

学位論文審査報告

前田, 豊広

安信, 強

岩本, 勝治

下園, 真一

他

<https://doi.org/10.15017/17404>

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 18 (1), pp.51-61, 1996-06-01. 九州大学大学院総合理工学
研究科

バージョン :

権利関係 :

学位論文審査報告

氏名(本籍) 前田豊広(奈良県)
 学位記番号 総理工博乙第236号
 学位授与の日附 平成7年12月28日
 学位論文題目 STUDIES ON THE ISOTROPIC-
 PRECURSOR PITCH FOR GENERAL PURPOSE CARBON FIBER
 (汎用炭素繊維用等方性プリカーサーピッチに関する研究)

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 持田 勲
 (副査) 〃 〃 西村 幸雄
 〃 〃 〃 諸岡 成治

論文内容の要旨

炭素繊維、活性炭素繊維、メソカーボンマイクロビーズなどの先進高機能炭素材料がエネルギー、環境や情報・通信分野の新技术を支えるキーマテリアルになりつつある。特に炭素繊維は、強度、弾性率、熱物性などの優れた物性からプラスチックやセメントなどの補強材料として広く利用されている。汎用炭素繊維(GPCF)は優れた性能と低価格により、近年その需要が著しく増加しているが、GPCFの工業化に際しては安価で、優れた性状を有するプリカーサーピッチの製造技術の確立が最重要課題である。

本研究は、GPCF用プリカーサーピッチの調製を目的として種々のピッチのエアブローン反応を調べ、生成したピッチの構造解析に基づきエアブローン反応機構を考察すると共に、組成修飾による炭素繊維プリカーサーの性能向上を試みたもので、これらの知見に基づいたコールタールピッチのエアブローン法によるGPCF用等方性プリカーサーピッチ製造技術の確立を目的としている。

第1章では、ピッチ系炭素繊維の研究動向について概要を紹介し、ピッチ系GPCFの製造技術、工業化に際して要求されるプリカーサーピッチの性状について詳述すると共に、工業化する上で残されている技術課題を明らかにし、本研究の意義と目的を述べた。

第2章では、コールタールピッチから高軟化点の完全等方性ピッチを製造する方法としてエアブローン法の可能性について調べた。その結果、330~380℃の高温下でのエアブローン反応により、メソフェース球晶を含有しない等方性高軟化点ピッチ(軟化点280℃)が得られることを明らかにした。このピッチは255℃から330℃の広範囲で優れた紡糸性と熱安定性を有し、GPCFのプリカーサーピッチとして優れたも

のであることを明らかにするとともに、プリカーサーピッチの実用的製造方法の基礎を確立した。一方エアブローンピッチを600℃で炭化して得られるセミコックスが光学的異方性を示すことを認め、エアブローン後も空気を遮断すれば重縮合反応が低粘度下で進む構造であることを明らかにした。

第3章では、種々のピッチ原料からの等方性ピッチの製造方法としてエアブローン法を評価すべく、ナフタレン原料の等方性合成ピッチと水素化コールタールピッチのエアブローン反応について調べた。両ピッチともナフテン構造を有するにもかかわらず、コールタールピッチに比べてエアブローン反応による軟化点上昇が極めて遅い。特にナフタレン合成ピッチはブローン反応により軟化点が高々200から210℃までしか上昇できない。エアブローンによる重合反応を加速するためピッチに1, 8ジニトロナフタレン(DNN)を添加してエアブローンすれば、DNNの添加量、ブローン温度、時間をコントロールすることにより、両ピッチからそれぞれ軟化点240℃と275℃の等方性高軟化点ピッチが得られることを見出した。添加したDNNの熱分解により生成するNO₂とNOが酸化反応あるいはラジカル反応を誘発し、ナフタレンピッチと水素化コールタールピッチの重縮合反応を加速する反応機構を提案した。

第4章では、コールタールピッチのエアブローンによって得られた等方性プリカーサーピッチの不融化性を向上させるために、ナフテン水素を多く含有するナフタレンピッチのブレンディングについて調べた。等方性及び異方性のナフタレン合成ピッチは、その添加量が30%程度まではブローンピッチと均一に混合し、混合ピッチの軟化点が低下すると共に、紡糸性が向上した。20%のナフタレン合成ピッチを混合して得られるピッチファイバーの不融化時間は、混合しない場合に比べて20から30分短縮できると共に、得られた炭素繊維の機械強度が向上することを見出した。これらの知見から、GPCF用プリカーサーピッチのブレンディングによる品質向上法を提案した。

第5章では、3種の原料ピッチから得られたブローンピッチの元素分析、NMR、質量分析及びFT-IR分析結果から、原料ピッチの化学構造とエアブローン反応性との関係を調べた。コールタールピッチ、水素化コールタールピッチ及び石油系ピッチの3種の等方性ピッチは異なったエアブローン反応性を示し、最も軟化点の低コールタールピッチが最大の軟化点上昇を示した。同じ軟化点のブローンピッチ間で比較すれば、コールタールピッチと水素化コールタールピッチは石油系ピッチに比較して、芳香環の重縮合が進み、キノリン不溶分が大きくなっている。原料及びブロー

ンピッチの各種分析結果から、水素化コールタールピッチと石油系ピッチは含有するアルキル基とナフテン基が酸化縮合反応の連鎖反応を停止するために、軟化点の上昇が緩やかになると推定した。

第6章は、本研究の結果を要約し、結論を述べた。

論文調査の要旨

ピッチ系等方性炭素繊維あるいは活性炭素繊維は、コスト/パフォーマンスの優れた材料として評価され、需要が拡大している。安価の芳香族性のピッチ原料の紡糸性を維持しつつ、軟化点を上昇させて、不融化石反応が高温で実行できるプリカーサーピッチの製造が炭素繊維の商業的生産に不可欠である。

本研究は、コールタールピッチ等のピッチからエアブローン処理して等方性を維持しつつ、高軟化点を達成する等方性炭素繊維用プリカーサーの商業的生産方法を確立し、その過程におけるピッチの構造ならびに物性の変化を明らかにしたものであり、以下の成果をえている。

1. コールタールピッチを原料に330~380℃の高温でエアブローン下加熱処理することにより、軟化点280℃で熱安定性ならびに紡糸性に優れた等方性プリカーサーピッチの製造に成功している。
2. エアブローンピッチの炭化性を調べたところ、メソフェーズが展開することを認め、エアブローン温度以上で炭化すれば、重縮合時に液晶形成が許される高流動性が維持でき、本研究の条件ではエアブローン時にピッチ構成分子中に、酸素が導入されないことに対応していることを明らかにしている。
3. ナフタレン合成ピッチに同様のエアブローン法を適用したところ、軟化点の上昇が著しく遅く、適当なプレカーサーピッチを製造できないことを認めたが、1, 8ジニトロナフタリンを添加することにより、軟化点上昇を加速できることを見出ししている。添加した1, 8ジニトロナフタリンの分解により生成するNO₂およびNOがラジカル反応を開始し、ピッチの重縮合反応を加速する反応機構を提案している。
4. コールタールピッチからエアブローン法によって製造した炭素繊維用プリカーサーピッチに対する合成ピッチの混合を検討し、紡糸性ならびに不融化石反応性の改善に成功している。ピッチの組成制御による物性改善法の提案として評価できる。
5. 原料ならびにエアブローンピッチの化学構造を解析し、芳香環の酸化的脱水素重縮合により、軟化点が増加する機構を提案している。ナフテン基を多数有する合成ピッチはラジカル連鎖が停止するため、軟化点の上昇が緩慢となると解釈している。
6. プリカーサーピッチの不融化石反応性がピッチ中

のアルキル基、ナフテン基量に強く依存することを認め、組成調製によるピッチの流動性ならびに不融化石反応性の改善が成分分子間の相互溶解ならびに分子間反応の加速に基づくことを明らかにしている。

以上要するに、本研究はコールタールピッチを原料として石油系製品について知られていたエアブローン法を高温で適用し、汎用等方性炭素繊維プリカーサーを製造する商業的方法を確立するとともに、その過程の化学変化を解明したもので、これらの成果は工業的価値に加えて、有機工業化学、炭素材料化学上価値ある業績である。よって本論文は博士(工学)の学位論文に値するものと認められる。

氏名(本籍) 安 信 強 (山口県)
 学位記番号 総理工博乙第237号
 学位授与の日付 平成8年2月26日
 学位論文題目 管開口端からの圧縮波の放出により形成されるパルス波の特性に関する研究

論文調査委員

(主 査) 九州大学 教授 松 尾 一 泰
 (副 査) 〃 〃 小 野 信 輔
 〃 〃 西 田 迪 雄
 〃 〃 永 山 邦 仁

論文内容の要旨

管内を伝ばする圧縮波が管の開口端に達すると、その一部は反射され、残りは管外に放出される。放出された圧縮波はパルス状の圧力波(パルス波)となって管外の空間を伝ばし、衝撃音の原因となる。例えば、新幹線がトンネルに突入することによりトンネル出口で発生する衝撃音はこのようにして生じる音であり、近年の新幹線の高速化に伴って大きな問題となりつつある。このため、従来より圧縮波とパルス波との関係や、衝撃音の低減策などに関して多くの研究がなされ、前者については空力音響解析を用いて理論的に導出されている。しかし、この圧縮波とパルス波との関係は、微小振幅波である音波を対象とする理論に基づいており、圧縮波のような有限振幅波の場合にも適用できるかどうかについては議論の余地が残されている。また、パルス波の特性やパルス波の形成過程についても十分な議論がなされていないのが現状である。

このような観点から、本論文は圧縮波とパルス波との関係や、パルス波の特性、およびパルス波の形成過程について、理論解析、数値解析、および実験により研究を行なったもので、6章より構成されている。

第1章では、管開口端からの圧縮波の放出により形

成されるパルス波に関する研究の必要性を述べるとともに、本論文の内容について概説している。

第2章では、まず、管内を伝ばする音波が開口端に達したときの開口端での音波の反射と放射現象や開口端補正の考え方、あるいは放射された音波の距離減衰や指向特性に対する音響理論による解析結果が記してある。これらの解析結果は、開口端からの圧縮波の放出や、形成されるパルス波の伝ば特性に関する基礎的な知見を与える。また、開口端からの非線形音波の放射や衝撃波の放出に関する従来の研究結果についても詳述している。これらの研究では、いずれも音響工学で得られた開口端における放射インピーダンスと波の重ね合わせを用いた理論解析がなされており、その解析方法の詳細と問題点が述べられている。次に、管内の圧縮波とパルス波の強さとの理論的な関係について、従来行なわれていた開口端補正を考慮しない空力音響理論による解析方法について詳述し、この解析法による問題点を明らかにしている。

第3章では、開口端補正を考慮した空力音響理論による解析法を提案し、この方法を用いて管内の圧縮波とパルス波の強さとの理論的な関係を導出している。この解析結果によれば、形成されるパルス波の強さは、開口端における圧力変化の最大値に比例し、従来言われていた開口端に達する圧縮波の最大圧力こう配に比例しない場合がある。さらに、圧力波形が正接曲線と与えられる圧縮波に対して、開口端補正を考慮した空力音響理論による解析結果を適用し、開口端補正を必要とする圧縮波の波面の長さの範囲や、圧縮波の波面の長さやパルス波の強さとの関係、圧縮波の最大圧力こう配とパルス波の強さとの関係などを理論的に明確にしている。

第4章では、パルス波の形成過程を調査するための数値解析方法の詳細と、数値解析結果を記述している。圧縮波が開口端に達すると開口端のコーナーから膨張波が形成され、この膨張波と圧縮波の三次元的な干渉によりパルス波が形成される過程が示されている。また、パルス波の形成領域について考察し、パルス波は近距離場内で形成されることを明らかにしている。さらに、パルス波の形成過程に及ぼす圧縮波の波面の長さの影響について解析を行ない、圧縮波の波面の長さは、パルス波の形成開始位置に大きな影響を持っていることが示されている。

第5章では、遠距離場におけるパルス波の特性、すなわちパルス波の距離減衰や指向特性に関する数値解析と実験結果を記している。数値解析により得られた遠距離場におけるパルス波の強さは、第3章で導出された理論解析結果とよく一致することが示されており、この結果から、本論文で得られた理論解析の有効性が

確認されている。一方、本研究で使用された実験装置は、通常の衝撃波管の隔膜部を急速開口弁におきかえたもので、実験により得られた圧縮波の波形は非常になめらかである。開口端下流の測定部には圧力変換器、および騒音計を設置し、遠距離場において形成されるパルス波の圧力波形を計測している。遠距離場におけるパルス波の強さの実験値は、空力音響理論による解析結果とよく一致する。また、遠距離場におけるパルス波の距離減衰と指向特性は、音響理論を用いて解析できることが明らかにされている。これらの結果から、第3章で提案した圧縮波とパルス波の強さに関する理論解析結果に音響理論を考慮することにより、遠距離場の任意の位置におけるパルス波の強さを予測することが可能であることが示されている。

第6章には、本論文の結論と今後の研究課題について記述している。

論文調査の要旨

近年、新幹線の高速化に伴ってトンネル出口より発生する衝撃音が問題となりつつある。この衝撃音は、列車の突入によりトンネル入口に形成される圧縮波がトンネル内を伝播し、出口より放出されることにより生じるパルス波によることが知られている。しかし、圧縮波からパルス波が形成される過程や形成されたパルス波の特性についてはまだよく分かっていない点が多く、衝撃音の低減対策の必要性から、その早急な解明が望まれている。

このような観点から、本論文は、断面積一定の管内を伝播する圧縮波が出口の開口端から放出される時の流れについて理論と実験の両面より研究し、圧縮波とパルス波の関係や管外におけるパルス波の挙動について調べた結果をまとめたものである。

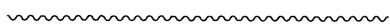
本論文では、まず、管開口端からの圧縮波の放出過程を一次元流れとしてモデル化し、新しい開口端補正の方法を提唱している。この方法によれば、管内の圧縮波とその放出により形成されるパルス波の関係、すなわち圧縮波の強さや波面形状、特に圧縮波による圧力の時間的増加割合（圧力こう配）の最大値とパルス波の強さとの関係などが理論的に導かれる。開口端補正を考慮しない従来の解析によれば、パルス波の強さは開口端に達する圧縮波の最大圧力こう配に比例するが、本解析によれば、開口端における圧力の時間的変化の最大値に比例する。

つぎに、著者は管開口端からの圧縮波の放出過程の軸対称流れ場を差分法により数値解析し、パルス波の形成過程を明らかにしている。その結果によれば、圧縮波が開口端に達すると開口端のコーナーから膨張波が形成され、この膨張波と圧縮波の三次元的な干渉に

よりパルス波が形成される。また、パルス波の強さは開口端からの距離の増加とともに減衰するが、本論文では、強さが距離に反比例し波形の相似性が保たれる、いわゆる遠距離場と、開口端近傍のいわゆる近距離場におけるパルス波の特性を明らかにしている。なお、数値解析によって得られたパルス波の強さや波形は前述の開口端補正を考慮した理論解析結果と良く一致し、本論文で提唱している開口端補正の方法が妥当であることを示している。

さらに、著者は衝撃波管の隔膜部に急速開口弁を用いた装置により圧縮波を発生させ、それを開口端より放出させる実験を行い、遠距離場におけるパルス波の強さを測定している。その結果、パルス波の強さの開口端からの距離による変化、すなわち距離減衰特性や、開口端を原点とした中心軸からの角度によるパルス波の強さの変化、すなわち指向特性に関して、実験結果は上述の数値解析結果とよく一致することを示している。

以上要するに、本論文は管開口端からの圧縮波の放出によりパルス波が形成されるメカニズムや形成されたパルス波の強さ、距離減衰、指向特性などについて多くの重要な知見を得ており、これらの成果は流動工学上寄与するところが大きい。よって本論文は博士(工学)の学位論文に値するものと認められる。



氏名(本籍) 岩本 勝治(山口県)
 学位記番号 総理工博乙第238号
 学位授与の日附 平成8年2月26日
 学位論文題目 高電圧ガス遮断器用超音速ノズルに関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 松尾 一 泰
 (副査) 〃 〃 渡辺 征 夫
 〃 〃 益田 光 治
 〃 〃 速水 洋

論文内容の要旨

超高圧変電所の遮断器には、電氣的に不活性な六フッ化硫黄(SF₆)ガス絶縁方式が適用されるようになってきた。遮断器は、送配電線や変電所母線・機器などの短絡故障時における50kA程度以上の大電流遮断と、平常時の電力用コンデンサおよび分路リアクトルの回路開閉操作に伴う100A程度の小電流遮断の両者を行う。大電流遮断ではアークの消弧にSF₆ガスの高速流れが必要となる。いっぽう、小電流遮断では瞬時にアークが消滅するため流れ場の断面積が増大し、大量のガスが流出する。その結果、流れ場の圧力が低

下して再点弧の危険性が生じるため、小電流遮断時には圧力が低下しないように流速を低く抑える必要がある。ガス遮断器用ノズルはこれらの相反する要求を満足する流れ場を発生させるものでなければならない。

ガス遮断器用ノズルに関する従来の研究はノズル内のアークの挙動が中心で、かつ研究のほとんどは高圧のSF₆ガスを常時蓄えておく二圧式遮断器に関するものである。これに対し、本研究で対象とするパッファ形ガス遮断器は電流遮断時にピストンで高圧ガスを発生させる形式で、この形式のガス遮断器に関する研究は数少ない。パッファ形ガス遮断器に使用されている消弧ノズルは、パッファ室で圧縮され高圧となったSF₆ガスを、ノズル中心部でアークに直角に吹き付け左右に分岐して流出させる。このようにガス遮断器ノズルは、通常の超音速用ラバルノズルとは非常に異なる特殊形状をしており、ノズル本体の流体力学的特性はまだよく分かっていない。このため、ノズルの設計指針が得られておらず、ノズルの製作は試行錯誤的になされているのが現状である。

本論文は、実機寸法の1/2の模型ノズルを用い、かつ作動流体に取扱いが煩雑なSF₆の代わりに空気を使用した実験と、差分法および変形FLIC法による数値解析を行い、ガス遮断器ノズル本体、大電流遮断時のノズルによる超音速噴流および小電流遮断時のノズル内部流れの研究を行ったもので、6章より構成されている。

第1章では、高電圧ガス遮断器の開発の背景と歴史、内部構造および遮断原理、従来の研究経緯、本研究の目的を述べるとともに、本論文の内容と構成を概説した。

第2章では、まずSF₆ガスの特性を述べ、SF₆の流れ場と実験で用いた空気の流れ場との相似性について考察した。つぎに実験装置の概要と供試ノズル、電極形状について記述した。また、流れ場測定用のレーザを用いた光学的測定法とレーザ流速計について説明した。

ガス遮断器内の流れ場は、固定電極がノズル出口より下流側にある大電流遮断の場合と、ノズル内部にある小電流遮断の場合とで大きく異なる。第3章ではこれらの流れを数値解析する際に用いた方法について説明した。大電流遮断の場合には、流れ場は直交格子系で解析できるため、三次元軸対称差分法を適用した。いっぽう、小電流遮断の場合はノズル内部に流れの分岐点が存在するため直交格子系を用いることができない。そこで非構造格子を用いた三次元軸対称変形FLIC法で流れ場を解析した。

第4章では、固定アーク電極がない場合のガス遮断器ノズル単体の流体力学的特性を明らかにするために

行った実験について述べた。形状の異なる3種類のノズルに対して、プレナム室や分岐部およびノズル壁面で圧力測定を行うとともに、ノズル出口からの噴流の可視化や噴流内の流速測定を行った。これらの結果に基づき、ノズル形状と衝撃波の発生位置との関係や噴流の特性を明らかにした。

第5章では、まず、固定アーク電極の位置を変化させ、電極がノズル内部および外部の種々の位置にある場合のノズル壁面静圧の測定結果について述べた。つぎに、固定アーク電極が大電流遮断時に対応したノズル外部にある場合の超音速流れの特性に関し、可視化測定、流速測定、および差分法による数値解析を行った。また、小電流遮断時の固定アーク電極がノズル内部にある場合、ノズル内部流れに関して、アクリルノズルおよびガラスノズルを用いた可視化、流速測定および変形 FLIC 法による数値解析を行い、流れ場の特性を調べた。これらの実験および数値解析結果より、固定アーク電極先端に発生する離脱衝撃波の形状やそのノズル壁面との相互作用の状態を示し、固定アーク電極が存在する場合の流れ場を明らかにしている。

第6章では、以上のガス遮断器ノズルに関する研究成果をまとめて、本研究の結論を示すとともに、今後の課題に言及している。

論文調査の要旨

超高压変電所の遮断器は、送配電線や変電所母線・機器などの短絡故障時における大電流遮断と、平常時の電力用コンデンサおよび分路リアクトルの回路閉鎖操作に伴う小電流遮断の両者を行う。遮断時に発生するアークを消すには絶縁性の高い六フッ化硫黄ガスの超音速噴流をアークに吹き付ける。従来は高压ガスを常時蓄えておく二圧式ガス遮断器が用いられてきたが、近年、大容量小型化の要求から、電流遮断時にピストンで高压ガスを発生させるパuffa形が用いられるようになってきた。パuffa形ガス遮断器に使用される消弧ノズルは、パuffa室で圧縮された高压ガスをノズル中心部でアークに直角に吹き付け、アークに沿って分岐させ流出させる。すなわち、ガス遮断器用ノズルは通常の超音速ノズルとは非常に異なる形状をしており、ノズル本体の流体力学的特性はよく分かっていない。このため、ノズルの設計指針が得られておらず、ノズルの製作は試行錯誤的に行われているのが現状である。

本論文は、パuffa形ガス遮断器用超音速ノズルの流体力学的特性について、模型実験と数値シミュレーションを行った結果を取りまとめたもので、ノズル単体の流れ、大電流遮断時に対応するノズル出口からの超音速噴流および小電流遮断時のノズル内部流れの解

明を試みている。本研究の特徴は、種々の遮断条件下における超音速流れと亜音速流れの領域や衝撃波の発生状況を系統的に明らかにしたことである。本研究で得られた主な知見は以下のとおりである。

まず、固定電極がない場合のガス遮断器ノズル単体の流体力学的特性に関し、基準となるノズルと、そのノズルのスロート下流における広がり角やスロート断面積を変えた3種類のノズルについて実験を行い、スロート下流のノズル形状よりもスロート断面積が衝撃波の位置に大きな影響を与えることを明らかにしている。また、可動電極側と固定電極側に流れる気体の流量比はアークの消弧に対して極めて重要なパラメータであるが、その流量比を本研究で初めて定量的に得ている。

つぎに、固定電極がある場合については、固定電極とノズルの相対位置により流れ場を次の三つのケースに分類し、その特徴を明らかにしている。すなわち、1) ノズル内流路の最小断面部分がノズル壁面と固定電極の間に囲まれた流路にある場合、流れは全領域で亜音速である。2) ノズルスロートが流路の最小断面部分で、かつ固定電極がノズル内にある場合、流れはスロートでチョークし、その下流は超音速となって、固定電極前面に離脱衝撃波が発生する。3) ノズルスロートが流路の最小断面部分で、かつ固定電極がノズルの外にある場合、流れ場は全領域で超音速である。上記のそれぞれのケースにおけるノズル出口からの噴流の構造や衝撃波の発生位置とその形状を明らかにしている。

さらに、本実験で得られたこれらの流動状態は、差分法および変形 FLIC 法による数値解析結果と良く一致することを示している。

以上要するに、本論文は、模型実験と数値シミュレーションにより、従来よく分かっていなかったガス遮断器ノズルの流れに関して多くの知見を得るとともに、ノズルの設計指針を示したもので、流体力学、電気工学、エネルギー変換工学上寄与するところが大きい。よって本論文は博士(工学)の学位論文に値するものと認められる。

氏名(本籍) 下 藺 真 一 (鹿児島県)

学位記番号 総理工博乙第239号

学位授与の日附 平成8年2月26日

学位論文題目 Local Search and Approximation
for Combinatorial Optimization
(組合せ最適化問題の局所探索と
近似手法)

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 宮野 悟
 (副査) 〃 〃 有川 節夫
 〃 〃 〃 松尾 文碩
 〃 〃 助教授 篠原 歩

論文内容の要旨

組合せ最適化問題は、文字列やグラフといった組合せ構造上の制約条件を満たす解のうち、そのよさを与える目的関数の値を最大あるいは最小にする解を求める問題である。科学技術の分野で直面する計算問題の多くは、組合せ最適化問題として定式化できる。しかしながら、巡回セールスマン問題など応用上重要な問題の多くは NP 困難であり、 $P \neq NP$ の仮定のもとでは、多項式時間で最適解を得ることは不可能なことが明らかになっている。近似アルゴリズムは、この計算量的困難さを克服するための実際的な手段の一つであり、最適解と比較しても十分によい近似解を、効率よく計算することを目的としている。

本論文では、まず、文字列上の情報を損なわずに文字の種類を減らす文字分類写像について、これを求めるいくつかの最適化問題の定式化を行い、その計算量的困難さを解明した。さらに、文字分類写像の最適化問題に対して近似アルゴリズムを設計し、その計算時間と、出力する解の誤差を解析した。また、近似アルゴリズムの有用性を検証するために行った実験では、文字分類写像を用いる機械学習システムによって、与えられた例から重要な知識表現を得ることに成功した。

つぎに、部分グラフ最大化問題として定義可能な多くのグラフの最適化問題について、自然に定義される局所探索問題は多項式時間で解くことが困難であることを証明した。これは、グラフを扱う局所探索問題に関して一様な計算量的困難さを示したはじめての結果である。

文字分類写像は、文字列の変換を定義する文字の置き換え写像であり、文字列を扱う際の組合せの数を減らすことを目的としている。第4章では、まず、交わりを持たない二つの文字列の集合に対して、文字分類写像による変換で生じる集合の交わりの大きさを最小にする最適化問題を定義し、この問題が NP 困難であることを明らかにした。つぎに、この最適化問題に対する局所探索アルゴリズムを設計し、局所探索問題が PLS 完全となること、すなわち局所最適解の探索が多項式時間では困難なことを証明した。また、変換された二つの集合の間に交わりを許さない場合に、文字分類写像に必要となる最小の文字種数を求める最適化問題を定義し、多項式時間での近似が困難なことを明らかにした。

第5章では、第4章で設計した局所探索アルゴリズム

に基づき、文字列データからの知識獲得を行う機械学習システムを構築し、タンパク質のアミノ酸配列データからの知識獲得の実験を行った。この機械学習システムは、与えられた例をごく少数の文字種類からなる文字列に変換する文字分類写像を探索し、同時にその変換された例を説明する正規パターン上の決定木を生成する。膜タンパク質の膜貫通領域判定問題について行った実験では、アミノ酸のよく知られた性質に基づく分類とほぼ等しい文字分類写像とともに、単純なので判定精度の高い決定木が見つかった。また、タンパク質のシグナル配列検出問題について行った実験でも非常によい結果を得た。これらによって、設計した局所探索アルゴリズムがよい近似解を見つけることを確かめた。

第6章では、二つの文字列の集合から生成される異なる文字列の組のうち、変換後も異なる組の数を最大にする文字分類写像を求める問題を定義し、これを解く近似アルゴリズムの解析を行った。まず、この問題が MAX SNP 困難なこと、すなわち $P \neq NP$ の仮定のもとで、誤差率を任意に小さくできる多項式時間アルゴリズムがこの問題には存在しないことを証明した。つぎに、この問題の多項式時間近似アルゴリズムを設計した。文字を K 種類に分類する場合、このアルゴリズムが定数誤差率 $1/K$ を保証することを証明した。さらに、文字列の組を M 個の文字列の組に拡張した最適化問題を定義し、定数誤差率を達成する多項式時間近似アルゴリズムを与えた。

第7章では、部分グラフ最大化問題に関する局所探索問題の計算量の解析を行った。あるグラフ属性 π を満たす全てのグラフに対して、その任意の部分グラフもまた π を満たすとき、 π は遺伝的であるという。グラフ属性 π に関する部分グラフ最大化問題は、与えられたグラフ上に π を満たす最大の部分グラフを見つける問題である。完全部分グラフ問題、 k 彩色可能部分グラフ問題など多くの重要なグラフの最適化問題は、 π として適切な遺伝的グラフ属性を選ぶことで、部分グラフ最大化問題として定義できる。部分グラフ最大化問題は、さまざまな計算量クラスにおいて解析が行われており、遺伝的グラフ属性に対するこの問題の計算量的困難さは、すでに体系化された手法によって示されている。しかし、局所探索問題のクラス PLS においては同様の結果は得られていなかった。そこで、最大独立点集合問題の局所探索アルゴリズムを拡張することにより、部分グラフ最大化問題の局所探索アルゴリズムを設計し、すべての遺伝的グラフ属性で定義される局所探索問題が PLS 完全となることを証明した。この結果により、さまざまなグラフ問題の局所最適解の探索が、多項式時間では困難であることが明らか

かになった。

論文調査の要旨

組合せ最適化問題は、文字列やグラフといった構造を対象とし、定められた条件を満たす解のうち、そのよさを与える目的関数の値を最大あるいは最小にする解を求める問題である。科学技術の分野で直面する問題のなかには、組合せ最適化問題として定式化される計算問題が数多くある。しかし、巡回セールスマン問題など応用上重要な問題の多くが NP 困難であることが証明されており、 $P \neq NP$ の仮定のもとでは、多項式時間で最適解を得ることは不可能なことが明らかになっている。近似アルゴリズムの概念は、この計算量的困難さを克服するために導入されたものであり、近似アルゴリズムは、最適解と比較して十分によい近似解を実際的に効率よく計算することを目的としている。

本論文は、タンパク質のアミノ酸配列データからの知識発見の研究のなかで定式化した文字分類写像について、組合せ最適化問題としての計算の困難さの解明及び近似アルゴリズムの設計と解析を行なっている。さらに、局所探索法について、部分グラフの最大化に関する局所探索問題の計算量を明らかにしている。

本論文で得られた主な成果は、以下の3つに要約できる。

(1) 文字分類写像の概念の定式化に成功し、文字分類写像を求める問題が NP 困難となることを証明している。文字分類写像は、交わりをもたない2つの文字列の集合 P と Q に対して、その文字列のアルファベットをより小さなアルファベットに変換し、文字変換後も交わりをもたないようにするものとして定義されている。この問題に対して、多項式時間局所探索アルゴリズムの設計とその理論的解析を行なっている。このアルゴリズムは、BONSAI という配列データからの知識発見システムのなかを実働化され、膜タンパク質の膜貫通領域配列やシグナル配列を用いた計算機実験で、分子生物学的に意味のある知識を発見することに成功している。この成功の鍵となったものは、本論文で初めて定式化した文字分類写像の概念であり、非常に価値ある業績といえる。

(2) 文字分類写像を求める問題が NP 困難であることが判明したため、この問題を最適化問題としてとらえ、その多項式時間近似アルゴリズムを与えている。そのアルゴリズムにおいては、アルファベットを K 文字に分類する場合、近似率が $(K-1)/K$ となることを証明している。さらに、この問題が MAX SNP 困難なことを証明し、 $P \neq NP$ の仮定のもとで、多項式時間アルゴリズムでは、近似率を任意に1に近づけることが不可能であることを明らかにした。

(3) 部分グラフ最大化問題に関する一連の局所探索問題が PLS (Polynomial-time Local Search) 完全となることを非常に一般的な形で証明している。この結果により、局所最適解といえども多項式時間で求めることが困難な問題が数多く同定されている。あるグラフの属性 π を満たすすべてのグラフに対して、その任意の部分グラフが属性 π を満たすとき、 π は遺伝的であるという。グラフ属性 π に関する部分グラフ最大化問題は、与えられたグラフ上に π を満たす最大の部分グラフを見つける問題である。完全部分グラフ問題、 k 彩色可能部分グラフ問題など多くの重要なグラフの最適化問題は、 π として適当な遺伝的グラフ属性を選ぶことで、部分グラフ最大化問題として定義できる。部分グラフ最大化問題は、いくつかの観点から解析され、その計算量が解明されている。しかし、局所探索問題としての定式化及び解析は十分に行なわれていない状況であった。本論文では、最大独立点集合問題の局所探索アルゴリズムを拡張することにより、部分グラフ最大化問題の局所探索アルゴリズムを設計し、すべての遺伝的グラフ属性で定義される局所探索問題が PLS 完全となることを証明している。PLS 完全性についてのこうした一般的な結果は、本論文で初めて得られたものである。

以上要するに、本論文は、文字分類写像及び部分グラフの最大化に関する組合せ最適化問題について、局所探索法と近似手法を理論と実際の両面から究明したものであり、情報科学上寄与するところが大きい。よって本論文は博士(理学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 李 鉉 列 (大韓民国)
 学位記番号 総理工博乙第240号
 学位授与の日附 平成8年2月26日
 学位論文題目 Studies on Dynamical Behaviors of Finite Cellular Automata (有限セルオートマトンの挙動に関する研究)

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 河原 康 雄
 (副査) " " 有川 節 夫
 " " " 中尾 充 宏

論文内容の要旨

セルオートマトンは、生命現象の1つである細胞の自己増殖機能を模倣するために、J. von Neumann によって導入された理論的モデルである。通常の機械は、それ自身より複雑でない対象を作るためのものである

が、生物の発生においては、進化と適応によって次第にそれ自身の複雑度を増加させる。セルオートマトンの挙動は、その簡単な構造にもかかわらず非常に複雑であり、フラクタルやカオスなどの現象との類似性も指摘されている。1980年代には、物理学における複雑系の理論的モデルというセルオートマトンのもう一つの重要な役割が見いだされた。このような理由から種々の自然現象のモデルを提供するシステムとして、セルオートマトンに対する興味が科学分野において広がっている。

セルオートマトンは、オートマトンネットワークのなかで、セル（サイト）が一様に配列され各セルの状態遷移規則が同一のものである。また、各セルの局所遷移規則から得られる大域的遷移規則の構成も、同期的なものや非同期的なものなど種々のものが提案されている。1次元の最も基本的な局所遷移規則は、3近傍局所遷移規則と呼ばれるもので、記号0と1からなる長さ3の記号列に0または1を割付ける規則である。その個数は256個あり、割付規則のコード化により0番から255番までの規則番号が付与されている。

本論文では、3近傍局所遷移規則あるいは5近傍局所遷移規則に従う1次元あるいは2次元有限セルオートマトンの挙動について、特に、不動点（安定様相）、リミットサイクルの周期とその個数、状態遷移グラフについて研究した。

第2章では、通常の同期的遷移規則をもつセルオートマトンより複雑な機構をもつ Gauss-Seidel 型セルオートマトンに対して挙動の解析を行った。Gauss-Seidel 型機構とは、セルの与えられた順序に従って局所遷移規則を適用する1種の非同期的遷移規則である。まず、この Gauss-Seidel 型のセルオートマトンの大域的状态遷移関数の反復関数を計算した。その結果を利用して、Gauss-Seidel 型セルオートマトンの不動点の存在を示し、状態遷移図のリミットサイクルの最大周期はセルの個数の線形関数であることを証明した。さらに、大域的状态遷移関数の不動点の個数をいくつか異なる境界条件のもとで計算した。

第3章では、加法的局所遷移規則をもつ1次元および2次元セルオートマトン $ca-60$ の大域的挙動について解析した。規則番号60番の3近傍局所遷移規則とは、あるセルの次の状態をそのセルとその左側のセルの状態の（2を法とする）和によって定めるものである。このセルオートマトンの様相を打ち切り多項式によって表現すると、局所遷移規則から誘導される大域的遷移関数も比較的簡単な打ち切り多項式により表現できることを示した。この結果を利用して、1次元セルオートマトン $ca-60(m)$ のリミットサイクルの周期およびその周期を持つリミットサイクルの個数を求め、

1次元セルオートマトン $ca-60(m)$ の位相的挙動を決定した。また、2次元セルオートマトン $ca-60(m, n)$ についても、大域的遷移関数の表現を2変数の打ち切り多項式により拡張し、位相的挙動を決定する指針を示した。

第4章では、加法的セルオートマトン $ca-90$ に記憶機構を添加したセルオートマトン $cam-90$ について挙動の解析を行った。その準備として、セルオートマトン $ca-90$ の大域的状态遷移関数の表現行列の特性多項式の種々の計算公式を示し、この特性多項式からセルオートマトン $ca-90$ の特徴的な挙動が導出されることを示した。さらに、特性多項式とセルオートマトン $ca-90$ の反復遷移関数を詳細に計算することによって、ある特定の様相を含むリミットサイクルの周期について、1次元セルオートマトン $cam-90(m)$ の場合は、丁度セルサイズ m に等しいこと、2次元セルオートマトン $cam-90(m, n)$ の場合は、 m と n との（2を法とする）乗法的準位数によって与えられる1つの上界の公式を証明した。

第5章では、有限セルオートマトンの状態遷移図について考察した。3近傍局所遷移規則をもつ有限セルオートマトンのなかでも状態遷移図が知られたものは多くない。そこで、まず状態遷移図を一般に表現する方法として木構造表現式およびサイクル表現式を導入し、過渡長の短い3近傍局所遷移規則をもつ有限セルオートマトン $CA-R_{a-b}(m)$ に対して、それらの状態遷移図を手計算およびコンピュータによって描くことにより木構造表現式のセルサイズ m についての帰納的公式を求めた。

論文調査の要旨

セルオートマトンは細胞の自己増殖機能を模倣するためのモデルとして導入されたもので、物理学における複雑系、ある種の反応性をもった媒質のなかで起こる化学反応、生物学におけるパターン形成など種々の自然現象のモデルとして広い科学分野で研究されている。解析学の分野では、セルオートマトンとフラクタルやカオスとの関係が研究されており、コンピュータを用いたセルオートマトンの模倣による統計学的な漸近挙動の解析も行われている。しかし、コンピュータでセルオートマトンを模倣する場合、現状では必然的に有限のものになる。従って、有限セルオートマトンに関する知識は、それ自身の重要性に加え、模倣によるセルオートマトンの研究に対しても基本的な指針を提供するものとして意義がある。

本研究はいくつかの有限セルオートマトンの挙動を解析・決定したもので、以下の結果を得ている。

- (1) 通常の同期的（並列的）遷移規則とは異なり、

ある順序に従って非同期的に局所遷移規則を適用する Gauss-Seidel 型セルオートマトンに対して挙動を解析している。この Gauss-Seidel 型セルオートマトンの大域的状態遷移関数の反復関数を計算し、セルオートマトンの様相のなかでも特徴的に現れる不動点の存在を示している。また、極限輪 (limit cycle) の最大周期はセルの個数の線形関数であることを示している。さらに、不動点の個数を4種類の異なる境界条件のもとで計算している。

(2) 加法的局所遷移規則60番をもつ1次元および2次元セルオートマトン ca-60 の大域的挙動について解析している。このセルオートマトンの様相を打ち切り多項式によって表現することにより、局所遷移規則から誘導される大域的遷移関数も比較的簡単な打ち切り多項式により表現できることを示している。この表現法を用いて、1次元セルオートマトン ca-60(m) の極限輪の周期およびその周期をもつ極限輪の個数を計算し、その位相的挙動を決定している。また、2次元セルオートマトン ca-60(m, n) についても、同様に大域的遷移関数の表現を2変数の打ち切り多項式により拡張し、位相的挙動を決定する指針を示している。

(3) 加法的局所遷移規則90番をもつセルオートマトン ca-90 に記憶機構を添加したセルオートマトン cam-90 について挙動の解析を行っている。まず、セルオートマトン ca-90 の大域的状態遷移関数の表現行列の特性多項式に関して、Cayley-Hamilton の定理を含む種々の計算公式を示し、この特性多項式の特殊な性質を利用してセルオートマトン ca-90 の挙動の特徴を効率よく導出している。さらに、特性多項式とセルオートマトン ca-90 の反復遷移関数を詳細に計算し、すべてのセルの状態が1であるような特別の様相を含む極限輪の周期について、1次元セルオートマトン cam-90(m) の場合は、丁度セルサイズ m に等しいこと、2次元セルオートマトン cam-90(m, n) の場合は、m と n との (2 を法とする) 乗法的準位数によって1つの上界を与えている。

(4) 3近傍局所遷移規則をもつ過渡長の短い有限セルオートマトン CA-R_{a-b}(m) の状態遷移図について考察している。そのために、状態遷移図を一般的に表現する方法として木構造表現式およびサイクル表現式を定式化し、これらの表現式に関する直積公式、和公式を導出している。それらの準備のもとで、13種類の有限セルオートマトン CA-R_{a-b}(m) (R=12, 200, 140, 4, 76, 29, 8, 72, 108, 1, 5, 19, 36) の状態遷移図を分析し、木構造表現式のセルサイズ m についての帰納的公式を導出している。

以上要するに、本論文はいくつかの有限セルオートマトンの不動点、極限輪の周期と個数、状態遷移図の

帰納公式を明らかにしたもので、情報科学に寄与する所が大きい。よって、本論文は博士(理学)の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 宮原 哲浩 (鹿児島県)
学位記番号 総理工博乙第241号
学位授与の日附 平成8年2月26日
学位論文題目 Studies on Concept Learning by Inductive Inference and Analogical Reasoning (帰納推論と類推による概念学習に関する研究)

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 有川 節夫
(副査) 〃 〃 〃 宮野 悟
〃 〃 〃 〃 松尾 文碩

論文内容の要旨

概念学習とは、与えられた概念の例から、その概念を記述する規則を生成する過程である。ここで、概念とは例の全体領域の部分集合のことである。学習に関する計算論的研究を行なう人工知能分野を機械学習という。概念学習は、機械学習の中心的研究課題である。

本研究は、帰納的関数と論理プログラムを学習アルゴリズムの対象概念を記述する規則とし、帰納推論と類推を基本的な学習手法とする枠組みの下で、様々な概念学習手法を研究したものであり、7章からなる。

第1章では、本研究の背景とその成果について述べ、第2章では、以下の章での議論に必要な基本的概念および用語の導入を行った。

第3章では、帰納的関数の論駁推論可能性について議論した。実験、観測データからコンピュータに科学的法則を発見させることを事実からの機械発見という。機械発見の本質が論駁推論であり、論駁推論可能な仮説空間は機械発見が可能であることがわかっている。最近、言語を対象として機械発見の計算論的学習理論が創始され、機械発見の理論的基礎が確立された。

本研究では帰納的関数の論駁推論可能性を調べて、機械発見の理論的基礎を与えた。機械発見の現実的理論を展開するため、帰納的関数を計算する具体的なプログラミング系の論駁推論可能性を調べた。ループ関数と単純関数のプログラムを具体的プログラム系として、このプログラミング系が計算する関数のクラスの論駁推論可能性を調べた。ループ命令の入れ子の深さが n であるループプログラムで計算できる関数全体のクラスを $\mathcal{FLoop}(n)$ で表すと、 $\mathcal{FLoop}(0)$ は論駁推論不可能であるが、 $\mathcal{FLoop}(n)$ ($n \geq 1$) は論駁推論可能であることを証明した。論駁推論不可能な関数

のクラスは、論駁推論可能な部分クラスの無限列で近似できれば、実質的に機械発見が可能となる。そこで、単純関数を計算する命令を用いて、 $\mathcal{F}Loop$ (1) を近似する論駁推論可能な部分クラスから成る無限列を構成した。

第4章では、帰納推論における自然な成功基準について議論し、その推論能力を比較した。帰納推論においては、仮説の生成過程に対する要求を表す成功基準が多く考えられる。自然な成功基準とは、帰納推論機械に無矛盾性のような自然な望ましい性質を要求するものである。無矛盾性を持つ帰納推論機械は各時点でそれまでにもらった例を説明する仮説しか出力しない。本研究では、新しい成功基準をいくつか導入し、その推論能力を調べた。通常の帰納推論機械は、各時点でそれまでに受け取ったすべての例をもとに、仮説を生成する。自然数 m, n に対して、各時点で最新の m 個の仮説と最新の n 個の例を利用して、次の仮説を生成する帰納推論機械は、反復的であるという。 m 個の仮説を利用する反復的帰納推論機械の推論能力が直前の仮説1つを利用する反復的帰納推論機械と等しいことを証明した。また、最後の仮説に説明できない有限個の例外を許す成功基準が考えられている。最後の仮説に有限個の例外を許す自然な成功基準をいくつか提案し、その推論能力が例外の個数が増えるにつれて、真に大きくなることを証明した。

第5章では、帰納推論と類推を利用する推論システムを提案した。類推とは、類似した既知の事実に基づいて、新しい事実を導く推論のことである。2つの対象を同一視できるかどうかは、時、場所、個人の主観に依存している。そこで、ユーザが与えた類似性についての例を受けとって、類似性を表現する規則を帰納推論して、この類似性に基づいて、新しい事実を推論するシステムを提案し、その能力を評価した。

第6章では、文字列で表現された知識を類推する枠組を提案した。これは、文字列上の論理プログラムである基本形式的体系の枠組を用いて与えた類推の枠組であり、2つの文字列の類似性を見つけるために近似的パターン照合を適用するものである。

第7章では、本研究で得られた結果をまとめ、今後の課題について述べた。

論文調査の要旨

与えられた例からその例を説明する規則を導き出すことを帰納推論といい、また、与えられた二つの対象間の類似性に基づいて、一方の対象で成立している事実や知識をもう一方の対象に変換することによって未知の事実や知識を推論することを類推という。このような帰納推論と類推は、機械学習の基礎理論である計

算論的学習理論における重要な課題であり、これまでに様々な研究が精力的に展開されてきた。帰納推論に関しては、何をもって推論を成功と見なすかという成功基準に関する研究が一つの主流を形成し、また、最近では、学習アルゴリズムによる機械発見の理論として、仮説空間自体を論駁するという、いわゆる論駁推論が提案され注目されている。さらに、類推は、通常の演繹推論に、類似した対象からの知識(ルール)の援用を追加する形で、正確に定式化され理論的な研究の展開が可能になっている。

しかし、論駁推論に関しては、言語族を対象とした精緻な理論は展開されているが、実際の科学技術の展開において得られる数値データを直接取り扱える数値関数については未だ手が着けられていず、また、成功基準に関しては、反復的推論や例外を許す推論の能力についての研究が未だ十分には展開されていない状況にあった。

この論文では、こうした帰納推論におけるいくつかの未解決の課題について新しい理論を展開し、また、類推に関して、その基になる類似性の帰納推論と文字列上の類推という概念を導入して、以下のような重要な成果を得ている。

1. 数値データを直接扱える事実からの機械発見の基礎を築くために、数論的関数である帰納的関数の論駁推論の可能性を議論している。すなわち、対象としてループ関数と単純関数のプログラムを取り上げ、ループ命令の入れ子の深さが n であるループプログラムで計算できる関数全体のクラスを $\mathcal{F}Loop(n)$ で表すと、 $\mathcal{F}Loop(0)$ は論駁推論可能であるが、 $\mathcal{F}Loop(n)$ ($n \geq 1$) は論駁推論不可能であることを証明し、 $\mathcal{F}Loop(1)$ は、単純関数を計算する命令を用いて、論駁推論可能な部分クラスからなる無限列でいくらかでも正確に近似できることを証明している。

2. 新しくいくつかの成功基準を導入し、その推論能力を調べている。帰納推論の各時点において、最新の m 個の仮説と最新の n 個の例を用いて次の仮説を生成する帰納推論機械を反復的であるというが、 m 個の仮説を利用する反復的帰納推論機械の推論能力が直前の仮説一つだけを利用する反復的帰納推論機械と等しいことを証明している。また、推論機械から出力される仮説によっては説明できない有限個の例外を許す成功基準について研究し、最後の仮説にこうした例外を許す自然な成功基準をいくつか提案し、その推論能力が許される例外の個数に応じて真に大きくなることを証明している。

3. 類推のよりどころとなる類似性は、どれとどれを類似しているか、というユーザの主観に依存する。そこで、ユーザが与える類似性についての例か

ら、類似性を一般的に表現する規則を帰納推論して類推を実行する新しい推論システムを提案し、その能力を評価している。これは、帰納推論と類推を自然な形で融合させた新しい研究である。また、文字列上の論理プログラムである基本形式的体系の枠組を用いて、二つの文字列の類似性を見つけるために近似的パターン照合を使う文字列上の類推システムを提案し、DNA 配列やアミノ酸配列からの類推による知識獲得への可能性を示している。

以上、要するに本論文は、帰納推論に関して、関数族の論駁推論の可能性と論駁推論可能な具体的な関数族を示し、自然な成功基準とされている反復的推論と例外を許す成功基準についてその推論能力を明らかにし、また、類推に関して、類似性の帰納推論と文字列上の類推の概念を導入したもので、情報科学上寄与するところが大きい。よって、本論文は、博士（理学）の学位論文に値するものと認める。