

2006-2009 年度
物理を基盤とする生命科学プロジェクト

生物センサーの構造と機能における
共通原理と多様性に関する生物物理学的研究

蟻川謙太郎（先導科学研究科・教授、代表者）
渡辺正勝（先導科学研究科・教授）
木下充代（先導科学研究科・助教）
伊関峰生（葉山高等研究センター・上級研究員）
粟田ひろ子（葉山高等研究センター・上級研究員）

○ 研究目的（当初）

この研究は、生物界に広く存在する物理的センサー、主として光センサーについて、その構造と機能を生物物理学的手法で研究し、共通原理と多様性を探る。生物は、外界の物理量変化をつねに鋭敏な感覚系でとらえ、行動を制御している。中でも光は多くの生物にとって最も重要な情報源である。ただ、光のどのような属性を何に利用するかは生物種によって著しい多様性があり、それを反映して光センサーの構造と機能も多様である。本研究では生物光センサー、特に未解明な点が多く学術的に発展が期待される無脊椎動物と微生物の系についての申請者ら自身の世界的な成果を出発点として、以下のように光受容分子系、細胞構造、光情報処理の3つの視点でとらえ、その動作原理と生物学的機能を解析・比較する：(1) 光受容分子系については、ミドリムシの新奇光センサーである光活性化アデニル酸シクラーゼ系 (Iseki et al, 2002, *Nature* 415: 1047-51) と、昆虫視物質系の2つに焦点をあて、分子構造、光活性化機構、受容分子代謝機構などを調べる。(2) 受容細胞構造については、光受容分子を含む細胞小器官の微細構造を電子顕微鏡レベルで調べ、生理光学的性質を解明する。(3) 光情報処理については、主として昆虫視覚系を取り扱い、波長の弁別機構(e.g. Arikawa et al, *J Neurosci*, 25: 5935-42, 2005)を心理物理学・神経生理学・微細構造学的手法で解析する。

○ 研究方法

(1) 昆虫色覚系の解析（蟻川グループ）

色覚系の生理・解剖・進化学的解析：行動の調節に関わる光センサーの機能を解明するため、チョウ類複眼を神経生理学、解剖学、分子生物学の方法で詳細に解析し、複眼の機能的構築を解明した。系統関係に基づいて選択した数種における解析から、色覚系の進化について考察した。第一次視覚介在ニューロンの解析法もほぼ確立した。

チョウ類色覚機能の行動学的解析：複眼視細胞多様性の色覚機能との関係を解明するために、色覚機能を詳細に解析した。アゲハで単色光の学習・実験系を確立し、波長弁別能と偏光弁別能を測定した。また、視覚ターゲットの着地行動を指標に、ターゲット輪郭の識別機構を解析した。行動実験を通して、異なる視細胞群の機能分担について考察した。

昆虫視物質の試験管内発現系の確立と応用：視物質分子そのものの光受容機構や分光吸収特性を解明するには、機能的な視物質を試験管内で発現・再構成することが不可欠である。この技術は脊椎動物の視物質については確立しているが、無脊椎動物ではほとんど成功例がない。もしこれが確立されれば動物界における光受容系の機能と進化の解析に画期的な進展をもたらす。細胞株、ベクター、培養条件等を詳細に検討し、技術の確立を目指した。大阪市大の寺北明久教授らとの共同研究として行なった。

(2) PACの構造機能関連の解析（渡邊グループ）

PACの大量発現系開発：PACの構造と機能を解明するためには、十分量のタンパク質試料を取得することが望まれる。しかしながら、通常用いられる大腸菌や昆虫培養細胞の発現

系においては PAC 本来の活性を保持した試料は得られておらず、本研究ではミドリムシ近縁生物であるリーシュマニアにおける発現系の構築を行った。また、ミドリムシ自身で大量発現させることを狙って、ミドリムシの形質転換を試みた。

PAC の単一分子分光分析：PAC の大量取得が困難である現在、少量の試料で分析可能な測定系を利用することは、PAC の構造・機能解明に向けての有効なアプローチとなる。そこで、東工大の藤芳暁博士・松下道雄博士らとの共同で、共焦点レーザー光学系を用いた低温下での単一分子分光分析を行った。

PAC の構造と機能に関する理論解析：長谷川浩司博士（アドバンスソフト）との共同で、PAC を構成する機能ドメインのホモロジーモデリングを行い、フラビン結合特性、ATP 結合特性等の理論解析を行うとともに、ドッキング解析により PAC サブユニット全体構造の推測を行った。

PAC の単粒子解析：大阪大の宮崎直幸博士・岩崎憲治博士らとの共同で、ミドリムシから精製した PAC を電子顕微鏡で観察し、得られた画像から PAC の三次元構造を再構築した。

○ 研究成果

(1) 昆虫色覚系の解析（蟻川グループ）

色覚系の生理・解剖・進化学的解析：シロチョウ科 3 亜科、アゲハチョウ科 2 亜科からそれぞれ数種を選び、視物質 cDNA をクローニングしてその多様性について検討した。シロチョウでは青視物質の重複が、アゲハチョウでは長波長視物質の重複が共通して起きているが、重複の細かなパターンは亜科あるいは属のレベルで特徴的であることが分かった。シロチョウ科モンキチョウ亜科のモンキチョウについては詳細な解剖学および電気生理学的解析を行ない、近縁のモンシロチョウとの比較検討を行った。

チョウ類色覚機能の行動学的解析：アゲハ複眼には、紫外、紫、青、緑、赤、広帯域の 6 種の色受容細胞が含まれる。これらの細胞は 3 通りの異なる組合せで個眼に含まれているため、複眼は 3 タイプの個眼から構成されている。異なる色受容細胞あるいは個眼の機能分化の実体を解明するため、求蜜行動を指標として、波長弁別能、標的エッジ検出能、偏光弁別能を詳細に解析した。その結果、アゲハの色覚は紫外、青、緑、赤の 4 原色であること、エッジ検出には同じ 4 種の細胞を使った明度受容が必要であること、偏光振動面は明るさの違いとして弁別され、これにも同じセットの細胞が関与しているらしいことが分かった。

昆虫視物質の試験管内発現系の確立と応用：モンシロチョウ青視物質 PrB と紫視物質 PrV を HEK 細胞の系で発現・再構成することに成功した。決定した吸収スペクトルは、電気生理実験から予測された吸収スペクトルと非常によく一致した。これは、昆虫視物質の培養細胞系での発現成功例としてはミツバチに次いで 2 例目である。

(2) PAC の構造機能関連の解析（渡邊グループ）

PAC の大量発現系開発：ミドリムシ近縁生物であるリーシュマニア (*Leishmania tarentolae*) において PAC 発現系を構築した。この系は良好に PAC を発現し、可溶性タンパク質として回収することができた。粗精製されたタンパク質は顕著なアデニル酸シクラーゼ活性を示し、しかもそれは光照射により増大した。これは異種発現系において生化学的に PAC の光活性化能が確認された最初の例である。一方、ミドリムシ自身での大量発現を行わせるための基礎情報として、PAC の遺伝子構造の解明に取り組み、PAC を構成する 2 種類のサブユニットをコードする遺伝子をそれぞれ単離し、塩基配列を決定した。その結果、意外にもこれら 2 つの遺伝子のエクソン/イントロン構成は大きく異なることが明らかとなった。

PAC の単一分子分光分析：東工大グループとの共同で、反射型対物レンズを機軸とした共焦点光学系を用いて、液体ヘリウム温度下における PAC の単一分子蛍光測定に成功した。その結果、PAC 1 分子には 8 個の FAD が結合していることが示されたほか、フラビン結合領域の組換えタンパク質を用いた測定から、PAC には水素結合ネットワークの異なる 2 つの状態が存在し、これが光スイッチングを反映したものであることが示唆された。これは低温下におけるフラビンタンパク質の単一分子分光測定の最初の例であるとともに、PAC の光活性化の機構解明に向けての大きな一歩である。

PAC の構造と機能に関する理論解析：目下のところ、PAC 分子の全体像は全く不明だが、PAC を構成する機能ドメイン、すなわち、フラビン結合領域 (F1, F2) およびアデニル酸シクラーゼ触媒領域 (C1, C2) については、それぞれ他生物の類似タンパク質において、結晶構造解析が行われている。それらの情報を元に、PAC の機能ドメインのホモロジーモデリングを行い、フラビン結合特性、ATP 結合特性等の理論解析を行った。その結果、F1 と F2 のフラビン結合性の違いが、発色団遠方アミノ酸残基の寄与によることが示唆されたほか、C1 が ATP 結合に直接関与していることが示唆された。さらに、フラビン結合領域とアデニル酸シクラーゼ触媒領域のドッキング解析を行い、その結果、F1 と C2、F2 と C1 の高い親和性が示され、対称性の良い PAC 分子モデルが構築された。

PAC の単粒子解析：大阪大グループと共同で電子顕微鏡による PAC の単粒子解析を行った。ミドリムシから精製した PAC を観察して得られた数千の電子顕微鏡画像をクラス分けし、逆投影によって PAC 分子の三次元構造を再構築した。その結果、四量体構造が明瞭に示され、この構造にはホモロジーモデリングで推測された PAC のサブユニット構造が良く適合した。さらに、ミドリムシの光受容オルガネラの格子状構造も PAC の配置で説明できることが示された。これらのことは、初めて PAC 分子の実体が見えたという画期的な進捗である。

○ 事業の成果

本事業では、アゲハに見られる多様な個眼が、それぞれに異なる機能を担っていることが初めて示された。個眼多様性は比較的最近になって見つかった現象だが、アゲハ以外の種でも広く見つかっており、類似の機能分化はこれから次々に見つかるであろう。そ

していずれ、無脊椎動物視覚機能の基本的な性質のひとつとして確立されると考えられる。ただし個眼多様性には種間差が大きいので、現時点での安易な一般化は危険である。多様性は主として亜科レベルでくくられる傾向が分かったため、これを念頭に進化のイベントを統一的に理解できるレベルまで個別のデータを積み重ねた上で、一般化を試みる必要がある。

色覚進化の昆虫視物質の試験管内発現系が確立されたことは特筆に値する。今回はモンシロチョウの短波長視物質2種の発現に成功した。生理学的実験結果ともよく符合するので、正しい情報が得られていると考えて良い。今後、無脊椎動物色覚系の分子生理学的な発展は多いに期待される。ただし、試みた視物質のすべてが発現できたわけではなくその原因は未だ不明なので、方法はさらに改良の余地がある。

微生物の系でも重要な結果がいくつか得られた。タンパク質の構造と機能を解明するための常道としては、X線結晶構造解析、NMR、赤外分光、ラマン分光等による解析が挙げられるが、これらはいずれも大量の試料を必要とする。PACについては大腸菌等の異種発現系では本来の活性を保持した組換えタンパク質を得ることができていなかったが、本研究においてリーシュマニアの発現系を用いることで光活性化されるタンパク質が得られた。しかしながら、精製度と量の点でまだ不十分であり、さらなる条件検討が必要であるが、結晶構造解析等へ向けての足掛かりが出来た点は特筆に値する。

一方、単一分子分光分析ならびに単粒子解析は、大量の試料は必要とせず、従来法によりミドリムシから精製したPACを用いて解析を進めることができた。それぞれの結果はPACの機能ならびに構造を可視化できたという点でインパクトのあるものであり、今後より正確に制御された光条件下での計測を行うことで、光活性化のメカニズムそのものに踏み込むことが可能となろう。

本研究は、動物視覚系（蟻川グループ）と微生物光受容系（渡邊グループ）のジョイントとして実施した。両グループとも葉山に実験室を立ち上げた時期とほぼ重なり、計画前半の2年間は実験設備の整備に主力を傾注することとなった。その過程にありつつも、研究期間を通じて個別の研究成果は着実に上がった。両グループに在籍する若手研究者の相互交流は活発で、たとえば光エネルギーの測定・評価や培養細胞系におけるタンパク質発現などで具体的な協力が行なわれた。また本研究は、グループ内に在籍する総研大生はもとより、他分野の院生の教育にも先導科学実習や先導科学特別研究I（研究室ローテーション）を通して深く携わり、生命共生体進化学専攻における生命科学系の教育に大きな役割を果たした。

研究成果

原著論文

1. Matsunaga S, Uchida H, Iseki M, Watanabe M, Murakami A (2010) Flagellar motions in phototactic steering in a brown algal swarmer. *Photochemistry and Photobiology* 86:374-381
2. Nakatani Y, Matsumoto Y, Mori Y, Hirashima D, Nishino H, Arikawa K, Mizunami M (2009) Why the carrot is more effective than the stick: different dynamics of punishment memory and reward memory and its possible biological basis. *Neurobiology of Learning and Memory*, 92:370-380
3. Arikawa K, Pirih P, Stavenga DG (2009) Rhabdom constriction enhances filtering by the red screening pigment in the eye of the Eastern Pale Clouded Yellow butterfly, *Colias erate* (Pieridae). *Journal of Experimental Biology*, 212:2057-2064
4. Awata H, Wakakuwa M, Arikawa K (2009) Evolution of color vision in pierid butterflies: Blue opsin duplication, ommatidial heterogeneity and eye regionalization in *Colias erate*. *Journal of Comparative Physiology A*, 195:401-408
5. Obara Y, Koshitaka H, Arikawa K (2008) Better mate in the shade: Enhancement of male mating behaviour in the cabbage butterfly, *Pieris rapae crucivora*, in UV-rich environment. *Journal of Experimental Biology*, 211:3698-3702
6. Kinoshita M, Takahashi Y, Arikawa K (2008) Simultaneous color contrast in foraging swallowtail butterfly, *Papilio xuthus*. *Journal of Experimental Biology*, 211:3504-3511
7. Stavenga DG, Arikawa K (2008) One rhodopsin per photoreceptor – Iro-C genes break the rule. *PLoS Biology*, 6:675-677.
8. Koshitaka H, Kinoshita M, Vorobyev M, Arikawa K (2008) Tetrachromacy in a butterfly that has eight spectral classes of visual photoreceptors. *Proceedings of Royal Society of London B*, 275:947-954.
9. Maruyama S, Misawa K, Iseki M, Watanabe M, Nozaki H (2008) Origins of a cyanobacterial 6-phosphogluconate dehydrogenase in plastid-lacking eukaryotes. *BMC Evolutionary Biology* 8:151
10. Takemura S, Stavenga DG, Arikawa K (2007) Absence of butterfly eye shine and tapetum in Anthocharidini (Pieridae). *Journal of Experimental Biology*, 210:3075-3081.
11. Lau TFS, Ohba N, Arikawa K, Meyer-Rochow VB (2007) Sexual dimorphism in the compound eye of *Rhagophthalmus ohbai* (Coleoptera: Rhagophthalmidae): II. Physiology and function of the eye of the male. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 10: 27-31
12. Wakakuwa M, Stavenga DG, Arikawa K (2007) Spectral organization of ommatidia in flower-visiting insects. *Photochemistry and Photobiology*, 83:27-34
13. Honda D, Shono T, Kimura K, Fujita S, Iseki M, Makino Y, Murakami A (2007) Homologs of sexually induced gene 1 (*sig1*) product constitute the stramenopile mastigonemes. *Protist* 158, 77-88
14. Nozaki H, Iseki M, Hasegawa M, Misawa K, Nakada T, Sasaki N, Watanabe M (2007) Phylogeny of primary photosynthetic eukaryotes as deduced from slowly evolving nuclear genes. *Molecular Biology and Evolution* 24, 1592-1595
15. Nagahama T, Suzuki T, Yoshikawa S, Iseki M (2007) Functional transplant of photoactivated adenylyl cyclase (PAC) into *Aplysia* sensory neurons. *Neuroscience Research* 59, 81-88
16. Shihira-Ishikawa I, Nakamura T, Higashi S, Watanabe M (2007) Distinct responses of chloroplasts to blue and green laser microbeam irradiations in the centric diatom *Pleurosira laevis*. *Photochemistry and Photobiology*, 83: 1101-1109
17. Stavenga DG, Arikawa K (2006) Evolution of color and vision of butterflies. *Arthropod Structure and Development*, 35:307-318
18. Takeuchi Y, Arikawa K, Kinoshita M (2006) Color discrimination at the spatial resolution limit in a swallowtail butterfly, *Papilio xuthus*. *Journal of Experimental Biology*, 209:2873-2879

19. Kinoshita M, Kurihara D, Tsutaya A, Arikawa K (2006) Blue and double-peaked green receptors depend on ommatidial type in the eye of the Japanese yellow swallowtail *Papilio xuthus*. *Zoological Science*, 23:199-204
20. Hori S, Takeuchi H, Arikawa K, Kinoshita M, Ichikawa N, Sasaki M, Kubo T (2006) Associative visual learning, color discrimination, and chromatic adaptation in the harnessed honeybee *Apis mellifera* L. *Journal of Comparative Physiology A*, 192:691-700
21. Stavenga DG, Foletti S, Palasantzas G, Arikawa K (2006) Light on the moth-eye corneal nipple array of butterflies. *Proceedings of Royal Society of London B*, 273:661-667
22. Kawada H, Tatsuta H, Arikawa K, Takagi M (2006) Comparative study on the relationship between photoperiodic host-seeking behavioral pattern and the eye parameter of mosquitoes *Journal of Insect Physiology*, 52:67-75
23. Takemura S, Arikawa K (2006) Ommatidial type-specific inter-photoreceptor connections in the lamina of the swallowtail butterfly, *xuthus* *Journal of Comparative Neurology*, 494:663-672

総説／解説

1. Arikawa K: Butterfly eyes and color vision. In: Barth FG, Humphrey J, Srinivasan M (eds) *Frontiers in sensing – Biology and engineering*, Springer, *in press*
2. 蟻川謙太郎: 昆虫の光感覚. 光科学研究の最前線 2、JILS, 印刷中
3. 蟻川謙太郎: チョウの色覚と紫外線. からだと光の事典, 朝倉書店, 印刷中
4. 蟻川謙太郎: 紫外線を見る一昆虫の色覚. いろいろな動物の感覚 (江口・蟻川編) 学会出版センター, 印刷中
5. 若桑基博、蟻川謙太郎: 訪花性昆虫複眼の構造とその多様性. 設計工学, 印刷中
6. 蟻川謙太郎 (2009) チョウに色は見えるのか? *MilSil* (国立科学博物館) 4: 17-19
7. 蟻川謙太郎 (2009) チョウ類における視物質重複と色覚の進化. *科学* (岩波書店) 79: 654-659
8. 蟻川謙太郎 (2009) 複眼という眼. 見える光, 見えない光: 動物と光のかかわり (寺北・蟻川編), 共立出版, 57-77
9. 渡辺正勝・鈴木武士 (2009) 単細胞生物の「目」. 見える光, 見えない光: 動物と光のかかわり (寺北・蟻川編), 共立出版 96-113
10. 蟻川謙太郎 (2008) チョウ類複眼の構造と機能. *昆虫ミメティクスとナノマテリアル* (北村編) NTS 出版, 164-178
11. 蟻川謙太郎 (2008) 視覚と光受容. *昆虫ミメティクスハンドブック* (下澤・針山編) NTS 出版, 273-283
12. 蟻川謙太郎 (2008) 蝶. *科学* (岩波書店) 78: 865
13. 蟻川謙太郎 (2008) 昆虫一次視覚中枢における超情報処理機構—アゲハ色覚の神経行動学的研究. *ブレインサイエンス・レビュー* 2008. 199-223.
14. 蟻川謙太郎 (2008) 昆虫に世界はどう見える? *昆虫の脳* (山口編) 技術評論社, 219-251.
15. 蟻川謙太郎 (2007) 動物の見る世界を探る. *生命を見る・観る・診る—生命の教養学 III*. 慶応義塾大学出版会. 73-95
16. 木下充代・蟻川謙太郎 (2007) アゲハチョウが見ている色の世界. *Butterflies*, 45. 日本蝶類学会, 23-30
17. 蟻川謙太郎 (2007) 昆虫の見る世界. 21世紀の動物科学 第8巻 行動とコミュニケーション (岡・蟻川編) 培風館, 70-98.
18. 蟻川謙太郎 (2007) 視細胞の分光感度. *生物物理学ハンドブック* (石渡他編) 朝倉書店, 433-435.
19. 渡辺正勝・伊関峰生・松永茂 (2007) 微細藻類の光運動反応—単細胞鞭毛藻ミドリムシを例に一遺伝 61, 81-82
20. 伊関峰生 (2007) ミドリムシにおける光センシングの分子機構 *原生動物学雑誌* 40, 93-100
21. 鈴木武士・渡辺正勝 (2007) 走光性 山村庄亮・長谷川宏司編著「天然物化学—植物編—」アイピーシー

22. 若桑基博、蟻川謙太郎 (2006) 訪花性昆虫複眼の分子デザイン. 昆虫 DNA 研究会ニュースレター、52:19
23. Iseki M, Matsunaga S, Murakami A, Watanabe M (2006) Photoactivated adenylyl cyclase (PAC), the photoreceptor flavoprotein with intrinsic effector function mediating euglenoid photomovements. *In Comprehensive Series in Photochemical & Photobiological Sciences, Flavins: Photochemistry and Photobiology* (Silva, E. and Edwards, A. M., eds.), RSC Publishing, 271-286

招待講演

1. 蟻川謙太郎: コメントー生き物の世界をとおして覗く世界ー生理学が支える認知生態学の可能性. 第41回種生物学会シンポジウム、八王子大学セミナーハウス 2009年12月
2. 蟻川謙太郎: チョウ類色覚系の構造と進化. 信州大学理学部特別セミナー、信州大学、2009年9月、松本
3. Arikawa K: The world of insects: Neuroethology of butterfly color vision. Special lecture at JSPS Summer Program 2009, Shonan Village Center, Hayama, Japan
4. Arikawa K: Spectral heterogeneity of ommatidia and its development in the eyes of the butterfly *Papilio xuthus*. "Visual processing in insects" May 2009, HHMI Janelia Farm Research Campus, Virginia USA.
5. Arikawa K: The color vision system in butterflies. IBRO-ANS Advanced Neuroscience School, January 2009, Australian National University Kioloa Campus, NSW, Australia.
6. 蟻川謙太郎: 昆虫の視覚世界を探る. 第3回中部大学ライフサイエンスフォーラム. 2008年12月中部大学、春日井
7. 蟻川謙太郎: モンシロチョウの複眼を解剖する. 信州大学理学部特別セミナー、信州大学、2008年9月、松本
8. Arikawa K: Retinal organization and color vision in a butterfly, *Papilio xuthus*. "Symposium: Senses and Behavior" International Conference on Sensors and Sensing in Biology and Engineering. October, 2008, Cetraro (Calabria) Italy
9. Arikawa K: International Seminar: Evolutionary Studies in Behavioral Neuroscience. June 2008, Shonan Village Center, Hayama, Japan
10. Arikawa K: Color and polarization vision of a swallowtail butterfly, *Papilio xuthus*. Polarization Conference: New directions in research on polarization of light. June 2006, Heron Island, Australia
11. 蟻川謙太郎: 昆虫の見る色世界を探る. 日本蝶類学会特別講演. 2008年3月、東京
12. 蟻川謙太郎: 複眼で見る世界ー昆虫視覚系の神経行動学. 岡山大学重点教育プロジェクト第1回公開シンポジウム「これからの大学院教育を考える」学術講演、岡山大学、2007年12月、岡山
13. 蟻川謙太郎: アゲハ色覚の神経行動学、岡山大学理学部特別セミナー、岡山大学、2007年12月、岡山
14. 蟻川謙太郎: チョウが見る世界ー昆虫の視覚生態学. 信州大学理学部特別セミナー、信州大学、2007年11月、松本
15. 蟻川謙太郎: 昆虫視細胞の分光感度決定機構. バイオ分子センサー連携研究プロジェクトレクチャーコース、2007年8月、岡崎
16. Arikawa K: Retinal properties underlying butterfly color vision. "Symposium: Visual ecology" The 5th International conference on the Biology of Butterflies, July 2007, Rome Italy
17. Arikawa K: Visual system of *Papilio* butterfly. "Symposium: *Drosophila* and beyond: New dimension of insect biology" The 8th Meeting of Japan *Drosophila* Research Conference, July 2007, Awaji Yumebutai International Conference Center, Hyogo.
18. 蟻川謙太郎: チョウの色覚と紫外線 太陽紫外線防御研究委員会第17回シンポジウム、第一ホテル東京、2007年3月東京
19. 蟻川謙太郎: チョウが見る世界 総合研究大学院大学サイエンスカフェ 2007年6月、葉山

20. 蟻川謙太郎: チョウには何が見えている? 昆虫視覚の神経行動学 先導科学研究科学術講演会、2006年11月、総合研究大学院大学、葉山
21. 蟻川謙太郎: 昆虫の目で見る。複眼の構造と機能 第3回生命科学研究科合同セミナー、2006年11月、つま恋ヤマハリゾート、掛川。
22. Arikawa K: Color vision and eye organization in butterflies. Interdisciplinary Sensory Systems Workshop "Invertebrate Arikawa K: Color Vision" October 2006, University of Virginia, Charlottesville, USA
23. 蟻川謙太郎: チョウの色世界をさぐる 総合研究大学院大学先導科学研究科新専攻設立記念講演会、2006年7月、学士会館、東京
24. 視細胞の分光感度はどう決まるかーモンシロチョウ複眼の視細胞内色素ー 生理学研究所研究会、2006年6月、生理学研究所、岡崎
25. 蟻川謙太郎: 昆虫は世界をどう見るか? 生命の教養学セミナー、2006年4月、慶応義塾大学、横浜
26. 蟻川謙太郎: チョウは色を見るか 鶴見セミナー、2006年1月、横浜市立大学鶴見キャンパス、横浜
27. Watanabe M, Iseki M, Fujiyoshi S, Hirano M, Matsushita M, Miyazaki N, Iwasaki K: Single molecule studies on fluorescence and 3-dimensional structure of photoactivated adenylyl cyclase (PAC), the sensor for photoavoidance in *Euglena*. The 13th Congress of the European Society for Photobiology, Wroclaw, Poland 8 September 2009.
28. Iseki M, Fujiyoshi S, Hirano M, Matsushita M, Miyazaki N, Iwasaki K, Watanabe M: Single molecule analyses of structure and function of photoactivated adenylyl cyclase (PAC), a sensor for photomovement in *Euglena*. The 15th International Congress on Photobiology, Düsseldorf, Germany 20 June 2009.
29. Nagahama T, Suzuki T, Yoshikawa S, Iseki M: Functional transplant of photoactivated adenylyl cyclase (PAC) into *Aplysia* sensory neurons. The 34th Meeting of the American Society for Photobiology, Burlingame, CA, 25 June 2008.
30. Watanabe M: The 3rd Asia and Oceania Conference on Photobiology (AOCP), Beijing, 17-20 November 2006.
31. Iseki M, Watanabe M: Photoactivation kinetics of the microalgal blue-light sensor, photoactivated adenylyl cyclase (PAC) International Plant Photobiology Meeting, Paris 24-28 April 2006.
32. 渡辺正勝・松永 茂・伊関峰生・鈴木武士 微細藻類の光センシング機構における細胞内共生 日本進化学会 2006年大会 2006年8月29-31日(東京)(招待講演)

国際学会 (応募発表)

1. Pirih P, Arikawa K, Stavenga DG: Eye Regionalisation in the Pale Clouded Yellow, *Colias erate*. International Conference on Invertebrate Vision, August 2008, Baeckaskog Castle, Sweden.
2. Arikawa K, Nakatani Y, Wakakuwa M, Kinoshita M: Color vision and compound eye of the small white butterfly, *Pieris rapae crucivora*. International Conference on Invertebrate Vision, August 2008, Baeckaskog Castle, Sweden.
3. Kinoshita M, Yamazato K, Arikawa K: Do *Papilio* butterflies see polarized light as color or brightness? International Conference on Invertebrate Vision, August 2008, Baeckaskog Castle, Sweden.
4. Kinoshita M, Arikawa K: Identification of the neuronal pathway of visual information in the brain of the *Papilio* butterfly. The 8th International Congress of Neuroethology, July 2007, UBC, Vancouver Canada.
5. Arikawa K, Iwanaga T, Wakakuwa M, Kinoshita M: Temporal expression pattern of opsin mRNAs in developing eye of the butterfly *Papilio xuthus*. The 8th International Congress of Neuroethology, July 2007, UBC, Vancouver Canada.
6. Nagahama T, Suzuki T, Yoshikawa S, Iseki M: Functional transplant of photoactivated adenylyl

- cyclase (PAC) into sensory neurons in *Aplysia* pleural ganglia. The 8th Asia Pacific Marine Biotechnology Conference, Busan, Korea 13 November 2008.
7. Nozaki H, Iseki M, Hasegawa M, Misawa K, Nakada T, Sasaki N, Watanabe M: "Super"plant kingdom reinstated: nonmonophyly of primary photosynthetic eukaryotes as deduced from slowly evolving nuclear genes. PSA Annual Meeting 2007 with the International Society of Protistologists (ISOP) in Providence, Rhode Island, USA 6-9 August 2007.
 8. Maruyama S, Iseki M, Watanabe M, Nozaki H: Origin of the cyanobacterial gnd gene in secondary phototrophs and non-photosynthetic protists. PSA Annual Meeting 2007 with the International Society of Protistologists (ISOP) in Providence, Rhode Island, USA 6-9 August 2007.

国内学会（応募発表）

1. 若桑基博、小柳光正、寺北明久、七田芳則、蟻川謙太郎：モンシロチョウ青受容型視物質 2種の波長制御に関わるアミノ酸残基の同定吸収特性．第34回日本比較内分泌学会日本比較生理製か学会第31回大会合同大会 2009年10月、千里ライフサイエンスセンター 大阪
2. 永田崇、小柳光正、塚本寿夫、磯野邦夫、蟻川謙太郎、寺北明久：ハエトリグモ主眼の4層構造をなす視細胞で機能する視物質の吸収特性．第34回日本比較内分泌学会日本比較生理製か学会第31回大会合同大会 2009年10月、千里ライフサイエンスセンター 大阪
3. 栗田ひろ子、松下敦子、若桑基博、蟻川謙太郎：ウスバシロチョウ（アゲハチョウ科）における個眼多様性．日本動物学会第80回大会 2009年9月、静岡県コンベンションセンター 静岡
4. 木下充代、エルジュンディ バジル、蟻川謙太郎、ホンベルグ ウベ：アゲハにおける視葉からキノコ体への神経経路．日本動物学会第80回大会 2009年9月、静岡県コンベンションセンター 静岡
5. 越高久晴、木下充代、蟻川謙太郎：求蜜行動中のアゲハにおける着地に関わる色受容細胞．日本動物学会第80回大会 2009年9月、静岡県コンベンションセンター 静岡
6. 小柳光正、永田崇、塚本寿夫、磯野邦夫、蟻川謙太郎、寺北明久：4層構造の網膜が関与するハエトリグモの視覚の分子基盤．日本動物学会第80回大会 2009年9月、静岡県コンベンションセンター 静岡
7. 岩田達也・渡辺昭英・伊関峰生・渡辺正勝・神取秀樹 2種類のBLUFドメイン、AppAとPACの赤外分光解析 第47回日本生物物理学会年会 2009年11月1日（徳島）
8. 藤芳 暁・平野充遥・松下道雄・伊関峰生・渡辺正勝 光活性化アデニル酸シクラーゼの単一タンパク質分光 第3回分子科学討論会 2009年9月 名古屋
9. 松永 茂・内田博子・伊関峰生・渡辺正勝・村上明男 褐藻遊走子の走光性：光で起こる後鞭毛の一過性の速い振動が遊泳方向を調節する 日本植物学会第73回大会 2009年9月 山形
10. 宮崎直幸・伊関峰生・渡辺正勝・足立伸一・朴三用・岩崎憲治 電子顕微鏡によるミドリムシ光センサータンパク質 Photoactivated Adenylyl Cyclase (PAC) の構造解析 第9回日本蛋白質科学会年会 2009年5月 熊本
11. 若桑基博、小柳光正、寺北明久、七田芳則、蟻川謙太郎：モンシロチョウ短波長受容型視物質2種の試験管内再構成．日本動物学会第79回大会 2008年9月、福岡大学 福岡
12. 岡村純也、川崎雅司、木下充代、蟻川謙太郎：ナミアゲハ成虫視葉板における視覚二次ニューロンの分光感度．日本動物学会第79回大会 2008年9月、福岡大学 福岡
13. 栗田ひろ子、若桑基博、蟻川謙太郎：モンキチョウ複眼におけるオプシンと個眼多様性．日本動物学会第79回大会 2008年9月、福岡大学 福岡
14. 柴崎弘道、岡村純也、木下充代、蟻川謙太郎：ナミアゲハ視覚中枢における長視細胞の形態．日本動物学会第78回大会 2007年9月、弘前大学 弘前
15. 大宮祐男、若桑基博、蟻川謙太郎：モンシロチョウ複眼背側における個眼の構造．日本動物学会第78回大会 2007年9月、弘前大学 弘前

16. 仲谷嘉洋、蟻川謙太郎：モンシロチョウ色覚の行動学的証明。日本動物学会第78回大会 2007年9月，弘前大学 弘前
17. 伊関峰生、鈴木武士、松永茂、渡辺正勝 ユーグレナの光センサー、光活性化アデニル酸シクラーゼの遺伝子構造 ユーグレナ研究会第23回研究会 2007年11月 大阪
18. Hasegawa K, Iseki M, Suzuki T, Matsunaga S, Nakano T, Watanabe M: Flavin-Binding Properties of Eukaryotic BLUF Domains of Photoactivated Adenylyl Cyclase (PAC) in *Euglena gracilis* : Ab initio Fragment Molecular Orbital (FMO) Calculations. 情報計算化学生物学会 2007年大会 2007年10月 広島
19. 平野充遥・藤原正規・藤芳 暁・松下道雄・伊関峰生・渡辺正勝 二波長の励起光を同時に利用できる低温の単一タンパク質分光装置の開発 第1回分子科学討論会 2007年9月 仙台
20. 丸山真一郎・伊関峰生・渡辺正勝・野崎久義 二次共生藻および非光合成原生物におけるシアノバクテリア型遺伝子の進化的系譜 日本植物学会第71回大会 2007年9月 野田
21. 本多大輔・庄野孝範・木村圭・藤田悟史・伊関峰生・牧野由美子・村上明男 *Sexual induced gene 1* ホモログ産物は、ストラメノパイル類のマスティゴネマを構成していた 日本進化原生物学研究会第3回研究会 2007年7月 横浜
22. 柴崎弘道、木下充代、蟻川謙太郎：ナミアゲハ複眼における個眼間角度と視細胞受容角および空間分解能。日本動物学会第77回大会 2006年9月，鳥取大学 松江
23. 岩永知幸，若桑基博，木下充代，蟻川謙太郎：蛹期のナミアゲハ個眼における視物質発現と感桿形態形成。日本動物学会第77回大会 2006年9月，鳥取大学 松江
24. 若桑基博，蟻川謙太郎：ミツバチ複眼の部域による色受容細胞分布の特異性。日本動物学会第77回大会 2006年9月，鳥取大学 松江
25. 長濱辰文・鈴木武士・吉川伸哉・伊関峰生 光活性化アデニル酸シクラーゼ（PAC）の神経生物学研究への利用 日本比較生理生化学会第28回大会 2006年7月 浜松
26. 藤芳 暁・平野充遥・古屋 陽・藤原正規・松下道雄・伊関峰生・渡辺正勝 低温のタンパク質分光の励起過程の検討 第2回分子科学討論会 2008年9月 福岡
27. 長谷川浩司・伊関峰生・鈴木武士・松永茂・中野達也・渡辺正勝 フラグメント分子軌道法によるミドリムシ光センサーPACとフラビン発色団との相互作用解析 日本農芸化学会 2008年度大会 2008年3月 名古屋

特許

なし。