

施工省力化ロボットの開発 「ECoCa[®](エコカ)」「Carryf[®](キャリフ)」「Dexhand[®](デクスハンド)」

Development of Construction Labor-saving Robot

"ECoCaTM" "CarryfTM" "DexhandTM"

細谷清一郎 HOSOYA Seiichiro JFE エンジニアリング プラント建設本部 建設センター エネルギー建設部 計画室長
原賀 健一 HARAGA Kenichi JFE エンジニアリング 技術本部 総合研究所 主任研究員

要旨

建設業界では、「技能労働者の減少および高齢化」「若年層の就業者比率の低下」が課題となっている。さらに、プラント建設業界においては「狭小空間での工事が多く発生」「準備に多大な時間と人員を要す」「専門および熟練技術が必要」などの課題がある。これらを克服すべく、「施工省力化」「安全性の向上」を目指しロボットの開発をスタートした。

本稿では、開発の経緯、現状、将来に向けての展望を紹介する。

Abstract:

In the construction industry, “decrease and aging of skilled workers” and “decrease in the ratio of young workers” are recent issues. In addition, in the plant construction industry, there are problems such as “many construction works in a narrow space”, “a large amount of time and personnel are required for preparation”, and “specialty and skills are required”. In order to overcome these problems, JFE Engineering started development of robots with the aim of “labor saving in construction” and “improvement in safety”.

In this article, we will introduce the development process, current status, and future prospects.

1. はじめに

JFE エンジニアリングが手がける清掃工場や天然ガス関連設備などのプラント建設工事では、土木建築工事のような広いエリアを対象とした工事または工場における定常的な生産ラインと異なり、日々さまざまな施工条件が変化するため、作業のロボット化や自動化は遅れている。今後を見据えた場合、少子高齢化による労働力減少に対応した作業効率化が急務となっている。3つのロボット開発【機器の運搬・据付：ECoCa[®]】【機器の運搬：Carryf[®]】【配管据付：Dexhand[®]】によって作業効率化を実現していく。



写真1 ECoCa[®]による作業状況
Photo 1 Work status by ECoCaTM

2. 開発ロボット概要

2.1 ECoCa[®](エコカ)

これは機器の運搬・据付を行うロボットである。従来、機器の運搬作業は、フォークリフトまたは人力の台車を使用していた。基礎上に据付ける場合は、鋼材、チェーンブロック等の仮設設備を設置していた。これらの運搬・据付作業をリモコン操作により1台で行うロボットを開発した。写真1に現場作業状況、表1に基本仕様を示す。

表1 ECoCa[®]基本仕様

Table 1 Basic specifications of ECoCaTM

Load capacity	3.0 t
Telescopic function	
Width direction (X)	1.4 m to 2.4 m
Depth direction (Y)	3.0 m to 3.7 m
Height direction (Z)	2.0 m to 3.2 m
Driving function	Four-wheel steering, Turn on the spot, Lateral movement

2022年4月5日受付



写真2 Carryf[®]による作業状況
Photo 2 Work status by CarryfTM

表2 Carryf[®]基本仕様
Table 2 Basic specifications of CarryfTM

Load capacity	5.0 t
Driving function	Four-wheel steering, Turn on the spot, Lateral movement
Step overcoming function	20 cm



写真3 Dexhand[®]による試験状況
Photo 3 Test status by DexhandTM

2.2 Carryf[®](キャリフ)

これは機器、資材の運搬を行うロボットである。リモコン操作により運搬し、約20cm程度の段差を乗り越えられる。写真2に現場作業状況、表2に基本仕様を示す。

2.3 Dexhand[®](デクスハンド)

これは配管、ダクトの据付けを行うロボットである。従来、配管据付作業はチェンブロック等で配管を吊上げていた。その作業を【吊る⇒掴む】にすることで、および先端部に3軸の駆動機能を備えることで、精度のよい施工が可能となる。写真3に現場作業状況、表3に基本仕様、図1に先端部の3軸の機能を示す。

3. 開発のキーポイント

開発にあたっては、「機能」「部品」「材料」など幅広く検

表3 Dexhand[®]基本仕様

Table 3 Basic specifications of the DexhandTM

Grab up	500 kg pipes and work.
7-axis drive	① Grip [Tip 3-axis] ② Swing ③ Rotate ④ Tilt [Boom] ⑤ Telescopic ⑥ Turning ⑦ Up and downs
Grab pipes	300 φ to 500 φ with one part.

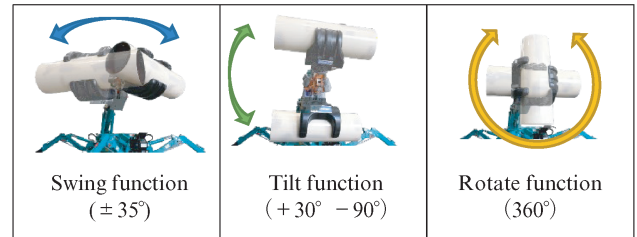


図1 先端3軸の動き
Fig. 1 Movement of tip 3-axis

討した。その中で、特に重要でまた時間を要した、Dexhandの「軽量化」とECoCaの「走行性能」について以下に示す。

3.1 Dexhand[®]の軽量化

ラック上や天井近傍で鋼管などの対象物を掴み、広範囲な作業半径および揚程を実現するには、伸縮ブームおよび先端に設置する掴み部を軽くし、転倒モーメントを極力小さくすることが重要である。また、将来的に人力によるロボットの運搬、組立も視野に開発をスタートしたことから、軽量化は重要であった。ここでは、軽量化に関する検討について以下に示す。

3.1.1 CFRP(炭素繊維強化プラスチック)の採用

軽量化を目指す上で最も重要な要素は、材料の選定である。今回はCFRP(炭素繊維強化プラスチック)を採用した。CFRPの特徴を以下に示す。

(1) 機械的性質

CFRPは繊維と樹脂という性質の違う材料の組み合わせである。比重は鉄の1/5で、単位重量あたりの剛性や強度は2倍以上高いといった特徴がある。また、繊維の配向方向や材料種類を変えることで、剛性や強度を変えられる。図2にCFRPの機械的性質を示す。

(2) 加工性

CFRPは、プラスチック(樹脂)を母材とし、そこに繊維を強化材として加える材料であるため、成形自由度が高いという特徴がある。そのため、複雑な構造や曲面を持つ形状も製作できる。

伸縮ブームに必要なテレスコピック構造は内筒、外筒およびこれらを保持するためのブラケット部から構成される。一方、掴み部は種々の直径のパイプを掴めるよう、掴

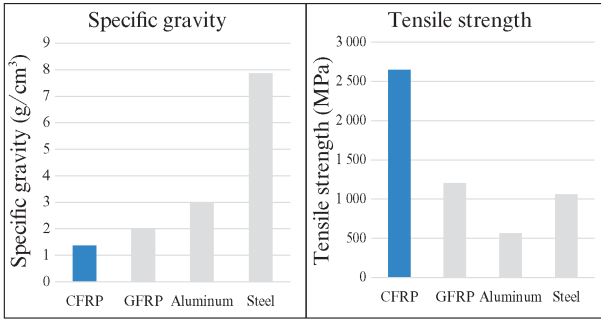


図2 CFRPの機械的性質¹⁾
Fig. 2 Properties of CFRP

み部の手のひら側の曲率は一定でなく、一般的な直径のパイプ外面が接触する箇所に緩やかな凹みを設け、パイプと掴み部の接触面積を増やし摩擦力を向上させる必要があった。

これらの形状を実現する上で、CFRPの高い成型自由度は大きな利点となった。凹み状況を写真4に示す。

3.1.2 CFRPの設計について

CFRPは、その材料特性から剛性や強度を変更でき、成型自由度が高いことが利点であるが、金属材料で確立されている降伏点、許容応力度等が定まっていない。そのため開発にあたっては、初期構想⇒設計・解析⇒試作・試験⇒製品化のフローが重要である。図3にCFRPの設計フロー図を示す。

なお、引張強度（材料強度）を基準強度として設計・解析するにあたり、現地での使用を考慮した安全率の考え方



写真4 パイプ径毎の掴み位置における凹み

Photo 4 Recess in grip position for each pipe diameter

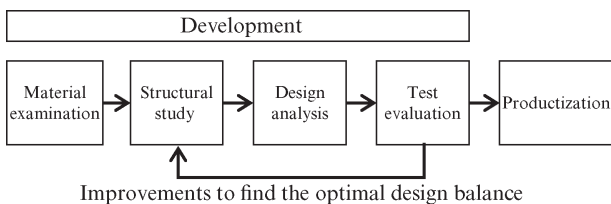


図3 CFRP部材の一般的な設計フロー¹⁾

Fig. 3 General development flow of CFRP parts

が重要となる。以下に安全率の設定方法を示す。

CFRPの設計では、荷重条件を設定して検討するが、実際の成形品では表4で示すさまざまな因子の影響を受けるため、各々の因子について安全率を定義して使用する。今回の製造および使用環境を考慮し、表4の下線を引いた4項目を因子として選定した。

FRP製品の安全率については、古くは風車用途で船舶協会等が設計ガイドラインを策定している。CFRPの適用で先行していたドイツ海事協会（GL: Germanischer Lloyd）の風車翼の設計ガイドライン（2010年版²⁾）に設計安全率が定義されており、表5に示すとおりそれぞれの因子の係数を抽出し、その積を求めることで安全率を設定している。本開発ではこの手法を適用し、安全率を「4.0」に設定した。

3.1.3 CFRP部材の試作、試験および評価

設計・解析は、複雑な境界条件や解析物の多様性への適

表4 検討する設計要因例（実製品で起こりうる変化要因）

Table 4 Examples of design factors to consider

Category	Factors
Load characteristics	<ul style="list-style-type: none"> Repeat frequency, load history (Fatigue) Continuous load (Creep) Momentary load (Impact) Variation in loading position Variation in fixed position
Usage environment characteristics	<ul style="list-style-type: none"> Usable years Operating temperature, history Operating humidity, history UV resistance Radiation resistance Oil resistance Water resistance Detergent resistance Acid resistance, Alkali resistance
Manufacturing characteristics	<ul style="list-style-type: none"> Material property (Fabric, mat, etc.) Moldability (Intricately shape, size) Process variation (Coating, tolerance, etc.) Characteristics derived from the molding method Injection : Flowability, orientation angle, weld FRP : Laminate, angle, etc. Metal : Welding, machining, forging, etc.

表5 GLガイドラインによるFRP風車翼の設計安全率

Table 5 FRP windmill blade safety factor by GL design guidelines

	Factor	Coefficient	Conditions
C_{1b}	Fatigue	2.68	$C_{1b} = N^{1/m}$ $m=14$ (CFRP), $N=10^6$ times
C_{2b}	Temperature	1.10	Outdoor
C_{3b}	Materials	1.20	Fabric
C_{4b}	Molding	1.10	Large molded product
Total		3.90	$= C_{1b} \times C_{2b} \times C_{3b} \times C_{4b}$

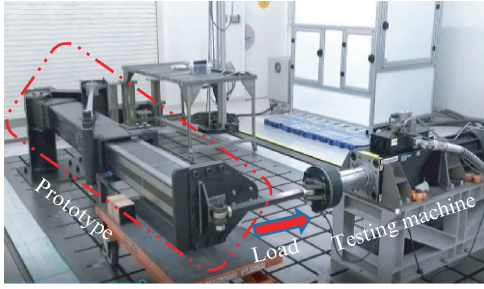


写真5 CFRP製伸縮ブーム荷重試験状況
Photo 5 CFRP telescopic boom load test

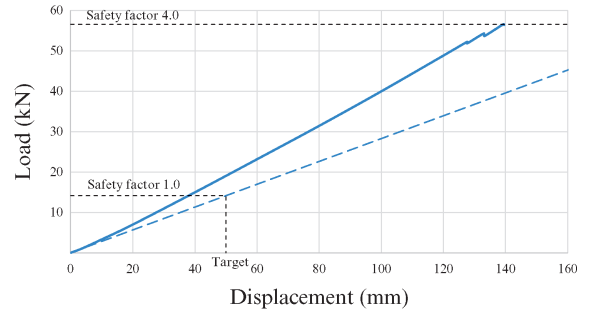


図5 CFRP製伸縮ブームの荷重—変位線図
Fig. 5 Load displacement diagram of CFRP telescopic boom

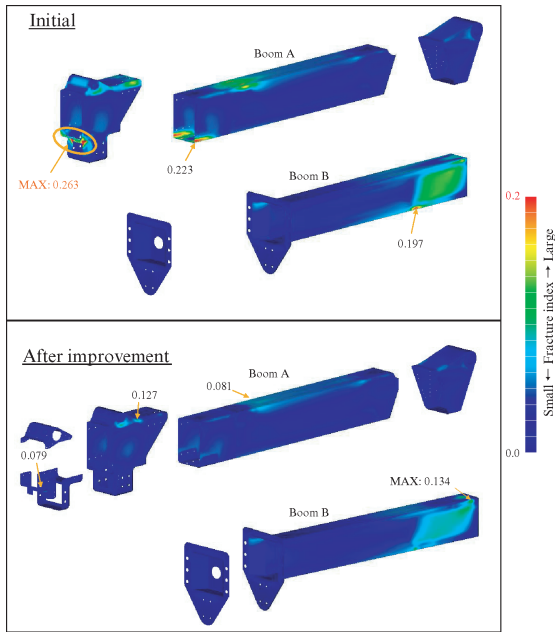


図4 形状改良による応力集中の緩和
Fig. 4 Relief of stress concentration by shape improvement

合性が高いFEM(有限要素法)を採用した。解析結果から試作品を製作し、荷重試験を行い評価した。試験結果をもとにトライ&エラーを重ねることで、設計・解析の精度を上げていった。

(1) CFRP製伸縮ブームによる解析技術の向上

CFRP製伸縮ブームの先端に重力方向の荷重を加えた時の変位量を計測した。写真5に荷重試験状況を示す。

当初のモデルではブームとブラケットの接着部で、応力集中による剥離が見られた。FEM解析に基づく積層補強および締結部の改良により、応力集中箇所および剥離はなくなり荷重耐久性が向上した。形状改良による応力集中の改善状況のFEM解析結果を図4に示す。

種々の改良を経て目標安全率4.0までの荷重载荷が可能となった。定格荷重の4.0倍まで荷重を加えたときの伸縮ブーム先端変位量を図5に示す。安全率1.0のときの変位量は目標値をクリアしており、除荷後の変位や各部位にも異常は確認されなかった。

(2) FEM解析モデルの設計手法の確立

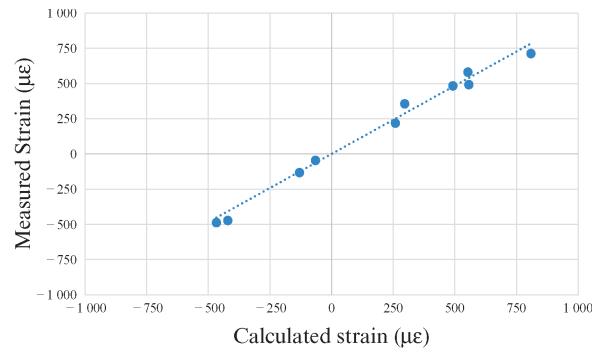


図6 ひずみ計算値に対する実測値
Fig. 6 Relationship between calculated and measured strain values

設計手法の妥当性を検証するため、試作品にゲージを貼り付けひずみを計測した。FEM解析の値(計算値)とひずみ計測の値(実測値)を比較するとほぼ合致した。この結果から、今回実施した設計・解析手法が適正であることを確認した。計算値と実測値の比較を図6に示す。

(3) CFRP製掴み部の試作

伸縮ブームの試作と試験評価、解析で得たCFRP部材の設計・解析の知見をもとに、次の軽量化対象として、掴み部を設計・試作した。

所定のシリンダ推力でパイプを掴んだときの掴み部変形量をFEM解析により求めた。鋼製部材と比べCFRP製は先端変形量が増加するが、実用性に問題ないことを確認した。同様に破壊指数分布解析を行ったところ、把持部の付け根近傍で応力集中が見られるが、安全率は5.0以上となった。試作品による試験でも、必要とされる把持力を確認できた。破壊指数分布解析結果を図7に示す。

3.1.4 まとめ

今回の開発により、CFRPを適用した施工ロボットの設計・解析手法は確立されたと考える。今後使用条件、荷重条件等の変更があっても、同様の手法で開発が可能である。なお、今回開発したCFRP製品の「ブーム」と「掴み部」の金属製品との軽量化比率を表6に示す。

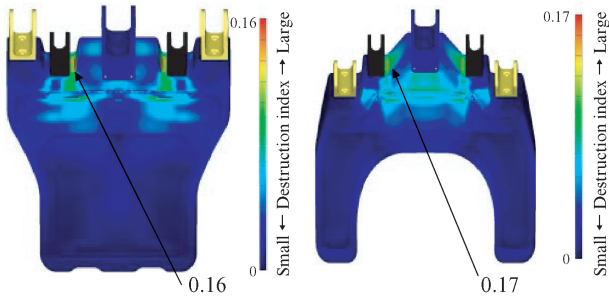


図7 破壊指数分布解析結果

Fig. 7 Fracture exponential distribution analysis results

表6 軽量化の効果

Table 6 Weight reduction

	Steel	CFRP	Ratio
Telescopic boom	250 kg	60 kg	76%
Gripper	140 kg	75 kg	46%

3.2 ECoCa[®]に要求される走行性能

機器等の重量物を安全に運搬する上で、走行性能の向上は重要な開発要素である。

通常車両における「4輪操舵」の調整は、内外輪の速度差を差動装置（ディファレンシャルギヤ）を用いて吸収配分することで、スムーズな走行を実現しているが、各ホイールそれぞれが独立した構造であり、専用のモーターを搭載するECoCaでは、差動装置を採用できない。また、X（横方向）Y（長手方向）伸縮時のホイールスパンに連動した舵角制御、およびあらゆる現場状況に応じた作業を実現するため、「その場旋回走行」「横行走行」に対応したシステムが必要であった。必要な3つの走行機能を図8に示す。

3つの走行機能を実現するため、旋回用、走行用の2つのモーターを搭載したホイールを採用した。またさまざまな測定機能、操舵調整機能を採用し、システムを最適化した。ここでは、システム最適化の経緯について示す。

3.2.1 走行機能の概要

(1) 四輪操舵走行

機器等の運搬作業は、狭小空間での作業が多いことから、より小回り走行が可能となる後輪を前輪と逆位相に操舵する「四輪操舵」を採用した。

操舵を開始した時点で操舵方向より外輪を決定し、TOFレーザーセンサ（リニアエンコーダ）から得られるY寸法と前後外輪の操舵角より旋回中心位置を算出し、XY寸法から得られる内輪位置を計算し、内輪の操舵角を内輪が走行する円周の接線角に操舵している。制御イメージを図9に示す。

(2) その場旋回走行

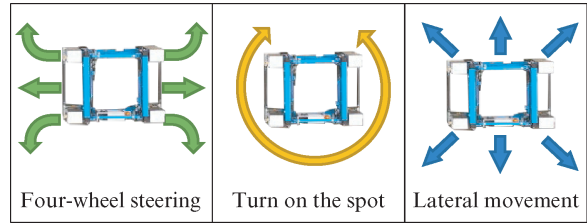


図8 走行機能

Fig. 8 Driving function

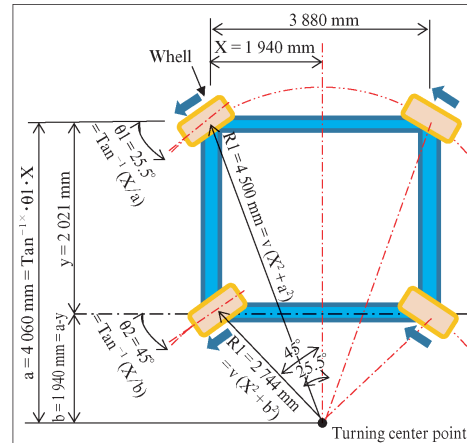


図9 ホイール舵角制御模式図（四輪操舵）

Fig. 9 Wheel steering angle control schematic diagram (four-wheel steering)

X方向およびY方向の伸縮寸法をTOFレーザーセンサ（リニアエンコーダ）により測長する。XY寸法とそれを1/2とした測長中心点からの位置関係により1~4の各車輪の中心からの角度を割り出し、90°加算した値を旋回円の接線とし、その角度に±1°の精度で操舵する。この機能により中心ブレのない正確な旋回動作を実現した。制御イメージを図10に示す。

(3) 横行走行

横行走行は、機器据付時の最終位置調整に多用される。ホイールの操舵角は±95°の角度範囲で調整可能で、4つのホイールを同じ角度にセットすることで、前後および斜め方向への平行移動に加え、完全な横方向への移動を可能にしている。

3.2.2 走行精度の向上

(1) 舵角原点設定

各走行機能の精度を高める上で、各ホイールの操舵原点をどのように設定するかが重要であった。ECoCaでは各ホイールの操舵角を検出するために13bitのアブソリュート型ロータリエンコーダを搭載した。操舵軸からロータリエンコーダには5:1のギヤ比で伝達されるため、 $360^\circ \div 8192$ (13 bit) $\div 5 = 0.0087^\circ$ の分解能で角度を計測できる。アブソリュートエンコーダは角度を絶対位置で出力するため、通常はホイールを本体に対して正確な取付角度で取り付ける必

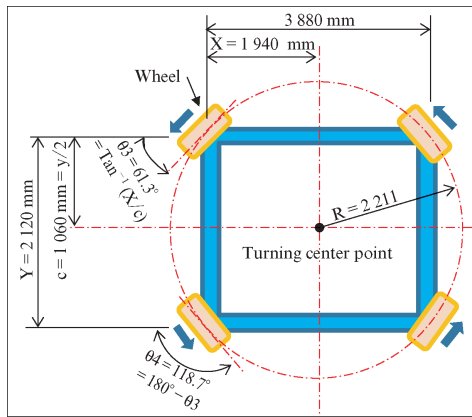


図 10 ホイール舵角制御模式図 (その場旋回)

Fig. 10 Wheel steering angle control schematic diagram (Turn on the spot)

要がある。ECoCa では組立時の調整作業および運用中の修正などを容易にするため、エンコーダの現在値を原点に設定し、オフセットする機能を搭載した。これにより、設置場所でのホイール交換などの場合でも、精密な測定器を必要とせずに作業できる。

(2) 走行精度

悪路および偏荷重時において直進性を確保するため、上位コントローラより回転数指令をモータードライバに指示し、モータードライバは指定回転数になるようにトルクを自動的に制御する。これにより、一部の車輪のみが低 μ の路面や窪みを通過する状況や、吊り荷の偏荷重時など局所的に車輪のトルクが抜けるような状況でも急に回転が上がることなく、安定した直進性能を実現している。

走行実証試験の過程で、ホイールの制動について課題があった。その課題を克服するため、モーターを制御するコントローラとして Gen4 を採用した。Gen4 は最高速、各加減速レート、トルク値などを専用の PC ソフトを用いることで調整でき、これで制御 PLC のプログラミングの負担を減らせた。また、機器運搬作業中の急加速・急減速は望ましくない挙動であることから、Gen4 の Traction baseline profile を調整することで、滑らかな加減速を実現した。それにより、数センチ単位の走行、停止を制動でき、高精度の機器

の据付けが可能となった。

3.2.3 まとめ

今回の開発によって、現場で必要とされる「4 輪操舵」「その場旋回走行」「横行走行」の 3 つ走行機能、および機器を据付ける上で必要となる数センチ単位の位置合わせの精度が確立されたと考える。

4. おわりに

開発した施工ロボットは、実証試験の段階で現場に投入し効果を確認できた。今後はプロジェクト、設計と連携しロボットの活用範囲を拡大していきたい。また、自動走行、自立移動、物体認識等の機能を向上させることで、日々移り変わる現場状況に対応し、「施工省力化」「安全性の向上」を実現していきたい。

謝辞

施工ロボットの開発にあたっては、岡谷鋼機株式会社、株式会社アクティオには、共同開発メンバーとして多大なる協力をいただいた。この場を借りてあらためて、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 東レ・カーボンマジック株式会社ホームページ
<https://www.carbonmagic.com/cfrp/>
- 2) Mike Woebeking, Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH. The New Guideline for the Certification of Wind Turbines. Edition 2010, Renewables Certification (GLRC)



細谷清一郎



原賀 健一