HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	胸椎思春期特発性側弯症に対する後方矯正固定術後の長期肺機能評価
Author(s)	卞, 榮満
Description	配架番号：2652
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(医学)
Dissertation Number	甲第14702号
Issue Date	2021-09-24
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k14702
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/83024
Type	doctoral thesis
File Information	BYUN_YoungMan.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学　位　論　文

胸椎思春期特発性側弯症に対する後方矯正固定術後の長期肺機能評価

(Long-term pulmonary function after posterior spinal fusion in main thoracic adolescent idiopathic scoliosis)

2021 年 9 月

北　海　道　大　学

卞　栄　満

Young Man Byun

学　位　論　文

胸椎思春期特発性側弯症に対する後方矯正固定術後の長期肺機能評価

(Long-term pulmonary function after posterior spinal fusion in main thoracic adolescent idiopathic scoliosis)

2021 年 9 月

北　海　道　大　学

卞　栄　満

Young Man Byun

目　次

発表論文目録および学会発表目録　・・・・・・・・・・・・　1 頁

要旨　・・・・・・・・・・・・　2 頁

略語表　・・・・・・・・・・・・　4 頁

緒言　・・・・・・・・・・・・　5 頁

研究方法　・・・・・・・・・・・・　11 頁

研究結果　・・・・・・・・・・・・　14 頁

考察　・・・・・・・・・・・・　20 頁

結論　・・・・・・・・・・・・　26 頁

謝辞　・・・・・・・・・・・・　28 頁

利益相反　・・・・・・・・・・・・　29 頁

引用文献　・・・・・・・・・・・・　30 頁

発表論文目録および学会発表目録

本研究の一部は以下の論文に発表した.

Young Man Byun, Takahiro Iida, Katsuhisa Yamada, Kuniyoshi Abumi, Terufumi Kokabu, Akira Iwata, Norimasa Iwasaki, Hideki Sudo

Long-term pulmonary function after posterior spinal fusion in main thoracic adolescent idiopathic scoliosis

PLoS One. 2020 Jun 25;15(6):e0235123.

本研究の一部は以下の学会に発表した.

卞栄満，飯田尚裕，山田勝久，鐙邦芳，小甲晃史，岩田玲，須藤英毅

胸椎思春期特発性側弯症に対する後方矯正固定術後の長期肺機能評価

第 54 回　日本側彎症学会学術集会
2020 年 11 月 6-8 日
Web Live 開催

要　旨

【背景と目的】特発性側弯症は思春期女児に多く，脊柱が回旋しながら大きく弯曲し三次元的に変形する疾患であり，発症頻度は 2-3/100 人と非常に高い．治療は側弯角（コブ角）30°～40°で装具治療を開始するが，45°以上の進行例では内固定金属を使用した手術による矯正を行う．後方矯正固定術は，現在，最も代表的な手術法であり，背部からの後方アプローチによって展開し脊柱変形を三次元的に矯正する．変形の矯正に加えて，胸椎特発性側弯症矯正術の重要な目的の 1 つとして，肺機能低下の予防がある．

特発性側弯症患者は一般的に 10 代で外科的治療を受けるため，ピーク時の予備呼吸気量への影響を評価するには 5 年以上の追跡調査が必要である．しかしながら，胸椎特発性側弯症患者の外科的介入における肺機能への 10 年以上の長期的な影響に関しては，限られた報告しかない．特に，後方矯正固定術を行った胸椎特発性側弯症患者の肺機能について 10 年以上の長期追跡をした報告は非常に少ない．本研究の目的は，胸椎特発性側弯症患者に対する後方矯正固定術後 10 年以上の長期追跡が可能であった患者の肺機能を評価することである．特に，特発性側弯症に対する後方矯正固定術が肺機能低下をもたらすかに関して調査した．

【対象と方法】1991 年から 2005 年に当院で連続して後方矯正固定術を行った Lenke 分類タイプ 1-4 の特発性側弯症患者を対象として，後ろ向きに検討した．後方矯正固定術で治療した胸椎主カーブの特発性側弯症患者 35 名（男性 7 名，女性 28 名）を対象とした．立位全脊柱 X 線と肺機能検査結果を評価した．X 線側面像では，胸椎後弯（T5-12），腰椎前弯（L1-S1）を測定した．冠状面バランスは，C7 プラムラインから仙骨正中線までの左右方向の変位量により評価した．矢状面バランスは，S1 の上位椎体終板後縁から C7 プラムラインまでの変位量を sagittal vertical axis として測定して評価した．肺機能検査は術前および最終経過観察時に実施し，立位で努力性肺活量と 1 秒量の測定を行った．

【結果】手術時の平均年齢は 14.9 歳（12～19 歳）．平均追跡期間は 15.1 年（10～24 年）であった．最終経過観察時における患者の努力性肺活量と 1 秒量は予測値と比較して有意に減少したが（$p<0.001$，$p<0.001$），最終経過観察時の一秒率は基準値と有意な差がなかった（$p=0.25$）．術前の％努力性肺活量は 74.0％で，最終経過観察時には 76.4％であった．最終経過観察時の一秒率は 0.89 であった．最終経過観察時の努力性肺活量および一秒量は術前値よりも高かったが，統計的に有意ではなかった（それぞれ $p=0.22$，$p=0.08$）．また，努力性肺活量および一秒量の％予測値は，術前と最終経過観察時において，統計

的な差がなかった（それぞれ p＝0.63、p＝0.29）．しかし，術前に肺機能障害を呈していた患者では，最終経過観察時に努力性肺活量と一秒量がともに有意に増加した（それぞれ p＝0.01，p＝0.01）．肺機能検査と術前の X 線パラメーターとの間には有意な相関関係はなく，肺機能検査の変化量は手術による X 線の変化量や最終経過観察時の X 線測定値との間にも有意な相関関係はなかった．

【考察】最終経過観察時の％努力性肺活量の平均は 76.4％，一秒率は 0.89 であり，軽度の拘束性肺機能障害を示唆していたが，閉塞性障害はなかった．術前％肺活量が 74.0％であったことを考えると，胸椎思春期特発性側弯症に伴う拘束性肺機能障害が術前から存在していたことになる．また，術前から最終経過観察時までの肺機能検査値および％予測値の変化量を比較したところ，術前と最終経過観察時に有意な差はなかった．術前に軽度肺機能障害を呈していた患者では，最終経過観察時に努力性肺活量と一秒量がともに有意に増加した．これらの結果は，長期的（10 年以上）に，胸椎主カーブを持つ思春期特発性側弯症患者において，後方矯正固定術は肺機能を減少させないことを示している．術前に肺機能障害があった患者では，肺機能検査でいくつかの項目で有意な改善が見られたものの，肺機能検査と X 線パラメーターには有意な相関関係はなかった．これらの結果は，肺機能改善のないことが，もともとの変形の程度とは関係ないこと，さらに X 線上でより大きな矯正ができた患者が，肺機能の向上と結びついていなかったことを示唆している．また肺機能検査の改善を呈するような X 線上の矯正の閾値が存在しなかったことも示唆された．

【結論】10 年以上の長期追跡が可能だった胸椎特発性側弯症患者に対する後方矯正固定術の肺機能への効果を検証した．胸椎主カーブを持ち，後方矯正固定術を受けた特発性側弯症患者は，長期的には肺機能検査値およびその％予測値は術前測定値と同等であり，手術から 15 年後の肺機能は後方矯正固定術によって低下していなかった．

略　語　表

本文中および図中で使用した略語は以下のとおりである.

FEV_1（1 秒量）	forced expiratory volume in 1 second
FVC（努力性肺活量）	forced vital capacity
SVA（日本語名なし）	sagittal vertical axis

緒　言

脊柱側弯とは，前額面において脊柱が側方へ弯曲した状態をいうが，この脊柱側弯は機能的側弯症と構築性側弯症に大別される．機能性側弯症には，腰痛等に伴い体幹が側方へ変位する逃避性側弯や，脚長差や骨盤傾斜に伴う代償性側弯があり，構築性側弯症では，椎体の凸側方向への回旋を伴い脊柱が三次元的に変形する．構築性側弯症には，特発性側弯症，神経筋原性側弯症や先天性側弯症などの症候性側弯症，マルファン症候群に伴う間葉性側弯症，および加齢による椎間板変性を基盤として生じた変性側弯症があるが，このうち、特発性側弯症が全側弯症の 70～80％を占めている．

特発性側弯症には，3 歳未満の乳幼児に発症する乳幼児側弯症，3～10 歳に発症する学童期側弯症，11 歳以上の思春期に発症する思春期側弯症があるが，現在は，10 歳までに発症する特発性側弯症を早期発症側弯症として思春期側弯症と大きく 2 つに分類することが多い．

前述のように，思春期特発性側弯症は思春期女児に多く，脊柱が回旋しながら大きく弯曲し三次元的に変形する疾患であるが，その発症頻度は 2-3/100 人と非常に高い．その原因については未だ明らかにされていないが，これまでに幾つかの疾患感受性遺伝子が同定されている（Takahashi et al., 2011; Kou et al., 2013; Sharma et., al., 2015）．

X 線学的診断は，立位 X 線撮影において主たる弯曲（主カーブ）の上端に位置して傾斜が最も大きい椎体（上位終椎という）の椎体上面と，下端で傾斜が最も大きい椎体（下位終椎）の椎体下面に接線を引いて，その交わる角度である側弯角（コブ角；図 1）を基に，10° 以上を側弯症として診断している．



図 1. 側弯角（コブ角）の計測法

側弯症の治療は，10°～30°では X 線上の骨成熟度や身長の伸び，初潮開始年齢を参考にしながら注意深い経過観察を行う．側弯角 30°～40°では装具治療を開始するが，開始後側弯の進行がなく，骨盤部や手関節の骨端線の閉鎖による骨成熟の完了を確認した段階で装具治療を終了する．側弯角 45°以上の進行例では内固定金属を使用した手術を考慮する．

手術は，変形した脊柱の矯正と変形の進行防止が主目的となる．この他、外見上の心理的影響を考慮して手術を選択する場合や，心肺機能の悪化防止を目的に手術を実施する場合がある．

手術法は，前方法と後方法に大別される．胸椎に主カーブがある胸椎側弯症に対する前方法においては，開胸アプローチによって肋骨を切除し，固定範囲内の椎体と椎間板に到達する．椎間板を切除後に椎体プレートを設置し，各椎体プレートをロッドで連結して矯正する（図 2）．

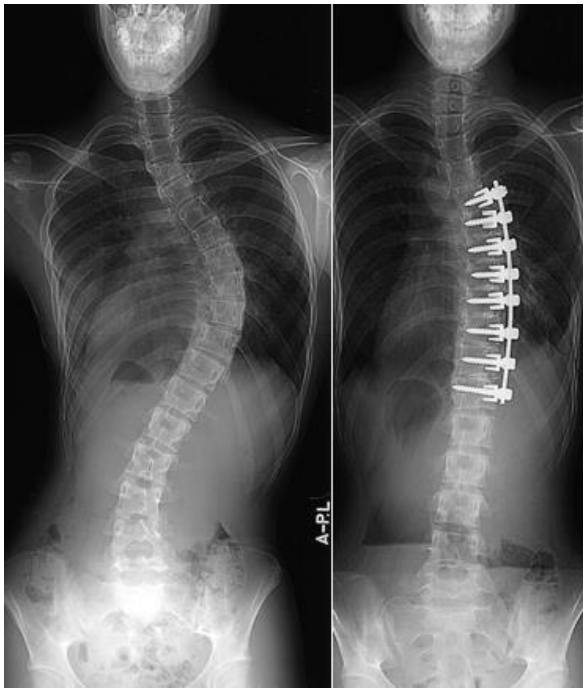


図 2．胸椎側弯症に対する前方法

主カーブが胸腰椎/腰椎にある側弯症に対しては，胸膜外後腹膜腔アプローチで当該椎体と椎間板に到達し，胸椎カーブと同様の操作を行う．

一方，後方矯正固定術は，背部からの後方正中アプローチによって展開し脊柱変形を矯正する（図 3）．

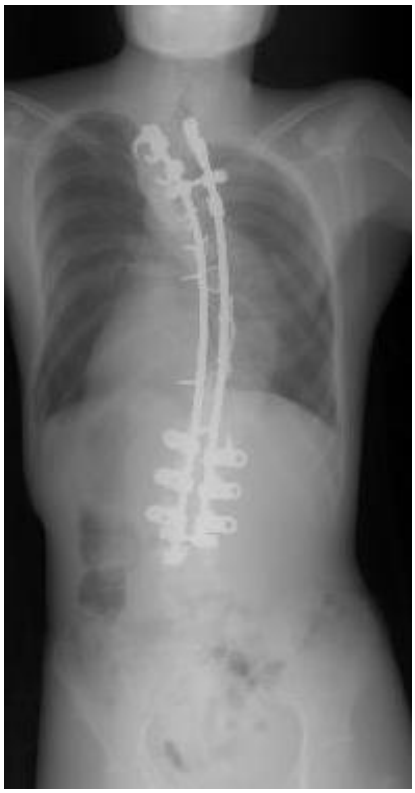


図 3．胸椎側弯症に対する後方法

側弯症手術においては，側弯矯正に加えて，脊柱全体のバランスを改善することで成人期以降における脊椎変性疾患の出現を抑えることも重要である．胸腰椎/腰椎側弯症では椎間板障害による腰痛の発生を予防し，胸椎側弯症においては，肺機能低下を予防することが重要である(Weinstein et al., 1981; Johnston et al., 2011)．実際，未治療の胸椎側弯症患者を対象とした長期追跡調査において，100°以上の胸椎カーブのある患者では肺機能の有意な低下が見られたとの報告がある(Weinstein et al., 1981)．このような高度側弯変形においては，胸郭にも顕著な変形が生じている（図 4）．

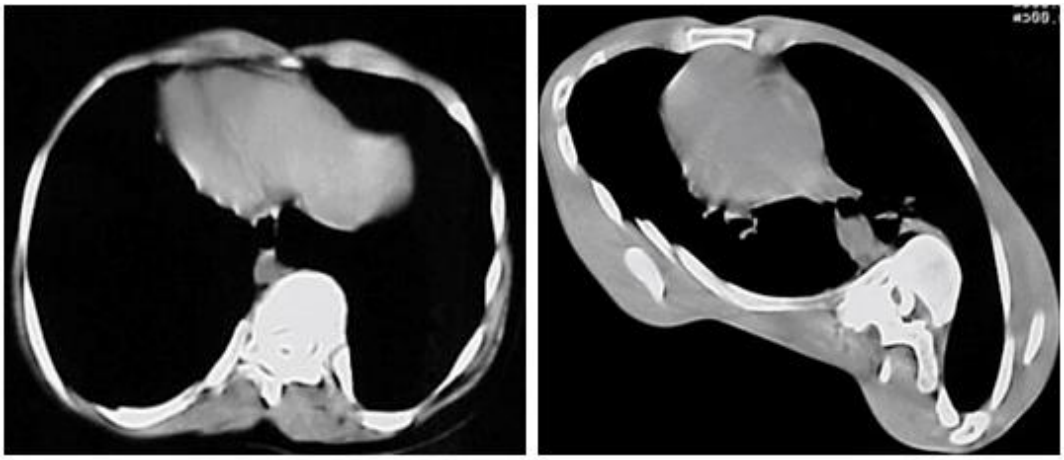


図 4　胸郭 CT 画像．軽度側弯（左）と高度側弯による顕著な胸郭変形（右）

肺機能検査における主な測定項目について，表 1 に示す．

表 1．肺機能検査における主な測定項目

	英語表記（略語）	解説
努力性肺活量	Forced vital capacity（FVC）	最大吸気位から精一杯呼出した量
予測肺活量	Predicted forced vital capacity（FVCPR）	性，年齢，身長から計算される標準的肺活量
パーセント肺活量	Percent-predicted forced vital capacity（%FVC）	予測肺活量に対する努力性肺活量の割合（80%以下の場合，拘束性換気障害）
1 秒量	Forced expiratory volume in one second（FEV_1）	努力性肺活量において，最初の 1 秒間に呼出した量
パーセント 1 秒量	Percent-predicted Forced expiratory volume in one second（$\%FEV_1$）	予測 1 秒量に対する実測 1 秒量の割合
1 秒率	Forced expiratory volume in 1 second as percent of predicted（$FEV_1\%$）=	努力性肺活量に対する 1 秒量の割合（70%以下の場合，閉塞性換気障害）

さらに，換気障害の分類について，図 5 に示す.

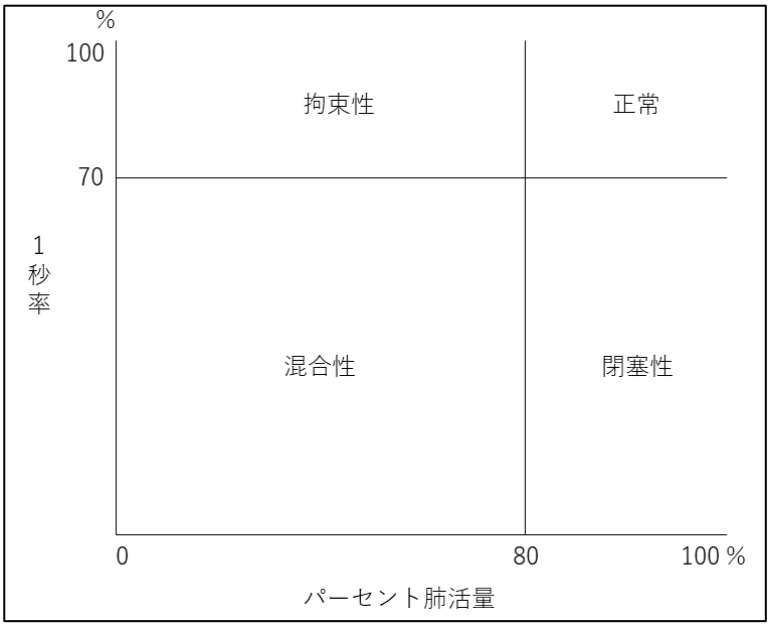


図 5　換気障害の分類

胸郭は前壁が胸骨と肋骨，側壁は肋骨，後壁が肋骨と肋骨に連結する脊柱からなる．側弯症では脊柱の回旋により側方へ移動するため，胸郭自体が押しつぶされるように変形し，凸側の肋骨は後方に突出する．胸郭の変形に伴い，胸郭容積の減少と胸壁の可動性の低下が生じて肺活量の減少する拘束性換気障害が出現するようになる．このように，側弯症においては拘束性換気障害が主体となるが，胸椎が前方に偏位する前弯変形を伴う胸椎側弯症では椎体が胸腔内に突出することで主気管支が機械的に圧迫されて扁平化し，閉塞性の換気障害が出現することもある．以上より，側弯症治療においては，胸郭変形に伴う拘束性換気障害についても考慮しながら治療方針を考える必要がある．

一般的に，特発性側弯症患者は 10 代で外科的治療を受けるため，手術が肺機能へ与える影響を評価するには，成人期以降にわたる 5 年以上の追跡調査が必要であると考えられる(Sudo et al., 2013a; Gitelman et al., 2011; Sudo et al., 2013b; Sudo et al., 2016)．しかしながら，胸椎特発性側弯症患者の手術介入に対して 10 年以上の長期的な肺機能調査を実施した報告例は限られているのが現状である

(Gitelman et al., 2011; Sudo et al., 2013b; Sudo et al., 2016; Nohara et al., 2015; Akazawa et al., 2018). 側弯症手術と肺機能を調査したこれまでの研究において，胸腰椎/腰椎側弯症患者における前方矯正固定術後の肺機能検査は，10 年以上の追跡調査では術前と有意な差がなかったとする報告がある(Sudo et al., 2013a; Ruiz-Juretschke et al., 2017; Gitelman et al., 2011). しかし，開胸前方アプローチによる前方矯正固定術においては，術後肺機能が低下したとする報告がある (Newton et al., 2005; Sudo et al., 2013b; Sudo et al., 2016).

後方矯正固定術後の肺機能については，10 年以上の長期追跡をした文献的報告例はこれまでに 3 編と非常に少ないが(Gitelman et al., 2011; Nohara et al., 2015; Akazawa et al., 2018), 肺機能は低下しなかったとされている. これらの報告から, 手術アプローチが胸椎特発性側弯症患者の術後肺機能に影響を与える重要な要因であることが推察される. 但し, これら後方矯正固定術後の肺機能を調査した研究の大きな課題として, 長期的に追跡し得た患者が 10%以下であったことや, 対象となる患者数が少なかったこと（7〜18 人）が挙げられる(Gitelman et al., 2011; Akazawa et al., 2018). さらに，現在実施されていない 50 年程度前の古い術式である，Harrington ロッドを用いて治療した患者を対象とした研究も含まれている (Akazawa et al., 2018).

そこで本研究の目的は，胸椎特発性側弯症に対する後方矯正固定術が肺機能に及ぼす影響を明らかにするために，後方矯正固定術後 10 年以上の長期経過観察が可能だった胸椎特発性側弯症患者における肺機能を X 線学的評価とともに調査することとした.

研　究　方　法

1991 年から 2005 年に連続して後方矯正固定術を行った Lenke 分類タイプ 1-4 の特発性側弯症患者を対象として，後ろ向きに調査した．Lenke 分類では，タイプ 1 は胸椎シングルカーブ，タイプ 2 は胸椎ダブルカーブ，タイプ 3 はメインが胸椎である胸腰椎/腰椎とのダブルカーブ，タイプ 4 はトリプルカーブ，タイプ 5 は胸腰椎/腰椎シングルカーブ，タイプ 6 は胸腰椎/腰椎がメインである胸椎とのダブルカーブを表す．

この研究は，北海道大学病院の倫理委員会で承認されており（承認番号 : 014-0370），人を対象とした医学系研究に関する倫理指針に従って実施した．また，説明と同意文書を全参加者から取得した．

除外基準は，症候性側弯症，神経筋原性側弯症，先天性側弯症，追跡期間が 10 年未満，及びタイプ 5、タイプ 6 特発性側弯症とした．対象となった患者全てにおいて肺疾患の既往はなかった．

手術は，全て ISOLA instrumentation system (DePuy AcroMed, Raynham, MA, USA) を用いて実施された．本システムは，腰椎に椎弓根スクリューを挿入し，胸椎にはフックとワイヤリングを用いて胸郭形成術を行わず後方矯正固定術を行うための手術用器械である．

本研究では X 線と肺機能検査を評価した．術前のデータは後ろ向きに検証し，最終経過観察時のデータは治療チームから独立した脊椎外科医が前向きに収集した．研究期間中に，胸椎主カーブを持つ（Lenke 分類タイプ 1-4），特発性側弯症患者計 50 名が後方矯正固定術を受けた．35 名の患者（男性 7 名，女性 28 名）から参加の同意が得られ，最低 10 年間の追跡調査を行った．

術前，術後，最終経過観察時に立位全脊柱 X 線正面像と側面像から各パラメーターを計測した．冠状断でのコブ角は近位部胸椎カーブ，胸椎主カーブ，胸腰椎/腰椎カーブを測定した．統計的比較の一貫性を保つために，術後，最終経過観察時の測定においても，術前 X 線と同じ終椎高位で測定した(Sudo et al., 2013a; Sudo et al., 2013b; Sudo et al., 2016; Sudo et al., 2018)．側面像では，胸椎後弯角（T5-12），腰椎前弯角（L1-S1）を測定した．冠状面バランスは，C7 プラムラインから仙骨正中線までの左右方向の変位量により評価した．矢状面バランスは，S1 の S1 上位椎体終板後縁から C7 プラムラインまでの変位量を sagittal vertical axis (SVA) として測定して評価した（図 6）．



図 6　冠状面および矢状面バランスの計測方法

術前および最終経過観察の肺機能検査では，立位で努力性肺活量（FVC）と 1 秒量（FEV_1）の測定を行った．各測定は 3 回繰り返し，最も高い容量と%値を使用した．FVC は最大吸気位時から努力呼出できた最大呼気量であり，FEV_1 は努力呼出した際の 1 秒間の呼気量である．

肺機能障害の重症度は，米国胸部学会のガイドラインに基づき，肺機能障害なしを%FVC が 80%以上，軽度の機能障害を%FVC が 65%から 80%以下，中等度の機能障害を%FVC が 50%から 65%以下，重度の機能障害を%FVC が 50%以下に分類した(Ruiz-Juretschke et al., 2017) (1986).

また，閉塞性換気障害は GOLD（Global Initiative for Chronic Obstructive Lung Disease）分類で評価した(Vogelmeier et al., 2017)．閉塞性肺疾患では FEV_1 が低下し，FEV_1/FVC が低下する．FEV_1/FVC＜0.7 がスパイロメトリーにおける閉塞性障害の基準であるが，更に閉塞性障害を%FEV_1 に基づく GOLD 分類を用いて，以下の 4 段階で評価した．すなわち，GOLD 1（%FEV_1≧80），GOLD 2（50＜%

FEV_1＜79%），GOLD 3（30≦%FEV_1≦49），GOLD 4（%FEV_1＜30）(Vogelmeier et al., 2017)である．

統計解析

すべての統計解析は，JMP Pro version 14.0 statistical software (SAS Institute, Cary, NC, USA)を用いて行った．肺機能検査および X 線の定量的変数の比較は，対応のある t 検定または Mann-Whitney U 検定を用いて行った．2 つの連続変数間の関係を評価するために，Pearson の相関係数分析を用いた．統計的有意水準を $p < 0.05$ と定義した．

研　究　結　果

患者背景因子

患者背景因子を表 2 にまとめた．手術時の平均年齢は 14.9 歳（12～19 歳），平均追跡期間は 15.1 年（10～24 年）であり，最終経過観察時の平均年齢は 34.1 歳（26～44 歳）であった．再手術症例はなかった．平均して 10.9 椎間（8～13 椎間）の矯正固定術が行われた．固定最上端椎体は，12 症例が T2，12 症例が T3，9 症例が T4，2 症例が T5 であった．固定最下端椎体は，2 症例が T12，7 症例が L1，8 症例が L2，18 症例が L3 であった．

表 2．患者背景因子

	平均 ± 標準偏差	範囲
手術時年齢（歳）	14.9 ± 2.0	12 － 19
最終経過観察時年齢（歳）	34.1 ± 4.8	26 － 44
リッサーサイン	3.8 ± 1.0	0 － 5
側弯範囲（終椎間）	9.3 ± 2.6	5 － 14
固定範囲（椎間）	10.9 ± 1.5	8 － 13
経過観察期間（年）	15.1 ± 4.4	10 － 24

肺機能

最終経過観察時の肺機能検査に関し，全 35 名の患者の肺機能検査値をスパイロメーターによる基準値（予測値）と比較した．最終経過観察時における患者の FVC および FEV_1 は，基準値と比較して有意に減少したが（$p<0.001$，$p<0.001$），最終経過観察時の FEV_1/FVC 値は基準値と有意な差がなかった（$p=0.25$）（表 3）．

表 3．最終経過観察時の患者 35 名の肺機能

	絶対値	基準値	P 値	% 予測値
FVC (L)	2.5 ± 0.6 (1.0 – 3.9)	3.3 ± 0.4 (2.6 – 4.7)	< 0.001	76.4 ± 16.0 (40 – 119)
FEV_1 (L)	2.2 ± 0.5 (1.3 – 3.4)	2.9 ± 0.3 (2.0 – 4.0)	< 0.001	82.8 ± 12.5 (44 – 104)
FEV_1 / FVC	0.89 ± 0.1 (0.72 – 1.22)	0.87 ± 0.1 (0.70 – 1.21)	0.25	

FVC, 努力性肺活量; FEV_1, 1 秒量.

平均 ± 標準偏差

次に，患者 35 名の術前，最終経過観察時の絶対値と予測値を解析した（表 4）.

表 4. 術前と最終経過観察時の肺機能の比較

	術前	最終経過観察時	P 値
FVC (L)	2.3 ± 0.7 (0.6 – 3.8)	2.5 ± 0.6 (1.0 – 3.9)	0.22
予測 FVC (L)	3.1 ± 0.5 (2.2 – 4.2)	3.3 ± 0.4 (2.6 – 4.7)	0.09
% FVC	74.0 ± 19.8 (15– 114)	76.4 ± 16.0 (40 – 119)	0.63
FEV_1 (L)	2.0 ± 0.6 (0.6 – 3.5)	2.2 ± 0.5 (1.3 –3.4)	0.08
予測 FEV_1 (L)	2.5 ± 1.0 (1.2 – 4.0)	2.9 ± 0.3 (2.0 – 4.0)	0.06
% FEV_1	91.8 ± 42.6 (15.4 – 203)	82.8 ± 12.5 (44– 104)	0.29
FEV_1 / FVC	0.86 ± 0.1 (0.59 – 1.02)	0.89 ± 0.1 (0.72 – 1.22)	0.14

FVC, 努力性肺活量; FEV_1, 1 秒量.

平均 ± 標準偏差

術後と最終経過観察時における FVC および FEV_1 は，いずれも術前の値よりも高かったが，統計学的有意な差はなかった（p＝0. 22，p＝0. 08）．術前と最終経過観察時における%FVC および%FEV_1 には，それぞれ統計的有意差はなかった（p＝0. 63 および p＝0. 29）．また，術前と最終経過観察時における FEV_1/FVC にも統計学的有意差はなかった（p=0. 14）．しかし，術前に肺機能障害を呈していた患者において，最終経過観察時に FVC と FEV_1 がともに有意に増加した（表 5）.

表 5. 術前肺機能障害のあった 20 例における術前と最終経過観察時の比較

	術前	最終経過観察時	P 値
FVC (L)	2.1 ± 0.6 (0.6 – 3.2)	2.3 ± 0.5 (1.0 – 9.9)	0.01
予測 FVC (L)	3.1 ± 0.5 (2.4 – 4.2)	3.3 ± 0.3 (2.6 – 3.8)	0.06
% FVC	66.1 ± 15.6 (15– 79)	70.7 ± 13.2 (40 – 92)	0.29
FEV_1 (L)	1.8 ± 0.5 (0.6 – 2.5)	2.1 ± 0.4 (1.3 – 2.6)	0.01
予測 FEV_1 (L)	2.6 ± 1.0 (1.2 – 4.1)	2.8 ± 0.3 (2.0 – 3.4)	0.12
% FEV_1	79.2 ± 37.7 (15.4 – 169)	81.1 ± 9.1 (59 – 93)	0.60
FEV_1 / FVC	0.87 ± 0.1 (0.59 – 1.02)	0.91 ± 0.1 (0.73 – 1.22)	0.22

FVC, 努力性肺活量; FEV_1, 1 秒量.
平均 ± 標準偏差

最後に，サンプルの代表性を分析するために，追跡調査を受けた 35 人の患者の術前肺機能を，追跡調査を受けなかった患者（n = 15）の術前肺機能と比較した(Ruiz-Juretschke et al., 2017)．追跡調査を受けた 35 人の患者と追跡調査を受けなかったした 15 人の患者との間で，術前肺機能検査の数値に有意な差はなかった（p＞0.05）（表 6）.

表 6．追跡調査を受けた 35 人の患者と追跡調査を受けなかった 15 人の術前肺機能の比較

	追跡調査を受けた 35 人	追跡調査を受けなかった 15 人	P 値
FVC (L)	2.3 ± 0.7 (0.6 – 3.8)	2.6 ± 0.7 (1.6 – 4.0)	0.23
予測 FVC (L)	3.1 ± 0.5 (2.2 – 4.2)	3.5 ± 0.6 (2.6 – 4.7)	0.06
% FVC	76.3 ± 16.2 (37.3 – 114.1)	75.0 ± 11.9 (48.0 – 88.3)	0.80
FEV_1 (L)	2.0 ± 0.6 (0.62 – 3.5)	2.2 ± 0.5 (1.4 – 3.0)	0.10
予測 FEV_1(L)	2.5 ± 1.0 (1.2 – 4.0)	3.0 ± 0.9 (1.2 – 3.9)	0.10
% FEV_1	91.8 ± 42.6 (15.4 – 203.0)	79.8 ± 28.9 (44.0 – 162.3)	0.12

FVC, 努力性肺活量; FEV_1, 1 秒量.
平均 ± 標準偏差

X 線画像

35 名の患者の胸椎主カーブは，術前平均 68.1°(42-122°)，近位部胸椎カーブは術前平均 34.6°(9-85°)，胸腰椎/腰椎カーブは術前平均 45.7°(14-82°)であった．側面像では，胸椎後弯は術前平均 16.2°（4-38°），腰椎前弯は術前平均 39.4°（20-56°）であった．冠状面と矢状面のバランスに関しては，C7 プラムラインの仙骨正中線からの変位量は平均 15.1mm（0-35mm），SVA は平均 17.5mm（-28-65mm）であった．研究に参加しなかった 15 名の患者と比較したところ，両群の術前値に統計的有意差はなかった（p＞0.05）．表 7 は，この比較に関するものと，研究対象となった患者の術後および最終経過観察時の X 線計測値の結果をまとめたものである(Ruiz-Juretschke et al., 2017).

表 7. 追跡調査を受けなかった症例と比較した研究参加者の X 線測定値

	追跡調査を受けなかった症例 (n=15)	研究参加者 (n=35)			
	術前	術前	術後	最終経過観察	P 値
近位胸椎カーブ (°)	27.1 ± 6.7 (17 – 35)	34.6 ± 20.3 (9 – 85)	17.5 ± 10.4 (5 – 52)	23.0 ± 5.8 (17 – 34)	0.47
主胸椎カーブ (°)	58.3 ± 5.1 (50 – 69)	68.1 ± 18.6 (42 – 122)	23.5 ± 2.0 (8 – 71)	28.9 ± 2.2 (10 – 72)	0.09
胸腰椎/腰椎カーブ (°)	36.8 ± 12.5 (17 – 55)	45.7 ± 14.4 (14 – 82)	22.1 ± 11.2 (4 – 46)	20.0 ± 10.2 (4 – 43)	0.06
胸椎後弯角 (T5-T12) (°)	17.1 ± 11.2 (-7 – 29)	16.2 ± 8.8 (4 – 38)	18.8 ± 9.0 (4 – 40)	21.3 ± 8.2 (5 – 42)	0.39
腰椎前弯各 (L1-S1) (°)	40.5 ± 10.6 (25 – 54)	39.4 ± 11.1 (20 – 56)	34.4 ± 10.9 (15 – 60)	36.9 ± 9.2 (13 – 55)	0.84
C7 プラムライン-仙骨正中線 (mm)	14 ± 5.4 (7 – 20)	15.1 ± 10.2 (0 – 35)	11.1 ± 7.5 (0 – 32)	13.5 ± 7.0 (0 – 30)	0.96
Sagittal vertical axis (mm)	19.6 ± 13.6 (5 – 35)	17.5 ± 25.5 (-28 – 65)	20.2 ± 22.7 (-40 – 60)	9.8 ± 28.1 (-43 – 62)	0.87

平均 ± 標準偏差

肺機能検査に改善がみられない原因が，術前の変形に起因するものであるかを判断するために，肺機能検査値と術前 X 線パラメーターとの相関を求めた．肺機能検査と術前 X 線パラメーターとの間には，有意な相関関係はなかった（表 8）．

表 8. 肺機能検査と術前 X 線パラメーターとの相関関係

	主胸椎カーブ		近位胸椎カーブ		胸腰椎/腰椎カーブ		胸椎後弯角		腰椎前弯角		C7 プラムライン−仙骨正中線		Sagittal vertical axis	
	r	p	r	p	r	p	r	p	r	p	r	p	r	p
FVC (L)	-0.42	0.06	-0.43	0.06	0.04	0.85	-0.19	0.41	-0.02	0.93	0.09	0.69	-0.27	0.25
%FVC	-0.37	0.11	-0.48	0.06	0.10	0.69	-0.10	0.67	-0.08	0.72	0.25	0.29	-0.38	0.10
FEV_1(L)	-0.40	0.08	-0.39	0.09	-0.09	0.70	-0.27	0.25	-0.13	0.57	0.09	0.70	0.03	0.27
%FEV_1	-0.03	0.89	-0.27	0.25	-0.16	0.50	-0.06	0.81	-0.27	0.24	0.33	0.15	0.03	0.27
FEV_1/FVC	0.09	0.71	0.18	0.46	-0.34	0.15	-0.22	0.35	-0.34	0.14	0.04	0.86	0.07	0.91

FVC, 努力性肺活量; FEV_1, 1 秒量.

さらに， X 線における改善の大きい患者が肺機能検査値の改善も大きいかを判断するために，肺機能検査値の変化量と手術による X 線の変化量との相関を求めた．その結果，肺機能検査の変化量と手術による X 線の変化量との間に有意な相関関係はなかった（表 9）.

表 9. 肺機能検査の変化量と手術による X 線の変化量との相関関係

	主胸椎カーブ		近位胸椎カーブ		胸腰椎/腰椎カーブ		胸椎後弯角		腰椎前弯角		C7 プラムライン−仙骨正中線		Sagittal vertical axis	
	r	p	r	p	r	p	r	p	r	p	r	p	r	p
FVC (L)	0.40	0.12	0.24	0.38	-0.32	0.22	-0.07	0.81	0.16	0.57	-0.03	0.91	0.40	0.12
%FVC	0.39	0.13	0.37	0.16	-0.34	0.20	-0.05	0.84	-0.12	0.66	-0.17	0.52	0.38	0.14
FEV_1(L)	0.34	0.20	0.23	0.38	-0.26	0.34	-0.02	0.94	0.05	0.85	-0.29	0.27	0.22	0.41
%FEV_1	0.01	0.97	0.21	0.44	-0.17	0.54	0.11	0.68	-0.11	0.68	-0.29	0.27	-0.12	0.65
FEV_1/FVC	0.12	0.66	0.09	0.75	-0.10	0.69	0.12	0.66	-0.08	0.78	-0.45	0.08	-0.11	0.68

FVC, 努力性肺活量; FEV_1, 1 秒量.

最後に，肺機能検査の経過中の改善が術後 X 線パラメーターと関連があるかを判断するために，肺機能検査値の変化量と最終経過観察時の X 線パラメータ

ーとの相関を求めた．その結果，肺機能検査の変化量と最終経過観察時の X 線パラメーターの変化量との間に有意な相関関係はなかった（表 10）.

表 10. 肺機能検査の変化量と最終経過観察時の X 線パラメーターとの相関関係

	主胸椎カーブ		近位胸椎カーブ		胸腰椎/腰椎カーブ		胸椎後弯角		腰椎前弯角		C7 プラムライン−仙骨正中線		Sagittal vertical axis	
	r	p	r	p	r	p	r	p	r	p	r	p	r	p
FVC (L)	0.24	0.31	0.32	0.17	0.28	0.23	0.07	0.76	0.35	0.13	0.24	0.32	0.21	0.38
%FVC	0.14	0.57	0.40	0.08	-0.04	0.85	0.13	0.58	0.06	0.81	0.16	0.49	-0.04	0.86
FEV_1(L)	0.33	0.15	0.17	0.48	0.38	0.10	0.20	0.41	0.35	0.13	0.16	0.49	0.27	0.24
%FEV_1	0.39	0.09	0.14	0.55	0.21	0.38	0.16	0.51	0.05	0.85	0.20	0.41	0.20	0.40
FEV_1/FVC	0.38	0.10	-0.11	0.66	0.30	0.20	0.25	0.30	0.27	0.24	0.09	0.72	0.23	0.32

FVC, 努力性肺活量; FEV_1, 1 秒量.

考　察

胸椎思春期特発性側弯症は，胸椎に主カーブがある代表的側弯症であり，発生頻度が最も高い．胸郭変形は側弯の高位や進行速度，胸椎前弯の程度に影響を受けるが，胸椎思春期特発性側弯症は，胸椎高位に変形があるため肺機能へ与える影響が高いと考えられ，実際，胸椎特発性側弯症患者は肺機能の状態が側弯角と相関している可能性があることが示唆されている(Ruiz-Juretschke et al., 2017; Huh et al., 2015)．さらに，外科的介入が術後の肺機能にどのような影響を与えるかについて調査することも意義深いと考えられる．

以上より，本研究では，その標準的な手術アプローチである後方矯正固定術を受けた患者に対して X 線学的術後成績とともに肺機能を長期的に調査した．その結果，35 名に対し（追跡率 70%）術前と比較して術後 15 年にわたり肺機能が低下していないことが明らかとなった．さらに，術前肺機能が低下していた症例においては，FVC と FEV_1 がともに最終経過観察時に有意に上昇していた．この結果から，後方アプローチによる矯正固定術自体が肺機能を低下させないことが示された．

肺胞は，5〜8 歳頃まで発達し (Gitelman et al., 2011; Ruiz-Juretschke et al., 2017; Thurlbeck, 1982)，その後，肺機能や呼吸器官の成熟が 17〜23 歳まで進むとされる(Ruiz-Juretschke et al., 2017; Gitelman et al., 2011; Wang et al., 1993)．このため，肺機能を調査する場合，成人期以降までの肺機能状態を長期的に調査することが重要であると考えられる．また，肺機能は 35 歳を過ぎると徐々に低下すると報告されている(Gitelman et al., 2011)．本研究において，最終経過観察時の平均年齢が 34 歳であったことは，肺機能がピークを迎える最適な時期に評価することができたと考えられる．

特発性側弯症における各種手術法に対する X 線学的矯正率や患者立脚型評価を行った研究は多いが(Sudo et al., 2018; Iwata et al., 2020; Sudo et al., 2021)，手術アプローチが肺機能に与える影響に関して調査した文献的報告例は少ないのが現状である．

特に，後方アプローチにおいて長期的に（10 年以上）肺機能を評価した文献的報告は限られている(Gitelman et al., 2011; Nohara et al., 2015; Akazawa et al., 2018)．Gitelman らは，後方矯正固定術を受けた思春期特発性側弯症患者を 10 年間追跡調査し，術後 10 年まで FVC と FEV_1 の両方が有意に増加していたが，%FVC と %FEV_1 には変化がなかったことを初めて報告した(Gitelman et al., 2011)．しかし，Gitelman らの研究の大きな限界は，手術を行った思春期特発性側弯症患者の約 7%しか長期追跡調査ができなかったこと，さらに，胸腰椎/腰椎側弯症患者が多数を占めて，胸椎主カーブを有する患者が 7 人しか含まれて

いなかったことが挙げられる(Gitelman et al., 2011)．このため，胸椎側弯症に対する肺機能を術後十分に調査した研究とはいえない． Akazawa らは，Harrington ロッドを用いた後方矯正固定術を受けた特発性側弯症患者 18 人を調査したところ，27.7%に拘束性換気障害がみられたと報告した(Akazawa et al., 2018)．Akazawa らの研究の平均追跡期間は 35 年と長期ではあったが，術前の肺機能検査のデータは入手できず，追跡率はわずか 9.2%であったと報告している(Akazawa et al., 2018)．また，現在実施されていない 50 年ほど前の術式に関する報告であったことも研究の限界として挙げられている．

一方，Nohara らは，本研究と同じ術式である，椎弓根スクリューとワイヤリングを用いたハイブリッドの後方矯正固定術を受けた胸椎特発性側弯症（Lenke 分類タイプ 1 または 2）患者 30 人において，最終経過観察時に肺機能が改善していたことを報告している(Nohara et al., 2015)．術前の FVC と%FEV_1 が平均 14 年の経過観察で有意に改善しており（2.5L に対して 2.7L，84%に対して 87%），追跡率は記載されていないが，胸椎側弯症に対する後方矯正固定術において，肺機能を長期的に，かつ比較的多人数に対して調査した初めての文献的報告であるといえる(Nohara et al., 2015)．

本研究においては，最終経過観察時の%FVC の平均は 76.4%，FEV_1/FVC 値は 0.89 であり，軽度の拘束性肺機能障害を示唆する値であったが，閉塞性障害を示唆する値はなかった．よって，特発性側弯症に特徴的な肺機能障害を呈していたといえる．本研究における術前平均%FVC が 74.0%であったことを考えると，胸椎特発性側弯症に伴う拘束性肺機能障害が術前から存在していたことを示している．

また，術前から最終経過観察時までの肺機能検査値および%予測値の変化量を比較したところ，術前と最終経過観察時に有意な差はなかった．さらに，術前に肺機能障害を呈していた患者に限定して解析した場合，最終経過観察時に FVC と FEV_1 がともに有意に増加していた．以上の結果は，胸椎主カーブを持つ特発性側弯症患者において，後方矯正固定術が長期（10 年以上）にわたり，肺機能を低下させないことを示唆している．

さらに，各肺機能検査値と X 線パラメーター値の間には有意な相関関係はなかった．これらの結果は，X 線上の変形矯正が肺機能の向上とは関係していないことを示唆している．さらに，肺機能検査の改善を呈するような X 線上の矯正の閾値

が存在しなかったことも明らかになった．

但し，術前と比較して肺機能が改善しているが，測定された評価指標が肺機能の変化を検出するのに十分な感度を持っていなかった可能性や，術後に胸郭の変形が改善したとしても，術前に肺胞が十分発達していないと肺が正常な状

態に戻ることができずに，その結果として肺機能が改善しなかった可能性も考えられる．

次に，前方アプローチと肺機能を長期的に調査した研究について紹介する．Sudo らは，Lenke タイプ 5 胸腰椎/腰椎特発性側弯症に対して前方矯正固定術を行い，10 年以上の長期経過観察を行なった 30 症例における X 線学的評価と肺機能評価の結果を報告している (Sudo et al., 2013a)．平均追跡期間は 17 年，追跡時平均年齢は 32 歳であり，追跡率は 100％であった．術前の平均 FVC（2.7L）と平均 FEV_1（2.3L）は，最終経過観察時の測定値（それぞれ 2.8L と 2.4L）と有意な差はなかった (Sudo et al., 2013a)．同様に，術前の平均％FVC（94％）および平均%FEV_1（82％）は，最終経過観察時の測定値（それぞれ 92％および 82％）と有意な差がなかったとも報告している(Sudo et al., 2013a)．

同様に，Ruiz-Juretschke らも，24 名の胸腰椎/腰椎カーブ特発性側弯症患者に対して前方アプローチによる手術を行い，18 年間追跡調査を実施している．追跡率は 34％であった．肺機能は術前と比べて変化なく，大きな肺機能障害は見られなかったと報告している (Ruiz-Juretschke et al., 2017)．

胸椎側弯症に対する前方アプローチについての報告もある．Sudo らは，Lenke タイプ 1 胸椎側弯症に対して前方矯正固定術を施行した 25 例の長期的な術後肺機能を評価している (Sudo et al., 2013b)．平均追跡期間は 15 年，最終経過観察時の平均年齢は 32 歳であり，追跡率は 100％であった．術前の平均 FVC（2.4L）と平均 FEV_1（2.1L）は，最終経過観察時の測定値（それぞれ 2.4L と 2.1L）と有意差はなかったが，術前の平均％FVC（81％）および平均%FEV_1（80％）は，最終経過観察時には有意に低下していたと報告している（それぞれ 73％および 69％）(Sudo et al., 2013b)．

さらに，41 名の胸椎特発性側弯症患者を対象とした国際多施設研究が実施されている．平均経過観察期間は 14 年であり，追跡率は 100％であった．最終経過観察時において，予測 FVC との割合が術前 80％から術後 72％に低下しており，Sudo らの先行研究(Sudo et al., 2013b)を支持するものであったと報告している(Sudo et al., 2016)．

以上，過去の文献的報告例と本研究結果の概要を表 11 に示す．

表 11. 特発性側弯症に対する手術法と肺機能に関する文献的報告

文献	手術法	平均調査期間	調査人数（追跡率）	肺機能
Sudo et al., 2013a	胸腰椎/腰椎特発性側弯症に対する前方法（開胸なし）	17 年	30 人（100%）	術前と比べて変化なし
Ruiz-Juretschke et al., 2017	胸腰椎/腰椎特発性側弯症に対する前方法（開胸なし）	18 年	18 人（34%）	術前と比べて変化なし
Sudo et al., 2013b	胸椎特発性側弯症に対する前方法（開胸あり）	15 年	25 人（100%）	術前と比べて低下
Sudo et al., 2016	胸椎特発性側弯症に対する前方法（開胸あり）	14 年	41 人（100%）	術前と比べて低下
Gitelman et al., 2011	胸椎主カーブに対する後方法	10 年	7 人（7%）	術前と比べて変化なし
Akazawa et al., 2018	胸椎主カーブに対する Harrington ロッドを用いた後方法	35 年	18 人（9%）	28%に拘束性換気障害あり（術前との比較はなし）
Nohara et al., 2015	胸椎主カーブに対する後方法	14 年	14 人（記載なし）	術前と比べて改善
本研究	胸椎主カーブに対する後方法	15 年	35 人（70%）	術前と比べて変化なし（術前肺機能障害例においては術前と比べて改善）

これらの知見は，特発性側弯症患者に対するいくつかの手術方法の中で，胸椎特発性側弯症に対する開胸を伴う前方アプローチが，長期的に肺機能に影響を与える可能性が高いことを示唆している．

現在，胸椎側弯症に対して後方アプローチが主流になったことの背景に，前方アプローチよりも脊柱への展開が容易であり，胸椎椎弓根スクリューの普及や後方骨切り術の導入に伴う後方矯正固定術の成績向上が挙げられているが，今後は，本知見によって得られた肺機能低下の可能性が後方アプローチでは低いことも後方法を選択する大きな理由となることが予想される．

本研究の強みは，平均経過観察期間が術後 15 年と長いことに加え，思春期特発性側弯症に対して後方矯正固定術を実施し，肺機能を調査した文献的報告例の中で調査人数が最も多く，追跡率が最も高かった（70%）ことが挙げられる．

また，本研究では術前の肺機能検査値と X 線学的パラメーターが，すべての測定値で経過観察を実施しなかった症例群と統計学的に差がなく類似していた．このことは，今回の解析対象集団が後方アプローチによる手術を受けた患者を代表した集団であったと考えている．

一方で，本研究には挙げるべき幾つかの限界を指摘しておく必要がある．まず，本研究の手術方法において，腰椎レベルでは椎弓根スクリュー，胸椎ではフックとワイヤリングを使用して，それらをロッドで連結して矯正操作を行うハイブリッド法と呼ばれる後方法が採用されていることである．本術式は 2000 年より以前に標準的に採用されていた後方アプローチによる術式であるが，現在の標準術式は，胸椎から腰椎すべてに椎弓根スクリューを設置し骨切りを併用する，より矯正率の高い手術法へと変遷している（図 7）．従って，現在採用されている後方矯正固定術による肺機能への長期的な影響は不明といえる．本研究結果では矯正率と肺機能には相関はなかったが，より矯正率の高い現在の術式によって胸郭の変形についても改善されることで，最終経過観察時の肺機能がより改善する可能があるかもしれない．今後，こうした現在の手術法における患者群を対象にした長期肺機能調査への展開が期待される．

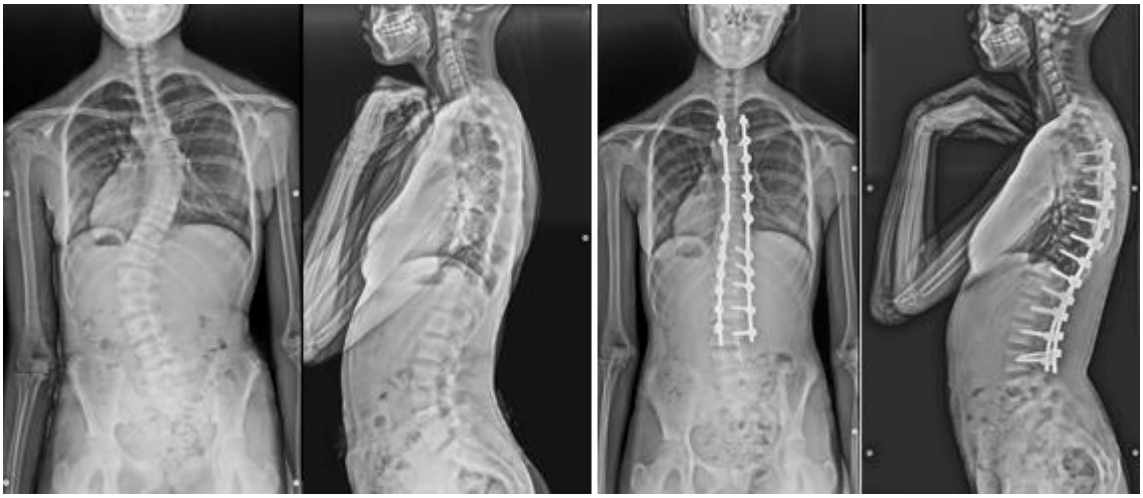


図 7.　特発性側弯症に対する現在の標準術式．胸椎から腰椎すべてに椎弓根スクリューを設置し，骨切りを併用することでより高い矯正率を獲得できる．

2 つ目に，今回の研究では，手術が肺機能に及ぼす影響のみを評価している．痛み，自己イメージや手術に対する患者満足度などの患者立脚型の臨床的評価項目は含まれていない．現在の臨床研究の多くは，患者立脚型評価を重視しており，側弯症の術後評価においても同様であるため(Sudo et al., 2018)，側弯角，肺機能評価，患者満足度等との相互の関連に関する調査が期待される．

3 つ目に，追跡できた 35 人の患者と追跡できなかった 15 人の患者との間で，予測 FVC と胸腰椎/腰椎カーブの間に有意な差はなかったが，p 値は有意水準に近い状態であった．胸腰椎/腰椎カーブと肺機能の間に明確な因果関係を指摘する要因はないと考えているが，この統計学的解析結果は本研究の解析対象集団に潜在的な偏りがある可能性を示している．

最後に，側弯症患者においては同年齢の正常児と比べて側弯の分，身長が低い傾向がみられるが，本研究においてはアームスパン（両上肢を左右に広げた際の両中指間の距離）を用いた補正式は用いず，実身長をそのまま採用している．よって，パーセント肺活量が本来の値と異なる可能性がある．しかしながら，本研究については，術前後で同じ式を用いて算出しており，さらに本施設で実施した特発性側弯症に対して前方法を行い肺機能を長期的に調査した研究においても同じ式を用いているため (Sudo et al., 2013a; Sudo et al., 2013b; Sudo et al., 2016)，当施設における後方法の縦断的調査や前方法と後方法を比較検討する場合においては，その影響は少ないと考えている．

結　論

- 特発性側弯症は思春期女児に多く，脊柱が回旋しながら大きく弯曲し三次元的に変形する疾患である．

- 後方矯正固定術は，現在，最も代表的な手術法であり，背部からの後方正中アプローチによって展開し脊柱変形を三次元的に矯正する．外見上の変形を治すことに加えて，胸椎側弯症においては肺機能低下を予防することが代表的な手術目的とされる．

- 一般的に，10 代で外科的治療を受けるため，手術が肺機能へ与える影響を評価するには成人期以降にわたる 5 年以上の追跡調査が必要であると考え

- られる．しかしながら，胸椎特発性側弯症患者の手術介入に対して 10 年以上の長期的な肺機能調査を実施した報告例は限られている．

- 本研究において，10 年以上の長期追跡が可能だった胸椎特発性側弯症患者に対する後方矯正固定術後の肺機能を評価した．

- 35 名に対して平均 15.1 年の追跡調査行った（追跡率 70%）．最終経過観察時における努力性肺活量と 1 秒量は予測値と比較して有意に減少していたが，一秒率は基準値と有意な差がなかった．

- 最終経過観察時の努力性肺活量および一秒量は術前値よりも高かったが，統計的に有意ではなかった．また，努力性肺活量および一秒量の%予測値は，術前と最終経過観察時において差がなかった．しかし，術前に肺機能障害を呈していた患者に限れば，最終経過観察時に努力性肺活量と一秒量がともに有意に増加していた．

- 胸椎主カーブに対して後方矯正固定術を受けた特発性側弯症患者は，長期的には肺機能検査値およびその%予測値は術前測定値と同等であり，手術から 15 年後の肺機能は後方矯正固定術によって低下していなかった．

- 本研究は，思春期特発性側弯症に対して後方矯正固定術を実施し，肺機能を調査した文献的報告例の中で調査人数が最も多く，追跡率が最も高い研究である．

- 本研究では術前の肺機能検査値と X 線学的パラメーターが，すべての測定値で経過観察を実施しなかった症例群と類似していた．このことは今回の解析対象集団が後方アプローチによる手術を受けた患者を代表した集団であると考えられた．

- 現在，胸椎側弯症に対して後方アプローチが主流になったことの背景に，前方アプローチよりも脊柱への展開が容易であり，胸椎椎弓根スクリューの普及や後方骨切り術の導入に伴う後方矯正固定術の成績向上が挙げられているが，今後は本知見によって得られた肺機能低下の可能性が後方アプローチでは低いことも後方法を選択する大きな理由となることが予想される．

- 本研究の手術方法において，腰椎レベルでは椎弓根スクリュー，胸椎ではフックとワイヤリングが使用されている．本術式は 2000 年より以前に標準的に採用されていた後方アプローチによる術式であるが，現在の標準術式は，胸椎から腰椎すべてに椎弓根スクリューを設置する，より矯正率の高い手術法に変遷している．従って，現在採用されている後方矯正固定術による肺機能への長期的な影響は不明といえる．今後，こうした現在の手術法における患者群を対象にした長期肺機能調査への展開が期待される．

謝　辞

本論文は，筆者が北海道大学大学院医学研究院専門医学系部門機能再生医学分野整形外科学教室博士課程在学中に行った研究をまとめたものです．本研究に関して，ご指導ご鞭撻を頂きました整形外科学教室岩崎倫政教授を始め，教室の諸先生に深謝致します．

また，これまでの研究課程において直接のご指導を賜りました北海道大学大学院医学研究院脊椎・脊髄先端医学分野の須藤英毅特任教授に心よりの感謝を申し上げます．

さらに，本研究に協力していただいた患者の皆様にも感謝致します．

利　益　相　反

本研究では，利益相反関係にある企業，組織等はありません.

引 用 文 献

American Thoracic Society (1986). Evaluation of impairment/disability secondary to respiratory disorders. American Thoracic Society. Am. Rev. Respir. Dis. *133*, 1205-1209.

Akazawa, T., Kuroya, S., Iinuma, M., Asano, K., Torii, Y., Umehara, T., Kotani, T., Sakuma, T., Minami, S., Orita, S.*, et al.* (2018). Pulmonary function and thoracic deformities in adolescent idiopathic scoliosis 27 years or longer after spinal fusion with Harrington instrument. J. Orthop. Sci. *23*, 45-50.

Gitelman, Y., Lenke, L.G., Bridwell, K.H., Auerbach, J.D., and Sides, B.A. (2011). Pulmonary function in adolescent idiopathic scoliosis relative to the surgical procedure: a 10-year follow-up analysis. Spine (Phila Pa 1976) *36*, 1665-1672.

Huh, S., Eun, L.Y., Kim, N.K., Jung, J.W., Choi, J.Y., and Kim, H.S. (2015). Cardiopulmonary function and scoliosis severity in idiopathic scoliosis children. Korean J. Pediatr. *58*, 218-223.

Iwata A, Sudo H, Abumi K, Ito M, Yamada K, Iwasaki N. (2020). Impact of lowest instrumented vertebra tilt and rotation on uninstrumented lumbar curve and L4 tilt in thoracic adolescent idiopathic scoliosis. J Neurosurg Spine, 2020 Jun 12;1-9. Online ahead of print.

Johnston, C.E., Richards, B.S., Sucato, D.J., Bridwell, K.H., Lenke, L.G., and Erickson, M. (2011). Correlation of preoperative deformity magnitude and pulmonary function tests in adolescent idiopathic scoliosis. Spine (Phila Pa 1976) *36*, 1096-1102.

Kou, I., Takahashi, Y., Johnson, T.A., Takahashi, A., Guo, L., Dai, J., Qiu, X., Sharma, S., Takimoto, A., Ogura, Y., *et al*. Genetic variants in GPR126 are associated with adolescent idiopathic scoliosis. Nat Genet. (2013) *45*,676-679.

Newton, P.O., Faro, F.D., Gollogly, S., Betz, R.R., Lenke, L.G., and Lowe, T.G. (2005). Results of preoperative pulmonary function testing of adolescents with idiopathic scoliosis. A study of six hundred and thirty-one patients. J. Bone Joint Surg. Am. *87*, 1937-1946.

Nohara, A., Kawakami, N., Saito, T., Tsuji, T., Ohara, T., Suzuki, Y., Tauchi, R., and Kawakami, K. (2015). Comparison of Surgical Outcomes Between Anterior Fusion and Posterior Fusion in Patients With AIS Lenke Type 1 or 2 that Underwent Selective Thoracic Fusion -Long-term Follow-up Study Longer Than 10 Postoperative Years. Spine (Phila Pa 1976) *40*, 1681-1689.

Ruiz-Juretschke, C., Pizones, J., Delfino, R., Sánchez-Mariscal, F., Zúñiga, L., and Izquierdo, E. (2017). Long-term Pulmonary Function After Open Anterior Thoracolumbar Surgery in Thoracolumbar/Lumbar Idiopathic Adolescent Scoliosis. Spine (Phila Pa 1976) *42*, 1241-1247.

Sharma, S., Londono, D., Eckalbar, W.L., Gao, X., Zhang, D., Mauldin, K., Kou, I., Takahashi, A., Matsumoto, M., Kamiy,a N., *et al*. (2015). A PAX1 enhancer locus is associated with susceptibility to idiopathic scoliosis in females. Nat Commun *6*,6452.

Sudo, H., Abe, Y., Kokabu, T., Kuroki, K., Iwata, A., and Iwasaki, N. (2018). Impact of Multilevel Facetectomy and Rod Curvature on Anatomical Spinal Reconstruction in Thoracic Adolescent Idiopathic Scoliosis. Spine (Phila Pa 1976) *43*, E1135-e1142.

Sudo, H., Ito, M., Kaneda, K., Shono, Y., and Abumi, K. (2013a). Long-term outcomes of anterior dual-rod instrumentation for thoracolumbar and lumbar curves in adolescent idiopathic scoliosis: a twelve to twenty-three-year follow-up study. J. Bone Joint Surg. Am. *95*, e49.

Sudo, H., Ito, M., Kaneda, K., Shono, Y., Takahata, M., and Abumi, K. (2013b). Long-term outcomes of anterior spinal fusion for treating thoracic adolescent idiopathic scoliosis curves: average 15-year follow-up analysis. Spine (Phila Pa 1976) *38*, 819-826.

Sudo, H.S., Mayer, M.M., Kaneda, K.K., Núñez-Pereira, S., Shono, S.Y., Hitzl, W.H., Iwasaki, N.I., and Koller, H.K. (2016). Maintenance of spontaneous lumbar curve correction following thoracic fusion of main thoracic curves in adolescent idiopathic scoliosis. Bone Joint J. *98-b*, 997-1002.

Sudo, H., Abe, Y., Kokabu, T., Kuroki, K., Iwata, A., Iwasaki, N. (2018). Impact of

multilevel facetectomy and rod curvature on anatomical spinal reconstruction in thoracic adolescent idiopathic scoliosis. Spine (Phila Pa 1976) *43*, E1135-1142.

Sudo, H., Tachi, H., Kokabu, T., Yamada, K., Iwata, A., Endo, T., Takahata, M., Abe, Y., Iwasaki, N. (2021). In vivo deformation of anatomically pre-bent rods in thoracic adolescent idiopathic scoliosis. Sci Rep *11*(1):12622.

Takahashi, Y., Kou, I., Takahashi, A., Johnson, T.,A., Kono, K., Kawakami, N., Uno, K., Ito, M., Minami, S., Yanagida, H., et al. A genome-wide association study identifies common variants near LBX1 associated with adolescent idiopathic scoliosis. (2011). Nat Genet *23*, 1237-1240.

Thurlbeck, W.M. (1982). Postnatal human lung growth. Thorax *37*, 564-571.

Vogelmeier, C.F., Criner, G.J., Martinez, F.J., Anzueto, A., Barnes, P.J., Bourbeau, J., Celli, B.R., Chen, R., Decramer, M., Fabbri, L.M.*, et al.* (2017). Global Strategy for the Diagnosis, Management, and Prevention of Chronic Obstructive Lung Disease 2017 Report. GOLD Executive Summary. Am. J. Respir. Crit. Care Med. *195*, 557-582.

Wang, X., Dockery, D.W., Wypij, D., Gold, D.R., Speizer, F.E., Ware, J.H., and Ferris, B.G., Jr. (1993). Pulmonary function growth velocity in children 6 to 18 years of age. Am. Rev. Respir. Dis. *148*, 1502-1508.

Weinstein, S.L., Zavala, D.C., and Ponseti, I.V. (1981). Idiopathic scoliosis: long-term follow-up and prognosis in untreated patients. J. Bone Joint Surg. Am. *63*, 702-712.