

氏名	まつ お しょう へい 松 尾 翔 平
授与学位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成30年3月27日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 化学工学専攻
学位論文題目	コークスの亀裂形成に関する数値解析
指導教員	東北大学教授 青木 秀之
論文審査委員	主査 東北大学教授 青木 秀之 東北大学教授 猪股 宏 東北大学教授 塚田 隆夫

## 論文内容要旨

### 第1章 緒論

製鉄用コークスは粒径が重要な品質であり、その粒径が乾留過程で生じる亀裂によって決定つけられることから、亀裂形成のメカニズム解明が求められている。乾留過程の亀裂は熱応力によって生じるため、理論的かつ定量的な検討を行うためには熱応力解析が有力な手段である。そこで本論文では、有限要素法に基づく熱応力解析を実施し、コークスの乾留過程における亀裂形成について検討した。第2章では、コークス乾留過程における亀裂の形成に関する既往の文献をまとめた。第3章では、亀裂の形成を引き起こす収縮現象に着目し、不活性成分がコークスの収縮に及ぼす影響を調査した。第4-6章においては亀裂の形成そのものに着目し、複雑な亀裂の形成を表現可能な、新規な数値解析手法の提案を行うとともに (第4章)、室炉コークス (第5章) および成型コークス (第6章) における亀裂形成について検討した。

### 第2章 コークスの亀裂形成に関する既往の研究

コークス乾留過程における亀裂の形成に着目し、コークス製造時における課題について既往の研究をまとめた。さらに、亀裂の形成に密接に関係するコークスの乾留現象について既往の研究をまとめた。また、亀裂の形成を取り扱うために有力な手段と考えられる数値解析手法について、特にコークスを対象とした研究内容をまとめた。

### 第3章 コークス中の不活性成分が収縮挙動に及ぼす影響の検討

収縮率の高い石炭を用いた場合にはコークスの粒径が小さくなるため、コークスの収縮率が亀裂の形成に関する重要な因子であると考えられる。既往の研究において不活性成分が収縮率に影響を及ぼすことが報告されているが、そのメカニズムは明らかにされていない。そこで、不活性成分を配合したコークスを対象に熱応力解析を

実施した。立方体の基質のなかに収縮しない不活性成分を配置し、コークスの乾留条件にしたがって昇温させた。不活性成分の弾性係数を変化させ、基質の材料物性を線形弾性体もしくは Maxwell モデルに基づく粘弾性体と仮定した。また、亀裂を配置し、不活性成分の近傍に形成される亀裂が収縮率に及ぼす影響を検討した。収縮率に着目すると、弾性係数の高い不活性成分を配置した場合に収縮率は低下した。これは、硬い不活性成分が基質の収縮を阻害したためであると考えられる。また、基質を粘弾性体と仮定した場合、基質の収縮率が増加した。これは、基質が軟化して不活性成分の近傍で大きく変形したためであると考えられる。さらに、亀裂を配置した場合、亀裂の配置によって収縮率が低下し、亀裂の数を増加させることによって収縮率はより低下することを示した。これは、基質と不活性成分の界面で生じた熱応力によって不活性成分の近傍に配置した亀裂が開口したためであると考えられ、既往の実験結果と整合する解析結果が得られた。

#### 第4章 複雑な亀裂の形成を表現可能な解析手法の提案

乾留過程のコークス内には分岐を有する多数の亀裂が形成される。亀裂の形成を検討するには破壊解析が有力な手法であるが、既往の数値解析手法を用いてコークス中に見られる複雑な形状の亀裂を表現することは困難であった。そこで、亀裂の発生、進展および分岐を考慮可能な有限要素法に基づく新規解析手法を提案した。本研究で提案した手法では、ある四面体をさらに4つに分割した六面体要素を用いて応力解析を行い、六面体要素の結合を分離することで亀裂の生成、進展および分岐を表現する。本手法は、拡張有限要素法やリメッシュを用いた解析では表現が困難である多数の亀裂や亀裂の分岐を表現することが可能である。解析手法の精度を検討するため、二つの切り欠きを有する円孔を配置した平板を上下に変位させる解析を行った。なお、提案した手法は亀裂の形状がメッシュの形状に依存することから、節点の配置が異なる10の解析メッシュを用いた。本手法を用いた場合に形成された亀裂の形状にはばらつきがあるものの、その平均的な形状は既往の解析結果を再現し、本手法の妥当性を示した。

#### 第5章 室炉コークスの乾留過程における主亀裂の進展メカニズムの解明

室炉コークスにおいては主亀裂がコークスの粒径を決定づけるため、主亀裂が形成されるメカニズムを解明することが必要である。そこで、室炉コークスを対象に単純な形状の亀裂および複雑な形状の亀裂を考慮した熱応力解析を実施し、主亀裂の形成メカニズムを検討した。解析に先立ち、試験コークス炉を用いて石炭を上面から加熱することで乾留し、コークス試料を作製した。乾留後のコークスは、加熱壁側が亀裂により分断され、加熱壁側から底面へと向かって亀裂が進展しており、実際の室炉コークスにおいて観察される主亀裂が生じた。そこで、解析では、試験コークス炉内で主亀裂が直進すると仮定し、熱伝導解析および熱応力解析を連成した解析を実施した。解析対象は試験コークス炉内のコークスを模擬し、主亀裂が形成される部位の境界条件を自由境界と

することで亀裂の形成を表現し、亀裂の先端が 460 °C を超えた場合に亀裂が発生すると仮定した。基質が弾性体 (Case Elastic) または粘弾性体 (Case Visco-elastic) であると仮定し、主亀裂の間隔が 40, 80, 160 mm となる条件で解析を実施した。解析結果の応力分布に着目すると、亀裂の先端が加熱壁から遠ざかるほど、亀裂の先端に生じる応力は減少した。これは、炉壁から離れるほど昇温速度が小さく、熱応力が減少したためであると考えられる。また、亀裂の間隔が狭いほど亀裂先端に生じる応力が減少した。これは亀裂が形成されたことによる応力緩和が原因であると考えられる。Case Visco-elastic の場合には応力が小さい。これは粘性による応力の緩和のためであると考えられる。さらに、第 4 章において提案した手法を用いて、複雑な亀裂の形成を考慮した熱伝導解析および熱応力解析の連成解析を実施した。このとき、引張強度を 50 MPa とした。コークスモデルの変形の様子に着目すると、Case Elastic の場合、加熱壁側においてコークスが分断し、加熱壁側から垂直な方向へと亀裂が進展した。本解析により、主亀裂が形成される様子を表現し、実験において観察された亀裂の形状を定性的に再現した。Case Visco-elastic の場合、亀裂が停止した。これは、粘性による応力緩和のためであると考えられる。

## 第 6 章 次世代型コークス製造プロセスの実用化に向けた成型コークスにおける亀裂の形成メカニズムの解明

成型コークスは石炭を圧密することで作製した成型炭を乾留することで製造するもので、多量の劣質炭を用いることが可能である。成型コークスにおいて亀裂の抑制が課題であり、熱応力解析が有力な検討手段であるが、成型コークスにおいて亀裂を考慮した解析例はない。そこで、成型コークスを対象に第 4 章で提案した手法を用いて複雑な亀裂の形成を考慮した熱伝導解析および熱応力解析の連成解析を実施した。解析対象は直径 40 mm の球体であり、初期条件を 25 °C とし成型物の表面を 400 °C から 7 °C/min で昇温した。基質を弾性体 (Case Elastic) もしくは粘弾性体 (Case Visco-elastic) であると仮定し、基本となる条件 (Hi7Sp) に加えて収縮率が低い条件 (Lo7Sp)、昇温速度が 3 °C/min である条件 (Hi3Sp) および形状が楕円体である条件 (Hi7El) について解析した。成型物内部における亀裂の形成および表面における変形に着目すると、Case Elastic の場合に成型物の表面から中心に向かって亀裂が進展した。これは、成型物内に熱応力が生じるためである。一方、Case Visco-elastic の場合、成型物の表面に形成される亀裂の数は減少した。これは、応力緩和のためであると考えられる。また、成型物の内部に亀裂が形成した。これは、粘性のために成型物の内部に熱応力が生じるためであると考えられる。また、亀裂を有する成型コークスの強度を定量的に評価するため、上記の乾留解析後のコークスモデルを対象に応力解析を実施し、計算された反力を比較した。亀裂がないコークスモデルと比較して亀裂が形成されたコークスモデルの反力が減少したことから、強度は低下した。いずれのコークスモデルにおいても Case Elastic の場合と比較して Case Visco-elastic の場合に反力は小さい。これは、成型物の内部が亀裂により分断され、力が伝達しなくなったためであると考えられる。各条件に着目すると、Coke Hi7Sp と比較して他のコークスモデルの反力が大きい。これは、これらの条件において形成される亀裂の量が減少したためであると考えられる。

## 第7章 結論

本論文では、乾留過程におけるコークスの亀裂形成について検討した。不活性成分を配合した場合における収縮率低下のメカニズムを明らかにした。また、新規解析手法を提案し、提案した手法を用いて乾留過程を対象とした熱応力解析を実施することで、室炉コークスおよび成型コークスにおける亀裂形成のメカニズムを数値解析的に示した。

# 論文審査結果の要旨

本論文は、コークスにおける亀裂の形成機構を明らかにしたものである。製鉄用の材料であるコークスは、大粒径であることが望まれるが、コークスの乾留過程において亀裂が形成されることで粒径が低下する。そのため、亀裂の形成メカニズムの解明が強く望まれている。特に近年では、劣質な石炭を多量に配合したコークスや次世代型のコークスとして期待されている成型コークスの製造において亀裂の形成および粒径の低下が大きな課題となっており、その工学的な意義は非常に大きい。しかしながら、コークスの亀裂形成に関する検討例は実験的にも数値解析的にも僅少であり、亀裂の形成を抑制するために十分な理論化が行われていない。本博士論文は、数値解析を活用し乾留過程におけるコークスの亀裂形成について理論的かつ定量的に検討したものである。

論文は全7章で構成されている。

第1章は総論であり、研究の背景および目的を述べている。

第2章では、コークスの亀裂形成に関して既往の研究をまとめている。

第3章では、亀裂の形成に大きく関係している収縮現象に着目し、コークス中の不活性成分が収縮挙動に及ぼす影響について検討している。モデルコークスを対象に有限要素法を用いた熱応力解析を実施することで、不活性成分の弾性係数や基質の粘性、そして亀裂が収縮率に影響を及ぼすことを明らかにしている。

第4章では、コークスの亀裂形成を数値解析的に取り扱うために、複雑な亀裂の形成を表現可能な数値解析手法を提案している。提案した手法は、亀裂の形成を個々の要素において表現することで複雑な亀裂の進展を安定的に計算することを可能としており、有限要素法に基づいているために応力解析の精度が高い。既存の解析手法との比較をおこなっており、本提案手法の特徴を明確にしている。さらに、応力分布や亀裂の進展について種々の検証問題を実施し、本解析手法の妥当性を確認している。

第5章では、室炉コークスにおいて形成される主亀裂の進展メカニズムを数値解析的に検討している。数値解析に先立ち、試験炉を用いたコークスの乾留試験を実施し、室炉コークスにおける亀裂の形成を再現している。数値解析においては、加熱壁から直進する主亀裂のみを再現した単純な数値解析および、本論文の第4章において提案した新規解析手法によって任意の亀裂形成を取り扱った解析を実施し、室炉コークスの乾留過程における亀裂形成のメカニズムについて理論的に検討している。さらに、本論文の第3章において検討した収縮率の影響を考慮した解析を実施しており、収縮率が室炉コークスにおける亀裂の形成に及ぼす影響を明らかにしている。

第6章では、成型コークスにおける亀裂の形成メカニズムについて検討している。熱応力解析および本論文の第4章において提案した新規手法を用いて、成型コークスを乾留した場合において形成される亀裂を解析している。また、本論文の第3章において検討した収縮率の影響に加えて、成型物の粘性、昇温速度、形状の影響を反映した解析を実施しており、これらの成型コークスを製造する条件が亀裂の形成に及ぼす影響を検討している。さらに、乾留後の解析対象を用いた応力解析を実施することで、解析結果を定量的に評価している。これらの解析により、成型コークスにおける亀裂の形成メカニズムを明らかとしている。

第7章は総括であり、各章の成果をまとめている。

以上の検討から、本論文においてコークスにおける亀裂の形成機構を数値的に明らかにすることができ、コークス製造技術の開発に大きく寄与することができる。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。