

平成22年5月10日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2009

課題番号：20760239

研究課題名（和文） 自律分散ネットワークにおける  
クラスタ中継符号化伝送に関する研究研究課題名（英文） Cluster Relay Coded Cooperative Transmission  
in Ad-Hoc Wireless Networks

研究代表者

衣斐 信介（IBI SHINSUKE）

大阪大学・工学研究科・助教

研究者番号：10448087

研究成果の概要（和文）：

本研究では、動的なネットワークトポロジーにおいても中継経路探索に負荷を必要とせず、安心安全に自律的なネットワーク構築する伝送方式の開発を目的とした研究を行った。この目的を達成するため、クラスタ符号化中継伝送という概念とその繰り返し復号法を提案し、有効性を確認した。また、中継局で多重信号を排他的論理和演算により構成した上で、繰り返し復号を行うことで、高い符号化利得が得られることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

In this research, a concept of cluster relay coded cooperation and its iterative detection scheme have been proposed. The concept is effective in forming secure network connections among wireless nodes without the aid of any centralized administration control even in highly mobile networks. In addition, the coded cooperation has been extended to enhance its code structure by adopting exclusive OR operation at relay nodes.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,000,000	600,000	2,600,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学，通信・ネットワーク工学

キーワード：(C)情報理論，(D)信号処理，(G)符号化

## 1. 研究開始当初の背景

無線通信の伝送速度の高速化における課題である、伝搬路ひずみ補償、送信電力制約条件下での伝送は、端末がバッテリーで駆動されているという現状を考えると、最も深刻な課題である。現在の無線伝送技術は、シャノ

ン限界にかなり近い電力効率を達成しているため、送信電力制約下でさらなる伝送速度の高速化を達成するためには、通信距離を短縮する以外にはない。しかしながら、それはネットワーク構築のための自由度の低下を招くため、あまり望ましいこととはいえない。

通信距離の短縮を行わずに伝送速度の高速

化を目指す場合、直接通信において「電波が宛先に届く」という前提条件が必ずしも満たされなくなる。このような問題に対しては、今一度、電波が空間に面的に伝搬しているという無線通信特有の原理原則に立ち返り検討すべきである。マルチノード環境に着目すると、従来のように各通信回線に対する直接通信（線トポロジー）ではなく、マルチノード間の通信を面トポロジーで捉え、マルチホップ伝送を活用することで、前述の原理原則に立ち返ることができる。

上記の面的な無線通信をサービスとして展開するため、アクセスポイント等の装置を必要とすることなく、複数のユビキタス端末が集まった時点で自律的にネットワークを構築するアドホックマルチホップネットワークが注目を集めている。特に、マルチホップ伝送の中継経路管理・通信資源配分の最適化手法が精力的に検討されている。

しかし、その自律的なネットワーク構築において、実用上、下記の問題点を克服すべきであると考えられる。

- 中継経路管理・通信資源配分を行うために、多くの制御情報の交換が無線通信空間内で必要となり、その最適化に時間を要するだけでなく、最適化プロトコルが複雑。
- ユビキタス端末の移動に伴い、無線伝搬路の特性によりネットワークトポロジーが動的に変化するため、本来の無線通信路の特性を活かすような最適化が困難。

## 2. 研究の目的

本研究では、研究背景で述べたアドホックマルチホップネットワークにおける実用上の問題点を克服するため、「動的なネットワークトポロジーにおいても中継経路探索に負荷を必要としない安心安全に自律的なネットワーク構築を可能とする伝送方式の開発」を目的とする。

ここで、有線通信とは異なり、無線通信の通信媒体が四方八方に放射される電磁波である点に着目すると、送信端末の送信信号は他の複数のユビキタス端末に到達可能であると考えられる。この無線通信固有の特徴を最大限に活用するためには、信号を受信した複数のユビキタス端末が信号を中継し、無線通信空間に信号を拡散（クラスタ中継伝送）させながら、通信宛先へ面的に伝送するべきであると考えられる。これは、送信局と受信局間の通信路を、複数の通信路の群れ（クラスタ）が構成する一つの等価的な通信路として扱う

ことで、前述した各端末間の通信回線品質に着目する必要がなくなり、中継経路管理等の最適化が不必要となるためである。この特徴により、動的なトポロジーにも対応し得るアドホックネットワークの構築が可能となる。

## 3. 研究の方法

本研究課題は、主に

- (1) クラスタ中継符号化・復号伝送の開発
  - (2) 接続符号構造の強化法の検討
  - (3) 接続符号の復号の低演算量化の検討
- の3項目により構成されている。項目(1)は、クラスタ中継符号化伝送のベースシステムの構築を目的とし、項目(2)および(3)は伝送システムの効率化を図っている。

- (1) クラスタ中継符号化・復号伝送の開発  
クラスタ中継符号化では、周波数選択性フェージング通信路に起因する符号化、及び面的な中継伝送による符号化の直列接続符号化として考えられる。このような接続符号化を施した信号の復号は、通信宛先の受信信号が持つ多変量確率密度関数の周辺化問題に帰着するため、接続符号化構造をベイジアンネットワークとして捉えてモデル化を行う。次に、接続符号化の符号性能を最大限に活かす復号処理として、BCJR アルゴリズム（ターボ符号の復号法の一つである繰り返し復号アルゴリズム）が知られているため、このアルゴリズムを用いて送信信号の判定を行う。

### (2) 接続符号構造の強化法の検討

#### [A] 通信路符号化の設計

周波数選択性フェージング通信路はFIR フィルタ構造を持つため、送信信号の時間的な分散範囲が限られている。このため、符号構造が瞬時の伝搬路状態に深く依存し、脆弱な符号構造となることもある。その脆弱な符号構造が出現する確率を低減するためには、ターボ符号が再帰的畳み込み符号を利用するように、送信信号の時間的な分散範囲を広くすることが有効であると考えられる。

そこで、通信路符号化としてIIR (Infinite Impulse Response) フィルタの一種であるアキュムレータ（メモリ数1の畳み込み符号）のような簡単なものを適用し、誤り訂正能力の向上を図る。この向上の原理は、複数経路を経て送られる送信信号を繰り返し符号と見なすことで、シャノン限界に近い特性を達成可能なRA (Repeat Accumulate) 符号と等価なものと考えられるという事実に基づいている。

[B] 中継器信号処理の設計

ここでは、2ユーザが基地局と通信を行う際に、一つの中継器が2ユーザの送信信号を受けて、それらを多重した信号を基地局へと中継する環境を考える（ただし、ここでは周波数選択性フェージングの影響は考えない）。信号を多重しない場合には、通信を完了するために4フェーズの送信機会が必要であるのに対して、上記の環境では、3フェーズの送信機会に削減可能であり、要求される無線リソースの削減が可能となる。

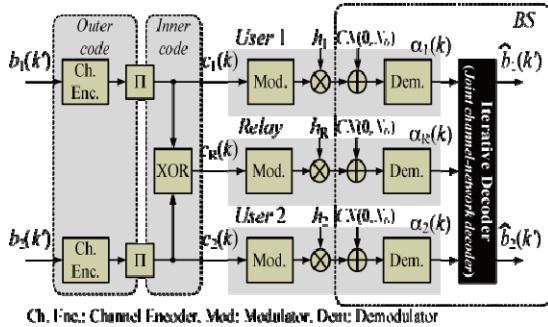


図1: システムモデル.

図1 にシステムモデルを示す. 2つのユーザ端末では、情報ビット  $b_1(k)$  と  $b_2(k)$  がそれぞれ通信路符号化・インターリーブされ、符号ビット  $c_1(k)$  と  $c_2(k)$  が得られる. その後、符号ビットは変調器へと入力され、基地局へと送信される. 一方、2つのユーザ端末の近傍に位置する中継局では、 $c_1(k)$  と  $c_2(k)$  の情報を得て排他的論理和により多重された符号ビット  $c_R(k)$  に対して変調が行われ、基地局へと送信される. ただし、中継器において  $c_1(k)$  と  $c_2(k)$  に関する情報は完全に得られるものとする.

無線通信路において異なる通信路利得  $h_i$  ( $i=\{1, 2, R\}$ ) が各々の送信信号に乗積され、基地局の受信機において電力スペクトル密度  $N_0$  の複素雑音が付加された後、軟入力軟出力機能を有する復調器により、外部対数尤度比 (LLR)  $\alpha_j(k)$  が得られる. 興味深いことに、その外部LLR は符号化率  $R_c$  の通信路符号化 (外符号) に対して、符号化率  $2/3$  のネットワーク符号化 (内符号) が直列接続された通信路-ネットワーク接続符号語の通信路情報として考えることができる. このような接続符号に対して繰り返し復号を適用し、情報ビット  $b_j(k)$  の推定値を検出する.

(3) 接続符号の復号の低演算量化

周波数選択性フェージングの影響が厳しい場合、復号処理としてBCJRアルゴリズムを採用すると、その演算量が膨大なものとなるこ

とが知られている. そこで、まず、BCJRではなくSum-Product アルゴリズムの適用を考える. Sum-Product アルゴリズムは周辺化対象である多変量確率密度関数を因数分解して、分解後のローカル関数毎に周辺化を行うアルゴリズムであり、ハードウェアで回路を構成する際に、周辺化処理の並列化が可能となる利点を持つ.

2-[B]の中継伝送における内符号である符号化率  $2/3$  のネットワーク符号に対する復号処理の本質は、外部LLR である  $\alpha_j(k)$  を0と1の確率に変換した後、ネットワーク符号語が有する  $2^3$  状態の結合確率、通信路復号器からのフィードバックである事前確率に基づき、 $c_1(k)$ 、 $c_2(k)$  それぞれについての周辺確率を求めることである. その周辺確率の対数尤度比をとり、式を簡略化するとネットワーク符号の復号器出力の外部LLR は次式で表現できる.

$$\begin{aligned} \beta_1(k) &= \alpha_1(k) + (\alpha_R(k) \boxplus [\gamma_2(k) + \alpha_2(k)]) \\ \beta_2(k) &= \alpha_2(k) + (\alpha_R(k) \boxplus [\gamma_1(k) + \alpha_1(k)]) \end{aligned}$$

ただし、 $\gamma_1(k)$ 、 $\gamma_2(k)$  は事前LLR である. したがって、上式に基づくと、通信路-ネットワーク接続符号のための繰り返し復号器は図2のような簡単な構成で実現できる.

繰り返し復号では、内符号の復号器出力である外部LLR  $\beta_j(k)$  ( $j=1, 2$ ) がデインターリーブを介して外符号の復号器へと入力され、誤り訂正が行われた後、その出力である外部LLR が内符号の復号器へとインターリーブを介して、 $\gamma_j(k)$  としてフィードバックされる. このような外部LLR の交換を任意の回数繰り返した後、外符号の復号器において、情報ビット  $b_j(k)$  に対して周辺確率を求めることで検出を行う.

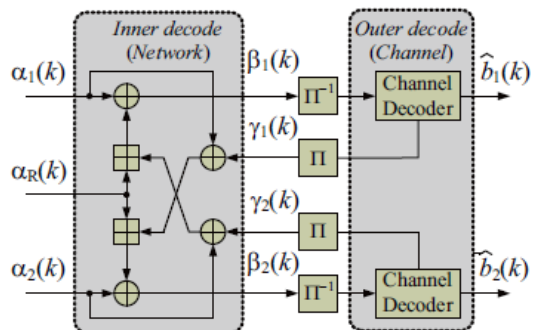


図2: 通信路-ネットワーク接続符号の繰り返し復号器.

#### 4. 研究成果

本研究課題で得た主な研究成果は、

- (1) Sum-Productアルゴリズムにより低演算量化したクラスタ中継符号化伝送の伝送特性評価
- (2) 排他的論理和を適用し、内復号器の演算量を削減した通信路-ネットワーク接続符号化中継伝送の伝送特性評価

である。

- (1) クラスタ中継符号化伝送の伝送特性評価

この評価では図3に示すように、正則に配置された9個のノードがクラスタ中継する場合の伝送特性を評価する。ただし、Sは情報生起ノード、Dは通信宛先ノード、他は中継ノードを意味する。なお、受信電力レベルは、通信距離に対する2乗則に従い減衰するものとする。また、表1にシミュレーションの諸元を示す。

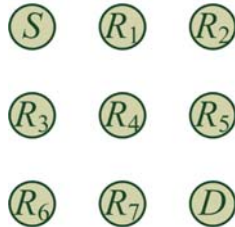


図3: ネットワークトポロジー。

表1: シミュレーション諸元。

Modulation	BPSK
Spectral efficiency	1 bits/s/Hz
Decoder	Sum-Product
Receive antenna	1 branch
Data Symbol length	512 symbols
Cyclic prefix length	16 symbols
Channel model	5-path Rayleigh fading
Delay profile	equal gain
Channel estimation	Perfect

図4および図5に、接続符号強化のためのアキュムレータを適用しないクラスタ中継伝送、適用するクラスタ中継符号化伝送の平均パケット誤り率PER (PER: Packet Error Rate) 特性を示す。ただし、#はネットワーク内において1パケットに対して許容可能な最大ホップ回数である。なお、S-D SNRは情報生起ノードSと通信宛先ノードD間の平均受信SNRを意味する。

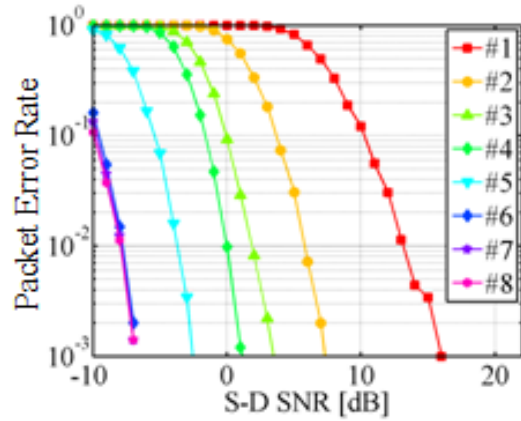


図4: クラスタ中継伝送のPER特性。

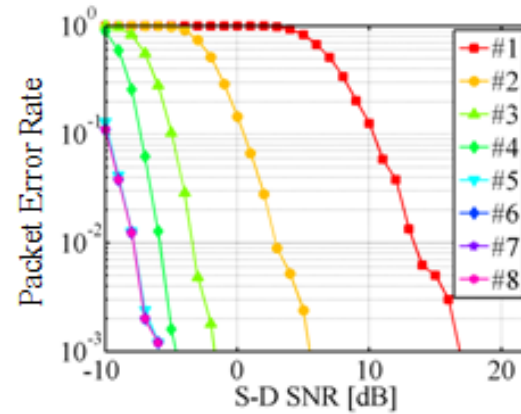
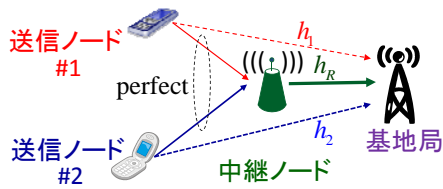


図5: クラスタ中継符号化伝送のPER特性。

図4と図5のPER=10<sup>-2</sup>において、最大ホップ回数8回の特徴を比較すると、クラスタ中継の概念を実現する両方式において、低SNRで運用可能であることを示しているものの、特性に差がないことを確認できる。これは、低SNRの領域では、正しく受信できる中継ノードの数が減少するため、アキュムレータを適用した符号化伝送を行っても、符号化構造が強化されるわけではないためである。しかし、ホップ数4回の特徴に着目すると、6dBの符号化利得が符号化中継伝送により得られることが分かる。

- (2) 通信路-ネットワーク接続符号化中継伝送の伝送特性評価

通信路-ネットワーク接続符号化を適用した中継伝送方式の特性を評価するため、計算機シミュレーションを行った。図6にネットワークトポロジーを、表2にシミュレーション諸元を示す。



$$|h_1|^2 / |h_R|^2 = 0 \text{ dB} \quad |h_2|^2 / |h_R|^2 = 0 \text{ dB}$$

図6: ネットワークトポロジー.

表2: シミュレーション諸元.

Modulation	Gray Coded QPSK
Channel Encoder	half-rate [17, 15] <sub>s</sub> turbo code
Code length	2048 bits/packet
Number of iterations	4 for turbo decoder 8 for joint decoder
Interleaver	random
Channel model	AWGN

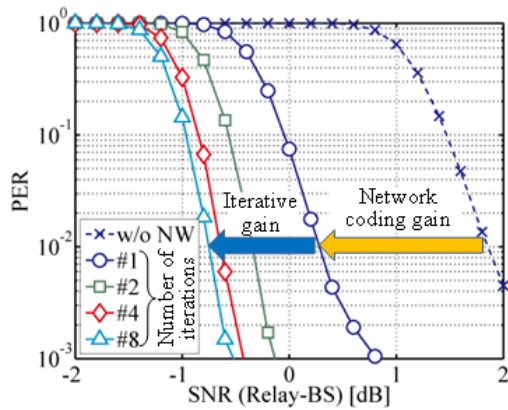


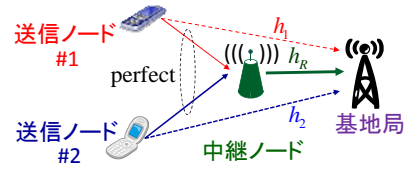
図7: 中継器—基地局間 SNR に対する PER 特性.

このトポロジーは、すべての回線の通信路利得は等しいという前提で、各回線のSNRを同時に変えるものである ( $|h_1|^2 = |h_2|^2 = |h_R|^2$  なので  $\text{SNR}_1 = \text{SNR}_2 = \text{SNR}_R$  である)。

図7に、中継器と基地局の間のSNRに対する両ノードからの信号のPER特性を示す。ネットワーク符号化を適用せず、中継器で単にパケットを再送信する場合の特性 (w/o NW) と比較して、ネットワーク符号化を適用すると、繰返し処理を行わなくても (繰返し回数1回)、 $\text{PER} = 10^{-2}$ において約1.5 dBのネットワーク符号化利得が得られている。それに対して繰返し処理を行うと、さらに約1 dBの繰返し復号利得が得られている。これは、ネットワーク符号化で両送信符号化系列の排他的論理和をとっていることから、他方の送信ノードからのチャネル符号化の冗長性が外部LLRのとしてLLRの改善に寄与しているためである。

図7の評価においては、すべてのリンクの通信路利得 (SNR) は等しいとしていた。しかしながらそれは実際の伝搬路ではありえない状

況設定であるので、より現実的なリンク状況で評価する。図8にそのネットワークトポロジーを示す。また、図9に、中継器と基地局の間のSNRを3 dB、 $|h_2|^2 / |h_R|^2 = -6$  dBとした場合の、 $|h_1|^2 / |h_R|^2$ に対するPER特性を示す。



$$|h_2|^2 / |h_R|^2 = -6 \text{ dB} \quad \text{SNR (Relay-BS)} = 3 \text{ dB}$$

図8: ネットワークトポロジー.

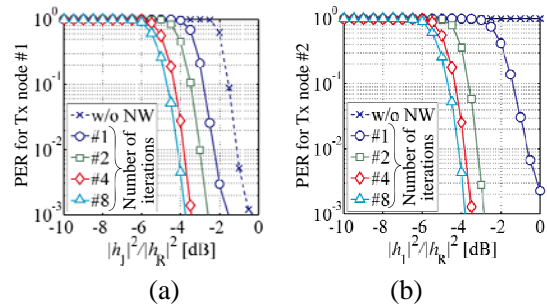


図9: 両送信ノードと基地局の間の通信路

利得が不均衡である場合のPER特性.

$|h_2|^2 / |h_R|^2 = -6$  dBなので、ノード2から信号を基地局で直接受信した場合には  $\text{PER} = 1$  である。また図9 (b)は、 $|h_2|^2 / |h_R|^2 = -6$  dBのままノード1と基地局の間の通信路利得を変えているので、中継器を用いない場合には、ノード2からの信号のPERは改善されるものではない。一方、ノード1からの信号を基地局で直接受信する場合 (中継器を使用しない場合) の特性は、図9 (a)の点線に対応しており、同図より、 $\text{PER} = 10^{-3}$ を得るための  $|h_1|^2 / |h_R|^2$  は約 0 dBであることがわかる。中継器—基地局間のSNR=3 dBなので、 $|h_1|^2 / |h_R|^2$  はSNRで約3 dBに相当する。ここで、ノード2の信号のみを中継する場合、中継器—基地局間のSNRは3 dBなので、これはPER が約  $10^{-3}$ の伝送品質で受信される。したがって、 $|h_1|^2 / |h_R|^2$  を約0 dB (SNR = 3 dB) に設定すると、基地局では、ノード1とノード2の信号を、ほぼ同じ伝送品質で受信できることになる。

それに対して、直接接続通信路—ネットワーク符号化を適用した中継伝送を行った場合、 $|h_1|^2 / |h_R|^2$  を-4 dB (SNR=-1 dB) に設定した時、両ユーザのデータはPER約  $10^{-3}$ の品質で受信できる。これは、ユーザ2の packetsのみを中継した場合に対して、約4 dBのネットワーク符号化利得と繰返し利得が得られているこ

とを示しており、中継器における協調伝送の効果が表示されているといえる。

これらの成果に加え、後述する発表論文等で得られた関連結果により、本研究が目的とする「動的なネットワークトポロジーにおいても中継経路探索に負荷を必要とせず、安心安全に自律的なネットワーク構築する伝送方式の開発」に成功したと結論付けることができる。

#### 5. 主な発表論文等 (研究代表者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① 畑本浩伸, 衣斐信介, 三瓶政一, 広帯域無線通信システムにおける中継ノードを利用した部分スペクトル再送方式, 電子情報通信学会論文誌, 査読有, Vol. J93-B, No. 1, 2010, 53-68.
- ② Quang Thang Duong, Shinsuke Ibi, Seiichi Sampei, Spectrum Shaping Combined with Spectrum Mapping for Two-Hop Amplify-and-Forward Relay Links, Proc. of WPMC '09, 査読有, CD-ROM, 2009.
- ③ Masatoshi Mizobuchi, Shinsuke Ibi, Seiichi Sampei, A Study on a Cooperative Relay using Joint Network and Channel Coding in Simple Triangular Network Topology, Proc. of PIMRC '09, 査読有, CD-ROM, 2009.
- ④ Shinsuke Ibi and Seiichi Sampei, A Cluster Relay Coded Cooperative Strategy in Broadband Wireless Ad-Hoc Networks, Proc. of ISITA '09, 査読有, CD-ROM, 2009.
- ⑤ Seiichi Sampei and Shinsuke Ibi, Enabling Technologies and Strategies for Radio Resource Management in Decentralized Heterogeneous Wireless Networks, Proc. of PIMRC '08, 査読有, CD-ROM, 2008.
- ⑥ Hironobu Hatamoto, Shinsuke Ibi, and Seiichi Sampei, A Study on Cooperative Multiple Relay Transmission Scheme for Broadband Wireless Mesh Networks, Proc. of PIMRC '08, 査読有, CD-ROM, 2008.

[学会発表] (計5件)

- ① 衣斐信介, ベイズ理論と分散符号の繰返し復号, 電子情報通信学会 2010 年総合大会, 2010年3月18日, 東北大学.

- ② 高田直幸, 衣斐信介, 三瓶政一, 無線分散ネットワークにおける通信路-重畳直列接続符号化に関する一検討, 電子情報通信学会 2010 年総合大会, 2010年3月18日, 東北大学.
- ③ 衣斐信介, 三瓶政一, 通信路-ネットワーク直列接続適応符号化伝送の EXIT 解析, 電子情報通信学会 2010 年総合大会, 2010年3月18日, 東北大学.
- ④ 衣斐信介, 三瓶政一, 通信路-ネットワーク直列接続符号化の中継器における信号多重法に関する一検討, 電子情報通信学会 2009 年 ソサイエティ大会, 2009年9月17日, 新潟大学.
- ⑤ 溝渕正倫, 衣斐信介, 三瓶政一, マルチノードドリレー環境下における繰返し検出を適用した協力型符号化による中継伝送方式とその信号分離に関する一検討, 無線通信システム研究会, 2008年3月6日, YRP.

[産業財産権]

○出願状況 (計2件)

- ① 名称: 無線通信システム、基地局装置及び通信方法  
発明者: 衣斐信介, 三瓶政一, 宮本伸一  
権利者: 衣斐信介, 三瓶政一, 宮本伸一  
種類: 特願  
番号: 2009-199227  
出願年月日: 2009年8月31日  
国内外の別: 国内
- ② 名称: 通信方式、送信方法、受信方法及び通信方法  
発明者: 衣斐信介, 三瓶政一  
権利者: 衣斐信介, 三瓶政一  
種類: 特願  
番号: 2009-040884  
出願年月日: 2009年2月24日  
国内外の別: 国内

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

衣斐 信介 (IBI SHINSUKE)  
大阪大学・工学研究科・助教  
研究者番号: 10448087