

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	多様な炭素源から製造した炭素繊維の構造及び物性の解析
Title(English)	
著者(和文)	木村大輔
Author(English)	Daisuke Kimura
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12718号, 授与年月日:2024年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:扇澤 敏明,松本 英俊,浅井 茂雄,難波江 裕太,戸木田 雅利
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12718号, Conferred date:2024/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	材料 材料	系 コース	申請学位 (専攻分野)： 博士 Academic Degree Requested Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	木村 大輔		審査員主査： Chief Examiner	扇澤 敏明

### 要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters )

<p>本論文は「多様な炭素源から製造した炭素繊維の構造及び物性の解析」と題し、以下の6章で構成される。</p> <p>第1章「緒論」は、環境対策に伴う炭素繊維への需要の変化について説明し、現行の炭素繊維の製造方法について解説しながらコスト面の課題と限界、さらには新規炭素源に代替する必要性について述べた。そのうえで、新規炭素源炭素繊維の開発に資する、多様な構造をも許容する解析技術の基盤技術の構築や、構造および物性の炭素源依存性を明らかにする必要があるという本研究の目的と意義を述べた。</p> <p>第2章「マイクロビーム X 線を用いた炭素繊維の圧縮過程における <i>in-situ</i> 構造解析」では、ポリアクリロニトリル (PAN) と石油や石炭残渣を精製して作製される Pitch を炭素源とする炭素繊維について、シンクロトロンマイクロビーム X 線を利用することによって、単繊維軸方向圧縮試験と単繊維での小角 X 線散乱 (SAXS) の同時測定および破壊後試料における局所領域の SAXS 測定を行った。有意に圧縮強度が低いことが知られている Pitch 系炭素繊維は、圧縮変形を加える初期過程でボイドの平均断面積が減少することがわかり、PAN 系炭素繊維ではそのようなボイド構造の変形は観測されなかった。また、そのボイド平均断面積の変形量は、圧縮方向における破壊までのひずみ量から計算される変化量より著しく大きく、ボイド近傍での応力集中が起きていることを明らかとした。さらに、圧縮破壊後の炭素繊維のボイド平均断面積は、Pitch および PAN 系炭素繊維の変形初期のボイド平均断面積に比べ減少していることがわかり、Pitch 系炭素繊維は圧縮変形初期に、PAN 系炭素繊維は破壊直前にボイド構造の不可逆変形が起きていることを明らかとし、結晶子サイズの大きさに伴う破壊点での応力集中のしやすさが圧縮強度を低減させていると結論付けた。</p> <p>第3章「新規前駆体炭素繊維の到達可能強度と構造解析」では、低コストと高性能を両立する炭素繊維の炭素源としてポリベンゾイミダゾール (PBI) と低コストな精製法によって得られる新規 Pitch に着目して、設計された欠陥で破壊させることで基質自体の強度を算出する到達可能強度と構造解析を行った。到達可能強度の測定において、PBI 系炭素繊維では、PAN に類似した直径依存性を有し、同じ直径の繊維同士と比較すると同等の力学強度の発現性があることが示唆された。新規 Pitch 系炭素繊維については、到達可能強度は市販の PAN 系や Pitch 系炭素繊維を上回るものなかったが、その炭素源の種類、精製法および炭素化温度によって到達可能強度に違いが出ていることから、それらの検討により、力学強度の発現性を改善できることが明らかとなった。また、構造解析の結果から、PBI 系炭素繊維においては断面内に構造分布が生じやすく、新規 Pitch 系炭素繊維では構造分布が生じにくいことがわかった。これらの結果より、PBI 系炭素繊維は、紡糸条件や炭素化条件による繊維直径や断面内構造の制御が重要であり、新規 Pitch 系炭素繊維は、精製前の炭素源の選定および精製方法の最適化が高強度化に重要であると結論付けた。</p> <p>第4章「炭素繊維のボイド長さ分布を考慮した内部欠陥解析」では、様々な炭素源からなる炭素繊維は、その欠陥構造にも違いがあり、それらを統一的に解析できる欠陥構造の解析手法が少ないことを踏まえ、これまでに重用されてきた Ruland 法の拡張を行うことによって解決を試みた。Ruland 法は Pitch 系炭素繊維では解析解が得られないという問題があるが、これをボイドの長さ分布を考慮していないことに原因があると考え、ボイド長さがガウス分布に従うことを仮定において解析対象を広げた解析式を導出し、種々の炭素繊維の解析を行った。その結果、Pitch 系炭素繊維も含めた全ての炭素繊維でボイドの長さを解析可能であることが確認された。さらに、炭素源によらず結晶子の長さともボイドの長さには正の相関があることがわかり、結晶子の厚みは炭素源の違いによって異なる傾向を示すことを明らかにした。</p> <p>第5章「機械学習を利用した炭素繊維の内部欠陥解析」では、散乱シミュレーションと機械学習を利用し、ほとんど構造の制約がなく、ボイドのサイズと向きを統計的に解析できる手法の確立を行った。具体的には、炭素繊維から得られる散乱像を個別のボイドからの孤立散乱の集合体と考え、長さや傾きの異なるボイドからの散乱像をシミュレートした上で説明変数とし、実際に得られた SAXS 像を目的変数として Ridge 回帰により各長さとも傾きを有するボイドの体積分率分布を求めた。その結果、製造条件の異なる複数の PAN 系炭素繊維と Pitch 系炭素繊維炭素繊維のボイドの太さ、長さ、配向の分布を求める事に成功し、第4章で計算上導入したボイド長さとも配向度に関する仮定が Pitch 系炭素繊維においても概ね成立することが確認された。また、Pitch 系炭素繊維では、ボイドの長さの増加に伴う配向のしやすさが PAN 系炭素繊維と比べて大きく、短いボイドが大きく傾いているという特徴的なボイド構造を有することが示された。この炭素源によって異なるボイド構造が圧縮強度に寄与している可能性が示唆された。</p> <p>第6章「結論」では、本研究で得られた結果を総括した。これを要するに本論文は、様々な炭素源による炭素繊維の構造、物性および到達可能強度の関係を明らかにし、多様な構造を許容する構造解析手法を提案した。以上の結果から、今後の炭素繊維の低コスト化および高性能化に資する開発指針を示した。</p>
---

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)  
Doctoral Program

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース : Department of, Graduate major in	材料 材料	系 コース	申請学位 (専攻分野) : Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名 : Student's Name	木村 大輔		審査員主査 : Chief Examiner	扇澤 敏明	

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words )

Carbon fibers are known for their excellent specific modulus and strength, which contribute to energy conservation. The application fields of carbon fibers are expanding, and demands are increasing for cost reduction and optimization of physical properties for each application. Thus, investigations into alternative carbon sources for carbon fibers are being considered. In this study, the influence of carbon sources on the mechanical properties, such as attainable strength and compressive strength, of carbon fibers was investigated. In addition, methods for analyzing the void structure in carbon fibers made from various carbon sources have been established, which will enable universal evaluation of various carbon fibers and understanding of their influence on mechanical properties.

Compressive strength is known to be strongly influenced by the precursor material. Pitch-based carbon fibers are known to have significantly lower compressive strength compared to polyacrylonitrile (PAN)-based carbon fibers while high modulus fibers are easy to produce. Therefore, the deformation of the void structure during the compression was observed through small-angle X-ray scattering measurements in PAN- and pitch-based carbon fibers first. It was revealed that the void structure of pitch-based carbon fibers is sensitive to compressive deformation and tends to cause stress concentration.

In addition, the intrinsic strength of carbon fibers produced from the novel pitch and polybenzimidazole, both used as low-cost precursors, was measured. The diameter dependence of the intrinsic strength of PAN- and polybenzimidazole-based carbon fibers was similar, while the intrinsic strength of novel pitch-based carbon fibers varies depending on feedstock and refining method of pitch itself. The findings suggest that polybenzimidazole-based and novel pitch-based carbon fibers could have high attainable strength by producing finer polybenzimidazole fibers and selecting appropriate feedstock and refining methods for pitch.

Finally, analytical techniques using mathematical and informatics approaches were established to uniformly analyze the diverse structures of carbon fibers from various carbon sources. The mathematical approach, which modified the Ruland method to include the distribution of void lengths, successfully broadened the range of subjects for analysis. The machine learning-accelerated method utilizing Ridge regression allows for almost all structures and clarifies the statistical distribution of void sizes and their orientation. The analysis revealed that variations in the precursor lead to differences in the void structure. Specifically, it was found that pitch-based carbon fibers exhibit a higher tendency to orient with increasing void length than PAN-based carbon fibers. This difference in void structure has a dominant effect on the mechanical strength of carbon fibers, which are brittle materials.

備考 : 論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意 : 論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。  
Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).