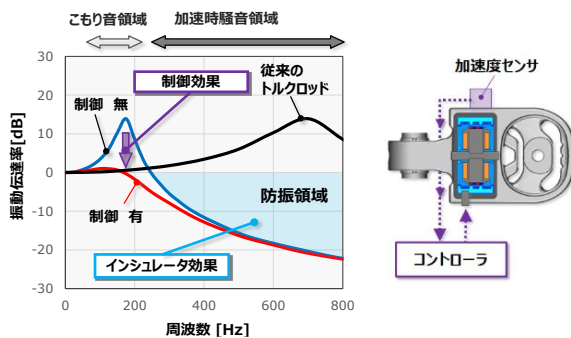


図 3 アクティブトルクロッドによる防振と制振の両立

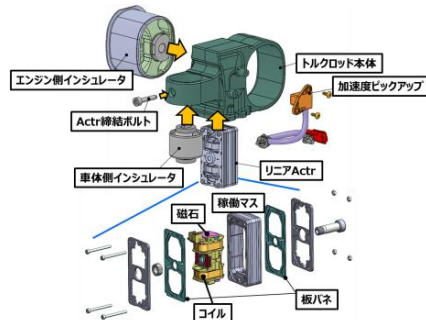


図 4 新開発の慣性マスキュータ

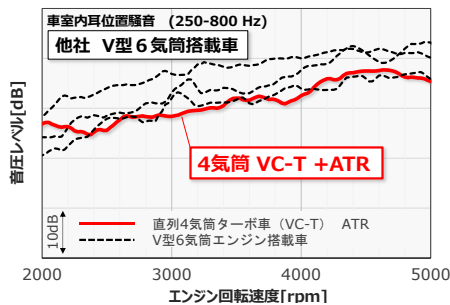


図 5 V 型 6 気筒並み静粛性の実現

^{*1} 正員、日産自動車(株) パワーレイン・EV 性能開発部 (〒243-0192 厚木市岡津古久 560-2)

^{*2} 日産自動車(株) シャシー開発部 (〒243-0192 厚木市岡津古久 560-2)

^{*3} 日産自動車(株) パワーレイン・EV 性能開発部 (〒243-0192 厚木市岡津古久 560-2)

^{*4} (株)ブリヂストン 防振ゴム設計第一部 (〒244-8510 横浜市戸塚区柏尾町1)

^{*5} 正員、シンフォニアテクノロジー(株)先行開発部 (〒516-8550 三重県伊勢市竹ヶ鼻町100)

1. 概要

自動車の塗装は防錆、対候性、外観品質など多岐の機能を必要としており、複数の層から構成されている。その中でも中上塗りと呼ばれる中塗り、ベース、クリアの塗装は、艶などの高い面品質や色などの高意匠が求められる。高意匠と生産性の両立のために、自動車では塗料を霧化(微粒化)して塗装するスプレー塗装が用いられている。この微粒化には主にエアを用いているが、このエアは吹付時の飛行にも用いるために、エアにのった塗料が被塗物上で跳ね返って飛散し、歩留まり(塗着効率)が低下する。それだけでなく飛散した塗料は設備を汚し、塗装品質にも影響を与えるため、塗着効率の向上は普遍的課題であった。

この課題に対し、エアをほとんど用いずに微粒化を行い、自動車のような大型の被塗物に対しても塗装できる技術を開発し、塗料の飛散がほとんどなく(図1)、塗着効率を従来から30%以上向上させた。

2. 技術の内容

本技術は、エアをほとんど使用せず、静電気力のみで塗料を微粒化し、被塗物へ飛行させる静電微粒化技術を自動車塗装に適用させた技術である。

静電微粒化原理は次のとおりである。ノズルから出た塗料に電荷を供給すると、アースされた被塗物側に静電引力により塗料が柱状に引き伸ばされる。電荷をさらに供給すると静電気力が表面張力や粘性を上回り、柱状の塗料が分裂・微粒化する。この塗料は帯電しているため、電界に沿って被塗物に向かって飛行し、付着する。

この静電微粒化は引き伸ばされた柱径が大きくなると良好な微粒化が得られないため、ノズルから吐出することのできる塗料は0.3cc/min以下となり自動車の塗装に必要な200cc/min以上には大幅に不足しているため、自動車の塗装には用いられてこなかった。

本技術ではこの静電微粒化に塗装機の回転体部分であるヘッドの円周上にノズルに見立てたセレーション(溝)を多数配置し、回転を加えることで、それぞれの溝から静電微粒化された塗料を同時に被塗物へ飛行させることができ、自動車塗装に必要な吐出量を確保することができた(図2)。

また塗装品質を確保するためには、粒子径を均一にする必要があり、電荷を安定的に供給する必要がある。電荷の供給には高電圧を印加する必要があるが、その制御には定電圧制御とよぶ、電圧を一定にする制御を行ってきた。この方法は被塗物との距離が変動すると電流もそれに伴い変動する。しかし、自動車の塗面は複雑なため、塗装機との距離を一定に保つことが困難、すなわち電荷を一定に保つことが困難である。

本技術では高電圧の制御方式も、電流を一定に保つ定電流制御として開発を行った(図3)。これにより電荷を安定供給でき、塗装品質を確保することができた。

3. まとめ

本技術により塗料がほとんど塗面に付着するため、塗料使用量が低減でき、未塗着塗料の回収装置も簡素化できる。

さらに本技術により、従来汚れ回避のために必要だった大型の塗装ブースが不要になり、設備を小型化することができ(図4)、CO2の大幅な削減も期待できる。

田中 一基^{*1}
(1977年生)

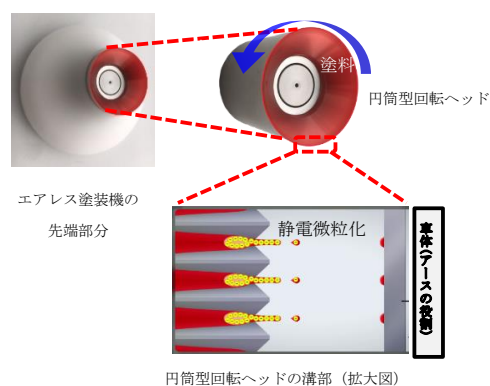
谷 真二^{*2}
(1968年生)

沼里 亮^{*2}
(1974年生)

藤沢 泰成^{*1}
(1963年生)



図1 従来塗装との比較



円筒型回転ヘッドの溝部(拡大図)

図2 塗装機先端と静電微粒化

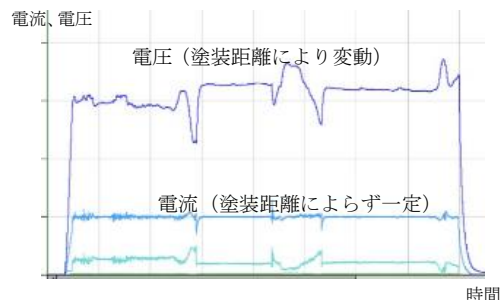


図3 定電流制御

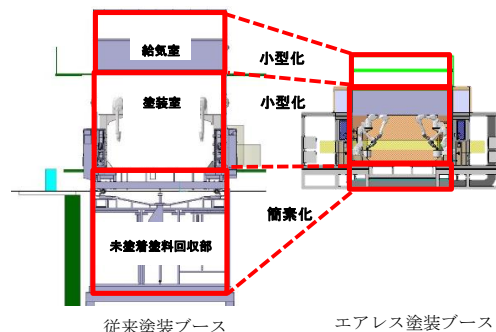
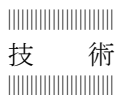


図4 エアレス塗装ブース断面

^{*1} 正員，トヨタ自動車(株)(〒471-8573 豊田市元町1)

^{*2} トヨタ自動車(株)(〒471-8573 豊田市元町1)



技術 3次元熱拡散率測定に基づく非接触・非破壊繊維配向評価システムの開発



長野 方星^{*1}
(1974 年生)



羽島 仁人^{*2}
(1972 年生)



大槻 哲也^{*2}
(1972 年生)



栗野 孝昭^{*2}
(1980 年生)

1. 概要

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は航空宇宙分野をはじめ、自動車、船舶、風力発電など、様々な産業への応用が期待されている。量産性が期待される炭素繊維強化熱可塑性樹脂 (CFRTP) においてはプレス成型時の繊維配向の偏りやボイド発生、密度ムラが問題となっている。しかし、これまでの繊維配向性評価は強度試験や X 線 CT 観察など、試料を切出す必要性や測定に長時間要するなど、簡便で実用的な方法が無かった。受賞者は、CFRTP の 1 点を周期的にスポット加熱し、面内 2 次元方向、厚さ方向への熱拡散過程をサーモグラフィで動的に計測し、その温度応答の位相遅れ、温度減衰情報を解析することで、その距離依存性から面内方向の繊維の配向分布を、加熱周波数依存性から繊維の疎密分布を非接触、非破壊、かつ数分で評価できる画期的な手法を開発し、製品化に至った。

2. 技術の内容

本測定法は受賞者が確立した周期加熱法に基づく面内および厚さ方向の 3 次元熱拡散率測定法を原理としている。検査対象部材の一点を周期的に加熱し、加熱点からの温度応答の時間遅れ、および温度振幅減衰の距離依存性から熱拡散率を求める。その解析を面内 360 度方向に適用し、繊維配向密度関数または楕円関数でフィッティングすることで、面内の繊維配向方向およびその分散を同定することができる。また、加熱周波数を変えながら位相遅れ、振幅減衰を測定することで、厚さ方向の熱拡散率が得られ、繊維の疎密分布情報を得ることができる。本装置では、レーザーで部材の片面をスポット加熱し、裏面に到達する温度伝搬情報をロックインサーモグラフィで計測することで、面内と厚さ方向の熱拡散率を同時かつ迅速に測定することが可能となり、ほぼ同時に繊維配向解析することで、非接触、非破壊、かつ数分で繊維配向情報を得ることができる。図 1, 2 に繊維配向評価システム Thermal Evaluation of Fiber Orientation Distribution (TEFOD) の装置構成および製品外観を示す。

(1) 測定例① CFRTP の繊維配向同定

図 3(a) に示す CFRTP にレーザーを照射し、周期的に加熱すると、図 3(b) のような位相遅れ分布が得られる。本位相遅れ分布から図 3(c) の熱拡散率分布が得られる。本結果を正規化し、楕円近似することで楕円の傾き、アスペクト比から図 3(d) のように繊維の配向角および配向強度が決定される。

(2) 測定例② 繊維配向と強度、含有率の関係

図 4(a) に示す意図的に繊維含有率を変えた CFRTP 試料に対して繊維配向、熱拡散率と引張強度、熱拡散率と繊維含有率の関係をそれぞれ調べた。繊維配向は図 4(b) に示すように横長に繊維が配向している。また繊維含有率と引張弾性率、および繊維含有率と熱拡散率に相関があることが見て取れる (図 4(c, d))。

3. まとめ

これまで X 線 CT 法しかなかった繊維配向評価に対して、非接触、非破壊で迅速に繊維配向を評価する手法が創出され、複合材料製造ラインにおけるインライン評価や、非破壊検査が可能になった。また、材料の研究開発においても熱物性評価と配向分布、繊維疎密分布が同時に図れる画期的な評価法として企業、大学、研究機関から注目されている。本技術により今後の産業の根幹となる新規材料開発や複合材料の量産化が飛躍的に加速されることを期待している。

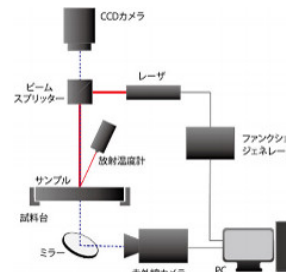


図 1 装置構成



図 2 TEFOD 装置外観

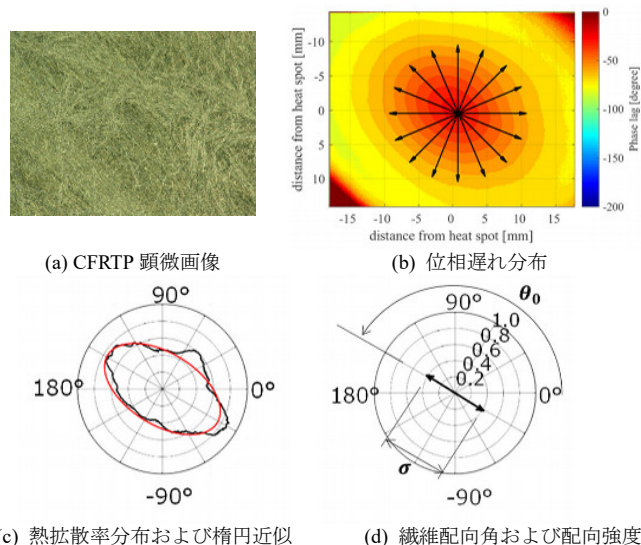
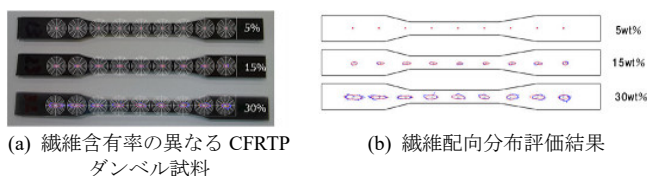
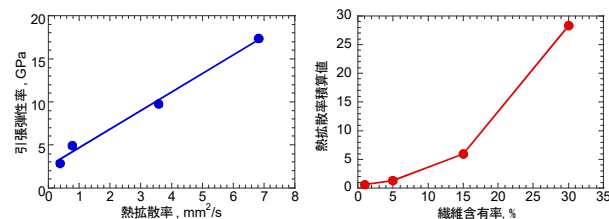


図 3 測定例① CFRTP の繊維配向同定



(a) 繊維含有率の異なる CFRTP ダンベル試料

(b) 繊維配向分布評価結果



(c) 熱拡散率と引張弾性率の関係

(d) 繊維含有率と熱拡散率の関係

図 4 測定例② 繊維配向と強度、含有率の関係

^{*1} 正員、名古屋大学大学院機械システム工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

^{*2}(株)ベテル ハドソン研究所 (〒300-0037 土浦市桜町 4-3-18)