

# 圧縮機自動制御装置“GROUPROL”

## Multiple Compressor Control System “GROUPROL”

生産工場の基本的な動力源として使用されている空気圧縮機システムの省エネルギーと、自動化運転が可能な圧縮機自動制御装置“GROUPROL”は、多くのユーザーに称揚されており、はん(汎)用形から複雑な空気圧縮機システムにフレキシブルに対応できる高機能形まで、幅広いニーズがでてきている。本論文では、省エネルギー・自動化の基本と複雑なシステムに対し圧力と負荷風量の予測演算法を導入した新制御方式の概要について述べ、更にシリーズ化したグループロールの実施例、適用分野と導入効果、応用例について紹介する。

渡辺 能康\* *Yoshiyasu Watanabe*

柴田 易蔵\* *Yôzô Shibata*

小西美津司\* *Mitsushi Konishi*

高橋松男\* *Matsuo Takahashi*

### 1 緒 言

オイルショック後の省エネルギーブームにより、「省エネルギー」は工場の生産ライン機器やユーティリティ機器に要求される基本項目として定着してきた。更に、最近の円高による合理化経営の一環として、省力化、機器・システムの長寿命化、メンテナンスフリー化などを含んだ広意義な省資源技術が求められている。

工場の生産ラインの動力源としての空気圧縮機システムは、簡単にライン制御の構成ができ、応答性が良く、かつ環境の汚染がないなどの特長により広く普及しており、その消費電力は工場全体の大きな割合を占めている。日立製作所では、これら空気圧縮機システムの省エネルギー運転と、自動化運転による省力化に早くから取り組み、これらを目的とした制御装置「グループロール」(“Hitachi Multiple Compressor Control System “GROUPROL”)を製品化して、エアユーティリティの省エネルギー・省力運転に先鞭をつけ、数多くの納入実績を持っている。

しかし、最近の経済成長の鈍化による民間設備投資の停滞や、石油価格の低下がもたらした電力単価の低減などにより、省エネルギー意識がやや低迷してきている。エアユーティリティの潜在的な省エネルギーニーズにこたえるには、イニシャルコストの低減といっそうの省エネルギー効果の向上が必要で、投資回収期間の短縮が大きな課題となっている。

この課題に対処して、日立製作所では、デジタル演算によるはん用形グループロール“GRL-SX”を1982年に発売以来多くの顧客に賞用されてきている。このたび、不定期的に变化する負荷に対し、圧力変動の予測演算法を導入したマイクロコンピュータ搭載形のはん用グループロール“GRL-C6”を製品化し好評を得ている。この“GRL-C6”に加えて、負荷

風量<sup>\*1)</sup>演算法の導入によって圧力変動幅を従来の約50%に縮小化し、圧縮機の最適組合せ制御を可能にした高機能形グループロール“GRL-CS”を開発した。以下、省エネルギー運転法と新制御方式の概要、及びシリーズ化したグループロールの実施例、適用分野と導入効果、応用例について述べる。

### 2 空気圧縮機システムの省エネルギー運転

#### 2.1 一般的な空気圧縮機のシステム構成

図1に示すように、複数台の圧縮機 $C_1 \sim C_n$ によって加圧された圧縮空気は、集合配管を経由し空気槽へ集められ、配管によって空圧機器へ供給される。一般的に、始動器から空気槽までは工場の一角に集合設置され、空圧機器は工場内に分散設置されるため、配管は工場の端から端まで引き回される。したがって、より大きな省エネルギーを実現するためには、次に述べる圧縮機、配管及び空圧機器の特性に基づく3種の基本的な制御方法を導入する必要がある。

#### 2.2 省エネルギー運転の基本的制御方法

##### (1) 台数制御(アンロードロスの排除)

図2(a)に圧縮機の吐出し風量と消費動力の関係<sup>1)</sup>を示す。圧縮機は、アンロード状態<sup>\*2)</sup>でも動力を消費し、その値は一般的に定格動力に対しレシプロ形、ドライスクリーク形で約20%、オイルスクリーク形では約60%にもなる<sup>2)</sup>。アンロード状態を検出し圧縮機を停止することによって、このむだ動力を排除できる。

##### (2) 圧力制御(余剰圧力の排除)

図2(b)に圧力と負荷風量、圧縮機吐出し風量及び圧縮機消費動力の関係を示す<sup>1)</sup>。一般的に、送気圧力幅は広く、かつ最低必要圧力に対し余裕を持って設定されているため、圧力幅

\*1) 負荷風量：空気圧縮機システムの負荷である空圧機器で消費される空気量の総和を言う。

\*2) アンロード状態：圧縮機を運転中、容量調整器を制御して吐出し風量を零とした状態を言う。

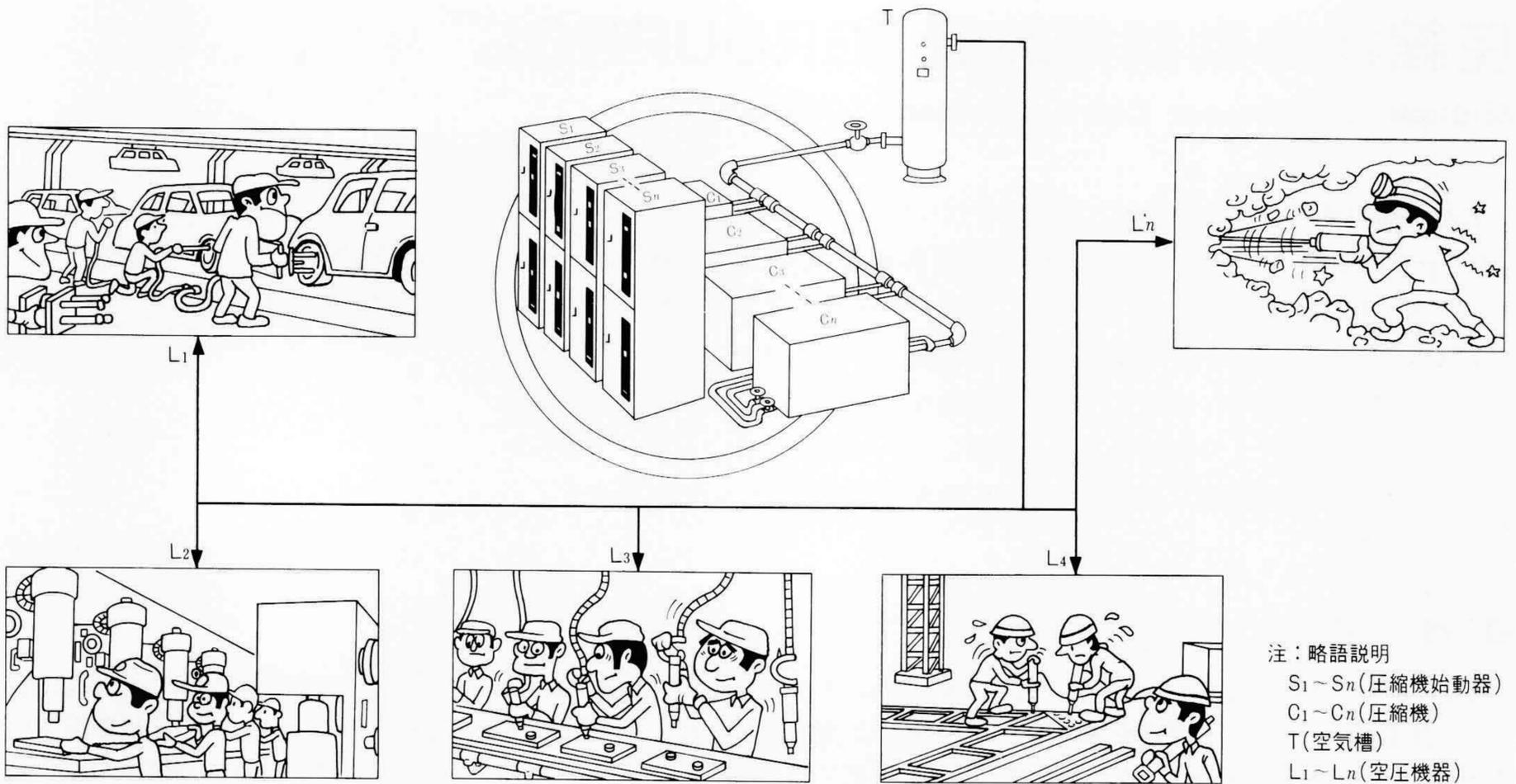


図1 空気圧縮機システム構成 圧縮機群、配管及び空圧機器群から成り、各要素の特性に基づくトータルな省エネルギー運転制御法が必要である。

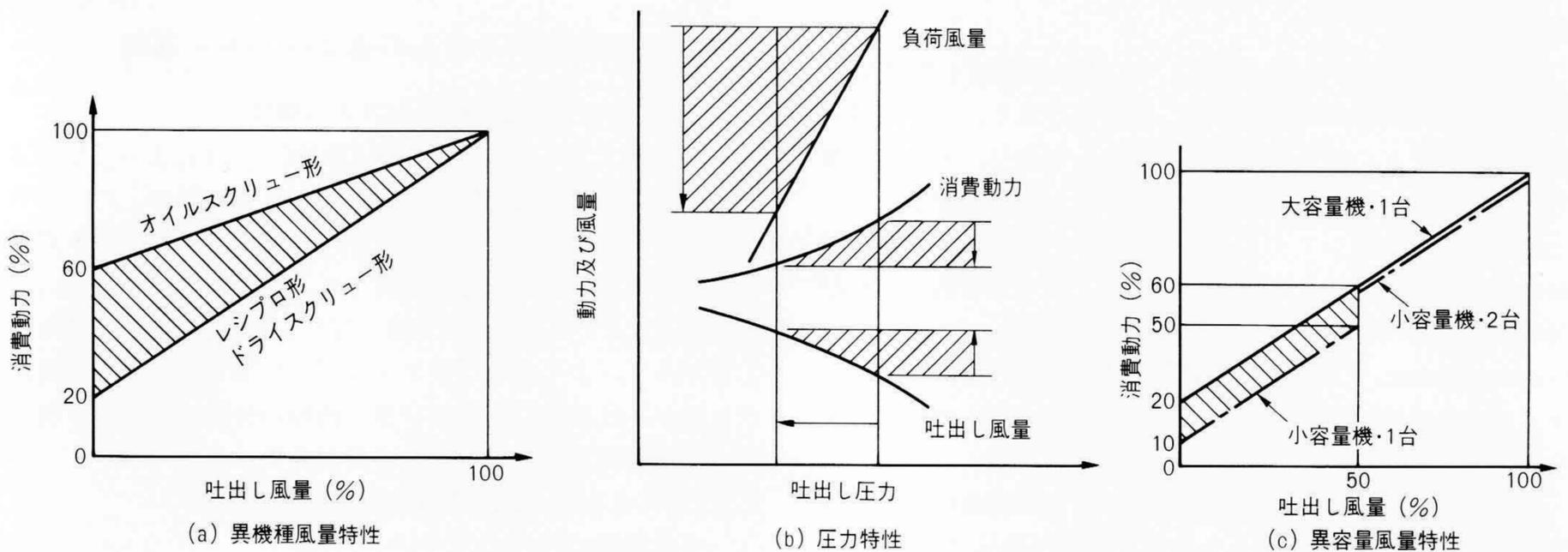


図2 エアユーティリティ特性 圧縮機、空圧機器の特性から、有効な省エネルギー運転法を見いだす。(c)は、レシプロ形圧縮機で小容量機が大容量機の半分の容量の場合を示す。

の縮小と負荷急増時の圧力低下を抑制することによって、常時送気圧力を最低必要圧力に近づけると、圧縮機消費動力の低下、圧縮機吐出し風量の増加及び負荷風量の減少によって、相乗的な省エネルギーが図れる。

(3) 高効率制御

図2(a), (c)に示した圧縮機の吐出し風量と消費動力の関係に見るように、機種及び定格容量が異なると同一吐出し風量に対応する消費動力に差が現れる。したがって、効率の良い圧縮機を優先的に運転し、アンロード特性<sup>※3)</sup>の良い圧縮機に部分負荷<sup>※4)</sup>制御を担当させることで、システム全体の消費動

力を低減できる。

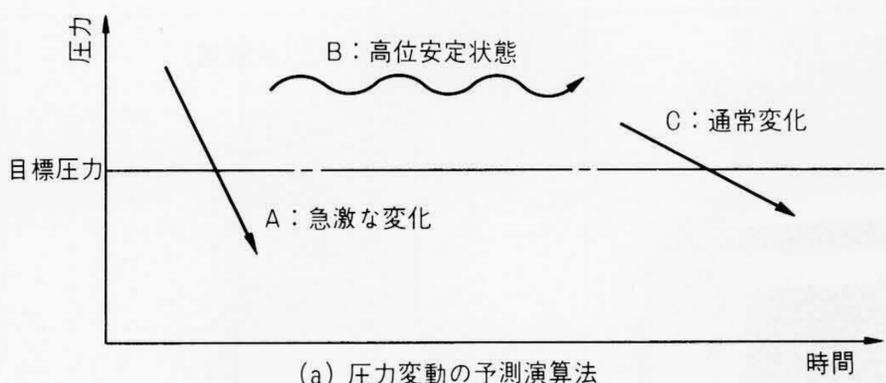
3 空気圧縮機の新制御方式

3.1 圧力変動の予測演算法

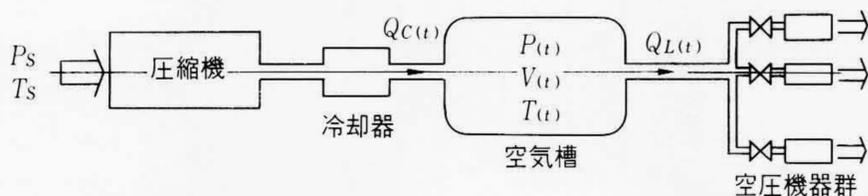
圧力変動の微分値及び目標圧力に対する偏差の積分値を演算し、図3(a)中のAで示すような急激な負荷変動による圧力異常変動、及び同図中Bで示すようなエネルギー消費の高い圧力の高位安定状態の発生を予測することによって、2.2節に示した圧力制御法の大幅な改善が可能である。

※3) アンロード特性：アンロード状態での消費動力特性を示し、消費動力が定格動力に比べて小さいほど良い。

※4) 部分負荷：負荷風量のうち変動分を示す。変動しない部分は、ベース負荷と呼ぶ。



(a) 圧力変動の予測演算法



注：記号説明

- $P_s$ ：吸込気体の圧力 (kPa[abs<sub>1</sub>]),  $T_s$ ：吸込気体の温度 (K)
- $Q_C(t)$ ：吐出し風量 (m<sup>3</sup>/min),  $Q_L(t)$ ：負荷の消費風量 (m<sup>3</sup>/min)
- $P(t)$ ：吐出し圧力 (kgf/cm<sup>2</sup>[abs<sub>1</sub>]),  $V(t)$ ：システム配管容量 (m<sup>3</sup>)
- $T(t)$ ：吐出し空気温度 (K)

(b) 負荷風量演算法

図3 新制御方式説明図 本演算法を基にした新制御方式によって、より大きな省エネルギーが実現する。

### 3.2 負荷風量演算法

負荷風量の検出方法として、流量計を設置する方法が挙げられる。しかし、価格及び既設システムへの取付けに要する工期・工数などを考えると実用的ではない。そこで、本制御方式では、図3(b)に示した一般的空気系統図で負荷風量の大きさが吐出し圧力の変化量として現れることに着目し、比較的安価で取付けの容易な電子式圧力伝送器を用い、詳細な誘導は省略するが、次式によって負荷風量を演算する<sup>3)</sup>。

$$Q_L(t) = Q_C(t) - \frac{T_s}{P_s} \cdot \left\{ \frac{P(t+\Delta t)}{T(t+\Delta t)} - \frac{P(t)}{T(t)} \right\} \cdot \frac{V(t)}{\Delta t} \dots (1)$$

本式による負荷風量演算によって、2.2節に示した圧縮機省エネルギー運転法の大幅な改善が可能である。

### 3.3 新制御方式による効果

前述した圧力変動の予測演算法及び負荷風量演算法を用いた台数制御、圧力制御及び高効率制御の改善効果を表1に示す。

## 4 グループロールの実施例

### 4.1 シリーズ化と適用

以上、空気圧縮機システムの省エネルギー運転の基本制御方法と新制御方式の効果などについて述べた。これらの機能

表1 新制御方式の改善効果 台数・圧力・高効率制御について、従来方式及び新制御方式のポイントと比較を示す。

項目		従来制御方式	新制御方式	比較・説明図																																		
台数制御	起動・停止指令	圧力が規定値以下で、1台ずつ起動、規定値以上で1台ずつ停止	負荷風量演算により、負荷変動に対応する台数分を起動・停止																																			
	起動・停止順序	ロータリ方式	同左																																			
	圧力変動幅	定常時 ±10 kPa(0.1 kgf/cm <sup>2</sup> ) 風量変動時 ±25 kPa(0.25 kgf/cm <sup>2</sup> )	同左 ±10 kPa(0.1 kgf/cm <sup>2</sup> )																																			
圧力制御	オンロード・アンロード指令	制御目標圧力下限値以下でオンロード、上限値以上でアンロード	圧力変動の予測により、制御目標圧力下限・上限値に達する前にオンロード・アンロード																																			
	オンロード・アンロード順序	ロータリ方式	同左																																			
	圧力変動幅	定常時 ±10 kPa(0.1 kgf/cm <sup>2</sup> ) 風量変動時 ±20 kPa(0.2 kgf/cm <sup>2</sup> )	同左 ±10 kPa(0.1 kgf/cm <sup>2</sup> )																																			
高効率制御	運転の組合せ	圧縮機群を、効率・容量によりグループ分割し、高効率機又は小容量機を優先的に運転・容量調整させる。	負荷風量演算により、前もってマイクロコンピュータに格納した最適組合せモードを読み出し、圧縮機を運転する。	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">負荷風量</th> <th colspan="2">圧縮機容量</th> <th colspan="2">圧縮機機種</th> </tr> <tr> <th>吐出し風量</th> <th>動力</th> <th>機種</th> <th>効率</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>Q_{L0}</math> 小</td> <td><math>Q_{D1}</math></td> <td>小</td> <td>レシプロ ドライ スクリー</td> <td>大</td> </tr> <tr> <td><math>Q_{Lm}</math> 大</td> <td><math>Q_{Dn}</math></td> <td>大</td> <td>スクリー</td> <td>小</td> </tr> <tr> <td colspan="5">消費動力計算例*</td> </tr> <tr> <td>従来方式</td> <td colspan="4">100</td> </tr> <tr> <td>新方式</td> <td colspan="4">78</td> </tr> </tbody> </table>	負荷風量	圧縮機容量		圧縮機機種		吐出し風量	動力	機種	効率	$Q_{L0}$ 小	$Q_{D1}$	小	レシプロ ドライ スクリー	大	$Q_{Lm}$ 大	$Q_{Dn}$	大	スクリー	小	消費動力計算例*					従来方式	100				新方式	78			
	負荷風量	圧縮機容量		圧縮機機種																																		
吐出し風量		動力	機種	効率																																		
$Q_{L0}$ 小	$Q_{D1}$	小	レシプロ ドライ スクリー	大																																		
$Q_{Lm}$ 大	$Q_{Dn}$	大	スクリー	小																																		
消費動力計算例*																																						
従来方式	100																																					
新方式	78																																					
消費動力	圧縮機の組合せが制限されるため、負荷風量の全領域ではむだが発生する。	負荷風量の全領域で、消費動力を最小にできる。		<p>* 従来方式を100として比較した。 条件：レシプロ 10 kW×2, 15 kW×2, 25 kW×2 スクリー 35 kW×2 (計8台)</p>																																		

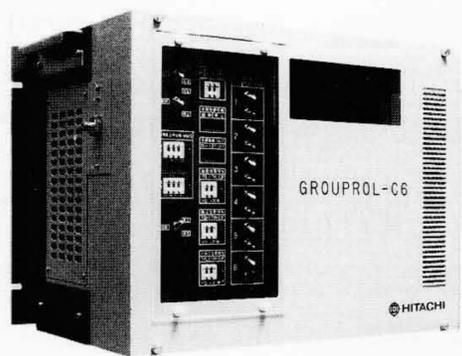
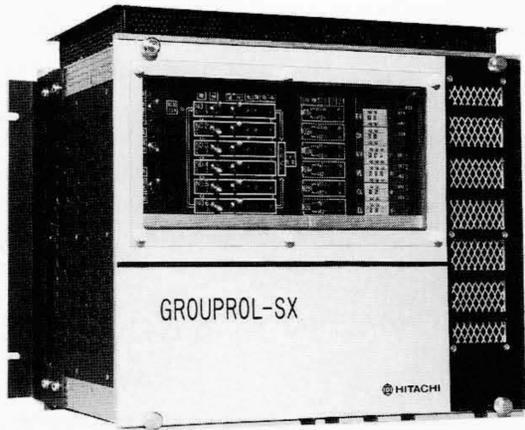
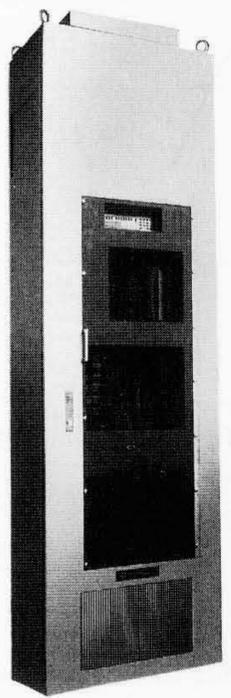
GRL-C6 (小容量)		GRL-SX (中容量)		GRL-CS (大容量)	
					
幅460×奥行280×高さ355(mm)		幅420×奥行290×高さ380(mm)		幅700×奥行400×高さ2,300(mm)	
最大制御台数	6台	6台	6台	12台	12台
制御機能	台数・圧力制御	あり	あり	あり	あり
	高効率制御	なし	オプションにあり	あり	あり
監視点数	26点	50点	50点	90点	90点
適用圧縮機	同機種同容量	同機種同容量	同機種同容量	異機種異容量	異機種異容量

図4 グループロールシリーズ 制御対象の設備規模によって、小・中容量→GRL-C6, 中容量→GRL-SX, 大容量→GRL-CSを適用する。

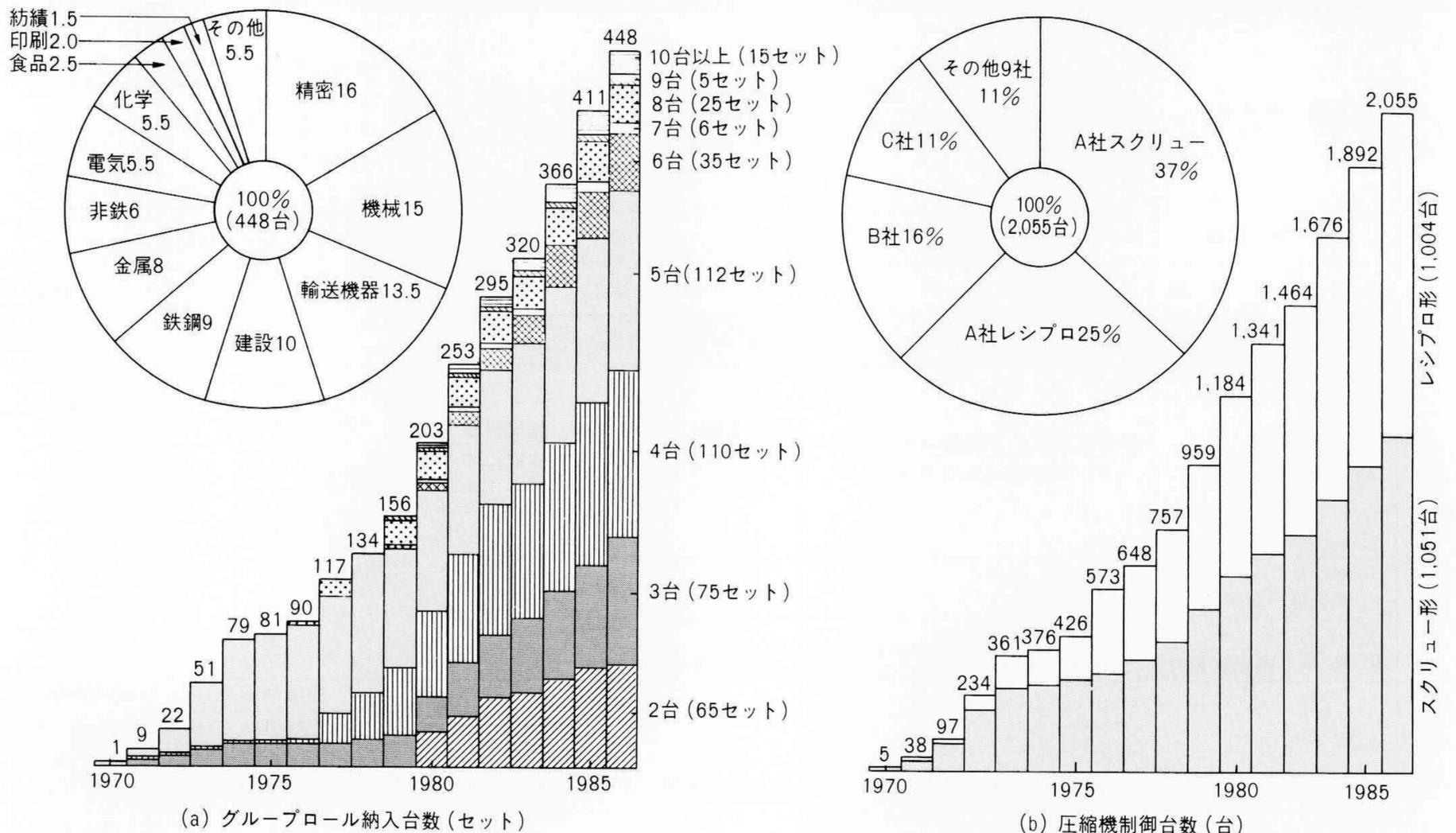


図5 グループロールの適用実績 適用産業分野の広さからは省エネルギー・自動化ニーズの広がり、また制御対象の圧縮機が広く数社に及ぶことから、はん(汎)用性に富むことが分かる。

を備えた「グループロール」を、はん用形の“GRL-SX”、“GRL-C6”と高機能形の“GRL-CS”にシリーズ化し、複雑多岐にわたる空気圧縮機システムの省エネルギー化と自動化に対応できるようにした。図4は、小容量、中容量及び大容量空気

圧縮機システムに対するグループロールの各機種の基本的な適用を示したものである。“GRL-CS”は、圧縮機制御の基本ユニットとして前述の“GRL-C6”を1～2台と、負荷風量演算及び高効率制御を行う高速マイクロコンピュータユニットをフ

フロントアクセス式にキュービクルに収納して構築している。

#### 4.2 グループロールの適用実績

1970年に日立製作所が圧縮機の制御装置としてグループロールを製作開始以来、産業の各分野に多くの納入実績を持っている。図5(a)は、1970年～1986年までに納入したグループロールの延納入台数448台を、圧縮機制御台数2台～10台以上に分類し示したものである。年度別に差はあるが、制御圧縮機台数として3台～5台が全体の約70%を占めている。適用産業分野別に分類してみると、ほとんどの業種に広く実績を持っており、省エネルギー・自動化ニーズの潜在的な深さと広がりがうかがえる。同図(b)は、グループロールがコントロールした圧縮機の延台数の年度別推移を示したものである。延圧縮機制御台数2,055台は、スクリー形とレシプロ形にほぼ均等にわたっており、またその圧縮機は日立製作所ばかりでなく、多くのメーカーの圧縮機を制御しており、グループロールのはん用性を表している。

#### 4.3 実施例と導入効果

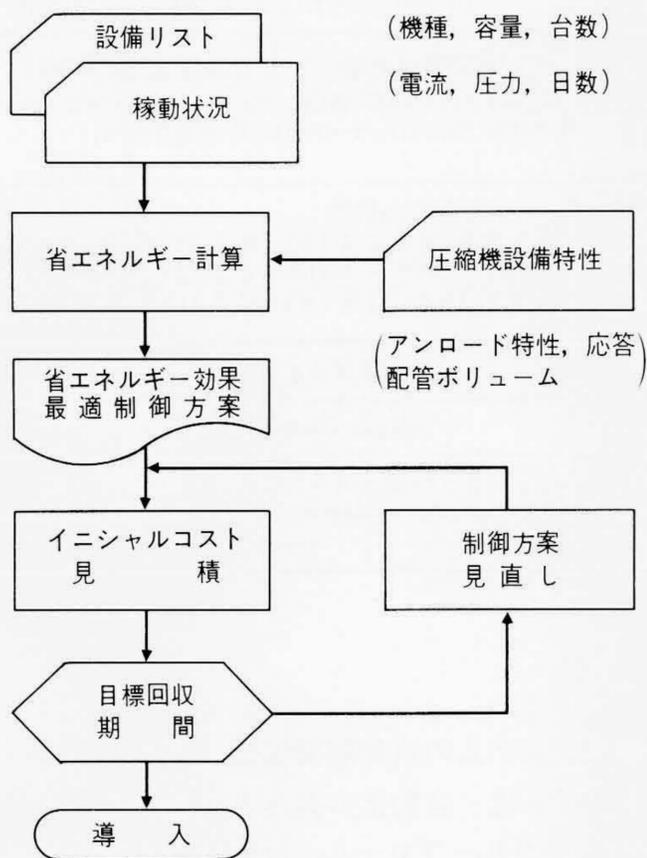
##### (1) 導入に当たって考慮すべき点

グループロールを導入して十分な省エネルギー・自動化のメリットを得るには、図6に示した導入ステップと留意点を守る必要がある。すなわち、設備の的確な情報(圧縮機仕様、台数、電流、現状圧力など)が正確な導入効果の予測に結びつき、またユーザーに最適なシステムを提供できることになる。更に、一般には、圧縮機設備は機種・容量が複雑に混在しており、制御性・信頼性向上のほかに既設設備の改造工事など、ユーザーとメーカーが一体となってローコスト化も図る必要がある。

##### (2) 具体的実施例と導入効果

表2は、75 kW×2台、150 kW×2台から成る代表的な空気圧縮機システムに、グループロールを導入した場合の具体的な導入効果を示したものである。オペレータ人数、生産規模、導入前の圧力、メンテナンスの方法などによって、その

導入ステップ



留意点

1	制御性	(1) 圧縮機の応答性 (2) 最大負荷変動と配管ボリューム
2	信頼性	(1) 自動、手動の二重化システム (2) 始動器、電動機の熱容量に適合したON-OFF頻度の選定 (3) 強電回路との保護協調 (4) ノイズ、浮遊容量障害防止 (5) 分散設置の圧損補正
3	工事	(1) グループロールの設置場所と圧力検出点の選定 (2) 始動器のワンタッチスタート化 (3) 容量調整器の電磁操作化 (4) 予備機保有台数 (5) 中央監視装置とのリンケージ

図6 導入ステップ グループロール導入計画で、設備の的確な情報をつかむことが重要である。

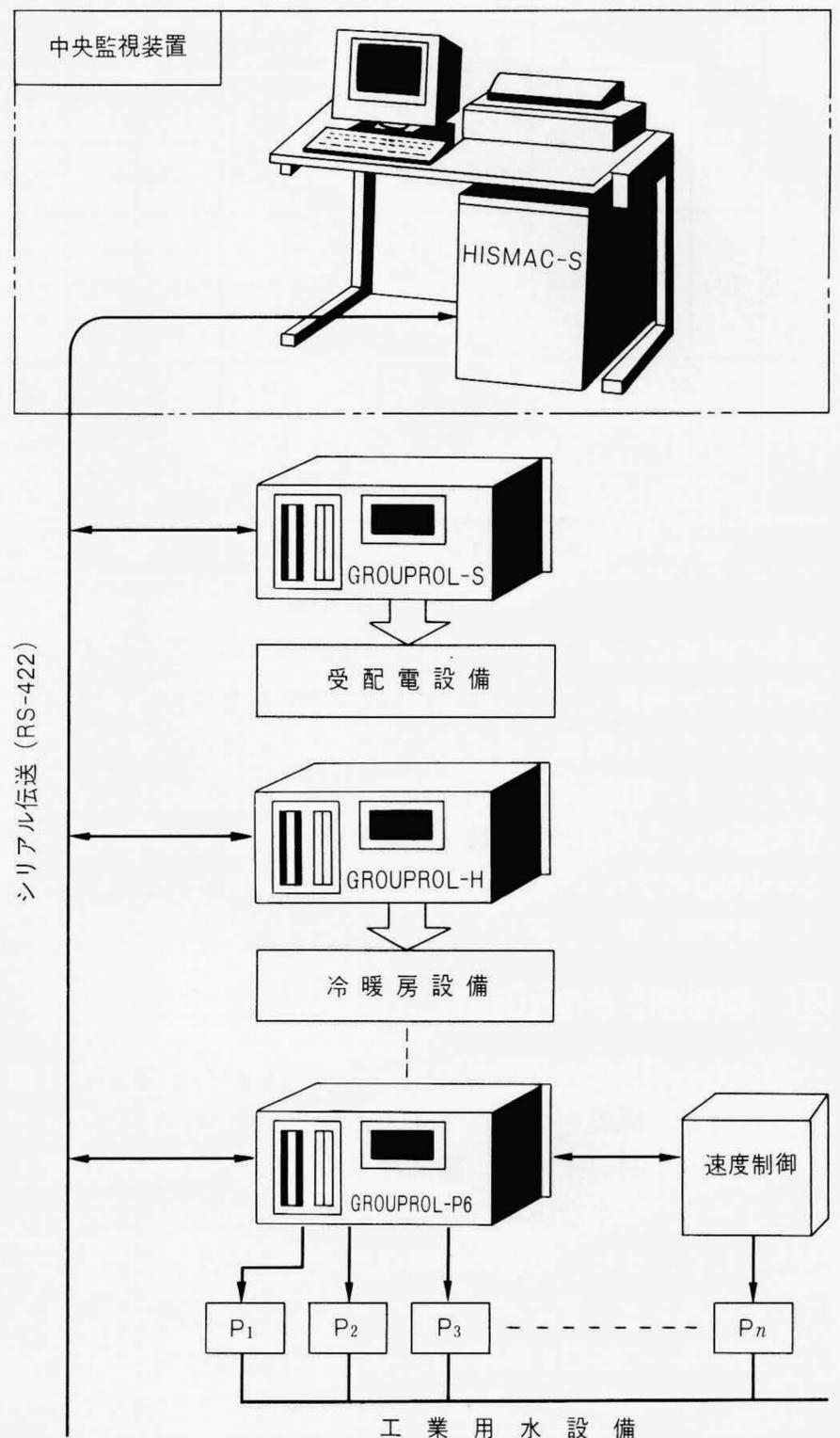
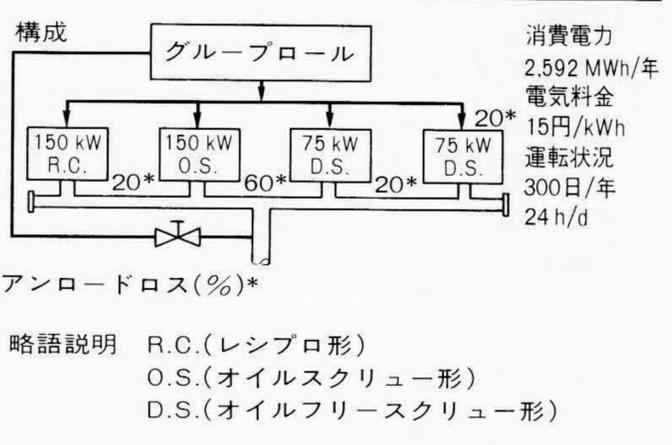


図7 応用例と今後の課題 受配電設備、冷暖房設備、ポンプ、ファンなどへの群別制御と中央監視盤との結合が可能で、高信頼システムの構築が可能である。

表2 グループロール導入効果例 圧縮機4台のシステムに導入した場合の具体例を示すもので、省力、省エネルギーのほかにも多くのメリットがあり、トータルな省資源が実現される。

項目	台数・圧力制御		台数・圧力・高効率制御		備考			
	効果	金額(万円/年)	効果	金額(万円/年)				
1	省力	3人	675	3人	675	2人3交替→1人3交替へ(2,250万円/人・年)		
2	故障時間の短縮	5 h/年	416.6	5 h/年	416.6	生産ラインの停止時間が短縮(年間生産60億円)である。		
3	省エネルギー		3(a)~(b)	686.5	3(a)~(c)	916.1		
	(a)	台数制御	アンロードロス	330 kWh/d	148.5	330 kWh/d	148.5	アンロード運転時間 150 kW R.C.: 2 h/d, 150 kW O.S.: 2 h/d, 75 kW D.S.: 6 h/d
			潤滑油	0.75 l/d	3.4	0.75 l/d	3.4	平均0.075 l/h・台, オイル価格: 150 円/l
			冷却水	2 m <sup>3</sup> /d	2.3	2 m <sup>3</sup> /d	2.3	平均0.2 m <sup>3</sup> /h・台, 水価格: 38 円/m <sup>3</sup>
	(b)	圧力制御	軸動力	154 MWh/年	231.2	154 MWh/年	231.2	圧力変動幅の抑制と, 必要最低圧力の保障 [手動制御: 520~677(平均608)kPa[ゲージ][5.3~6.9(平均6.2)kgf/cm <sup>2</sup> [ゲージ]] GRL制御: 539±10 Pa[ゲージ][5.5±0.1 kgf/cm <sup>2</sup> [ゲージ]]
負荷風量			2,258 Mm <sup>3</sup> /年	301.1	2,258 Mm <sup>3</sup> /年	301.1		
(c)	高効率制御	むだ運転	—	—	405 kWh/d	182.3	むだ運転の排除 (150 kW O.S.を150 kW R.C.に変更: 3 h/d) (150 kW O.S.を75 kW D.S.に変更: 5 h/d) (150 kW R.C.を75 kW D.S.に変更: 7 h/d)	
		むだ圧力	—	—	105 kWh/d	47.3		
4	寿命の延長		4(a)~(b)	49.5	4(a)~(b)	49.5	項目3(a)による効果	
	(a)	消耗部品	10 h・台/d	4.5	10 h・台/d	4.5	消耗品平均価格: 15 円/h・台	
	(b)	オーバーホール周期	10 h・台/d	45.0	10 h・台/d	45.0	オーバーホール平均価格: 150 円/h・台	
総計(四捨五入)			—	1,828	—	2,057	—	



効果の評価法は違って来るが、省エネルギー・省力のほかに安定した圧縮機システムの自動化運転がもたらす生産ラインのダウンタイム短縮、機械のメンテナンス費の削減など多くのメリットが出てくる。同表に示した空気圧縮機システムを平均値としてみれば、台数・圧力制御の省エネルギーだけでも、448台のグループロールによって年間30億円にも達しており、省資源に著しく寄与していると言える。

### 5 応用例と今後の課題

複数台ある機器を群制御する技術は古くからあるが、圧縮機の諸特性、機能を生かして省エネルギー・自動化を図るグループロール制御技術は、図7に示すように中央監視装置と結合させて、力率改善やデマンドなど受配電設備への応用が考えられる。また、病院の床暖房用ヒータやクーラー、食品用の冷凍庫など、更にポンプやファンなど各工業設備の最適な群別制御への応用が期待され、既に一部実用に入っている。グループロールは、今後更にインテリジェントなコントロールユニットとして周辺機器や上位の監視制御装置と有機的に結合させ、より多くのユーザーに利用してもらえよう発展させる考えである。

### 6 結 言

空気圧縮機システムの自動制御装置「グループロール」による省エネルギー化・自動化の基本と実施例を、その効果を交えて述べた。「グループロール」は安価で各種の圧縮機に適用できること、また国内で稼働中の圧縮機台数の数パーセントしかグループロールによる省エネルギー・自動化を図っていないこと、また、他への応用展開が容易に図れることから、各方面でクローズアップされてきている。そのニーズにこたえるため、今後ともユーザーと密接してブラッシュアップに努め、省資源・自動化・合理化にまい進してゆく考えである。

### 参考文献

- 1) 柴田, 外: 省エネルギーのための電気設備の上手な使い方「圧縮機」, 省エネルギー, Vol.36, No.13(1984)
- 2) 吉川: 油圧と空気圧, 圧縮機の省エネ運転, 日本油圧協会, 第12巻, 第3号(1981)
- 3) 岩本: 圧縮性流体力学, 共立出版(1983)