

第43回日本脳神経CI学会総会: 20200124-岡山コンベンションセンター
シンポジウム-5 <脳卒中CFD術前解析>14:00-15:30

神経血管減圧術と責任血管のCFD解析 ～三叉神経痛・片側顔面痙攣での検討～

佐藤 透¹⁾、八木高伸²⁾、小野田恵介³⁾、
亀田雅博⁴⁾、佐々木達也、伊達 勲

1) 涼風会 佐藤脳神経外科、2) 早稲田大学 先端生命医科学センター
、3) 岡山赤十字病院 脳神経外科、4) 岡山大学大学院 脳神経外科

Lecturers report no conflict of interest concerning the materials or methods used in this study.



神経血管接触(Neurovascular contact、NVC)部位での責任血管のCFD解析

- NVC部位では責任血管が脳神経と接触。
- NVC部位での責任血管の壁剪断応力 (Wall shear stress, WSS)をCFD解析。



目的

- 三叉神経痛(Trigeminal neuralgia、TN)や片側顔面痙攣(Hemifacial spasm、HFS)でのNVC部位では、これまで脳神経の圧迫・変形について、形態学的・解剖学的・電気生理学的検討が行われて来た。
- 今回、NVC部位の責任血管について、WSSのCFD解析を行い、接触が血管に及ぼす血行力学的影響を検討した。



NVC部位での神経形態と血管のWSS

- 脳神経：
NVC部位では、三叉神経や顔面神経が責任血管により、接触・圧迫され、神経形態が変化。
- 責任血管：
 - WSS_m: NVC部位での責任血管のWSS強度を、NVC前、NVC直前、NVC部、NVC後の各部位で計測。1心拍動での変動量(WSS_{mV})を解析。
 - WSS_v: NVC部位での責任血管のWSSベクトル方向と1心拍動での変動量(WSS_{vV})を解析。



NVC部位での神経と血管の関係

NVCを外から観察



From Outside: Blind to inside of vessel.

NVCを血管内から観察



From Inside: See the outside of vessel.



対象と方法

- 三叉神経痛(TN)10例、片側顔面痙攣(HFS)10例。
- 3D-CTAと3D-MR cisternogram(MRC)の融合画像：責任血管と脳神経との解剖学的位置関係を表示。
- CTAデータからCFD解析し、3D-CFD画像を作製。
- 3D-CFD画像でのNVC部位は、3D-CTA-MRC融合画像およびMVD手術所見と対比し決定。
- WSS_mをNVC前、NVC直前、NVC部、NVC後の各部位で計測。NVC前に対するWSS_m強度比を算出。



对象

	Trigeminal Neuralgia	Hemifacial Spasm
No. of patients	10	10
Age (yrs), Median (IQR)	66.5 (9.0)	60.0 (10.3)
Age range (yrs.)	37-85	39-74
Sex (male/female)	5/5	2/8
Side (rt/lt)	7/3	2/8
Offending vessels	SCA-trunk 3 SCA-caudal 7	PICA 9 AICA 1

IQR = interquartile range.



方法 (1): CFD解析

- Step 1: 対象者の固有血管形状の作製。
CTA (Ziostation-2™)、選択 >90 HU、VR。
- Step 2: CFD解析 (Hemoscope™)
Vessel Segmentation。
- Step 3: VCFD
Finite volume method、ニュートン流、拍動流、
密度 $\rho = 1050 \text{ kg/m}^3$ 、粘度 $\mu = 0.004 \text{ Pas}$ 。
- Step 4: CFDパラメータ、WSS_m、WSS_{mV}、
WSS_v、WSS_{vV} の3D静止画、動画を表示。

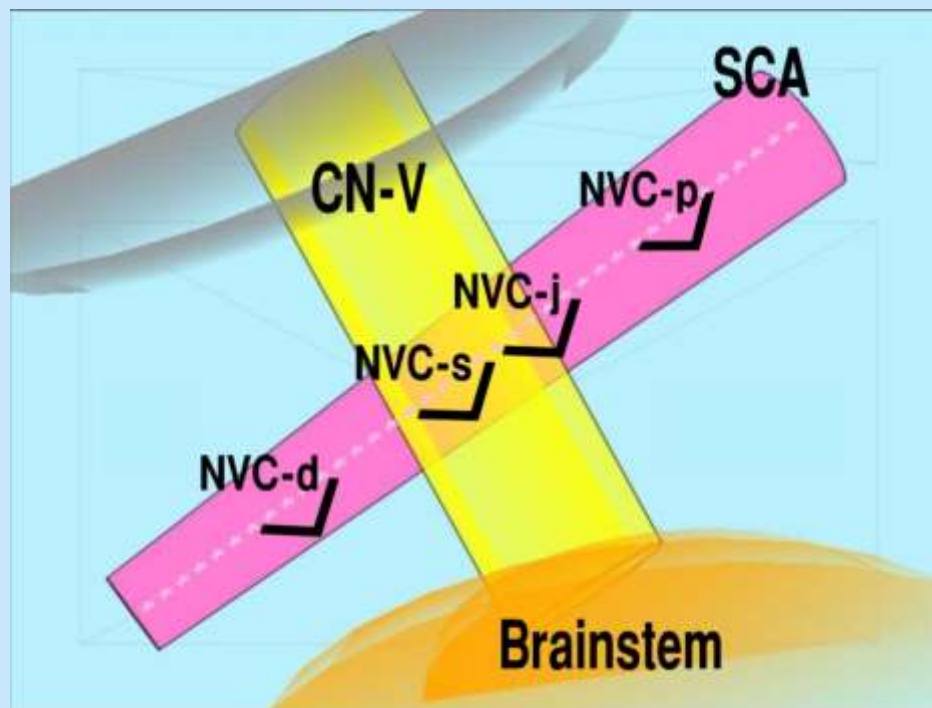


方法 (2): 形態画像とCFDの対比

- 3D 融合画像(形態):
 - 3D CTAで責任血管を描出、
 - 3D MRCで脳神経を描出、
 - 3D CTAと3D MRCを重畳、
 - 手術方向からsimulation画像を作製。
- 3D CFD画像: WSS_m、WSS_v、
 - 手術方向からsimulation画像を作製。
- 3D 融合画像(形態)と3D CFD画像とを対比。



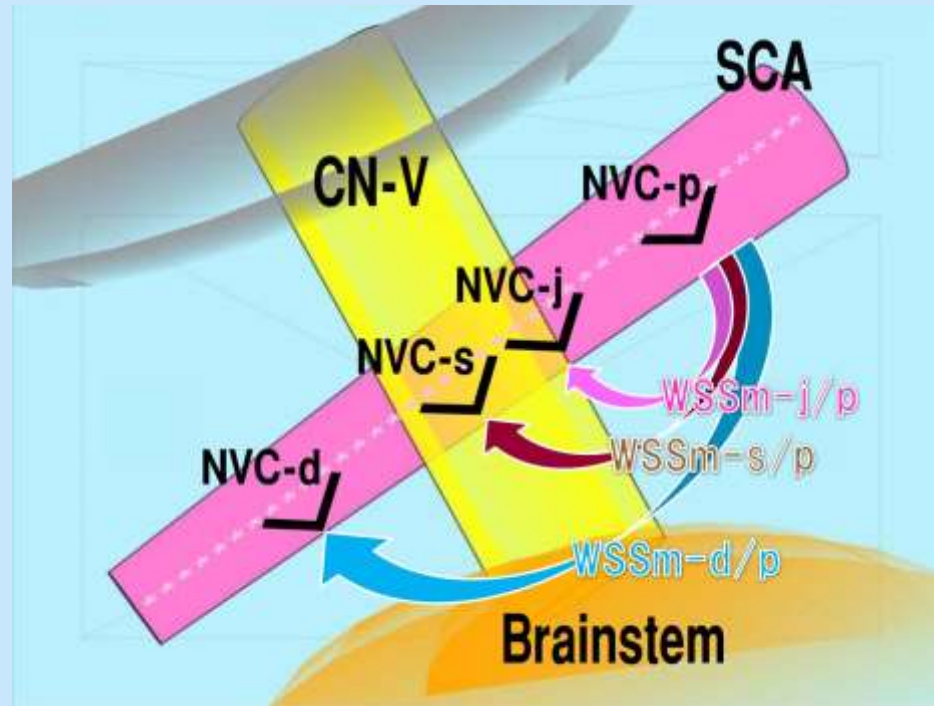
方法 (3): NVC各部位での分割(TN)



- 関心領域に分割
- NVC前 : NVC-p:
 - NVC直前 : NVC-j
 - NVC部 : NVC-s
 - NVC後 : NVC-d



方法 (4): NVC各部位でのWSSm強度比(TN)



- WSSm強度比 ● NVC直前/前: NVC-j/p
- NVC部/前: NVC-s/p
 - NVC後/前: NVC-d/p

NVCでのWSSmと強度比の結果



		NVC-p	NVC-j	NVC-s	NVC-d
TN (n=10)	FR-avg (mL/min)	17.17 (18.47)	17.11 (18.42)	17.10 (18.29)	17.11 (18.50)
	WSSm-sys (Pa)	2.55 (2.46)	6.05 (4.55)	2.90 (5.70)	2.15 (2.59)
	WSSm-dia (Pa)	0.96 (0.85)	2.34 (1.60)	1.19 (2.00)	0.79 (0.87)
	WSSm-avg (Pa)	1.48 (1.41)	3.64 (2.64)	1.80 (3.30)	1.27 (1.49)
	WSSm-sys Ratio	(to NVC-p)	1.93 (0.77)**	1.29 (0.77)*	0.77 (0.29)
	WSSm-dia Ratio	(to NVC-p)	1.89 (0.88)*	1.21 (0.73)**	0.76 (0.25)
	WSSm-avg Ratio	(to NVC-p)	1.69 (0.68)*	1.26 (0.81)**	0.84 (0.53)
HFS (n=10)	FR-avg (mL/min)	26.82 (22.20)	24.12 (21.34)	23.96 (21.10)	24.08 (21.54)
	WSSm-sys (Pa)	2.44 (3.35)	5.23 (3.56)	3.85 (2.47)	2.71 (2.10)
	WSSm-dia (Pa)	0.89 (1.01)	1.74 (1.06)	1.57 (0.86)	1.12 (0.79)
	WSSm-avg (Pa)	1.49 (1.85)	2.98 (1.71)	2.87 (1.44)	1.75 (1.24)
	WSSm-sys Ratio	(to NVC-p)	1.80 (0.91)*	1.43 (0.25)*	1.00 (0.36)
	WSSm-dia Ratio	(to NVC-p)	1.73 (0.73)**	1.49 (0.32)*	1.11 (0.35)
	WSSm-avg Ratio	(to NVC-p)	1.28 (0.91)**	1.45 (0.25)*	1.05 (0.32)

All values expressed as Median, IQR = interquartile range.

NVC-p;NVC-proximal,NVC-J;NVC-just-beginning,NVC-s;NVC-contact-site,NVC-d;NVC-distal.

FR;flow rate, WSSm;magnitude of WSS; sys;systolic, dia;diastolic, avg,average.

WSSm ratio: NVCj/NVCp, NVCs/NVCp and NVCd/NVCp.

p-value Mann Whitney U-test, *<0.05, **<0.01.

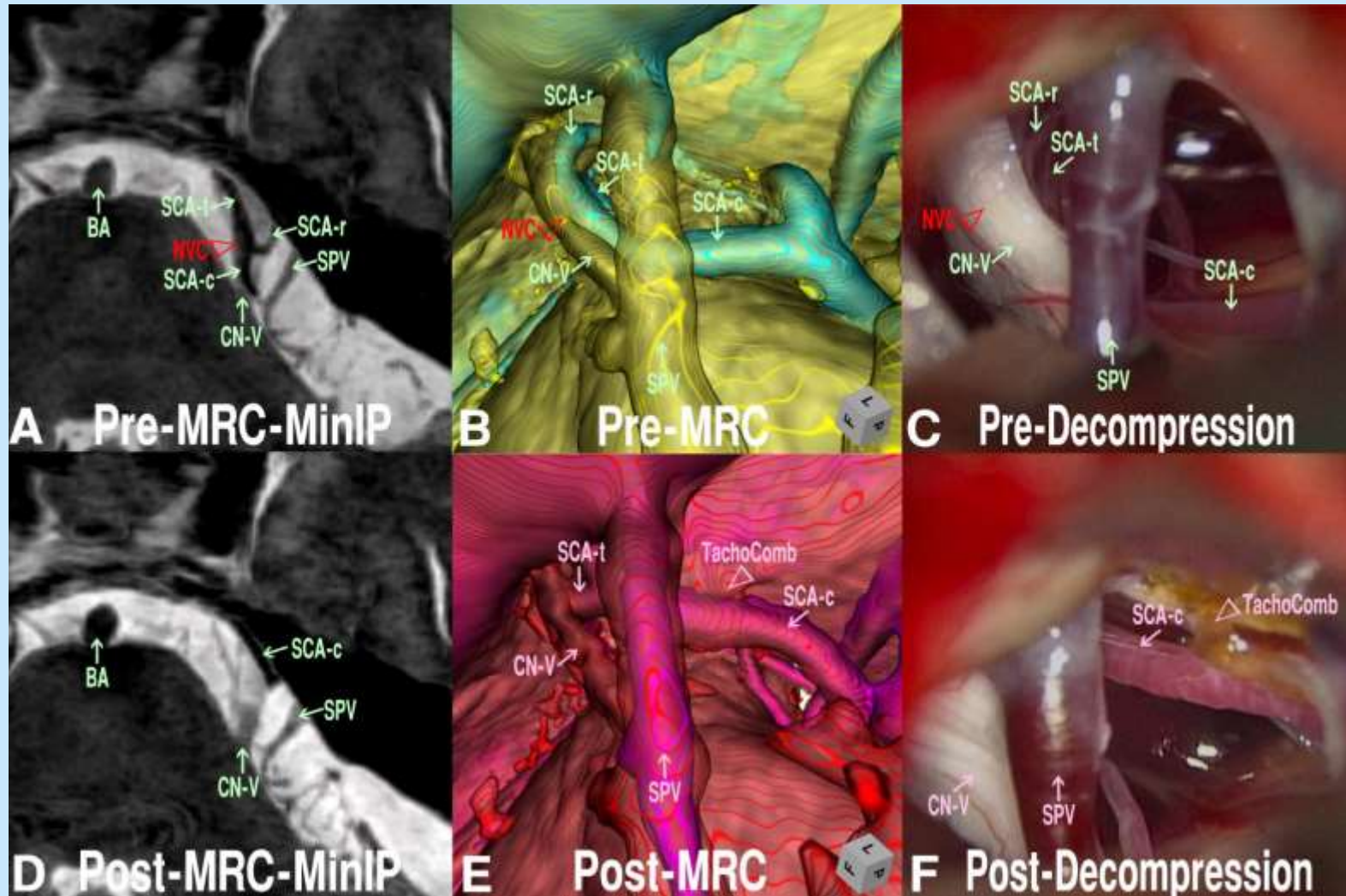
○TN・HFSともに、NVC直前・NVC部でWSSm・WSSm強度比が高値



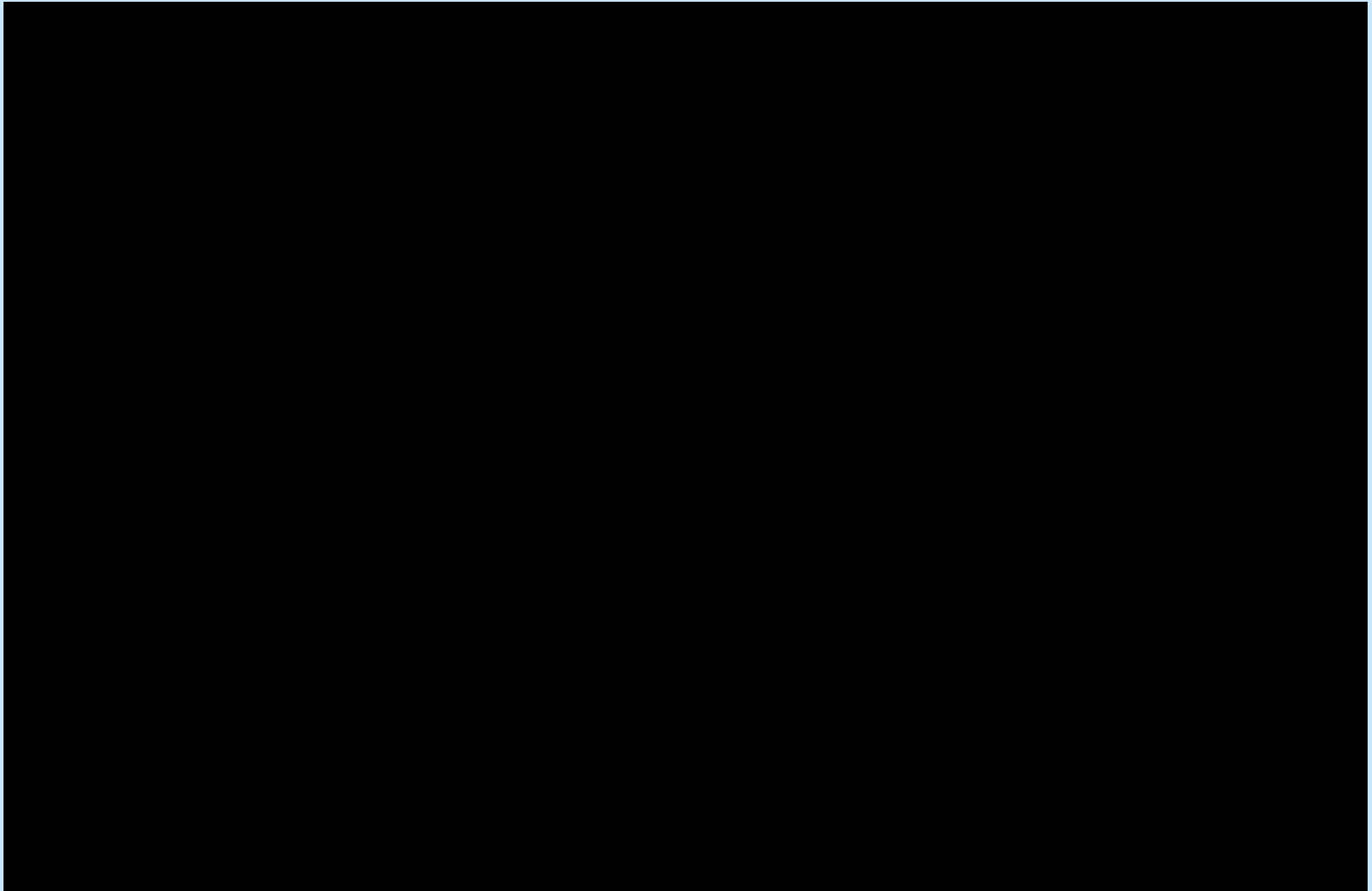
Trigeminal Neuralgia



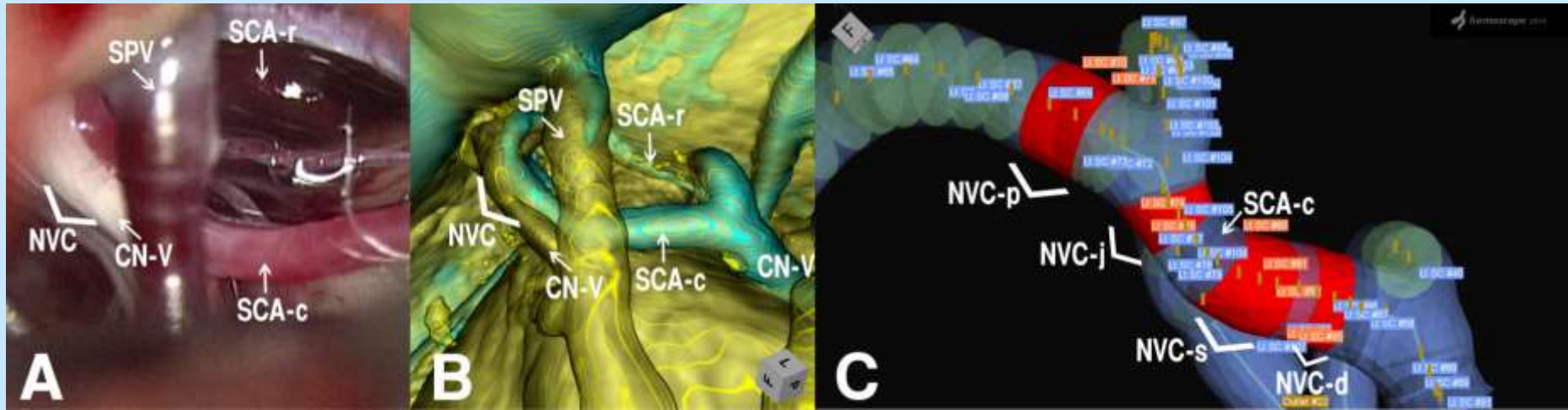
Lt. Trigeminal Neuralgia (V-3)



手術VTR: Lt. Trigeminal Neuralgia (V-3)



Vessel Segmentation



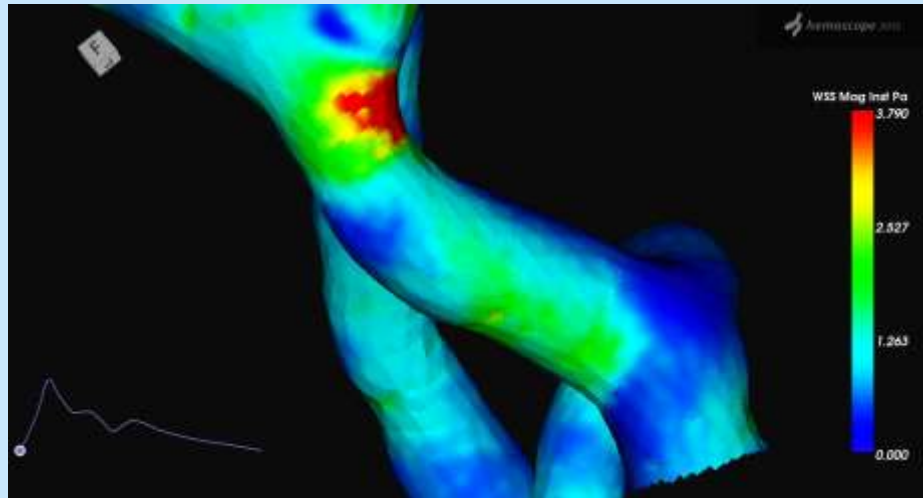
NVC部位の推測:

- 形態 (A・B): NVC部位で三叉神経が陥凹・変形
- CFD解析(C): NVC部位でWSS_mとWSS_vが変化

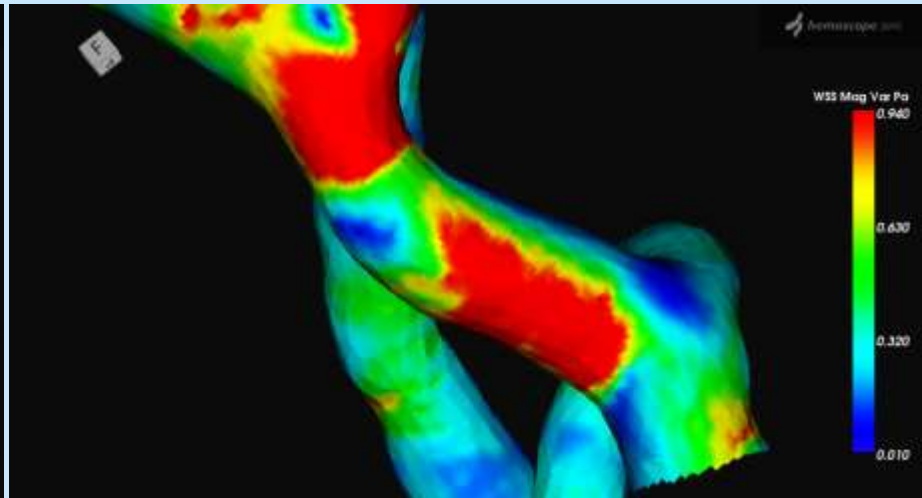


WSSm(動画)とWSSmV(静止画)

WSSm



WSSmV

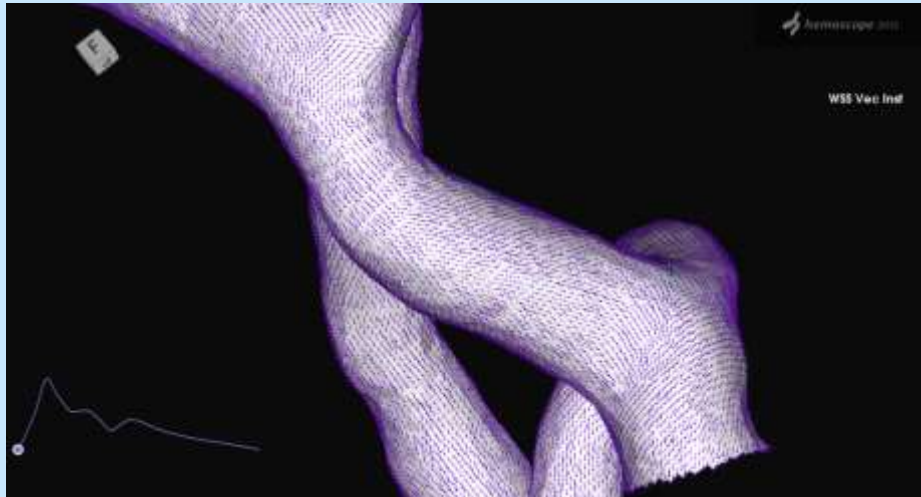


○ NVC部位(接触側)では、
WSSmは増大、WSSmVは増加

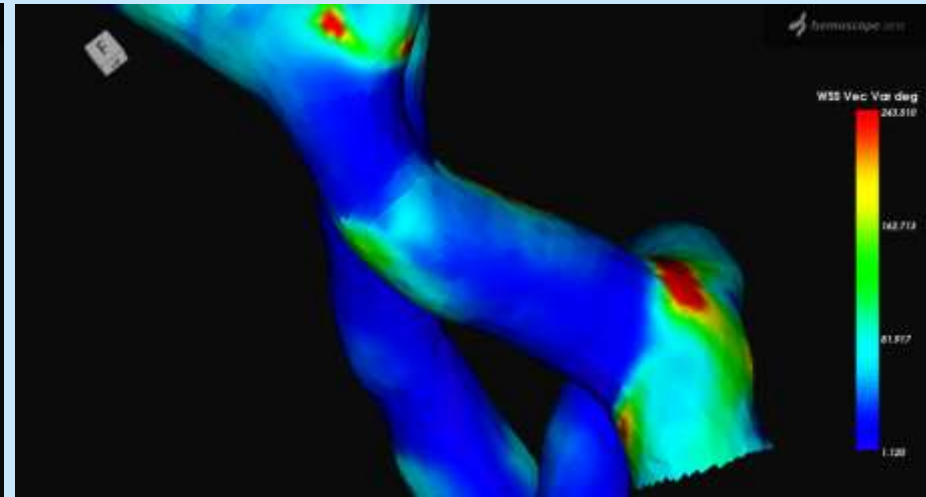


WSS_v(動画)とWSS_{vV}(静止画)

WSS_v



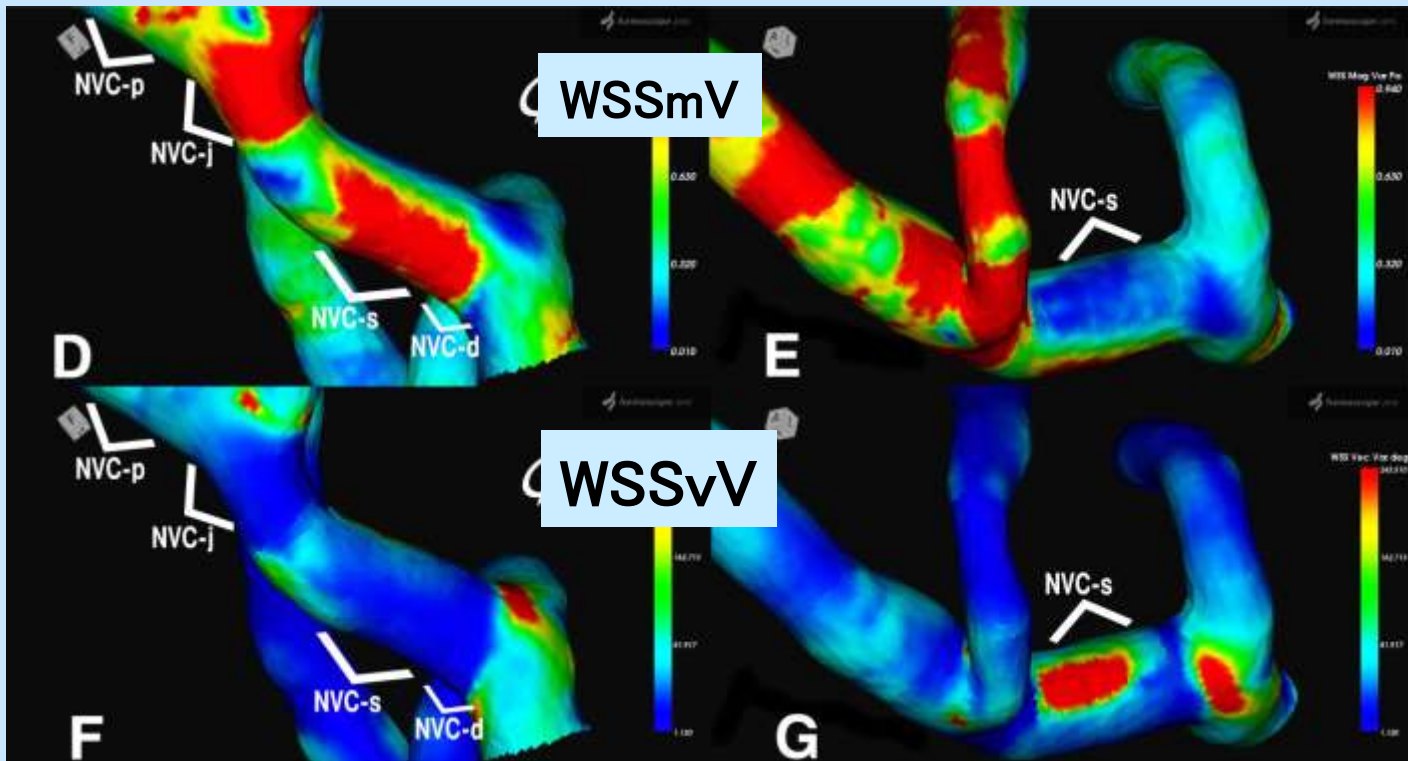
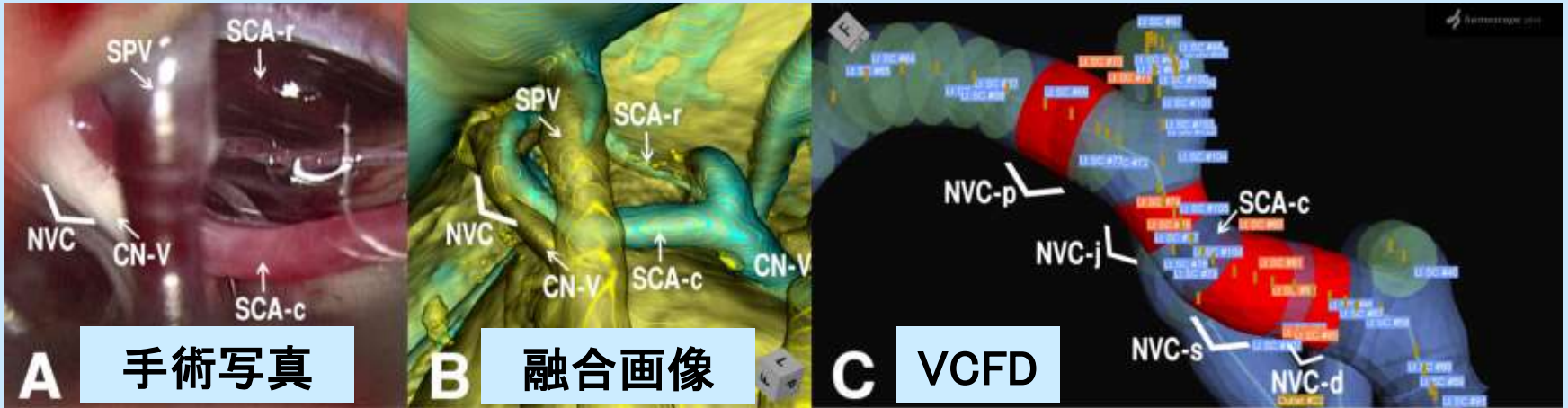
WSS_{vV}



○ NVC部位(接触側)では、
WSS_vは減少、WSS_{vV}は低下
(WSS_m・WSS_{mV}とは反対の結果)



Lt. Trigeminal Neuralgia (V-3)



NVC
接触側

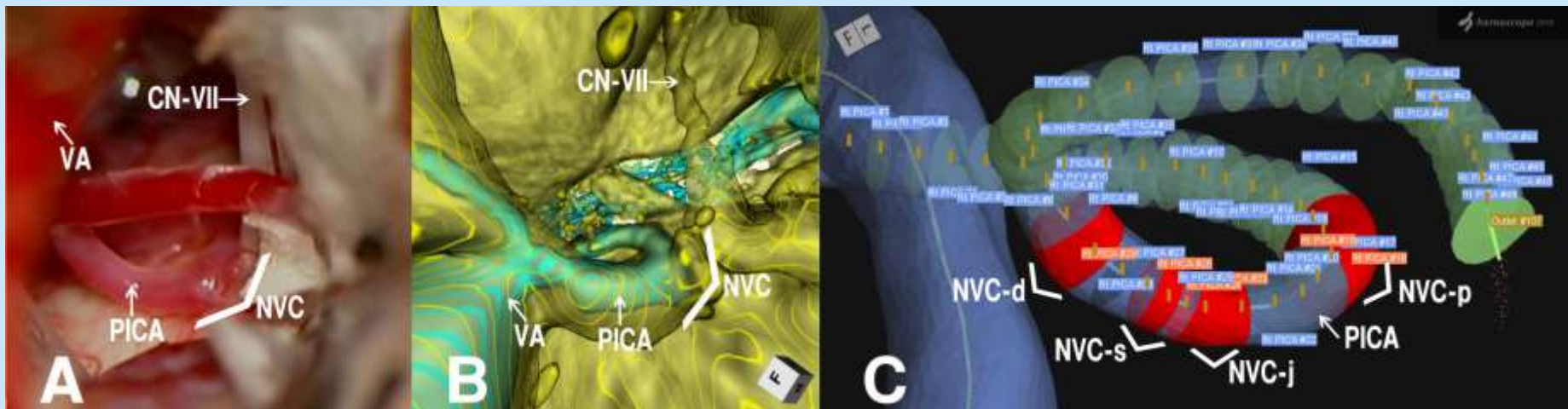
NVC
対側



Hemifacial Spasm



Vessel Segmentation

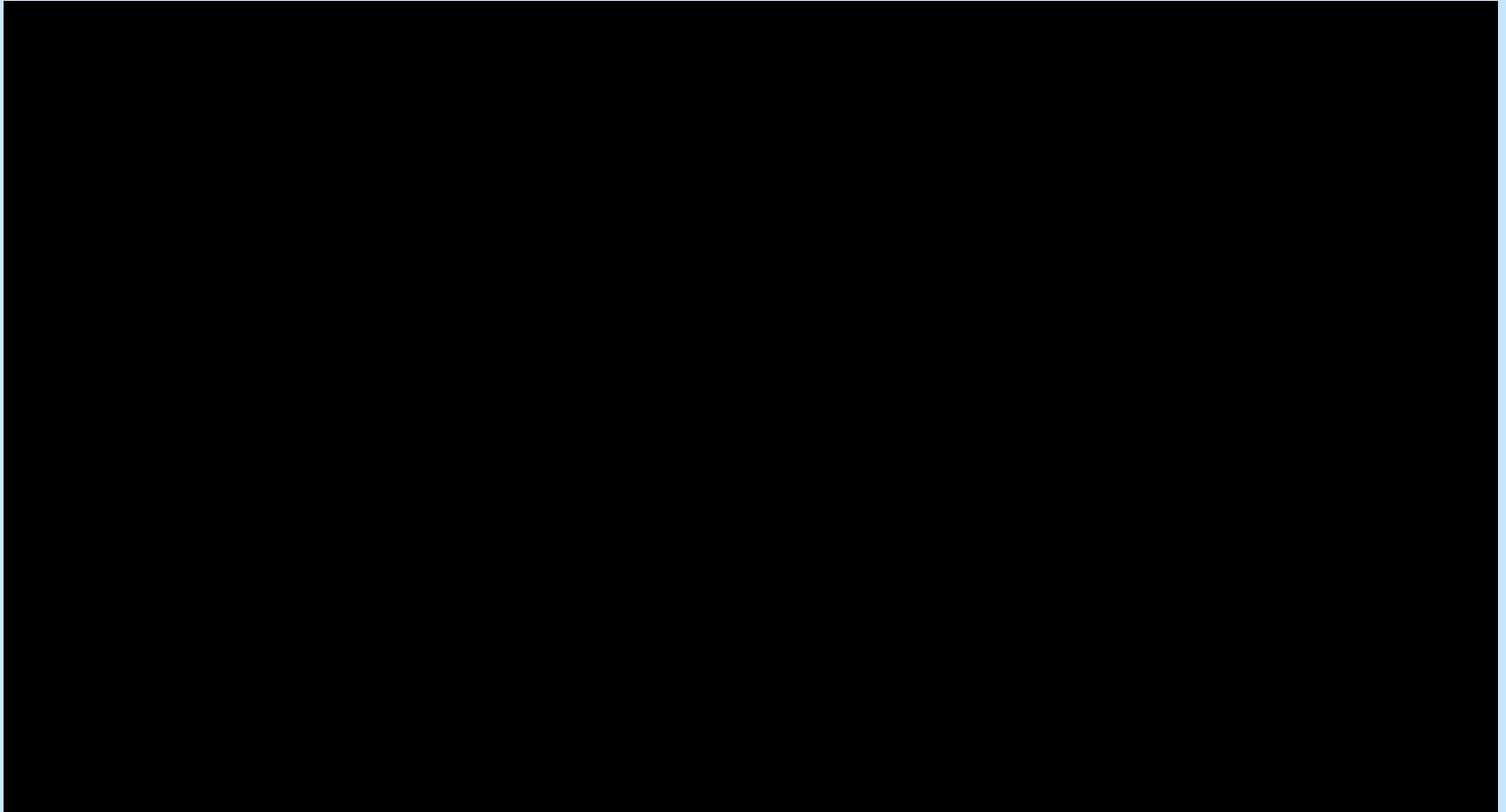


NVC部位の推測:

- 形態 (A・B): NVC部位で顔面神経・脳幹部で接触
- CFD解析 (C): NVC部位でWSSmとWSSvが変化

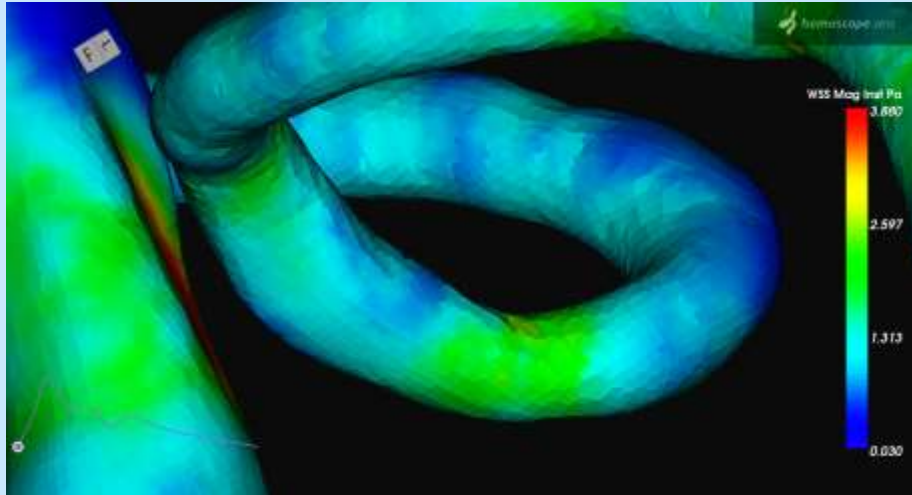


手術VTR: Lt. Hemifacial Spasm

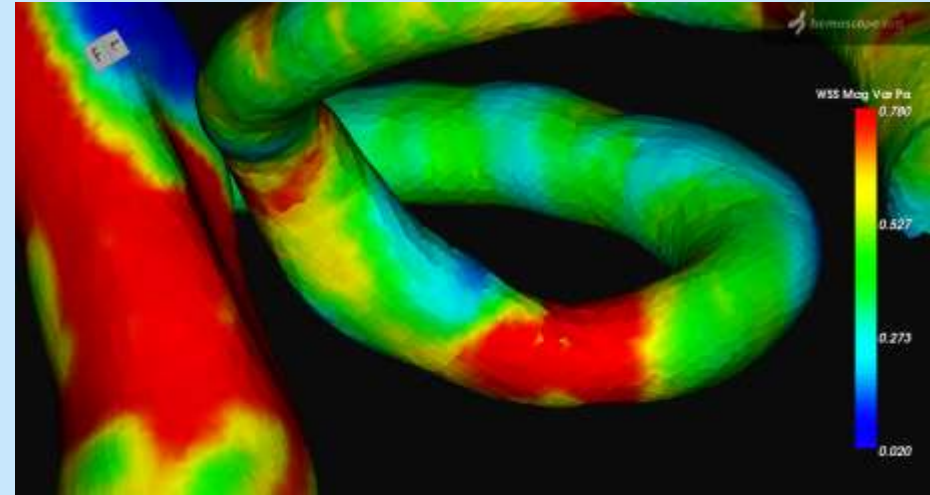


WSSm(動画)とWSSmV(静止画)

WSSm



WSSmV

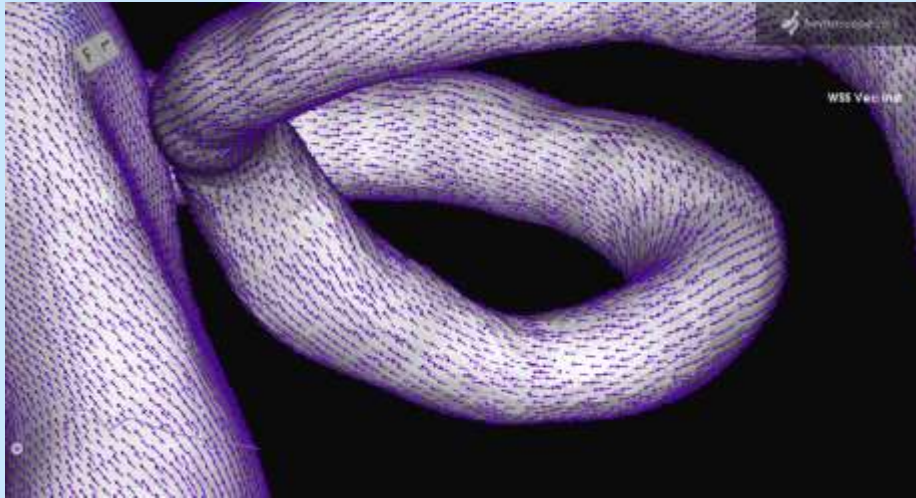


○ NVC部位(接触側)では、
WSSmは増大、WSSmVは増加

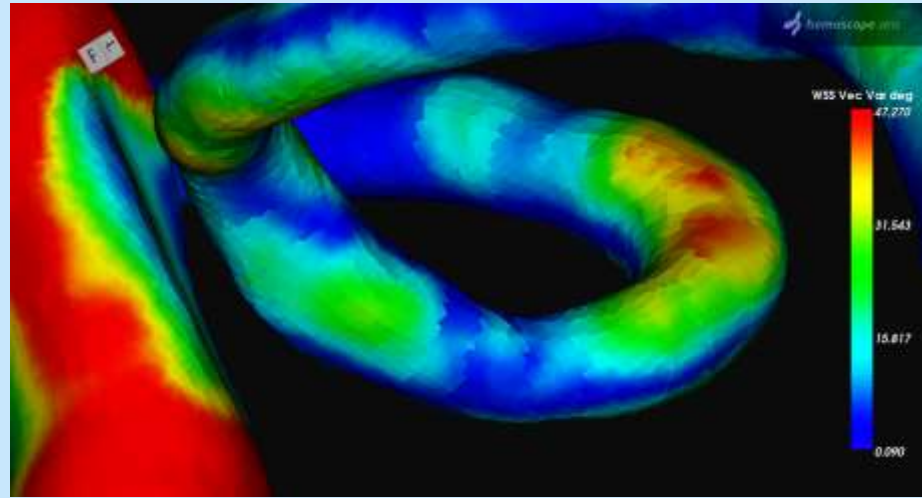


WSS_v(動画)とWSS_{vV}(静止画)

WSS_v



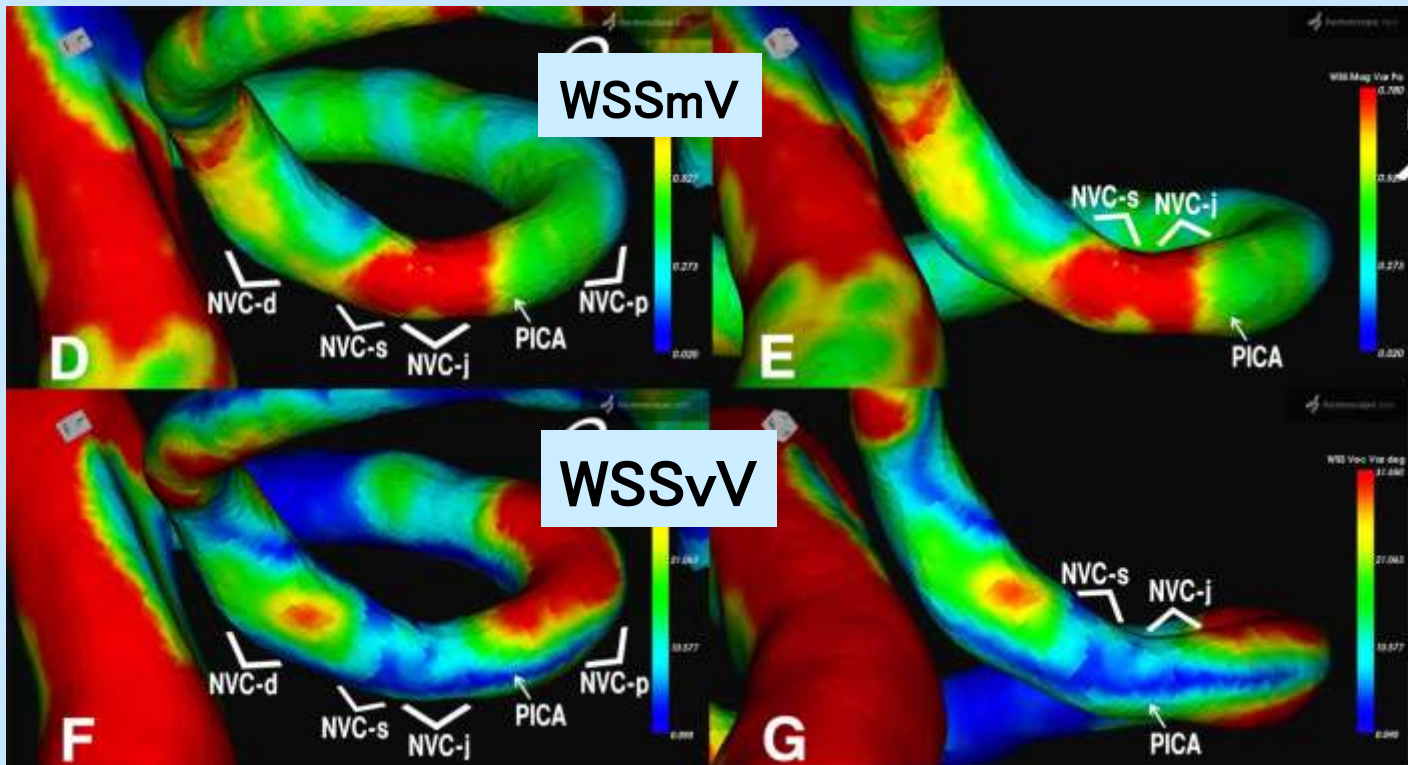
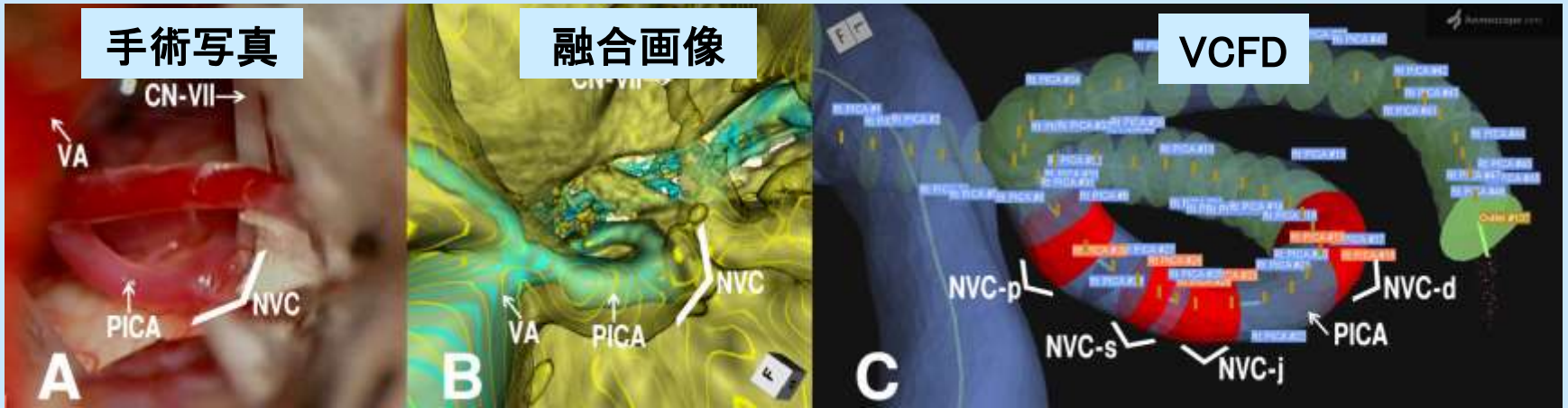
WSS_{vV}



○ NVC部位(接触側)では、
WSS_vは減少、WSS_{vV}は低下
(WSS_m・WSS_{mV}とは反対の結果)



Lt. Hemifacial Spasm



**NVC
接触側**

**NVC
対側**



WSSの解釈

- WSS: 流れの接線方向に働く血管壁への摩擦力。
WSSは強さとWSSのベクトル方向とを併せ持つ。
- **WSS_m**: WSS の強度(Pas)、流量により変化。
- WSS_{mV}: 1心拍動でのWSS_mの変化量(Pas)。
- **WSS_v**: WSSの力の向き(ベクトル方向)。
- WSS_{vV}: 1心拍動でのWSS_vの方向変化を積算値(deg)として定量。
- 通常の平行な流れの場面では、流量増加でWSS_m増大するも、WSS_vの向きは変わらない。
- 流れの衝突・回転・合流の場所では、WSSの大きさ(m)だけでなく、向き(v)も変動。



流れの特性 (1)

● 血管の狭窄:

○ 狭窄部までは流速が上昇(加速流)

⇒ WSS_m増大、WSS_v低下。

○ 狭窄部以降では流速が低下(減速流)

⇒ WSS_m減少、WSS_v増加。

● 血管の弯曲による流れの偏心:

○ 外弯部

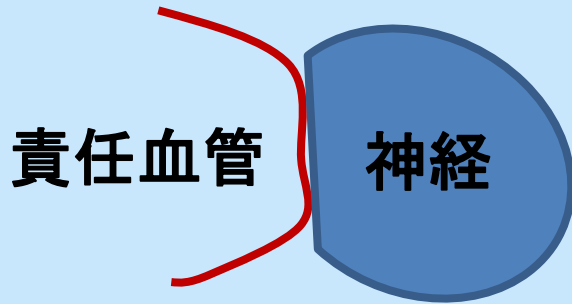
⇒ WSS_m増大、WSS_v低下。

○ 内弯部

⇒ WSS_m減少、WSS_v増加。

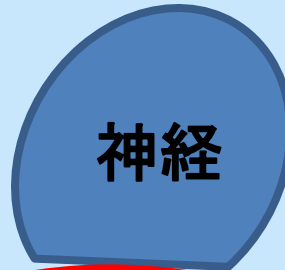


流れの特性 (2)



血管狭窄 有効血管断面積の減少
加速と減速の度合いを強める

偏心



外弯部
流れが加速
WSSm増大, WSSv低下



内弯部
流れは減速
WSSm減少, WSSv増大



NVC部位でのWSSの解釈

- NVC部位では、神経と接触することで責任血管は流体力学的に狭窄を来している。
- NVC直前・NVC部では加速流によりWSS_m増大。加速流では流れは安定化するためWSS_vV低下。NVC後では、逆に、WSS_m減少、WSS_vV増加。
- NVC前に対するWSS_m強度比：
NVC直前 \geq NVC部で高値、NVC後で低値。
- NVC部位では、これに流れの偏心がのってくる。外弯部でWSS_m増大、WSS_vV低下。内弯部でWSS_m減少、WSS_vV増加。



NVC部位でのWSS_mとWSS_vの解釈

- NVC部位で神経と接触した責任血管では、
狭窄：NVC直前 \geq NVC部でWSS_m高値。
偏心：外弯部でWSS_m増大、WSS_v低下。
- NVC部位でのWSS_mは、流れの接線方向に働く血管壁への微細なずれ応力(Pas)。
神経の圧迫には血圧が関与し、WSS_mは直接作用する力とはならない(1mmHg=133Pas)。
- NVC部位で神経と接触する血管壁でWSS_v低下。
接触血管壁面でのベクトル方向変化は僅少となる。
WSS_vは接触する神経の動きには直接作用しない。



責任血管のCFD解析での留意点

- 責任血管が細く蛇行し、静脈が重畳する場合には、固有血管形状の作製が困難となる。
- NVC部位の同定：
NVCでのWSSm強度はWSSm部よりもWSSm直前で高値を示し、流体力学的なNVCの始まりが、手術・融合画像での形態所見より近位部で予測される。
- NVCでの責任血管の接触と脳神経の圧迫程度との詳細な関連は未解決であり、流体力学的所見から、症候性NVCの判別は困難である。
(今後の検討課題である。)



結 論

- NVCの責任血管では、血管壁に平行に作用する $WSS_m \cdot WSS_{mV}$ の比較的高い領域が認められた。
- NVCでは、血管壁のベクトル変動が少なく、 $WSS_v \cdot WSS_{vV}$ は低下していた。
- NVC部位での責任血管のWSS変化は、接触による血管狭窄、屈曲による偏心に関連した特徴的な流体力学的(CFD)所見と考えられた。
- WSS_m と WSS_v のCFD解析により、NVCの流体力学的予測・同定が高感度で可能であり、TN・HFSの術前診断・治療戦略に有用であった。



第43回日本脳神経CI学会総会: 20200124-岡山コンベンションセンター
シンポジウム-5 <脳卒中CFD術前解析>14:00-15:30



ご清聴ありがとうございました。

