

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：13801

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K23485

研究課題名(和文)光ファイバーによる新規な液膜計測法の開発

研究課題名(英文) Development of measurement technique for liquid film thickness by using the optical fiber probe

研究代表者

水嶋 祐基 (Mizushima, Yuki)

静岡大学・工学部・助教

研究者番号：30844716

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、蒸気タービン等の実機条件で実現可能な液膜計測法を世界に先駆けて開発し、従来法では困難な薄い液膜の測定を実現するものであり、全2年間の研究期間において、レイトレーシング、光ファイバーとレーザー技術の融合により、新規な液膜の光計測に挑戦した。提案する手法は、光ファイバーは流路壁面と面一に挿入し、そこを流れる液膜の厚さを非接触計測する。この液膜計測用光ファイバースENSORのセンサ製作に係る最適設計パラメータをレイトレーシングシミュレータにて選定、模擬液膜による検証実験、風洞試験による検証実験、を計画から遅延なく実施し、査読付き論文1報、学会発表7件、特許出願1件を果たした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現行の液膜測定方法は、任意位置での液膜の厚さやその時間変動を実時間で捉えることが困難である。例えば、電気、超音波、レーザーを利用した膜厚測定が実用化されているが、時間分解能はkHzオーダーであり、界面が複雑に変動する場合等、測定される膜厚が時間平均的にならざるを得ない。加えて、実機環境ではS/N比の大幅な低下から十分な測定分解能を得られない。そのため、国内外のメーカー各社は多額の開発費を投じながらも、見えない液膜制御に苦慮しているのが実情である。本研究で構築した方法は重電メーカーとの共同研究にも活用されており、新規な計測器の開発、という学術的意義と共に、企業ニーズへの貢献も果たすことが出来た。

研究成果の概要(英文)：In this research, a new optical measurement method for thin liquid films has been developed, which is difficult to be realized by conventional methods, by combining ray tracing, optical fiber and laser technologies.

In the proposed method, the optical fiber is inserted flush with the channel wall, and the thickness of the liquid film flowing through the optical fiber is measured without contact. The following steps were carried out without delay: (1) selection of the optimum design parameters for the sensor fabrication of the optical fiber probe for liquid film measurement using a ray-tracing simulator, (2) verification experiment using a quasi-liquid film, and (3) verification experiment measuring liquid film flow in a wind tunnel.

研究分野：流体力学

キーワード：光ファイバー レーザー 光線追跡 液膜流 液膜厚さ

1. 研究開始当初の背景

我が国の抱えるエネルギー問題において、東日本大震災以降続く原子力発電所の停止や世界情勢と連動した化石燃料価格の乱高下等は、電力の安全かつ安定な供給維持に深刻な影を落としている。火力発電は高度成長期以前から現在も我が国の暮らしや経済を支える屋台骨であるが、国は2030年に向け火力・原子力を主体とするバイオマス等再生可能エネルギーの活用、エネルギーミックスの実現を進めている(図1)。これらで最も重要な機械要素が蒸気タービンであり、我が国の電源構成の8割以上で蒸気タービンが引き続き利用されることになる。国内の火力・原子力発電所の多くが耐用年数を間近に迎える中、蒸気タービンの効率追求や長寿命化は決して無視できない課題である。

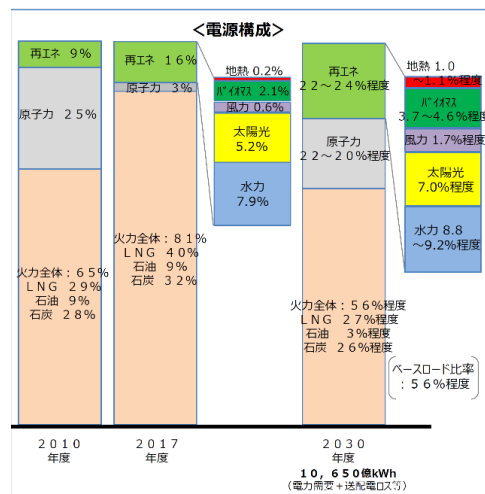


図1: 我が国の電源構成の現状と目標とするエネルギーミックス[1]

2. 研究の目的

蒸気タービン開発において問題とされるのが、作動流体である蒸気の状態に起因する液膜の存在である。タービン静翼面に表出・成長した液膜が微粒化し、動翼と高い相対速度で多数衝突すると、タービン駆動の妨げとなることが知られている。また、この状態が長期に渡って継続すると動翼面が損傷してしまうため、液膜の厚み情報を直接計測する方法が長年求められてきた。そこで極限状態に近いタービン内でも実現可能な液膜計測法(図2)を世界に先駆けて開発し、これらに資する測定情報を獲得することが、本研究の目的である。

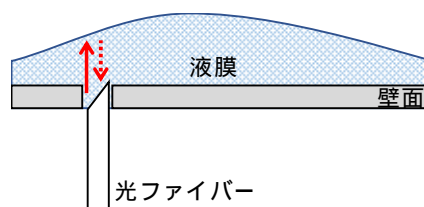


図2: 本研究で開発する液膜計測法

3. 研究の方法

液膜計測用光ファイバプローブ(OFP)を、次の項目に従って開発する。液膜測定用OFPの最適設計パラメータ選定: 既に構築済の3次元光線追跡(図3)を用いて、対象とする液膜に最適なセンサを探索・製作し、模擬液膜による検証実験: 専用装置にて正確に見積もった液膜厚さをOFP計測の結果と比較検討し、風洞試験による検証実験: 風洞試験機内のテストセクションに形成した液膜をOFPにて実測(図4)、高速度カメラ画像やテストセクションでの吸い込み量による結果と比較検討し、液膜厚さ及びその時間変動が実時間で計測できることを実証する。

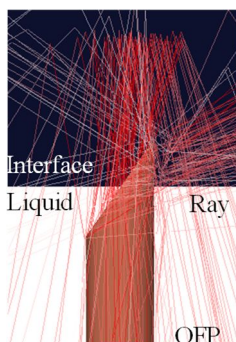


図3: 独自に構築した3次元光線追跡によるOFPの光伝搬解析

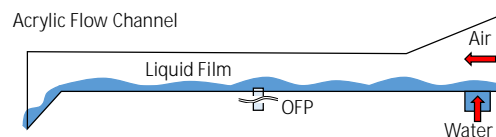


図4: 構築する液膜流発生試験(計画時)

4. 研究成果

研究1年目では、光線追跡を用いた OFP 設計と検証実験、風洞装置の構築を実施した。OFP が液膜界面を検出した際に現れる光信号をつぶさに分析し、センサの設計パラメータ決定や信号処理ルーチンの構築に反映した。光線追跡は光を光線として近似し、幾何光学に落とし込む方法である。その計算精度は光線の本数に依存するため、OFP 内を伝播する光を精緻に分析するには計算コストがかかる。そこで GPU を活用した並列計算を導入し、計算負荷の低減や多条件でのパラメトリックスタディ (図5) を実現した。これに基づき実験にて疑似的に膜厚測定を行い、可視化計測の結果と良く一致することを確認した (図6)。

研究2年目では、OFP を用いて高速気流中での液膜厚さ計測を実証した。測定値は高速度カメラ画像による推測値と比較し、これらと良好に一致することを確認した (図7)。また、前年度に蓄積した基礎データから OFP の信号特性を解析し、光ファイバーの種類や特徴に応じたセンサ開発の指針を明らかにし、論文化および特許化を果たした。

以上を踏まえ、本研究では以下の成果を得た。液膜測定用 OFP の最適設計パラメータ選定：光ファイバーのコア径・種類に応じて、 $10\mu\text{m} \sim 1\text{mm}$ の液膜厚さを測定可能である [6,7]。模擬液膜による検証実験：OFP と可視化により測定された膜厚は良好に一致した [8]。風洞試験による検証実験：OFP と比較用データ (可視化・質量法) により得られた膜厚の平均値は良好に一致した [9]。さらに OFP は液膜厚さの時間変動も取得可能である。ただし、今回の計測では OFP にて得られた膜厚の時系列変化を十分に評価可能なデータが得られなかったため、今後の課題として引き続き研究する予定である。

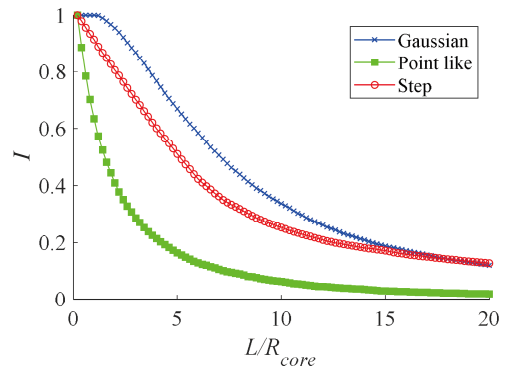
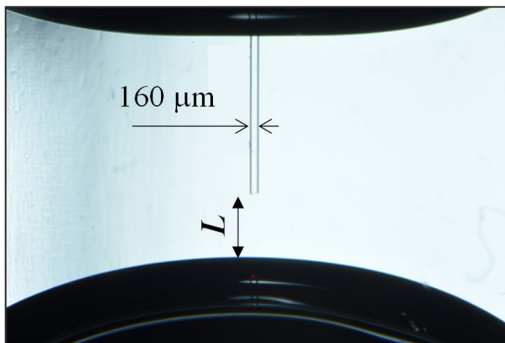
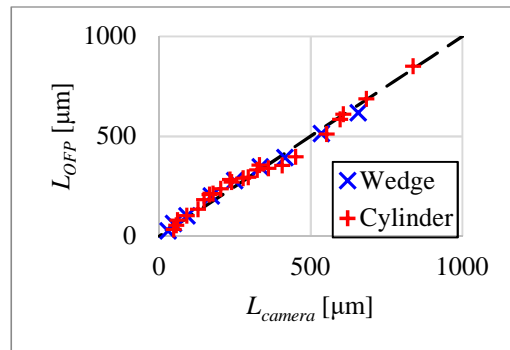


図5：試行したパラメトリックスタディの一例 [2-5] (図中横軸はファイバー半径で除した無次元厚さ、縦軸は OFP の信号レベル)。OFP に使用する光源の選定により、液膜厚さに対する感度を調整することが出来る。

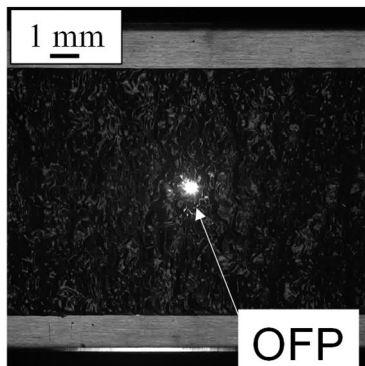


(i) 模擬液膜厚さ計測の可視化画像

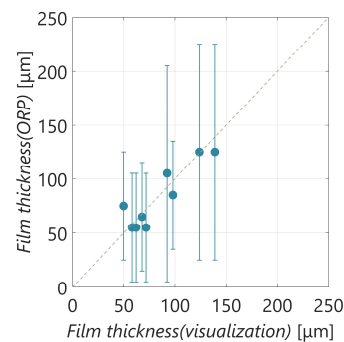


(ii) OFP と可視化計測結果の比較

図6：模擬液膜による検証実験の様子



(i) 液膜流計測の可視化画像 (俯瞰図)



(ii) OFP と可視化画像からの推測の比較

図7：風洞試験機による検証実験

- [1] 再生可能エネルギーの主力電源化に向けた制度改革の必要性と課題、経済産業省 資源エネルギー庁 (2019)
- [2] 水嶋祐基、界面反射光を用いた単一光ファイバースコープによる液膜厚さ計測の開発、日本混相流学会 混相流シンポジウム 2019 (2019).
- [3] Yuki Mizushima, New Development of a liquid film thickness measurement using pre-signal of a single tip optical fiber probe, *11th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flow* (2019).
- [4] Kampei Yamaguchi and Yuki Mizushima, Development and optimization of Optical-fiber-based Reflectance Probe (ORP) for liquid-film thickness measurement, *The 73rd Annual Meeting of the American Physical Society's Division of Fluid Dynamics* (2020).
- [5] Kampei YAMAGUCHI, Toshiyuki SANADA and Yuki MIZUSHIMA, Accurate thin-film measurement method based on a distribution of laser intensity emitted from optical fiber: Proposal of step light emitted model for ray-tracing simulation, *Mech. Eng. Lett.*, **6**, 20-00419 (8 pages) (2020).
- [6] 川田竣哉、水嶋祐基、光ファイバーを用いた液膜厚さ測定法に関する実験的研究、日本混相流学会 混相流シンポジウム 2020 (2020).
- [7] 山口寛平、水嶋祐基、3次元光線追跡シミュレータを用いた光ファイバーによる液膜厚さ計測法に関する考察、日本混相流学会 混相流シンポジウム 2020 (2020).
- [8] 水嶋ほか、光ファイバースコープセンサーを用いた薄液膜厚さと液膜速度との同時測定方法、及び同センサーの較正方法、特願 2020-188100 (2020).
- [9] 奥井貴之、真田俊之、水嶋祐基、光ファイバーを用いた液膜厚さ測定法に関する実験的研究、日本混相流学会 混相流シンポジウム 2020 (2020).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kampey YAMAGUCHI, Toshiyuki SANADA and Yuki MIZUSHIMA	4. 巻 6
2. 論文標題 Accurate thin-film measurement method based on a distribution of laser intensity emitted from optical fiber: Proposal of step light emitted model for ray-tracing simulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Letters	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/mel.20-00419	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Takayuki Okui, Toshiyuki Sanada, Yuki Mizushima, Shunsuke Mizumi, Soichiro Tabata
2. 発表標題 A Novel Thickness Measurement Method of Liquid Film in Air Flow via Optical-Fiber-Based Reflective Probe
3. 学会等名 ASME Turbo-Expo 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kampey Yamaguchi and Yuki Mizushima
2. 発表標題 Development and optimization of Optical-fiber-based Reflectance Probe (ORP) for liquid-film thickness measurement
3. 学会等名 The 73rd Annual Meeting of the American Physical Society's Division of Fluid Dynamics（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山口寛平, 水嶋祐基
2. 発表標題 3次元光線追跡シミュレータを用いた光ファイバーによる液膜厚さ計測法に関する考察
3. 学会等名 日本混相流学会 混相流シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 奥井貴之, 真田俊之, 水嶋祐基
2. 発表標題 光ファイバプローブを用いた液膜流中での厚さ計測に関する考察
3. 学会等名 日本混相流学会 混相流シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川田竣哉, 水嶋祐基
2. 発表標題 光ファイバーを用いた液膜厚さ測定法に関する実験的研究
3. 学会等名 日本混相流学会 混相流シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 水嶋祐基
2. 発表標題 界面反射光を用いた単一光ファイバプローブによる液膜厚さ計測の開発
3. 学会等名 日本混相流学会 混相流シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Mizushima
2. 発表標題 New Development of a liquid film thickness measurement using pre-signal of a single tip optical fiber probe
3. 学会等名 11th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flow (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 光ファイバープローブセンサーを用いた薄液膜厚さと液膜速度との同時測定方法、及び同センサーの較正方法	発明者 水嶋祐基，馬場，染矢，齋藤，田中，上山，水谷	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-188100	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------