

報 告

漸増シャトルウォーキングテストにおける 酸素摂取量の直線的増加に関する研究 —最高酸素摂取量は総歩行距離から予測可能か？*—

有 薦 信一¹⁾ 高 橋 哲也¹⁾ 熊 丸めぐみ¹⁾ 畠 地 萌¹⁾
安 達 仁²⁾ 千 住 秀 明³⁾ 谷 口 興一²⁾

要旨

閉塞性肺疾患患者の運動耐容能評価用に開発された漸増シャトルウォーキングテスト (ISWT) は最高酸素摂取量 (peak $\dot{V}O_2$) を一次回帰直線式から予測できるとされているが、今までに ISWT 中の酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) 効率を連続的に 1 呼吸ずつ測定した研究ではなく、実際に ISWT 中の $\dot{V}O_2$ が直線的に増加するかどうかは疑問である。そこで、本研究の目的は、ISWT 中の $\dot{V}O_2$ 増加の直線性を検討することである。健常人 12 例に対し、ISWT とトレッドミル上での ISWT の負荷プロトコルを用いた運動負荷試験 (TET) を無作為の順番で行った。両テスト中は $\dot{V}O_2$ をポータブル呼気ガス分析装置により breath by breath 法を用いて測定した。ISWT と TET 中の $\dot{V}O_2$ と総歩行時間又は総歩行距離からの一次回帰直線式を算出し、peak $\dot{V}O_2$ の実測値と予測値を比較した。その結果、実測 peak $\dot{V}O_2$ は総歩行時間から求めた予測 peak $\dot{V}O_2$ より有意に 1 Met 以上高く、一方、総歩行距離からの予測 peak $\dot{V}O_2$ とは 1 ml/kg/min 程度しか差を認めなかった。これらの結果から、ISWT の結果から peak $\dot{V}O_2$ を予測する場合は総歩行距離を用いることが望ましいと考えられた。

キーワード 漸増シャトルウォーキングテスト、酸素摂取量、直線的増加

はじめに

呼吸器疾患患者や心疾患患者に対する運動耐容能評価は、患者の最大運動能力の把握に加えて、運動制限因子の検出や運動処方、さらに薬物療法や運動療法などの治療効果判定にも行われる。現在、広く用いられている運動耐容能評価法には、呼気ガス分析を併用する心肺運動負荷試験をはじめ、6 分間歩行テスト (Six Minutes

Walking Test; 6MWT) などのフィールドウォーキングテストがある。呼気ガス分析を併用した心肺運動負荷試験では正確な運動耐容能評価が可能な反面、使用する呼気ガス分析装置やトレッドミルなどの機器は高額であり、かつ、熟練したスタッフを必要とすることから、全ての施設で実施できるとは限らない。一方、6MWT は比較的実施が容易で、特別な器具や装置を必要としないことや、歩行という日常生活動作によって評価する利点をもち、臨床や研究の場で広く用いられている¹⁾。しかし、6MWT も負荷が定量化されていない点や、患者の意欲や慣れによって結果が左右するといった標準化の欠如の問題が指摘されている²⁾。これら 6MWT の問題を補い、検査手順が標準化された漸増シャトルウォーキングテスト (Incremental Shuttle Walking Test; ISWT) が、1991 年に Singh らによって開発され、注目を浴びている³⁾。その理由として、ISWT は漸増負荷プロトコルを用いた最大負荷テストであり、信頼性や妥当性が確認されているためである³⁻⁵⁾。また、Singh らは、ISWT は総歩行距離から最高酸素摂取量 (peak $\dot{V}O_2$) を一次回帰直線式で予測できると報告している⁴⁾。しか

* Assessment of Increase Pattern of Oxygen Consumption during the Incremental Shuttle Walking Test: Is Peak Oxygen Consumption Really Predictable from the Total Walking Distance of the Incremental Shuttle Walking Test?

1) 群馬県立心臓血管センター 心臓リハビリテーション室
(〒371-0004 群馬県前橋市亀泉町甲3-12)

Shin-ichi Arizono, RPT, Tetsuya Takahashi, RPT, MSc, Megumi Kumamaru, RPT, Megumu Azechi, RN: Division of Cardiopulmonary Rehabilitation, Gunma Prefectural Cardiovascular Center

2) 群馬県立心臓血管センター 循環器内科

Hitoshi Adachi, MD, PhD, Kouichi Taniguchi, MD, PhD: Division of Cardiology, Gunma Prefectural Cardiovascular Center

3) 長崎大学医学部保健学科

Hideaki Senju, RPT, PhD: Nagasaki University School of Health Sciences

(受付日 2002 年 8 月 30 日 / 受理日 2003 年 1 月 25 日)

表1 ISWTの負荷プロトコル

Level	歩行距離 (m)	総歩行距離 (m)	総歩行時間 (秒)
1	30	30	60
2	40	70	120
3	50	120	180
4	60	180	240
5	70	250	300
6	80	330	360
7	90	420	420
8	100	520	480
9	110	630	540
10	120	750	600
11	130	880	660
12	140	1020	720

ISWT：漸増シャトルウォーキングテスト。

歩行距離：各レベルの1分間の歩行距離。

総歩行距離：各レベルの累積した歩行距離。

総歩行時間：各レベルの累積した歩行時間。

し、彼らは酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) の変化を1分間毎の平均値で表しており、実際に、ISWT中の $\dot{V}O_2$ が連続的かつ直線的に増加するかどうかは確認されておらず、peak $\dot{V}O_2$ を一次回帰直線式で予測できるかは疑問である。

そこで、本研究の目的は、①ISWT中の総歩行時間や総歩行距離に対する $\dot{V}O_2$ 増加の直線性を検討し、ISWTにおけるpeak $\dot{V}O_2$ の予測一次回帰直線式に、総歩行時間や総歩行距離のどちらが変数として妥当であるかを検討することである。また、②方向転換を必要としないトレッドミル上での運動負荷試験にISWTの負荷プロトコルを用いた場合、通常のISWTから得られた $\dot{V}O_2$ などの結果とどのような違いがあるかを検討することである。

対 象

対象は健常人12例で、内訳は、男性7例、女性5例、平均年齢 30.2 ± 6.1 歳、平均身長 166.1 ± 8.9 cm、平均体重 60.3 ± 14.8 kgであった。なお、全対象には本研究の目的、方法、リスクなどを口頭で説明し、研究参加の同意を確認した。

方 法

本研究では、①標準的な方法でのISWTと、②トレッドミル上でISWTの負荷プロトコル（分速10mの漸増負荷）を用いた運動負荷試験（treadmill exercise test; TET）を無作為の順序で行った。

ISWTは10mの平地コースで行われる。急な方向転換を避けるため10mコースの両端から0.5m手前に目印のコーンを置き、被検者はその周囲を歩行する。CDプレーヤーから発せられる規則的な間隔の発信音にあわせて歩行し、被検者は次の発信音がする前に反対側のコ

ーンに到達していかなければならない。歩行速度は分速10mずつ増加し、レベル1では1分間に10mコースを1往復半（30m）歩行し、レベル2では2往復（40m）、最後のレベル12では7往復（140m）を歩行することになる（表1）。測定前に一度練習を行い、ISWTの詳細はISWTの日本語版のマニュアルにしたがった⁶⁾。

TETはトレッドミルの傾斜角度を0%とし、歩行速度の増加はISWT（分速10mの漸増負荷）と同様とした。

両テストの中止基準は、アメリカスポーツ医学協会の運動負荷試験実施要項に準じた⁷⁾。その他、ISWTの中止基準として、対象が決められた時間内にポールの手前0.5mに到達することができない場合とした。

両テスト中の心拍数（HR）、および心電図（ECG）は心電図モニター（日本光電 WEP-3212）により監視測定した。また、両テスト開始前の安静5分間とテスト中の $\dot{V}O_2$ 、呼吸数（RR）、一回換気量（VT）、分時換気量（ $\dot{V}E$ ）などの各種呼気ガス指標は、アニマ社製ポータブル呼気ガス分析装置AT-1100を用いて、breath by breath法で連続測定した。今回使用したAT-1100は据え置き型呼気ガス分析装置（ミナト医科学社製AE280S）の呼気ガス測定値との妥当性が確認されている⁸⁾。breath by breath法で得られた呼気ガス指標は、8呼吸毎に移動平均し、平滑化処理をした⁹⁾。テスト終了までの各測定項目の最高値を最高測定値とした。

解 析

まず、 $\dot{V}O_2$ の増加の直線性を検討するために、両テスト中の実測 $\dot{V}O_2$ から安静時の平均 $\dot{V}O_2$ を減じ、その値を従属変数に、テスト開始からの総歩行時間又は総歩行距離を独立変数に割り当て原点を通過する一次回帰直線式を求めた。総歩行距離は、総歩行時間に対し、表1に示すように一定ずつ増加しないため、 $\dot{V}O_2$ のデータ毎の歩行時間と、そのレベルの歩行速度から算出した。求められた一次回帰直線式に実測peak $\dot{V}O_2$ に達した総歩行時間又は総歩行距離を代入し、それぞれの予測peak $\dot{V}O_2$ を求めた（始めに安静時の $\dot{V}O_2$ を除いているため、最後に安静時の $\dot{V}O_2$ を加えた）。総歩行時間から求めたpeak $\dot{V}O_2$ の予測値を予測(t) peak $\dot{V}O_2$ と示し、総歩行距離から求めたpeak $\dot{V}O_2$ の予測値を予測(d) peak $\dot{V}O_2$ と示した。ISWTとTETの実測peak $\dot{V}O_2$ と予測(t) peak $\dot{V}O_2$ 、予測(d) peak $\dot{V}O_2$ の比較や、各測定値の最高値のテスト間の比較、また、両テストの1分毎の $\dot{V}O_2$ の平均値の差はpaired t-testで比較した。危険率5%未満を有意水準とした。

結 果

ISWTとTETのテスト中、ECG上で異常反応の出現は認められなかった。

表2 TETとISWTの各測定値

項目	TET	ISWT	p値
peak VE (l)	74.0 ± 26.2	66.2 ± 26.3	p < 0.01
peak RR (f/min)	50.7 ± 8.5	47.4 ± 6.6	n.s.
peak VT (l)	1.7 ± 0.5	1.5 ± 0.5	p < 0.01
peak HR (bpm)	171.5 ± 10.7	165.3 ± 11.8	p < 0.01
peak VO ₂ (ml/kg/min)	33.3 ± 3.3	31.5 ± 3.7	p < 0.01
予測(t)peak VO ₂ (ml/kg/min)	29.2 ± 2.8	27.7 ± 2.6	p < 0.01
予測(d)peak VO ₂ (ml/kg/min)	32.3 ± 2.9	29.8 ± 3.2	p < 0.01

測定値：平均値 ± 標準偏差, TET：トレッドミルによる運動負荷テスト (treadmill exercise test), ISWT：漸増シャトルウォーキングテスト, p値：TETとISWTと比較, peak VE：最高分時換気量 (maximum minute ventilation), peak RR：最高呼吸数 (maximum respiration rate), peak TV：最高一回換気量 (maximum tidal volume), peak HR：最高心拍数 (maximum heart rate), peak VO₂：最高酸素摂取量 (maximum oxygen uptake), 予測(t)peak VO₂：総歩行時間による一次回帰直線式から求めたpeak VO₂, 予測(d)peak VO₂：総歩行距離による一次回帰直線式から求めたpeak VO₂, *：peak VO₂と予測peak VO₂との比較 p < 0.01.

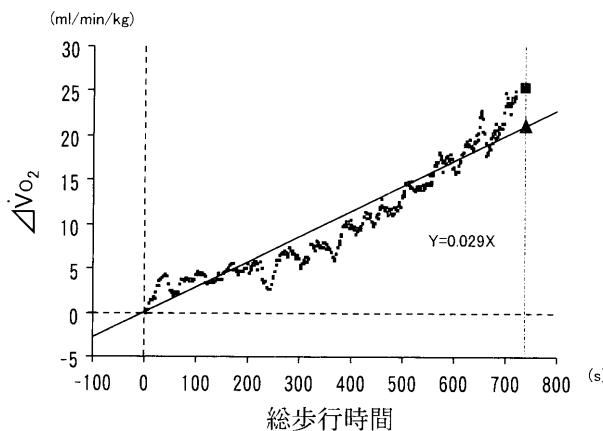


図1 ISWT中の酸素摂取量の増加と総歩行時間
 $\Delta \dot{V}O_2$ ：テスト中 $\dot{V}O_2$ - 安静時 $\dot{V}O_2$, ■；実測 peak $\dot{V}O_2$, ▲；予測 peak $\dot{V}O_2$.

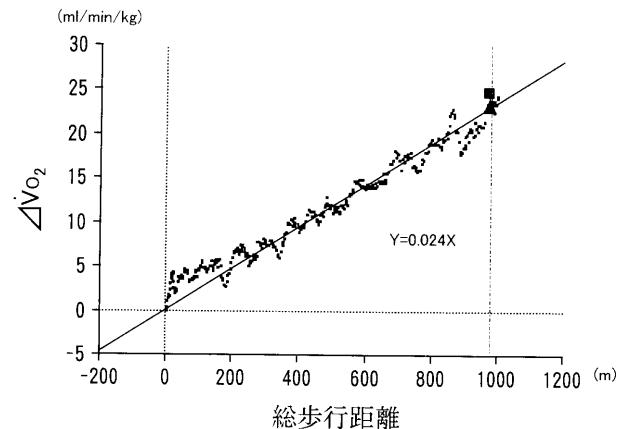


図2 ISWT中の酸素摂取量の増加と総歩行距離
 $\Delta \dot{V}O_2$ ：テスト中 $\dot{V}O_2$ - 安静時 $\dot{V}O_2$, ■；実測 peak $\dot{V}O_2$, ▲；予測 peak $\dot{V}O_2$.

表3 TETとISWTの1分毎の酸素摂取量

時間	TET	ISWT	p値
2分目	8.3 ± 1.2	9.9 ± 1.5	p < 0.05
3分目	10.4 ± 1.5	11.5 ± 2.0	p < 0.05
4分目	11.5 ± 2.2	12.6 ± 1.7	n.s.
5分目	11.8 ± 2.8	13.3 ± 2.1	p < 0.05
6分目	13.4 ± 2.6	15.4 ± 2.4	p < 0.05
7分目	15.6 ± 2.1	17.1 ± 3.2	p < 0.05
8分目	18.3 ± 2.8	19.9 ± 2.9	p < 0.05
9分目	20.9 ± 3.2	23.0 ± 2.5	p < 0.05
10分目	23.2 ± 3.6	25.4 ± 3.4	p < 0.05
11分目	25.0 ± 3.2	27.8 ± 2.4	p < 0.05
12分目	29.0 ± 3.8	31.3 ± 3.2	n.s.

測定値：平均値 ± 標準偏差, TET：トレッドミルによる運動負荷テスト (treadmill exercise test), ISWT：漸増シャトルウォーキングテスト.

ISWTの最終レベルはレベル10が2例、レベル11が3例、レベル12が1例、全レベルを達成が6例であった。TETの最終レベルはレベル10が4例、レベル11が1例、レベル12が1例、全レベルを達成が6例であった。

ISWTとTETの全レベル達成できた者は同一被検者であった。運動終了理由は全例歩行速度についていくことができないというものであった。

表2にISWTとTETの各呼気ガス指標の最高値、最高心拍数、予測(t)peak VO₂、予測(d)peak VO₂を示す。実測peak VO₂、peak VE、peak VT、peak HRは、TETがISWTと比べて有意に高かった (p < 0.01)。同一被検者のISWTのVO₂をY軸に、総歩行時間(図1)と総歩行距離(図2)をX軸にした各一次回帰直線式を図1と図2に示した。実測peak VO₂と予測(t)peak VO₂、予測(d)peak VO₂の平均値の差の比較は、実測peak VO₂の方がISWTとTETともに有意に高かった。実測peak VO₂が予測(t)peak VO₂と1Met以上差のあった者はISWTで7例、TETで9例であり、実測peak VO₂と予測(d)peak VO₂との差が1Met以上差を示した者はいなかった。1分毎のVO₂は、4分目と12分目以外でTETが有意に高かった (p < 0.05) (表3)。

考 察

1. $\dot{V}O_2$ の直線性について

ISWTとTETの実測 $\dot{V}O_2$ は、総歩行時間をX軸にした場合、図1のように曲線的に増加し、実測peak $\dot{V}O_2$ と予測(t) peak $\dot{V}O_2$ が乖離していた。このことは、ISWTの一分間毎に増加する歩行負荷プロトコルが、ISWTとTETにおいては、身体に及ぼす負荷量として同程度の漸増負荷ではないことを示している。一般に身体に及ぼす負荷量が均等に上昇する場合には $\dot{V}O_2$ の増加量は一定であり、1分毎の漸増負荷テスト中の $\dot{V}O_2$ は直線的に増加する。しかし、ISWTやTETの分速10mの漸増負荷プロトコルでは、 $\dot{V}O_2$ は直線的に増加せず、むしろ曲線的に増加していた。歩行は速くなる毎に、腕の振りが大きく速く、歩幅が大きく、下肢を速く蹴り出し振り出すことになる。それにより、ISWTやTETで $\dot{V}O_2$ が直線的に増加しなかったのは、活動筋の種類や動作に違いが生じ、消費する酸素量が一定ずつ増加しなかったと考えられる。さらに、ISWTは、分速10mの漸増負荷プロトコルのほかに、10mの平地コースを往復歩行するため、長く歩き続けるには、効率よくポールを回るパフォーマンスや10m間で急な加速減速というパフォーマンスが必要であるため、身体に及ぼす負荷量が一分間でも一定ではなかったと考えられる。一方、 $\dot{V}O_2$ と運動強度関係の勾配はanaerobic thresholdを超えたあたりから一定ではなくなるといった報告もあり¹⁰⁾、その理由として、高い換気量に達すると呼吸仕事量が非直線的に増加し、呼吸筋での酸素消費量が増加することや、解糖過程に活発に関与している諸臓器での酸素消費量が増加することや、無酸素代謝は有酸素代謝より効率が悪いことなどが挙げられている。

総歩行距離をX軸にした場合、ISWTとTETの予測(d) peak $\dot{V}O_2$ は、実測値の方が1ml/kg/min程度しか高くなく、一次回帰直線式からの予測精度は高かった。総歩行時間はレベルが進むにつれて、60秒ずつ累積し、総歩行時間 = $60X$ (X: level) とあらわされ、直線的に増加する。しかし、総歩行距離はレベルが進むにつれて、初回レベルの30mに10mずつ加算された歩行距離が累積され、総歩行距離 = $5X^2 + 25X$ (X: level) とあらわされ、直線的でなく曲線的に増加する。つまり、総歩行距離は加速度によって経時的に曲線的に増加するため、曲線的増加を示す $\dot{V}O_2$ と高い直線性を示したと考えられた。Singhらの報告は、 $\dot{V}O_2$ の測定をbreath by breath法で行っておらず、 $\dot{V}O_2$ のポイントが少ないとが問題視されていたが、breath by breath法を用いたわれわれの検討でも、総歩行距離をX軸にした場合、 $\dot{V}O_2$ は直線的に増加し、Singhらの報告を支持する結果となった。

2. ISWTとTETの成績の差について

ISWTよりTETの方が $\dot{V}O_2$ 、VT、 $\dot{V}E$ 、HRの最高値が高かったことや各レベルでの $\dot{V}O_2$ が高かったことは、TETの方がISWTより身体に及ぼす負荷量が多かったことを示している。 $\dot{V}O_2$ やHRは、同一歩行速度の平地歩行よりトレッドミル上の歩行の方が高くなるといわれている¹¹⁾。それは、同一歩行速度ではトレッドミルの方が、歩幅が短く、歩行率が高いことや¹²⁾、トレッドミル上での歩行運動が動くベルトの上で同じ位置を保つようにバランスを取りながら、歩かされていることによる筋活動量の増加や運動効率の違いが影響することが原因と考えられている¹³⁾。今回のISWTとTETの比較でも、両テストの1分毎の $\dot{V}O_2$ に差が認められた。よって、両テスト間に、運動効率の違いがあることが認められ、ISWTをトレッドミル上で再現しようとする際には、 $\dot{V}O_2$ やHRの解釈に注意を要するものと考えられた。

文 献

- 1) Solway S, Brooks D, et al: A qualitative systematic overview of the measurement properties of functional walk tests used in the cardiorespiratory domain. Chest 119: 256-270, 2001.
- 2) Guyatt GH, Pugsley SO, et al: Effect of encouragement on walking test performance. Thorax 39: 818-822, 1984.
- 3) Singh SJ, Morgan MD, et al: Development of a shuttle walking test of disability in patients with chronic airways obstruction. Thorax 47: 1019-1024, 1992.
- 4) Singh SJ, Morgan MD, et al: Comparison of oxygen uptake during a conventional treadmill test and the shuttle walking test in chronic airflow limitation. Eur Respir J 7: 2016-2020, 1994.
- 5) 有蘭信一、北川知佳・他：慢性閉塞性肺疾患患者の運動耐容能評価法としての漸増シャトルウォーキングテストの妥当性。日本呼吸管理学会誌 11: 414-419, 2002.
- 6) 千住秀明：シャトルウォーキングテスト(SWT) 日本語版～評価マニュアル～。長崎大学医学部保健学科理学療法学専攻千住研究室、長崎、2001, pp 2-5.
- 7) アメリカスポーツ医学会(編)：運動処方の指針(原著第6版)，南江堂、東京、2000, pp 89-113.
- 8) 田嶋明彦：携帯型呼気ガス分析器と据え置き型呼気ガス分析器(AE-280S)の精度に関する比較検討、第7回国心臓リハビリテーション学会：66, 2001.
- 9) 伊東春樹：心肺運動負荷テスト、谷口興一(編)，南江堂、東京、1993, pp 106-116.
- 10) 栗原直嗣：運動負荷テストの原理とその評価 心肺運動負荷テストの基礎と臨床(原著第2版)，谷口興一(編)，南江堂、東京、1999, pp 60-89.
- 11) 西田裕介、樋口謙次・他：トレッドミル平地歩行と室内平地歩行の相違—生理的反応と主観的運動強度での検討—。理学療法学 13: 199-204, 1998.
- 12) Larsson LE, Odenrick P, et al: The phases of the stride and their interaction in human gait. Scand J Rehab Med 12: 107-112, 1980.
- 13) Murray MP, Spurr GB, et al: Treadmill vs. floor walking: kinematics, electromyogram, and heart rate. J Appl Physiol 59: 87-91, 1985.

〈Abstract〉**Assessment of Increase Pattern of Oxygen Consumption during the Incremental Shuttle Walking Test: Is Peak Oxygen Consumption Really Predictable from the Total Walking Distance of the Incremental Shuttle Walking Test?**

Shin-ichi ARIZONO, RPT, Tetsuya TAKAHASHI, RPT, MSc, Megumi KUMAMARU, RPT,
Megumu Azechi, RN

Division of Cardiopulmonary Rehabilitation, Gunma Prefectural Cardiovascular Center

Hitoshi ADACHI, MD, PhD, Kouichi TANIGUCHI, MD, PhD

Division of Cardiology, Gunma Prefectural Cardiovascular Center

Hideaki SENJYU, RPT, PhD

Nagasaki University School of Health Sciences

The incremental shuttle walking test (ISWT) was developed for the evaluation of exercise capacity in patients with chronic obstructive pulmonary disease. A previous study reported that peak oxygen consumption ($\dot{V}O_2$) was predictable using single regression line against the total walking distance of ISWT. However, it is still unclear whether $\dot{V}O_2$ really increases continuously and straight linearly during ISWT since no study has measured changes in $\dot{V}O_2$ continuously using breath-by-breath method. The purpose of this study is to determine whether peak $\dot{V}O_2$ is predictable according to the total walking distance of ISWT. Twelve healthy men participated in this study. The ISWT and treadmill-walking test using same protocol of ISWT were performed at random. The $\dot{V}O_2$ was continuously measured using breath-by-breath method with a portable gas analyzer (AT-1100, Anima, Co., Japan) during ISWT. Straight linear increase in $\dot{V}O_2$ both against the total walking distance of ISWT and against the total walking time of ISWT were evaluated using a single regression analysis, and predicted peak $\dot{V}O_2$ was calculated. Finally, the measured peak $\dot{V}O_2$ was compared with the calculated values. Measured peak $\dot{V}O_2$ showed only 1 ml/kg/min difference from the predicted peak $\dot{V}O_2$ against the total walking distance. Measured peak $\dot{V}O_2$ was 1 Met or significantly higher than the predicted peak $\dot{V}O_2$ against the total walking time. In conclusion, peak $\dot{V}O_2$ of ISWT was predictable using single regression line against the total walking distance of ISWT in normal subjects. Further study to determine the predictability of peak $\dot{V}O_2$ of the ISWT is necessary before implementation to patient population.