

平成21年 6月 15日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18560343
 研究課題名（和文） 基本波および3倍波併用型の高性能弾性表面波
 センサー装置の基礎研究
 研究課題名（英文） Fundamental Research on High-Performance Surface-Acoustic
 -Wave Sensor Using Fundamental and 3rd-Harmonic Frequencies
 研究代表者
 疋田 光孝（HIKITA MITSUTAKA）
 工学院大学・グローバルエンジニアリング学部・教授
 研究者番号：00407157

研究成果の概要：

燃料電池自動車用の水素ガス漏洩等をセンシングする新弾性表面波ガス・センサーを提案した。従来の弾性表面波センサーは、圧電結晶基板が水晶に限定されていたが、自己温度補償機能の発案により結晶に対する制約を取り除いた。基本周波数と3倍周波数を用いることにより、センサーのダイナミック・レンジを大幅に拡大出来る可能性を示した。更に、2.4-GHz帯 ZigBee センサー・ネットワークに本センサーを導入するための周辺回路との共通化等の可能性も示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,600,000	0	1,600,000
2007年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	570,000	4,070,000

研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：弾性表面波、SAW、センサー・ネットワーク、弾性表面波センサー、ガス・センサー、ZigBee

1. 研究開始当初の背景

弾性表面波 (Surface Acoustic Wave、以下 SAW と略す) を用いたセンサーは、非常に微量な空気中の分子等をセンシング出来る可能性がある。将来の環境センサー、燃料電池に対する水素漏洩用センサ等への応用が期待され、色々な角度から研究されている。

(1) 従来の SAW センサ装置は、出力信号を増幅して、再び入力側へ帰還することにより、発振器を構成する。SAW が伝搬する水晶基板の

表面に、センシングする微量分子と特異的に結合する物質を薄膜状に形成する。センシング分子が薄膜物質と結合すると、SAW の伝搬条件が変化するため、これが発振器の発振周波数の変化として現れるものである。しかし、この構造では帰還増幅器の利得を非常に大きくする必要があり、電力消費も大きい。また、センサー出力が発振器の発振周波数の変化となるため、この変化をモニタするための回路も必要であった。

(2) 従来の SAW センサー装置では、センシングする微量分子の影響以外では、弾性表面波発振器の発振周波数の変化は許されない。SAW 用の圧電結晶基板は温度特性の良い水晶基板に限られていた。水晶基板は、温度特性は良いが圧電効果は弱い。電気信号との変換効率も低く、損失が大きいと言う欠点があった。

2. 研究の目的

センサーを多用するシステムの今後の発展形態として、環境に関する種々のデータ等を常時センシングし、これ等の情報を小規模な無線を用いたネットワークを介して管理、あるいはそれ等の情報に基づき逆に住環境等を制御することが考えられている。これはセンサー・ネットワークと呼ばれ、移動通信とセンサー技術を結び付けた将来的に非常に注目されるシステムである。本研究もセンサー・ネットワークを無視しては成り立たない。センサー・ネットワークでは、2.4GHz帯のZigBeeを無線媒体として用いる。したがって、センサー・ネットワークの各ノードは、TCXO(温度補償型基準発振器)にロックした2.4GHz帯のVCO(電圧制御発振器)等で構成され、これ等が送信信号の生成と受信信号の復調に用いられる。本研究は、従来のSAWセンサー装置の問題点を克服し、ZigBeeをネットワーク媒体とするセンサー・ネットワーク内に、センサー・ノードとして導入可能な低消費電力で高性能な弾性表面波センサー装置の基礎研究を行うものである。

(1) 従来のSAWセンサー装置と異なり、ZigBeeの2.4GHzの信号をベースとして用いる。すなわち、SAWセンサー装置には、従来のような固有のSAW発振器は必要としない。ZigBeeの無線回路内で生成する2.4GHzの信号を用い、分周あるいは通倍することによって得られる信号でセンシングを可能にする。装置の大幅な簡素化が出来、小型・低消費電力化が要求されるセンサー・ノードでも用いることを目指す。

(2) 圧電結晶基板として水晶以外の基板を用いることを可能にする。これにより、従来とは異なり、温度特性は良くないが圧電効果の強い、すなわち、変換効率の高い基板も採用出来る。かつ、センシングすべき微量分子と結合し易い相性の良い基板の採用も可能とし、センサーとしての用途も非常に広げることを目指す。

(3) 基本波と3倍波の両方を用いてセンシングする。センシング分子が非常に微量の場合は、3倍波を用いて高い感度でセンシングし、分子濃度がある程度高い場合は、基本波への切り換えで、非常に精度の高いかつダイナミックレンジの広いセンシングを可能にする。

3. 研究の方法

研究の目的(1)～(3)は、以下の独創的な方法に基づいて実現を図る。基本波の入力に対して、出力(1)、(2)、(3)が得られる3ケのSAW遅延線D-1、D-2、D-3を用いる。D-1の入出力トランスデューサ間はLで、D-2、D-3はそれぞれ $L+\lambda_0/8$ 、 $L-\lambda_0/8$ (ここで、 λ_0 はSAWの波長)である。したがって、出力(1)、(2)、(3)の位相関係は、出力(2)の位相をゼロ(X軸上)と仮定すると、出力(3)は、理想的には $\pi/2$ だけ位相が進みY軸上となる。D-2、D-3は基準位相を生成する遅延線として外気から遮断し、D-1をセンシング用素子として用いる。

(1) D-1の出力(1)は、(2)と(3)の中間に位置する。出力(1)のX軸射影成分およびY軸射影成分を x_1 、 y_1 と書く。微量分子との結合により出力(1)の位相は、初期の位置からずれるが、このずれ量は微量分子の濃度に比例する。また、位相のずれ量は x_1 、 y_1 でモニタ出来るため、従来のSAWセンサーのような発振器を構成する必要はない(目的(1))。

(2) 温度に対する出力(1)、(2)、(3)の位相の変動は、全て同一の条件のため射影成分には互いに打ち消しあって表れない。すなわち、本提案の構成はSAWの温度特性は互いに打ち消し合う自己温度補償機能を有しており、用いる基板の温度特性は特に考慮する必要はない(目的(2))。

(3) SAW用櫛の歯状のトランスデューサで基本波と3倍波を励振するには、励振効率が課題である。種々の工夫により、基本波と3倍波の励振を可能にする。3倍波に対する各出力の位相関係は、同様に出力(2)の位相をゼロ(X軸上)と仮定すると、出力(3)は $3\pi/2$ (-Y軸上)となり、同様に(2)と(3)は直交する。すなわち、3倍波に対しても基本波と同じ原理のセンシングが可能である。波長は基本波の3分の1のため、センシング感度は3倍になる(目的(3))。

4. 研究成果

(1) 図1に基本波(基本周波数SAW)と3倍波(3倍周波数SAW)の励振の状態を模式的に表す。基本周波数SAWと3倍周波数SAWの励振が両立するトランスデューサ構造の検討を以下の手順で行った。①シミュレーションによる設計、②本学MBSC(Micro-Bio System Research Center)のMEMS用プロセス装置を用いた試作と評価(基板には、128°YカットX伝搬LiNbO₃を用いた)。図2(a)に、従来のトランスデューサ(4分の1波長電極指から成る櫛の歯状電極)によるSAW励振のシミュレーション結果を示す。従来構造のトランスデューサのように、電極指幅 $W(M)$ と間隔 $W(S)$ が等しい場合は、基本周波数SAWに対して3倍周波数SAWの励振はほとんどゼロで

あることが分かった。図 2(b)、(c)に実験結果を示す((b)は電極パターン、(c)は実測結果)。シミュレーション結果を完全に裏付ける結果が得られた。電極指幅に変調を加えるトランスデューサを検討した。図 3(a)に、シミュレーション結果の 1 例を示す。本例では、基本周波数 SAW に比べ 3 倍周波数 SAW の励振は十分大きいことが予想出来る。図 3(b) に試作素子の写真、図 3(c)に電極パターンを示す。幅狭の電極指と幅広の電極指を併用し、かつ電極指間隔は狭くしたものである。図 (d)に実測結果を示す。基本周波数 SAW に比べ 3 倍周波数 SAW の励振は十分大きく、シミュレーション結果を裏付ける結果が得られた。本結果により、研究目標の一つである基本周波数 SAW と 3 倍周波数 SAW の励振を両立させることが出来ることを確認した。今後更に両励振の効率を向上させることが課題である。

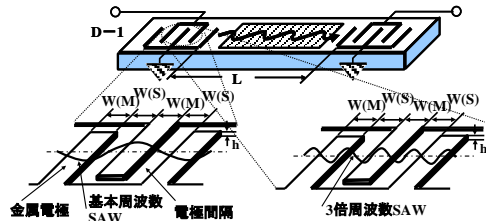
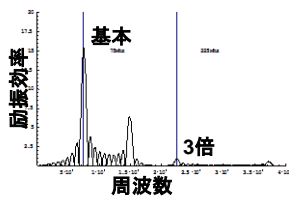
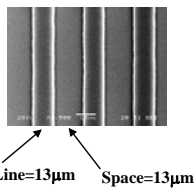


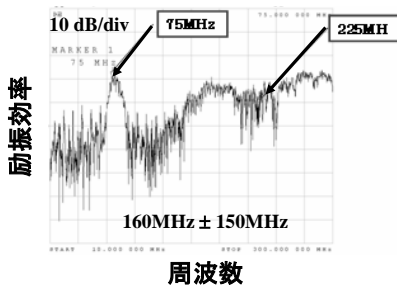
図 1 基本周波数と 3 倍周波数 SAW の励振



(a) シミュレーション結果

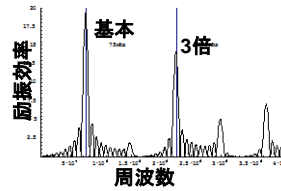


(b) 試作電極パターン

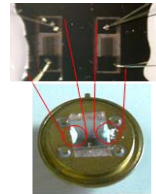


(c) 実験結果

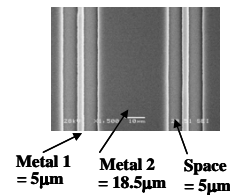
図 2 従来トランスデューサの励振特性



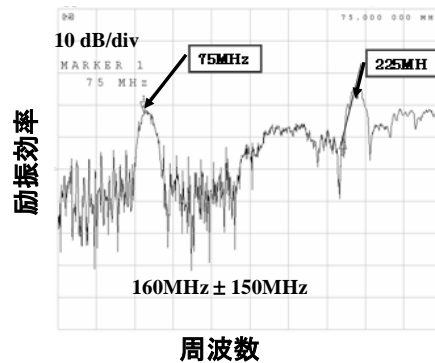
(a) シミュレーション結果



(b) 試作素子の写真



(c) 試作電極パターン



(d) 実験結果

図 3 電極幅変調トランスデューサの励振特性

(2) 図 4 に、本提案センサーの基本構造を示す。基本周波数入力に対して、出力(1)、(2)、(3)が得られる 3 本の SAW 遅延線 D - 1、D - 2、D - 3 で構成される。D - 1 の入出力トランスデューサ間は L で、D - 2、D - 3 はそれぞれ $L + \lambda_0/8$ 、 $L - \lambda_0/8$ (λ_0 は SAW の波長)である。したがって、出力(1)、(2)、(3)の位相関係は出力(2)の位相をゼロ(X 軸上)と仮定すると、図 5 に示すようになることが予想される。出力(3)は、D - 2 と D - 3 の入出力トランスデューサ間が、 $\lambda_0/4$ だけ異なることより、理想的には $\pi/2$ だけ位相が進み Y 軸上となる。出力(1)は、(2)と(3)の中間に位置する。出力(1)の X 軸成分および

Y 軸成分を x_1, y_1 とすると、各々は出力(1)と(2)のミキシング(混合)出力、出力(1)と(3)のミキシング出力から得られる。D-2、D-3 は基準位相を生成する遅延線として外気から遮断する。D-1 をセンシング用素子として用いる。微量分子との結合により出力(1)の位相は、図 5 の(1)の位置からずれるが、このずれ量は微量分子の濃度に比例する。位相のずれ量はミキシング出力 x_1, y_1 でモニターする。また、温度に対する出力(1)、(2)、(3)の位相の変動は、全て同一の条件のため、ミキシング出力には互いに打ち消しあって表れない。

本自己温度補償機能を以下の実験で確認した。実験では、図 4 の構成ではなく、図 6 に示す簡易的な構成により機能確認を行った。図 6 では、SAW 遅延線は全て同じ物を 3 ケ使い、各遅延線の外部に伝搬に伴う位相角が θ_i ($i=1, 2, 3$) の伝送線路を各々付加する。これにより等価的に図 4 のセンサー遅延線 D-1 と基準位相を与える遅延線 D-2、D-3 を実現する。ただし、外部伝送線路は高周波ケーブル等を用いて実現するため、必ずしも図 4 に対応した位相角を実現することは出来ない。今回は、室温基本周波数 (75MHz) で $\theta_1=230^\circ$ 、 $\theta_2=60^\circ$ 、 $\theta_3=150^\circ$ の値の線路を用い組み合わせることで実現した。

図 7 に 75MHz の基本周波数に対する SAW センサー遅延線 (等価的な図 4 の D-1) からの出力(1)の位相、基準位相用遅延線 (等価的な図 4 の D-2、D-3) からの出力(2)、(3)の位相の実測値を示す。温度範囲は 10~50°C、室温では $\theta_1=230^\circ$ 、 $\theta_2=60^\circ$ 、 $\theta_3=150^\circ$ である。LiNbO3 は負の温度係数を持ち温度の上昇と共に速度が小さくなるため位相の遅れが増大する。図 7 より 3 ケの位相の温度に対する傾斜特性は全く同じであり、D-2、D-3 の出力位相は互いに完全に直交 (90°) していることが分かる。このことはセンサーの出力(1)の位相は、基準位相を与える遅延線 D-2、D-3 の出力(2)、(3)の位相を基準に測定すれば良いことを意味する。温度とは無関係にセンシング分子の影響による位相の変化のみを評価可能である点が確認された。本研究の目標の一つである基本周波数に対する自己温度補償機能が実験的にも示された。

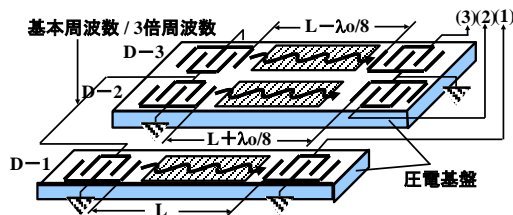


図 4 提案の SAW ガス・センサーの構造

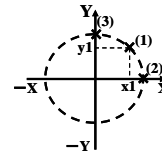


図 5 基本周波数での各出力位相

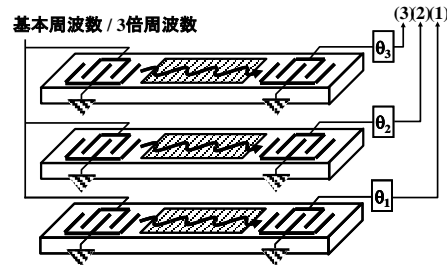


図 6 図 4 と等価な実験用 SAW センサー

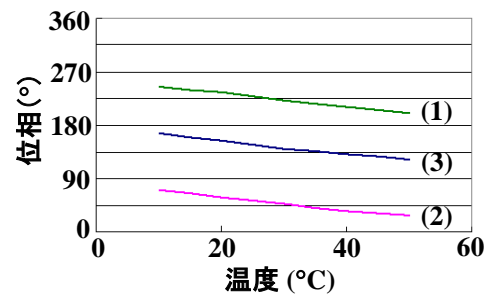


図 7 基本周波数 (75MHz) での各出力位相の温度特性

(3) 本研究の更なる目標である感度の高い 3 倍周波数に対する確認実験を行った。3 倍周波数に対する各出力の位相関係は、図 8 に示すようになることが予想される。基本周波数と同様に出力(2)の位相をゼロ (X 軸上) と仮定すると、出力(3)は理想的には $3\pi/2$ (-Y 軸上) となる。これは基本周波数と同様の手法で得られる出力で、 y_1 のみの符号を反転すれば、基本周波数に対する議論と全く同じ議論が成立することを表している。図 6 に示す簡易的な構成により、3 倍周波数に対しても同様の機能確認実験を行った。

図 9 に 225MHz の 3 倍周波数に対する SAW センサー遅延線 (等価的に図 4 の D-1) からの出力(1)の位相、基準位相用遅延線 (等価的に図 4 の D-2、D-3) からの出力(2)、(3)の位相の実測値を示す。温度範囲は同様に 10~50°C、室温では約 $\theta_1=330^\circ$ 、 $\theta_2=180^\circ$ 、 $\theta_3=90^\circ$ である。温度に対する特性は基本周波数の場合と全く同様である。温度に対する位相遅れの傾斜は基本周波数の約 3 倍となる。しかし、D-2、D-3 の出力位相は互いに完全に直交 (ただし、 -90°) している点、センサー遅延

線の出力位相も同じ温度傾斜特性を有するなど、基本周波数と同じ扱いが可能であることが分かる。すなわち、3倍周波数でも自己温度補償機能が実現されることが確認出来た。

一般に3倍波周波数は、基本周波数に比べSAWの波長が3分の1になるため、同一条件のセンシング分子の吸着に対する感度は3倍となると考えられる（この点に関する実験的検証はまだ行ってない）。従って、基本周波数と3倍波周波数を切り替えることによって、センシングのダイナミックレンジを非常に大きく拡大することが出来る可能性がある（本点も本構造の特徴の一つであり、今後具体的に確認する予定）。図9に示す特性の課題として、温度に対して若干湾曲した特性を成しており、現状原因は不明である。実用的な面からは今後原因の解明など更なる検討が必要であると思われる。

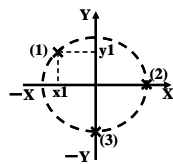


図8 3倍周波数での各出力位相

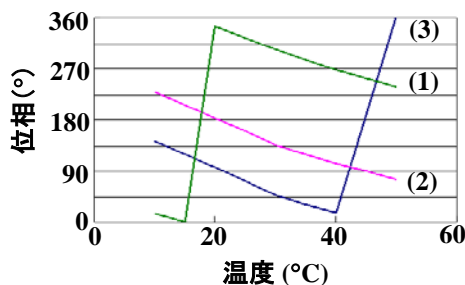


図9 3倍周波数(225MHz)での各出力位相の温度特性

(4) 本研究はセンサー・ネットワークの無線媒体として、2.4GHz帯の標準化ZigBeeを想定している。センサー・ネットワークの各ノードは、図10にブロック図を示すように、TCXO (Temperature-Compensated X'tal Oscillator: 温度補償型基準発振器)にロックした2.4GHz帯のVCO (Voltage-Controlled Oscillator: 電圧制御発振器)等を内蔵している。従来のSAWセンサーと異なり、ZigBeeの2.4GHzの信号を分周あるいは逡倍することによって得られる信号でセンシングを行う(図10の例では16分周で150MHz、その3逡倍で450MHzを得ている)。これにより、装

置を大幅に簡素化出来、小型・低消費電力化が要求されるセンサー・ノードでも用いることが可能になる。本点に関しては、今回の研究期間内では実験的な検証は出来なかった。引き続き検討を継続する予定である。

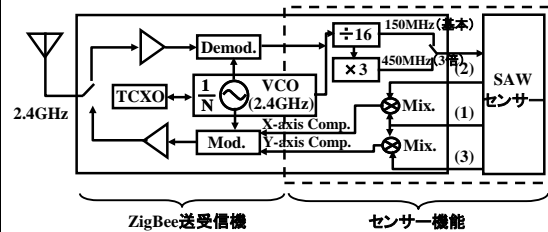


図10 SAWセンサーを内蔵したZigBeeベースのセンサー・ネットワーク用ノード

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 10件)

(1) M. Hikita, Y. Hiraizumi, H. Aoki, J. Matsuda and T. Watanabe, "Experiments for self-temperature-compensated characteristics of SAW gas sensor at fundamental and 3rd-harmonic frequencies," IEE Electronics Letters (査読有), to be published.

(2) M. Hikita, Y. Hiraizumi, H. Aoki, J. Matsuda, T. Watanabe, "Investigation of Novel Ultrasonic Positioning Method Installed in Sensor Network," Proc. of Progress in Electromagnetics Research Symposium (査読有), pp. 1676-1682, 2009

(3) 疋田光孝、平泉康志、青木宏融、松田潤治、渡邊友章、"センサ・ネットワーク用弾性表面波希薄ガス・センサの研究 (第2報)," 工学院大学研究報告書(査読無), Vol. 105, pp. 1-10, 2008.

(4) Y. Hiraizumi, H. Aoki, J. Matsuda, T. Watanabe, M. Hikita "Study of SAW Excitation Efficiency for Novel Gas Sensor Installed in Sensor Network," Proc. of Symposium on Ultrasonic Electronics (査読有), Vol. 29, pp. 247-248, 2008.

(5) 疋田光孝、南圭哉、滝本宏紀、平泉康志、"センサ・ネットワーク用弾性表面波希薄ガス・センサの研究 (第1報)," 工学院大学研究報告書(査読無), Vol. 103, pp. 63-69, 2007.

(6) K. Takimoto, K. Minami, Y. Hiraizumi, and M. Hikita, "Study of Novel Ultrasonic Positioning Method for Sensor Network," Proc. of Symposium on Ultrasonic Electronics (査読有), Vol. 28, pp. 373-374, 2007.

(7) K. Minami, K. Takimoto, Y. Hiraizumi, and M. Hikita, "Study of Novel SAW Gas Sensor for Sensor Network," Proc. of Symposium on Ultrasonic Electronics (査読有), Vol. 28, pp. 99-100, 2007.

(8) M. Hikita, K. Minami, K. Takimoto, and Y. Hiraizumi, "Investigation of Surface Acoustic (SAW) Gas Sensor Used in Sensor Network," Proc. of Progress in Electromagnetics Research Symposium (査読有), pp. 301-305, 2008.

(9) M. Hikita, K. Minami, H. Takimoto, and K. Sakiyama, "Investigation of attenuation increase at lower-side frequency bands for highly-integrated SAW modules," IEE Electronics Letters (査読有), Vol. 42, No. 25, pp. 148-1489, 2006.

(10) M. Hikita, K. Minami, H. Takimoto, N. Shibagaki, and K. Sakiyama, "Investigation of attenuation increase at lower-side frequency bands of SAW-and SMR-filters," IEEE International Ultrasonics Symposium Proceeding (査読有), pp. 1887-1890, 2006.

[学会発表] (計 6件)

(1) Y. Hiraizumi, H. Aoki, J. Matsuda, T. Watanabe, M. Hikita, "Study of SAW Excitation Efficiency for Novel Gas Sensor Installed in Sensor Network," 29th Symposium on Ultrasonic Electronics, 2008年11月12日、仙台.

(2) M. Hikita, Y. Hiraizumi, H. Aoki, J. Matsuda, T. Watanabe,

"Investigation of Novel Ultrasonic Positioning Method Installed in Sensor Network," Progress in Electromagnetics Research Symposium 2009, 2009年3月27日、北京.

(3) K. Takimoto, K. Minami, Y. Hiraizumi, and M. Hikita, "Study of Novel Ultrasonic Positioning Method for Sensor Network," 28th Symposium on Ultrasonic Electronics, 2007年11月16日、つくば.

(4) K. Minami, K. Takimoto, Y. Hiraizumi, and M. Hikita, "Study of Novel SAW Gas Sensor for Sensor Network," 28th Symposium on Ultrasonic Electronics, 2007年11月14日、つくば.

(5) M. Hikita, K. Minami, K. Takimoto, and Y. Hiraizumi, "Investigation of Novel Surface Acoustic Wave (SAW) Gas Sensor Used in Sensor

Network," Progress in Electromagnetics Research Symposium 2009, 2008年3月24日、杭州 (中国).

(6) M. Hikita, K. Minami, H. Takimoto, N. Shibagaki, and K. Sakiyama, "Investigation of attenuation increase at lower-side frequency bands of SAW-and SMR-filters," 2006 IEEE International Ultrasonics Symposium, Vancouver.

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 2件)

(1) 疋田光孝、"超音波距離計測システム," 特願2008-125735、平成20年5月13日出願.

(2) 疋田光孝、"弾性表面波ガス・センサ装置," 特願2007-280020、平成19年10月29日出願.

○取得状況 (計 0件)

[その他]

ホームページ

Hhttp://www.ns.kogakuin.ac.jp/~wwa1022/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

疋田 光孝 (HIKITA MITSUTAKA)

工学院大学・グローバルエンジニアリング学部・教授

研究者番号: 00407157

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者