

平成 22 年 5 月 17 日現在

研究種目：基盤研究（A）  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19206013  
 研究課題名（和文） ミクロ構造におけるフォノン閉じ込めの可視化とモード制御  
 研究課題名（英文） Visualization and Mode-Control of Phonons Confined in  
 Microstructures  
 研究代表者 O・B Wright  
 （オー・ビー ライト）  
 北海道大学・大学院工学研究科・教授  
 研究者番号：90281790

研究成果の概要（和文）：この研究は様々な新しいミクロスケール構造に閉じ込められたフォノンモードを、先例のないピコ秒時間分解能とマイクロメートル空間分解能、メガヘルツ周波数分解能で、可視化と制御するものである。以下の内容を研究した：フォノン結晶中のブロッホ波とブロッホモードの可視化、フォノン結晶導波路とフォノン結晶キャビティ、ウィスパリングギャラリーモードの調査、音響的な負の屈折、弾性表面波場の位相特異性の調査、産業界で使われる弾性表面波共振器への応用。ミクロ構造におけるフォノン閉じ込めの可視化とモード制御

研究成果の概要（英文）：This work involves the imaging and control of phonon modes confined in a wide variety of novel microscopic geometries with unprecedented picosecond temporal, micron spatial, and megahertz frequency resolutions. The following topics are investigated: visualizing Bloch waves and modes in phononic crystals, phononic crystal waveguides and cavities, investigating whispering gallery modes, acoustic negative refraction, and phase singularities in surface acoustic wave fields, and applications to industrially-produced surface acoustic wave resonators. Visualization and Mode-Control of Phonons Confined in Microstructures

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	15,100,000	4,530,000	19,630,000
2008年度	9,300,000	2,790,000	12,090,000
2009年度	7,900,000	2,370,000	10,270,000
年度			
年度			
総計	32,300,000	9,690,000	41,990,000

研究分野：光物性、フォノン物性

科研費の分科・細目：応用物理学、工学基礎・応用物理学一般

キーワード：超音波物性、超高速分光、表面波、非破壊検査、表面・界面物性

## 1. 研究開始当初の背景

マイクロ構造に閉じ込められた GHz 弾性表面波は、フィルタ・遮蔽・導波技術への応用としてとても有望である。商用に应用される技術の急速な広がり観点から、このような 50 MHz ~5 GHz の範囲の、音波の波長が典型的に 1~100  $\mu\text{m}$  の閉じ込められたフォノンの可視化や制御には差し迫った必要がある。

2次元の弾性表面波の可視化には、ストロボ法や光ナイフエッジ方式、光干渉計、液中で焦点の超音波による検出など、様々な方法が提案されてきた。特に弾性表面波の励起と検出の両方を光を使って行う方法は、非接触性のため最も多用途であることが示されている。しかし、弾性表面波の1つのイメージだけを得ることで音響周波数分布をもった一般的な弾性表面波の場の完全な解析はできない。この種の完全な解析には2次元面内での各点での音響場の振幅と位相をある時間間隔で知る必要がある。しかし最近まで、このような実時間領域での弾性表面波のイメージングをする有効な方法はなかった。

我々は、初めて超高速光技術を基に実時間領域での高周波数弾性表面波のイメージング技術を開発した (Phys. Rev. Lett. **88**, 185504, 2002) など、この研究領域において重要な役割を果たしている。我々の弾性表面波場の時間空間フーリエ解析方法はフォノンの分散関係を得ることを可能にした。

しかしこの方法の問題として、得られる分散関係の周波数分解能が 80MHz のレーザーの繰り返し周波数によって制限されてしまうことがある。さらに我々も他のグループも、光励起する GHz の弾性表面波の空間分布を任意に制御することができず、選択的に特定の弾性表面波のモードのみを励起することが困難であった。ただ、コンピューターホログラムを利用した光の空間的な制御によって2次元の弾性表面波を制御する技術は低周波数では行われていた (イギリス Nottingham 大学の M. Clark 博士による研究)。この問題点を解決して実時間領域でのイメージングと光スポットを空間制御することを可能にし、急成長する GHz 弾性表面波の研究分野に応用することは非常に重要である。

## 2. 研究の目的

この研究目的は不透明基板試料の弾性表面波のイメージングの研究分野における我々の近年の研究を発展させることであり、以下のような様々な構造での弾性表面波の可視化と制御を行う。

1) 1次元および2次元フォノン結晶上

での弾性表面波の可視化

- 2) フォノン結晶キャビティ、フォノン結晶導波路、マイクロ円板上などでの閉じ込められた弾性表面波の可視化
- 3) コンピューターホログラム技術を使った弾性表面波のアクティブな制御
- 4) 圧電素子上での弾性表面波の制御と可視化
- 5) 弾性表面波場の位相特異性の可視化とフォノン結晶の負の屈折

## 3. 研究の方法

測定システム:

弾性表面波のイメージングは、試料表面に局部的に弾性表面波を励起する励起光パルス (ポンプ光) と、励起光よりも遅延して試料に当たり弾性表面波による試料表面の変位もしくは試料の光反射率変化を干渉計によって検出する検出光パルス (プローブ光) によってなされる。この実験装置には、現有のフェムト秒チタンサファイアパルスレーザーの繰り返し周波数 80 MHz を調節するパルスピッカー (Conoptics 社製) を含む。このパルスピッカーと現有の 12 ns まで光学距離を変化できる機械的な遅延光路とを組み合わせることで 100 ns までのポンプ光パルスに対するプローブ光パルスの遅延時間を作ることができる。このイメージング装置では、自動制御可能な2軸可動鏡と 4f レンズシステム、対物レンズを利用して可視光のポンプ光と近赤外光のプローブ光の光スポット位置を独立に試料に垂直入射に近い形で動かすことができる。これらの光パルスのパルス幅は~1 ps、パルスエネルギーは~1 nJ、スポット径は<1  $\mu\text{m}$  である。ポンプ光パルス列を音響光学変調機を用いて振幅変調することで、ロックイン検出をしている。この測定システムでは、試料上に任意の空間強度分布をもつポンプ光を当てて弾性表面波を励起するためのコンピューターホログラムシステムと組み合わせて使うことも可能である。このコンピューターホログラムは 800 x 600 ピクセルの2次元空間位相変調器 (浜松ホトニクス製、波長 400-700nm、効率 72%) でつくられる。

試料の準備

この試料はフランス、Besancon の CNRS FEMTO-ST 研究所の A. Khelif 博士と S. Benchabane 博士によって準備された。マイクロ構造やフォノン結晶の試料作製は、深堀反応性イオンエッチングと、ウェットエッチング、収束イオンビーム装置でつくられた。

#### 4. 研究成果

##### 4-1 1次元および2次元フォノン結晶上の弾性表面波のイメージング

既に発表していた1次元フォノン結晶の結果 (Phys. Rev. Lett. **97**, 055502-1-4, 2006) に引き続き、我々は以下のような様々な研究を行った。

1つ目に、この1次元フォノン結晶の研究手法を2次元フォノン結晶に当てはめた (Phys. Rev. B. **80**, 014301-1-7, 2009)。この研究ではシリコン基板上にマイクロの穴を四角格子状に掘り、この格子内部で弾性表面波を励起した。結果として得られた弾性表面波場は、フーリエ空間中で解析され分散関係を得た。図1は試料と典型的な弾性表面波のイメージ、実験の概念図を示している。

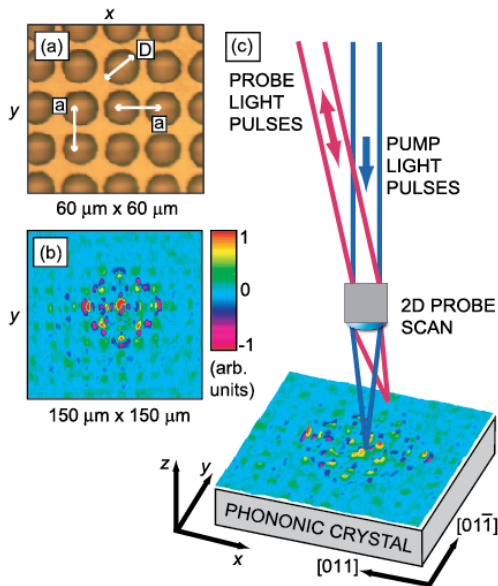


図1 (a) 40 nmの膜で覆われたシリコンフォノン結晶の光学顕微鏡像。穴の直径は  $D = 12 \mu\text{m}$  であり、格子間隔は  $a = 15 \mu\text{m}$  である。(b) 遅延時間 7.4 ns での弾性表面波のイメージ。(c) 実験装置の概念図。

実験結果に時間と2次元空間フーリエ変換を取ることにより、図2のような分散関係  $|F(\mathbf{k}, \omega)|$  を得ることができた。 $\mathbf{k}$  は2次元の波数ベクトルである。この図には市販の解析ソフトをもちいた数値計算結果も比較のために示しており、実験結果と非常に良く一致していることがわかる。

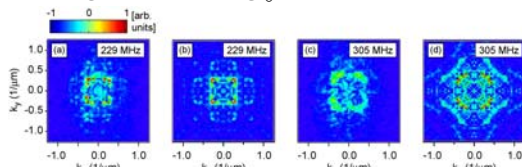


図2. 229 MHzの等周波数面での実験結果(a)と数値計算結果(b)。この周波数では、ブラック散乱の条件が第1ブリルアンゾーン端の波数 $\mathbf{k}$ にほぼ当てはまっている。伝播方向によっては消失周波数帯となる305 MHzの等周波数

面での実験結果(c)と数値計算結果(d)。

この結果は、305 MHzでxおよびy方向への弾性表面波の伝播ができない消失周波数帯の存在を示している。このことは、 $|F|$ を波数と周波数の関係として示した図3により明らかになる。この図では数値計算結果の実時間実空間領域での弾性表面波場とそれによる分散関係も同時に示している。

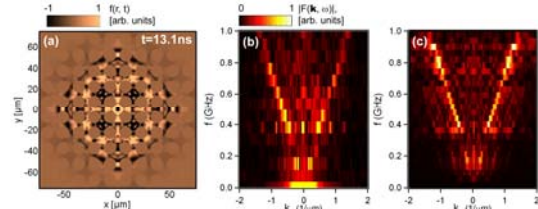


図3 (a) 13.1 nsでの弾性表面波による試料表面に垂直方向への表面変位の数値計算結果。(b), (c) 実験結果と数値計算結果のフーリエ変換で得られた分散関係  $|F(\mathbf{k}, \omega)|$  の  $\omega$ - $k_y$  断面。消失周波数が(b) と(c)ともに 300 MHzであることが確認できる。

我々はまたそれぞれの周波数での弾性表面波の場を求め、フォノン格子での異なった固有モードの特性を示した。この実験とシミュレーション結果は比較され、Chinese Journal of Physics に投稿中である。

フォノン結晶のイメージングと分散関係の研究は、1次元フォノン結晶に対して行った別の実験技術を使って行った (J. Appl. Phys. **105**, 123530, 2009)。この研究はシリコン基板上で周りをシリコン酸化物に覆われた銅のストライプ細線の上に弾性表面波を励起するための、我々の研究室内の商用のレーザー干渉グレーティング実験装置を使ってなされた。第1ブリルアンゾーン端で減衰しにくいモードの確認とその寿命の測定をすることができ、その結果を波束が広がっていく理論と比較した。

これらの実験結果をより高い周波数分解能で得られるようにするため、パルスピッカーを使ってレーザーの繰り返し周波数を 40 MHz に落として行った結果を得ている。この測定には成功しているものの、パルスピッカーによるポンプ光のレーザーパワーの減少のため、現在では質の低い動画しか得られていない。そのため、我々はパルスピッカーと組み合わせて満足いく実験結果を得るためには現状より高い出力の(繰り返し周波数 80 MHz の)チタンサファイアレーザーが必要であると信じている。このため、周波数分解能をさらに 10 MHz までする実験にはまだ取り組んでいない。

##### 4-2 フォノン結晶キャビティ、フォノニ

ック結晶導波路、マイクロ構造の円板に閉じ込められた弾性表面波のイメージング

弾性表面波が閉じ込められるような構造でのイメージングの実験をいくつか行った。まず、マイクロな銅の円板中に弾性表面波を励起する研究を行った (Phys. Rev. B **81**, 165434, 2010)。直径  $37.5\ \mu\text{m}$ 、厚さ  $370\ \text{nm}$  の結晶のシリコン基板上的円板の端近くに弾性表面波を励起した。典型的な実験結果を図4に示す。ロックイン増幅器の直角位相出力を利用して周波数  $760\ \text{MHz}$  のウィスパリングギャラリモードのイメージを分離することができた。この方法は弾性表面波の場合うち長い持続時間をもつ成分を目立たせることができ、音響的な  $Q$  値を推定することに役立つ。このウィスパリングギャラリモードの  $Q$  値はおよそ  $600$  であることが分かった。このモードは銅板の表面に対する厚さの影響を受けることがわかった (J. Appl. Phys. **107**, 03352, 2010)。

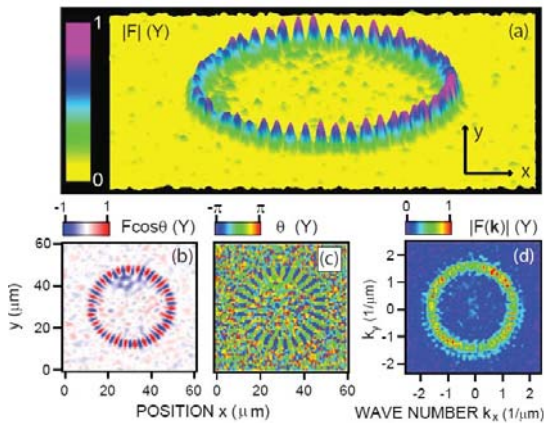


図4 760 MHz の弾性表面波の直角位相出力成分の時間フーリエ変換結果の絶対値(a)、実部(b)、および位相(c)、(d) 時間空間フーリエ変換で得られた対応する等周波数面。

我々はまた、シリコン基板上的格子定数  $6.2\ \mu\text{m}$  の四角格子フォノン結晶中の次に述べる様な構造での弾性表面波のイメージングを行った。直線導波路、L字型導波路、プリズム、1つの格子欠陥によるフォノン結晶キャビティの構造である。実験で得られたフォノン結晶導波路とスラブ構造導波路(導波路の両側が深さ  $100\ \mu\text{m}$  の穴でできた構造)での2つの周波数の弾性表面波のイメージを図5に示す。

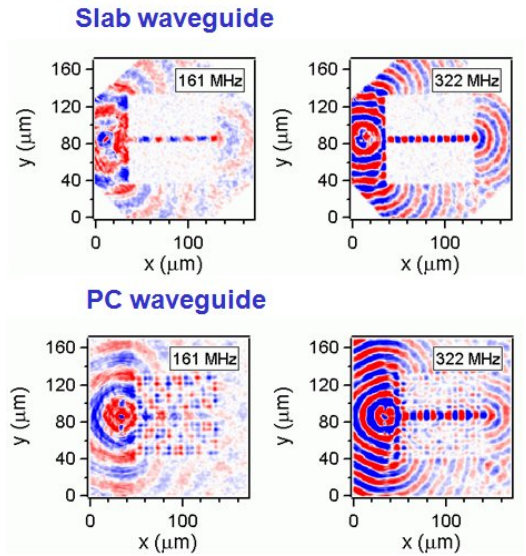


図5 直線スラブ構造導波路と直線フォノン結晶導波路での  $161\ \text{MHz}$  と  $322\ \text{MHz}$  の弾性表面波の実験イメージ。

フォノン結晶導波路では、フォノン結晶の消失周波数帯より低い約  $300\ \text{MHz}$  以下の周波数成分は通過させるが、フォノン結晶の消失周波数帯より高い約  $400\ \text{MHz}$  以上の周波数の弾性表面波はフォノン結晶に波が漏れ出すためにうまく導波できないことが示された。逆に消失周波数帯の  $322\ \text{MHz}$  の弾性表面波は閉じ込め効果により弾性表面波がより減衰せずに透過することが観察された。比較のための直線スラブ構造導波路では弾性表面波は周波数依存性なしに導波路を透過した。図6に示したシミュレーション結果は実験結果とよい一致をしている。L字型フォノン結晶導波路や単格子欠陥のフォノン結晶キャビティ、三角格子を通り抜ける様子など他の閉じ込め構造を含むこれらの結果は現在発表のための準備をしている最中である。

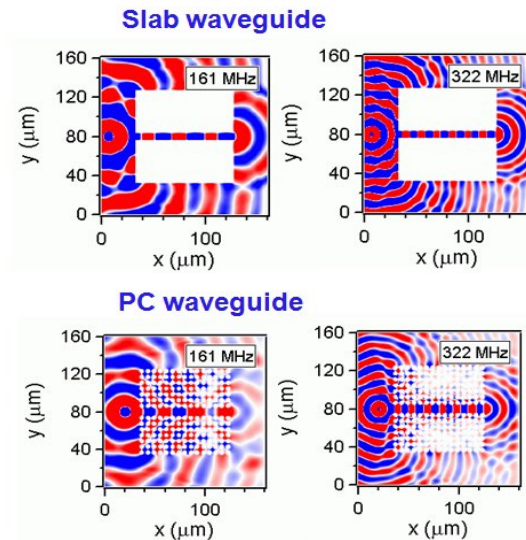




図6 直線スラブ導波路と直線フォノンニック結晶導波路での161 MHzと322 MHzの弾性表面波のシミュレーションイメージ。図5に示した実験結果と良く一致している。

#### 4-3 コンピューターホログラム技術によるアクティブな弾性表面波の制御

コンピューターホログラムシステムは環の形状を投影させるようにテストした。レーザー光を30度の入射角でコンピューターホログラムをつくる液晶空間位相変調器に入射させ、位相変調を起こし、反射光を試料上に集光する。この光をもとに環状に弾性表面波が励起され、試料上の一点に収束するように伝播させるのに利用する。この装置は低いパワー密度と収差のため、試料上に投影されたパターンの精度（試料表面上に線上で約10  $\mu\text{m}$  のスポット幅になってしまう）が高いエネルギーをもつ弾性表面波を励起するのに十分でないため、十分に高品質の弾性表面波の動画を撮ることはできていない。だが、テストで使った環状のパターンで弾性表面波が一点に収束していく様子は得ている。この現状の問題のため、我々はこの技術を使ってフォノンニック結晶上に特定の弾性表面波のモードを励起ことはまだ試していない。この研究は進行中であり、現在は、光学系とコンピューターホログラムを生成するアルゴリズムの両方を改良することで、光の集光の精度を向上させることに取り組んでいる。関連する研究として、2つの光パルスの時間を制御して、1次元のフォノンニック結晶のGHzの弾性表面波とバルク波をコヒーレント制御することを示した研究も行った (Appl. Phys. Lett. **93**, 113101, 2008)。

#### 4-4 圧電基板上での表面弾性波のイメージングと制御

我々は弾性表面波のイメージング技術を、新しい電気パルス励起と光パルス検出による方法に拡張した (Appl. Phys. Lett. **93**, 261101, 2008)。この研究は Applied Physics Letters 誌2008年12月号の表紙にも選ばれた。薄膜からなるバルク弾性波共振器の100 MHzから2.1 GHzまでの弾性波の時間分解イメージを得た。光パルスレーザーと同期させた電気パルスが圧電効果を使ってデバイス内に弾性波を励起し、それと同期した近赤外光の光パルスが表面の動きを光干渉計で検出する。この周波数分散は時間空間フーリエ変換によって得られ、縦波と表面波の両方の弾性波モードを明らかにした。時間フーリエ変換で得られるうちのいくつかの周波数の振幅像と位相像を図7に示す。

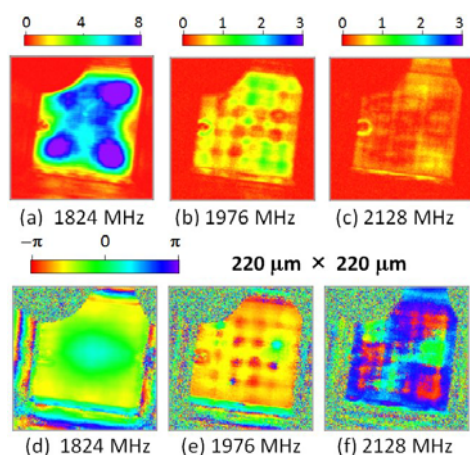


図7 薄膜バルク弾性波共振器での2 GHzまで76 MHzの周波数間隔で得られる振幅像(任意単位)(a)-(c)と位相像(d)-(f)。共振器の大きさは160  $\mu\text{m}$   $\times$  160  $\mu\text{m}$ である。

#### 4-5 弾性表面波の位相特異性イメージングとフォノンニック結晶の負の屈折

弾性表面波の位相特異性のイメージングをするために、シリコン基板上にマイクロな溝を掘った試料をいくつか用意した。この目的は直線板の端での波の通過の様な光学で見られる現象との対比である。深さ10  $\mu\text{m}$ の溝の周りで得られた結果を図8に示す。残念ながら位相特異性が期待できる障害を超えた弾性表面波を観察できるほどの十分な鮮明さをえることができなかった。

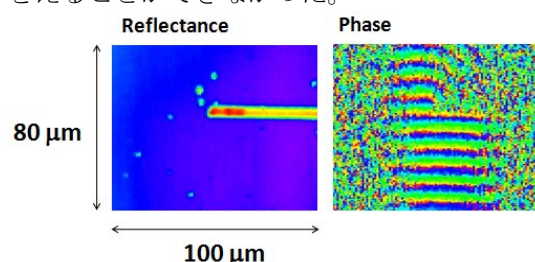


図8 直線溝端での弾性表面波のイメージ。左図はシリコン基板上の深さ10  $\mu\text{m}$ の溝の位置を示している。右図は時間フーリエ変換で得られた位相像。

4-6. 以上に述べた事柄に関連した研究として、機械的な接触をなす荒い表面でのGHz弾性波パルスの反射のイメージングがある。この境界面の種類は、散乱体が周期的に並んだフォノンニック結晶に対比して、散乱帯がランダムに配置されたものと考えることができる (Phys. Rev. B **80**, 235409, 2009, Ultrasonics **50**, 197, 2010)。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計8件)

① Acoustic whispering-gallery modes generated and dynamically imaged with

ultrashort optical pulses  
T. Tachizaki, O. Matsuda, A. A. Maznev and O. B. Wright  
Phys. Rev. B 81, 165434-1-5 (2010) 査読有

② Optical generation of surface acoustic waves guided at the linear boundary between two thin films  
A. A. Maznev, T. A. Kelf, M. Tomoda, O. Matsuda and O. B. Wright  
J. Appl. Phys. 107, 033521-1-6 (2010) 査読有

③ Picosecond time scale imaging of mechanical contacts  
T. Dehoux, O. B. Wright and R. Li Voti  
Ultrasonics 50, 197-201 (2010) 査読有

④ Nanoscale mechanical contacts probed with ultrashort acoustic and thermal waves  
T. Dehoux, O. B. Wright, R. Li Voti, and V. E. Gusev  
Phys. Rev. B 80, 235409-1-5 (2009) 査読有

⑤ Optical generation of long-lived surface vibrations in a periodic microstructure  
A. A. Maznev and O. B. Wright  
J. Appl. Phys. 105, 123530-1-6 (2009) 査読有

⑥ Dynamic visualization of surface acoustic waves on a two-dimensional phononic crystal  
D. M. Profunser, E. Muramoto, O. Matsuda, and O. B. Wright  
Phys. Rev. B 80, 014301-1-7 (2009) 査読有

⑦ Real-time imaging of acoustic waves on a bulk acoustic resonator  
T. Fujikura, O. Matsuda, D. M. Profunser, O. B. Wright, J. Masson, and S. Ballandras  
Appl. Phys. Lett. 93, 261101-1-3 (2008) 査読有

⑧ Coherent control of gigahertz surface acoustic and bulk phonons using ultrafast optical pulses  
D. H. Hurley, R. Lewis, O. B. Wright and O. Matsuda  
Appl. Phys. Lett. 93, 113101-1-3 (2008) 査読有

[学会発表] (計4件)

① Dynamic visualization of surface phonons on phononic crystals  
O. B. Wright Apr. 20, 2010

Phonons 2010, 13th International Conference on Phonon Scattering in Condensed Matter, Taipei, Taiwan (invited)

② Dynamic imaging of phononic wave packets interacting with periodic structures  
O. B. Wright  
2009 KNOS Winter Workshop on Nano Optics and Related Techniques, Muju, South Korea Feb. 26, 2009 (invited, Plenary)

③ Imaging the rectification of surface acoustic waves in periodic triangular structures  
S. Danworaphong, O. B. Wright, O. Matsuda, T. A. Kelf, Y. Tanaka, N. Nishiguchi, K. Ueno, Y. Nishijima, S. Juodkasis, and H. Misawa International Congress on Ultrasonics, Santiago, Chile, Jan. 11-17, 2009, p. 102 (oral presentation)

④ Picosecond laser acoustics with bulk and surface waves  
O. B. Wright  
Summer School: Son et lumiere: from microphotonics to nanophononics, Cargese, France, Sept. 1-13, 2008 (invited)

[その他]  
ホームページ等  
<http://kino-ap.eng.hokudai.ac.jp/Press.html>  
[http://kino-ap.eng.hokudai.ac.jp/phononic\\_crystal.html](http://kino-ap.eng.hokudai.ac.jp/phononic_crystal.html)  
<http://kino-ap.eng.hokudai.ac.jp/baw.html>  
[http://kino-ap.eng.hokudai.ac.jp/phononic\\_crystal2D.html](http://kino-ap.eng.hokudai.ac.jp/phononic_crystal2D.html)  
<http://kino-ap.eng.hokudai.ac.jp/WG.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

O・B Wright (オー・ビー ライト)  
北海道大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：90281790

### (2) 研究分担者

松田 理 (マツダ オサム)  
北海道大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：30239024  
友田 基信 (トモダ モトノブ)  
北海道大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：30344485  
田中 之博 (タナカ ユキヒロ)  
北海道大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：00281791