

博士学位論文

ザリガニの嗅覚探索行動の解析と

噴流を利用した能動化学センシング手法の開発

Investigations of Olfactory Search Behavior of Crayfish and  
Development of Active Chemical Sensing Methods that  
Use Jet Discharge

2020年6月

東京農工大学大学院

生物システム応用科学府

生物機能システム科学専攻

石田 華子

# Abstract

Crayfish generate jet-like water currents during food search by using fan-like flagella of their maxillipeds. The jets generated toward their sides induce an inflow from the surroundings to the jets, which promotes odor sample collection from the surroundings to their olfactory organs. Crayfish also use their forward gill currents to deliver their urine to their opponents during their territorial fights. The objective of this research is to study the effects of such active jet discharge in crayfish behavior and to investigate applications of jet discharge in chemical sensing robots.

First of all, flow fields generated by a device that models the jet discharge of crayfish were investigated. The results of experiments and computational fluid dynamics (CFD) simulations showed that water samples are drawn from the surroundings to the jet discharge device in much shorter time than by simple water suction. The results also showed that there is a tradeoff between the angular range of chemical sample collection and the sample collection time.

It is also known that crayfish can generate the jets in several different directions and change the direction of the inflow. To investigate this behavior, a small ink discharge device was developed. The device enables ink release near the maxillipeds of a freely walking crayfish so that the directions of the jets can be visualized. It was shown for the first time that crayfish adaptively change the jet directions during their food search.

Finally, a gas sensing method that uses active jet discharge was proposed for an aerial robot. As a crayfish uses a water current to deliver its urine to the opponent, the proposed system uses the jets generated by the two connected quadcopters to deliver gas drifting near the ground to an onboard gas sensor. The CFD simulation results showed the feasibility of this method for methane emission monitoring in landfill sites.

# 概要

ザリガニは、様々な場面で匂いを使ったコミュニケーションを行っており、その際に、自ら生成した流れを上手く利用している。例えば縄張り争いの際には、鰓から排出された水で噴流（噴き出す流れ）を作り、自分の尿を相手に送って匂いを相手に伝える。また、餌を探す際にも、噴流を利用して匂いを引き寄せていると言われている。この場合には、口元にある3対の顎脚を振って左右に噴流を作り出す。すると、周囲の流体が噴流に巻き込まれ、噴流に向かう流れが誘起される。ザリガニに向かって周囲の流体と共に匂いが引き寄せられるため、ザリガニは餌を探索する際に高感度に匂いを検出できると言われている。さらに、ザリガニは噴流を放出する方向を変え、匂いを引き寄せる流れの指向性を操ることができる。これは他の生物では見られない行動であり、このザリガニの行動を解明できれば、漏れ出た化学物質を辿って環境汚染物質などを探索するロボットの開発に役立つと期待される。

本研究では、ザリガニの噴流生成の効果を解析すると共に、噴流を応用した能動センシング手法の開発を行った。まず、左右に噴流を放出する装置により、嗅覚探索行動時におけるザリガニの噴流生成をモデル化し、噴流の方向を変えた際の流体の引き寄せ範囲と速度を実験的に評価すると共に、数値流体力学シミュレーションによってその効果を定量的に評価した。さらに、自由に歩行するザリガニのアクティブな噴流生成を観察するため、ザリガニが背負って歩ける大きさの噴流可視化装置を開発し、ザリガニの嗅覚探索行動の観察実験を行い、行動戦略を解析した。また、ザリガニの縄張り行動における噴流生成をヒントに、噴流を利用して地表付近に漂うガスを巻き上げ、ドローン上のセンサに届けて検出する手法を着想した。ごみの埋立地におけるメタンガスモニタリングへの応用を目指し、数値流体力学シミュレーションで流れ場を計算し、実現可能性を示した。本論文の各章の概略を、以下に示す。

第1章では、ザリガニのケミカルコミュニケーションを紹介し、水中化学物質源探査ロボットに関する研究と、ごみの埋立地におけるメタンガスモニタリングの現状をまとめた。そして、本研究の位置づけと目的を述べた。

第2章では、ザリガニをモデル化した噴流生成装置の周囲に形成される流れ

場を、実験と数値流体力学シミュレーションの両面から解析した結果を述べた。装置はザリガニと同程度の大きさであり、正面から水を吸引し、その水を左右から噴流として放出する。ザリガニがどの範囲にある匂いをどの程度の速さで引き寄せているのか、定量的に解析した。噴流の放出方向を変えると、流体を引き寄せることができる範囲が変わることが知られている。そこで、左右の真横に噴流を放出した場合と、左右の後方 45°に放出した場合を比較する実験を行った。流体を引き寄せる角度範囲については、噴流を後方 45°に放出した方が、広範囲から装置に向かって流体が引き寄せられる。一方、流速については、左右真横に噴流を放出した方が、周囲の流体を速く引き寄せられることが確認された。

第 3 章では、数値流体力学シミュレーションを用い、噴流による流体の引き寄せ時間を定量的に解析した結果を述べた。噴流は層流から乱流へと遷移していく流れであり、十分に発達した乱流をモデル化した乱流モデルでは十分な計算精度が得られないことがある。そこで、流速変化が大きい領域のメッシュを細かくして、乱流モデルや境界条件を変更した結果、実験値と近いシミュレーション結果を得ることができた。噴流を左右の真横と後方 45°へ放出した場合の 2 通りのシミュレーションを行い、流体の引き寄せ速度の減衰を表すモデル式を得た。

第 4 章では、自由に歩行するザリガニに背負わせる噴流可視化装置について述べた。第 3 章までに述べた研究では、水中に静止した噴流生成装置が作る流れ場を調査した。しかし、餌を探索しながら移動しているザリガニが、いつ噴流の方向を切り替え、どの程度先から匂いを集めているか、明らかではない。そこで、防水のためにシリコンゴムで封止した小型インク放出装置をザリガニの頭胸甲に載せ、顎脚付近にインクを放出することで噴流を可視化することを提案し、実際に装置を試作した。

第 5 章では、開発した噴流可視化装置を用いて行ったザリガニの嗅覚探索行動観察実験について述べた。先行研究にて、ザリガニは直進している際には左右両側の顎脚を振っており、転回時には転回方向とは逆側の顎脚のみを振っていることを示した。しかし、顎脚の振動の有無を観察するだけでは、真横や上方など噴流の三次元的な角度方向を調査することはできない。本研究にて自由に歩行するザリガニの噴流を可視化できるようになり、直進時にはザリガニが左右の後方に噴流を放出し、転回時には転回方向とは逆側の真横に噴流を放出

していることが明らかになった。

第6章では、ドローンが生成する噴流を利用し、ごみの埋立地において地表を漂うメタンガスをドローン上のセンサまで巻き上げて検出する手法について述べた。連結した2台のドローンが生成する下降気流（噴流）を地表で衝突させて、巻き上がる気流を作る。ドローンが作る気流場の数値流体力学シミュレーションを行い、噴流を利用した能動化学センシング手法の実現可能性を示した。

第7章では、本研究で得られた知見をまとめ、今後の課題と展望を述べた。

# 目次

Abstract .....	i
概要.....	ii
目次.....	v
第1章 緒論.....	9
1.1 はじめに.....	9
1.2 ザリガニが餌を探す時の行動.....	12
1.2.1 ザリガニの能動的な噴流生成.....	12
1.2.2 ザリガニの周囲にできる流れ場.....	16
1.2.3 吸引による流体の引き寄せと噴流による流体の引き寄せ .....	19
1.3 ザリガニの縄張り行動 .....	20
1.4 能動化学センシングの活用が期待される場面 .....	21
1.4.1 海底における不発機雷や海底資源の探索 .....	21
1.4.2 ごみの埋立地におけるメタンガスモニタリング .....	23
1.5 本研究の目的と意義 .....	26
第2章 噴流の放出方向と引き寄せ範囲・時間の関係.....	29
2.1 はじめに.....	29
2.2 噴流生成装置.....	30
2.3 実験条件の検討.....	32
2.3.1 実験方法 .....	32
2.3.2 噴流の放出時間の決定法 .....	33
2.4 実験結果.....	34
2.4.1 噴流によって色素溶液が引き寄せられる範囲と時間 .....	34
2.4.2 色素を引き寄せる速度に水温が与える影響.....	37
2.4.3 吸引による色素溶液の引き寄せ.....	39
2.4.4 噴流と吸引による匂いの引き寄せ効果の比較.....	41
2.5 シミュレーションによる流れ場の解析.....	43

2.5.1	各工程における条件の設定 .....	43
2.5.2	噴流生成装置の周囲に形成された流れ場 .....	47
2.5.3	2本の噴流間の相互作用 .....	52
2.6	シミュレーション結果と実験結果の比較 .....	54
2.7	本章のまとめ .....	56
第3章	噴流による流体の引き寄せ速度の解析 .....	57
3.1	はじめに .....	57
3.2	シミュレーション領域の設定と領域の離散化 .....	58
3.3	定常計算による流れ場の解析 .....	61
3.3.1	境界条件と計算条件 .....	61
3.3.2	シミュレーション結果 .....	62
3.4	非定常計算による流れ場の解析 .....	65
3.4.1	境界条件と計算条件 .....	65
3.4.2	シミュレーション結果 .....	67
3.5	流体の引き寄せ速度に関する考察 .....	69
3.5.1	引き寄せに要する時間の算出 .....	69
3.5.2	引き寄せ速度の距離依存性を表す実験式 .....	72
3.6	本章のまとめ .....	75
第4章	噴流可視化装置の開発 .....	77
4.1	はじめに .....	77
4.2	ザリガニの噴流を可視化するのに適したインクの濃度の検討 .....	79
4.3	インク放出装置の構成 .....	81
4.4	装置本体内部の構成要素 .....	83
4.4.1	可視化用インクを送液するマイクロポンプ .....	83
4.4.2	装置駆動用の電源と装置起動方法 .....	85
4.4.3	昇圧用 DC / DC コンバータと流量調節用マイコン .....	86
4.4.4	ワイヤレス充電機能 .....	88
4.5	装置本体外部の構成 .....	89
4.5.1	可視化用インクを収める液貯め .....	89
4.5.2	インク放出口 .....	90

4.5.3	回路用防水ケースの成型 .....	91
4.6	本章のまとめ .....	93
第5章	嗅覚探索行動中のザリガニが作る噴流の方向の観察 .....	94
5.1	はじめに .....	94
5.2	アメリカザリガニを用いた行動観察の方法 .....	95
5.2.1	使用したザリガニ .....	95
5.2.2	実験のセットアップ .....	97
5.2.3	実験手順 .....	99
5.3	アメリカザリガニの行動観察結果 .....	100
5.3.1	ザリガニの移動軌跡 .....	100
5.3.2	噴流の放出方向の記録 .....	106
5.4	ウチダザリガニを用いた行動観察の方法 .....	112
5.4.1	使用したザリガニ .....	112
5.4.2	実験条件 .....	113
5.4.3	実験のセットアップと実験手順 .....	115
5.5	ウチダザリガニの行動観察結果 .....	118
5.5.1	装置を載せたことがザリガニの行動に与える影響 .....	118
5.5.2	探索フェーズと噴流の放出方向 .....	120
5.6	本章のまとめ .....	123
第6章	噴流で化学物質を巻き上げて検出する手法 .....	124
6.1	はじめに .....	124
6.2	クアッドコプタ .....	125
6.3	数値流体力学シミュレーションによる 流れ場の解析 .....	128
6.3.1	Solidworks .....	128
6.3.2	Solidworks Flow Simulation .....	129
6.3.3	クアッドコプタを飛行させた際に生成される気流分布 .....	130
6.3.4	2台のクアッドコプタから生成された気流分布 .....	132
6.4	2台のクアッドコプタによるガス検知実験 .....	135
6.4.1	実験のセットアップ .....	135
6.4.2	実験結果 .....	137



6.5 本章のまとめ.....	139
第7章 結論.....	140
7.1 本研究で得られた成果.....	140
7.2 今後の展望.....	144
謝辞.....	145
参考文献.....	146
業績リスト.....	150

---

# 第1章

## 緒論

---

### 1.1 はじめに

甲殻類生物にとって、匂いやフェロモンといった化学シグナルは、様々なライフステージにおいて重要な役割を果たす。着底、闘争、交尾相手の探索と選択等は、全て化学シグナルによって媒介されている。エビ、カニ、ロブスター、ザリガニ等の大型の甲殻類生物では、自ら作った流れを使って、化学シグナルを送ったり、化学受容に向かって引き寄せたりする<sup>(1)</sup>。匂いを辿って餌を探す時にも、自ら生成した流れを利用していると言われている<sup>(2)</sup>。この甲殻類生物の行動を解明し、その行動を模倣することができれば、環境汚染物質や海底資源や機雷等から漏れ出た化学物質を辿って、発生源を探索するロボットの開発に役立つと期待される。

化学物質は分子拡散や水の流れにより広がる。しかし、水中における化学物質の分子拡散速度は1時間に5 mm程度と非常に遅いため、現実の多くの環境においては、匂いは主に水の流れに運ばれて広がる<sup>(2)</sup>。ロブスターやワタリガニなど流れのある環境に生息する甲殻類生物は、匂いを感知すると流れを逆に辿って餌を探索する<sup>(3)-(5)</sup>。また、この行動を模倣した水中ロボットが報告されている<sup>(6),(7)</sup>。これらの水中ロボットは、甲殻類生物の行動を模倣して、化学物質を検出するとその流れを辿って発生源を探索する。しかし、この方法は万能ではない。池や沼の底などでは、水底の流速が10 mm/sを超えることはほとんどなく流れが乏しい<sup>(2)</sup>。このような環境では、化学物質が発生源の近傍に留まり、発生源から数 cm 離れると化学物質が検出されない。そのため、化学物質の発生源を探索することは非常に困難である。また、たとえ流れのある環境であっても、高感度な化学センサを搭載したからといって、環境汚染物質や海底資源、機雷を探索できるようにはならない。分子拡散が非常に遅いため、流れ

に運ばれて帯状に広がる匂いの分布からわずかにでも離れると、匂いを感知できないためである<sup>(2)</sup>。そのため、特に水中では能動的に化学物質を集めることが必要不可欠となる。

ザリガニは、このような流れの乏しい環境に適応し、自ら匂いを集めて餌を探す。口元にある顎脚を振り、左右に噴流（噴き出す流れ）を作り出す。すると、周囲の流体が噴流に巻き込まれ、噴流に向かう流れが誘起される。そして、この流れによって運ばれてきた匂いを検出していると言われている<sup>(1),(8)</sup>。これまで、ザリガニをカメラの前に固定して、放出された噴流と周囲の流れ場を観察する実験が行われてきた<sup>(8)</sup>。しかし、歩行中のザリガニが実際にどのような流れを作っているか未解明である。ザリガニを模倣して、周囲からアクティブに化学物質をサンプリングすれば、水中化学探査ロボットの性能向上が期待できる。しかし、水中ロボットに噴流放出機能を付けても、どのように噴流を使えば効果的に匂いを集められるのか分からず、ザリガニの行動をロボットで再現できる段階には達していない。

ザリガニは、縄張り争いの時にも噴流を上手く利用している。ザリガニは、触角腺という1対の排出器官を持ち、これが第2触角の基部に開口している。そのすぐ下には鰓からの水が排出される隙間がある。縄張り争いの時には、鰓から排出された水で噴流を作り、自分の尿を相手の小触角に送って匂いを相手に伝える<sup>(9)</sup>。この行動を模倣して化学物質を噴流に乗せてセンサまで運ぶことができれば、化学物質とセンサの間に距離がある条件でも、化学物質を噴流に乗せてセンサに集め、検出できる。そこで、噴流を利用して地表付近に漂うガスを巻き上げ、ドローン上のセンサに届けて検出する手法を着想した。しかしまずは、このようなセンシングが実際に可能であるか調査する必要がある。

そこで本研究では、以下の3点を目的とした。まず、ザリガニが作る噴流によって周囲に形成される流れ場を実験とシミュレーションによって調査し、流体を引き寄せることができる範囲と、引き寄せるのに要する時間を再現できるシミュレーション条件を求めることを目的とした。噴流をシミュレーションで再現するのは容易ではないが、再現できれば水中ロボットの設計に役立てることができる。二つ目の目的は、ザリガニの行動を制限することなく、歩行中のザリガニが生成する噴流の方向を可視化する手法を開発することである。これまでに歩行中のザリガニが作る流れを観察した例はなく、新たな知見が得られるものと期待される。三つ目の目的は、ドローンが飛行する際に生成する流れ

を使って地面付近の化学物質を検出する手法を提案し、その実現可能性を確かめることである。本研究では、ドローンが作る流れをシミュレーションで求め、実現可能性を検討した。

本章ではまず、本研究で着目しているザリガニのアクティブな化学サンプリング行動を紹介する。次に、能動化学サンプリングの実用が望まれる場面を示し、現状でどのような手法で化学サンプリングが行われているかを紹介する。そして最後に、本研究の目的と意義を述べる。

## 1.2 ザリガニが餌を探す時の行動

### 1.2.1 ザリガニの能動的な噴流生成

ザリガニのイラストを Fig. 1.1(A)に示す<sup>(2)</sup>。ザリガニは、口元の左右に顎脚という 3 対の付属肢を持つ。甲殻類生物の付属肢は、先端が内肢と外肢の二股に分かれている。顎脚の内肢は、餌を口に運ぶ役割を担っている。一方で、顎脚の外肢の役割はよく分かっていない。しかし、顎脚の外肢の先端には扇状に毛が生えている。

この顎脚の外肢で水を掻く様子を Fig. 1.1(B)、(C)に示す。Fig. 1.1(B)に示すように、水を掻く時には扇状に先端を開き、戻す時には Fig. 1.1(C)のように扇状の毛を折りたたんで水を掻かないようにする。このように外肢を振ると、ノズルから水を噴き出した時のように、特定の方向に流れが作り出される。このように噴き出す流れを、流体力学の分野では噴流と呼ぶ。噴流が放出されると、周囲の静止した流体との境界に連続的に渦ができる。この渦と流体の粘性により、周囲の流体が噴流に巻き込まれる。巻き込まれた流体は、噴流と共に下流へ向かうため、噴流周辺の圧力が下がる。そのため、巻き込まれた流体のさらに外側から流体が噴流に向かって巻き込まれていく。このエントレインメントと呼ばれる現象により、Fig. 1.2 に示すように噴流に対して軸対称に流れが形成される<sup>(8)</sup>。この流れによって、ザリガニに向かって周囲の流体と共に匂いが引き寄せられるため、ザリガニは餌を探索する際に高感度に匂いを検出できると言われている。

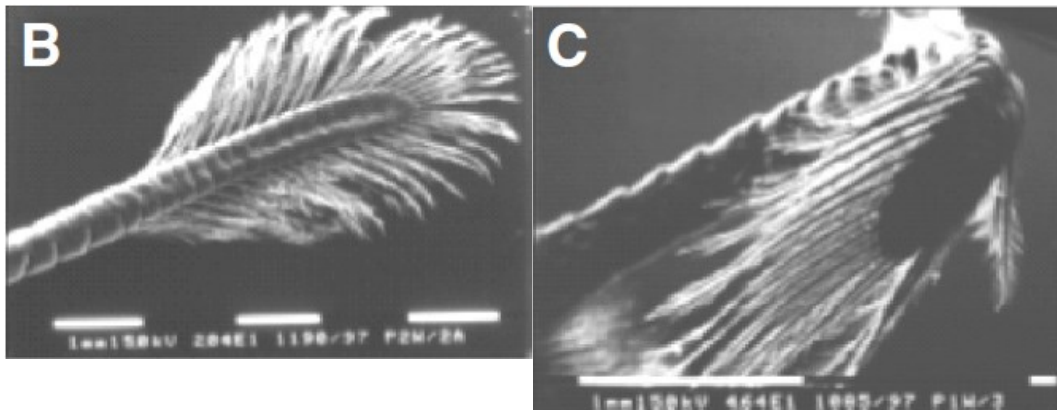
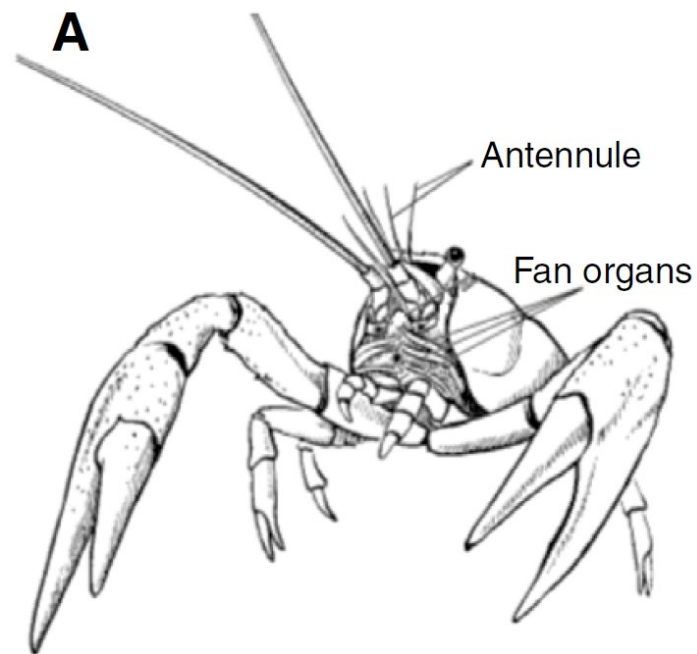


Fig. 1.1 (A) Locations of fan organs (exopodites of maxillipeds) and antennules (chemoreceptor organs). (B) Maxilliped during power stroke. (C) Maxilliped during recovery stroke. Figure 1 from Breithaupt, T. 2001. *Biol Bull.* 200:150–154<sup>(2)</sup>. Reprinted with permission from the University of Chicago Press Marine Biological Laboratory, Chicago, IL.

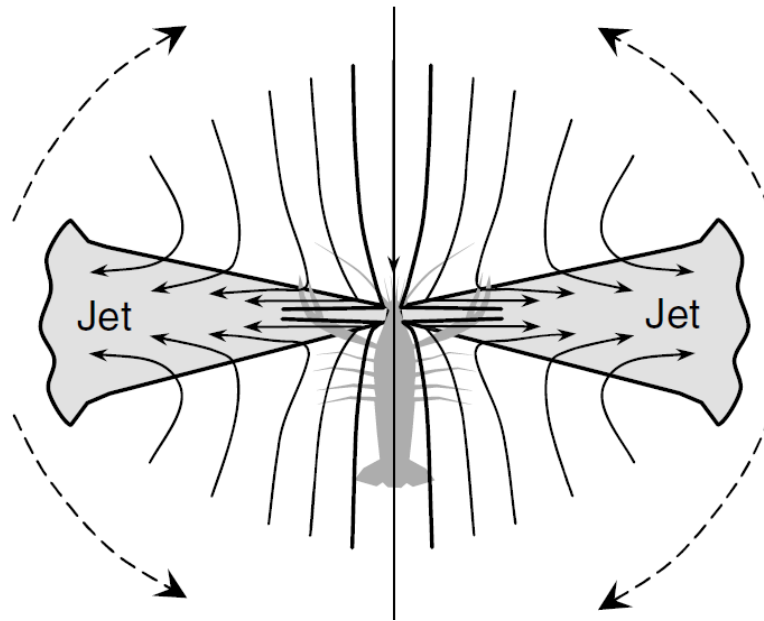


Fig. 1.2 Flow generated by crayfish and the induced inflow. Republished with permission of Company of Biologists Ltd., from “The flow generated by an active olfactory system of the red swamp crayfish,” P. Denissenko, S. Lukaschuk, and T. Breithaupt, *Journal of Experimental Biology*, vol. 210, 2007<sup>(8)</sup>; permission conveyed through Copyright Clearance Center, Inc.

ザリガニの生息環境における流れの有無と嗅覚探索行動を行う時に置かれた環境における流れの有無が、嗅覚探索行動に与える影響を調査した研究例がある<sup>(10)</sup>。この研究では、川（流れのある環境）と湖（流れの乏しい環境）から捕獲してきたザリガニ（*Orconectes virilis*）が使用された。このザリガニは、同じ種でありながら異なる環境に生息している。流れのある水槽と流れのない水槽を用意して、それぞれの水槽において、川から捕獲したザリガニと湖から捕獲したザリガニの嗅覚探索行動を観察する実験が行われた。その結果、湖から捕獲したザリガニは流れのある水槽において、流れのない水槽における行動と比較して歩行スピードが上がるなど探索行動が変化した。一方、川から捕獲してきたザリガニは、流れの有無に関わらず、探索行動に変化が見られなかった。この結果から、流れの乏しい環境に生息するザリガニの方が、環境に対する適応力が高いと示唆している<sup>(10)</sup>。

噴流を巧みに操って餌の匂いを引き寄せることができる点がザリガニの嗅覚探索行動の特殊性である。さらに、流れのある環境に生息する甲殻類生物よりも、流れのない環境に適応したザリガニの方が、適応力が高いと考えられている。これらの点が、工学的に水中ロボットの開発を目指した際に、ザリガニの行動に着目する意義となる。



## 1.2.2 ザリガニの周囲にできる流れ場

Fig. 1.3 は、ザリガニが作り出す噴流を可視化して撮影したものである<sup>(8)</sup>。ハサミを取り除いたザリガニをカメラの前に固定して、ザリガニの口元にインクを放出している。放出したインクは、ザリガニが作り出す噴流によって噴き飛ばされている。Fig. 1.3(A)ではザリガニの左右両側の斜め 45°上方に噴流が生成されており、Fig. 1.3(B)ではザリガニの左右両側の真横に噴流が生成されている。また Fig. 1.3(C)では、ザリガニの右側の真横に噴流が生成されている。このようにザリガニは、異なる方向へ噴流を放出することができる。

Fig. 1.4 に、噴流を生成しているザリガニの周囲に形成された流れ場の速度分布を示す<sup>(8)</sup>。この速度分布は、粒子画像流速測定法（particle image velocimetry、以下 PIV と略す）によって求められた。PIV では水中に微粒子を撒き、シート状のレーザ光を照射して、レーザが照射された平面上の粒子の動きを可視化する。そして、粒子の動きを追跡して速度分布を求める。Fig. 1.4 を見ると、ザリガニに向かって様々な方向から流れが形成されている。さらに、この流れ場は Fig. 1.4(B)から(D)に示すように時間と共に変化しており、ザリガニが顎脚の振り方を変えていることを示している。ザリガニは、状況に応じて適応的に噴流の放出方向を変え、異なる方向から匂いを引き寄せて、効率良く餌の探索を行っている可能性がある。

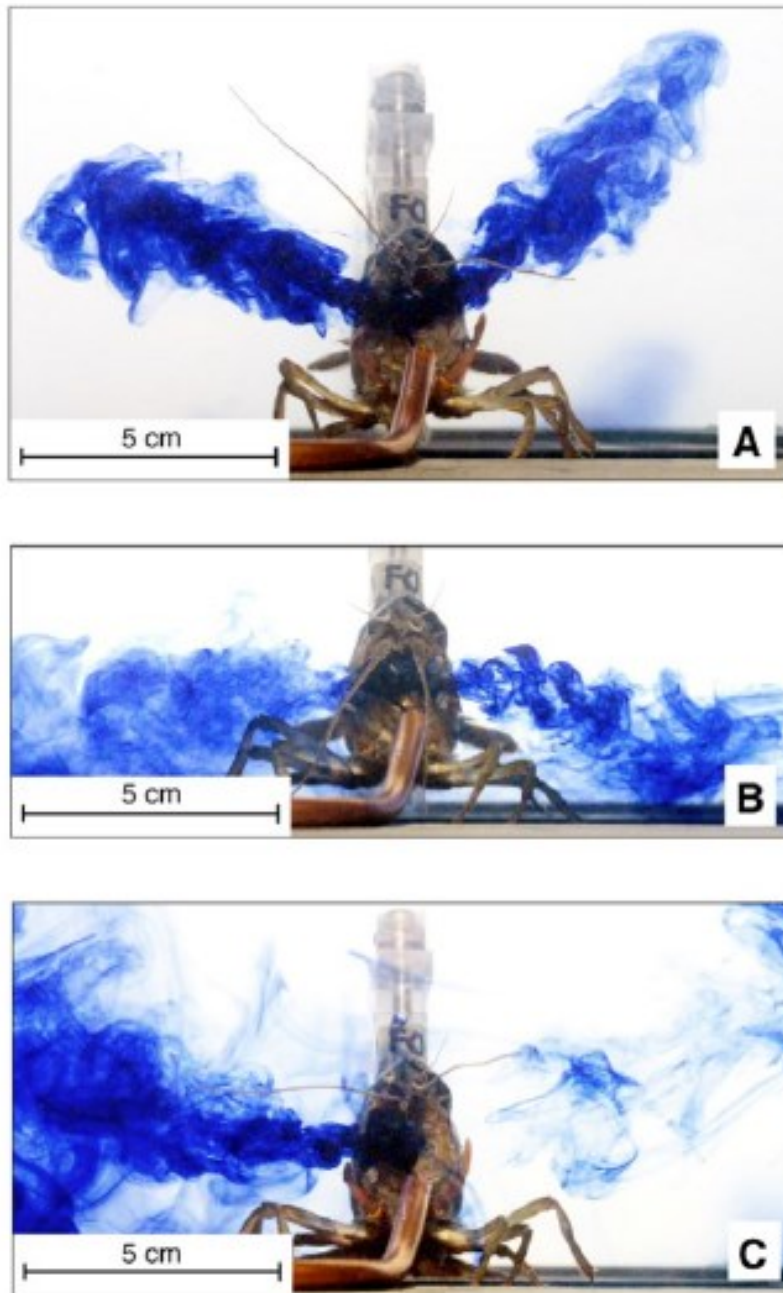


Fig. 1.3 Visualization of the jets generated by crayfish. (A)–(C) show the variations of the flow generated by a crayfish. Republished with permission of Company of Biologists Ltd., from “The flow generated by an active olfactory system of the red swamp crayfish,” P. Denissenko, S. Lukaschuk, and T. Breithaupt, *Journal of Experimental Biology*, vol. 210, 2007<sup>(8)</sup>; permission conveyed through Copyright Clearance Center, Inc.

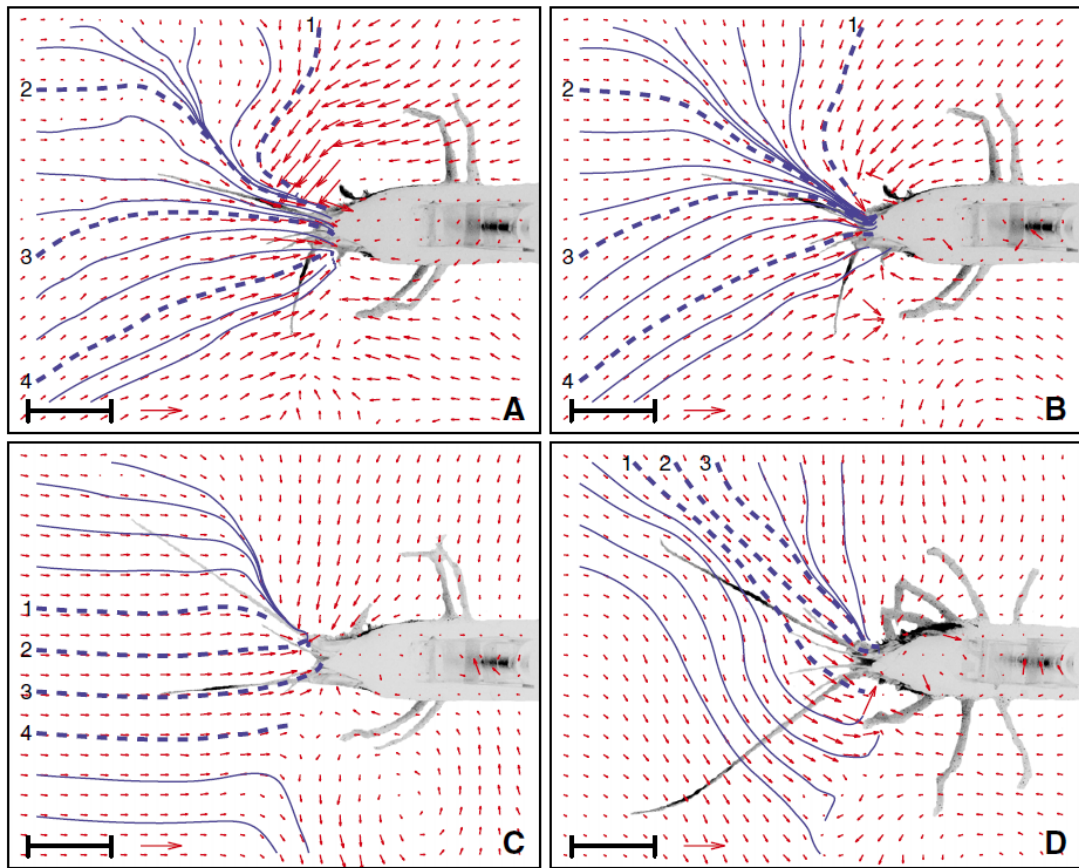


Fig. 1.4 Flow fields generated by crayfish. (A) shows the instantaneous velocity field, and (B)–(D) show averages over 30 instantaneous measurements taken at 1-s time intervals. Republished with permission of Company of Biologists Ltd., from “The flow generated by an active olfactory system of the red swamp crayfish,” P. Denissenko, S. Lukaschuk, and T. Breithaupt, *Journal of Experimental Biology*, vol. 210, 2007<sup>(8)</sup>; permission conveyed through Copyright Clearance Center, Inc.

### 1.2.3 吸引による流体の引き寄せと噴流による流体の引き寄せ

Fig. 1.5 に、1 点から流体を吸引して引き寄せた場合と、噴流によって流体を引き寄せた場合に形成される周囲の流れ場の模式図を示す。小さな吸引口に吸引して流体を引き寄せた場合、吸引口を中心として球対称に周囲の流体が引き寄せられる。一方で、噴流のエントレイメントによって流体を引き寄せた場合には、噴流を中心として軸対称に周囲の流体が引き寄せられる<sup>(8)</sup>。周囲に形成される流れ場の違いにより、噴流を用いることに二つの利点生まれる。

一つ目は、噴流の放出方向を変えることにより、周囲に形成される流れ場を変えることができる点である<sup>(8)</sup>。吸引の場合には、吸引口を中心にほぼ等方的な流れ場が形成される。そのため、吸引口の向きを変えたとしても、形成される流れ場はほとんど変化しない。一方、噴流の場合には、噴流の方向を変えると軸対象な流れの中心軸の向きが変わるため、異なる流れ場が形成される。ザリガニは様々な方向に噴流を放出し、異なる方向から流体を引き寄せることができる。これは噴流を用いているからこそ可能となる

二つ目は、引き寄せる流れの流速が遠方でも減衰しない点である<sup>(8)</sup>。噴流を用いた場合には、周囲に形成される流れ場は軸対称のため、流速が距離の 1 乗に反比例する。一方で、吸引の場合には、吸引口に向かって球対称な流れ場が形成されるため、流速は距離の 2 乗に反比例する<sup>(8)</sup>。そのため、吸引の場合には、吸引口から離れた位置の流体の流速が急激に小さくなる。ザリガニは、噴流を用いることで、遠くから匂いを引き寄せることができる<sup>(8)</sup>。

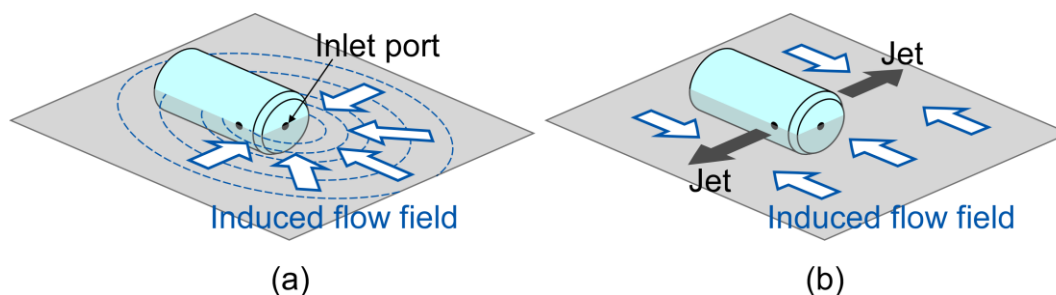


Fig. 1.5 Comparison between suction and jet discharge. (a) Flow induced by suction into a point sink. (b) Flow induced by the jets.

### 1.3 ザリガニの縄張り行動

ザリガニは、一般的に高い密度で生息しており、個体同士が遭遇する頻度が高い。遭遇したオス同士が闘争を繰り返すことでヒエラルキーが生まれる。ヒエラルキーが高いオスは、他のオスよりも巣穴や餌やメスを探しやすくなる。

Fig. 1.6 は、2匹のオスのザリガニ (*Astacus leptodactylus*) が縄張り闘争をしている様子を撮影したものである。これらのザリガニの頭胸甲には、0.1%フルオレセインナトリウム水溶液が注射器で注入されており、体液の流出を防ぐために蜜蝋とテープで穴がふさがれている。頭胸甲に注入したフルオレセインナトリウム水溶液が鰓から放出され、緑色の蛍光で可視化されている。

この写真が示すように、ザリガニは、縄張り争いの時にも噴流を上手く利用している。ザリガニは、触角腺という1対の排出器官を持ち、その開口部が第2触角の基部に位置する。そのすぐ下には、鰓からの水が排出される隙間がある。縄張り争いの時には、鰓から排出された水で噴流を作り、自分の尿を相手の小触角に送って匂いを相手に伝える。この時、顎脚を振って作る噴流も使っている<sup>(9)</sup>。鰓からは前方にしか噴流を放出できないが、顎脚で作る噴流も使って方向を変えることができる。



Fig. 1.6 Aggressive interaction of two male *Astacus leptodactylus*. Urine was visualized by using Fluorescein dye injected into their carapace. Reprinted from (1) with permission.

## 1.4 能動化学センシングの活用が期待される場面

### 1.4.1 海底における不発機雷や海底資源の探索

ザリガニが餌を探索する時に噴流で匂いを引き寄せているように、能動的に化学センサへ検出対象となる化学物質を引き寄せて検出し、その放出源の位置まで辿る手法が役立つと期待される場面が存在する。例として、海底に沈んでいる不発弾の処理<sup>(11)</sup>、メタンハイドレートなどの海洋資源の探索<sup>(12)</sup>、電気生態系発見が期待され生命起源解明の糸口として興味を持たれている熱水噴出孔（チムニー）<sup>(13)</sup>の探索などが挙げられる。これらの目的を達成するために、環境汚染物質や機雷などから漏れ出た化学物質を辿り、その発生源を探索する水中ロボットの開発が求められている。一般に、分子拡散の速度は非常に遅く、化学物質は主に水の流れに運ばれて水中を広がる。しかしながら、高感度な化学センサを搭載したからといって、海底資源や機雷を探索できるようにはならない。たとえ流れのある環境であっても、分子拡散が非常に遅いため、流れに運ばれて帯状に広がる匂いの分布からわずかにでも離れると、匂いを感知できない<sup>(1),(2)</sup>。そのため、特に水中では能動的に化学物質を集めることが必要不可欠となる。

現在、不発弾として残っている機雷やメタンハイドレートなどの海底資源の探索には、主に音波などが用いられている<sup>(14)</sup>。海上や海中から音波を照射し、地形を計測するのが一般的である。化学センサを搭載し、熱水噴出孔から放出される硫化水素などの化学物質の検出や、海水の pH 等の計測に利用している探査船もある<sup>(14)</sup>。しかし、化学センサからの応答をリアルタイムで探索に役立て、探査機の移動方向などを決定している例はない。化学成分の分析に時間がかかることが多く、サンプルを持ち帰って分析することもある。このような中、最新の化学センサを搭載した海底資源探査が行われ、新たな海底熱水活動を伴う鉱床を発見した例がある<sup>(15)</sup>。この研究では、海洋研究開発機構の研究船「なつしま」と、高感度リアルタイム計測可能な化学センサ群を搭載した「ハイパードルフィン」が用いられた。探査は、沖縄県本島沖合の北東伊是名海域にて行われた。この探査では、探査中に化学センサが強く応答した地点を記録して、探査領域を絞り込んだ。そして、絞り込んだ地点を重点的に探査することで、新規の熱水噴出孔を発見することができた。

しかし、この探査では、化学センサの応答を頼りに漏れ出た化学物質を辿っ

たのではなく、くまなく移動して高い応答を示す場所を記録した上で、その場所を重点的に調査している。自律的に化学物質を辿ってその発生源を探索するロボットが開発できれば、この例のように探索範囲をくまなく移動する必要はなくなり<sup>(16)</sup>、より短時間で熱水噴出孔を探索することが可能となる。

## 1.4.2 ごみの埋立地におけるメタンガスモニタリング

ザリガニの縄張り行動では、噴流を操って尿を吹き飛ばし、闘争相手に送る。この手法を模倣して化学物質を吹き飛ばし、センサまで運んで検出する手法が役立つと期待される場面として、本研究では、ごみの埋立地で行われているメタンガスのモニタリング<sup>(17)</sup>に着目した。埋立地の様子を Fig. 1.7 に示す。埋立地でメタンガスモニタリングが行われる理由は、大きく分けて3点ある。一つ目は、メタンガスの温室効果が大きく、地球温暖化へ及ぼす影響が大きいからである<sup>(18)</sup>。メタンガスの温室効果は、二酸化炭素と比較し、20倍程度ととても大きい。また、人為的起源によって排出されるメタンガス総量のうち3分の1程度を埋立地から放出されるメタンガスが占めている。そのため、地球温暖化への影響がとても大きい。二つ目は、メタンガスには可燃性、爆発性があるからである。埋立地を再利用しようとしても、メタンガスが発生している場所では工事を行う際に事故が起こる可能性が高く、建物を建設できない。三つ目は、埋め立てられたごみの分解の程度を、メタンガス発生量を用いて推定できるからである。ごみは微生物によって分解されるにつれて、メタンガスを発生させる。メタンガスの発生量はごみの分解度合いに比例するので、ごみの分解度合いを地上から間接的に調べるため、メタンガスの発生量が計測されている。これらの理由から、埋立地を管理するため、メタンガスのモニタリングを行うことは法律によって義務付けられている。



Fig. 1.7 Landfill site. Photograph courtesy by Haruka Matsukura.



埋立地におけるガスの検出・測定手法は幾つかある<sup>(19)</sup>。ガス放出量を計測する際には、閉鎖式チャンバーを用いる手法（以下、チャンバー法と呼ぶ）が使われている<sup>(20),(21)</sup>。計測したい場所でチャンバーを地面にかぶせ、この内部に溜まったガス量を計測して、単位時間、単位面積当たりのガス放出量を求める。しかし埋立地は広大であるため、埋立地全体の総ガス放出量を正確に求めるためには、数多くのチャンバーを設置しなければならない。それに伴って人も多く必要となってしまう、多大な費用がかかってしまう。地表付近のガス濃度を簡易的に測定するためには、レーザーメタン計が広く使われている。人がレーザーメタン計を持ち、メタンに吸収される波長の赤外線レーザーを地面に向けて照射する。このようにすることで、メタン計と地面の間に存在するメタンガスの濃度を検出することができる。しかし、風があると、検出できるメタンガスの量が風の向きによって変わってしまう。風向の変動に伴い、測定される濃度も変わるため、一貫した計測値が得られないという欠点がある。また、地表面温度からガスの放出量が特に多いホットスポットを探す手法も試みられている。メタンガスのホットスポットでは地表面温度が高くなる傾向がある。そのため、サーマルビデオカメラなどを用いてホットスポットを探索できる。しかし、日射または放射冷却により測定結果が影響を受けるときには利用できないことが、この手法の欠点として挙げられる。そのため、春や秋の夜明け前から早朝以外では行うことができない。

このように既存の手法にはそれぞれ欠点があり、新しいモニタリング手法の研究開発が行われている。観測井モニタリング<sup>(22)</sup>と呼ばれる手法では、観測井を地中に埋め込み、ここに携帯型ガス濃度計測器を取り付け、観測井内に滞留するガスを直接計測する。この手法では、モニタリングが容易となる一方で、観測井を埋め込まなければならないため、管を埋め込んだり抜いたりするために手間やコストがかかるといった欠点がある。また、チャンバー法の手間を軽くする手法として、埋立地ガスの温度を計測することが提案されている<sup>(23)</sup>。この手法は手軽に用いることができる一方で、ガスの有無に関わらず地表温度は場所によって異なるため、温度だけでガス放出量を判断することが困難であるといった欠点がある。

以上に述べたように、埋立地に発生するメタンガスを検出するために様々な手法が用いられており、それらは大きく、ガス濃度を直接計測する手法と、ガス温度などから間接計測する手法に分けることができる。チャンバー法では、

ガス放出量を直接計測しているため、他の手法と比較してガス放出量を正確に計測することができる一方、手間や費用がかかってしまう。しかし、間接計測する手法には、適用できる気象条件などに制限がある。そこで、ガスを直接計測でき、かつ手間や費用が掛からない手法の開発が望まれている。噴流を操って地表付近を漂うガスを巻き上げて検出できるロボットが開発できれば、測定を自動化し、労力をかけずに多数の地点でガス濃度を測定することが可能になる。ロボットを用いて地表の濃度分布を詳細に計測すれば、得られたデータを処理して埋立地における総ガス放出量を正確に推定することもできるであろう。他の手法と比較して、より手軽で、かつ精度良くガス放出量を計測することが可能となる。

## 1.5 本研究の目的と意義

流れの乏しい環境では化学物質がその発生源の近傍に留まり、感知することが困難となるため、アクティブに化学物質を集めることが重要である。一方で、流れのある環境では、下流に向かって化学物質が帯状に広がっていく。しかし、たとえこのように流れのある環境であっても、分子拡散が非常に遅いため、帯状に広がる化学物質からわずかにでも離れると、匂いを感知できなくなる。そのため、能動的に化学物質を集めることが必要不可欠となる。

また、ザリガニは縄張り争いの時に、相手に匂いを伝えるために相手の小触角に向けて能動的に作った流れで化学物質を送っている。化学物質とセンサの間に距離がある場合に、能動的に化学物質を運ぶことが重要となる。

そこで本研究では、餌を探すザリガニの行動を模倣して、環境汚染物質など化学物質の発生源を探索する水中ロボットを開発することを目指した。また、ザリガニが縄張り争いの時に相手に匂いを伝える行動を模倣して、地表を漂う化学物質を検出する飛行ロボットの開発を目指した。そのために、噴流による流体の引き寄せ効果を再現できるシミュレーション条件を求めた。さらに、自由に歩行するザリガニの行動解明を目指し、噴流の方向を切り替える様子を可視化する装置を開発して、ザリガニが作る噴流の方向を明らかにした。また、飛行ロボットが作る流れ場をシミュレーションにより求め、ガスを地表から巻き上げて検出できることを示した。

内閣府の第5期科学技術基本計画に基づいて国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構が策定して「次世代人工知能・ロボット中核技術開発」基本計画では、アクティブセンシング技術の発展がロボット分野の重要課題として挙げられている<sup>(24)</sup>。ザリガニが能動的に流れを作って匂いを集めているように、能動的な行動とセンサを上手く連動させれば、高いセンシング性能が得られる。化学物質検知に噴流を用いたアクティブセンシング技術を応用した研究例は他にない。本研究は、アクティブセンシング技術に関して新たな知見をもたらすと共に、生物行動学の分野における学術的な貢献も大きい。

Fig. 1.8 に本論文の構成を示す。第2章と第3章では、ザリガニの噴流生成をモデル化した装置を用いて、噴流による流体の引き寄せ効果を調査した結果を報告する。これらの章で述べる実験やシミュレーションでは、噴流の放出口が固定された条件において、化学物質の引き寄せ効果を調査した。しかし、ザリ

ガニの探索戦略を移動ロボットに応用して設計指針を得るためには、ザリガニがどのように歩き回って餌を探索しているのか調べる必要がある。そこで、ザリガニの行動を制限することなく、自由に歩行するザリガニの噴流生成を可視化する装置を開発したので、第4章で報告する。第5章では、実際に開発した装置をザリガニに背負わせて、嗅覚探索行動を観察した結果を報告する。第6章では、ごみの埋立地におけるメタンガスモニタリングへの応用を目指し、ドローンから生成された複数の噴流で気流を操ってメタンガスを検出する手法について述べる。数値流体力学シミュレーションと実験によって、提案する手法の実現可能性を調査した結果を報告する。最後に第7章において、本研究で得られた成果をまとめ、今後の展望を述べる。

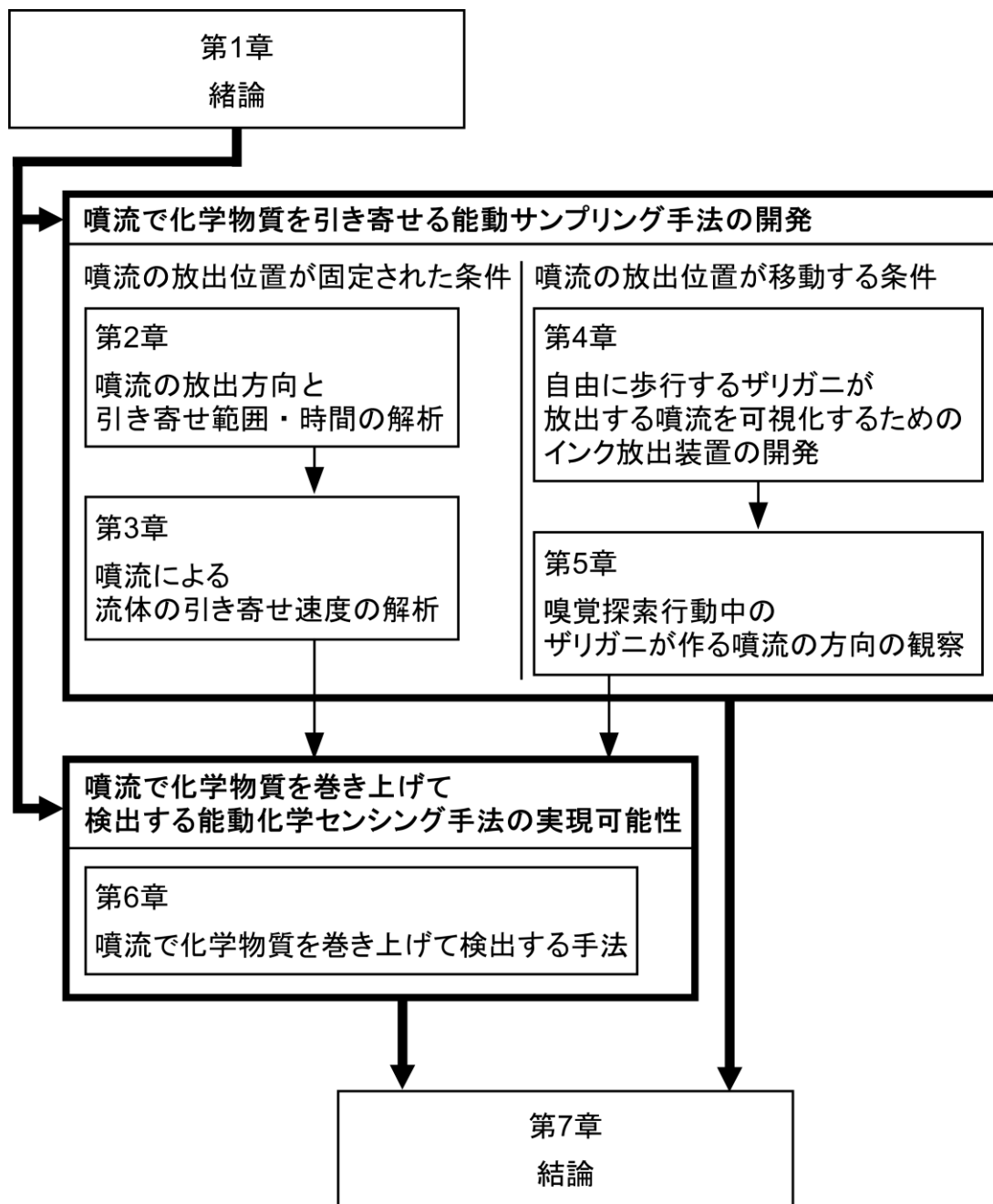


Fig. 1.8 Structure of this thesis.

---

## 第2章

# 噴流の放出方向と 引き寄せ範囲・時間の関係

---

### 2.1 はじめに

竹村らは、ザリガニの化学受容と噴流生成をモデル化した装置を開発し、ザリガニの行動に倣った条件で実験を行って、噴流による流体の引き寄せ効果の解明に取り組んできた<sup>(25),(26)</sup>。この装置は正面に3本のセンサ電極を10 mm 間隔で搭載している。実験では化学物質を内径 2.84 mm のステンレスチューブから放出しており、放出された化学物質は噴流に引き寄せられていく。しかし、センサ電極の間隔が 10 mm あるため、引き寄せられた化学物質がセンサ間を通り抜けることがある。この場合、流れが乱れて、通り抜けた化学物質が左右に蛇行して流れた時のみ、化学物質がセンサに接触して応答が得られる。そのため、実験で得られたセンサ応答時刻は、化学物質がセンサを並べた位置まで最初に到達した時刻を表しているとは限らない。そこで本研究では、センサ応答を記録して解析するのではなく、色素溶液を用いて流れ場を可視化して、流体が噴流に引き寄せられ、装置まで到達する時間を測定し、噴流による引き寄せ時間を明らかにすることを目的とした。また、数値流体力学シミュレーションで実験結果を再現できるようにして、実験をしなくても装置の設計を可能にすることを目指した。本章では、色素溶液が噴流に引き寄せられて装置に到達するまでの流跡線を記録した結果と、到達時刻を記録した結果を述べる。また、得られた実験結果とシミュレーションの比較についても述べる。

## 2.2 噴流生成装置

本研究室で作製された噴流生成装置の外観を Fig. 2.1 に示す<sup>(26)</sup>。この装置の噴流生成部は直径 30 mm、長さ 60 mm のアクリル樹脂製の筒に蓋をした構造となっている。蓋の中央に穴が開いており、ここから水を吸引する。ザリガニをカメラの前に固定して行われた実験では、ザリガニが左右の真横、後方 45°、上方 45°に噴流を放出する様子が観察されている<sup>(8)</sup>。装置の側面には、1 対の真横に向いた穴と、1 対の後方 45°方向に向いた穴が開けられている。これらの穴のうち、一つまたは二つから噴流を放出する。それぞれの穴には、内径 2.84 mm のステンレスチューブを接続する。ステンレスチューブの另一端は、プラスチックチューブを介してポンプ（マイクロポンプアクア PPLT-001040-002、シナノケンシ株式会社）と接続する。装置正面にある吸引口から吸引された水は、Y 字型のチューブジョイントにより二つに分かれて左右のポンプに向かい、それぞれに接続されたステンレスチューブから放出される。左右のステンレスチューブから放出される水の流量は、プラスチックチューブに取り付けたピンチ

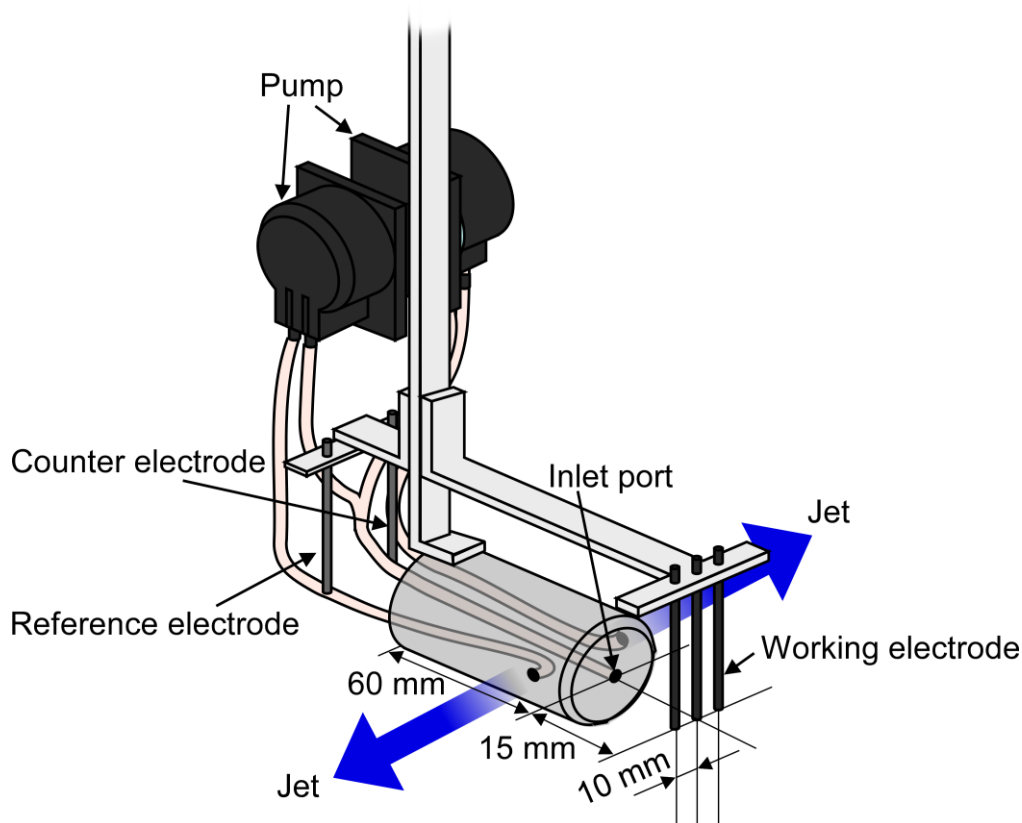


Fig. 2.1 Jet discharge device.

バルブで調節する。後述する実験では、ポンプの流量を左右それぞれ 150 mL/min に調節し、周囲に形成される流れの速度が、ザリガニの周囲に形成される流れの速度と同程度になるようにしてある<sup>(26)</sup>。片側のみに噴流を放出する際は、片側のポンプのみを駆動する。

ザリガニは噴流を用いて引き寄せた匂いを、頭胸甲の先端にある小触角で感知している。Fig. 2.1 に示す噴流生成装置には、電気化学式センサの作用電極が 3 本取り付けられている。3 本のうち中央にある電極は、吸引口の前方 15 mm の位置に取り付けられており、その左右に 2 本の電極が 10 mm 間隔で配置されている。



## 2.3 実験条件の検討

### 2.3.1 実験方法

竹村らが開発した噴流生成装置<sup>(26)</sup>を使用し、1200 mm × 800 mm の子供用ビニールプールの中に装置設置して実験を行った。本実験では装置を移動させないが、装置を移動するためにステップモータとリニアアクチュエータが取り付けられたフレーム<sup>(26)</sup>に噴流生成装置を取り付け、フレームごと子供用ビニールプールに入れた。このプールに水深が 100 mm になるように水を張り、噴流生成装置の前方 60 mm の地点に色素溶液の放出源を設置した。色素溶液には、100 mg/L のローダミン 6G 水溶液を使用した。左右の噴流の流量のわずかな違いや、水槽内にわずかに残った対流などの影響により、色素溶液が装置に向かって真っ直ぐに移動せず、左や右に曲がる可能性がある。そこで、アレイ状に色素溶液の放出口を 10 mm 間隔で 17 個並べた。

実験を行う際には、色素の放出源と装置を予め設置し、水槽内の水の流れが収まるのを待った。十分な時間が経過した後、放出源から色素溶液をわずかに出し、その動きを見て、水の流れが収まったことを確認した。そして、噴流の放出を開始してから 30 秒間経過した時点で色素溶液を放出して、色素溶液が噴流に引き寄せられる様子をビデオカメラで記録した。以上の実験を噴流の放出方向を左右の真横と後方 45° の 2 通りに変え、それぞれ 3 回ずつ行った。

### 2.3.2 噴流の放出時間の決定法

無限に広がる空間では、噴流の放出時間を長くすることで十分発達した噴流を作り出すことができる。しかし、実際の実験環境は、壁に囲まれた水槽である。このような環境では、壁に衝突した噴流が実験環境内を循環する流れを作り出すため、定常的な噴流を作るために噴流を放出し続ければ良いというわけではない。そのため、噴流が発達するのに十分で、かつ、実験環境内の水が循環する前に実験が終了するような時間帯を抽出する必要がある。

そこでまず、噴流が十分発達するために必要な時間を調べた。この実験にも、竹村らが開発した噴流生成装置<sup>(26)</sup>を使用した。噴流が十分発達していない状態よりも十分発達した状態の方が、色素が速く引かれると予想できる。噴流の放出時間が15秒、30秒、45秒、1分、2分の時点で、それぞれ色素溶液を噴流生成装置の60mm前方から5秒間放出して、放出された色素が装置に到達する時間を測定した。すると、噴流を放出してからの経過時間が長くなるにつれて、色素が引き寄せられるのに要した時間が短くなっていった。また、噴流の放出を開始してから2分経過した時点で色素溶液を放出した場合には、色素溶液の流跡線が左右に揺れており、水槽内を大きく循環する流れが形成され、その循環流の影響を受けているように見えた。

次に、噴流の放出を開始してから、噴流によって水槽内の水が乱れて、循環流が形成されるまでの時間を測定した。この実験では噴流を左右真横に放出し、水槽の各所に色素溶液を垂らして、水槽内の水が循環する時刻を測定した。その結果、噴流が壁に衝突するまでにかかった時間は数秒であった。噴流は壁に衝突した後、左右に分かれる。そして、装置を吊るすフレームの脚に衝突して、大きく渦を描きながら装置の正面に向かっていく流れが形成された。このような渦が噴流の放出を開始してから約60秒で形成されたため、実験を60秒以内に終了した方が良いことが分かった。以上の結果より、噴流の放出を開始してから30秒間経過した時点で色素溶液の放出を開始して、その時点を実験開始時刻とした。

## 2.4 実験結果

### 2.4.1 噴流によって色素溶液が引き寄せられる範囲と時間

色素が引き寄せられる様子を Fig. 2.2 に示す。噴流を左右真横と後方 45°に放出した場合の流脈線を比較する。噴流を左右真横に放出した場合には、放出口から出た色素は直線的に噴流に向かい、噴流に巻き込まれていく。一方で、噴流を後方 45°に放出した場合には、放出された色素が描く流脈線が装置の前方に収束するように、中央に向かってカーブしている。ザリガニは、頭胸甲の先端に小触角を持ち、引き寄せられてきた匂いを小触角で感知していると言われている。装置の正面に到達した色素の流脈線の範囲を比べると、噴流を左右真横に放出した場合には、中央とその左右 2 本ずつの範囲にある流脈線が装置の正面に到達している。一方で、噴流を後方 45°に放出した場合には、中央とその左右 3 本ずつの範囲にある流脈線が装置の正面に到達している。色素の放出口の間隔は 10 mm である。噴流を左右真横に放出した場合には、約 40 mm の幅から、噴流を後方 45°に放出した場合には、約 60 mm の幅から流体を引き寄せていることになる。噴流を後方 45°に放出した場合の方が、広い角度範囲から流体を引き寄せられることが示されており<sup>(25),(26)</sup>、この実験からも確認できた。これは、固定されたザリガニが左右真横や後方 45°に噴流を放出した際に周囲に形成された流れ場を PIV で測定した結果<sup>(8)</sup>にも一致している。

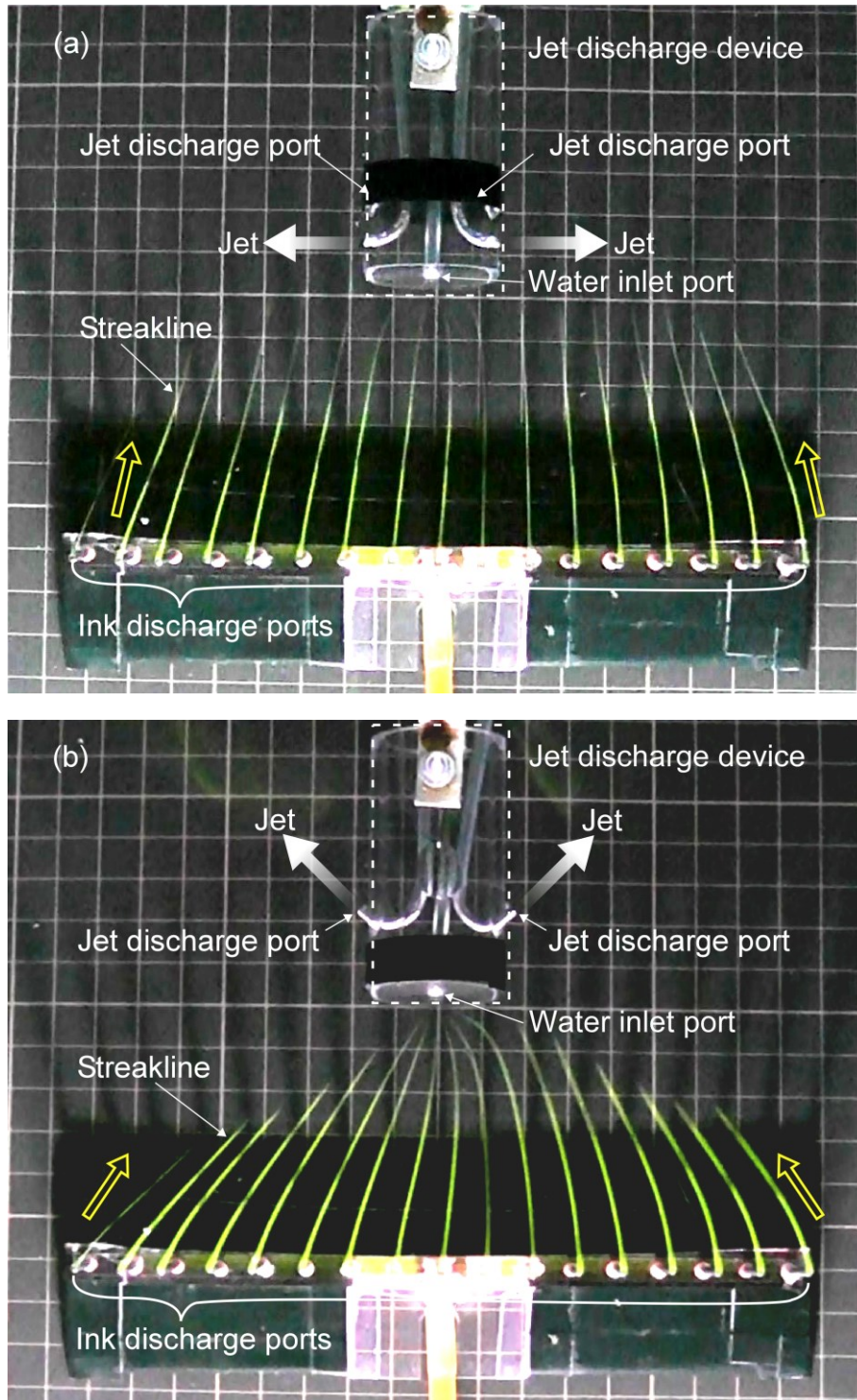


Fig. 2.2 Streaks of fluorescent ink when the jets were discharged (a) to sides and (b) 45° backward. © 2017 IEEE. Reprinted, with permission, from (27).

次に放出口から放出された色素が装置に到達するまでにかかる時間を測定した。装置の近傍まで色素溶液が近づくと、噴流や吸引の影響により色素が薄まり、どこまで到達したか判別することが難しくなる。そのため、装置の前方 10 mm の地点に色素が到達した時刻を調べた。色素の動きを記録する動画の撮影速度は、1 秒間に 30 フレームである。そのため、色素の到達時間を調べる時間分解能は 1/30 秒となる。色素が装置の前方 10 mm の地点に到達してから実際に装置の吸引口に吸い込まれるまでの時間は、1/30 秒未満であった。

アレイ状に並んだ色素溶液の放出口の内、中央に設置した放出口からの流脈線が、装置まで到達する時刻を記録した結果を Table 2.1 に示す。噴流を左右真横に放出した場合には平均 17.4 秒であり、噴流を後方 45°に放出した場合には平均 28.9 秒であった。噴流を左右真横に放出すると、装置に到達する流体の角度範囲が狭いかわりに、流体を速く引くことができる。噴流を後方 45°に放出すると、装置に到達する流体の角度範囲が広いが、引き寄せに時間がかかる。このように、噴流を用いて匂いを集める際には、匂いを引き寄せられる角度範囲と速度の間には、トレードオフの関係があることが分かった。

Table 2.1 Arrival time of the ink streaks to the jet discharge device from the ink discharge port.

Trial	Jet discharge to sides	Jet discharge to 45° backward
First	17.4 s	28.5 s
Second	17.1 s	30.4 s
Third	17.7 s	27.8 s
Average	17.4 s	28.9 s

## 2.4.2 色素を引き寄せる速度に水温が与える影響

噴流を用いて流体を引き寄せる際に、水温が与える影響を調べた。実験方法は前節で述べた方法と同様である。水温は、水底近傍と、水底から 70 mm の高さの 2 ヶ所で、アルコール温度計を用いて測定した。噴流の放出方向は後方 45° とした。

まず、水温が水底で 15.0°C、水面付近で 16.0°C の時に色素の放出源を噴流と同じ高さにした場合、色素の到着時間は 20 秒であった。これは、前項に示した実験結果よりも約 9 秒早い。次に、色素の放出源を水底から 5 mm の高さまで下げて同様に実験を行ったところ、到着時間は 27 秒であった。この実験は、冬の気温が低い時期に行った。実験を行った部屋の暖房をつけてしばらくすると、水面付近の水温は徐々に上がるが、床があまり断熱されておらず冷たいため、水底付近の水温は上がりにくい。半日ほど暖房を付けた状態にしておいても、水面付近と水底の間に約 1°C の温度差が生じていた。

そこで次に、水底と水面付近の水温を等しくして実験を行った。実験を行った部屋の暖房をつけて水温を上げた後、暖房を消してしばらくすると、水底と水面付近の水温が等しくなる。実験は冬に行ったため、暖房を消した状態にしておくと水温が徐々に下がってゆく。これを利用して適当な水温になった時に測定を行った。

水槽内の水温に対する到着時刻の変化を調査した結果を Fig. 2.3 に示す。実験を行った際の水温は、12.6°C、14.0°C、15.2°C であった。12.6°C と 15.2°C で

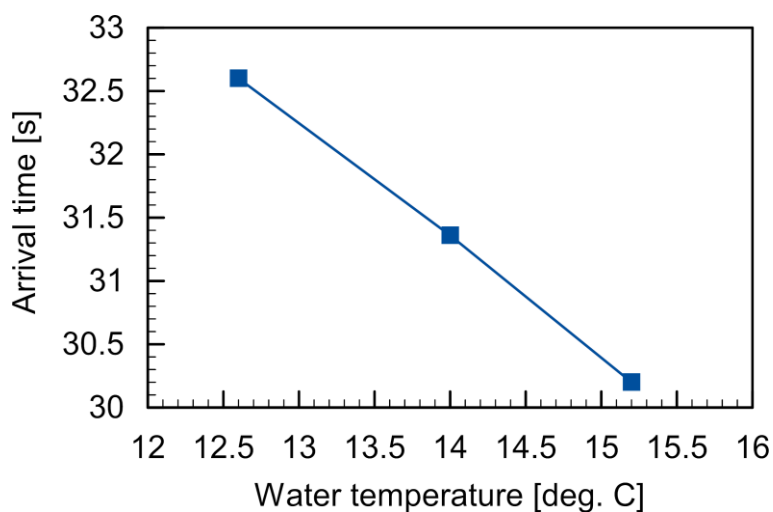


Fig. 2.3 Arrival time plotted against the water temperature.

は、色素の到着時間に 2.4 秒の違いがある。

前項で述べた実験では、水底と、水底から 70 mm の地点における水温が等しい条件下で実験を行っている。実験は数日間にわたって行っており、水温が変動していた可能性がある。しかし、噴流を左右真横に放出した場合に引き寄せにかかった時間と噴流を後方 45°に放出した場合に引き寄せにかかった時間の間には約 11 秒の差がある。これは、水温の変動によって現れる差よりも十分大きいと、前項に示した実験結果は信頼できるものである。

### 2.4.3 吸引による色素溶液の引き寄せ

噴流によって流体を引き寄せることの効果を評価するために、吸引を用いて流体を1点に引き寄せた場合にどの程度時間がかかるのか調査し、結果を比較した。実験には、噴流を用いた場合の実験と同じ水槽と噴流生成装置を用いた。ポンプで水を吸引したら、吸引した水を排出しなければならない。この実験では、吸引した水を水槽の中に噴流として放出するのではなく、噴流生成装置から噴流放出ノズルを取り外してチューブを繋ぎ、吸引した水を水槽の外に捨てた。噴流は左右に 150 mL/min ずつ放出していたため、吸引した水の流量は合計で 300 mL/min である。本項で述べる実験でも流量を揃え、300 mL/min で水を吸引した。測定は3回行った。測定結果を Table 2.2 に示す。噴流を放出した場合と比較して、吸引のみによる色素の引き寄せには大幅に時間がかかっていた。また、実験の際にはわずかに水槽内に残った対流の影響を非常に受けやすく、吸引による流体の引き寄せ効果が非常に小さいと分かった。

また、実験で得られた結果の妥当性を調べるために、引き寄せにかかる時間を理論的に算出した。噴流生成装置と色素の放出源付近の模式図を Fig. 2.4 に示す。吸引によって流体を引き寄せると、吸引口を中心として球対称に流体が引き寄せられていく。そのため、Fig. 2.4 の化学物質源の位置にある化学物質を引き寄せるためには、吸引口と化学物質源との距離を半径とした球の内部の流体を全て吸引する必要がある。この時、吸引による流体の引き寄せ時間は、おおよそ以下の理論式で求められることが伊藤らの研究により分かっている<sup>(28)</sup>。

$$V \cdot t = \frac{4\pi}{3} x^3 \quad (1)$$

Table 2.2 Time required to draw ink solution only by suction.

Trial	Time
First	101.2 s
Second	104.3 s
Third	109.2 s
Average	104.9 s



ただし、 $V$ は吸引流量、 $t$ は吸引にかかる時間、 $x$ は吸引口と色素の放出源との距離を表す。また、この式では水底の存在を無視している。

実験では、色素溶液の放出口を装置の前方 60 mm の地点に設置した。そして、装置から 10 mm の地点に色素が到達するのにかかった時間を測定した。したがって、吸引で色素を引き寄せるためには、半径 60 mm の球の体積から、半径 10 mm の球の体積を引いた部分の流体を全て吸引することになる。しかし、今回の実験の場合、吸引口を中心とする半径 60 mm の球を描くと、球の内部に噴流生成装置が入り込む。また、水底と吸引口の距離が近いため、引き寄せる流体の体積は、半球の体積とほぼ等しくなる。以上より、今回の実験で、色素を引き寄せるために吸引しなければならない流体の体積は、

$$\begin{aligned} & (\text{半径 } 60 \text{ mm の球} - \text{半径 } 10 \text{ mm の球}) \div 2 - \text{噴流生成装置の体積} \\ & = (904.77 [\text{cm}^3] - 4.18 [\text{cm}^3]) \div 2 - 42.41 [\text{cm}^3] \\ & = 407.88 [\text{cm}^3] \end{aligned}$$

と表される。実験では、水を 5 mL/s で吸引している。引き寄せにかかる時間は、求められた体積を 5 mL/s で割って 81.6 秒と求められる。実験で測定された時間と比較すると、理論的に算出された時間の方が 23.3 秒短い。これは吸引される体積を半球と仮定したためであり、水底の位置を考慮して正確に体積を計算すれば、理論値が実測値にさらに近づくと予想される。しかし、1 点から水を吸引した場合には球対称な流れ場が形成され、今回の実験でも、色素の引き寄せ時間を球の体積から見積もることができると確認された。

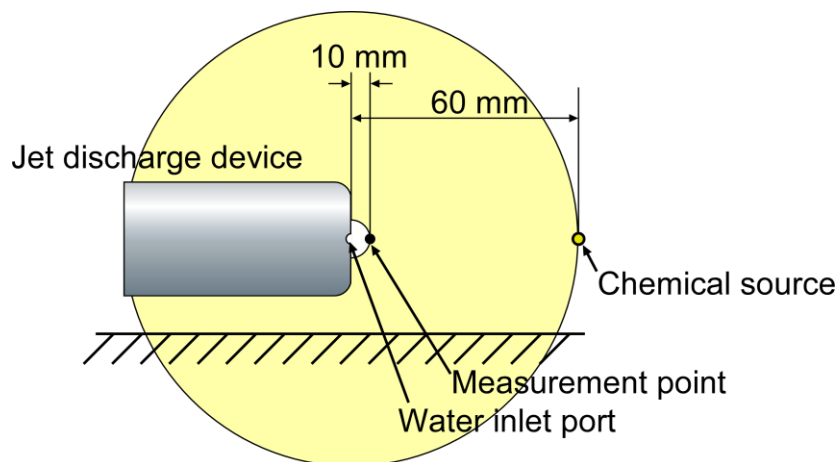


Fig. 2.4 Schematic diagram showing relative position of the water inlet port of the jet discharge device and the chemical source.

#### 2.4.4 噴流と吸引による匂いの引き寄せ効果の比較

次に、実験結果において、噴流によって流体を引き寄せために必要な時間と吸引によって流体を引き寄せるために必要な時間を比較する。色素が放出源から装置の手前 10 mm の地点に到達するまで、10 mm ごとにラップタイムを測定した。アレイ状に並んだ色素の放出口の内、中央に設置された放出口から伸びた流脈線の到達時刻を記録した。そして、測定したラップタイムを使い、色素の放出口が装置の前方 10 mm から 60 mm までの地点にあった場合に、それぞれの距離から色素が装置に到達するのにかかる時間を算出した。例えば、装置から 30 mm の地点で放出された色素を引き寄せるのに必要な時間は、装置からの距離が 30 mm の地点から 20 mm までにかかったと 20 mm から 10 mm までのそれぞれのラップタイムを合計することで算出される。前述したように、前方 10 mm の地点から装置まで色素を引き寄せるのに必要な時間は、無視できるほど小さい。

Fig. 2.5 に、装置からの距離と算出された時間の関係を示す。吸引によって流体を引き寄せる場合には、距離が長くなるに応じて必要な時間が大幅に増加していくのに対して、噴流を用いた場合には増加率が小さい。第 1 章で紹介した

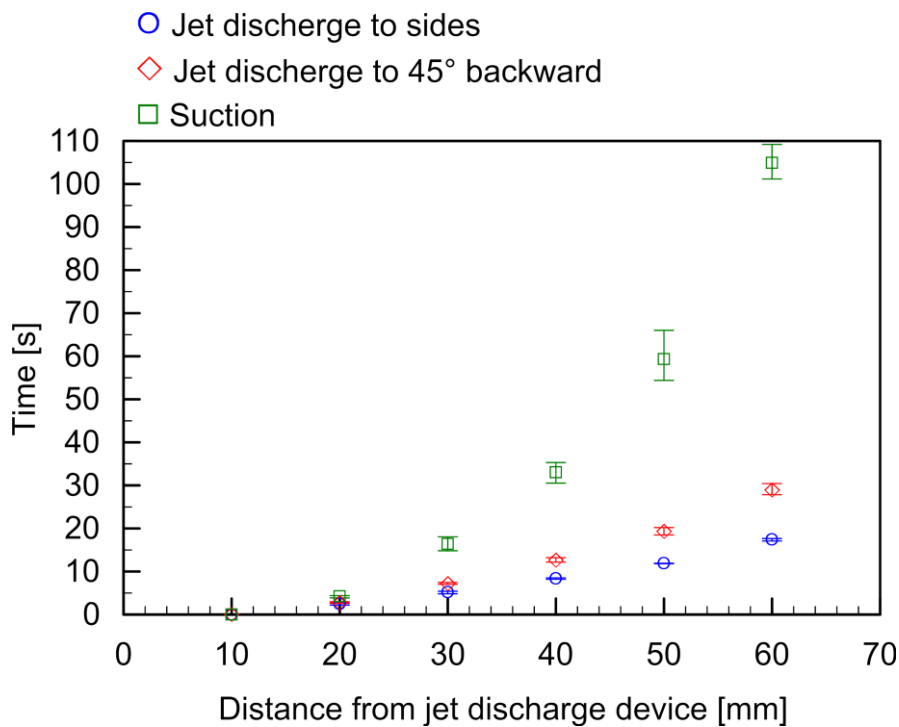


Fig. 2.5 Time required for dye solution to reach jet discharge device from different distances.

ように、噴流を用いた方が、引き寄せる流速の距離に応じた減衰が小さいことが知られている<sup>(8)</sup>。実験においても、吸引と噴流を比較した場合に噴流を用いた方が、距離に対する到達時間の増加が緩やかであることが確認された。色素が装置の近傍にある場合には、時間の差が少ない。しかし、吸引のみを行った場合と左右真横に噴流を放出した場合を比較すると、60 mm 前方にある色素を引き寄せる際には、吸引を用いる場合と噴流を用いる場合で、色素を引き寄せるために必要な時間に 5 倍もの差が出るということが分かった。水中において、流体を引き寄せるために噴流を用いることは非常に有用であることが示されている。

また、装置の正面からの距離が 30 mm の位置から色素を引き寄せるのに要する時間は 5.18 秒であり、20 mm の時には 2.43 秒であった。ザリガニは餌を探索して歩き回っている時に、たびたび立ち止まって再び歩き始めるという行動を繰り返す。この立ち止まっている時間は、長くても 3 秒程度である。このザリガニの行動と歩行速度を考えると、ザリガニが餌を探索して歩き回っている時には、前方の 20 mm から 30 mm の距離にある匂いを引き寄せていると示唆される。

## 2.5 シミュレーションによる流れ場の解析

本研究では、商用の数値流体力学解析ソフトウェアである ANSYS Fluent 14.5 (ANSYS, Inc.) を用いた。数値流体力学シミュレーションでは、空間を離散化して数値的に解を求める。ANSYS Fluent でシミュレーションを行う際には、まずジオメトリモデルを作成し、次に計算領域を離散化する。そして、境界条件と初期条件を設定してシミュレーションを開始する。先行研究<sup>(26)</sup>で用いられていたシミュレーション条件を元に、本研究では、主に計算領域の離散化を行う条件と境界条件を変更した。

### 2.5.1 各工程における条件の設定

#### ジオメトリモデル

シミュレーション領域の設定は、先行研究と同じである。幅 2100 mm、長さ 2100 mm、高さ 100 mm の直方体の中には水が満たされており、Fig. 2.6 に示すように中央に噴流生成装置が設置されている。噴流生成装置の前面の中央を座標系の原点とし、噴流生成装置が  $x$  軸の正の方向を向くように  $x$  軸の向きが設定されている。実験に合わせて、シミュレーション領域の上面は水面、底面は水底を想定している。しかし、シミュレーション領域の側面は壁ではなく、水

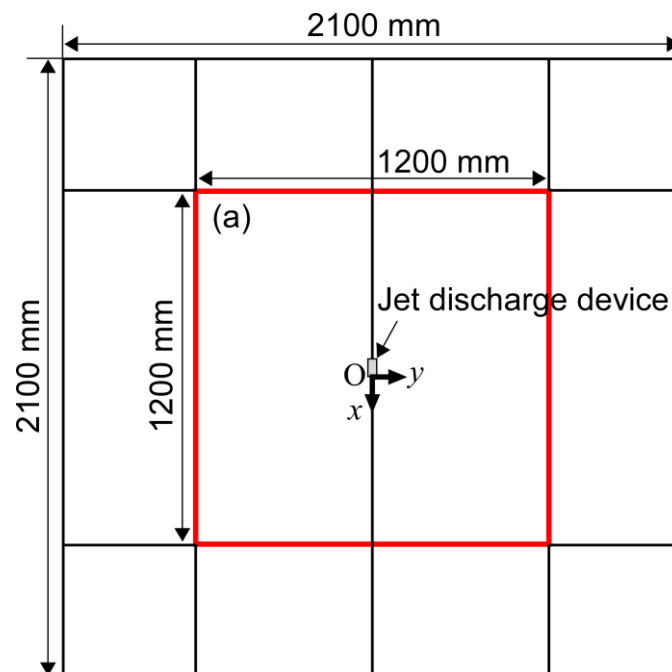


Fig. 2.6 Division of computational region.

に満たされた別の領域と接していると仮定され、開放壁面となっている。シミュレーション領域内に設置されている噴流生成装置は、実物と同じ大きさを持つ直径 30 mm、長さ 60 mm の円筒で模してある。先行研究では、噴流の放出方向を左右の真横、後方 45°、上方 45°の 3 通りに変えているが、本研究では左右の真横と後方 45°の 2 通りについてシミュレーションを行った。

### 計算領域の離散化

速度の変化が大きい領域は、格子を細かくして離散化した方が、より正確な計算結果が出る。先行研究では、速度の変化が大きいことが予想される吸引口の周辺や噴流の発達領域、装置周辺の領域に、細かい格子を生成していた<sup>(26)</sup>。特に、噴流の発達領域を重要視しており、直径 2.84 mm の噴流の放出ノズルよりも、十分小さい格子を噴流の発達領域に生成している。一方、装置周辺の領域に関してはあまり検討が行われていなかった。そこで本研究では、装置周辺のできるだけ大きな領域で細かい格子を切るように設定した。Fig. 2.6 中の噴流生成装置を含む領域(a)において、格子分割を細かくする。今回は、この領域の大きさを 1200 mm × 1200 mm とした。先行研究では領域(a)の寸法を、左右真横に噴流を放出するシミュレーションでは 240 mm × 284 mm、後方 45°に放出するシミュレーションでは 800 mm × 800 mm としていた。

### 乱流モデルと境界条件の設定

乱流モデルには realizable  $k$ - $\epsilon$  モデルを使用した<sup>(26)</sup>。計算条件を Table 2.3 にまとめる。境界条件は、以下のように設定した。吸引口には一様流速分布を持つ流出境界が適用されている。流出速度は実験における吸入流量が 300 mL/min であることから計算して 0.795 m/s とした。噴出面における流出速度は、その 2 分の 1 である 0.395 m/s とした。また、realizable  $k$ - $\epsilon$  モデルでは、噴出面における乱流強度を設定する必要がある。この値の最適値を竹村らが試行錯誤的に求めており、乱流強度を 10%に設定すると最も妥当な結果が得られると報告されている<sup>(26)</sup>。水底と噴流生成装置の壁面には、滑り無し境界条件、水面には滑り壁境界条件が適用されている。計算領域を表す直方体の側面は自由開放とし、ゲージ圧 0 Pa の圧力境界が適用されている。

Table 2.3 Details of the simulations.

Solution algorithm	SIMPLE
Discretization schemes	Gradient: Least squares cell based Pressure: Standard Momentum: QUICK
Convergence criteria for residual error	$10^{-3}$

しかし、水底や水面とは異なり、シミュレーション領域の側面には流体の流入がある。そのため、入口境界条件として圧力の値を指定するだけでなく、 $k$ と $\varepsilon$ も設定する必要がある。ANSYS Fluent では、これらの値を指定するために以下の四つの方法が用意されている<sup>(29)</sup>。

#### 1. k and epsilon

$k$ と $\varepsilon$ の値を直接入力する方法である。境界における $k$ と $\varepsilon$ の数値が既知の場合に使用する。

#### 2. Intensity and viscosity ratio

乱流強度[%]と乱流粘性比を規定する方法で、比較的良く用いられる。乱流強度はおおよそ1~10%程度、乱流粘性比はおおよそ1~10程度の数値をとる場合が多い。

#### 3. Intensity and hydraulic diameter

乱流強度[%]と水力直径[m]を指定する方法である。ダクトなどの内部流れを計算する際に使用する場合が多い。

#### 4. Intensity and length scale

乱流強度[%]と長さスケール[m]を規定する方法である。渦の長さスケールが予測できる場合に使用される。

竹村らが行ったシミュレーションでは、1の方法が用いられており、 $k$ と $\varepsilon$ にはデフォルトで入力されていた適当な値が設定されていた<sup>(26)</sup>。しかし、今回

のシミュレーションにおいては、 $k$  と  $\varepsilon$  の値が既知ではなく、入口境界における乱流粘性比を推定することも困難である。渦の長さスケールも既知ではないことから、3の方法を用いた。乱流強度は10%とし、水力直径は噴流の放出口の直径と同じ2.84 mmとした。以上の設定で、領域全体の流速が0 m/sであることを初期条件として解析を開始し、定常計算を行った。

## 2.5.2 噴流生成装置の周囲に形成された流れ場

噴流の周囲に形成された流れ場のシミュレーション結果を Fig. 2.7 と Fig. 2.8 に示す。比較のために先行研究で行われたシミュレーション結果を並べて示す。これらの図では、計算領域を上面から見ている。図中の小さな矢印は、吸引口と放出口の中心軸を通る水平面における流れの向きを表し、その速さをグレースケールで表している。また、流速のグレースケールの最大値を 10 倍に広げたコンター図を重ねて表示している。

Fig. 2.7 は噴流を左右の真横に放出した場合の結果である。条件変更前と変更後で全体的な流れ場に違いは見られなかった。Fig. 2.8 は噴流を左右の後方  $45^\circ$  に放出した場合の結果である。こちらは、計算領域の境界付近における噴流の流速分布に違いが見られた。本研究において、計算領域の側面の境界条件を改善した。一般的には、境界から領域に入る乱流よりも計算領域内部で生成される乱流の方が高レベルであり、計算結果に対する流入境界条件の影響は小さいことが多い。しかし、本研究においては、Fig. 2.8 に見られるように自由開放境界付近の噴流の形状に改善が見られた。Fig. 2.8(a)の右上と左上に着目すると、自由解放面に到達する前に放出された噴流が二又に分かれてしまっている。しかし、Fig. 2.8(b)では、二又に分かれることなく噴流が伸びている。



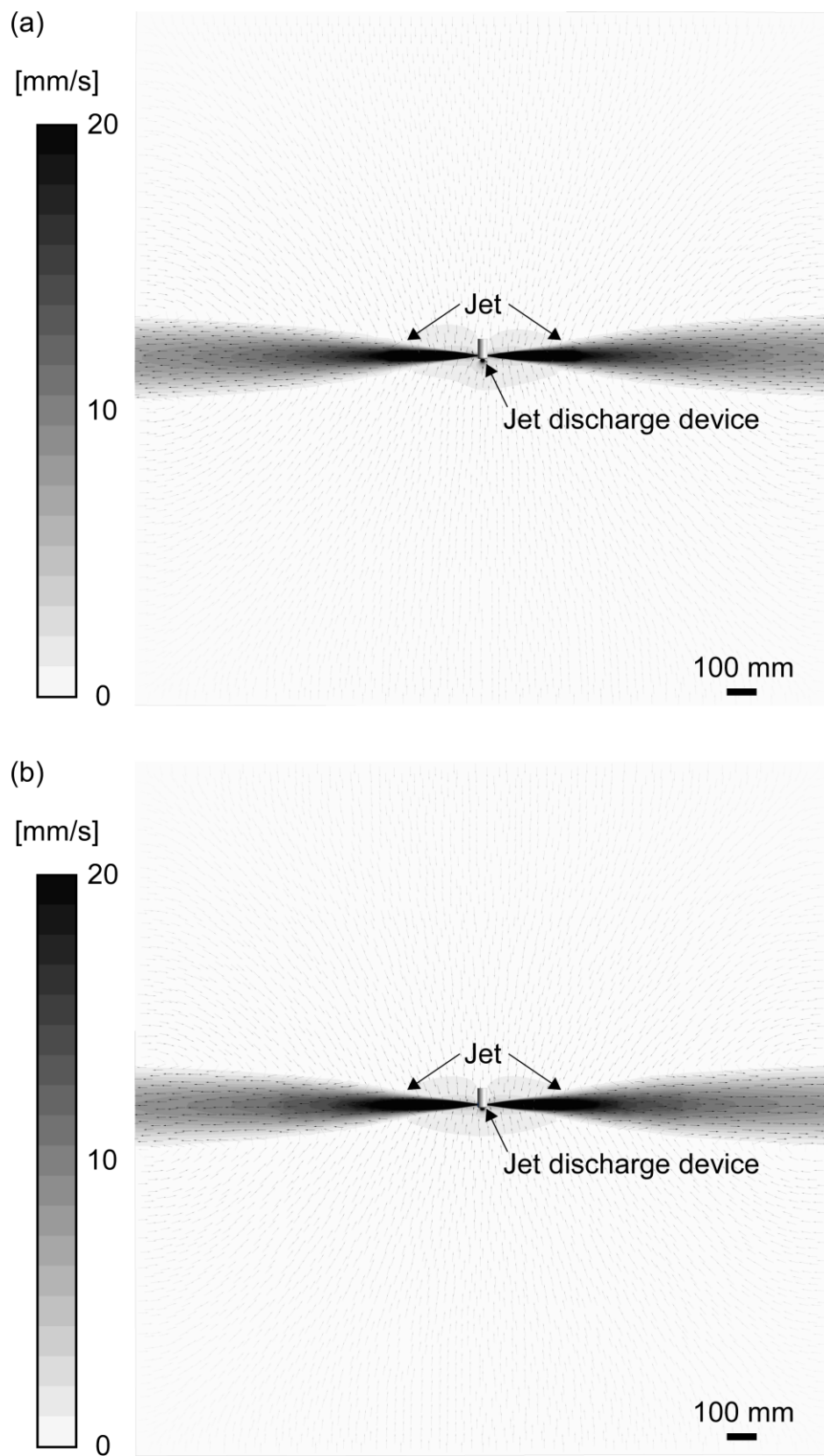


Fig. 2.7 Results of simulations for the jets discharged to sides. (a) Before changing the simulation conditions. Adapted with permission from (30). (b) After changing the simulation conditions.

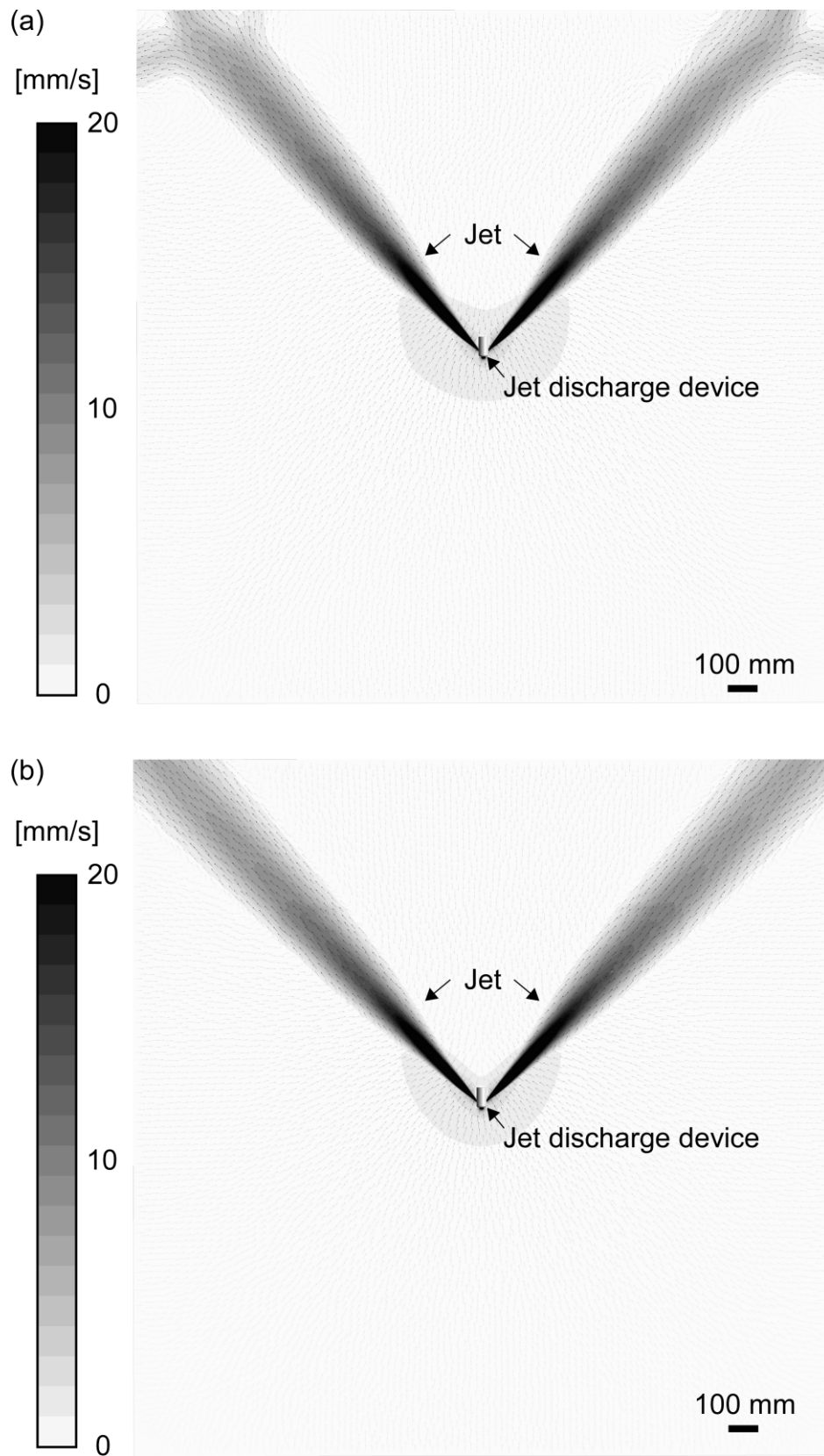


Fig. 2.8 Results of simulations for the jets discharged to  $45^\circ$  backward. (a) Before changing the simulation conditions. Adapted with permission from (30). (b) After changing the simulation conditions.

次に、装置に向かって前方から化学物質を引き寄せる流れの流速に関する計算結果を示す。装置前方における流れの流速分布を Fig. 2.9 に示す。各種条件を変更する前のシミュレーション結果は、文献(30)より得た。噴流生成装置の前方に向かって  $x$  軸の正の向きをとっているため、装置の前方 60 mm の地点を中心として、 $y$  軸の正の向きに 25 mm、負の向きに 25 mm の範囲で流速を調べた。計算領域は  $x$  軸に関して左右対称であるため、引き寄せられる流れも左右対称になるはずである。噴流の放出方向がいずれの場合にも、条件変更後のシミュレーションで得られた流れ場の方が左右対称に近付いている。

また、流速の大小関係を比較する。2.4 節で述べた実験において、流体を最も速く引き寄せることができたのは、噴流を左右真横に放出した場合であった。2.4 節で述べた実験においては、装置の正面に設置した放出口から色素が装置に引き寄せられる時間を記録した。そこで、Fig. 2.9 の  $y = 0$  [mm] の地点に注目すると、噴流を後方 45° に放出した場合の方が、約 0.2 mm/s 速い流速を示している。しかし、実験において色素を引き寄せるのにかかった時間は、後方 45° に噴流を放出した方が長くなっており、Fig. 2.9 に示すシミュレーション結果と矛盾している。

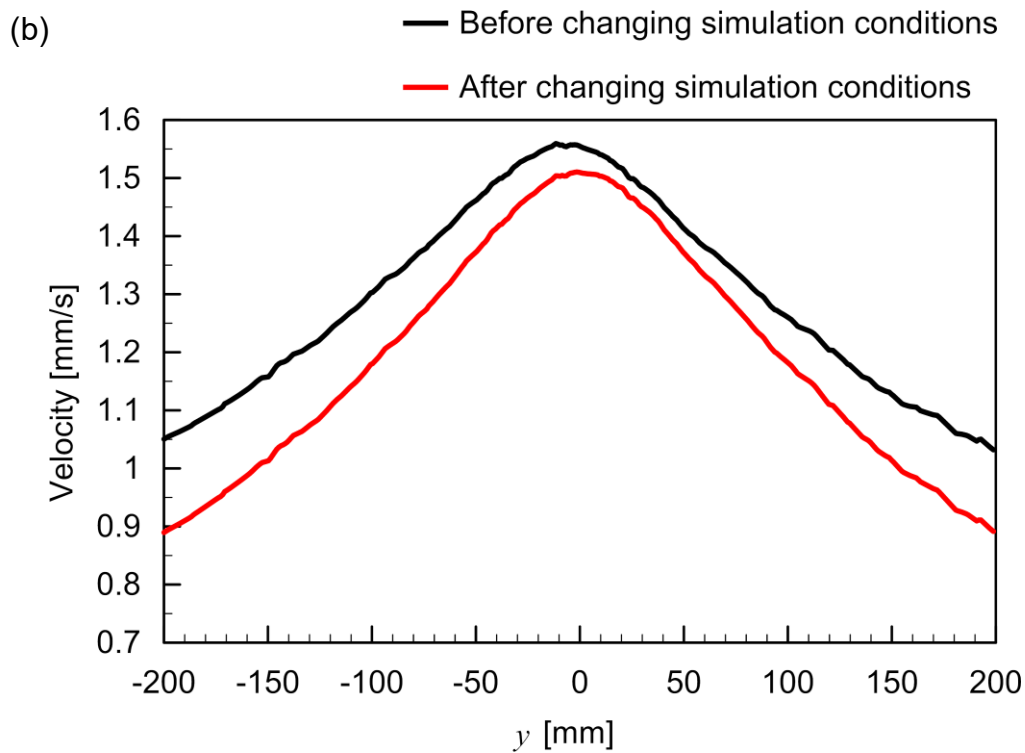
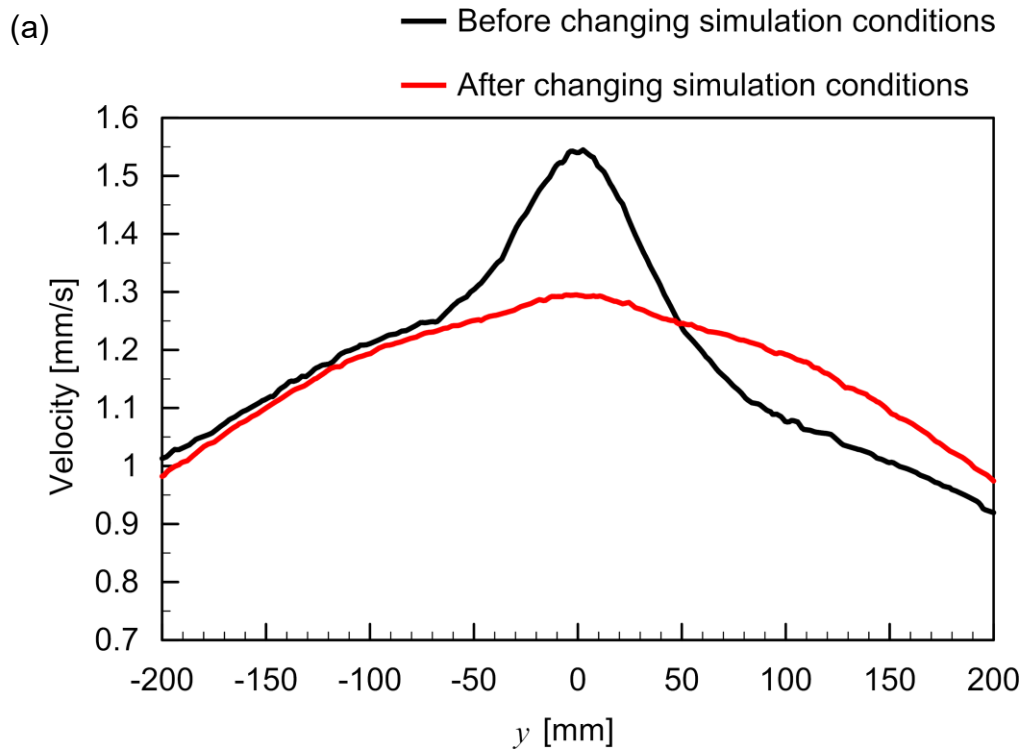


Fig. 2.9 Transversal flow velocity profile at 60 mm to the front of the jet discharge device. (a) When jets were discharged to the sides. (b) When jets were discharged to 45° backward.

### 2.5.3 2本の噴流間の相互作用

Fig. 2.10 は、Fig. 2.8(b)に示した噴流を後方 45°に放出した場合のシミュレーション結果に、噴流の放出口から 45°方向に向かう直線を引いたものである。噴流の放出口の向きは後方 45°方向であるが、実際に放出された噴流が伸びていく角度は装置の後方側にずれ、45°以上となっている。図中の矢印の色の濃さは流速の大小を表しており、色が濃いほど流速が速い。

噴流を左右の真横に放出した場合 (Fig. 2.7) と比較すると、噴流を左右の真横に放出した場合は装置の前方と後方で流速がほぼ等しいのに対し、噴流を後方 45°に放出した場合は、装置の後方にある流体の流速が遅くなっている。後方 45°に噴流を放出した場合、2本の噴流が左右に並ぶため、噴流に引き寄せられる流体を噴流同士で奪い合う。その結果、噴流の後方の流速が遅くなる。その分だけ、前方から引き寄せる流量が増え、装置前方における流速が速くなったのではないかと考えられる。

これを確かめるために、後方 45°に放出する噴流を片側のみにしてシミュレーションを行った。シミュレーション条件は他のシミュレーションと同じである。結果を Fig. 2.11 に示す。同図では、後方 45°の方向に引いた直線と噴流の中心が一致している。また、噴流の前方と後方の流体の流速を見ると、ほぼ等しくなっていることが分かる。この結果は、噴流が相互に引き寄せ合ったために、装置後方から引くことができる流量が少なくなった結果、装置前方から引き寄せる流量が増え、流速が速くなったという仮説を裏付けている。

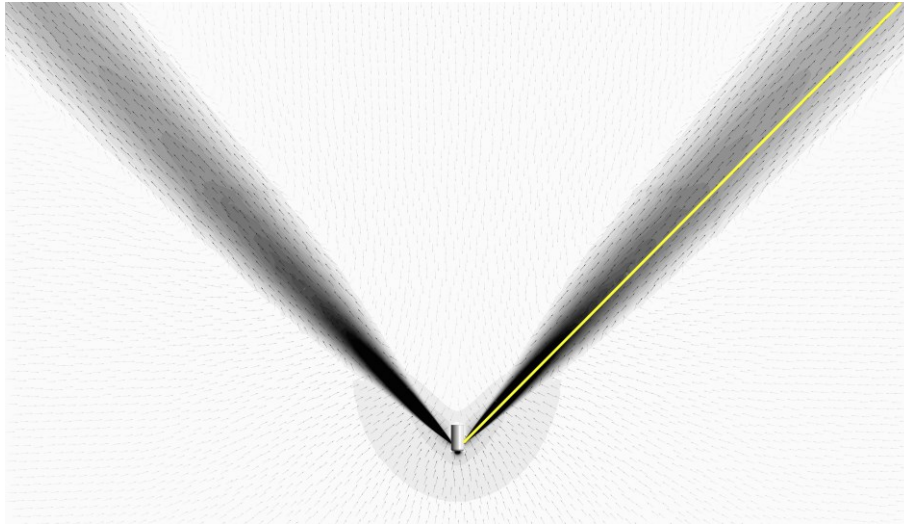


Fig. 2.10 Enlarged view of the simulation result shown in Fig. 2.8(b) around the jet discharge device. The yellow line shows the initial jet discharge direction.



Fig. 2.11 Result of simulation for a jet discharged  $45^\circ$  backward to one side. The yellow line shows the initial jet discharge direction.

## 2.6 シミュレーション結果と実験結果の比較

これまでのシミュレーションでは、装置の正面の流体に着目すれば定性的に妥当な流れ場が計算できていたように見えていたが、計算領域の境界付近の流れ場が左右対称ではなかった。定量的にも評価可能なシミュレーションを行うためには、装置付近、つまり計算領域の中央付近だけでなく、境界付近の流れ場も正しく計算できていることが必要となる。そこで、本章で述べた研究では、流れ場を定量的にも再現するシミュレーションを目指して、まずは計算領域のどの範囲でも定性的に妥当な結果が得られるシミュレーション条件を求めることを目標とした。

ここでは、得られたシミュレーション結果を実験結果と比較する。ANSYS Fluent では、各座標における流速を座標値と共に出力することができる。そこで、色素放出地点から噴流生成装置までを 1 mm ごとの区間に分割し、各区間の始点と終点においてそれぞれの座標における流速の平均を取り、流体がこの 2 点間を移動するのにかかる時間を算出した。各区間について同様に時間を算出して、全範囲分を合計することにより、装置の前方 60 mm の地点から流体を引き寄せるのにかかる時間を算出した。

Table 2.4 に引き寄せに要する時間をまとめる。境界条件を変更する前のシミュレーションでは、引き寄せられる流体の流速まで再現できておらず、噴流を後方 45°に放出した場合の流速が速かった。改善を行った結果、二つの噴流放出方向の間で流速の差は少なくなった。しかし、2.5.3 項に述べたように、2 本の噴流の相互作用の影響により、装置の前方にある流体の流速が速くなっており、噴流を後方 45°に放出した場合の方が左右真横に放出した場合よりも流速が速いままである。そのため、化学物質を引き寄せるのにかかる時間は、噴流

Table 2.4 Comparison between the simulations and experiments on the time required for chemical to reach the jet discharge device.

Jet discharge direction	Time calculated from results of the simulations	Time measured from results of the experiments
Side	26.5 s	17.4 s
45° backward	23.3 s	28.9 s

を左右真横に放出した場合の方が長く、後方 45°に放出した場合の方が短い。

一方、実験では、噴流を左右真横に放出した場合の方が引き寄せにかかる時間が短かった。実験において噴流を左右真横に放出した場合と後方 45°に放出した場合を比較すると、左右真横に噴流を放出した場合の方が、噴流が早く壁に達する。そのため、噴流が壁に衝突して水槽内を循環する流れが形成される影響が大きくなりそうである。2.3.2 項で述べたように、本研究にて噴流を放出する時間を実験によって検討した。しかし、水槽内の循環流の影響を取り除ききれておらず、色素の引き寄せにかかる時間が、壁がない場合よりも短くなっている可能性がある。このことは、噴流で流体を引き寄せる化学サンプリング手法では、周囲の障害物の有無によって、化学物質を検出するまでに要する時間が変わることを示唆している。



## 2.7 本章のまとめ

噴流を利用した能動サンプリングの有用性を示すため、噴流生成装置を用いて噴流の方向を切り替えて、それぞれの噴流方向における流体の引き寄せ効果を調査した。噴流を左右真横に放出すると、装置に到達する流体の角度範囲が狭いかわりに、速く引くことができた。一方、噴流を後方 45°に放出すると、装置に到達する流体の角度範囲が広いが、引き寄せに時間がかかった。このように、噴流を用いて周囲の流体を引き寄せる際には、引き寄せられてくる流体の角度範囲と速度の間にトレードオフの関係があることが確認された。

化学物質を引き寄せるために工学的に最も単純な方法として、ポンプを用いて1点に流体を吸引する方法がある。噴流を利用して流体を引き寄せた場合と、吸引によって流体を引き寄せた場合を比較したところ、吸引による引き寄せは大幅に時間がかかることが分かった。また距離が離れるにつれて、引き寄せにかかる時間の増大率が非常に大きいことが確認された。噴流を用いて流体を引き寄せると、吸引よりも早く引き寄せられることが確認され、流体を引き寄せるために非常に有効な方法であることが分かった。

噴流を左右の真横に放出した場合において実験結果とシミュレーション結果を比較した結果、実験では水槽内の循環流の影響で引き寄せに要する時間が短縮されていた可能性があることが分かった。したがって、噴流で流体を引き寄せる化学サンプリング手法では、周囲の障害物の有無によって、化学物質を検出するまでに要する時間が変わると示唆される。

実験では噴流を真横に放出した場合の方が引き寄せ時間が短かったが、これが仮説通り循環流の影響だとすると、流体の角度範囲と速度の間にトレードオフの関係があるという結論と一見矛盾する。しかし、後方 45°に噴流を放出した場合に引き寄せ時間が短いのは装置の正面のみであり、Fig. 2.9 でも正面から横にずれた場所の流速は遅くなっている。様々な方向から色素を引き寄せてくる時間を平均すれば、広い角度から引き寄せる方が時間が長くかかるのは、エネルギー保存則からも明らかである。

---

## 第3章

# 噴流による流体の引き寄せ速度の解析

---

### 3.1 はじめに

本研究では、能動化学センシングシステムの開発に向けて、噴流の引き寄せ効果を、実験とシミュレーションにより調査してきた。第2章では、ザリガニを模倣した装置を用いて、噴流を生成した際に装置の前方にある流体がどのように装置に向かって引き寄せられるかを調査した結果を述べた。その結果、噴流の放出方向によって引き寄せに要する時間が異なることが分かった。水中ロボットに搭載する噴流を用いた探索アルゴリズムの開発を想定すると、シミュレーションで噴流の放出方向ごとの引き寄せ効果を手軽に調べられることが望ましい。しかし、第2章で述べたシミュレーションでは、定性的な流れ場は実験結果と一致していたが、化学物質の引き寄せ時間に関しては定量的に妥当な結果は得られていなかった。実験は水槽内で行っており、水槽の壁があるが、シミュレーションでは計算領域の側面を自由境界面としていた。実験では、噴流が壁に当たって水槽内を循環する流れが生成され、噴流に向かっていく流れが速くなったのではないかと予想がつく。そこでまず、計算領域を実験環境と同様に変更した。さらに、その他にもメッシュの細かさなどシミュレーション条件を全体的に見直して、流れ場を定量的に評価できるシミュレーション条件を求めることを目的とし、様々な検討を行った。本章では、これらの結果を述べる。

## 3.2 シミュレーション領域の設定と領域の離散化

第2章で述べた実験は、1200 mm × 800 mm の子供用プールで行っており、周囲を壁で囲まれている。一方で、シミュレーションでは計算領域の側面を自由境界面としていた。実験では、壁面の影響がなるべく出ないように測定時間を設定したものの、装置から放出された噴流が壁に衝突して水槽内を循環する流れとなり、噴流に向かう流れが速くなったのではないかと予想がつく。そこで、シミュレーションの計算領域の大きさを実験で用いた子供用プールと同じ1200 mm × 800 mm にして計算を行い、シミュレーションの妥当性を調べた。

Fig. 3.1(a)に計算領域の上面図を、Fig. 3.1(b)に噴流生成装置付近の拡大図を示す。Fig. 3.1(a)に示すように、計算領域の周囲に沿って a から f の領域に区切った。計算領域の周囲を囲む面には、境界条件として滑りなし壁を設定する。そして、壁面付近の処理として壁関数を適用する。壁関数を適用する際に最適な大きさとなるよう、領域 a から f には適切なサイズのメッシュを生成する必要がある。メッシュの大きさを変えてシミュレーションをして比較検討した結果、a から f の領域には 5 mm 四方の構造メッシュを生成することとした。

また、噴流放出口付近は噴流の流速変化が大きい。Fig. 3.1(b)に示したように、噴流の中心に、メッシュが十分細くなるように設定した領域 A を作成した。領域 A のメッシュの大きさは、0.284 mm から 0.568 mm とした。メッシュ数が多すぎると計算負荷が大きくなるため、計算負荷と計算精度のバランスを取りながら、メッシュの大きさを適宜変更した。さらに、領域 A の周りに領域 B を作成することで、メッシュの大きさの変化を緩やかにした。計算領域を区切り、噴流に隣接しているメッシュが粗くなり過ぎないようにしている。以上の設定の一覧を Table 3.1 にまとめた。

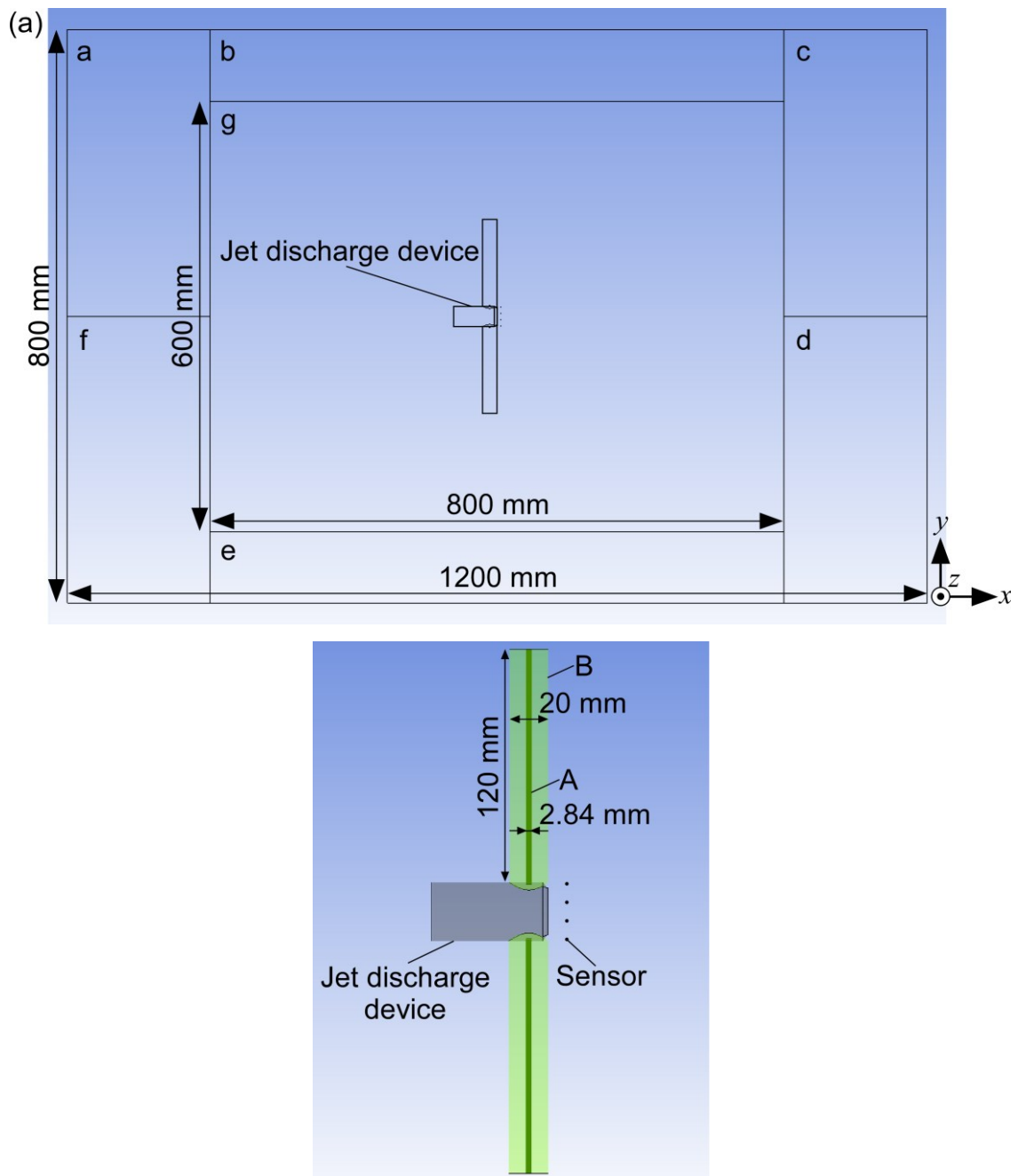


Fig. 3.1 Division of computational region. (a) Top view of computational region. (b) Enlarged view of surroundings jet discharge device. Reprinted from (31).

Table 3.1 Geometry setup and mesh details.

		Jet discharge to the sides	Jet discharge at the 45° backward
Computational domain		800 mm in width, 1200 mm in height, and 100 mm in depth	
Mesh details	Size of cells in area a – f	5 mm square	
	Size of cells in area A	0.284 mm	0.568 mm
	Growth rate	1.06	
	Total number of cells	12648545	7346386

## 3.3 定常計算による流れ場の解析

### 3.3.1 境界条件と計算条件

初めに、前章で述べたシミュレーションと同様に、定常計算を行った。Table 3.2 に境界条件の一覧を示す。これまでのシミュレーションと同様に、噴流生成装置の表面には滑りなし壁を設定した。計算領域の側面と底面には、滑りなし壁を適用した。上面については、Wall を選択した後、No Slip ではなく Specified shear を選択し、 $x, y, z$  方向のせん断応力を 0 として、水面を再現した。吸引口と放出口には、velocity inlet を適用した。実験で設定した流量から算出し、吸引口の流速を  $-0.789$  m/s、放出口の流速を  $0.395$  m/s と設定した。いずれも、一樣流速を与えた。

乱流モデルには Realizable  $k$ - $\epsilon$ モデルを使用した。乱流に関する入口境界の設定には、乱流強度と水力直径を設定する方法を用いた。前章で述べたシミュレーションと同様に、ここでは乱流強度を 10%、水力直径  $0.00284$  m に設定した。壁面付近の処理には標準壁関数を適用した。

また、計算の初期値には、Hybrid Initialization を適用した。Hybrid Initialization とは、オイラー方程式を元に設定した回数（10 回程度）だけ計算を行い、その結果を初期値に設定する方法である。定常計算の場合、理論的には初期値の違いによって結果に差は出ないはずであるが、結果に近い値を初期値に入力することで計算時間を短縮できる。

Table 3.2 Boundary conditions.

Name of surface	Boundary condition
Bottom	Wall: No slip condition
Sidewall	Wall: No slip condition
Water surface	Wall: Specified shear Shear stress: $x = 0, y = 0, z = 0$
Jet discharge device	Wall: No slip condition
Jet discharge port	Velocity inlet: $0.395$ m/s
Water suction port	Velocity inlet: $-0.789$ m/s

### 3.3.2 シミュレーション結果

シミュレーション結果を Fig. 3.2 に示す。Fig. 3.2(a)が噴流を左右真横に放出した場合の流れ場であり、Fig. 3.2(b)が噴流を後方 45°に放出した場合の流れ場である。これらの図は、計算領域を上面から見た図である。図中の小さな矢印は、吸引口と放出口の中心軸を通る水平面における流れの向きを表し、その速さをグレースケールで表している。また、流速のグレースケールの最大値を 10 倍に広げたコンター図を重ねて表示している。

Fig. 3.2(a)の中の白抜きの矢印は、装置の前方の流れ場の大きな方向を表している。第 2 章で紹介した実験結果と同様に、装置の正面の領域の流体が真っ直ぐ装置まで引き寄せられている。これを詳しく調べるために、第 2 章の実験における色素溶液の放出口の位置と同じ位置に、ANSYS Fluent 上で流脈線の開始点を作成した。実験で使用した色素溶液の放出口は 17 個あり、10 mm 間隔で並んでいる。装置の正面から 60 mm 離れた位置に中央のインク放出口を設置していた。17か所の色素溶液の放出口を開始点とした流脈線を Fig. 3.3 に示す。図中の装置の前に並んだ小さい赤い球が流脈線の開始点を表す。開始点の位置は左右対称に設定しているため、流脈線も左右対称となるはずだが、計算結果は左右対称にはならなかった。流脈線の内、中心とその左右を含む 3 本の流脈線は装置に到達し、吸引口に吸い込まれている。それ以外の流脈線は、装置の正面には到達せず、噴流に巻き込まれて壁に衝突した後、三次元的に広がっている。一部の流脈線は、水面付近を通過して再び噴流に巻き込まれている。また、一部の流脈線は、Fig. 3.3 の右側（装置の前方側）に向かって壁に沿って広がっている。そして、図中の右端の壁面に到達する前に、再び噴流によって引き寄せられている。

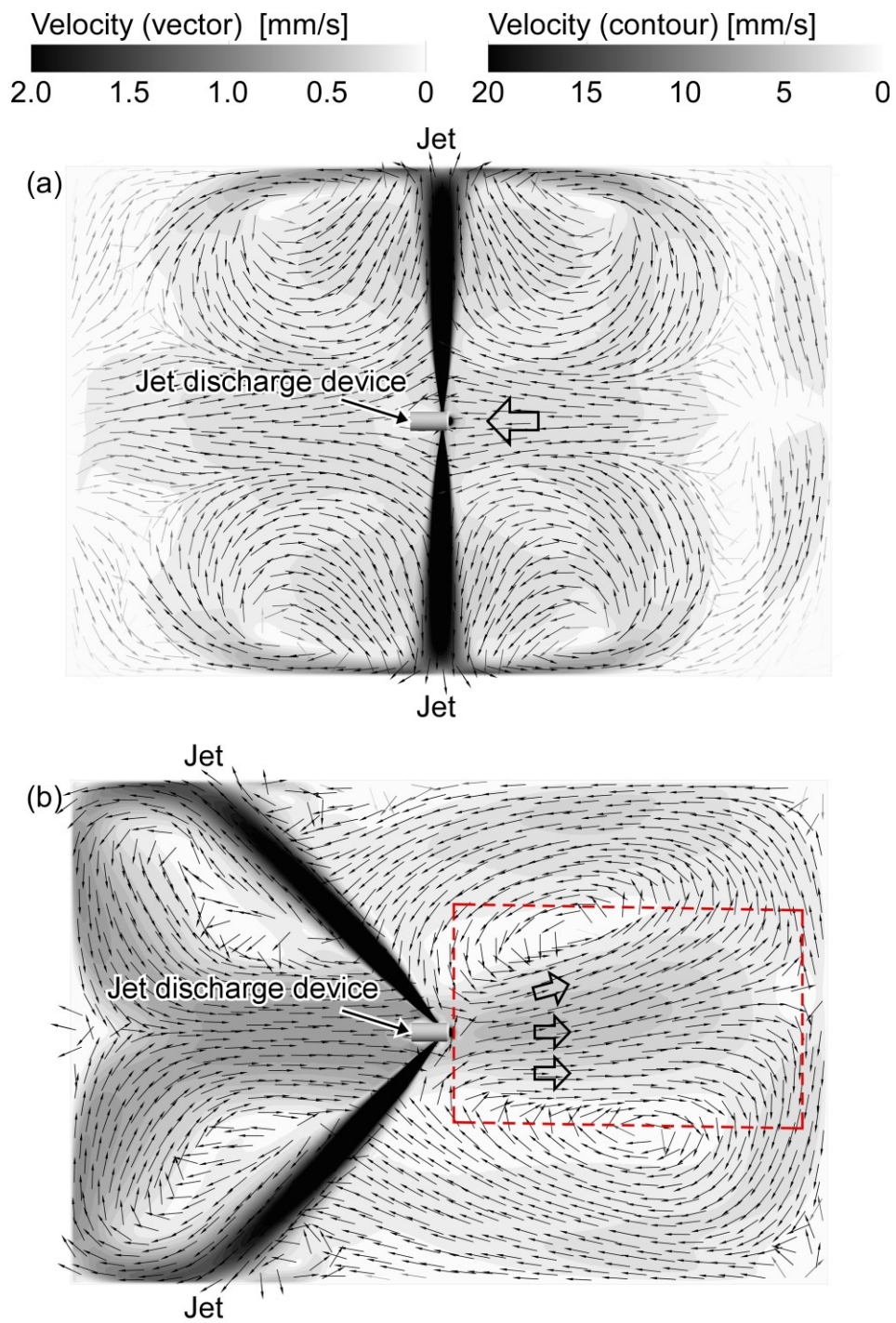


Fig. 3.2 Results of steady state simulation. (a) Result of the jets discharged to sides. (b) Result of the jets discharged to 45° backward.



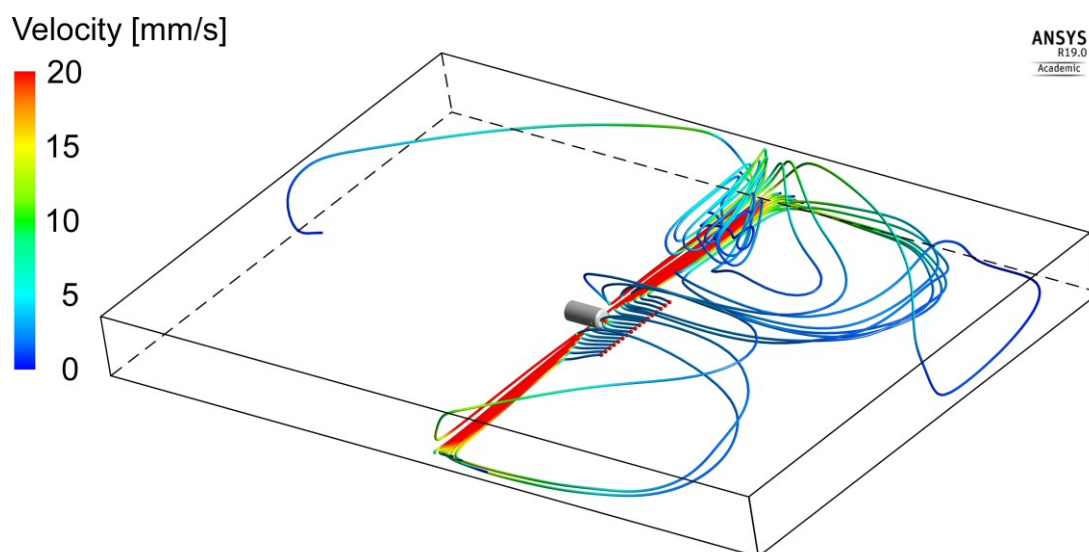


Fig. 3.3 Streaklines from the dye solution discharge ports. The small red balls show the dye solution discharge ports. The color bar shows the absolute value of the flow velocity.

次に、Fig. 3.2(b)に示す後方 45°に噴流を放出した場合の流れ場を詳しく見る。Fig. 3.2(a)と同様に、白抜き矢印は、装置の前方の流れ場の大まかな方向を表している。噴流によって装置の前方から流体が引き寄せられるはずだが、破線で囲った領域の流れが逆向きになっている。シミュレーションでは定常流れ場を計算している。一方で、第 2 章で述べた実験では、噴流の放出を開始してから 30 秒経過した時に色素溶液の放出を開始している。そのため、実験で測定を行った時点では、水槽内を循環する流れ場はできておらず、噴流を放出し続ければ、逆向きの流れに変わる可能性をまず疑った。そこで、第 2 章で述べた実験と同じ条件で実験を再び行い、噴流を後方 45°に放出した場合に形成される流れ場を調べた。しかし、噴流の放出を開始し始めてから 4 時間が経過しても、放出された色素溶液は、噴流に引き寄せられて装置に向かって引き寄せられる様子が観察され、逆向きの流れはできなかった。したがって、計算領域の周囲を滑りなし壁で囲んだ条件において、噴流を後方 45°に放出した場合には、定常計算では妥当な結果が得られないような流れ場になっている可能性がある。

## 3.4 非定常計算による流れ場の解析

### 3.4.1 境界条件と計算条件

前節で述べたように、後方 45°に噴流を放出した場合には、定常計算では正しい結果が得られないような複雑な流れ場が形成されている可能性がある。そこで、非定常計算を行った。Table 3.3 に境界条件の一覧を示す。境界条件はこれまでのシミュレーションと同様である。噴流生成装置の表面には滑りなし壁を設定した。計算領域の側面と底面には、滑りなし壁を適用した。上面については、Wall を選択した後、No Slip ではなく Specified shear を選択し、 $x, y, z$  方向のせん断応力を 0 として、水面を再現した。吸引口と放出口には、Velocity inlet を適用した。実験で設定した流量から算出し、吸引口の流速を  $-0.789$  m/s、放出口の流速を  $0.395$  m/s と設定した。いずれも、一様流速を与えた。なお、乱流に関する入口境界の設定には、乱流強度と粘性比を設定する方法を用いた。今回は、乱流強度を 5%、乱流粘性比を 0.5 に設定した。

定常計算では、初期値に関わらず理論的には計算結果は同じになる。一方で、非定常計算の場合は、実際の初期状態を表すような流れ場を初期値として与えないと、妥当な計算結果は得られない。噴流は、層流から乱流へと遷移する流れである。しかし、多くの商用のシミュレーションソフトウェアで用意されている乱流モデルは、十分に発達した乱流を想定している。そのため、噴流のシ

Table 3.3 Boundary conditions.

Name of surface	Boundary condition
Bottom	Wall: No slip condition
Sidewall	Wall: No slip condition
Water surface	Wall: Specified shear Shear stress: $x = 0, y = 0, z = 0$
Jet discharge device	Wall: No slip condition
Jet discharge port	Velocity inlet: $0.395$ m/s
Water suction port	Velocity inlet: $-0.789$ m/s

シミュレーションにそのまま適用すると、乱れが過大に見積もられて、噴流が発達する前に消失してしまうことがある。そこで、本研究では、最初の数秒間を層流とみなして乱流モデルを用いずに計算し、その後乱流モデルを適用して計算を続けることとした。途中から適用する乱流モデルには、Standard  $k$ - $\epsilon$ モデルを使用し、壁面付近の処理には標準壁関数を適用した。

今回行ったシミュレーションではタイムステップサイズを 0.01 秒として、1ステップ当たりの繰り返し計算回数を 20 回として計算した。一般的に、非定常計算では、1ステップ当たりの計算回数が 20 回以下で収束することが望ましい。今回設定した条件でシミュレーションを試しに行ってみると、20 回以内に収束していたので、この設定で計算を続けることにした。

次に、乱流モデルを適用せずに計算する時間を検討した。非定常計算で計算を開始してから、1 秒ごとに流速分布を出力した。層流で計算する時間が短いと、乱流モデルを適用して計算を続けても、噴流が壁に到達する前に消失してしまった。そこで、流速が 0.2 m/s 以上ある領域が、壁面に衝突して放射状に広がり始めるまで乱流モデルを適用せずに計算を続けた。その結果、計算開始から 7 秒経過した時点で、流速が 0.2 m/s 以上ある領域が壁面に衝突して放射状に広がり始めた。そこで、7 秒まで計算した後、乱流モデルを適用することにした。実験では、噴流の放出を開始してから 30 秒間経過した時点で色素溶液の放出を始め、引き寄せ時間の測定を開始した。そこで、非定常計算においても、経過時間が 30 秒になるまで計算を続けた。

Table 3.4 Calculation conditions.

Item	Set value	
	From 0 s to 7 s	From 7 s to 30 s
Turbulent model	Not applied	Standard $k$ - $\epsilon$ model
Near wall condition	Not applied	Standard wall function
Max iteration	20	
Time step size [s]	0.01	
Number of time steps	700	2300

### 3.4.2 シミュレーション結果

シミュレーションを開始してから 30 秒経過した時点の流れ場を Fig. 3.4 に示す。Fig. 3.4(a)が噴流を左右真横に放出した場合の流れ場であり、Fig. 3.4(b)が噴流を後方 45°に放出した場合の流れ場である。これらの図は、計算領域を上面から見た図である。図中の小さな矢印は、吸引口と放出口の中心軸を通る水平面における流れの向きを表し、その速さをグレースケールで表している。また、範囲を 10 倍に広げたグレースケールで表したコンター図を重ねて表示している。

また、Fig. 3.4(a)、(b)中の白抜きの矢印は、装置の前方の流れ場の方向を表している。第 2 章で紹介した実験結果と同様に、Fig. 3.4 (a)の噴流を左右真横に放出した場合には、装置の正面の領域の流体が真っ直ぐ装置まで引き寄せられている様子が分かる。Fig. 3.4 (b)の噴流を後方 45°に放出した場合には、定常計算のシミュレーション結果とは異なり、実験で見られたように装置の前方から流体が引き寄せられている。Fig. 3.4(a)よりも広い範囲から引き寄せられた流体が装置に到達している様子が分かる。

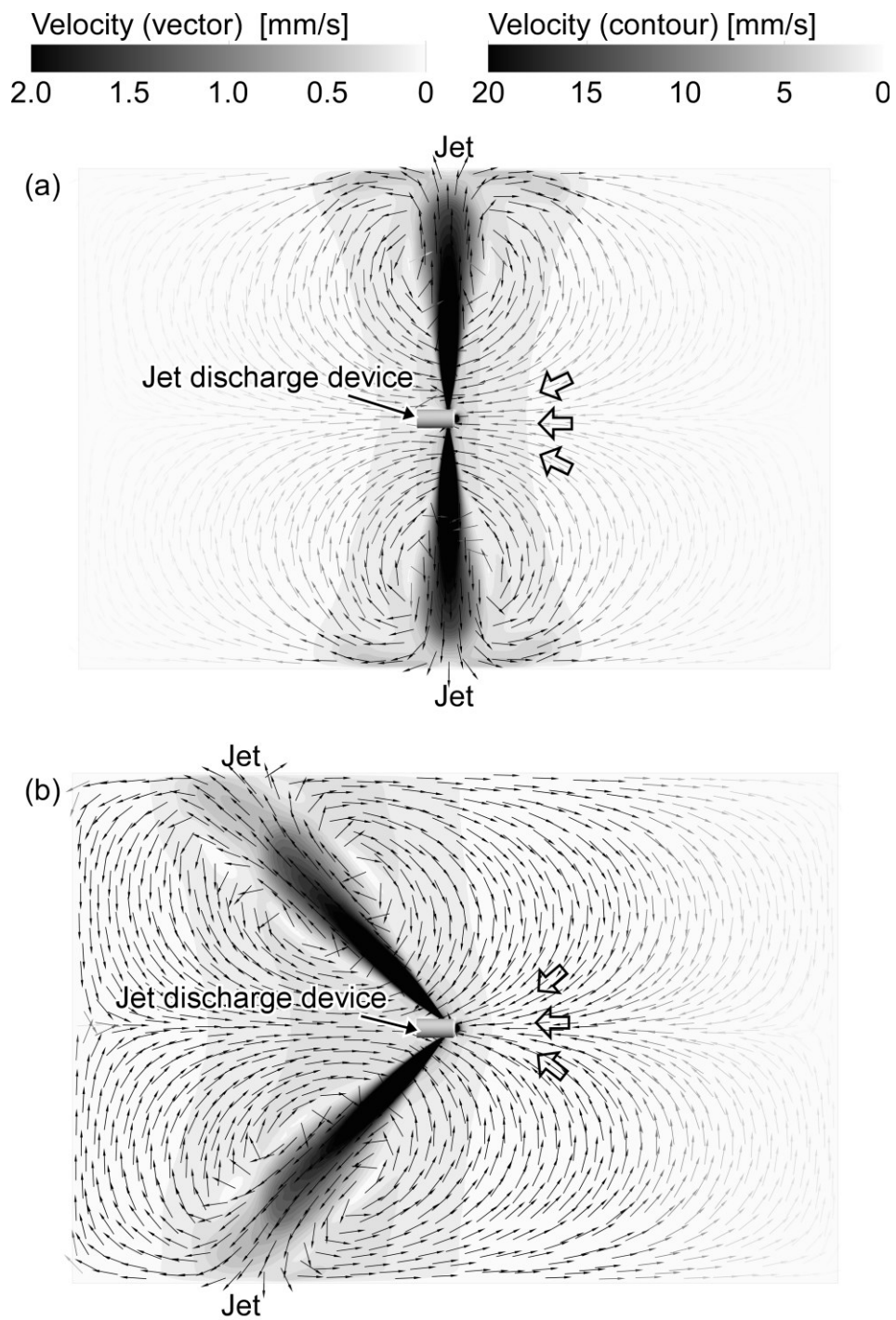


Fig. 3.4 Results of transient simulations. (a) Result of the jets discharged to sides. (b) Result of the jets discharged to 45° backward.

## 3.5 流体の引き寄せ速度に関する考察

### 3.5.1 引き寄せに要する時間の算出

装置の吸引口の中心軸上を含む平面において、吸引口から 60 mm 離れた位置まで、0.1 mm 刻みの位置で流速を出力した。この流速分布から、色素の引き寄せに要する時間を算出した。噴流を左右真横に放出した場合における、距離と引き寄せ時間の関係を表したグラフを Fig. 3.5 に示す。また、噴流を後方 45° に放出した場合における、距離と引き寄せ時間の関係を表したグラフを Fig. 3.6 に示す。これらのグラフには、本章で述べた、計算領域の周囲の境界条件を滑りなし壁とした時の定常計算と非定常計算の結果だけでなく、第 2 章で述べた実験結果と計算領域の周囲の境界条件に自由境界面を設定した時のシミュレーション結果を重ねてプロットしている。なお、Fig. 3.6 の後方 45° に放出した場  
合については、計算領域の周囲に滑りなし壁を設定して定常計算を行った条件では、装置に向かって引き寄せられる流れ場が得られなかったため、プロットしていない。Fig. 3.5 と Fig. 3.6 に共通した傾向として、本章で述べたように計算領域を実験環境と同じ大きさにしてシミュレーション条件を全体的に見直した結果、シミュレーションで求めた引き寄せに要する時間が実験値に近づいたことが分かる。

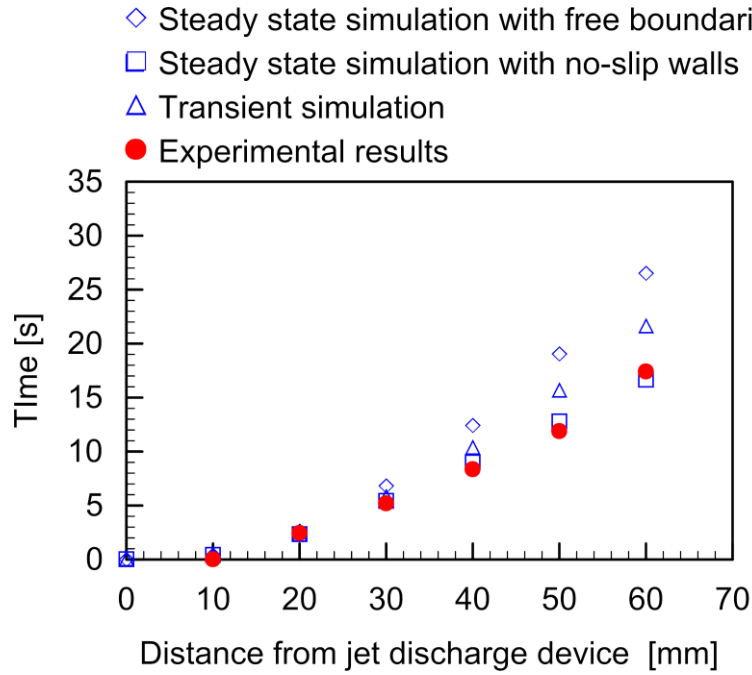


Fig. 3.5 Time required to draw water samples from different distances for the jets discharged to the sides.

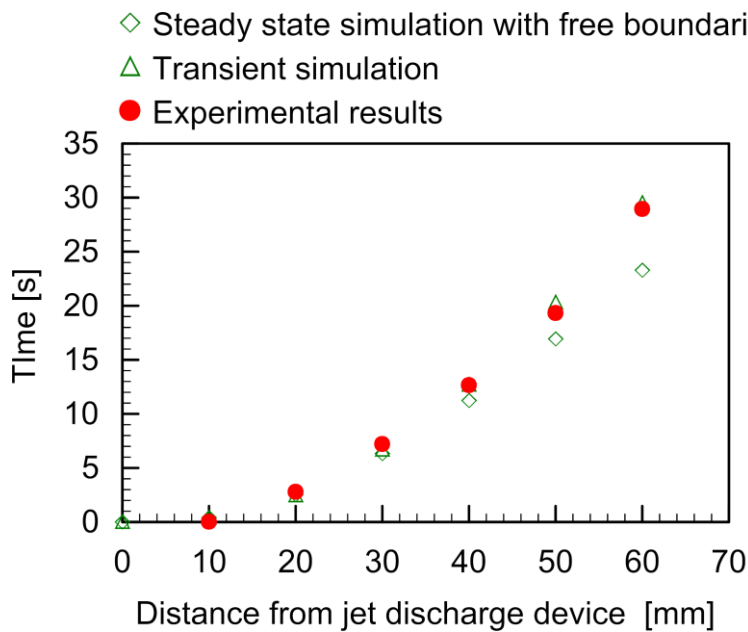


Fig. 3.6 Time required to draw water samples from different distances for the jets discharged to 45° backward.

第 2 章で述べたシミュレーションでは、左右真横に噴流を放出した場合が 26.5 秒であり、後方 45°に噴流を放出した場合の 23.3 秒の方が、時間が短くなっていた。これは、左右真横に噴流を放出した場合の方が引き寄せに要する時間が短いという実験結果とは逆の傾向である。本章で述べた非定常計算の結果を見ると、Fig. 3.5 より左右真横に噴流を放出した場合は、60 mm 先にある流体を引き寄せるのに要する時間が 21.58 秒であった。一方、Fig. 3.6 では 29.5 秒であり、後方 45°に噴流を放出した場合の方が、引き寄せに要する時間が長い。実験と同様な傾向が得られており、定量的にも妥当な結果が得られるシミュレーション条件を求められたことが分かる。

最も実験結果と近い値が得られたシミュレーション条件を調べると、左右真横に噴流を放出した場合 (Fig. 3.5) には、計算領域に滑りなし壁を適用して定常計算を行った場合であった。一方で、後方 45°に噴流を放出した場合 (Fig. 3.6) には、計算領域に滑りなし壁を適用して非定常計算を行った場合に、最も実験結果と近いシミュレーション結果が得られた。

本章で紹介した計算領域の周囲が滑りなし壁で囲まれているモデルにおいては、噴流を左右真横に放出した場合のような、壁に衝突した噴流が領域内を循環して定常的な流れ場となりやすいと予想される条件では、定常計算を行うことで、実験の流れ場と定量的にも一致するシミュレーション結果が得られたと考えられる。一方で、噴流を後方 45°に放出した時には、噴流生成装置の後方の流れ場が常に乱れて、定常な流れ場となりにくいと予想される。このような流れ場では、定常計算よりも、非定常計算を行った方が妥当な結果が得られたと示唆される。噴流は放出された瞬間は層流であり、その後乱流へと遷移していくという性質を持つ。この性質を考慮して、最初の数秒間を、乱流モデルを適用せずに計算し、その後乱流モデルを適用することで、定量的にも実験の流れ場と一致する結果が得られた。放出された噴流と、壁面に衝突して跳ね返ってきた噴流の両方が形成する流れ場においても妥当な値が得られるシミュレーション条件を本研究で得ることができた。



### 3.5.2 引き寄せ速度の距離依存性を表す実験式

第1章で紹介したように、1点の吸引口に向かって周囲の流体を引き寄せた場合、吸引口を中心として球対称に周囲の流体が引き寄せられる。理論的には、引き寄せられる流体の流速は、吸引口からの距離の2乗に反比例して減少する。一方で、噴流のエントレイメントによって周囲の流体を引き寄せた場合には、噴流を軸とする軸対称な流れ場が形成される<sup>(8)</sup>。理論的には、引き寄せられる流体の流速は、噴流からの距離の1乗に反比例して減少する。

本研究で用いている噴流生成装置には、正面に吸引口があり、吸引口から吸った水を側面から噴流として放出する。そこで、装置に引き寄せられる流体の流速が、距離の $a$ 乗に反比例して減少すると仮定して、この装置が持つ流体の引き寄せ性能を考察した。噴流を真横に放出した場合と後方 $45^\circ$ に放出した場合のそれぞれに対して、装置の前方にある流体を装置まで引き寄せるのに要する時間を計算する式を求めた。

ここでは、実験値と最も引き寄せ時間が近いシミュレーション結果を用いて、式を求めることとした。そのため、噴流を左右真横に放出した場合の式を求めるために、計算領域の周囲に滑りなし壁を設定して定常計算を行ったシミュレーションの流速分布を使用した。噴流を後方 $45^\circ$ に放出した場合の式を求めるためには、計算領域の周囲に滑りなし壁を設定して非定常計算を行ったシミュレーションの流速分布を使用した。

今、引き寄せられる速度が、距離の $a$ 乗に反比例して減衰すると仮定すると、流速 $v$ は以下の式で表される。

$$\frac{v}{U} = k \left(\frac{x}{d}\right)^{-a} \quad (2)$$

$U$ は装置から放出された噴流の放出口断面に置ける平均流速を表し、 $d$ は噴流の放出口の直径を表す。 $k$ は定数である。このとき、噴流生成装置から距離 $L$ だけ離れた位置にある流体を引き寄せるのに要する時間 $T$ は、以下の式で求められる。

$$T = \int_0^L v^{-1} dx \quad (3)$$

式(2)を代入すると、

$$T = \frac{1}{Uk} \int_0^L \left(\frac{x}{d}\right)^a dx = \frac{d}{Uk(a+1)} \left(\frac{L}{d}\right)^{a+1}$$

$$\therefore \frac{T}{T_s} = \frac{1}{k(a+1)} \left(\frac{L}{d}\right)^{a+1} \quad (4)$$

ここで、 $T_s = d/U$ とした。

式(4)から両対数グラフを作成し、 $d = 2.84$  [mm]、 $U = 394.65$  [mm/s]と実際の値を代入して、最小二乗法により  $a$  と  $k$  の値を求めた。Table 3.5 に算出した  $a$  と  $k$  の値をまとめる。また、シミュレーション結果から算出した引き寄せ時間のプロットに、求めた係数を用いて描いた近似直線を重ねて Fig. 3.7 に示す。左右真横に噴流を放出した場合は、引き寄せられる流体の流速の式が、

$$\frac{v}{U} = 0.10 \left(\frac{x}{d}\right)^{-1.08} \quad (5)$$

となった。一方で、後方  $45^\circ$ に噴流を放出した場合は、引き寄せられる流体の流速の式が、

$$\frac{v}{U} = 0.16 \left(\frac{x}{d}\right)^{-1.45} \quad (6)$$

となった。

Table 3.5 Coefficients for the equation that represents the time required to draw water samples with the assistance of the jets.

Coefficient	Jet discharge to the sides	Jet discharge to $45^\circ$ backward
$a$	1.08	1.45
$k$	0.10	0.16

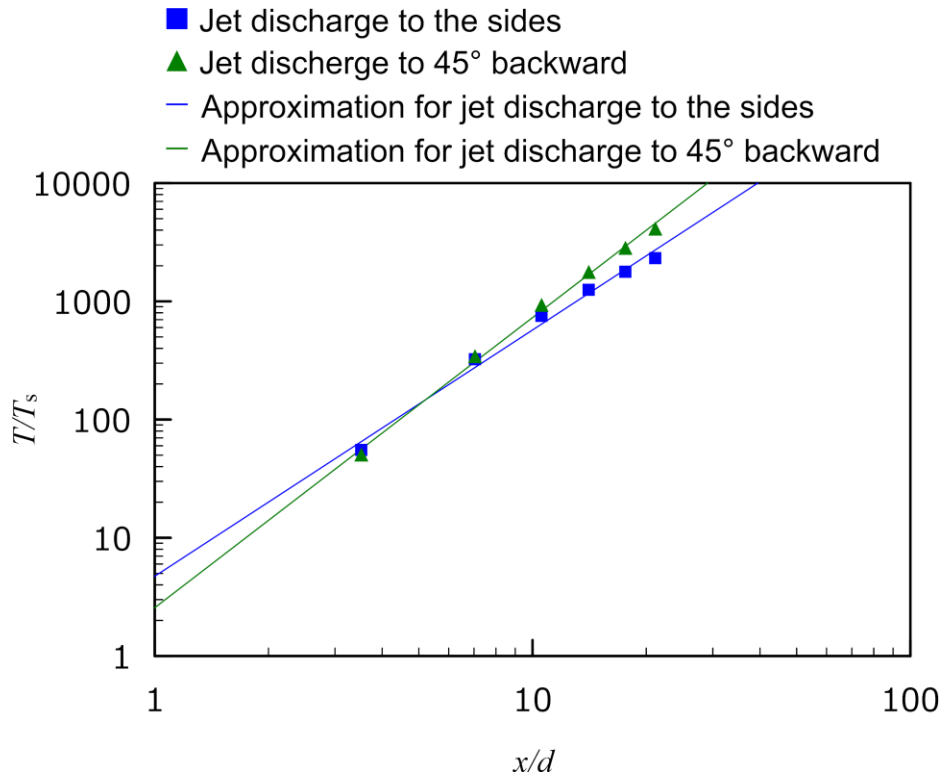


Fig. 3.7 Double logarithmic plot of the non-dimensional time required to draw water samples from different distances. The straight lines are calculated by the least squares method. According to eq. (3), the coefficients are calculated to be  $a = 1.08$  and  $k = 0.10$  for jets discharge to the sides and  $a = 1.45$  and  $k = 0.16$  for jets discharge to 45° backward.

## 3.6 本章のまとめ

シミュレーションを行っても、その条件の設定が適切でない場合、実際の流れ場とは全く異なる計算結果が得られてしまうことがある。第2章において、ザリガニをモデル化した噴流生成装置の前方から色素溶液を放出して、形成される流れ場を可視化した。さらに、数値流体力学シミュレーションによって、装置から噴流を放出した際に周囲に形成される流れ場を計算し、実験結果と比較した。引き寄せられる流体の範囲が実験結果と一致しており、定性的に妥当な流れ場であることが示された。しかし、引き寄せられるのに要した時間を算出したところ、一致していなかった。このように、条件を検討して、噴流そのものの形状等については妥当な計算結果が得られたとしても、噴流によって周囲に形成される流れ場の流速が定量的に一致しないこともある。

そこで、実験条件に近くなるように計算モデルを改善し、メッシュの生成方法や境界条件など条件を見直して、流れ場の定性的な様子だけでなく、定量的な速度についても妥当な結果が得られるシミュレーション条件を求めた。その結果、計算領域の周囲が滑りなし壁で囲まれているモデルにおいては、噴流を左右真横に放出した場合のような、壁に衝突した噴流が領域内を循環して、定常的な流れ場になりやすいと予想される条件では、定常計算を行うことで実験の流れ場と定量的にも一致するシミュレーション結果を得られた。

一方で、噴流を後方45°に放出した時には、噴流生成装置の後方の流れが乱れて、定常な流れ場となりにくいと予想される。このような流れ場では、非定常計算を行ったほうが良いと予想がつく。さらに、噴流は放出された瞬間は層流であり、その後乱流へと遷移していくという性質を持つ。この性質を考慮して、最初の数秒間を、乱流モデルを適用せずに計算し、その後乱流モデルを適用することで、定量的にも実験の流れ場と一致するシミュレーション結果が得られた。

水中ロボットで化学物質を辿る時の実際の環境を想定すると、計算領域の周囲に自由境界面を設定したシミュレーションでは、周囲に障害物が全くないような環境における引き寄せ効果をシミュレーションしていることになる。一方で、本章では、計算領域の周囲に滑りなし壁を設定したシミュレーションを述べた。このシミュレーションでは、水中ロボットの周囲に障害物があるような

条件における引き寄せ効果を計算していることになる。

本研究により、同じ方向に噴流を放出したとしても、周囲の障害物の有無など、環境の違いによって引き寄せに要する時間が変化することが分かった。実際にロボットを使う環境に適した条件で噴流の引き寄せ効果をシミュレーションすることが重要となる。この結果は、実際の環境でも引き寄せ効果が変わることを示しているため、実際のロボットもザリガニと同様に、周囲の環境に合わせて噴流の生成方向や放出継続時間を変えることが重要であることを示唆している。

---

## 第4章

# 噴流可視化装置の開発

---

### 4.1 はじめに

本研究では、装置を固定した状態で噴流を放出し、周囲の流体が引き寄せられる様子を、実験と数値流体力学シミュレーションを用いて解析してきた。しかし、先行研究により、ザリガニは歩行の方向に応じて、左右の顎脚を振り分けていることが分かっている<sup>(32)</sup>。顎脚を振る方向を変えると、放出される噴流の方向が変わるため、ザリガニは局面に応じて噴流の放出方向を変えて、異なる方向から匂いを引き寄せしていると示唆される<sup>(26)</sup>。しかし、実際にザリガニがどのような方向へ噴流を生成しながら匂いを集めて餌を探しているのか、その探索戦略は未だに明らかにされていない。ザリガニを模倣して水中ロボットに噴流放出機能を付けても、どのように噴流を使えば効果的に匂いを集められるのか分からず、ザリガニの行動をロボットで再現できる段階には達していない。

ザリガニの行動を解明するためには、ザリガニが自由に歩き回って、餌を探している最中の噴流の方向を明らかにし、ザリガニが局面に応じてどのように噴流の方向を変えているかといった情報が必要となる。顎脚はザリガニの口元に3対備わっている。全体が波打つように一つ一つの付属肢が連続的に振動するため、肉眼で見る、あるいは市販されている通常のビデオカメラで撮影するといった手法では、顎脚を振っている向きまで判別することは非常に難しい。流れ場を計測する一般的な方法として、PIV（粒子画像流速測定法）がある。しかしこの方法では、水中に微粒子を分散し、可視化したい断面に対してレーザーシート光を当てる必要がある。ザリガニの体にレーザー光が遮られた部分の流速は測定できないので、自由に歩行するザリガニの流れ場を可視化する目的には不向きである。

そこで、ザリガニが背負って歩ける噴流可視化装置を開発して使うことを提案した<sup>(33),(34)</sup>。Fig. 4.1 に装置を背負ったザリガニのイメージ図を示す。このように装置を背負わせて、顎脚付近にインクを放出することで、ザリガニの行動を制限することなく、嗅覚探索行動中の噴流の放出方向を可視化することを着想した。本章にて、装置の実現可能性を調べた実験と装置の構成を述べる。

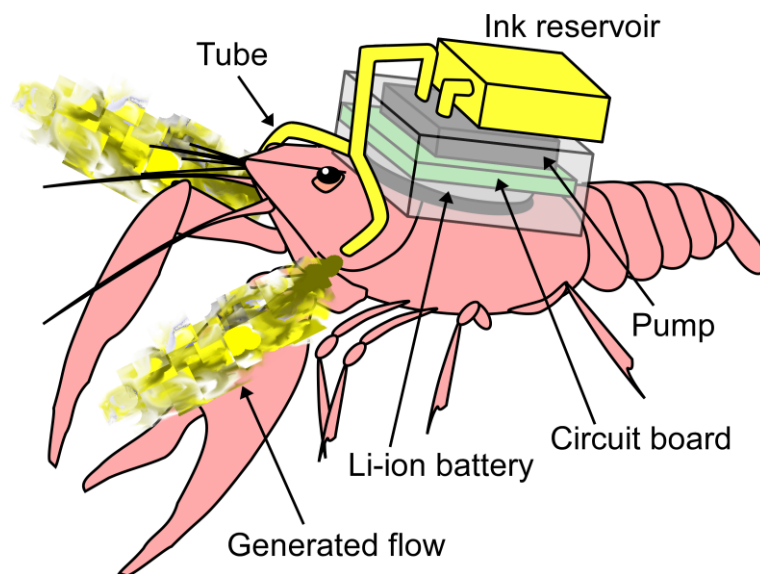


Fig. 4.1 Schematic diagram of the ink discharge device to visualize flow generated by a crayfish.

## 4.2 ザリガニの噴流を可視化するのに適した インクの濃度の検討

先行研究にて行われた観察実験<sup>(32)</sup>では、ザリガニが餌の匂い源までたどり着くのに費やす時間は最長で 30 分間程度であった。そのため、噴流可視化実験を行う際にも、30 分間はザリガニの顎脚付近にインクを放出し続けることができるようにインク容量を設定することが望ましい。通常、インク容量を多くすればするほど、可視化できる時間は伸びると考えられるが、インクを放出すればするほど、実験環境全体にインクが広がっていく。本研究の実験では 500 mm × 500 mm の透明水槽に高さ 10 cm まで水を入れ、カメラの中心軸上に水槽の中心が来るように上面にカメラを設置し、また水槽を囲うように側面から撮影できるように側方にもビデオカメラを設置して、噴流の方向を撮影・記録する。この場合、実験が進むにつれて、新たに顎脚付近に放出され噴流により流されたインクと、周囲を漂うインクの区別が付きづらくなり、噴流の可視化ができなくなってしまう。特に、水槽の側面に設置したカメラの画像では、この傾向が顕著である。

そこで、ザリガニの噴流を可視化でき、かつ 30 分間放出し続けても噴流を識別できるように、必要最低限のインクの濃度を検討した。実験には、三石らが開発したインク放出装置のプロトタイプを用いた<sup>(33)</sup>。500 mm × 500 mm の透明水槽を使用し、ザリガニが匂いを集めようと顎脚を振る頻度が多くなるように、装置の中央に市販のザリガニの餌（ザリガニ、ヤドカリ・カニのエサ、株式会社キョーリン）を置いた。この水槽内に、装置のプロトタイプを背負わせたアメリカザリガニ（*Procambarus clarkii*）を入れる。顎脚付近に放出するインクとして蛍光色素ローダミン 6G を用い、その濃度を 200, 300, 400, 500, 1000 mg/L の 5 通りに変えた。

実験の結果、インク濃度が 300 mg/L 以上であれば、ほとんどのタイミングで噴流を可視化できることが分かった。ただし、これは実験個体の体長に依る部分が多い。飼育している中で最も大きい個体の頭甲胸長は 45 mm であったが、この個体はその体長の大きさから、歩行速度が比較的速い。この場合、放出されたインクと周囲の水の混合が早く進むので、ザリガニが急に動くタイミングでは 300 mg/L でも噴流の方向が分かり辛いことがあった。500 mg/L のインク



を用いれば、頭胸甲長の大きな個体を使用した場合でも、ほとんどのタイミングで噴流が可視化できた。このように、ザリガニの個体ごとの大きさにより、適切なインク濃度は変わるため、個体に合わせてインク濃度を変えることが必要となる場合もある。

水槽全体の見え方の変化については、インク濃度を 300 mg/L とした場合においては 15 分経過時点まで、側面のカメラからでも噴流の方向を視認できた。30 分経過した時点でも、真上のカメラや撮影者が手に持ったハンディカメラで顎脚付近をズームして撮影した動画では噴流を視認することができた。これらを踏まえて、インク濃度を 300 mg/L とし以降の実験を行うこととした。

### 4.3 インク放出装置の構成

開発した装置のシステム構成図を Fig. 4.2 に示す。装置の駆動には 3.6 V のリチウムイオンコイン充電電池 (LIR2450) を用い、DC/DC コンバータ (HT7750A、Holtek Semiconductor Inc.) により 3.6 V を 5 V へ昇圧する。5 V を印加されるとマイクロポンプが稼働し、インクを液貯めからインク放出口へ送液する。ポンプの流量をザリガニの噴流の可視化に適した流量まで下げるために、PIC マイコン (PIC12F629、Microchip Technology Inc.) を搭載している。ポンプには制御信号線が用意されており、これに PIC マイコンからハイ (5 V) かロー (0 V) の信号を一定時間ごとに入力することでポンプのオンとオフを切り替え、流量を細かく調節することができる。

マイクロポンプと駆動用電池やその他電子部品はシリコーンゴムの内部に封止して固める。シリコーンゴムで全体を封止した後に内部のリチウムイオン充電電池を非接触で充電できるように、装置にはワイヤレス充電 IC と専用コイルを組み込んだ。これにより、装置をシリコーンゴムで封止した後も内部の電池の充電を可能とした。

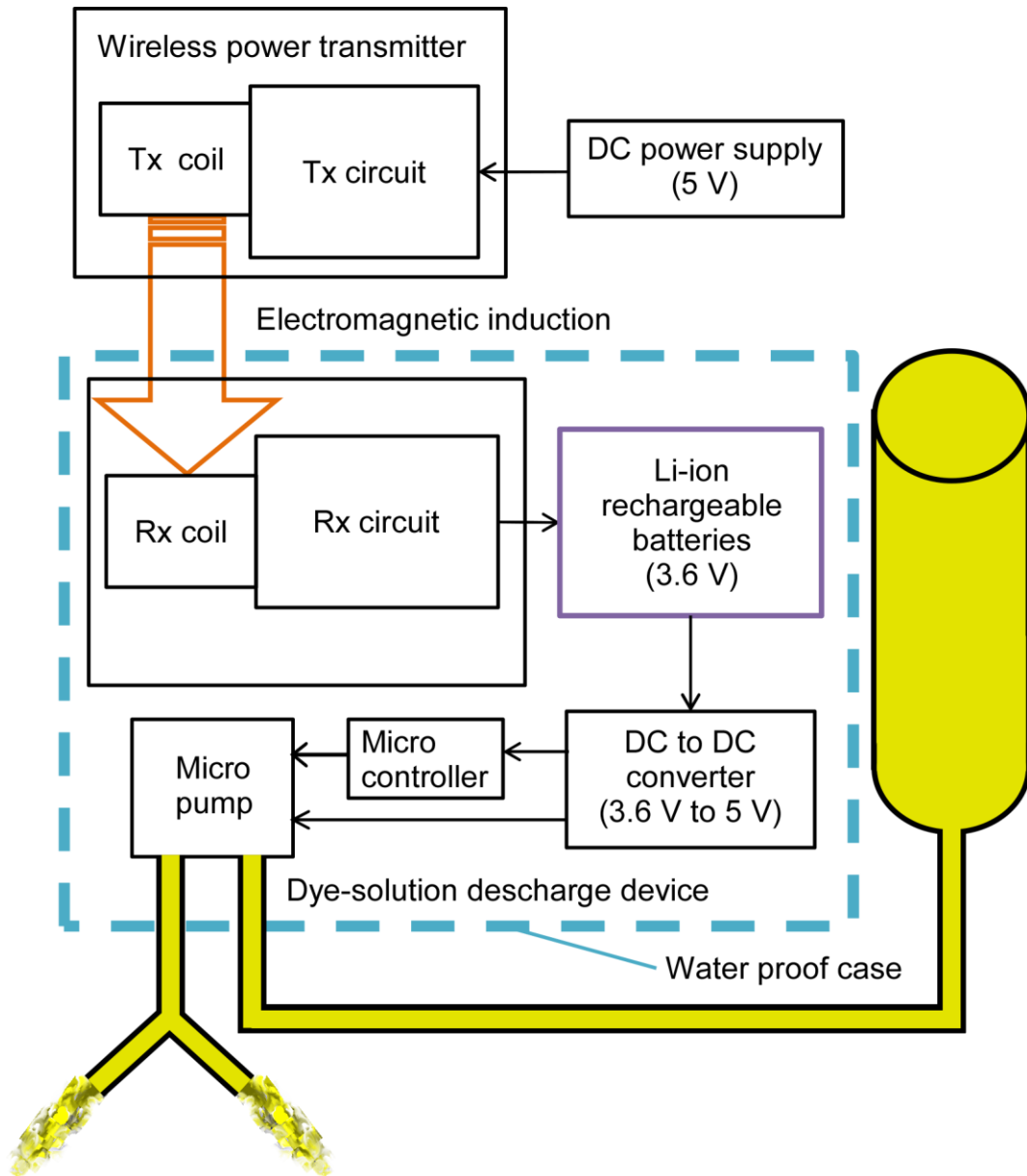


Fig. 4.2 System configuration of the improved ink discharge device. Reprinted with permission from (34).

## 4.4 装置本体内部の構成要素

### 4.4.1 可視化用インクを送液するマイクロポンプ

インクの放出は圧電型ダイヤフラム式マイクロポンプ (SDMP302D、高砂電気工業株式会社) により行う。Table 4.1 にマイクロポンプの詳しい仕様を示す。圧電型ダイヤフラム式のポンプは圧電素子の圧縮・伸張によりダイヤフラムを動作させ、流体を一方向に送液する仕組みであり、圧電素子の駆動には 250 V と比較的大きな電圧が必要である。しかし、SDMP302D は昇圧回路を内蔵しているため、DC 5 V を印加するだけでポンプが駆動する。このポンプには制御信号線が用意されており、これにハイ (5 V) かロー (0 V) を入力することで駆動のオンとオフを切り換えられる。このポンプの標準流量は 3 mL / min である。しかし、このままではザリガニの噴流の可視化には多すぎるため、PIC マイコンを用いて流量調節を行った。短い周期でポンプのオン・オフを切り替えることにより、連続駆動した場合よりも流量を少なくすることが可能である。

Table 4.1 Specifications of micropump.

Item	Specification	Remark
Pump system	Piezoelectric diaphragm type	
Standard flow rate	3 mL / min	
Standard pump pressure	40 kPa	
Drive voltage	DC 5 V $\pm$ 5 %	The pump is driven at approximately 250 V using the internal boost circuit. Operates at approximately 30 Hz.
Power consumption	5 mW / 120 mW	At standby / When driving
External dimensions	25 mm in width, 25 mm in length and 8.2 mm in height	
Weight	6 g	

#### 4.4.2 装置駆動用の電源と装置起動方法

ザリガニが背負って歩ける大きさ・重さの装置を開発するためには、なるべく小さい装置駆動用の電源を用いることが必要となる。しかし、一般的に小さい電池であればあるほど放電容量が少ないため、装置の稼働時間が短くなってしまう。先の研究においてザリガニの嗅覚探索行動が長い時で 30 分ほどかかることが分かっている。したがって装置も最低でも 30 分間は駆動できるようにしなければならない。

そこで、リチウムイオン充電電池 LIR2450 を採用した。リチウムイオン電池は、放電容量が一割を切るまで電圧低下がほとんどないという特性を持っている。また、起電力が 3.6 V と高いため、ポンプの駆動に必要な 5 V に昇圧する回路も入手しやすい。ポンプに必要な電圧を安定して出力することができ、マイクロポンプの駆動可能時間が 1 時間前後となった。また、充電電池を採用することで、電池の交換の必要をなくし、後述するシリコンポッティングによる防水可能にした。

また、装置の起動にはリードスイッチ（MK24-B-3-OE、Standex-Meder Electronics, Inc.）を用いることとした。これは常時閉接点のリードスイッチであり、磁石を近づけている間は電流が流れず、磁石を離すと電流が流れる。紐を付けた磁石をシリコーンで密封した上から装置のリードスイッチ部に密着させておくと、接点が開き、装置への電源供給が止まる。実験を開始するタイミングで紐を引き、磁石を離すことで装置を起動させる。

#### 4.4.3 昇圧用 DC / DC コンバータと流量調節用マイコン

装置に組み込むマイクロポンプの入力電圧は 5 V なのに対して、装置駆動用電源として用いる LIR2450 は公称電圧 3.6 V である。したがって、マイクロポンプへ入力する前に 3.6 V を 5 V へ昇圧する必要がある。本装置では PFM ステップアップ DC / DC コンバータ (HT7750A、Holtek Semiconductor Inc.) を用いて昇圧を行った。Fig. 4.3 に昇圧回路の回路図を示す。

マイクロポンプは標準流量 3 mL/min であり、5V を印加してポンプを駆動すると、この流量で動作する。ただし、本研究で用いた 500 mm × 500 mm の水槽に 3 mL/min の流量でインクを放出し続けると、10 分程で水槽内全体にインクが広がってしまい、噴流によって吹き飛ばされるインクと周囲を漂うインクの区別が付きにくくなってしまう。そこで、装置回路内にマイクロコントローラ (PIC12F629, Microchip Technology Inc.) を組み込み、その出力端子をマイクロポンプの制御信号線に繋げ、流量を調節した。Fig. 4.4 に、PIC マイコンとその周辺回路の回路図を示す。PIC マイコンの GP4 ピンをデジタル出力ポートに設定し、ここから出力したハイ (5 V) かロー (0 V) をマイクロポンプの制御信号線へと入力することでオンとオフを切り替える。今回は制御信号線に 0.05 秒間ロー、0.5 秒間ハイを入力することにより、インクの時間平均放出流量を約 0.3 mL/min まで下げた。

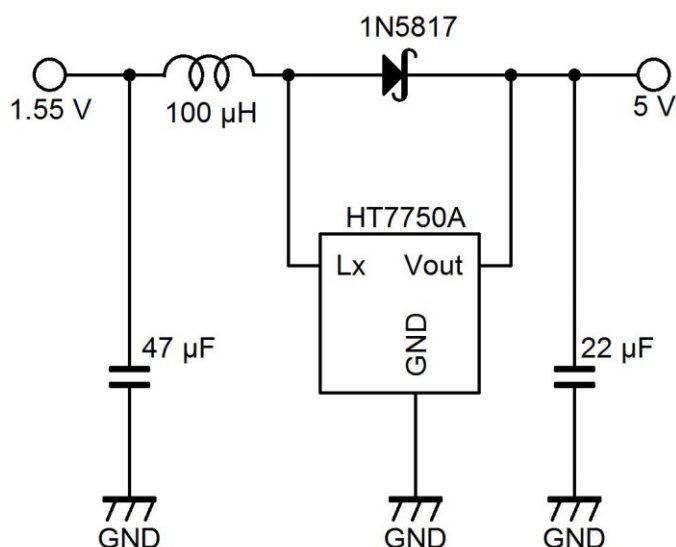


Fig. 4.3 Circuit diagram of the power supply circuit. Reprinted with permission from (34).

また、柔軟に流量調節ができるように、基板に実装したままの状態での PIC マイコンの内蔵メモリにプログラムを書き込むことができる ICSP (In Circuit Serial Programming) 用のコネクタを基板に用意した。ICSP 用の回路として PIC の 1、4、6、7、8 ピンから配線を伸ばし、基板上の 6 ピンヘッダの内の五つに接続している。そして、PICkit2 (Microchip Technology Inc.) のコネクタ部へ装置基板の 6 ピンヘッダを接続し、PIC マイコンへプログラムを書き込む。なお、4 ピンの Vpp には書き込み時に 12 V の電圧がかかるため、それが装置基板の他の回路へ悪影響を及ぼさないよう、Vpp 端子と Vdd 端子の間に 10 kΩ の抵抗を挟み、回路を保護している。

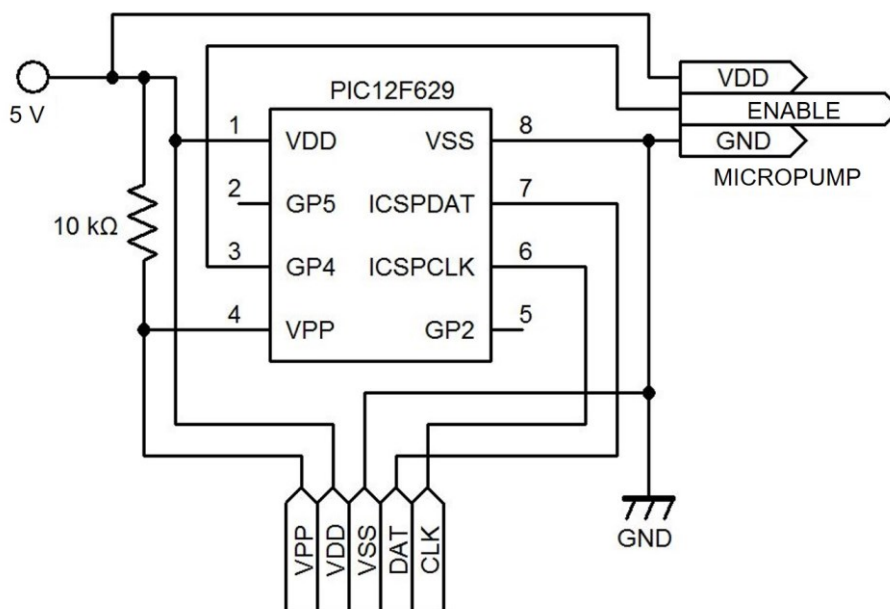


Fig. 4.4 Circuit diagram of the microcontroller and its peripheral circuit. Reprinted with permission from (34).



#### 4.4.4 ワイヤレス充電機能

マイクロポンプと駆動用電池やその他電子部品はシリコーンゴムの内部に封止し、固めることで防水する方法を取ることとした。シリコーンゴムで全体を封止した後に内部のリチウムイオン充電電池を非接触で充電できるように、装置内部の回路にワイヤレス充電 IC (LTC4120, Analog Devices, Inc.) と専用コイルを組み込んだ。これにより、封止した内部の電池の充電を可能とした。

ワイヤレス充電 IC による充電方式は、リチウムイオン充電電池の充電方式としては一般的な CCCV 充電 (Constant Current Constant Voltage) である。これはある電圧に達するまでは定電流で充電し、設定電圧に達したら定電圧モードとなり、そこからは充電が進むほど電流を絞っていく方法である。正常に動作した場合は 1.0 A 付近から段々と電流値が低下していき、0.06 A でほぼ充電完了となる。この構成で装置の回路を設計し、プリント基板に実装し、回路基板を製作した。Fig. 4.5 に製作した回路基板を示す。使用する電子部品はできる限りサイズの小さいものを採用した。また、4 層基板の表裏にそれぞれ部品を配置し、できる限り部品の集積度を高めることで、部品回路基板のサイズが 34.8 mm × 37.4 mm まで小さくなり、ザリガニの頭胸甲に載せることができる大きさの回路基板を製作することができた。

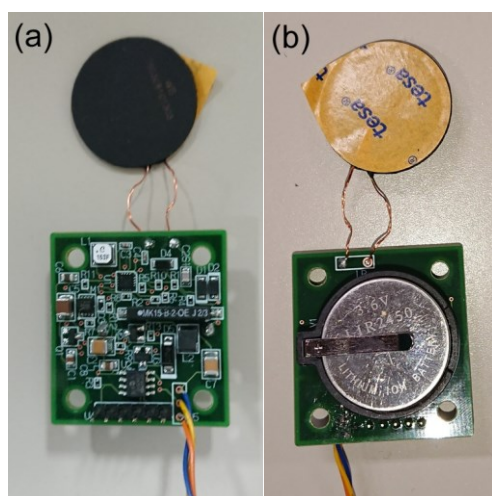


Fig. 4.5 Circuit board of the ink discharge device. (a) Front side. (b) Reverse side. Reprinted with permission from (34).

## 4.5 装置本体外部の構成

### 4.5.1 可視化用インクを収める液貯め

噴流の方向を可視化するインクには、水棲生物に無害な蛍光色素であるローダミン 6G 水溶液を使用する。この溶液を貯めておくため、チャックで封止できる縦 120 mm × 横 50 mm のナイロン袋を使用した。チャック部には以前の液貯めとして用いていたスポイト<sup>(35)</sup>の先端部分を接着剤で埋め込んでいる。使用時はここにインク放出装置本体側のインク送液用チューブを差し込み、接続する。この液貯めに約 12 mL のインク溶液を充填し、可視化実験を行った。その結果、実験開始から 30 分経過後も、インク放出口から出たインクを視認できた。水槽の真上に置いたビデオカメラや手持ちのビデオカメラでザリガニの顎脚付近をズームして撮影した動画では 30 分間、噴流の方向を判別できた。その一方で、放出されたインクが徐々に水槽全体に散らばっていくため、水槽をビデオカメラで真横から撮影した動画では、次第に噴流の判別が難しくなってしまうという問題があった。

## 4.5.2 インク放出口

1.2.1 項で述べたように、ザリガニは顎脚を左右に3本ずつ、計6本持っている。したがって、噴流が放出される個所は左右に合計2か所あり、インクによる噴流の可視化を行うには、この2か所のそれぞれの場所にインクが放出されるようにする必要がある。そのため、三石らによって開発されたプロトタイプではマイクロポンプの排出口に接続したチューブを途中で二股に分け、それぞれの先端がザリガニの顎脚付近に固定するように専用の放出口を開発し、ビニールテープでザリガニの頭部側面に固定する手法を取っていた<sup>(35)</sup>。この放出口部分は簡易的に送液用タイゴンチューブをU字に折り曲げて作製したが、ビニールテープとの粘着が弱く、実験中に剥がれてしまうという問題があった。そこで、本研究で用いた装置では、Fig. 4.6 に示すようなU字チューブを新たに開発した。チューブの材質を金属にすることで、テープに付着しやすくなった。

次に、インク放出口をザリガニの頭部側面に固定する方法を検討した。最も強力な固定法は、瞬間接着剤による固定である。しかし、この方法では実験終了後に放出口をザリガニから外す際に、固着した接着剤を、ナイフを用いて切り離す手間がかかる。また、ザリガニの頭胸甲に固着した接着剤が完全には除去できない。一方、ビニールテープでは、水中に沈めた際に、すぐに剥がれてしまう。そこで、ビニールテープよりも強力な粘着力を持つ布ガムテープを用いて放出口をザリガニに固定する方法を試したところ、最低でも1時間程度は固定状態を保つことができた。そこで、布ガムテープを用いてインク放出口の固定を行うこととした。



Fig. 4.6 Ink outlets. Reprinted with permission from (34).

### 4.5.3 回路用防水ケースの成型

シリコーンゴムなどの樹脂材料を型に流し込んで固めることを、ポッティングと呼ぶ。本研究では、ポッティング用のシリコーンゴムに KE3475T（信越化学工業株式会社）を用いた。一度ポッティングを行った際に、リチウムイオンコイン充電電池とそれを収める電池ホルダの隙間にシリコーンゴムが入り込み、導通しなくなる問題が発生した。そこで、ポッティングを行う前に導電性エポキシ接着剤 CW-2400（ITW Chemtronics Inc.）を電池ホルダのプラス電極とマイナス電極に塗り、電池を接着した。導電性エポキシ接着剤の硬化を確認した後、装置内部部品をシリコーン充填用のケース（5 cm 四方のクリアケース）の中に入れ、その中にシリコーンゴムをポッティングした。一度に全ての部品が覆われるようにポッティングしてしまうと、深部の硬化に時間がかかるため、ポッティング作業は複数回に分け、確実に硬化していることを確認しながら層状に積み重ねた。システム停止用スイッチ以外の部品が完全にシリコーンゴムで覆われた状態で硬化していることが確認できた後、ケースから取り外した。また、固まったシリコーンゴムのうち、余分な部分をカッターナイフで取り除き、最小限の重量となるようにした。

完成した装置を Fig. 4.7 に示す。装置の寸法は横 40 × 縦 35 × 高さ 40 mm で、質量は約 30 g となった。比重はほぼ 1 となったが、実験に用いる時には装置の両側面に薄く切ったスタイロフォームを貼り付けて浮力を調整した。この装置をザリガニに背負わせたところ、転ばずに歩行していた。さらに、装置を背負ったザリガニの近くに餌を落としたところ、ザリガニは脚で地面を探って餌を

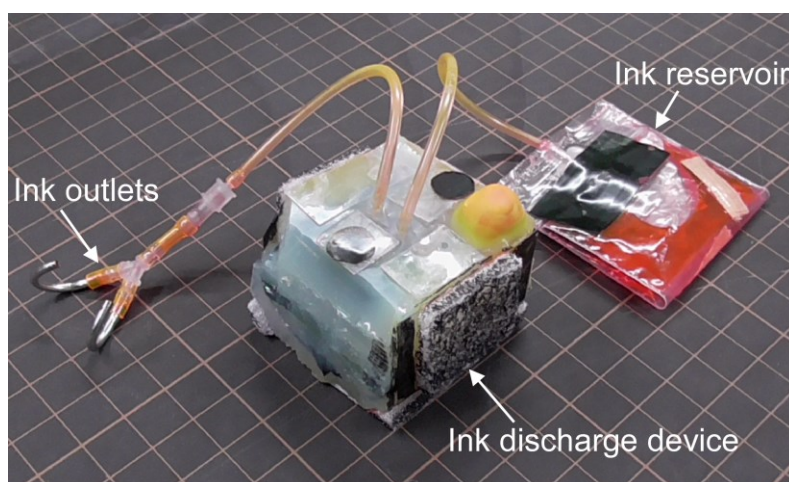


Fig. 4.7 Ink discharge device. Reprinted with permission from

掴もうとする行動を示した。このことから、ザリガニの餌を探すモチベーションは下がっていないことが示された。自由に歩行するザリガニの行動を制限せずに、放出された噴流を可視化する装置を開発できた。

## 4.6 本章のまとめ

ザリガニの嗅覚探索行動の解明のために、自由に歩行しているザリガニの顎脚付近にインクを放出し、噴流の放出方向を可視化する装置を開発した。この装置は圧電型ダイヤフラム式マイクロポンプを搭載しており、可視化用インクを放出する。リチウムイオンコイン充電電池を採用し、装置内部にワイヤレス充電機能を持たせた。これにより、装置全体をシリコーンゴムで覆い、防水することが可能となり、ザリガニが背負って歩ける程度に装置の重量とサイズを共に小さくすることができた。また、液貯めや、インク放出口をアメリカザリガニの体形に合うように製作した。これにより、装置をザリガニに背負わせた状態で、30分以上安定してインクを放出できるようになった。

---

## 第5章

# 嗅覚探索行動中のザリガニが作る噴流の方向の観察

---

### 5.1 はじめに

第4章において、ザリガニの顎脚付近にインクを放出して噴流を可視化する小型インク放出装置を提案し、その構成を述べた。本章では、開発した装置をザリガニに背負わせて、水槽の中央から放出した餌の匂いを探索している最中の噴流を可視化し、記録した結果を述べる。

本章の前半では、日本における飼育が簡単なアメリカザリガニ (*Procambarus clarkii*) に対して実験を行った結果を述べる。装置を背負ったアメリカザリガニは嗅覚探索行動を示していた。しかし、ザリガニに対して装置が大きく、可視化された噴流以外にザリガニが示す様々な仕草を記録しにくいことがあった。嗅覚探索行動を解明するためには、噴流の放出方向だけでなく、その瞬間のザリガニの仕草も記録して、関連を考察することが重要となる。そこで、アメリカザリガニよりも大型のウチダザリガニ (*Pacifastacus leniusculus*) を使用した観察実験も行い、噴流の方向とその時々を示す仕草の関連を考察した。本章の後半では、ウチダザリガニを用いて、実験条件を改良した嗅覚探索行動実験を行った結果について述べる。

## 5.2 アメリカザリガニを用いた行動観察の方法

### 5.2.1 使用したザリガニ

実験には、頭胸甲長が 35 mm 以上の成体を 6 匹使用した。すべてのザリガニは、埼玉県東松山市の浄福寺内にある池で捕獲した。野生のアメリカザリガニを捕獲すると、縄張りをめぐる闘争により、大触角や小触角、脚などの付属肢に欠損が見られることが多い<sup>(36)</sup>。ザリガニの各部位の名称を Fig. 5.1 に示す。ザリガニには番号を振って個体を識別した。本章で述べる実験に使用したのは、crayfish 1 から crayfish 6 までの 6 匹である。このうち、crayfish 1、crayfish 2、crayfish 4、crayfish 6 のザリガニには付属肢に欠損が見られなかった。一方、crayfish 5 は、左側の第 4 胸脚の先端が切れており、crayfish 3 は左側の第 3、5 胸脚が途中から切れていた。

普段はザリガニを 1 匹ずつに分け、エアレーションを行った水槽で飼育している。水槽内の水位は、ザリガニの背中が水中に隠れる程度にしている。ザリガニは雑食性のため、水槽に入れた水草なども食べる。実験を行う前には絶食期間を設けるため、水槽には隠れ家となるシェルタのみ入れており、餌になるものは入れていない。投餌頻度は 1 日おきとし、市販されているザリガニの餌を毎回 5 粒から 10 粒程度与えた。水換えは 7 日に 1 回程度とした。

餌の探索を促すため、実験前には絶食期間を 7 日間設定した。また、視覚を頼りに餌の探索することができないように、実験に用いる前日から黒いビニールテープで作った目隠しで眼柄の周囲を覆った。ザリガニに対するこれらの実験前処理は、先行研究で行われたザリガニの観察実験と同様である<sup>(32)</sup>。



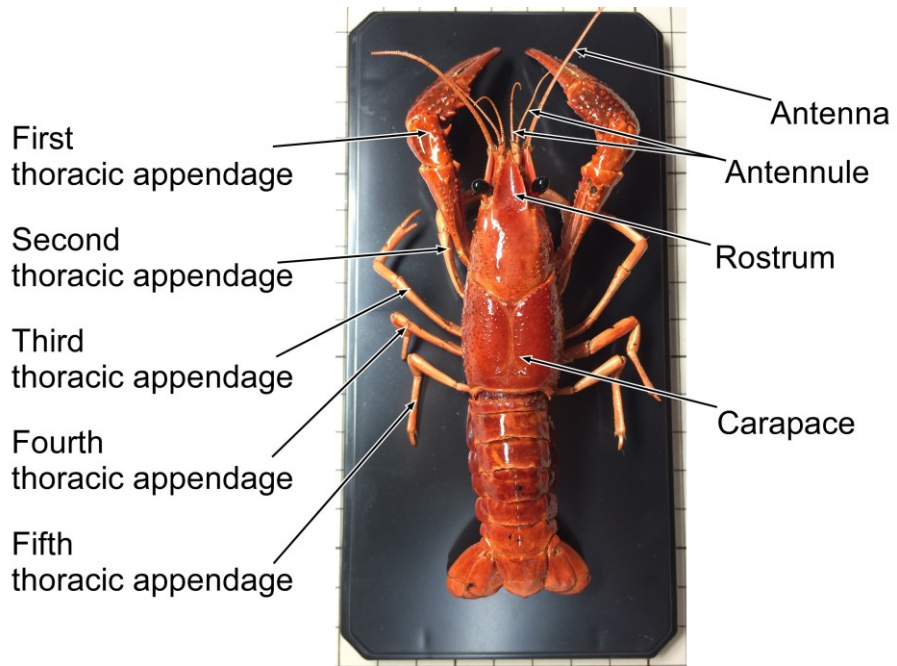


Fig. 5.1 Morphology of crayfish

## 5.2.2 実験のセットアップ

餌の匂いを付加した溶液の作製には、普段飼育の際に与えている市販のザリガニの餌（ザリガニ、ヤドカリ・カニの餌、株式会社キョーリン）を使用した。放出した匂い溶液の分布を可視化するため、食用色素で着色した。以下に、作製手順を示す。

- (1) 餌を 1.5 g 量り取って、乳鉢ですりつぶし、300 ml のカルキを抜いた水に入れる。
- (2) マグネチックスターラーで 10 分間攪拌する。
- (3) 攪拌した溶液をろ過する。ろ過した溶液のうち 200 ml を使用する。
- (4) この溶液 200 mL に、濃度が 1.5 g/L となるように食用赤色色素（共立食品株式会社）を 0.3 g 加えた。

Fig. 5.2 に実験のセットアップを示す。実験には 500 mm × 500 mm の透明水槽を使用した。カルキを抜いた水道水を水位が 100 mm になるまで水槽に入れた。水槽の中央には、先端が水槽の底から 30 mm の高さに来るようにステンレスチューブを固定した。

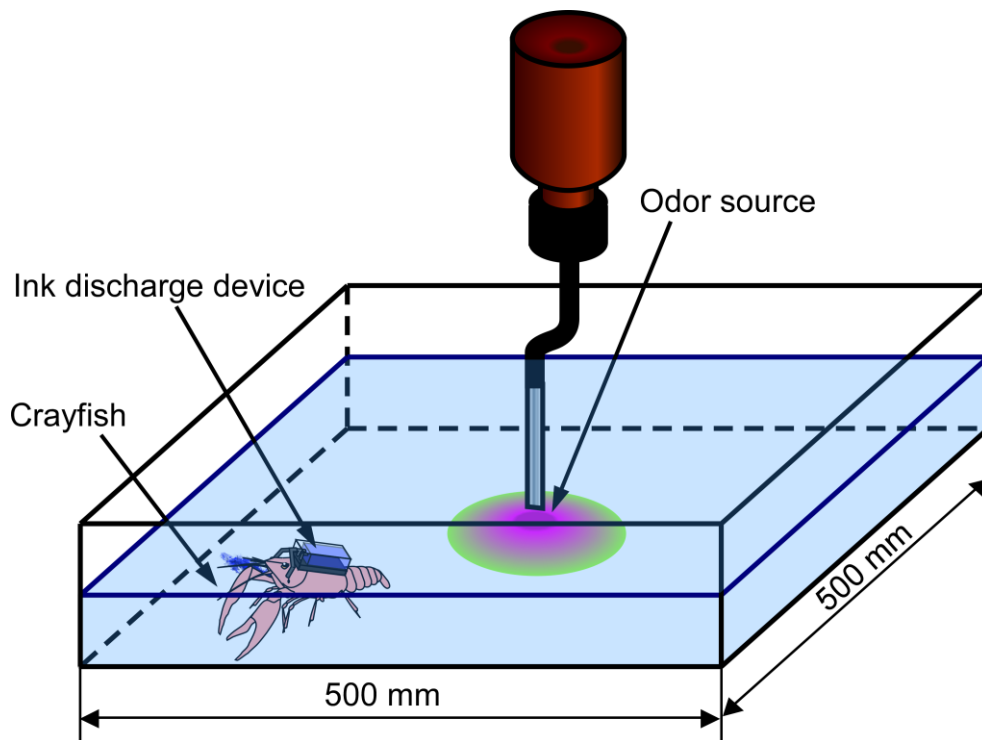


Fig. 5.2 Experimental setup of the behavioral observation. Reprinted with permission from (34).

この水槽の中で実験中にザリガニが出す噴流の方向を様々な方向から録画できるように、Fig. 5.3 に示すように水槽を囲むフレームを用意した<sup>(37)</sup>。このフレームの中央の台に Fig. 5.2 に示した水槽を設置する。ザリガニの行動を記録するビデオカメラは、水槽の四つの側面と真上の 5 箇所配置した。それぞれのカメラは、視野内にちょうど水槽全体が移るように画角を調節してある。フレームの下から 2 段目の梁のそれぞれに LED 照明を取り付け、全方位から水槽を照らすことで、ローダミン 6G 水溶液が蛍光を示すようにしている。水面で反射した光が上面のカメラの映像に入らないように、LED 照明の高さを決めた。

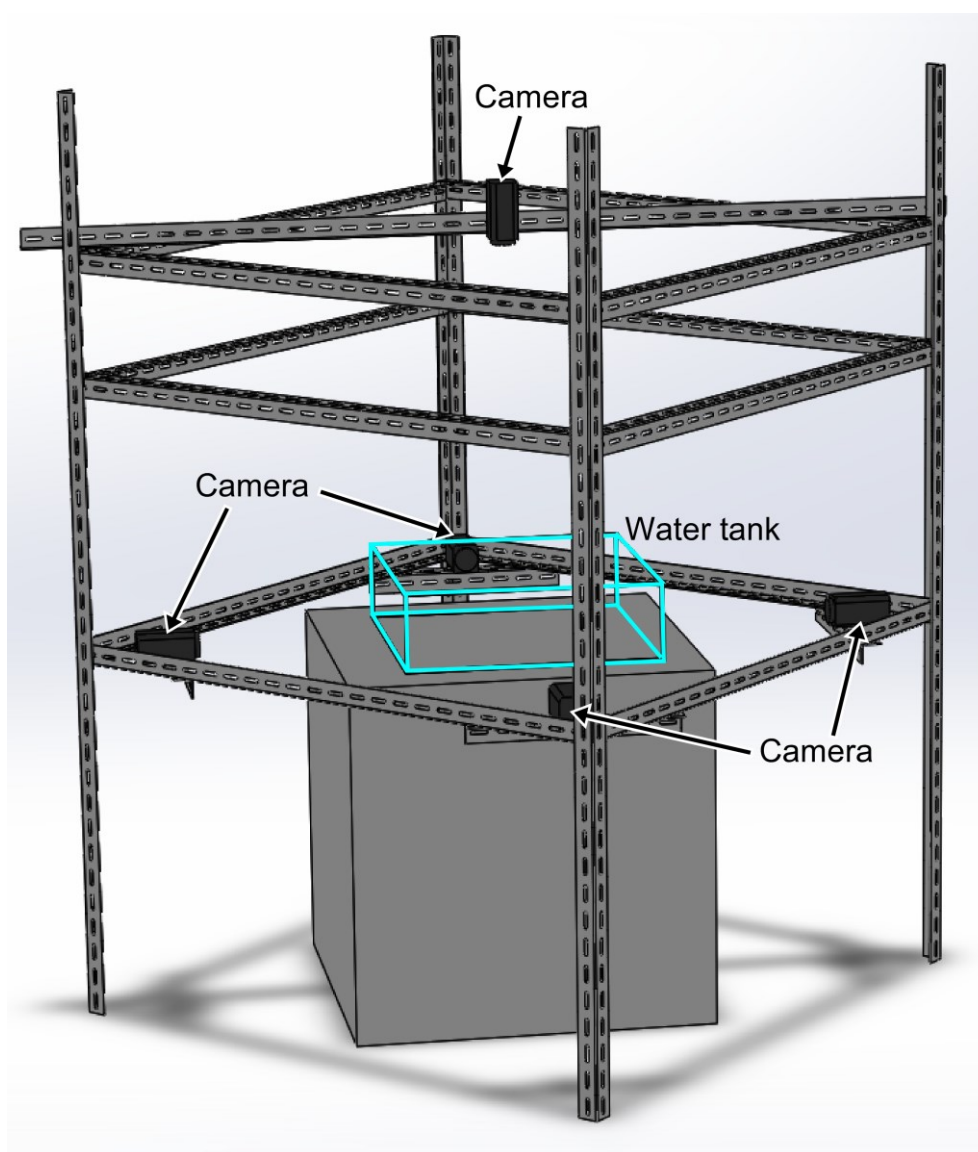


Fig. 5.3 Schematic diagram of camera frame for behavioral observation from all directions. Reprinted with permission from (37).

### 5.2.3 実験手順

まず、ザリガニに装置を装着し、20分程度小型水槽内に入れて慣らしておく。水槽に張った水の流れが収まるのを待った後、匂い溶液の放出を開始した。放出流量は、0.1 mL/minとした。チューブ先端から放出された匂い溶液は、水よりもわずかに密度が高かったため、水底に沈降した。水底に沈んで溜まった匂い溶液の直径が、注入口を中心に約100 mmとなった時点で、ザリガニを静かに水槽内に入れ、装置を起動した。その後、五つのビデオカメラの間で時間の同期をとるために照明を一度消し、再度照明を点けた。撮影した動画を解析する際は、照明が消えた時点を実験開始時刻とした。

ザリガニが水槽の中央にある匂い溶液の放出源にたどり着き、その場で leg raking を示した時点で匂い源の探索に成功したとみなした。この leg raking とは、停止して第3顎脚の内肢や、第1、第2歩行脚を用いて、地面に埋まった餌を掘り返そうとする行動や、餌を掴もうとする行動である。探索の制限時間は、30分間とした。

## 5.3 アメリカザリガニの行動観察結果

### 5.3.1 ザリガニの移動軌跡

6匹のザリガニに対して1回ずつ実験を行った結果、全てのザリガニが、30分程度で匂いの放出源に到達した。ザリガニの移動軌跡を Fig. 5.4 から Fig. 5.9 に示す。図中の矢印は、装置上面の先端と後端に付けたマーカを結ぶベクトルを示しており、カメラ画像中のザリガニの位置を1秒ごとに記録したものである。crayfish 3を除いたほとんどの個体がまず壁伝いに何周も歩き回り、ある時点において両側の顎脚を振り真横に噴流を放出しながら匂い源の方向に向かって直進し始め、最終的に匂い源に到達して餌を掴む行動を見せた。crayfish 3のみ、実験開始から終始後ずさりをしながら縦横無尽に動き回り、後ずさりしたまま匂い源の近傍に近づいたところで匂いに気づき餌を掴む行動を行った。

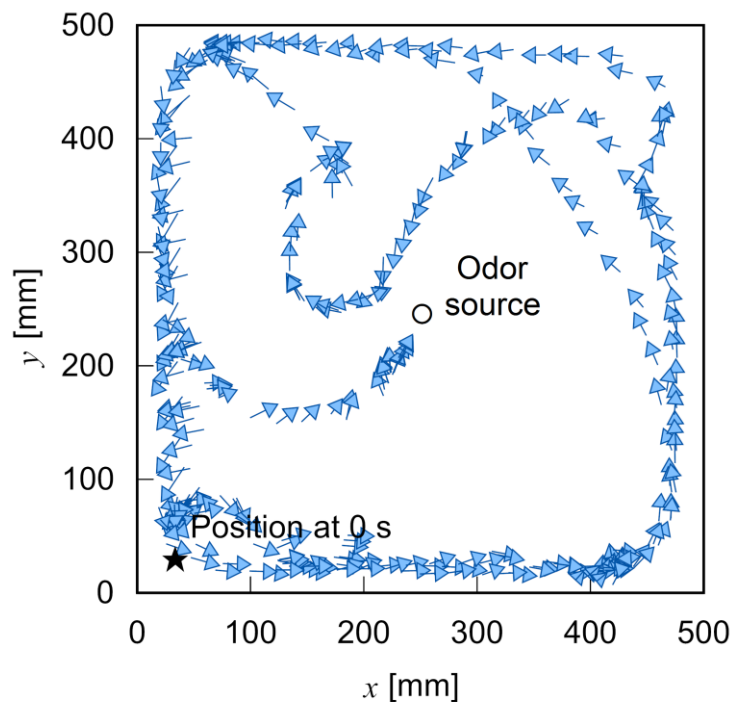


Fig. 5.4 Search path of crayfish 1. Reprinted with permission from (34).

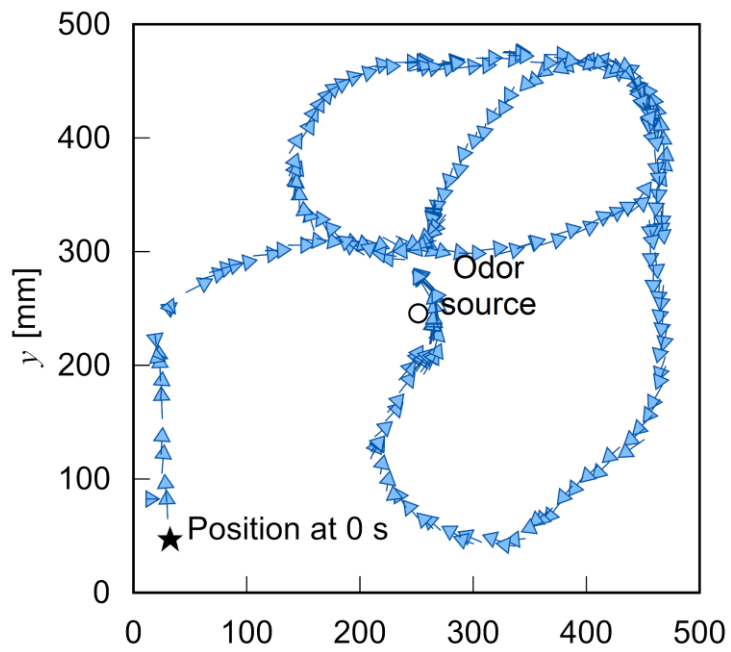


Fig. 5.5 Search path of crayfish 2. Reprinted with permission from (34).

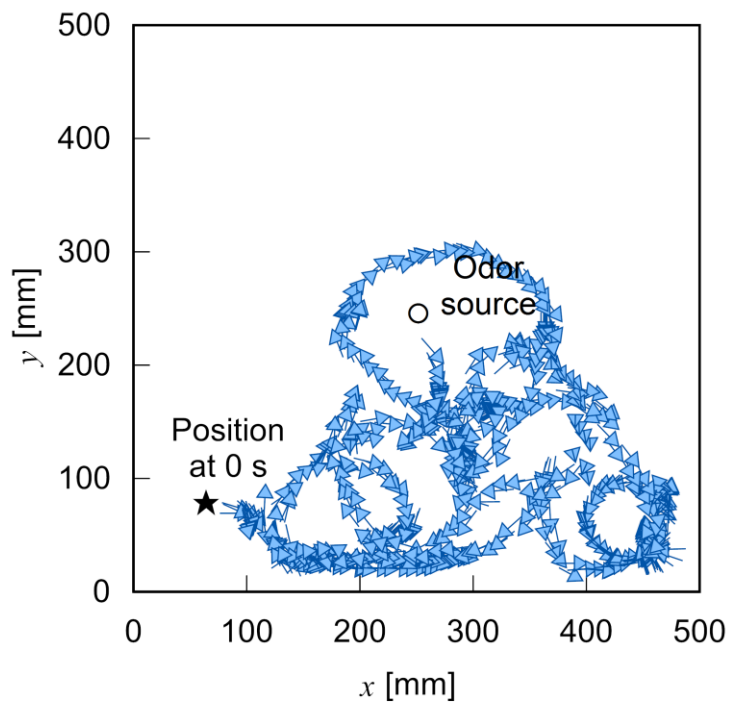


Fig. 5.6 Search path of crayfish 3. Reprinted with permission from (34).

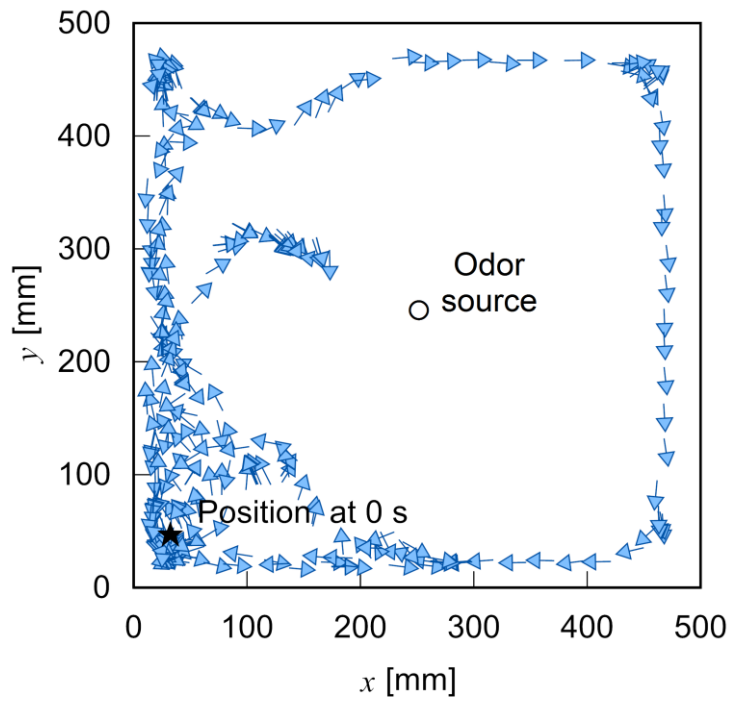


Fig. 5.7 Search path of crayfish 4. Reprinted with permission from (34).

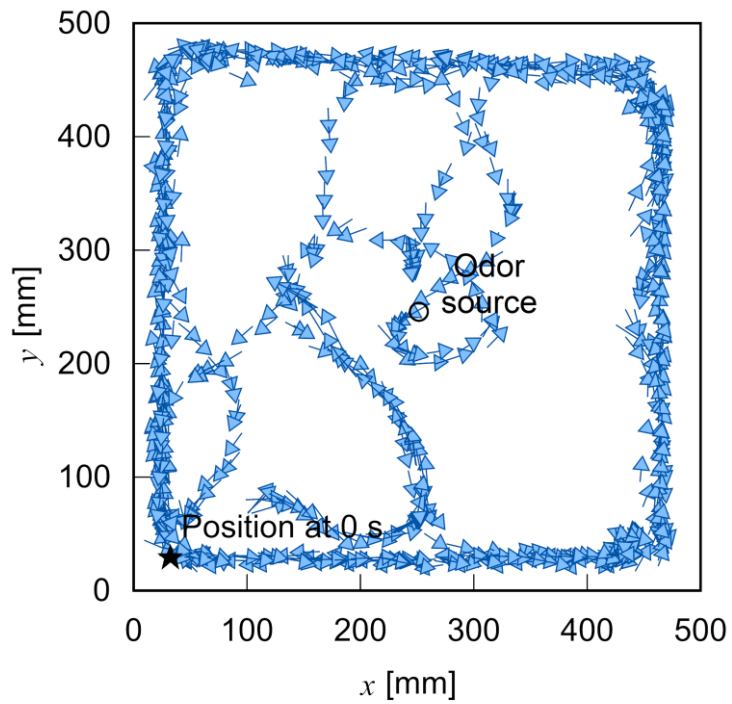


Fig. 5.8 Search path of crayfish 5. Reprinted with permission from (34).

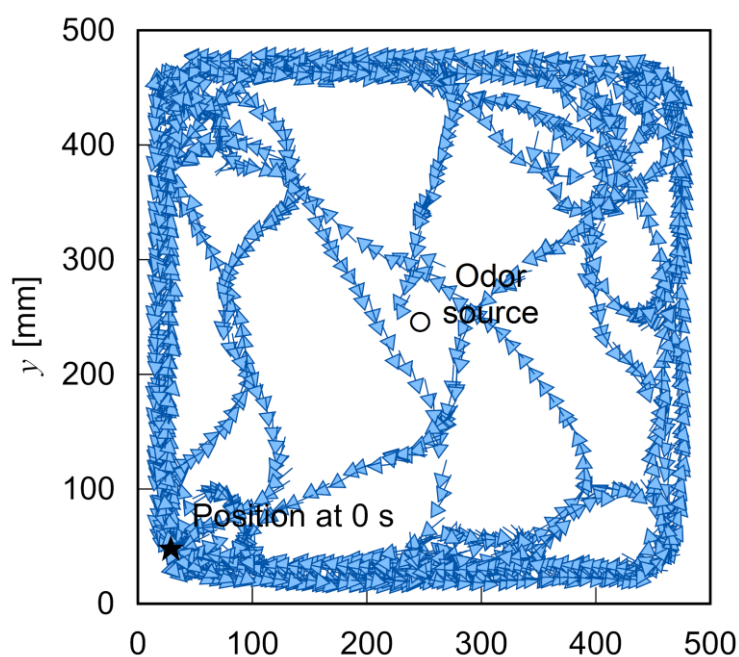


Fig. 5.9 Search path of crayfish 6. Reprinted with permission from (34).

### crayfish 1 の観察結果

今回の噴流可視化実験で用いたザリガニのうち最も体長の大きい個体であり、歩行速度が速いときには秒速 50 mm に達した。そのため、ザリガニが歩行している際に、放出口から出たインクが顎脚付近に到達する前に流されてしまい、噴流の方向を判別できないことがあった。実験全体を通して、止まることなく常に歩き回っていた。匂い源に近い水槽の中央付近を歩く際には左右両側の真横方向へ噴流を放出し、匂い源から遠い壁沿いを歩く際には左右両側の後方へ噴流を放出していることが多かった。実験開始から 2 分 15 秒経過した時点で一度匂い源に近傍へ到達したが、餌を掴み、口に運ぼうとする行動は見せなかった。その後、5 分 30 秒経過時に匂い源で餌を掴む行動を行った。

### crayfish 2 の観察結果

実験開始から 30 秒経過した時点で匂い源の近傍を通過し、その際に餌を探すように第 2、第 3 胸脚で地面を探る行動をしたが、餌を掴み、口に運ぼうとする行動はしなかった。探索中のほとんどの時間で立ち止まらずに歩行しており、直進時に左右両側の後方に噴流を放出することが多かった。まれに立ち止まることもあり、その前後では左右両側の真横方向に噴流を放出していた。実験全体を通して転回時の転回角速度が他のザリガニに比べて遅かった。転回角速度



が遅かったこととの関係性は不明であるが、今回の実験ではこのザリガニのみ全ての転回時に両側へ噴流を放出していた。今回の実験ではこのザリガニが最も早く中央の匂い源に辿り着き、餌を掴む行動をした。探索時間は3分55秒であった。

### **crayfish 3 の観察結果**

実験開始から最後まで、後退しながら移動していた時間が長かった。実験開始から3分10秒経過した時点で、匂い溶液の溜まりから約40 mm離れた位置にいた際に、急に匂い源に向かって前進し始め、餌を掴む行動をしたため、実験を終了した。後退している場合でも転回時には転回方向と逆側へ噴流を放出していることが確認された。

### **crayfish 4 の観察結果**

実験開始から5分0秒経過した時点で匂い源に到達し、餌を掴む行動をした。壁伝いに歩行している時間が多かったが、水槽の隅に来た時に壁をよじ登ろうとすることが4回あった。直進時のほとんどで顎脚を振っており、左右両側の真横方向に噴流を放出することが多かった。転回時には転回方向と逆側の真横に噴流を放出していた。

### **crayfish 5 の観察結果**

実験開始から3分20秒ほどまでは直進中に右側のみ真横方向に噴流を放出することが多かった。4分20秒前後で一度匂い源の近傍に到達してからは、直進時に左右両側の真横方向か、あるいは後方に噴流を放出していた。転回時には転回方向と逆側に噴流を放出することが多かったが、転回角速度が比較的遅い場合には左右両側の上方向や真横方向に噴流を放出しながら転回することがあった。

### **crayfish 6 の観察結果**

実験開始直後から左右両側の後方に噴流を放出しながら、壁沿いに水槽内を歩き回った。実験開始から1分20秒経過した時点で、ザリガニは水槽中央に到達したが、餌を掴み、口に運ぼうとする行動はしなかったため、実験を続行した。その後も終始左右両側の後方に噴流放出しながら、壁沿いに水槽内を歩き

回り、数回水槽中央にたどり着いたが、餌を掴み、口に運ぼうとする行動は行わなかった。実験開始から 30 分 40 秒経過した時点で水槽中央にて餌を掴む行動を行ったため、実験を終了した。

### 5.3.2 噴流の放出方向の記録

撮影した動画を再生し、噴流の放出方向と顎脚の動きの有無を調べた。左右の両側、右側のみ、左側のみ、の3種類の顎脚の振り方のそれぞれに対し、真横、上方、前方、後方の4方向に噴流の方向を判別し、計12種類に噴流放出方向を分類した。また、噴流の方向を視認できないシーンに関しては、顎脚を振っていないことが動画から鮮明に確認された場合は噴流を出していないと分類し、顎脚が動いているか否かも確認できない場合は不明と分類した。これら計14パターンのうちいずれの状態であったかを0.2秒ごとに記録した。

結果の一例として crayfish 5 の移動軌跡を Fig. 5.10 から Fig. 5.14 に示す。ザリガニが出した噴流の方向によって、1秒ごとのザリガニの位置と向きを表す矢印を色分けして表示した。軌跡が重なることで色分けが見づらくなるように、実験開始から150秒おき（最後の区間のみ200秒）に区切って軌跡を描いた。

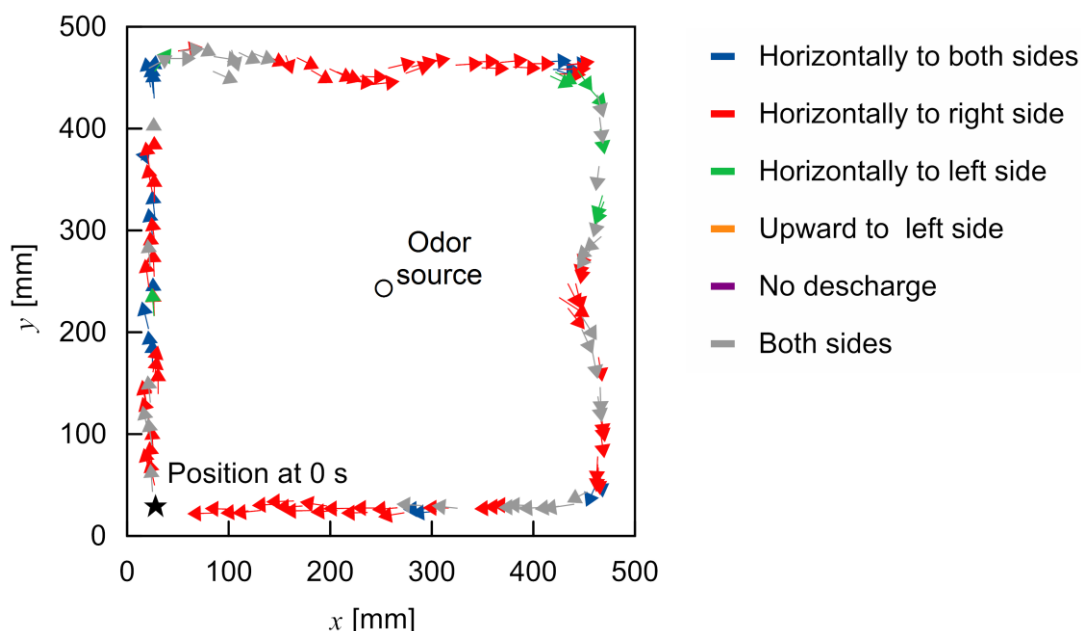


Fig. 5.10 Search path of crayfish 5 in 0–150 s colored by the direction of the jets. Reprinted with permission from (34).

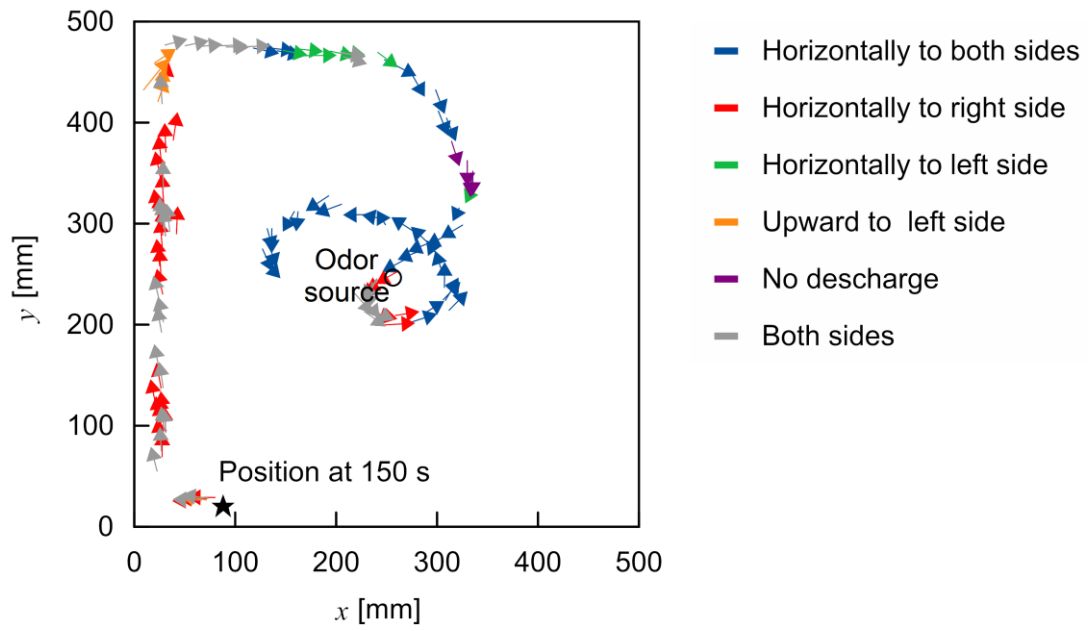


Fig. 5.11 Search path of crayfish 5 in 150–300 s colored by the direction of the jets. Reprinted with permission from (34).

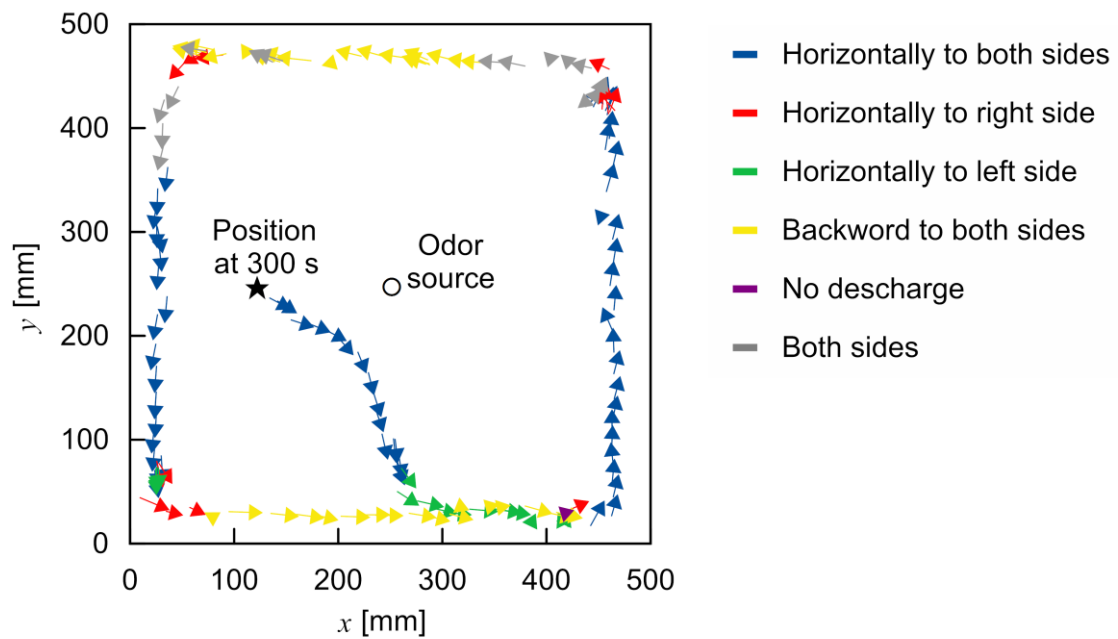


Fig. 5.12 Search path of crayfish 5 in 300–450 s colored by the direction of the jets. Reprinted with permission from (34).

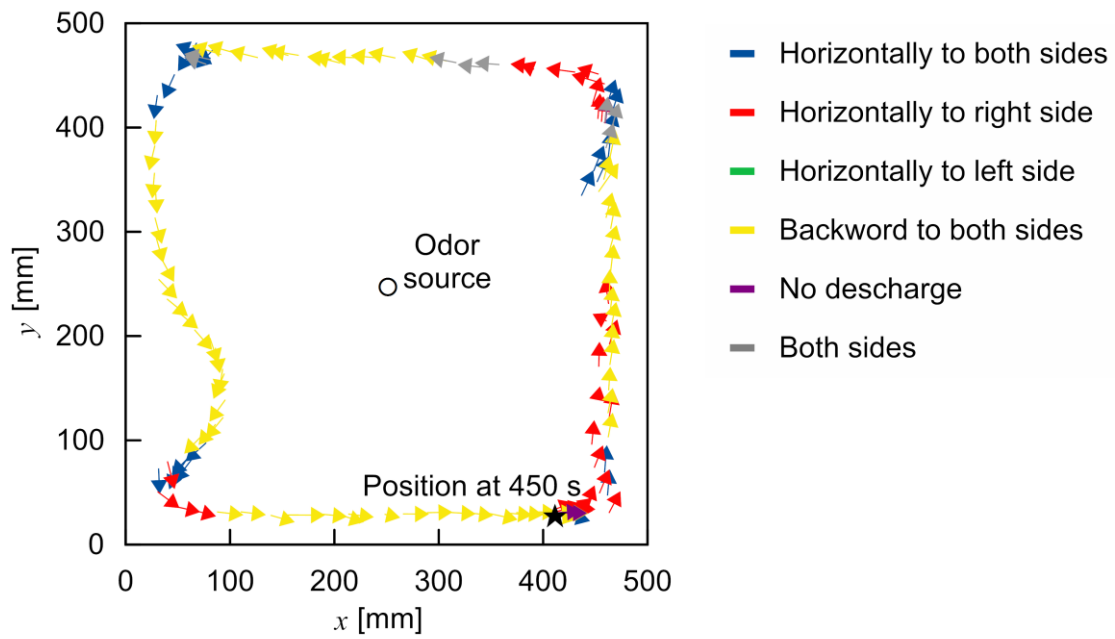


Fig. 5.13 Search path of crayfish 5 in 450–600 s colored by the direction of the jets. Reprinted with permission from (34).

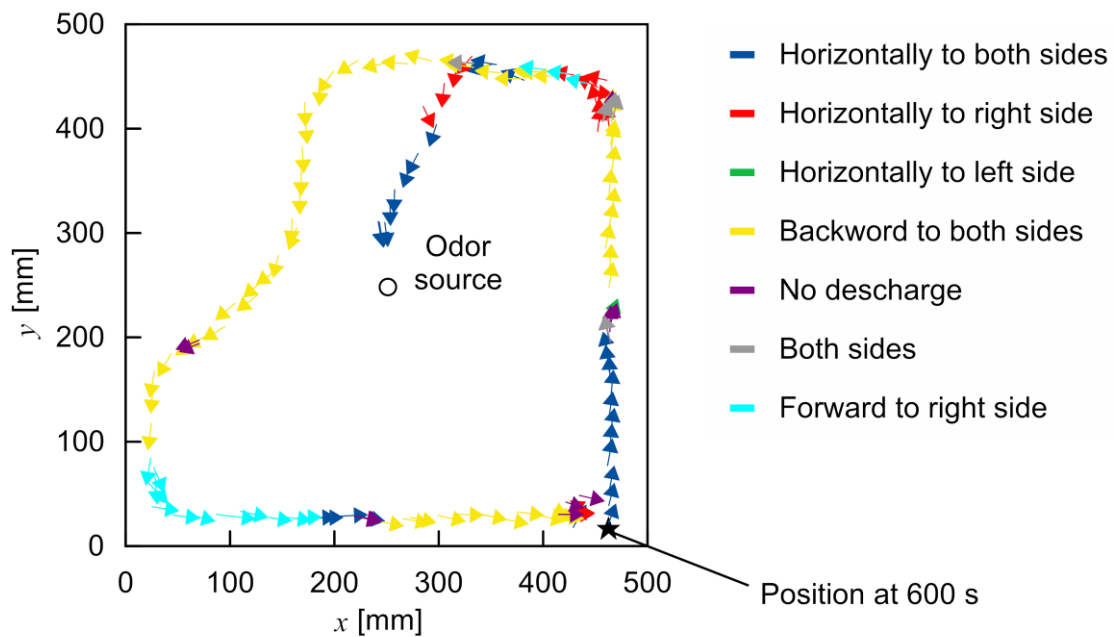


Fig. 5.14 Search path of crayfish 5 in 600–800 s colored by the direction of the jets. Reprinted with permission from (34).

この crayfish 5 は、実験全体を通しておおむね壁伝いに歩き、水槽の四隅にたどり着くと転回を行った。開始から探索終了までの間を通して、転回時には転回方向と逆側に噴流を放出する傾向が見られた。また、crayfish 3 を除いた他の 4 体のザリガニにおいても同じ傾向が見られた。本研究室で以前に行ったザリガニの顎脚の動きの観察実験においては、転回時に転回方向と逆側の顎脚を振る頻度が有意に大きいという結果が得られた<sup>(32)</sup>。本研究で開発した噴流可視化装置によって、実際に顎脚を振っている方向のみに噴流が生成されていることを確認できた。

また、crayfish 5 において、転回時に転回方向と逆側に噴流を出していた場合には、その方向の真横に向けて噴流を放出していることが多かった。他の crayfish 1、2、4、6 についても同様に、真横方向に噴流を放出していることが多かった。竹村らは、ポンプで噴流を作る装置を作製し、装置を転回させながら、化学物質を引き寄せる効果を調べる実験を行った<sup>(26)</sup>。この実験では、転回時に転回方向とは逆側のみに噴流を放出した場合、左右両側に噴流を放出した場合や噴流を放出しなかった場合と比べて、速く化学物質を引き寄せることができた。さらに、転回方向とは逆側の真横、後方 45°、上方 45°に噴流を放出した場合を比較し、真横に放出した場合に転回先から化学物質を引き寄せるのが最も速く、他の方向と比べて約 2 秒早く匂いを検出できるという結果が得られている<sup>(26)</sup>。このような探索戦略の下、ザリガニは転回時に真横に噴流を放出している可能性がある。

Fig. 5.10 から Fig. 5.14 に示す crayfish 5 の移動軌跡から、各時刻においてザリガニの頭胸甲が向いていた方向を算出した結果を Fig. 5.15 に示す。ザリガニが各時点で出していた噴流の方向を調べ、Fig. 5.10 から Fig. 5.14 と同様に分類し、プロットした結果も併せて示した。なお、ザリガニの頭胸甲の角度は、 $x$  軸の正の向きを 0°とし、反時計回りを正として算出した。Fig. 5.15 において、頭胸部の方向を表した曲線の傾きは、ザリガニが転回する際の角速度を表す。グラフが連続して同じ方向に傾いている区間は、ザリガニが進む方向を変えるために、体の向きを継続して変えていることを表す。

このグラフを見ると、角度が急激に増加している区間（赤い破線で挟まれた区間 a）、すなわちザリガニが急に左に転回し出したタイミングでは、ほぼ必ず右側の真横に噴流を出している。一方で角度の増加が比較的緩やかな区間（青い一点鎖線で挟まれた区間 b）、すなわちザリガニがゆっくりと転回を行って

た区間では、左右両側の真横や後方に噴流を放出していることが多い。他の個体についても同様に、止まっていた状態から急に動き出す際に、動く方向と逆側の真横に噴流を放出する傾向が見られた。動き始めのタイミングで、自身の体の方向を変える推進力を得るために噴流を利用している可能性も考えられる。

実験開始から 375 秒を経過した時点 (Fig. 5.12 以降) から、直進時に左右両側の後方に噴流を放出している時間帯が増えている。直進時に両側の後方に噴流を放出する傾向は、crayfish 1、2、6 にも見られた。両側の後方に噴流を放出すると、前方の広範囲から匂いを引き寄せられる<sup>(8)</sup>。この crayfish 5 は、餌を掴む行動こそしなかったが、250 秒前後にて一度匂い源の近くにたどり着き、第 2、第 3 胸脚で周囲の水底をつつくようにして餌を探す行動を行った。このタイミングで周囲に餌があると認識していた可能性が高い。したがって、それ以降は直進時に前方の広い角度範囲から匂いを引き寄せ、周囲に匂い源がないか、あらかじめ感知しようとしていた可能性が考えられる。あるいは、直進時にも噴流による推進力を得るために後方に噴流を放出していたのかもしれない。

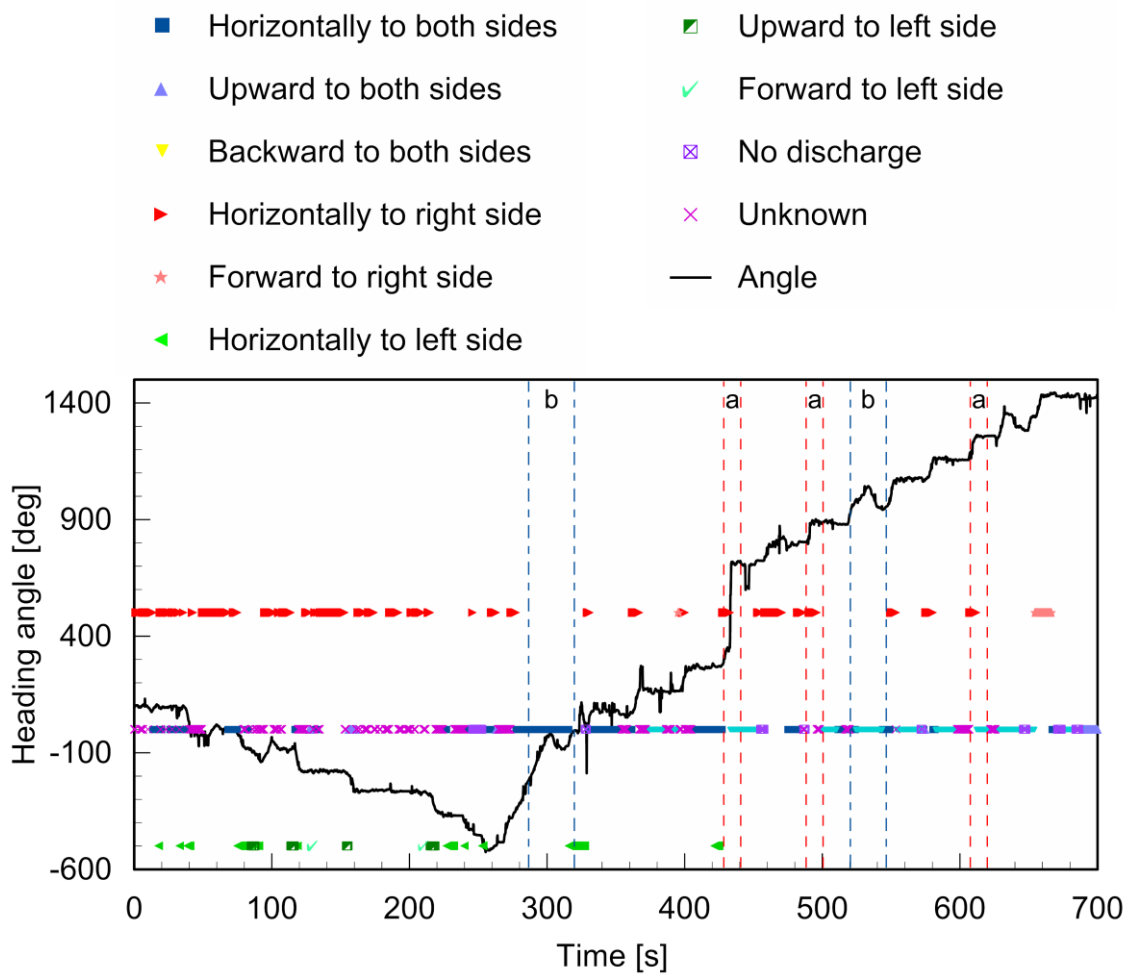


Fig. 5.15 Direction of jets generated by crayfish and its heading direction that were obtained from the video data. Reprinted with permission from (34).



## 5.4 ウチダザリガニを用いた行動観察の方法

### 5.4.1 使用したザリガニ

実験には、オスの成体とメスの成体を使用した。すべての個体に番号を振って識別した。小触角、大触角、はさみ、歩行脚の欠損を確認し、これらのうち、完全に欠損した付属肢を持たない個体を選別して実験に使用した。選別した 24 個体には、外側の小触角の先端がわずかに欠けている個体 2 匹、大触角が欠けて短くなっている個体複数匹、第 2 胸脚の先端が欠けている個体 1 匹、はさみの大きさが不揃いな個体 5 匹を含む。24 個体の頭胸甲長の平均は 46.4 mm であり、標準偏差は 1.65 mm であった。

本実験は、後述するように英国のハル大学にて行った。ハル大学における通常の飼育方法は以下の通りである。ザリガニは、一つのタンクに 9~12 匹ずつ分けて飼育する。飼育水槽の水温を 16°C~17°C に保ち、12 時間の明暗サイクル下で飼育した。投餌頻度を 1 週間に 2 回として、小エビとグリーンピースを交互に与えた。アメリカザリガニと同様に、餌の探索を促すため、1 回目の実験を行う日の 7 日前から絶食期間を設けた。一つの実験で何匹かのザリガニの行動を観察するが、実験が 1 日で終わらないため、実験条件によって絶食期間は 6 日間から 10 日間の間でばらつきがある。

実験を行った部屋の室温は 9°C~12°C に保たれ、水温は 9°C~10°C に保たれていた。そのため、ザリガニを実験時の水温に慣れさせるため、事前に実験室に移動させる必要があった。後述するように、それぞれのザリガニに対して 2 条件の実験を行った。そこで、1 回目の実験を行う日の 4 日前からザリガニを実験室へ移動させた。実験室に移動させてから実際に実験に用いるまでの時間も、実験条件によって 4 日から 7 日の間でばらつきがある。絶食期間中の共食いやケンカを避けるため、この期間は 1 匹ずつ分けて飼育した。

## 5.4.2 実験条件

匂い溶液の作製には、普段の飼育の際に与えている冷凍の小エビを使用した。小エビを 600 g 測り取って、300 mL のカルキを抜いた水に入れた。小エビが解凍された後、潰してさらに時間をおいた。浸漬時間は 3 時間とした<sup>(38)</sup>。その後、フィルターに通して小エビを取り除き、赤色の食用色素（食用色素 赤、共立食品株式会社）で着色した。

開発した装置をザリガニに背負わせて嗅覚探索行動を観察する。しかし、装置を背負わせたことがザリガニに影響を与えていた場合、ザリガニは自然な行動を示さず、実験で得られた行動を解析しても嗅覚探索行動を解明できない。そこで、装置を背負わせない条件でも実験を行い、装置を背負わせた場合の行動と比較した。

今回実験を行なった四つの条件を以下に示す。

- 条件 1-1 装置を背負わせないザリガニを用いて、  
餌の匂いを付加した溶液を放出しなかった場合（対照実験）
- 条件 1-2 装置を背負わせないザリガニを用いて、  
水槽の中央から匂い溶液を放出した場合
- 条件 2-1 装置を背負わせたザリガニを用いて、  
餌の匂いを付加した溶液を放出しなかった場合
- 条件 2-2 装置を背負わせたザリガニを用いて、  
水槽の中央から匂い溶液を放出した場合

条件 1-1 の実験が対照実験（コントロール実験）である。この実験で観察されるザリガニの行動は嗅覚探索行動ではなく、一般的な歩行の様子が観察されると予想される。この条件と比較することで、嗅覚探索行動に特有の行動を抽出する。そのため、条件 1-1 と条件 1-2 で同じザリガニを使用した。同様に条件 2-1 と条件 2-2 でも同じザリガニを使用した。したがって、すべてのザリガニは、餌の匂いがしない水槽における実験と、餌の匂いがする水槽における実験の 2 回使用された。ザリガニは、個体ごとに性格が異なる。個体によっては、全く歩かないことや、常に壁に沿って歩くだけで中央付近を歩かないこともある。最初に条件 1-1 の実験を行い、撮影領域の中央付近を横切って歩いたザリガニを選び、条件 1-2 の実験を行った。条件 2-1、2-2 においても同様に実験を

行った。最終的に 24 匹のザリガニを選び、各条件で 12 データずつ揃えた。

この実験を行なった結果、ウチダザリガニは、アメリカザリガニと全般的な性格の傾向が異なっていることが分かった。アメリカザリガニと同様に壁に沿って歩く個体もいるが、新しい環境に置かれてもすぐに歩き回り始める個体も多かった。短時間で匂い源に到達する傾向があったので、アメリカザリガニを使用した実験では、実験の制限時間を 30 分間としていたが、ウチダザリガニを使用した今回の実験では 20 分間とした。匂い溶液を放出しない条件 1-1、条件 2-1 でも、行動記録時間は 20 分間とした。条件 1-2、条件 2-2 の実験では、20 分以内に匂い源にたどり着けなかった場合を失敗とした。

条件 1-1、1-2 では、実験を行う日の前日に目隠しと追尾用の目印を付けた。条件 2-1、2-2 では、実験を行う日の前日に目隠しと追尾用の目印を付けるだけでなく、さらにインク放出チューブの固定具をそれぞれのザリガニの体格に合わせて作製し、目隠しの上から取り付けた。

### 5.4.3 実験のセットアップと実験手順

本節で紹介する実験は、イギリスにあるハル大学 (University of Hull, Hull, East Yorkshire, UK) の Thomas Breithaupt 博士の実験設備を使用して行った。本章の前半で紹介したアメリカザリガニを用いた観察実験では、50 cm × 50 cm の水槽を使用していた。そのため、実験の制限時間である 30 分間、常にインクを放出し続けると、水槽全体にインクが広がってしまう。実験の終わりに近づくとつれ、噴流の方向を記録しにくくなってしまった。さらに詳細に行動を解析するために、噴流の方向をさらに識別しやすくしたい。そこで、幅 1 m、長さ 2 m の流れを作ることができる水槽の中に、1 m × 1 m の大きさに区切った領域を作り、ここを実験領域とした。水深は 15 cm とした。

実験のセットアップを Fig. 5.16 に示す。ザリガニがどちらの方向を向いても噴流の方向を記録できるように、撮影領域を縦 600 mm、横 1000 mm として、水槽の両側に設置したカメラで同じ領域を撮影した。このセットアップであれば、左右に付いている顎脚の動きも撮影できる。噴流の可視化には、フルオレセインナトリウム水溶液を使用した。蛍光が見やすいように、黒いスエード地の布を貼ったアクリル板で、実験環境の床と壁面を囲んだ。

実験領域の左下には、ザリガニを入れて水槽内の環境に慣らすための領域を

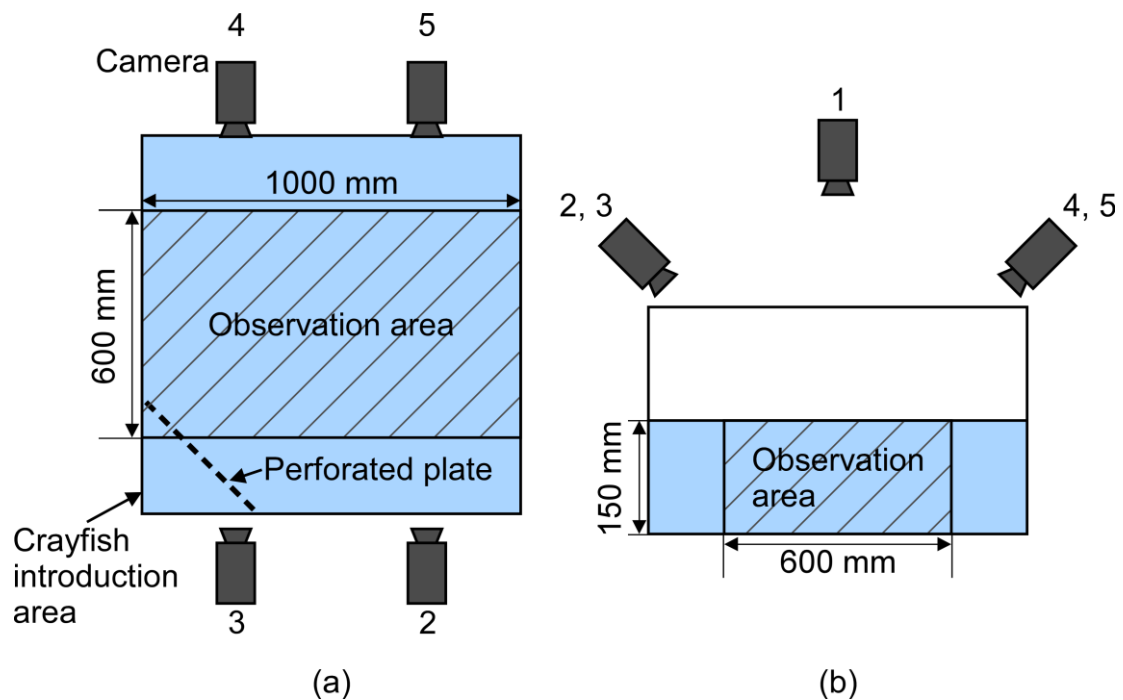


Fig. 5.16 Experimental setup. (a) Top view. (b) Side view.

設定した。条件 1-1、条件 1-2 では、半円状の縦断面を持つケージを使用した。ケージの入り口は、金網で作られた蓋が付いている<sup>(32)</sup>。一方で、条件 2-1 と条件 2-2 の装置を背負わせた場合には、ザリガニを蓋の付いたケージに入れてしまうと、実験開始時に装置のスイッチを操作できない。そのため、Fig. 5.16(a) に示すように、小さな穴を複数開けたアクリル板で領域を区切った。実験の具体的な手順を以下に示す。

#### 条件 1-1、条件 1-2 の実験の手順

1. 水槽内の水の流れが落ち着いたのを確認した後、匂い溶液の放出を開始する。水底に溜まった匂い溶液の直径が約 15 cm に広がるまで待機する。  
(条件 1-1 ではこの工程を飛ばす。)
2. ザリガニをケージに入れて、ケージごと水槽内に静かに入れる。
3. 甲殻類生物は、小触角で匂いを知覚すると、小触角を小刻みに振る。この行動はフリッキングと呼ばれる。そこで、ザリガニがフリッキングを開始したのを確認した後、ケージの蓋を開ける。
4. ザリガニの額角が実験領域に入った瞬間を実験開始時刻として、記録を開始する。
5. 制限時間を 20 分間として、ザリガニが匂いの溜まりに入って、leg raking を示したら匂い源への到達成功とみなし、記録を終了する。  
(条件 1-1 では、実験開始から 20 分間経過したら、記録を終了する。)

#### 条件 2-1、条件 2-2 の実験の手順

1. ザリガニに装置を背負わせる。
2. 水槽内の水の流れが落ち着いたのを確認した後、匂い溶液の放出を開始する。水底に溜まった匂い溶液の直径が約 15 cm に広がるまで待機する。  
(条件 2-1 ではこの工程を飛ばす。)
3. 装置を載せたザリガニを穴の開いたアクリル板で区切った領域に静かに入れる。
4. ザリガニがフリッキングを開始したのを確認した後、流れを起こさないようにゆっくりとアクリル板を取り除く。
5. ザリガニが実験領域に入る直前で、装置のスイッチを入れる。ザリガニの額角が実験領域に入った瞬間を実験開始時刻として、記録を開始する。

6. 制限時間を 20 分間として、ザリガニが匂いの溜まりに入って、leg raking を示したら匂い源への到達成功とみなし、記録を終了する。

(条件 1-1 では、実験開始から 20 分間経過したら、記録を終了する。)

## 5.5 ウチダザリガニの行動観察結果

### 5.5.1 装置を載せたことがザリガニの行動に与える影響

24匹すべてのザリガニは、水槽の中央から匂い溶液を放出した条件 1-2 と 2-2 において、匂い源に到達して leg raking を示した。本章で述べた実験の目的は、ザリガニが餌を探索する時の行動を観察して、探索戦略を解明することである。そのため、ザリガニの自然な行動を観察することが重要であるが、もし、装置がザリガニにとって大きすぎた場合には、以下の 2 点が問題となる。

- ・ザリガニの行動が制限され、通常とは異なる行動を示す
- ・餌を探索するモチベーションを失う

装置が大きすぎてザリガニの歩行の妨げになっていた場合には、歩行スピードが下がると予想される。そこで、条件 1-1 (装置なし・匂いなし) と条件 2-1 (装置あり・匂いなし) を比較して、匂いがない条件において、装置の有無によって歩行スピードが変化するかを比較した。

実験開始後、初めて撮影領域に入り、かつ、初めて 20 cm 直進し続けた時の時間を測定した。測定には、それぞれ 12 匹分すべてのデータを使用した。条件 1-1 (装置なし・匂いなし) における歩行速度の平均値は 30.5 mm/s であった。条件 2-1 (装置あり・匂いなし) における歩行速度の平均値は 26.1 mm/s であった。ザリガニに装置を載せたことによって、歩行速度が 86% に下がっている。これらの歩行速度の違いに有意な差があるかどうか、統計的検定を行った。

まず、それぞれのデータが正規分布に従うかを、Shapiro-Wilk 検定により確かめた<sup>(39)</sup>。条件 1-1 (装置なし・匂いなし) の  $p$  値は 0.07 であり、条件 2-1 (装置あり・匂いなし) の  $p$  値は 0.01 であった。Shapiro-Wilk 検定における帰無仮説は、「標本の母集団が正規分布に従う」である。したがって、有意水準 5% とすると、条件 1-1 (装置なし・匂いなし) では帰無仮説が棄却されず、正規分布に従う。一方で、条件 2-1 (装置あり・匂いなし) では帰無仮説が棄却され、正規分布に従うとは言えないという結果になった。

そこで、ノンパラメトリック検定である Wilcoxon の順位和検定を行って、これらのデータの間には有意差があるかどうかを調査した。検定の結果、 $p$  値は 0.1048 であった。Wilcoxon の順位和検定における帰無仮説は「二つのデータの

代表値（中央値）に差がない」である<sup>(40)</sup>。有意水準 5%とすると、帰無仮説が棄却されず、有意差があるとは言えない結果となった。

水槽の中央から匂い溶液を放出した条件 1-2 と 2-2 において、ザリガニが匂い源に到達し、leg raking を示したことを考慮すると、装置を載せたことによって 85%の速度となったが、これは装置の影響によって有意に減少したとは言えず、また餌を探索するモチベーションは失っていないことを示す。したがって、ザリガニは通常と同様な嗅覚探索行動を示していたと示唆される。歩行速度は 85%であるが、装置を載せたことによる影響は少なく、餌を探索するモチベーションは失っていないことが示された。したがって、本研究にて得られたデータを解析することが嗅覚探索行動の解明に繋がることが示された。



### 5.5.2 探索フェーズと噴流の放出方向

ザリガニは、壁に沿って歩行する習性がある。Fig. 5.16 に示すように、本実験では、ザリガニが自由に歩行できる実験領域（1000 mm × 1000 mm）に対して、詳細に行動を記録するための撮影領域（600 mm × 1000 mm）が小さい。そのため、ザリガニが水槽の中央から放出されている匂いを探そうとせずに、常に壁に沿って歩いた場合、ザリガニが撮影領域の内側にいる滞在時間は全体の実験時間の 20%を超えることはない。

条件 1-2 の 12 データにおいて、探索時間が最も短いデータは 38 秒であり、最も長いデータは 19 分 34 秒であった。条件 2-2 の 12 データにおいては、探索時間が最も短いデータは 41 秒であり、最も長いデータが 11 分 35 秒であった。同じ条件でも個体ごとの探索時間の差が大きい。そこで、探索時間が長い 3 データと短い 3 データを除いた 6 データに対して、ザリガニが撮影領域内にいた滞在時間を測定した。個体ごとに探索時間が異なるため、それぞれ探索時間に対する滞在時間の割合を求めた。条件 1-2 では、探索時間の平均が 5 分 41 秒であった。条件 2-2 では探索時間の平均は 3 分 15 秒であった。また、同じ 6 個体に対して、条件 1-1 と 2-1 における滞在時間も記録した。これらの条件では、記録時間 20 分間に対する滞在時間の割合を算出した。

Table 5.1 に滞在時間の割合の一覧を示す。匂いのない条件 1-1 と条件 2-1 では、どちらも 20%を下回っている。いずれのザリガニも壁に沿って歩行する行動が多くみられた。撮影領域の中心付近を歩行する個体もいたが、6 個体の内最も割合が高いものでも 24%であった。また、壁付近を歩行する時も中央付近を歩行する時も、歩行スピードが一定のように見えた。一方で、匂いのある条件 1-2 と条件 2-2 では、滞在時間の割合が 48%と 67%であった。これらの条件では、ザリガニが壁から離れて歩くこともあった。また、歩行スピードに変動があるように見えた。特に、匂い源に近づくときに、歩行スピードが遅くなっ

Table 5.1 Averages of time ratios in which crayfish was staying in the observation area.

Without Device		With Device	
Condition 1-1	Condition 1-2	Condition 2-1	Condition 2-2
18%	48%	19%	67%

ているように見えた。歩行スピードが遅ければ、滞在時間は長くなる。壁に沿って歩行するだけでなく、匂いを辿って水槽の中央付近を歩き回っていたことが数値でも示されている。

匂いを辿って水槽の中央付近を歩き回っていたことが示されたため、この時間帯に着目して、噴流の放出方向を調べた結果について述べる。Fig. 5.17 に、ある 1 匹のザリガニが噴流の方向を変えた様子を示す。上から下に行くにしたがって時間が経過している。この写真の一番上では、ザリガニは立ち止まっている。そして、前方に向かって流れを作っている。これは顎脚を振って作った噴流ではなく、エラから放出された流れである。次に、このザリガニは、匂いに気付いてフリッキングを開始した。そして直後に左に転回する時には、右側のみに噴流を生成していた。次に匂い源に向かって直進した時には再び、両側の後方に噴流を生成した。匂いのプルームにたどり着いた 4 枚目の写真は、上方に向かって噴流の放出を開始した瞬間である。そして、上方に噴流を生成しながらプルームの中央まで進み、leg raking を示した。

他の個体についても、条件 2-1 と条件 2-2 の実験結果を比較すると、条件 2-1 では常に同じような歩行スピードで歩き、噴流の放出方向は、後方または左右真横であった。一方で条件 2-2 では、何匹かの個体に対して、途中でザリガニの行動が変化した様子が観察された。匂いに気付く前は、直進する時には、両側の真横または、後方に向けて噴流を放出していた。匂いに気付くと、歩行速度が遅くなり、フリッキングを開始した。そして、まっすぐ歩いていたのに、匂い源の方へ向かって体の向きを変えた。匂い源に向かっている時も、直進している時は、左右真横または後方に向かって噴流を生成していた。そして、匂いのプルームにたどり着くと、噴流を上方に向けて放出していた。本実験により、ザリガニが餌を探索する時にいくつかの探索フェーズを持ち、フェーズごとに噴流の放出方向も変えている可能性が示唆された。

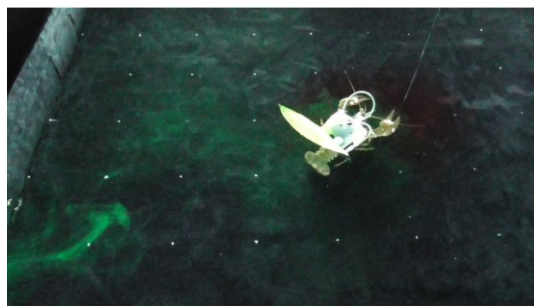
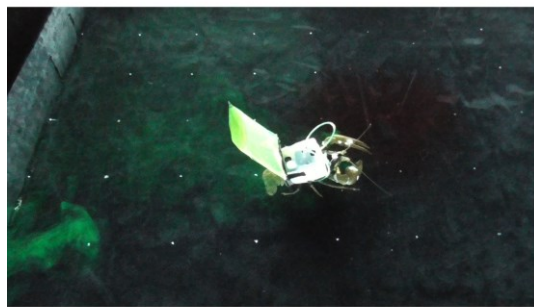
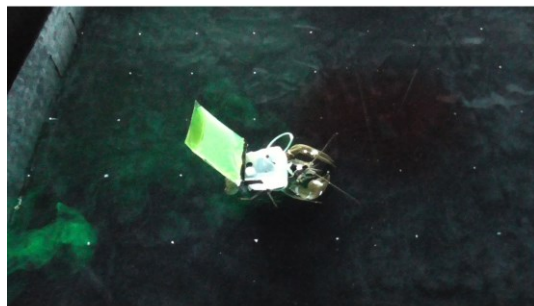
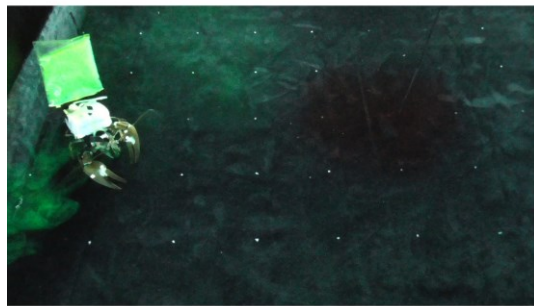
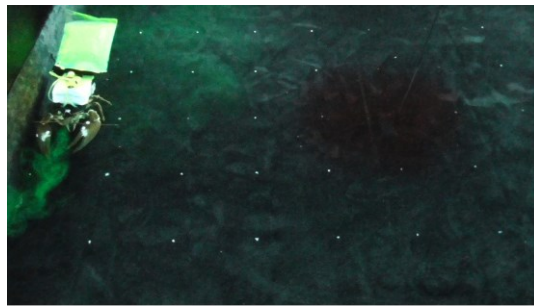


Fig. 5.17 Images captured by camera 3.

## 5.6 本章のまとめ

開発した噴流可視化装置を用いてアメリカザリガニに対して噴流可視化実験を行った。その結果、ザリガニは急に転回を行う際に、ザリガニから見て転回方向と逆側の真横方向へ噴流を放出する傾向があることが分かった。竹村らによって行われた噴流生成装置を用いた実験<sup>(26)</sup>より、転回時に最も早く流体を引き寄せることができる噴流の方向は逆側真横方向であることは分かっていたが、噴流可視化装置を用いることで、実際のザリガニも転回時に逆側の真横方向に噴流を出していることが確認された。また、噴流可視化装置を用いることにより、直進時に両側の顎脚から後方へ噴流を放出する傾向が新たに明らかになった。前方の匂い源の有無をあらかじめ検知しようとしている可能性や、直進する際の推進力を得る目的でこの方向に噴流放出を行っている可能性がある。

また、イギリスのハル大学の Thomas Breithaupt 博士の下でウチダザリガニに対しても、嗅覚探索行動を観察した。複数の個体において、餌の匂いを感知して匂いの空間分布を辿っている時と、匂いの放出位置に十分近づいた時では、作る流れの方向を変えていることが発見された。ハル大学で用いた水槽は大型であり、ザリガニが戦略を切り替える瞬間を捉えることができた。また、餌を探す時の探索戦略が、いくつかのフェーズに分けられる傾向が得られた。特に、ザリガニが匂い溶液のプルームに到達した後の行動が興味深い。上方に噴流を放出しながら、歩行脚で地面を探って匂い溶液の分布を乱したり、鰓から吐いた水を地面に打ち付けたりするような行動をしていた。そうすることで、水底に沈んだ餌の匂いを巻き上げて、小触角に運んでいると示唆される。

---

## 第6章

# 噴流で化学物質を巻き上げて検出する手法

---

### 6.1 はじめに

これまで、噴流のエントレイメントで流体を引き寄せることに着目して、餌を探す時のザリガニの噴流生成を研究した結果を紹介してきた。第5章の行動観察実験において特に興味深かった行動が、匂い溶液のプルームに到達した後に、噴流を上方に向けて放出している行動である。上方に噴流を放出しつつ、足元で水底から流体を巻き上げるような流れを作ると、下からも流体を引き寄せることができる。水底に沈んだ餌の匂いを巻き上げて、小触角に運んでいる可能性がある。また、第1章で述べたようにザリガニは縄張り闘争の際に、噴流で自分の尿を相手へ吹き飛ばす。

これらの行動からヒントを得て、ごみの埋め立て地において、気流を操って地表のガスを巻き上げてセンサで検出する手法を着想した。飛行ロボットを用いて能動的にメタンガスを集めて検出することができれば、より手軽で、かつ精度の良いメタンガスモニタリングを行えると期待される。市販のシミュレーションソフトで用意されている乱流モデルでは、十分に発達した乱流を想定しているため、噴流のシミュレーションが難しいと言われる。本研究では、これまで噴流のシミュレーションを行ってきたため、妥当な計算結果を得るために必要な条件設定や計算方法に対する知見がある。そこで、市販の流体解析ソフトウェアを用いて、飛行ロボットの周囲に形成される流れ場を解析した。さらに、実際にドローンを飛行させてガスを検出する実験を行い、噴流で化学物質を巻き上げて検出する手法の実現可能性を示した。

## 6.2 クアッドコプタ

無人航空機のうち、遠隔操作、または自動操縦が可能なものをドローンと呼ぶ<sup>(41)</sup>。ドローンには滑空機、飛行機、飛行船、回転翼機などがある。本手法では、ガスを検出する際に、同じ位置に留まって気流を操作してガスを巻き上げることを想定している。先に上げたドローンのうち、滑空機、飛行機は飛行原理上、同じ位置に留まることができないという欠点がある。飛行船には周囲の気流場に与える影響が小さいという利点はあるが、位置制御がしづらく、機体のサイズも大きくなってしまう。そのため、本研究で提案する手法には、ガスを検出する飛行ロボットとして回転翼機が適している。

回転翼機は、ヘリコプタとマルチコプタの二つに分けることができる。ヘリコプタには、メインロータとシングルロータをもつシングルロータ式と、2枚のロータをもつタンデムロータ式の2種類がある。マルチコプタには、3枚のロータを持つトライコプタ、4枚のロータを持つクアッドコプタ、6枚のロータを持つヘキサコプタ、8枚のロータを持つオクトコプタなどがある。マルチコプタは、上昇、下降気流に弱いものの、構造的に単純であること、飛行原理がわかりやすいこと、操縦が容易であること、製造コストが安いこと、メンテナンスが容易であること、ある程度の耐久性があること等の利点がある。特に近年発展が著しく、多様な用途で用いられているため、手に入りやすいクアッドコプタを用いることにした。また、オープンソースにおける開発環境が整っていることから、初心者でも開発しやすいという利点があることも選択した理由である。

本研究では Parrot 社の AR Drone 2.0 Power Edition を用いた。その外観を Fig. 6.1 に示す。このクアッドコプタは、安全性、運用性及び開発性の高さの良さから選定された<sup>(42)-(45)</sup>。クアッドコプタは四つのロータを持ち、隣り合うロータは互いに反対方向へ回転している。このようにロータを配置することで機体に働くトルクを打ち消し、姿勢を安定させることができる。また、この四つのロータの回転数をそれぞれ制御することによって、自由に動けるようになっている。例えば、前進させる際には、後方となるロータの回転数を上げることで前への推進力を得ることができる。上昇させる際には四つのロータ全ての回転数をあげることで上方向へ推進し、右回転する際には時計回りに回転するロータの回転数をあげることでその場で回転する。

一般的なクアッドコプタのオンボードパーツの概略図を Fig. 6.2 に示す。同図に示したのは、ドローンを操縦するために必要最低限な部品であり、実際のドローンではこの他にも各種センサ等が搭載されている。コントローラで指令すると、回路で生成した信号が 2.4 GHz の無線電波でドローン上の受信器に送られる。通信で用いる 2.4 GHz 帯の無線周波数は、無線従事者の免許がなくても使用することができる一方、Wi-Fi 等の無線通信にも利用されることから、混線してしまうという欠点もある。受信器で受信した信号はフライトコントローラに送られる。フライトコントローラでは受信した信号からどのようにロータを制御したら良いか演算を行い、計算された PWM (pulse width modulation) 信号を ESC (electronic speed controller) へ送る。ESC では受信した PWM 信号を元に、実際に電圧の制御を行う。ESC で調整された電圧がモータに印加され、モータが作動する。ESC に付属される BEC (battery eliminator circuit) では、バッテリーから動力部である ESC に印加された電圧を用い、フライトコントローラや受信機、センサなどの駆動部に必要な印加電圧を電圧降下回路によって作り出し、各部に電力を供給している。



Fig. 6.1 AR Drone 2.0 Power Edition, Parrot. Reprinted with permission from (44).

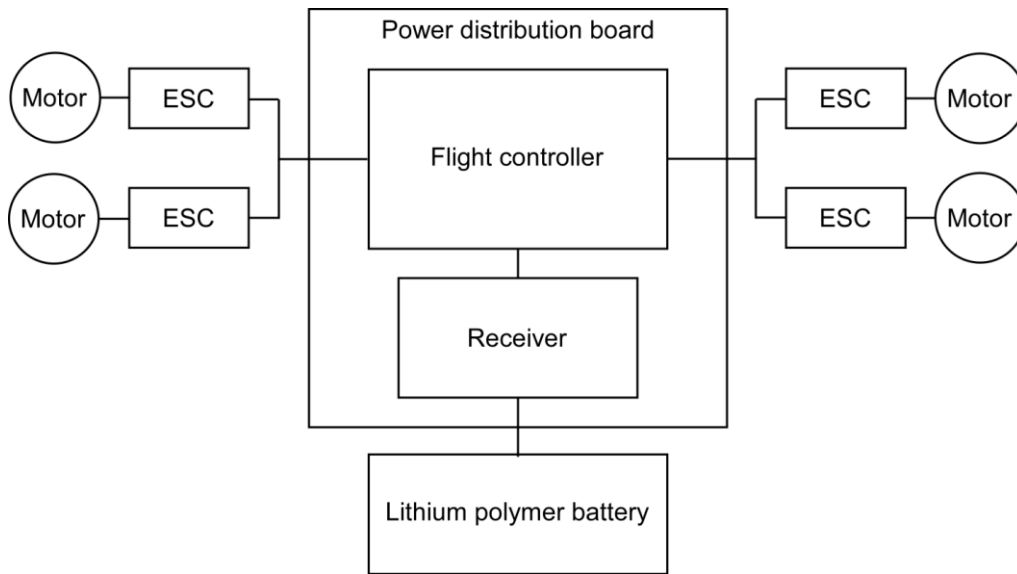


Fig. 6.2 Onboard parts of a quadcopter. Reprinted with permission from (44).



## 6.3 数値流体力学シミュレーションによる 流れ場の解析

本研究では、Solidworks (Dassault Systèmes) でモデルを作成し、Solidworks Flow Simulation で流体シミュレーションを行った。モデルの作成と流体シミュレーションの両者を Solidworks 内で行うことにより、シミュレーションソフトに CAD モデルを読み込ませる手間を省くことができる。また、モデルに変更を加えた際もすぐに反映させることができる。一方、流体計算専用ソフトウェアほどの細かい設定は行えないため、正確さには長けていない。本節では、それぞれで使ったソフトウェアと作業手順について紹介する。

### 6.3.1 Solidworks

シミュレーションモデルの作成には、市販の CAD ソフトウェアである Solidworks を使用した。本ソフトウェアの特長として、他の CAD ソフトと比較して簡単な操作で複雑な部品を作成できることが挙げられる。さらに、後述の CFD シミュレーション用ソフトウェア Solidworks Flow Simulation と同じウィンドウ上で利用できるため、データの入出力を行う手間を省くことができる。

本ソフトウェアにおける作業手順は、大きく分けると以下に示す 2 段階に分けることができる。まず、パーツ機能を用いて作成したいモデルへ組み込む部品をそれぞれ作成する。その後、作成した部品をアセンブリ機能で組み合わせる。本研究ではパーツ機能を用いて、クアッドコプタのアーム、ロータ、ロータの支柱、ロータとアームの接続部分、床の 5 箇所をそれぞれ作成した。その後、アセンブリ機能を用いて、作成した五つの部品を組み立てた。

### 6.3.2 Solidworks Flow Simulation

本章で述べるシミュレーションでは、Solidworks Flow Simulation を用いた。本ソフトウェアを選択した理由は、CAD ソフトウェアである Solidworks との互換性が高く、同じウィンドウ上で操作することができるからである。そのため、モデルを作成した後にデータを出力し、CFD ソフトウェアにモデルデータを入力するという手間を省くことができる。また、CAD ソフトに統合されたシミュレーションソフトウェアであるため、ものを動かした際の動きを正確にシミュレーションで再現し、周りを流れる流体の動きを計算できる。本研究で行ったシミュレーションにおいては細かい精度で計算を行うよりも、ロータの回転を再現できることが重要であるため、本シミュレーションソフトウェアを用いた。

本ソフトウェアでは、作成したモデルの周囲の気流場を計算した。シミュレーション設定を以下に示す。まず初期状態における条件を指定した。その後、計算領域、境界条件、回転条件、メッシュ設定、ゴール条件を指定した。回転領域や細かいメッシュを指定する領域は円柱で区切り、これらの領域を固体として認識しないように設定した。初期状態における乱流パラメータとして、乱流強度を 3%、乱流長さを 0.254 m と設定した。その後、メッシュを作成した後にデータを一度出力し、作成されたメッシュを見ながらメッシュの設定条件が適切か確認する。確認ができたなら計算を開始した。計算中は、計算モニタを用いて計算の進捗状況やエラーの有無等を確認した。

### 6.3.3 クアッドコプタを飛行させた際に生成される気流分布

佐藤らの研究により、クアッドコプタにガスセンサを搭載しただけでは、地表付近を漂うガスを飛行ロボット上で検出することができないことが示されている<sup>(42),(43)</sup>。そこで、実際にクアッドコプタが飛行する際、どのような気流場が生成されていたのか CFD シミュレーションを用いて調べた。シミュレーションに用いたモデルを Fig. 6.3(a)に示す。モデルとして作成したクアッドコプタは、市販されている Parrot 社の AR Drone 2.0 を模倣し、対角線長を 0.4 m とした。ロータは、直径 10 inch、ピッチ 4.5 inch のものを利用した。四角で囲われている部分が計算領域を示している。その大きさは、縦 2 m、横 2 m、高さ 1 m とした。計算領域内で丸く囲ってある部分はロータの回転領域を示しており、四つのロータをつなぐ細い線は機体を表している。四つのロータのうち、灰色のロータは時計回りに、白色のロータは反時計回りに回転させた。ロータの回転数はいずれも 3800 rpm とした。実際に高度 0.8 m で飛行する AR Drone 2.0 のロータの回転数を計測したところ 3791 rpm であったため、この測定値に合わせて回転数を設定した。境界条件は、計算領域の境界面では流体が自由に出入りできるものとした。また、クアッドコプタや床面と流体の境界面は、すべりなし壁とした。この条件でメッシュを作製したところ、メッシュ数は 2368580 となった。

Fig. 6.3(b)に示した上面図の  $x'$  軸を通る垂直断面におけるシミュレーション結果を Fig. 6.3(c)に示す。矢印の向きは風向を表し、色は風速の大きさを表している。ロータが回転することによって生成された気流は、7 m/s 程度の速さで吹き降ろされ、地表に到達している。その後、地表に沿って、クアッドコプタから離れる方向へ流れていくことが分かる。クアッドコプタの中央の真下では、吹き降ろされた気流が地表ではね返り、0.2 m 程度まで気流が上昇していることが分かる。この気流は、ロータから吹き降ろされた気流に巻き込まれ、再び地表へ向かう。以上から分かるように、地表付近にガスが漂っていても、ロータが回転したことで生成される下降気流によって押し流されてしまう。そのため、単にガスセンサをマルチコプタ上に取り付けても、ガスを検出することはできない。

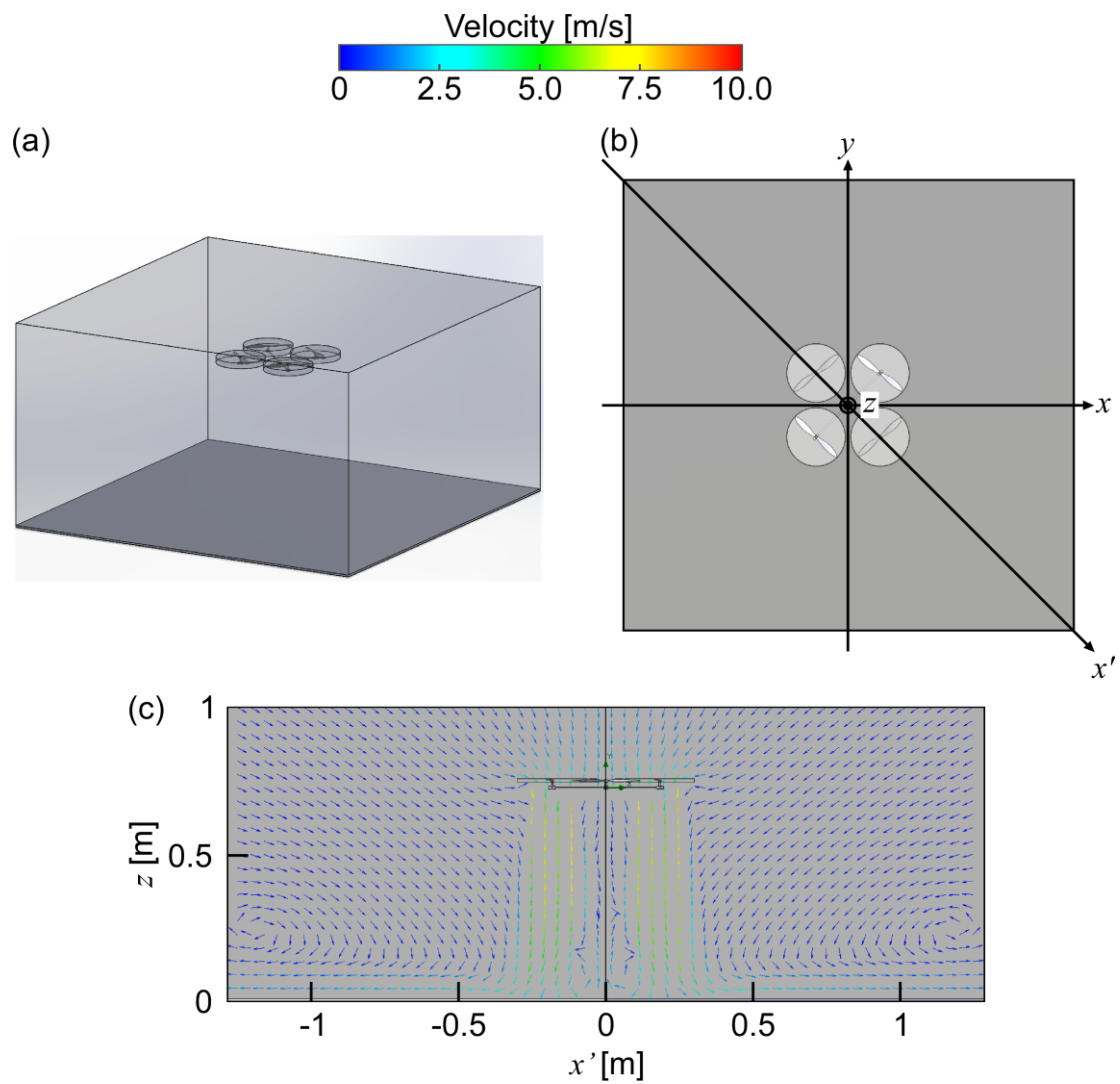


Fig. 6.3 0.4 m quadcopter hovering at 0.8 m. (a) Model of this simulation. (b) Top view of the computational domain. (c) Results of the simulation showing the airflow distribution on  $x'z$  plane. Reprinted with permission from (44).

### 6.3.4 2台のクアッドコプタから生成された気流分布

下降気流を使って上手く気流を操れば、ガスを巻き上げて検出できる。下降気流は地表に到達し、放射状に広がっていく。これを複数生成すれば、複数の気流の中心で互いに衝突する。その際に、上昇気流が生成される。この上昇気流によって、地表付近を漂うガスをクアッドコプタ上まで巻き上げて検出することを着想した。そこで、想定された通りの気流が生成されているか、CFDシミュレーションを用いて調べた。

シミュレーションに用いたモデルを Fig. 6.4 に示す。作成したクアッドコプタは、前節で述べたシミュレーションと同様に、対角線長を 0.4 m とした。ロータは直径 10 inch、ピッチ 4.5 inch とし、3800 rpm で回転させた。このクアッドコプタ 2 台を 1.7 m 離し、飛行高度 0.5 m としてシミュレーションを行った。境界条件の設定も前節で述べたシミュレーションと同様であり、クアッドコプタや床面と流体の境界は、すべりなし壁とした。また、計算領域の壁面では、流体が自由に出入りできるものとした。この条件でメッシュを生成したところ、メッシュ数は 2201346 となった。

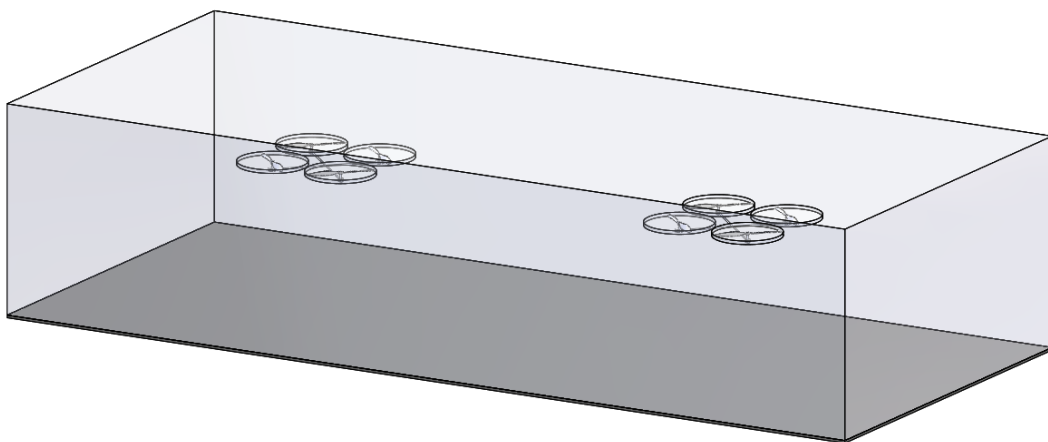


Fig. 6.4 Model for simulating the flow field generated by two quadcopters. Reprinted with permission from (44).

Fig. 6.5(a)に示した上面図の  $x$  軸と  $x'$  軸をそれぞれ通る垂直断面に形成された気流場を Fig. 6.5(b), (c)に示す。矢印の向きは風向を表し、色は風速の大きさを表している。Fig. 6.5(b)から、ロータで生成された気流が地表へ吹き降ろされ、地表に沿って放射状に広がっていく様子が分かる。広がっていった気流のうち、クアッドコプタ間に向かった気流の流速は 5 m/s 程度である。この気流が中心で互いに衝突すると、上昇気流が生成される。もし二つのクアッドコプタの間にガスがあった場合、ガスはこれらの気流に流され、クアッドコプタと同じ高さまで上昇し、ガスを検出できると考えられる。また、クアッドコプタから離れる方向へ向かった気流は、その方向へ流れ続けることが分かる。

以上のように、二つのクアッドコプタを飛行させると、各クアッドコプタから生成された気流が互いに衝突して上昇気流を生成する。二つのクアッドコプタを紐で結び、その中心にガスセンサを搭載することで、地表を漂うガスを巻き上げて検出できることが分かる。さらに、Fig. 6.5(c)で片方のクアッドコプタに着目すると、クアッドコプタの中心の真下では、上昇気流が生成されていることが分かる。同じ対角線長 0.4 m のクアッドコプタを 0.8 m の高さで飛行させた Fig. 6.3(c)の場合と異なり、高度 0.5 m でクアッドコプタを飛行させると、単独のクアッドコプタでも、十分に低空飛行をさせれば地表付近を漂うガスを検出できる可能性があると考えられる。

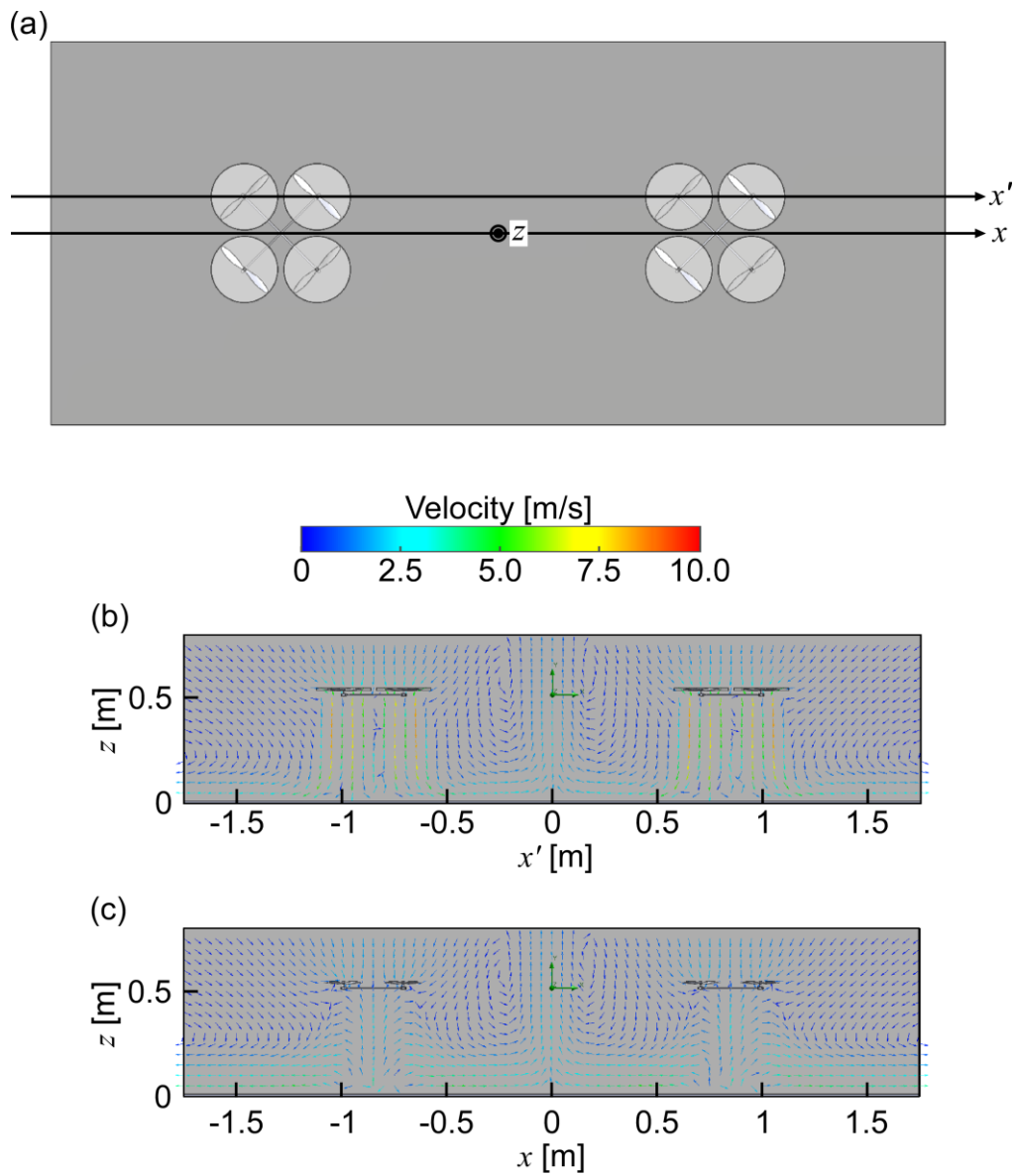


Fig. 6.5 Two 0.4 m quadcopters hovering at 0.85 m away from each other. (a) Top view of the computational domain. (b) Airflow distribution on  $x'z$  plane. (c) Airflow distribution on  $xz$  plane. Reprinted with permission from (44).

## 6.4 2台のクアッドコプタによるガス検知実験

### 6.4.1 実験のセットアップ

実際に2台のクアッドコプタを用いて、上空でガスを検知する実験が行われた<sup>(42),(43)</sup>。Fig. 6.6は実験環境を上面から見た図である。2台のクアッドコプタを紐で繋ぎ、紐にガスセンサが取り付けられている。ガスセンサには、半導体ガスセンサ (MiCS-5521, e2v technologies Ltd.) を用いた。ガスセンサの応答値は、外部 PC に応答値を送信するモジュールを作製して記録した。このモジュールは、計測用のマイコン基板 (Arduino Duo, Arduino LLC) 及び無線シリアル通信モジュール (XBee-Pro ZB S2B, Digi International Inc.) から成る。このガスセンサモジュールの駆動には 5V の電圧が必要であるため、AR. Drone 2.0 に搭載されている USB コネクタを利用し、AR. Drone 2.0 のバッテリーから電源電圧をモジュールに供給することにした。ガスセンサの応答値を Arduino Duo で読み取り、0.1 秒ごとに ZigBee を介して外部 PC に送信する。外部 PC では、Arduino Duo 側の XBee から送信されたガスセンサ応答値を受け取り、LabVIEW で開発したプログラムで読み取る。このガスセンサモジュールを、片方のクアッドコプタに取り付ける。

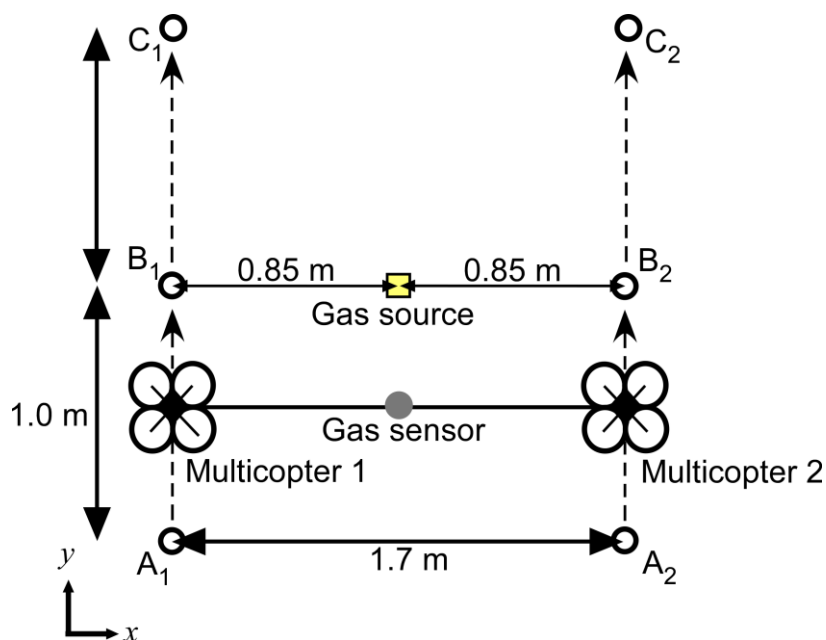


Fig. 6.6 Setup for gas detection experiments using two quadcopters. Reprinted with permission from (43).



実験では、エタノール飽和蒸気を内径 3 mm のチューブから 500 mL/min の流量で放出してガス源とした。2 人の実験者がクアッドコプタを手動で操縦し、飛行高度 0.5 m でホバリングさせる。厳密に同じ位置でホバリングさせることは困難であり、狙った位置から最大で 0.3 m 程度移動してしまうことがあった。実験手順は以下の通りである。

- (1) ガスセンサ応答の記録を開始し、1 分間待機する。
- (2) クアッドコプタ 1 及び 2 をそれぞれ地点 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>にて離陸させ、1 分間待機する。
- (3) エタノール飽和蒸気の放出を開始し、1 分間待機する。
- (4) クアッドコプタ 1 及び 2 をそれぞれ地点 B<sub>1</sub> 及び B<sub>2</sub>に移動させ、1 分間待機する。
- (5) クアッドコプタ 1 及び 2 をそれぞれ地点 C<sub>1</sub> 及び C<sub>2</sub>に移動させ、1 分間待機する。
- (6) ガスの放出をやめ、クアッドコプタを着陸させる。

測定は 3 回行った。さらに、クアッドコプタを用いずに、実験者 2 人が紐の両端を持ち、ガスセンサの位置がクアッドコプタを飛行させた時と同じになるように移動して測定を行い、対照実験とした。

## 6.4.2 実験結果

ガスセンサ応答の時間変化の一例を Fig. 6.7 に示す。実験開始から 2 分後にガス源からガスの放出を開始したが、その前後でガスセンサの応答に大きな変化は見られなかった。これはガス源と 2 台のクアッドコプタの位置が離れていたため、ガス源から放出されたガスがクアッドコプタから離れる方向に流されていたためだと考えられる。実験開始から 3 分後に 2 台のクアッドコプタをそれぞれ地点 B<sub>1</sub> 及び B<sub>2</sub> に向けて移動させた時には、移動開始後速やかにガスが検出された。クアッドコプタが地点 B<sub>1</sub> 及び B<sub>2</sub> の上空でホバリングしている時の、最初の 15 秒を除いた 45 秒間のセンサ応答平均値は 0.77 であり、ベースラインから大きく応答値が変化していた。一方、2 台のクアッドコプタをそれぞれ地点 C<sub>1</sub> 及び C<sub>2</sub> の上空に移動したとき、ガスセンサの応答値は再びベースラインに近づいた。クアッドコプタが地点 B<sub>1</sub> 及び B<sub>2</sub> の上空でホバリングしている時に、ガスセンサがガス源の上空に位置する。その時のみガスセンサが応答を示したことから、ガスセンサがガス源の上空にあるときにのみガスが検出されることが分かる。

また、Fig. 6.8 に対照実験の結果を示す。この実験では、2 台のクアッドコプタをそれぞれ地点 B<sub>1</sub> 及び B<sub>2</sub> でホバリングさせている間も、センサ応答が変化していない。以上の結果から、地表付近のガスを検出するためには、クアッドコプタが生成する噴流を利用することが有用であり、噴流を使ってガスを巻き上げて検出できることが分かった。これにより、本研究で提案した手法の実現可能性が示された。

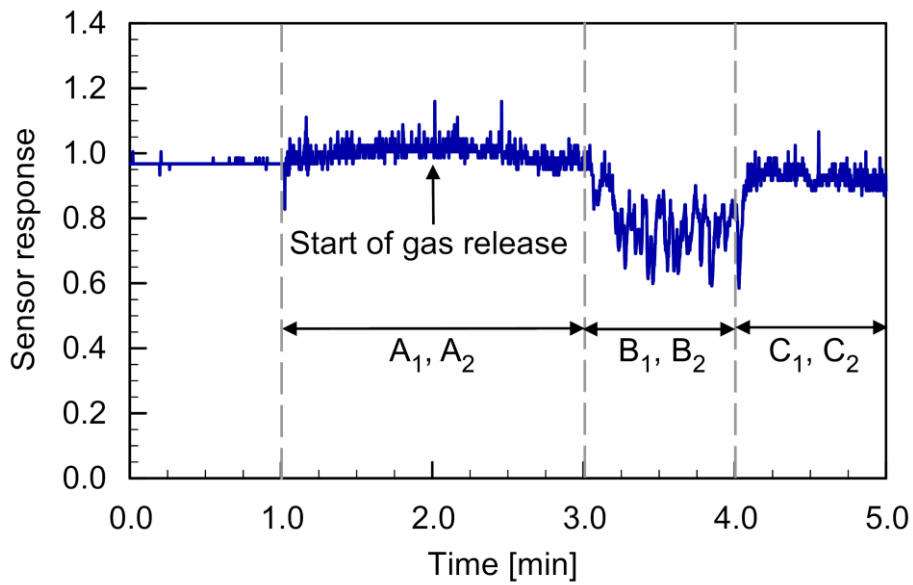


Fig. 6.7 Gas sensor response when two quadcopters flew from A<sub>1</sub> and A<sub>2</sub> to C<sub>1</sub> and C<sub>2</sub> through B<sub>1</sub> and B<sub>2</sub>. Reprinted from (43) with permission.

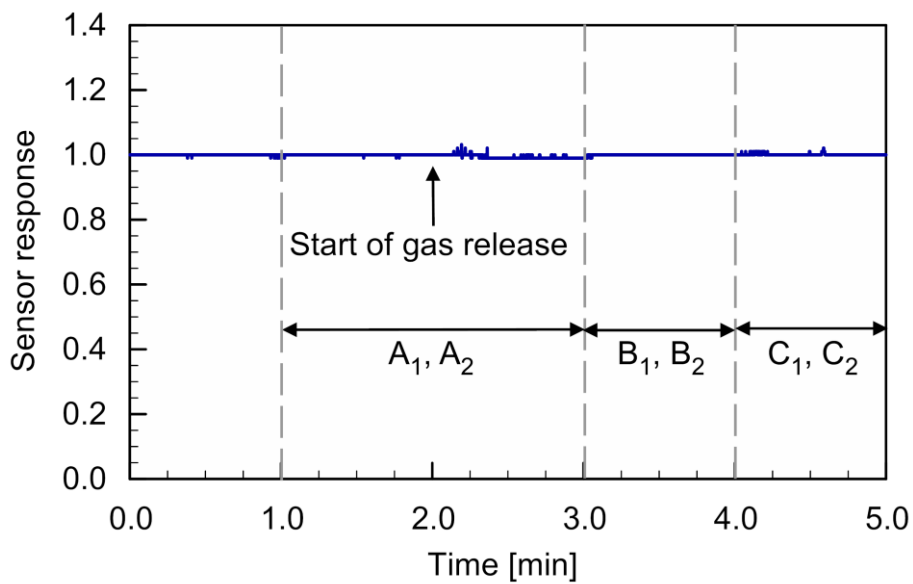


Fig. 6.8 Gas sensor response when two quadcopters flew from A<sub>1</sub> and A<sub>2</sub> to C<sub>1</sub> and C<sub>2</sub> through B<sub>1</sub> and B<sub>2</sub><sup>(43)</sup>. Reprinted with permission from (43).

## 6.5 本章のまとめ

数値流体力学シミュレーションを用いて、クアッドコプタを用いたガス検出手法の実現可能性を調査した。本研究で利用した機器とソフトウェアについて紹介し、これらの特徴を踏まえてモデル化したシミュレーションを行い、流れ場を考察した。その結果、2 台のクアッドコプタを並べて飛行させると、それぞれのクアッドコプタから生成された下降気流がクアッドコプタの間で衝突し、地面からガスを巻き上げる気流が生成されることがシミュレーションで確認された。さらに、実際に 2 台のクアッドコプタを用いて実験を行ったところ、ガス源が 2 台のクアッドコプタ間の地表にある場合には、2 台のクアッドコプタの間に取り付けたガスセンサが応答を示し、地表付近のガスを上空で検出できることが確かめられた。

このように、本章で述べた CFD シミュレーションと実験の結果から、クアッドコプタが生成する噴流を用いたガス検出手法の実現可能性が示された。アクティブ化学センシング手法として、飛行ロボットで生成した複数の噴流を利用して気流を操ることの有用性が示された。

---

# 第7章

## 結論

---

### 7.1 本研究で得られた成果

ザリガニが餌を探す時に噴流のエントレイメントを利用していることに着目し、左右に噴流を放出する装置によりザリガニの噴流生成をモデル化し、噴流の方向を変えた際の流体の引き寄せ範囲と速度を実験と数値流体力学シミュレーションによって解析した。水中化学探査ロボットへ実装する探索アルゴリズムの設計指針を得ることを目指し、自由に歩行するザリガニのアクティブな噴流生成の解析も行なった。ザリガニが背負って歩ける噴流可視化装置を開発し、装置を用いて実際にザリガニの嗅覚探索行動の観察実験を行い、行動戦略を解析した。

また、ザリガニが縄張り闘争の際に、噴流で自分の匂いを相手まで飛ばす行動に着目し、噴流で化学物質をセンサまで押し流して検出手法を提案した。ごみの埋立地で発生するメタンガスの検出を応用先として想定し、2台のドローンから発生する噴流で化学物質を巻き上げて検出手法を提案した。数値流体力学シミュレーションによって流れ場を解析し、噴流を用いたガスモニタリング手法の実現可能性を示した。

以上述べたように、噴流に引き寄せられる流れを利用して化学物質を集める手法の有用性が本研究によって示された。さらに、噴流で化学物質を巻き上げて検出手法の実現可能性が示された。化学物質を引き寄せて検出するか、センサに向かって押し流して検出するかの違いはあるが、いずれの場合も、噴流を利用して化学物質を能動的に集めてセンサで検出手法が化学センシングシステムを高感度化するために、有効であることが分かった。以下に、具体的な成果を述べる。

- ザリガニをモデル化した装置を用いて、噴流による流体の引き寄せ効果を調査した。左右の真横方向に噴流を放出した場合と、左右の後方 45°方向に放出した場合について比較した。引き寄せられてくる流体の角度範囲については、後方 45°に放出すると、噴流を真横に放出した場合よりも広範囲から装置に向かって流体が引き寄せられることが分かった。流速については、左右真横に噴流を放出した場合の方が、後方 45°に放出した場合よりも、周囲の流体を速く引き寄せられることが分かった。引き寄せてくる流体の角度範囲と速度の間には、トレードオフの関係があることが確認された。本実験で用いた装置はザリガニと同様なスケールである。したがって、本実験の結果を、ザリガニがどの範囲にある匂いをどの程度の速さで引き寄せているかを検討するために用いることができる。
- 噴流により流体を引き寄せるのに要する時間を、吸引を用いた場合の引き寄せ時間と比較した。吸引と比較すると噴流を用いた方が、引き寄せる距離に応じた流速の減衰が小さいことが知られている。実験の結果、装置から 60 mm 前方にある色素溶液を引き寄せる際には、噴流を用いると、吸引によって引き寄せた場合と比較して 5 分の 1 の時間で装置まで引き寄せられることが分かった。
- 数値流体力学シミュレーションを用いて、噴流による流体の引き寄せ時間を定量的に解析した結果を述べた。定性的な流れ場だけでなく、定量的にも妥当な流れ場を計算できるシミュレーション条件を求めることができた。本研究では、噴流を左右の真横へ放出した場合と後方 45°へ放出した場合についてシミュレーションを行い、噴流の方向を変えても定量的に精度の良い結果が得られることを示した。さらに、求めたシミュレーション結果を用いて、噴流生成機能を搭載した装置の前方にある流体の引き寄せ速度の減衰を表すモデル式を得た。本研究の成果は、水中ロボットに噴流生成機能を搭載するための、設計指針を得ることに役立つと期待される。
- 自由に歩行するザリガニの行動を制限することなく、生成している噴流を可視化する手法を提案した。この手法では、防水のためにシリコンゴムで封止した小型インク放出装置をザリガニの頭胸甲に載せて、顎脚付近に

色素溶液を放出することで噴流を可視化する。この装置は、マイクロポンプとポンプの流量を調整するためのマイコンを搭載している。ワイヤレス充電 IC と専用コイルを組み込んでおり、シリコーンゴムで全体を封止した後でも内蔵した充電電池を充電できる。

- 開発した小型インク放出装置を実際にザリガニに背負わせて、噴流を可視化することに成功した。この実験では、歩行中に生成した噴流を可視化できるか否かだけでなく、ザリガニが餌を探すモチベーションを失っていないかどうかも調査した。水槽内に餌を置くと、装置を背中に背負わされたザリガニも餌の近くで leg raking を示した。これにより、本装置を取り付けてもザリガニが餌を探すモチベーションを失うことはないことが確認され、嗅覚探索行動中のザリガニが生成する噴流を可視化するために本装置が有効な手法であることが示せた。
- 開発した噴流可視化装置を背負ったザリガニの嗅覚探索行動の観察実験を行った。アメリカザリガニは、直進時には左右の後方に噴流を放出しており、転回時には転回方向とは逆側の真横に噴流を放出している傾向があった。これは、本研究において実際に利用可能な噴流可視化装置を開発でき、自由に歩行するザリガニの噴流を可視化することが可能になったことにより得られた新しい知見である。また、より大型な種類であるウチダザリガニに対しても装置を用いた嗅覚探索行動観察を行った。その結果、匂いに気付く前、匂いに気付いて餌に向かって移動している時、餌に到達した時点で、ウチダザリガニが噴流の放出方向を変えている様子が観察された。これは、ザリガニが探索フェーズによって行動を切り替えている可能性を示唆している。
- ザリガニの縄張り行動における水流生成からヒントを得て、ごみの埋立地におけるメタンガスモニタリングへの応用を想定し、噴流を用いた能動化学センシング手法を提案した。この手法では位置や姿勢が制御しやすいマルチコプタを 2 台連結させて使用する。それぞれのマルチコプタから生成された下降気流（噴流）を衝突させ、地表を漂うメタンガスを巻き上げて、マルチコプタに搭載したセンサで検出する。数値流体力学シミュレーショ

ンを用いて、マルチコプタから生成された気流とその周囲の流れ場を解析したところ、予想した通りの流れ場が形成されていることが分かった。さらに、連結した2台のドローンを用いて実際に実験を行ったところ、ガス源の上空を飛行させるとガスセンサに応答が現れた。地表付近のガスを検出するためには、ドローンの下降気流を使ってガスを巻き上げることが有効であり、埋立地におけるモニタリングへの実現可能性があることが示された。



## 7.2 今後の展望

本研究では噴流を用いた能動化学センシングシステムの開発を目指し、ザリガニが嗅覚探索行動中に行っている噴流生成に着目した。ザリガニをモデル化した装置を用いて、噴流によって周囲の流体が装置に向かって引き寄せられる様子を調査した。シミュレーション結果から、装置の前方にある流体の引き寄せ時間を算出した。今後は、噴流の流量や角度を変えてシミュレーションを行い、式の汎用性を高めることが望まれる。

また、本研究では、自由に歩行しているザリガニが適応的に噴流の放出方向を変えて餌の匂いを引き寄せている可能性を解析するため、噴流可視化装置の開発と、それを用いた実験を行った。本研究により、ザリガニが出す噴流の方向についてある一定の傾向が発見され、ザリガニの嗅覚を用いた探索戦略が明らかにされつつある。今後は、実験結果の中で共通して見られる傾向について統計的検定を行い、ザリガニの探索戦略を解明することが望まれる。さらに、噴流の放出方向を切り替えられる装置を開発し、水中ロボットに実装する探索アルゴリズムを開発するため、ザリガニの探索戦略の効果を定量的に評価することが望まれる。そして、水中科学探査ロボットの開発に貢献することが期待される。

さらに、本研究にて飛行ロボットが作り出す噴流を利用した、ごみの埋立地におけるメタンガスのモニタリングシステムの実現可能性を示した。今回は、平らな地面の上を飛行ロボットがホバリングしている状況を想定してシミュレーションや実験を行ない、地表に漂うガスを噴流で巻き上げて、飛行ロボット状のガスセンサで検出できることを示した。今後は、凹凸や傾斜のある地面における流れの解析や、飛行ロボットに対して横風が当たった場合などの解析を進め、様々な環境においても使用可能なシステムを開発することが望まれる。

# 謝辞

石田寛教授に心より感謝申し上げます。研究に行き詰まった時には、私が理解できるまで何度も丁寧に説明してくださいました。ただ知識を教えて頂いただけでなく、研究者としての姿勢や考え方を教えていただきました。

イギリスハル大学の Thomas Breithaupt 博士にも御礼申し上げます。ザリガニの行動観察について幾度となく助言を頂きました。甲殻類生物の専門家からの助言は、本論文をまとめる上で非常に重要な視点を与えてくれました。

本論文を執筆するにあたり、副査を務めていただきました藤波香織教授、上田祐樹教授、西舘泉准教授、田中雄一准教授、池上貴志准教授に深く感謝申し上げます。

大阪大学の松倉悠助教には、研究だけでなく、研究生活についても何度も相談に乗っていただきました。大変感謝しております。

本研究は、竹村龍一氏、三石健暉氏、三宅新人氏、小口彩希氏、佐藤遼平氏、田中健登氏と共に行いました。竹村龍一氏の研究が元となって、本研究に発展しました。感謝いたします。また、三石健暉氏と三宅新人氏から頂いた指摘は数え切れません。二人からの鋭い指摘がなければ、本研究を成し遂げられませんでした。御礼申し上げます。小口彩希氏、佐藤遼平氏、田中健登氏がいなければ、飛行ロボットのプロジェクトに関われることもなかったと思います。ありがとうございました。

最後に、常に私を応援し、支えてくれた家族に感謝いたします。

# 参考文献

- (1) T. Breithaupt, “Chemical communication in crayfish,” in *Chemical Communication in Crustaceans*, T. Breithaupt and M. Theil, eds., New York, NY, USA: Springer, 2011, pp. 257–276.
- (2) T. Breithaupt, “Fan organs of crayfish enhance chemical information flow,” *Biological Bulletin*, vol. 200, no. 2, pp. 150–154, 2001.
- (3) P. A. Moore, N. Scholz, and J. Atema, “Chemical orientation of lobsters, *Homarus americanus*, in turbulent odor plumes,” *Journal of Chemical Ecology*, vol. 17, no. 7, pp. 1293–1307, 1991.
- (4) D. V. Devine and J. Atema, “Function of chemoreceptor organs in spatial orientation of the lobster, *Homarus americanus*: Differences and overlap,” *Biological Bulletin*, vol. 163, no. 1, pp. 144–153, 1982.
- (5) M. J. Weissburg and R. K. Zimmer-Faust, “Odor plumes and how blue crabs use them in finding prey,” *Journal of Experimental Biology*, vol. 197, no. 1, pp. 349–375, 1994.
- (6) F. W. Grasso, T. R. Consi, D. C. Mountain, and J. Atema, “Biomimetic robot lobster performs chemo-orientation in turbulence using a pair of spatially separated sensors: Progress and challenges,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 30, nos. 1–2, pp. 115–131, 2000.
- (7) F. W. Grasso and J. Atema, “Integration of flow and chemical sensing for guidance of autonomous marine robots in turbulent flows,” *Environmental Fluid Mechanics*, vol. 2, no. 1, pp. 95–114, 2002.
- (8) P. Denissenko, S. Lukaschuk, and T. Breithaupt, “The flow generated by an active olfactory system of the red swamp crayfish,” *Journal of Experimental Biology*, vol. 210, no. 23, pp. 4083–4091, 2007.
- (9) T. Breithaupt and P. Eger, “Urine makes the difference: chemical communication in fighting crayfish made visible,” *Journal of Experimental Biology*, vol. 205, vol. 9, pp. 1221–1231, 2002.
- (10) P. A. Moore, P. A. Ferrante, and J. L. Bergner, “Chemical orientation strategies of

the crayfish are influenced by the hydrodynamics of their native environment,” *American Midland Naturalist*, vol. 173, no. 1, pp. 17–29, 2015.

- (11) X. Kang and W. Li, “Moth-inspired plume tracing via multiple autonomous vehicles under formation control,” *Adaptive Behavior*, vol. 20, no. 2, pp. 131–142, 2012.
- (12) 林雅雄, 中水勝, 長田順子, “メタンハイドレート—資源量評価研究の経緯と最新の成果—,” *石油・天然ガスレビュー*, vol. 41, no. 5, pp. 57–68, 2007.
- (13) M. Yamamoto, R. Nakamura, T. Kasaya, H. Kumagai, K. Suzuki, and K. Takai, “Spontaneous and widespread electricity generation in natural deep-sea hydrothermal fields,” *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 56, no. 21, pp. 5725–5728, 2017.
- (14) 海洋研究開発機構海底資源研究開発センター, 海底資源探査技術.  
[Online] <https://www.jamstec.go.jp/shigen/j/exploration/tech.html>
- (15) 下島公紀, 坂本敦史, 藤井輝夫, “海底熱水鉱床探査への化学センサの適用,” 2014 年度日本地球化学会第 61 回年会講演要旨集, 2014, p. 362.
- (16) 牧下智美, “甲殻類の嗅覚探索行動の解明に向けた化学センシングシステムの開発,” 平成 23 年度修士論文, 東京農工大学工学府機械システム工学専攻, 2012.
- (17) V. H. Bennetts, A. J. Lilienthal, P. P. Neumann, and M. Trincavelli, “Mobile robots for localizing gas emission sources on landfill sites: Is bio-inspection the way to go?,” *Frontiers in Neuroengineering*, vol. 4, Art. no. 20, 12 pages, 2012.
- (18) T. Abichou, J. Chanton, D. Powelson, J. Fleiger, S. Escoriaza, Y. Lei, and J. Stern, “Methane flux and oxidation at two types of intermediate landfill covers,” *Waste Management*, vol. 26, no. 11, pp. 1305–1312, 2006.
- (19) 石垣智基, “埋立地メタン,” *国立環境研究所ニュース*, vol. 31, no. 3, pp. 11–12, 2012.
- (20) 環境省, “埋立地ガスの新しい計測方法について,” 平成 26 年度海面最終処分場閉鎖・廃止マニュアル (案) 検討調査業務報告書, 参考資料 4, 2014.
- (21) 石森洋行, 遠藤和人, 山田正人, “閉鎖式チャンバー法より計測されるガスフラックスについて,” 第 20 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演集, Art. no. P2-D6-5, 2 pages, 2009.
- (22) 田中宏和, 山崎慶子, 中村大充, “最終処分場を安全に利用するための観測井ガスモニタリング,” *福井県衛生環境研究センター年報*, vol. 14, pp. 45–

49, 2015.

- (23) 吉田英樹, “埋立地ガスと温度一埋め立てが終了した処分場での調査事例を通して一,” 廃棄物循環学会誌, vol. 20, no. 6, pp. 283–286, 2009.
- (24) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 「次世代人工知能・ロボット中核技術開発」基本計画. [Online] <http://www.nedo.go.jp/content/100758012.pdf>
- (25) 高橋健司, “噴流を利用した水中化学探知システムによるザリガニの嗅覚探索行動の模倣,” 平成 22 年度卒業論文, 東京農工大学工学部機械システム工学科, 2011.
- (26) 竹村龍一, “水中化学物質源探査ロボットの実現に向けたザリガニの能動的な水流生成の効果の研究,” 平成 27 年度博士学位論文, 東京農工大学生物システム応用科学府生物システム応用科学専攻, 2016.
- (27) H. Ishida, T. Mitsuishi, R. Takemura, H. Matsukura, and H. Ishida, “Chemical sampling device for underwater robot: Jet discharge mimicking crayfish,” in *Proceedings of 17th ISOCS/IEEE International Symposium on Olfaction and Electronic Nose*, 2017, pp. 116–118.
- (28) 伊藤誠悟, “水中匂い源探知コンパスの研究,” 平成 14 年度修士論文, 東京工業大学理工学研究科電子物理学専攻, 2003.
- (29) ANSYS Japan User Service Center, 製品情報|ANSYS Fluent. [Online] [https://www2.ansys.jp/uscj/products/fluent/145/doc/pdf/flu\\_ug.pdf?sc=7dvcddd2qlgcfr3v5efumu9nl5](https://www2.ansys.jp/uscj/products/fluent/145/doc/pdf/flu_ug.pdf?sc=7dvcddd2qlgcfr3v5efumu9nl5)
- (30) R. Takemura, K. Takahashi, T. Makishita, and H. Ishida, “Adaptive chemical sampling device inspired by crayfish,” *ECS Transactions*, vol. 50, no. 12, pp.259–266, 2012.
- (31) H. Ishida, R. Takemura, T. Mitsuishi, H. Matsukura, and H. Ishida, “Active chemical sampling using jet discharge inspired by crayfish: CFD simulations of the flow fields generated by the jet discharge device,” *Sensors*, vol. 20, no. 2, Art. no. 522, 18 pages, 2020.
- (32) 石田華子, 竹村龍一, Thomas Breithaupt, 石田寛, “ザリガニの嗅覚探索行動時における顎脚の振り方の観察,” 日本味と匂学会誌, vol. 22, no. 3, pp. 469–472, 2015.
- (33) 三石健暉, 三宅新人, 石田華子, 松倉悠, 石田寛, “水中ロボットの開発に向けたザリガニの嗅覚探索行動の解明—ザリガニが作る噴流の可視化手

- 法の検討一,” 第 35 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム論文集, Art. no. 30am3-PLN-91, 2 pages, 2018.
- (34) 三石健暉, “ザリガニの嗅覚探索行動時における能動的な噴流生成の解明に向けた噴流可視化装置の開発,” 平成 30 年度修士論文, 東京農工大学生物システム応用科学府生物機能システム科学専攻, 2019.
- (35) 三石健暉, “ザリガニの嗅覚探索行動時における能動的な水流生成の調査—水流可視化用インク放出装置の試作—,” 平成 28 年度卒業論文, 東京農工大学工学部機械システム工学科, 2017.
- (36) 砂川光朗, 大人のザリガニ飼育ガイド: 子供も大人も夢中になれる水辺のヒーロー, エムピージェー, 2013.
- (37) 三宅新人, “ザリガニの嗅覚探索行動時における能動的な水流生成の調査—ザリガニの全方位観察システムの開発—,” 平成 29 年度卒業論文, 東京農工大学工学部機械システム工学科, 2018.
- (38) T. Breithaupt, private communication, Sep., 2019.
- (39) 蓑谷千風彦, 正規分布ハンドブック, 朝倉書店, 2012, pp. 600–641.
- (40) 前園宜彦, ノンパラメトリック統計, 共立出版, 2019, pp. 65–66.
- (41) 日本 UAS 産業振興協議会編, トコトンやさしいドローンの本, 日刊工業新聞社, 2016.
- (42) 佐藤遼平, “飛行ロボットが作る気流場を用いたガス源探索手法の研究,” 平成 28 年度修士論文, 東京農工大学生物システム応用科学府生物機能システム科学専攻, 2017.
- (43) 田中健登, “マルチコプタが作る気流場を用いたガスセンシングシステムの研究,” 平成 28 年度卒業論文, 東京農工大学工学部機械システム工学科, 2017.
- (44) 小口彩希, “地表付近を漂うガスを検出するクアッドコプタの基礎的研究,” 平成 30 年度修士論文, 東京農工大学生物システム応用科学府生物機能システム科学専攻, 2019.
- (45) K. Tanaka, S. Koguchi, R. Sato, J. P. R. Ramirez, H. Matsukura, and H. Ishida, “Using airflows generated by multicopter for gas detection in midair,” in *Proceedings of 17th International Meeting on Chemical Sensors*, 2018, pp. 470–471.

# 業績リスト

## 本博士論文に関連する投稿論文・査読付国際会議論文

- (1) Hanako Ishida, Tatsuki Mitsuishi, Ryuichi Takemura, Haruka Matsukura, and Hiroshi Ishida, “Chemical sampling device for underwater robot: Jet discharge mimicking crayfish,” in *Proceedings of 17th ISOCS/IEEE International Symposium on Olfaction and Electronic Nose*, Montreal, Canada, May 28–31, 2017, pp. 116–118, doi:10.1109/ISOEN.2017.7968882.
- (2) Hanako Ishida, Ryuichi Takemura, Tatsuki Mitsuishi, Haruka Matsukura, and Hiroshi Ishida, “Active chemical sampling using jet discharge inspired by crayfish: CFD simulations of the flow fields generated by the jet discharge device,” *Sensors*, vol. 20, no. 2, Art. no. 522, 18 pages, 2020, doi:10.3390/s20020522.
- (3) Ryohei Sato, Kento Tanaka, Hanako Ishida, Saki Koguchi, Jane Pauline Ramos Ramirez, Haruka Matsukura, Hiroshi Ishida, “Detection of gas drifting near the ground by drone hovering over: Using airflow generated by two connected quadcopters,” *Sensors*, vol. 20, issue 5, Art. no. 1397, 16 pages, 2020, doi:10.3390/s20051397.

## その他の投稿論文・査読付国際会議論文

- (1) 石田華子, 竹村龍一, Thomas Breithaupt, 石田寛, “ザリガニの嗅覚探索行動時における顎脚の振り方の観察”, 日本味と匂学会誌, vol. 22, no. 3, pp. 469–472, 2015.
- (2) Hanako Ishida, Ryuichi Takemura, Haruka Matsukura, and Hiroshi Ishida, “Experimental observation of olfactory search behavior of crayfish in seven arm maze,” in *Proceedings of 18th ISOCS/IEEE International Symposium on Olfaction and Electronic Nose*, Fukuoka, Japan, May 26–29, 2019, pp. 31–33, doi:10.1109/ISOEN.2019.8823519.

## 総説・解説

- (1) 石田寛, 松倉悠, 石田華子, 村井彩乃, “陸上や水中で化学物質の発生源を探索するロボット”, *AROMA RESEARCH*, vol. 18, no. 2, pp. 133–140, 2017

## 国際学会発表

- (1) Hanako Ishida, Ryuichi Takemura, and Hiroshi Ishida, “Effect of changing waving patterns of maxillipeds during olfactory search by crayfish,” in *Abstract, 17th International Symposium on Olfaction and Taste*, Yokohama, Japan, June 5–9, 2016, p. 157.
- (2) Hanako Ishida, Tatsuki Mitsuishi, Haruka Matsukura, and Hiroshi Ishida, “Investigation of water sampling assisted by jets for active chemical sensing system,” in *Proceedings of 17th International Meeting on Chemical Sensors*, Vienna, Austria, July 15–19, 2018, pp. 641–642, doi:10.5162/IMCS2018/P1SM.2.

## 国内学会発表

- (1) 石田華子, 竹村龍一, Thomas Breithaupt, 石田寛, “ザリガニの嗅覚探索行動時における顎脚の振り方の観察”, 日本味と匂学会第 49 回大会プログラム・予稿集, 岐阜県岐阜市, 2015 年 9 月 24 日–26 日, p. 141.
- (2) 石田華子, 竹村龍一, Thomas Breithaupt, 石田寛, “ザリガニの嗅覚探索行動時における顎脚の振り方の変化”, *The 12th IEEE Transdisciplinary-Oriented Workshop for Emerging Researchers Programs and Abstracts*, 東京都葛飾区, 2015 年 11 月 28 日, p. 21.
- (3) 石田華子, 竹村龍一, 松倉悠, 石田寛, “ザリガニが餌の匂いを引き寄せる際に顎脚を振り分けることの効果”, *The 13th IEEE Transdisciplinary-Oriented Workshop for Emerging Researchers Programs and Abstracts*, 東京都小金井市, 2016 年 12 月 3 日, p. 61.
- (4) 石田華子, 三石健暉, 竹村龍一, 松倉悠, 石田寛, “水中ロボットの開発に向けたザリガニの嗅覚探索行動の解明—噴流による流体の引き寄せ効果の調査—”, 第 34 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム論文集, 広島県広島市, 2017 年 10 月 31 日–11 月 2 日, Art. no. 31am3-PS-71, 3 pages.



- (5) 三石健暉, 石田華子, 松倉悠, 石田寛, “ザリガニが嗅覚探索行動時に作る水流の可視化方法の検討”, *The 14th IEEE Transdisciplinary-Oriented Workshop for Emerging Researchers Programs and Abstracts*, 東京都葛飾区, 2017年11月4日, p. 45.
- (6) 石田華子, 竹村龍一, 松倉悠, 石田寛, “能動化学センシングシステム開発に向けた噴流による化学物質の引き寄せ効果の調査”, 平成30年電気学会全国大会講演論文集, vol. 3, 福岡県福岡市, 2018年3月14日–16日, p. 264.
- (7) 三石健暉, 三宅新人, 石田華子, 松倉悠, 石田寛, “水中ロボットの開発に向けたザリガニの嗅覚探索行動の解明—ザリガニが作る噴流の可視化手法の検討—”, 第35回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム論文集, 北海道札幌市, 2018年10月30日–11月1日, Art. no. 30am3-PLN-91, 2 pages.
- (8) 三宅新人, 石田華子, 三石健暉, 松倉悠, 石田寛, “水中化学探査ロボット開発に向けたザリガニの嗅覚探索行動の観察に関する基礎的研究”, 平成31年電気学会全国大会講演論文集, 北海道札幌市, 2019年3月12日–14日, p. 282.
- (9) 石田華子, 三石健暉, 竹村龍一, 松倉悠, 石田寛, “能動化学センシングシステム開発に向けた噴流によって形成される流れ場の定量的評価”, 令和元年度電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会, 神奈川県横浜市, 2019年7月1日–2日, pp. 7–10.
- (10) 石田華子, 竹村龍一, 松倉悠, 石田寛, “化学物質を辿る水中ロボットの開発に向けて—7方向迷路におけるザリガニの嗅覚探索行動の観察—”, 第36回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム論文集, 静岡県浜松市, 2019年11月19日–21日, Art. no. 19ame3-PS3-47, 4 pages.
- (11) 石田華子, 三宅新人, 三石健暉, 松倉悠, 石田寛, “水中ロボットの開発に向けたザリガニの嗅覚探索行動の解明—ザリガニが作る噴流を可視化する装置の試作—”, 電気学会ケミカルセンサ/バイオ・マイクロシステム合同研究会資料, 東京都小金井市, 2020年3月19日, Art. no. CHS-20-008, BMS-20-008, pp. 39–40.