

1.5-Tesla pulsed arterial spin labeling灌流画像 における頸動脈ステント留置前後の内頸動脈錐体骨 部arterial transit artifactの変化

後藤, 克宏
原三信病院脳神経外科

山本, 光孝
原三信病院循環器科

安部, 啓介
原三信病院脳神経外科

庄野, 禎久
原三信病院脳神経外科

他

<https://doi.org/10.15017/6788682>

出版情報：福岡醫學雑誌. 113 (4), pp.73-82, 2022-12-25. Fukuoka Medical Association
バージョン：
権利関係：

原 著

1.5-Tesla pulsed arterial spin labeling 灌流画像における頸動脈 ステント留置前後の内頸動脈錐体骨部 arterial transit artifact の変化

¹⁾原三信病院 脳神経外科

²⁾原三信病院 循環器科

³⁾九州大学大学院 医学研究院 脳神経外科

⁴⁾原三信病院 放射線科

⁵⁾蜂須賀病院 脳神経外科

後藤克宏¹⁾, 山本光孝²⁾, 安部啓介¹⁾, 庄野禎久¹⁾, 迎伸孝³⁾, 下川能史³⁾,
田中厚生⁴⁾, 有村公一³⁾, 吉本幸司³⁾, 森岡隆人⁵⁾

Changes of the Arterial Transit Artifact of the Petrous Internal Carotid Artery Following Carotid Artery Stenting on 1.5-Tesla Pulsed Arterial Spin Labeling Perfusion Image

Katsuhiro GOTO¹⁾, Mitsutaka YAMAMOTO²⁾, Keisuke ABE¹⁾, Tadahisa SHONO¹⁾,
Nobutaka MUKAE³⁾, Takafumi SHIMOGAWA³⁾, Atsuo TANAKA⁴⁾, Koichi ARIMURA³⁾,
Koji YOSHIMOTO³⁾ and Takato MORIOKA⁵⁾

¹⁾ Department of Neurosurgery, Harasanshin Hospital

²⁾ Department of Cardiology, Harasanshin Hospital

³⁾ Department of Neurosurgery, Graduate School of Medical Sciences, Kyushu University

⁴⁾ Department of Radiology, Harasanshin Hospital

⁵⁾ Department of Neurosurgery, Hachisuga Hospital

Abstract

Purpose : We investigated the relationship between the arterial transit artifact (ATA) of the petrous portion of the internal carotid artery (pICA) on 1.5-T pulsed arterial spin labeling (ASL) perfusion images and hemodynamic changes on digital subtraction angiography (DSA) before and after carotid artery stenting (CAS) in patients with ICA stenosis.

Method : ASL images were taken with postlabeling delay (PLD) of 1.5 s and 2.0 s before and after CAS, and these findings were compared with those of DSA in nine patients.

Results : On pre-CAS ASL, ATA of the pICA was visualized both on PLD 1.5 s and 2.0 s in six cases, in which DSA demonstrated stagnation of contrast medium in the pICA and delayed visualization of the distal MCA. Immediately after CAS, DSA showed improvement in these findings : pICA was either visualized or not visualized on ASL images at 1.5 s, and disappeared at 2.0s.

Conclusion : The presence of ATA of the pICA both on PLD 1.5 and 2.0 s suggests stagnation of blood flow within pICA with delayed visualization of the MCA and its disappearance after the CAS demonstrates improvement of these findings.

Key words : arterial transit artifact, petrous internal carotid artery, carotid artery stenting, pulsed arterial spin labeling, carotid stenosis

はじめに

Arterial spin labeling (ASL) は頸部で動脈血のスピンを磁氣的に標識し、ある一定時間後 (postlabeling delay: PLD) に撮像して、脳組織に流入する標識された脳血流量 (cerebral blood flow; CBF) を表示する灌流画像である^{1)~3)}。ASLでの標識方法は、臨床的には pulsed ASL (PASL) と、pseudocontinuous ASL (pCASL) に大別される^{1)~4)}。PASLは、pCASLに比べて容易な方法で、多くのMR機器に実装可能であるが、効果的な標識が出来ないので、信号対雑音比の低い画像しか得られない。従って現時点ではASLによるCBFの評価には、3-tesla (T) MR装置による3-T pCASLを用いることが推奨されている^{1)~5)}。我々も、閉塞性脳血管障害^{6)~9)}、巨大脳動脈瘤¹⁰⁾、硬膜動静脈瘻¹¹⁾などの様々な脳血管障害やその周術期の脳循環評価に、3-T pCASLがきわめて有用であることを報告してきた。この際、ASLはarterial transit time (ATT)の影響を受けやすいので、通常用いられるPLD1.5秒に、より遅いPLD2.5秒での撮像を追加するdual PLD法を用いることで、血行動態をより明確に描出できることを強調している^{6)~8)10)~12)}。例えば、PLD1.5秒でのASL信号が、2.5秒でさらに上昇すれば遅い血流を、逆にPLD2.5秒で減少すれば速い血流を意味する。また、PLD1.5秒と2.5秒によるdual PLD法の妥当性は、造影剤注入後1.5秒と2.5秒のそれぞれの脳血管撮影 (digital subtraction angiography; DSA) 所見と比較することによって証明されている⁶⁾⁷⁾¹⁰⁾¹³⁾。

さて、内頸動脈 (internal carotid artery; ICA) 狭窄に対する頸動脈ステント留置 (carotid artery stenting; CAS) 前後のCBFや血行動態の変化に関しての過去の報告も、1.5-Tまたは3-T MR装置の違いはあるが、pCASLを用いたものがほとんどである^{14)~19)}。しかし、pCASLは限られたMR装置にしか実装可能ではなく、また3-T MR装置もすべての施設に普及している訳ではない^{1)~3)}。我々は、実臨床で広く応用が可能な1.5-T PASLを用いて、非痙攣性てんかん重積時の発作時過灌流の血行動態について検討した⁵⁾。この際1.5-T PASLにおいては、遅すぎるPLDでは血液スピンの急速なT1緩和によって標識効

果が減衰することから、遅いPLDは2.5秒ではなく、2.0秒を選択している⁵⁾²⁰⁾。その結果、1.5-T PASLではやはり脳組織内の信号よりも頭蓋内主幹動脈の血管内信号、すなわちarterial transit artifact (ATA)の描出が顕著であった⁵⁾。この主幹動脈のうち、例えば中大脳動脈 (middle cerebral artery; MCA) は水平部 (M1) や島部 (M2) をはじめ、遠位の弁蓋部 (M3) や皮質部 (M4) のATAも描出されるが、ICAの錐体骨部 (petrous ICA; pICA) のATAが強く描出されることはほとんど経験しなかった⁵⁾。今回、ICA狭窄症例において1.5-T PASLを用いると、しばしばpICAのATAがきわめて強く描出されることに注目した。このpICAのATA描出の臨床的意義について、CAS前後のPLD1.5秒と2.0秒のASL所見と、造影剤注入後1.5秒と2.0秒のDSA所見をそれぞれ比較する方法⁶⁾⁷⁾¹⁰⁾¹³⁾を用いて検討したので報告する。

対象と方法

対象は2021年4月から2022年3月の期間に同一術者 (MY) により行われたCAS11症例のうち、術前後にtime-of-flight法によるmagnetic resonance angiography (MRA) およびASLを含むMR imaging (MRI) と、^{99m}Tc-ethyl cysteinate dimerによるsingle photon emission tomography (ECD-SPECT)を行った9例である。年齢は55~86歳 (平均71.3歳) で、全例男性であった。

ASLの撮像は1.5T-MR機器 (MAGNETOM Aera; Siemens, Erlangen, Germany) を用いて、過去の報告⁵⁾²⁰⁾と同様に行った。ASLの主な撮像条件は以下の通り: phase encoding in the z direction=24, time to repeat (TR)=3,000 msec, TE=17.18 msec, FOV=220 mm, matrix=64 × 52, slice thickness=3 mm, and number of slices=48。今回も過去の報告⁵⁾²⁰⁾と同様に、PLDは1.5秒 (1,500 msec) と2.0秒 (1,999 msec) を選択した。どちらのPLDでも撮像時間はそれぞれ2分30秒であった。

MRIは術前3~17日 (平均10.8日) に、術後はすべて翌日に行い、ECD-SPECTは術前1~17日 (平均5.7日) に、術後1~4日 (平均2.4日) に行った。

MRAにおいては、非手術側に比べて手術側

ICA と MCA の描出が不良なものを描出不良 (+) と、同じものを (-) とした。ASL においては、両側それぞれの pICA の ATA 描出を PLD1.5 秒と 2.0 秒のそれぞれで、疑似カラー表示で強い赤色で描出されるものを強陽性 (++)、薄い赤色、黄色もしくは緑色で描出されるものを陽性 (+)、描出されないものを陰性 (-) で判定した。また、手術側 MCA の ATA 描出が非手術側に比べて遅いものを MCA の ATA 描出遅延 (+) と、手術側 MCA 領域の描出が非手術側に比べて不良なものを MCA 領域の描出不良 (+) と判定した。

ECD-SPECT による脳血流量の評価には Patlak plot 法を用いて²¹⁾、左右の血流量を比較した。

術前 DSA では、非手術側の総頸動脈に造影剤を注入後、右 pICA 内の造影剤濃度が 1.5 秒から 2.0 秒と薄くなっていくことを確認し、これをコントロールとした。次に手術側の総頸動脈撮影で North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial (NASET) 法により ICA 狭窄率を算出した。また、非手術側と比較して、造影剤注入後に pICA 内には 1.5 秒、2.0 秒と造影剤濃度が上昇したままのものを造影剤停滞 (+) とした。また、手術側 MCA の描出に関しても、非手術側と比べて遅いものを造影遅延 (+) と判定した。また、術後の DSA でも、術前と同様の評価法を用いて、pICA 内の造影剤停滞と MCA の描出遅延の有無について判定した。

これら ASL, MRA, ECD-SPECT, DSA の評価は臨床所見を知らされていない 2 名 (A. T., T. M.) の視覚的評価によって行ったが、結果として 2 名の評価に差はみられなかった。

なお、周術期の血圧は収縮期血圧で 100~140 mmHg となるようにコントロールした。また、本研究は原三信病院倫理委員会の承認 (No. 2021-10) と被験者の承諾を得ている。

結 果

1. 代表症例呈示

症例 4 69 歳男性

糖尿病があり、頸動脈エコーで左 ICA 狭窄を指摘され受診した。MRI で梗塞巣はなかった。MRA では左 pICA から MCA の描出が右に比べて乏しかった (Fig. 1A)。ECD-SPECT では脳血流量に明らかな左右差はなかった (Fig. 1B)。

ASL の PLD1.5 秒では、左の pICA の ATA は右に比べて強く描出され (Fig. 1D 黄色矢印)、2.0 秒では右が完全に消失したのに対して、左はほとんど変化がなかった (Fig. 1D 黄色矢印)。頭蓋内では、左 MCA の M3 と M4 の ATA は、右に比べて 1.5 秒において描出が乏しく (Fig. 1C 白色矢印)、2.0 秒で遅れて描出された (Fig. 1D 白色矢印)。MCA 領域の描出は 1.5 秒では左で低下していたが、2.0 秒では明らかな左右差はなくなった。

DSA では、左 ICA 起始部に 80% の狭窄があり、一部潰瘍を伴っていた (Fig. 1E 赤色矢印)。左の pICA 内には 1.5 秒、2.0 秒ともに造影剤が停滞し (Fig. 1F 赤色矢印)、左の M3 から M4 の明らかな描出に 2.0 秒を要した (Fig. 1F)。一方、健側の右 pICA 内の造影剤濃度は 1.5 秒、2.0 秒と薄くなっていった (Fig. 1G 赤色矢印)。また、右の M3 から M4 は 1.5 秒後に造影され (Fig. 1G)、右の ICA から両側の前大脳動脈 (anterior cerebral artery; 3 ACA) と MCA も描出された (Fig. 1G)。

CASPERTM 8×20 で CAS を行ったところ (Fig. 1H)、DSA では直後から造影剤の遅延所見の改善がみられた。すなわち、左の pICA 内の造影剤濃度は 2.0 秒で薄くなり (Fig. 1I 赤色矢印)、左の M3 から M4 部は 1.5 秒後に造影されるようになった (Fig. 1I 青色矢印)。また、左の ICA から左の ACA が描出されるようになった。

術翌日の MRA では pICA から MCA の描出に左右差はみられなくなった (Fig. 1J)。ECD-SPECT でも術前同様に脳血流量に左右差はなかった (Fig. 1K)。ASL 上、両側 pICA の ATA は 1.5 秒ではともに描出されたが (Fig. 1L 黄色矢印)、2.0 秒ではほとんど消失した (Fig. 1M)。左右の MCA の ATA の描出に左右差はなくなり、MCA 領域の描出にも左右差はなくなった (Fig. 1L, M)。

2. CAS 前の MRA, ASL, DSA 所見 (Table 1)

CAS 前の ASL では、非手術側の pICA の ATA は PLD1.5, 2.0 秒ともに描出されないか (4 例)、1.5 秒で描出されても 2.0 秒では消失した (5 例)。しかし、手術側の pICA は、6 例

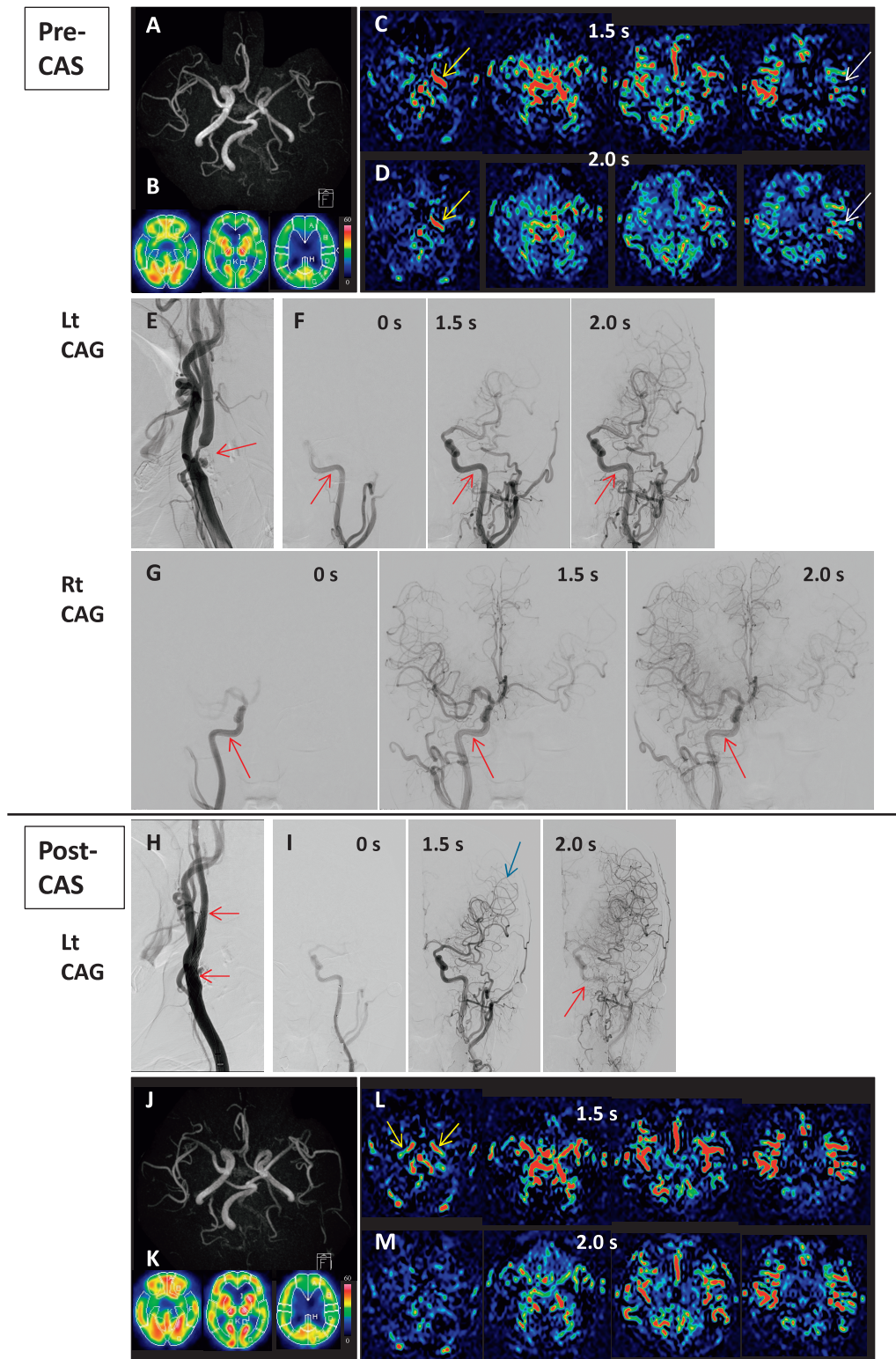


Fig. 1 Case 4 as a representative case

A–G : Preoperative images of carotid artery stenting (Pre-CAS) including magnetic resonance angiography (MRA) (**A**), single photon emission tomography with ^{99m}Tc -ethylcysteinate dimer (SPECT) (**B**), 1.5-Tesla pulsed arterial spin labeling perfusion images (ASL) at postlabeling delay (PLD) of 1.5 seconds (s) (**C**) and 2.0 s (**D**), lateral view of left common carotid angiography (Lt CAG) (**E**), and serial AP views of Lt CAG (**F**) and right CAG (Rt CAG) (**G**) at 0 s, 1.5 s, and 2.0 s following the injection of contrast medium (CM).

H–M : Postoperative images of CAS (Post-CAS) including lateral view of Lt CAG (**H**), serial AP views of Lt CAG (**I**) at 0 s, 1.5 s, and 2.0 s following the CM injection (**I**), MRA (**J**), SPECT (**K**), and ASL at PLD of 1.5 s (**L**) and 2.0 s (**M**). See details in the text.

(66.7%)において1.5秒で強く描出され(++)、2.0秒でも消失せずに残存した(+) (Fig. 1C, D 黄色矢印, 2A, B 黄色矢印). この6例をA群とし、1.5秒で描出されたpICAが2.0秒で消失した3例をB群とした.

A群は症候性が4例、無症候性が2例であった. また、狭窄率が95%以上であった症例が2例(症例1, 2)、80%台が2例(症例3, 4)、70%台が2例であった. 一方、B群は狭窄率が80%台の2例は無症候性であったが、狭窄率63%の1例(症例6)は症候性であった.

A群のMRAでは6例中5例でICAの描出は不良であった(Fig. 1A). また、DSAでは6例全例でpICA内での造影剤の停滞がみられた(Fig. 1D 赤色矢印). 一方、B群は3例ともMRAでのICAの描出は良好であり、DSAではpICA内での造影剤停滞はみられなかった.

またMCAに関して、A群のASLでは6例全例でMCAのATAの描出遅延を認め、このうち4例ではMCA領域の描出不良も認めたが、B群ではこれらの所見はなかった. MRAではA群の5例においてMCAの描出が不良であったが、B群ではこの所見はみられなかった. また、DSAにおいては、A群では非手術側に比べてMCA遠位部の描出遅延がみられたが、B群ではこの所見は得られなかった.

3. CAS後のDSA, MRA, ASL所見 (Table 1)

CAS後に新たな神経学的所見を呈した症例はみられなかった. CAS直後のDSAではA群の6例全例でpICA内での造影剤停滞はみられなくなり、これに伴って同側MCAの描出遅延もみられなくなった. 狭窄率が95%以上であった症例1と2においては(Fig. 2C 赤色矢印)、これらの変化は顕著で、1.5秒でpICAの造影剤は薄くなり、M2-4部が明瞭に描出され、2.0秒ではこれらもほとんど消失し(Fig. 2F)、“速すぎる流れ(Flow too fast)”と判定した.

術翌日のMRAにおいては、A群のなかで術前ICAの描出が不良であった5例はすべてこの所見がみられなくなった.

同じくA群のASLでは、pICAのATAはPLD1.5、2.0秒ともに描出されなくなるか(4

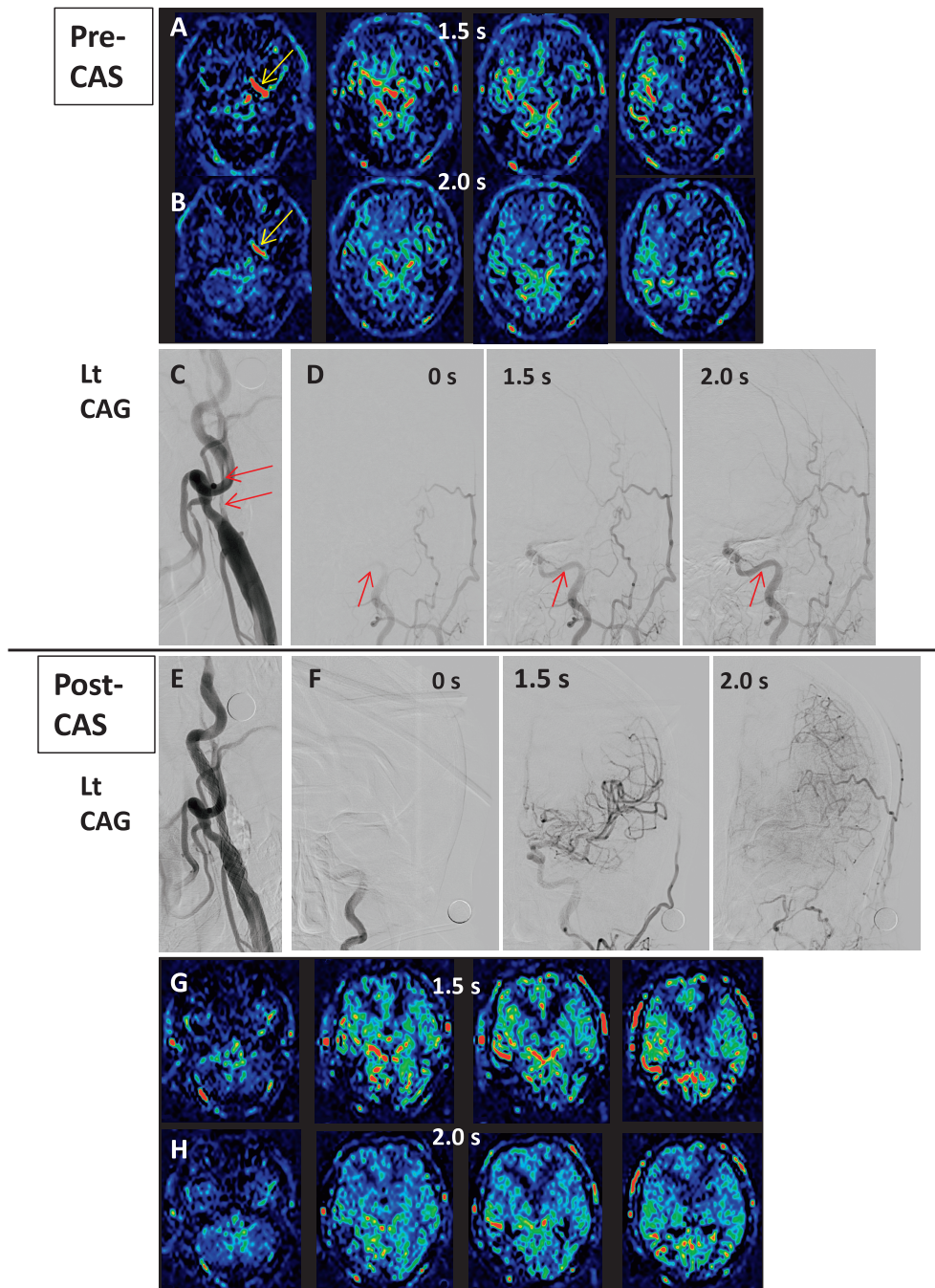
例)、1.5秒で描出されても2.0秒では消失した(2例). A群の6例中3例ではMCAのATA描出遅延はみられなくなった. しかし、残りの3例(症例1, 2, 6)では、MCAのATAは術前よりも明らかに描出が低下していた. このうち狭窄率が95%以上であった症例1と2においては、MCA領域の描出は良好であった(Fig. 2G, H). しかし、長いstent (Carotid WALLSTENT 10×31, Boston Scientific, Marlborough, MA, USA)を用いた症例6では(Fig. 3A, D 赤色矢印)、術前(Fig. 3B, C)と比べて、左ICAの描出は低下していた(Fig. 3E, F). さらに、MCAのATA描出も低下し、MCA領域の描出も不良であった(Fig. 3E, F).

一方、B群のCAS後の所見は、CAS前の所見と変化はなかった.

考 察

3-T pCASLにおいては、閉塞性脳血管障害などで血管内に長く停滞したASL信号がblight vessel appearanceなどのATAとして描出されることがあるが⁶⁾、今回用いた1.5-T PASLでは、健常の脳循環においてもWillis動脈輪からMCA遠位部のATAはしばしば描出される^{1)~5)}. しかし、pICAのATAが強く描出されることは通常はあまり経験しない⁵⁾. 今回の9症例においても、非手術側のpICAはPLD1.5、2.0秒ともに描出されないか、1.5秒で描出されても2.0秒では完全に消失した. 一方、A群6例の手術側pICAは、1.5秒で強く描出され、2.0秒でも消失せずに残存した. pICAは、ASL無信号の錐体骨内を、しかもMRIの水平断にほぼ平行な頸動脈管内を走行しているため、pICAのATAは容易に同定された. さらに、pICAのATA描出はMCAのATA描出の遅延を伴っていた. これらのASL所見はDSAの結果より、MCAの描出遅延を伴うpICA内の血流停滞を意味することが示唆された.

このASL所見を示したA群は狭窄率が95%以上であった2例を含み、6例中4例が80%以上の狭窄率であり、狭窄率が高度な程この所見がみられる傾向は示された. しかし、A群のうち2例は70%台の狭窄率であり、またB群3例のうち2例も80%台の高い狭窄率であり、この点はWillis

**Fig. 2**

Case 1 in whom blood flow in the middle cerebral artery became too fast after placement of CAS. **A-D** : Pre-CAS images including ASL at PLD of 1.5 s (**A**) and 2.0 s (**B**) and lateral view (**C**) and serial AP views of Lt CAG at 0 s, 1.5 s and 2.0 s following the CM injection (**D**). **E-H** : Post-CAS images including lateral view (**E**) and serial AP views of Lt CAG at 0 s, 1.5 s and 2.0 s following the CM injection (**F**) and ASL at PLDs of 1.5 (**G**) and 2.0 s (**H**). See details in the text.

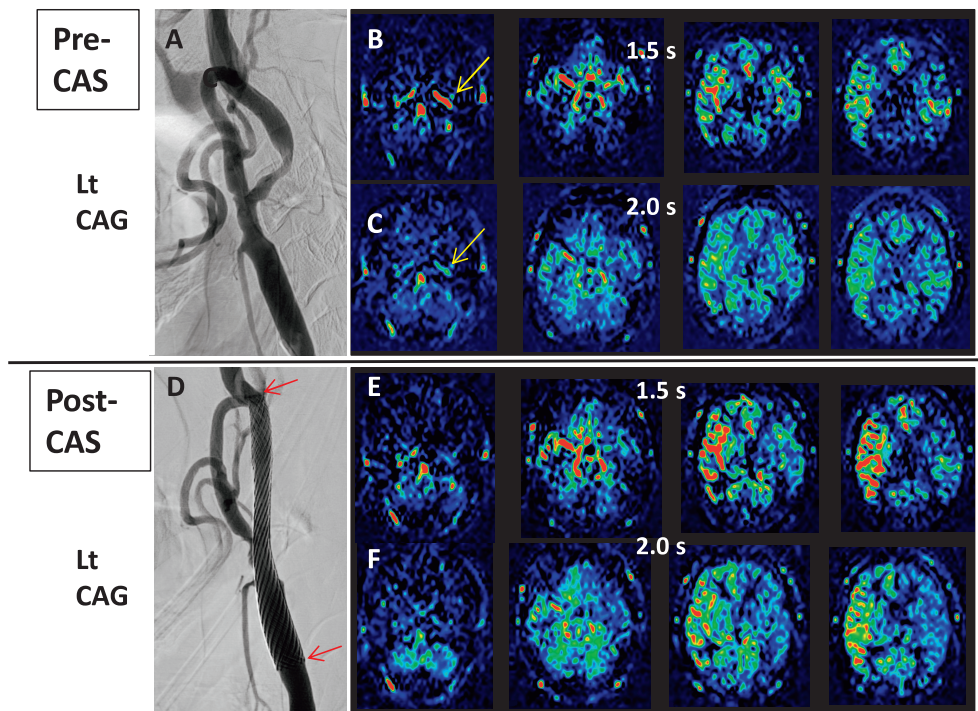


Fig. 3

Case 6 in whom appropriate ASL were not obtained probably due to insufficient labeling affected by the placement of long CAS.

A-C: Pre-CAS images including lateral view of Lt CAG (**A**) and ASL at PLD of 1.5 s (**B**) and 2.0 s (**C**).

D-F: Post-CAS images including lateral view of Lt CAG (**D**) and ASL at PLD of 1.5 s (**E**) and 2.0 s (**F**). Distance between the two red arrows on (**D**) represents the length of the stent. See details in the text.

動脈輪を介した側副血行などとの関連も含め、今後症例を重ねて明らかにしていく必要がある。また、MRAではA群の6例中5例でICAからMCAの描出不良がみられた。しかもCAS後ASL所見の改善に伴って、これらのMRA所見も改善したことから、ASLとの高い相関が示唆された。

CAS後のA群ASLでは、pICAのATAはPLD1.5、2.0秒ともに描出されなくなるか、1.5秒で描出されても2.0秒では消失した。また、6例中3例ではMCAのATA描出遅延もみられなくなった。CAS直後のDSAでは全例でpICA内の造影剤停滞はみられなくなり、これに伴ってMCAの描出遅延も改善していた。今回の症例はすべてCAS前後のECD-SPECTでCBFに変化はみられなかったため、ASL所見の変化はATTの変化によるものと考えられる。

しかし、残りの3例では、MCAのATAは術前よりも明らかに描出が不良であった。このうち

狭窄率が95%以上であった症例1と2においては、ASL上MCA領域の描出は良好であった。この2例のCAS直後DSAでは、ICAからMCAは“速すぎる流れ”を呈したことから、このためMCAのATA描出がないままに、MCA領域が描出されたものと考えられる。また、症例6では、pICAとMCAのATA、またMCA領域の描出も術前と比べてすべて不良であった。薄いplaneで標識するpCASLでは、特に頸動脈の分岐部が高位な場合、ステントの存在により十分な標識が来ずに良好なASL画像が得られない可能性が報告されている¹⁶⁾²²⁾。一方で、15~20cmの厚いslab内を標識するPASLではこのような可能性は少ないと考えられるが、症例6のように長いステントを留置した場合には、やはり十分な標識が出来ない可能性も考慮すべきと思われる。

今回の研究はいくつかの限界がある。まず、第1に9例と症例数の少ない後方視的研究であることから、統計学的に十分な処理が出来ないことで

ある。第2に、DSAで造影剤を注入する際は、本研究以前にはinjectorを用いて一定の量を一定の注入速度で行っていた⁶⁾⁷⁾¹⁰⁾。しかし、現在では、治療時間の短縮や造影剤減量による腎保護の目的で、術者のhand injectionを用いているため、DSA上で正確なATTの評価は出来ないが、同一術者が均一に注入するように努めた。また、PASLで標識した血管のレベルは上述したように厚いslab内にあり、DSAのカテーテル先端と必ずしも同じレベルではない。第3に今回は解析を容易にするため、MCA以外の頭蓋内主幹動脈の血行動態変化については検討していないことである。第4に、PASLの性格上すべての診断は視覚的評価によるものであり、定量的ではないことである。また、今回の症例にはCAS後に過灌流症候群を呈した症例はなく、この病態で1.5-T PASL上のような所見が得られるかは明らかに出来なかった。

結 語

実臨床に普及しているPASLは、ATAが描出されるために、正確な脳循環の評価は出来ないとされている。今後更に症例数を重ねた検討が必要であるが、ICA狭窄におけるpICAのATAがPLD1.5、2.0秒ともに描出されることは、頭蓋内ATTの遅延を伴うpICA内の血流停滞を意味し、CAS後の消失は、これらの改善を示唆している。

参 考 文 献

- 1) Alsop DC, Detre JA, Golay X, Günther M, Hendrikse J, Hernandez-Garcia L, Lu H, MacIntosh BJ, Parkes LM, Smits M, van Osch MJ, Wang DJ, Wong EC and Zaharchuk G : Recommended implementation of arterial spin-labeled perfusion MRI for clinical applications : A consensus of the ISMRM perfusion study group and the European consortium for ASL in dementia. *Magn Reson Med.* 73 : 102-116, 2015.
- 2) Bambach S, Smith M, Morris PP, Campeau NG and Ho M-L : Arterial spin labeling applications in pediatric and adult neurologic disorders. *J Magn Reson Imaging.* 55 : 698-719, 2020.
- 3) Soldozy S, Galindo J, Snyder H, Ali Y, Norat P, Yağmurlu K, Sokolowski JD, Sharifi K, Tvrdik P, Park MS and Kalani YS : Clinical utility of arterial spin labeling imaging in disorders of the nervous system. *Neurosurg Focus.* 47 : E5, 2019.
- 4) Dolui S, Vidorreta M, Wang Z, Nasrallah IM, Alavi A, Wolk DA and Detre JA : Comparison of PASL, PCASL and background suppressed 3D PCASL in mild cognitive impairment. *Human Brain Mapp.* 38 : 5260-73, 2017.
- 5) Goto K, Shimogawa T, Mukae N, Shono T, Fujiki F, Tanaka A, Sakata A, Shigeto H, Yoshimoto K and Morioka T : Implications and limitations of magnetic resonance perfusion imaging with 1.5-Tesla pulsed arterial spin labeling in detecting ictal hyperperfusion during non-convulsive status epilepticus. *Surg Neurol Int.* 13 : 147, 2022.
- 6) Akiyama T, Morioka T, Shimogawa T, Haga S, Sayama T, Kanazawa Y, Murao K and Arakawa S : Arterial spin-labeling magnetic resonance imaging with dual post-labeling delay in internal carotid artery stenosis-occlusion : validation with digital subtraction angiography. *J Stroke Cerebrovasc Dis.* 25 : 2099-2108, 2016.
- 7) Haga S, Morioka T, Shimogawa T, Akiyama T, Murao K, Kanazawa Y, Sayama T and Arakawa S : Arterial spin labeling perfusion magnetic resonance image with dual postlabeling delay : A correlative study with acetazolamide loading ¹²³I-Iodoamphetamine single-photon emission computed tomography. *J Stroke Cerebrovasc Dis.* 25 : 1-6, 2016.
- 8) Haga S, Morioka T, Kameda K, Takahara K, Amano T, Tomohara S, Takaki H, Tsurusaki Y and Arihiro S : Subtraction of arterial spin-labeling magnetic resonance perfusion images acquired at dual post-labeling delay : Potential for evaluating cerebral hyperperfusion syndrome following carotid endarterectomy. *J Clin Neurosci.* 63 : 77-83, 2019.
- 9) Shimogawa T, Morioka T, Sayama T, Haga S, Akiyama T, Murao K, Kanazawa Y, Furuta Y, Sakata A and Arakawa S : Signal changes on magnetic resonance perfusion images with arterial spin labeling after carotid endarterectomy. *Surg Neurol Int.* 7 : S1031-1040, 2016.
- 10) Shimogawa T, Morioka T, Akiyama T, Haga S, Arakawa S and Sayama T : Sequential changes of arterial spin-labeling perfusion MR images with dual postlabeling delay following reconstructive surgery for giant internal carotid artery aneurysm. *Surg Neurol Int.* 8 : 222, 2017.
- 11) Tokunaga S, Morioka T, Shirozu N, Tsurusaki Y, Arihiro S, Shimogawa T, Mizoguchi M and Haga S : Arterial spin-labeling perfusion MR images with dual postlabeling delay reveals

- hemodynamic changes in dural arteriovenous fistulas following endovascular surgery. *Interdiscip Neurosurg.* 21 : 100733, 2020.
- 12) Takahara K, Morioka T, Shimogawa T, Haga S, Kameda K, Arihiro S, Sakata A, Mukae N and Iihara K : Hemodynamic state of periictal hyperperfusion revealed by arterial spin-labeling perfusion MR images with dual postlabeling delay. *eNeurologicalSci.* 12 : 5-18, 2018.
 - 13) Lyu J, Ma N, Liebeskind DS, Wang DJJ, Ma L, Xu Y, Wang T, Miao Z and Lou X : Arterial spin labeling magnetic resonance imaging estimation of antegrade and collateral flow in unilateral middle cerebral artery stenosis. *Stroke.* 47 : 428-433, 2016.
 - 14) Chen Z, Chen L, Shirakawa M, Liu W, Ortega D, Chen J, Balu N, Trouard T, Hatsukami TS, Zhou W and Yuan C : Intracranial vascular feature changes in time of flight MR angiography in patients undergoing carotid revascularization surgery. *Magn Reson Imaging.* 75 : 45-51, 2021.
 - 15) Lin T, Lai Z, Zuo Z, Lyu Y, Feng F, You H, Hou B, Qu J, Wu B and Liu C : ASL perfusion features and type of circle of Willis as imaging markers for cerebral hyperperfusion after carotid revascularization : a preliminary study. *Eur Radiol.* 29 : 2651-2658, 2019.
 - 16) Mizuhashi S, Fukuda K, Sato M and Kohyama S : The usefulness of perfusion magnetic resonance imaging with arterial spin labeling in the perioperative management of carotid artery stenting. *J Neuroendovascular Ther.* 12 : 321-328, 2018.
 - 17) Schröder J, Heinze M, Günther M, Cheng B, Nickel A, Schröder T, Fischer F, Kessner SS, Magnus T, Fiehler J, Avellaneda AL, Gerloff C and Thomalla G : Dynamics of brain perfusion and cognitive performance in revascularization of carotid artery stenosis. *Neuroimage Clin.* 22 : 101779, 2019.
 - 18) Wang WX, Wang T, Ma L, Sun ZH and Wang GS : New-onset lesions on MRI-DWI and cerebral blood flow changes on 3D-pCASL after carotid artery stenting. *Sci Rep.* 11 : 8005, 2021.
 - 19) Yun TJ, Sohn CH, Han MH, Yoon BW, Kang HS, Kim JE, Paeng JC, Choi SH, Kim JH and Chang KH : Effect of carotid artery stenting on cerebral blood flow : evaluation of hemodynamic changes using arterial spin labeling. *Neuroradiology.* 55 : 271-281, 2013.
 - 20) 後藤克宏, 堤貴大, 深水豊, 高崎実, 田中厚生, 庄野禎久, 森岡隆人 : Arterial spin labeling による MR 灌流画像で両側線状体に一過性の血流増加を認めた低酸素脳症の1例. *脳卒中* 44 : 636-641, 2022.
 - 21) 高木昭浩, 吉岡克則, 寺岡悟見, 相馬努, 矢野今朝人, 宮坂正, 横井孝司, 村瀬研也 : ^{99m}Tc -ECD を用いた脳血流定量自動解析ツールの開発と臨床例での検証. *日放技学誌* 62 : 729-733, 2006.
 - 22) Chen D YT, Kuo YS, Hsu HL, Yan FX, Liu HL, Chen CJ and Tseng YC : Loss of labeling efficiency caused by carotid stent in pseudocontinuous arterial spin labeling perfusion study. *Clin Radiol* 71 : e21-27, 2016.

(Received for publication December 5, 2022)