原 著

脊椎・脊髄手術におけるナビゲーションシステムの使用経験

西川 節, 大畑 建治, 高見 俊宏, 後藤 剛夫, 原 充弘

Experience of using Navigation System in Spinal Surgery

by

Misao Nishikawa, M.D., Kenji Ohata, M.D., Toshihiro Takami, M.D.,
Takeo Goto, M.D., Mitsuhiro Hara, M.D.

from

Department of Neurosurgery,
Osaka City University Graduate School of Medicine

We report our experience of using a navigation system in spinal surgery, and assess its usefulness. Forty cases were operated upon using a navigational system, and 33 were operated upon using conventional methods, without a navigational system. There were significantly fewer complications when the navigation system was used than when it was not. We mostly used the navigation system for cases having anomalies and/or severe deformation of the spine requiring instrumentation (transarticular screw, pedicle screw) and bony resection.

The system increased the accuracy of spinal instrumentation and decreased the risk of neurovascular injury. Navigation-assisted surgery improves the accuracy of spinal instrumentation and bony resection because it provides a multidimensional view of anatomical relationships during surgery.

Key words: navigation system, spinal surgery, supporting system

Spinal Surgery 19 (2) : 127~136, 2005

はじめに

Frameless 手術ナビゲーションシステムは、1986年に Roberts [17] らによって報告されて以来、さまざまな技術改良を経て、頭蓋内疾患ばかりでなく脊椎・脊髄外科にまで幅広く利用されるようになった [1, 6]. 手術ナビゲーションシステムは脊椎の三次元的画像を得ることができ、かつ手術野からは直視できない椎弓根、横突孔や椎骨動脈などの重要な構造物をモニター上で確認することができる [5, 15, 16]. このモニター上のイメージを活用して手術操作を誘導することによって、正確な手術操作を可能することができる [5, 9, 10-16]. そこで、私どもは、脊椎・脊髄手術において、積極的に

手術ナビゲーションシステムを用いるようにしてきた。

今回、私どもの脊椎・脊髄手術における手術ナビゲーションシステムの使用経験を示し、手術ナビゲーションシステムの有用性と現時点での問題点を検討した。

対象と方法

過去10年間の当施設における脊椎・脊髄手術は401例である。このうち44例11%にナビゲーションシステムを用いた。1998年に当施設にナビゲーションシステムが導入される以前は、ほとんどの脊椎脊髄手術においてナビゲーションを行うことはなかった。後述するような場合

(Received : November 8, 2004, Accepted : February 25, 2005)

大阪市立大学大学院医学研究科 脳神経外科 (連絡先: 西川 節, 〒545-8585 大阪市阿倍野区旭町 1-4-3 大阪市立大学大学院医学研究科 脳神経外科) Address reprint request to: Misao Nishikawa, M.D., Department of Neurosurgery, Osaka City University, Graduate School of Medicine, 1-4-3 Asahimachi, Abeno-ku, Osaka, 545-8585, Japan

には、レントゲン撮影を繰り返すかあるいはCアームによる透視を行っていた。1998年以降、当施設にナビゲーションシステムが導入されてからは、奇形例・骨の変形の強い例や神経根・脊髄を損傷したり、硬膜を損傷したりすることによる髄液漏などの重篤な合併症を来す可能性のある操作（骨の切除、インスルメンテーション／他）、さらに腫瘍の切除範囲を決定する際においてナビゲーションシステムを用いることとしてきた。

我々は、Stealth Station™ (Medtronic, Memphis, TN, U.S.A.) を用いている。あらかじめCT scanで、骨の画像データを取っておく。このデータをStealth Station™ にインストールする。実際の術野とCTデータの画像を、赤外線カメラをとおして、術野と融合させる。これらの操作におけるシステムの理論上の空間精度は0.3 mm以下の誤差である。実際の操作としては、リファレンスアームを、手術操作を行う脊椎の棘突起に固定し、このリファレンスアームと赤外線カメラとの位置関係をStealth Station™ に読み込ませる（リファレンス）。次に、実際の術野における解剖学的に明瞭な位置とStealth Station™ 内のCTデータとを融合させる（レジストレーション）[5, 6, 9, 11-16, 19]。この次に実際の手術操作となる。

脊椎脊髄手術のうちのナビゲーションシステムを用いた疾患の内訳を検討した。ナビゲーションシステムを用いる前、1997年以前のインスルメンテーションを行った33例の手術と1998年以降のナビゲーションシステムを使用してインスルメンテーションを行った44例の手術を対象として、これらの症例のうちの合併症がおきた頻度を検討した。さらに、ナビゲーションシステムの実際の使用経験から、ナビゲーションシステムにおける現在の問題点、使用に際しての注意点を検討した。

結 果

脊椎・脊髄手術の11%にナビゲーションシステムを用いているが、疾患別にその利用率をみると、変性疾患243例中16例（6.6%）にナビゲーションシステムを用いた。同様に、奇形23例中14例（61%）に、外傷37例中8例（22%）に、腫瘍90例中5例（5.6%）に、炎症性疾患8例中1例13%にナビゲーションシステムを用いた。これらから、奇形の症例に最も高率にナビゲーションシステムを用いていた。インスルメンテーションのスクリューの挿入の際などの35例に、骨切除の際のオリエンテーションのための7例、腫瘍切除の際のオリエンテーシ

ョンのための3例にナビゲーションシステムを使用した。このことからインスルメンテーションを行う際に最も多くナビゲーションシステムを使用した。

脊椎脊髄手術のうちのインスルメンテーションを行う際の合併症の発生頻度を検討した。ナビゲーションシステムを用いる前、1997年以前のインスルメンテーションを使用した手術は33例で、そのうち合併症は3例（9.1%）に、椎骨動脈の損傷、硬膜損傷によると思われる髄液漏、スクリューが椎間関節を逸脱したdisorientationがみられた。ナビゲーションシステムを用いるようになった1998年以降のインスルメンテーションを使用した手術は44例で、そのうち合併症は1例（2.3%）であった。椎骨動脈の狭窄をきたした1例のみであった。ナビゲーションシステムを用いるようになってからの方が、合併症は減少していた。手術中、ナビゲーションシステムを使用すること自体による合併症はなかった。

< 症例 1 >

70歳の男性で、進行する脊髄症状で発症した。Os odontoideumが認められ（Fig. 1A and 1B）、延髄頸髄への圧迫と、環椎軸椎亜脱臼と不安定性が認められた。

環椎椎弓切除と環椎軸椎にtransarticular screw: Magerl法を行い、後頭骨軸椎固定を計画した。椎骨動脈は左側が優位なうえに、走行異常がみられた。Magerl法を行う際に、ナビゲーションシステムを用いた（Fig. 1C, 1D and 1E）。

リファレンスアームを固定し、レジストレーションを行った。スクリューの刺入位置、刺入方向、刺入の深さを決定した（Fig. 1F）。骨皮質を切り、オールを挿入して行く間、幾度か方向、深さを確認した。オールが関節面に達した際や（Fig. 1F）、刃先が海面骨から環椎前弓の前面の骨皮質に達した際には、ナビゲーションシステムで位置、方向、深さを確認した。その後、スクリューを挿入した。

スクリューをOlerud cervicalシステム（Anatomica Spinal System, Gothenburg, Sweden）のrodで連結し、腸骨をおき固定した。

スクリューは予定通りの方向、深さに挿入された。頭蓋頸椎移行部は、neutral positionで固定された。スクリューは計画通り、pedicleの上方の海綿骨内を通過し、環椎の前方の骨皮質に入るとまっている（Fig. 1G）。脊髄は減圧され、軟部組織は縮小した（Fig. 1H）。

A	B	C	D	E
F				
G		H		

Figure 1

A: CT scan sagittal and coronal image showing the osodontoideum.

B: MRI T1WI sagittal image showing compression of spinal cord by the osodontoideum.

C and D: Reconstructed CT scan showing the planning for insertion of a transarticular screw.

E: 3D-CT angiogram demonstrating abnormal displacement of the vertebral artery on dominant (left) side.

F: Calculation of the direction and depth using a probe in the navigation system.

Arrows show the direction and depth of insertion the screws.

G: Cervical plain X-ray showing the screws in good position and fixation in the neutral position.

H: MRI T1WI: sagittal image showing decompression of the cord.

A		B
C	D	E

<症例 2>

51歳の男性で、脊髄空洞症の症例で、延髄、頸髄は大孔部で強く圧迫されている。この症例は、Third condyle, Klippel Feil syndrome, 歯突起の変形、さらには、前医にて椎弓拡大形成もおこなわれていた (Fig. 2A and 2B)。骨奇形、変形が特に強い症例で、大孔部減圧と後頭骨軸椎固定を計画した。

右軸椎のpedicleは狭く、椎骨動脈がすぐ近傍を走行しており、この部分へのスクリューの挿入は難しいと考えられ、C2/3 transarticular screw, C4 lateral mass screwも考慮した (Fig. 2C and 2D)。左軸椎のpedicleも狭いが、スクリューは通過できると思われたので、こちらには、C1/2 transarticular screw: Magerl法を行うことにした (Fig. 2D and 2E)。これら、スクリューの挿入の操作にナビゲーションシステムを用いた。

リファレンスアームを固定し、レジストレーションを行った。さらに左軸椎へのpedicle screwの刺入位置、

刺入方向を決定した。骨皮質を切り、オールを挿入し、タップを切っていくが、この際に、何度か、方向・深さを確認した。環椎軸椎関節面、環椎前弓の骨皮質までの距離を確認した。横断像でも同様に確認した (Fig. 2F)。

次に、右側のC1/2 transarticular screwは可能かどうかをみた。椎骨動脈が近傍を走行しており、スクリューが安全に通過するための骨はないようなので、C2/3 transarticular screwとすることとした (Fig. 2G)。

この症例では、さらに右C4 lateral mass screwを加えて、各スクリューをOlerud cervicalシステムのrodで連結し、後頭骨軸椎を固定し、後頭骨軸椎刺突起間に腸骨を置いた。

スクリューは、計画どおりに狭いpedicleを通過し、脊椎管・椎間孔に出ることなく、椎体前面の骨皮質に達している。後頭骨軸椎はneutral positionで固定され、大槽部は現われ、脊髄空洞は縮小している (Fig. 2H and 2I)。

Figure 2

A: CT scan: sagittal image showing the third condyle.

B: MRI T1WI: sagittal image showing severe compression of the cord at the craniovertebral junction and syringomyelia.

C and D: Reconstructed enhanced CT scan demonstrating the planning of a transarticular screw at C1/2 and C2/3, and a lateral mass screw at C4 on the right side. Transarticular screw insertion may not be possible because of the insufficient bone for the root of the transarticular screw..

D and E: Reconstructed enhanced CT scan showing successful transarticular screw insertion in the left side.

F: photo demonstrating the decision of the direction and calculation of the depth using probe in navigation system for the left side transarticular (C1/2) insertion of screw.

Arrows indicate the direction and depth of insertion the screw.

G: Calculation of direction and depth for insertion of a transarticular (C2/3) screw using a probe in the navigation system.

H: Cervical plain X-ray showing the screws in good and fixation in the neutral position.

I: MRI T1WI: sagittal image showing decompression of the cord.

A	B	C	D
E			

Table 1: Patients, diagnosis and situation using a navigation system

Spinal surgery: 401 (1994 - 2003)		
Navigation system: 44 (11%)		
Diagnosis	No.	Situation
Spondylosis	16 / 243 (6.6%)	Instrumentation (16)
Malformation	14 / 23 (61%)	Instrumentation (10)
		Bone resection (7)
Trauma	8 / 37 (22%)	Instrumentation (8)
Tumor	5 / 90 (5.6%)	Tumor resection (3)
Inflammation	1 / 8 (13%)	Instrumentation (1)

Table 2: Results

Complication on insertion of instrumentation	
Before (1994 - 1997)	After (1998 - 2003)
3 / 33 (9.1%)	1 / 44 (2.1%)
Before: cases before introduction of navigation system	
After: cases on and after introduction of navigation system

Figure 3

A: Reconstructed CT scan: sagittal image showing fracture of the body of L1.

B: MRI T1WI: sagittal image showing compression of the cord.

C and D: Reconstructed CT scan showing planning of the insertion of a pedicle screw.

E: Calculation of direction and depth for insertion of a pedicle screw using a probe in the navigation system.

F, G and H: Reconstructed CT scan showing the screw inserted in good position and fixation in good alignment.

<症例 3>

82 歳の女性で、転倒による第 1 腰椎の圧迫骨折を認めた (Fig. 3A and 3B). 後方から減圧, 第11/12 胸椎, 第 2/3 腰椎の pedicle screw インスルメンテーションによる固定を計画した。

CT scan 上, 右第 2 / 3 腰椎の pedicle が小さく, 直径では 6.0 mm であり, 使用するスクリューの最小の直径が 5.5 mm である (Fig. 3C and 3D). この pedicle screw の挿入の際に, ナビゲーションシステムを用いた。

スクリューの刺入位置, 刺入方向, 刺入距離を決定した (Fig. 3E). 骨皮質を切り, オールを挿入していくが, 何度か刺入方向・深さを確認した。この症例ではとくに, 冠状断像も観察しながら, オールが正しく pedicle を通過することを確認めた (Fig. 3E). 同様の操作を左右, 第11/12 胸椎, 第 2 / 3 腰椎に行い, Liverty system (Medtronic, Memphis, TN, U.S.A.) で連結, 固定した。

術後, スクリューは, pedicle 内を, 骨皮質に接しながらギリギリ通過していた。スクリューは, 当初の計画どおりの位置に入った (Fig. 3F and 3G). 腰椎の alignment は是正され, スクリューは pedicle 内のわずかな部分を通過しているのがわかる (Fig. 3H).

考 察

今回の検討において, ナビゲーションシステムを用いることにより, より一層安全で正確なインスルメンテーションを行うことが確かめられた。このことは, Laine ら [11], 水野 ら [12], Roessler ら [16], Tamura ら [18] も報告している。特に奇形例, 骨の変形 of 強い例などの通常の解剖学的構造と比べて, 著しく構造の変化がみられるような例においては, ナビゲーションシステムを用いることにより安全, 正確に操作を行うことができた。頸椎の transarticular screw fixation や pedicle screw fixation におけるスクリューの挿入は, 椎骨動脈を損傷したり, 神経根を損傷したり, 硬膜を損傷したりすることによる髄液漏などの重篤な合併症を来す可能性のある操作である [3, 10, 11, 13, 19]。このような操作の際にナビゲーションシステムの使用により, より安全で正確なスクリューの挿入を行うことができた。ナビゲーションシステムを用いることによって, 実際の手術において操作を行っている箇所の位置関係を確認することができる。このことによって, 操作の安全を確認しながら, 正確に操作をすすめることができる。頭蓋頸椎移行部の疾患の症例などは, 頻繁に経験するも

のではない。このような疾患では、症例を積み重ねることによって得られる経験だけでは、手術を完璧に行うようになることはできない。ナビゲーションシステムを用いることによって、経験することの少ない疾患においても、手術部位の解剖学的位置関係を正確に示すことができ、安全・正確・完璧に手術を行うことができる。

我々のナビゲーションシステムの使用経験からの注意点が四つあげられる。一つは、リファレンスアームの不安定性からくる誤差の拡大である。術者の手が触れてアームが動いてしまう場合や、脊椎の不安定性のためにアームをしっかりと固定できない場合には、実際の術野とナビゲーションシステムとの間に誤差が生じ、操作の正確さが低下する。二つ目は、レジストレーションを行う際に、術野と解剖学的な位置とCT上の解剖学的な位置を融合させるのであるが、この操作は術者の眼による判断によるものである。このために、術者の正確な判断がなければ、誤差が拡大し、ナビゲーションシステムの正確さが低下する。三つ目は、手術操作が一つの椎骨に収まる場合はよいが、操作が二つ以上の椎骨にいたる場合は、操作の途中に位置関係がずれてしまうことがある。これらのことから、現時点では、やはり、そのおのおの時点における確認のためにfluoroscopyの確認が望ましいと思われた。四つ目は、腫瘍の切除の際には、髄液の排出、脊髄の拍動などによって、術前と比べて位置関係が変化してしまうことである。

脊椎・脊髄手術においてナビゲーションシステムを用いる際に念頭に置いておかなければならないことは、本システムが手術中の手術の方法を決定したり、術者に代わって操作するためのものではないということである。実際に、手術方法を決定し操作するのは、術者自身である。あくまで術者自身が、解剖に熟知し、画像などからの綿密な手術計画をたてること、手術操作に熟練することが大切である。ナビゲーションシステムは、あくまでも手術を安全、正確に行うための支援であることをわすれてはならない。

ナビゲーションシステムに関する最近の報告では、ポインターの改良によって、オールやプローベにもポインターと同様の機能を備えることができるようになり、リアルタイムにモニター上で位置を確認できるようになっている [2]。また、高度に焦点の調整されたC-armやCT scanを用いて、手術中にリアルタイムに画像を再構成しながら手術操作を進めていくナビゲーションシステムが開発されている [2, 4, 7-9, 18]。しかし、これらの道具、システムにも、実際の術野での扱いが難

しいことや、画像解像度が低いなどの問題点は多く、今後さらに改良の必要があると思われる。

まとめ

脊椎・脊髄手術におけるナビゲーションシステムの使用経験から、ナビゲーションシステムの脊椎脊髄手術における有用性、使用上の要点と問題点を示した。

奇形例、骨の変形の強い例などの通常の解剖学的構造と比べて、著しく構造の変化がみられるような例における骨の切除やインスルメンテーションを行う際の操作においては、ナビゲーションシステムを用いることによって、安全・正確に操作を行うことができる。一方で、ナビゲーションシステムの幾つかの問題点も指摘されており、今後の改良が望まれる。

文 献

1. Bennett GH, Kormos DW, Steiner CP, Weisenberger J: Intraoperative localization using an armless, frameless stereotactic ward. J Neurosurg 78: 510-514, 1993
2. Bolger C, Wigfield c: Image-guided surgery: application to the cervical and thoracic spine and review of the first 120 procedures. J Neurosurg (Spine), 92: 175-180, 2000
3. Dickman CA, Sonntag VKH: Posterior C1-C2 transarticular screw fixation for atlantoaxial arthrodesis. Neurosurgery, 43: 275-281, 1998
4. Foley KT, Simon DA, Rampersaud YR: Virtual fluoroscopy: computer-assisted fluoroscopic navigation. Spine 26: 347-351, 2001
5. Grunert P, Darabi K, Espinosa J, Filippi R: Computer-aided navigation in neurosurgery. Neurosurg Rev 26: 73-99; 2003
6. Heilbrum MP, McDonald PP, Wicker C, Koehler S, Peter W: Stereotactic localization and guidance using a machine vision technique. Stereotact Func Neurosurg 58: 94-98, 1992
7. Holly LT, Foley KT: Three-dimensional fluoroscopy-guided percutaneous thoracolumbar pedicle screw placement. Technical note. J Neurosurg Spine 99: 324-329, 2003
8. Hott JS, Deshmukh VR, Klopfenstein JD, Sonntag

- VK, Dickman CA, Spetzler RF, Papadopoulos SM: Intraoperative Iso-C C-arm navigation in craniospinal surgery: the first 60 cases. 54: 1131-1136, 2004
9. Kamiura M, Ebara S, Itoh H, Tateiwa Y, Kinoshita T, Takaoka K: Accurate pedicle screw insertion under the control of a computer-assisted image guiding system: laroratory test and clinical study. J Orthop Sci. 4: 197-206, 1999
10. Kotani Y, Abumi K, Ito M, Minami A: Improved accuracy of computer-assisted cervical pedicle screw insertion. J Neurosurg Spine 99: 257-263, 2003
11. Laine T, Lund T, Ylikoshi M, Lohikoski J, Schlenzka D: Accuracy of pedicle screw insertion with and without computer assistance: a randomized controlled clinical study in 100 consecutive patients. Eur Spine J 9: 235-240, 2000
12. 水野順一, 中川 洋, 張 漢秀, 山田隆壽, 渡部剛也, 犬飼 崇: Spinal instrumentation における navigation surgery の応用. 脳外誌 9: 731-737, 2000
13. Mizuno J, Nakagawa H, Watabe T: Combined anterior and posterior instrumentation in severe fracture-dislocation of the lower cervical spine with help of navigation: a case report. J Clin Neuroscie. 8: 446-450, 2001
14. Nolte LP, Slomczykowski MA, Berlemann U, Strauss MJ, Hofstetter R, Schlenzka D, Laine T, Lund T: A new approach to computer-aided spine surgery: fluoroscopy-based surgical navigation. Eur Spine J Suppl 1: S78-88, 2000
15. Roessler K, Ungersboeck K, Dietrich W, Aichholzer M, Hittmeir K, Matula C, Czech T, Koos WT: Frameless stereotactic guided neurosurgery: clinical experience with an infrared based pointer device navigation system. Acta Neurochir (Wien) 139: 551-559, 1997
16. Roessler K, Ungersboeck K, Aichholzer M, Dietrich W, Czech T, Heimberger K, Matula C, Koos WT: Image-guided neurosurgery comparing a pointer device system with a navigation microscope: a retrospective analysis of 208 cases. Minim Invasive Neurosurg 41: 53-57, 1998
17. Roberts DW, Strohbehn JW, Tatch JF, et al: A frameless stereotactic integration of computerized tomographic imaging and the operating microscope. J Neurosurg 65: 545-549, 1986
18. Tamura Y, Yonenobu K: The advanced technology of three-dimensional medical imaging in spine, bone and joints. Nippon Rinsho 62: 799-805, 2004
19. Van Cleynenbreugel J, Schutyser F, Goffin J, Van Brussel K: Image-based planning and validation of C1-C2 transarticular screw fixation using personalized drillguides. Comput Aided Surg. 7: 41-48, 2002

Reviewer's comment : 今栄 信治 (和歌山県立医科大学 脳神経外科)

脊椎脊髄疾患に対する手術において、ナビゲーションシステムの使用前と使用後を比較した結果、明らかに手術合併症が減じ、ナビゲーションシステムの使用は有効であるとした素晴らしい報告である。我々の施設でも、同時期にナビゲーションシステムを導入し、特にC1-2のtransarticular fixationでは極めて有用と考えている。ただし、著者らも強調しているようにナビゲーションシステムが手術を行うのではなく、術者自身が行うということを、理解しておく必要があると思われる。また、最大の欠点としては準備や調整に時間が浪費される点で、それだけ術中感染の機会を作っていることは否めない事実であり、必要に応じた使用が重要視される。著者らは、ナビゲーションシステムを脊髄腫瘍にも応用されているようであるが、本編にはその詳細がなかったので、機会があれば報告をお願いしたい。

Reviewer's comment : 水野 順一 (愛知医科大学 脳神経外科)

脊椎脊髄手術におけるナビゲーションの役割は、spinal instrumentationの手技が複雑化してくるにつれて、重要になってきている。特にC1-2 transarticular screw fixationと頸椎、胸椎でのpedicle screw fixationには欠かせない手術支援機器となっている。著者らは40例以上に及ぶ経験から、ナビゲーションを併用することにより、手術合併症が有意に減少したと報告している。術中のスクリュー誤進入による椎骨動脈損傷、脊髄損傷は致命的な合併症となりうるため、ナビゲーション併用による正確なinstrumentationが基本である。ただし著者らも言われているように、あくまで外科解剖を熟知したうえでのナビゲーションであることは忘れてはならないことである。