

ガスパイプラインの最適運用計画

Cost-minimum Operation Planning of Gas Pipelines

近年、エネルギー供給安定化の要請により、天然ガスパイプラインの建設規模は、ますます大形化しつつある。これに伴って、ガス圧送ステーション動力も大容量化し、その動力コストの削減が、ガスパイプラインの経済性を左右する大きな問題として重要視されている。

本稿では、所定量のガスを最小コストで輸送するための経済運用法について述べる。動力コストを最小にするためには、タービン及び圧縮機の部分負荷特性を考慮し、各ステーションへの負荷配分を最適化する必要がある。日立製作所は、この問題を動的計画法によって定式化し、輸送流量に応じて、各ステーションの最適運転点(運転すべきユニット台数、吸込圧、吐出し圧、軸回転数など)を求める手法を開発した。

この最適化手法は、ガスパイプライン全系のオンライン運転制御を目的とするだけでなく、ガスパイプラインの当初計画・設計時での各種代替案の評価や輸送流量の年次増加に対する経済的な設備増強案(インペラ交換、ユニット増設、ガス圧送ステーション増設)などの検討にも用いられている。

1 緒 言

ガスパイプラインシステムの開発に際し、安全性を十分に考慮すべきことはもちろんであるが、これとともに、経済性や輸送能力の確保もまた重要な課題である。特に、運転に要する圧縮動力は、1システムで数百メガワットに達するものもあり、これをどのようにして最小化するかがガスパイプラインの経済性を左右する問題として重要視されている^{1),2)}。また、ガス圧送ステーション(以下、ステーションと略す)機器の定期点検あるいは故障停止時にも、一定の輸送能力が維持されねばならない³⁾。

これらの課題は、個々のステーション単位の問題ではなく、ガスパイプライン全系に関するシステム最適化を図る必要がある⁴⁾。更に、ステーション機器の選定や予備機計画、運用の最適化などの総合的な計画評価技法が要求される。筆者らはこのようなシステム代替案の作成・評価手順の体系化を目的として、ガスパイプラインの計画評価システム“PASLINE”(Planning and Appraisal System for Gas Pipelines)の開発を進めている。図1に“PASLINE”の概要を示すが、主な機能は次に述べる3点である。

- (1) タービンと圧縮機の機種選定及び予備機計画に関する各種の代替案を作成する機能。
- (2) 各代替案の経済性(設備費、動力費、保守費)と輸送能力を評価する機能。この評価計算は、輸送流量の変動あるいはタービンや圧縮機の故障停止などの種々の状況設定のもとで行なわれる。
- (3) ステーション機器の構成や輸送流量に応じた最適(動力コスト最小)な運用法を決定する機能。

これらの機能に必要なデータは、ステーションの間隔とサイト条件、管径、輸送流量、最低吸込圧、最高吐出し圧、その他運用上の制約事項であり、計画担当者が入力する。

以上述べたように、“PASLINE”はステーション機器を中心とした設備計画、及び運用計画のためのシミュレーション

田畑 邦晃* Tabata Kuniaki
油井 兄朝** Yui Shigetomo
久保田道雄*** Kubota Michio

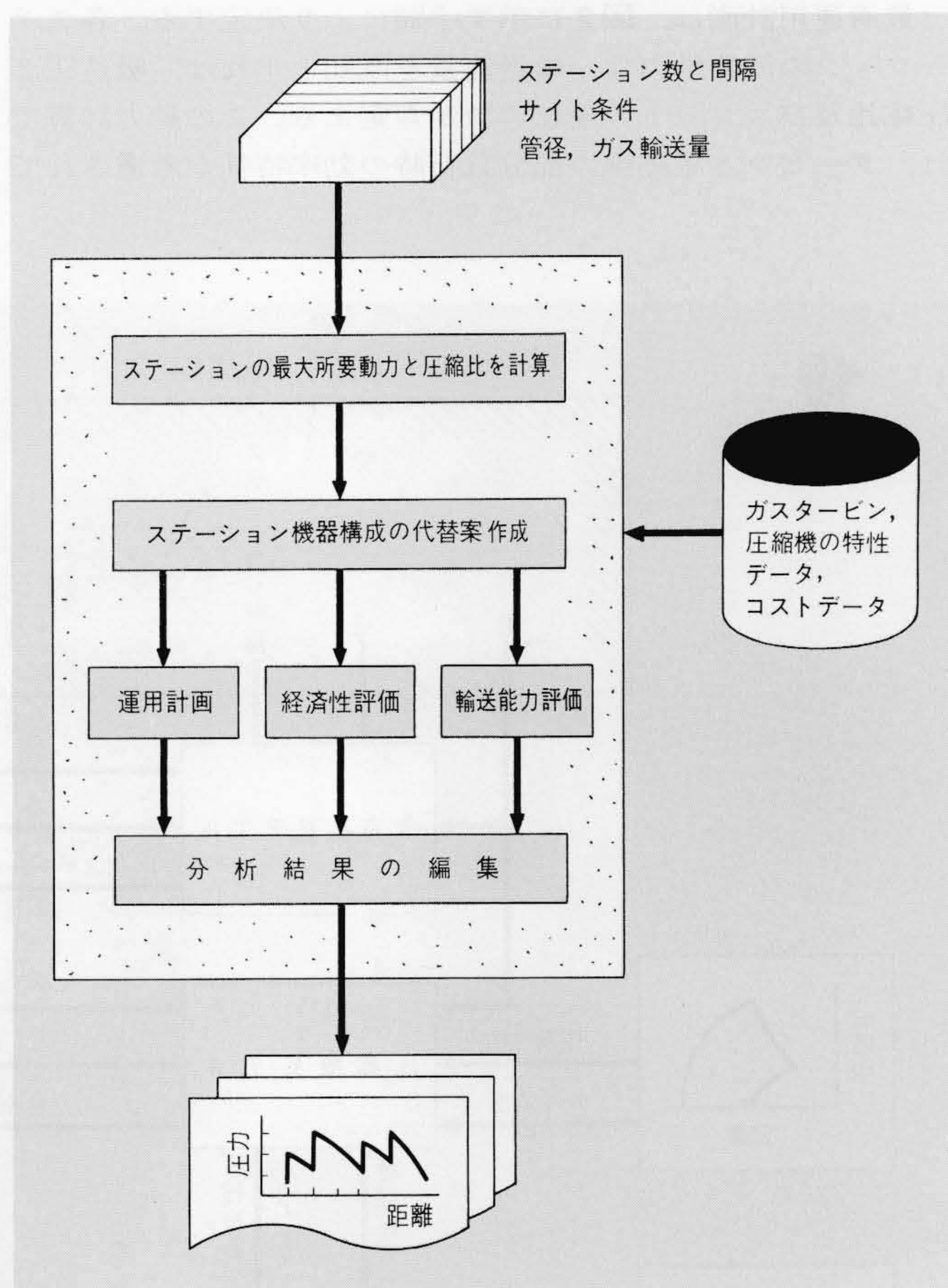


図1 ガスパイプライン計画評価システム“PASLINE”

“PASLINE”は、ガスタービンなどのステーション機器構成の代替案を作成するとともに、経済性と輸送能力を評価できる。また、輸送流量に応じた最適運用計画も決定できる。

* 日立製作所システム開発研究所 ** 日立製作所システム事業部 *** 日立製作所電力事業本部

システムであるが、本稿では、上記(3)の運用計画面に重点をおき、概要を説明する。

2 ガスパイプラインの最適運用計画

2.1 運用最適化問題

本稿で考察する問題は、所定量のガスを最小の動力コストで輸送するための経済運用法を決定する問題である。具体的には、運転すべきユニット台数、吸込圧、吐出し圧、軸回転数などの最適値を、各ステーションについて求める。ただし、ガスの流れは定常流として扱う。

ガスパイプラインの圧力損失式⁵⁾から明らかなように、各ステーションの吐出し圧が許容最高圧を維持するように運転すれば、管路抵抗による圧力低下は最小になる。しかし、反面、設計点以下のガス流量によっては、タービンや圧縮機が部分負荷になり、低効率で運転する可能性がある。したがって、動力コストを最小にするためには、管路抵抗による損失と、タービン及び圧縮機の動力損失をバランスさせる必要がある。この問題は、タービンと圧縮機の部分負荷特性を考慮し、各ステーションに対する動力負荷の配分を最適化することにはほかならない。今までにも、動力コストを最小とする運用の手法は検討されているが、ガスパイプライン全系を対象とし、タービンと圧縮機の部分負荷特性まで考慮している例は少ない。

2.2 動的計画法による最適化

最適運用計画は、図2に示す手順により決定する。各ステーションの所要動力は、輸送流量を既知とすれば、吸込圧と圧縮比及びユニットの運転台数から定まる。この動力計算では、タービンと圧縮機の部分負荷時の効率特性が考慮されて

いる。また、ガスパイプラインの圧力損失式に示されるように、任意のステーションの吸込圧は、その隣接する上流ステーションの吸込圧と圧縮比によって定まる。これらの関係に注目すれば、隣接ステーション間の最適運転条件に関して、次の漸化式を得る⁶⁾。

$$f_j(s_j) = \min \{g_j(s_j, r_j, m_j) + f_{j+1}(s_{j+1})\}$$

$$s_{j+1} = h_j(s_j, r_j)$$

ここに、ステーション j ($j=1, \dots, N$)の吸込圧を s_j 、圧縮比を r_j 、運転台数を m_j で表わす。関数 g_j はステーション j の動力コストを示し、 h_j は圧力損失式に対応する。また関数 f_j は、最適運用計画のもとで、 j 以降のすべてのステーションについての動力コストの総和を表わす。この最適解は、動的計画法によって容易に得られる⁶⁾。

なお、上記の最適化計算では、タービン及び圧縮機の軸回転数の上下限や最大出力、最低吸込圧、最高吐出し圧などの制約が考慮されており、これらの制約条件によって、変数 $\{r_j\}$ と $\{m_j\}$ の実行可能域が設定されている。

2.3 運用計画プログラムの特長

上記の最適化手法をプログラム化しているが、これは次に述べるような特長をもっている。

(1) 圧縮機及びタービンの部分負荷特性を考慮

圧縮機及びタービンの各部分負荷特性が考慮されているので、最適負荷配分を精度よく計算できる。また、タービンの特性は、外気温度やガス温度によって変化するが、このようなサイト条件や季節による影響も考慮されている。

(2) モデルの汎用性

モデルが汎用化されており、各種の幹線ガスパイプライン

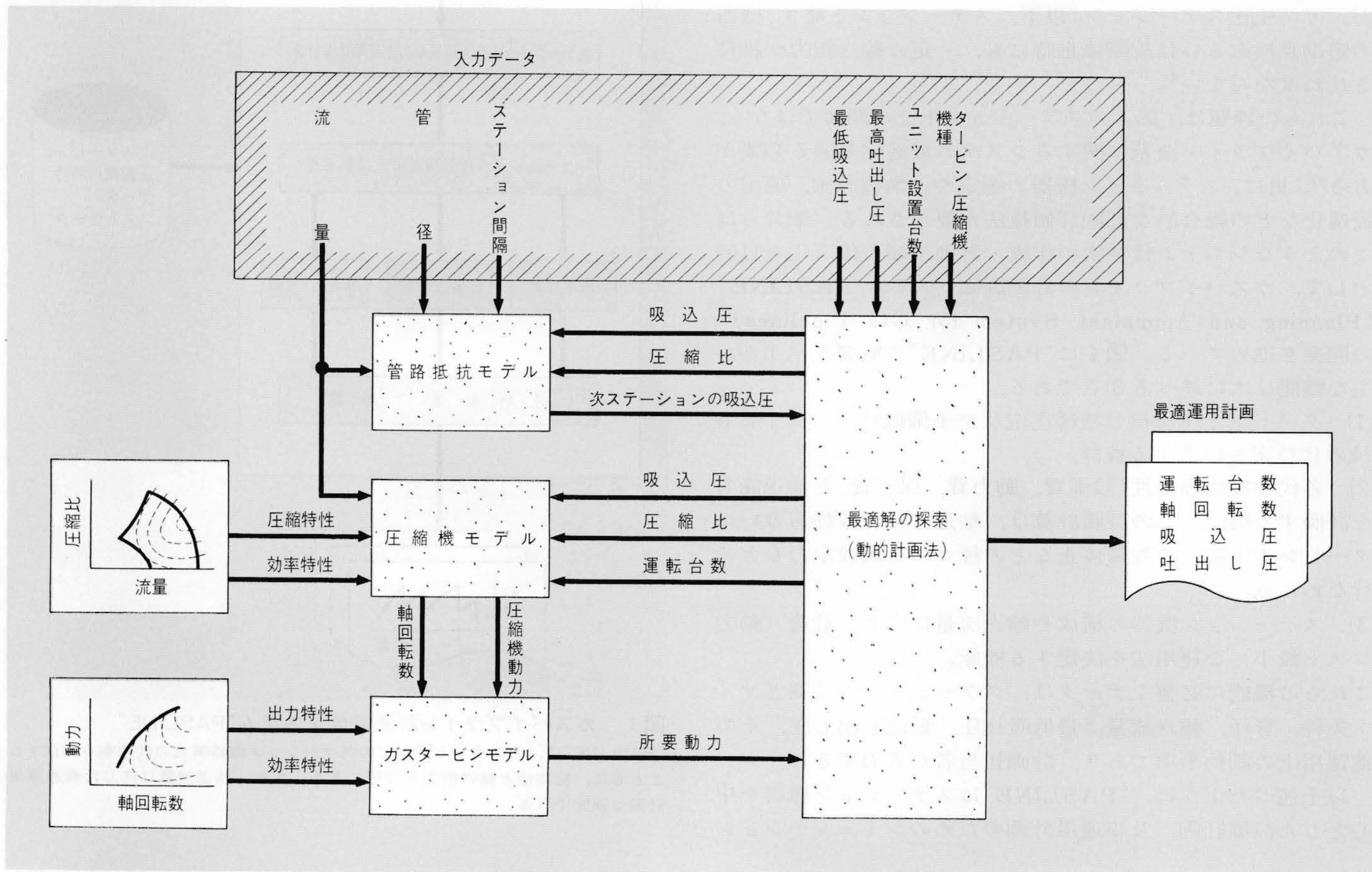


図2 最適運用計画の決定手順 ガスタービンと圧縮機の部分負荷特性を考慮し、動力コストが最小の運用計画(各ステーションの運転台数、吸込圧、吐出し圧、軸回転数など)を決定する。

の分析に適用できる。例えば、圧縮機の接続方式は、直・並列のいずれも可能であり、また、任意の機種タービンや圧縮機が扱える。

(3) パラメータ修正の容易さ

タービン機種、ユニットの設置台数、管径、ステーション間隔などのパラメータの修正が容易であり、これらの設備条件の変更による感度解析が迅速に行なえる。特に、ユニット故障時の運用法の検討、タービン機種別の動力コストの評価、輸送流量の年次増加に対する経済的な設備増強案（インペラ交換、ユニット増設、ステーション増設）の選択などに有効である。

3 運用計画の最適化例

3.1 ガスパイプラインのモデル

以上に述べた運用計画プログラムを用いて、図3に示すようなガスパイプラインの運用法を考察する。ただし、ステーションのタービンは出力33,550HPの日立-GE二軸形ガスタービン(MS5332形)とし、圧縮機はガスパイプライン専用の日立-NP形2段遠心式圧縮機(PCL1002形)⁷⁾を採用するものとする。同図の条件では、ステーション当たりの最大所要動力が85,000HPとなるので、各ステーションには3ユニット(予備機を含まず)ずつ設置されている。これらのユニットは並列に接続されている。

3.2 最適化例

最大設計流量の70%相当のガスを輸送する場合、動力コストが最小の最適運用法は図4、5に示すようになる。ここで図4は、各ステーションの吸込圧と吐出し圧、及び運転すべきユニット台数を、図5は、圧縮機とタービンの運転点を示す。本稿の運用計画プログラムは、圧縮機とタービンの部分負荷特性を考慮する点に特長があるが、このようなモデルの精密化による効果を検討するために、図4、5には、タービンの部分負荷特性を無視(圧縮機の部分負荷特性は考慮)したモデルの計算結果をも示している。

タービンの部分負荷特性を無視した単純なモデルでは、吐出し圧を上限値(100kg/cm²)に維持するように、No.12以外の全ステーションを運転する。このような運用法は、管路抵抗による圧力損失が最小になるという点では有利であるが、反面、圧縮機とタービンの運転効率が低下する場合がある。これに対して最適運用法では、No.3,6,9,12の各ステーションをバイパスすることによって、運転効率を高めている。その結果、前述の単純な運用法に比べて、ユニットの運転台数は22台から16台に減少し、動力消費量は約7%(6×10⁷kcal/h)が削減される。これは、1,000kcal当たりの動力コストを3円と仮定すれば、年間14億円以上の節約になる。

この計算例に示すように、ユニットの運転台数と運転点(吸込圧、吐出し圧、軸回転数など)をステーション間で調整することによって、動力コストの削減を図っているが、特に、ステーションバイパスの有無により、動力コストが左右される。そこで、次に述べる三つの運用パターンA、B、Cについて、動力消費量を比較して示したものが図6である。ここで、パターンAとは、全ステーションを運転する方法であり、パターンBは1ステーション間隔、パターンCは2ステーション間隔にそれぞれ運転する方法である。どのパターンも、運転すべきステーションの吐出し圧は、上限値(100kg/cm²)を維持する。これらの三つのパターンを比較すれば、管路抵抗による圧力損失はAが最小で、Bがこれに次ぐ。しかし、輸送流量が72%(最大設計流量に対する比率)未満の場合、パタ

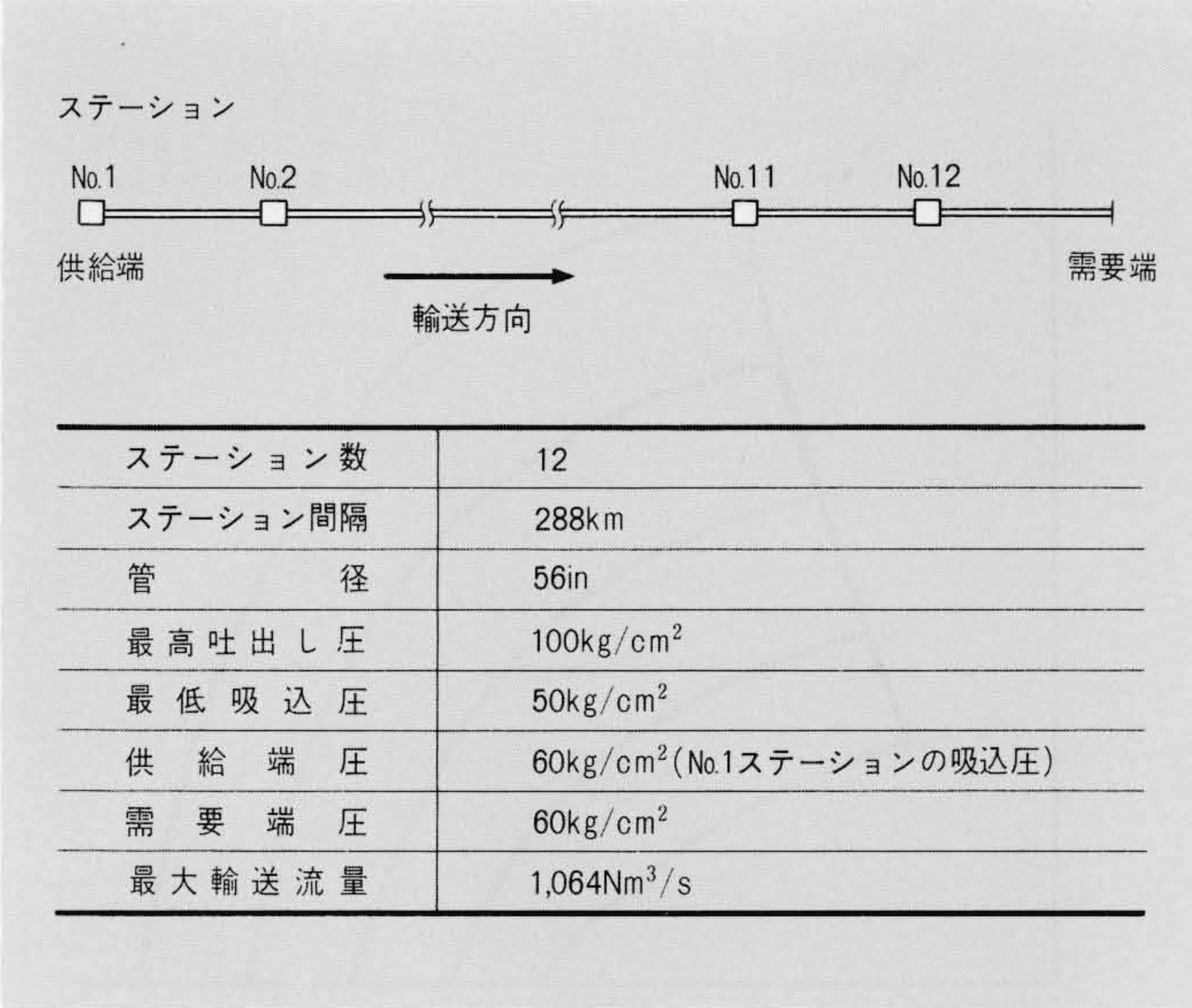


図3 ガスパイプラインのモデル 分析の対象とするガスパイプラインは、12のステーションで構成される。ガスタービンは、MS5332形であり、圧縮機はガスパイプライン専用のPCL1002形と呼ばれるターボ形である。

ーンAは低負荷運転のため、パターンBよりも多くの動力を消費することが分かる。動力コストが最小となる運用パターンは図6に示すように変化するが、本稿の運用計画プログラムでは、輸送流量に応じて最適パターンを選択することができる。

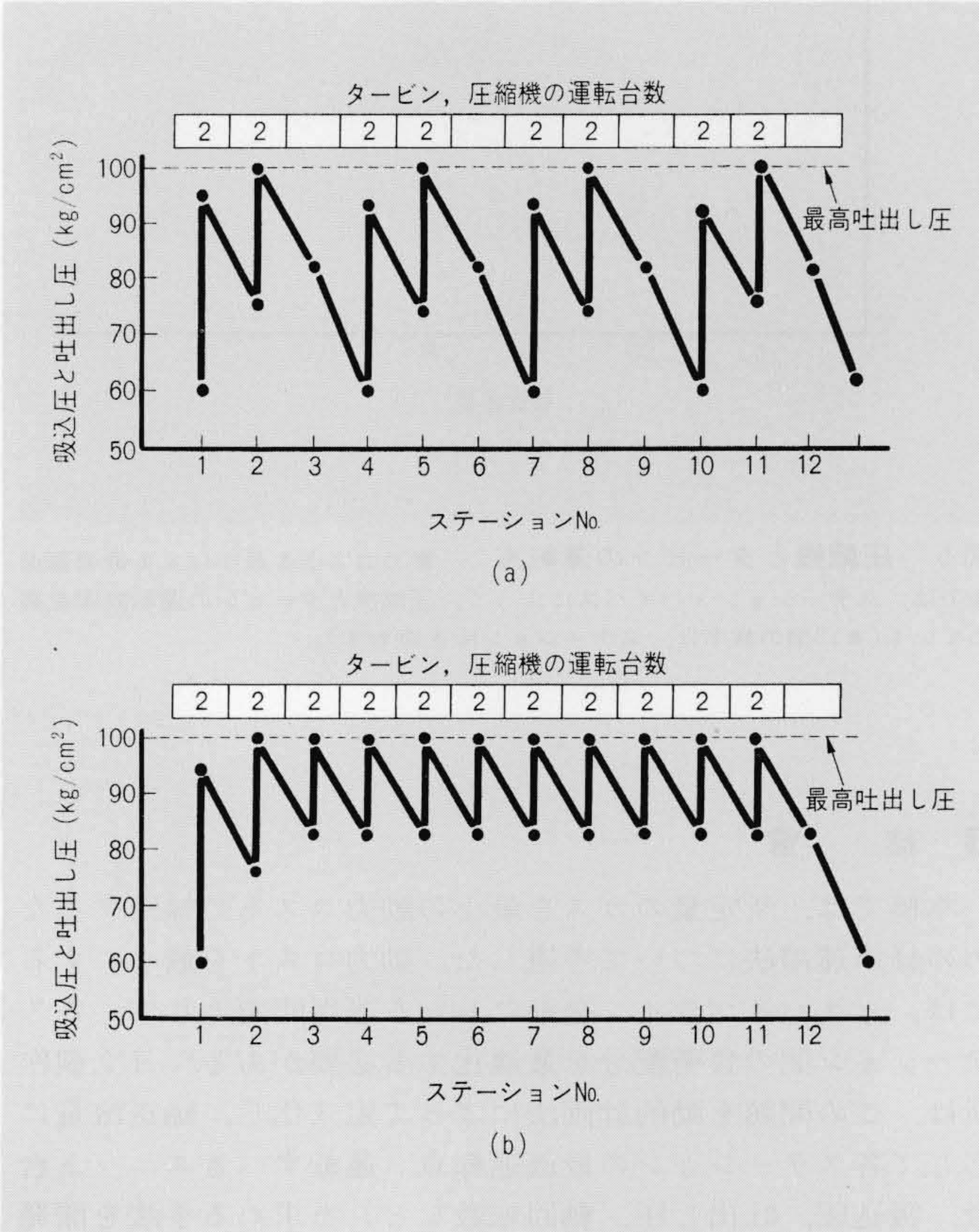


図4 ステーションの吸込圧と吐出し圧及びユニットの運転台数 (a) 動力コストを最小にする最適運用法、(b) タービンの部分負荷特性を無視した運用法を示す。

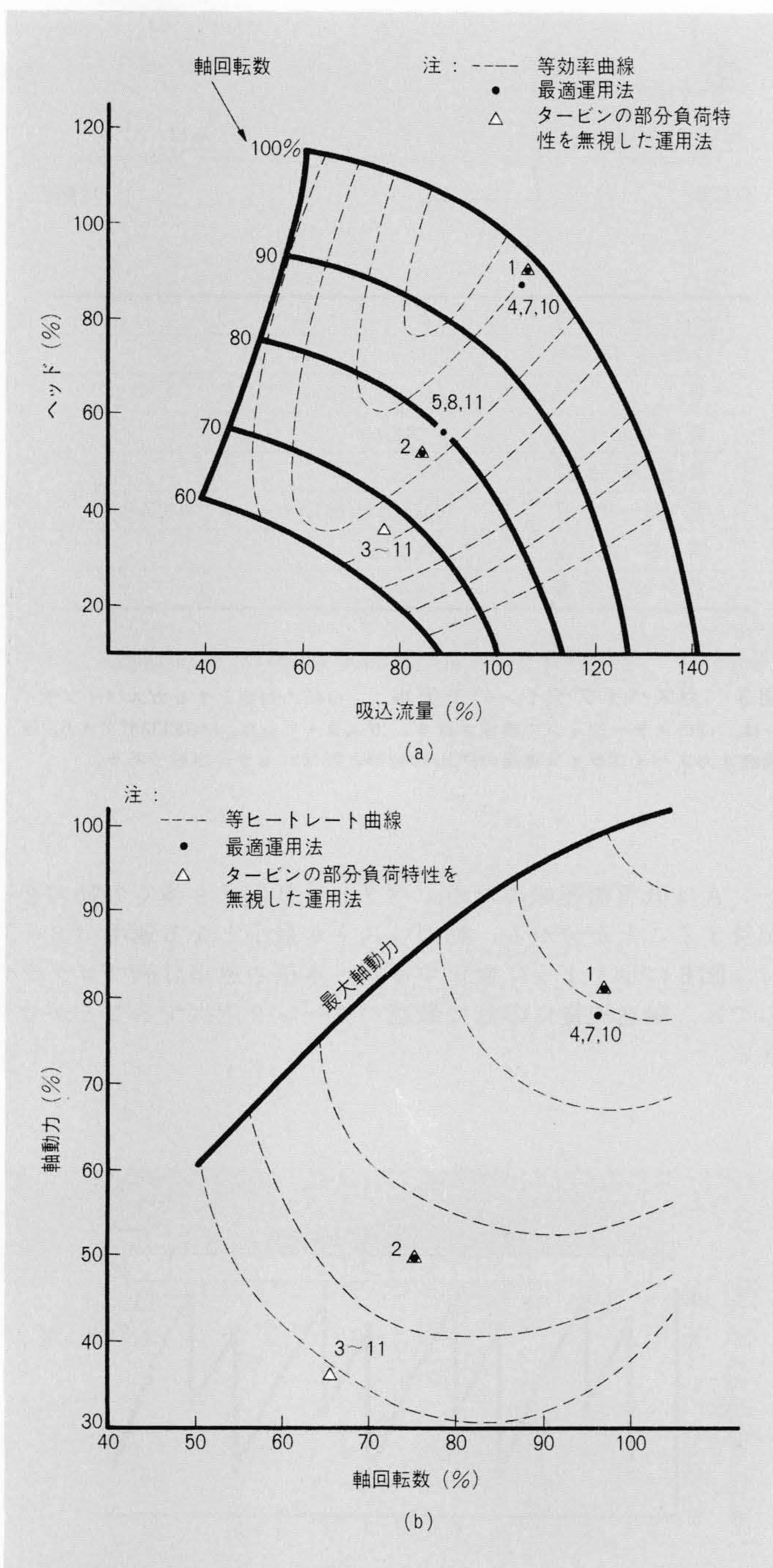


図5 圧縮機とタービンの運転点 動力コストを最小にする最適運用法では、ステーション・バイパスによって、圧縮機とタービンの運転効率を高めている(●印横の数字は、ステーションNo.を表す)。

4 結 言

本稿では、所定量のガスを最小の動力コストで輸送するための経済運用法について考慮した。動力コストを最小にするには、ガスパイプライン全系にわたる運用問題として、各ステーション間の負荷配分を最適化する必要がある。日立製作所は、この問題を動的計画法によって定式化し、輸送流量に応じて各ステーションの最適運転点(運転すべきユニット台数、吸入圧、吐出し圧、軸回転数など)を求める手法を開発した。特に、従来手法との相違点は、圧縮機及びタービンの各部分負荷特性を考慮したことにある、これによって、最適負荷配分を精度よく計算することができた。

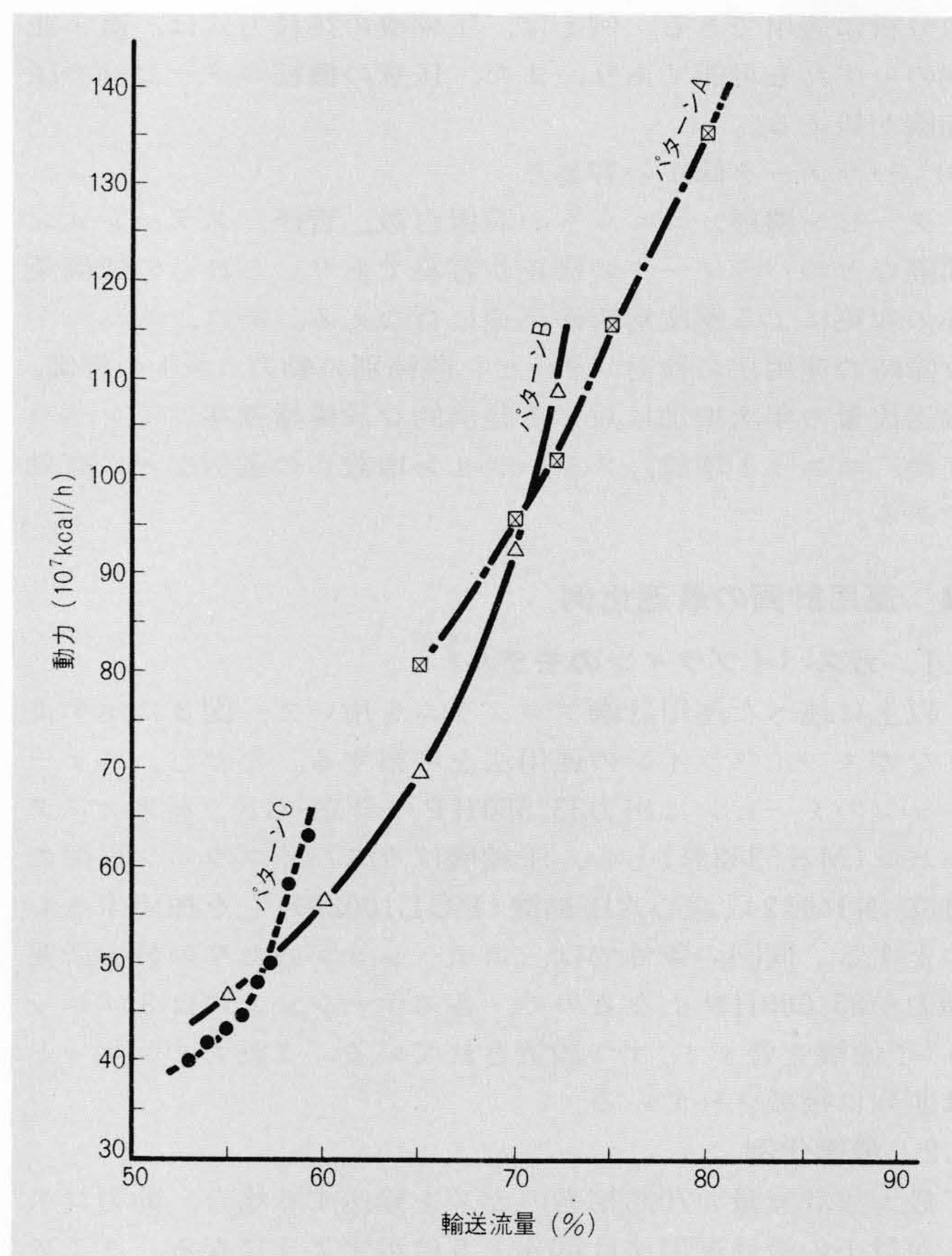


図6 運用パターン別の動力消費量の比較 A, B, Cの三つの運用パターンについて、動力消費量を比較したものを示す。動的計画法による最適化プログラムは、輸送流量に応じて動力消費量が最小の運用パターンを選択することができる。

この最適化手法は、ガスパイプライン全系のオンライン運転制御を目的とするだけでなく、ガスパイプラインの当初計画・設計時における各種代替案の評価や輸送流量の年次増加に対する経済的な設備増強案(インペラ交換、ユニット増設、ステーション増設)などの検討にも用いられている。

今回のモデルは、幹線形ガスパイプラインを対象にしているが、今後はギャザリング・ラインへも拡張する予定である。更に、輸送の信頼性確保の面から、輸送能力評価を予備機計画の検討も含めて、ガスパイプライン全系に関する計画評価システムの開発を進めたい。

参考文献

- 1) T.C.Heard: Gas Pipelines Fuel Costs Reduced, Oil and Gas Journal, 195 (September 20, 1976)
- 2) G.E.Graham: Optimizing Gas-System Design, Oil and Gas Journal, 170 (November 13, 1972)
- 3) P.C.Heilmann, N.L.Bryan: How To Use Probability Theory In Pipeline Design, Pipeline and Gas Journal, 71-74 (1978-3)
- 4) 油井ほか2名: ガスパイプラインシステムの計画と制御, 日本機械学会誌, 80, 708, 1133 (昭52-11)
- 5) S.T.Robinson: Powering of Natural Gas Pipelines, Journal of Engineering for Power, 181 (July 1972)
- 6) 田畑ほか2名: ガスパイプラインにおける最適運用計画プログラム, 電気学会全国大会 (昭52-7)
- 7) 久保田, 山本: 天然ガスパイプライン・ブースタ・ステーション, 日立評論, 60, 3, 200 (昭53-3)