

呼吸介助法の換気力学的研究

-胸腔内圧, 胸郭コンプライアンス及び呼吸仕事量による検討-

弘前大学大学院保健学研究科保健学専攻

提出者氏名: 山本健太

所属: 健康支援科学領域 障害保健学分野

指導教員: 石川玲

目次

略語一覧	2
緒言	3
【第一章】呼吸介助法における姿勢の違いが胸腔内圧に及ぼす影響について... 5	
序論	5
方法	5
結果	11
考察	14
【第二章】呼吸介助法が胸郭コンプライアンス, 安静呼吸時の呼吸仕事量に及ぼす影響について	16
序論	16
方法	16
結果	22
考察	23
総括	25
謝辞	27
引用文献	28
英文要旨	31

略語一覧

ALI: 急性肺傷害 (acute lung injury)

ARDS: 急性呼吸窮迫性症候群 (acute respiratory distress syndrome)

Ccw: 胸郭コンプライアンス (chest wall compliance)

CL: 静肺コンプライアンス (static lung compliance)

Cl: 動肺コンプライアンス (dynamic lung compliance)

EELV: 終末呼気肺気量位 (end expiratory lung volume)

EILV: 終末吸気肺気量位 (end inspiratory lung volume)

FRC: 機能的残気量 (functional residual capacity)

LIP: low inflection point

Pes: 食道内圧 (esophageal pressure)

Pmo: 口腔内圧 (mouse pressure)

Ppl: 胸腔内圧 (intrapleural pressure)

Ptp: 経肺圧 (transpulmonary pressure)

P-V loop: 圧量曲線 (pressure-volume loop)

RR: 呼吸数 (respiratory rate)

TV: 一回換気量 (tidal volume)

WOB: 呼吸仕事量 (work of breathing)

緒言

呼吸理学療法手技の一つである呼吸介助法は、胸郭を用手的に圧迫することで、深い呼気を促進し、増加した胸郭の弾性拡張力により吸気量の増大を得ようとするものである¹⁾。

呼吸不全患者に対する呼吸介助法は、気道内分泌物の移動や機能的残気量の減少、一回換気量の効果がある報告されている²⁾。その一方で、人工呼吸器装着患者に対する呼吸介助法の効果(排痰量の増大や換気機能の改善)について疑問視する報告も散見される^{3,4)}。また、技術的には、最大呼気まで絞り出すような過度な圧迫は胸腔内圧を著しく上昇させ、エアートラッピングや肺胞虚脱の原因となる危険性が考えられる。そのため、呼吸介助法の適応、注意点等を検討するためには、手技が生体に及ぼす換気力学的変化を把握する必要がある。

また、呼吸介助法は徒手的に胸郭の圧迫を繰り返すことで、胸郭をストレッチングする手技として用いられることもある。臨床場面では、肺過膨張により胸郭コンプライアンスが低下している慢性閉塞性肺疾患患者に対して、運動療法前のコンディショニングとして、胸郭の柔軟性の改善や呼吸仕事量の軽減を目的に実施されることがある⁵⁾。そのため、呼吸介助法による胸郭のストレッチングの効果について、胸郭のコンプライアンスや呼吸仕事量による検討が必要である。

これらの胸腔内圧や胸郭コンプライアンス、呼吸仕事量を解析するためには、食道内圧バルーン法による食道内圧の測定が必要になる。食道内圧は人工呼吸管理患者における肺の保護戦略の観点から適切な呼気終末陽圧の設定や呼吸仕事量を評価する上で、近年使用されている⁶⁾。食道内圧は胸腔内圧の指標とされており、我々、理学療法士が行う呼吸理学療法の手技を検討する上でも非常に有益な指標であると考える。

そこで、本研究の目的は、食道内圧測定法により呼吸介助法の換気力学的作用の

一端を明らかにすることであり、第 1 章では呼吸介助法における姿勢の違いが胸腔内圧に及ぼす影響について、第 2 章では呼吸介助法による胸郭ストレッチングが安静呼吸時の呼吸仕事量に及ぼす影響について検討することである。

【第一章】呼吸介助法における姿勢の違いが胸腔内圧に及ぼす影響について

序 論

呼吸介助法は、換気障害の部位に応じて背臥位や側臥位など様々な姿勢で行われ、換気の増大を目的に実施する。一方でこの手技は、呼気時の胸郭圧迫により胸腔内圧を上昇させ、呼気終末の肺気量位は残気量近くまで低下する場合、呼気時に気道・肺胞虚脱、吸気時にその開放を繰り返す。これにより Atelectrauma（無気肺・肺損傷）を誘発する結果となり、急性呼吸窮迫症候群（acute respiratory distress syndrome：ARDS）／急性肺傷害（acute lung injury：ALI）に対する肺保護戦略^{7,8)}から考えると悪影響となる可能性がある。また、姿勢によって換気運動と呼吸機能が変化することは知られている⁹⁾。例えば、背臥位では肺気量位が低下しやすいため、呼吸介助時には胸腔内圧が上昇しやすい可能性がある。

しかし、呼吸介助法における姿勢の違いが胸腔内圧に与える影響についての報告はない。

本研究の目的は、背臥位、側臥位での呼吸介助法を行った時の胸腔内圧を測定し、肢位や呼吸介助法の違いが胸腔内圧にどのような影響を与えるか検討することとした。

方 法

1. 対象

呼吸介助法を受ける被術者は、健常男性 7 名とした。被術者の基本情報を表 1 に示した。呼吸介助法を行う術者は呼吸理学療法の実験年数が 8 年の男性理学療法士

1名とした。

表 1 被術者の基本情報

項目	中央値（四分位範囲）
年齢（歳）	28(26－29)
身長（cm）	176(174－181)
体重（kg）	60(59－68)

2. 呼吸介助法・測定手順

呼吸介助の方法は、背臥位での上部胸郭介助方法、両側の側臥位での下部胸郭介助法を行った。背臥位での上部胸郭介助方法は、術者の両手掌を患者の両側の鎖骨下前胸部に置き、呼気時に胸郭を尾側方向に同時に押し下げた¹⁾。側臥位での下部胸郭呼吸介助法は術者の両手掌を患者の剣状突起の高さを目安に前胸部と後胸部から挟み込むように置き、両側の母趾は腋窩中央線にそろえる。呼気時に患者の骨盤方向に圧迫を加え、尾側方向に引き下げるようにした¹⁾ (図 1)。

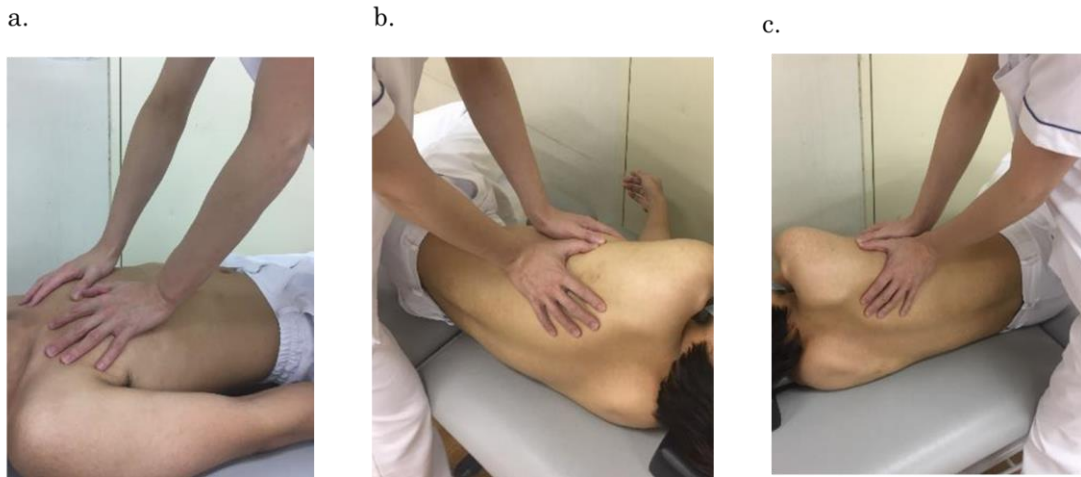


図1 各姿勢での呼吸介助法

a: 背臥位での上部胸郭介助法, b: 右側臥位での下部胸郭介助法, c: 左側臥位での下部胸郭介助法

測定手順は、十分な安静呼吸後に背臥位での上部胸郭介助法、両側での下部胸郭介助法をそれぞれ2分間ランダムに実施し、その測定の間は十分な休息を取った。また、測定中は測定機器の機械的誤差により生じる肺気量位のドリフト現象を補正するために、安静呼吸時、呼吸介助時の測定前後で最大吸気を行わせた。

3. 流量, 肺気量位の測定方法

流量, 肺気量位の変化は呼気ガス分析器(ミナト医科学社製 AE300-s)を用いて測定した。得られたデータは A/D 変換器(ADI 社製 ML880PowerLab16/30)を用いて、サンプリング周波数 100Hz で A/D 変換後にパーソナルコンピュータに取り込み、波形解析ソフト(ADInstruments 社製 Labchart7)にて解析を行った。

流量計を用いて肺気量位を測定する際には、機械的誤差によって生じる肺気量位のドリフト現象が、波形分析時の問題となる。このドリフト現象とは、急な呼吸様式の変化、流量センサーの吸気・呼気のキャリブレーション値のわずかな誤差、温度、湿度の

変化が原因となって生じる機械的な誤差であると言われている¹⁰⁾。そのため肺気量位による波形の分析時には、そのドリフト現象の補正が必要となる。今回、ドリフト現象の補正は Johnson ら¹⁰⁾の方法に準拠し、安静呼吸時、呼吸介助時の測定前後で最大吸気を行わせ、その最大吸気位の値が一定になるようにドリフト現象の補正を行った。すなわち、一つの最大吸気時と次の最大吸気時の肺気量位の差をその間の時間で除し、一定時間にドリフト現象によって生じる肺気量位の変化を求め、その間の測定値からその変化量を引くことによりドリフト現象の補正を行った(図 2)。

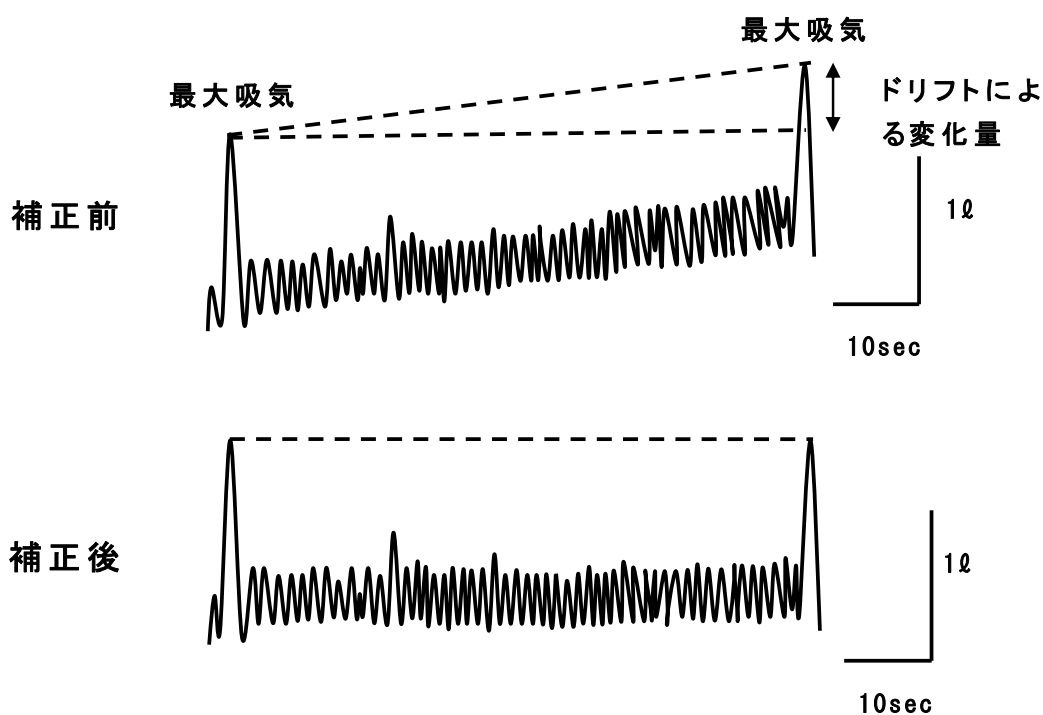


図 2 ドリフト現象の補正方法¹¹⁾

肺気量の測定では、安静時、呼吸介助時、ともに安定した 3 呼吸を抽出し、その後、肺気量位変化から一回換気量 (tidal volume: TV), 終末吸気肺気量位 (end inspiratory lung volume: EILV), 終末呼気肺気量位 (end expiratory lung volume: EELV) を算出した。EILV, EELV は、各対象者の肺活量に対する比 (%) で表した。

4. 胸腔内圧の測定方法

胸腔内圧 (intrapleural pressure: Ppl) は、圧測定用のトランスデューサー (チェスト社製) と食道内圧バルーンを用いて食道内圧 (esophageal pressure: Pes) を測定することで求めた。食道内圧バルーンは、長さ 10cm, 直径 1.2cm のバルーンに長さ 100cm, 直径 2.0mm のポリエチレンチューブをつけたものを使用した。Ppl の測定は先行研究^{12,13)} に準じて、食道内圧バルーン法で求めた。食道内圧バルーンを鼻腔から挿入し、45cm ほど挿入したところで声帯を閉じながら呼気努力を行わせて Pes を陽圧にすることでバルーン内の気量をゼロとして、0.2~0.5ml の空気をバルーン内に挿入した。この状態でさらに鼻腔から 60cm 以上挿入し、バルーン全体を胃内に入れ、吸気時の陽圧が高まることを確認し、吸気時に Ppl が陰圧となるまで食道内圧バルーンのチューブを徐々に引き抜き、バルーン全体が食道内に収まっている状態にあることを確認した上で測定を行った。なお、バルーンカテーテルの挿入は共同研究者の医師が行った。

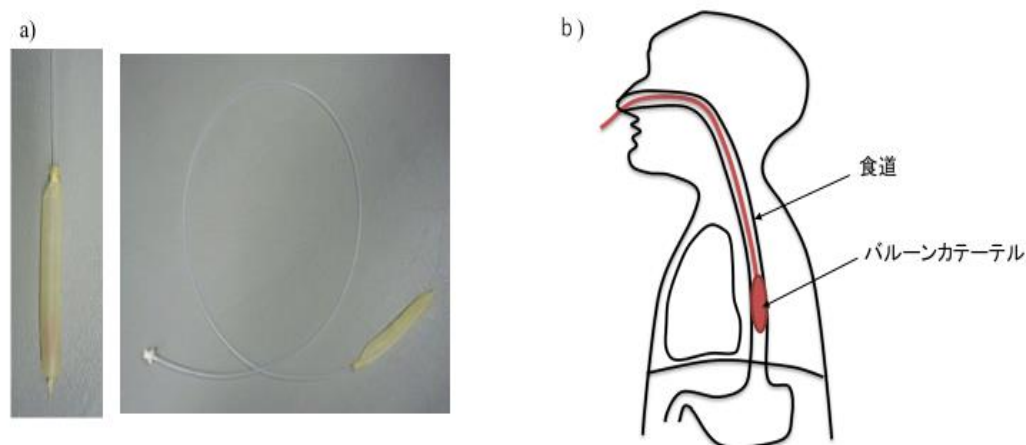


図3 食道内圧バルーン法の模式図

a) 食道内圧バルーン, b) 食道内圧バルーン挿入時の模式図

トランスデューサーからの信号は呼気ガス分析器からの信号と同期させ、肺気量位のデータと同様にサンプリング周波数 100Hz で A/D 変換 (ADInstruments 社製 ML880PowerLab16/30) 後、パーソナルコンピュータに取り込み、波形解析ソフト (ADInstruments 社製 Labchart ver7) で解析を行った。Ppl 変化は、安静時、呼吸介助時ともに肺気量位測定を行った 3~5 呼吸より、終末呼気位での Ppl (終末呼気 Ppl)、終末吸気位での Ppl (終末吸気 Ppl) を算出した。

5. 圧量曲線 (Pressure-volume loops : P-V loop) の分析方法

肺気量位, Ppl の解析を行った波形から、呼吸介助時の P-V loop を作成した。P-V loop の分析に関しては、吸気時の波形で吸気開始初期の傾きがフラットであり、その後の傾きが上がりだす点、つまり、吸気開始直後は、圧は変化するが肺気量位の変化がなく、その後に肺気量位が変化するポイントが、吸気初期にあるかどうかを視覚的に判断し、その点を気道閉塞や肺胞虚脱の指標とされている lower inflection point (LIP)^{14,15)} とし、その有無を視覚的に観察した (図 4)。

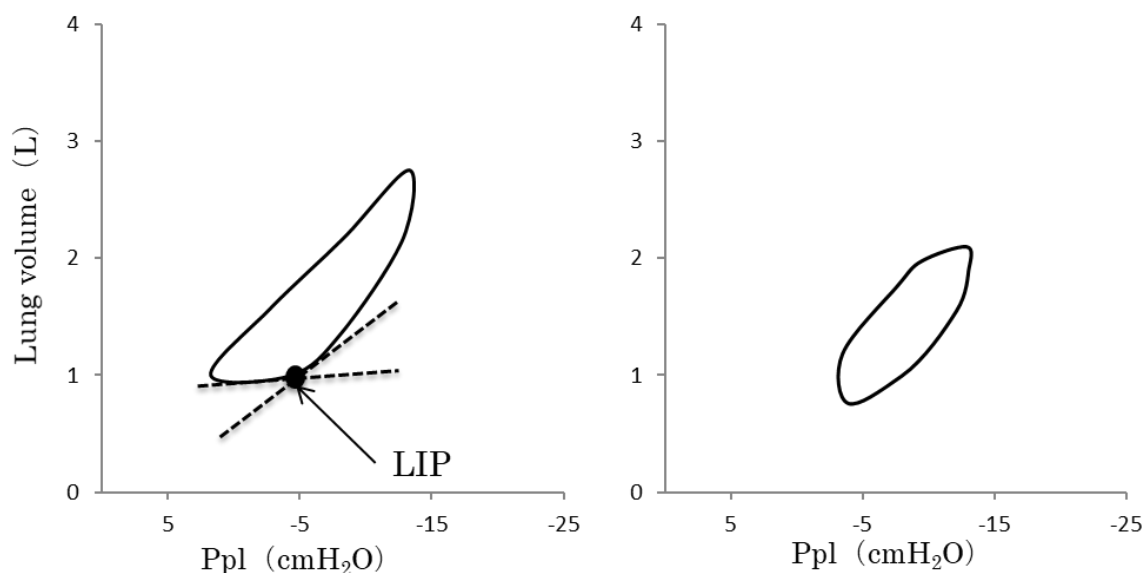


図 4 呼吸介助法時の P-V loop の例

左図:吸気時の LIP 有, 右図:吸気時の LIP なし

統計学的解析

TV, 肺気量位 (EILV, EELV), Ppl の姿勢別での比較を一元配置分散分析, 多重比較法にて解析を行った。有意水準は 5%とした。

倫理的配慮, 説明と同意

対象者及び術者には研究に関する説明を口頭・書面にて説明を行い, 同意を得た。また, 本研究は甲南女子大学研究倫理委員会 (承認番号: 20110210) の承認を受けた後に実施した。

結 果

1. 姿勢別での安静呼吸時, 呼吸介助時の TV, 肺気量位, Ppl について (表2)

表 2 に姿勢別での安静呼吸時、呼吸介助時の TV, 肺気量位 (EILV, EELV), Ppl を示す。安静呼吸の姿勢別姿勢別の検討では, 各姿勢での安静呼吸時の TV に有意差はみられなかったが, EILV, EELV とともに両側の側臥位が背臥位に比べ有意 ($p<0.05$) 高かった。一方で安静時の胸腔内圧については, 終末吸気 Ppl, 終末呼気 Ppl とともに両側の側臥位が背臥位に比べ有意 ($p<0.05$) に低かった。

呼吸介助時の姿勢別の検討では, 各姿勢での TV に有意差はみられなかった。肺気量位の変化は, EILV は各肢位間で有意差はなく, EELV は両側の側臥位が背臥位に比べ有意 ($p<0.05$) に高かった。胸腔内圧については, 終末吸気 Ppl, 終末呼気 Ppl はともに両側の側臥位が背臥位に比べ有意 ($p<0.05$) に低かった。

表 2 各姿勢での安静呼吸, 呼吸介助時の TV, 肺気量位, Ppl (n=7)

	背臥位		右側臥位		左側臥位	
	安静呼吸	呼吸介助	安静呼吸	呼吸介助	安静呼吸	呼吸介助
TV(L)	0.56 (0.40-0.66)	1.23 (1.11-1.54)	0.49 (0.42-0.66)	1.24 (1.01-1.36)	0.49 (0.44-0.58)	0.98 (0.84-1.21)
EILV(%)	40.7 (36.6-44.4)	42.4 (34.3-48.4)	49.5 (43.9-56.2)*	50.7 (47.2-58.0)	51.6 (48.5-58.8)*	46.8 (45.5-48.1)
EELV(%)	27.7 (24.9-35.7)	11.8 (9.3-16.4)	39.8 (32.6-46.5)*	23.9 (21.8-31.9)†	41.3 (36.9-47.2)*	26.7 (22.3-29.1)†
吸気終末 Ppl (cmH ₂ O)	2.04 (0.37-3.88)	7.25 (5.51-12.2)	-3.53 (-6.54-0.02)*	-1.89 (-3.16-1.63)†	-4.94 (-6.33-4.36)*	-2.63 (-3.96-2.34)†
呼気終末 Ppl (cmH ₂ O)	0.16 (-1.98-2.21)	-0.44 (-1.26-0.19)	-5.25 (-6.99-3.86)*	-6.43 (-7.02-4.88)†	-6.68 (-8.60-2.70)*	-8.76 (-9.76-7.00)†

中央値(四分位範囲)

*:p<0.05 vs 背臥位時の安静呼吸, †:p<0.05 vs 背臥位時の呼吸介助

2. 呼吸介助時の P-V loop での LIP の有無

全例の呼吸介助時の P-V loop を呼吸介助時の P-V loop については, 背臥位で LIP が全例生じていたが, 右側臥位では生じている例はなく, 左側臥位では 2 例のみ(被術者 a, e)であった。

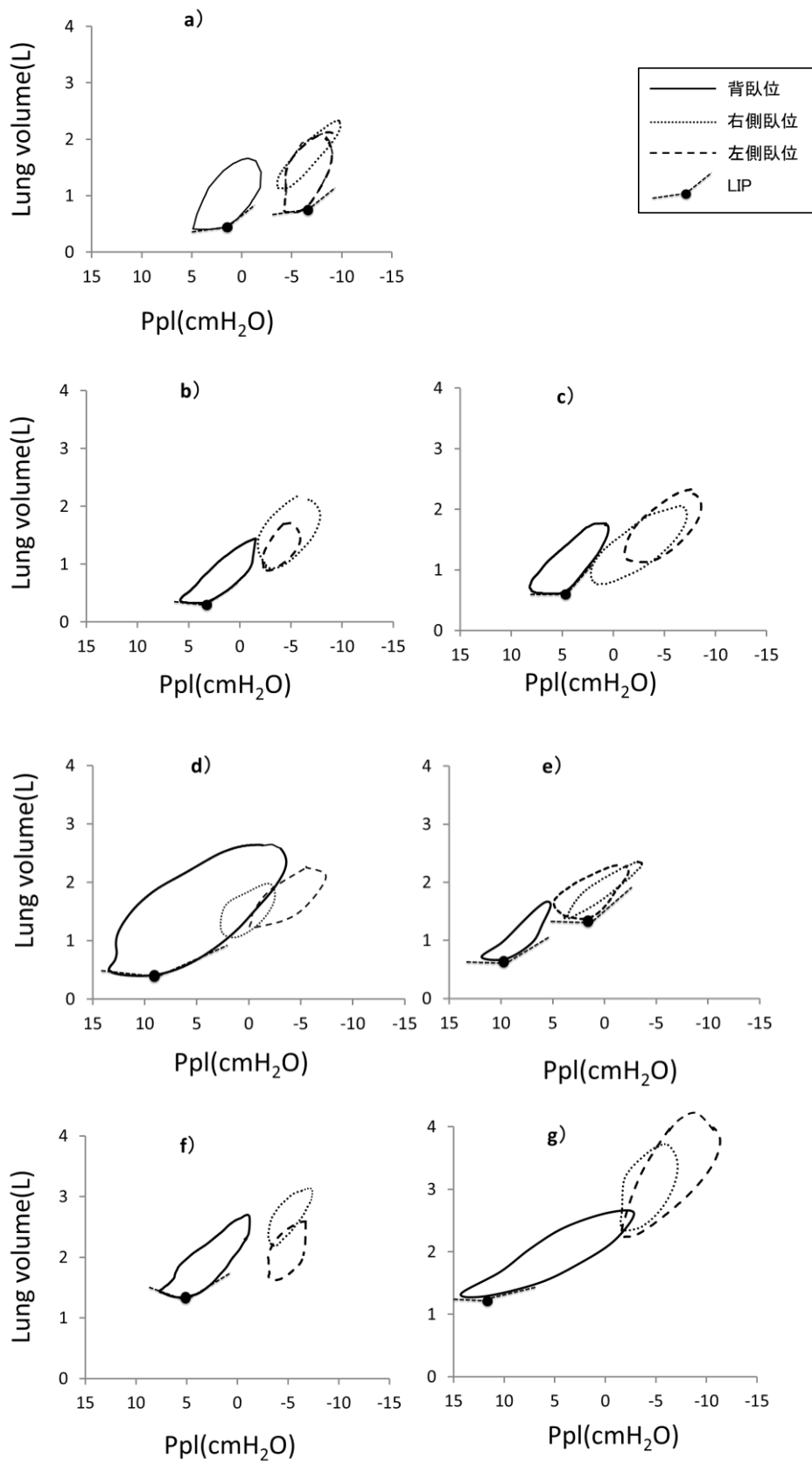


図5 全被術者の呼吸介助時の P-V loop

考 察

1. 姿勢の違いにおける肺気量位 (EILV, EELV), Ppl の違いについて

姿勢の違いにおける安静呼吸時の肺気量位については、TVは姿勢の違いにおいて差はなかったが、両側臥位の EILV, EELV は背臥位に比べて、有意に高かった。肢位の違いによる安静呼吸時の肺気量位を検討では、Behrakis らは側臥位に比べ、背臥位では予備呼気量が減少するとし¹⁶⁾、村岸らは側臥位での安静呼吸時の肺気量位が EILV, EELV とともに背臥位に比べ増加すると報告している¹⁷⁾。背臥位では腹部臓器が横隔膜を介して胸腔内を圧迫するため肺のコンプライアンスが低下し、FRC が低下することで FRC と closing capacity が接近するため、安静呼吸時も気道閉塞が生じやすくなる^{18,19)}。一方で側臥位では、下側肺の FRC は背臥位と同様に腹部臓器による圧迫により FRC が同程度まで低下するが、上側肺は背臥位よりも FRC が増加するため、肺気量は高くなるとされている²⁰⁾。そのため、本研究でも側臥位での安静呼吸時の肺気量位は背臥位と比べ高かったと考えられる。また呼吸介助時の結果から、側臥位での呼吸介助時は背臥位に比べ呼気終末位での Ppl は低く、呼気時の肺気量位も側臥位は背臥位での呼吸介助時に比べ高いことがわかった。このことから、介助時の肺気量位が低く、Ppl が陽圧を示す背臥位に比べ、側臥位での呼吸介助は呼吸終末でも Ppl の陰圧が維持され、気道および肺胞の虚脱が生じにくい肢位であると考えられた。

2. 呼吸介助中の P-V loop における LIP について

LIP は、急性呼吸不全患者の P-V loop の波形の吸気開始時に、虚脱した肺胞の拡張による急激なコンプライアンスの増加する点とされている¹⁴⁾。また、P-V loop の LIP 以下では虚脱した肺胞の存在が示唆される¹⁵⁾ ことから、ALI/ARDS に対する人工呼吸管理での肺保護戦略において、LIP よりも高い終末呼気陽圧

(positive end-expiratory pressure : PEEP) に設定することは、肺胞虚脱、無気肺損傷を防止することができるため推奨されている¹⁴⁾。今回の研究では、背臥位の呼吸介助中は LIP が全例に生じていたが、側臥位の呼吸介助中はほとんどみられなかった。背臥位では、前述したように安静時の呼気終末位でも Ppl は陽圧となる場合がある。これは背臥位では腹部臓器が横隔膜を介して胸腔内を圧迫し陽圧になるためと考えられ、さらにその状況に呼吸介助として胸郭を圧迫し胸腔内に陽圧を加えることは、肺胞虚脱が生じる可能性があることが示唆された。一方で、LIP が生じづらい側臥位での下部胸郭介助法は呼吸終末でも胸腔内圧の陰圧が維持され、気道および肺胞の虚脱が生じにくい介助方法であると考えられた。

3. 本研究の限界

本研究の限界として、対象があくまで健常者であることが挙げられる。ARDS/ALI 患者では、健常人に比べて肺コンプライアンスが低下するため、呼吸介助による影響については今後検討する必要がある。

また、研究方法として背臥位での下部胸郭介助法や介助を行う圧迫の強さなどを規定した上での検討も今後必要と考える。

【第二章】呼吸介助法が胸郭コンプライアンス, 安静呼吸時の呼吸仕事量に及ぼす影響について

序 論

呼吸介助法は, 用手的に胸郭を圧迫することで胸郭の柔軟性を高め, 呼吸仕事量 (Work of breathing; WOB) の軽減や呼吸困難感の軽減を目的に実施される。慢性閉塞性肺疾患患者では胸郭ストレッチングを含む体操などが, 肺過膨張を改善させる可能性があるとも報告されている^{5,22)}。呼吸介助法は呼気に合わせて胸廓を徒手的に繰り返し引き下げることから, 徒手的に胸廓をストレッチングする手技であるとも言える。

呼吸仕事量は人工呼吸管理下の患者において, 呼吸器モードを適正化する目的で使用される²²⁾。評価方法としては, 食道内圧法にて測定する胸腔内圧を横軸に, 肺気量位の変化を縦軸にプロットした図に肺と胸郭(弛緩時)の圧量曲線を加えた Modified Campbell diagram が用いられる^{23,24)}。

本研究の目的は用手的な胸郭圧迫による呼吸介助法が, 胸郭コンプライアンスと安静呼吸の呼吸仕事量に与える即時的効果を検討することである。

方 法

1. 対象

呼吸介助法を受ける被術者は健常成人 6 名とした。被術者の基本情報を表 3 に示した。呼吸介助法を行う術者は呼吸理学療法の実験がある 3 名の理学療法士とし、介助者はランダムに実施した。

表 3 対象者の基本情報

項目	中央値(四分位範囲)
性別	男性:4名, 女性2名
年齢(歳)	33(30-34)
身長(cm)	174(160-176)
体重(kg)	63(53-68)

2. 呼吸介助法・測定手順

呼吸介助の方法は、背臥位での上部胸郭介助方法、両側の側臥位での下部胸郭介助法を行った。背臥位での上部胸郭介助方法は、術者の両手掌を患者の両側の鎖骨下前胸部に置き、呼気時に胸郭を尾側方向に同時に押し下げた¹⁾。下部胸郭呼吸介助法は術者の両手掌を患者の剣状突起の高さを目安に両側の前～側胸部置き、呼気時に患者の骨盤方向に圧迫を加え、尾側方向に引き下げるようにした¹⁾(図6)。

測定手順は上部及び下部胸郭介助法をそれぞれランダムに合計15分間実施し、実施前後で胸郭コンプライアンス(Chest wall compliance; Ccw), 静肺コンプライアンス(static lung compliance; CL), 安静呼吸を2分間測定した。

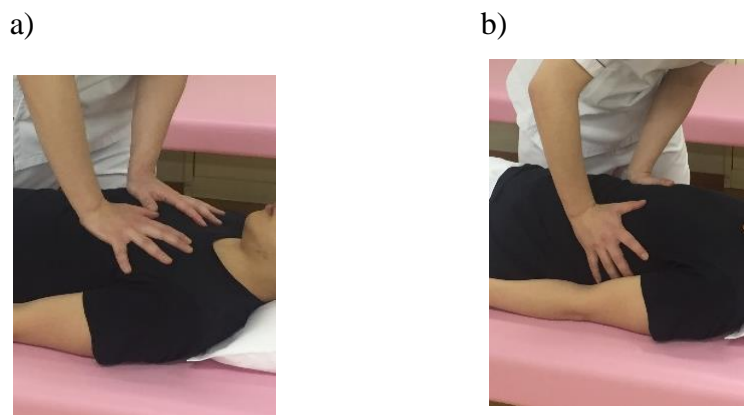


図 6 背臥位での呼吸介助法

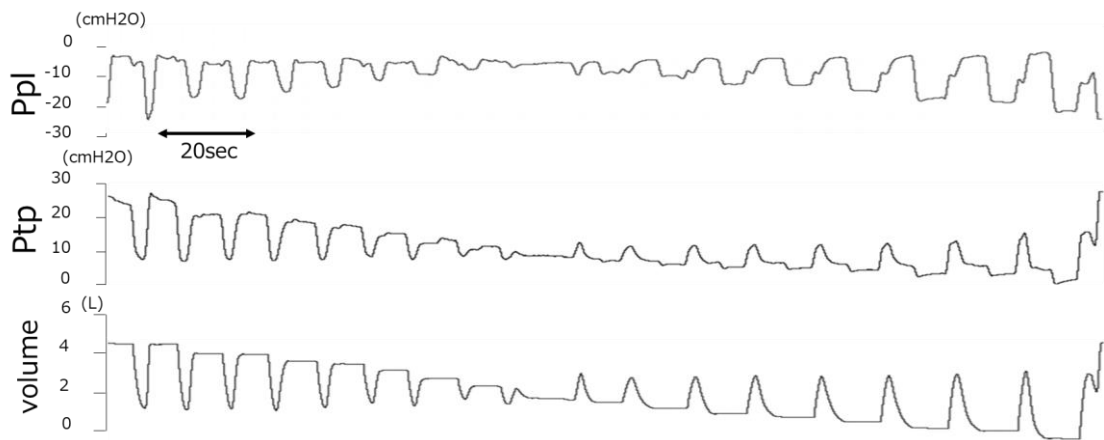
a) 上部胸郭介助法, b) 下部胸郭介助法

2. 測定方法

肺気量変化は、流量計(チェスト社製)を用いて測定した。Ppl は第 1 章と同様に共同研究者の医師が食道内圧バルーン法にて測定した。また、口腔内圧(mouth pressure: Pmo)はマウスピース内の圧を差圧トランスデューサー(チェスト社製)にて測定し、経肺圧(Transpulmonary pressure; Ptp)は Pmo から Ppl を減じることにより求めた。得られた圧及び肺気量変化をサンプリング周波数 100Hz で PC に取り込み、A/D 変換(ADInstruments 社製 ML880PowerLab16/30)後、パーソナルコンピュータに取り込み、波形解析ソフト(ADInstruments 社製 Labchart ver7)にて分析した。また、コンプライアンスを算出に必要な機能的残気量(functional residual capacity; FRC)を呼吸機能検査装置(CHESTAC-8900)用い、ガス希釈法にて測定した。

Ccw と CL の測定は、座位にて気流阻止法を用いて肺・胸郭の圧量曲線をそれぞれ作成することで求めた。この方法は最大吸気位から最大呼気を含む各肺気量位で被験者の息止めに合わせてシャッターで気流を遮断し測定する方法である²⁵⁾。シャッターは流量計の筒先に設置し、閉鎖は徒手で行った。その際、被験者は呼吸を行わず十分にリラックスするように指示し、Ppl, Ptp が一定となり呼吸筋が弛緩状態となっていることを確認しながら実施した(図 7-a)。シャッター閉鎖時の肺気量位と Ppl の散布図から近似曲線を求め、胸郭の圧量曲線とした。同様に肺気量位と PL から求めた近似曲線を肺の圧量曲線とし、コンプライアンスは、胸郭、肺の圧量曲線(図 7-b)の FRC と FRC+0.5L の 2 点を結んだ直線の傾きから Ccw, CL を算出した。

a)



b)

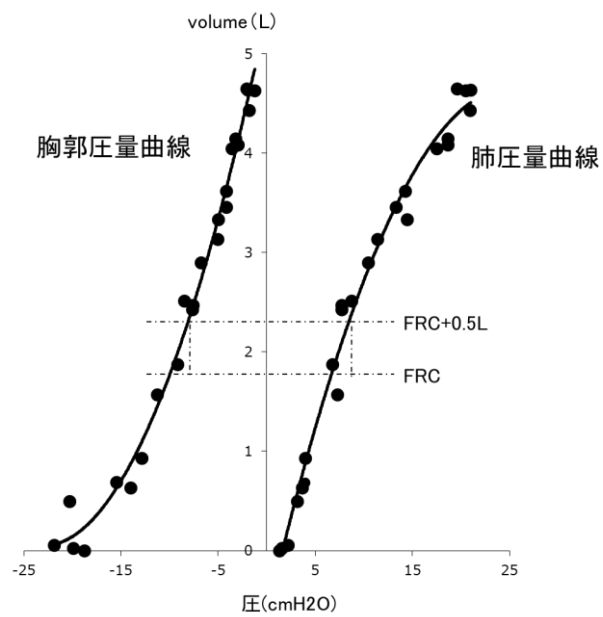


図7 気流阻止法時による胸郭・肺の圧量曲線の求め方^{25,26)}

a) 気流阻止法時の Ppl, Ptp, volume の経時的変化

b) 胸郭・肺の圧量曲線, シャッター閉鎖時の肺気量位と Ppl の散布図から近似曲線を求め, 胸郭の圧量曲線とした。同様に肺気量位と Ptp から求めた近似曲線を肺の圧量曲線とした。

安静呼吸の解析対象は測定後半の安定した 3~5 呼吸とし、TV、呼吸数 (respiratory rate; RR)を算出し、Ppl と肺気量変化から安静時呼吸の圧量ループを描いた。WOB の解析については Guenetteら²⁴⁾の方法に準拠して行った。安静呼吸時の P-V loop に、胸郭圧量曲線から得られた Ccw と、P-V loop の流量がゼロとなる EILV、EELV の点を結んだ線を動肺コンプライアンス (dynamic lung compliance: Cl)を加えることで、Modified Campbell diagram を図 7 のように作成した。安静呼吸時の吸気、呼気それぞれの弾性 WOB と粘性 WOB を求めた。弾性 WOB とは、肺・胸郭の弾性力に抗する WOB であり、粘性 WOB とは主に気道・組織抵抗に抗する WOB である。図 8 で Cl 左側の斜線で示す領域が吸気粘性 WOB、Cl と Ccw に囲まれた上部の水平線で示す領域が吸気弾性 WOB、Ccw の右側の点線で示す領域が呼気粘性 WOB、Cl と Ccw に囲まれた下部の垂直線で示す領域が呼気弾性 WOB を示す²⁵⁾。各領域の WOB は、Ppl と肺気量変化の積によりそれぞれ算出した。

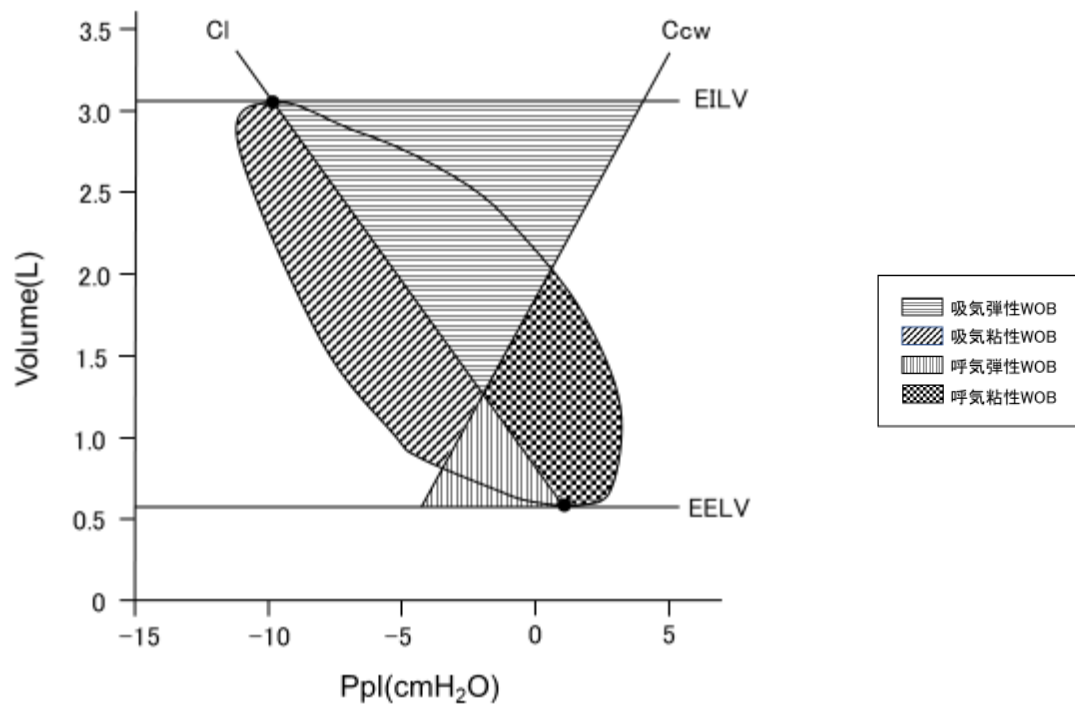


図 8 呼吸仕事量 (Modified Campbell diagram) の解析方法^{24,27)}

統計学的解析

呼吸介助法前後での各項目の差を検定するため、Wilcoxon 検定を行い、有意水準は 5%とした。

倫理的配慮, 説明と同意

対象者及び術者には研究に関する説明を口頭・書面にて説明を行い、同意を得た。また、本研究は甲南女子大学研究倫理員委員会(承認番号:20110210)の承認を受けた後に実施した。

結 果

呼吸介助法前後での Ccw, CL, TV, RR, WOB の結果を表 4 に示す。呼吸介助法前後で Ccw は有意に増加し(p<0.05), 一方で CL に有意差は認めなかった。呼吸介助前後での安静時呼吸の TV, RR ともに有意差はなかった。WOB については, 吸気の弾性 WOB は前後で有意に低下した(p<0.05)。吸気の粘性 WOB, 呼気の弾性 WOB, 呼気の粘性 WOB は前後で有意な差を認めなかった。

表 4 呼吸介助法前後の Ccw, CL, TV, RR, WOB

	呼吸介助前	呼吸介助後	p 値
Ccw (L/cmH2O)	0.24(0.23–0.31)	0.30(0.26–0.34)	0.042
CL (L/cmH2O)	0.22(0.17–0.25)	0.23(0.16–0.25)	0.246
TV (L)	0.49(0.46–0.51)	0.49(0.43–0.52)	0.197
RR (回/分)	17.2(16.2–18.1)	15.6(13.7–17.9)	0.345
吸気弾性 WOB (J/min)	1.87(1.78–2.17)	1.01(0.71–1.51)	0.028
吸気粘性 WOB (J/min)	0.39(0.27–0.51)	0.21(0.14–1.51)	0.060
呼気弾性 WOB (J/min)	0.00(0.00–0.04)	0.05(0.00–0.13)	0.141
呼気粘性 WOB (J/min)	0.05(0.00–0.11)	0.02(0.00–0.20)	0.686

中央値 (四分位範囲)

図 9 は, 呼吸介助法前後の安静時呼吸の Modified Campbell diagram の代表例を示す。呼吸介助法前後の安静呼吸はともに, 呼気時の WOB は粘性, 弾性ともにほぼ生じていない。吸気時は弾性 WOB が Ccw の増加, つまり傾きの上昇により低下していた。

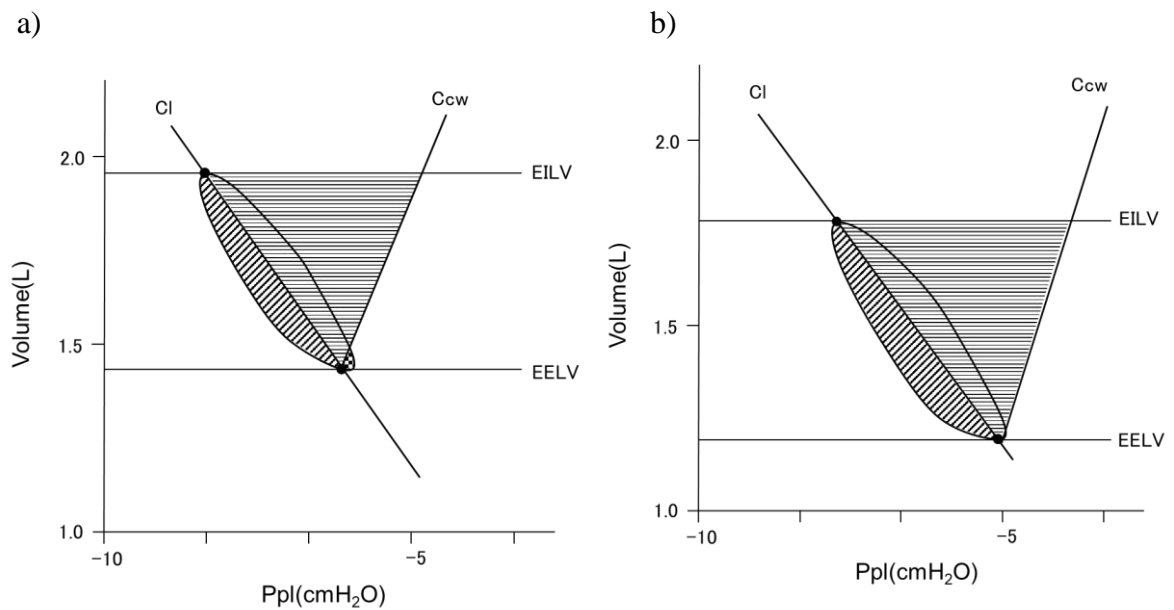


図9 呼吸介助法前後での安静呼吸の Modified Campbell diagram の代表例

a) 呼吸介助前, b) 呼吸介助後

(呼吸介助法前→呼吸介助後, 単位 Ccw : L/cmH₂O, WOB : J/min)

Ccw : 0.20→0.26, 吸気弾性 WOB : 1.91→1.62, 吸気粘性 WOB : 0.41→0.36, 呼気弾性 WOB : 0.00→0.00, 呼気粘性 WOB : 0.18→0.01

考 察

1. 呼吸介助法前後の Ccw, WOB について

WOB は換気に必要なエネルギーのことであり, 肺・胸郭の弾性力に抗する弾性 WOB, 気道・肺の組織抵抗に抗する粘性 WOB からなる²⁸⁾。安静呼吸時の WOB については, 吸気は肺や胸郭の弾性抵抗と肺・気道の粘性抵抗により生じ, すべて吸気筋が発生するものとされている²³⁾。本研究の結果も安静呼吸時の呼吸仕事量はほぼ吸気時の弾性, 粘性 WOB で構成されていた。その他, WOB を増減する因子として, 胸郭・肺のコンプライアンスの増減も挙げられる。つまり, それぞれのコンプライアンスの増減が変化することで, WOB を算出する際

のそれぞれの圧量曲線の傾きが変化するため、WOBの中でも特に吸気時の弾性WOBに影響することが考えられる。本研究の結果では、呼吸介助法前後でCcwが増加し、安静呼吸の吸気時の弾性WOBが低下していた。このことから、呼吸介助法による即時的な胸郭コンプライアンスの改善が、胸郭弾性圧と吸気時の胸郭収縮力を低下させ、胸郭の弾性抵抗に抗する仕事量である吸気時の弾性WOBを低下させると考えられた。臨床場面では、慢性閉塞性肺疾患患者においては、胸郭のコンプライアンス低下によりWOBが増大し、息切れの要因となっている症例が多くみられる。本研究の結果は、呼吸介助法は胸郭コンプライアンスの改善、呼吸仕事量の軽減目的としては呼吸不全患者に有益な手技である可能性が示唆された。

2. 本研究の限界

本研究では、呼吸介助法による胸郭ストレッチングの実施時間や第1章と同様に、他の呼吸介助法との比較や強度を規定した上での影響や他の呼吸様式のWOBについては未検討である。今回は15分間に設定したが、実施時間の違い、他の呼吸介助法や圧迫の強度によるCcw, WOBへの影響と、安静呼吸だけではなく、呼吸介助法前後での運動時呼吸のWOBへの効果についても今後検討が必要であると考えらる。

総 括

今回、呼吸理学療法の一手技である呼吸介助法について換気力学的に検討した結果、以下の可能性が示唆された。

1. 背臥位での上部胸郭に対する呼吸介助法では、両側側臥位での下部胸郭呼吸介助法に比べ、呼気終末での P_{pl} が上昇し肺気量位を低下させる。
2. 背臥位での上部胸郭に対する呼吸介助法は両側側臥位での下部胸郭に対する呼吸介助法に比べ、肺胞、気道虚脱の指標とされている LIP が生じやすい手技である。
3. 呼吸介助法による 15 分間の胸郭ストレッチングでは、 C_{cw} と安静呼吸の吸気の弾性 WOB を低下させる。

以上のことより、呼吸介助法では P_{pl} が上昇し、肺胞、気道虚脱を生じる危険性がある一方で、 C_{cw} の改善による WOB を軽減するという効果がある可能性が判明した。つまり呼吸介助法を行う上で、実施する患者の病態に合わせて手技を選択する必要があると考える。例えば、肺胞、気道虚脱が生じやすい ARDS/ALI 患者に対する背臥位での呼吸介助は P_{pl} を上昇させ、さらに肺胞にストレスがかかる可能性があるため非常に危険である考える。一方で動的肺過膨張により、 C_{cw} が低下しやすい慢性閉塞性肺疾患患者に対する呼吸介助による胸郭ストレッチングは C_{cw} を上昇させ、 WOB 、息切れの軽減につながる可能性が考えられる。しかし、今回の一連の研究は健常者を対象としているため、今後は呼吸不全患者を対象とした研究が必要である。

また、本研究で用いた食道内圧バルーン法による胸腔内圧の測定や呼吸仕事量の解析は、呼吸介助法などの呼吸理学療法の効果を検討する上で有益な方法であると考えられる。しかし、測定方法が鼻腔からバルーンカテーテルを挿入するという侵襲的な方法であるため、健常者においても測定が困難な

場合がある。そのため、食道内圧バルーン法以外の方法での測定方法の実施が必要と考える。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、ご協力いただきました全ての対象者の皆様に深く感謝申し上げます。また、弘前大学大学院保健学研究科健康支援学領域障害保健学分野石川玲教授に、多大なるご指導を賜りましたことを深く感謝申し上げます。

そして、研究協力及び指導を頂いた甲南女子大学看護リハビリテーション学部理学療法学科 間瀬教史教授、神戸百年記念病院 尾崎孝平先生、さらに測定の際にご協力いただいた甲南女子大学看護リハビリテーション学部理学療法学科、甲南医療センターリハビリテーション部、伊丹恒生脳神経外科病院リハビリテーション部のスタッフの皆様に深く感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 神津玲:呼吸介助(法)/呼気介助(法). 千住秀明, 真淵敏, 宮川哲夫(監). 呼吸理学療法標準手技. pp.92-95, 医学書院, 東京, 2008.
- 2) 伊橋光二, 伊藤直栄, 他:呼吸介助手技が肺気量分画に与える影響. 理学療法学, 16:267-272, 1989.
- 3) Unoki T, Kawasaki Y, et al: Effects of expiratory rib-cage compression on oxygenation, ventilation, and airway-secretion removal in patients receiving mechanical ventilation. *Respir Care*, 50: 1430-1437, 2005.
- 4) Guimarães, FS, Agnaldo J: Expiratory Rib Cage Compression in Mechanically Ventilated Subjects: A Randomized Crossover Trial. *Respiratory Care*, 59: 678-685, 2014.
- 5) 千住秀明, 他:効率的な運動療法のためのコンディショニング. 日本呼吸管理学会・日本呼吸器学会・日本理学療法士協会(編). 呼吸リハビリテーションマニュアル—運動療法—(第2版). pp.35-41, 照林社, 東京, 2003.
- 6) Talmor D, Sarge T, et al. Mechanical Ventilation Guided by Esophageal Pressure in Acute Lung Injury. *N Engl J Med*, 359: 2095-2104, 2008.
- 7) Caironi P, Cressoni M, et al: Lung opening and closing during ventilation of acute respiratory distress syndrome. *Am J Respir Crit Care Med*, 181: 578-586, 2010.
- 8) Chiumello D1, Carlesso E, et al: Lung stress and strain during mechanical ventilation for acute respiratory distress syndrome. *Am J Respir Crit Care Med*, 178: 346-355, 2008.
- 9) 間瀬教史:体位により変化する換気運動と呼吸機能. 日本呼吸ケア・リハビリテーション学会誌, 28:365-370. 2020.
- 10) Johnson BD, Weisman IM, et al: Emerging concepts in the evaluation of ventilator

- limitation during exercise: the exercise tidal flow-volume loop. *Chest*, 116: 488-503, 1999.
- 11) 野添匡史, 間瀬教史, 他: 慢性閉塞性肺疾患患者における動的肺過膨張の程度と呼吸機能・換気様式との関係. *理学療法学*:38:74-83, 2011.
 - 12) 飛田渉: 換気力学. コンプライアンスと抵抗. 日本呼吸器学会肺生理専門委員会(編). 臨床呼吸機能検査第7版. pp34-42, メディカルレビュー社, 東京, 2008.
 - 13) Benditt JO: Esophageal and gastric pressure measurements. *Respir Care*, 50: 68-75, 2005.
 - 14) Harris RS: Pressure-volume curves of the respiratory system. *Respir Care*, 50:78-99, 2005.
 - 15) Amato MB, Barbas CS, et al: Effect of a protective-ventilation strategy on mortality in the acute respiratory distress syndrome. *N Engl J Med*, 338: 347-354, 1998.
 - 16) Behrakis PK, Baydur A, et al: Lung mechanics in sitting and horizontal body positions. *Chest*, 83: 643-646, 1983.
 - 17) 村岸亜伊子, 間瀬教史, 他: 側臥位における安静呼吸時の肺気量位および呼気流制限の特徴. *臨床理学療法研究*. 28:11-15, 2011.
 - 18) Lablanc P, Ruff F, et al: Effects of age and body position on "airway closure" in man. *J appl physiol*, 28: 448-451, 1970.
 - 19) Craig DB, Wahba WM, et al: "Closing volume" and its relationship to gas exchange in seated and supine positions. *J Appl Physiol*, 31: 717-721, 1971.
 - 20) Rehder K, Sessler AD: Functional of each lung in spontaneously breathing man anesthesisiology with thiopental-meperidine. *Anesthesiology*, 38: 320-327, 1973.
 - 21) 伊橋光二, 斎藤昭彦, 他: 労作性息切れに対する呼吸介助手技の効果. *理学療法学*. 17:83-90, 1990.
 - 22) 山田芳嗣: 人工呼吸中の呼吸筋仕事量. *呼吸*, 12:31-37, 1993.

- 23) Roussos C, Campbell EJM. Respiratory muscle energetics. In: Handbook of Physiology, The Respiratory System, Mechanics of Breathing, pp.481-509, American Physiological Society, Bethesda, 1986.
- 24) Guenette JA, Querido JS, et al: Sex differences in the resistive and elastic work of breathing during exercise in endurance-trained athletes. Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol, 297: 166-175, 2009.
- 25) Gibson GJ, Pride NB: Lung distensibility. The static pressure-volume curve of the lungs and its use in clinical assessment. British Journal of Diseases of the Chest, 70:143-184, 1976.
- 26) 山本実穂, 間瀬教史, 他: 上肢を支持した前傾姿勢における肺・胸郭圧量曲線の特徴. 臨床理学療法研究. 34:29-33, 2017.
- 27) 山根緑, 間瀬教史, 他: 呼吸介助法施行時の呼吸仕事量の特徴について. 臨床理学療法研究. 33:13-17, 2016.
- 28) Cabello B, Mancebo J. Work of breathing. Intensive Care Med, 32: 1311-1314, 2006.

Abstract

The ventilatory mechanics study of chest wall compression -The investigation by intrapleural pressure, chest wall compliance and work of breathing-

Kenta YAMAMOTO

Department of Disability and Health,
Hirosaki University Graduate School of Health Sciences

【Introduction】

The purpose of this study was to investigate some of the ventilatory mechanical effects of the chest wall compression.

【Chapter1】

Effects of postural differences on intrapleural pressure during chest wall compression.

[Purpose] The purpose of this study was to investigate the difference in intrapleural pressure (Ppl) between the supine and lateral (decubitus) positions during manual chest wall compression (CWC).

[Methods] The study population comprised 7 healthy males and CWC was performed by the same physiotherapist with 8 years of experience in chest physical therapy. CWC was performed by the same physiotherapist to participants lying in the supine and in the right and left side positions. Changes in Ppl and lung volume were observed for each participant during quiet breathing (QB) and CWC.

[Results] During the CWC, Ppl at end-expiratory lung volume and end-inspiratory lung volume was lower in the right and left side-lying positions than in the supine position. The following low inflection points (LIP) in the pressure-volume loops were observed during CWC: all participants in the supine position, no participants in the right decubitus position, and two participants in the left decubitus position.

[Conclusion] CWC in the bilateral decubitus positions may not cause excessive Ppl on the airway and alveolus compared with CWC in the supine position.

【Chanpter2】

Effects of chest wall compression on chest wall compliance and work of breathing during quiet breathing

[Purpose] The purpose of this study was to examine the immediate effects of CWC on static lung compliance (CL), chest wall compliance (Ccw), and work of breathing (WOB) during quiet breathing (QB).

[Methods] The study population comprised 6 healthy adults. CWC was performed by a physiotherapist. Ccw, CL, and QB were measured before and after CWC. WOB during QB was calculated using the Modified Campbell diagram

[Results] Ccw was significantly increased, and inspiratory elastic WOB during QB was significantly decreased after CWC.

[Conclusion] The results of this study suggested that improvement of Ccw by CWC decreases the elastic pressure and the inspiratory contractility the of the chest wall, therefore decreases the inspiratory elastic WOB.