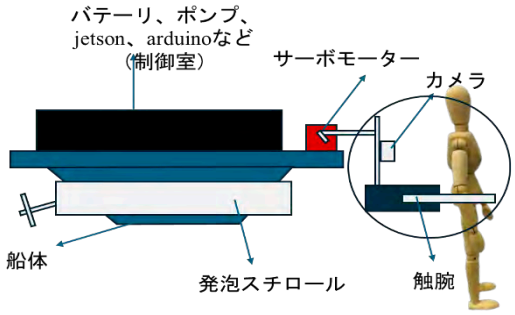
第II部門　　水面移動型救助ロボットのための触腕機構の開発

京都大学工学研究科　学生員　○唐　少恒
京都大学防災研究所　正会員　山上　路生

１．はじめに

沿岸・河川域における水難事故は依然として深刻な社会問題である．意識を失った要救助者を対象とする場合，浮環の投下などの受動的救助から自律的な能動的救助への移行が求められ，水面移動型救助ロボットの研究が重要な課題となっている．最大の課題はロボットと人体との物理的接触インターフェースにあり，従来の剛体アームは波浪や流れによる相対運動と相まって衝撃外傷や局所的高圧接触を生じる恐れがあるため直接接触には適さない．

柔軟材料を用いるソフトロボティクスは安全な機構を与え，対象形状に順応して接触面積を拡大し荷重を分散できる．一方，流体中での動的挙動—流体力と構造弾性の相互作用—は十分に解明されていない．本研究では繊維強化型空気圧触腕機構を開発し，多方向・高流速場での把持安定性と生体力学的安全性を，開水路実験と国際安全規格に基づき評価する．



(a) システム構成



(b) 理想的な把持姿勢

図-1　水面移動型救助ロボットと触腕機構

２．実験装置および方法

本機構は，弾性シリコンチューブの片側に非伸長性のガラス繊維を螺旋状に巻いた繊維強化ソフトアクチュエータである．内部に圧縮空気を供給すると拘束側が膨張に抗し，構造全体が決定論的な曲げ運動を示す（図-1）．理想的な把持姿勢では，船首から伸びた触腕が要救助者の脇下を通り胸部を包み込み，気道を圧迫せず安定に保持する．

流水中の把持性能を定量化するため間接的な圧力計測法を採用した．流体乱れによる動圧ノイズを避けるため，有効直径 0.8 cm の薄膜圧力センサを対象ではなく船体（固定壁）側の把持界面中央に設置した（図-2）．人体ダミーの代わりに等価円柱模型（質量 80 g，高さ 10 cm，直径 6 cm）を用いて再現性の高い接触状態を確保した．実験は京都大学の開水路（幅 B = 40 cm）で行い，断面平均流速 U を 10, 20, 30 cm/s の 3 段階，相対流向角 θ を 45°刻みで 0°〜315°の全 8 方位に変化させた（図-3，表-1）．

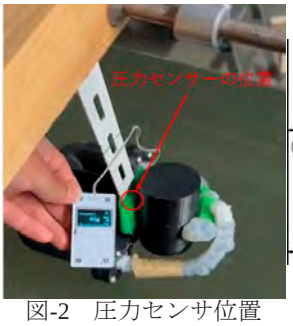


図-2　圧力センサ位置

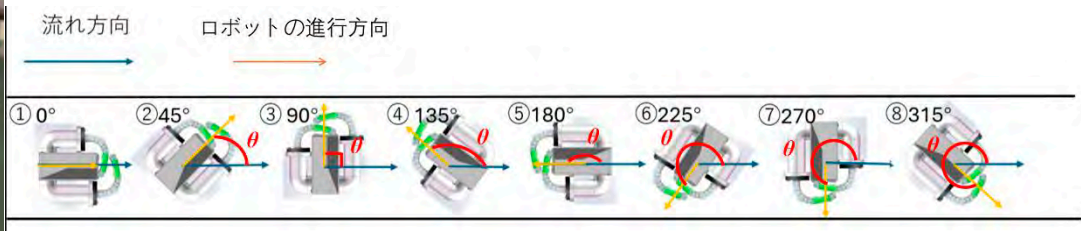


図-3　進行方向と流れ方向のなす相対流向角 θ

表-1　水理条件

流速 U (cm/s)	流量 Q (L/s)	水深 h (cm)
10	12.0	30.0
20	12.0	15.0
30	15.0	12.5

３．力学解析と流れ方向による把持挙動

解析の中核は３つの物理量である．触腕把持$F_{tentacle,still}$は，静水中で触腕が円柱をセンサ高さで船体側へ押す水平力であり，給気圧のみで決まる一定値（実測 0.44 N）である．理論支持力N_{hull}は船体壁が円柱に与える法線反力で，剛体のモーメント釣合いから導かれ，流速 U と流向 θ に依存する．静水条件（U = 0）ではセンサ高さで触腕力と壁反力が大きさ等しく逆向きとなり，二者が一致（0.44 N）して基準線を与える．流れを加えると，把持点ま

わりのモーメントにはN_{hull}と流体力$F_{flow}(U)$のみが寄与し，$F_{tentacle,still}$は一定に保たれる．この理論値と実測値の差が，高流速で生じる触腕挙動の変化を示す．

①順流（0°）：低流速では理論と実測がよく一致する．30 cm/s では流体力が触腕の剛性を上回り，触腕が撓んでN_{hull}の実測値が 0.39 N へ低下する．

②横流（90°, 270°）：理論支持力は流速に依らず一定で，差は触腕の変形に起因する．30 cm/s では横方向の力が摩擦を上回り，接触点がわずかに滑る．

③斜流（135°, 225°）：20 cm/s 以上で，後方からの流れが円柱を船体と触腕根元の隙間へ押し込み，実測力（最大 0.60 N）が理論値を上回る．

④逆流（180°）：30 cm/s では理論 0.12 N に対し実測 0.57 N と大きくなる．後方から押される円柱が船体前部に押し付けられ，接触が強まったためと考えられる．いずれの場合も，実測値は剛体モデルの予測から外れるが，接触は失われず保持が維持された．

４．人体スケール換算と安全性評価

物理的安全性を評価するため，実験データを人体スケール（身長 180 cm，体重 80 kg の成人男性）へ換算した．胴体を等価円柱（30 kg，長さ 0.6 m，径 0.36 m）で近似し，質量スケール α = 375，長さスケール β = 6 を得る．実測・理論力を人体スケール換算力へ射影し，β²の面積拡大により換算圧力を求めた．安全性は ISO/TS 15066 の背部・肩部の疼痛閾値（力 210 N，圧力 210 N/cm²）に照らして評価した．

図-4 に全 8 方位・3 流速の換算接触圧力P_{conv}と理論支持換算圧力P_{hull_conv}を示す．理論値は 0°–180°軸に沿って対称に拡大する一方，実測P_{conv}は高流速で分布が歪み，第 3 章で述べた流れ方向による把持挙動の違いを反映する．最大換算力F_{conv} ≈ 225 N は 210 N 閾値をわずかに超えるが，接触面積の拡大により換算圧力は大きく低減される．図-5 の時系列でも全条件を通じて換算圧力P_{conv}は最大 12.4 N/cm²にとどまり，許容限界 210 N/cm²を大幅に下回る．

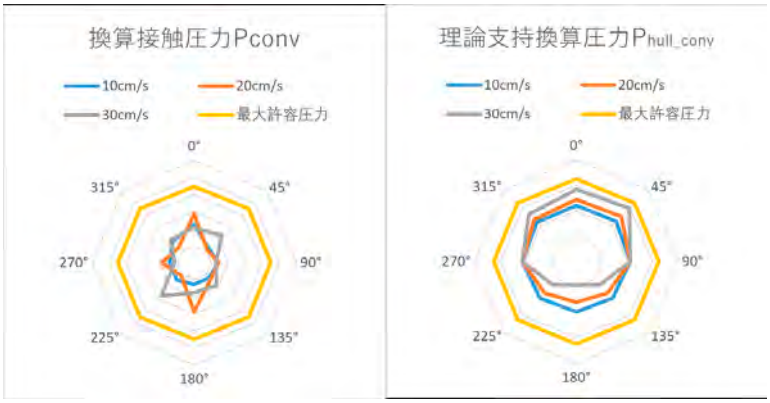


図-4　換算接触圧力P_{conv}と理論支持換算圧力P_{hull_conv}

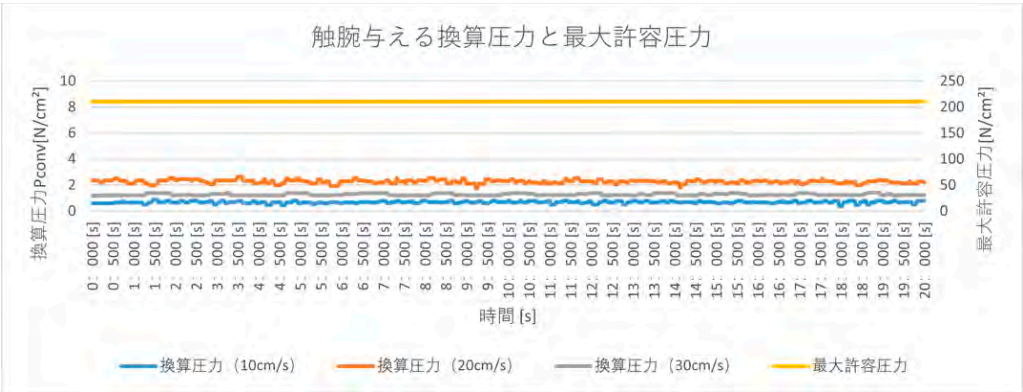


図-5　触腕が与える換算圧力と最大許容圧力の時系列

５．結論

空気圧ソフト触腕機構を水面移動型救助ロボットに統合し，多方向流れ場での把持性能を評価した．流れ方向と流速により触腕の変形や接触点の滑りなど把持挙動が変化し，実測力が剛体モデルの予測から外れる場合もあるが，いずれの条件でも接触は失われず保持が維持された．動的な力のピークが疼痛閾値を局所的に超え得るものの，柔軟材料が接触面積を広げて力を分散するため，最大換算圧力P_{conv} = 12.4 N/cm²は許容限界 210 N/cm²を大幅に下回り，剛体機構に対するソフト機構の安全上の優位性を示した．今後は視覚・触覚フィードバックの統合と自律型 USV による実水域試験を進める．

Shaoheng TANG and Michio SANJOU
tang.shaoheng.85i@st.kyoto-u.ac.jp