

人工鰓の小型化に向けた高効率ガス交換システムに関する研究

Study on the highly efficient gas exchange system for the miniaturization of artificial gill

○横井涼 (富士システムズ株式会社) 佐藤耕司郎 (富士システムズ株式会社)

川口洋一郎 (富士システムズ株式会社)

Ryo YOKOI, Fuji Systems Corp.

Koshiro SATO, Fuji Systems Corp.

Yoichiro KAWAGUCHI, Fuji Systems Corp.

Abstract: Recently, there has been an increasing interest in underwater exploration for recreational and scientific purposes. If the oxygen dissolved in seawater could be used for breathing, human beings could spend more time under water, greatly increasing their mobility. As yet, however, sufficient oxygen to enable us to live in the sea for long periods is not available. Therefore, we developed an artificial gill with silicone hollow fiber. The artificial gill made it possible to dive about 30 minutes in dive test. However, the artificial gill is a large device (the artificial gill overall length: 2.5 m, weight: 40 kg), operability and mobility in water is difficult. And dive time was limited by the battery. In this study, we aimed to develop new artificial gill miniaturized Donkey of conventional artificial gill.

Key Words: Artificial gill, Silicone hollow fiber,

1. 緒言

近年、スキューバダイビングなどのマリンスポーツが盛んになり、また科学的な目的のため水中探査への関心が高まっている。そのため、人間が魚類のように水中を自由に活動することを目的とした様々な技術が研究開発されている。例えば、アクアラングを用いたスキューバダイビングや、海上あるいは海底船舶からホースにより酸素を供給する他給式潜水がある。しかし、水中での活動時間はポンプからの酸素供給時間により制限され、また、行動範囲はホースの長さにより制限されるという欠点がある。このように、人間の水中における活動が、時間的あるいは空間的に制限されているのが現状である。

これら問題を解決するため、水中に溶けている酸素を気相に取り込む装置として、人工鰓が研究開発されている。

Fig.1 に海中の溶存酸素量を示す。一般に海面から深さ100 mまでの表層付近では、対流によって十分に混合が行われており、温度、濃度は大体均一に保たれている。溶存酸素量は約5-6 ml/L、溶存二酸化炭素は46 ml/Lである。この海中に溶けている酸素を連続的かつ効率的に気相に取り込むことができる人工鰓が開発されれば、人間は長時間の潜水を可能にし、陸上と同様の自由な活動が可能になる。更に、このシステムは、海底空間、海底工場などにおいて海水から酸素を供給する場合でも有用であり、工業的にも応用することが可能である。

この人工鰓により、地上での生活を海底という特殊環境

の中に持ち込むことも可能となり、それによって海底が開発できると期待されている。

Fig.2にこれまでに開発した人工鰓であるDonkeyについて示す。

これまで、我々は、シリコン中空糸を使用した人工鰓の研究開発を行ってきた。Fig.2に示した人工鰓であるDonkeyは、シリコン中空糸、水中スクータ、エアバックで構成されている。この人工鰓の気体交換機構は、シリコン中空糸を介して水中の溶存酸素と気体側の溶存酸素との分圧差を利用して、水中より溶存酸素を気体側に移動させる。気体側のガス成分のガス分圧が、水中の同種のガス分圧より高ければ、逆にこれらの成分はシリコン中空糸を通して水中に拡散される。これにより、水中で連続して呼吸が行うことが可能となる。また、シリコン中空糸の両面には、液境界膜、ガス境界膜がありガス透過膜とともに気体透過の抵抗となる。この液境界膜は、水の流速に比例して薄くなるため、水中スクータによりシリコン中空糸に十分な水流を与え、シリコン中空糸の境界膜抵抗を低減させガス交換効率を向上させる構造となっている。

このDonkeyを用いた潜水実験では、水深が約5 mの条件で約30分の潜水が可能であることが確認された。

しかし、Donkeyは地上重量が40 kg、全長が2.5 mと装置が大きく、水中での運動性や操作性が難しい点、水中スクータのバッテリーの寿命が潜水時間を制限するといった問題が挙げられた。

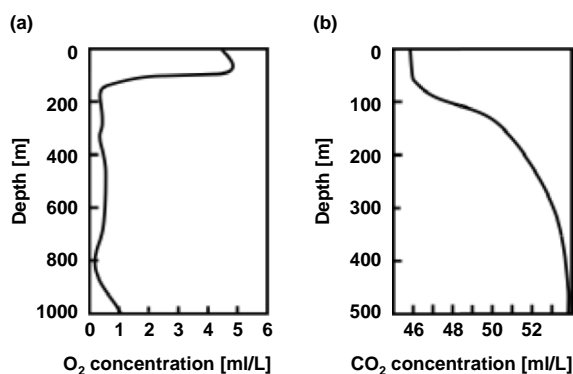


Fig.1 海水中の溶存酸素量

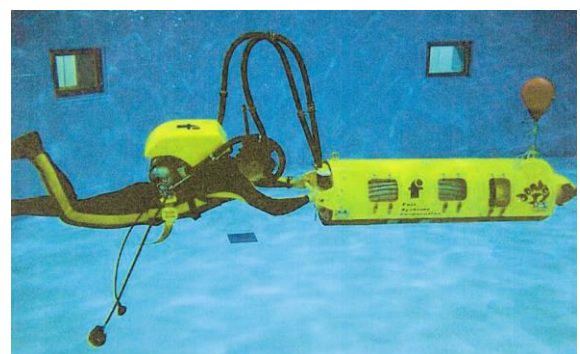


Fig.2 Donkey

2. 目的

本研究では、これまで開発した人工鰓である Donkey に対して小型かつ長期間の呼吸を可能とする人工鰓の開発を目的とし、小口径かつ薄肉であるシリコン中空糸を用いた人工鰓の設計および高いガス交換性能を得るための中空糸親水化処理に関して検討を行った。

3. 人工鰓の設計

Fig.3 に新たに提案する人工鰓の構想図を示した。

従来型の人工鰓である Donkey は、全長 2.5 m、地上重量 40 kg である。また、ガス交換部のシリコン中空糸は、内径 0.6 mm、外径 0.9 mm、肉厚 0.15 mm のものを使用しており、その中空糸 144 本を一束として 116 束使用し、有効膜面積を 27.6 m² としたことで、使用可能時間 35 分を得ることが出来た。以上のように、Donkey は大型装置であるため水中における運動性や操作性に問題があった。そこで、この中空糸を細径化し、人工鰓の小型化を行う。気体のガス透過性能は、一般にガス透過膜の面積に比例し、厚さに反比例することが知られている。今回、人工鰓の小型化にあたり、内径 0.3 mm、外径 0.4 mm、肉厚 0.05 mm のシリコン中空糸を作製した。式 1 に単位時間当たりの気体透過量を求める式を示した。

$$Q = \frac{P_w - P_G}{\frac{\delta_w}{D_w H_w} + \frac{\delta_G RT}{D_G} + \frac{\delta_m}{\pi}} \dots\dots (1)$$

ここでは、D_w は、水の気圧分子に対する拡散係数、H_w は、気体の水分子への溶解係数、D_G は、気体の拡散係数、π は、気体の透過係数、R は、気体定数、T は、絶対温度である。式 1 より、このシリコン中空糸の酸素透過度を算出し、1 人当りの有効膜面積を算出した。これより、有効膜面積を 17.3 m² が得られ、この中空糸を 660 本、一束として 80 束使用することで、使用可能時間が 41 分になることが算出された。この設計により、小型かつ使用可能時間の改善を行うことが可能となった。

更に、使用可能時間および操作性を向上させるために、新たに設計した人工鰓は、従来的人工鰓である Donkey と同様に、強制的にシリコン中空糸に十分な水流を与え、シリコン中空糸の境界膜抵抗を低減させガス交換効率を向上させる設計を行っている。そのため、数値流体解析 (CFD) により、シリコン中空糸において水の境界膜抵抗を抑える、人工鰓内部構造の最適化設計を行う。

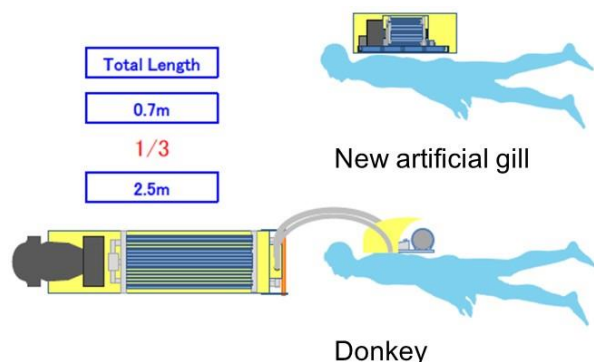


Fig.3 新たな人工鰓の構想図

4. 実験

4-1 中空糸の親水化処理

今回、人工鰓のガス交換で使用するシリコン中空糸は疎水性であるため、そのままの状態であると水の境界膜抵抗が大きく、気体の透過性が悪い。そこで本研究では、このシリコン中空糸の境界膜抵抗を低減させるため、親水化処理を施した。この親水化処理を施したシリコン中空糸の状態、気体透過性について検討するため、親水化処理を施していないシリコン中空糸を用いた性能比較実験を行った。

4-2 実験結果

Fig.4 に親水化処理の有無による中空糸表面状態について示した。

これより、シリコン中空糸は親水化されたことから、人工鰓の気体透過性能を向上させることが可能であると推測できる。そこで、親水化処理を施したシリコン中空糸を用いてモジュールを作製し気体透過について性能評価を行った。これより、親水化処理を施すことで、親水化処理を施していないものと比較し、酸素透過度は約 13 % 向上したことが確認された。以上より、人間が水中で呼吸を行うために必要な中空糸膜面積を小さくすることが可能となり、人工鰓の小型化を可能にし、更には、人工鰓を長期使用することも可能になると示唆された。

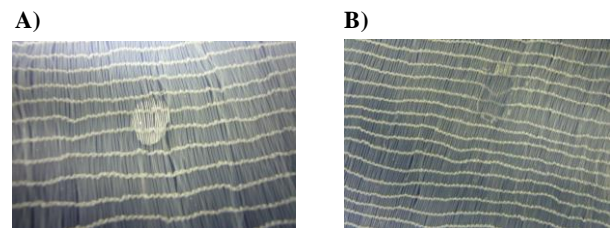


Fig.4 シリコン中空糸の親水化処理
A) 親水化処理前 B) 親水化処理後

5. 結語

従来的人工鰓である Donkey は、中空糸の仕様が、内径 0.6 mm、外径 0.9 mm、膜厚 0.15 mm と膜厚が大きいため、気体透過量が小さく、また、中空糸に流れる水の流速および流れの状態により、水の境界膜抵抗も大きくなり十分な酸素を供給することができなかった。しかし、今回提案する人工鰓の中空糸の仕様は、内径 0.3 mm、外径 0.4 mm、膜厚 0.05 mm であるため、Donkey と比較すると膜厚は 1/3 倍となり薄くなり、更には、疎水性であるシリコン中空糸を親水化処理するため人工鰓の気体透過性能を向上させることが可能となる。また、中空糸の口径および本数を調整することで長さを短くするため、水の流速を高くした場合においても中空糸に流れる水の流れを均一化し、水の境界膜抵抗を小さくすることが可能であると示唆される。

以上より、小型かつ長期間の呼吸を可能とする人工鰓の開発することが可能となる。更に、これら技術は人工鰓だけに留まらず、長期使用を目的とする人工肺、水処理や食品などの産業分野における気体交換装置や脱気装置など、広範囲の用途に応用可能であると考えられる。

参考文献

- (1) 松田 守, 人工鰓の話, 防衛庁技研本部技報, 491, pp. 13-19, 1970.
- (2) 川口 信久, 人工鰓の開発まで, ポリファイル, vol.27.5, pp.17-21, 1990.