低侵襲冠動脈外科手術の現在, そして未来へのパラダイムシフト

山口聖次郎, 渡邊 剛

Yamaguchi S, Watanabe G: Paradigm shift in minimally invasive coronary artery bypass surgery. What's going on? J Jpn Coron Assoc 2012; 18: 63-66

I. はじめに

1946年にワインバーグらによって施行された冠動脈手術の第1例目からはや65年が過ぎた¹⁾. 冠動脈バイパス手術は確実に進歩をたどり, 本邦においては待機手術死亡率も1-2%程度の安全な手技として確立された. 21世紀に入り, 本邦ではOPCABが冠動脈手術症例の60%強を占め, OPCABに関しての技術そしてデバイスの発展は記憶に新しいところであろう. 現在の心臓手術の現状を, 65年前の心臓手術黎明期に最前線に立っていたドクター達が想像しえただろうか? 年を追うごとに, 手術死亡率は低下し, 医療のレベルは上昇している. これを踏まえ, これから何十年か先を見据えた治療を考えたとき“低侵襲手術”という言葉は誰もが思い浮かべるものと考ええる. 現在のわれわれの低侵襲手術の取り組みは, 1)zero assist(off-pump), 2)small access(小切開), 3)local anesthesia(全身麻酔からの離脱)の3つのベクトル軸に沿って展開している. これらを踏まえ, 未来の展望についても本稿において言及したい.

II. 現在に至るまでの“低侵襲手術”への取り組み

1. Multiple MIDCAB

On-pump手術(conventional CABG)からOPCABへと切り変わるきっかけは, 左前胸部小開胸でのLITA-LAD, 1枝バイパス手術であり, この頃からMIDCABという呼び名が使われ始めた²⁾. その後, 完全血行再建が可能なoff-pump手術が隆盛となり, 正中切開での多枝OPCABへと術式は移行していった. 正中切開アプローチである以上, 胸骨からの出血, 感染のリスクは伴うが人工心肺を使用しないことにより(zero assist)手術侵襲が減じ, またヘパリンの使用量も減り, ICU滞在時間が短縮化され, 輸血使用量も減った. われわれは, このOPCAB移行期から現在に至るまで, 症例によってはLASTアプローチに上腹部切開を追加した多枝MIDCABを施行してきた^{3, 4)}. この術式の目的は胸骨正中切開を回避し, かつ多枝バイパスの完全血行再建をおこなうことにある. 胸骨の温存

は, 出血量をさらに減じ, 術後縦隔炎の発生防止に効果がある. 結果的に, 通常のOPCABよりさらに侵襲度を上げた術式となる. 基本的には有茎グラフト(in situ graft)を用いるが, 術視野からの上行大動脈への操作はPAS-Portなどの中枢自動吻合器を用いれば可能である. またこのデバイスを使うことで, 下行大動脈をグラフトのinflowとして使用することも可能である⁵⁾.

さらに術式は, 内視鏡下ITA剥離を導入し, 皮膚切開長を減じた手術へと発展した. また内視鏡下ITA剥離術を進めていくその過程で, 従来の2D内視鏡から, 新たに開発した3D内視鏡を臨床の場において使用した⁶⁾. 内視鏡の3D化によって, 奥行きを把握しながら剥離を進められ, より正確性, 安全性が向上した.

2. 完全内視鏡下冠動脈バイパス術—Be-TEC

先の項で述べた3D内視鏡は2Dと比べ奥行きを見定め, より精密な作業を可能とした. これに伴い, 従来の左前胸部小切開アプローチでのMIDCABを完全内視鏡下におこなう術式を考案した. ポートアクセス専用スタビライザーおよび, 器具を用いておこなった⁷⁾. 完全内視鏡下での手術によって, 創はminimumに小さくなり, また開胸器を肋骨にかけないことから, 肋骨が完全に温存され, 術後疼痛が著しく減じ, 結果的に, 離床, 回復の時間が著しく短くなった. 完全閉鎖胸腔での冠動脈バイパス術の施行は, 知りうる限り, 世界初の報告となった.

3. ロボット支援下小開胸冠動脈バイパス術—ThoraCAB

われわれの, “低侵襲手術”への取り組みにあたって, 大きな転機となったのはロボットの導入であった. 現在, da Vinci® Surgical System(Intuitive Carifornia, USA)は, 心臓外科領域のみならず, 呼吸器外科, 血管外科, 一般外科, 婦人科, 泌尿器科など多くの科で使用されるようになっている. われわれの施設では2006年に本格的に導入して以来, 42例の手術をおこなっている. da Vinci® Surgical Systemの特徴は, 閉鎖空間のなかで7関節可動のアームを用いて自在に操作が可能な点が第1に挙げられる. 従来の内視鏡用の鉗子は, ポートを支点として可動し, 基本的には関節をもたないため, 直線的な動きが主であり, 血管吻合などの施行に難点があった. da Vinci systemのアームはまさに“円”の動きであり, よ

図 1

A:TECAB 手術, 外観, da Vinci[®] Surgical System のスタンダードモデルを使用し手術を施行. 中央のアームが内視鏡用のアームであり, 左右のアームを術者が操作して手術をおこなう.

B: TECAB 手術, 内視鏡画像, ロボットアームを ultra fine mode で操作し, 冠動脈吻合を施行. U-clip による単結節吻合をおこなった.

A | B

り人の手の動きに近づいた手術操作が可能である. 第2の特徴は, “motion scaling system”である. これは, 固定比率で, 実際のコンソール側での手の動きを, 可動するロボットアーム側で小さくできるシステムである. Ultra fine mode では4対1と実際の動きの25%のスケールでロボットが稼動することとなる. この機能によって精密な作業がおこなえるようになっていく. また振動吸収機能によって, 手のふるえはロボットのアームの動きには反映されないようになっていく. 第3にこのシステムの内視鏡も3Dシステムである. 3D化は, 奥行きを感じて手術がおこなえるため, 心臓手術のような立体的感覚を強く要求される術式においては, 有用なものである.

ロボット支援手術の導入にあたって, 冠動脈バイパス手術の領域においては, 内胸動脈を両側ないしは片側をロボットで剥離し, 心膜切開, 吻合ターゲットを決定までの過程を完全な閉鎖胸腔内でおこない, 内側から胸壁をカメラで観察して, 指摘な切開位置を決定し, 皮膚切開, 冠動脈吻合をおこなう Srivastaba らが提唱する ThoraCAB から RoboticCABG に着手した⁸⁾(図 1A, B). この術式は, multiple MIDCAB と Be-TEC によって得られた知識の集合体ともいえる. また以前の multiple MIDCAB と比較して, ターゲットとなる血管を認識した上で, 皮膚切開位置を決定することで, より小さな皮膚切開で, 直下にターゲットとなる血管を見て手術が可能となった. さらに, ロボット操作によって, ITA と RA の y-Composit グラフトを作成し, バイパスをおこなうことによって左冠動脈系のバイパス手術を極小切開で, 完全血行再建手術が可能な術式へと発展させた. この段階において, 血管吻合に Nitinol 製の U-clip を採用しておこなった. モノフィラメントナイロンを用いた一針連続吻合は血管吻合のスタンダードな手技である. U-clip を用いた単結節吻合法の開存率は, モノフィラメントナイロンと比

較しても有意差がないとされている⁹⁾. 針自体のコンポーネントが小さく, 閉鎖胸腔内での手術操作に適している.

4. 完全胸視鏡下ロボット支援冠動脈バイパス術—TECAB

ThoraCAB によるロボット導入をおこない, ロボット支援による冠動脈バイパス手術を国内で具現化したわれわれの施設で次に目指したものは, 完全閉鎖胸腔内でのバイパス手術の施行であった. 現時点で考える“もっとも小さな創”で手術をおこなえる手段として, そしてそれを可能とする器具としてはロボットシステムが適している. その理由は前項目において, システムの特徴として説明したとおりである. TECAB は ITA ハーベスト, 心膜切開, ターゲットとなる吻合位置の特定までの一連の作業は前項目の ThoraCAB と同じである. その後, ターゲットの固定(stabilizing), バイパス吻合もロボットを用いておこなう術式である(図 1A, B). ターゲットの固定においては, 前出の Be-TEC におけるテクニックが有用であった. スタビライザーに関しては, 折りたたんだ状態で挿入できるものを使用しておこなっている. 限られた閉鎖空間のなかで極力, 大きなワーキングスペースを得るためには, 胸骨の挙上がポイントである. そのため心窩部側から胸骨下端にフックをかけて持ち上げる工夫をおこなっている. また同じ部位から, スタビライザーも挿入して手術をおこなうことで, 吻合部位の術野が混雑しないようにしている. グラフトと冠動脈の吻合には U-clip を用いておこなった¹⁰⁾.

TECAB(LITA-LAD バイパス)の平均手術時間は, 276±52 分, 出血量は 243±120 ml, 無輸血手術である. 在院日数は 5 日となった.

また, Bonatti らはこの TECAB の低侵襲性と, 現存する治療法のなかで, もっとも良好な長期予後を示す LITA-LAD バイパスの特性を活かし, 左主幹病変に対して, TECAB と薬剤溶出性ステント治療のハイブリッド療法を

提唱している¹¹⁾。

5. 覚醒下冠動脈バイパス術—AwakeOPCAB

前出の項目に関しては、zero assist, small access を目指した手術であるが、本術式は、zero assist, local anesthesia による手術である。基本的な OPCAB との違いは、“全身麻酔をしない”ということである。すなわち覚醒のまま冠動脈バイパス手術を施行するものである。この術式の特徴は覚醒状態における人体の“auto regulation”を維持したまま手術をおこなうことにある。全身麻酔に伴う auto regulation の変化は麻酔学においても、常に指摘される項目である。とくに、OPCAB においては血圧の上がり下がり大きな手術であるため、それに対する調節機能を維持することは、脳保護の観点から重要な要点だと考えている。また術中のイベント、すなわち脳梗塞の発生は全身麻酔下の手術であれば、覚醒するまでこれを知る術は、通常、限局されてしまう。下手をすると覚醒遅延によって、その発生を知ることすら少ない。覚醒下の手術は術中ないし、術直後より身体所見を観察するだけで、その発生を認識することが可能で、発生後からのいわゆる golden time 内で迅速に治療を開始することが可能である。われわれはこの手術においては、既往に高度脳梗塞をもっている、ないしは有意な脳血流低下を伴う、高度頸動脈狭窄を合併した症例、ないし高度呼吸障害症例に対して、選択的におこなっている。したがって、術前の logistic EuroScore II は、自験例において、通常 OPCAB 群 0.63 ± 0.49 、に対して AwakeOPCAB 群 1.33 ± 0.62 ($p < 0.05$) となっている。

高位硬膜外麻酔によって、交感神経系の抑制効果もあり、手術時に頻脈をみとめにくく、術後心房細動の発生を抑制する効果もある¹²⁾。

本術式はすなわち、ハイリスク群のために特化した術式といえる。また一方で全身麻酔を回避することで、リハビリの開始も早く fast track recovery の観点からも有用な術式である。麻酔法は高位硬膜外麻酔を用いる。アプローチは胸骨正中切開法である。自発呼吸下で内胸動脈剝離をおこない、同時に必要なほかのグラフト(RA, SVG など)を採取しておこなう。患者の呼吸は主に、横隔膜の上下動により、肋間筋は十分に弛緩されている¹³⁾。

III. 未来へのパラダイムシフト、特化された“低侵襲手術”から均一化した“低侵襲手術”へ

現在の心臓手術領域において“低侵襲手術”は常に話題となり、各施設において、少なからず取り組んでいると考えられる。例えば、大動脈瘤手術領域において、ステントグラフトが広く一般的になっていったように、これからの冠動脈手術領域でなにがスタンダードになっていくのかについて考察したい。

まず挙げられるものとしては、フリーグラフトの採取法であろう。SVG, RA グラフト採取は、冠動脈外科医と

して、若いドクターにとっては初めにくぐる門でもある。現在、われわれの施設では、極力、内視鏡システムをつかったグラフト採取を心掛けている。現在、本邦においては、VasoView®(MAQUET, New Jersey, USA)、と VirtuoSaph®(TERUMO, Japan)が一般的に使われているデバイスと考えられる。採取トレーニングのためのキットも各メーカーで保持しており、手技の習熟のための環境は十分に整っているといえる。グラフト採取にあたって通常採取法が、横方向にグラフトの走行を確認しながらおこなえるのに対し、内視鏡下採取法は直線的に採取する点が異なる。そのためにグラフトの走行が屈曲している場合などに損傷に注意が必要である。われわれの施設では、トレーニングの一環として、若いドクターには、まず皮膚小切開を分節して採取する方法をおこなってもらい、その後より内視鏡下採取法へ以降するトレーニングスケジュールでおこなっている。

1. ロボット手術トレーニング

現在、ロボット支援システム、da Vinci® Surgical System の使用には、製造元の Intuitive 社支援のトレーニングプログラムに参加し、認定を受ける必要がある。諸外国では、人死体を用いて、実際の手術トレーニングも可能である。本邦では、人体でのトレーニングは不可能であり、ブタを用いるか、ないしは自作する方法となる。われわれの施設では、摘出ブタの心臓を用いてのトレーニングをおこなっている。

実際の臨床使用においては、内胸動脈の剝離から導入していくのがよいとされる報告がある¹⁴⁾。実際にわれわれの施設においても、同じステップで導入を開始した。その後の learning curve を検討したところ、連続 10 例目においては、有意に剝離時間が短縮していた(図 2)。

現在の世界的状況から考えると、ロボット支援手術のシェアは年々増加している。また同じアジア圏においても、中国、韓国にメガセンターが作られ、多くの症例がおこなわれている。現行のままでは、本邦のロボット支援手術はアジアのなかでも、遅れをとる可能性も大にある。そのためには制度の改革も必要である。現在、ロボット支援下の冠動脈バイパス手術に関しては、高度先進医療の認定がなされ、患者の負担金は、手術自体のみとなり、それ以外に関しては保険診療内でおこなえるようになった。今後も、ほかの心臓疾患手術を含め、保険適応の拡大が望まれる。このこと自体、ロボット手術の裾野を広げ、情報交換の場も広がり、ロボット手術の普及につながると考えられる。

2. 遠距離手術

現行のロボット手術システムは、コンソール(操作台)からロボットを遠隔操作して手術をおこなうものである。それ故、理論的には、はるか山海を越えて、遠くの遠隔地のロボットを操作しての手術が可能である¹⁵⁾。国内どこにいても、最寄のロボットセンター病院で、エキ

図2 Robotic LITA harvest number
ロボットを用いたITA剥離時間の検討。剥離経験が
10例で時間の短縮をみとめた。

スパートドクターの手術を受けることが可能ということになる。また逆に、若い心臓外科医にとっては、日本のどこにいてもエキスパートドクターの手術に触れ、学ぶ機会が生まれるということでもある。また現在、教育用システムとして、ダブルコンソールモデルのロボットも考案されている。このシステムを用いればエキスパートドクターの指導の下、リアルタイムにロボット手術を経験、実施することが可能である。

IV. まとめ

“低侵襲手術”のわれわれの施設における過去から現在までの取り組みについて述べた。低侵襲手術の施行は、内科とのハイブリッド治療などの新たな可能性を見出す手技であり、また、幾多の心臓外科が“挑戦”をくりかえし進化を遂げていった過程の一つともいえる。その未来は、より多くの心臓外科医によって普遍的に施行される手技であり、そのための修練、技術革新を今後も引き続き、続けていくことが必要と考える。

文 献

- 1) Vineberg AM: Restoration of coronary circulation by anastomosis. *Can Med Assoc J* 1946; **55**: 117–119
- 2) Benetti FJ, Ballester C: Use of thoracoscopy and a minimal thoracotomy, in mammary-coronary bypass to left anterior descending artery, without extracorporeal circulation. Experience in 2 cases. *J Cardiovasc Surg (Torino)* 1995; **36**: 159–161
- 3) Watanabe G, Takemura H, Tomita S, Misaki T, Kotoh K:

Multiple minimally invasive direct CABG for the complete revascularization: the figure L approach. *Thorac Cardiovasc Surg* 2003; **51**: 28–32

- 4) Watanabe G, Misaki T, Kotoh K, Kawakami K, Yamashita A, Ueyama K: Multiple minimally invasive direct coronary artery bypass grafting for the complete revascularization of the left ventricle. *Ann Thorac Surg* 1999; **68**: 131–136
- 5) Yamaguchi S, Watanabe G, Tomita S, Ohtake H, Nagamine H, Iino K: Use of skeletonized radial artery graft with the PAS-Port proximal anastomotic device. *Ann Thorac Surg* 2009; **87**: 1910–1913
- 6) Ishikawa N, Oda M, Yasumatsu H, Watanabe G: Three-dimensional monitor in endoscopic surgery. *Surg Endosc* 2004; **18**: 1149–1150
- 7) Watanabe G, Takahashi M, Misaki T, Kotoh K, Doi Y: Beating-heart endoscopic coronary artery surgery. *Lancet* 1999; **354**: 2131–2132
- 8) Srivastava SP, Patel KN, Skantharaja R, Barrera R, Nanayakkara D, Srivastava V: Off-pump complete revascularization through a left lateral thoracotomy (ThoraCAB): the first 200 cases. *Ann Thorac Surg* 2003; **76**: 46–49
- 9) Ono M, Wolf RK, Angouras D, Schneeberger EW: Early experience of coronary artery bypass grafting with a new self-closing clip device. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2002; **123**: 783–787
- 10) Nishida S, Watanabe G, Ishikawa N, Kikuchi Y, Takata M, Ushijima T: Beating-heart totally endoscopic coronary artery bypass grafting: report of a case. *Surg Today* 2010; **40**: 57–59
- 11) Bonatti J, Schachner T, Bonaros N, Lehr EJ, Zimrin D, Griffith B: Robotically assisted totally endoscopic coronary bypass surgery. *Circulation* 2011; **124**: 236–244
- 12) Yashiki N, Watanabe G, Tomita S, Nishida S, Yasuda T, Arai S: Thoracic epidural anesthesia for coronary bypass surgery affects autonomic neural function and arrhythmias. *Innovation* 2005; **1**: 83–87
- 13) Watanabe G, Tomita S, Yamaguchi S, Yashiki N: Awake coronary artery bypass grafting under thoracic epidural anesthesia: great impact on off-pump coronary revascularization and fast-track recovery. *Eur J Cardiothorac Surg* 2011; **40**: 788–793
- 14) Bonatti J, Schachner T, Bernecker O, Chevtchik O, Bonaros N, Ott H, Friedrich G, Weidinger F, Laufer G: Robotic totally endoscopic coronary artery bypass: program development and learning curve issues. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2004; **127**: 504–510
- 15) Rayman R, Croome K, Galbraith N, McClure R, Morady R, Peterson S, Smith S, Subotic V, Van Wynsberghe A, Primak S: Long-distance robotic telesurgery: a feasibility study for care in remote environments. *Int J Med Robot* 2006; **2**: 216–224