

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：52601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24592758

研究課題名(和文)非侵襲型人工呼吸器実現を目指した溝付管路内の間欠振動流による高頻度振動換気

研究課題名(英文)High Frequency Oscillation Ventilation by Intermittent Oscillatory Flow in a Pipe with Circumferential Grooves aiming for Realization of a Non-Invasive Artificial Respirator

研究代表者

清水 昭博 (SHIMIZU, Akihiro)

東京工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：90149914

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：高頻度換気法における振動流を正弦波状のものから停止時間を変えた間欠振動流による管路内の炭酸ガスの有効拡散係数を実験によって求めた結果、停止時間が長い間欠振動流の場合に最も高い有効拡散係数が得られることが判明した。また、流れの可視化実験により、間欠振動流による軸方向及び半径方向の最大流速が大きくなることから、有効拡散係数を高める要因になっていることを突き止めた。管路内の円周方向溝の寸法については、溝内容積と管路コア部の容積が同程度の際に最大の有効拡散係数が得られることがわかった。

さらに、振動流を利用して呼気と吸気を分離した人工呼吸器を考案し、現行の市販品と比べて2倍程度の換気性能が得られた。

研究成果の概要(英文)：Measurement of the carbon dioxide concentration change by intermittent oscillatory flow through a pipe with circumferential grooves at several stop times of the intermittent oscillatory flow has been carried out. The results show that the effective diffusivity is the greatest when the stop time of the intermittent oscillatory flow is the longest. The greater the maximum velocity in the pipe, the greater the effective diffusivity. When the volume of the core region of the pipe was almost same as the volume in the circumferential grooves in the pipe, maximum effective diffusivity was obtained. Furthermore, a respirator which was devised with a new mechanism has been tested and as the ventilation performance was double in comparison with a current commercial article.

研究分野：計測工学

キーワード：振動流 有効拡散係数 分散 拡散 溝付管 間欠振動流 人工呼吸器 高頻度換気

1. 研究開始当初の背景

従来の人工呼吸法は陽圧式が主流であったが、1979年に呼吸不全の犬の肺に僅かな換気量、低い圧力、高い振動数の空気の振動流(平均流量は0)を供給して延命に成功し、この方法は「高頻度振動換気法」と名付けられた。圧力を抑えた酸素供給で、肺疾患を悪化させることなく、効果的に炭酸ガスと酸素とを交換する方法として、その後、そのメカニズム解明の研究が多くなされた。

1983年に層流状態の空気の振動流中の不純物の有効拡散係数の厳密解が報告され、実験値とよく一致した。

1990年代後半に、人や動物の気管内面を模して管路内に周期的な円周方向溝をつけると有効拡散係数が向上することが水の振動流中に黒インクを注入して実験した結果から、示唆されていた。

2001年から研究代表者は円周方向溝付管内の空気の振動流中の炭酸ガス輸送実験を実施し、炭酸ガス濃度変化を測定し、直管と比べて溝付管では有効拡散係数が大きく上昇することを確認した。実験を重ね、溝の寸法、振動数、振動流を発生させるピストン拍出体積を変化させたときの様々な傾向を把握し、有効拡散係数を大きく向上させることが可能との見通しを得るに至った。水を用いた振動流による可視化実験を行った結果、溝によって発生する渦による乱流が有効拡散係数の向上に関わっていることを明らかにした。さらに、正弦波状振動流を間欠振動流に置き換えることによって、溝付管と間欠振動流の相乗効果でさらに飛躍的な有効拡散係数向上を達成した。

一方、すでに高頻度振動換気法による人工呼吸器は実用化され、呼吸不全の乳幼児の患者の生命を救う大事な医療装置の一つとして位置づけられている。高頻度振動換気法を用いた人工呼吸器に最近成人用が実用化され、普及し始めた。平成21年に流行した脅威の新型インフルエンザで呼吸不全に陥った患者に高頻度振動換気法を用いた人工呼吸器が貢献した。しかし、一般に人工呼吸器では気管挿管が必要で、死亡事故も発生しており、この高頻度振動換気法による人工呼吸器の性能にも不安を感じずる医療関係者が多く、まだ広く普及するには及んでいない。また、高価なシステムなので、貧しい国々の病院では導入が極めて困難で、多くの生命が失われている現状である。

研究代表者は間欠振動流によって、気管内面の凹凸が管路内の有効拡散係数を大きくする効果があることをすでに示していたので、同様の管路も利用して、間欠振動流によって、非侵襲で、安全で、安価な同様の人工呼吸器を提案できると考えた。そのためには、間欠振動流の停止時間や溝付管の形状に関して、従来よりも高性能な人工呼吸器設計のための各種条件を調べる必要があった。

2. 研究の目的

現在使用されている人工呼吸器は呼吸不全患者に対して気管挿管が必須であるが、誤って食道に挿入して死をもたらした例もあり、医師、歯科医師、講習や実習を通して国家資格を得た救急救命士以外の一般人による気管挿管は法律で禁じられている。また、自発呼吸可能な患者にとっても、気管挿管は苦痛を伴うのみならず、会話や食事ができなくなり、QOL(Quality of Life)に大きな障害となる。そこで、気管挿管を要しない非侵襲型の高性能人工呼吸器が出現すれば、これらを全て解決できる。

研究代表者はこれまでに気管の内面形状を模した円周方向溝付管内における空気の振動流中の炭酸ガス輸送実験を実施して有効拡散係数を求められる装置及び手法を確立し、ガス輸送に関する有効拡散係数を定量的に正確に求めることを可能にした。さらに、正弦波状振動流を間欠振動流に置き換えることにより、さらに大きな有効拡散係数を得た。本研究はこの成果を用いて、さらに有効拡散係数が向上するメカニズムを解明して高頻度振動換気法を最適化することを目的とする。これにより「非侵襲型高性能人工呼吸器」の実現の基礎を築く。

侵襲的な人工呼吸器に代わる、非侵襲で、現在広く普及しているAEDのように、国家資格保有者でなくても装着できる、高性能人工呼吸器実現を目指し、その基礎を築くために、気管形状を機械的に模した円周方向溝付管の有効拡散係数を最大にする条件を探し出し、高頻度振動換気法を最適化することを目的とする。

特に、高頻度振動換気における管軸方向流速が0になるピストンの上下死点を中心とする位相区間で管路中央と管壁面近傍の炭酸ガスの濃度差が最大になることによる半径方向での分子拡散または対流の効果が最大になり、これが有効拡散係数向上に大きく寄与していると研究代表者は洞察しており、これに基づく最適な高頻度振動換気法を実現し、有効拡散係数増大効果を実証する。より具体的には、振動流をこれまでの正弦波状振動流から間欠振動流に変更して、軸方向のガス流が止まる位相区間を長くできるようにする。溝付管路内の気流は乱流となっているために実証には理論解析は極めて困難であるので、三角カムまたはACサーボモーターの制御によってピストンの駆動を一定位相区間だけ停止させた実験的手法を用いる。

3. 研究の方法

(1) 溝ピッチを変えた円周方向溝付管路内の一定の間欠時間の間欠振動流による炭酸ガス輸送実験により、溝ピッチ、振動数とピストンの拍出体積をパラメータとして、有効拡散係数が高くなる最適条件を求める。

(2) 間欠振動流の上下の各死点におけるピストンの停止時間を位相に換算して、30, 60,

90度と変化させて有効拡散係数を測定する実験を実施した。ピストンの停止時間の変更には、ACサーボモータをプログラマブルコントローラによって、位置制御することで実現した。

(3) 2次元PIV流れ解析システムを用いた間欠振動流の可視化実験による流速分布測定により、炭酸ガス有効拡散係数上昇のメカニズムを解明する。三角カムを用いた間欠振動流発生装置と有効拡散係数を求めるときと同じ管路を用いて、空気と力学的に相似な水による間欠振動流の可視化実験を実施し、有効拡散係数向上のメカニズムを解明する。間欠振動流を高速度カメラと十分に明るいグリーンレーザー光源を用いることにより、振動数を変えた場合の可視化実験で鮮明な各位相での動画像を得たうえで、間欠振動流の各位相での流れを考察し、有効拡散係数向上のメカニズムを明らかにする。

(4) 研究期間中に考案したツインピストン型あるいはタンデムピストン型HFV式人口呼吸器を用いて実形状気道モデルを含む肺モデルを接続した上での生体外換気実験を実施し、市販された人工呼吸器の基本的な換気性能と比較する。

4. 研究成果

気管を模した円周方向溝付管内の停止時間を変化させた間欠振動流による炭酸ガス輸送実験及び流れの可視化を通して、実験条件の範囲内で、以下のことがわかった。

(1) 管路内の円周方向溝の寸法については溝内容積と管路コア部の容積が同程度の際に最大の有効拡散係数が得られた。

(2) 停止時間を30度、60度、90度と3種類に変えた間欠振動流による溝付管内の炭酸ガス濃度測定実験を実施したところ、停止時間が最も長い90度の間欠振動流がより最も高い有効拡散係数が得られることがわかった。

(3) 間欠振動流の可視化により、間欠振動流による軸方向及び半径方向の最大流速を測定し、それらが大きくなればなるほど、有効拡散係数も大きくなることがわかった。

(4) 新たな機構の換気装置を考案、試作して、換気実験をして、実用化されている換気装置との比較を実施した結果、約2倍の換気性能が得られた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 0 件)

[学会発表](計 18 件)

清水昭博, 須田大樹, 安田剣太, 清水優史, 菅原路子, 呼吸吸気分離式接続管を介したタンデムピストン式人口呼吸器による生体外換気実験, 日本機械学会2015年度年次大会講演論文集, (2015.9)(発表予定), (札幌市, 北海道大学)

吉田康人, 清水昭博, 清水優史, 菅原路子, 日本機械学会第27回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, pp.547-548, (2015.1), (新潟市, 朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター)

安田剣太, 清水昭博, 清水優史, 菅原路子, 日本機械学会第27回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, pp.351-352, (2015.1), (新潟市, 朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター)

須田大樹, 清水昭博, 清水優史, 菅原路子, タンデムピストン式人口呼吸器と実形状肺モデル間における接続管の最適長さ, 日本機械学会第27回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, pp.285-286, (2015.1), (新潟市, 朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター)

吉田康人, 清水昭博, 清水優史, 菅原路子, 日本機械学会第27回バイオフロンティア講演会講演論文集, pp.105-106, (2015.1), (鳥取市, とりぎん文化会館)

須田大樹, 清水昭博, 清水優史, 菅原路子, タンデムピストン式人口呼吸器と実形状肺モデル間における接続管の長さが換気性能に及ぼす影響, 日本機械学会第27回バイオフロンティア講演会講演論文集, pp.285-286, (2015.1), (鳥取市, とりぎん文化会館)

Shimizu A., Hayashi R., Shimizu M., Sugawara M., Effective Diffusivity of Carbon Dioxide by Intermittent Oscillatory Flow in a Pipe with Circumferential Grooves Imitated from Periodic Cricoid of Trachea (査読付), 7th World Congress of Biomechanics, Boston, USA (2014.07)

林莉澄, 清水昭博, 清水優史, 菅原路子, 「停止時間を変えた円周方向溝付管内の間欠振動流の可視化実験を通じた流速測定」, 日本機械学会第26回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, (2014.1) pp.295-296, (仙台市, 東北大学)

鈴木健太, 清水昭博, 清水優史, 菅原路子, 「ツインピストン式人工呼吸器を用いた間欠振動流による実形状の生体外換気実験」, 日本機械学会第26回

バイオエンジニアリング講演会講演論文集,(2014.1) pp.299-300,(仙台市,東北大学)

石井涼,清水昭博,清水優史,菅原路子,「停止時間を変えた円周方向溝付管内間欠振動流中の炭酸ガスの有効拡散係数」,日本機械学会第26回バイオエンジニアリング講演会講演論文集,(2014.1) pp.301-302,(仙台市,東北大学)

石井涼,清水昭博,「溝付管内における間欠振動流中の炭酸ガスの友好拡散係数」,The 高専@セミコンジャパン 2013,(千葉県千葉市,幕張メッセ),(2013.12.4~6)

林莉澄,清水昭博,「溝付管内間欠振動流の可視化」,The 高専@セミコンジャパン(2013.12),(千葉県千葉市,幕張メッセ),(2013.12.4~6)

鈴木健太,清水昭博「タンデムピストン式人口呼吸器を用いた間欠振動流による生体外換気実験」,The 高専@セミコンジャパン,(2013.12)(千葉県千葉市,幕張メッセ),(2013.12.4~6)

林莉澄,清水昭博,清水優史,菅原路子,円周方向溝付管内の間欠振動流中の炭酸ガスの有効拡散係数と軸方向拡散の相関,日本機械学会 第24回バイオフロンティア講演論文集,(2013),pp.37-38(京都市,同志社大学)

鈴木健太,清水昭博,清水優史,菅原路子,タンデムピストン式人工呼吸器を用いた間欠振動流による生体外換気実験,日本機械学会 第24回バイオフロンティア講演論文集,(2013),pp.117-118(京都市,同志社大学)

清水昭博,高島 綾太,清水 優史,菅原路子,「円周方向溝付管内の間欠振動流中の炭酸ガスの有効拡散係数と半径方向流速の相関」,日本機械学会 2013 年度年次大会学術講演会講演論文集,2013.9) pp.J025015(岡山市,岡山大学)

内田 敦士,清水昭博,清水 優史,菅原路子,「呼気・吸気のツインピストンを用いた間欠振動流による生体外換気実験」,日本機械学会第25回バイオエンジニアリング講演会講演論文集,2013.1) pp.611-612(つくば市,産業技術総合研究所)

高島綾太,清水昭博,清水 優史,菅原路子,「円周方向溝付管内における間欠振動流の可視化と流れ解析」,日本機械学会第25回バイオエンジニアリング講演会講演論文集,2013.1) pp.613-614(つくば市,産業技術総合研究所)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 1 件)

名称:換気装置
発明者:清水昭博,内田敦士
権利者:独立行政法人国立高等専門学校機構
種類:特許
番号:特開2014-233413
出願年月日:2013-5-31
国内外の別:国内

取得状況(計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等
なし

6.研究組織

(1)研究代表者

清水 昭博(SHIMIZU Akihiro)
東京工業高等専門学校 機械工学科
准教授
研究者番号:90149914