

平成 21 年 5 月 10 日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19760239
 研究課題名 (和文) 多重ホログラムの消去・再書込み技術の確立と大容量光メモリへの応用に関する研究
 研究課題名 (英文) Establishment of erasure/rewriting technique of multiplexed holograms and its application to large capacity optical memory
 研究代表者
 文仙 正俊 (BUNSEN MASATOSHI)
 福岡大学・工学部・助教
 研究者番号：50412573

研究成果の概要：

次世代光メモリであるホログラフィックメモリにおいて、データ消去・書換え機能を実現するための新たな光学系を提案し、より大面積かつ高精細な多重データページの選択的消去・書換えを可能とした。書換えられたデータページの信号対雑音比や BER を測定するシステムを新たに構築し、データページ内の部位ごとに異なる消去・書換えムラ等も反映した定量的評価を可能とした。さらに、より大容量なホログラフィックメモリシステムにおける多重ホログラム記録再生・消去・書換え精度を向上するための新たなホログラム多重記録方式も提案し、実験によりこの方式の有用性を明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,500,000	0	2,500,000
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	270,000	3,670,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子デバイス・電子機器

キーワード：ホログラフィックメモリ、ホログラフィー、データストレージ、フォトリフラクティブ効果、光メモリ

1. 研究開始当初の背景

ポスト青色光メモリとして、テラバイトクラスの記録容量を達成するいくつかの新技术が提案されており、特にホログラム技術を光メモリに応用するホログラフィックメモリは、国内外の企業・大学・研究機関が近い将来の実現を目指し精力的に研究開発を進めている。ホログラフィックメモリでは、二次元バーコード様のデジタルデータ (データ

ページと呼び、典型的には 1 ページあたり $1000 \times 1000 = 1\text{Mbit}$ 程度の情報量を持つ) のホログラムを記録媒質の同一箇所にも多重記録することにより、DVD 大にテラバイトを超える超大容量記録が可能である。ホログラフィックメモリの研究は既に試作機の開発段階にまで至っており、例えば米国の InPhase Technologies 社は 300-800GB 級のメモリシステムの開発を進めている。

これら現在研究開発が加速度的に進展中のホログラフィックメモリシステムは、一度だけデータの記録が可能でライトワンス型の段階に留まっている。しかし、このメモリシステムの有する大容量記録領域を真に有効活用するためには、また、不要となった機密データを物理的に消去可能にしセキュリティ性能を向上するためには、記録データの消去・更新技術、すなわち「リライタビリティ」の実現が必要不可欠である。リライタビリティ実現へのアプローチには主に二つの側面がある。一つ目は消去・再書込み可能なホログラム記録材料の開発であり、フォトリフレクティブ材料がそのホログラム記録メカニズムの可逆性から最も有力な材料と考えられている。二つ目は材料中に多数記録されているホログラムから、ある特定のホログラムのみを消去する技術、特に材料中の同一箇所にも多重記録されたホログラムの中の任意の一枚、あるいは数枚のホログラムのみを選択的に消去する技術の確立である。ここで、一つ目の材料開発については内外の多くの研究者が取り組み、ホログラム保持と消去という相反する二つの機能を併せ持つ有力な材料が日々進歩している状況である。

しかし、二つ目の多重ホログラムの選択的消去技術に関してはこれまでに十分な検討がされておらず、また、過去に提案された手法も、大型で高価な装置が必要であったり消去精度が悪い等、実用化に向けて克服すべき課題が多く残されている。多重ホログラムの選択的消去は、消去したいホログラムに対し、空間的位相差を持つ干渉縞を照射することで、実現可能なことが知られている。そして、これまでに提案された手法は、液晶位相変調器やピエゾ駆動ミラーを参照光路上に配置し、これらを電気的に制御することで物体光と参照光により生成される干渉縞の位相を制御している。しかし、これらのデバイスは高価・大型であり、また、液晶位相変調器では電圧誤差等、ピエゾ駆動ミラーではヒステリシス特性やバックラッシュ等が位相差誤差の原因となり、消去精度を低下させる要因となっている。

2. 研究の目的

本研究は、上記従来手法よりも簡易かつ小型な光学系による高精度な多重ホログラムの選択的消去・書換え手法を考案し、ホログラフィックメモリ中に多重記録されたデータページの消去・再書き込み技術を確立することを目的とする。これまでに研究代表者らは誘電体多層膜ビームスプリッターとミラーのみにより構成される二重マッハツェンダ(DMZ)干渉光学系が、多重ホログラムの消去・書換え用光学系として有用であることを

基礎的な実験により実証してきた。アルファベット形状等の単純な画像のホログラムを数枚程度多重記録し、これを選択的に消去し書換える実験には成功していたものの、DMZ干渉光学系においては光波の入射角度・入射位置、波面の誤差や光学系精度が干渉縞の位相差精度に影響を及ぼしたり、物体光や参照光の光強度分布の影響により比較的大面積・高精細な多重データページのホログラムを均一に選択的消去し、書換えることは困難であった。そこで、本研究課題では上記の諸光波入射条件がホログラムの消去・書換え性能に及ぼす影響を明らかにするとともに、より高性能かつ実現性の高い新たな選択的消去・書換え法を考案することも目的とする。

また前述のように、これまでも多重ホログラムの選択的消去に関する実験例はいくつか報告されてきたが、選択的消去完了後における消去対象ページの回折効率によりその性能が評価されていた。しかし、選択的消去後の消去対象ページに残留ホログラムが存在する際に、ページ全体の輝度の総和を測定対象とした回折効率による評価法ではホログラムが局所的に強く残る場合と全体的に弱く残る場合とを区別できない。これらのページに新規データを再記録した場合、当然ながら残留ホログラムによりエラーの発生状況が異なるため、従来の回折効率の測定による評価では書換え性能を詳細に議論することは困難であった。この問題を解決するためには再生データページ内の1ピクセル毎を測定対象とし書換え性能を評価する必要がある。そこで、本研究ではフォトリフレクティブ結晶中に多重記録したデータページの選択的書換えにおいて、書換え完了毎に再生データページのピクセル毎の輝度値から判別したページ内の信号と雑音の分布により信号対雑音比(SNR)と符号誤り率(BER)を算出するシステムを構築し、これを用いてデータページ書き換え性能を定量的に評価することでリライタブル・ホログラフィックメモリを実現する上で解決すべき課題を明らかにする。

さらに、より大容量なホログラフィックメモリシステムにおいては、多重ホログラム領域を空間的に並べて配置する空間多重も併用されるが、この時に用いられるホログラム媒体移動用ステージに要求される繰返し位置決め精度を緩和し、多重ホログラム記録再生・消去・書換え精度を向上するための新たなホログラム多重記録方式を提案し、実験によりこの方式の有用性を示すことも目的としている。

3. 研究の方法

図1に二重マッハツェンダ干渉光学系を示す。

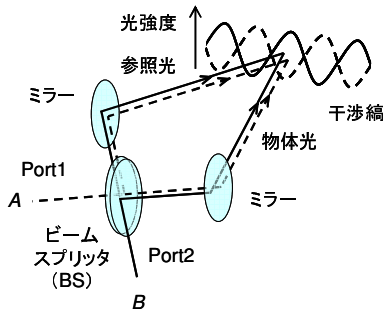


図1 二重マッハツェンダ干渉光学系

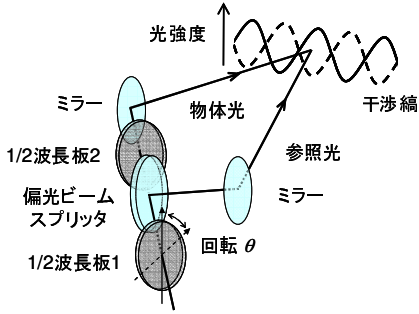


図2 HWP と PBS を利用したホログラム選択的消去・書換え用の光学系の概念図。

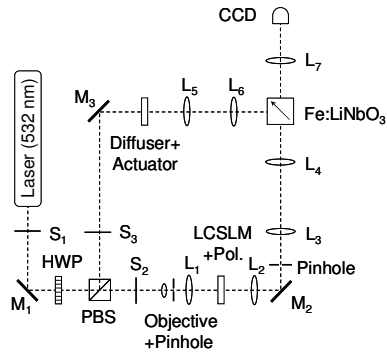


図3 実験系. L: レンズ, M: ミラー, S: シャッター, LCSLM: 空間光変調器。

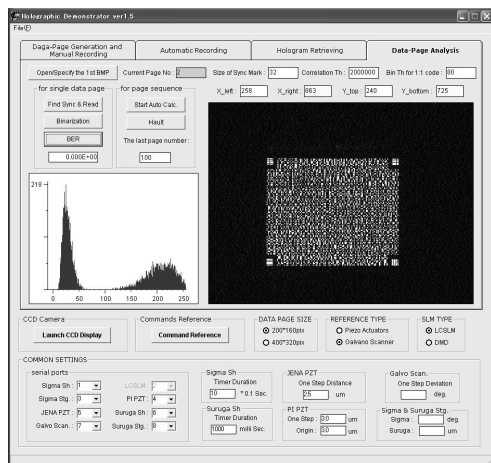


図4 開発したホログラム多重記録・再生・BER評価システム(図はBER評価画面。左側はビット毎の輝度ヒストグラム、右側はビット位置自動同定後のデータページである)。

この光学系を用いて大面積・高精細なデータページの多重ホログラムを消去・再書き込みするための条件を実験及び理論計算により明らかにする。また、より高性能かつ実用性の高い新たな選択的消去・書換え用の光学系として図2の系を提案し、これを用いた場合の多重データページの選択的消去・書換え性能を図3の実験系により詳細に調べる。ここでデータページ書き換え性能は、新たに作成した評価用ソフトウェア(図4)を用いて算出した再生データページのSNRおよびBERにより評価する。

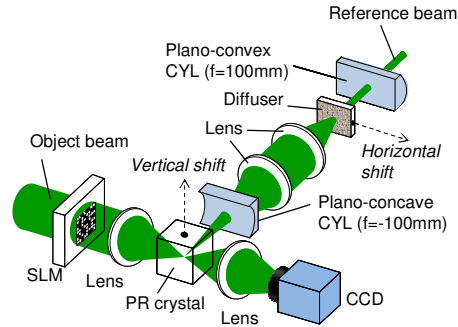
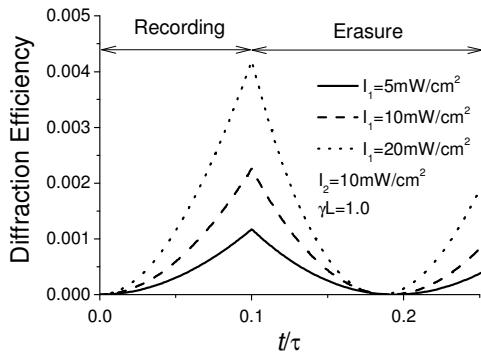


図5 ホログラムのスペックル多重および空間多重記録用の光学系。

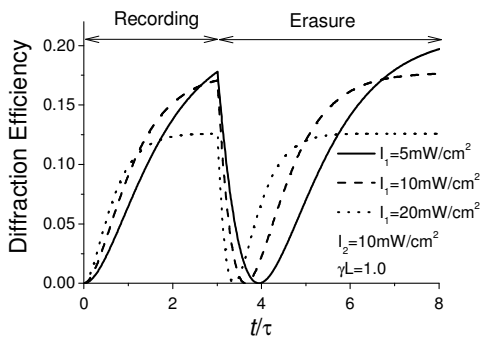
さらに、図5に新たに考案したホログラム多重記録用の光学系を示す。参照光路上のディフューザを水平方向へ移動することで、ホログラム材料中の同一箇所へのデータページ多重記録を行うことができる。参照光路には2枚のシリンドリカルレンズ(CYL)が配置されており、これにより材料中での参照光波面は水平方向と鉛直方向で異なる自己相関距離を有する。これは、この光学系を使用して記録したホログラムのシフト選択性は、参照光波面が大きな相関距離を示す方向である鉛直方向のみ緩和され、水平方向では維持されることを意味する。従って、鉛直方向へ材料をシフトさせ多重ホログラム領域の空間多重を行うことで(また、同一箇所多重はディフューザの水平方向シフトにより行うことで)、ホログラム再生・消去時にホログラム媒体に求められる繰返し位置決め精度が低減できると考えられる。この光学系の有用性も実験により検証する。

4. 研究成果

図6に計算例としてホログラム記録・選択的消去プロセスにおける様々な物体光強度に対する回折効率の時間応答特性の理論計算結果を示す。ここで、参照光の強度 I_2 は記録時及び消去時共に $10\text{mW}/\text{cm}^2$ で一定としている。また、 τ はホログラム材料であるフォトリフラクティブ結晶の時定数であり、図6(a)は記録時間 T_w を $T_w/\tau=0.1$ 、(b)は $T_w/\tau=3.0$ としている。図より、物体光強度



(a) $T_w/\tau = 0.1$

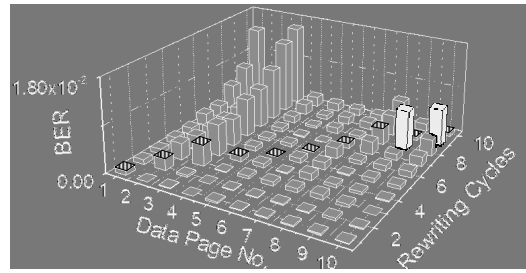


(b) $T_w/\tau = 3.0$

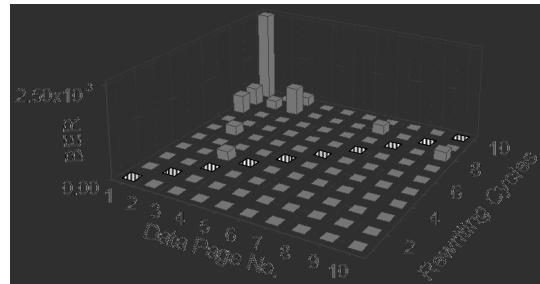
図6 計算結果例：ホログラム記録・選択的消去プロセスにおける様々な物体光強度に対する回折効率の時間応答特性。

によって消去時にホログラムが完全に消えるまでの時間が異なり、この影響は記録時間が長い場合により顕著であることが分かる。 $T_w/\tau = 3.0$ の場合を見ると、 $I_1 = 5 \text{ mW/cm}^2$ で記録・消去が行われたホログラムが完全に消去される時点 ($t/\tau \approx 4$) では、 $I_1 = 20 \text{ mW/cm}^2$ で記録・消去が行われるホログラムは $t/\tau \approx 3.4$ でいったん完全に消去された後に、再び定常状態の 48%程度まで記録されている。この結果より、物体光断面内で光強度が一樣でない場合には、その消去速度が部位によって異なり、消去ムラを生じる原因となると考えられる。物体光断面内の光強度分布を均一化することにより、ホログラムの消去性能は大幅に向上すると考えられる。

これらの計算により最適化されたパラメータを用い、図3の光学系を用いて実験を行った結果を以下に示す。本実験ではフォトリソグラフィック結晶として $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ の Fe 添加 LiNbO_3 結晶、光源として波長 532 nm の半導体励起固体レーザを用いた。記録情報として縦 $80 \times$ 横 100 ピクセルのデータページを使用した。まず、結晶中で物体光と参照光を交差し、スペckル多重記録方式を用いてデータページを 10 多重記録する。次に、多重データページのうち1枚を選択的に消去し新規データを再記録する書き換えプロセスを1枚目から 10 枚目まで順番に 1 回ずつ行なう。



(a) 1:1 コードの場合



(b) 1:2 コードの場合

図7 選択的書き換えによる再生時 BER の変化。

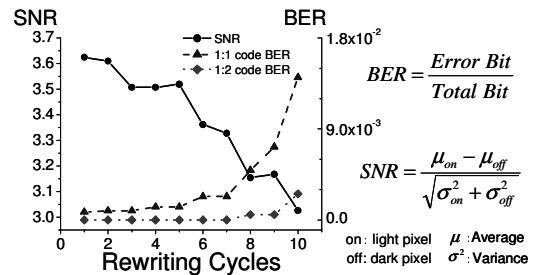
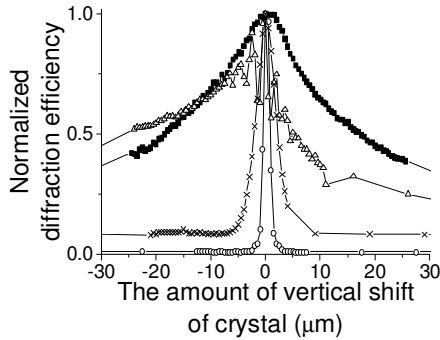


図8 1枚目データページの SNR と BER の変化。

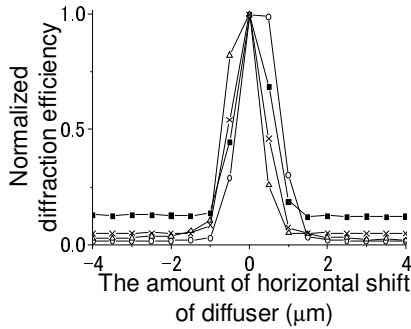
書き換え完了毎に全ページを再生し、SNR と BER を測定することで書き換え性能を定量的に評価する。ここで、データページの変調符号化によるエラー発生状況の差異を考察するために、1:1 符号と 1:2 符号の 2 種の符号方式を用いてビットの明暗を判別し、元データと比較することで BER を算出する。図7に 1~10 枚目書き換えプロセスにおける再生データページの BER の変化を示す。図中の斜線部は書き換えたページを表す。1:1 符号 (図7 (a))、1:2 符号 (図7 (b)) それぞれを用いた場合での平均 BER は 1.92×10^{-3} 、 5.40×10^{-5} となり、ホログラフィックメモリにおける典型的な許容 RAW エラーレートが 10^{-4} 程度であることを考慮すると、比較的良好な値だといえる。また、図8は1枚目データページの SNR と BER の変化である。書き換えプロセスの進行に伴い、消去対象外ページである 1 枚目の SNR が劣化し、ビットエラーが発生していることが分かる。以上より、図2の光学系を用いることで、データページの消去・書き換え自体はほぼエラー無く実行可能となったが、同一箇所にも多重記録されている書き換え対象外ページのホログラムが徐々に減衰し SNR および BER が劣化することが書き換え回

数を制限する主要因となることを明らかにした。減衰したホログラムに対して同相のホログラムを上書きし増強する光学的リフレッシュの適用などにより再生データページのSNRを維持しビットエラーの発生を回避する必要があると考えられる。

さらに図5の光学系の有用性を示すために以下の実験を行った。参照光路上に平凸や平凹CYLを配置したいくつかの光学系において記録媒体の鉛直方向シフト量に対する正規



(a) 記録媒体の鉛直方向シフト量に対する正規化回折効率



(b) ディフューザの水平方向シフト量に対する正規化回折効率

図9 記録媒体とディフューザのシフト量に対する正規化回折効率. ■は平凸と平凹CYLを, △は平凸CYLのみを, ×は平凹CYLのみを配置し, ○はどちらも配置しないことを表す.

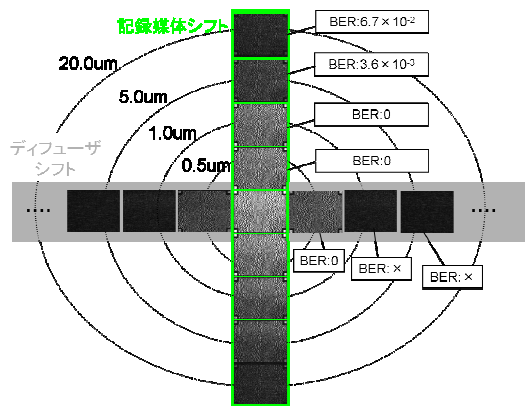


図10 記録媒体の鉛直方向シフト量とディフューザの水平方向シフト量に対する再生データページ画像とBER.

化回折効率を測定し、適切なレンズ系を選択することでこの方向のシフト選択性が緩和できることを示す。さらにディフューザの水平方向シフト量に対する正規化回折効率も測定し、水平方向に関してはシフト選択性が変化しないことも示す。これにより本提案光学系を用いて同一記録領域の多重性能を維持したまま空間多重記録性能を向上させることができる。図5に示す光学系のように参照光路上に平凸と平凹CYLを配置する場合、平凸CYLあるいは平凹CYLのみを配置する場合と、どちらも配置しない場合の四種のレンズ系について、記録媒体の鉛直方向シフト量及びディフューザの水平方向シフト量に対する正規化回折効率を測定する。測定時のホログラム記録時間は60秒である。図9(a)に記録媒体の鉛直方向シフト量、(b)にディフューザの水平方向シフト量に対する正規化回折効率をそれぞれ示す。(a)より平凹CYLのみを配置した場合は、何も配置しない場合と比較しほとんどシフト選択性が変化しないことがわかる。一方で平凸CYLのみを配置した場合にはシフト選択性が緩和されており、さらに、平凸と平凹CYLを配置した場合に最もホログラム再生に許容されるシフト量が増大している。これらは、平凹CYLは結晶位置でのスペックルサイズを光学的に拡大しており、また平凸CYLの焦点位置にディフューザを配置することで鉛直方向のスペックルパターンランダム性が低下することが原因と考えられる。また、(b)ではどの参照光学系においても水平方向シフト選択性はほぼ同一であった。鉛直方向のみ収束されたビームのディフューザによる散乱光は、水平方向のスペックルサイズは変化せずこの方向のランダム性が低下しないためである。以上より適切に平凸と平凹CYLを配置することで、水平方向シフト選択性を維持したまま、鉛直方向シフト選択性のみを緩和可能なことが明らかとなった。図10は記録媒体の鉛直方向シフト量とディフューザの水平方向シフト量に対する再生データページ画像とBERである。この図からも本光学系が、多重ホログラム領域が空間多重記録された場合における、データページ再生・選択的消去・書換え時の位置決め精度の緩和に有用であることが分かる。

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1件)

① M. Bunsen, H. Furuta, K. Aragane, and A. Okamoto, "Improved Holographic Recording Techniques for Data-Page

Rewriting,” Jpn. J. Appl. Phys., vol. 47, pp. 5977-5980 (2008-07) 査読有

〔学会発表〕(計10件)

- ① 松本佳士、再生データフィールドバックを用いた光学的リフレッシュによる多重データページ書換え性能の向上手法、2009年 電子情報通信学会総合大会、2009年3月20日、愛媛大学
- ② 福地誠児、アナモフィック参照光学系によるスペックル多重ホログラムの空間多重記録再生、2009年 電子情報通信学会総合大会、2009年3月20日、愛媛大学
- ③ 文仙正俊、データページ書換え性能のビットエラーレート評価とその改善手法の検討、日本光学会年次学術講演会OPJ2008、2008年11月6日、つくば国際会議場
- ④ 文仙正俊、ホログラフィックメモリにおけるデータページ書換え手法の提案とそのBER評価、平成20年度(第61回)電気関係学会九州支部連合大会、2008年9月24日、大分大学
- ⑤ 松本佳士、再生時ビットエラーレート測定による多重データページ繰返し書換え耐性の評価、電子情報通信学会2008ソサイエティ大、2008年9月18日、明治大学
- ⑥ 福地誠児、アナモフィック参照光学系によるスペックル多重ホログラムのシフト選択性の方向性制御、電子情報通信学会2008ソサイエティ大会、2008年9月18日、明治大学
- ⑦ 荒金邦明、ホログラフィックメモリにおけるデータページ書き換え性能のビットエラーレートによる評価、2008年秋季 第69回応用物理学会学術講演会、2008年9月3日、中部大学
- ⑧ 松本佳士、ビーム断面内強度分布がホログラム消去性能に及ぼす影響、2008年 電子情報通信学会総合大会、2008年3月20日、北九州学術研究都市
- ⑨ Masatoshi Bunsen、Improvement of Holographic Recording Configuration for Data Page Rewriting、International Symposium on Optical Memory 2007、2007年10月24日、シンガポール(パンパシフィックホテル)
- ⑩ 荒金邦明、ホログラフィックメモリにおけるデータページ選択的消去法の改善、2007年秋季 第68回応用物理学会学術講演会、2007年9月6日、北海道工業大学

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称：ホログラム記録・消去装置およびホログラム記録・消去方法

発明者：文仙正俊、古田洋介、岡本淳

権利者：学校法人福岡大学

種類：特許

番号：特願2008-016095

出願年月日：H20年1月20日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

文仙 正俊 (BUNSEN MASATOSHI)

福岡大学・工学部・助教

研究者番号：50412573

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし