

特別報文

建築用タワークレーンのハイブリッド型 電力供給システムの開発

三 浦 拓

地球温暖化防止のための環境負荷低減対策が各産業分野で取り組まれている中、建設業における建設機械分野での取り組みとしてハイブリッドエンジンの技術開発をはじめ、アイドリングストップ、省エネ運転等の方策が展開されている。

建築用タワークレーンはもともと環境負荷の少ない建設機械であるが今回、近年急速な進歩を遂げている蓄電制御技術をクレーンの運転に必要なエネルギー（電力）の供給システムとして採用し効率的なエネルギーの活用を目指した「建築用タワークレーンのハイブリッド型電力供給システム」を開発、実用化したので紹介する。

キーワード：建築，タワークレーン，環境負荷，省エネ，ハイブリッド

1. はじめに

近年、急速な進歩を遂げている蓄電制御技術は地球環境対策の観点から各分野において環境負荷低減への取り組みに採用され、その開発が盛んに進められている。

本システムは建築の生産性向上と地球環境保全活動に期待される新しい機械システムをエネルギーの効率活用という観点から開発したものである。

2. 開発の背景

地球温暖化防止に向けて先進国の温室効果ガス排出削減約束を取り決めた京都議定書の目標期限のスタートがいよいよ来年に迫り、建設業においても2010年を目途にCO₂の排出量を12%削減する目標を掲げ、その実現に向けて様々な取り組みが進められている。

「建設業自主行動計画－地球温暖化防止対策」の中でクレーンに関連する次のような実施方策が述べられている。

- ①省エネルギー性に優れた建設機械，車両の採用促進
 - ・エネルギー効率に優れた建設機械，車両の採用促進
 - ・作業内容に適応した建設機械，車両の採用促進
 - ②高効率仮設電気機器等の使用の促進
 - ・作業所におけるエネルギー効率の高い機器及び工具の使用促進
- 建築用クレーンを駆動エネルギーで大別すると、電

気駆動の定置式タワークレーンとエンジン駆動の移動式クレーンに分けられる。タワークレーンはもともと環境負荷の少ない機械であり、上記の地球温暖化防止策の一つである作業内容に適応した建設機械となりえるものであるが、利便性において移動式クレーンより劣る部分があるため、機種選定に際しては移動式クレーンが採用され易い傾向にある。

建築現場におけるクレーンの機種選定は建物の規模、構造、工期などの条件により定置式、または移動式のいずれかに決められ概ね以下のケースとなる。

- ・建物高さが30m以下の低・中層建物の工事には工事敷地の余裕度にもよるが現場への搬入、搬出、組立、解体、現場内の移動性、駆動源の実装、据付性などの利便性を活かし移動式クレーンが使用されるケースが多い（図－1）。
- ・建物高さが60m程度までの高層建物工事には定置式のタワークレーンが比較的多く使用されるが諸条件によっては大型の移動式クレーンが使用される（図－2）。
- ・上記以外の超高層建物の工事には揚程の高いタワークレーンが使用される（図－3）。

しかしながら移動式クレーンでは最近、公道上を自走または搬送するときの車両重量規制の厳格化（2004年国土交通省発表）による分割搬送からの運行経費、組立解体手間の増加、第3次排ガス規制の強化によるオフロード機械への規制対象の拡大、転倒事故に対する安全性向上の指導強化などの課題を抱えてきてお

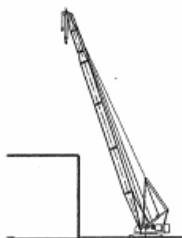


図-1 移動式クレーン

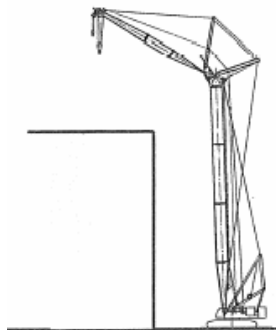


図-2 大型移動式クレーン

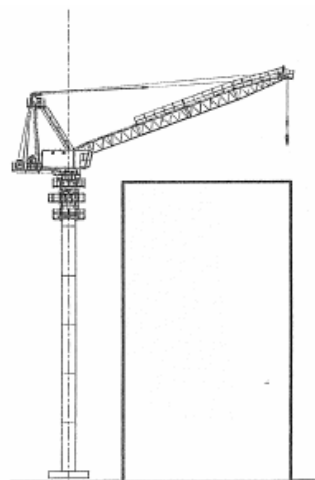


図-3 タワークレーン

り、その利便性も問われ始めている。

このような移動式クレーンを取り巻く環境の変化がタワークレーンに対する利便性の向上ニーズとして高まってきている。本システムはエンジン系クレーンに比べて環境負荷が極めて少なく、安全性の高いタワークレーンの強みを活かし、エンジン系クレーンに劣る部分を改善することでその領域をカバーする代替機として普及し、タワークレーンが有効活用される機械に革新するものと考えられる。またこれらの技術は関連産業の技術水準の向上と高度化に寄与するとともに社会的課題に対する解決の一端を担い、低生産性分野のタワークレーン製造業としての活性化を図るためにも必要なシステムと考える。

3. システムの概要

(1) 主要性能

本システムはクレーン運転時、商用電源からの所要エネルギーを予め決められた電力（通常契約電力）以内にコントロールし、効率的かつ安全に蓄電装置のエネルギーと併用制御する以下の性能を有する。

- ①クレーン運転時の一般的動作パターンで最も不利となる条件のもとで計算された所要電力が商用電源側（以下商用側という）において、その計算値の50%以下になること。
- ②クレーン作業中において蓄電装置容量が上限または下限を超えた場合あるいは双方どちらかに異常が発生した場合においてもシステムを安全な状態に保ち、クレーン性能を極力低下させることの無い包括的安全制御システムであること。

(2) システム構成と基本仕様

本システムの主要構成機器とその基本仕様を以下に示す。

①蓄電装置（電気二重層キャパシタ）（写真-1）

1セル	2.3 V	3200 F
ユニット数	264 個 × 2 台 = 528 個	
総電圧	2.3 V × 264 個 = 607 V	
最大貯蔵エネルギー	2.0 MJ × 2 = 4.0 MJ	
使用温度	- 25 ~ + 40 °C	
充電時間	16.8 kW/秒	
寿命	+ 25 °Cで50万サイクルまたは10年以上	

②充放電装置（DC/DC コンバータ）（写真-2）

・入力特性（キャパシタ側）

定格容量	250 kW（最大 300 kW）
定格電圧	DC 0 V ~ DC640 V
定格電流	DC350 A 連続
過負荷耐量	150 % 60 秒および DC600 A 2 秒

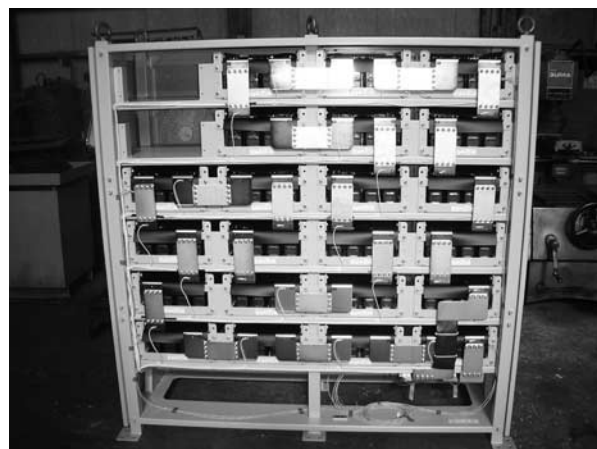


写真-1 電気二重層キャパシタ

- ・出力特性 (DC リンク側)
 - 定格容量 250 kW (最大 300 kW)
 - 定格電圧 DC550 V ~ DC730 V
 - 定格電流 DC350 A 連続 (最大 450 A)
 - 過負荷耐量 150 % 60 秒および DC600 A 2 秒
- ・使用環境
 - 環境 屋内
 - 相対湿度 5 ~ 95 % RH (但し結露なきこと)
 - 保存温度 - 20 ~ + 60 °C
 - 動作温度 - 10 ~ + 45 °C
- ・制御回路電源 AC200 V ± 20 % 50/60Hz



写真一2 DC/DC コンバータ

- ③クレーン制御装置
 - 巻上用 37 kW インバータ + ダイオードコンバータ
 - 起伏用 15 kW インバータ
 - 旋回用 3 kW インバータ

(3) 特徴

本システムの特徴を以下に示す。

- ①蓄電装置 (以下キャパシタという) の電圧監視および商用電源の電力監視によりそれぞれの規定値, 制限値を任意に設定できることでクレーンの作業パターンに合わせた効率的なエネルギー制御ができる。
- ②キャパシタの蓄電量が予め設定した規定値, 制限値に達した場合, システムがデマンド制御を行いクレーン

- ン動作に制限を与えるが, クレーンが急停止することのないよう減速措置を段階的に講ずることでクレーン能力を極力低下させることがなく, またクレーン運転者の緊張感の緩和にも有効な制御である。
- ③キャパシタの蓄電量が少量になった場合でもクレーン作業待機中, または休止中の時間を利用し商用側から随時急速充電ができる。

4. 具体的な性能確認

本システムの具体的な性能を検証するためにシステムを搭載する試用クレーンの能力を設定し, その目標性能を下記の通り掲げ試験を行った。

試用クレーンは低・中層建築工事に使用される 60 t 級クライミングクレーンを採用することとし, その能力は表一の通りである。

表一 クレーン能力表

ジブ長さ	22.5 m			
定格荷重	8 t	6 t	4.3 t	3 t
作業半径	8.5 m	10 m	15 m	20 m
速度	巻上	0.3 m/s ~, 0.6 m/s		
	起伏	102.0 sec		
	旋回	0.052 rad/s		
電動機	巻上	30.0 kW		
	起伏	15.0 kW		
	旋回	3.0 kW		
タワー自立高	22.5 m			
全負荷容量	50.4 kW			

試用クレーンの能力に基づいた具体的なシステムの性能を以下の通りに設定した。

- ①商用電源の供給電力を監視(測定)し, 一定量(24 kW)以下に制御する。
- ②商用電力が 24 kW を超える場合, キャパシタから不足エネルギーを供給する。
- ③蓄電量が 25 % 以下に降下した場合は起伏・旋回モータにデマンド制御を行う。
- ④蓄電量が 17 % 以下に降下する場合はキャパシタからの供給を停止して商用電力単独制御とし, 巻上モータには速度制限, 起伏・旋回モータは停止させる。

図一4 は試用クレーンの一般的な動作パターンに基づいた所要電力とキャパシタ蓄電量の推移をシミュレーションしたものである。

(1) 性能試験

上記の性能確認に際し, 商用側の電力供給制御値とキャパシタの初期充電値, 充電停止レベルおよびキャ

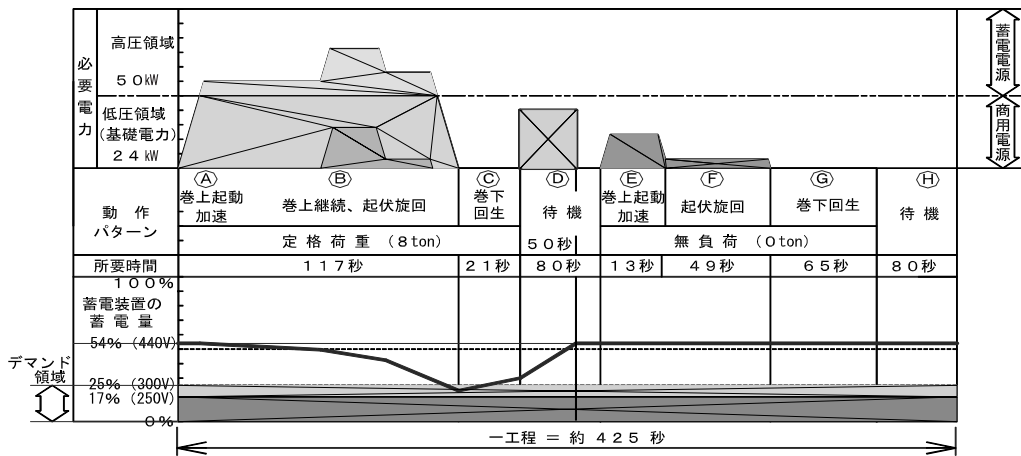


図-4 所要電力と蓄電装置蓄電量のモデルシミュレーション

パシタ蓄電率規定値を以下の通りに設定した。

- ・商用側電力供給制御値 24 kW
- ・初期充電値 440 V
- ・充電停止レベル 550 V
- ・蓄電率規定値
 デマンドレベル 1 300 V (25%)
 デマンドレベル 2 250 V (17%)

また負荷条件は試験荷重を 0t, 3t, 4t, 5t, 6t, 7t, 8t の 7 種類とし、巻上下げ揚程は 35 m, ジブの起伏動作を作業半径で 5 ~ 8.5 m, 旋回動作は 180 度で行った。

試験方法としては荷重を 35 m 巻上げ、ジブ起しと旋回動作後、荷重を 5 m 巻下げ、80 秒待機後空フックで元の位置に戻るといった状態を繰り返し行い、商用側の電力値とキャパシタ側の蓄電率を測定した。写真-3 に試験中の試用クレーン全景を示す。

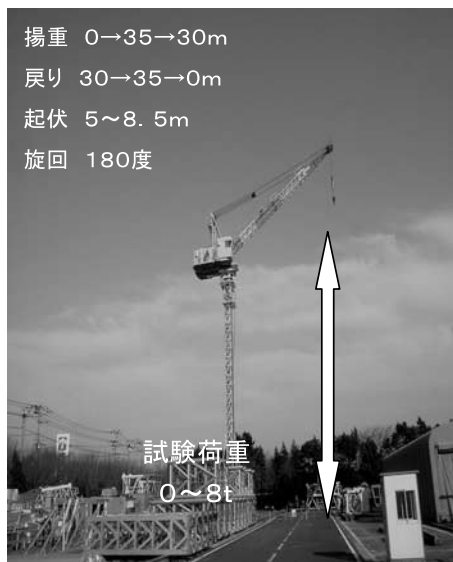


写真-3 試用クレーン全景

(2) 試験結果

荷重 0t (空フック) 時における商用側の電力は巻上・起伏・旋回の 3 動作でも 24 kW に達せずシステムは稼動しない。

巻下げ動作による回生は減速時に限り僅かに回生された。

荷重 3 ~ 8t 時における商用側の電力は巻上単独運転で 24 kW を超えるのは 6t 以上の場合であった。商用側の電力制御値 24 kW 超過時にはシステムが稼動し負荷電力制御によりほぼ 24 kW 一定に制御された。また、巻下げ時には負荷に応じた回生電力が蓄積されることを確認した。

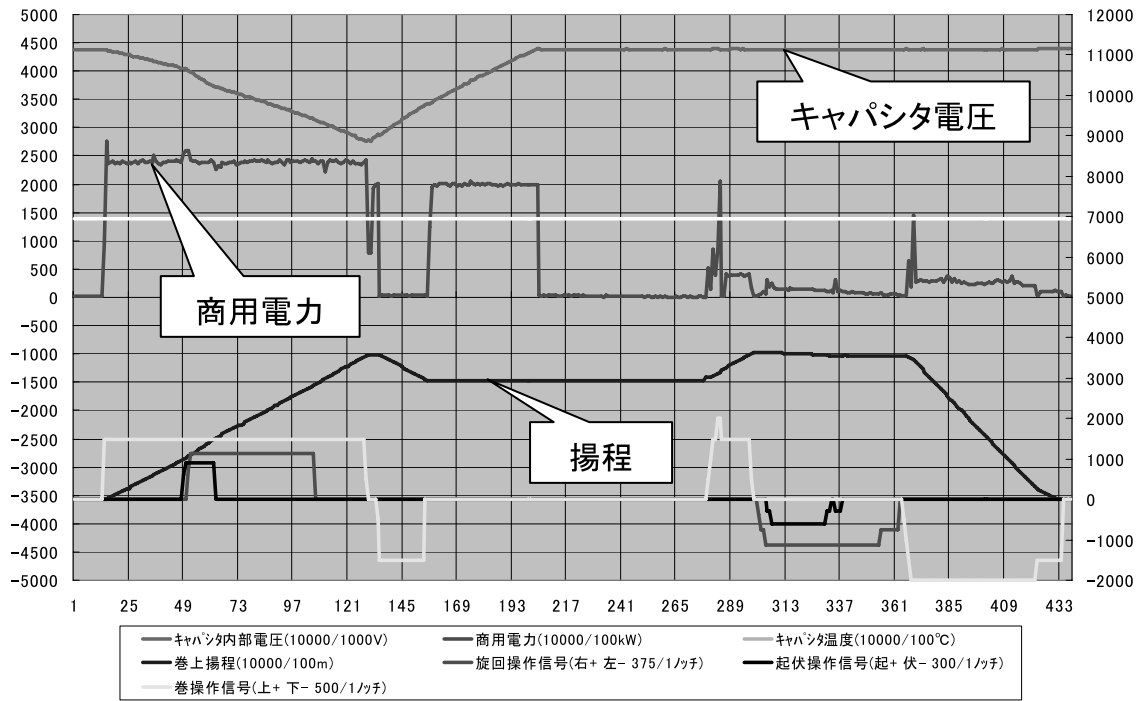
図-5 はシステム運転時系列グラフで、荷重は試用クレーンの最大定格荷重である 8t 時の状態を示す。

時系列グラフより以下のことが確認できる。

- ・揚程 35 m を巻上げている区間において、巻上起動時および起伏旋回を加えた部分の商用電力で若干オーバーシュートが見られるが 24 kW 一定制御がされている。またキャパシタ電圧が 440 V から 276 V まで低下し、起伏旋回が速度制限されるデマンド信号が出力されることが確認できた。
- ・荷重を 5 m 下げた区間においてはキャパシタ電圧が上昇していることから、回生されたエネルギーからの充電が確認できる。
- ・巻上停止区間においては直ちに待機充電が行われ、待機充電レベルに達していることが確認できる。

(3) エネルギー回生率の確認

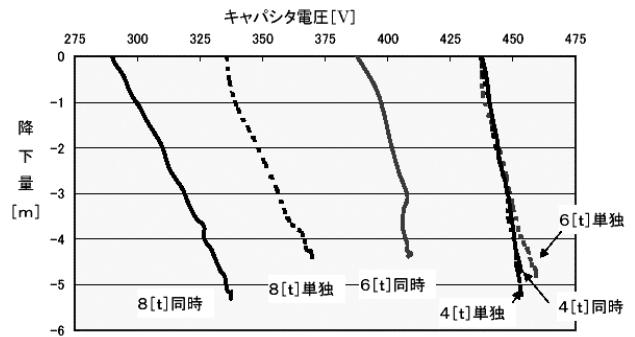
試験荷重 8t, 6t, 4t の 3 動作単独運転と 3 動作同時運転において回生されたエネルギーを以下の算定式により求め、クレーン通常作業 1 サイクルあたりの全消費エネルギーに対する割合である回生率を表-2



図一五 システム運転時系列グラフ (荷重 8 t 時)

表一 二 エネルギーの回生率

定格荷重	8 t		6 t		4 t		
運転モード	単独	同時	単独	同時	単独	同時	
全消費エネルギー (kJ)	4454.0	4442.2	3555.0	3449.3	2685.1	2685.2	
キャパシタ	開始時	335.8	289.9	437.6	387.8	437.0	437.6
	終了時	370.2	337.2	459.3	409.3	453.3	453.3
実測降下量 (m)	4.4	5.3	4.9	4.8	5.2	4.7	
回生量 (kJ)	実測	294.5	359.6	246.0	244.8	176.0	169.6
	5 m 換算	333.1	339.2	252.0	257.7	168.6	180.4
回生率 (%)	7.5	7.6	7.1	7.5	6.3	6.7	



図一六 巻下げ時のキャパシタ電圧の変化

に示す。結果として平均7%以上の回生があったことを確認できた。また、実測データを図一6に示す。

$$Ek = 1/2 \cdot C \cdot (Vf^2 - Vs^2)$$

Ek：回生されたエネルギー

Vf：巻下げ終了時のキャパシタ電圧

Vs：巻下げ開始時のキャパシタ電圧

なお、各荷重毎のクレーン通常作業1サイクルは今回の設置条件において、全消費エネルギーが最大になるような動作パターンを設定した。

5. 技術的、経済的成果

(1) 技術的成果

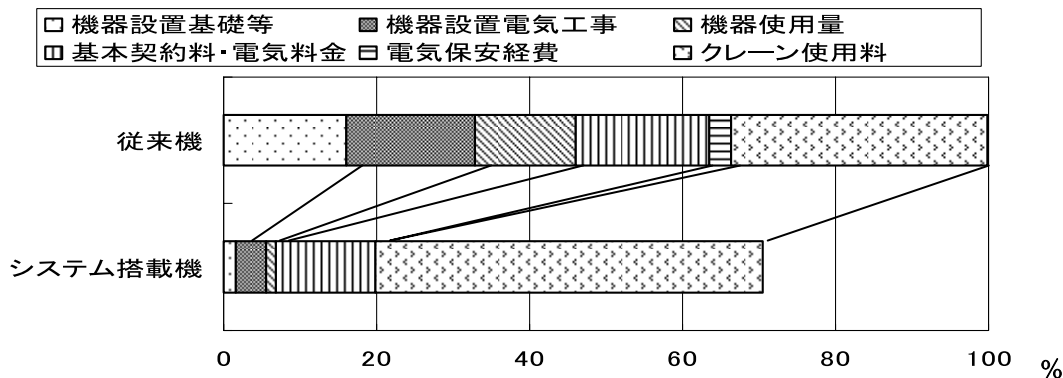
- ①本システムの実用化に相応しいクレーン運転状態の制御機構とその制御ソフトが完成した。
- ②クレーンの一般的動作パターンにおいて、商用側の電力供給規定値を超過しない状態が充分維持可能で

あること、またキャパシタ蓄電量が制限値以下に低下しないことを確認できた。

- ③クレーン作業中においてキャパシタ蓄電量が上限、あるいは下限を超えた場合においてもシステム全体の安全が充分確保され、かつクレーンの性能低下が極力抑えられたことが確認できた。
- ④クレーンの常態として軽荷重の場合はキャパシタ蓄電量の推移に余裕があり、重荷重の場合は初期蓄電量の設定を上げることで規定値を下回らないことが確認できた。これらのことから商用側とキャパシタ初期蓄電量の最適な組合せを作業所の電力条件とクレーン作業条件に応じて選定可能なことが確認できた。
- ⑤クレーン通常作業1サイクルあたりの全消費エネルギーに対する定格荷重およびフックの降下時に回生されるエネルギーの回生率が平均で7%以上を確認

表一 3 電源 (トランス) 容量比較表

用途	電動機	定格電流		動作電流	トランス容量	受電設備
巻上	30 kW	112 A	従来機	180 A	63 kVA 標準 75 kVA (60 kW)	高圧
起伏	15 kW	59 A	システム	商用側 90 A	31 kVA 標準 40 kVA (32 kW)	低圧
旋回	3 kW	9 A	搭載機	キャパシタ側 90 A		



図一 7 工事用電気関連費用比較図

できたことでの省エネ効果と CO₂ 排出削減目標 6%の実現に寄与できる効果が確認できた。

(2) 経済的効果

クレーン用仮設受電設備が本システムを採用することで高圧受電から低圧受電に転換した場合の経済的効果を以下のシミュレーションから確認することができる。

表一 3 は試用クレーンの能力を参考例として比較したものであるがトランス容量はおよそ 1/2 程度と低圧受電が可能となり、工事現場における電気関連費用は図一 7 の通りおよそ 70%の低減が見込まれる。またクレーン使用料の付加価値アップ分を考慮しても約 30%程度のコスト低減が期待できる。

また、クレーン能力によっては高圧受電を避けられない場合であってもその設備容量を軽減できることで全体のコストダウンが充分期待でき、冒頭に述べた「建設業自主行動計画 - 地球温暖化防止対策」の一つである「高効率仮設電気機器等の使用の促進」に適うものと考ええる。

6. 今後の課題

- ・本システムを広く普及させるためには蓄電装置部および充放電制御装置部が占めるスペース並びにコストの軽減が重要なポイントとなり、今後二次電池を含めた蓄電装置の生産技術の向上とクレーン能力に応じた充放電制御装置のモデル化が望まれる。
- ・クレーンによる解体作業等で大量に回生されるエネ

ルギーが蓄電量を超過する場合、本システムでは抵抗器により放熱することとしている。この余剰エネルギーの活用方法として起伏、旋回を含めたクレーン全体への電源供給が考えられるが、他の目的への活用可能なシステムの開発が望まれる。

7. おわりに

本システムの開発で建築用タワークレーンにおけるエネルギーの効率的活用という観点からのハイブリッド制御の基礎技術ができた。また定置式建築用タワークレーンが環境負荷低減に少なからず貢献できることが確認できた。今後さらに他分野での蓄電制御システムの発展とともに技術向上、低コスト化が図られ本システムに対する認知度の広まりに伴って建築用タワークレーンが新しい付加価値を持った建設機械として見直されることを期待する。最後に本システムの開発に際し試用クレーンの設置、助言、資料提供等のご協力をいただいた株式会社竹中工務店の関係者の方々へ感謝し、また製作にあたっては日本自転車振興会の機械工業振興事業補助金の交付を受けた財団法人機械システム振興協会が実施する新機械システム普及促進事業の一部助成を受けたことを申し添える。 JICMA

[筆者紹介]
三浦 拓 (みうら ひらく)
株式会社小川製作所
取締役設計部長

