冠動脈バイパスにおけるグラフト流量波形分析に関する実験的検討

高森 達也¹, 折目由紀彦¹, 中田 金一¹, 塩野 元美¹, 古場 隼人²

【目的】CABG のグラフト流量波形上の逆流成分(R)の全流量波形成分(T)に対する割合 R/T がグラフト機能を反映しうるかを検討した。【対象と方法】豚(7頭)を用い, LAD#7 に LITA を端側吻合した。TTFM を LAD#6, LAD#8, LITA に装着し LAD#6 と LITA 吻合部に血管狭窄器を装着した。LAD#6 の狭窄率を変化させ, 各流量波形を分析した。LAD#6 の血流量減少率を 75% に固定し, 吻合部の狭窄率を変化させ, 流量波形を分析した。【結果および考察】LAD の血流量減少率が 0% でバイパス吻合した場合, LITA の R/T の大きさは LAD と LITA の間の血流競合の程度を反映し, 吻合部末梢への流量は低下し, グラフト機能障害が示唆された。LAD 中枢の血流減少率が 75% 以上で, R/T は減少し, 十分なグラフト流量が得られた。つまり血流減少率 75% 以上であれば, CABG にて, 冠動脈の血流改善を期待できると考えられた。LITA の吻合部狭窄の程度が増加すると, LITA の R/T は増加し, 冠動脈末梢の血流量は減少し, 吻合部狭窄によるグラフト機能障害を示唆した。【結語】CABG 術中グラフト血流評価において, LITA の R/T は血液供給管としてのグラフト機能を推定する信頼できる定量的な指標の一つとして有用であると考えられた。

KEY WORDS: coronary artery bypass grafting, analysis of the graft flow wave, transit time flow meter, intra-operative graft evaluation system, experimental study

Takamori T, Orime Y, Kin-ichi N, Shiono M, Koba H: **Experimental study of graft flow analysis for coronary artery bypass grafting.** J Jpn Coron Assoc 2012; 18: 12-20

I. はじめに

冠動脈バイパス手術(coronary artery bypass grafting; CABG)は, 重症狭心症や心筋梗塞などの虚血性心疾患に対する治療法として確立され, 最もスタンダードな心臓手術法として盛んに行われている。わが国でも年間総数約 12,000 例を数え, 初回待機手術の死亡率は 0.75% と欧米よりも良好な成績を収めている¹⁾。しかし, 実際には少数ではあるが術後早期にグラフトが閉塞してしまう症例も報告²⁾されており, CABG におけるバイパスグラフトの評価は, 手術成績の維持と向上に不可欠である。

CABG 後のグラフトの開存や流量の評価には, 術後のグラフト造影検査が一般的に行われてきた。この検査では造影された吻合部の形状や造影剤の流れ方でグラフトの開存や流量の評価を行っているが, これは強制的圧力によって造影剤を流し込んだ時のグラフト血管内腔の形状のみを視覚的に 2 次元で評価しており, 客観的なグラフト機能評価ではない。造影剤注入時の圧は生理的状态での大動脈拡張期に冠動脈にかかる圧とは異なり, 生理的状态でのグラフト流量や吻合部の形状そのものを評価

したことはならないからである。これではバイパス吻合後の血流増加効果がどの程度であったのかについて, 客観的かつ定量的に評価を行うことは困難である。

また, 臨床においては 75% 以上の狭窄を認めた場合に, CABG の適応とされている³⁾が, グラフトを吻合した冠動脈の中枢の狭窄程度とグラフト流量, および吻合部末梢の冠動脈流量との関係を詳細に分析, 検討した報告はなく, 客観的かつ定量的なグラフト機能評価はまったく行われていないのが現状であり, そのエビデンスは乏しい。

今回, われわれは動物実験において, transit time flow meter(TTFM) (Transonic systems Inc, N.Y.)を用いて, グラフトを吻合した冠動脈の中枢の狭窄程度とグラフト流量, および吻合部末梢の冠動脈流量との関係, さらにグラフト吻合部の狭窄程度とグラフト流量, および吻合部末梢の冠動脈流量との関係を実験的に分析, 検討したので報告する。

II. 対象と方法

対象とした動物は, ヒト冠動脈に走行が類似しているといわれている豚 7 頭(雄, 体重: 45.8±5.1 kg)を用いた。Midazolam 0.1 mg/kg を筋肉内注射し鎮静させ, Propofol 0.5 mg/kg を耳静脈より投与して麻酔導入し, 仰臥位に固定した。Vecuronium 0.1 mg/kg にて筋弛緩し, 気管挿管し, 呼吸を 200~300 ml/kg/min とし, Sevoflurane 2% で全身麻酔を維持した。頸動脈を確保し, 冠動脈造影用カテーテル, 動脈圧測定用カテーテルを挿入した。

¹ 日本大学医学部外科系心臓血管・呼吸器・総合外科分野 (〒173-8610 東京都橋区大谷口上町 30-1), ² 筑波大学大学院システム情報工学研究科
(本論文の要旨は第 23 回日本冠疾患学会学術集会, 2009 年 12 月・大阪にて発表した)
(2010.12.15 受付, 2011.11.09 受理)

図1 Picture of experimental model

胸骨正中切開にて開胸し、左内胸動脈(left internal thoracic artery; LITA)を skeletonization 法にて採取した。心臓ポートを作成したのち、左前下行枝(left anterior descending branch; LAD)#6~#8 までほぼ全長に渡り心外膜から剝離した。LAD#6, #8, LITA に TTFM を装着し、LAD#6, #8, LITA の血流量、および血流波形を測定、記録した。ヘパリン化したのちに、off-pump CABG 手技にて、LITA を LAD#7 に Prolene 8-0 を用いて端側吻合した。

LITA の選択的カテーテル造影を行い、吻合に問題のないことを確認した後、吻合端より約 2 cm 中枢側の LAD#6 と吻合端より約 0.5 cm 中枢側の LITA に血管狭窄器(VO-4: ユニークメディカル社, Tokyo): 内径 4 mm, カフ幅 7 mm, カフ厚 2 mm を装着し、吻合端より約 1 cm 中枢側の LAD#6, LAD#8, 吻合端より約 1 cm 中枢側の LITA に TTFM を装着した(図 1)。

LAD#6 と LITA に装着した狭窄器を用いて LAD#6, LITA のコントロール血流量からそれぞれ 0% 減, 25% 減, 50% 減, 75% 減, 90% 減と変化させ、そのときの LAD#6, #8, LITA の流量波形をリアルタイムに計測、記録した。この血流量の変化率を血流量減少率と表現する。この血流量減少率は実際の血流量を測定し、どれだけ減少したかを表すものであり、通常血管造影で血管径の長さで評価している狭窄率と異なり、血管の断面積で評価するため、狭窄率 50% は血流量減少率の 75% 減に相当する(図 2)。流量波形測定時にはスタビライザーを解除し、心臓を正常な位置に戻し、血圧、心拍数は適正範囲内を保った状態で測定した。測定結果は、解析ソフト Acknowledge (BIOPAC Systems Inc, Santa Barbara, CA) を用いて、大動脈圧、左室圧、心電図、LAD#6 flow, LAD#8 flow, LITA flow, の 6 channel にて記録した。

以下の 2 つのプロトコルにしたがって、データを記録、計測した。

1. プロトコル 1(冠動脈の実験的狭窄モデル)

LITA からの逆流する血流による誤差をなくすため、吻

図2 狭窄率と実際の血流量の減少率との関係

合した LITA の血流を吻合部で一旦遮断したのち、LAD#6 の中枢側に装着した血管狭窄器で LAD#6 の血流量をバイパス前の血流量に対して血流計表示で 0% 減, 25% 減, 50% 減, 75% 減, 90% 減になるように狭窄させる。LAD#6 の血流量が安定したところで LITA の遮断を解除する。その後、再びすべての血流量が安定した時点で LAD#6, LAD#8, LITA の流量波形を測定した(図 3 上)。

2. プロトコル 2(グラフトの実験的狭窄モデル)

LITA の血流を吻合部で遮断し、LAD に LITA からの血流が干渉しない状態にする。LAD#6 を狭窄させ、血流量減少率が 75% 減となった状態で狭窄器を固定し、冠動脈狭窄の状態をつくる。次に LITA の遮断を解除、LAD#6 の血流を遮断し、LITA の血流に LAD#6 からの血流が干渉しない状態にした後、LITA の血管狭窄器を徐々に狭窄させ、LITA の流量計のデジタル表示がコントロールの 25% 減, 50% 減, 75% 減, 90% 減で狭窄固定し、LAD の血流を都度再開させる。血流量が安定したところで LAD#6, LAD#8, LITA の流量波形を測定した(図 3 下)。

統計学的評価は、Stat view (SAS Institute, NC, USA) を用い、paired t-test にて行い、 $p < 0.05$ をもって有意差ありとした。

III. 結 果

1. プロトコル 1(冠動脈の実験的狭窄モデル)

CABG 前の LAD#6, LAD#8, LITA の流量波形を心電図 R-R の 1 心拍分示す。冠動脈の血流の多くは拡張期に流れている。LITA は通常の動脈圧波形と類似した流量波形を呈し、LAD#6, LAD#8 では左室等容収縮期に一致して、一瞬の逆流波形が見られた(図 4 上)。CABG 後では、LAD#6 の血流量減少率 0% の時、心収縮開始時直後に、まず LAD#6 から LITA へ向かう血流が認められ、LITA の流量波形は逆行性に、LAD#6 の流量波形は順行性となった。その後、LITA の順行性の血流が増えてくると、逆に LITA から LAD#6 への逆行性血流が増えるようになり、こ

Protocol-I

Protocol-II

図 3

Protocol-I(冠動脈の実験的狭窄モデル)

Vascular occluder attachment: proximal site of LAD (seg 6), LAD (seg 6) stenosis: 0, 25, 50, 75, and 90%, Flow wave analysis: LAD proximal site (seg 6), LAD distal site (seg 8), LITA (graft)

Protocol-II(グラフト吻合部の実験的狭窄モデル)

Vascular occluder: proximal site of LAD (seg 6), distal site of LITA, LAD (seg 6) stenosis: 75%, (fixed) LITA stenosis: 0, 25, 50, 75 and 90%, Flow wave analysis: LAD proximal site (seg 6), LAD distal site (seg 8), LITA (graft)

図 4 バイパス前後での LAD proximal site (seg 6), LAD distal site (seg 8), LITA (graft) の各フローパターン変化

図5 R/Tの算出

図6 Changes of reverse flow area ratio (R/T)
血流量減少率0%におけるバイパス前後のR/T変化 図7 Changes of flows
血流量減少率0%におけるバイパス前後の血流量の比較

れにより LAD#6 と LITA の流量波形はちょうど対称性のグラフを示した(図4下). このときの1心拍分の血流波形の変化を見ていくと, 収縮期早期において, 通常では見られない LITA の逆流性波形が出現した. われわれはこれに注目し, 流量波形上の逆流成分(R)の全流量波形成分(T)に対する割合: 逆行性波形成分面積比(R/T)(図5)を算出し, これがグラフト機能評価の指標として妥当であ

るかを検討した.

まず, LAD#6 の血流量減少率0%における CABG 前後の LITA の R/T を比較すると, バイパス前には $1.0 \pm 0.9\%$ であったものが $36 \pm 22\%$ と大きく増加していた ($p=1.37426 \times 10^{-5}$)(図6). この時の実際の血流量も LITA において 30 ± 16 ml/min から -3.0 ± 13 ml と著明に減少していた ($p=0.001092322$). LAD#8 の血流量も 22 ± 14 ml から

図8 LADseg6 血流量減少率が25%, 50%時の各フローパターン

図9 LADseg6 血流量減少率が75%, 90%時の各フローパターン

14±16 ml まで減少していた($p=3.7798 \times 10^{-5}$) (図7).

LAD#6 の血流量減少率を、25%, 50%(図8), 75%, 90% (図9)まで変化させると実際の流量波形においてLITAの逆流成分波形は徐々に減少し、それに伴いLITAのR/Tも減少し、LAD#6の血流量減少率が75%以上で、LITAのR/Tはほぼ0となり安定した(図10). 血流量としては、LAD#6の血流量減少率が増加すると徐々にLITAの流量は

上昇し、血流量減少率75%以上で安定した値を示した. このとき、LAD#8の流量は増加しなかった(図11).

2. プロトコル2(グラフトの実験的狭窄モデル)

LAD#6の血流量減少率を75%とし吻合部の狭窄率を変化させていった. その結果、吻合部血流量減少率が75%以上になると、LITAのR/Tは吻合部血流量減少率75%で $3.6 \pm 3.8\%$ ($p=0.024227912$), 吻合部血流量減少率90%では

図 10 Changes of reverse flow area ratio (R/T) (LADseg6 stenosis: 0-90%)
LADseg6 の血流量減少率の増加と R/T の変化

図 12 Changes of reverse flow area ratio (R/T) (LITA stenosis: 0-90%)
LITA の吻合部血流量減少率の増加と R/T の変化

図 11 Changes of flows (LADseg6 stenosis: 0-90%)
LADseg6 の血流量減少率の増加と実際の血流量の変化

図 13 Changes of flows (LITA stenosis: 0-90%)
LITA の吻合部血流量減少率の増加と実際の血流量の変化

8.8±10.2%(p=0.035840946)と著明に増加した(図 12)。このときの実際の血流量は吻合部血流量減少率 0% 時 LAD#6 で 18.2±0.9 ml/min, LAD#8 で 23.6±3.4 ml/min であったのが、吻合部血流量減少率 90% 時で、LAD#6 では、34.2±3.4 ml/min(p=2.22753×10⁻⁷) に増加し(変化率 187±21%)、LAD#8 においては 16.5±9.4 ml/min (p=2.22804×10⁻⁶) まで減少(変化率 70±26%)した(図 13)。

IV. 考 察

CABG は、虚血性心疾患に対する外科治療法として確立され、日常的に行われている。しかし薬剤溶出性ステントの導入によって治療の中心は冠動脈インターベンション治療に移行しつつある⁴⁾。現在 CABG の適応となる症例は冠動脈のびまん性狭窄症例、完全閉塞症例、主幹部狭窄症例といったより重症な症例が多くを占めるよう

になり、1 箇所のみが狭窄の質が周術期、遠隔期の morbidity, mortality に大きく影響するため、グラフト吻合にはより高いクオリティを求められるようになっていく。グラフト吻合の良否は、術中に心臓外科医の最も気になる場所であり、術中にリアルタイムに評価できれば安心して閉胸することができ、術中にも吻合のクオリティが良くないことが判明すれば、すぐその場で再吻合することによって、長期のグラフト開存率を高めることが可能となる。

術中にグラフト吻合を評価する方法として、術中 an-gio⁵⁾, thermal angio⁶⁾, 術中心表面エコー⁷⁾, インドシアニンを用いた造影 (SPY)^{8,9)}, などがあり、それぞれに研究が行われているが、これらは視覚的、感覚的なものが多い。TTFM を用いた評価法は、簡便で再現性があり、血管径、HCT 値に影響されず、プローブの角度の影響も

受けない¹⁰⁾ため、ほかの方法と異なり、グラフト吻合を客観的かつ定量的に評価できる方法として注目されている¹¹⁻¹³⁾。

しかし、TTFMを用いた分析においても、どの指標をどのように用いてグラフト吻合のクオリティを評価するかについてはいまだ確立されていない。Walpothら¹³⁾は平均血流量(Qm)が20 ml/min以上で開存を示唆するとしているが、高味ら¹⁴⁾は15 ml/min以上で高い感度、特異度を示したと報告している。Jaber¹⁵⁾らは最適なQmというものとはさまざまな要因によって強く影響されるため、ある数値を決定することはできない、と報告しており、またQmと長期開存率とは相関がないとの報告¹⁶⁾もある。Hirotaniら¹⁷⁾、Holら¹⁸⁾は、CAGと比較して、Qmは吻合部狭窄を検出するのに有効でないと報告しており、D'Anconaら¹²⁾はQmだけでなく波形、拍動係数(pulsatility index; PI)などの結果から総合的に評価することを勧めている。また、高味ら¹⁴⁾は心電図信号を同期入力して得られる拡張期フィリング係数(DFI)の有用性を報告している。

現在のCABGの適応については、術前の冠動脈造影において、75%以上の狭窄を認めた場合に、CABGの適応とされている³⁾がその狭窄率についてのエビデンスは乏しい。とはいえ、実際の臨床の場において、さまざまな狭窄率の冠動脈に対してバイパスを行い、血行動態の変化を分析し、真にバイパスの適応となる冠動脈の狭窄率を確認することは現実には困難である。また、一般的にグラフト吻合の早期開存率は98%と高く¹⁹⁾、グラフト狭窄のためにその機能が低下した状態を分析、評価できる機会は極めて少なく、グラフトを吻合した冠動脈の中樞の狭窄程度とグラフト流量、および吻合部末梢の冠動脈流量との関係を詳細に分析、検討することは難しい。宮内ら²⁰⁾は臨床の冠動脈バイパス術中に近位側を遮断し、術中グラフト評価をし、その有用性を報告しているが、この方法は、冠動脈を損傷するおそれがあり、通常用いられる評価法としては侵襲が大きいと思われる。今回われわれは、冠動脈の狭窄率やグラフトの吻合部狭窄率を自由に設定できる実験モデルを作成し、グラフト流量波形分析を行った。さらにバイパス後のLITAの流量波形に特徴的に現れた収縮期早期の逆行性波形(R)に注目し、流量波形上の(R)の全流量(T)に対する割合(R/T)を算出し、これがグラフトの血液供給管としての機能評価の指標として有用で妥当であるかを検討した。

プロトコル1においてLAD中樞の狭窄が血流量減少率0%の場合にバイパスを行うと、LAD#8の流量波形はあまり変化せず、LAD#6とLITAの流量波形がちょうど対称性を示すようになった。収縮期早期に、まずLAD#6からLITAへの逆行性血流が認められた。この現象はLITAがLAD#6からの血流の逃げ道となったためで、このときLAD#6の波形は順行性となり、LITAには通常では見られ

ない逆行性の波形が認められた。その後冠動脈とLITAにかかる動脈圧の時間的位相のずれから、LITAの順行性の血流が増えてくると今度は逆にLITAから、LAD#6への逆行性血流が増えるようになったと考えられ、このとき、LAD#6とLITAの間で血流競合(competition flow)が起こっていることが示唆された。このことからわれわれはLITAの流量波形でみられる逆行性波形(R)の大きさは、LAD#6とLITAの間の血流競合の程度を反映しうるのでないかと考えた。

プロトコル1の結果から、LAD#6の血流量減少率が75%以上になると(R)は減少することから、LAD#6の血流量減少率75%以上で、LAD#6とLITAの血流競合の程度は著しく減少することが示唆された。このことから冠動脈中樞の血流量減少率が少なくとも75%以上でバイパスした場合に、十分なグラフト流量が得られ、グラフトは血液供給管として有効に機能することが示された。この血流量減少率75%は、もし同心円状に冠動脈が狭窄すると仮定すると、一般に行われている冠動脈造影上の狭窄率50%に相当する(図3)。このことから冠動脈造影上の冠動脈の狭窄率が50%以上であればバイパスグラフトは有効に機能し、CABGを行う十分な価値があると思われる。これはCABGの適応として提唱されてきた「冠動脈の狭窄率75%以上」という適応条件の幅を広げる可能性がある注目すべき知見である。

今回の実験では、プロトコル1においてLAD#6の狭窄を強くしてもLAD#8の流量の著しい変化は認められなかった(血流量減少率0%時: 26±5 ml/min → 血流量減少率90%時: 26±4 ml/min) (p=0.277594)。この現象については、本実験モデルは実際の臨床のように慢性的ゆっくりと虚血が進行した状態ではなく、LAD#8のcoronary reserveが低下した状態とは違い、LITAとLAD#6間で血流競合を起こしていてもその状態でcoronary reserveとしてLAD#8に十分な血流が維持されていたためと考えた。

プロトコル1の結果を踏まえ、プロトコル2ではLAD#6の血流量減少率を75%に固定し、LITAの吻合部の狭窄率を変化させた。吻合部狭窄によるグラフト機能障害が増強すると吻合部血流量減少率が75%以上で、LITAのR/Tの増加を認めた。LAD#8の血流量も減少することから、吻合部血流量減少率が75%以上ではLITAは血液供給管として適切に機能しなくなる可能性が示唆された。もちろん血流量減少率が75%以下であっても乱流などの影響による長期的な開存率を保証できるわけではない。Jaberら¹⁵⁾はoff-pump CABGにおいてTTFMは75%未満の吻合部狭窄では、狭窄のないものと同様な拡張期優位の血流波形を示すと報告しているが、今回の実験で得られた結果を検討すると、単なる拡張期優位というパターン認識のみでは狭窄率の評価としては不十分であると考えられ、今回われわれが提唱したような定量的指標が血流量の減少率に対する評価には適していると思われる。

以上より、グラフト流量波形上の逆行性成分面積比(R/T)は、グラフト機能を推定する信頼性のある定量的な指標となりうることを示唆された。これにより術中にグラフト吻合の整合性、妥当性が判断でき、グラフトの機能評価が可能となり、術直後に起こりうる吻合部狭窄の予測が可能であり、グラフト不全の早期診断につながると考えられた。しかしながら、今回の実験は動脈硬化をまったく起こしていない状態のブタを用いており、実際の臨床における慢性的に動脈硬化をもった冠動脈狭窄症例とは、血管抵抗や弾力性が異なっている。また、今回の実験は狭窄率の違いによる波形の特徴を見つけ、それが狭窄率の違いにより定量的に変化するかを検討したもので、この実験で得られたデータを実際臨床応用するには、さらに多くのサンプル数を集め、また実際の臨床データと突き合わせ、その整合性を検討して、基準値を決定する必要がある。また、LITA、LADのバイパス前の血流量の相対関係による影響、狭窄部と吻合部の距離、狭窄部位の長さ、程度(単発、多発、びまん性など)、などによる差異や、動脈グラフトと静脈グラフトの差異なども検討すべき課題であると思われる。今回注目したR/Tは、逆行性波形成分の実測値ではなく、全流量波形成分に対する逆流成分流量の比を表している。したがって全流量が低下するほど、逆流成分が強調され、R/Tは大きな値になる。このことは実際に起こっている逆流、狭窄を過大に評価している可能性があるため、R/Tのみならず、流量などほかの実測値を参考にして総合的に評価する必要がある。われわれは冠動脈バイパスグラフトの流量波形から抵抗、コンプライアンスを数理モデルから計算する評価法の有用性も報告しており^{21, 22)}、これらのデータと今回の実験結果との関連性を検討し、色々な有効なパラメータを取り入れた総合的な評価法を確立する必要があると考える。

V. 結 語

1) LAD 中枢の血流量減少率が0%でバイパス吻合した場合、LITAの流量波形でみられる逆行性波形成分面積比(R/T)の大きさはLADとLITAの間の血流競合の度を反映し、このときグラフト吻合部末梢への流量は低下し、グラフト機能障害が示唆された。

2) LAD 中枢の血流量減少率が75%以上の場合、逆行性波形成分面積比(R/T)は減少し、LADとLITAの血流競合の度は減少し、十分なグラフト流量が得られ、正常なグラフト機能を呈した。つまり血流減少率75%(冠動脈造影上50%)以上であれば、CABGを行い、冠動脈の血流改善を期待できると考えられた。

3) LITAの吻合部狭窄の度が増加すると、LITAの逆行性波形成分面積比(R/T)は増加した。このとき、冠動脈末梢の血流量は減少した。これらの現象は吻合部狭窄によるグラフト機能障害を示唆した。

4) トランジットタイム血流計を用いたCABG術中グラフト血流評価において、LITAの流量波形上の逆流成分(R)の全流量波形成分(T)に対する割合R/Tはグラフト機能を推定する信頼性のある定量的な指標の一つとして有用であると考えられた。

文 献

- 1) 我が国の冠動脈外科の現状：2010年度全国冠動脈外科アンケート調査結果2011年7月14日<<http://www.jacas.org/enquete/2010.html>> (accessed September 20, 2011)
- 2) Fitzgibbon GM, Kafka HP, Leach AJ, Keon WJ, Hooper GD, Burton JR: Coronary bypass graft fate and patient outcome; angiographic follow-up of 5065 grafts related to survival and reoperation in 1388 patients during 25 years. *J Am Coll Cardiol* 1996; **28**: 616–626
- 3) 循環器病の診断と治療に関するガイドライン(1998 – 1999年度合同研究班報告)冠動脈疾患におけるインターベンション治療の適応ガイドライン(冠動脈バイパス術の適応を含む)―待機的インターベンション―. *Jpn Circ J* 2001; **64**: 1009–1022
- 4) Kaiser C, Brunner-La Rocca HP, Buser PT, Bonetti PO, Osswald S, Linka A, Bernheim A, Zutter A, Zellweger M, Grize L, Pfisterer ME; BASKET Investigators: Incremental cost-effectiveness of drug-eluting stents compared with a third-generation bare-metal stent in a real-world setting: randomised Basel Stent Kosten Effektivitäts Trial (BASKET). *Lancet* 2005; **366**: 921–929
- 5) Goldstein JA, Safian RD, Aliabadi D, O'Neill WW, Shannon FL, Bassett J, Sakwa M: Intraoperative angiography to assess graft patency after minimally invasive coronary bypass. *Ann Thorac Surg* 1998; **66**: 1978–1982
- 6) Mohr FW, Falk V: As originally published in 1989; thermal coronary angiography; a method for assessing graft patency and coronary anatomy in coronary bypass surgery; update in 1997. *Ann Thorac Surg* 1997; **63**: 1506–1507
- 7) Suematsu Y, Takamoto S, Ohtsuka T: Intraoperative echocardiographic imaging of coronary arteries and graft anastomoses during coronary artery bypass grafting without cardiopulmonary bypass. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2001; **122**: 1147–1154
- 8) 川島敏也, 奈良岡秀一, 柿崎哲也, 高橋政夫, 向原伸彦: 蛍光画像システムによるCABGグラフトの術中評価. *胸部外科* 2009; **62**: 519–522
- 9) Reuthebuch O, Haussler A, Genoni M, Tavakoli R, Odavic D, Kadner A, Turina M: Novadaq SPY: Intraoperative quality assessment in off-pump coronary artery bypass Grafting. *Chest* 2004; **125**: 418–424
- 10) Canver CC, Cooler SD, Murray EL, Nichols RD, Heisey DM: Clinical importance of measuring coronary graft flows in the revascularized heart; ultrasonic or electromagnetic? *J Cardiovasc Surg* 1997; **38**: 211–215
- 11) 中田金一, 秋山謙次, 古賀 守, 長谷川雅江, 服部努, 舟橋道雄, 根岸七雄: 大動脈内バルーンパンピングが冠動脈バイパスグラフトに与える影響. *胸部外科*

- 2003; **56**: 371–375
- 12) D’Ancona G, Karamanoukian HL, Ricci M, Schmid S, Bergsland J, Salerno TA: Graft revision after transit time flow measurement in off-pump coronary artery bypass grafting. *Eur J Cardiothorac Surg* 2000; **17**: 287–293
- 13) Walpoth BH, Bosshard A, Genyk I, Kipfer B, Berdat PA, Hess OM, Althaus U, Carrel TP: Transit-time flow measurement for detection of early graft failure during myocardial revascularization. *Ann Thorac Surg* 1998; **66**: 1097–1100
- 14) Takami Y, Matsumoto H: A new index of intraoperative transit-time flow evaluation in coronary artery bypass grafting. *J Cardiothorac Surg* 2006; **35**: 5–9
- 15) Jaber SF, Koenig SC, BhaskerRao B, VanHimbergen DJ, Cerrito PB, Ewert DJ, Gray LA Jr, Spence PA: Role of graft flow measurement techniq in anastmotic quality assessment in minimally invasive CABG. *Ann Thorac Surg* 1998; **66**: 1087–1092
- 16) Louagie YA, Haxhe JP, Jamart J, Buche M, Schoevaerdt JC: Doppler flow measurement in coronary artery bypass grafts and early postoperative clinical outcome. *Thorac Cardiovasc Surg* 1994; **42**: 175–181
- 17) Hirotani T, Kameda T, Shirota S, Nakao Y: An evaluation of the intraoperative transit time measurements of coronary bypass flow. *Eur J Cardiothorac Surg* 2001; **19**: 848–852
- 18) Hol PK, Fosse E, Mork BE, Lundblad R, Rein KA, Lingaas PS, Geiran O, Svennevig JL, Tonnessen TI, Nitter-Hauge S, Due-Tonnessen P, Vatne K, Smith HJ: Graft control by transit time flow measurement and intraoperative angiography in coronary artery bypass surgery. *Heart Surg Forum* 2001; **4**: 254–257
- 19) Kobayashi J, Tashiro T, Ochi M, Yaku H, Watanabe G, Satoh T, Tagusari O, Nakajima H, Kitamura S; Japanese Off-Pump Coronary Revascularization Investigation (JOCRI) Study Group: Early outcome of randomized comparison of off-pump and on-pump multiple arterial coronary revascularization. *Circulation* 2005; **112**: 1338–1343
- 20) 宮内忠雅, 島袋勝也, 今泉松久, 福本行臣, 竹村博文: 冠狀動脈バイパス術における近位側遮断試験による術中グラフト評価. *日本冠疾患学会雑誌* 2007; **13**: 195–200
- 21) Nakata K, Sankai Y, Akiyama K, Orime Y, Kashiwazaki S, Koba H, Shiono M: Evaluation of a new device for the intraoperative assessment of coronary artery bypasses grafting. *Ann Thorac Cardiovasc Surg* 2011; **17**: 160–165
- 22) 古場隼人, 中田金一, 秋山謙次, 折目由紀彦, 高森達也, 山海嘉之: 血管系の数値モデルによる動脈抵抗の評価: 動物実験による検証. *生体医工学* 2011; **49**: 84–90