

経皮的冠動脈形成術後の冠動脈内腔の評価：定量的冠動脈造影法と血管内エコー図法との比較

Intravascular Ultrasound Assessment at the Site of Balloon Angioplasty: Comparison With Quantitative Coronary Angiography

山下 恭寛
高沢 謙二
藤田 雅巳
池谷 敏郎
伊吹山千晴

Yasuhiro YAMASHITA
Kenji TAKAZAWA
Masami FUJITA
Toshiro IKETANI
Chiharu IBUKIYAMA

Abstract

The effect of coronary angioplasty is usually evaluated on the basis of coronary angiography. However, angiographic images taken after angioplasty vary and the angiographic assessment of the therapeutic success of angioplasty is limited by local disruptions and dissections at the site of the dilatation, which are often difficult to detect by angiography. Intravascular ultrasound imaging is a new method for evaluation of coronary dimensions and wall morphology.

Quantitative coronary angiographic analysis was compared with intravascular ultrasound assessment after balloon angioplasty in 42 patients. A diagnostic ultrasound imaging catheter was used during percutaneous transluminal coronary angioplasty (PTCA) to image both the lesion and the vessel segment just proximal (reference segment). Correlation between angiographic and ultrasound findings of vessel diameters and areas at reference segments was closer ($r=0.78, 0.66$) than at the sites of PTCA ($r=0.54, 0.36$). Dilated sites were analyzed in two subgroups segregated by degree of lumen eccentricity. An eccentric vessel lumen, defined as a circular shape factor of less than 0.92, was present at 25 of 42 sites. The correlation between angiographic and ultrasonic cross sectional area was not as close for these eccentric segments ($r=0.37$). The difference in luminal areas between eccentric lumens estimated by edge detection and densitometry methods was $0.93 \pm 0.3 \text{ mm}^2$, significantly greater than $0.54 \pm 0.31 \text{ mm}^2$ in the circular group ($p < 0.01$).

Luminal area after balloon angioplasty is clinically important to confirm by intravascular ultrasound especially in patients with large differences in measured values by quantitative coronary angiography.

Key Words

intravascular ultrasound, eccentricity, quantitative coronary angiography, differential value, percutaneous transluminal coronary angioplasty

はじめに

経皮的冠動脈形成術 (percutaneous transluminal coronary angioplasty: PTCA) は、1977年に初めて Gruentzig が報告¹⁾して以来、器具の改良、また手技の上達などにより治療成績が向上し、虚血性心疾患の治療法の一つとして、今日広く普及している。

従来より虚血性心疾患における冠動脈病変の診断や PTCA などのインターベンション後の評価は、冠動脈造影により行われているが、冠動脈造影は造影剤による血管内腔の投影像であり、血管の解剖学的性状までは正確に表現できず、冠動脈造影による病変部の狭窄率の評価と病理組織学的所見とを比較した研究では、両者の不一致を認める報告²⁾もある。

近年、血管内エコー図法 (intravascular ultrasound: IVUS) の開発により、冠動脈内膜、中膜の粥状硬化の観察や冠動脈内径、内腔断面積の正確な測定が可能となり³⁻⁶⁾、PTCA 施行部位に関しても、血管造影による評価との間に解離を認める報告がある^{7,8)}。しかし現時点においては、どの施設でも PTCA 後 IVUS による内腔の確認が可能というわけではなく、そのため血管造影で得られる情報から、IVUS で観察できる内腔形態を推定し、評価することは重要と思われる。

そこで今回、PTCA 施行部位の血管内腔形態の評価において densitometry 法と edge detection 法との両者の計測結果に差異がある点に着目し、IVUS での内腔形態評価、内腔径、内腔面積と比較し、その問題点について検討した。

方 法

1. 対 象

当院において狭心症、心筋梗塞治療のため PTCA を施行し、術中に IVUS で病変部位を観察しえた 42 例を対象とした。性別は男 35 例、女 7 例、年齢は 43-75 歳、病変部位は右冠動脈 13 例、左冠動脈前下行枝 24 例、回旋枝 5 例であった。PTCA のバルーンサイズは 2.5-4.0 mm を使用し、至適バルーンサイズは術前造影での病変の近位部、および遠位部の血管径をもとに決定した。Indentation がとれるまで加圧し、残存狭窄率 50% 以下を成功とし、適宜バルーンのサイズを変更した。なお術前に急性冠閉塞など PTCA の合併症について患者およびその家族に説明、承諾を得るさいに、IVUS 施行についても説明し了解を得た。

2. 血管内エコー図装置

CVIS 製 IVUS イメージングシステムを用いた。画像の深さは 6 点で構成されており、各深さにおけるゲインは 0-40 で調整可能で、ダイナミックレンジは 60dB である。イメージングカテーテルは外径 4.3 Fr、先端に 360° 走査、回転数 1,200 rpm の反射ミラー、周波数 30MHz の超音波探触子を装着したカテーテルを使用した。通常の PTCA 施行後に、冠動脈内にガイドワイヤーをそのまま留置し、エコーカテーテルをモノレール法により冠動脈内に挿入、PTCA を施行した病変部の遠位部より観察を開始し、拡張病変部、造影上異常なしと判定される近接正常部位へとトランス

デューサーを引き抜き、各部位での血管内腔の画像をビデオテープに記録した (Fig. 1)。IVUS 施行に伴う合併症を考慮し、バルーン径 2.5 mm 以上で拡張した症例にのみ IVUS を施行した。IVUS 施行後は少なくとも 10 分以上の間隔をおいた後、再び確認造影を施行し、拡張病変部における攣縮などの合併症の有無を確認した。

3. 定量的冠動脈造影法

冠動脈造影は 25 frames/sec で 35 mm シネフィルムに撮影し、病変部が良好に造影された拡張末期画像を選択した。この画像を CCD カメラを内蔵したプロジェクター (ELK CAP-35B) によりビデオ信号に変換し、画像処理装置 (Kontron 製、CARDIO500) のメモリー上に取り込んだ後、定量的冠動脈造影法 (quantitative coronary angiography: QCA) の densitometry 法と edge detection 法による計測を行った。画像のマトリックスは 512×512 pixel で、計測は catheter calibration (ガイディングカテーテル 8Fr, 2.66 mm) によって、pixel 数から millimeter に変換した⁹⁾。Vessel border は vessel midline に垂直に 100 分割したライン上の vessel density profiles を測定、それぞれについて 12 次の FFT 処理を行い、1 次微分、2 次微分を計測、それら両者の EXTREMA により内側点、外側点を決定、内側から 60% の部位を血管壁とし測定を行った。Densitometry 法は、冠動脈病変部に ROI を設定し、gray level を測定後、両側に設定した background ROI の gray level により補正した。同様にして近接正常部位の gray level を測定し、profile curve の積分値より血管断面積を算出した。

4. Ultrasound measurements

ビデオテープに記録された冠動脈内の超音波画像から拡張病変部、近接正常部内腔の直径、周界、断面積をプランニメーター法で測定した (Fig. 2)。さらに、その内腔形態が正円形に対してどの程度の歪みを示しているかを circular shape factor: CSF=(calculated perimeter/observed perimeter)² で評価し¹⁰⁾、eccentricity の指標とした。冠動脈造影、IVUS による血管内腔、内腔面積の相関、および内腔形態を拡張病変部、近接正常部で比較検討した。

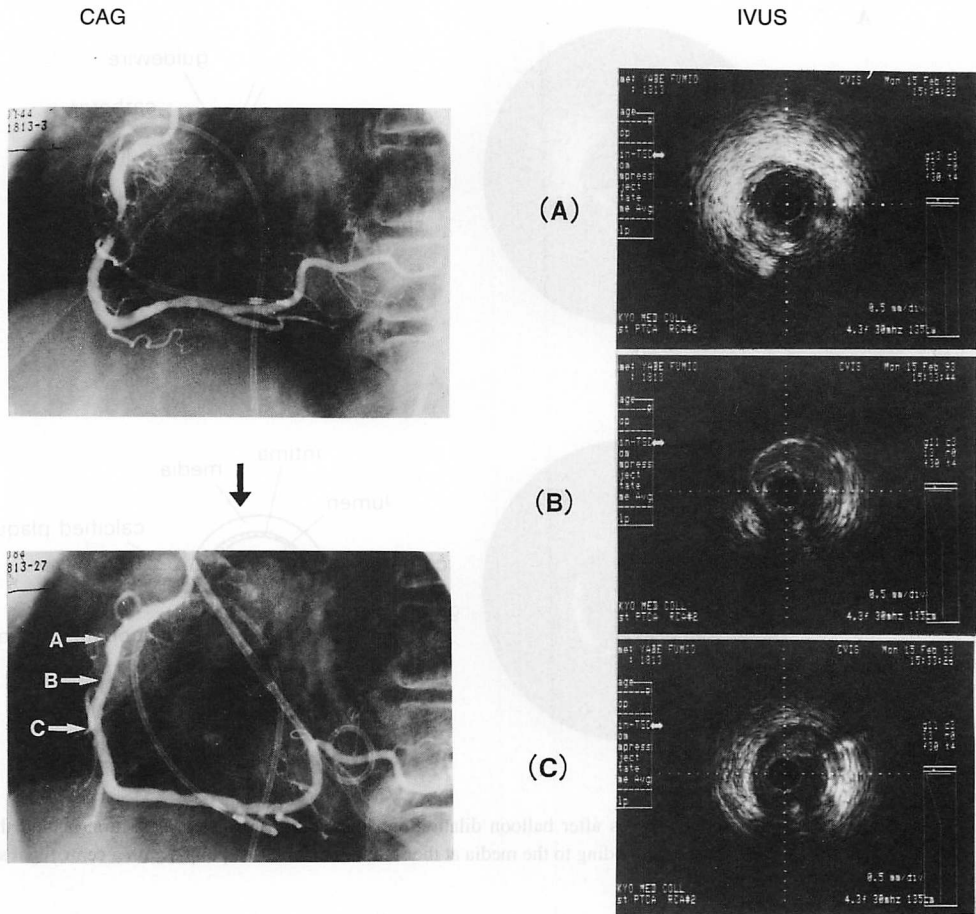
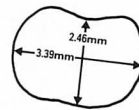
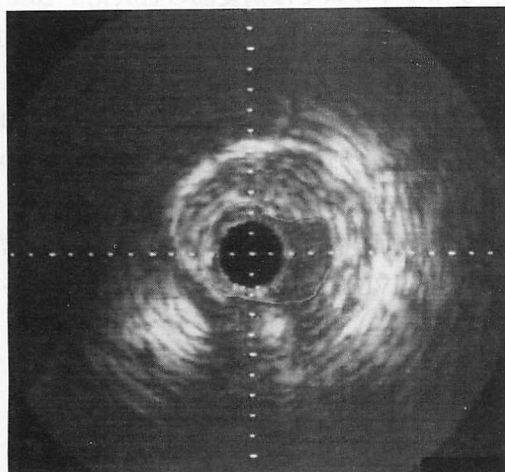


Fig. 1 Angiographic (*left*) and ultrasound (*right*) images in a patient with stable angina

The proximal reference segment demonstrates the following:

- A: Atherosclerotic plaque between the 5 and 9 o'clock positions.
- B: Ultrasound image corresponding to the balloon dilation. Lumen is compromised with a large atheroma mass between the 9 and 3 o'clock positions.
- C: Distal to the dilated segment, a distinct atherosclerotic lesion is seen at the 4 o'clock position.

CAG=coronary angiograms; IVUS=intravascular ultrasound images



CSA = 6.4mm

$$CSF = \left(\frac{\text{Calculated perimeter}}{\text{Observed perimeter}} \right)^2$$

$$= \left(\frac{8.98}{9.67} \right)^2 = 0.864$$

Fig. 2 Planimetry of cross-sectional area (*left*) and calculation of circular shape factor (*right*)

CSA=cross-sectional area; CSF=circular shape factor

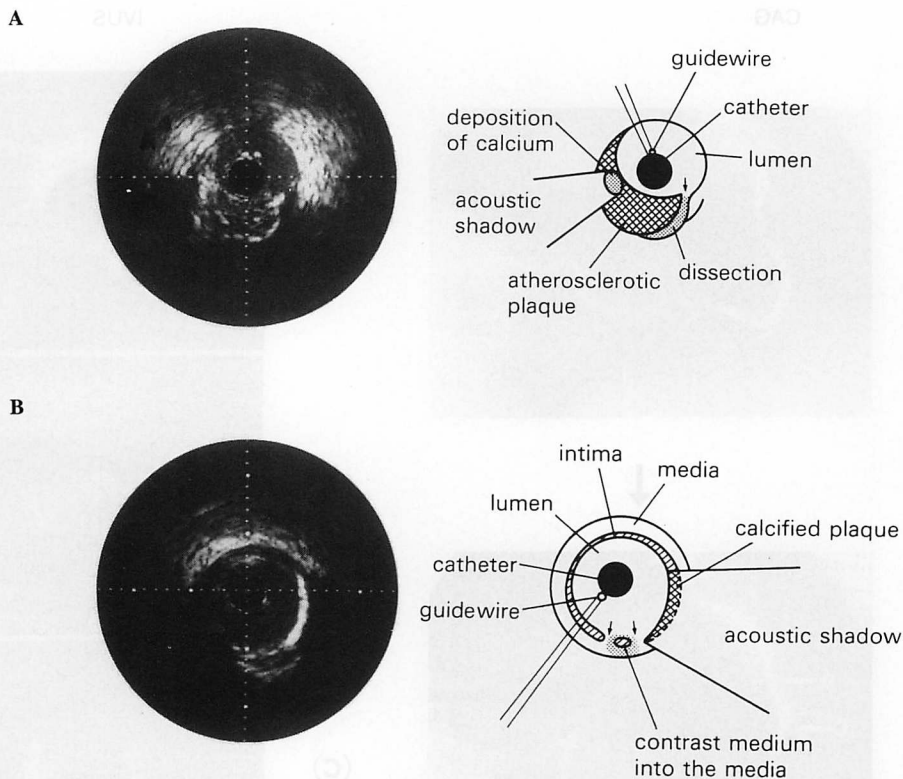


Fig. 3 Intravascular ultrasound images after balloon dilation demonstrating a localized dissection behind the eccentric atheroma (A), and the tear extending to the media at the shoulder of calcified plaque with a centrifugal shadow (B)

5. 定量的冠動脈造影法 (QCA) と病変部内腔形態

拡張病変部を CSF により concentric 群 ($CSF \geq 0.92$), eccentric 群 ($CSF < 0.92$) に分類¹⁰⁾, 同一病変部を QCA の edge detection 法, densitometry 法でそれぞれ得られた内腔面積の差の絶対値 (differential value: D 値) を求め, その D 値と eccentricity による分類とについて検討した.

6. 統計処理

統計学的解析は冠動脈造影と冠動脈内エコー図から得られたそれぞれの血管内腔径, 面積の関係を散布図に示し, 回帰直線分析を用い相関係数を求めた. また concentric 群と eccentric 群間の差の検定には unpaired Student's *t*-test を使用した. データは平均値 ± 標準偏差とし, $p < 0.05$ を統計学的に有意とした.

結 果

PTCA 施行部位に認められた IVUS 所見を **Fig. 3** に示す. IVUS 画像において最も内層の全周性の

echogenic layer を内膜と内弾性板, その外側の echolucent layer を中膜, 最も外側の高エコー域を外膜とし^{11,12)}, また外膜に比し gray level が高く, 音響陰影を有するものを石灰化病変とすると, **Table 1** に示すように, 42 例中 37 例 (88%) に内膜および中膜の亀裂を認め, シネフィルムでは病変部の石灰化が 20% にのみ検出されたが, IVUS では石灰化が 42 例中 33 例 (79%) と多数に認められ, シネ上陰性であっても IVUS で広範囲な石灰化を検出する例 (**Fig. 3-B**) や, シネで石灰化を認めても石灰沈着がプラーク内の一部に限局する例 (**Fig. 3-A**) を認めた. また 42 例中 14 例 (33%) で, 冠動脈造影上異常を認めない近接正常部位においても, IVUS で明らかなプラークが検出された (**Fig. 1-A**).

1. 血管径, 内腔面積の比較

病変部, 対照部位における冠動脈造影と IVUS による血管径, 内腔面積の比較をみると, 血管径についての相関は近接正常部位では $r = 0.78$ ($p < 0.01$) と比較的

Table 1 Ultrasound findings at sites of PTCA

Ultrasound findings at 42 PTCA sites	Lesions	
	n	%
Laceration		
Limited to the intima	12	29%
Extending into the media	18	43%
Dissection	7	17%
Calcification	33	79%

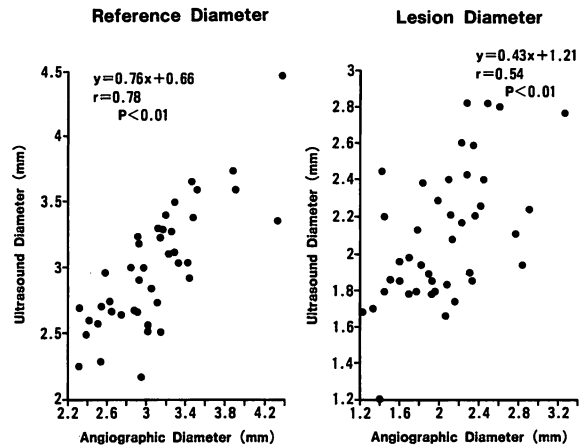


Fig. 4 Correlation between angiographic and ultrasound diameters

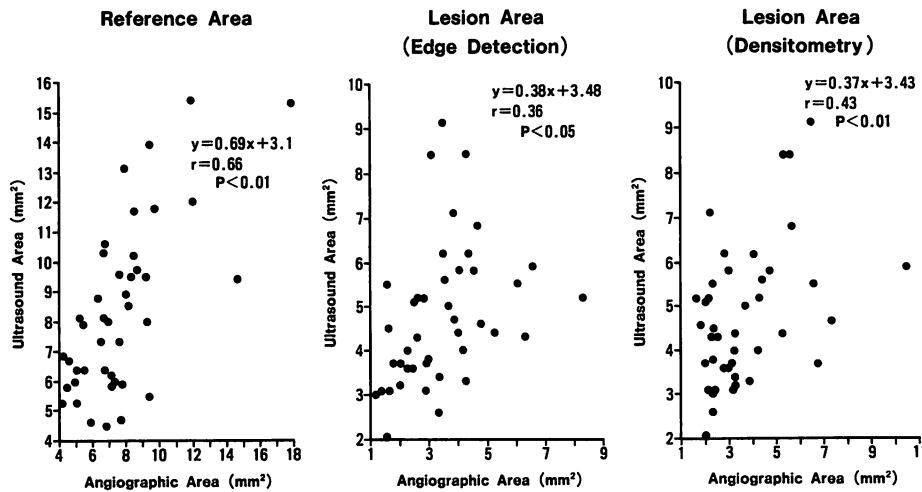


Fig. 5 Comparison of cross-sectional areas measured by ultrasound and angiography after balloon dilation

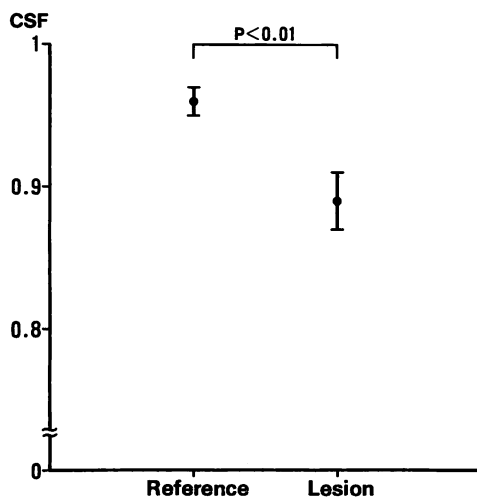


Fig. 6 Circular shape factor at reference segments and at sites of PTCA
Abbreviation as in Fig. 2.

良好であるのに対し、PTCA 施行部位においては $r=0.54$ ($p<0.01$) と相関が低く (Fig. 4), また内腔面積に関しても、近接正常部位では $r=0.66$ ($p<0.01$) に対し、PTCA 施行部位では edge detection 法で $r=0.36$ ($p<0.05$), densitometry 法による解析でも $r=0.43$ ($p<0.01$) と相関が低かった (Fig. 5).

2. Eccentricity

PTCA 施行部位は、IVUS による観察でその内腔形態の指標 CSF により、concentric 群 17 例 (40%), eccentric 群 25 例 (60%) に分類された。

拡張病変部の CSF は 0.89 ± 0.02 , 近接正常部の CSF は 0.96 ± 0.01 であり、PTCA 施行部位の CSF のほうが有意 ($p<0.01$) に低値であった (Fig. 6).

PTCA 施行部位の冠動脈造影, IVUS による内腔面積

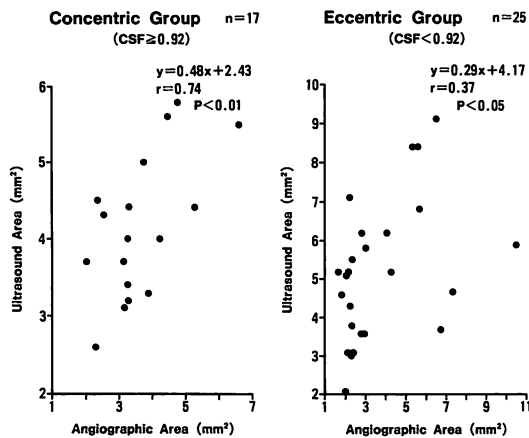


Fig. 7 Comparison of densitometric areas with ultrasound areas in the circular group (left) and the eccentric group (right)

Correlation between angiographic and ultrasound areas was poor in the eccentric group.

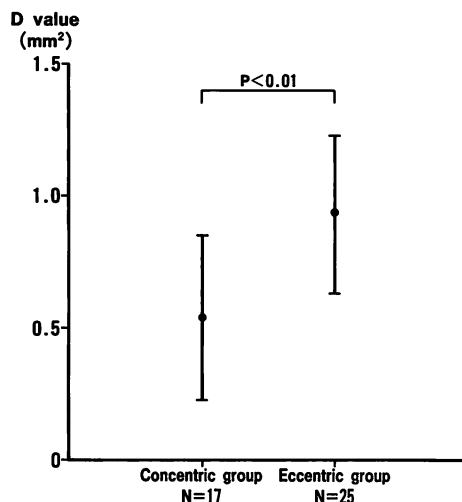


Fig. 8 Difference in angiographic areas measured by edge detection and by densitometry

D value = differential value

の相関を concentric 群, eccentric 群それぞれについてみると, concentric 群で $r=0.74$ ($p<0.01$) に対し, eccentric 群では $r=0.37$ ($p<0.05$) と相関が低かった (Fig. 7).

3. 両方法による内腔面積の差

PTCA 施行部位の内腔面積を QCA で edge detection 法, densitometry 法によりそれぞれ計測すると, その差 (絶対値 D 値) は, eccentric 群では $0.93 \pm 0.3 \text{ mm}^2$, concentric 群では $0.54 \pm 0.31 \text{ mm}^2$ であり, eccentric 群で有意に高値を示した (Fig. 8).

4. 合併症

エコーカテーテルの使用による合併症はほとんど認めず, 安全に施行された. 2例で冠攣縮を認めたが, isosorbide 冠注により解除された. IVUS 施行により冠動脈解離, 心筋梗塞などの合併症を起こした症例は認めなかった.

考 察

従来より PTCA による狭窄病変の拡張後の評価は, 主に冠動脈造影で熟練した術者の肉眼による判定で行われているが, その造影所見の特徴は多彩で, 血管辺縁は smooth-walled dilation のほか, extraluminal hasiness, さらに intraluminal hasiness を伴う症例, 伴わない症例, そして extraluminal dissection, spiral-type dissection, aneurysmal dilation など^{13,14}を認め, その内腔の評価は術者により異なることがある.

1. 定量的冠動脈造影法と IVUS の比較

近接正常部位では, 血管内径および内腔面積は冠動脈造影, IVUS 両者間で比較的良好な相関 ($r=0.78$, $r=0.68$) があるのに対し, PTCA 施行部位では, 狭窄病変の断面は複雑な形態に拡張されるため, 両者の相関は低く, その評価には十分な注意を要することが示された. ヒト冠動脈における PTCA 施行部の病理学的変化に関する報告では, 初期に考えられていたプラークの圧排¹⁵によるものよりも, プラークの破壊や, 中膜・内膜の断裂とそれによる動脈壁の伸展が重要視されてきており, Waller¹⁶は病理組織学的検討で, plaque fracture, 内膜のフラップ, 中膜の dissection が PTCA の主要なメカニズムであり, さらに偏在性病変においては健全部分の伸展もその要因になると述べている. Frab¹⁷も病理学的検討で, PTCA 拡大のメカニズムにおける中膜破綻の重要性を報告している. IVUS でもエコーカテーテルを回転させたり前後にわずかつ動かし, また観察中に contrast medium を注入するなどの工夫で, leading edge が不明瞭な部位, 裂傷の深達度などについて観察を行っているが, その解像度にはまだ発展の余地があり, その読影にも熟練を要すると考えられる. 病理学的には PTCA のほとんどの症例に内膜・中膜の亀裂が生じているとされるが, 内膜にとどまるわずかな亀裂では検出できない例もあると考えられ, また中膜の断裂についても, hard plaque の後では

音響陰影により情報が消失し、sonolucent zone の内部での dissection の範囲について判読困難な症例もある。

QCA では vessel border 決定の正確性に大きく影響を受けるため、PTCA 施行部位では内腔が不十分でも亀裂部に入り込む造影剤によりアウトラインが不整となり、撮影方向により過大評価される可能性が考えられる。また残存プラーク、その破壊により造影効果にむらができる症例などでは、十分な内腔があってもその内腔を過小評価する可能性があり、それらさまざまな拡張病変部の病理学的特徴と撮影方向との組み合わせにより PTCA の評価に誤差を生じると考えられる。

2. Eccentricity と計測法による差

Densitometry 法と edge detection 法による計測結果の比較では、concentric 群に比し、eccentric 群で両法の計測結果に解離の認められる症例が多く認められた。Edge detection 法が横幅のみの 1 次元的測定であるのに対し、densitometry 法は横幅に加え奥行きとしての濃度を考慮した 2 次元的測定法であるため、撮影方向や狭窄形態の違いによる影響を受け難い特徴があるが、その内腔面積の評価は、IVUS と比較して edge detection 法では $r=0.36$ 、densitometry 法でも $r=0.43$ と相関が低かった。

Eccentric 群では concentric 群に比し、両法の計測結果の差 (D 値) が大きくなり、これらの症例では IVUS による測定結果とも解離を生じた。これは冠動脈造影上この値が高値を示すような症例では、拡張された内腔形態が複雑で、亀裂や残存プラーク、その破壊で造影効果に大きな影響を及ぼして造影所見が解離していると考えられる。血管内腔が正円であれば理論上、phantom 試験に示されるように両法の計測結果は一致するはずで、内腔形態が複雑で正円からの歪みが強い CSF が低値な症例で、両法の計測結果に解離を生じた。このことは両計測の差が大きい症例では、PTCA 後の評価に十分な注意を要すると考えられた。

3. 定量的動脈造影法の問題点

最近、冠動脈の狭窄病変や PTCA 施行部位の客観的・定量的判定を目的として、シネビデオコンバーターとコンピューター画像処理の進歩による血管内腔の定量的計測が多用され¹⁸⁾、臨床的に有用となってい

る。本法の問題点として、体内走行、つまり 3 次元空間を蛇行する血管を 2 次元的に投影して計測すること、撮影方向の違いにより椎体など background の影響を強く受けること、画素子数による解像度の問題、計測病変部位と絶対値の基準とするカテーテルとの空間内のずれによる誤差、さらに本法は vessel edge detection の正確性如何により非常に影響を受けるため、side branch の存在や、造影の均一性などの手技的要素も関与することから、今後コンピューター解析がさらに進歩する余地がある。

4. IVUS の臨床的有用性

冠動脈は IVUS で 3 層構造として観察され、それぞれ内膜、中膜、外膜を描出している¹¹⁾。摘出冠動脈標本を用いた実験で¹²⁾、最も内層の全周性の echogenic layer は内膜と内弾性板、その外側の echolucent layer は中膜、最も外側の高エコー域が外膜であることが指摘されている。今回、IVUS により、冠動脈造影では得ることのできない正確な冠動脈の内腔径、面積が得られ、血管壁の情報に関しても Fig. 1-A に示したように、冠動脈造影上病変を認めない近接正常部位にも観察部位により中等度の動脈硬化性病変が直接観察された。

PTCA 術中、狭窄病変に対し十分な拡張が得られたとして終了してよいか、あるいはより高压で再度バルーン拡張を施行またはバルーンのサイズを変更し拡張すべきかなどは、主に熟練した術者による冠動脈撮影の肉眼的判断によっている。しかし症例によっては病変部の造影効果が不均一で、十分な内腔が得られたかどうか判断に迷うことがしばしばある。術中、病変部が造影上では十分拡張されたと考えられたにもかかわらず、まだプラークにより内腔が占められており、さらにバルーン拡張を必要とする例や、従来なら造影上薄く拡張不十分と考えられ拡張を繰り返すような病変が、IVUS で十分な内腔を確認されるといった経験をするところがあるが、IVUS の開発は血管内腔を確認する装置として認められつつある。

今後、PTCA の重要な問題点である再狭窄についても、IVUS の所見から再狭窄の有無¹⁹⁾をある程度予測することが可能になれば、その所見により new device を使い分け、coronary intervention の成績の向上に役立つなど幅広い有用性が期待される。

要 約

経皮的冠動脈形成術 (PTCA) を施行した拡張病変部の血管内腔は、プラークの破壊や、血管壁の亀裂、解離などのため複雑な形態を有し、冠動脈造影上、造影効果が不均一で、その評価が困難な症例がある。今回、PTCA 後血管内エコー図法 (IVUS) を施行し、定量的冠動脈造影法 (densitometry 法, edge detection 法) の計測結果と比較して、注意を要する PTCA 後の評価について検討した。

対象は虚血性心疾患患者 42 例で、PTCA 後血管内エコー図法 (CVIS 製 30MHz, 4.3Fr) を施行し、近接正常部、拡張病変部それぞれの血管内腔径、面積および circular shape factor: CSF = (calculated perimeter/observed perimeter)² を比較した。さらに拡張病変部を CSF により concentric 群 (CSF \geq 0.92) 17 例, eccentric 群 (CSF<0.92) 25 例に分類し、冠動脈造影、血管内エコー図法の内腔面積の相関および edge detection 法, densitometry 法で測定した内腔面積の差である D 値を比較した。

冠動脈造影と血管内エコー図法との血管内腔径の相関は、近接正常部では $r=0.78$ 、拡張病変部では $r=0.54$ 、内腔面積についても近接正常部では $r=0.66$ 、病変部では edge detection 法で $r=0.36$ 、densitometry 法でも $r=0.43$ と相関が低かった。拡張病変部の CSF は 0.90 ± 0.02 で、近接正常部 0.96 ± 0.01 より低値であった ($p < 0.01$)。PTCA 施行部位の内腔面積を edge detection 法, densitometry 法によりそれぞれ計測し、その差の絶対値 D 値をみると、eccentric 群では $0.93 \pm 0.3 \text{ mm}^2$ で、concentric 群の $0.54 \pm 0.31 \text{ mm}^2$ よりも有意に高値を示した。

PTCA 施行部の内腔は近接正常部より CSF が低値で、とくに定量的冠動脈造影上 D 値が高い症例では、その評価に十分注意を要し、十分な内腔が得られたか、さらにバルーン拡張を要するかは、IVUS による内腔の確認が有用と考えられた。

J Cardiol 1994; 24: 423-431

文 献

- 1) Gruentzig AR: Nonoperative dilatation of coronary artery stenosis: Percutaneous transluminal angioplasty. *N Engl J Med* 1979; **301**: 61-68
- 2) Vlodaver Z, Frech RS, Van Tassel RA, Edwards JE: Correlation of the antemortem coronary arteriogram and the postmortem specimen. *Circulation* 1973; **47**: 162-169
- 3) Nishimura RA, Edwards WD, Warnes CA, Reeder GS, Holmes DR Jr, Tajik AJ, Yock PG: Intravascular ultrasound imaging: In vitro validation and pathologic correlation. *J Am Coll Cardiol* 1990; **16**: 145-154
- 4) Gussenhoven EJ, Essed CE, Lancée CT, Mastik F, Frietman P, Van Egmond FC, Reiber J, Bosch H, Van Urk H, Roelandt J, Bom N: Arterial wall characteristics determined by intravascular ultrasound imaging: An in vitro study. *J Am Coll Cardiol* 1989; **14**: 947-952
- 5) Bartorelli AL: Plaque characterization of atherosclerotic coronary arteries. *Echocardiography* 1990; **7**: 389-395
- 6) Potkin BN, Bartorelli AL, Neville RF, Roberts WC, Leon MB: Coronary artery imaging with intravascular high-frequency ultrasound. *Circulation* 1990; **81**: 1575-1585
- 7) Nissen SE, Grines CL, Gurley JC, Sublett K, Haynie D, Diaz C, Booth DC, DeMaria AN: Application of a new phased-array ultrasound imaging catheter in the assessment of vascular dimensions: In vivo comparison to cineangiography. *Circulation* 1990; **81**: 660-666
- 8) Werner GS, Sold G, Buchwald A, Kreuzer H, Wiegand V: Intravascular ultrasound imaging of human coronary arteries after percutaneous transluminal angioplasty: Morphologic and quantitative assessment. *Am Heart J* 1991; **122**: 212-220
- 9) Buchi M: Validation of a new automatic system for biplane quantitative coronary arteriography. *Int J Card Imaging* 1990; **5**: 93-103
- 10) Nissen SE, Gurley JC, Grines CL, Booth DC, McClure R, Berk M, Fischer C, DeMaria AN: Intravascular ultrasound assessment of lumen size and wall morphology in normal subjects and patients with coronary artery disease. *Circulation* 1991; **84**: 1087-1099
- 11) Mallery J: Assessment of normal and atherosclerotic arterial wall thickness with an intravascular ultrasound imaging catheter. *Am Heart J* 1990; **119**: 1392-1400
- 12) Webb JG, Yock PG, Slepian MJ, White NW, Hui PY, Rowe MH, Linker DT, Finkbeiner WE: Intravascular ultrasound: Significance of the three-layered appearance of normal muscular arteries. *J Am Coll Cardiol* 1990; **15**: 17A(abstr)
- 13) Waller BF: Morphologic correlates of coronary angiographic patterns at the site of percutaneous transluminal coronary angioplasty. *Clin Cardiol* 1988; **11**: 817-822

- 14) Naruko T, Ueda M, Becker AE, Tojo O, Teragaki M, Takeuchi K, Takeda T: Angiographic-pathologic correlations after elective percutaneous transluminal coronary angioplasty. *Circulation* 1993; **88**: 1558–1568
- 15) Dotter CT, Judkins MP: Transluminal treatment of arteriosclerotic obstruction: Description of a new technic and a preliminary report of its application. *Circulation* 1964; **30**: 654–670
- 16) Waller BF: “Crackers, breakers, stretchers, drillers, scrapers, shavers, burners, welders and melters”: The future treatment of atherosclerotic coronary artery disease? A clinical-morphologic assessment. *J Am Coll Cardiol* 1989; **13**: 969–987
- 17) Farb A, Virmani R, Atkinson JB, Kolodgie FD: Plaque morphology and pathologic changes in arteries from patients dying after coronary balloon angioplasty. *J Am Coll Cardiol* 1990; **16**: 1421–1429
- 18) Hermiller JB, Cusma JT, Fortin DF, Harding MB, Bashore TM: Quantitative and qualitative coronary angiographic analysis. *Cathet Cardiovasc Diagn* 1992; **25**: 110–131
- 19) Honye J, Mahon DJ, Jain A, White CJ, Ramee SR, Wallis JB, Al-Zarka A, Tobis JM: Morphological effects of coronary balloon angioplasty in vivo assessed by intravascular ultrasound imaging. *Circulation* 1992; **85**: 1012–1025