

戦略的国際科学技術協力推進事業（日本－フランス 研究交流）

1. 研究課題名：「海洋性細菌の走磁性を支えるべん毛構造と磁気刺激反応の解明」
2. 研究期間：平成22年1月～平成25年3月
3. 支援額： 総額 14,400,000 円
4. 主な参加研究者名：

日本側（研究代表者を含め6名までを記載）

	氏名	所属	役職
研究代表者	難波啓一	大阪大学大学院生命機能研究科	教授
研究者	加藤貴之	同上	助教
研究者	南野徹	同上	准教授
研究者	宮田知子	同上	特任助教
研究者	RUAN, Juanfang	同上	特任研究員
研究者	川本晃大	同上	大学院生
参加研究者 のべ 10 名			

相手側（研究代表者を含め6名までを記載）

	氏名	所属	役職
研究代表者	WU, Long-Fei	CNRS, INSB, Laboratoire de Chimie Bacterienne	Research Director
研究者	SANTINI, Claire-Lise	同上	IE1
研究者	PHILIPPE, Nadège	同上	Postdoc
研究者	ZHANG, Wei-Jia	同上	Ph.D. student
研究者	ZHANG, Sheng-Da	同上	Ph.D. student
参加研究者 のべ 5 名			

5. 研究・交流の目的

極めて高速で泳ぎ、微弱な磁場を感じて走性行動する磁性細菌特有の、べん毛超分子の立体構造と動作機構を解明することを目指した。

6. 研究・交流の成果

6-1 研究の成果

Long-Fei Wu博士のグループが地中海から採取して単離と培養に成功したMO-1株と呼ばれる磁性細菌は、べん毛を回転させることにより300 $\mu\text{m/s}$ という、大腸菌やサルモネラ菌の10倍にもおよぶ驚くべき超高速で泳ぐ。これはMO-1べん毛のユニークな構造によるものであると考え、べん毛の構造と機能の解明を目指して共同研究を開始した。

MO-1株の培養条件は特殊であるためWu博士の研究室を訪問し、培養条件や培養方法を直接学び、大阪大学に戻って最適化した。そして、クライオ電子線トモグラフィーをほぼ完全に自動でできるよう設計された電子顕微鏡を用い、MO-1の細胞や単離したべん毛のトモグラフィーによる立体構造観察を行った。細胞から伸びる2本のべん毛は、実はそれぞれが7本のべん毛の束からなる複雑なべん毛装置であることはわかっていたが、トモグラフィーによる立体像観察により、7本のべん毛が強固な束となって鞘に包まれ、べん毛繊維間

を数多くの微小繊維が埋めていること、根元で7個のべん毛基部体が六方格子状に規則配列し連結されていること、そして鞘が構成蛋白質のらせん配列によりできていることを明らかにした。

なかでも驚くべき発見は、六方格子状に規則配列した個々のべん毛基部体の周囲を6個の小さな基部体を取り囲んでいたことである。これらは微小繊維の基部体で、総計24個の基部体が観察された。我々はこの複雑な構造を、水平連結六方7連べん毛モーターと名付けた。

基部体の存在は微小繊維も回転可能であること、そして24本の微小繊維が7本のべん毛繊維の間にべん毛と逆回転することで鞘に包まれた緊密な束の中で同方向に回転するべん毛繊維間の大きな摩擦を低減していることを強く示唆する。また興味深いことに、この六方格子状の規則配列は、哺乳動物骨格筋の細胞内横断面でミオシンの太い繊維とアクチンの細い繊維が形成する規則配列と全く同じである。

プロペラとしてのべん毛繊維の推進効率はその粘性流体抵抗と回転速度に比例し、粘性流体抵抗は繊維の直径の二乗に比例する。サルモネラ菌のように数本のべん毛繊維が緩やかに束を形成する場合、推進効率は単純な加算であるが、MO-1株のように7本のべん毛と24本の微小繊維が緊密な束となり鞘に包まれている場合は、その直径100 nmが粘性流体抵抗を決めるパラメータとなり、推進効率は個々のべん毛繊維の100倍にもなる。しかも、微小繊維の逆回転によりべん毛繊維は摩擦抵抗を受けることなく高速回転でき、束としてのべん毛装置も高速回転できるように設計されている。これが、MO-1株が300 $\mu\text{m/s}$ という超高速で泳ぐしくみである。体長わずか2ミクロンの微生物にこれほど複雑な運動器官が存在することは驚くべき発見であった。

6-2 人的交流の成果

・MO-1株の培養条件と培養法を学ぶためフランスの研究室を訪問した二人の研究スタッフは、すでに海外活動経験は豊富であったが、それでも異分野の研究に直に触れる機会を得たという意味で貴重な経験であった。フランスの研究室の学生や研究員にとっても同様であったと思われる。物理的な行き来は3度だけであったが、メールやスカイプによる議論や相談の回数は数え切れず、共著の論文も投稿中の1報を含めて3報となった。研究期間終了後も残された研究課題は山積みであり、今後も共同研究を通じた研究交流を継続する予定である。

7. 主な論文発表・特許等（5件以内）

相手側との共著論文については、その旨を備考欄にご記載ください。

論文 or 特許	・論文の場合： 著者名、タイトル、掲載誌名、巻、号、ページ、発行年 ・特許の場合： 知的財産権の種類、発明等の名称、出願国、出願日、 出願番号、出願人、発明者等	備考
論文	Zhang, W.-J., Santini, C.-L., Bernadac, A., Ruan, J., Zhang, S.-D., Kato, T., Li, Y., Namba, K. & Wu, L.-F. Complex Spatial Organization and Flagellin Composition of Flagellar Propeller from Marine Magnetotactic Ovoid Strain MO-1. J. Mol. Biol. 416, 558-570, 2012.	共著 論文
論文	Ruan, J., Kato, T., Santini, C.-L., Miyata, T., Kawamoto, A., Zhang, W.-J., Bernadac, A., Wu, L.-F. and Namba, K. Architecture of a flagellar apparatus in the fast-swimming magnetotactic bacterium MO-1. Proc. Natl Acad. Sci. USA , 109, 20643-20648, 2012.	共著 論文