

## Venous anatomy of CNS

: Exploring the antireflux mechanisms without valves

東海大学八王子病院

青木吏絵

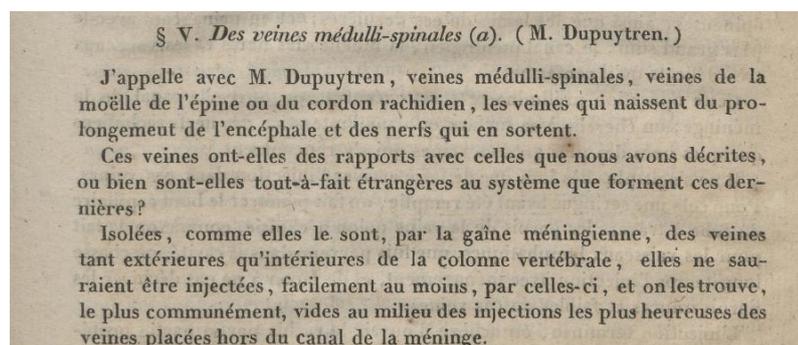
Key words: antireflux mechanism, chordae willisii, sphincter, the Starling resistor

### 【はじめに】

頭蓋内および脊髄静脈には、構造としての弁がないことが知られている。そして、その弁そのものの代わりに、“antireflux mechanism”が報告されている。今回、この“antireflux mechanism”について、過去の文献の review し、考察を交えて報告する。

### 【spinal venous system】

1960 年代初頭には、Oswald や Clemens, Vogelsang, Theron and Moret, Breschet に代表される様々な解剖学者達が、献体の硬膜外静脈叢に casting material を圧注入しても硬膜内に侵入しないことを発見したことから、radicular vein の逆流を防止する“弁”が存在しているとされていた。1)



(Fig1) isolated as they are by the meningeal sheath from both the internal and external veins of the vertebral column, cannot be injected, easily at least, through these, and they are most commonly found empty amidst the best injections of the veins located outside the meningeal canal. (文献 1 より抜粋)

しかしながら、唯一 Oswald らは約 30%に実際に弁を認めたと報告していたが、2) それ以外の研究では実際に弁を観察した報告はなく、証拠もないまま広く受け入れられていた。その後、一時はその逆流防止機構の弁の存在についての関心は薄れていったが、1970 年に Gillilan らが複数の因子による逆流防止の概念を報告し、3) 1979 年から 1985 年 Clemens, Crock, Yoshizawa らなどの報告や、Dommissie は実際の構造としての弁ではなく、「弁のような機能をするもの」の存在を提唱するなど、脊髄の逆流予防装置については再び解剖学者達の関心を集めることとなる。4)そしてこの「弁のような機能をするもの」の実態は、Tadié らによって明らかにされた。5)6)7) 彼らは、解剖標本で観察され

た構造について報告し、それまで信じられていた実際の構造としての弁の存在について初めて否定し、radiculomedullary vein の遠位端の硬膜貫通部の近くに弁のような役割を果たす構造があることを証明し、これに対して“dispositif protecteur anti-reflux” (antireflux mechanism) という名称を提唱した。そして、現在でもこの”antireflux mechanism”が、弁を持たないヒトの脊髄における静脈の還流に大きな意味を持つと考えられている。

今回はこの”antireflux mechanism”についてももう少し掘り下げていく。

<antireflux mechanism>

\* 構造について

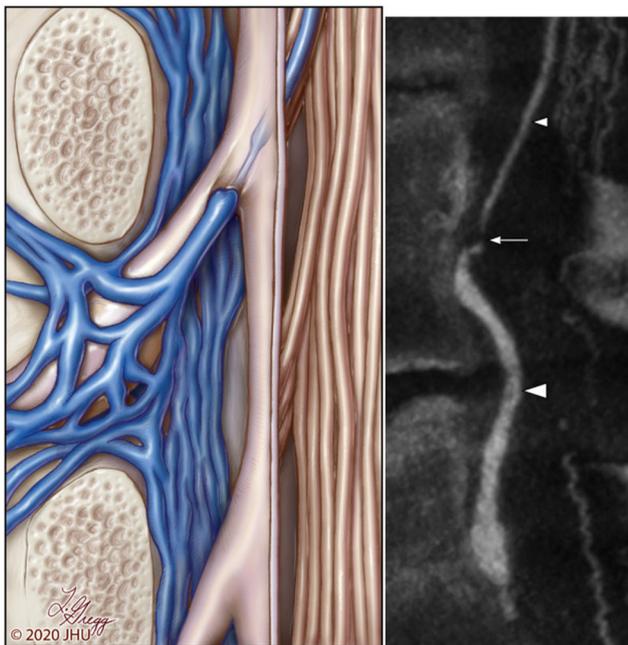
初めてこの概念を提唱した Tadié は、報告の中でこう供述している。

“an obstacle caused by a very significant and inextensible narrowing of the vein in its course within the dura mater [with a] clear and constant modification of the wall of the vein precisely where it crosses the dura mater.”

Tadié らは、それ以前に信じられてきていたいわゆる古典的な静脈弁の存在を初めて否定した。そして腸骨静脈から硬膜内静脈を逆行的に充満させることは、他のすべての静脈を結紮しない限り不可能であり、結紮したとしても、強い過圧迫を加えなければ不可能であると報告した。彼らは、radicular vein の遠位端が硬膜に貫通する部分で狭窄しておりこれが valve としての機能を果たしていると結論付けた。

(Fig2)

(Fig3)



(Fig.2) Dr.Lydia Gregg の radicular vein の硬膜貫通部を表現したイラスト (文献 15 より抜粋)

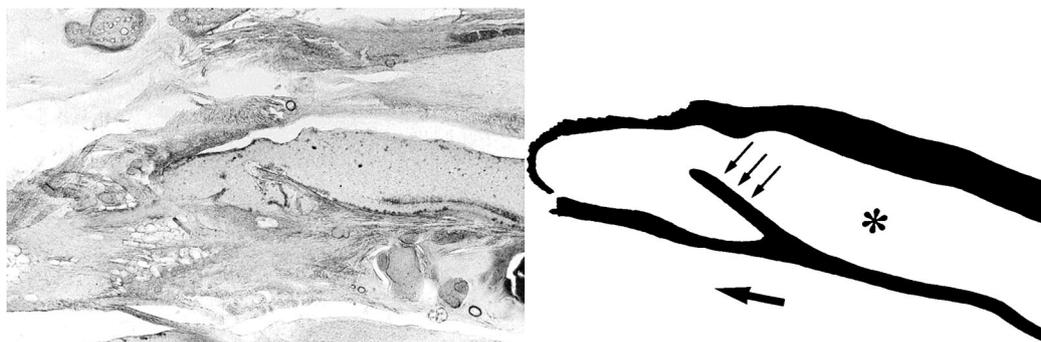
(Fig.3) Flatpanel catheter angiography: sagittal reconstruction of a left L4 injection better delineating the connection of the epidural pouch (large arrowhead) and draining RMV (small arrowhead); the arrow points at the focal narrowing marking the incompetent ARM (arrow).

(文献15より抜粋)

そして、急激な圧上昇に対しては弁として機能するが、慢性的な圧力上昇に起因する静脈還流障害は影響を受けにくく逆流を防止しきれない可能性があるとも述べた。5) 6) 7)

その後、Van der Kuipらは、1999年に、10体の新鮮な献体に Araldite CY211 混合物を注入した後に解剖をし検証した研究の中で、顕微鏡下での調査でも、すべての献体で radicular vein に弁が認められなかったこと、硬膜内の radicular vein 内に Araldite が逆行して入っていたことを報告している。8) Van der Kuip らの報告は、硬膜外から内への液体の逆流が認められた点では Tadié らの行ってきた研究結果とは、完全に矛盾する結果となった。Tadié らが用いた注入手順の技術的詳細は不明であるため、なぜ全く硬膜内に逆流しなかったのかの理由については推測することしかできないが、死後、血液は内椎骨静脈叢に蓄積する傾向がある。体が仰臥位になると、特に体幹背側に血液が溜まる。そのため血液を除去する作業の有無が結果を大きく変えてしまった可能性があると考えられる。いずれにせよ、Van der Kuip らの報告では、"antireflux mechanism"が過去考えられていたように、完全に逆流を防止するものではないということが言える。また、同時に彼らは、静脈逆流を完全には防ぐことはないが静脈逆流装置としてはたらく可能性のある、4つの構造について観察されたとも報告している。8)

① The valve-like dural folds



(Fig.4) Microscopic section of a dural fold (small arrows) within the transdural part of a radicular vein, filled with Araldite CY 221 mixture (asterisk). The direction of anterograde blood flow is shown by the large arrow. (文献8より抜粋)

このdural foldsはradicular veinを完全に閉塞できないように見えるが、逆行性の血流の場合、層流を乱流に変えられと考えられる。この乱流は血管内抵抗の上昇を引き起こし、その結果、静脈圧波の硬膜内構造への伝達が減少すると思われる。

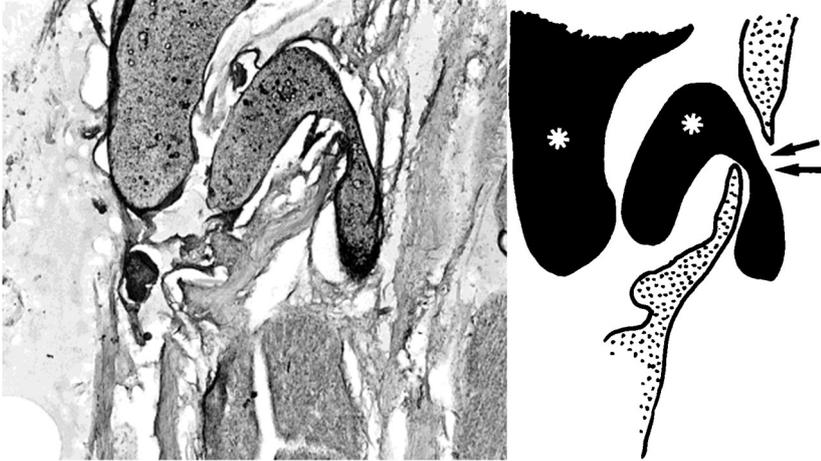
② Meandrous configuration and widening of the radicular veins

radicular vein 周囲の静脈は、その高い容量と曲がりくねった形状により、radicular vein の硬膜内への静脈還流を減少させる可能性があるため、逆流制御にも役割を果たしている可能性がある。

③ Narrowing of the part of the radicular veins

radicular vein が硬膜を貫通する部分に狭窄が観察された。これらの静脈の最も狭い部分では、コラーゲン繊維と meningotheial cell の増加が認められた。これは、Tadié らが 1979 年に既に報告

している。この間質の肥厚は、一見すると括約筋の存在を示唆するものの、Van der Kuip らの実験では、これらの部位に平滑筋細胞の集中は示されなかった。しかし、Tadié ら（1979）が提唱したように、radicular vein の硬膜貫通部の狭窄は、逆流防止装置とみなすことができる。なぜなら、この血管内径の減少は血管内抵抗を増加させ、血流を減少させることができる



(Fig.5) Microscopic section of the transdural part of a radicular vein, filled with Araldite CY 221 mixture (asterisks), showing extensive venous narrowing (arrows) at the point of penetration of the dura mater. The schematic “3D” reconstruction of eight adjacent sections demonstrates that this narrowing really exists, and is not caused by misinterpretation of a transection of a tortuous vein.

(文献8より抜粋)

#### ④ Smooth muscle fibers

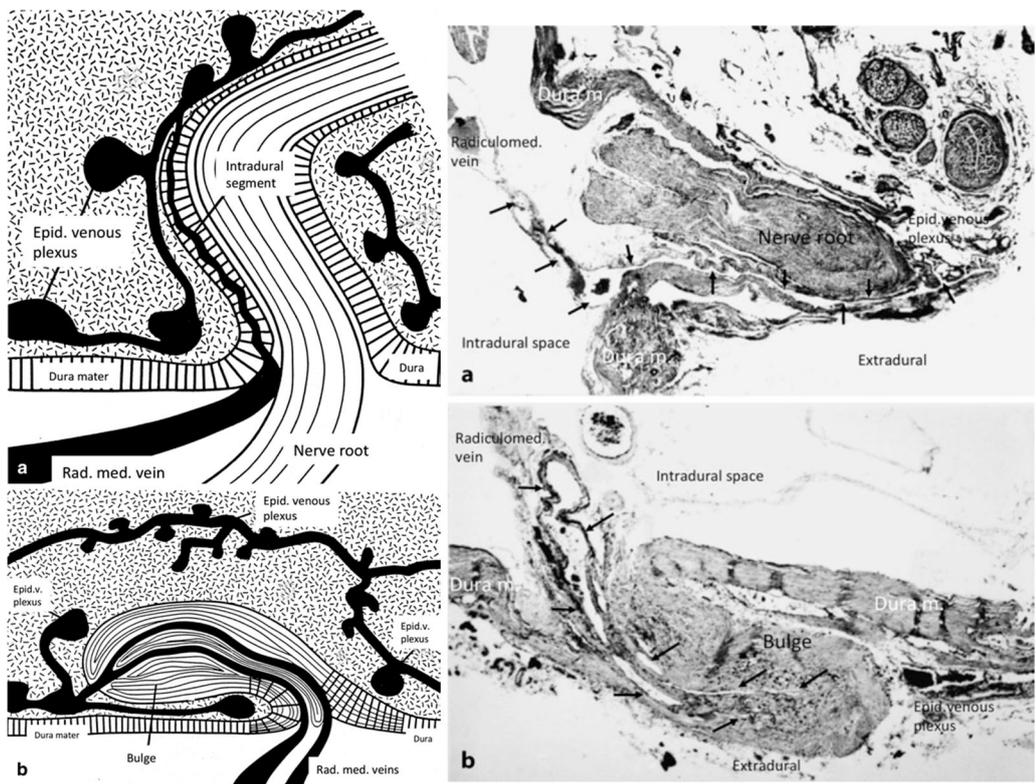
radicular vein の壁内に相当数の平滑筋線維が存在することは、能動的な血管拡張または収縮によって血管径が動的に調節されていることを示唆している。これは、硬膜にも非常に複雑な血管運動機能が備わっており、血液灌流を能動的に調整することができるという Zenker と Kubik らの報告に類似している。9)

また、Thron らは、合計 102 本の脊髄静脈を、脊柱管の様々なレベルの radicular vein の硬膜貫通部を顕微鏡で観察した。さらに、26 本の血管を、硫酸バリウムを用いて硬膜内静脈部分を巡行性（12 本）または逆行性（14 本）に造影した後に、微小血管造影検査により調べた。その報告によると、研究された標本の 60% がスリット型、35% がバルジ型または結節型であったと報告している。残りの 5% はどちらの型にも分類できなかった。スリット型は神経根近傍でよく観察される。バルジ型または結節型は、主に神経根からある程度離れた 2 本の脊髄神経の間の硬膜を貫通している血管である。10) 後に Komiyama は、この論文に対して、「これは、スリット型がいわゆる radiculomedullary vein であり、バルジ型または結節型が bridging vein であることを意味する」と解説を加えている。11)

radicular vein の硬膜貫通部の狭窄については、Tadié らが、硬膜外腔の容積と圧力が増加すると、くも膜カフの腫脹により狭い硬膜貫通部が徐々に閉鎖され逆流を防ぎ、これにより、硬膜内は急激な圧力

上昇から保護される。しかし、慢性的な圧力上昇に起因する静脈還流障害はこのシステムは影響をあまり受けないと述べている。このメカニズムがあれば、硬膜に平行に傾斜したバルジ型は、スリット型よりも逆流制御にさらに効果的であるはずだ。

ちなみに Kiyosue らによると、spinal dural AVF のドレナージ経路は、症例の 77% で BV (バルジ型) を経由し、RMV (slit 型) ドレナージはわずか 5% であると報告している。12) いわゆる Thron の報告の中でのバルジ型の radicular vein の構造がより dAVF の成因との関連があるかどうかは興味深いところである。



(Fig.6) a : slit 型 b: bulge 型 Structurally different types of blood vessel exit through the dura mater. Histological sections, H&E, original magnification 60 x. (文献 10 より抜粋)

\*機能について

Van der Kuip らの報告で、注入した Araldite CY211 混合物が相当数の radicular vein に逆行性に充填された。8) また、Meijenhorst らが、腰椎ヘルニアの患者に対して、経大腿より硬膜外静脈叢を造影した際、硬膜内の sacral radicular vein が描出されたことを報告しており、これは生理的条件下で生体において radicular vein を介した静脈の逆流が生じることを示唆している。13) この”antireflux mechanism“自体は、Van der Kuip らは、実際には逆流を完全に防ぐものではなく、あくまで硬膜内の脊髄の神経組織を静脈の過度な圧迫、圧上昇から保護するために静脈の逆流を調節するものであると報告している。8) 実際に、下大静脈の結紮による脊髄硬膜内の逆流で症候性に至った報告はない。14)

また、Zenker と Kubik らは、椎骨静脈叢が、高体温時に脳脊髄液（CSF）を介して脊髄を冷却するための解剖学的条件を満たしていると述べている。背部の皮膚の静脈網で冷却され、吻合部を通して外部から内部の椎骨静脈叢へと流入する血液は、最終的に脊髄硬膜の血管床に到達し、同様に CSF を冷却することができる。9)しかし、彼らは当時まだ radicular vein が存在すると考えていたため、硬膜内の冷却は不可能だと考えていたが、実際には弁が存在しないため冷却された血液は脊髄に流入する可能性がある。

つまり、”antireflux mechanism“は、静脈圧が高い状態においては血管内抵抗を増加させ、脊髄を静脈圧から保護する能力を有する一方で、生理的逆流は可能であり、脊髄内圧および温度の調節に役割を果たしている可能性がある。

<正常および病態における”antireflux mechanism”>

2020年にはPhilippe Gailloudは、正常およびshunt疾患における脊髄静脈の血管撮影による臨床画像によって”antireflux mechanism”を放射線解剖学的に示し証明した。15)

\*the normal angiographic anatomy of the antireflux mechanism



(Fig.7) Angiographic anatomy of the antireflux mechanism in a 74-year-old man. (a) DSA, left L1 injection (arterial phase), posteroanterior projection, documenting the artery of Adamkiewicz (large white arrow) and the anterior spinal artery (small white arrow). (b) DSA, left L1 injection (venous phase), posteroanterior projection, showing the anteromedian spinal vein (small black arrow) and a left L1 radiculomedullary vein (RMV) (large black arrow). (c) FPCA, left L1 injection, oblique reconstruction along the plane of the artery of Adamkiewicz; note the course of the vessel between its take-off from the left L1 intersegmental artery (arrowhead) and its intradural segment (arrow). (d) FPCA, left L1 injection, oblique reconstruction along the plane of the left L1 RMV. The RMV drains into the internal vertebral venous plexus (black asterisk), which is connected to the external vertebral venous plexus

(white asterisk) by the intervertebral veins crossing the neural foramen (gray arrowhead). The RMV is divided into intra- and extradural segments (black and gray arrows) by the ARM located at its point of passage through the thecal sac (bracket). As shown in this example, the ARM commonly appears as a focal opacification defect indicating the minute caliber of its lumen. (文献15より抜粋)

**\*The antireflux mechanism and high-flow spinal vascular anomalies**

high-flow spinal vascular anomalies の部位が硬膜内か硬膜外なのかによって”antireflux mechanism”に与える影響が変わってくる。硬膜内の順行性の drainage を伴う high flow shunt の場合は静脈圧の上昇に比例する程度まで拡張させる可能性がある。 ”antireflux mechanism”の拡張については、圧力依存性であるが、患者の年齢や圧力上昇の持続期間などの要因も影響している可能性がある。一方、硬膜外の high flow shunt の場合、 ”antireflux mechanism”は髄内の静脈還流は逆流を予防し静脈圧上昇から脊髄を守る。しかし、長期間持続すると、硬膜内ドレナージが時折観察され、 ”antireflux mechanism”の有効性が低下している可能性がある

**\*The antireflux mechanism and spinal venous thrombosis**

狭窄部が存在すると、正常な順行性脊髄ドレナージに悪影響を及ぼす可能性がある。脊髄静脈の長くほぼ垂直な経路は座位または立位において静脈うっ血および血栓症の危険因子となる。この現象は加齢に伴う脊髄静脈のドレナージの喪失を説明できる可能性がある。また、Gailloudらは、low-flow の脊髄動静脈瘻の疑いで紹介された脊髄症患者数名に脊髄造影検査を行うと、動静脈シャントがないにもかかわらずドレナージ障害に起因する perimedullary vein の拡張が確認された。これらの観察結果が、正常範囲の極端な変化を表しているのか、特定の疾患（脊髄静脈不全症など）を表しているのか、それとも low-flow 脊髄動静脈瘻にみられる脊髄静脈不全の初期段階（「瘻孔形成前」段階）を表しているのかは明らかではない。

**\*The antireflux mechanism and low-flow spinal arteriovenous fistulas**

硬膜内また外の low flow shunt で硬膜内へのドレナージを伴う場合、典型的には spinal venous hypertension に続発する進行性脊髄症を呈する。おそらく”antireflux mechanism” の機能が進行性に低下したことに関連していると考えられる。Low-flow 脊髄動静脈瘻の形成と発現は、いずれも血栓化によって起こることがあると考えられる。脊髄動静脈瘻に関しては、頭蓋内硬膜動静脈瘻の発生と同様に、 ”antireflux mechanism”の血栓症が動静脈シャント形成に先行する可能性が高いと考えられる。 15)

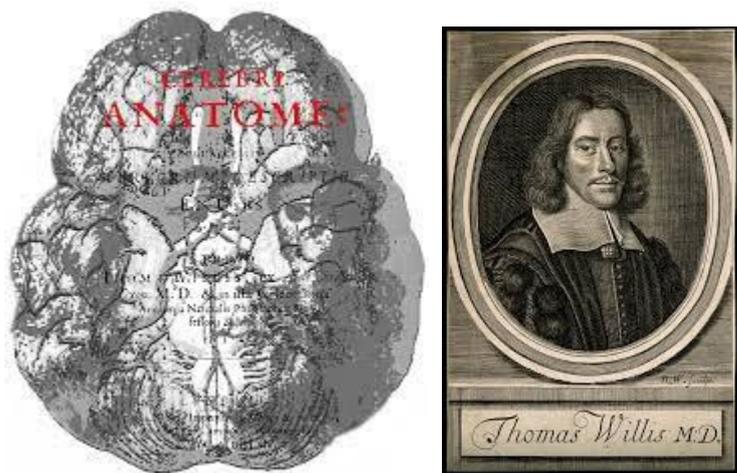
**【cerebral venous system】**

脳静脈も脊髄同様弁を持たない。そのため、逆流防止、静脈還流の自己調節については、数々の報告がなされている。これらのsystemを検討する前提として、脳は頭蓋骨に覆われ、Monro-Kellieの法則で知られる通り、頭蓋内腔の容量が一定とされている。そのため、静脈の還流も単に一方的な流れの向きということよりも動脈圧や頭蓋内圧などに影響される部分が多い。これをふまえ、過去の報告の

中で、脳の静脈還流を調整するsystemとして機能している可能性のある、Chordae Willisiiや皮質静脈と上矢状静脈洞（SSS）の接合部の解剖学的構造などに着目した文献をいくつかreviewする。

<chordae willisii>

Thomas Willis は、イギリスの脳神経系の解剖の第一人者であり、Willis 動脈輪を発見した功績は広く知られるところである。彼は 1664 年の彼の著作”*Cerebri anatome*”に硬膜洞の内部の構造物として初めて Chordae willisii について記述した人物である。16)



(Fig8.) Thomas Willis

Chordae willisii は静脈洞内に見られる多数の線維性の構造物であり、その生理学的意義については様々な議論があり、一部では静脈の逆流防止機能に関わっている説がある。

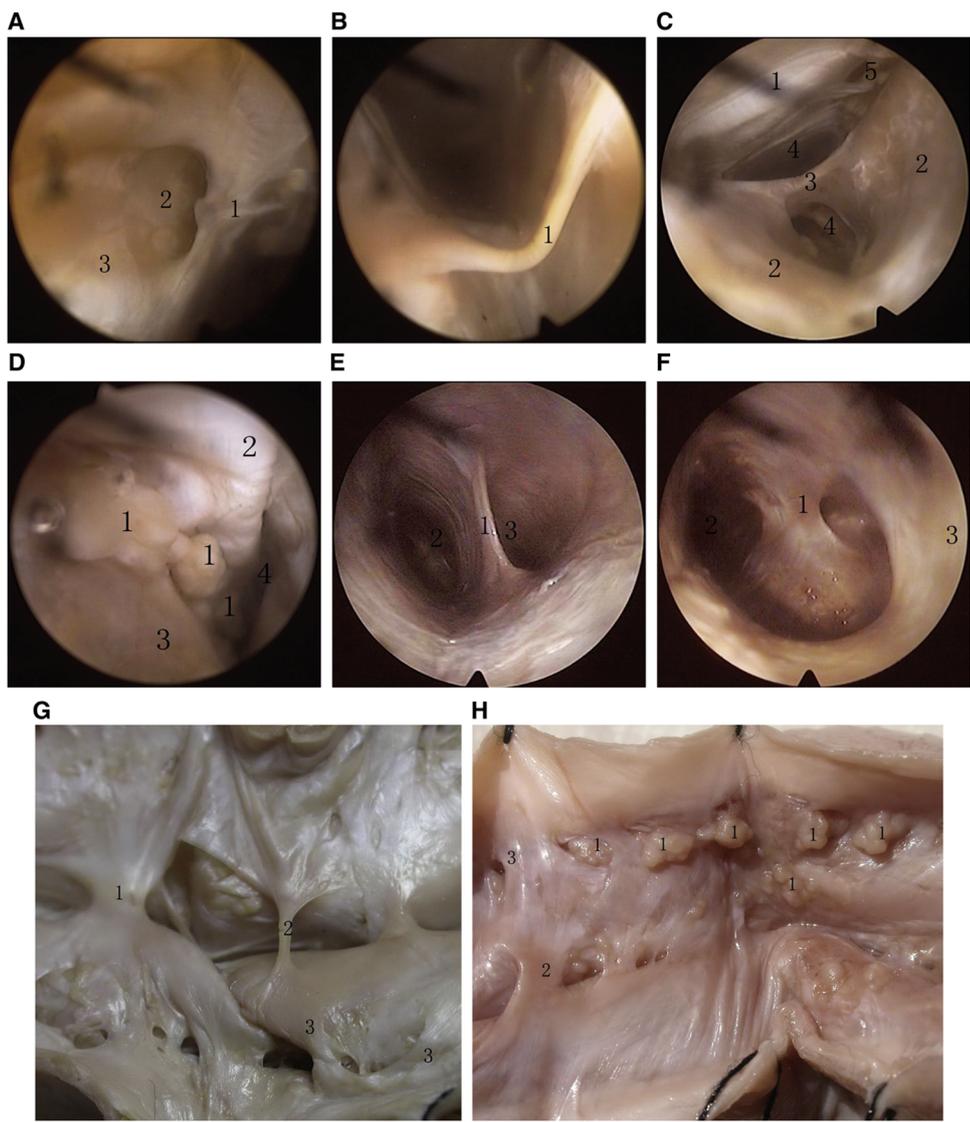
1980 年 Schmutz は SSS 内に存在する Chordae willisii の形態学的な分類や分布の特徴をまとめさらにその機能について考察している。彼らによると、Chordae willisii を形態的な分類をすると Valve-like lamellae, Trabeculae, longitudinal lamellare の 3 種類の type があり、valve-like type が 49% と最も多く認められ、cortical vein の SSS への流入口を半分ほど覆うことがあると報告している。SSS 内の Chordae willisii の分布は、いずれの形状の type も前頭部より後頭頭頂部に多く見られた。頭頂部と後頭部の脳表の静脈の末端は静脈洞に合流する手前で前方に向かい、静脈洞の血流の方向とは逆の角度で流れ込んでいて、SSS 内の後方に向かう血流とは逆になる。そのためこの部分の開口部のほとんどは、静脈から静脈洞への排出を確実にするために、Valve-like lamellae で半分覆われていると Schmutz は考察している。静脈洞から Lacunae laterales や上大脳静脈が満たされるには、非生理的に高い圧力が必要であることを Browder と Kaplan, 1950 年 ; Browder, 1972 年 ; Ray ら, 1951 年 が証明しており、これは Chordae willisii が逆流を防ぐ安全装置として機能していることを示しており、また、valve-like type の Chordae willisii が頻繁に静脈の開口部の近くに存在している理由もこれで説明がつくとしている。また、Chordae Willisii の Trabeculae type や longitudinal lamellare type は静脈洞の内腔を部分的に狭めることで流速を増加させ、その結果、静的圧力が静脈開口部で低下し、その圧格差によって血液を逆流させず排出できる。（ベンチュリー効果）また、静脈洞の断面積は後頭部側に向かって大きくなり通常だと乱流が起こり血流は停滞しそうだが、Chordae willisii の longitudinal lamellare type を通ることにより乱流をふせぎ、層流となることで巡行性の血流の向きを

担保している。つまり Chordae willisii のそれぞれの形態は静脈洞内の巡行性な血流の維持にそれぞれ重要な意味をもつと報告している。 17)

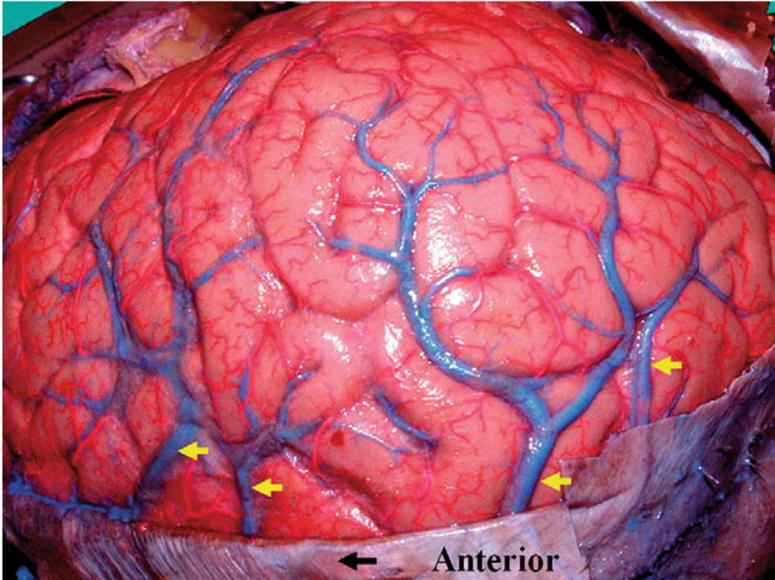
また、2003 年 Alicja らは胎児から成人の時期の違いによって上矢状静脈洞に現れる Chordae willisii の外観を比較評価し、それらの役割を明らかにした。彼らの報告では、Lacunae laterales も、くも膜顆粒も Chordae willisii も、胎児には存在しない。その後脳の成長とともに bridging vein の SSS への流入角度にも変化が起き、Chordae willisii も発生、発達、増加することから Alicja らは Chordae willisii は静脈の還流に大きな役割があるとしている。 18)

これまでは献体の解剖で Chordae willisii の構造を評価したものだったが、2004 年 Mansoor らは検体を内視鏡を用いることで元の構造を損傷することなく静脈洞内を観察し報告した。SSS を生理食塩水で還流して観察を行ったところ、全ての chordae willisii の中で valvelike が 45%と最も多く、彼らもこれはそのうち約 50%は静脈の流入口の近傍にあり、弁のような役割を果たしていたと報告し以前の報告と類似した結果であった。 19)

2009 年 Shao らは内視鏡的 SSS 内の観察と解剖の両方で Chordae willisii の構造を評価し、Schmutz の報告同様に形状は 3 種類に分かれており、laminar 型は SSS 内の内腔を 2 つの独立した腔に分けていた。Valve-like 型は静脈の SSS への開口部と関連が深く、静脈の中部および後部の末端部が前方を向き、血流方向とは反対の角度で上矢状洞に流入することを指摘し、これもまた、静脈開口部において生理学的に不利な角度を形成するため Valve-like 型の Chordae willisii が開口部に存在し SSS 内の巡行性の流れに関わっているとした。また同時に Shao らはラテックス注入実験も行い、ラテックスを SSS 後端から注入すると、SSS から逆行的に脳静脈に色素が充填されたために、Chordae willisii の弁としての機能は非生理的な圧がかかる環境下では十分には働かないことを証明した。 20)



(Fig. 9 ) (A) Endoscopic view of a venous opening partially covered by a peripherally located lamina. 1 = Valve-like chordae, 2 = hatch of the vein, 3 = sinus wall. (B) Endoscopic view of a solitary cord in the lumen of the SSS. 1 = Trabecular chorda. (C) Endoscopic view of a laminar chorda inside the sinus, dividing the lumen into two channels. 1 = Superior wall, 2 = side wall, 3 = laminar chorda, 4 = sinus lumen. (D) Endoscopic view of several arachnoid granulations in the lumen. 1 = Arachnoid granulations, 2 = side wall, 3 = sinus cavity, 4 = superior wall. (E) Endoscopic view of a laminar chorda inside the sinus, dividing the lumen into two channels. 1 = Laminar chorda, 2 = right channel, 3 = left channel. (F) Endoscopic view of a chorda inside the torcular herophili. 1 = Laminar chorda in the torcular herophili, 2 = right transverse sinus, 3 = Laminar chorda. (G) Photograph of three chordae in the middle of a dissected sinus. 1 = Laminar chorda; 2 = trabecular chorda, 3 = valve-like chorda. (H) Photograph showing many arachnoid granulations in the middle of a dissected sinus. 1 = Arachnoid granulations, 2 = Laminar chorda, 3 = valve-like chorda. (文献20より抜粋)



(Fig. 10) The superior cerebral veins (pale arrows) were filled in a retrograde fashion following the intraluminal injection of blue latex into the superior sagittal sinus. (文献20より抜粋)

一方、Jeanらは、Chordae willisiiは一定の部位に存在せず個体差がありCortical veinの流入部に必ずしも存在しているわけではないことから、これまでの数々の研究者がChordae willisiiは逆流防止に重要な役割を果たしているという説を否定しており、あくまで胎児期のvenous plexusの遺残であり、弁の機能を果たす役割はなく、生理学的な意義はないとしている。しかし、これはAlicjaの胎児にChordae willisiiを認めなかったという報告内容と矛盾する。21)

#### <Sphincter>

JeanらはChordae willisiiは逆流防止の役割をもつことについては否定的で、皮質静脈と上矢状静脈洞(SSS)の接合部の構造に着目し、これが逆流防止装置として働いている可能性について述べている。ホルマリン固定された献体の頭部を解剖し、SSSに沿った皮質静脈の接合部を解剖学的、組織学的、免疫組織化学的、および超微細構造的の研究によって明らかにした。21)

#### \*解剖学的特徴

SSSは、柔軟なbridgin veinとは対照的に、硬い静脈集合系である。さらに、SSSへの皮質静脈の開口部は、静脈洞と脳脊髄液区画の境界、すなわちくも膜下腔に位置している。過去にはcortical veinがSSSに流入する直前には狭窄があると報告されていたが、Jeanらの報告では全例で、逆に少し膨らんでいるような構造を取っていた。ここでは”puffy-looking appearance”と表現している。

#### \*微細構造的特徴

透過型電子顕微鏡(TEM)を用いた観察により、この接合部におけるコラーゲン繊維は、他の部位の直線状とは対照的に、螺旋状に配向していることが実証された。他の研究者らも、コラーゲン繊維の方向が変化し、SSSから離れるにつれて次第に螺旋状が大きくなることを指摘している。コラーゲン繊維の

螺旋状の配列は、伸張時の変化に適応するバネのように、補償システムとして機能している可能性がある。

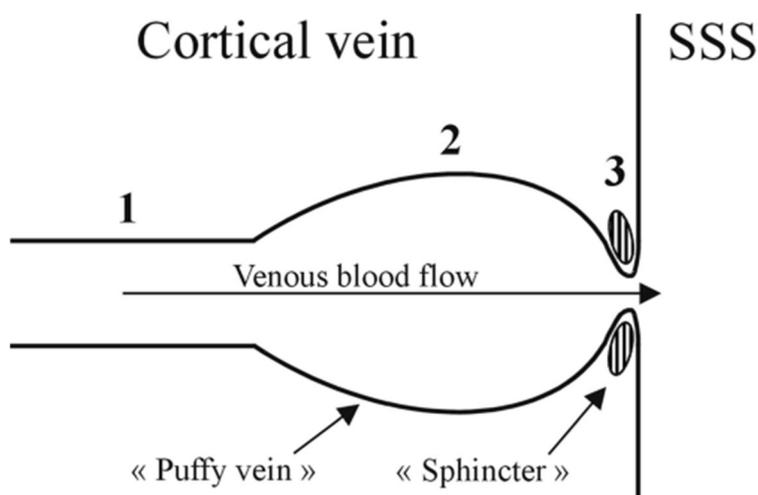
\*組織学的特徴

bridging vein はくも膜下腔を走行した後 SSS の硬膜を貫通し、短い硬膜内を走行して SSS に開口した。HES 染色切片では、静脈壁と隣接する硬膜洞壁はすべて SMA 陽性染色を示した。免疫染色はすべての標本の皮質静脈で規則的であり（図 2），後皮質静脈では特に多く見られた。静脈と SSS の交差点では、平滑筋線維が豊富で非常に太く、静脈の内腔径を減少させていた。この豊富な筋線維は、"smooth sphincter"と呼ばれるものを形成していた。

この発見から、脳静脈系の調節には筋原性の要素が関与し、頭蓋内圧の上昇時の脳血流変動に応じて"smooth sphincter"は、自己調節機能をもつ可能性がある。

実際、頭蓋内圧と皮質静脈圧の間には密接な関連があり、皮質静脈圧は頭蓋内圧よりも約 2~5 mmHg 高い。これは、頭蓋内圧亢進時に大脳静脈が常に開通している。そして動物実験では、皮質静脈壁にノルアドレナリンおよびペプチド神経線維が存在し、脳静脈の自律神経支配を示唆している報告がある。

以上から、Jean らは、"puffy-looking appearance", コラーゲン繊維の螺旋配列, 筋繊維の存在から、cortical vein と SSS の接合部に"sphincter"というべき構造があり、皮質静脈と SSS の接合部は、ショックアブソーバーとしてだけでなく、ベンチュリー効果による排出コーンとしても機能し、これが脳静脈の逆流防止システムとして作動していると考えた。(21)

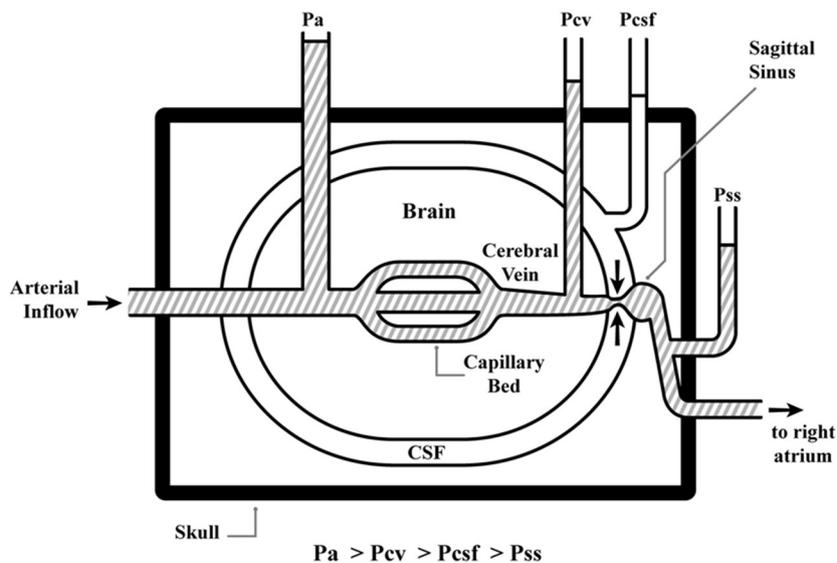


(Fig.11) Schematic diagram illustrating the hypothesized mechanism of regulation. The cerebral venous system is generally likened to a "Starling resistor model." Intravascular pressure is normally equal to perivascular pressure (CSF pressure), with transmural pressure being approximately 0 mmHg (1). The diameter of the cortical veins increases just before their openings into the SSS, producing a "puffy-looking" vein (2). This Venturi effect is a particular effect of the Bernoulli principle, with fluid (blood) flow through a tube (cortical vein) with a constriction in it (the "sphincter" observed at the junction between the veins and the SSS). Blood velocity must increase in the restriction (3), causing a reduction in pressure. This

pressure reduction is the result of energy storage—blood gains kinetic energy as it enters the constriction, the energy being supplied by a pressure gradient force from behind. The pressure gradient reduces the pressure in the constriction in reaction to the acceleration. Likewise, as the blood leaves the constriction, it is slowed by a pressure gradient force that increases the pressure back to the ambient level. (文献21より抜粋)

<the Starling resistor >

実際の静脈還流の調整は、上記までに述べてきた局所的なものだけではなく、姿勢変化、大気圧、頭蓋骨という閉鎖環境、頭蓋内圧、脳脊髄液圧などがさらに考慮される必要がある。そのようなメカニズムの一つに「スターリング抵抗器」があり、種を超えて存在している。「スターリング抵抗器」は、空気で満たされたチャンバー内に設置された液体で満たされた虚脱可能なチューブで構成される装置である。チャンバー内の空気圧はチューブの虚脱を制御するために使用され、可変抵抗器として機能する。この抵抗器は、1912年に生理学者アーネスト・スターリングによって発明された。22) 1948年、脳脊髄液圧が脳循環に及ぼす影響について議論する中で、Ketyらは「スターリング抵抗器」を類似例として提案した。23) その後、脳静脈などスターリング抵抗器でいういわゆる虚脱可能なチューブの生理機能は、1980年にFryらによって詳細に説明された。24) 彼らは、管腔内圧が導管外表面にかかる圧力を下回ると管が虚脱することを観察した。したがって、流量は入口圧力と出口圧力の差には依存せず、代わりに、流量は入口圧力と導管系周囲の圧力の差に依存し管内の液体の流れを調整しているとした。この現象は「スターリング抵抗現象」として知られており、このメカニズムが作用する導管上の箇所は「チョークポイント」として知られている。24) これをヒトの脳に当てはめると、脳は頭蓋骨という硬い容器に囲まれ、くも膜下腔において脳脊髄液(CSF)に囲まれている。内頸動脈と椎骨動脈からの血液は脳動脈に流入し、毛細血管床に流れ込む。毛細血管床からの血液の流出は、架橋静脈などの脳静脈を通して行われる。架橋静脈は側方小窩に排出され、そこから硬膜の硬い静脈洞に流れ込み、頭蓋骨から頸静脈と椎骨静脈へと流れ出る。脳静脈はくも膜下腔を横断するため、周囲のCSFによる外圧を受ける。つまりくも膜下腔内を通過するbridging veinのSSSとの接合部がいわゆる「チョークポイント」となる。直立姿勢中に上矢状静脈洞の圧力が低下すると、高い脳脊髄液圧が矢状静脈洞への接続部を圧迫するため静脈血のサイフォン作用が防止され静脈の過剰流出を防ぐ。同時に、スターリング抵抗部近位の脳静脈圧は、発生する圧により脳脊髄液圧よりも高いレベルに維持される。このように、スターリング抵抗部は、脳内の様々な液体コンパートメントの圧力の優先順位、すなわち動脈流入圧 > 脳静脈圧 > くも膜下脳脊髄液圧 > 矢状静脈洞圧を維持する役割を果たしている。これにより、圧力勾配が形成され、矢状静脈洞への脳脊髄液の流出が促進される。25)



(Fig. 12) Schematic illustration of hierarchy of pressures of various liquid components of the intracranial space. Arrows indicate Starling resistor at lateral lacunes (the junction between cortical bridging vein and sagittal sinus). Arterial inflow pressure (Pa) is higher than CSF pressure (Pcsf), which in turn is higher than pressure in the superior sagittal sinus (Pss). Pressure in the upstream cerebral veins (Pcv) is always maintained above Pcsf due to constriction effect by the Starling resistor, this phenomenon also prevents venous overdrainage during upright positioning when Pss falls. The bridging vein is surrounded by CSF; thus, cerebral perfusion is dependent on the difference between Pa and Pcsf. (文献26より抜粋)

**【cerebrospinal venous system】**

Cerebrospinal venous system(CSVS)は頭部から骨盤まで伸びており、弁がないため自由に交通する静脈と静脈叢の集合体で構成されている。このシステムの構成要素の1つ目は頭蓋内静脈で、皮質静脈、硬膜洞、海綿静脈洞、眼静脈が含まれる。2つ目は vertebral venous system(VVS)で、脊椎の全長に沿って流れる椎骨静脈叢が含まれる。頭蓋内静脈は、後頭下領域で VVS と豊富に吻合する。尾側では、CSVS は仙骨静脈、骨盤静脈、そして前立腺静脈叢と自由に連絡している。CSVS は、双方向に血流が流れる、他に類を見ない大容量の弁のない静脈網を構成している。CSVS は、姿勢変化に伴う頭蓋内圧の調節や脳からの静脈流出において重要な役割を果たしている。ヒトや他の脊椎動物におけるこれらの研究すべてから、CSVS の頭蓋部と脊椎部との吻合は、姿勢の変化に応じて頭蓋内静脈系の圧力恒常性を維持する上で重要な役割を果たしていると考えられる。(27)

**【参考文献】**

1. Breschet G. Essai sur les veines du rachis. Paris: Chez M\_equignon-Marvis, Libraire Pour la Partie de Medecine, 1819.
2. Oswald K. Untersuchungen u" ber das Vorkommen von Sperrmechanismen in den Venae radicales des Menschen. Thesis, Berlin. 1961.

3. Gillilan LA. Veins of the spinal cord. Anatomic details; suggested clinical applications. *Neurology* 1970; 20:860–868.
4. Dommissie G. The arteries and veins of the human spinal cord from birth. 1st ed. Edinburgh, London and NewYork: Churchill Livingstone, 1975.
5. Tadi\_e M, Hemet J, Freger P, et al. Morphological and functional anatomy of spinal cord veins. *J Neuroradiol* 1985; 12: 3–20.
6. Tadi\_e M, Hemet J, Aaron C, et al. Le dispositif protecteur anti-reflux des veines de la moelle. *Neurochirurgie* 1979; 25: 28–30.
7. Tadi\_e M, Hemet J, Aaron C, et al. Les veines radiculaires de drainage de la moelle ont-elles un dispositif de se\_curite\_anti-reflux? *Bull Acad National Med* 1978; 162:550–554.
8. Van der Kuip M, Hoogland PV and Groen RJ. Human radicular veins: regulation of venous reflux in the absence of valves. *Anat Rec* 1999; 254: 173–180.
9. Zenker W, Kubik S. Brain cooling in humans—anatomical considerations. *Anat Embryol* 1996; 193:1–13.
10. Thron A, Krings T, Otto J, et al. The transdural course of radicular spinal cord veins – a microangiographical and microscopical study. *Clin Neuroradiol* 2015; 25: 361–369.
11. Masaki Komiyama. Spinal radiculomedullary vein and bridging vein. *Interventional Neuroradiology* 2020; 26(6):703-705
12. Kiyosue H, Matsumaru Y, Niimi Y, JSNET Spinal AV Shunts Study Group, et al. Angiographic and clinical characteristics of thoracolumbar spinal epidural and dural arteriovenous fistulas. *Stroke* 2017; 48:3215–3222.
13. Meijenhurst GCH.. Lumbar epidural double-catheter venography with Metrizamide (Amipaque). *Diagn Imag* 1979;48:244–252.
14. Northway RO, Buxton RW.. Ligation of the inferior vena cava. *Surgery* 1945;18:85–94.
15. Philippe Gailloud. The antireflux mechanism – Angiographic anatomy and clinical implications. *Interventional Neuroradiology* 2020;26(6):691-702
16. Willis T: *Cerebri Anatome: cui accessit nervor um description et usus*. London: Jo. Mertyn & Ja. Alleftry, 1664
17. Schmutz HK: The chordae Willisii in the superior sagittal sinus: morphology and classification. *Acta Anat* 1980; 108:94–97
18. Alicja K, Wojciech K et at : Morphology of the Willis chords in the superior sagittal sinus during various periods of life *Folia Morphol* 2003;62(3):255-7
19. Mansoor sharifi, m.d., Jacek kunicki, m.d.,et al : Endoscopic anatomy of the chordae willisii in the superiorsagittal sinus *J Neurosurg* 2004;101:832-835
20. Yi Shao , Jin-Long Sun et at Endoscopic and microscopic anatomy of the superior sagittal sinus and torcular herophili *Journal of Clinical Neuroscience* 2009;16 421–424
21. Jean R V et al. A hypothesis of cerebral venous system regulation based on a study of the junction between the bridging veins and the superior sagittal sinus. *Laboratory investigation J*

Neurosurg, 2007;107(6):1205-10

22. Knowlton FP, Starling EH The influence of variations in temperature and blood-pressure on the performance of the isolated mammalian heart. J Physiol 1912; 44(3):206–219
23. Kety SS, Shenkin HA, Schmidt CF The effects of increased intracranial pressure on cerebral circulatory functions in man. J Clin Invest 1948; 27(4):493–499
24. Fry D, Thomas L, Greenfield J Flow in collapsible tubes. In: Patel D, Vaishnav R (eds) Basic hemodynamics and its role in disease processes. University Park, Baltimore, pp. 419–423 1980
25. K Barami. Cerebral venous overdrainage: an under-recognized complication of cerebrospinal fluid diversion Neurosurg Focus. 2016 ;41(3): E9
26. Luce et al. A Starling resistor regulates cerebral venous outflow in dogs. J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol. 1982;53(6):1496–1503
27. Tobinick E, Vega CP The cerebrospinal venous system: anatomy, physiology, and clinical implications. MedGenMed 2006; 8(1):53