

北辰電機 空気式計装システム開発史

1 開発の経過

1950 年頃から米国の石油精製工場などで、空気式グラフィック・パネル計装が盛んに採用されるようになり、日本でも関心が高まった。北辰では 1955 年 DR シリーズと呼ぶ自社開発の空気式制御システムを発表した。差圧、圧力等を 0.2 - 1kgf/cm² の統一空気圧信号に変換・伝送し、共通に設計した小形受信計器で受信して記録や調節を行うシステムである。受信計器、調節器ではよい性能が得られたが、ダイヤフラム式、ベローズ式の差圧変換器類の性能は部品、材料の制約や経験不足のために十分とはいえず、1957 年世界的に評価の高かった Barton 社の差圧伝送器技術の導入、ついで翌 1958 年とくに流量計を得意とする総合計器メーカー F & P 社との技術援助契約の締結を行って提携製品を国産化する道を選んだ。

1960 年 Ratographic 小形計器 F1200 シリーズを国産化して発表した。小形指示調節計、記録調節計、指示積算計、液面指示計等から成り、Barton 式差圧伝送器、F1400 シリーズ現場計器、自社開発の圧力伝送器等からの伝送信号をグラフィック・パネル上で受信するものである。

1967 年自社技術により小形記録計 ALR35、記録調節計 ALR55 シリーズを開発して F1200 シリーズの該当機種をリプレースした。

1967 年末の計測展では F & P 社開発の P S L 指示調節計 F1350 シリーズを発表し、これに自社開発の記録計 AL R37、積算計 ALI101/102、現場指示調節伝送器 F1451 等を順次加えた。空気式差圧伝送器 F10B シリーズも国産化して伝送器群を整備した。

1969 年のハーフサイズ電子式記録計 ELR33、記録調節計 ELR53 の発表に続いて 1971 年に同サイズの空気式記録計 ALR33、記録調節計 ALR53 を発表した。特長あるペン・サーボ機構や調節器を備えた機種であった。

1977 年これまでの技術的蓄積の上に多くの創意を盛り込み、電子式システムと設計コンセプトを整合させた AL シリーズを自社開発した。並行して記録計も EK シリーズの該当機種に対応する形にモデル・チェンジした。差圧伝送器については F & P 社製品を参考にして DPF200 シリーズを開発した。

以下受信計器を主にシリーズ構成機種の特徴を述べる。

2 空気式システム各シリーズの特長

2.1 DR シリーズ (1955 年)

シリーズの中心機種は小形空気式記録計 DR20、指示計 DR21、無指示調節器 DR33 である。変換器類もシリーズ製品として並行開発した。

DR20 は前面寸法 150 × 150mm、記録紙幅 75mm、記録紙横方向送り、精度 1% の直線縦書き 1 ペン記録計であり、器内下部の手動操作者の有無、記録紙送りが同期モータ式か空気圧時計式かにより 4 機種に分かれる。入力信号圧のほか設定信号圧も目盛り上に指示される。受圧要素は燐青銅ベローズであった。記録機構を引き出しても手動操作器はケース内に残る構造となってい

て、右脚のつまみは自動時には設定用の、手動時には手動操作の減圧弁に連結される。手動出力は操作器中央の圧力計によって示される。左側のコックは自動/手動切り替え用である。ケースドアに初めてアクリル樹脂を使用した。

DR21 は記録計と同じサイズの、目盛り幅 80mm、精度 1%の縦形指示計であり、記録計と同様に手動操作器の有無により2機種に分かれる。手動操作器付きの機種では入力圧と設定圧とが指示される点も同じである。

DR33 は比較的コンパクトな圧力入力、変位平衡形の無指示 PID 調節器であり、上述の DR シリーズ記録計、指示計の背面にプラグインすることもできるし、別付きにもできる。図 1 は動作原理図である。入力圧と設定圧との偏差により作動レバーを、復原圧により復原レバーを変位させ、円弧レバーの傾き、さらにこれに接するノズル・フラッパによって両レバー変位の差を検出する。ノズル背圧をパイロット弁に与えて出力圧、復原圧を得る。比例帯はノズル・フラッパの円弧レバー上の位置により、微分時間、積分時間はそれぞれの絞りにより調整することができる。この調節器は製造が容易で、トラブルも少なく好評であった。

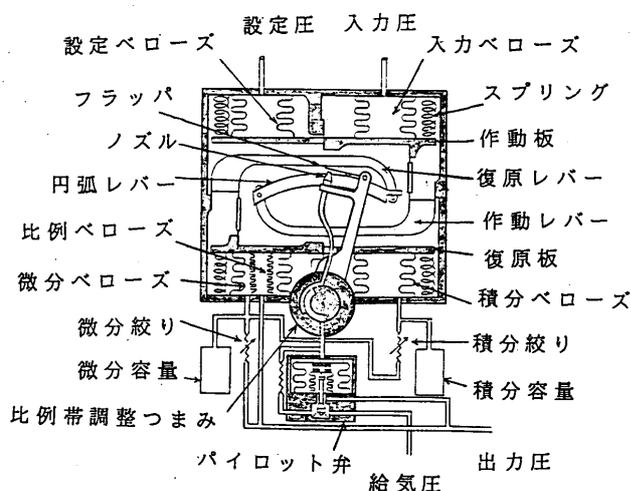


図 1 DR33 の動作原理

2.2 Ratographic シリーズ (1960 年)

基幹機種の F1212(1960 年)は前面寸法 152×152mm、記録紙幅 102mm、記録紙横送り、精度 1%の直線縦書き 2 ペン記録調節計である。2 つの入力圧記録のほか設定圧の指示も行われる。受圧要素には NI-Span C 製のカプセルが使用された。下部の手動操作器の構造や機能は DR20 と同様である。記録紙巻き取りスプールを内器の奥に置き、内器の引き出しのみで 14 時間分の過去の記録が、内器の左側面に見られるようになっている。調節器

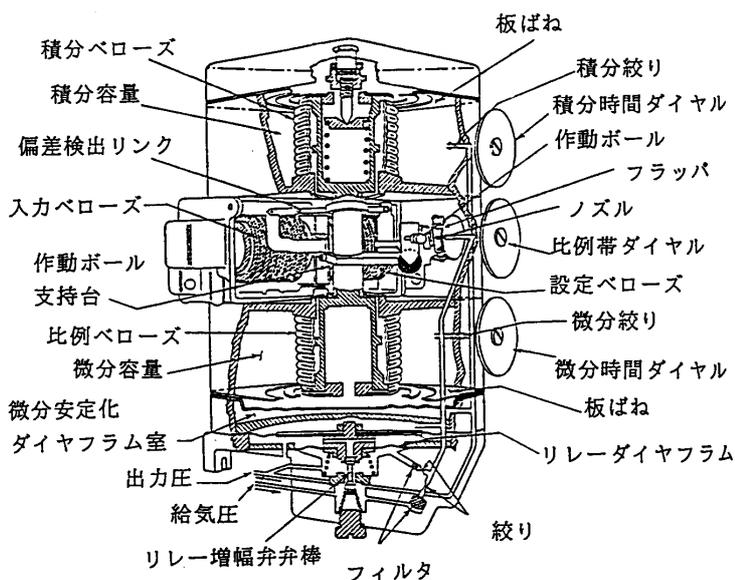


図 2 PM4000 調節計

PN4000 系は圧力入力、変位平衡形で、計器背面にプラグイン設置する。フィールドに設置する場合には類似した PM4000 系が用意されていた。調節器の構造を図 2 に示す。入力圧および設定圧を受ける対向ペローズ対と、比例および積分ペローズ対とを連結軸が互いに直交するように配置する。この交差域に比例帯調整機構およびノズル・フラッパが設けてある。下部のパイロット弁の出力圧を微分絞り・微分容量を経て比例ペローズに、積分絞り・積分容量を経て積分ペローズに与えてそれぞれ負および正の向きの復原としている。比例帯機構を図 1.3 により説明する。フラッパを押す作動ボールは偏差により図の左右方向に、復原により上下方向に変位する。L 形のフラッパはピボットで支えられた軸周りに回転可能であり、またフラッパ・アセンブリは比例帯ダイヤルによりノズル軸周りに回転できる。フラッパが図のようにボールの側面に当たるときにはフラッパは偏差変位により振られてノズル背圧を変えるが、復原変位には感じない。調節器はオープン・ループ状態に近い特性を示す。すなわち狭い比例帯に相当する。アセンブリを 90° ほど回転してフラッパがボールの上に乗る位置を取れば、状況は逆になり、比例帯がごく広いことを意味する。よってダイヤルで比例帯が調整できることになる。微分動作は負の向きの比例復原を遅らせることにより、積分動作は遅れを付けた正の復原

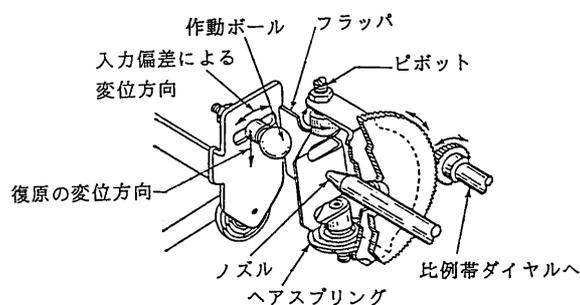


図 3 PM4000 比例帯の動作原理

で比例復原をしたいに打ち消して得ている。微分容量の下側には微分ゲイン制限回路が設けてある。

2 ペン記録計 F1202(1960 年)は調節計から手動操作器や調節器を除いたものである。ダイヤル形指示調節計 F1213 は前面サイズが調節計と同じで、記録機構の代わりにステンレス鋼製の双針ブルドン管圧力指示計を取り付けたものである。入力圧および設定圧を 1%の精度で指示する。F1203 は単針または双針の指示計である。このほかドラム形液面指示計 F1301、指示警報計 F1303 などもシリーズに含まれていた。

F1231 は同じ前面寸法の縦形指示計付き積算計である。指示部は差圧または流量に比例した入力圧を燐青銅製ペローズで受け、自乗目盛りまたは均等目盛りに精度 1%で指示する。積算部は同期モータにより入力値に応じた時間幅で、間欠的に 5 桁現字カウンタを駆動する機械的方法をとっている。差圧入力に対しては開平積算する機能を持ち、積算繰り返しは 20 回/分、精度は 1%であった。

電子式小形計器は以前より記録紙縦送り、円弧横書き方式を採用していたので空気式もこれに合わせるため、1967 年 F1212、F1202 をリプレースする北辰独自の機種 ALR55、ALR35 を発表した。ALR55 は前面寸法 155 × 155mm の 2 ペン記録調節計、ALR35 は 2 ペン記録計であり、機能や構成要素は前機種とほぼ同じであった。ただし精度は 0.75%に改善された。

2.3 P S L シリーズ (1969 年)

P S L (Pneumatic Scan Line) シリーズの基幹機種は、前面寸法、デザインを ESL 計器と整合させたハーフサイズ偏差指示調節計 F1351 である。偏差指示・調節部および手動操作器とから構成され、内器を引き出しても後者がケース内に残る点は記録調節計等と同じである。ディスプレイには当時計装界で注目された偏差スキャン監視方式を取り入れた。指示計は均等または自乗目盛りを持ち、そのフルスケールは $\pm 20\%$ の偏差相当に拡大されていて、 0.5% の指示精度が得られる。スケールには、伸縮の少ないナイロン被覆のガラス繊維製テープを使用し、設定精度の確保を図っている。また宝石軸受けやリンクの中間でのバッファ・スプリングの採用によって摩擦、振動、衝撃等の影響を防止している。

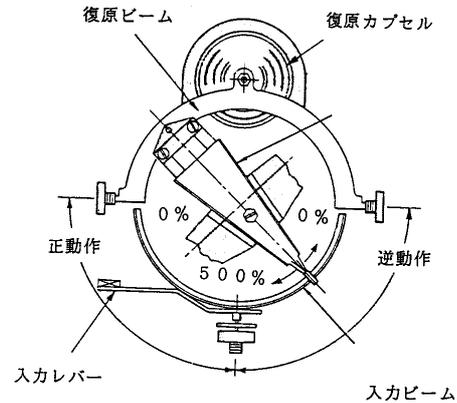


図 4 F1351 比例帯の動作原理

つぎに内蔵調節器の動作について述べる。入力圧は入力カプセルにより、設定値は設定ダイヤル、ドラム、カムによりそれぞれ変位に変換し、偏差検出機構に加えて偏差相当の変位を得る。リンク機構を経て偏差指示計の指針を振らせると同時に、この偏差を変位入力、総合復原形の調節器の比例帯機構(図 4)に加える。この機構は一つ

の円を構成するように向かい合った半円弧状の入力ビーム、復原ビーム、両ビームを跨ぐよう置かれた検出ビームから成る。3ビームはそれぞれ紙面上の上下、左右、および紙面に垂直方向の、ビームの中央、両端、円の中心を通る 3 軸の周りに回転できる。偏差は入力ビームに溶接された入力レバーの末端に、復原カプセルからの変位は復原ビームの中央位置に、ともに紙面に垂直な向きで加える。検出ビームの紙面に対する傾きをノズル・フラッパで検出する。この構成で検出ビームが左右を指す位置を取れば、復原がかからない

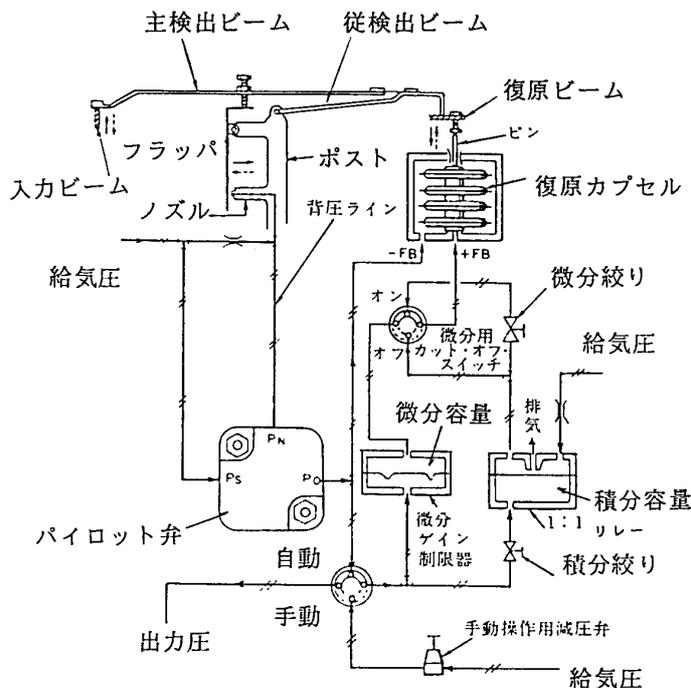


図 5 F1351 調節計の動作原理

ので比例帯はごく小さくなり、上下を指す位置に近づけば、入力が小さくなるので比例帯はきわめて大きくなる。すなわち検出ビームの回転によって比例帯を調整できる。図5はPID調節器の回路図を示す。この調節器の特長は、復原カプセル1個を使用する点、1:1リレーを使用した微、積分相互干渉の防止、微分カットオフ・スイッチの採用等である。ステップ状の偏差入力に対し、パイロット弁出力は復原カプセルの外側に加わり負の復原を与えるが、同時に微分ゲイン制限器(分圧器)を経てカプセルの内側に入り上記復原の大半を打ち消す。したがって調節器出力は微分動作特有の立ち上がりを示す。しかしこの圧力は微分絞りを通して1:1リレー側に排気されて低下し、出力も比例動作相当に落ち付く。積分動作は積分絞り、1:1リレー、微分絞りを経て復原カプセル内側をしだいに加圧し、前記負の復原を打ち消すことで得られる。

現場設置形調節器PM4000を使うとくのために、F1351の内部に設定圧を発信する設定発信器を取り付けた機種が用意されていた。またカスケード制御用の機種ではリモート・ローカルスイッチと手動設定用減圧弁が手動操作器内に内蔵されていた。

F1351のなかには偏差指示計タイプのほかに0-100%の固定スケール指示計付きのタイプもあったが、両者の違いは指示計部分のみであり、ここでは省略する。指示計F1352、手動操作器F1353、F1354、比率設定器F1355等も揃っていた。

1971年改良形F1351NIを発表した。従来のモデルでは電子式-空気式混合計装の際に、指示計スケール長の若干の差が目立つのを電子式の寸法に合わせて統一した点、手動操作器を改良し、自動運転時に保守のため手動操作器を引き出せるようにした点、自動/手動バンプレス切り替えができる操作器モデルを用意した点が改良点である。図6によりバンプレス切り替えを説明する。手動時には手動出力はつまみにより調整され、クラッチ、ノズル、フラップ、ベローズを経て復原を受けながら調節弁に至る。コンパレータはこの出力と自動調節部出力とを比較し、比較結果であるノズル背圧をバイパス路経由で調節部の復原カプセルの内側に復原し、偏差の有無に拘らず両者を一致させる。

したがって自動に切り替えてもバンプは起こらない。自動時にはクラッチが切れて弁開度計は自動出力を指示する。つぎに自動から手動に切り替える場合には、クラッチがフラップを自動時の位置にロックし、この状態での手動出力が調節弁に与えられる。ノズル、フラップ、ベローズは予め調整しており、ここでもバンプは起こらない。つまみを回せばその回転に応じて出力が変わる。

指示調節計と組み合わせる記録計としては、前面寸法170×152mmのフルサイズ3ペン形ALR37を開発した。受圧要素はNi-Span Cカプセル、精度は0.5%である。前面下部にトレンド記録のための入力選択プラグ3個を備え、このプラグを引き出して近くの指示調節計に用意された入力信号ジャックに差し込むことができる。選択点数が多い場合には専用のジャック・ボードALZ401を使用する。

PSLと同時期に発表した演算器の一つに開平演算器F50PS1000がある。一般に開平演算には乗除演算器を利用して出力信号の自乗値を作り、これを入力信号値と平衡させる方法がとられていたが、乗除演算器は複雑、高価であった。F&P社開発のこの演算器は開平演算専用であり、小形・低価格を特長としていた。動作原理には近似式 $1 - \cos \theta \approx \theta^2/2$ を利用している。(図7)

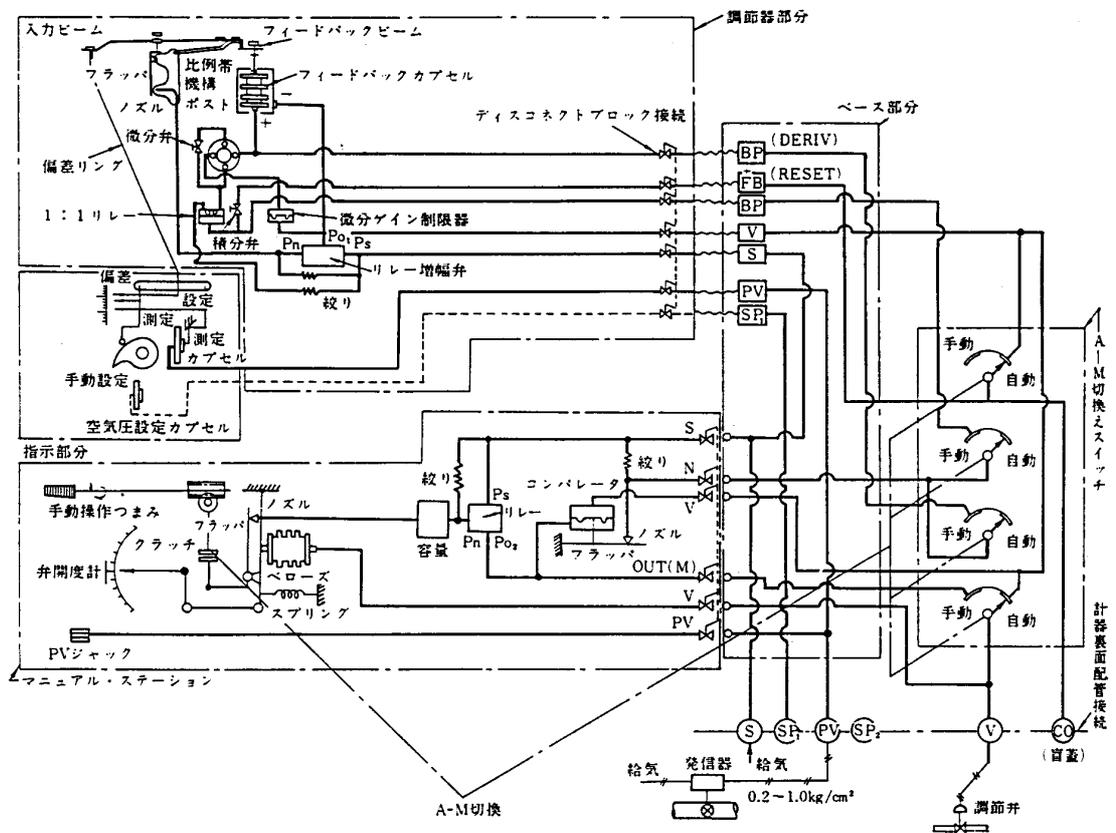


図6 F13 バンプレス切換回路図

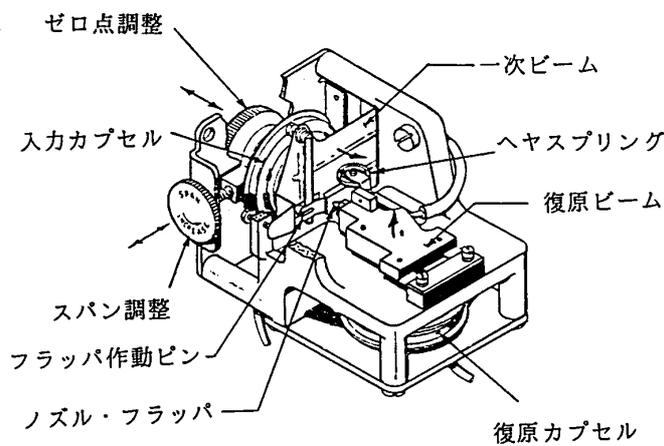


図7 開平演算器の構造

入力圧を入力カプセルで受けて一次ビームを比例的に変位させる。このビームの末端にはピンが付き、ベースに取り付けたフラップを押している。入力カプセルと直角な向きに復原カプセルを置き、ノズルを乗せた二次ビームを復原圧すなわち出力圧で押し上げる。このビームは両カプセルの変位方向と直交する軸の周りに回転可能にしてある。ノズル

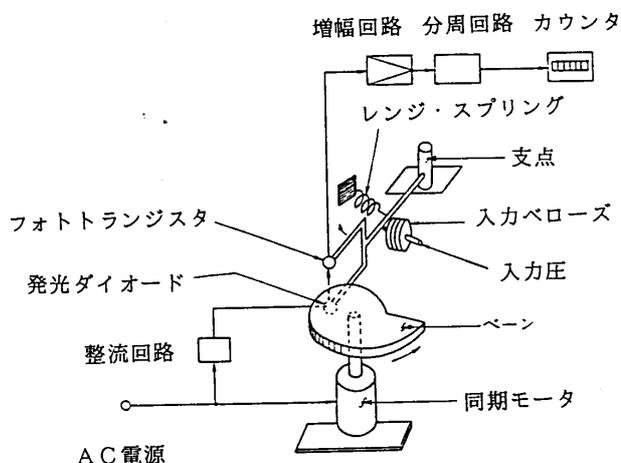


図 8 積算器の動作原理

背圧はパイロット弁を経て出力圧となる。このように構成すると、1 次ビームの前進変位によりノズル背圧が上がり、二次ビームは角度 θ で回転変位してノズルは新しい位置でフラップに接する。その結果ノズルが入力変位方向に $1 - \cos \theta$ に比例した量だけ後退した形で系は平衡する。出力値は $1 - \cos \theta$ に比例するので結局開平演算が行われることになる。この演算器の精度は入力 4 - 100% に対し 0.5% であった。

積算計では F&P 社開発の F1231 に代えて、ハーフサイズの開平形 ALI101 比例形 ALI102 を 1972 年に開発した。動作原理は図 8 により容易に理解できよう。本機種は入力圧により支点周りに変位するレバー、その先端に付けた発光ダイオード/フォト・トランジスタ対、同期モータで駆動される遮光ベーン、パルス計数回路等から構成されて間欠積分動作を行う。入力小さいときにはレバーの先端はベーンの回転中心に近いので、光パルスが通過できる時間は短く、入力の増加とともに長くなる。ベーンの形状を適当に設計すれば、受光パルス数は入力の開平値または入力値に比例する。積算率の変更は分周回路内の接続の変更やレンジ・スプリングの調整による。通常の 6 桁現字カウンタのほかプリセット・カウンタを設置することもできる。精度は、開平形では出力 30% 以上で、比例形では出力 10% 以上でともに 1% であった。簡潔な機械部分と融通性に富む電子回路部分の、それぞれの特長をうまく組み合わせたものと言える。

2.4 AL R53/33 系 (1971 年)

ALR53 は PSL 指示調節計や ESL 記録調節計と寸法、デザイン等の整合を図りながら開発したハーフサイズ、精度 0.5% の 2 ペン記録調節計である。

設計面ではアルミニウム・ダイキャスト構造の採用によりペンサーボ・ユニット、設定ユニット、調節器などをユニット化して信頼性の確保、保守の容易化を実現した。自動調節部、手動操作器を独立に取り出して保守できる構成や自動 - 手動バランスレス・パンプレス切り替え機能を PSL シリ

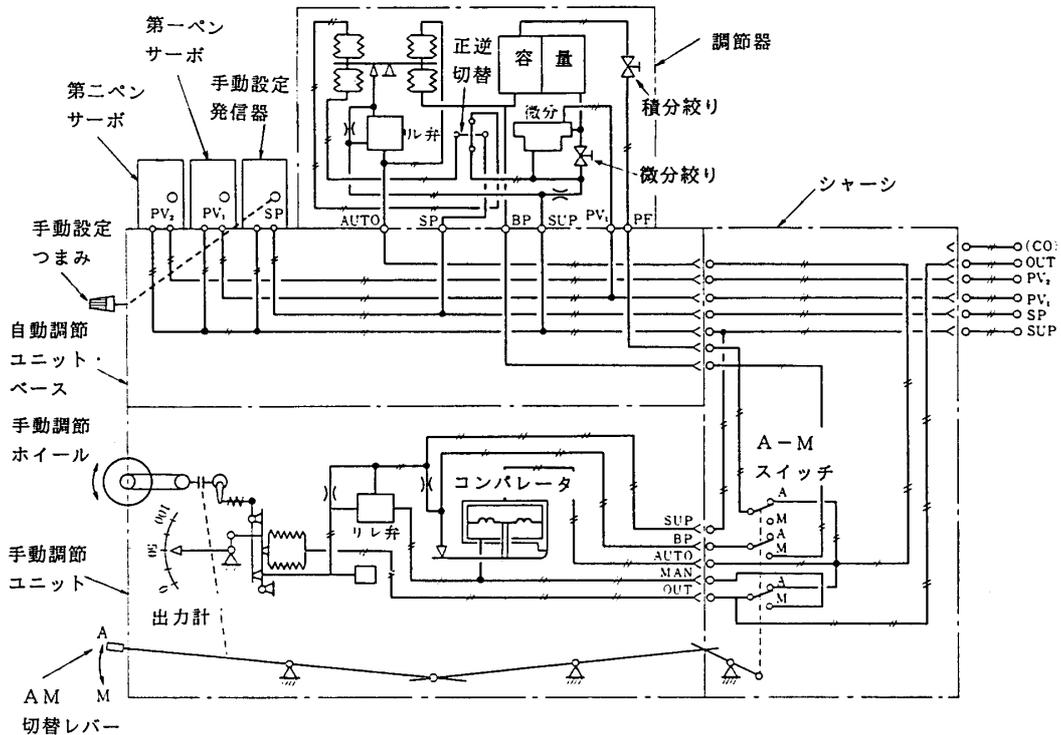


図9 ALR53 記録調節計の全回路

ーズから引き継いでいる。

内蔵調節器には測定値微分先行方式を特長とする力平衡形を開発した。微分先行方式は積分飽和時の応答に優れる点があり、ELR53 では偏差に対しこの方式を適用していた。本機種ではさらに考え方を進め、測定値のみに微分演算を適用し、設定値に対する微分演算を除いた。図9、図10に動作原理図を示す。入力圧を微分ユニットに入れ、微分成分を加算してPI調節部に与える。このときの微分ゲインは2つのダイヤフラムの有効面積比に等しい。

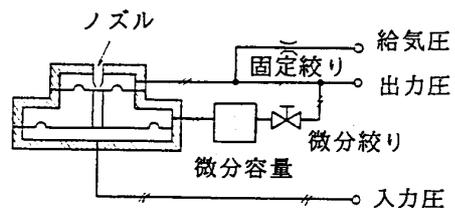


図10 微分ユニット

PI調節部は平面上に配置した測定、設定、比例、積分の4ベローズと力平衡を検出するディスク、ノズルから成るよく知られた方式のものである。

したがって詳細の説明は省略する。調節器が圧力入力形であるから設定発信器を内蔵し、設定指針位置に対応した設定圧を発信できるようになっている。手動操作器の構成、動作は前述のF1352NIのそれと同様である。

本機種の特長の一つは図11に示すペン・サーボ機構の採用である。入力圧を入力ベローズに導入してフォースビームを押すとノズル背圧が上がって復原ベローズが伸び、フォースビームを押し戻して平衡させる。ベローズは同時にペンアームを振らせる。ベローズ内にはダンピング用の油

が入れてある。

ALR33 はハーフサイズの 3 ペン記録計で、ALR53 の調節器、手動操作器を除いて代わりに 1 ペン分の記録機構を収納したものである。下部に警報ランプ・PV ジャックを取り付けることができる。

このほかりボン形指示調節計 ALR23、現場設置調節器 ALC500 が同時期に発表されたが、構成要素は上記機種のものとはほぼ同じである。

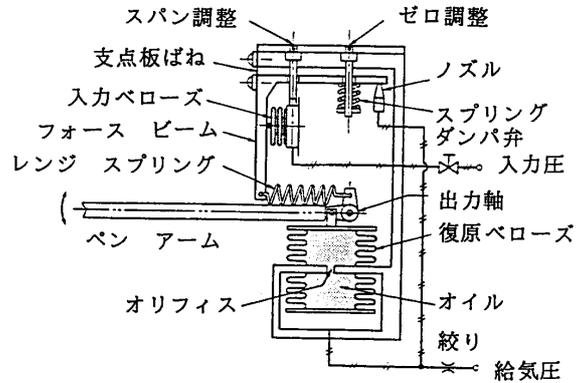
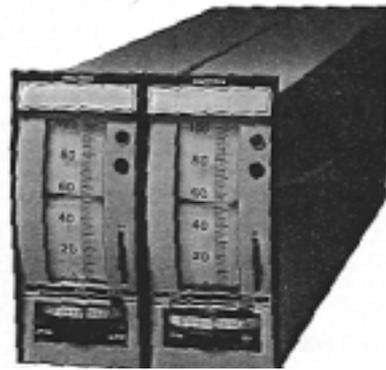


図 11 ペンサーボ機構

2.5 AL シリーズ (1977 年)

ALC210A を基幹機種とする AL シリーズは前面寸法、デザインだけでなく機能や操作面に至るまでも極力 EK シリーズと整合させて設計した空気式制御システムである。(右の写真参照)

共通の機能項目を列挙すれば、出力の自動(A と略記、以下同じ) / 手動(M) 無条件パンプレス切り替え、設定の遠隔(R) / 内部(L) 無条件パンプレス切り替え、指示付きプリセット手動出力(H)、A/M 遠隔切り替え、A/H 遠隔切り替え、上下限設定アンチ・リセットウィンドアップ 測定値および偏差に対する警報等である。これらはいずれも空気式システムの計装への適応性を電子式システムなみに高めるものである。さらに空気式計器としては、構成要素のユニット化・レバー・リンクの使用を避けた設計、空気回路板の採用などにより精度と信頼性の向上を図っている。



EK (左) と AL (右) シリーズ

ALC210A はハーフサイズのいわゆるフルビュー形指示調節計である。入力値および設定値の指示精度は 0.5% である。F1351 等と同様に自動部と手動操作器は独立した構成になっているうえに、自動運転時に自動部を引き出すと自動的に手動運転状態に変わり、手動時には手動操作器はロックされて引き出せないフルプルーフ機能も取り込んである。

図 12 に全体回路図を示す。本調節計の特徴の一つに空気圧式 A/M 切り替えがある。A/M 切り替えレバーとスライドスイッチにより(EX) 回路の圧力を供給圧(A)または大気圧(M)に切り替える。この信号圧で自動部内のスイッチ・ユニットを駆動して出力や復原信号の切り替えを行う。上述の A/M・A/H 遠隔切り替え、フルプルーフ機能やスイッチの合理的配置を本方式が可能にしている。コストの点から指示計の受圧要素にペローズを使用した、Ni - Span C 製スプリングを組み合

わせて指示精度 0.5%を得ている。

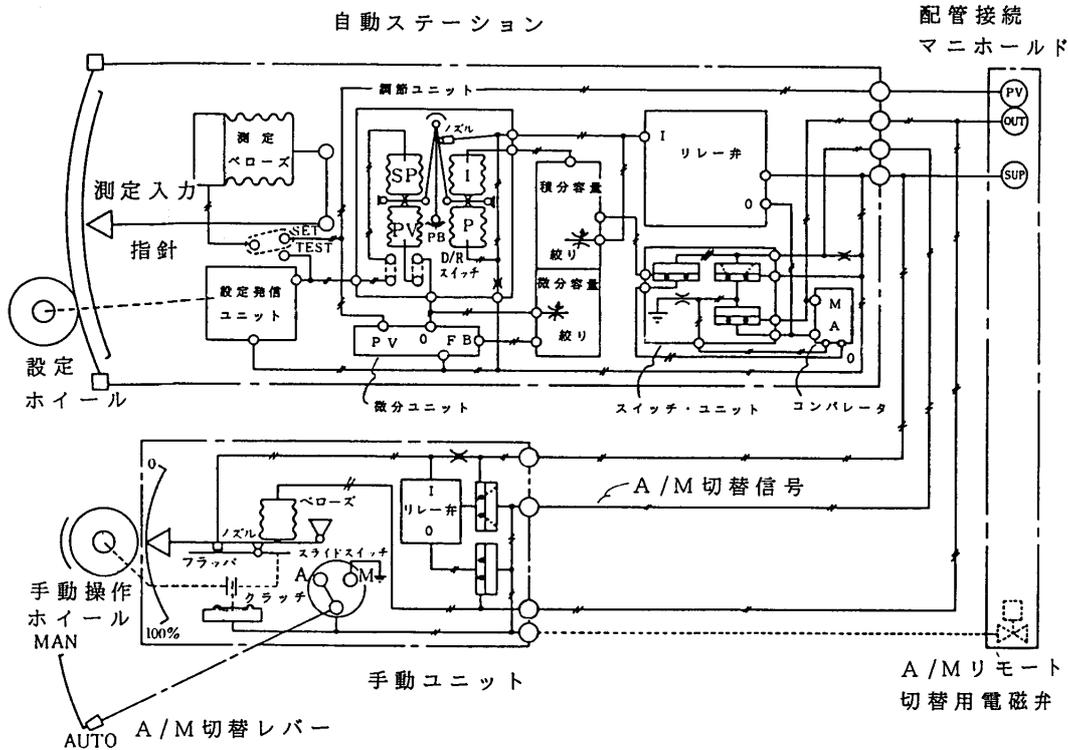


図 12 ALC210A 指示調節計の回路

調節器の動作を図 13 により説明する。

AE55 と同様に測定値への微分を先行させるために入力を微分ユニット(図 10 参照)に加えて微分成分を付与する。調節器は対向し合う測定・設定、比例・積分の 4 ベロース、この 2 組のベロース対が接続された入力ビーム、復原ビーム、平衡レバーから成る、いわゆるベクトル・バランス・メカニズムおよび積分絞リ、容量、ノズルから構成される力平衡形である。

平衡レバーは支点 A の周りに回転可能であり、入力圧の増加により左に回転してノズル

背圧を上昇させる。ノズル背圧は比例ベロースに入りレバーを右に回転させる。平衡状態では $F_{sin} = F_{fb} \sin$ が成立するが、比例帯は $F_{in}/F_{fb} = \sin / \sin$ で与えられるので、結局、すなわち支点 A の位置を変えて比例帯を調整することができる。ただし F_{in} 、 F_{fb} はそれぞれ入力ビ

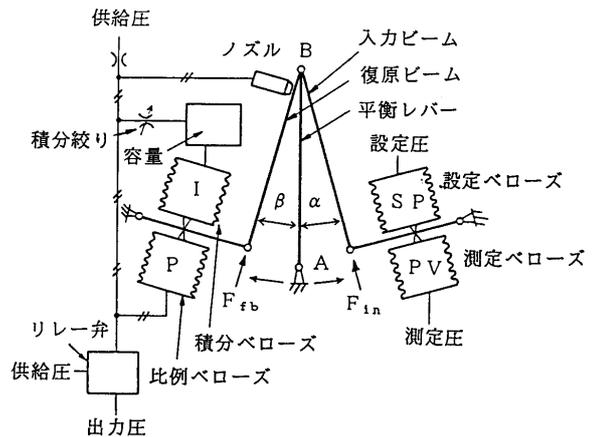


図 13 調節計の動作原理

ーム、復原ビームに加えられるビーム長手方向力、 F_{fb} は両ビームと平衡レバーのなす角である。ノズル背圧を絞りと容量を経て積分ペローズに加えて積分動作を得ると同時にパイロット弁により増幅して自動出力とする。

つぎに A/M バンプレス切り替えにつき述べる。たとえば F1351 等の従来の調節器では A → M 切り替えは無条件にバンプレスであるが、M → A 切り替えは偏差が比例帯に比べて小さいときにのみバンプレスであった。この原因は自動出力を手動出力に追従させるコンパレータの出力が過大な偏差によって飽和するところにある。本調節器ではストップによってビーム連結点 B の変位を制限してこの飽和を防いでいる。B 点がストップに当たっている状態でも追従が正しく行われるためにはコンパレータと調節器の復原部から成る追従ループが正常に動作する必要があるが、図 14 に示すように復原ビームは動けなくても、復原力によりフラツがわずかに撓む設計により正常動作を確保している。したがって、ストップ間隔を適当に選べば、いかなる偏差、比例帯、手動出力値においても自動出力は正しく手動出力を追従し、切り替えによるバンプは起らない。自動運転時における設定信号の R/L 切り替えに、この A/M 切り替えの特長を活用して出力バンプを除いている。スイッチは L、L - B、R - B、R の 4 位置を持ち、L - B、R - B 位置では A/M 切り替え圧を操作して調節器を手動状態に移し、設定信号の L/R 切り替えはスイッチ位置(L - B)から(R - B)への切り替え時に行う方法を取っている。手動状態下で設定を変更しても出力バンプが起らないことは言うまでもない。このほかプリセット・マニュアル、アンチ・リセット・ウィンドアップ等の機能もあるが説明は省略する。

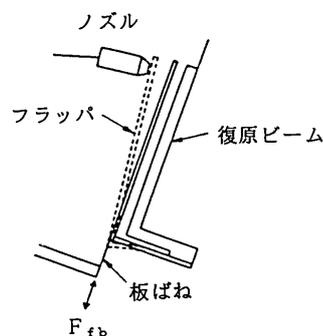


図 14 フラツパの構造

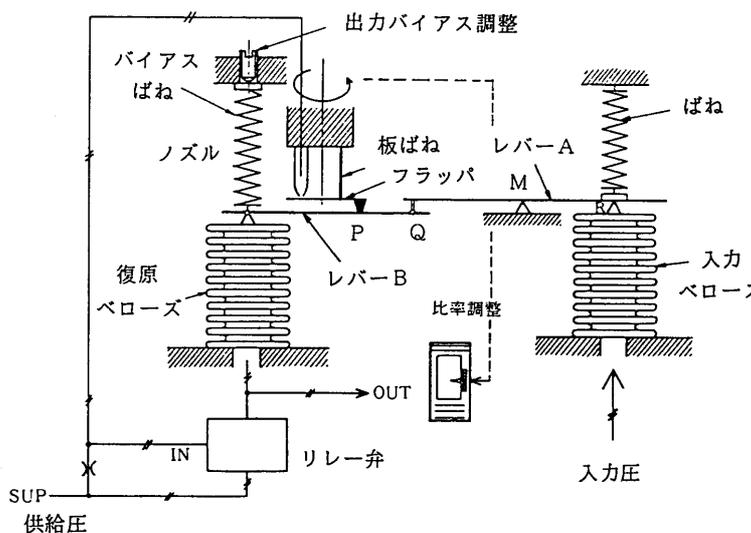


図 15 比率調節器の動作原理

比率設定器では調節器の比例帯調整機構を流用して係数演算を行うのが普通であるが、AL シリーズの比率演算器 ALX261A では簡潔な演算機構を専用開発している(図 15)。入力を入力ペローズで受けてレバー A を支点 M の周りに傾ける。リンク結合されているレバー B の右端の Q 点が下がると P 点の下がり、板ばねが撓みフラツパがノズルに近づく。この結果ノズル背圧が上がり、

復原ペローズが延びて P 点を元に戻す。よって P 点は空間に固定された支点と等価になり、入・出力圧の比すなわちレバー B の両端の変位比は P 点の位置によって定まる。この比はノズル・フラッパを図示のように回転して変えることができる。ばねにより出力バイアスも加えられる。

手動操作器、指示計、記録計、積算器等も前面デザインを指示調節計に合わせて変更したが、内容的にはほとんど変わっていない。

AL シリーズは空気式にも拘らず電子式に比肩する多くの新しい機能を持ち、性能も十分であり、同業他社に注目されたが、北辰、F&P 社とも石油精製、石油化学工業での納入実績が少なかったのと、発表時期には空気式の需要のピークが過ぎていたため販売量はとくに多くはなかった。