

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：54101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03860

研究課題名(和文)閉口き裂の検出精度向上を目的とした非線形超音波探傷法に関する研究

研究課題名(英文)Study on the Nonlinear Ultrasonic Waves for Detecting Closed Cracks

研究代表者

末次 正寛 (Suetsugu, Masahiro)

鈴鹿工業高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：50259884

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：構造物中に存在するき裂(クラック)は、突発的な脆性破壊を誘引して大事故に直結するため非破壊検査で検出すべき欠陥の最たるものである。本研究では、特に検知が困難である閉口き裂の検出精度向上を目的とし、超音波の伝ばによるき裂の開閉口挙動を実験によって直接観察した。その結果、縦波超音波の引張相の入射時にはき裂は開口して波を反射し、圧縮相ではき裂が閉じて波を透過させる現象が視覚的に確認できた。

さらに、フェーズドアレイ法によってき裂部へ焦点を絞った集束波を入射させれば、平面波入射の場合と比較して、より高次の高調波まで明確に観測できることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

き裂からの反射エコーを利用する従来の超音波法では、検知が極めて難しい閉口き裂を検出するため、強力な超音波を入射することによって発生する非線形超音波(高調波や分調波)を利用する手法が研究されている。このような非線形超音波の発生要因とされている「き裂の開閉口挙動」を、数値解析などのシミュレーションではなく、実験的に超音波の伝ば挙動を可視化して直接観察し、この挙動を視覚的に確かめた。光干渉法によって、nmオーダのき裂開口量(COD)も実験的に測定可能であるため、非線形超音波の発生とCODとの関連性も今後検討が可能である。

研究成果の概要(英文)：Cracks existing in mechanical structures are the principal defects that should be detected by non-destructive inspection because they induce sudden brittle fracture and lead directly to a tragic accident.

In this study, we directly observed the opening and closing behavior of cracks due to the transmission of ultrasonic waves with the aim of improving the inspection accuracy of closed cracks, which are particularly difficult to detect, by the non-linear ultrasonic technique. As a result, it was visually confirmed that the crack opens and reflects the wave when the tensile phase of the longitudinal ultrasonic wave is incident, and the crack closes and transmits the wave in the compressed phase. Furthermore, it was found that if an incident wave was focused on the closed crack by using the phased array method, higher harmonics can be clearly observed as compared with the case of plane wave incident.

研究分野：材料力学

キーワード：非破壊検査 非線形超音波法 閉口き裂 超音波可視化 光弾性法 鋭敏色法 フェーズドアレイ法

1. 研究開始当初の背景

超音波探傷法は放射線試験法等と違って人体への悪影響がないため、機械構造物内部に存在する欠陥の検出手法として広く用いられている。本手法は材料内部へ入射した超音波が欠陥部から反射して帰ってくる反射エコーをキャッチする原理に基づいており、欠陥の中でも突発的な脆性破壊を引き起こして大事故に直結するき裂(クラック)の検出に威力を発揮している。しかし、このようなき裂の多くは「開口量が極めて微小(一般的に数十 nm から数百 nm)」であるため反射すべき超音波が透過してしまい、き裂の検出が困難になる問題が生じている。さらに、検査は機械の稼働を休止して行うことが多いため、検査時は「全く閉じた状態」となることもあり、検出は更に難しくなる。

以上のように、閉口状態にあるき裂の検出は、反射エコーを利用するこれまでの線形超音波探傷法では原理上不可能であるため、新たに「非線形超音波法」と呼ばれる手法が提案され、現在研究が進められている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。この非線形超音波法は、入射した超音波周波数の整数倍の高調波、あるいは整数分の1の分調波が閉口き裂部から発生することを利用した手法であり、これらの高調波・分調波をキャッチして「見えないき裂」を検出しようとするものである。しかし、これらの高調波・分調波は、閉口き裂の存在以外の原因(例えば高電圧回路装置の電気信号)でも発生するため、発生源の判別が重要であり、閉口き裂部からの高調波・分調波発生メカニズムの解明がこの鍵となると考えられる。

2. 研究の目的

上述のとおり、非線形超音波法による閉口き裂の検出精度向上のためには、高調波・分調波の発生メカニズムを明らかにする必要がある。このためには、数値計算的ならびに実験的なアプローチがあるが、FDTD(Finite Difference Time Domain)法に代表される数値解析が主流である⁽⁵⁾。本研究は、モデル化や仮定を含む数値解析法ではなく、実験的な手法に軸を置いて非線形超音波の発生現象を直接観察しようとするところに特徴がある。これまでの研究によれば、粗密波である縦波超音波の場合は、「波の位相が引張の時にき裂が開き、位相が圧縮の時にき裂が閉口する。従って、き裂が開く引張位相の時のみ反射波が得られる半波整流状態となり偶数倍の高調波・分調波が発生する」という説明がなされている。また、せん断波である横波の場合についても「閉口き裂面の摩擦状態に依存した矩形波状態となるため奇数倍の高調波・分調波が生じる」とされている。しかしながらこれらは概念的な説明・仮定である。本研究では、超音波の伝播過程を実験による直接可視化撮影によって観察し、閉口き裂部でどのような現象により非線形超音波が発生しているのかを明確にした上で、この現象を助長するような探傷法・実験条件(波の種類や入射方法など)を考えることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究で用いた超音波の可視化実験法は、固体内を伝ばする超音波の音圧によって発生する応力場を光の偏向現象によって視覚化する光弾性法であり、古典的な方法ではあるが実際に伝ばしている超音波を“目”で直接見る事が出来るという信頼感がある。この可視化原理に、閃光時間が ns オーダーのナノパルサー光源を組み合わせたストロボ撮影法によって、数千 m/s で固体中を伝ばする超音波の伝ば挙動を細かく観察することができる。実験装置の概略を図1に示す。なお、通常の平面偏光器(偏光子と検光子の組み合わせ)では応力場強度の自乗に比例した輝度情報となるため、引張場と圧縮場の区別がつかない。本研究ではこれらの区別をつけて観察する必要があるため、鋭敏色法と呼ばれるテクニック⁽⁶⁾を併用した。これは、図1に示すように波長が 560 nm の「1 波長板(λプレート)」を試験片と検光子の間に組み込んだものであり、560 nm の波長と試料との光路差が相加的に組

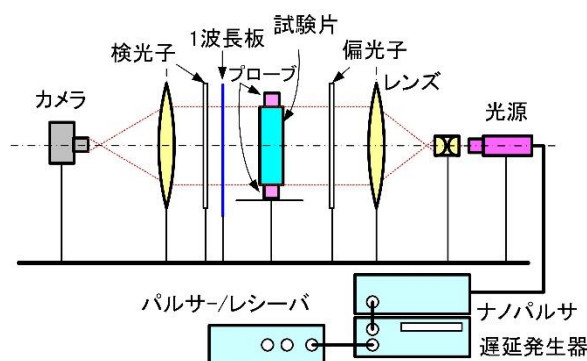


図1 超音波可視化装置の概略

み合わさった部分は青みが強く、相減的に重なった部分は赤みが強くなる特徴がある。この方法を利用すれば縦波（粗密波）の引張相と圧縮相を区別して可視化することができる。

4. 研究成果

(1) 微小開口き裂の開閉口挙動について

熱応力を利用して自然き裂を導入した耐熱ガラスの試験片を図2に示す。常温において、右端面から34 mmの部分（A-B間）はき裂が全く閉じているが、中央部の7 mmの部分（B-C間）の一部はき裂がわずかに開口している。また、先端部の10 mmの部分（C-D間）では再びき裂が全く閉じている。B-C間に存在する微小開口部は同図に示すように板厚中央部の楕円形状であるが、これは意図せず偶然にできたものである。この部分の開口量は、白色光による光干渉法⁽⁷⁾の実験結果より、少なくとも $0.2\mu\text{m}$ 以下であると推定された。

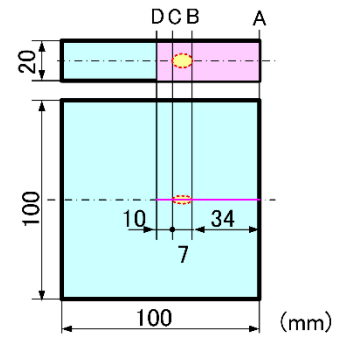


図2 試験片形状寸法

図3に、通常の平面偏光器を用いて可視化された縦波超音波を示す。周波数 $f = 2.25\text{ MHz}$ の広帯域型垂直探触子から耐熱ガラス（図2と同じ寸法の無垢材）中へ入射された15波の超音波が、白い横縞模様として可視化されている。この間隔は、ガラス中を伝ばする縦波の音速 $C_L = 5570\text{ m/s}$ ならびに入射波の周波数から計算される波長 2.48 mm の約 $1/2$ であることより、引張相と圧縮相が交互に同じ白色模様で可視化されていることがわかる。図3には、中心線（黄色のライン）上の輝度分布が示してあり、これを周波数分析した結果が図4である。入射縦波周波数 2.25 MHz の2倍である 4.5 MHz にピークがあることから、圧縮相と引張相が同じ白色で可視化されていることが確認できる。

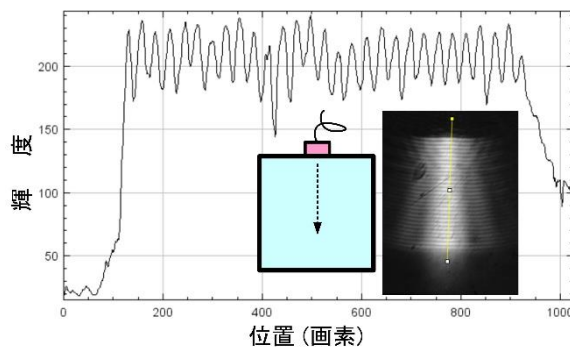


図3 縦波超音波の可視化像と中心線上の輝度分布（平面偏光）

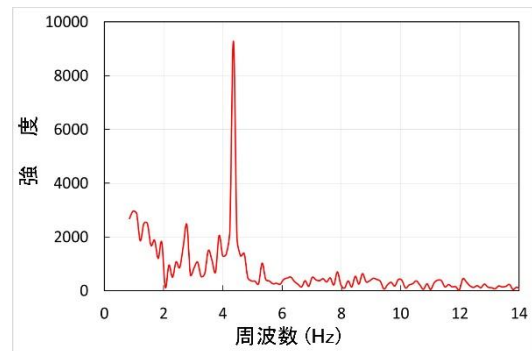


図4 輝度分布の周波数分析

一方、図5は鋭敏色法で同様に縦波超音波を可視化したものであり、橙色と青色の縞模様が交互に可視化されている。これらの色縞は、同図中に示した曲げによる検定写真からわかるとおり、橙色が引張相、青色が圧縮相である。

図6は、図1に示した試験片中の微小開口き裂部へ入射された縦波超音波の伝ば挙動を、鋭敏色法によって可視化したものである。撮影条件は図5と同じであり、引張相が橙色、圧縮相が青色で観察されている。「圧縮相（青）- 引張相（橙）- 圧縮相（青）」の一連の波が微小開口き裂部へ進み、③フレームで先頭の圧縮相（青）が、また④フレームで引張相（橙）がき裂上面に達していることがわかる。その後、先頭の圧縮相（青）はき裂部を透過し、引張相（橙）は位相を転じて圧縮相（青）となって反射していることが⑤、⑥フレームよりわかる。また、⑤から⑦フレームのき裂部直下を観察すると、き裂部分の長さに対応する引張相（橙）の一部の輝度が低くなっていることから、透過した波は半波整流の傾向になっていると考えられる。しかし、この状態は波の伝ばとともにき裂両端部からの波の回折によって解消され

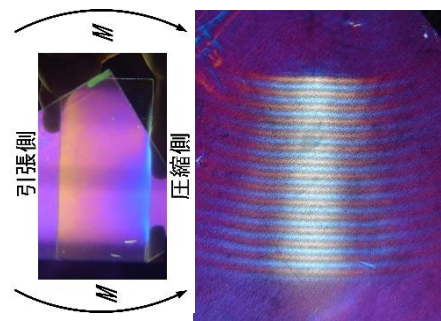


図5 超音波可視化像（鋭敏色法）

ていることが⑧、⑨フレームから知られる。

図7は、通常の平面偏光器を用いて10波の縦波超音波を可視化した画像ならびに輝度分布の周波数解析である。同図(a)は微小開口き裂部への入射前、(b)は入射直後のもので、それぞれ周波数解析は黄色のライン部を対象としている。図7(a)に示すき裂部入射前の解析結果では、入射波の周波数である $f = 2.25\text{MHz}$ の2倍の成分($f = 4.5\text{MHz}$)が強く出ていることがわかる。また、同図(b)に示すき裂部入射直後の解析結果では、 $f = 4.5\text{MHz}$ の成分は入射前より抑えられており、入射波の周波数成分($f = 2.25\text{MHz}$)が最も強く出ていることがわかる。さらに、これらに加えて $f = 2.25\text{MHz}$ の1/2の成分($f = 1.125\text{MHz}$)も強く出ていることが知られる。以上のように、

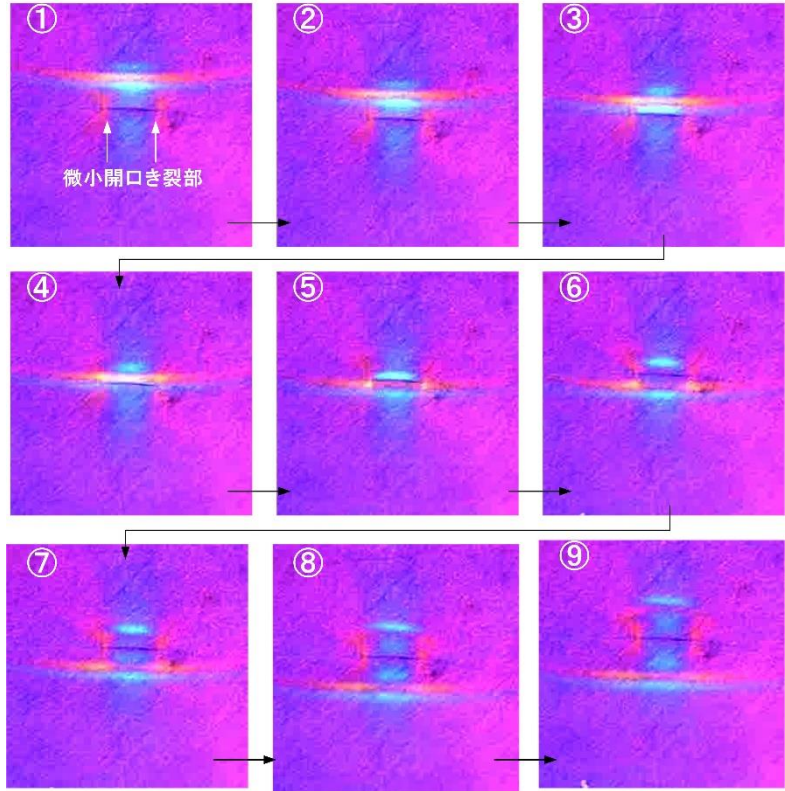


図6 微小開口き裂部における縦波超音波の伝ば挙動

微小開口き裂の開閉口挙動によって超音波の周波数が大きく変化していることがわかる。しかし、図6に示したように、引張相のみが微小開口き裂部で反射して半波整流波形になっていると考えれば、図7(a)の $f = 4.5\text{MHz}$ の2倍(偶数倍)の 9MHz 成分が図7(b)に生じるはずであるが、そうはなっていない。この点も含めて、今後は超音波の受信信号の周波数解析などを可視化像の検討と併せて行っていく必要があると考えている。

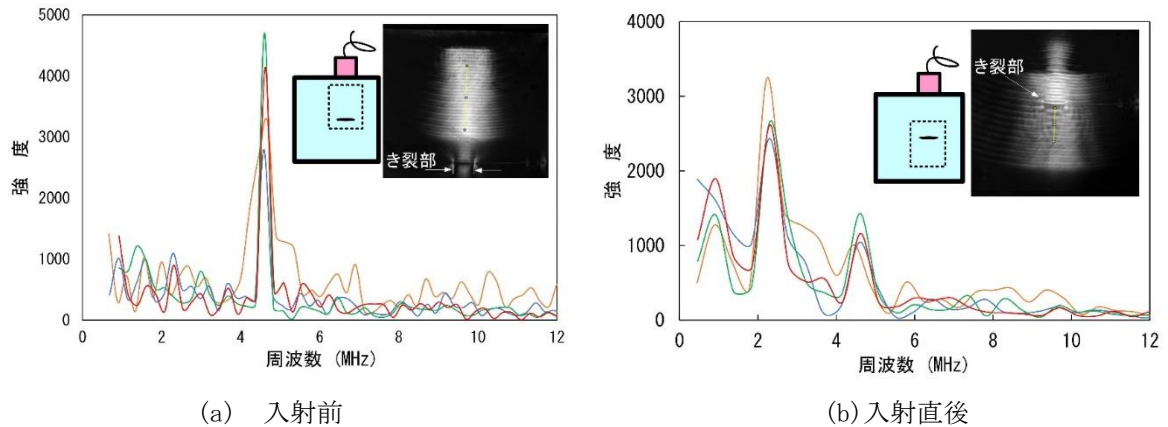


図7 微小開口き裂部近傍における輝度分布の周波数解析
(同条件で行った4回の実験結果)

(2) 閉口き裂探傷へのフェーズドアレイ法の適用について

閉口き裂部から効果的に非線形超音波を発生させることを目的とし、フェーズドアレイ法によって閉口き裂部へ焦点を絞った集束波を入射することを考えた。複数の圧電素子を有するフェーズドアレイ探触子を用いれば、個々の圧電素子にディレイを与えることで、任意の位置に焦点を絞った集束波を入射することができる。通常、このディレイは超音波探傷装置が自動的に制御するが、本研究では超音波の伝ば挙動を可視化して直接観察し、閉口き裂部へ正確に集束波を入射した。図8に実験装置の概略を示す。試験片の形状寸法は図2と同じであり、熱応力によって端部より中央へ向かってき裂を導入してある。き裂の開口量を光干渉法⁽⁷⁾によって測定した

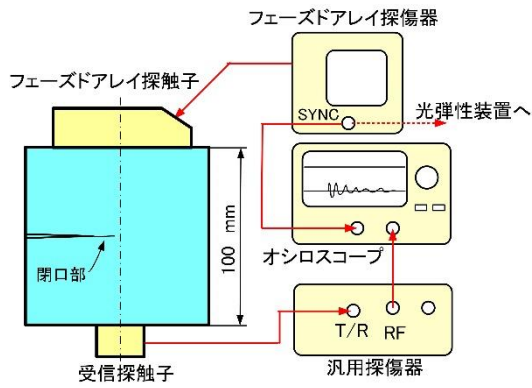


図8 実験装置の概略

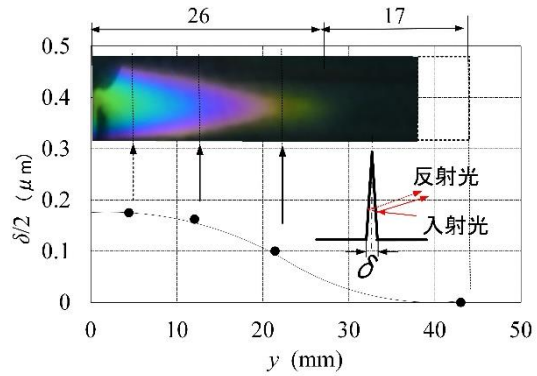
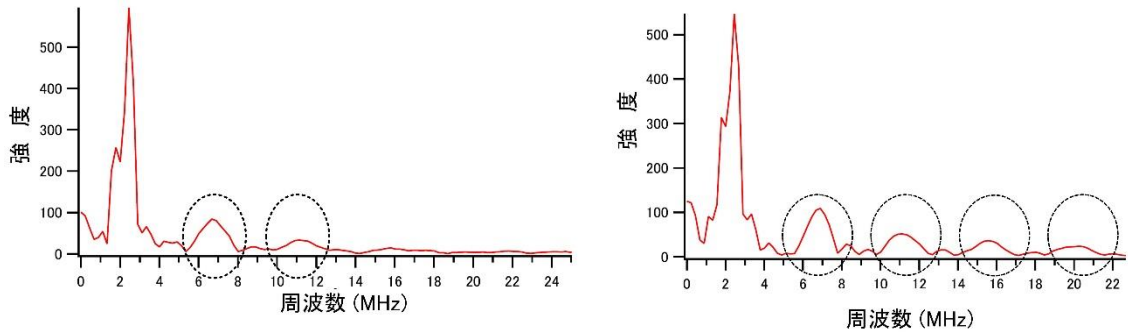


図9 き裂の開口量



(a) 平面波入射

(b) 集束波入射

図10 フェーズドアレイ法を用いた集束波入射

結果が図9である。き裂の全長は41 mmであるが、先端の17 mm部分は常温時では全く閉じた状態である。図10は、開口き裂先端部(図9の左端から26 mm付近)へ超音波を入射し、その透過波をFFT解析した結果である。同図(a)は平面波入射(フォーカスなし)、(b)は集束波入射(フォーカスあり)のものであるが、両者ともに送信周波数である2.25 MHzに大きなピークを持っている。また、両者ともに複数の高調波が生じているが、(b)の集束波を入射した場合の方が、より高次の高調波を明瞭に観測できていることがわかる。なお、参考のため、き裂が無い部分を伝ばさせた超音波の受信波形をFFT解析した結果、高調波は全く生じていなかった。

<引用文献>

- (1) 川嶋紘一郎、非線形超音波を用いた非破壊材料特性評価、システム/制御/情報、48巻5号、2004、159-164
- (2) 村瀬守正、林高弘、北山綱次、接触界面における高調波発生現象の可視化、非破壊検査、63巻6号、2014、310-315
- (3) 丸山泰蔵、廣瀬壮一、接触条件を考慮したき裂による2次元高調波・分調波励起シミュレーション、非破壊検査、64巻12号、2015、586-592
- (4) 丸山泰蔵、廣瀬壮一、接触条件を考慮したき裂による2次元高調波・分調波励起シミュレーション、非破壊検査、64巻12号、2015、586-592
- (5) 山中一司、小原良和、小熊みゆき、新宅洋平、減衰2重節点を用いた閉口き裂における分調波の2次元解析、非破壊検査、61巻3号、2012、113-121
- (6) 保坂儒人、今野和彦、ストロボ光弾性法による固体中のき裂と残留応力中を伝播する超音波の可視化、素材物性学雑誌、27巻1/2号、2016、20-24
- (7) 関野晃一、古川敬、古村一朗、清水紘治、横波および縦波入射によるき裂周りの超音波の可視化、溶接・非破壊検査技術センター技術レビュー、4巻、2008、5-9

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 馬場敦也, 末次正寛, 白木原香織, 関野晃一
2. 発表標題 微小開口き裂に入射した縦波超音波伝ば挙動の直接観察
3. 学会等名 日本非破壊検査協会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Itaya, R. Hashimoto, M. Suetsugu, S. Yoshioka and K. Inuzuka
2. 発表標題 Development of teaching material package for advanced nondestructive inspection education combining robotics/IoT utilization and nondestructive inspection
3. 学会等名 15th International Symposium on Advances in Technology Education (ISATE) 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 末次正寛, 河原岳尊, 馬場敦也, 谷川義之, 中川朋彦, 白木原香織, 関野晃一
2. 発表標題 閉口き裂部から発生する非線形超音波の基礎的検討
3. 学会等名 日本設計工学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 末次正寛, 河原岳尊, 小宮沙和, 白木原香織, 関野晃一
2. 発表標題 固体の境界部から発生する非線形超音波についての基礎的検討
3. 学会等名 日本設計工学会東海支部
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 関野晃一，末次正寛
2. 発表標題 収束型超音波コースティックス法における像の形成について
3. 学会等名 日本非破壊検査協会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 関野晃一，末次正寛
2. 発表標題 超音波を用いた応力拡大係数評価のためのコースティック定数の測定について
3. 学会等名 日本非破壊検査協会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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