

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 3月31日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2011

課題番号：20560406

研究課題名（和文）多次元生体信号計測による視覚パターンが覚醒維持状態に及ぼす影響の客観的評価

研究課題名（英文）Objective study of the influence of visual stimuli to the wakefulness maintenance state against sleepiness by using multi-channel bio-signal processing

研究代表者

吉田 久 (YOSHIDA HISASHI)

近畿大学・生物理工学部・准教授

研究者番号：50278735

研究成果の概要（和文）：

視覚パターンが覚醒維持状態に及ぼす影響を客観的に評価するために、多次元生体信号（脳波、心拍変動、血圧、眼球運動、瞳孔径変動）を計測した。時間一周波数解析、古典的スペクトル解析、フィードバックモデル解析、いずれの結果においても、覚醒維持状態は自然入眠時と異なる特徴的なパターンが見られた。さらに眼球運動や瞳孔径変動からもその特徴を見出すことが可能であった。また上記の解析を行う上で重要なアーチファクト除去に関する成果も得られた。

研究成果の概要（英文）：

We have measured multi-channel bio-signals, i.e., electroencephalogram, heart rate variability, blood pressure, eye movement and pupil diameter variability in order to evaluate the influence of visual stimuli to the wakefulness maintenance state against sleepiness. We performed time-frequency analysis, conventional spectral analysis, and feedback modeling to those signals. All results showed that physiological activities in wakefulness maintenance state have different features from those in onset of natural sleep. In addition, we have introduced new artifact removal methods to the EEG analysis.

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	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：統計的生体信号処理

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：覚醒維持状態、脳波、心拍変動、血圧変動、眼球運動、瞳孔径変動、時間-周波数解析、独立成分分析

1. 研究開始当初の背景

近年、本研究代表者らは情報論的ダイバージェンスの応用の広さに注目し、画像解析や信号解析へダイバージェンスを用いた解析

法の研究を進めてきた。この解析手法の有効性を検証する意味において、「眠気に逆らった覚醒維持状態における脳波を解析対象として研究を進めるに至った。睡眠段階や覚醒

水準などの評価などに関する研究では、脳波や皮膚電気活動、心拍変動、瞬目などの生体信号を利用して生理反応を調べる例が数多く見られるが、眠気に逆らい覚醒維持の努力をするという状態に関する研究報告は、わずかに血流解析などがあるのみで、その生理反応などはほとんどわかっていない状態であった。しかしながら、運転中のドライバーなどは言うに及ばず、単調作業を強いられる職場や受験勉強などといった様々な場面において、「眠気に逆らい覚醒努力を課されている状態」における生理反応を定量的に評価することは大いに有意義であり、安全性や作業・学習効率の向上に繋がるのは間違いないとの考えに至った。そこで本研究は上述のような着想に基づき、これまでに研究開発してきた生体信号に関する解析法(時間-周波数解析における瞬時等価帯域幅など)を適用しながら、さらに本研究で取り上げる問題に特化した解析法および評価法の開発を試みたものである。

2. 研究の目的

上述の通り「眠気に抗した覚醒維持状態」における生理反応を定量的に評価することは有意義であるとの考えから、これを達成するために、本研究では「眠気に抗した覚醒維持状態」を中心に、その生理反応を定量的に評価、解析すること、ならびにその解析法に関する研究を主な目的として研究を行った。具体的には以下に列挙する2つの目的である。

- (1) 心拍変動、血圧変動、瞳孔径、眼球運動、そして脳波という多次元生体信号を同時計測し、視覚パターンが覚醒状態に及ぼす影響を定量的に、評価、解析すること。
- (2) 脳波に混入する眼球運動および瞬目を原因とするアーチファクトを除去すること。

3. 研究の方法

(1) 生体信号計測実験と解析

- ① 眠気に抗して覚醒維持を課された状態における生体の生理反応に関する基礎データを脳波、心拍変動、血圧変動(多次元生体信号)を同時計測する実験を行った。

- 時間-周波数解析法および瞬時等価帯域幅による脳波解析
- 古典的な周波数解析法による多次元生体信号解析
- フィードバックモデルによる多次元生体信号解析

- ② 視覚刺激パターンが生体に及ぼす影響の定量的評価のために、映像の画素の動きを統制した映像を鑑賞する実験を行い、このときの生体生理反応を解析した。

- ③ 眼球運動と瞳孔径を同時計測する実験を行い、マイクロスリープ直前の覚醒レベルを検証した。

(2) 脳波へ混入するアーチファクト除去に関する研究

- ① 脳波へのEOG混入モデル検証のための脳波およびEOG、眼球運動の同時計測実験を行い、適応信号処理によるアーチファクト除去法の提案。
- ② ICAを用いたアーチファクト除去法の提案

4. 研究成果

(1) 時間-周波数解析法および瞬時等価帯域幅による脳波解析

今、脳波 $x(t)$ が時間-周波数分布 $p(t, f)$ を持つとすれば、この脳波 $x(t)$ のある時刻 t における瞬時等価帯域幅 $w^{(\alpha)}(t)$ は以下のようにして定義できる。

$$W^{(\alpha)}(t) = \frac{1}{2} \left(\int p^{\alpha}(f | t) df \right)^{1/(1-\alpha)}$$

但し、 $p(t, f)$ はある時刻 t における条件付き周波数分布であり、

$$p(f | t) = \frac{p(t, f)}{p(t)},$$

$$p(t) = \int P(t, f) df.$$

$$\left(\int \int p(t, f) df dt = 1, \quad p(t, f) \geq 0 \right)$$

を満たす分布である。等価帯域幅は情報論的に定義されるものであり、上述のように確率分布とみなせる時間-周波数分布(正值時間-周波数分布)が得られれば、容易に瞬時等価帯域幅を求めることができる。

図1は覚醒維持実験中の、特に眠気に抗している状態における脳波(電極: 01)30秒間の典型的な解析例を左から順に10秒ずつ区切って示したものである。

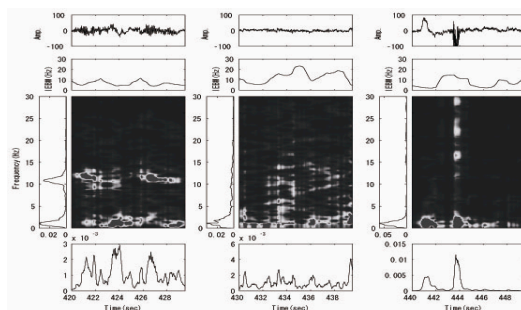


図1

各パネルは最上段が脳波、2段目が等価帯域幅、中央の分布が脳波の時間-周波数分布、最下段が脳波のエネルギー分布であり、左側が脳波のパワースペクトルである。なお、特

に眠気に逆らい覚醒維持の努力をしている区間の特定は、実験中に撮影したビデオ映像により行った。420 秒付近の時間一周波数分布には、眠気が誘発されているために α 帯域の脳波が見られるが、次の 10 秒間においては、脳波のエネルギーは β 帯域を含む広範囲に分散し、このために脳波の瞬時等価帯域幅は 20Hz 以上の大きな値を持つ。このような傾向は、他の被験者にも同様に見られ、眠気に抗して覚醒維持の努力をしている状態における脳波の特徴的な点である。

(2) 古典的な周波数解析法による多次元生体信号解析

視覚ターゲットを左右に一定時間間隔で動かす実験と読書による眠気を誘発させる実験を行った。このとき脳波、心拍変動、血圧変動、脈派容積変動（末梢血管抵抗）、ならびに眼球運動 (EOG) を同時に測定した。図 2 は心拍変動、血圧変動、NPV のスペクトル解析を詳細に行った結果を示したものである。

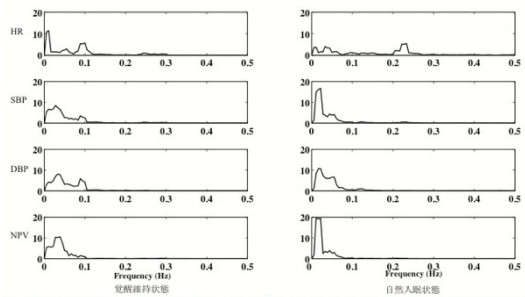


図 2

左側が覚醒維持状態であり、右側が自然入眠状態の解析結果である。上から順に心拍変動、収縮期血圧変動、拡張期血圧変動、脈派容積変動のパワースペクトルである。覚醒維持状態および自然入眠状態のいずれの場合でも、心拍変動と収縮期血圧変動には呼吸性変動成分が存在し、特に覚醒維持状態の心拍変動の呼吸性変動成分が大きいことが示された。また、覚醒維持状態においてはメイヤー波に相当する 0.1Hz のパワーが心拍変動、収縮期血圧ならびに拡張期血圧変動において顕在化している一方で、自然入眠状態においては、心拍変動、血圧、NPV 共にメイヤー波に対応するパワーが消失することが明らかになった。

(3) フィードバックモデルによる多次元生体信号解析

心拍変動を $x(t)$ とし、血圧変動を $y(t)$ とすると、これらはそれぞれ、入力 $y(t)$ と $x(t)$ によって駆動されるフィードバックモデルと考えることができる。このフィードバックシステムは 2 変量の自己回帰モデルとして、

$$\begin{bmatrix} y(n) \\ x(n) \end{bmatrix} =$$

$$\sum_{m=1}^M \begin{bmatrix} a_{11}(m) & a_{12}(m) \\ a_{21}(m) & a_{22}(m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y(n-m) \\ x(n-m) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e(n) \\ f(n) \end{bmatrix}$$

と表現できる。但し、ここで $e(n), f(n)$ は互いに無相関な白色雑音とする。この係数からインパルス応答が求まる。

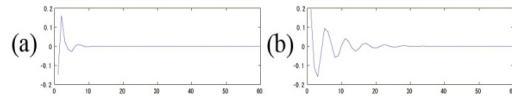


図 3

図 3 は、フィードバックシステム(式(3))における心拍変動から血圧へのインパルス応答を示したものである。(a) は覚醒維持実験前半の、(b) は後半のそれである。ストレスによりインパルス応答の持続時間が長くなり、振動していることがわかる。またこのインパルス応答は通常の傾眠時と異なるものであることから、システムインパルス応答の違いを見ることで、両者の違いを捉えられることも示唆している。

(4) 視覚刺激パターンが生体に及ぼす影響の定量的評価

視覚刺激パターンが生体に及ぼす影響を明らかにするために、自然映像を用いながら、パン、チルト、ロール、ズームなどの画素の動きを人工的にコントロールした視覚刺激実験を実施した。ここで視覚刺激に用いた映像は自然な映像であり、人工的に作成したコンピュータグラフィックスではない。このような映像を作成するために 3 軸のカメラ制御装置を作成し、ビデオカメラをパン、チルト、あるいはロールさせることによって、映像中の画素の動きをコントロールした。上述の装置を用いて作成した映像による視覚刺激実験を行い、その間、脳波、心電位、血圧、規準化脈波容積、ならびに眼球運動を同時記録した。生体生理反応の指標として、今回は心電図から算出した心拍変動を用い、また主観的な映像酔いの評価指標としてよく使われる SSQ による評価も行った。その結果の典型的な例を図 4 に示す。図 4 左側に SSQ の値を、また右側は心拍変動スペクトルの HF/LF (HF: 0.15-0.30Hz, LF: 0.05-0.15Hz) を示した。横軸は映像鑑賞の回数を表している。青線がパン、赤線がロール映像による視覚刺激を受けた時の反応である。両者を比較すると、映像刺激による生理反応がより大きく出たのは、パン映像によるものであることがわかる。なぜなら、ロール映像鑑賞により、実験後半になるにつれ SSQ のスコアが高くなること、また心拍変動の HF/LF の値もパン映

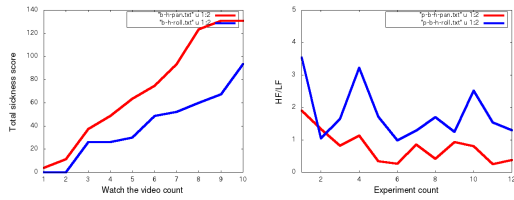


図 4

像刺激の時に最も、HF/LF 値が低くなるためである。つまり視覚刺激パターンのうち、パン映像による視覚刺激によってストレスが増大し、交感神経の亢進による、いわゆる映像酔いの状態になっているものと推察される。この他に映像の種類を変えて、異なる雰囲気映像刺激実験も行ったが、両者に大きな違いは見られなかった。

(5) 眼球運動と瞳孔径によるマイクロスリープ直前の覚醒レベルの解析。

被験者に暗室内で十字型の指標を呈示し、ごく短時間の睡眠（マイクロスリープ）に陥ったことに気づいた場合は、気付くと同時にマウスをクリックする実験を行った。

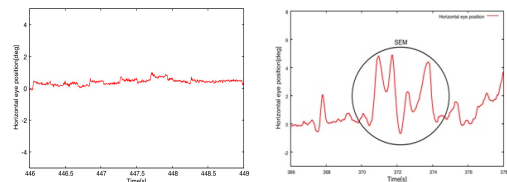


図 5 (a) (b)

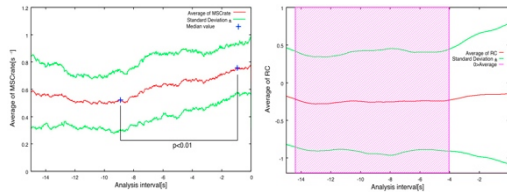


図 6 (a) (b)

固視微動の計測例を図 5(a) に示す。マウスをクリックされた直前には、眼球がゆっくりと回転する様子が観察される (図 3(b))。この眼球運動は、SEM (slow eye movement) と呼ばれ、入眠時に頻繁に発生することが知られている。このことから、マイクロスリープが発生する直前には、覚醒水準の低下により、眼球運動系が弛緩して制御を喪失してしまうものと考えられる。このとき、固視微動の中でも、マイクロサッカドと呼ばれる不随意に発生する微小な視線のジャンプに注目し、その発生頻度の推移を求めた。その結果、SEM が発生する約 10 秒前からマイクロサッカドの発生頻度が有意に上昇することが示された (図 6(a))。また、移動線形回帰法と呼ばれる手法により、瞳孔径が縮瞳あるいは散瞳のいずれの傾向にあるのかを分

析した結果、マイクロサッカドの発生頻度が上昇を始める直前から、瞳孔径は持続的な収縮状態にあることが示された (図 6(b))。すなわち、まず始めに副交感神経系が支配的となり、次に眼球運動系が制御を失ってマイクロサッカドが頻発し、SEM に至ることが推察される。この結果から、マイクロサッカドと瞳孔径を同時にモニタリングすることによって、覚醒レベルの正確な予測が可能になるものと思われる。

(6) 脳波に混入する眼球運動や瞬目によるアーチファクトの除去

① 適応フィルタを用いたアーチファクトの除去

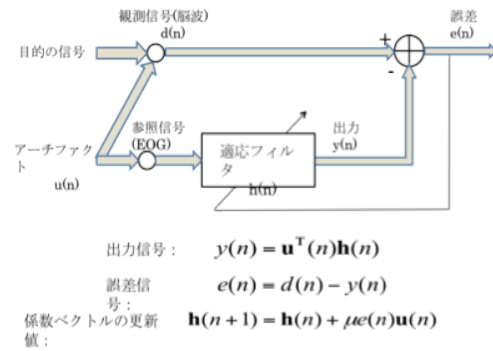


図 7 適応フィルタ

アーチファクトが混入した脳波 $d(n)$ に対して、参照信号である EOG $u(n)$ を入力とする適応フィルタを構成し、その出力が脳波 $d(n)$ に近づくようにフィルタ係数を決めた。図 7 はそのブロック図である。図 8 は適応フィルタによって眼球運動によるアーチファクトを除去した例である。

図 8 適応フィルタによるアーチファクト除去青線が眼球運動や瞬きによるアーチファクトである。背景脳波にスパイク状に重畳している信号がアーチファクトである。一方、赤線は適応フィルタによって推定された脳波である。瞬きによるスパイク状のアーチファクトが低減していることがわかる。

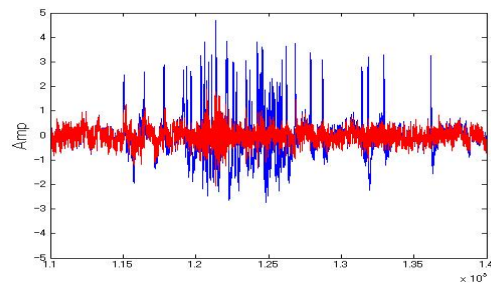


図 8 適応フィルタによるアーチファクト除去

② ICAを用いたアーチファクト除去法

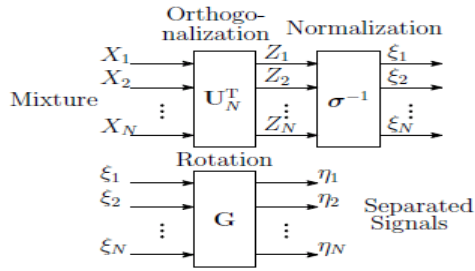


図9 独立成分分析

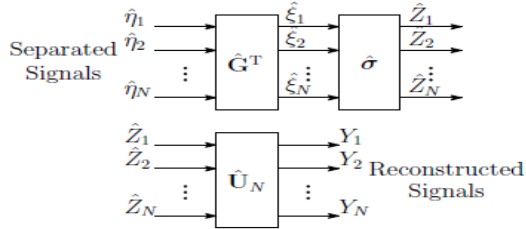
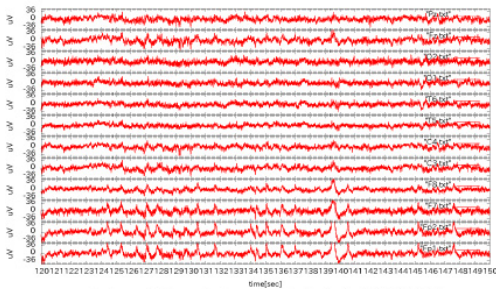
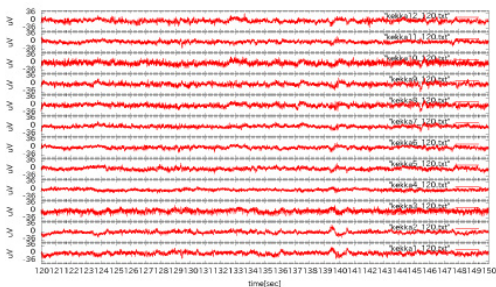


図10 独立成分の再合成

アーチファクトを含んでいる脳波 $X(t)$ をICAによって、独立成分 $\eta(t)$ に分解する(図9)。独立成分の中からアーチファクト成分を除去したのち、図10のように再合成を行った。その結果を図11に示す。図11(a)は観測脳波である。FP1, 2などの前頭部分の脳波に眼球運動や瞬きによるアーチファクトが大きく混入していることが確認できる。(b)がアーチファクト除去後の再合成脳波である。これを見るとアーチファクトが一部除去できていない部分も見受けられるが、その影響の多くは除去できたと考えられる。



(a) アーチファクトを含む観測脳波



(b) アーチファクト除去後の脳波

図11 ICAによるアーチファクト除去

今後、適応フィルタを用いた場合と比較し、定量的に評価する必要がある。

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15件)

1. 田中達朗, 小濱 剛, 吉田 久, “マイクロサッカーと瞳孔径の解析に基づく覚醒水準変動の客観的評価,” 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 36, No. 13, pp. 51-54, 2012. (査読なし)
2. 中川 啓, 小濱剛, 吉田 久, 吉川 昭, “固視微動解析に基づく映像酔いの定量的評価,” 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 36, No. 13, pp. 47-50, 2012. (査読なし)
3. Hisashi Yoshida and Sho Kikkawa, “An Analysis of Brain and Muscle Activity in Arousal Maintenance State against Sleepiness,” Proceedings of the 33rd Ann. Int. Conf. of the IEEE EMBS, pp. 3845 - 3848, 2011. (査読付)
4. 小濱 剛, 竹中 悠, 吉田 久, 戸田 尚宏, “視覚的注意がドリフト眼球運動に及ぼす影響の統計解析,” 映像情報メディア学会誌, VOL. 64, No. 12. pp. 1892-1898, 2010. (査読付)
5. Takeshi Kohama, Hisashi Yoshida, Naohiro Toda, “A Statistical Model Analysis of Attentional Effects on Fixational Drift Eye Movements,” Proceedings of the Forth International Workshop on Image Media Quality and Its Applicatoins, pp. 96-99, 2010. (査読付)
6. 吉田 久, 吉川 昭, “Copulaに基づく時間一周波数表現とその応用,” 京都大学数理解析研究所講義録, pp. 1-12, 2010. (査読なし)
7. Hisashi Yoshida, Takuya Higuchi, Kanae Shirasawa and Sho Kikkawa, “Analysis of Desynchronized Brain Activity in Wakefulness Maintenance State against Sleepiness by Instantaneous Equivalent Bandwidth,” Proceedings of the 6th International Workshop on Biosignal Interpretation, 2009. (査読付)
8. Hisashi Yoshida, Isao Fujimoto and Sho Kikkawa, “A spectral estimation method by non-equinterval smoothing of log periodogram,” Proceedings of SPIE, Vol. 7074, pp. 707411-707411-8, 2008. (査読付)

〔学会発表〕（計36件）

1. 吉田 久, “覚醒維持状態における自律神経系解析,” 第55回システム制御情報学会研究発表講演会(吹田市), 平成23年5月19日.
 2. 田中 達郎、小濱 剛、吉田 久 (田中 達郎), “マイクロカード発生頻度と瞳孔径変動の解析に基づく覚醒水準の客観的評価,” 第50回日本生体医工学会大会(東京都 東京電機大学神田キャンパス)平成23年4月26日.
 3. 樋口 拓哉, 吉田 久, 田中達郎, 小濱剛 (樋口拓哉), “眠気に抗した覚醒維持状態の客観的評価とその解析,” 日本生体医工学会生体医工学シンポジウム(札幌市(北海道大学)), 平成22年9月10日.
 4. Kei Nakagawa, Takeshi Kohama, Hisashi Yoshida (Kei Nakagawa), “Effects of motion sickness on fixation eye movements,” 第49回日本生体医工学会大会(大阪市), 平成22年6月26日.
 5. Tatsuro Tanaka, Takeshi Kohama, Hisashi Yoshida, “Microsaccade rate varies with arousal level,” 第49回日本生体医工学会大会(大阪市), 平成22年6月26日.
 6. 藤本 勲、吉川 昭、吉田 久, “不等間隔平滑化によるスペクトル推定,” 平成21年電気関係学会関西支部連合大会(大阪市), 平成21年11月7日.
 7. 吉田 久、吉川 昭, “Copulaに基づく時間-周波数表現とその応用,” 京都大学数理解析研究所共同研究集会(招待)(京都市), 平成21年10月5日.
 8. 松山 祐貴、樋口 拓哉、吉田 久, “眠気に抗した覚醒維持状態における脳波および自律神経系の解析,” 第24回生体・生理工学シンポジウム(仙台市), 平成21年9月26日.
 9. Takeshi Kohama, Hisashi Yoshida, Naohiro Toda, “Attentional effects on drift eye movements before and after microsaccades,” 32nd The European Conference on Visual Perception (Regensburg Utrecht), 平成21年8月25日.
 10. 松山 祐貴、樋口 拓哉、野村 健太、吉田 久, “眠気に抗した覚醒維持状態における脳波-血圧同時解析,” 第48回日本生体医工学会大会(東京江戸川区), 平成21年4月25日.
 11. 藤本 勲、吉川 昭、吉田 久, “スプライン補間を用いた対数ペリオドグラムによる不等間隔平滑化によるスペクトル推定,” 平成20年電気関係学会関西支部連合大会(京都市), 平成20年11月9日.
 12. 白澤 香苗、矢野 朋史、吉田 久、野村 健太、吉川 昭、樋口 拓哉, “瞬時等価帯域幅をによる眠気に抗した覚醒維持状態の脳波解析,” 平成20年電気関係学会関西支部連合大会(京都市), 平成20年11月8日.
 13. 吉田 久、吉川 昭, “情報論的ダイバージェンスによる等価帯域幅の提案と生体信号への応用,” 第18回インテリジェント・システム・シンポジウム(FAN2008)(広島市), 平成20年10月23日.
 14. 吉田 久、白澤 香苗、野村 健太、樋口 拓哉, “眠気に抗した覚醒維持状態の脳波奇跡：ガンマ帯域における筋電図の影響について,” 第23回生体・生理光学シンポジウム(名古屋市), 平成20年9月30日.
 15. 白澤 香苗、矢野 朋史、吉田 久、吉川 昭, “自然入眠状態と眠気に抗した覚醒維持状態の脳波解析とその比較,” 第47回日本生体医工学会大会(神戸市), 平成20年5月8日.
6. 研究組織
- (1)研究代表者
吉田 久 (YOSHIDA HISASHI)
近畿大学・生物理工学部・准教授
研究者番号：50278735
 - (2)研究分担者
小濱 剛 (KOHAMA TAKESHI)
近畿大学・生物理工学部・講師
研究者番号：90295577
 - (3)連携研究者 なし