

Sumitomo Heavy Industries Technical Review



Nov.2021
No.205 ISSN 0387-1304

A detailed, colorful illustration of various mechanical components, including gears, pipes, valves, and machinery parts, arranged in a complex, interconnected pattern. The style is reminiscent of technical drawings or a mechanical assembly diagram.

住友重機械 技報

産業車両特集

Special issue for Industrial Vehicles

住友重機械技報 No. 205 2021

巻頭言

カーボンニュートラルの実現に向けて

数見保暢

産業車両特集

論文・報告	ショベル掘削動作中のエネルギー効率分析	佐野裕介, 呉 春男	1
	クレーンシミュレータの開発	山本泰広, 呉 春男	5
	有効応力集中係数を考慮した修正ENS法の提案 -裏当て金付き突合せ溶接継手への適用-	柴田 誉, 佐藤啓介, 堀川秀信, 堤成一郎	9
	インプロセス溶接欠陥検知に向けた溶接画像センシング技術の研究	笠野和輝	15
技術解説	衝突軽減システム搭載お知らせ機能付き周囲監視装置 FVM2+	泉川岳哉	21
	アスファルトフィニッシャの自動制御	寺元陶太, 伊藤 匠	23
	さまざまな作業に対応できる小型クローラクレーン SCX550-3	越 達夫	25
	クローラクレーンの油圧システム	宮崎 格	29
新製品紹介	新型リーチフォークリフト FBR2-3t		33
	ガンダムキャリア		34

Towards achievement of Carbon Neutral

Yasunobu KAZUMI

Special issue for Industrial Vehicles

T/PAPERS	Analysis of Energy Efficiency of Excavator During Digging Operation	Yusuke SANO, Chunnan WU	1
	Development of Crane Simulator	Yasuhiro YAMAMOTO, Chunnan WU	5
	Proposal of Modified ENS Method Considering Effective Stress Concentration Factor –Application to Butt Weld Joints with Backing Plate–	Homare SHIBATA, Keisuke SATOH, Hidenobu HORIKAWA, Seiichiro TSUTSUMI	9
	Study on Welding Image Sensing Technology for In-Process Welding Defects Detection	Kazuki KASANO	15
T/INVITATIONS	FVM 2 +, Construction Machinery Surrounding Monitoring Device Equipped with System of Reducing Impact of Collision and Function of Notification	Takeya IZUMIKAWA	21
	Automatic Control for Asphalt Finisher	Touta TERAMOTO, Takumi ITOH	23
	Development of Small Crawler Crane SCX550-3	Tatsuo KOSHI	25
	Hydraulic System of Crawler Crane	Tadashi MIYAZAKI	29
NEW PRODUCTS	New Reach Forklift Truck FBR 2-3 t		33
	GUNDAM-CARRIER		34

産業車両特集発行に当たって カーボンニュートラルの実現に向けて

住友建機株式会社
代表取締役社長

数 見 保 暢



まずこの技報が発行される頃には、ワクチン接種が進みコロナウィルス感染症の拡大が収束していることを祈っています。

また、今年も昨年に引き続き西日本を中心に豪雨災害が発生し、被害に遭われた皆様にお見舞い申し上げるとともに、早期の復旧をお祈りします。このように近年は日本国内で豪雨災害が頻発しており、海外でも同様に豪雨災害や山火事等自然災害が多くなってきていますが、原因の一つに地球温暖化の影響があると考えられています。

このような自然災害に対して、特にインフラ整備を行ううえで今回の特集で取り上げている産業車両はお役に立っていますが、一方で地球温暖化対策としてカーボンニュートラルへの対応にも取り組んでいかななくてはなりません。国土交通省は建設施工におけるカーボンニュートラルの実現として情報化施工(ICT)を推進し施工の効率化を推進しようとしており、また、ディーゼルエンジンを基本とした燃費性能の向上を掲げています。一方で情報化施工の推進に合わせ安全確保の重要性が増しています。本特集では機械周辺の「人の安全」に着目し、機械を自動で減速・停止することで油圧ショベルの接触事故リスクの低減に貢献する「FVM2+」の紹介をいたします。次に、舗装工事において丁張り設置等の事前準備や熟練技術が不要で、より精度の高い舗装を実現できるアスファルトフィニッシュのマシンコントロール、さらに作業の安全性向上・容易化・省人化を目的として、操舵とスクリード幅の自動制御にも着手しており、その紹介をいたします。

次に、さまざまな作業に対応できる小型クローラークレーンでは、安心をキーワードにライフサイクルコストのミニマム化を目指し、低燃費技術や安全性能の紹介をします。当社ではこれらの建設機械の効率化・安全性向上を目的として新技術・各種解析技術開発も実施しており、今回はクローラークレーンの油圧技術、ショベル掘削動作中のエネルギー効率分析、クレーンシュミレーターの開発を紹介いたします。

また、溶接構造物の信頼性向上への取組みも行っており、溶接継手への修正有効切り欠き応力法(ENS法)の提案や、溶接欠陥検知に向けた溶接画像センシング技術の研究も紹介いたします。

今回紹介させていただいた製品や技術にとどまらず、当社では各種製品・技術開発・サービスを通じて、カーボンニュートラルの実現のみならず、社会課題に積極的に取り組んでまいりますので、今後とも皆様方の御指導・御鞭撻をよろしくお願い申し上げます。

ショベル掘削動作中のエネルギー効率分析

Analysis of Energy Efficiency of an Excavator During Digging Operation

●佐野 裕介* 呉 春男*
Yusuke SANO Chunnan WU



図1 模擬試験装置
Mock test equipment

油圧ショベルの掘削作業における消費エネルギーは、土砂から受ける掘削反力(土圧)と油圧ショベル動作によるエネルギーの合計となる。したがって、掘削反力の発生メカニズムを明らかにすることで、効率の良い掘削軌道を生成することが可能になる。これまで、円弧による掘削軌道の土圧モデルを対象としていたが、水平引きを伴う掘削軌道の土圧モデルは考慮されていなかった。また、エネルギー効率の評価を目的として、模擬試験装置から得られた掘削反力データをもとに、消費エネルギーを検証してきたが、土圧モデルを用いて掘削反力を計算することができれば、模擬試験を実施することなく、掘削軌道からエネルギー効率を評価することが可能になる。そこで、水平引き軌道を伴う掘削軌道の土圧モデルを検証し、シミュレーションによってエネルギー効率を評価する方法を検証した。

Energy during excavation works of a hydraulic excavator is consumed by both the earth pressure and its operations. Therefore, after clarifying the mechanism to be generated excavation reaction, it'll be possible to generate an efficient excavation trajectory. However the earth pressure model of the excavation trajectory by arc had been targeted, horizontal sweep isn't considered on the model. In addition, to evaluate energy efficiency, the energy consumption is verified only based on data of excavation reaction force obtained from mock test. So, if the excavation reaction force can be calculated using the earth pressure model, it'll be possible to evaluate the energy efficiency from the excavation trajectory without mock tests. On this paper, both the earth pressure model of the excavation trajectory with horizontal sweep and simulation method for energy efficiency evaluation is verified.

1 まえがき

近年、労働人口の減少やインフラの老朽化によって、自律化された建設機械の開発が行われている⁽¹⁾。建設機械の自動施工システムは、3次元計測や動作計画、電子油圧制御などにより複雑化してきている。油圧ショベルのように土砂を掘削する建設機械の場合、掘削対象からの反力が機械動作や消費エネルギーに影響するので、自動制御することは困難であ

る。したがって、掘削反力をモデル化し、自動制御における掘削軌道を評価する方法が必要となる。これに対し、過去の研究では油圧ショベルが円弧軌道で土砂を掘削するときのバケット内の土砂挙動の観察と反力計測を行い、クーロンの土圧理論をもとに掘削中の反力の定式化を行ってきた。また、掘削中の油圧ショベルの消費エネルギーを、土圧によるエネルギーとショベルの動作によるエネルギーの合計として表し、掘削反力の計測結果をもとにした掘削効率の評価も行ってきた。

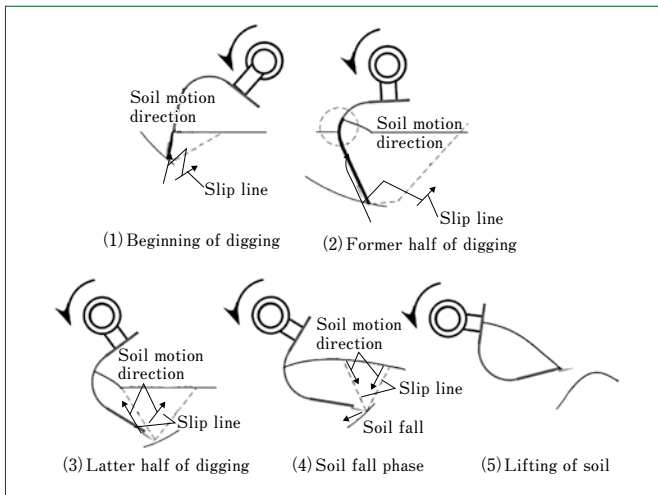


図2 掘削中の土砂挙動過程
Soil behavior phases during excavation

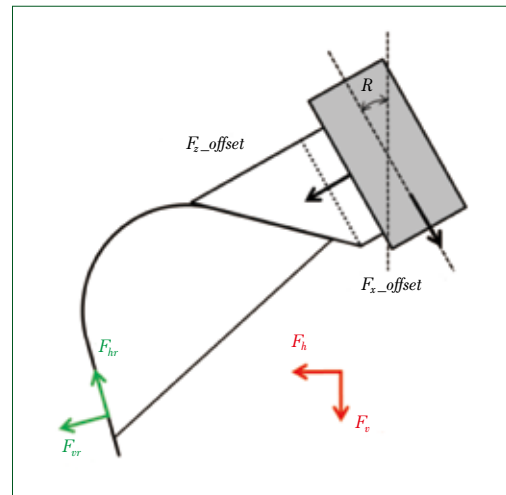


図3 掘削反力座標系
Coordinate system of reaction force

た。しかし、それらの検討では水平引きの掘削軌道については考慮されていなかった。

水平引きの土圧モデルは、掘削中のバケット前方に堆積する土砂量に依存することから、堆積土砂量の考慮が必要になる。また、エネルギー効率の評価では、水平引きの掘削軌道について消費エネルギーの比較実験を行い、試験装置から得られた実験データを掘削反力としていたが、水平引き軌道の土圧モデルを用いることによって実験をすることなく掘削軌道からエネルギー効率の計算を行うことが可能となる。そこで、水平引きの掘削反力を検証し、水平引きの掘削軌道における土圧モデルを作成した。また、土圧モデルによる消費エネルギーと油圧ショベル動作による消費エネルギーから、掘削軌道のエネルギー効率の評価を行った。

2 実験環境

図1に、本実験で使用した掘削模擬試験装置を示す。掘削機構は水平方向に移動するX軸、垂直方向に移動するY軸とバケットを回転させるR軸の3軸で構成される。各軸に変位および速度を与えることで、油圧ショベルの掘削運動を再現することが可能である。装置下部に設置された土砂容器は装置駆動範囲と同等の大きさで、容器片側の壁面がポリカーボネート製である。これにより、土中の土砂挙動を観察することが可能である。ステンレス製のバケットは実機のスケールモデルであり、取外し可能な側板が取り付けられている。また、基礎実験の結果から、砂とバケットとの動摩擦角と停止安息角は、それぞれ 23° 、 32° と求められた。

3 掘削中の土砂挙動と土圧モデル

油圧ショベルの掘削運動を再現した模擬試験動画から、バケット内部における土砂挙動の観察を行った。その結果から、掘削反力を定式化するには、図2に示すような掘削過程に分割する必要があることが分かった。それぞれのフェーズにおいて反力の定式化を行い、実験値との比較によりその妥当性を検証した。

土圧モデルは、クーロンの受働土圧の式をもとに三角形を

複数使用したモデルを使用することで、高い計算精度が得られることが分かっている⁽²⁾。このクーロンの受働土圧モデルをもとに、掘削反力の理論値が計算される。まず、バケット面での土砂の滑りを想定し、受働土圧を計算する。次に、土砂の内部での滑りを想定した受働土圧を、爪先の掘削軌道が安息角となるまで計算する。これらの区間では、実際には受働土圧が小さい方の現象が発生する。受働土圧の決定には、バケット前方の地表に堆積している土砂量が必要であり、受働土圧の計算では堆積した土砂量の影響が非常に大きい。土砂挙動の観察結果および掘削反力測定データから、掘削開始後の貫入軌道ではバケット前方に堆積する土砂量は考慮せず、水平軌道到達後から、バケットによる掃引体積の0.7倍がバケット前方の地表に堆積すると仮定した。さらに、堆積する土砂の形状は滑り線形状から算出された。この仮定によって、水平引きの距離に応じた掘削反力の計算が可能となる。バケット爪先の軌道が安息角を超えると、爪先の下方の空間で土砂の崩落が発生することから、爪先の上部の土砂が下方に流れ始める。このとき主働土圧が発生し、その後、掘削反力は主働土圧よりもさらに小さくなる。爪先が地上に出ると水平方向の反力がなくなり、垂直成分はバケット内部に残った土砂の重量となる。これにより、掘削反力の垂直成分の最終値はバケットの積載土砂重量となるが、理論値ではゼロとしている。

4 掘削反力計測

掘削中の土圧モデルの妥当性を評価すべく、模擬試験装置による実験を行った。掘削反力は、バケット根本に取り付けられた6軸力覚センサによって計測される。このとき、計測された力データからバケット重量などの補正を行っている。計測された反力の絶対座標における水平、垂直成分 F_h 、 F_v および、バケット底面を基準とした F_{br} 、 F_{vr} の座標系を図3に示す。これらの変換は回転行列を利用して計算される。土圧モデルの妥当性を検証すべく、計測データと理論値の比較を行った。図4に掘削反力の計測結果と理論値の水平方向成分を、図5に垂直方向成分を示す。

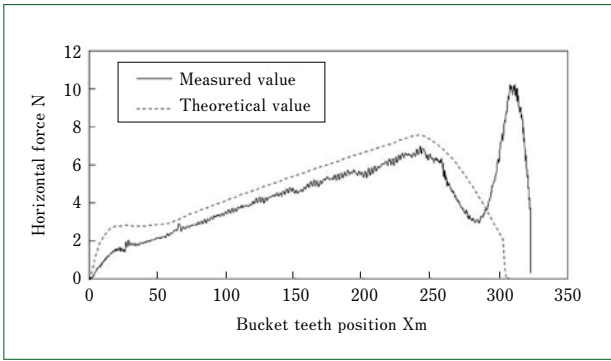


図4 水平方向反力
Reaction force of horizontal direction

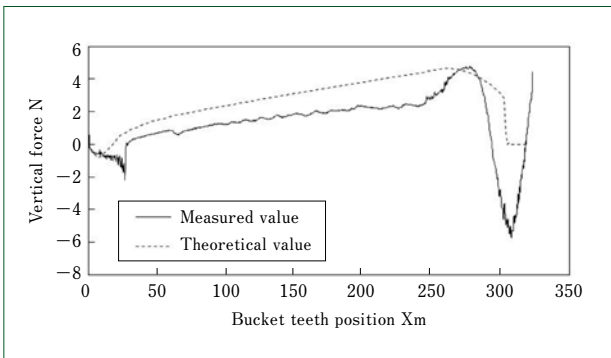


図5 垂直方向反力
Reaction force of vertical direction

図4を見ると、爪先位置が280mmから290mmの間で主働土圧が発生し、およそ300mmで爪先が地表に到達している。爪先位置が200mm以降の反力増加は、土砂を持ち上げる段階で発生しており、これは土砂とバケットの接触によって発生している。しかし、掘削軌道はバケットと土砂が接触しない条件で生成されていることから、掘削後に土砂が崩落したことによる影響と考えられる。理想的には、掘削軌道上に土砂は存在しないので、理論値では影響を考慮していない。この結果から、爪先位置が240mmまでの受働土圧データはおおよそ一致していることが分かる。垂直方向反力では、受働土圧の滑り線内側の重量の見積もりが計測データに合わせて調整されている。しかしながら、滑り線内側の重量の差によって、掘削反力の理論値は実測値よりも大きな値となってしまう。また、主働土圧の値は非常に小さく、ほとんどがバケット内土砂重量に支配される。

5 モデル化および消費エネルギー計算

油圧ショベルのアタッチメントはブーム、アーム、バケットの3軸で構成され、油圧シリンダの伸縮により各関節が回転することから、3リンクマニピュレータとして扱うことができる。図6に、ブームの駆動部を原点としたときのモデルを示す。ただし、バケット長さ L_3 はバケット関節から土砂反力の作用点までの距離である。掘削軌道は、掘削軌道に対してバケットの姿勢が一意的に決定されるように生成された。バケットの姿勢となる第3関節の角度が決定されるので、残りの関節角度は逆運動学によって導出される。

各関節が行う仕事は、関節変位とトルクの積で表される。

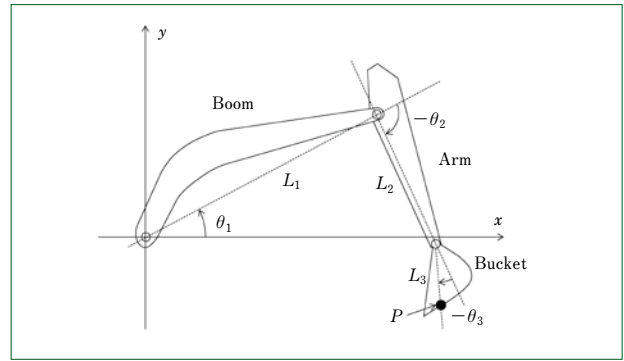


図6 ショベルモデル
Kinematic model of excavator

関節の回転方向とトルクを受ける方向が異なる場合はエネルギーを出力するが、同じ方向の場合には外部からエネルギーを受けることになる。しかし、実際は関節を目標角度に保つことによるトルクが発生する。このことから、エネルギーを貰うようにトルクを受けた場合でも関節はこれに対抗するトルクを出力し、本来貰うはずのエネルギーを消費する。これは負のエネルギーと呼ばれる⁽³⁾。よって、動作による仕事量を求めるには、関節変位とトルクの積の絶対値を積分する必要がある。ショベルの動作に必要な仕事量は土圧とショベルの動作による合計で表されることから、ショベルモデルでの仕事量は式(1)で表される。

$$|\Delta \theta^T \tau_{ext}| = \sum_{k=1}^3 |\Delta \theta_k| |\tau_{extk}| + |\Delta \theta_k| |\tau_{mechk}| \dots \dots \dots (1)$$

負のエネルギーは作業装置の姿勢、進行方向および外力の方向によって発生するので、負のエネルギーの発生量を最小にする掘削開始地点がエネルギー効率を最大化することになる。

6 効率の良いすくい取り軌道

土砂反力に影響を及ぼす因子は、バケットの姿勢と掘削深さである。このことから、掘削反力を低減しエネルギー効率を高めるには、掘削深さを小さくし、掘削中のバケットを寝かせる必要があることが分かっている⁽⁴⁾。水平引き軌道を伴う土圧モデルをもとに、生成された掘削軌道のエネルギー効率の評価を行った。

図7に土圧モデルのシミュレーションに適用する掘削軌道を、表1に軌道条件を示す。一定以上の土砂量を掘削するには、持ち上げ動作までの掘削する体積をバケット体積より大きくする必要がある。このことから、掘削体積 S_s とバケット体積 S_b の比率を軌道パラメータとした。掘削深さと掘削体積を組み合わせた2パターン掘削軌道を生成した。表2に、シミュレーションと比較した実験結果を示す。この結果は、掘削軌道を適用したときに模擬掘削装置で発生する消費エネルギーであり、土圧による消費エネルギーのみを示しており、ショベル動作による消費エネルギーは考慮されていない。

それぞれの軌道に対してシミュレーションを行い、エネルギー消費の評価を行った。表3に、Test 1を基準としたとき

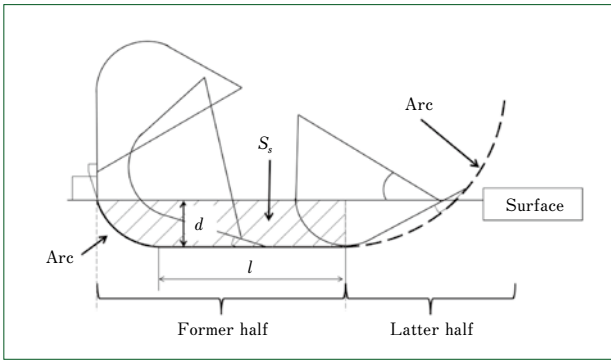


図7 掘削軌道
Excavation trajectory

表1 掘削軌道条件
Excavation trajectory conditions

Test	S_s / S_b	l (mm)	d (mm)
1	2	208	23.5
2	1	47.5	33.5

表2 掘削試験結果
Experimental results of excavation

Test	Scooped soil (g)	Works (J)	Energy efficiency (g/J)
1	486	2.97	164
2	450	2.99	151

表3 シミュレーション結果
Simulation results of excavation

Test	Works ratio	Works ratio	
		earth pressure	gravity
1	1	1	1
2	0.486	1.099	0.408

のTest 2の消費エネルギー比率を示す。シミュレーション結果は実機スケールに換算された値であり、土圧による消費エネルギーの比とショベル動作による消費エネルギーの比を示している。Test 1は「長く浅い」軌道であり、Test 2は「深く短い」掘削軌道である。

シミュレーション結果から、掘削深さが浅く水平引き距離が長いTest 1よりも、掘削深さが深く水平引き距離が短いTest 2の消費エネルギーが小さいことが分かる。図8に、掘削中の各爪先位置での消費エネルギーを示す。この値の合計面積が掘削動作の消費エネルギーとなる。この結果から、同じ位置での消費エネルギーはTest 1の方が小さいものの、合計の消費エネルギーでは掘削距離が長いTest 2の方が小さいことが分かる。これは掘削反力の特性と異なるが、負のエネルギーの影響と考えられる。土圧による消費エネルギーは、ほとんど同じ比率となっており、最大値は深い掘削軌道であるTest 2の方が大きい、合計では同程度となっている。表2の模擬試験装置による実験結果は、土圧のみによる消費エネルギーを表しているが、どちらの軌道も同程度の消費エネルギーとなっており、シミュレーション結果と実験結果が同様の傾向を示していることが分かる。この結果から、土圧モデルによるエネルギー効率の比較が可能であると考えられる。重力に起因する消費エネルギーは、Test 1ではTest 2の2倍

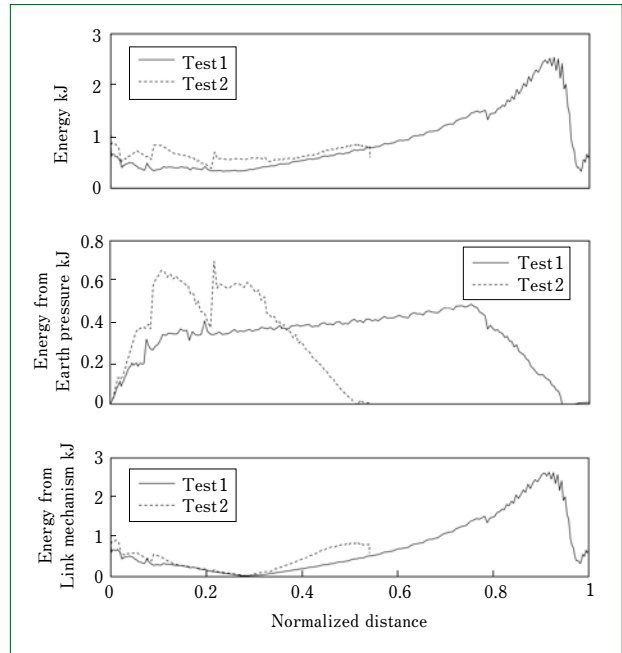


図8 シミュレーションによる消費エネルギー
Energy consumption by simulation

以上である。これは、水平引き距離が長い条件では、負のエネルギーによって消費エネルギーが増加したことによると考えられる。これらの結果から、土圧モデルを用いた掘削効率の評価が可能であり、ショベル動作による消費エネルギーを考慮することで、深く短いTest 2の掘削軌道の方がエネルギー効率が良いことが分かった。

7 むすび

- (1) 模擬試験装置の反力結果から、水平引き軌道における掘削反力をモデル化し、モデルと実験結果がほぼ一致することを確認した。
- (2) 導出された土圧モデルを用いて、掘削軌道のエネルギー効率を評価し、土圧による消費エネルギーがシミュレーションと実験で同じ傾向となることを確認した。
- (3) 土圧モデルによる掘削効率の評価結果において、ショベル動作による消費エネルギーの影響によって、短い掘削軌道のエネルギー効率が高いことを示した。

本研究を進めるに当たり共同研究を実施させていただいた中央大学の大隅久教授に心より感謝申し上げる。

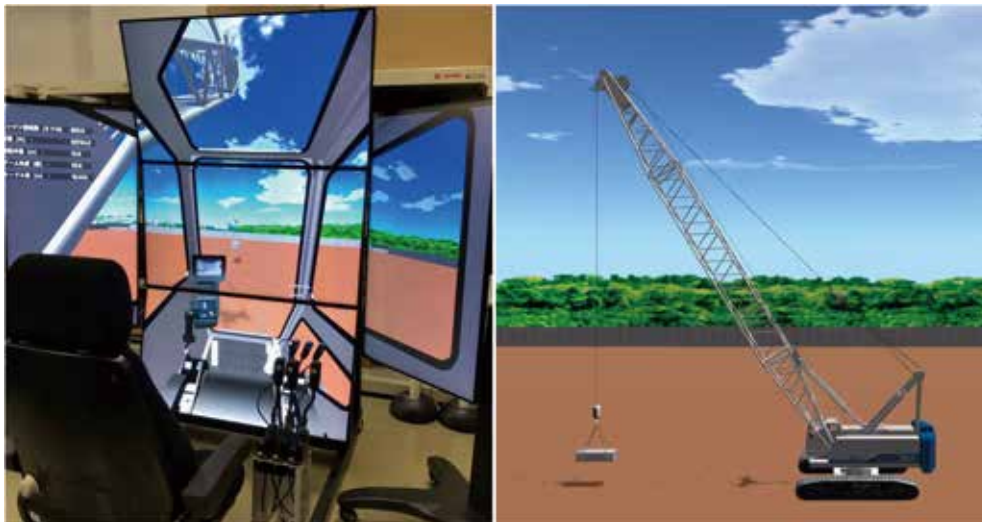
(参考文献)

- (1) 藤野健一, 独立行政法人土木研究所における建設ロボット調査研究について, 建設マネジメント技術, pp.23-28, 2013年6月号.
- (2) 岩瀬裕史他, バックホーにおける土砂掘削反力の解析, 第15回建設ロボットシンポジウム, 2015.
- (3) 広瀬重雄, 梅谷陽二, 歩行機械エネルギー効率に関する基本的考察, 計測自動制御学会論文集, Vol.15, No.7, pp. 928-933, 1979.

クレーンシミュレータの開発

Development of a Crane Simulator

●山本 泰広* 呉 春男*
Yasuhiro YAMAMOTO Chunnan WU



クレーンシミュレータ
Crane simulator

クレーン作業では、吊り荷の振れや機械の転倒などの危険が多く、振れ止め制御機能の搭載が望まれている。しかしながら、開発段階で制御効果の確認を実機で行うことは容易でなく、特に大型のクレーンでは暴走による転倒や倒壊のリスクを伴う。そこで当社では、クレーンシミュレータを開発し、振れ止め機能や自動運転などのオペレータ支援システムの制御検証に用いることを目指した。クレーンシミュレータは詳細な機構モデルおよび油圧モデルをもとに構成され、入力された指令値に対してリアルタイムに機械の挙動が模擬できてクレーン挙動の把握に優れ、効率的な開発に貢献する。モデルの有効性は、シミュレーション結果と実測値との比較を行い検証した。また、位相平面理論をもとにした振れ止めアルゴリズムも併せて開発し、クレーンシミュレータに適用することでその有効性を確認することができた。

There is much danger situation with crane operation, such as swaying of lifting loads, overturning of machinery itself and so on. And controlling function to stop the swaying has been required. But it's difficult for us to confirm the effect to operate the machinery during development stage, especially there will be some risks with large scale crane, such as turning over and collapsing. So SHI set the goal that a crane simulator would be developed and it would be utilized to verify the control for assisting system for operators, like decreasing to sway and automatic operation. The simulation is applied to detailed structure model and hydraulic model. It can show the machinery movement real-time to response to input signal, and can be used for efficient development. The validity of the model had been evaluated with comparing simulation results with real data. An algorithm to decrease swaying based on the phase plane theory had been also developed, and its validity was confirmed to apply for the crane simulator.

1 まえがき

近年、建設現場における安全作業の徹底や、熟練作業不足への対策として、建設機械の安全機能拡充や自動化へ向けた要望が高まっている。特にクレーン作業では、搬送や地切り時の荷振れによる接触や機械の転倒といった危険が多く存在し、荷の振れ止め機能の実現が望まれている。

しかしながら、制御効果の確認を実機で行うことは容易でなく、特に大型のクレーンでは転倒や倒壊のリスクを伴うことから、制御検証は一般に困難である。そこで当社では、振れ止め機能や自動運転などのオペレータ支援システムの制御

検証に用いるクレーンシミュレータを開発した。さらに、オペレータ支援機能の一例として、振れ止めアルゴリズムを併せて開発し、クレーンシミュレータを活用した制御効果確認試験を実施した。なお、クレーンシミュレータには実機のシートや操作レバーを搭載し、操作訓練用のシミュレータとしての活用も可能なものとした。

2 クレーンシミュレータ

2.1 クレーンシミュレータの構成

図1に、当社にて作製したシミュレータのシステム構成を示す。

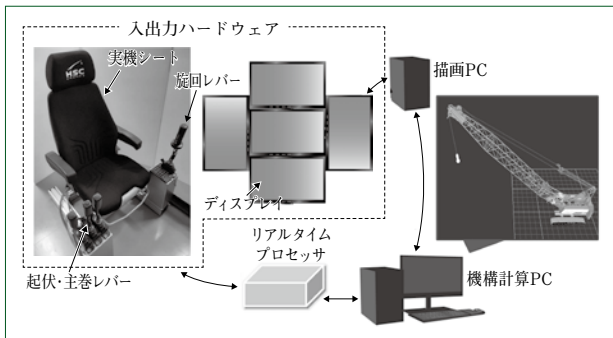


図1 シミュレータの構成
System configuration of simulator

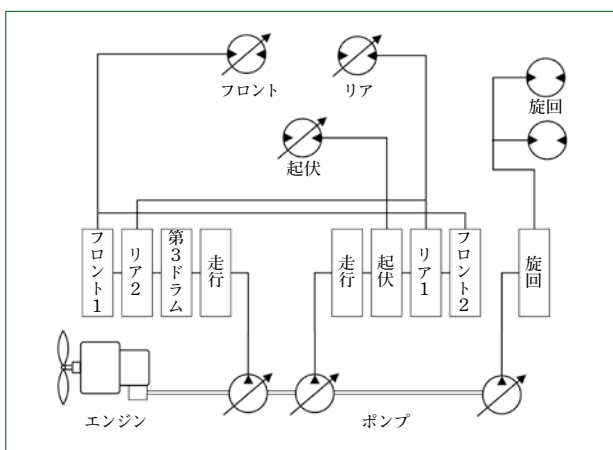


図2 油圧クレーンシステムの構成
System configuration of hydraulic crane

システムは入出力ハードウェア、機構モデル計算PC、アニメーション描画PC、クレーンの油圧モデルを内包したリアルタイムプロセッサをそれぞれ連成させた環境から成る。また、リアルタイムプロセッサ内にオペレータ支援システムを実装しており、機構モデル計算で得られた情報などから制御指令の生成を行う。なお、リアルタイムプロセッサは、MATLAB・SIMULINKからモデルをビルドし、実装することができるものを利用した。

本シミュレータでは、クレーンに実際に搭載されているレバーを用い、動作の基本となる旋回、起伏、巻上げ・巻下げ操作が行えるよう、情報を電気信号として入力できるものとした。レバー操作電気信号は、リアルタイムプロセッサに与えられ、プロセッサ内に実装されているクレーン油圧回路を駆動し、レバー操作量に応じた旋回、起伏、巻上げ・巻下げのトルク指令を生成する。

2.2 機構・油圧モデル

クレーンの機構特性を模擬すべく、当社では物理計算ソフトのVortexツールを用いた。クレーンの詳細な3Dモデルを準備し、それらに質量、慣性、剛性および摩擦を与え、入力されたトルク指令に対してリアルタイムに応答するモデルとした。また、ワイヤについてもVortexツール内に標準搭載されたワイヤモデルを用いており、その剛性や伸びなども考慮したものとした。さらに、地面傾斜や風など外乱の影響を模擬することも可能な仕様となっている。

クレーンの油圧回路の模擬については、油圧回路の特性を

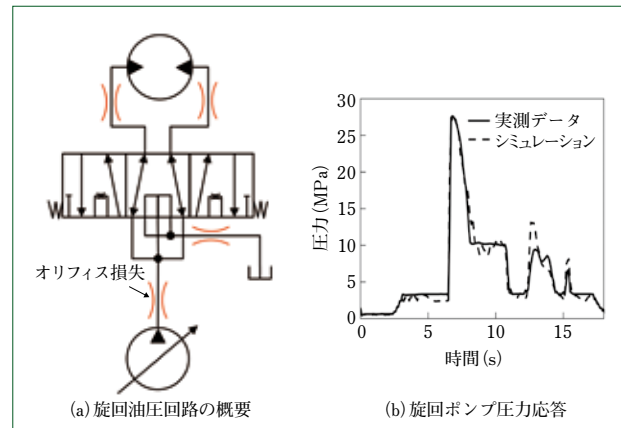


図3 旋回モータシミュレーション
Simulation result of swing motor

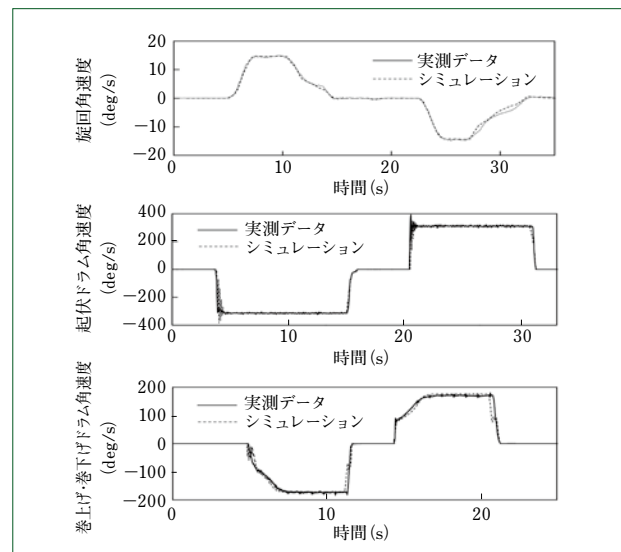


図4 シミュレーション結果(旋回, 起伏, 巻上げ・巻下げ)
Simulation results (Swing, Boom, Hoist)

数式によってモデル化し、MATLAB・SIMULINKによってそれを実装した。図2に、油圧クレーンシステムの構成を示す。

図3に、旋回モータのシミュレーション結果を示す。図3(a)は旋回油圧回路の概要であるが、管路や油圧ホースの取り回しなどに影響され、設計値とは異なった圧損特性となることがほとんどである。これに対応すべく、バルブベンチ試験データをもとに圧損特性を把握し、オリフィス損失を定義することにより再現を試みた。その結果、図3(b)に示す実測に近い旋回ポンプ圧の解析ができ、精度の高いシミュレーションが行えるようになった。

2.3 シミュレーションモデルの検証

クレーンシミュレータ精度を評価すべく、実測とシミュレーションの比較を実施した。クレーンは旋回、起伏、巻上げ・巻下げ動作を基本の動作とするので、これら3軸について確認を行った。図4に、実機とシミュレータから出力された旋回角速度、起伏ドラム角速度、巻上げ・巻下げドラム角速度の比較を示す。シミュレーション結果は実測に近い速度特性を再現しており、シミュレータとして正しく実機動作を模擬

※ [MATLAB] および [SIMULINK] は、Mathworks社の登録商標です。

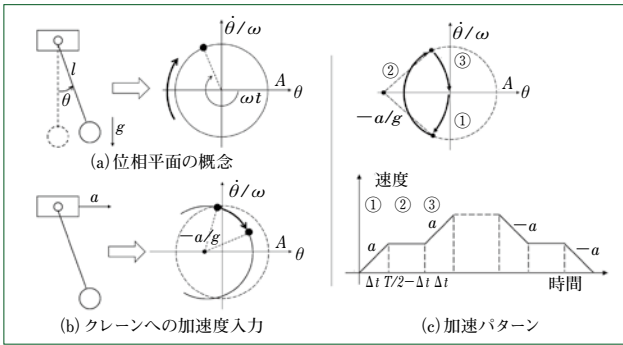


図5 位相平面
Phase plane

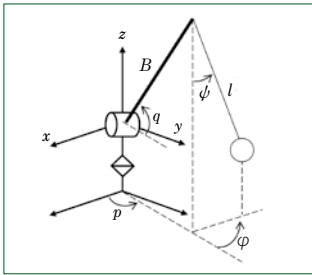


図6 クレーンモデル
Crane model

表1 シミュレーション条件
Simulation conditions

	仕様
ブーム	24 m
吊り荷	5000 kg
ワイヤ長	20 m
ブーム角	60 deg 固定
旋回角	90 deg
搬送時間	20 s



図7 シミュレーション概観
Simulation overview

できることが分かった。このことから、開発したシミュレータがクレーンのオペレータ支援システムの検証に利用できることを確認した。

3 振れ止めアルゴリズム

3.1 位相平面

並進運動を行うクレーンにおいては、位相平面において振れの状態を表現し、オープンループ制御を行う研究が進められてきた。当社においても、旋回を行うクレーンへの適用を目指し、開発を進めている⁽¹⁾。

図5(a)に、位相平面の概念を示す。ワイヤ長、重力加速度、振れ角をそれぞれ l 、 g 、 θ とすると、単振り子の運動方程式は式(1)となる。式(1)より、振れ角と角速度を導けば式(2)、(3)となる。ただし、 A は定数とする。

$$\theta'' = -\frac{g}{l}\theta = -\omega^2\theta \dots\dots\dots (1)$$

$$\theta = A\cos(\omega t) \dots\dots\dots (2)$$

$$\theta'/\omega = -A\sin(\omega t) \dots\dots\dots (3)$$

これをもとに横軸に振れ角 θ 、縦軸に固有振動数 ω で正規化した角速度 θ'/ω にて位相平面が表現される。振り子運動は位相平面上で時計回りに角速度 ω で回転を行い、一周にかかる時間は振り子の周期 $T(=2\pi/\omega)$ となっている。

ここで、図5(b)に示すように、クレーンに加速度 a が加えられた場合には、運動方程式は式(4)のように変わる。これを式(5)のように式変形することで、位相平面上の円運動は、その中心が $-a/g$ だけ平行移動され、移動された中心周りの円運動に切り替えられたことが分かる。

$$\theta'' = -\frac{g}{l}\theta - \frac{1}{l}a \dots\dots\dots (4)$$

$$\left(\theta + \frac{a}{g}\right)'' = -\frac{g}{l}\left(\theta + \frac{a}{g}\right) \dots\dots\dots (5)$$

よって、適切なタイミングで必要な加速度を与えることで、円運動を原点へ向かわせることができ、運動が原点にきた際に加速度をゼロとすれば、振動を収束させることが可能となる。

この振れ角制御の理論をもとに、本開発では図5(c)に示す加減速パターンを利用することを考えた。このパターンによれば、停止中のクレーンに対して、まず時間 Δt で加速度 a を与える。次に、加速度をゼロとして時間 $T/2 - \Delta t$ だけ等速運動をさせ、最後に時間 Δt で加速度 a を与えることで、振れを発生させることなく加速を行うことができる。加速後は、任意の時間だけ等速度にて搬送を行い、加速パターンの符号を反転させた減速パターンを与えれば、停止時に振れ止めが可能となる。

3.2 クレーンにおける振れ角

3.1で詳述した振れ止めパターンの効果を検証すべく、クレーンの運動学モデルを立てる。

図6に、クレーンのモデルを示す。図のような座標系を取ることで、旋回と起伏によってブーム先端の位置は式(6)~(8)のように表すことができる。ただし、ワイヤ長、重量加速度の記号は3.1において設定したものと同一とし、さらにブーム長 B 、旋回角 p 、起伏角 q 、懸垂物の振れ角 ϕ を定義した。

$$x = B\cos q \cos p \dots\dots\dots (6)$$

$$y = B\cos q \sin p \dots\dots\dots (7)$$

$$z = B\sin q \dots\dots\dots (8)$$

よって、クレーンに対して、起伏角加速度 q'' 、旋回角加速度 p'' を与えたときのブーム先端の加速度は、式(9)~(11)のように記述される。

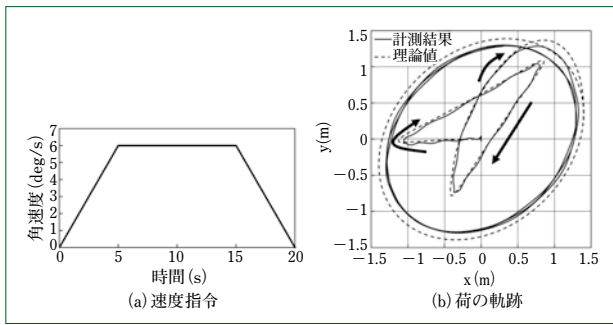


図8 搬送シミュレーション(振れ止めなし)
Transportation simulation (Not sway suppression)

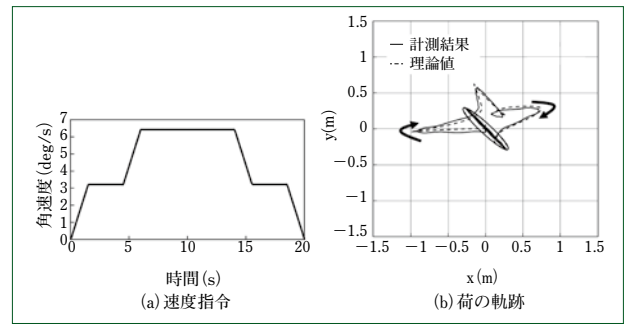


図9 搬送シミュレーション(振れ止めあり)
Transportation simulation (Sway suppression)

$$x'' = -Bq'' \sin q \cos p - Bp'' \cos q \sin p - B(q'^2 + p'^2) \cos q \cos p + 2Bq'p' \sin q \sin p \dots\dots\dots (9)$$

$$y'' = -Bq'' \sin q \sin p + Bp'' \cos q \cos p - B(q'^2 + p'^2) \cos q \sin p - 2Bq'p' \sin q \cos p \dots\dots\dots (10)$$

$$z'' = -Bq'' \cos q - Bq'^2 \sin q \dots\dots\dots (11)$$

荷の座標系は、図6におけるブーム先端を原点とし、クレーン座標と同じ姿勢の座標系となるようにとれば、荷の重心位置の座標は、次のようになる。

$$x_p = l \sin \phi \cos \varphi \dots\dots\dots (12)$$

$$y_p = l \sin \phi \sin \varphi \dots\dots\dots (13)$$

$$z_p = -l \cos \phi \dots\dots\dots (14)$$

これをもとに、荷の回転運動における ψ 、 ϕ 方向の運動方程式を立てると、式(15)、(16)のようになる。

$$\psi'' = -\frac{1}{l} (2l'\phi' - l\varphi'^2 \sin \phi \cos \phi + g \sin \phi + \cos \phi \cos \phi x'' + \cos \phi \sin \phi y'' + \cos \phi z'') \dots\dots\dots (15)$$

$$\phi'' = -\frac{1}{l \sin \phi} (2l'\varphi' \sin \phi + 2l'\varphi'\phi \cos \phi - \sin \phi x'' + \cos \phi y'') \dots\dots\dots (16)$$

式(15)、(16)の x'' 、 y'' 、 z'' に対し、式(9)～(11)の加速度を適用することで、旋回と起伏動作に対する荷の運動を表現することが可能となる。

ここで、本シミュレータにおいては、荷の状態を確認すべくブーム先端から鉛直真下を常に向き続けるようにカメラ機能を設定している。カメラのxy座標は、クレーン座標のx、yに対して、z軸周りに $-\pi/2$ rad回転し、さらに旋回角に応じてp rad 回転させた状態として表現される。

4 振れ止めアルゴリズムの検証

これまで述べたことをもとに、クレーンシミュレータに対して加速度を与えた際の荷の運動を確認する。シミュレーションは、図7に示すようにクレーンのフックに荷を吊った状態で行う。表1に、シミュレーション条件を示す。まず、シミュレータ上での荷の挙動が、3.2で導いた荷の運動方程式に沿うかについて確認を行った。図8に、その結果を示す。

図8(a)に示した速度パターンを旋回軸に与えた際に、ブーム先端カメラから観測された荷の重心の軌跡が図8(b)に示されている。このシミュレーションにおいて与えた速度は、

振れ止め効果を持つパターンとなっていないことから、軌跡を見れば、残留振動の振幅はx方向に±1.5 m、y方向に±1.5 mほど生じることが分かる。導出した運動方程式による荷の軌跡とシミュレータによる荷の軌跡を比較すると、ワイヤの伸縮や振動などによって軌跡に若干のズレは見られるものの、十分な模擬の行えるシステムとなった。

これに対し、振れ止め指令となる入力を与えたシミュレーション結果を図9に示す。図9(a)に示す旋回速度指令を入れたときの荷の軌跡が図9(b)に示されている。

旋回速度を与えている時間と、旋回する角度は図8に示したシミュレーション結果と同一であり、今回得られた軌跡を見れば、荷振れはx方向に±0.2 m、y方向に±0.2 mほど生じるものの、十分な振れ止め効果を確認することができた。

なお、振れ止め指令は並進クレーンをもとに作成しているが、旋回を行うクレーンでは、荷に対して旋回遠心力が働くことにより、完全な振れ止めとなっていないことに注意されたい。本シミュレータの作製によって、クレーンの運動が十分模擬されることが分かったことから、今後はこれを活用し、より効果の高い振れ止め指令の開発を行っていく予定である。

5 むすび

- (1) 本研究においては、振れ止め機能や自動運転などの、オペレータ支援システムの制御検証に用いることを目的としたクレーンシミュレータを作製した。
- (2) 詳細な3D機構モデルと油圧計算モデルの連成により、旋回モータ、起伏ドラム、巻上げ・巻下げドラムの速度について実機データとの一致を確認することができた。
- (3) オペレータ支援システムとして、位相平面をもとにした振れ止め指令の作製と、クレーンモデルの立式を行い、これをシミュレータへ適用することでその有効性を確認した。

今後は、クレーンの旋回時において発生する荷の遠心力の影響も加味した振れ止め指令を考案し、シミュレータでその有効性を評価する。また、シミュレータでの十分な検討の後に、実機クレーンを用いた振れ止め検証を行う予定である。

(参考文献)

(1) Yamamoto, Y., Wu, C., Osumi, H., Yano, M., & Hara, Y. (2020), Development of an Algorithm for Crane Sway Suppression, In ISARC, Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction, IAARC Publications, Vol.37, pp.584-588.

有効応力集中係数を考慮した修正ENS法の提案

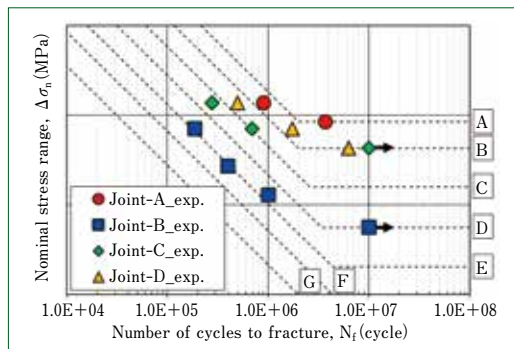
—裏当て金付き突合せ溶接継手への適用—

Proposal of Modified ENS Method Considering Effective Stress Concentration Factor
—Application to Butt Weld Joints with Backing Plate—

●柴田 誉* 佐藤 啓介* 堀川 秀信** 堤 成一郎***
Homare SHIBATA Keisuke SATOH Hidenobu HORIKAWA Seiichiro TSUTSUMI



油圧ショベル(SH200-7)
Hydraulic excavator (SH200-7)



疲労試験結果
Fatigue test results



疲労試験片
Fatigue test specimen

溶接継手の疲労性能評価手法として、有効切欠き応力法(ENS法)が知られているが、過度に安全側の評価となる可能性があるうえ、角変形に関する明確な記述はない。一方、近年提案された有効応力集中係数は、引張側の応力範囲に基づいて定義され、一部の継手形式に対して疲労性能との相関の高さが示されている。本研究では、裏当て金付き突合せ溶接継手を対象として疲労試験を実施するとともに、有効応力集中係数を考慮した修正ENS法の提案を行う。はじめに、疲労寿命評価に用いる応力範囲においては、角変形を考慮した有効応力集中係数に基づく評価結果の予測精度が最も高いことを確認した。次に、有効応力集中係数の算出式を用いて修正S-N線図を提案した。提案手法により4種の継手に対して統一的高精度な寿命評価が可能であることを示した。

Effective notch stress method is well known as a general method to predict fatigue life from stress of both in welded toe and root. But it has probability to give safer side evaluation, and no description for angular distortion in the guideline. On the other hand, the effective stress concentration factor was proposed in recent years. It's defined on the stress range of the tensile side and shows high correlation with fatigue property of some types of welded joints. In this research, fatigue experiment to butt welded joint with backing plate has been conducted, and modified ENS method considering the effective stress concentration factor is proposed. Within the stress range in this research, the predicted result based on the effective stress concentration factor considering angular distortion is the most accurate to experiment results. And modified S-N diagram is proposed with using calculation method for effective stress concentration factor. It is possible for proposed method to evaluate fatigue life accurately for four types of welded joints.

1 まえがき

機械・構造物の老朽化問題が議論されるようになって久しく、以来疲労照査の導入が各所⁽¹⁾で進められている。疲労問題は破壊事例のおよそ8割を占める⁽²⁾と言われる深刻な問題であり、特に溶接継手部において顕著である。

本研究において検討対象とする裏当て金付き突合せ溶接継手は、建設機械アタッチメントをはじめとする箱型構造物の

溶接時に多用される溶接継手形式である。この継手には、母材と裏当て金の高い応力集中部となる溶接ルート部が残存し、設計時には溶接止端部と合わせ双方からの疲労照査が必要となる。このような溶接止端部と溶接ルート部の両者を起点とする疲労問題の性能評価手法として国際溶接学会(IIW)が推奨する有効切欠き応力(ENS: Effective Notch Stress)法⁽³⁾が広く知られており、これまで多くの研究⁽⁴⁾⁽⁵⁾が行われている。ENS法では、溶接止端部や溶接ルート部の

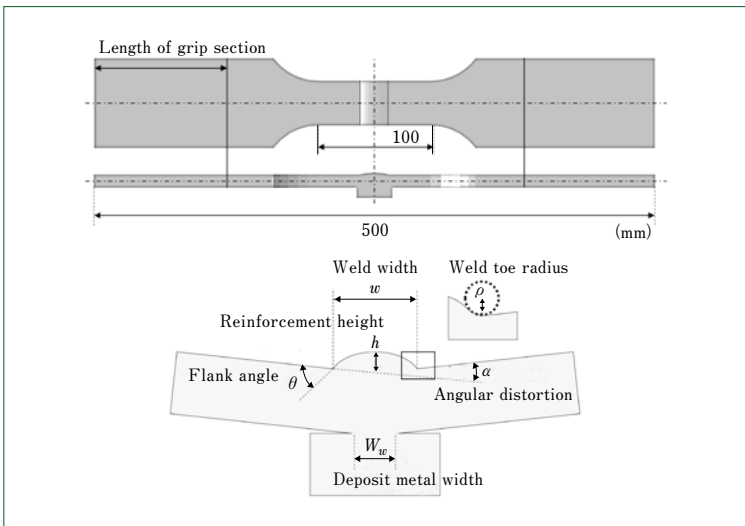


図1 疲労試験体形状および形状パラメータ定義
Fatigue specimen geometry and geometry parameter definition

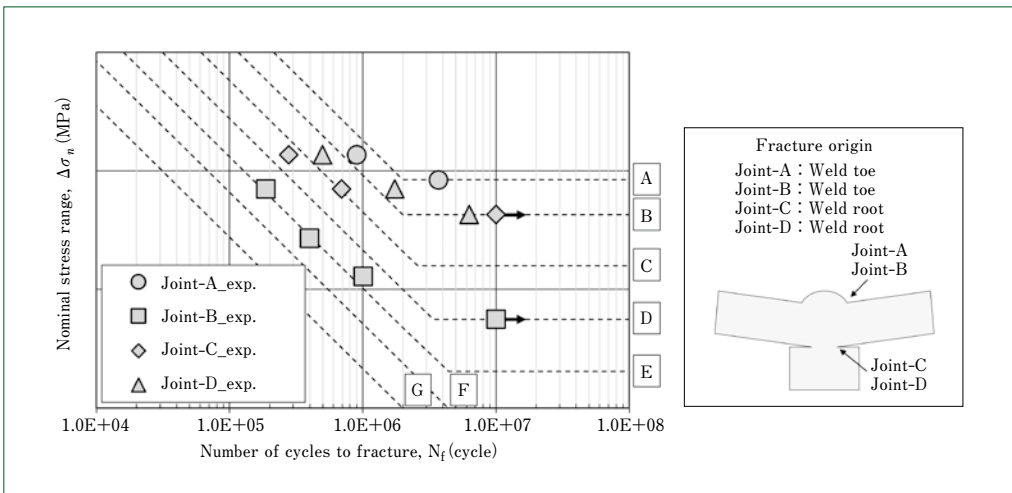


図2 疲労試験結果
Fatigue test results

局所的な形状のバラツキや塑性変形の影響を勘案し、半径 1 mmの仮想円弧を設けたモデルの弾性解析による局所応力範囲を疲労に対する駆動力として算出する。そして、その値をIIWの規定する200万回疲労強度が225 MPaとなるMaster S-N線図(FAT225)と比較することによって疲労性能を評価する。しかし、この手法は、あくまでも安全設計を主目的とした評価方法であることから、疲労性能の高い継手においては過度に安全側の評価を与える可能性が懸念される。さらに、疲労寿命に大きな影響を与える溶接角変形に関する具体的な記述も見当たらない。

一方、疲労破壊起点部の局所応力範囲と疲労寿命は相関が高いことが知られており、特に角変形を有する継手においては、疲労試験における治具拘束後の局所応力範囲である有効局所応力範囲との高い相関が示されている⁽⁶⁾。さらに、活荷重に応じて変化する有効局所応力範囲を用いて応力集中を定義する有効応力集中係数 ΔK_t が提案されており、著者らも本継手形式の溶接止端部および溶接ルート部における有効応力集中係数 ΔK_t を評価可能な簡易予測式の開発を進めている。

そこで本研究では、溶接継手の高精度かつ簡易な疲労性能

予測手法の提案を目的として、まず裏当て金付き突合せ溶接継手を対象とした疲労試験を実施するとともに、従来ENS法では、その考慮の要否に関して明確な規定がない角変形の影響に関して考察する。次に、従来ENS法に対して有効応力集中係数 ΔK_t の概念を組み合わせた修正ENS法を提案し、疲労試験との照査により、その予測精度に関して検証を行う。

2 疲労試験

2.1 疲労試験体

母材にSM490A、裏当て金にSS400、溶接金属にJIS Z3312のYGW15材を使用して製作した疲労試験体形状を図1に示す。疲労試験体の種類はJoint-AからJoint-Dまでの4種類であり、それぞれ異なる溶接条件のもとで製作した。製作後、形状計測装置(Keyence VL Series)を使用して、図1中の定義に従い、形状パラメータを計測した。

2.2 疲労試験結果

疲労試験は、油圧サーボ疲労試験機を使用して実施した(応力比: $R=0/0.1$, 試験速度: 10Hz)。

図2に、疲労試験結果を示す。なお、試験結果は疲労試験

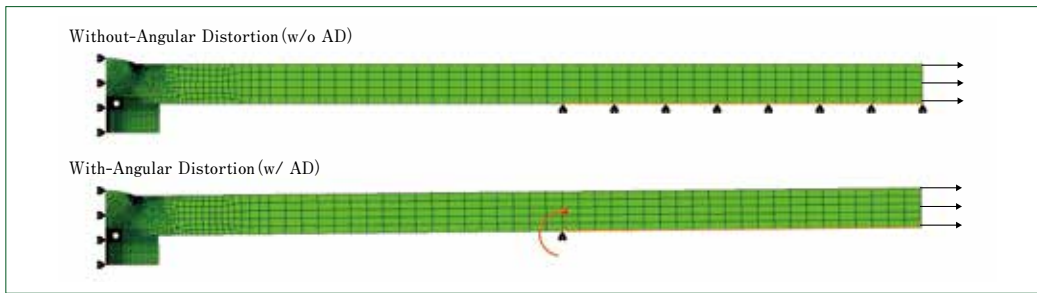


図3 解析モデルおよび解析条件(Joint-A)
FE models and Analysis conditions (Joint-A)

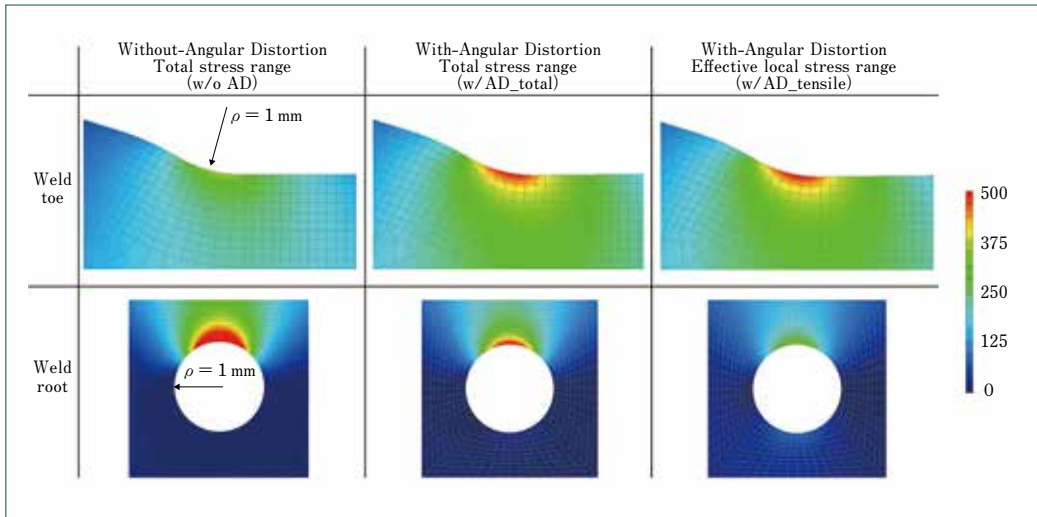


図4 疲労寿命評価に使用する局所応力範囲分布(Joint-A)
Local stress range distributions for fatigue life evaluation (Joint-A)

体が完全に破断した繰返し数を破断寿命として定義している。黒破線で示したJSSCによるA等級からG等級までの疲労強度等級⁷⁾に注目すると、本継手形式はF等級と設定されており、全試験結果はこれを満足している。また、既往の実験結果と同様にE等級からB等級程度まで幅広く存在し、試験体ごとの差が大きいことが確認された。疲労き裂発生起点は、破断面観察によりJoint-AおよびBが溶接止端部、Joint-CおよびDが溶接ルート部であった。

3 Master S-N線図基準の従来ENS法による疲労寿命評価

本章では、2章の疲労試験結果に対して、従来法であるMaster S-N線図基準のENS法による疲労寿命評価を行う。また、疲労寿命に対する角変形の影響および局所応力範囲取得方法に関する考察を行う。

3.1 角変形(AD: Angular Distortion)を設定しない解析モデルに対する適用

はじめに、角変形を設定しない解析モデルの疲労寿命評価結果について述べる。

2章に示した角変形量以外の形状計測結果を参考に作成した解析モデルの一例(Joint-A)および境界条件を図3上段に示す(要素数 2914, 節点数 6212)。解析モデルには、IIWによる指針に倣い、溶接止端部および溶接ルート部に半径1 mmの仮想円弧を設定した。ただし、溶接止端半径が1 mm

以上の良好な形状の溶接継手は、溶接止端部の形状として実測止端半径を採用する。要素タイプは六面体1次要素であり、節点の奥行き方向変位を拘束することにより、平面ひずみ状態を再現した。なお、最小要素サイズは仮想円弧周辺において $0.1 \times 0.1 \times 1$ mm程度とした。

解析により得られた局所応力範囲の分布を図4の左列に角変形なし/全応力範囲(w/o AD)として示す。応力は節点平均値で出力した仮想円周方向の応力である。溶接止端部に比べ溶接ルート部の局所応力範囲が大きく、溶接ルート部から破断する結果となった。この傾向はJoint-BからJoint-Dの検討結果においても同様であり、検討の範囲ではすべて溶接ルート部から疲労破断が予測される。しかし、これは疲労試験における疲労き裂発生起点と一致していない。また、図5にMaster S-N線図を用いて評価したJoint-Aの疲労寿命評価結果を示すが、w/o ADは疲労試験結果と比べて非常に短寿命という予測結果となることが確認できる。

これらのことから、角変形を考慮しない従来ENS法による疲労寿命評価結果は実現象を反映できず、過度に安全側の評価結果を与える場合があることが示された。

3.2 ADを設定した解析モデルに対する適用

次に、角変形を設定したモデルに対する検討結果について述べる。

疲労寿命評価に使用した解析モデルおよび境界条件は図3下段の通りである。すべての形状パラメータは2章の形状計

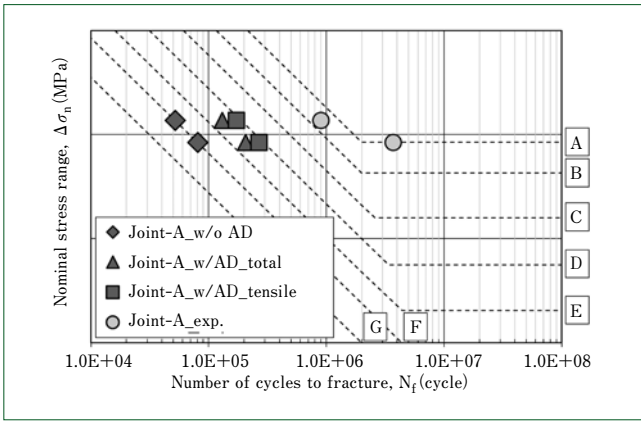


図5 各種応力範囲による疲労寿命予測結果 (Joint-A)
Fatigue life evaluations by various stress ranges (Joint-A)

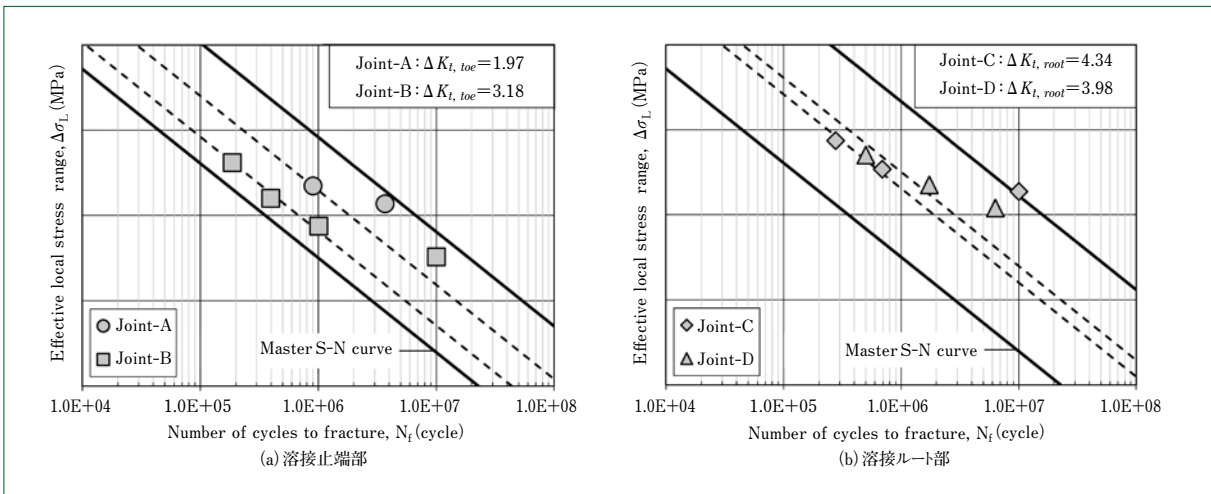


図6 有効局所応力範囲と破断寿命の関係
Relationship between effective local stress range and fracture life

測結果を参考にしている。応力解析は、疲労試験の荷重載荷状態を再現すべく、治具拘束を模擬した強制変形を保持したまま疲労荷重の载荷を行った。疲労寿命評価に使用する応力範囲は、通常用いられる角変形あり/全応力範囲(w/AD_total)のほかに、治具拘束後の引張側局所応力範囲である角変形あり/有効局所応力範囲(w/AD_tensile)も採用し、応力範囲取得方法に関する検討を行った。

応力解析で得られた局所応力範囲分布を図4の中央および右列に示す。w/AD_totalの最大値は溶接ルート部、w/AD_tensileの最大値は溶接止端部であった。後者は疲労試験(Joint-A)における疲労き裂発生起点と一致し、全継手において一致する結果を得た。また、図5に示すMaster S-N線図を用いた疲労寿命評価結果についても、w/AD_tensileが最も実験結果に近づいており、ENS法を用いた疲労寿命評価において解析モデルに角変形を考慮し、有効局所応力範囲を使用することの有用性が示された。一方、疲労試験結果に対するw/AD_tensileの寿命予測結果の割合は1/5程度であり、過度に安全側といえる評価結果であった。この傾向はその他継手についても同様であり、統一的に高精度な疲労寿命評価が可能であるとは言い難い。

これらのことにより、Master S-N線図基準のENS法による疲労寿命評価結果において、解析モデルに角変形を考慮し、

有効局所応力範囲を使用することの有用性が示されたものの、疲労寿命の評価は過度に安全側となった。より高精度な評価手法の確立が望まれる。

4 有効応力集中係数 ΔK_t の簡易予測式

一般に疲労問題は応力集中部において顕著となることから、溶接継手の応力集中係数簡易予測式に関する研究⁸⁾が多く行われている。しかし、角変形を有する継手の場合は、治具拘束によって溶接止端部や溶接ルート部を中心に応力が分布することから、その定量評価や取り扱いが難しい。

他方、既往研究⁶⁾において治具拘束の影響を除外した有効応力集中係数 ΔK_t が提案されており、疲労性能との高い相関が示されている。ここに、有効応力集中係数 ΔK_t の定義は式(1)とし、疲労試験における治具拘束後の引張側局所応力範囲である有効局所応力範囲と公称応力範囲の比として与える。

$$\Delta K_t = \frac{\Delta\sigma_L}{\Delta\sigma_n} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\Delta\sigma_L$ ：有効局所応力範囲、 $\Delta\sigma_n$ ：公称応力範囲

これにより、著者らも裏当て金付き突合せ溶接継手の溶接止端部および溶接ルート部における簡易予測式の開発・改善を進めており、それぞれ式(2)、(3)に示す。

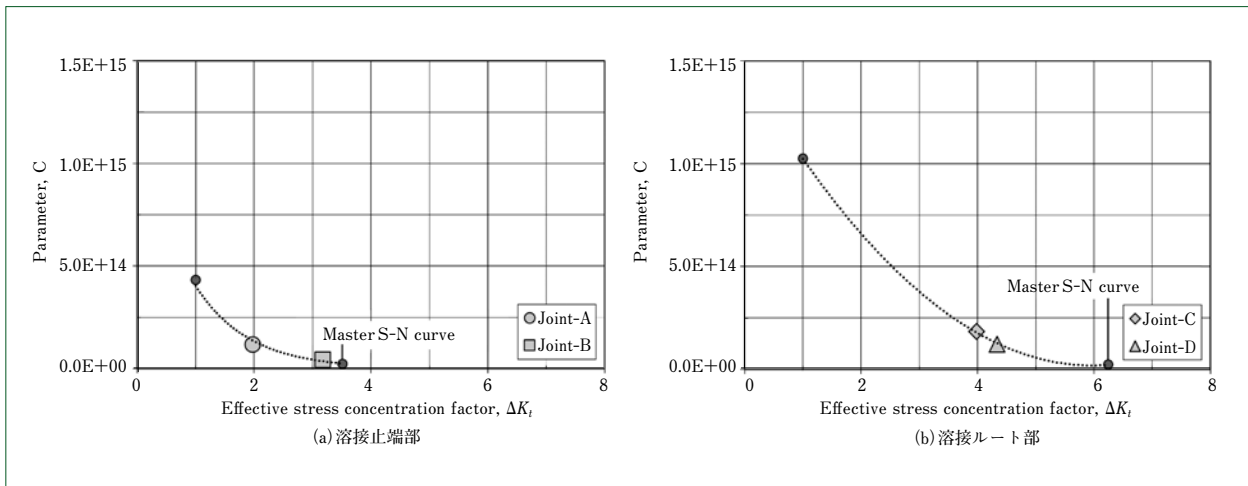


図7 有効応力集中係数 ΔK_t とパラメータCの関係
Relationship between effective stress concentration factor ΔK_t and Parameter C

$$\Delta K_{t, toe} = (1.0 + A1 \cdot \alpha) \cdot (1.0 + A2 \cdot F(h/t)) \cdot F(w/t) \cdot F(\theta) \cdot \sqrt{t/\rho} \dots (2)$$

ここで、 $F(h/t) = 1.0 - \exp(A3 \cdot (h/t)^{A4})$

$$F(w/t) = 1.0 - \exp(A5 \cdot (w/t)^{A6})$$

$$F(\theta) = \frac{1 - \exp(A7 \cdot (\rho/t)^{A8}) \cdot \theta}{1 - \exp(A7 \cdot (\rho/t)^{A8}) \cdot \frac{\pi}{2}}$$

$$\Delta K_{t, root} = \frac{\Delta \sigma_L}{\Delta \sigma_n} \dots (3)$$

$$\Delta \sigma_L = \begin{cases} \sigma_s \cdot (\sigma_{n, max} - \sigma_0) & (\sigma_0 < \sigma_{n, max}) \\ 0 & (\sigma_0 > \sigma_{n, max}) \end{cases}$$

ここで、 $\sigma_0 = f_{\sigma_0}(\alpha) \cdot f_{\sigma_0}(Ww/t) \cdot f_{\sigma_0}(h/t)$

$$f_{\sigma_0}(\alpha) = B1 \cdot \alpha \quad f_{\sigma_0}(Ww/t) = 1 + B2 \cdot (Ww/t)$$

$$f_{\sigma_0}(h/t) = B3 \cdot \left(1 - \frac{h/t}{B4 + h/t}\right)$$

$$\sigma_s = f_{\sigma_s}(\alpha) \cdot f_{\sigma_s}(h/t) \cdot f_{\sigma_s}(Ww/t)$$

$$f_{\sigma_s}(\alpha) = C1 - C2 \cdot \alpha$$

$$f_{\sigma_s}(Ww/t) = C3 + (C4 - C3) \cdot \frac{(Ww/t)^{C5}}{C6^{C5} + (Ww/t)^{C5}}$$

$$f_{\sigma_s}(h/t) = C7 + (C8 - C7) \cdot \frac{(h/t)^{C9}}{C10^{C9} + (h/t)^{C9}}$$

5 修正ENS法の提案

2～4章を踏まえて、修正ENS法の提案を行う。まず、5.1で4章の有効応力集中係数 ΔK_t を用いた修正S-N線図の提案を行う。その後、5.2において3章に述べた有効局所応力範囲と提案する修正S-N線図を組み合わせた疲労寿命評価を行い、これを修正ENS法として提案する。

5.1 疲労寿命評価に使用する修正S-N線図の提案

図6は、溶接止端部および溶接ルート部における有効局所応力範囲と実験における破断寿命の関係であり、図中の破線は、疲労限界付近以外のデータを使用した各継手に対する回帰線である。図中の実線はIIW基準のS-N線図であり、各継手の有効応力集中係数 ΔK_t は $\Delta \sigma_n = 180\text{MPa}$ 載荷時の値である。この結果より、各継手のデータはいずれもMaster S-N線図よりも上方に位置し、有効応力集中係数 ΔK_t が小さいほど乖離が大きいたことが分かる。つまり、有効応力集中係数 ΔK_t が小さい継手は疲労寿命が長くなる傾向にある。

そこで本研究では、提案するS-N線図の一般式を式(4)のように設定し、有効応力集中係数 ΔK_t の大小と対応した修正S-N線図の提案を行う。なお、一般に疲労性能の高い継手はS-N線図の傾きが小さくなる傾向があるが、本研究では疲労試験データ数を考慮して傾きは $m = 3$ (一定)とし、パラメータCが支配する上下平行移動のみの修正を対象とする。

$$N = \frac{C}{\Delta \sigma_L^m} \dots (4)$$

図7に、溶接止端部および溶接ルート部における有効応力集中係数 ΔK_t とパラメータCの関係を示す。なお、各継手のパラメータCの値は疲労限界付近のデータを除いた平均値である。これらの点群と各継手の有効応力集中係数 ΔK_t を近似した関数が図中の点線であり、それぞれの関数形は式(5)および式(6)のように表現される。

溶接止端部

$$C = f(\Delta K_{t, toe}) = 1.22 \times 10^{15} \exp(-1.10 \Delta K_{t, toe}) \dots (5)$$

溶接ルート部

$$C = g(\Delta K_{t, root}) = 4.08 \times 10^{13} \Delta K_{t, root}^2 - 4.86 \times 10^{14} \Delta K_{t, root} + 1.47 \times 10^{15} \dots (6)$$

5.2 修正ENS法による疲労寿命評価結果

3章に述べた有効局所応力範囲と5.1で提案した修正S-N線図を用いた修正ENS法による疲労寿命評価結果を図8に

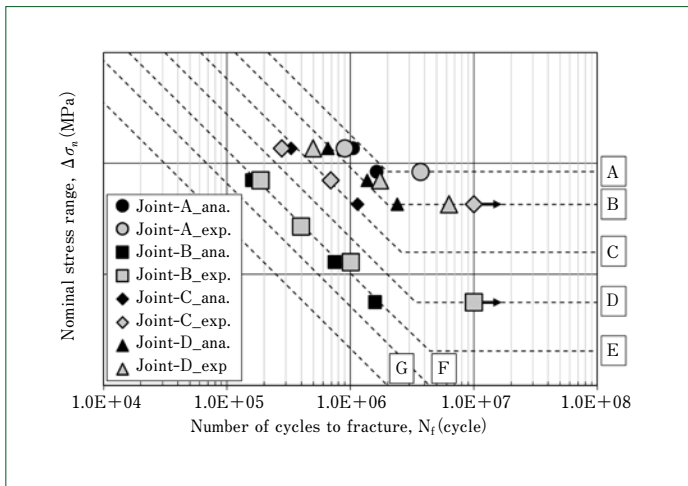


図8 修正ENS法による疲労寿命評価結果
Fatigue life evaluation by modified ENS method

示す。灰色が実験結果、黒色が解析結果を示すが、疲労限付近を除けば解析結果は実験を統一的に精度良く再現できていることが見て取れ、本研究で提案する修正ENS法の有用性が示された。

溶接継手の形状パラメータを計測することにより、有効応力集中係数 ΔK_t が算出され、疲労寿命を精度良く再現することができる一連のシステムを提案した。本研究は、裏当て金付き突合せ溶接継手に対する検討であったが、両側/片側すみ肉溶接継手や重ね継手など、ほかの継手形式に対しても、同様の手順を踏むことにより高精度な疲労寿命評価システムの確立が可能である。また、このシステムを利用して、完成品の溶接継手形状を測定することにより高精度な疲労寿命を得ることができ、ENS法による数値解析で低疲労寿命と判断される箇所に対する現実的な疲労寿命評価が可能となる。

6 むすび

本研究では、裏当て金付き突合せ溶接継手を対象として疲労試験を実施し、従来ENS法の修正評価手法として修正ENS法の提案を行った。その結果、4種の溶接継手に対し、統一的に高精度な疲労寿命評価結果が可能であることを確認した。

得られた知見を次に示す。

- (1) 従来ENS法による疲労寿命評価において、角変形を設定しないモデルを用いた評価では疲労試験におけるき裂発生起点と解析の局所応力範囲最大位置は異なると予測されたが、角変形考慮/有効局所応力範囲で評価することにより全継手において一致し、その局所応力範囲取得手法の重要性が示された。
- (2) 提案する局所応力範囲取得手法および修正S-N線図を組み合わせた修正ENS法の疲労寿命評価により、全継手の疲労試験結果を高精度で予測することができた。

今後は、有効応力集中係数簡易予測式における検討モデル数や検証用の疲労試験体数を増やすことにより、より確度の高い汎用的な評価式の開発が期待される。

(参考文献)

- (1) 日本道路協会, 道路橋示方書・同解説(Ⅱ鋼橋・鋼部材編), 丸善株式会社, 2017.
- (2) 日本材料学会, 疲労設計便覧, 株式会社養賢堂, 1995.
- (3) Hobbacher, A. F., Recommendations for fatigue design of welded joints and components Second edition, IIW Doc. IIW-2259-15 ex XIII-2460-13/XV-1440-13.
- (4) 森猛, 明見正雄, 十字溶接継手ルート破壊の疲労強度評価に対する有効切欠き応力概念の適用性, 土木学会論文集A, 65, 1, 188-195, 2009.
- (5) 森猛, 鈴木俊光, 大前暢, 村上貴紀, 射越潤一, 有効切欠き応力概念を用いた止端仕上げ面外ガセット溶接継手のルート疲労破壊防止法の検討, 鋼構造論文集, 21, 83, 43-52, 2014.
- (6) Ottersböck, M.J., Leitner, M., Stoschka, M., Impact of angular distortion on the fatigue performance of high-strength steel T-joints in as-welded and high frequency mechanical impact-treated condition, Metals 2018, 8, 302.
- (7) 社団法人日本鋼構造協会, 鋼構造物の疲労設計指針・同解説一付・設計例-[2012年改訂版], 技報堂出版株式会社, 2012.
- (8) Wang, Y., Luo, Y., Tsutsumi, S., Parametric formula for stress concentration factor of fillet weld joints with spline bead profile, Materials 2020, 13, 4639.

インプロセス溶接欠陥検知に向けた溶接画像センシング技術の研究

Study on Welding Image Sensing Technology for In-Process Welding Defects Detection

● 笠野 和輝*
Kazuki KASANO



アーク溶接向け画像センシング技術
Image sensing technology for arc welding

インプロセスでの溶接欠陥検知に向け、アーク近傍の溶接現象観察技術を検証した。本研究では可視～赤外光の波長範囲にかけてアーク光の分光分析を行うとともに、種々のバンドパスフィルタを用いて溶接現象を観察し、アーク光の輝度が低く、かつアーク近傍の溶接現象が明瞭に観察可能な観察条件を検証した。その結果、1300nm近傍の赤外光波長領域の光を選択的に透過するフィルタおよび本波長領域において受光感度を有したセンサを組み合わせることにより、実操業への適用も可能な溶接画像センシング装置でアーク近傍の溶接現象の観察が可能であることを明らかにした。

An observation method for welding phenomena near arc had been verified, which purpose is to establish the technology for detecting welding defect in process in the near future. In this study, arc light which wavelength region is from visible to infrared had been performed spectral analysis, welding phenomena had been observed using variety types of optical band-pass filters, and observation condition was verified, which arc light brightness is lower and in which can be observed welding phenomena more clearly. As a result, welding phenomena near arc could be observed with combination of filter, which transmit infrared light in the wavelength region near 1300nm selectively and sensors, which are sensitive to these wavelength region, even using a welding image sensing device which can be applied to real production lines.

1 まえがき

アーク溶接技術は、素材同士を接合し製品を製造する上で製品品質、能率およびコストに直結するコア技術である。特にアルゴン(Ar)や炭酸ガス(CO₂)をシールドガスに用い、外部から溶接ワイヤを供給しながら溶接を行うガスメタルアーク溶接(GMAW: Gas Metal Arc Welding)は施工能率に優れることから、当社において建設機械、クレーン、フォークリフトおよび船舶といった産業車両の製造に用いられている。GMAWは、ワイヤと母材との間に高温のアークを点弧させることにより、ワイヤおよび母材を溶かして熔融池を形成し、冷却・凝固の過程を経て素材同士を接合する溶接法である。

接合の過程において、溶接部では外部からのガスの巻き込みや素材同士が十分に融合しないことによる溶接欠陥が形成されることがある。こうした溶接欠陥は溶接継手強度の低下や破壊の起点となることから、現状では溶接施工後に検査工程を設け、溶接継手中に欠陥が含まれた製品が出荷されないように管理されている。一方、検査工程において溶接欠陥が検出された場合には、手直しや補修溶接が行われ、製造の能率低下やコスト増加につながる。今後製品品質、能率およびコストパフォーマンスの向上による競争力強化の観点からは、溶接中にインプロセスで溶接欠陥発生を検知し、溶接を停止させて手直しや補修溶接を行う必要性を最小限に抑える「溶接自動化」に向けた技術の開発が望まれている。

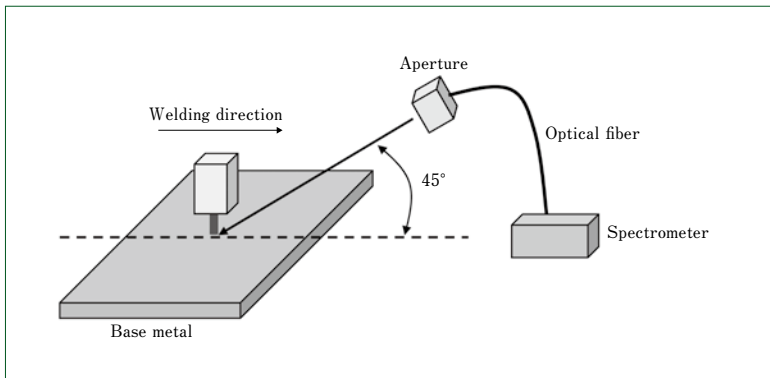


図1 アーク分光分析手法⁽²⁰⁾
Spectroscopic measurement method during welding

表1 アーク分光分析条件⁽²⁰⁾
Spectroscopic measurement conditions

Spectrometer (400-850 nm)	HR4000 (OptoSirius Corporation)
Spectrometer (900-1700 nm)	NIR QUEST (OptoSirius Corporation)
Optical fiber	P400-2-VIS/NIR (OptoSirius Corporation)
Integration time (ms)	100

インプロセスで溶接欠陥の発生を検知する技術の一例として、溶接中の電流・電圧波形を解析する手法^{(1)~(6)}や、溶融池の形状を画像センシング技術によりモニタリングするといった手法^{(7)~(9)}が開発されてきている。こうした技術はインプロセスでの溶接欠陥発生検知が可能であるものの、溶接欠陥発生以外の要因でも変動しやすい溶接中の電流・電圧波形や溶融池形状の変化を欠陥発生検知指標としていることから、検知精度や施工条件が変化した場合の汎用性に課題が残る。

溶接欠陥発生に伴い認められる溶接現象については、その発生メカニズムの観点から種々検討が成されてきており^{(10)~(15)}、溶接欠陥の形成とアークのごく近傍の溶接現象が強く相関することが報告されている。すなわち、こうした溶接欠陥発生と強く相関する溶接現象を検知することが、欠陥検知精度や汎用性に優れたインプロセスでの溶接欠陥検知技術の開発につながると期待される。

アークのごく近傍での溶接現象の観察は、一般的なビデオカメラでは超高輝度なアーク光に阻害され困難である。これまでにアーク光より輝度が高いレーザー光を外部光源として用いる手法が開発され⁽¹⁶⁾広く利用されているものの、レーザー光源の安全性や光学セッティングの煩雑さから実操業での利用には課題が残る。一方、従来アーク光の輝度は紫外~可視光にかけては高輝度であるものの、より長い波長領域である赤外光波長領域では輝度が低下することが報告されている⁽¹⁷⁾。このことから、アーク光の発光特性に基づき、アーク光の発光強度が低い波長領域を選択的に透過するフィルタ、およびこうした波長領域に受光感度を有したセンサを選定することにより、外部光源を用いることなくアークのごく近傍の溶接現象の観察が可能であることが示唆されている。しかし、これまでに赤外光波長領域まで含めて溶接現象観察結果を検証した例はない。

表2 溶接条件⁽²⁰⁾
Welding conditions

Base metal (mm)	SM490A (200×300×12)
Joint type	Bead on plate
Welding wire (Diameter/mm)	YGW-12 (1.2)
Power source	DC nopulse mode
Current (A)	300
Voltage (V)	30
Shielding gas	80%Ar+20%CO ₂
Welding speed (mm/s)	5
Extention (mm)	20

本研究ではこうした背景を踏まえ、溶接欠陥発生と強く相関する溶接現象を検知することにより、インプロセスでの溶接欠陥発生検知技術の実用化につながるアークのごく近傍の溶接現象観察に適した溶接画像センシング方法を確立することを目的とし、可視~赤外光波長領域におけるアーク光の発光特性およびこれらの波長領域における溶接現象の観察結果について検証した。

2 実験方法

2.1 アーク分光分析手法

図1にアーク光の分光分析手法の模式図、表1に分光分析条件を示す。溶接進行方向の前方斜め45°の位置に光学絞りをセットし、光学絞りと分光器を光ファイバで接続して計測した。分光器には紫外~赤外(400~850 nm)および赤外波長範囲(900~1700 nm)に感度を有した2種類の分光器を用いた。分光器の積算時間は計測感度が保証される100msとし、溶接が定常状態になった後に複数回計測し、計測した結果の平均値を算出した。表2に、溶接条件を示す。母材にはSM490A材の平板を用い、ビードオンプレート溶接を行った。溶接ワイヤにはφ1.2mmのYGW-12ワイヤを用いた。溶接電源はパルスなし直流モードとし、シールドガスには80%Ar+20%CO₂ガスを用い、溶滴移行形態がスプレー移行となり、安定した溶接が可能な溶接電流、電圧、速度および突き出し条件とした。

2.2 溶接現象観察方法

図2に溶接現象観察方法の模式図、表3に溶接現象観察条件を示す。アークのごく近傍の溶接現象を観察することを目的として、カメラは溶接進行方向の前方方向45°の角度で設置し、アーク点弧部をのぞき込むようにした。カメラには可視光領域を中心に感度を有したCMOSセンサを搭載したもの

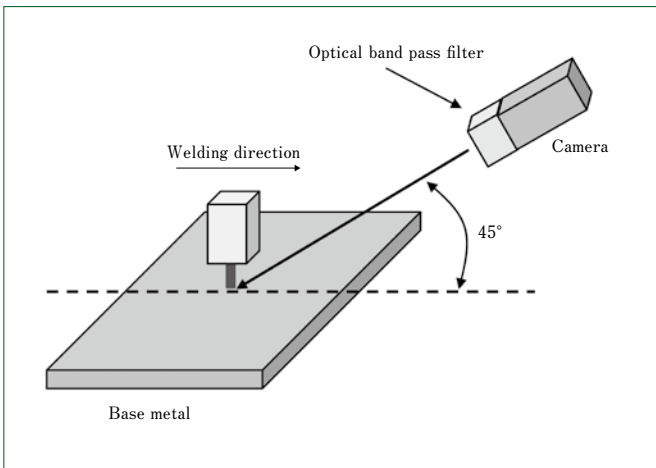


図2 溶接現象観察方法⁽²⁰⁾
Observation method of arc welding phenomena

表3 溶接現象観察条件⁽²⁰⁾
Observation conditions of welding phenomena

CMOS camera	acA2040-90 μm (Basler AG)
InGaAs camera	Bobcat320 (Xenics NV.)
Framerate (Hz)	100
Exposure time (μs)	5-10000
Transmission wavelength of optical band pass filter for CMOS camera (nm)	785
Transmission wavelength of optical band pass filter for InGaAs camera (nm)	1100, 1320
Full width at half maximum (nm)	10
Neutral density filter	ND8

と、赤外光領域を中心に感度を有したInGaAsセンサを搭載したカメラの2種類を用いた。いずれのカメラでの観察でも外部光源は用いずに溶接現象を観察した。本実験では各種波長域における溶接現象を観察すべく、それぞれのカメラに装着したレンズの先端部に、種々の中心透過波長を有する半値幅10nmの光学バンドパスフィルタ(BPF: Band Pass Filter)を取り付けた。カメラのフレームレートはともに100Hzとし、アークや溶融池の挙動を観察した。各BPFを取り付けた状態で溶接を観察し、1本の溶接ビードを溶接するなかで溶接定常部においてカメラの露光時間(E.T.: Exposure Time)を種々変更し、アークや溶融池部分の輝度が異なる状態の映像を得た。溶接条件は、アーク光分光分析時と同様の表2に示す条件とした。

3 実験結果

3.1 アーク光分光分析結果

図3に、400~850nmの波長範囲におけるアーク光分光分析結果を示す。400~650nmの波長範囲において複数の発光ピークが認められた。一方、650~850nmの波長範囲においても発光ピークは複数認められたものの、発光強度は400~650nmの波長範囲に比べると低下した。

図4に、図3より長波長側である900~1700nmの波長範囲におけるアーク光分光分析結果を示す。850nm以上ではアーク光の発光強度が400~650nm付近に比べると相対的に低下し、発光ピークもほとんど認められなかったが、900~1700nmの波長範囲のみを分光分析した結果、本波長範囲においてもアーク光の発光ピークが多数認められた。一方、1100nm付近と1300nm付近において局所的にアークの発光ピークが認められない波長範囲が存在した。

3.2 溶接現象観察結果

400~850nmのアーク光分光分析結果(図3)において、アーク光の発光強度が低下し、発光ピークがほとんど認められなかった785nmの波長の光を透過するBPFをCMOSカメラに取り付け、種々のE.T.で溶接現象を観察した結果を図5に示す。E.T.が50μsではワイヤ先端部(Wire)、ワイヤが溶融し形成された溶滴(Droplet)、ワイヤおよび母材が溶融して形

成された溶融池(Moltenpool)のうち、アークのごく近傍のみが観察された。露光時間を50μsから100μsに増加させると、アーク光によるハレーションを起こした範囲(Arc)が増加し、アークのごく近傍の溶接現象の観察が困難になった。さらにE.T.を増加させると、ほぼアーク光によりハレーションを起こした箇所のみが観察された。

400~850nmに比べアーク光の発光強度が低下する900~1700nmの波長範囲において、アーク光の発光ピークが認められなかった1100nm、1320nmの波長の光を透過するBPFをInGaAsカメラに取り付け、種々のE.T.で溶接現象を観察した結果を図6および図7に示す。1100nmの波長の光を透過するBPFを用いた場合、E.T.が100μsではワイヤ、溶滴および溶融池のうちアークのごく近傍のみが観察された。露光時間を100μsから200μsに増加させると、アーク光によりハレーションを起こした範囲が増加したものの、E.T.が100μsの場合と同様にワイヤ、溶滴および溶融池部の現象が観察可能であった。また、溶融池部については、アークのごく近傍以外のより広い範囲まで観察可能であった。露光時間をさらに増加させると、アーク光によりハレーションを起こした範囲が増加し、アークのごく近傍の溶接現象の観察が困難となった。1320nmの波長の光を選択的に透過するBPFを用いた場合では、1100nmとほぼ同様の傾向であったものの、E.T.が200μsのときに溶融池部分の輝度が1100nmの場合と比べると高く、より明瞭に溶接現象の観察が可能であった。これらのことから、400~850nmの波長範囲に比べアーク光の発光強度が相対的に低下する900~1700nmの波長範囲において、アーク光の発光ピークが認められない波長の光を選択的に透過するBPFを用いることにより、アークのごく近傍の溶接現象を明瞭に観察できることが分かった。加えて、本実験では特に1300nm付近の光を選択的に透過するBPFを用いることにより、最も明瞭にアーク近傍の溶接現象を観察できることが確認された。

4 考察

本実験のアーク光の分光分析結果において、種々の発光ピークが認められた。アーク溶接では、アークプラズマ中に含

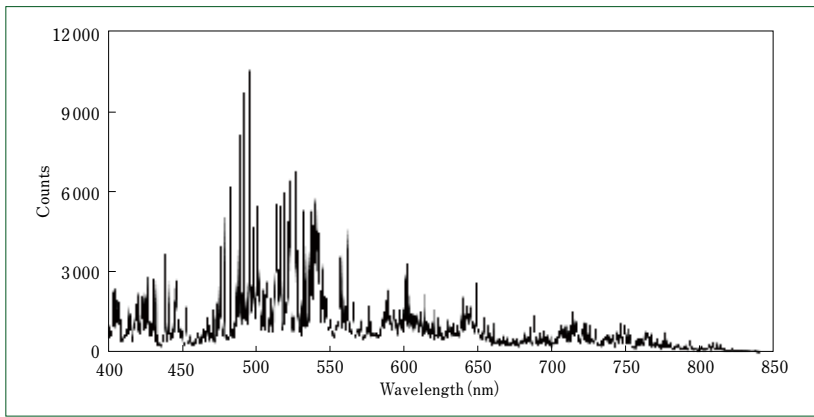


図3 アーク光の分光分析結果(400~850nm)⁽²⁰⁾
Spectroscopic measurement result of arc light in 400-850 nm wavelength

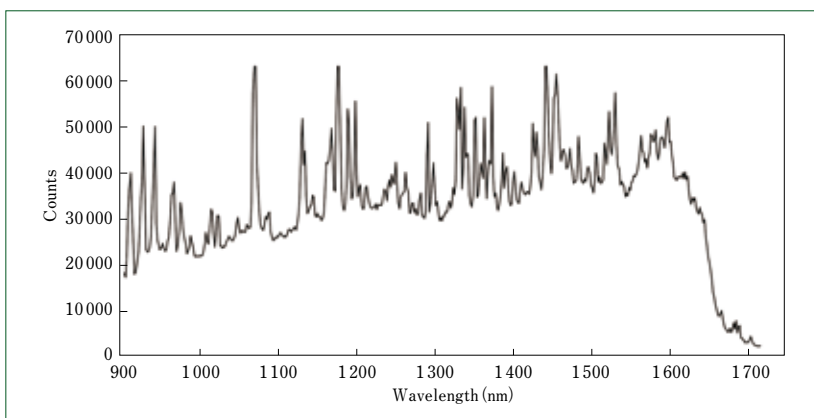


図4 アーク光の分光分析結果(900~1700nm)⁽²⁰⁾
Spectroscopic measurement result of arc light in 900-1700 nm wavelength

まれる元素やイオンが超高温環境下において、電子のエネルギー準位の変化に伴う離散的な発光ピークが認められることが報告されている⁽¹⁸⁾。本実験で認められた発光ピークを、米国標準技術研究所(NIST)が提供する原子発光スペクトルデータベース(ASD: Atomic Spectra Database)⁽¹⁹⁾より同定すると、主に鉄(Fe)、アルゴン(Ar)、炭素(C)および酸素(O)の発光ピークによるものと同定される⁽²⁰⁾。これは、これまでにアーク溶接中の分光計測⁽²¹⁾およびアークプラズマシミュレーション⁽²²⁾⁽²³⁾による検証結果で報告されているように、アークプラズマ中においてワイヤや母材成分であるFeの蒸気が存在することや、アークプラズマの外縁部にArやOといったシールドガス成分が存在することが要因と考えられる。すなわち、こうした元素の発光ピークが存在しない波長範囲に中心透過波長を有したBPFを選定することにより、溶接現象を観察するうえで妨げとなるアーク光の輝度を低下させることが可能になると考えられる。

一方、発光ピークが存在しない波長範囲に中心透過波長を有したBPFを選定した場合でも、観察結果においてアーク光によりハレーションを起こした部分や、溶融池部分の見え方に差異が認められた。これは発光ピークが存在しないことによるアーク光の輝度低下だけでなく、アークのごく近傍に存在する溶融池部分の発光強度に起因するものと考えられる。

溶融池部分の発光特性は、溶融池表面温度に起因する熱放射エネルギーに基づき導出される。アーク近傍の溶融池温度は、アーク消弧直後の溶融池温度計測結果⁽²⁴⁾から2000~2300 K程度と報告されている。図8に、Planckの放射則に基づき種々の温度での放射エネルギーを算出した結果を示す。放射エネルギーは温度が高くなるにつれ最大値が増加し、さらに最大値を示す波長が短波長側にシフトする。従来報告されている溶融池温度に近い温度である2223 Kや2073 Kでは、放射エネルギーは約800~900 nm以上の波長範囲で急激に増加し始め、1300 nm付近で最大値を示す。すなわち、アークのごく近傍の溶融池は1300 nm付近の波長の放射エネルギーが最大であり、最も発光輝度が高いと考えられる。このことが、本実験において1300 nm付近のBPFを用いたときに溶融池部まで含めて明瞭に溶接現象を観察できた要因であると考えられる。

実験と考察を重ね、アーク光の発光ピークが存在しない波長範囲、かつ溶融池の発光輝度が最大となるような波長範囲のBPFを選定するとともに、こうした波長領域に受光感度を有したセンサ搭載のカメラを組み合わせることにより、外部光源を使用せずにアークのごく近傍の溶接現象の観察が可能であることが検証できた。本研究での成果により、実作業において溶接欠陥発生と強く関連する溶接現象の観察が容易に

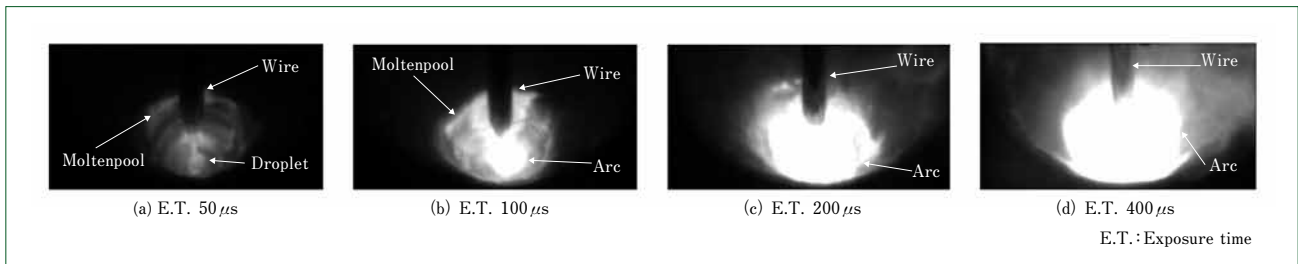


図5 溶接現象観察結果 (CMOSカメラ+中心透過波長785nmバンドパスフィルタ)
Observation results using CMOS camera and optical band pass filter with transmission wavelength of 785nm

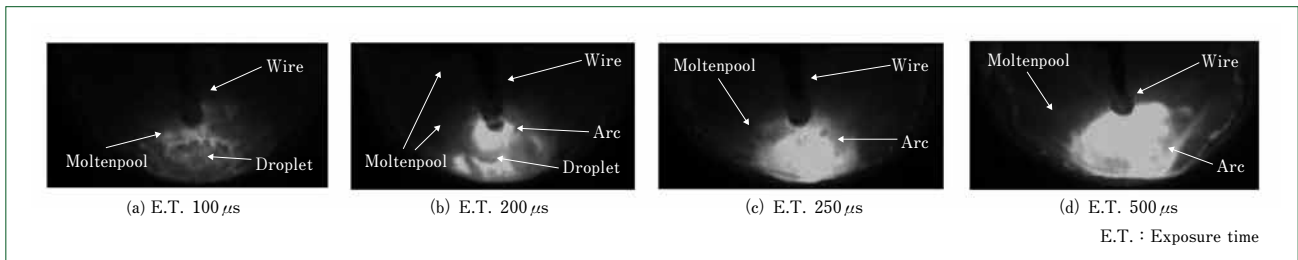


図6 溶接現象観察結果 (InGaAsカメラ+中心透過波長1100nmバンドパスフィルタ)
Observation results using InGaAs camera and optical band pass filter with transmission wavelength of 1100nm

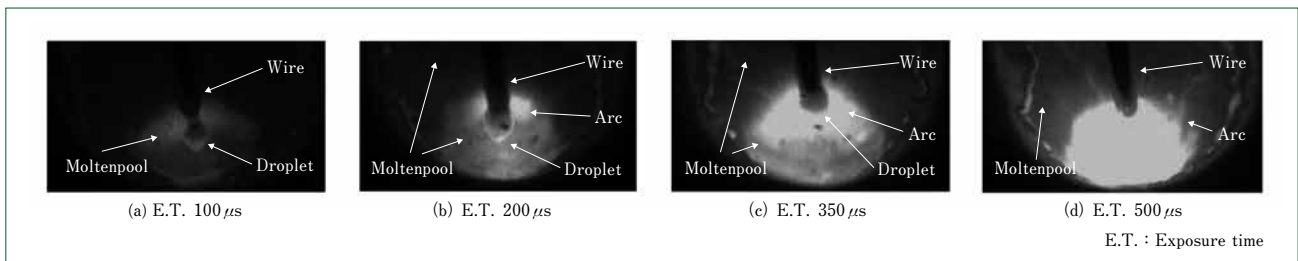


図7 溶接現象観察結果 (InGaAsカメラ+中心透過波長1320nmバンドパスフィルタ)⁽²⁰⁾
Observation results using InGaAs camera and optical band pass filter with transmission wavelength of 1320nm

なり、今後インプロセスでの溶接欠陥発生検知技術の実用化につながると考えられる。

5 むすび

本研究で得られた知見を次に示す。

- (1) アーク光の発光特性を紫外～赤外光波長領域にかけて分光分析により検証した結果、赤外光波長領域では発光輝度が紫外～可視光に比べ低下する傾向を確認した。
- (2) アーク光の輝度が低下した赤外光波長領域においてもアーク光には多数の発光ピークが認められたものの、本実験では1100nmや1300nm近傍といった波長領域において発光ピークが認められないことを確認した。
- (3) アーク光の発光ピークが認められない波長領域の光を選択的に透過するフィルタと、本波長領域に受光感度を有するセンサを組み合わせることで溶接現象を観察した結果、特に1300nm付近の波長領域を選択することにより、アークのごく近傍の溶接現象を明瞭に観察できることを確認した。

(参考文献)

- (1) S.ADOLFSSON, A.BAHRAMI, G.BOLMSJO and I.CLAESSON, On-Line Quality Monitoring in Short-Circuit Gas Metal Arc Welding, WELDING JOURNAL-NEW YORK- 78 (1999), 59-s.
- (2) Y.X.CHU, S.J.HU, W.K.HOU, P.C.WANG and S.P.MARIN, Signature Analysis for Quality Monitoring in Short-Circuit GMAW, Welding Journal 83.12 (2004), 336s-343s.
- (3) T.P.QUINN, C.SMITH, C.N.McCOWAN, E.BLACHOWIAK and R.B.MADIGAN, Arc Sensing for Defects in Constant-Voltage Gas Metal Arc Welding, Welding Journal-78 (1999), 322-328.
- (4) Zhifen Zhang, Xizhang Chen, Huabin Chen, Jiyong Zhong, Shanben Chen, Online welding quality monitoring based on feature extraction of arc voltage signal, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.70 (2014), 1661-1671.
- (5) C.S.Wu, T.POLTE and D.REHFELDT, A Fuzzy Logic System for Process Monitoring and Quality Evaluation in GMAW, Welding Journal, Vol.80 (2001), No.2, 33-38.
- (6) Seungmin Shin, Min Seok Kim, Sehun Rhee, Prediction of weld porosity (pit) in gas metal arc welds, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.104 (2019), 1109-1120.
- (7) YAMANE.S, OHSHIMA.K, Sensing and Control by Fuzzy Neural Network in GMA Welding, Preprints of the National Meeting of The Japan Welding Society, Vol.66 (2000), F37-42.
- (8) Takanashi Taro, Yamane Satoshi, Nakazima Toru, Yamamoto

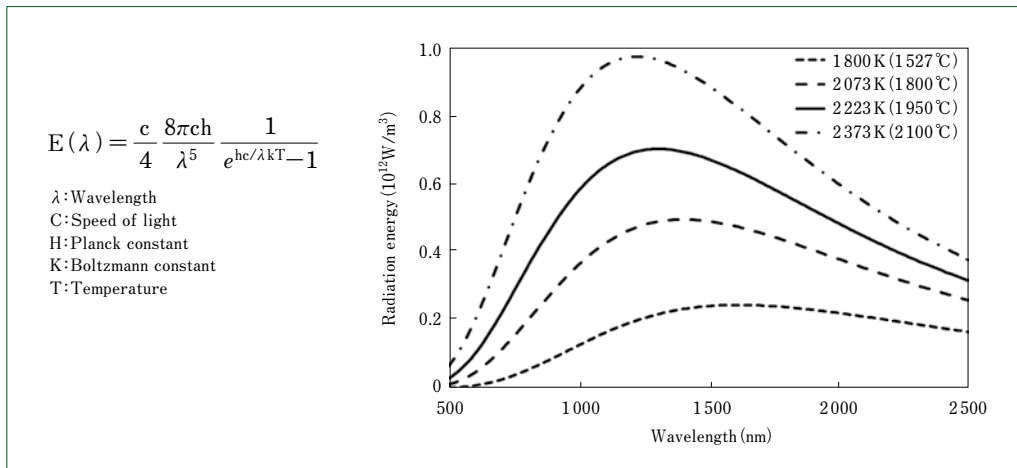


図8 プランクの放射則によるアーク近傍溶融池表面の放射エネルギー計算結果⁽²⁰⁾
Calculation results of radiation energy of molten pool just under arc with Planck's law

- Hikaru, Application of Visual Sensor to Plasma Arc Welding System, Preprints of the National Meeting of The Japan Welding Society, 2010f.
- (9) YAMANE Satoshi, YUZAWA Hiroki, KANEKO Yasuyoshi, YAMAMOTO Hikaru, HIRAKAWA Manabu and OHSHIMA Kenji, Image Processing and Control of Weld pool in Switch Back Welding without Backing Plate, Welding International, Vol.19 (2005), No.11, 856-861.
- (10) YAMAZAKI Kei, IZUTANI Shun, YANAGI Keiichiro, SUZUKI Reiichi, NAKAMURA Kazuki, UEDA Yuji, UEZONO Toshiro, TASHIRO Shinichi, TANAKA Manabu, Blowholes generate phenomenon in GMAW of galvanized steel sheet, Preprints of the National Meeting of The Japan Welding Society, Vol.90 (2012), 90-91.
- (11) IZUTANI Shun, YANAGI Keiichiro, YAMAZAKI Kei, SUZUKI Reiichi, NAKAMURA Kazuki, UEDA Yuji, UEZONO Toshiro, Blowholes reduction in GMAW of galvanized steel sheet, Preprints of the National Meeting of The Japan Welding Society, Vol.91 (2012), 396-397.
- (12) YUAN Yimin, Development of Hybrid Tandem GMAW Process, Journal of The Japan Welding Society, Vol.86 (2017), 90-94.
- (13) IZUTANI Shun, YAMAZAKI Kei, SUZUKI Reiichi, UEDA Yuji, NAKAMURA Kazuki, UEZONO Toshiro, Blowhole Generation Phenomenon and Quality Improvement in GMAW of Galvanized Steel Sheet, International Journal of Automation Technology, Vol.7, No.1 (2013), 103-104.
- (14) Shoko Tsuchiya, Yoshinari Ishida, Shinji Kodama, Yasunobu Miyazaki, decreasing porosities and improvement of fatigue properties on arc welding for galvanized high strength steel sheet, Preprints of the National Meeting of The Japan Welding Society, Vol.92 (2013), 34-35.
- (15) Nobuyuki Yamauchi, Yoji Inaba, and Takao Taka, Formation Mechanism of Lack of Fusion in MAG Welding, Journal of The Japan Welding Society, Vol.51 (1982), No.10, 843-849.
- (16) AKICHIKA Akira, The Visualization of Arc Welding Phenomenon using Laser Illumination, Journal of The Japan Welding Society, Vol.83 (2014), No.8, 598-601.
- (17) Omae, Wada, Manabe, Inoue, アーク光及び溶融池光の特性解析に関する研究(Only in Japanese Title), Preprints of the National Meeting of The Japan Welding Society, Vol.34 (1984), 66-67.
- (18) Yoji OGAWA, Imaging Analysis of Welding Phenomena, Journal of High Temperature Society, Vol.37 (2011), No.3, 99-107.
- (19) NIST Standard Reference Database 78 "Atomic Spectra Database" (<https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>).
- (20) Kazuki KASANO, Yosuke OGINO, Satoshi FUKUMOTO, Satoru ASAI, Study on welding phenomena observation method based on arc and molten pool light emission characteristics in visible and infrared wavelength region, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, Vol.38 (2020), No.2, 103-113.
- (21) TODA Kaname, NOMURA Kazufumi, MIMURA Kouhei, ASAI Satoru, Study of 3D temperature measurement of arc plasma in MAG welding, Preprints of the National Meeting of The Japan Welding Society, Vol.101 (2017), 368-369.
- (22) TSUJIMURA Yoshihiro, TANAKA Manabu, Numerical Simulation of heat source property with metal vapor behavior in GMA Welding, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, Vol.30 (2012), No.1, 68-76.
- (23) OGINO Yosuke, HIRTA Yoshinori, Numerical simulation of GMA metal transfer phenomena including arc plasma, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, Vol.33 (2015), No.1, 1-12.
- (24) YAMAZAKI Kei, YAMAMOTO Eri, SUZUKI Keiichi, KOSHIISHI Fusaki, MIYAZAKO Shigeru, TASHIRO Shinichi, TANAKA Manabu, NAKATA Kazuhiro, The Surface Temperature Measurement of Weld Pool by Infrared Two-Color Pyrometry, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, Vol.27 (2009), No.1, 34-40.

衝突軽減システム搭載お知らせ機能付き周囲監視装置 FVM2+

FVM2+, Construction Machinery Surrounding Monitoring Device Equipped with System of Reducing Impact of Collision and Function of Notification

● 泉川 岳哉*
Takeya IZUMIKAWA

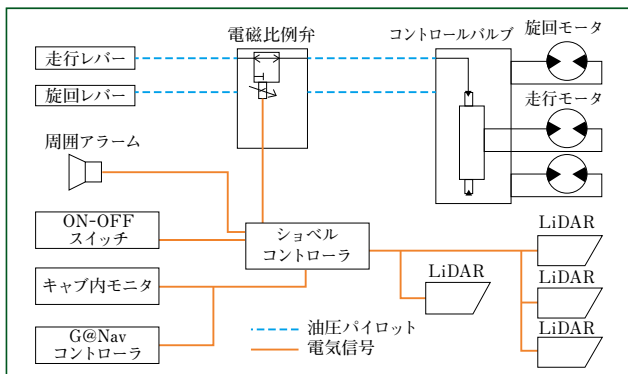


図1 FVM2+のシステム構成図
System configuration flow of FVM2+

1 はじめに

建設業の死亡事故は全産業のなかでも依然として多く、とりわけ建設機械に起因する事故が多く発生している。国土交通省の進めているi-Constructionにより機械周囲の作業者が減少したことで安全性が向上していると推定されるが、ICT建設機械のオペレータを対象にしたアンケートでは、ICT施工特有のリスクも挙げられている。具体的な事例として、マシンガイダンスのモニタのみを注視することによる周囲への目配りの減少や、機械周囲の作業者が少なくなった反面、安全確認が十分でなくなったことによるヒヤリハットなどがある。このことからICT施工の推進と併せて、機械自体の安全性の向上を図ることが必要と考えられる。住友建機株式会社では、この課題を解決すべく衝突軽減システム搭載お知らせ機能付き周囲確認装置FVM2+を開発した。

住友建機では、安全な建設現場を実現すべく2011年に3台の車載カメラの画像を合成してワイドな後方視界を俯瞰画像によりひと目でカバーするFVMを、2017年にはそれらの画像を解析して機械周辺の人の形を認識し、人がいると判断した場合には、モニタ画面への表示とお知らせアラームでオペレータに注意を促すFVM2を市場に投入してオペレータの安全確認サポートにいち早く取り組んできた。今回、機械周囲の「人の安全」に着目し、機械を自動で減速・停止することで油圧ショベルの接触事故リスクのさらなる低減に貢献するFVM2+(フィールドビューモニター2プラス)を20tクラス標準機SH200-7用に開発した。本報では、このシステムについて紹介する。

2 システムの概要

本システムは、3Dセンサを活用した反射物検知方式により、危険エリア内にいる安全ベストを着用した人を検知し、機械の走行および旋回を自動で減速・停止させることで衝突被害の軽減を図る装置である。安全ベストを着た人を反射物



図2 人検知機能
Human detection function

検知方式で高精度に検知する一方、建築現場に存在する盛土などに対しては作動しないことから安全性と作業効率を両立させた。作動範囲は機械の後方周囲270°のワイドエリアに対応し、作動状況はモニタで確認できるだけでなく外部アラームで周囲の作業者に警告することも可能である。

図1に、FVM2+のシステム構成図を示す。3Dセンサ(LiDAR)からの反射物検知情報をシヨベルコントローラで処理し、走行・旋回パイロット圧力を制御することで、走行・旋回動作を減速・停止させる。同時にモニタおよび周囲アラームを制御し、警報を発する。検知情報はG@Navコントローラにより稼働管理システムに送られ、遠隔地でもウェブ画面上で作動状況を確認することができる。

3 FVM2+の特徴

(1) 人検知機能

本システムでは、LiDARによる反射物検知方式で安全ベストを着た人を高精度に検知している。LiDARは、一般的に埃や雨があるとそれらを物体として検知してしまう。埃の多い建設現場では、埃を検知して機械が止まってしまうと作業効率が著しく低下してしまうので好ましくない。そこで、LiDARが検出した位置情報と併せて反射強度情報を用いることで反射物のみを検知しており、反射強度の低い埃を検知することはない。また、安全ベストを着用していれば作業者が屈んでいても姿勢に関係なく検知が可能である(図2)。ただし、反射板付きのカラーコーンなどに反応して停止することがないよう、高さ60cm未満の反射物は検知しないので倒れている作業者を検知することはできない。同様に大きな荷物を抱えていてセンサが反射ベストを捉えにくい状態であったり、安全ベストの種類や劣化により反射率が低下していると検知されない場合がある。安全ベストは一般に販売されている物で検知可能であるが、丈が長く全体に反射ラベルが付いた反射強度が強い物を推奨している。



図3 走行・旋回時の減速・停止制御のイメージ
Image of control for reducing speed and stop on moving and turning

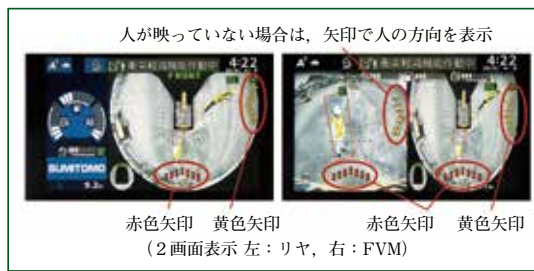


図5 モニタ表示例
Examples of displaying on monitor



図4 周囲アラーム
Alarm to surrounding construction machinery



図6 G@Nav表示例
Examples of displaying on G@Nav

LiDARは変調赤外線照射方式で外乱光に強く、夏の直射日光の下でも冬の西日が差し込む状況でも、また暗がりでも反射物を検知することができる。

人の検知範囲は機械の後方周囲270°としており、オペレータがモニタのFVM画面上で視認可能なエリアと同一としている。これによりオペレータはシステムの作動範囲を容易に判断することができる。また、ショベルが下部走行体に対し上部旋回体を90°旋回させて横方向に走行しているときも後進時と同様に検知範囲としている。

(2) 衝突軽減機能

安全ベストを着た人を検知すると、機械の走行および旋回を自動で減速・停止させ、急停止によるオペレータへの負担や衝突被害の軽減を図る(図3)。機械が停止した状態で検知した場合は、走行・旋回の起動を停止させる。減速・停止制御が作動すると、周囲に人がいなくなっても制御を継続させるが、オペレータが操作レバーを中立にすることで安全確認が行われたとシステムが判断すると制御は解除される。これにより、人がいなくなった途端に機械が動き出す危険を防ぐと同時に、操作レバーから手を離すことなく作業を再開でき、安全性と作業効率を両立させている。旋回の減速・停止制御は衝突する方向でのみ行われ、回避する方向には運転操作が可能である。

走行と左右旋回の減速・停止範囲は個別に設定されており、走行で衝突するリスクがあっても旋回で衝突するリスクがない場合は、走行にのみ減速・停止制御が行われる。走行・旋回以外のアタッチメントについては制御が行われないので、アタッチメントが急停止するようなリスクは生じない。人の検知および制御のフレームレートは約50Hzとなっており、制御のパラツキを最小限に抑えている。

(3) 警報機能

人を検知し衝突軽減機能が作動すると、オペレータにモニタ上で警告すると同時に、周囲の作業にも外部

アラームで警報を発する(図4)。これにより作業者が衝突のリスクを回避し、その場から退避するなどの行動を起こすことができる。外部アラームは夜間工事などで騒音に配慮する必要がある場合はOFFとし、キャブ内のみアラームに切り替えることができる。モニタには実際のカメラ画像に検知した人の方向が矢印で表示され、周囲の状況をひと目で確認できるようになっている(図5)。矢印は検知した人との距離に応じ2段階(遠方の減速エリアでは黄色、より近くの停止エリアでは赤色)で表示される。これらの警報や停止制御はゲートロックの状態やレバーの操作状況に関係なく常に行われるので、人の検知状況を作業開始前からオペレータと周囲の作業者に知らせることが可能となり、安全性が向上する。

FVM2+の作動状況はリアルタイムで稼働管理システムG@Navに送信され、事務所などの遠隔地からもウェブ画面上で確認することが可能である。FVM2+が作動した場所を地図上に表示するなど、危険発生リスクを見える化することで、現場における安全対策に活用することができる(図6)。

4 おわりに

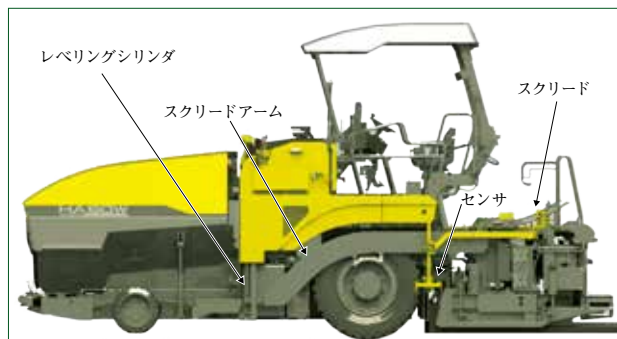
安全性だけでなく作業効率も考慮し、現場責任者やオペレータが使いたいと思う安全装置を目指し、衝突軽減システムの開発を進めてきた。しかしながら現場の安全は本システムのみでは実現されず、現場全体の安全管理およびオペレータの安全操作が前提であり、さらに万が一のときに安全をサポートする装置などにより実現することができる。すでに自動車業界ではより高度な安全技術が開発されており、建設機械においても機械や現場の特性に合った安全装置の開発が求められる。今後もさらなる安全性の向上を目指して新たな技術開発を進めていきたい。

※「FVM」は、住友重機械工業株式会社の登録商標です。
「G@Nav」は、住友建機株式会社の登録商標です。

アスファルトフィニッシャの自動制御

Automatic Control for Asphalt Finisher

● 寺元 陶太* 伊藤 匠**
Touta TERAMOTO Takumi ITOH



アスファルトフィニッシャの外観
Asphalt finisher

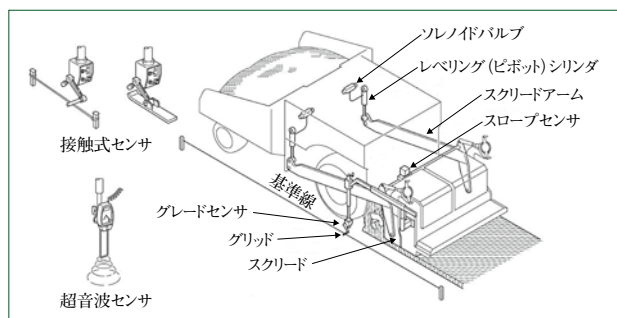


図1 AGC装置
AGC device

1 はじめに

アスファルトフィニッシャにおけるMC (Machine Control) の歴史は古く、住友建機株式会社では40年以上前から2D-MCに対応した機械を生産している。

本報では、アスファルトフィニッシャのMCについて現在どのような技術が用いられているか、そして今後、住友建機としてどのように対応していくかについて述べる。

2 アスファルトフィニッシャにおける2D-MC

アスファルトフィニッシャにおける2D-MCとは、AGC (Auto Grade Control) 装置と呼ばれるもので、基準との距離をスクリードもしくはスクリードアームに取り付けられたセンサで測定し、舗装厚を変化させるレベリングシリンダに指令を出してスクリードの高さが一定になるように舗装厚を調整するシステムのことである(図1)。

当初は基準面やワイヤロープ上を直接滑らせて高さの変化を測定する接触式センサが主流であったが、後に超音波を使用して基準までの距離を測定する非接触式センサが開発され、現在では広く使用されるようになった。最近では複数の超音波センサを装備した非接触式センサも開発され、さらなる精度向上を図っている。また、左右のスクリードアームをつないだビーム上の角度センサで横断方向の角度変化を測定する



図2 複数センサ使用状況
Usages of plurality of sensors

スロープセンサを使用し、勾配を制御する場合もある。

これらの制御では、センサやコントローラが発する電気信号を受けてレベリングシリンダを上下する必要があるが、現在ほとんどのアスファルトフィニッシャには電磁ソレノイドバルブでレベリングシリンダを上下するシステムが採用されており、その信号を受けることができるようになっている。

3 2D-MCの問題点

AGC装置の制御方法には、既設路面や構造物のような基準面、もしくはあらかじめ敷設したロープやワイヤなどによる丁張りを測定して舗装面高さを一定に保とうとする高さ制御と、路盤(施工前の路面)からの高さを測定して舗装厚を一定に保とうとする厚み制御がある。高い平坦性を得やすいのは高さ制御であるが、事前の準備が煩雑であったり、場合によっては丁張りが設置できない現場もある。路盤を基準とする厚み制御では事前の準備は容易であるが、路盤の平坦性が舗装面の平坦性に影響を与えることになる。

このようなことから、路盤を基準としつつも一定の平坦性を得る方法として、路盤上に長いスキーを滑らせて細かい凹凸をキャンセルする方法や、複数のセンサを用いて平均化する方法(図2)なども開発されている。

4 情報化施工への取組み

近年、建設施工が直面する生産性や安全性の向上、品質確保、熟練技術者不足といった多くの課題に対応することを目的に、ICT(情報通信技術)を用いた情報化施工技術の導入など、i-Constructionへの取組みが国土交通省主導で進められている。

アスファルトフィニッシャにおいてもi-Constructionへの対応として、2D-MCを発展させた3D-MC装置が各機器メーカーにより開発され、すでに広く使用されている(図3)。

5 アスファルトフィニッシャにおける3D-MC

アスファルトフィニッシャにおける3D-MCとは、アスファルトフィニッシャのスクリード、またはスクリードアーム



図3 3D-MC機器装着状態
3D-MC device mounting state

に設置された計測装置の現在位置座標を計測し、その座標から算出した現舗装高さデータと施工箇所の3D設計データの差分に基づき、左右のレベリングシリンダに指令を出して所定の舗装高さとなるよう自動制御するシステムである。

位置の計測には、自動追尾式TS(Total Station)方式もしくはGNSS(汎全地測位航法衛星システム)方式を用いる。TS方式では、機械に設置したプリズムを自動追尾式TSで追尾し、位置情報と高さ情報を同時に高い精度で計測する。一方、GNSS方式では、複数の衛星電波を受信することで位置情報を取得し、基地局と機械に設置された移動局との間で無線通信により誤差を補正するRTK-GNSS方式を用いて高い位置計測精度を実現している。

しかし、RTK-GNSS方式においても高さ精度はcm単位での計測が限度であり、mm単位の精度が求められる舗装工事では実用性に疑問がある。そこで、別途設置したゾーンレーザによりmm単位の高さ計測を行っている。

前述の通り、アスファルトフィニッシャには電磁ソレノイドバルブでレベリングシリンダを上下する機構が採用されており、いずれの方式においても既存の2D-MC用コネクタに接続するだけで使用可能となっている。

6 3D-MCの特長

- ① 計測されたアスファルトフィニッシャの位置および姿勢に合わせて舗装高さ調整が自動化されることで作業の容易化が図れる。
- ② 連続した3D設計データを基準として使用することにより、丁張り設置などの事前準備が不要で熟練技術も要さず、より精度の高い舗装が実現できる。
- ③ 特に野球場やグラウンドといった広く複雑な勾配がある現場で効果を発揮する。
- ④ 出来形管理にも活用でき、設計データと施工結果の比較も施工の場で容易に行うことが可能で、施工結果をデータとして残すことができ、より高度な施工管理が可能となる。

7 3D-MCの課題と今後の展開

各機器メーカーから現在発売されているアスファルトフィニッシャの3D-MC装置は舗装厚(高さ)のみを制御するもの

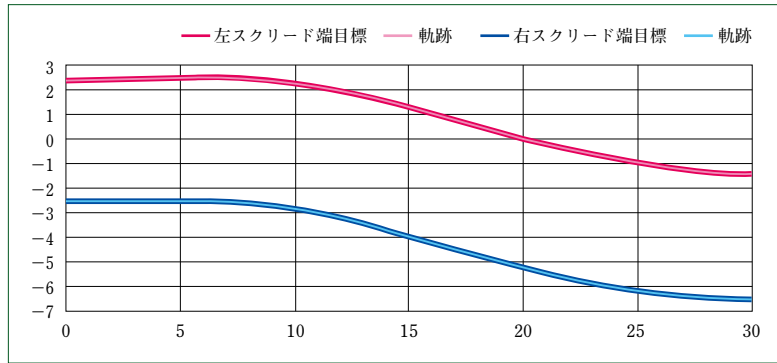


図4 自動追従制御システム試験結果
Evaluation test result for automatic tracking control system

となっており、せっかく作成された3D設計データを十分に活用できていない。3D設計データの情報を各装置の自動化などへ拡張させ、作業の安全性向上とともに効率化および利便化を図ることが課題としてあげられる。

住友建機では、アスファルトフィニッシャのICT技術を用いた応用課題として3D設計データの活用、各種センサを使用した車両制御、施工情報管理に取り組んでいる。

8 操舵・スクリード自動追従制御システム

現在、作業の安全性向上、容易化および省人化を目的として、操舵とスクリード幅を自動で制御する取り組みにも着手している。その操舵・スクリード自動追従制御システムについて紹介する。

本システムは、舗装高さの自動制御システムでも使用する自動追尾式TSとスクリード伸縮センサを用いて自車両の位置、姿勢角度、スクリード位置を演算し、施工面の3D設計データとの差分に基づいた操舵およびスクリードの指令信号により、望んだ舗装幅になるように自動制御するシステムである。

このシステムを組み込んだ原理実証試験機を用いて、スクリードを空中に浮かせた状態での原理実証評価試験を実施した。図4に、結果を示す。評価試験では施工延長を30m、起点から終点にかけての施工幅員を5m、高速道路のランプを想定した曲率半径を40mに設定した。

試験結果から、目標設計データにスクリード端部がおおむね追従していることが分かる。評価試験はアスファルトを用いてはいたが本制御システムの有効性を示すことができた。今後、精度向上および機能面を拡充する予定である。

なお、本自動制御システムは住友建機グループで推進しているMBD(Model Based Development)手法に基づいて開発を進めており、上市の早期実現に貢献できると期待される。

9 おわりに

- (1) アスファルトフィニッシャでは40年以上前から一部制御に2D-MCの技術が使用されている。
- (2) 近年では高精度化、熟練技術者不足への対策として3D-MCの利用が増えている。
- (3) 今後のICT技術活用の一部として、住友建機のアスファルトフィニッシャ自動化への取り組みを紹介した。

さまざまな作業に対応できる小型クローラークレーン SCX550-3

Development of SCX550-3 Small Crawler Crane

●越 達 夫*
Tatsuo KOSHI



**SCX
550-3**

SCX550-3 (左)と従来機 SCX550(右)
New model, SCX550-3(left) and conventional model, SCX550(right)

1 はじめに

本機の前モデルであるSCX550は1994年に発売され、以後改良を重ねながら20年以上にわたり国内外で販売してきた。しかし、近年は各地域の排ガス規制への対応や安全性、輸送性および快適性を向上させることを目的としたモデルチェンジが強く求められるようになってきた。そこで、従来機の優れた基本性能はそのままに、SCX-3シリーズ共通のコンセプトである「安心」をキーワードにライフサイクルコストのミニマム化を目指した新型クローラークレーンSCX550-3を2019年7月1日に発売した。

2 SCX550-3の特長

表1に、SCX550-3の仕様を示す。

2.1 輸送性の向上

(1) 輸送幅

従来機に対して上部旋回体幅とカーボディ幅を縮小し、輸送幅を輸送用トレーラ幅の一つである3200mmとした。このクラスの機械は狭隘地での作業に使用されることも多く、後端半径が小さいことが求められる。輸送幅の縮小は後端半径の拡大につながる要因となるが、本機では輸送幅を3200mmとしながらも後端半径は従来機と同等の3850mmとコンパクトに収めた(図1)。

(2) カウンタウエイト

カウンタウエイトは、輸送時や保管時の取扱い性を向上させるべく、従来機の3列縦型タイプから3段横積みタイプとした(図2)。それぞれのカウンタウエイトを平置きできる形状とすることで、輸送時や保管時にカウンタウエイトを横倒しにする作業がなくなり、取扱い性や安全性の向上および組立て時間の短縮につなげた。最下段となるベースウエイトとその上の2段目ウエイトを逆積みが可能となる構造とすることで利便性を向上させた。また、カウンタウエイト減少仕様をオプション設定し、機械総重量や接地圧に制限がある現場にも対応可能とした。

2.2 さまざまな用途への対応

(1) ウインチ

従来機はクレーン作業から重掘削作業まで幅広い用途で使用されており、各作業で高い評価を得ている。本機においてもその汎用性の高さを踏襲した。特にドラグラインやクラムシェルといった掘削作業では、2段目ウエイト性能が重視される。従来機を長年使用しているオペレータでも違和感なく安心して操作できるように、ウインチは実績と信頼のある減速機内蔵型フリーフォール機能付きウインチ(図3)を標準装備とした。近年のドラムブレーキは湿式多板式が主流となりつつあるが、本機は小型機ならではの汎用性を考慮し、各種作業に合わせてブレーキ調整がしやすいバンドブレーキ式を採用した。さらにライニングの材質を変更することで、操作フィー

表1 SCX550-3仕様
Specification of SCX550-3

		単位	クレーン仕様	クラムシェル仕様
最大つり上げ荷重×作業半径		t×m	55×3.7	—
基本ブーム長さ		m	10	10
最長ブーム長さ		m	52	19
クレーンジブ長さ		m	6.0~15.0	—
ブーム+クレーンジブ最長		m	43.0+15.0	—
ロープ速度*	フロント/リヤ(定格6.5負荷時)	m/min	110(53)	74 (支持および開閉ロープ速度)
	ブーム起伏	m/min	60	60
旋回速度		rpm	4.2(4.2)	4.2(4.2)
走行速度* 高速/低速		km/h	2.0/1.5	2.0/1.5
登坂能力		%(度)	40(22)	40(22)
バケット容量		m ³	—	0.8/1.0/1.2
クラムシェル許容グロス質量		t	—	60
最大掘削深さ		m	—	36
エンジン名称		日野J05E-UN(オフロード法2014年基準適合)		
最高出力		kW/rpm(PS/rpm)	138/2100(188/2100)	
接地圧		kPa(kgf/cm ²)	73.1(0.75) (基本ブーム 55tフック付き)	75.1(0.77) (基本ブーム 12m ³ バケット付き)
全装備質量		t	約53.4 (基本ブーム 55tフック付き)	約54.8 (基本ブーム 12m ³ バケット付き)

*印は負荷により速度変化する。



図1 機械幅と後端半径
Width and rear end swing radius



図2 カウンタウエイト(上:従来機 SCX550 下:SCX550-3)
Counterweight

リングの向上と高寿命化を図った。

(2) 旋回操作性の向上

旋回操作性を向上させるべく旋回中立フリー/ブレーキモード切替え機能や、強風や傾斜地での操作時に役立つ旋回ブレーキ操作ペダルなどの新機能(図4)もオプションで搭載可能とした。

2.3 排出ガス規制への対応と低燃費化

(1) クリーンエンジンの搭載

SCX550-3は、オフロード法2014年基準適合の新世代クリーンエンジンを搭載している。本エンジンは共通レール式燃料噴射システム、可変ノズルターボ、クールドEGR(排気再循環)の搭載によりPM(粒子状物質)、NO_x(窒素酸化物)を低減させる。また、PM捕集フィルタと尿素SCR(Selective Catalytic Reduction: 選択触媒還元)システムを一体化した後処理装置(図5)の採用に

より、装置前段のフィルタでPMを捕集し、後段の尿素SCRではNO_xを大幅に低減している(図6)。

PM捕集フィルタの性能を維持するには、PMがフィルタに一定量堆積したときにフィルタの温度を上げてPMを燃焼させ、フィルタ機能を復活させる「再生」が必要である。本機では、機械作業中に再生制御が実行された場合でも違和感なく作業できるように、再生時の油圧制御方式を改良した。

(2) 低燃費化技術

軽負荷時にエンジンは低回転のまま高速巻上げ・巻下げ作業が可能なエコウインチモード(図7)と、非作業時にエンジンを停止するオートアイドルストップ機能を標準装備し、燃費の低減に貢献している。

(3) 低騒音化

本機は、国土交通省の超低騒音型建設機械の指定を受



図3 減速機内蔵型
フリーフォール付きウインチ
Winch with installed reduction
gear



図4 旋回操作性を向上させる機能
Function for improving turning
operability



図5 後処理装置
Exhaust gas after treatment device

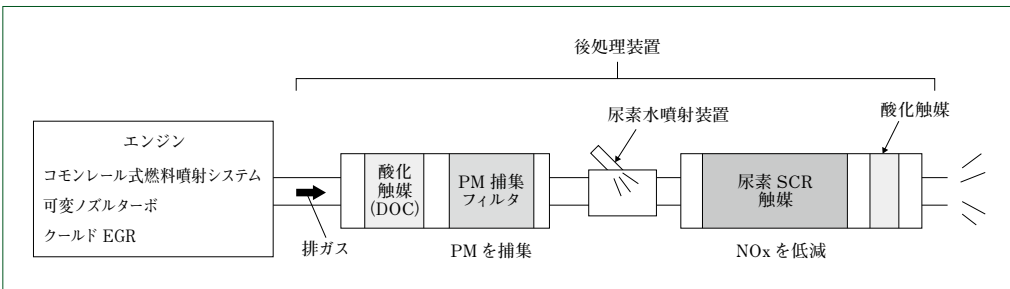


図6 後処理装置の構成図
Exhaust gas after treatment system



図7 エコウインチ
Eco winch



図8 キャブ
Cab

けている。近年の排ガス規制対応によってエンジンの発熱量が上昇してしまうので、それに対応するには機械により高い冷却性能が必要となっている。

一般的に低騒音化と冷却性能の向上はトレードオフの関係にあるが、最新の排ガス規制に対応しつつ超低騒音を実現した。

2.4 快適性と安全性能の向上

(1) キャブ

キャブ(図8)およびキャブ内装備品は、SCX-3シリーズとして統一化を図り居住性を向上させた。操作レバーは、従来のスタンドレバー式から評価の高いアームチェアコントロールレバー式に変更した。手元でレバー操作ができることでオペレータの負担低減に貢献し、広々とした前方視界を確保して快適性を高めている(図9)。

(2) 過負荷防止装置(M/L)

M/Lには、SCX-3シリーズに採用している8インチ大型ディスプレイ(図10)を搭載した。安全機能の追加や排ガス浄化システムの高性能化に伴い表示項目は増加傾向にあるが、各種警告灯やエンジン関係の情報をオペレータが見やすい表示となるように画面右側に集約した。

また、エンジンや排ガス浄化システムに重大な不具合が発生した場合は、状況や対応方法についてのガイダンスをポップアップ表示し(図11)、情報を見落とすことがないように配慮している。

(2) 安全装備

ボイスアラーム、起伏オートドラムロックなどの標準安全装置に加え、旋回角度制限装置(図12)もオプションで搭載可能とした。旋回角度制限装置とは、作業前に旋



図9 キャブ内部と前方視界
Inside of cab and its front view

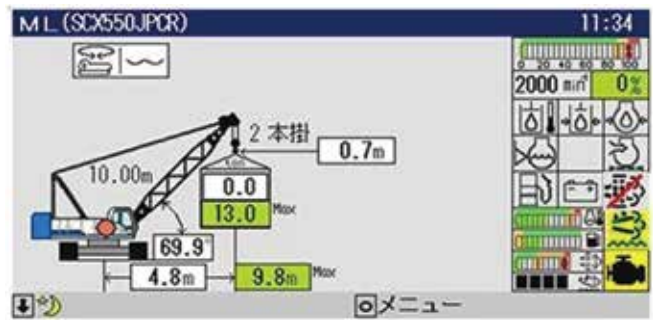


図10 8インチ大型ディスプレイ
8 inch large display

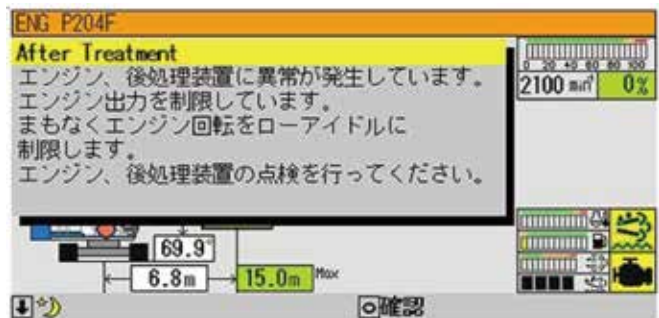


図11 ポップアップ表示(異常時表示例)
Pop-up display (example at abnormal)

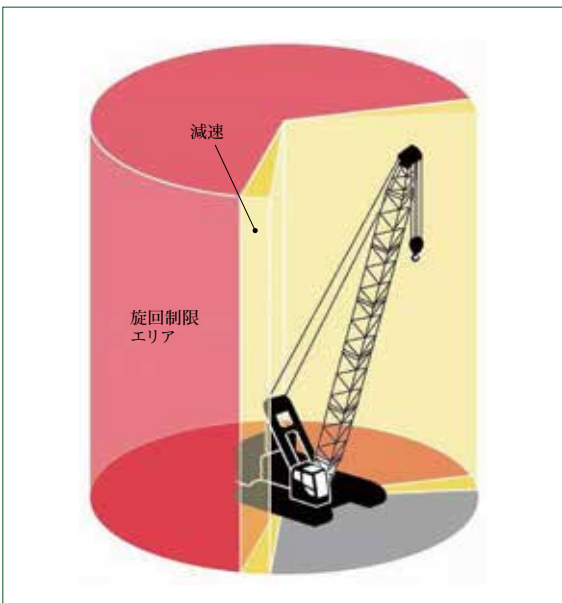


図12 旋回角度制限装置
Turning angle limiting device

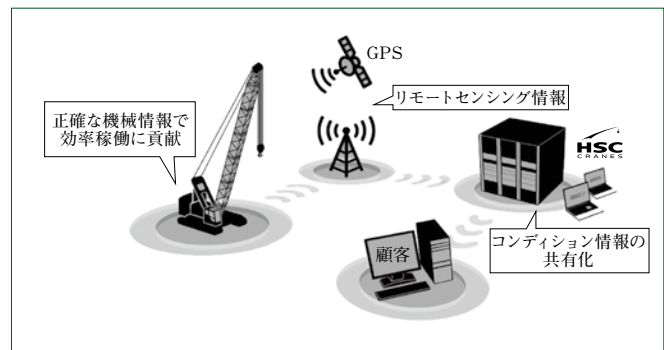


図13 リモートセンシングシステム
Remote sensing system

回制限範囲を設定しておき、作業中にその範囲外に出ないように警報を鳴らしたり、減速や自動停止をさせるものである。また、M/Lの作業範囲制限機能と併せることで、限られた作業空間における安全性をさらに高めることができる。その他、幅広タイプのサイドウォークや機械上面からの転落防止用のハンドレール(輸送時折りたたみ式)も標準で装備し、ブームにはつり環を設けるなど、各箇所での安全性を向上させた。

2.5 安心の予防保全システム

予防保全システムであるリモートセンシングシステム(図13)を標準搭載した。本システムは、機械の稼働状態を常に把握し、予防保全管理を徹底することで計画的なメンテナンスを可能にし、機械の稼働率を向上させる。また、整備にかかる時間やコストの削減にも役立っている。さらにメール配信機

能を有し、法令点検であるクレーン性能検査や定期交換部品の交換時期が近づくとユーザにお知らせメールを配信し、適正時期での検査とメンテナンス実施を促すことができる。

3 おわりに

本機は、住友重機械建機クレーン株式会社(HSC)が製造するクローラクレーンのなかで小型機械の位置付けとなる。このクラスの機械は、クレーン作業だけでなくバケット作業など耐久性を重要視する掘削作業で使用されることも多く、従来機はこの点において高評価を得ている。今回、さまざまな現場作業への対応力の高さはそのままに、HSC最新シリーズ機の機能を搭載したモデルチェンジを実施した。今後も、市場での多様な顧客ニーズに対応していきたい。

クローラクレーンの油圧システム

Hydraulic System of a Crawler Crane

●宮崎 格*
Tadashi MIYAZAKI



図1 クローラクレーン外観(SCX3500-3)
Crawler crane(SCX3500-3)

1 はじめに

クローラクレーン(図1)は、高張力鋼管で構成された軽量かつ高剛性のブーム、全周同一の高いつり能力、低い接地圧などから多くの荷役掘削作業に利用されている。

本報では、クローラクレーンの油圧システムの特徴を紹介する。

2 クローラクレーンの歴史

クローラクレーンは、ロープ式の万能掘削機にその起源を有し、構成されるフロントアタッチメントをクレーンブームに置き換えた機械から発展した(図2)。

ロープ式の万能掘削機は、操作性や取扱い性の良さからロープの代わりに油圧シリンダを使用した油圧ショベルへと急速に進化し、クローラクレーンもそれに追従するように油圧化されてきた。

油圧化される以前は、ロープドラム両側に配置された巻上げ用クラッチと巻下げ用クラッチに原動機の回転を伝え、必要な回転方向の動力をドラムに接続し、同時にドラムのバンドブレーキを自動解除することで駆動していた(図3)。

油圧化により、巻上げ装置はモータ付属のカウンタバラン

スバルブがつり荷を保持し、駆動油のブリード量(タンクへ逃げる量)をコントロールする簡単な構成できめ細かい速度調整が可能となり、建築鋼材のボルト穴の位置合わせなどの作業性や安全性が向上した。

また、従来メカニカルに行われてきた動力の伝達や切替えが油圧機器や配管などに置き換わることでメンテナンス作業が軽減し、さらに機器配置の自由度の高さからユーザが求める多様な機械が生まれ、市場へ浸透することとなった。

3 クローラクレーンの油圧回路

3.1 主回路

クローラクレーンは、前述の通り掘削機由来であり複数のドラムを同時に駆動することから、ポンプ吐出の全量を再利用できるシリーズ(直列)回路を多く採用してきた。

また、作業出力をより高くする目的で、メインウインチには2つのポンプ流量を投入可能な合流回路を併用している。

これらの基本回路は掘削用のクローラクレーンが油圧化され始めた1970年代から変わらない構成となっている(図4)。

3.2 巻上げモータ

クローラクレーンの油圧機器は油圧ショベルと共用可能なコンポーネントも多いが、巻上げ用のモータは2つのポンプ



図2 ロープ式万能掘削機 (LS-78)
Rope type universal excavator (LS-78)

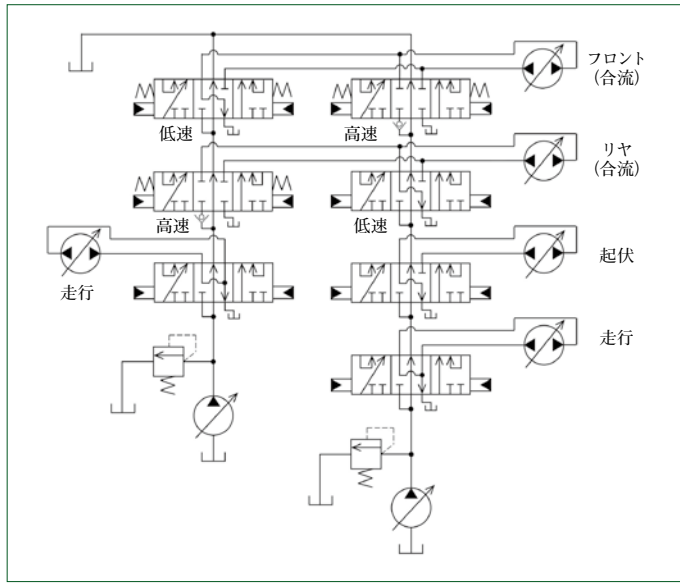


図4 シリーズ+2ポンプ合流回路
Hydraulic circuit, series and two pumps confluence

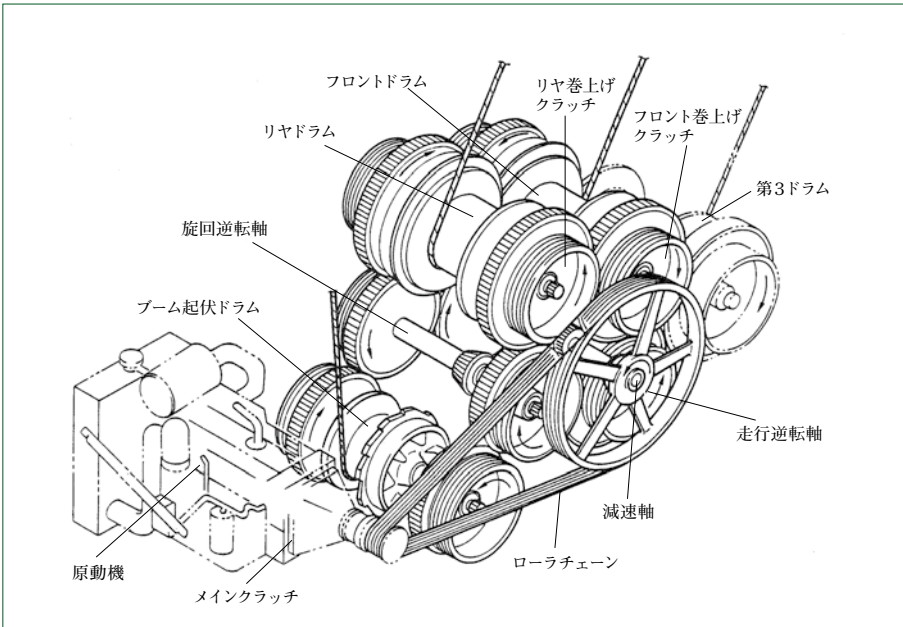


図3 油圧化以前のクレーンの駆動機構
Driving mechanism of crane before using hydraulic pressure

出力を受け止め、掘削時に発生するサージ圧に耐えられるものを機器メーカーと協力して開発してきた。

高温環境下での連続運転、つり荷保持中の耐スリップ特性、シリーズ運転時の両高圧耐性、カウンタバランス弁の安定性など巻上げモータの課題は多岐にわたったが、開発シリーズごとに改良を重ね高圧化、2速モータ化、大型モータ化、負荷による連続容量可変性、可変比率拡大などにより進化させてきた。

現在は、エンジン回転数制御と組み合わせてモータを通常より小容量で運転するエコウインチモード(3速モータ)や、2つのウインチ回転量が一致するように流量を補正する制御弁の搭載(図5)などによって低燃費性、低騒音性および利便

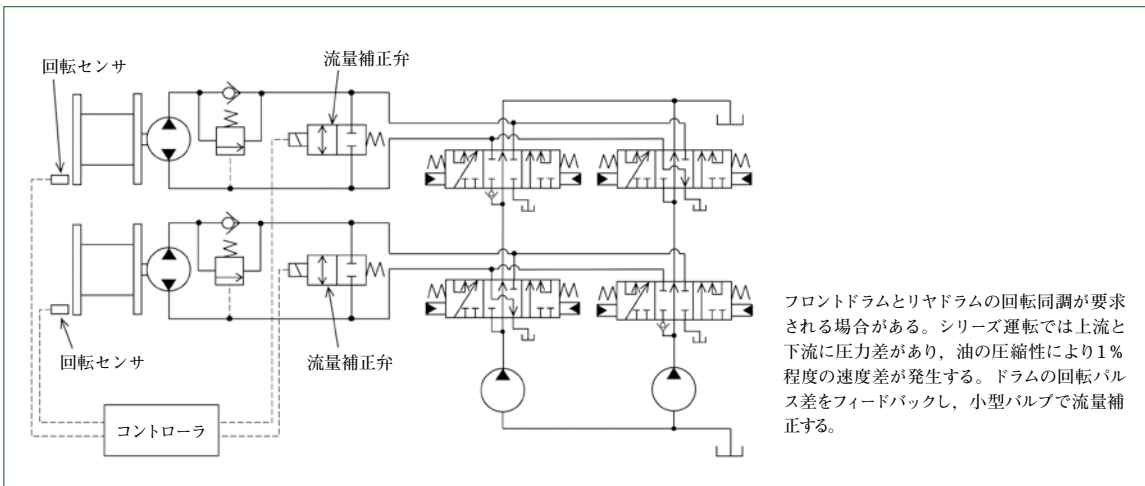
性などを向上させている。

3.3 コントロールバルブ

コントロールバルブもクローラクレーン用に改良が加えられている。

シリーズ回路では、パラレル(並列)回路のように複合操作時に負荷の軽い方へ油が逃げてしまうことはないものの、ブリードコントロールでは荷の重さやポンプの流量によりアクチュエータが動き始めるレバーの操作位置が変化してしまう。そのままでは重荷重での細かい操作やウインチのブレーキ解除のタイミング制御などに影響することから、シリーズ回路専用の圧力補償弁(コンペンセータ)を搭載している。

余剰油を後方セクションにバイパスして再利用することで、



フロントドラムとリヤドラムの回転同調が要求される場合がある。シリーズ運転では上流と下流に圧力差があり、油の圧縮性により1%程度の速度差が発生する。ドラムの回転パルス差をフィードバックし、小型バルブで流量補正する。

図5 ドラム回転補正制御
Hydraulic circuit, control for correcting drum rotation

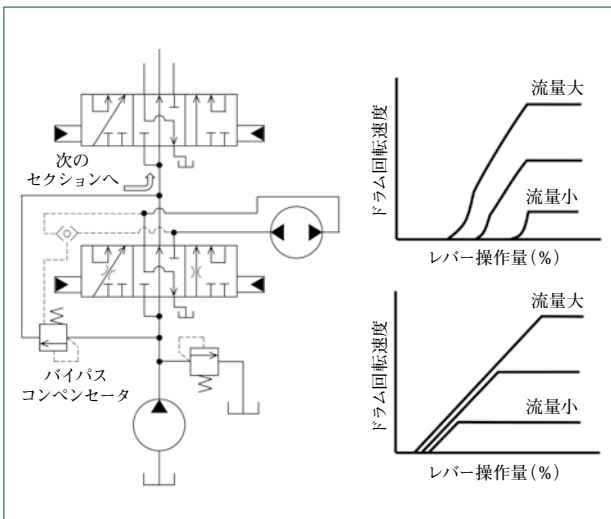


図6 シリーズ回路用の圧力補償弁
Hydraulic circuit, pressure compensation valve for series circuit

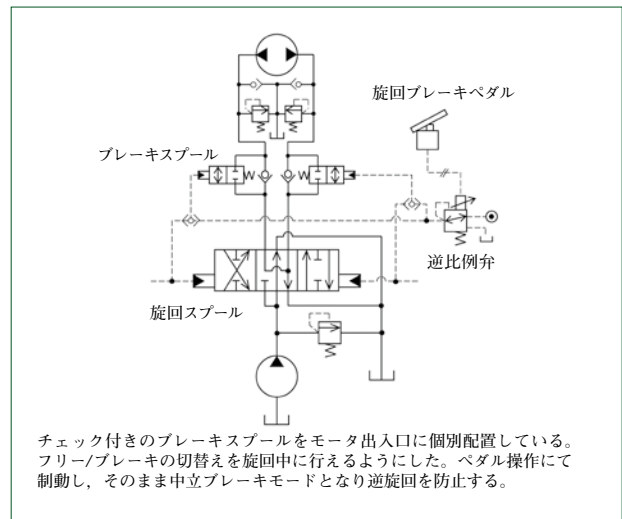


図7 旋回中立ブレーキの改良例
Example for improving turning neutral brake

シリーズ回路の利点は損なわずに、ウインチが始動するレバー操作位置の変化を小さくしている(図6)。

3.4 旋回回路

建設機械の旋回操作は、レバーを中立に戻すと自動的にブレーキがかかる「中立ブレーキ方式」が一般的であるが、クローラクレーンではレバーを中立に戻してもブレーキがかからない「中立フリー方式」も選択可能となっている。

中立フリー方式は、トルクコントロールに近い操作方式でつり荷の減速をレバーの逆操作で行う。この操作方式は減速トルクを一定に調整しやすく、大きな質量のつり荷の旋回や、大きな揺れを伴うバケット作業などでも荷をコントロールしやすいといわれており、荷役の安全性から長く採用され続けている。

また長尺物を旋回方向に引き起こす場合、中立フリー状態でウインチの巻上げ操作をすると、フックがつり荷の重心上に自動的に引き寄せられるので地切り時の荷振れを防止することができる。

しかし中立フリー方式は、つり荷の微妙な位置合わせの際に風や傾斜の影響で旋回が影響を受ける場合があり、このことから中立ブレーキ方式との選択式になっている。

近年はクレーンの大型化により風の影響を大きく受けるようになり、中立ブレーキの開放タイミングによる逆旋回が発生しないよう、専用のブレーキ弁なども開発中である(図7)。

3.5 周辺装置

一定の重量以上のクローラクレーンは輸送時に分解する必要があり、分解組立作業を省力化すべく多くの油圧シリンダが搭載されている(図8~10)。

各種ピンの着脱用シリンダ、カウンタウエイトやクローラを自分自身で持ち上げる自力着脱用シリンダ、トレーラにクレーン本体を積載することを目的としたジャッキアップ用シリンダなどがあり、それぞれ有線リモコンなどで遠隔操作される。

さらに、大型機では自走可能な油圧源ユニットをオプション化し、ブーム接続ピンの接続や、ブームの先端装置などの



ロープが組み込まれたまま、ウインチごとフレーム前後を切り離すことで分解時間が短縮される。接続ピンは油圧シリンダで持続する。

図8 リヤフレーム分解用シリンダ(SCX3500-3)
Cylinder for taking rear frame to pieces(SCX3500-3)



自身のクローラを外してトレーラへ積載することを目的としたシリンダを搭載し、補助クレーンのサイズを低減する。

図9 クローラ分解用シリンダ(SCX1200-3 オプション)
Cylinder for taking crawler to pieces(SCX1200-3 option)



カウンタウエイトを自力で着脱する機種もある。移動距離の長い地域では、補助クレーンの移動コストの低減も重要な課題である。

図10 ウェイト自力着脱シリンダ(650TLX オプション)
Cylinder having self removable weight(650TLX option)

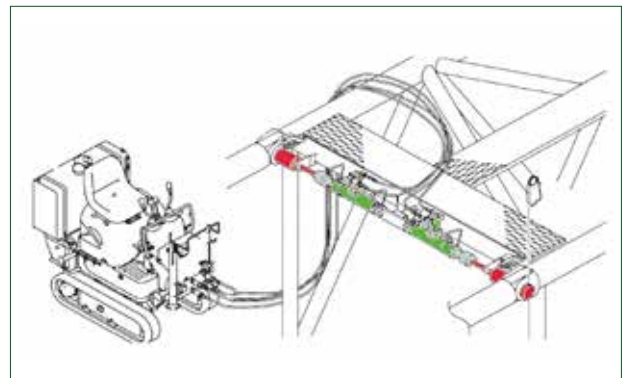


図11 自走式油圧源ユニット(オプション)
Self hydraulic unit(option)

本体から離れた箇所の組立てを油圧シリンダで行うことで、高所での打撃作業や補助クレーンによる反転作業などを削減している(図11)。

4 おわりに

本報では、クローラクレーン特有の油圧技術を抜粋して紹介した。

- (1) 長い歴史を持つクローラクレーンの安全性、効率化、省力化は現在も進化し続けている。
- (2) 近年は環境性能向上を目的としてエンジンを電動モータに置き換える開発も盛んである。しかし、アクチュエータを含めたシステム全体の電動化には、シリンダの置換えや分解輸送コストを含めた小型化などに課題が残り、対応に今しばらくの時間が必要であろう。
- (3) これまでバランス良く磨き上げてきた油圧技術に新しい技術を併せ、油圧技術と電気電子制御の両輪で顧客メリットの高い機械の開発を進めていきたい。

新型リーチフォークリフト FBR2-3t

New Reach Forklift Truck FBR 2-3t



FBR2-3tは、顧客から高い評価を得ているFBR1t系モデルのコンセプトを踏襲し、さらに顧客からの要求を満たす4つの特長(作業性、経済性、快適性および安全性)を兼ね備えたリーチフォークリフトである。小回り性については、住友ナコフォークリフト株式会社の独自技術であるAWC(Aisle Width Control)を採用することで、業界最小の直角積付け通路幅を達成し、作業効率、保管効率および疲労度を大幅に改善した。また、省エネルギー性については、新モータの採用や制御の最適化などにより、規定のサイクルパターンにおいて消費電力量を従来車比率で13%削減した(JIS D6202:2011, FBR20-312Ahバッテリーでの比較)。

主要仕様

機種	FBR25(新型)	FBR25(従来)
定格荷重(kg)		2500
揚高(mm)		3000
走行速度(km/h)	9.5	11.5
上昇速度(mm/s)		500
最小旋回半径(mm)	1950	1955
直角積付け通路幅(mm)	2760	2860
全長(mm)	2210	2195
全幅(mm)	1210	1220
ヘッドガード高さ(mm)	2270	2300
車両重量(kg)	3010	3090
バッテリー(V×Ah)	48×312	

特長

(1) 作業性：走行と荷役における加減速特性および制御を

最適化し、インチング時の作業性を向上させた。また、リーチシリンダのショックレス機能やリーチローラスパンの改善により、荷役操作時のマスト揺れを低減した。倉庫内での作業性を向上させるべく、オプションとしてセーフティレーザ、キャリッジライトおよびLEDライトを用意している。

- (2) 経済性：荷役モータにACモータを採用することで、エネルギー効率を向上させた。また、油圧機器の効率化および旋回時にトルクを抑制する旋回速度制御によりエネルギー消費の低減に貢献している。さらに、従来車と同等の走行・荷役性能を維持することで、作業性と経済性の両立を図っている。
- (3) 快適性：フロア高さを従来車より30mm低くした。この低床化により、リーチフォークリフトの作業において頻繁な乗降時の疲労低減を実現した。ステアリングは、EPSモータ制御による操舵角ロックにより、従来車のような操作エンドで発生する機械的なショックを防止した。
- (4) 安全性：運転席以外からの操作を防止する走行・荷役インターロック、下り坂での意図しない加速を抑制するスロープスピードリミット、旋回速度制御装置を標準で搭載した。また、オプションとしてオペレータの急操作を知らせる危険運転警報や充電時の温度を監視する装置など、幅広い要求に応える装備を用意している。

(住友ナコフォークリフト株式会社 村上 智)

ガンダムキャリア

GUNDAM-CARRIER



GUNDAM-CARRIERは、神奈川県横浜市山下ふ頭 GUNDAM FACTORY YOKOHAMAに設置された搬送台車で「動くガンダム」を支持することを目的として使用される。その役割は、エンターテインメント業界で最大級の荷重となる約25tの「動くガンダム」の腰部を支持し、歩行やしゃがみ動作の前後・上下動作を担うことにある。

本機は、遠隔制御室と「動くガンダム」の中間に位置する機械で「動くガンダム」の制御盤、動力および制御ケーブルなど多くの機器を備えていながらも、GUNDAM-DOCKと呼ばれる制約のある格納スペースに納めるべくコンパクト設計を実現させた台車である。

主要仕様

支持荷重	25t
昇降ストローク	4.95m
スパン	10m
ホイールベース	16m
昇降速度	0.3m/s
走行速度	0.5m/s
電源	3相交流 400V 50Hz

特長

- (1) 各運動にはインバータ制御を採用し、スムーズな起動・停止および微速運転による「動くガンダム」との連動を可能としている。

- (2) 昇降はチェーン駆動を採用しており、チェーンの一端にカウンタウェイトを吊り下げることでトルクを抑え、マストトップのモータをコンパクトにしている。
- (3) 停止精度を向上させるべく、走行は8車輪中4輪に駆動装置を設けており、スリップの低減と安定したブレーキ力を有している。
- (4) 本機の設置場所がふ頭であることから、高潮対策として足回りの電気機器はグラウンドレベルより1m以上高い位置に設置している。
- (5) 安全装置として昇降チェーンを2本掛ける構造を採用し、万が一、一方のチェーンが切断しても退避運転ができる。
- (6) 台車フレームのたわみを考慮し「動くガンダム」が直立姿勢のときに垂直となるようキャンバを設けている。これらの特長は、住友重機械搬送システム株式会社の保有する複数の機種技術を応用することで達成した。本機的设计製作は、SDGsの価値観など社会が求める21世紀のものづくり技術と方向性を考える良い機会であり、今回学んだ多くの異業種の技術も参考にしながら、新たな機械の開発・実現に生かしていく。

(住友重機械搬送システム株式会社 山田和徳)

住友重機械技報第205号発行に当たり

住友重機械技報第205号をお届け致します。

本誌は、当社が常々ご指導いただいている方々へ、最近の新製品、新技術をご紹介申し上げ、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、なにとぞご意見賜りたく、今後ともよろしくご支援下さるよう、お願い申し上げます。

なお、貴組織名、ご担当部署などについては、変更がございましたら裏面の用紙にご記入のうえ、FAXでお知らせいただきたくお願い申し上げます。また、読後感や不備な点を簡単に裏面用紙にご記入願えれば幸いに存じます。

2021年11月

〒141-6025 東京都品川区大崎2丁目1番1号 (ThinkPark Tower)

住友重機械工業株式会社

技術本部 技報編集事務局

(宛先)

(発信元)

住友重機械工業(株)
技術本部 技報編集事務局 行
FAX 横須賀 046 - 869 - 2358

貴組織名
担当部署
氏 名
TEL No.
FAX No.

住友重機械技報第205号の送付先の確認と読后感などの件

送 付 先 変 更	(旧送付先)	(新送付先)
	送付番号 _____	送付番号 _____
	組織名称 _____	組織名称 _____
	担当部署 _____	→ 担当部署 _____
	所在地 _____ 〒 _____	所在地 _____ 〒 _____

新 規 送 付 先	新しい部署ができた場合ご記入下さい。
	組織名称 _____
	担当部署 _____
	所在地 _____ 〒 _____
	必要部数 _____ 部

本 号 の 読 後 感 に つ い て	1. 本号で、一番関心を持たれた記事は。
	2. 本号を読まれたご感想をお知らせ下さい。(○印でご記入下さい。)
	1 興味深かった 2 特に興味なし
	その理由をお聞かせ下さい。

キ
リ
ト
リ
線

主要営業品目

変速機、インバータ

●機械式減速機：[同心軸]サイクロ減速機，サイクロギヤモーターアルタックス，精密制御用サイクロ減速機，コンパワー遊星歯車減速機，[平行軸]パラマックス減速機，ヘリカルパディボックス，プレストギヤモーター，[直交軸]パラマックス減速機，ハイポニック減速機，アステロ直交ギヤヘッド，ベベルパディボックス，ライタックス減速機，HEDCON ウォーム減速機，小形ウォーム減速機 ●変速機：[機械式変速機]バイエル無段変速機，バイエル・サイクロ可変減速機，[電気式変速機]インバータ，インバータ搭載ギヤモーター，サーボドライブ，DCドライブ サイクロ，アルタックス，コンパワー，パラマックス，パディボックス，プレスト，ハイポニック減速機，アステロ，ライタックス，HEDCON，バイエルおよびバイエル・サイクロは，住友重機械工業株式会社の登録商標です。

プラスチック加工機械

●プラスチック加工機械：射出成形機，射出吹込成形機，ディスク成形機，セラミックス成形機 ●フィルム加工機：押出機，フィルム製造装置，ラミネート装置 ●IC 封止プレス ●成形システム・金型：射出成形用金型，PET システム，インジェクションブロー成形システム，インモールドラベリング成形システム

レーザー加工システム

●レーザドリル装置 ●レーザアニール装置 ●YAG レーザと加工システム

半導体・液晶関連機器

●イオン注入装置 ●成膜装置：(太陽電池，タッチパネル，有機EL用)プラズマ薄膜形成システム ●精密位置決め装置 XY ステージ ●モーションコーポネント ●ライン駆動用制御システム ●マイクロマシン ●レーザアニール装置 ●ウエハ研削装置

環境施設

●環境・エネルギー関連プラント：循環流動層(CFB)ボイラ，ロータリーキルン式産業廃棄物処理施設 ●大気関連プラント：電気集塵装置，灰処理装置 ●水関連プラント：上水処理施設，下水処理施設，浸出水処理施設 ●産業廃水処理装置

加速器，医療機器，精密機器，極低温機器，超電導磁石

●イオン加速器：サイクロトロン，ライナック，シンクロトロン ●電子線照射装置 ●医療機器：PET診断用サイクロトロン・CYPRIIS，標識化合物合成装置，陽子線治療システム ●冷凍機：パルスチューブ冷凍機，4KGM 冷凍機，MRI 用冷凍機，クライオポンプ ●人工衛星搭載観測装置冷却システム ●超電導磁石：ヘリウムフリー超電導マグネット

CYPRIIS は，住友重機械工業株式会社の登録商標です。

物流・パーキングシステム

●自動倉庫システム ●FMS/FA システム ●無人搬送システム ●機械式駐車場

金属加工機械

●鍛圧機械：フォーミングプレス，油圧プレス，フォーミングロール，超高压発生装置 ●工作機械，クーラント処理装置 ●SPS(放電プラズマ焼結機)

運搬荷役機械

連続式アンローダ，港湾荷役クレーン(コンテナクレーン，タイヤマウントジブクレーン，タイヤマウント式LLC)，トランスファクレーン，ジブクレーン，ゴライアスクレーン，天井クレーン，製鋼クレーン，自動クレーン，コイル搬送台車，ヤード機器(スタッカ，リクレーマ，スタッカ/リクレーマ)，シップローダ，ベルトコンベアおよびコンベアシステム，リフティングマグネット装置，コークス炉移動機械

船舶海洋

●船舶：油槽船，石油製品運搬船

化学機械，プラント

●一般プラント：紙・パルプ製造装置，化学装置，原子力装置 ●圧力容器：リアクタ，塔，槽，熱交換器 ●攪拌混合システム：マックスブレンダー攪拌槽，スーパーブレンダー(同心2軸型攪拌槽)，バイボラック(横型2軸反応装置) マックスブレンダーおよびバイボラックは，住友重機械プロセス機器株式会社の登録商標です。

建設機械，フォークリフト

油圧式ショベル，杭打機，道路舗装機械，クローラクレーン，基礎機械，フォークリフト

タービン，ポンプ

蒸気タービン，プロセスポンプ

その他

航空用機器，精密鍛造品，防衛装備品(各種機関銃，機関砲およびシステム)

※文章中のソフトウェア等の商標表示は，省略しております。

事業所

本社	〒141-6025 東京都品川区大崎2丁目1番1号(ThinkPark Tower)	技術研究所	〒237-8555 神奈川県横須賀市夏島町19番地
関西支社	〒530-0005 大阪市北区中之島2丁目3番33号(大阪三井物産ビル)	技術研究所	〒792-8588 愛媛県新居浜市惣開町5番2号(新居浜)
中部支社	〒461-0005 名古屋市東区東桜1丁目10番24号(栄大野ビル)		
九州支社	〒812-0025 福岡市博多区店屋町8番30号(博多フコク生命ビル)		
田無製造所	〒188-8585 東京都西東京市谷戸町2丁目1番1号		
千葉製造所	〒263-0001 千葉市稲毛区長沼原町731番1号		
横須賀製造所	〒237-8555 神奈川県横須賀市夏島町19番地		
名古屋製造所	〒474-8501 愛知県大府市朝日町6丁目1番地		
岡山製造所	〒713-8501 岡山県倉敷市玉島乙島 8230番地		
愛媛製造所			
新居浜工場	〒792-8588 愛媛県新居浜市惣開町5番2号		
西条工場	〒799-1393 愛媛県西条市今在家1501番地		

本号に関するお問い合わせは，技術本部技報編集事務局(電話番号は下記)宛お願い致します。

住友重機械工業株式会社のホームページ <http://www.shi.co.jp/>

技報編集委員

委員	鈴木 哲史	委員	伊藤 晃
	大西 良孝		阿部 昌博
	平田 徹		白澤 克年
	井上 千晶		村澤 崇
	梶谷 純平		柴田 雅也
	長部 洋介		奥平 恭之
	有吉 政博		坂根 剛
	石川 賢治		石倉 武久
	諏訪 義和		蟹 伸章
	幾島 悠喜		前野 亮一
		事務局	技術本部
		編集協力	(株)千代田プランニング

住友重機械技報

第205号 非売品

2021年11月10日印刷 11月20日発行

発行 住友重機械工業株式会社
〒141-6025 東京都品川区大崎2丁目1番1号
(ThinkPark Tower)

お問い合わせ電話 横須賀 046-869-2306

発行人 千々岩敏彦



住友重機械工業株式会社
Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

