

厚板倉庫自動クレーンの開発

Automatic Plate Warehouse Crane

河野 信博 ⁽¹⁾ Nobuhiro KAWANO	大石 清 ⁽¹⁾ Kiyoshi OOISHI	中野 鉄也 ⁽¹⁾ Tetsuya NAKANO	是久 悦次郎 ⁽²⁾ Etsujiro KOREHISA
東 征治 ⁽³⁾ Seiji HIGASHI	中目 政孝 ⁽⁴⁾ Masataka NAKAME	山野寺 敬 ⁽⁵⁾ Takashi YAMANODERA	

抄 録

厚板成品倉庫の自動化において、リフティングマグネット式クレーンによる鋼板吊り枚数選別制御及び複数台クレーンの効率的な運行管理は必要不可欠な主要技術である。大分、君津製鐵所厚板工場成品倉庫において、これらの要素技術の開発、並びに、吊り枚数選別精度の向上、有人並の運行効率の確保に取り組み、大規模厚板成品倉庫を無人化することに成功した。

Abstract

In automatization of a warehouse for plate products, the selecting control of the number of steel plates to be lifted by a lifting magnet mode crane and the efficient operating control of a plural number of cranes are indispensable key technologies. Nippon Steel has endeavored to develop these elementary technologies for these product warehouses of plate mills in both Oita Works and Kimitsu Works, to improve the accuracy of selecting the number of steel plates to be lifted and to secure the conducting efficiency of crane equal to the one of a manned operation, and has succeeded in making the operation of the large-scale warehouses for plate products

1. 緒 言

厚板工場の中核をなす製造工程において、各種計測装置の導入、及び圧延制御技術の開発等により高度な自動化が進められてきた。しかしながら、倉庫作業については熟練クレーンオペレータにとって替る技術が開発されておらず、こうした合理化の流れから乖離した職場となっていた。

倉庫作業は、厚鋼板固有のリフティングマグネット(以下リフマグと称す)クレーンによる鋼板吊り選別作業の繰り返しが主体であり、吊り選別はクレーンオペレータの熟練を要する技術である。又、厚板工場の最終工程に位置する倉庫での作業ミスは誤出荷に直結することから、吊り選別作業には高い正確性と、限られた置き場面積を有効活用する必要から、作業の効率性が要求される。従ってこれらの作業の完全自動化は、極めて困難とされていたが、リフマグクレーンによる鋼板吊り選別と運転作業の完全自動化を主要課題として自動化技術の開発を進め、1992年9月に世界に先駆けて大規模厚板倉庫作業の無人化を実現した。

本稿では、その無人化の基盤である、鋼板の吊枚数制御技術とクレーンの自動運行制御技術及びその適用効果について述べる。

2. 倉庫作業の概要と主要開発課題

図1に大分製鐵所厚板工場のレイアウト、図2に同厚板成品倉庫の設備概要を示す。厚板成品倉庫は3棟の北半分と4棟及び5棟である。1992年9月に自動化した4棟倉庫では、対象材として厚さ8~60mm、幅1000~3300mm、長さ3000~14500mmの成品を扱っている。図3に倉庫の主要な作業を示す。倉庫作業には、剪断や精整ラインから鋼板を受け入れる受け作業、南北の通路に待機しているキャリアバレットやトレーラーに積み込む出庫作業、出庫準備のため一時的に受け入れた鋼板を向け先別に積み替える配替え作業がある。これらの作業に対し、4棟倉庫には同一走行レール上に3台のクレーンが配置されている。これら3台のクレーンの自動運行制御化に際しては、下記2点の主要開発課題があった。

(1) 鋼板の自動吊り枚数選別制御技術

- 1) 広範囲に渡るサイズの鋼板群から、初回のチャンスにおいて指定枚数を高い成功率で吊り分ける信頼性の高い吊り枚数選別技術
- 2) 誤出荷防止の観点から、倉庫受入れから出荷までクレーンハンドリングに伴う現品管理を100%の信頼性で実行するために、吊り枚数の過不足や吊り荷の状態を正確に確認する吊り枚数判定技術。

⁽¹⁾ 大分製鐵所 圧延工場 マネジャー
大分県大分市大字西の洲1 ☎ 870 ☎ (0975)-53-2181
⁽²⁾ 大分製鐵所 設備部 マネジャー

⁽³⁾ 大分製鐵所 設備部
⁽⁴⁾ 君津製鐵所 厚板工場 マネジャー
⁽⁵⁾ 君津製鐵所 設備部 マネジャー

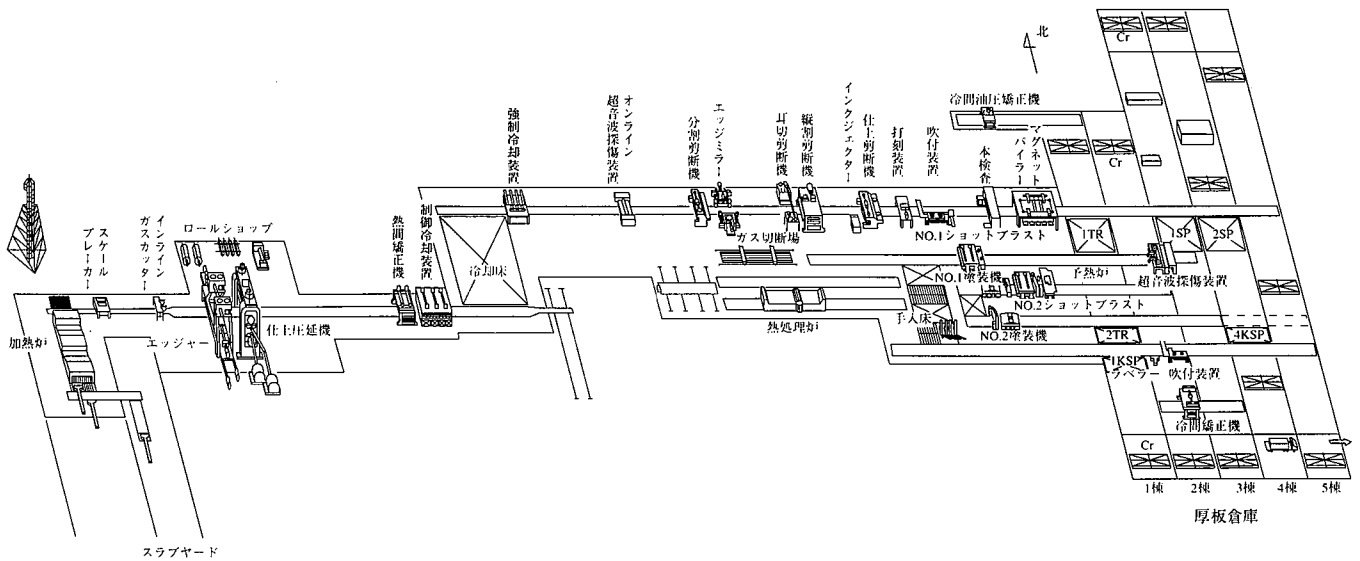


図1 大分製鐵所厚板工場レイアウト

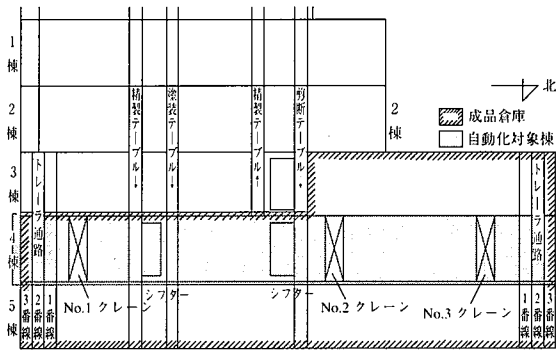


図2 厚板倉庫設備概要(大分製鐵所)

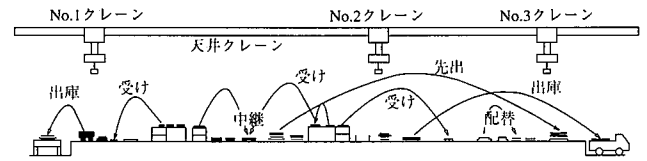


図3 厚板倉庫作業概要

(2) 複数台クレーンの自動運行制御技術

1) 複数台クレーンの運行過程で生じる相互干渉の発生頻度を低減させ、1サイクル当たりの作業(荷吊り~搬送~荷降ろし)を最小時間で完結する高効率の運行制御技術。

表1に主要課題と開発技術の概要について記す。

表1 主要課題と開発技術概要

開発課題	開発技術の概要	開発機器・装置	
1.自動吊り選別制御技術	(1) リフマグ励磁電流制御	・吊り選別時点で鋼板に必要なかつ十分な吸着力を作用させる電流設定制御技術(吸着力特性モデル) ・吊り上げ瞬間に発生する鋼板の撓みによる吸着力の減衰や床面/リフマグ間のレベル差による吸着力の変動を補償して吊り選別性能を向上させる瞬間電流補正制御技術	・吊り上げ瞬間を検出する地切り検出器
	(2) 吊り枚数判定	・リフマグ内蔵の磁束式板厚センサーと吊り荷重により、吊り枚数及び吊り荷の状態を検出する技術	・リフマグ内蔵の磁束式板厚検出装置
	(3) リトライ制御	・救済手段として、吊り枚数の過不足に応じて超過枚数の切離しや不足枚数の再吊り上げを行う技術	
2.複数台クレーンの自動運行制御技術	(1) 作業命令作成システム	・作業命令の適切性を評価する関数を導入し、稼働率の偏りや相互干渉を回避する命令発行システム	
	(2) 運行管理システム	・作業種別(受入れ, 出荷, 配替え)の優先度やクレーン間の相互干渉による時間損失を考慮して最大効率下での運行を可能とする運行管理システム	
	(3) 3軸同時駆動制御	・作業の起点(荷吊り)~終点(荷降ろし)に至る最短ルートを決定制し、巻上げ/走行/横行駆動を同時に実行するクレーン駆動制御技術	

3. 厚板倉庫クレーン自動制御システム

3.1 自動クレーンシステム構成

本開発技術を適用したクレーンの自動運転システム構成を図4に示す。大別すると、作業命令作成・現品座標管理及び吊り枚数選別電流設定計算を行うオンライン計算機とクレーン運行管理を行う群管理計算機(MAC: Multiple Automatic Crane Controller)、及び自動吊り選別制御/駆動制御(巻き, 走行, 横行)を行う3台のCLP(Crane Local Processor)により構成されている。これら各設備間の伝送は、オンライン計算機とMACはモデムで、MACとCLPは誘導無線によって接続されている。

3.2 鋼板自動吊り枚数選別制御技術

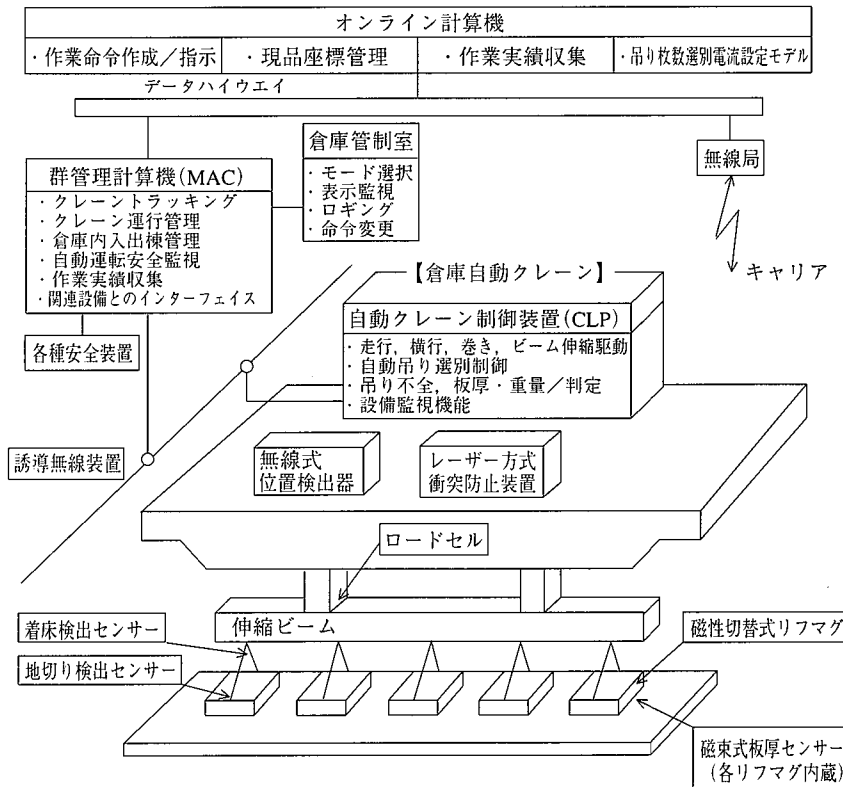
従来の鋼板吊り枚数選別作業では、吊り上げられる鋼板のサイズ及び枚数から使用するリフマグ個数とリフマグに流す電流値をクレーンオペレータが決定し、吊り上げられた鋼板が指定された枚数であるかの確認は鋼板重量計測器(以下ロードセルと称す)によって

行われていた。又、吊り上げ対象材の中に低重量の鋼板が混在し、ロードセルでの判定が困難な場合には、作業者が目視確認する非効率な方法を取っていた。本吊り枚数制御技術の構築にあたっては、表2に示すように、(1)高い初回成功率を確保するリフマグ励磁電流制御、(2)吊り上げ枚数・吊り上げ状態を確認する吊り枚数判定、(3)初回吊り不成功時の救済手段としてのリトライ制御、の3要素技術を核として開発が進められた。

3.2.1 リフマグ励磁電流制御

吊り枚数選別の基幹となるリフマグ吸着力特性モデルは、実機の極性変換型リフマグ^{2,3)}を対象にオフラインで板厚や吊り枚数等を変化させ、電流と吸着力の関係を測定し定式化した。図5に吊り枚数選別の原理及び吸着力特性実測の一例を示す。実測から得られた知見としては、例えば、

- 1) n枚目の板厚 t_n が同一で、n-1枚目までの合計板厚と枚数が同じであれば、個々の板厚と板幅の構成差は影響しない
- 2) n-1枚目までの合計板厚が同じであっても、その枚数が異なれば



自動化クレーン設備仕様

項目	No.1/No.3クレーン	No.2クレーン
定格吊り荷重	20t×1ビーム	15t×2ビーム
スパン	32.6m	32.6m
揚程	4.0m	4.0m
ビーム伸縮範囲	5.2m~11.5m	5.2m~11.5m
リフマグ個数	5個/ビーム	4個/ビーム
速度	走行	120m/s
	横行	40m/s
	巻き	10m/s
	伸縮	63m/s

図4 クレーン自動運転システム構成

表2 自動吊り選別制御を構成する要素技術

自動吊り選別制御を構成する要素技術		開発のポイント	
(1)リフマグ励磁電流制御	吸着力特性モデル	高性能な吊り選別性能	リフマグ吸着力-励磁電流特性からベース電流設定
	瞬間電流補正制御		鋼板撓みによる吸着力特性変動補償
	リフマグ個別電流制御		レベル差によるリフマグ分担荷重変動補償
(2)リトライ制御	地切り検出センサー	リフマグの地切り順検出	
	磁極変換式リフマグ	リフマグ吊り選別性能向上(当社/住友重機共同)	
(3)吊り枚数判定	電流再設定制御	吊り不足: 次回吊り電流を再設定	
	電流漸減制御(切離し制御)	吊り過ぎ: 電流を漸減して過剰枚数切離し	
	磁束式板厚センサー	磁束式板厚センサーと荷重による二重検定で信頼性向上	

鋼板間の微小なエアギャップの増加により吸着力が低下する(図6参照)などがある。これらの知見から吸着力は、吊り枚数 n 、 $n-1$ までの合計板厚 t_{n-1} 、 n 枚目の板厚 t_n 、極性別の数値テーブルの形で整理した。但しリフマクの幅より狭い鋼板がある場合には吸着力テーブルで求めた電流値に幅狭のある位置によって補正を行っている。

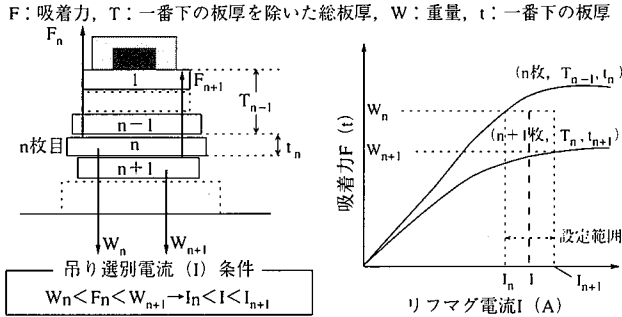


図5 吊り枚数選別の原理と吸着力特性図

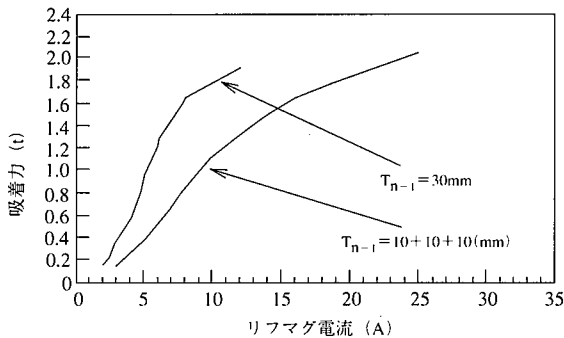


図6 吸着力特性図($n-1$ 枚目までの合計板厚が同一で枚数の異なったケース)

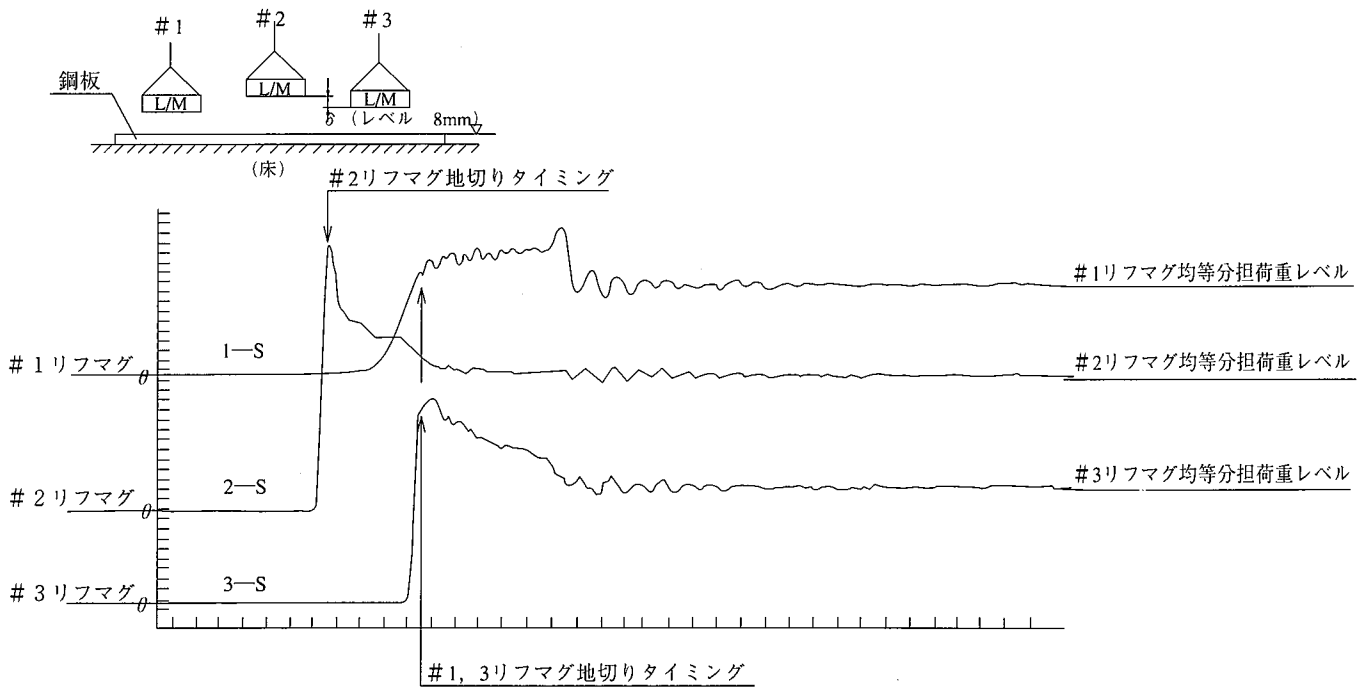


図7 リフマクにレベル差をつけた場合の地切り順荷重変化

鋼板を吊り上げる過渡期には、床面あるいはリフマクのレベル差や鋼板の撓みにより吸着力が変動する。実機クレーンには吊りビームに4~5個のリフマクを装備しており、鋼板を吊り上げる場合、吊りビームの撓み等から複数のリフマクのレベルが必ずしも一様とされない。図7は鋼板のレベルを均一にし、#1~#3リフマクの間担荷重を均等になるようリフマクピッチを設定し、#2リフマクにレベル差(8mm)を付けて吊り上げを行った結果である。#2リフマクの地切り瞬間には均等分担荷重よりかなり大きな荷重を受けており、#1、#3が地切りするに従って#2リフマクの間担荷重は徐々に減り均等分担荷重レベルに落ち着くことが分かる。

又図8には板厚8mmの1枚吊りの鋼板撓みと撓みによって生じるエアギャップを取るための設定電流の実測値を示す。最大500mmの撓みでは設定電流倍率は約5倍とかなりの補正が必要となる。これら吊り上げ過渡期に生じる外乱に対処するため、鋼板が地切りするタイミングをリフマク個別にとらえ、吸着力テーブルで設定された電流に補正を加える瞬間電流補正制御を開発した。

図9に瞬間電流補正制御の概要を示す。撓み補正電流と地切り順補正電流の二つを吸着力テーブルで設定された電流に印加し、リフマク毎に個別制御している。鋼板の地切りタイミングは、リフマク毎に装着された地切りセンサーで検知し、地切りの順に補正電流を付加している。又撓み補正電流は、板の撓み理論に基づく幅長さ方向の高精度な撓み計算により補正電流を厳密に予測している。

3.2.2 吊り枚数判定とリトライ制御機能

図10に吊り枚数判定とリトライ制御の概要図を示す。吊り上げを行った鋼板の枚数確認は、従来からのロードセルと各リフマクに内蔵した磁束式板厚センサー³⁾の二重検定方法を採用し信頼性を向上させた。

図11に磁束式板厚センサーによる板厚検出特性例を示す。検出誤差は ± 2 mmであり、最小成品厚8mmの判別に十分適用可能である。吊り状態の正常判定は、重量検定と板厚検定共に満足した場合

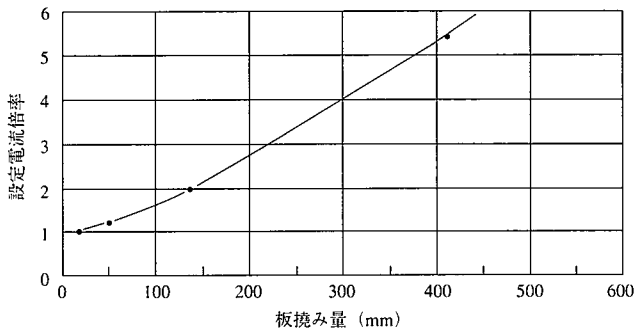


図8 撓みと設定電流倍率

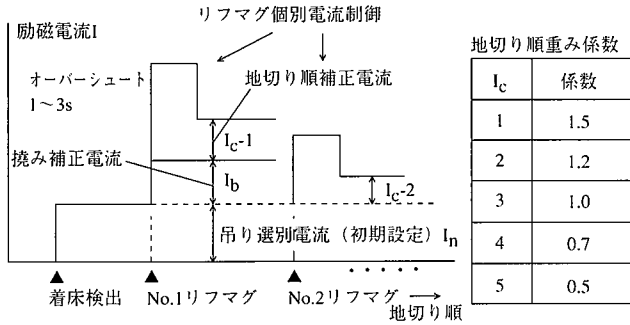
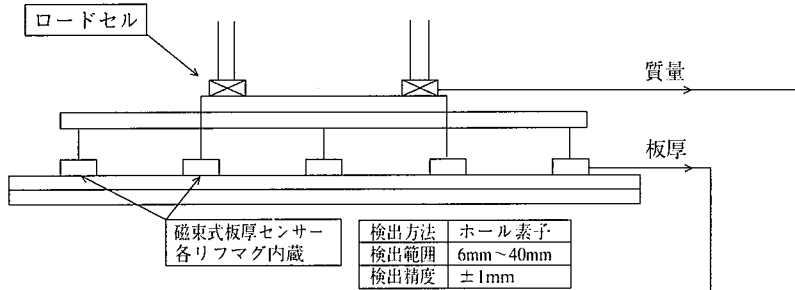
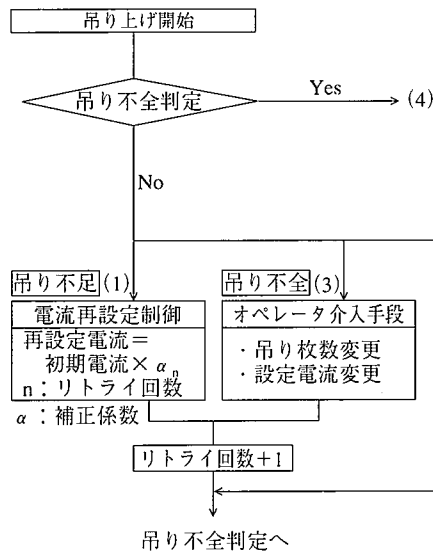


図9 瞬間電流補正制御

(a) 吊り枚数判定機器構成



(b) リトライ制御方法



(c) 吊り枚数判定

		質量判定			
		小	正	大	
板厚判定	小	(1)	(1)	(3)	(1)吊り不足
	正	(1)	(4)	(2)	(2)吊り過大
	大	(3)	(2)	(2)	(3)吊り不全 (4)作業完了

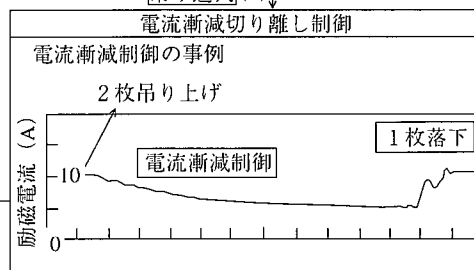


図10 吊り枚数判定とリトライ制御

であり、どちらかが小さければ吊り不足、大きければ吊り過大、互いに逆であれば吊り不全として判定する。判定結果が吊り不足の場合は、一度巻き下げた後、励磁電流設定値を増加させて再度つり上げを行う。吊り過大の場合は、吊り上げたまま制止させて振動等の小さい状態で励磁電流を漸減させ超過分の鋼板を落下させる。又、落下させる制御が鋼板の組合せから比較的容易な場合は図11(b)に示すようにリフマグへの電流指令を瞬時に弱める制御(電流瞬時カット制御)を適用している。更にこれらの制御が困難な場合は、リフマグへの磁束指令を徐々に弱める制御を適用している。又吊り不全状態は図12の如く多様であるが、この場合はリトライ機能を働かせずクレーン監視オペレータの判断に委ねている。

表3にはこれらリフマグ励磁電流制御技術を実機で大量確性した結果を示す。初回吊り選別成功率は90%以上、リトライを含めればほぼ100%であり、実用上十分な吊り選別性を有していることが実証できた。

3.3 複数台クレーンの自動運行制御技術

複数台のクレーンを高効率で運行するには、作業命令が出て終了する時間(以下サイクルタイムと称す)を最小にすることが肝要である。同一命令をクレーン単体で与えた場合、自動と有人のサイクルタイムは、ほぼ同じか自動の方が若干早い結果が得られた。しかし、複数台のクレーンで運用した場合、サイクルタイム実測平均は、有人運転225秒/命令に対して自動運転294秒/命令と約1.3倍

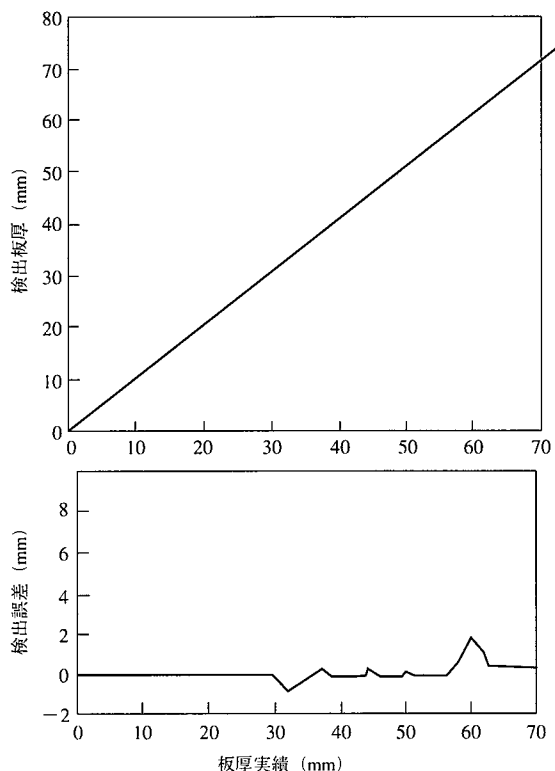


図11(a) 板厚検出特性例

のタイムロスが発生した。この差は、オンラインからCLPまでの計算機群と有人との知的判断の差であり、前述した3点の課題(1)最適作業命令作成システム、(2)高効率運行管理システム、(3)巻き上下、走行、横行3軸同時駆動制御)を解決する自動運行制御システムの開発が必要となった。

3.3.1 最適作業命令作成システム

従来のクレーン作業命令は、作業優先度と大まかに割り付けられたクレーン可動範囲のテーブルに基づいて作成され、出された命令に対し、クレーン干渉が発生した場合はオペレータの判断に委ねられていた。本開発では、従来からある作業優先度の他に適合度、集

正常時	吊り不全状態			
	片吊り	吸着不良	撓み	共吊り
	一枚吊り	複数枚吊り		板同士 の吸着 (選択不良)
	板端部または中央部のたれ、撓み (落板、衝突の危険性大)			

図12 吊り不全状態

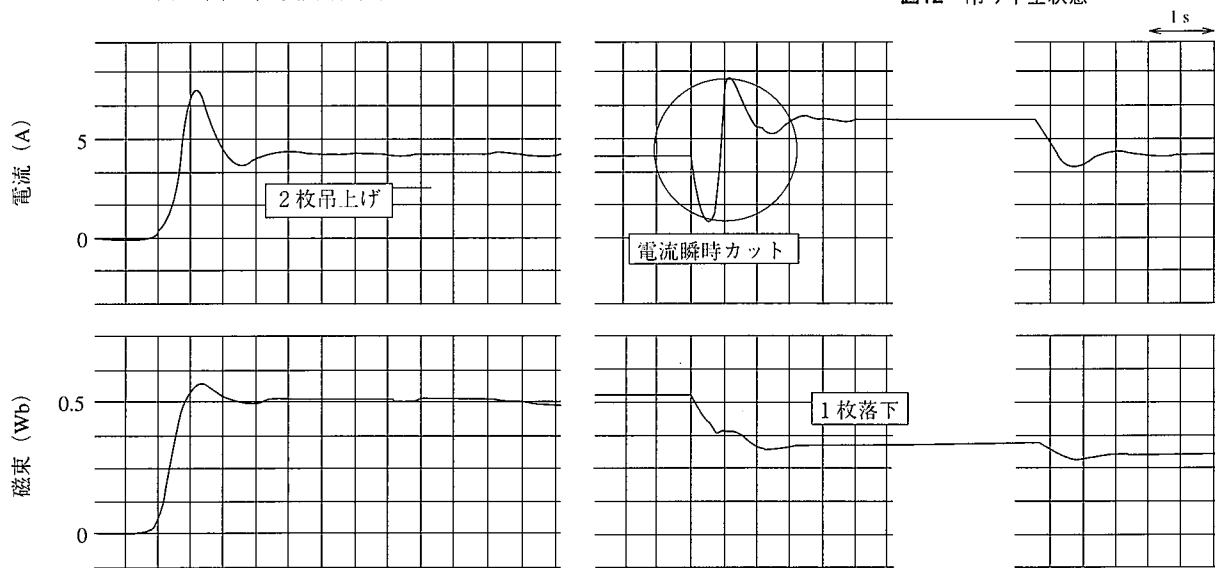


図11(b) 電流瞬時カット制御

表3 自動吊り選別成功率

初回吊り成功件数B(件)	6 496
リトライ発生件数C(件)	554
吊り不足(件)	81
吊り超過(件)	473
リトライ成功件数D(件)	551
処理件数A(件)	7 051
初回吊り成功率B/A(%)	92.1
リトライ成功率D/C(%)	99.5
全体選別成功率(B+D)/A(%)	99.96

初回吊り成功率内訳 1992年10月～1992年11月

吊り 枚 数 (枚/回)	構成比(%)		初回成功率(%)
	1	2	
1	39.5	100	
2	32.7	91	
3	16.9	83	
4	8.4	77	
5	3.4	71	
合計	100	92.1	

中度、干渉度という評価基準値を新たに作成し、これらを総合的に評価する関数式により命令を作成した⁴⁾。以下に適合度、集中度、干渉度の概要について簡単に述べる。

(1)適合度：適合度とは、作業命令の移動範囲とクレーンの位置関係による可動範囲の適合性を評価する基準である。図13及び表4に示すように設備の配置(テーブル、出庫ゾーン等)を基本として倉庫内を八つのゾーンに区分し、ゾーン別の作業命令(From位置~To位置)に対するクレーンの可動優先度を表すテーブルを作成した。表中の値は熟練運転手の経験を基に決定したものであり、この評価値が大きいクレーン程その作業を選択しやすくなる。

(2)集中度：適合度だけでは、あるクレーンだけに作業が集中する可能性があるため、集中度という評価基準を導入した。集中度とは優先作業発生件数と自クレーンの可動優先命令件数の割合を表したものであり、この値が大きいほど集中度は高くなる。

(3)干渉度：干渉度とはこれから発生する命令と既に発行された命令との干渉量を予め予測評価することにより、深い干渉を未然に防止するための評価基準である。図14及び表5にその一例を示す。干渉の度合いを定量的に評価するために、作業開始位置同士の干渉距離From1 From2, 終了位置同士の干渉距離To1To2, 開始(又は終了位置)と相手側の終了(又は開始位置)From1 To2(To1From2)の四つの干渉距離と、干渉状態の重みによって計算する。干渉距離が大きく且つ干渉状態が深いほど干渉度は高くなる。

これらの評価度数を(1)式により算出し、評価基準値を上回った時、命令が作成される。

評価関数：

$$a \times \text{優先度} + b \times \text{適合度} / (c \times \text{集中度}) - d \times \text{干渉度} \geq \text{評価基準値} \dots (1)$$

a~d：調整係数

3.3.2 高効率運行管理システム

命令が発行された後の優先クレーンの決定は、一種の計画問題である。代表的な解法である探索法を用いMACで試みたが、計算負荷が大きく実用化が困難であったため、命令作成システム同様、簡易的な評価関数法を用いた。

評価関数の要素としては、(1)作業別の優先度(w)、(2)命令を受けてからの経過時間(T)、(3)目標までの移動距離(L)をパラメータ

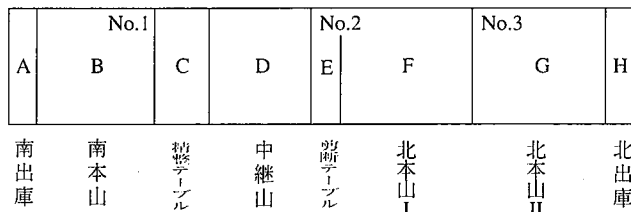


図13 倉庫内のゾーン分け

表4 適合度一覧(抜粋)

From	A			B			C			H		
	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3
A	64	1	0	64	4	0	40	3	0	0	1	0
F	24	4	0	24	15	6	15	32	13	0	4	48
G	16	3	0	16	12	7	10	24	21	0	3	56
H	0	1	0	0	4	8	0	8	24	0	1	64

として(2)式で表した。

$$\text{評価関数} : J = e \times w + f \times T + g \times L \dots (2)$$

e~gは調整係数であるが、作業別の優先度調整係数については緊急作業のみ最優先となるよう調整した。

3.3.3 巻き、走行、横行3軸同時駆動制御

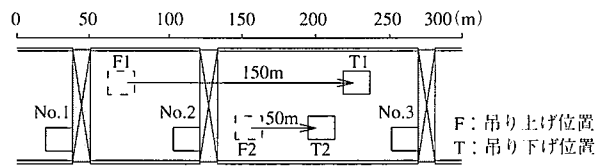
図15に3軸同時駆動制御の概要図を示す。詳細説明は省略するが、作業の起点から終点に至るまでの搬送時間最小となる最短ルートオンラインで計算し、巻き・走行・横行を同時にすることで作業時間の短縮を図った⁵⁾。

図16には、これら自動運行制御システムを適用し実機で大量確性した結果を示す。従来、複数台クレーンの運行管理はAI等の高度な知的判断システムが必要と考えられていたが、簡単な評価関数法で熟練オペレータと同等以上の高効率運行を実現した。

4. 安全対策

上記主要開発技術の他にも、安全保障、設備保護の観点から、自動クレーン運転中に作業員が誤って入棟することがないように、各種の異常進入検知及び警報装置を倉庫内に網羅した。又クレーン間で相互の位置認識をすると同時に、異常接近時の緊急停止機能を装備し、クレーンの衝突が発生しないよう万全の安全対策を施した。

図17に自動クレーン適用対象倉庫内の安全対策を示す。



No.1 No.2クレーン間の干渉例

干渉組合せ	干渉マップ				干渉距離	備考
	F1	F2	T2	T1		
A F1-F2					0	独立作業可
B F1-T2					0	独立作業可
C T1-F2					50m	No.1作業待
D T1-T2					25m	No.2退避

干渉度 = (FF+TT+(TF+FT) × α) × N
 α：調整係数 (FromとToの干渉に重み付け)
 N：干渉状態係数 (干渉のきびしさを表現 上記例 N=2)

図14 干渉度例

表5 干渉状態係数一覧表 (No.1とNo.2クレーンの例)

N	干渉パターンの例		干渉状態
0	No.1 T ← F	No.2 F → T	干渉無し
1	No.1 T ← F	No.2 F → T	小
2	No.1 F → T	No.2 F → T	中
3	No.1 T ← F	No.2 F → T	大
4	No.1 F → T	No.2 T ← F	全て干渉

N：干渉状態係数

干渉パターンは計14パターン存在

運行途中で発生する全ての干渉を網羅して干渉の度合いを定量化

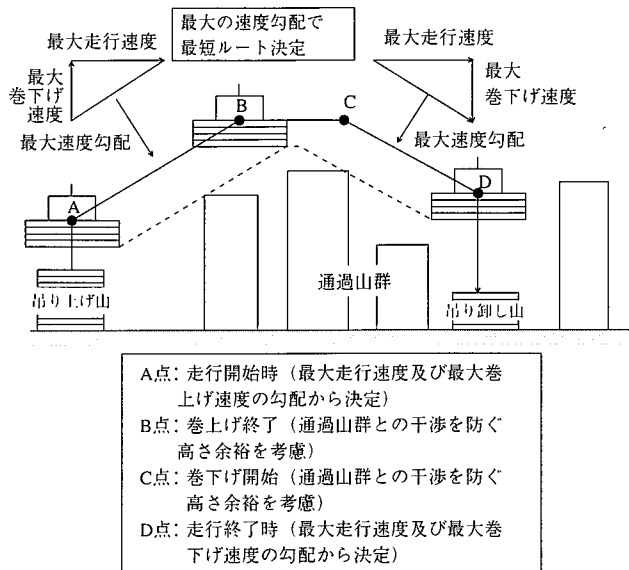


図15 3軸同時駆動制御

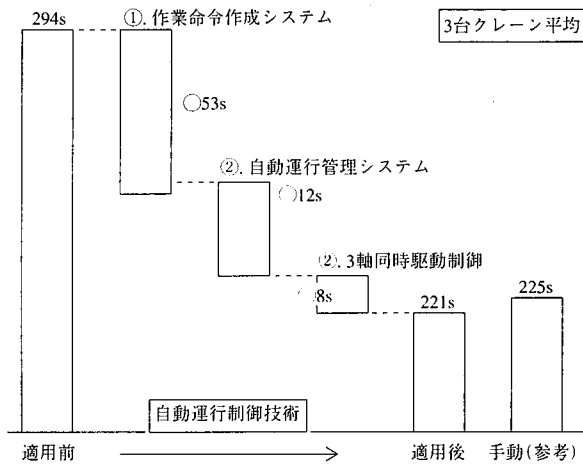


図16 サイクル時間(1作業の処理に要する時間)の推移

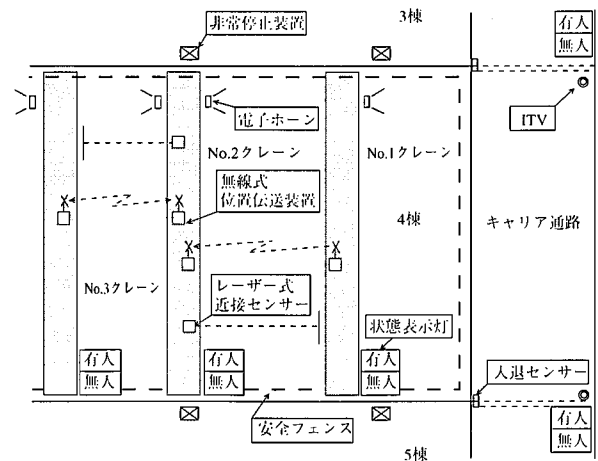


図17 自動倉庫安全装置配置図

5. 結 言

リフマグクレーンの自動化を推進する上で主要課題であった、(1)鋼板の自動吊り枚数選別制御技術、(2)複数台クレーンの自動運行制御技術を開発した。

この結果、吊り枚数選別精度の向上、有人並の運行効率を確保するに至り、大分、君津両製鐵所⁶⁾の大規模厚板倉庫を無人化することに成功した。

参考文献

- 1) 中野鉄也 ほか：材料とプロセス、5、1572(1992)
- 2) 山口義弘 ほか：住友重機械技報、25(75)、56(1977)
- 3) 山田晃正 ほか：住友重機械技報、28(81)、93(1979)
- 4) 東 征治 ほか：日本鉄鋼協会共同研究会制御技術部会、108-3-2(1993)
- 5) 大石 清 ほか：材料とプロセス、6、502(1993)
- 6) 中目政孝 ほか：材料とプロセス、5、1573(1992)