

【215】

氏名	佐山隼敏 さ やま はや とし
学位の種類	工学博士
学位記番号	論工博第229号
学位授与の日付	昭和43年11月25日
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当
学位論文題目	最大傾斜法による化学プロセスの最適化に関する研究
論文調査委員	(主査) 教授 高松武一郎 教授 榎木義一 教授 井伊谷鋼一

論文内容の要旨

この論文は、最大傾斜法により化学プロセスの最適設計、制御およびモデル決定などの問題を解析した結果をまとめたもので、6章からなっている。

第1章の緒論においては、化学プロセスの最適化に関する従来の研究を総括し、本研究の目的を述べている。今までに発表されている主な最適手法としては、変分法、ポントリャギンの最大原理、ダイナミック・プログラミング、最大傾斜法等がある。一般に化学プロセスは多変数の非線型関数で表示され、また、各装置間の結合方式も複雑であるので、2点境界値問題や次元性のわざわいのために、最適解を求めることは困難であった。この論文では、それらの難点を克服するために、最大傾斜法により種々の化学プロセスの最適解を求めることを試み、ついで、この手法が化学プロセスの最適化問題に有効であることを確かめ、併せて、この手法に特有な問題点も明らかにしている。

第2章では、本研究における基本的な手法である最大傾斜法の概念の記述と、この概念に基づく計算法について述べたものである。まず、一般的な最適計画問題の定式化を行ない、変分原理による最適解であるための必要条件式を展開し、この結果生ずる2点境界値問題を避けるために、最大傾斜法による変分問題の解法について説明し、さらに、操作変数、状態変数に制約条件の課せられた問題も最大傾斜法により取り扱うことが可能であることが示されている。

第3章においては、回分式反応装置の最短時間制御系、すなわち、与えられた初期濃度から目的とする最終濃度に最小の時間で到達するように、操作圧力-時間の関係を決定する問題を論じている。まず、モデルとしては、綿実油より硬化油を製造するプロセスを取り上げ、名目上の操作変数の選定についても、十分にプロセスの特性を理解することの必要性を強調し、終端点の濃度に制約条件が課せられた場合について、最適解を求めている。最大傾斜法の計算過程において、とくに、終端点に制約条件のある問題にたいして最も重要な点は妥当な計量の選定と、計量およびステップ巾の減少の方法であり、これは収斂速度に大きな影響を与えるものである。迅速にしかも確実に収斂させるために、計量とステップ巾を相互に減

小させる計算方式を提案し、この方式の妥当性を検証するために行なわれた計算結果より、この方式が有効であることが示されている。操作変数に制約条件のある問題も、最大傾斜法により比較的容易に最適解が求められるが、この場合には、操作変数を改良すべき微小変動量が存在しない区間が生ずるので、これをできるだけ簡単な方式で処理することを考察し、数値例で検討している。実際の工業プラントでは、圧力一定のもとで操作されることも多いので、最適な定圧操作条件を求め、圧力を変化させる場合と比較し、終端点に制約条件のない場合には定圧操作方式も実用性のあることを示している。終端点に制約条件のある問題については、ダイナミックプログラミングによる近似解と同じ傾向であることが明らかにされ、またこの両手法の特性について論及している。

第4章においては、状態変数に不等号制約条件を有する管型反応装置の最適温度分布とその感度解析を論じている。まず、 $A \rightarrow B \rightleftharpoons C$ 型の反応を伴う反応装置において、濃度と温度に不等号制約条件が課せられた問題について、理論的に解析を行ない、原料供給および冷却水流量の2操作変数と各種の制約条件との関係を検討している。つぎに、 $A \rightarrow B \rightarrow C$ 型の逐次反応を伴う管型反応装置において、温度を操作変数とし、反応管長さを一定にして、Bの濃度を極大とする最適温度分布を求めている。一般に状態変数に不等号制約条件が課せられた問題については、随伴関数が不連続になるために、その境界条件の決定、計量およびステップ中の減少等について統一的な手法が確立されていないので、その最適解を求めることは困難な問題であり、したがって研究例も少ない。ここでは濃度に不等号制約条件を有する問題について、Bの濃度を極大とする最適温度分布を求め、制約条件のない場合の最適解と比較し、制約条件が最適温度分布に与える影響について考察している。つぎに、最適解の近傍において、各パラメータの微小変動が系の評価関数に与える影響、すなわち、感度を知ることは重要な問題であるが、ここでは、線型摂動論と随伴関数により、系の挙動を解析的に表現する基礎式を求め、最適解が決定されれば、随伴関数の境界条件を修正することにより、基礎式に必要な感度関数と感度係数が決定されることを示している。この方法に基づいて、管型反応装置の入口濃度、反応時間および反応温度変数が出口濃度に与える影響について検討し、さらに、厳密解と比較することにより、感度解析の工学上における重要性を論じている。また、この問題では、操作変数についての感度関数は最適解においては零になるので、2次の摂動項による近似解法についても論じている。

第5章においては、化学反応プロセスのパラメータ決定について考察している。まず、パラメータ決定法に関する従来の研究の概要を述べ、パラメータを状態変数の初期値または時間とともに変化しない操作変数とみなして、最大傾斜法についての計算式を展開し、さらに、触媒活性度の劣化のように、時間的に変化するパラメータ決定問題にも適用できることが示されている。このようなパラメータ決定法の利点は、従来のように数多くの等温状態のもとでの実験が不要となり、また、データに一致するまで試行法を繰り返す必要もないために、非等温状態におけるデータより、多変数のパラメータを迅速にしかも正確に決定できる点にある。ここでは、プロセスモデルとして、1次不可逆発熱反応を伴う連続式攪拌反応槽を取り上げ、そのプロセス方程式に含まれる活性化エネルギー、頻度因子および反応次数の3変数について、濃度および温度の計算値と観測値の偏差の2乗の積分値が最小となるように最大傾斜法によりパラメータを決定し、ここで提案した手法がこのような問題に対して有効であることを示している。また、計量

の決定に必要な荷重関数についても簡単に論じている。

第6章においては、重水回収、再濃縮のための蒸留塔カスケード系に対する最適設計問題を考察している。まず、設計の基礎となる回収部と濃縮部の所要理論段数および塔内上昇蒸気流量を表わす理論式を求め、年間重水濃縮費と補給費の和を評価関数として、このプロセスの最適比問題が定式化されている従来の実験データより、供給重水濃度とその流量、および製品重水濃度を規定して、概略計算を行ない、3塔よりなるカスケード方式が妥当であることを示している。その結果、このカスケード系は6変数の最適化問題となり、最大傾斜法により評価関数を極小とする操作条件を求めている。設計計算の基礎となるデータは、京都大学工学研究所の多孔板精溜塔による実験結果であり、また価格算定に必要な数値も実際に使用されている値を採用したものであり、設計計算の結果が現実のプラント設計にただちに適用できるように留意している。また、単一精溜塔および電解濃縮法による最適設計についても考察を加え、これらの諸方法について工学的、経済的観点から検討し、その特性を明らかにしている。

論文審査の結果の要旨

化学プロセスの最適化問題に関して、従来は主として経験的または試行的に最適化が行なわれていたものと考えられるが、最近電子計算機が急速な進歩をとげると同時に、種々の最適化手法が開発され、また信頼性の高いプロセスモデルを得るための方法も数多く提案されつつある。現在では電子計算機と新しい最適化手法を組み合わせることにより、大規模な化学プロセス全体をも最適に設計、制御することが可能になり、このような内容を基盤とした新しい学問体系にまで発展しつつある状態である。しかし、非線型、多変数でしかも複雑な装置間の結合方式を有する化学プロセスの最適化に対して、各種の最適化手法はそれぞれ一長一短があり、線型計画問題における単体法のように、化学プロセス問題に適した一般的な手法はまだ確立されていない。

本論文は、最適化手法の一つである最大傾斜法の化学プロセスの最適化問題への応用に関するものであり、種々のプロセス最適化へ応用するにあたっての特性を数値解析的に究明し、その際起ってくる諸問題点を検討することによって、本法の利点と欠点を明確にし、化学プロセスの最適化のための実際的な考察をまとめたものである。本研究の主な成果はつぎのとおりである。

(1) 操作変数および終端点に制約条件を有する回分式反応プロセスの反応時間を最小にする最適化制御問題について、最大傾斜法が有効に使用できることを示し、さらに計量とステップ中の選定についての実際的な方法を提案すると同時に、ダイナミックプログラミングによる近似解と比較し、最適化問題における両手法の特質を明確にしている。

(2) 状態変数に制約条件が課せられた各種の化学反応装置に対して、制約条件式と操作変数の関係について考察し、とくに逐次反応を伴う管型反応装置に対して最適温度分布を最大傾斜法により求め、制約条件が最適解に及ぼす影響を明らかにしている。

(3) 一般にシステム方程式に含まれるパラメータの変動の最適解への影響を知ることは、最適政策の実施の面からみて非常に重要なことであるが、この感度特性を求めるため、線型摂動論と随伴関数により、系の挙動を表示する基礎式を導き、これを利用して管型反応装置における各変数の出口濃度に与える感度

を求めうることを示している。

(4) 従来より化学反応プロセスの諸パラメータを決定するためには、例えば多くの等温実験やデータ処理のための試行法などが必要とされてきたが、最大傾斜法を利用することにより、この難点を解決し、さらに時間的に変化するパラメータの決定問題にも適用できることを1次不可逆発熱反応を伴う流通式攪拌反応槽を例にとって示している。

(5) リサイクルを含む複雑な化学プロセスの一例として、蒸留による重水濃縮のカスケードプラントをとりあげ、最適設計法の実際的な手順を示している。ここで使用している諸数値は実規模に近いプラントから得られたものであるため、最適化により与えられる結果は工業的に充分有意義なものであり、またこの方式と電解法との比較、処理量の最適政策に及ぼす影響などをも考察し、いかなる環境条件のもとで精留方式の方が経済的になるかを明らかにしている。

以上述べたように、本論文は最大傾斜法という最適化の数理的手法を、化学プロセスの最適設計、操作という応用的見地につけて、その利用の有効性、特質ならびに実用上の問題点を明らかにするために行なわれた研究を記述したものであり、学術上、工業上寄与するところが少なくない。よって本論文は工学博士の学位論文として価値あるものと認める。