

# 都市ガス供給システムの解析

大阪瓦斯K K 技術部 河 合 栄  
佐 伯 親 謙

## 1. ま え が き

都市ガス事業はパイプにより可燃性のガスを需用家に供給するもので、日本においてはガスは二三の天然ガス供給者を除いては大部分が工場で製造したガスを供給している。すなわち工場において石炭、石油系の原料をガス化し精製し、これら各種の製造ガスを配合し熱量一定の燃焼が良好なガスとしてパイプラインに送り出すものである。ガスの供給はその事業の性格上、需用家の要求するままにその必要量を規定圧力で需用端まで供給しなければならない。もし圧力が大きく変動する場合は満足なガスの使用は不可能となり、ときには保安上の問題をおこす恐れもある。このためガスの製造、供給設備は需用量のピークに見合う設備を必要とする。当社においても、近年ガス需用の増大に従いこれら製造および供給設備の増大につとめているのであるが、ガス事業においては総資産に対する製造および供給設備の固定資産の割合はきわめて高く、典型的な設備産業といえる。またガスの生産原価に占める資本費、原料費の割合はきわめて高く、これら製造供給設備をいかに経済的に新設するか、またいかに経済的に運用するかはガス企業にとっては重要な問題である。このため製造設備、供給設備の近代化、高能率化を計るとともに、その設置、運用方法において最適化への努力がなされている。特に最近需用面におけるピークの問題、需用地区拡大に対するパイプラインの延長、複雑化、すなわち供給方式のネットワーク化により、運用操作がますます複雑となってきたため、供給システムの特性を把握する必要性は、ますます大となってきた。このため広域供給を行っているガス事業者においては、テレメーターリング、あるいはテレコントロール設備によりガスの生産、供給の集中管理を行い、供給操作の確実性と速応性を増すとともに、経済的な操作に努め、各種データの集積、解析を行いシステム特性の解明に努力しているのである。供給システム解析の気運が上ってきたのは、上記の企業内の必要性の増大とともに学問として、ORの発展、電子計算機の実用化が大きく貢献しているものである。ガス事業にとって供給シ

木大阪此花区西島町9

ステムの解析はやっと緒に着いたばかりで、まだ体系をなしているものではなく幾多の問題を今後に残しているものである。

## 2. 供給システム

ガスの供給システムを大きく分類するとガスの生産要素としての工場、消費要素としての需用家があり、この間を結ぶ輸送要素としてのパイプライン、整圧器などがある。

工場から送出されるガスは、その圧力により高压 ( $3.0\text{kg/cm}^2$ 以上)、中圧 ( $3.0\text{kg/cm}^2$ 以下 $0.1\text{kg/cm}^2$ ) 以上

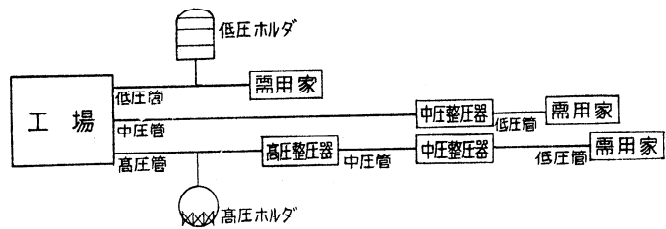


図1 供給システム

および低圧 ( $0.1\text{kg/cm}^2$ 以下) に分類され、それぞれ高压、中圧、および低圧のパイプラインに送り出される。高压ガスは主として遠隔地へ輸送するもので高压パイプラインに設置された高压整圧器で中圧に降圧された中圧パイプラインに流入される。中圧ガスは中圧整圧器で低圧に降圧され低圧ガスとなり低圧パイプラインを通り需用家に至るものである。これを図示すると図1のごとくなる。

低圧供給は工場、供給所のごく近傍の需用家に対して行なわれるもので、大部分のガスは中圧および高压で輸送される。この他にガスの貯蔵設備としてガスホルダーがあり、その貯蔵ガス圧力により高压ホルダー、および低圧ホルダーに分類されている。高压ホルダーからその貯蔵ガスを取り出す場合は貯蔵ガスが持っている圧力で高压あるいは中圧管に流入し得るが低圧ホルダーから中圧、あるいは高压管に送り出すためには、ガス圧送機を必要とする。

図1は供給系統の概念を示したもので、供給規模の小

さいうちはこれらの設備も少く、工場と供給所を結ぶ関係も比較的簡単であったが供給規模が拡大されるにつれこれらの関係は複雑となってきた。すなわち最も初期の供給状態はパイプが工場を中心とし放射状に出ており、この工場の供給範囲は固定されており需要状況も把握しやすく、供給操作も容易であったが最近のごとくパイプラインが環状、網状となり工場、供給所の数も増加し、これらが相互に連絡されてくるに及び、その間の製造、供給量のバランス、圧送圧力のバランス等相互の協調が必要となり、これらをうまく制御しなければ円滑な供給を行うことは困難となってきた。

### 3. 需用の予測

需用の予測は設備計画および運用計画の基礎となるものである。予測には年度別、月別需用量の他、最大需用量の予測、日別需用、時間別需用の予測が必要である。

このうち長期のものは設備計画の基礎となり、短期のものは運用計画の基準になる。すなわち最大需用量（1日当り）は製造設備、貯蔵設備の能力を決定し最大送出日の時間別負荷は圧送設備、供給導管の容量を決定する。また年間、月間需用はこれら設備の稼働率に影響し設備の種類決定の基礎になるものである。また導管計画にはこれら総合需用予測の他、地域別需用の予測が必要である。

#### 3.1 総合需要予測の方法<sup>1)</sup>

ガスの需用は地域社会の経済情勢、地域開発計画、住宅建設計画、需用家の消費性向、生活様式等に影響されるもので予測の方法は需用家を業種別に層別し、これら変動の要因との相関を求めて予測を行なう方法が多く用いられている。

たとえば工業用需用については鉱工業生産指数、商業用需用については商業販売額指数、家庭用については世帯当りの生活費等との相関、あるいはこれらと需用家数との重相関を求め回帰式を作りこれにより需用を算出し、これを各種資料によりチェックし補正している。

#### 3.2 最大需用予測

最大需用は厳寒期に起るもので風雨、気温等気象条件により大きく変るものであるが、最大送出量となるような日は毎年ほぼ一定の条件であると考えられるので時系列分析を行うことができる。これには最大送出量自体を時系列分析する場合と需用戸数の伸びと一戸当りの使用量（最大送出日）の推移とにより最大送出量を求める場合がある。最大送出量の時系列分析において、あてはめる曲線としては3次曲線、または Logistic 曲線が用いられる。

以上の需用予測はガスの販売計画、製造計画、原料計画、設備の新設拡充計画の前提となるものである。

#### 3.3 需用の短期予測

短期の需用予測は運用計画の基礎となるもので年間需用は設備稼働計画、原料計画に必要であり日間需要予測はガス製造計画、圧送計画の基本となるものである。ガスの製造は一般に高温状態において行なわれるものである。すなわち石炭ガスは 1000°C 以上に加熱されたコークス炉により発生されるものであり、発生ガス量を需用に応じ急変せしめることはできない。また石油系原料によるガス発生設備も 700°C ~ 900°C に加熱された触媒、あるいは煉瓦により油を分解するものである。したがって稼働までにある程度時間を要する。もし急に稼働する必要のある場合は、あらかじめ加熱し設備を高温に保っておく必要がある。需用の予測をまちがえて少な目に予測をした場合は稼働までに時間がかかり、ガスが不足し供給不良という事態に至る。多い目に予測する場合はガスが余り、放出するという不経済なことになる。また用心して常に発生設備を高温に保つということは加熱燃料の不経済となる。すなわち予測誤差が大きくなれば当然経済的損失をもたらすことになる。現在行なわれている予測の方法としてはあらかじめ年間の基準需用曲線を過去の需用変動特性から設定し、これを基とした天候要因などで修正する方式、季節的基準パターンを利用し、その時点までの需用量を見てこれを修正する方式等が用いられている。予測で最も困難なのは暖房に入る時間と暖房が終る時期の需用予測である。

1日の時間帯需用の予測については各時間帯の送出率は割合安定しているのでこれを基準とし、それまでに得られた情報、たとえば気温、天候、昨日の需用、本日のその時点までの需用等を考慮し行うもので時々変化する量の情報を受けながら修正して行くものである。

いま送出率を予測の基準とし毎時入ってくる送出量によってその日の送出量を予測した場合、すなわち

$$\frac{\text{その時間までの累積送出量}}{\text{その時間までの累積送出率}} \rightarrow 1 \text{ 日の送出量}$$

とした場合の予測精度（累計送出率の相対誤差）は次表のごとくなる。この表は11時、15時、19時、22時にそれぞれ1日の送出量を予測した場合の精度である。ここに1日とは朝7時から翌日の朝7時までをいうのである。

表 1

|    | 11時 | 15時 | 19時 | 22時 |
|----|-----|-----|-----|-----|
| 1月 | 1.8 | 1.1 | 1.0 | 0.4 |
| 2月 | 2.5 | 1.6 | 1.1 | 0.5 |
| 3月 | 5.5 | 3.0 | 1.6 | 0.7 |

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 4月  | 4.8 | 3.5 | 2.0 | 1.0 |
| 5月  | 2.2 | 1.9 | 1.5 | 0.7 |
| 6月  | 2.5 | 2.2 | 1.9 | 0.7 |
| 7月  | 2.4 | 1.7 | 1.2 | 0.6 |
| 8月  | 1.9 | 1.8 | 1.2 | 0.6 |
| 9月  | 2.9 | 2.1 | 1.0 | 0.4 |
| 10月 | 3.0 | 2.4 | 1.4 | 0.6 |
| 11月 | 3.7 | 3.8 | 1.4 | 1.0 |
| 12月 | 2.8 | 1.9 | 1.1 | 0.6 |

この表より見ると季節的に精度に相当差があり春、秋の予測はかなり困難であることがわかる。このように時間帯予測は送出率を基準とし、これに気温の変動、天候の変化等を考慮し予測を修正するものである。

#### 4. 需用家の特性

現在ガスは主として熱源として使用されているため需用は気温に左右される。図2は月別の平均消費量を示した図であるが冬期需用は夏期需用の約2.5倍に及んでいる。また図3は消費量と温度との関係を示したもので気温16°C前後でガス消費状態に変化が見られる。これは16°C以下になると暖房用の需用が増加するためである。図4は2月の平日の送出率であり図5は8月の送出率を示したものである。この図からも明らかなように夜間の需用は昼間に比して極めて少なく、また夕刻17~19時に大きなピークが表れている。

#### 5. 導管網の解析

##### 5.1 パイプ内ガス流量と圧力損失

導管は工場と需用家を結ぶ輸送要素として供給システムに重要な役割を持っている。特に導管が網状となっている場合はガスの圧力、流量分布を知ることが供給運用上また導管の新設計画上極めて重要なことである。以下に導管網内の流量、圧力の定時的分布を解析する方法を述べる。

パイプ内を流れるガス流量と圧力損失との関係は定常状態において次式で表される。

$$Q^2 = k(P_1^2 - P_2^2) \dots (5.1)$$

ここで

Q : ガス流量

k :  $KD^5/S \cdot L$

K : 定数

D : パイプ径

S : ガス比重 (空気=1)

$P_1$  : 上流側圧力 (絶対圧力)

$P_2$  : 下流側圧力 (絶対圧力)

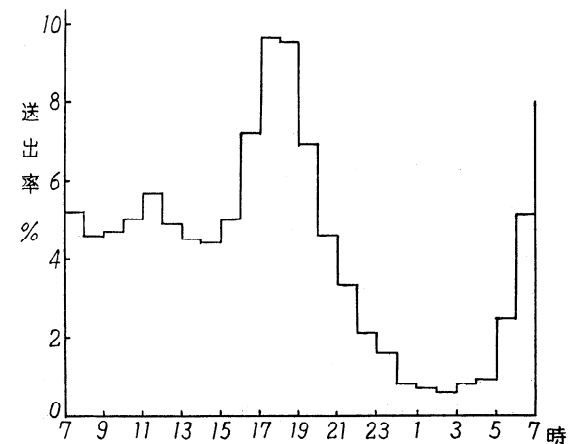
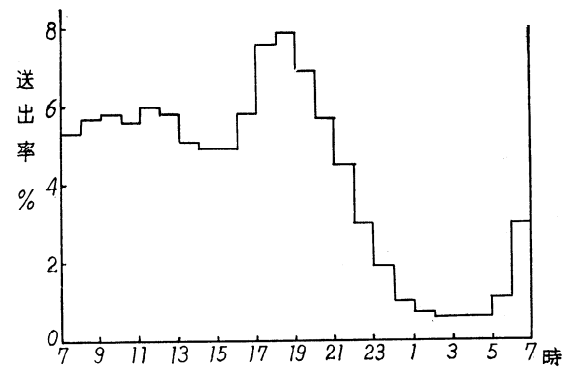
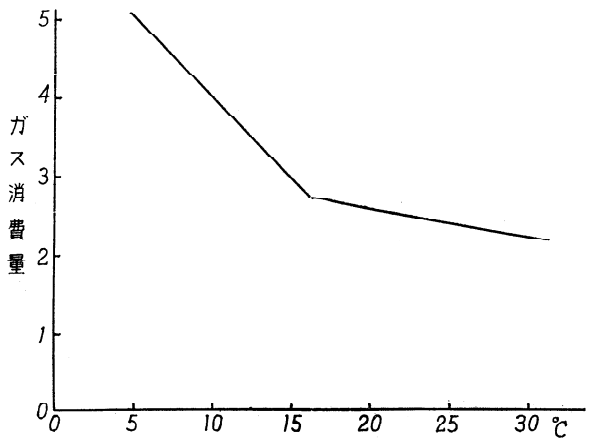
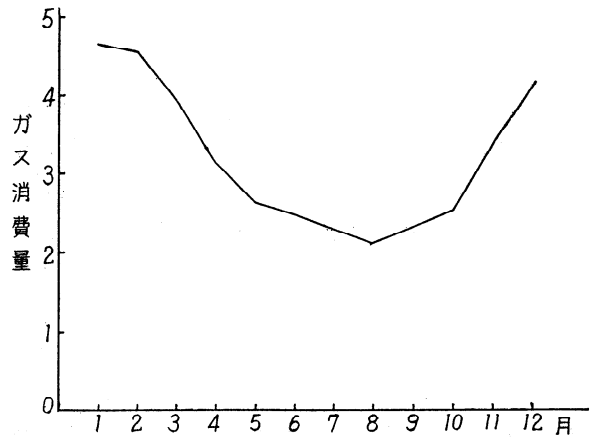


図2 月別消費量  
 図3 温度と消費量  
 図4 2月の平日の送出率  
 図5 8月の平日の送出率

$P_1^2 - P_2^2 = h$ とおくと (5.1) 式は次のごとくなる。

$$h = \delta Q^2 \quad (5.3)$$

ただし  $\delta = 1/k$

したがっていま  $\rho$  をレジスタンス係数,  $k$  をコンダクタンス係数と名付けると, レジスタンス係数  $\delta_1, \delta_2, \dots$   $\rho n$  なるパイプを直列に接続するとその合成レジスタンス係数  $\delta$  は次の通りになる。

$$\delta = \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (5.3)$$

またコンダクタンス係数  $k_1, k_2, \dots, k_n$  なるパイプを並列に接続すると合成コンダクタンス係数  $k$  は

$$k = \left( \sum_{i=1}^n \sqrt{k_i} \right)^2 \quad (5.4)$$

となる。

### 5.2 導管網における流量と圧力

簡単な導管システムにおいては上式を用いて圧力, 流量分布を知ることができるが, システムが複雑になるとははや上式により解くことは困難となる。導管網においては電気回路網におけると同様に Kirchhoff の法則が成立する。

すなわち導管網内の任意の一つの接合点に流出入する流量の代数和は零である。したがって各接合点において次の関係式が成立する。

$$\sum_i Q_i = 0 \quad (5.5)$$

ただし流出, 流入のうち, いずれかを正とし, 他を負として代数和を求めるものとする。

また導管網内の任意の一つの閉ループにおいて各枝路の圧力降下の代数和はその閉回路内に含まれている昇圧機の昇圧圧力の代数和に等しい。すなわち,

$$\sum_i \delta Q_i \delta Q_{il} = \sum_j H_j \quad \dots (5.6)$$

ただし  $H_j$  は第  $j$  番目の圧送機等の吸引側圧力 (絶対圧力) と吐出側圧力 (絶対圧力) の 2 乗の差とする。一般にガスの供給導管において閉ループ内に昇圧設備を入れて考えることはあまりなく (5.6) 式で  $\sum_j H_j = 0$  として考える。

$$\sum_i \delta Q_{il} Q_{il} = 0 \quad (5.7)$$

上式で流量の符号は流れの方向がループに沿って時計廻り方向か, あるいは反時計廻り方向かで正または負とし代数和を求めるものである。したがって解析しようとする導管網について各接合点, 閉ループにつき (5.5) および (5.7) 式を立てて, これを連立方程式として解けば答を得るのであるが実際の導管網につき連立方程式を解くことは不可能である。そこで次に示す数値解法が用いられている。

まず  $f(x) = 0$  の根を求めるといことは  $f(x) \doteq 0$  か

ら  $f(x + \Delta x) = 0$  とする  $\Delta x$  を求めればよいことになる。すなわち

$$f(x + \Delta x) = f(x) + \Delta x f'(x + \theta \cdot \Delta x) = 0$$

$$\therefore \Delta x = \frac{-f(x)}{f'(x + \theta \cdot \Delta x)}$$

ただし  $0 < \theta < 1$

いま  $\theta \cdot \Delta x \doteq 0$  とおけば

$$\Delta x \doteq -\frac{f(x)}{f'(x)} \quad (5.8)$$

以下に説明する Hardy Cross 法はこの  $x$  として流量  $Q$  を用い逐次近似解を求める方法であり, 圧力法は圧力  $P$  の近似解を求める方法である。

### 5.3 Hardy Cross 法<sup>2)</sup>

Hardy Cross 法は (5.5) 式の成立を基準とし (5.7) 式が成立するようにガス流量の修正を逐次行なって行く方法である。その計算手順を示すと次のごとくなる。

1. 各接合点において (5.5) 式が成立するように各枝路の流量を仮定する。

2. 各ループ毎に補正流量  $\Delta q_i$  を求める, 補正流量  $\Delta q_i$  は

$$\Delta q_i = \frac{-\sum_j \delta_{ijl} Q_{ijl} Q_{ij}}{2 \sum_j \delta_{ijl} Q_{ijl}} \quad (5.9)$$

ここで  $\Delta q_i$ : 第  $i$  ループの補正流量

$\delta_{ij}$ : 第  $i$  ループの第  $j$  枝路のレジスタンス係数

$Q_{ij}$ : 第  $i$  ループ第  $j$  枝路を流れる流量

(流量方向はループに沿って時計方向あるいは反時計方向を正あるいは負とする。)

3.  $\Delta q_i$  を前の仮定流量  $Q_{ij}$  に加え流量の修正を行う。この場合隣接ループのないときは

$$Q_{ij} + \Delta q_i \rightarrow Q'_{ij}$$

隣接ループ  $k$  があるときは

$$Q_{ij} + \Delta q_i - \Delta q_k \rightarrow Q'_{ij}$$

かくして修正された流量  $Q'_{ij}$  を新たに各枝路の流量としてさらに (5.9) により補正流量を求め修正を行い, すべてのループの  $\Delta q_i$  が極めて小さくなるまで修正を行うのである。しかるときは各接合点において

$$\sum Q_e = 0$$

各ループにつき

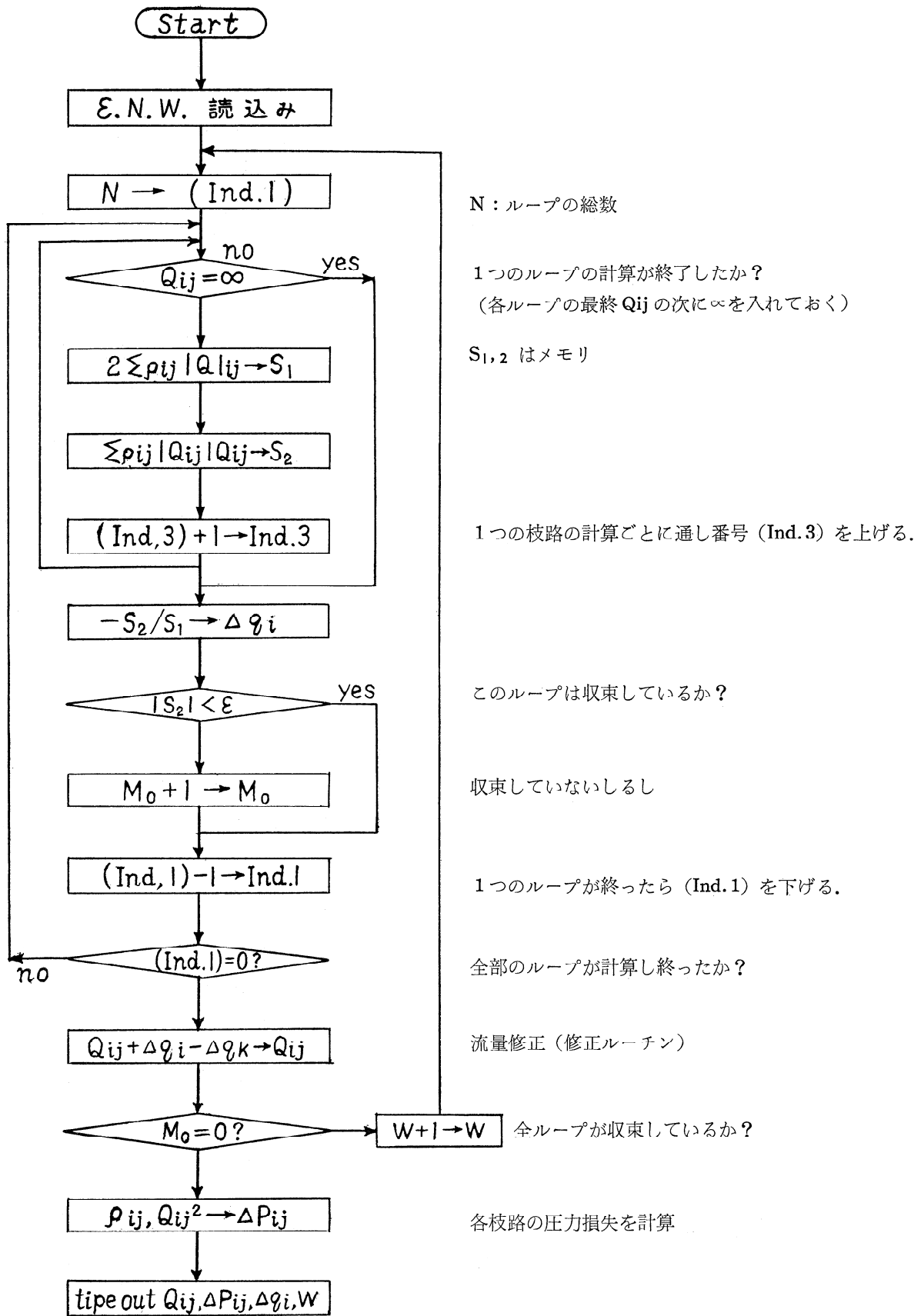
$$\sum \delta_{ijl} Q_{ijl} Q_{ij} \doteq 0$$

となり流量の近似解を得る。また圧力分布は導管網上の 1 点の圧力を規定すると (5.2) 式により求められる。

次に電子計算機で解く場合の flow chart を示す。

### 5.4 圧力法

この方法は Hardy Cross 法と逆に各接点に対し任意



の圧力を仮定し、各接点に流入する流量が (5.5) 式が満足するように圧力を修正する方法である。

いま仮定した圧力よりある接合点  $i$  に流出入する流量の和を求めると、

$$\sum_j \pm k_{ij} \sqrt{|P_i^2 - P_j^2|} \pm q_i = \lambda$$

となる。ここに  $q_i$  は  $i$  点において導管網に流入または流出する流量 (たとえば整圧器負荷のごとく導管網の系外へ出て行くもの) である。

この  $\lambda$  を減少させるように  $P_i^2$  を修正する。補正圧力を  $\Delta P_i^2$  とすると

$$\Delta P_i^2 = - \frac{\sum_j \pm k_{ij} \sqrt{|P_i^2 - P_j^2|} \pm q_i}{\sum_j \sqrt{|P_i^2 - P_j^2|}} \quad (5.10)$$

となる。

この  $\Delta P_i^2 \rightarrow 0$  となるまで繰り返すことにより各点圧力を得ることができる。 $P_i$  が求まれば (5.1) 式より流量が求まる。

以上の計算は繰返し計算であり、接合点、ループの数が多い実際の回路網につき解析を行う場合は電子計算機による他はない、この計算方式により供給状態のシミュレーションを行い、圧送設備および供給導管設備の方式、能力などの計画、あるいはガス供給計画に用いている。

### 5.5 パイプ内圧力流量の動特性の近似計算

上記 (5.1) 式は定常状態における流量、圧力の関係を示すものであり過渡状態においては用いられない。ガスの供給設備計画、あるいは運用計画においては、しばしば導管の過渡特性を知ることが必要となる。たとえば長距離輸送管の負荷変動に対する圧送計画、また長距離輸送管による高圧ホルダの充填など、導管の動特性を知らなければ計画できない問題がある。

このような場合流体力学的には 2 元 2 次連立偏微分方程式で表されるが、これを解くことは簡単ではない。それで微小区間微小時間内においては定常であるとして近似計算を行っている。以下高圧ホルダの充填を例にとって計算方法の 1 例を示す。これは京都に高圧ホルダを設置した場合に大阪からガスを送り、はたして規定時間内に充填可能か否か、またそのため京都地区へのガス輸送量がいかほど減少するかを調べるために行ったものである。

いまパイプの微小区間につき微小時間経過後の圧力、流量を考える。

パイプの長さ方向の 1 点において時刻  $t$  の圧力を  $P_{l,t}$  微小区間離れた地点の時刻  $t$  における圧力を  $P_{l+\Delta l,t}$  とする。微小区間内においては流れは定常流と考えて

$$P_{l+\Delta l,t} = P_{l,t} + \delta Q_{l,t} \quad (5.11)$$

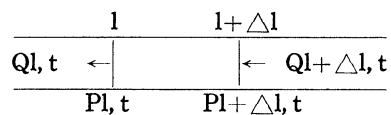
とする。

すなわち微小区間  $\Delta l$  で (5.10) 式で示される圧力降下がある。このときこの微小区間の平均圧力は  $(P_{l,t} + P_{l+\Delta l,t})/2$  となる。時刻  $(t - \Delta t)$  の時のこの区間の平均圧力は  $(P_{l,t} + P_{l+\Delta l,t} - \Delta t) / 2$  であるから時刻  $t$  までの間にこの  $\Delta l$  区間に蓄えられるガス量  $\Delta Q_{l,t}$  は

$$\Delta Q_{l,t} = \frac{1}{2} \{ (P_{l,t} + P_{l+\Delta l,t}) - (P_{l,t} + P_{l+\Delta l,t} - \Delta t) \} \times \frac{\pi}{4} D_l^2 \Delta l \quad (5.12)$$

ただし  $D_l$ : 1 点でのパイプ径  
(流入量) = (流出量) + (蓄積量) であるから

$$Q_{l+\Delta l,t} = Q_{l,t} + \Delta Q_{l,t} \quad (5.13)$$



これより初期状態 ( $t=0$ ) と境界条件 ( $l=0$ ) を与えると各時刻、各地点の圧力、流量は逐次計算できる。

この場合境界条件としては高圧ホルダの圧力と送端圧送機の吐出圧力により与えられる。

この場合距離および時間の区分のしかたが計算精度に影響するのであるが、この例の場合延長約 50km、管径 300mmφ、送端圧力 7.5kg/cm<sup>2</sup>abs. とし距離区分としては 10 区分以上では、ほとんど精度に影響を与えず、時間間隔は 15 分程度で充分と思われた。

### 5.6 アナログ型シミュレータ

ガスの流量と圧力の関係を電流および電圧に置き換えた、いわゆるダイレクトシミュレータが多く用いられている。ガスの流量、圧力の関係式  $P_1^2 - P_2^2 = \delta Q^n$  において  $P_1^2$  を電圧  $e_1$  に  $P_2^2$  を  $e_2$  に対応させ  $Q$  を電流  $I$  に対応させると、流量の式は  $e_1 - e_2 = \delta I^n = (\delta \ln^{-1}) I$  となる。すなわち  $\delta \ln^{-1}$  なる抵抗素子が求まればシミュレータを構成し得る。このような非線形素子として、最も早く実用化させたものは Fluistor と呼ばれる電球である。これは  $V = K \cdot I^{1.85}$  (低圧) および  $\Delta P^2 = \delta' Q^{1.85}$  (高圧) に対応させている。この素子を用いた McIlroy 導管網解析機は 1953 年頃から米国で使用されている。

最近この非線形抵抗素子の代りにダイオードによる折線近似を用いた 2 端子関数発生器、あるいはトランジスタを用いた 2 端子関数発生器を用いたシミュレータが用いられている。このシミュレータにおいて消費要素としては定電流回路を、供給源要素としては定電圧素子が用いられている。

### 5.7 導管網解析の問題点

以上述べた方法は、導管網内の流量、圧力の定常的分布を知る方法、あるいは簡単な導管におけるガスの圧縮性を考慮した動特性の数値解法である。このような方法は1つのケースにつき解を得るには有力であるが、導管網の一般的特性を見出すことはできない。供給設備の最適化、供給操作の最適化をねらう場合、導管網系の力学を、もっと見透しのよい形しておかなければならない。このため最近では導管網を位相幾何学的に考察する試みなど非線形回路論による接近がなされている。

## 5. 結 言

以上、現在までに主として当社で行なわれてきた解析法について述べてきたのであるが、前にも述べた通りこのような解析は、やっと緒についた段階で、今後によくの問題点を残しているものである。特に運用面における最適化の問題は今後における大きな課題である。運用の最適化を行なうにはまず需用の正確にして迅速な予測法の確立が必要である。これにはまず従来の時間帯送率パターンに修正を加える方法の定式化、計算のルーチン化が必要である。これには需用に相関のある要因を見出し、これらの係数を予測に対する2乗誤差を最小にする計算方式が有効であろうと思われる。

次に運用面における、各工場、供給所のガスホルダの使用法の最適化の問題に対しては、各時間帯における部分的最適化を積重ねて解析するDP法が、また製造設備、圧送機の運転については、これらの諸量関係を1次近似化して条件付の連立方程式として解くLP法が有効な手法となるのではないかと考える。今後これらの研究を進め円滑にして経済的なガスの供給を行なうよう努力しなければならない。

## 文 献

1. 「都市ガス工業（供給編）」日本瓦斯協会編
2. 佐藤「長期計画と需要予測」経営科学、第6巻 第3号1963, 6
3. 福森「電子計算機による中圧ガス導管網の流量計算」経営科学第6巻第3号1963, 6
4. G. G. Wilson, DV, Kniebes "Distribution system analysis with the electronic digital Computer."
5. E. F. Trunk, R. E. Murray, J. R. Bruns "Use of the Hardy Cross Analysis for Calculating Gas Distribution Network Dressures." A. G. A. Proceedings 1953
6. 高橋「流体輸送プロセスの非線形回路論的考察」自動制御 8巻1号 1961
7. 寺尾「ガス輸送管路のシミュレーション」動力 July 1959