

令和元年6月25日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K04973

研究課題名(和文) 超音波駆動波長走査光源とウェーブレット変換処理を用いた実時間フルフィールドOCT

研究課題名(英文) Real-time full-field OCT using static swept source and wavelet transform

研究代表者

鈴木 孝昌 (Suzuki, Takamasa)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：40206496

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：オプティカル・コヒーレンス・トモグラフィ(OCT)は近年、医療診断分野で急速に需要が高まっている。本研究では、超音波偏向器を用いて波長走査幅、応答速度、光出力等の特性を改善した安価で高性能なOCT向け波長走査光源を開発した。さらに、この光源を用いて実際にOCTを構成した。信号処理には、従来よく用いられていたフーリエ変換処理に代えて連続ウェーブレット変換を適用し、高精度な画像再生が行えることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

オプティカル・コヒーレンス・トモグラフィ(OCT)では、波長走査光源がよく用いられる。これまでの光源は、ミラーあるいは回折格子といった光学部品を圧電素子(PZT)で機械的に動かす構造であり、波長の走査速度を高めることは困難であった。これに対し本研究では、回折格子へのビーム入射角を超音波偏向器を使って制御する方式を新たに開発した。波長の走査速度を飛躍的に高め、医療診断の時間短縮と高精度化が実現できる点で社会的意義は大きい。一方信号処理には、これまで当該分野であまり用いられてこなかったウェーブレット変換を適用した。OCTの画像再生に、新しい解析手法を提案している点で学術的意義があるものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Recently, optical coherence tomography has high demand for medical diagnosis. In this study, we developed low-cost and high-performance swept source (SS) by using acousto-optic deflector. Characteristics, such as wavelength scanning range, response time, optical power, have been improved in this SS. Moreover, OCT was configured with this SS. We confirmed that accurate image restoration was realized by using continuous wavelet transform instead of Fourier transform.

研究分野：光応用計測

キーワード：波長走査光源 OCT ウェーブレット変換

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) OCT による生体断層イメージング装置に関する研究が国内外で精力的に行われており、さまざまな方式のシステムが研究されていた。特に、検出した干渉信号をフーリエ変換処理するフーリエドメイン OCT が S/N、処理時間の観点から主流であり、そのための光源開発も同時に進行していた。

(2) 光源に関しては、広帯域の光を一度に出射するスーパーluminescentダイオード (SLD) と単色光を広い波長帯域で時間的に走査する波長走査光源が主に研究対象となっていたが、そのうち波長走査光源は、半導体レーザと回折格子を用いて比較的容易に構成できることから OCT の光源として有望視されていた。研究開始当初の装置は、主に図 1 (a) に示すように回折格子と回転ミラーを用いた「リットマンタイプ」と図 1 (b) に示すように回折格子を回転させる「リトロタイプ」、さらに我々が当時提案していたタイプ、すなわち外部ミラーを固定し、超音波偏向器 (AOD) によって波長走査を実現する図 1 (c) のような「静的リットマンタイプ」の 3 種類が存在していた。前者 2 つのタイプでは、外部ミラーを機械的に駆動する必要があり、走査速度を上げるのは非常に困難であった。一方、AOD を用いるタイプは機械的走査であるため高速走査が可能であり、シンプルな構成で高性能な波長走査光源が実現できていた。「静的リットマンタイプ」は、当時の性能で、波長走査幅 15nm、3dB 走査周波数 60kHz であった。

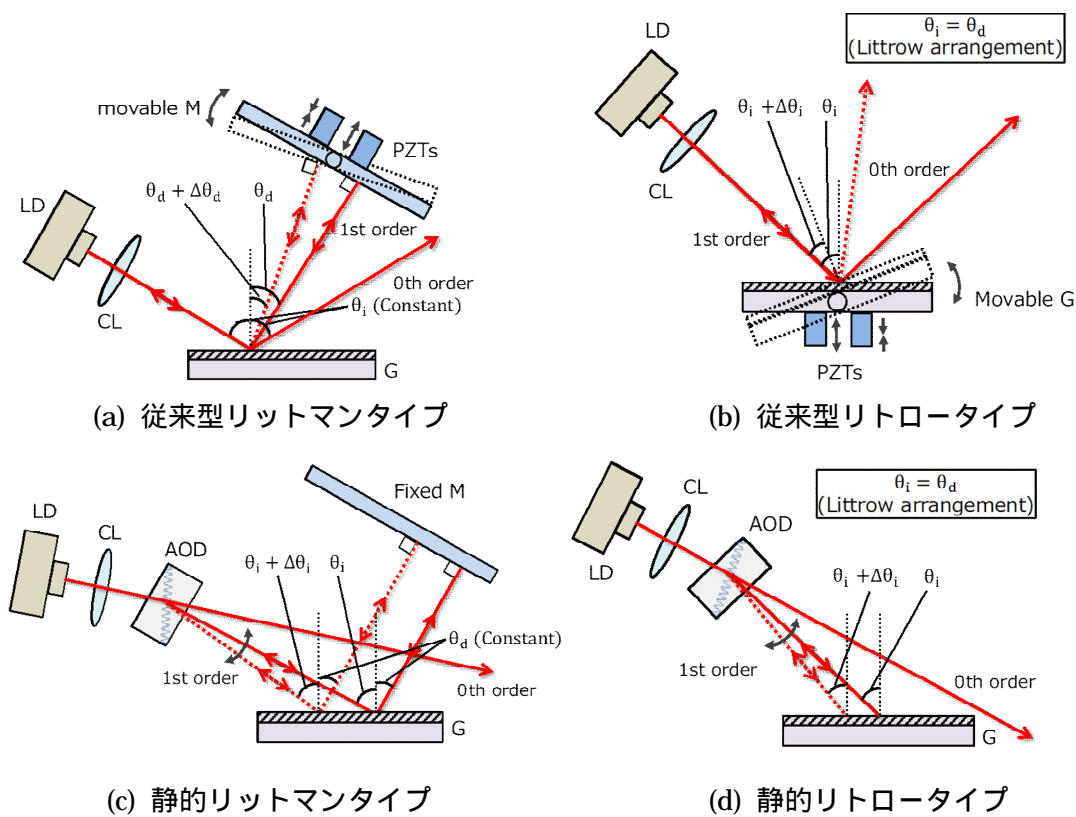


図 1 外部共振器型波長走査光源

(3) 信号処理に関しては、依然としてフーリエ変換を用いた方法が主流であった。広帯域の波長を用いて取得した信号をフーリエ変換では、波長のリスケージング (波長校正) 等の処理が必要であり、信号処理上大きな課題となっていた。

### 2. 研究の目的

(1) すでに提案済みであった、「静的リットマンタイプ」波長走査光源に関して、走査可能波長範囲および走査速度の大幅な改善を図るとともに、モードホップの有無、波長走査の時間的安定性等を既存の波長走査光源との比較から評価し、その動作特性を明らかにすることが一つの目的であった。

(2) 光学系および信号処理系に関して：

静的波長走査光源を用い、実時間フルフィールド OCT を構築することが二つ目の目的であった。具体的には、強散乱媒質である生体を計測するための微弱光検出方法や高 S/N の干渉画像を取得するための手法の確立、また、波長走査と同時に取得した大量の画像データから生体内部情報を再生するための新規の画像処理アルゴリズムの構築などが挙げられる。

### 3. 研究の方法

#### (1) 光源に関して

図 1(c)に示す波長走査光源において、光学パラメータに関する理論解析および実験的検討を行う。

また、専用の筐体を設計して波長走査光源の光学系を収納し、小型で機械的にも安定な実用化レベルの波長走査光源を構築する。

発振波長のさらなる広帯域化および強散乱媒質に対する高 S/N の干渉画像取得を実現する 2 つの目的で、波長走査光源のパルス駆動を試みる。

#### (2) 光学系および計測系に関して：

波長の走査タイミングと同期をとりつつ干渉画像を高速に取得する干渉計測系の構築を試みる。

また、取得画像を高精度に時間 - 周波数解析できる連続ウェーブレット変換(CWT)ベースの再生アルゴリズムを開発する。

さらに、このアルゴリズムに基づく演算を画像処理専用ハードウェア (FPGA 画像処理ボード) に実装し、計測の実時間化を試みる。

### 4. 研究成果

#### (1) 光源に関して

各種理論解析を行う過程で、図 1(d)に示す「静的リトロタイプ」の構成が可能であることがわかった。リットマンタイプでは光が 2 回、回折格子を経由するため、共振時に線幅が細く、高コヒーレンスな光が得られるという利点がある。これに対し、リトロタイプでは、光が回折格子から直接 (1 回の回折で) 光源にフィードバックされるため、戻り光強度が担保され、これによって、光共振が強く誘発される。さらに、外部共振器長を短く設計することが可能であるため、波長走査幅の拡大が見込まれる。以上の観点から、本研究では静的リトロタイプを採用した。

図 2 に波長走査幅測定の実験系および測定結果を示す。中心波長 830nm、波長走査幅は 68.85nm であった。波長走査幅が、目標とする 100nm には届かなかったが、これは使用した無反射 (AR) コート付きの半導体レーザーの基本性能 (半値全幅約 70nm) に負うところが大きく、素子の実力を出し切った値といえる。

図 3 に、AOD 印加電圧  $V_c$  と発振波長の関係を示した。破線が理論値、ドットが測定値である。測定結果と数値計算結果は強い相関があることが分かる。誤差要因として、理想的なリトロ状態からの逸脱が考えられた。

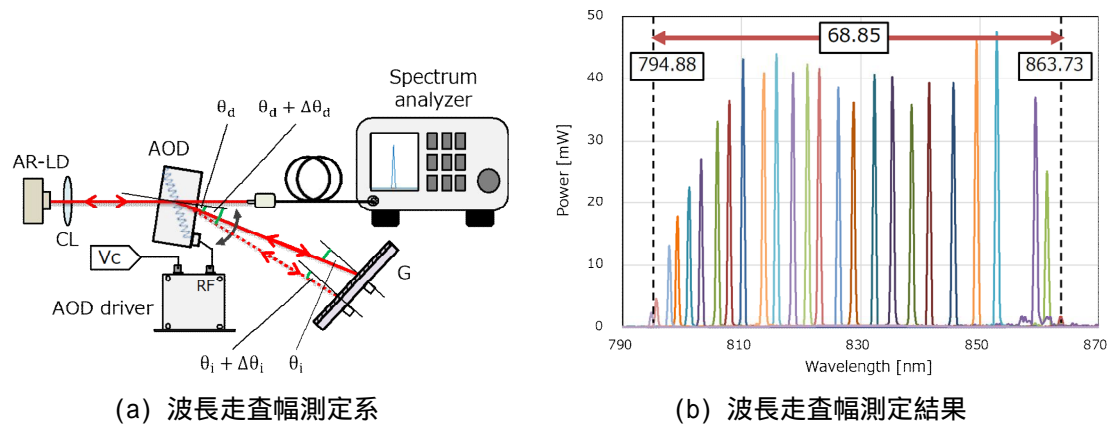


図 2 波長走査幅の測定

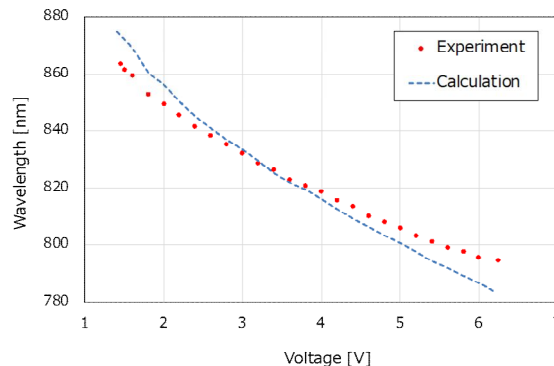
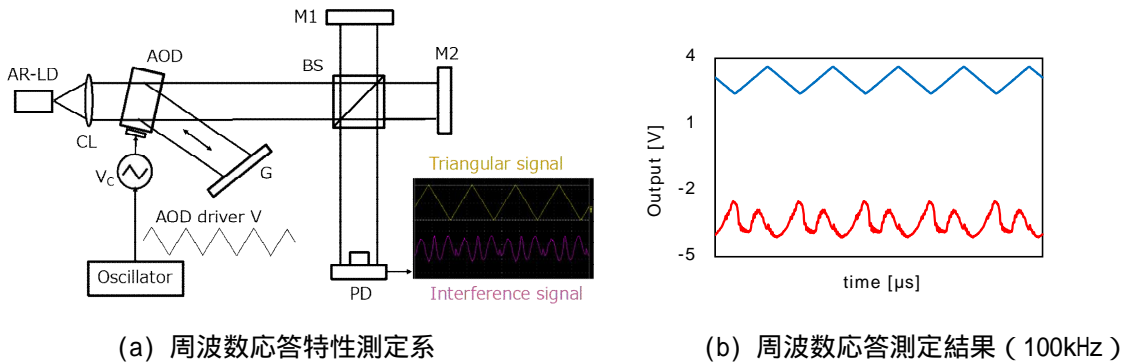


図 3 AOD 印加電圧と発振波長の関係



(a) 周波数応答特性測定系

(b) 周波数応答測定結果 (100kHz)

図4 AOD印加電圧と発振波長の関係

図4に波長走査周波数応答特性の測定系と代表的な実験結果を示す。AODドライバへの印加電圧  $V_c$  は  $3.0 \pm 0.4$  V、このときの波長走査幅は 18.7 nm で、最小発振波長は 823.4 nm、最大発振波長は 842.1 nm であった。周波数 0.1, 1, 10, 20, 50, 80, 100, 120, 150 kHz の三角波を入力し、変調信号と干渉信号の波形を観察した。図4(b)の 100kHz の結果を見ると、干渉信号が波長変化に追従した連続的な変化を示しており、システムの周波数応答性が 100kHz 以上であることがわかる。

専用の筐体設計後、金属ベース上に波長走査光源の光学系構築を行った(図5)。これにより、小型で機械的にも安定な実用化レベルの波長走査光源を構築した。

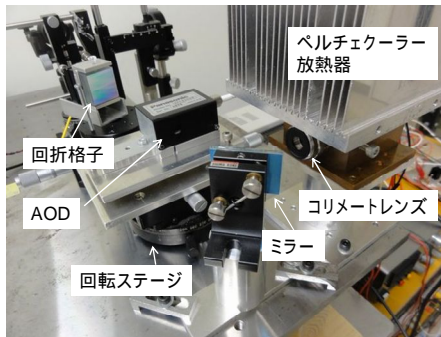
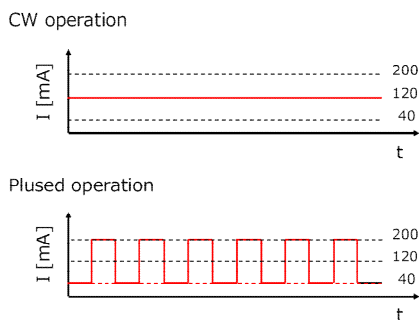
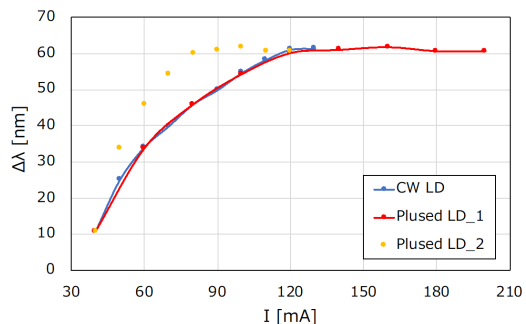


図5 波長走査光源の構築

波長走査光源のパルス駆動に関する実験を行った。一般に光源の光強度と共振の強さとの間には相関がある。また、パルス発光によって瞬間的に光強度の大きなレーザ光が得られれば、強散乱媒質に対しても高 S/N の干渉画像取得が実現できる可能性がある。そこで、図6(a)に示すように、これまで連続発光させていた光源をパルス発光させ、その特性を評価した。図6(a)は、それぞれ注入電流の実効値を 120mA に設定した際の連続発光、パルス発光波形である。測定結果を図6(b)に示す。測定結果「CW LD」は連続発光であり、注入電流の値(実効値)を、「Plused LD\_1」はパルスの最大値を、「Plused LD\_2」は実効値をそれぞれ横軸に設定してプロットした。これらの結果より、CW LD と Plused LD\_1 における波長走査幅の遷移はほぼ等しいことが分かった。言い換えると、パルス駆動の場合、波長走査幅は注入電流の実効値ではなく、最大値に大きく依存するということができる。しかしながら、最大波長走査幅は、連続発振時で 61.08 nm (783.90-844.98 nm)、パルス発振時で 61.77 nm (783.19-844.96 nm) であり、波長走査幅のさらなる拡大は実現できなかった。



(a) 連続発光とパルス発光



(b) 波長走査幅測定結果

図6 波長走査光源のパルス駆動

(2) 光学系および計測系に関して：

波長の走査タイミングと同期をとりつつ干渉画像を高速に取得する干渉計測系を図7のように構築した。静的リトロタイプ波長走査光源およびフィゾー干渉計を用い、カバーガラス(CG)の厚み分布測定を行う装置となっている。ARコートLDは中心波長830nm、最大出力100mWであり、ペルチェ温度コントローラにより $25 \pm 0.01$ ℃、LD駆動電流は130mAで出力を一定に保った。回折格子の格子周期は、1/600mm/本、最大回折効率66%、ブレイズ波長750nmである。CCDカメラは解像度：640×480 30万画素、ピクセルサイズ：5.6×5.6μm、カバーガラスは角型カバーガラス(厚さ：120-170μm)を使用した。使用したカバーガラスの厚みは、市販のマイクロメータ(分解能：10μm)による測定で150μmであることを確認した。レーザ光はガラスの表面と裏面でそれぞれ反射し、光路差Lを持った状態でBSにて再度重ね合わされ干渉信号となる。この干渉信号をCCDカメラにてサンプリング周波数40Hzで256枚取得した。画像を取得する際、AOD印加電圧とCCDカメラのシャッタートリガを波長走査・画像取得同期回路を用いて、各波長で1枚の縞画像を取得するよう制御した。波長走査・画像取得同期回路はマイコン制御とした。連続的に取得した縞画像の各画素に着目し、時間軸方向に展開することで、時間的に変化する干渉信号S(t)を得る。波長走査範囲は817.18-847.64nmで、波長走査幅は30.46nmであった。これより、今回構築したSS-OCTの深さ方向の測定範囲zは1.46mm、波長走査幅由来の分解能Δzは10.02μmであると見込める。

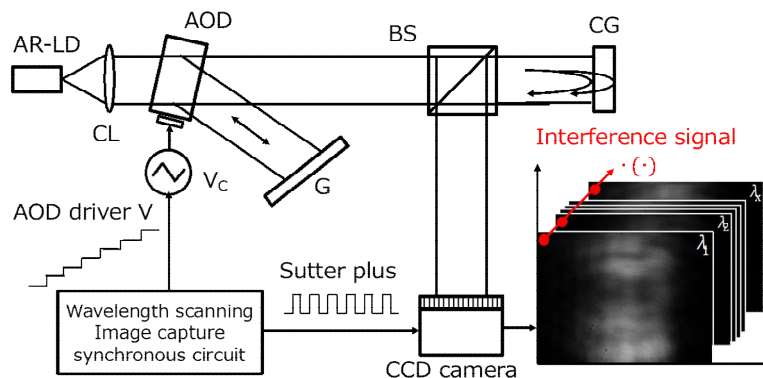


図7 波長走査光源のパルス駆動

時間的に変化する干渉信号S(t)(図8上段)を取得後、ウェーブレット変換により、カバーガラスの厚み計測を1画素分行った。このときの波長走査幅は $\Delta\lambda = 30.46$ nmである。マザーウェーブレットとして複素モーレを採用し、スケールパラメータaを1-40(1刻み)で変化させると、係数マップ(図8中段)と位相マップ(図8下段)が得られた。係数分布の最大輝度線を位相分布に反映させ、各点の位相情報を抽出する。この位相情報から得られた厚みは、145.7μmであり、この結果は、市販のマイクロメータ(分解能：10μm)を用いた測定結果150μmと同等の値であった。次に取得した干渉縞画像全画素に対して同様の計算を行い、厚み分布を計算した。測定範囲は1.57mm×2.52mmとなる。解析結果を図9に示す。144.4μmから147.0μmの範囲において均一な厚み測定ができ、平均厚みは145.7μmであった。以上の結果より、連続ウェーブレット変換(CWT)ベースの再生アルゴリズムが実現できたことを確認した。

上記アルゴリズムに基づく演算を画像処理専用ハードウェア(FPGA画像処理ボード)に実装し、計測の実時間化を試みた。手順は、CWTのM-ファイルを各処理ごとにモジュール化し、Simulink上に移植する。次にHDL Coderを利用することでSimulinkモデルからHDLコードを生成し、FPGAに解析システムを実装する。しかしながら、HDLコードの生成過程でさまざまなエラーが発生し、ハードウェア実装までには至らなかった。

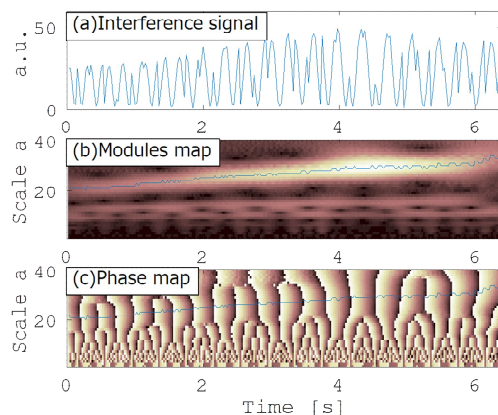


図8 干渉信号とウェーブレット変換結果

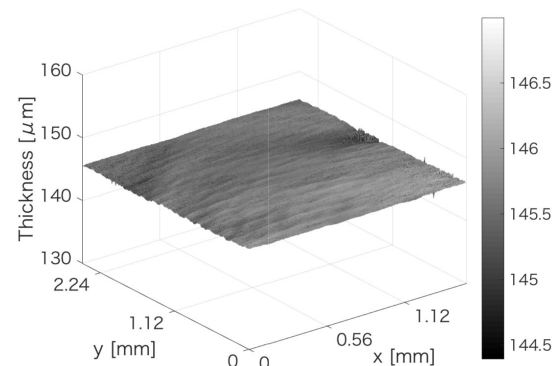


図9 厚み分布計測結果

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

(ただし、Optical Engineering 投稿中)

〔学会発表〕(計4件)

Nariyasu Sugawara, Takamasa Suzuki, and Samuel Choi, "Improvement of wavelength-scanning range in acousto-optically tuned external-cavity laser diode," Joint Symposia on Optics hosted by Optical Society of Japan (国際学会,2018,査読あり)

Takamasa Suzuki, Gen Suda, Samuel Choi, and Osami Sasaki, "Full-field optical coherence tomography using acousto-optically tuned external-cavity laser diode and wavelet transform," Frontiers in Optics 2018 (国際学会,2018,査読あり)

Gen Suda, Takamasa Suzuki, Samuel Choi, and Osami Sasaki, "Full-field optical coherence tomography using acousto-optically tuned external-cavity laser diode in Littrow configuration," The Twelfth Japan-Finland Joint Symposium on Optics in Engineering (国際学会,2017,査読あり)

Gen Suda, Takamasa Suzuki, Samuel Choi, and Osami Sasaki, "Acousto-optically tuned external-cavity laser diode based on Littrow configuration," International conference on Optoacoustics (国際学会,2017,査読あり)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称：光学装置

発明者：鈴木孝昌

権利者：新潟大学

種類：特許

番号：特願 2017-207428

出願年：2017年

国内外の別：国内

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：崔 森悦

ローマ字氏名：チョエ サムエル

所属研究機関名：新潟大学

部局名：自然科学系

職名：助教

研究者番号(8桁): 60568418

研究分担者氏名：村松 正吾

ローマ字氏名：ムラマツ ショウゴ

所属研究機関名：新潟大学

部局名：自然科学系

職名：教授

研究者番号(8桁): 30295472

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。