

脊椎外科における材料のニーズの 現在と未来

長谷川 和 宏*

1. はじめに

生体材料(インプラント)を用いた脊椎手術は、1950年代に米国の Harrington が脊柱変形に対する矯正固定術を実施したのを契機として世界に広まった⁽¹⁾。インプラントが実用化される以前の黎明期においては、脊椎固定術は、もっぱら骨移植と体幹ギプスなどの外固定のみによって骨癒合をめざす方法であり、術後長期の臥床を余儀なくされ、歩行開始後も嚴重に外固定を継続する必要があった。近年開発された各種のインプラントによって、早期の離床と日常生活への復帰が可能になり、患者への恩恵は計り知れない。

本稿では、脊椎の機能解剖と現在行われているインプラントを用いた脊柱再建術を概説し、将来のニーズを考えてみたい。

2. 脊柱の機能解剖

脊椎には体幹の支持性、運動性を維持しながら内部の神経組織を保護する機能がある。椎骨(椎体+椎弓)は、前方の椎間板、後方の椎間関節、および頭尾側方向に縦走する靭帯群によって連結され、脊柱を形成する(図1)。その内部の脊柱管には脊髄および馬尾が存在し、脊柱管内で分岐した神経根は椎骨間の隙間から脊柱管外へ出て末梢へ送られる。脊柱は、椎体間の関節(椎間板および椎間関節)でその可動性を生

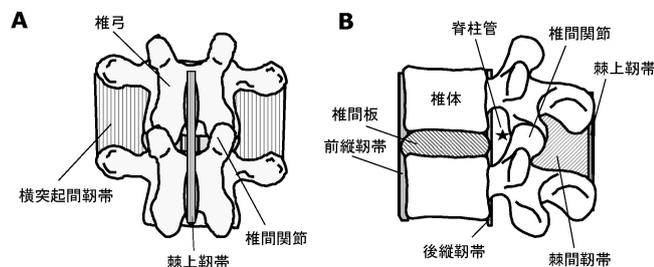


図1 正常脊椎の機能的脊柱単位シエマ。
A. 後方, B. 左側面。



図2 正常脊柱左側面図。

むが、脊柱管の横断面積はほぼ一定に保たれ、内包する神経組織は保護される。

生体力学的観点から見ると、脊柱は椎弓と椎体の連結部(椎弓根)を境界として前方(腹側)要素と後方(背側)要素に分けられる(図1B)。前方要素の椎間板は、主に軸圧に抗して体重を支える。例えば腰椎の場合、体幹の荷重は、前方要素(主に椎間板)で約80%、後方要素(主に椎間関節)で約20%が支えられる⁽²⁾。背筋群の収縮力は椎弓根を通して前方要素に伝達される。後方要素の関節である椎間関節は、脊柱安定性、とくに回旋において重要な役割を担う。脊柱では、頸椎、胸椎、腰椎、それぞれのレベルにおいて基本的構造は同じであるものの、椎骨の大きさや同一椎骨内での各構成要素の相対的大きさに違いがある。これは各レベルでの荷重や運動状態の差異によるものと考えられる(図2)。健常者では、視覚や聴覚の情報を脳で総合し、神経・筋活動を総動員して、無意識のうちに最小の筋肉活動エネルギー消費でこの複雑な形状をもつ脊柱バランスを維持している⁽³⁾⁽⁴⁾。

* 新潟脊椎外科センター；センター長(〒950-0165 新潟市江南区西町 2-5-22)

Present and Future Requirments for Materials in Spine Surgery; Kazuhiro Hasegawa(Niigata Spine Surgery Center, Niigata)

Keywords: spine surgery, implant, reconstruction, pedicle screw system, intervertebral cage, fusion, functional anatomy

2013年12月2日受理[doi:10.2320/materia.53.134]

3. 脊椎手術の概要

現在行われている脊椎手術は下記のように大別される。

- (1) 椎間板ヘルニアや脊柱管狭窄症に代表される神経圧迫病変に対しては、圧迫の原因となる組織を切除する⁽⁵⁾。
- (2) 関節機能の破綻が原因で痛みなどの症状を起こしている場合には、関節を固定(関節固定術)、可動性を残して補強(制動術)⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾、あるいは、関節をインプラントで置換する(人工椎間板)
- (3) 脊柱側弯症に代表される変形に対しては、様々なインプラントを駆使して、正常の脊椎配列(アライメント)に近づけて固定する(脊柱矯正固定術)⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。
- (4) 脊椎腫瘍のような破壊性病変に対しては、病巣を切除し、その欠損部をインプラントで補填し、残存する正常骨に固定する⁽¹¹⁾。

通常、脊椎手術の第一の目的は神経の除圧である。除圧操作には多かれ少なかれ脊柱構成要素の切除を伴う。その切除範囲が大きいほど脊柱の安定性は損なわれる⁽¹²⁾。インプラントを用いた脊柱再建術の目的は、このような除圧操作で生じた解剖学的破綻を即時に安定化し、術後早期の荷重や日常生活動作に十分耐えられるようにすることである。各種のインプラントが開発され、現在では、後頭および頸部⁽¹³⁾から仙骨に至るまで、あらゆる部位での再建が可能である。脊柱が強固に再安定化されれば手術後の装具も簡略化でき、早期の離床とともに退院後の日常生活や職場への復帰が容易となる。脊柱再建術の技術的進歩によって、手術適応は大きく拡大した。とくに高齢者脊柱変形に対する矯正固定術⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾や脊椎悪性腫瘍における腫瘍椎体の全切除再建術⁽¹¹⁾ができるようになったことは脊椎手術に大きな変革をもたらしたと言える。

脊椎における病巣切除術は、脊椎構成要素のあらゆる部位に行われるが、その進入経路は前方と後方に大別される。従って、再建術も大きく前方法と後方法に分けられるが、場合によっては、両者を同時に行うこともある。前方からの脊柱再建術は、主病巣が脊柱の前方要素に存在する場合に適応となる。椎間板に病変が局限している場合には、罹患椎間板レベルを切除して、椎間ケージなどで椎間固定を行う。椎体腫瘍では病変部を切除し、この切除部分を補填する。

再建術を行う場合には各部位の機能解剖と生体力学的作用を考慮した適切なインプラントと固定手技が必要となる⁽¹⁴⁾。

4. 代表的な脊椎手術の実際

(1) 胸腰椎後方手術

骨折などで破綻した脊柱を、後方からインプラントおよび骨移植を行って再建する方法である。必要に応じて、神経除圧操作を行う。脊柱再建の目的は、脊椎配列を正常に近づけて骨癒合を得ることである。インプラントは、矯正した脊椎配列を維持するための補助であり、最終的にはインプラント周囲を新生骨が取り囲んで連結することにより骨癒合が得られる。

症例：64才女性 骨粗鬆症性第12胸椎偽関節

尻もちをついてから背部痛が持続。徐々に腰曲りが強くなり、歩行困難となって受診。胸腰椎移行部に圧迫骨折と後弯を認め、骨粗鬆症性第12胸椎偽関節(本来骨である骨折部が関節のように動く状態になっている癒合不全)⁽¹⁵⁾の診断で、脊柱矯正固定術を施行(図3A, B, C)。術後3年、腰曲りや背部痛はなく、日常生活を不自由なく送っている(図3D, E, F)。

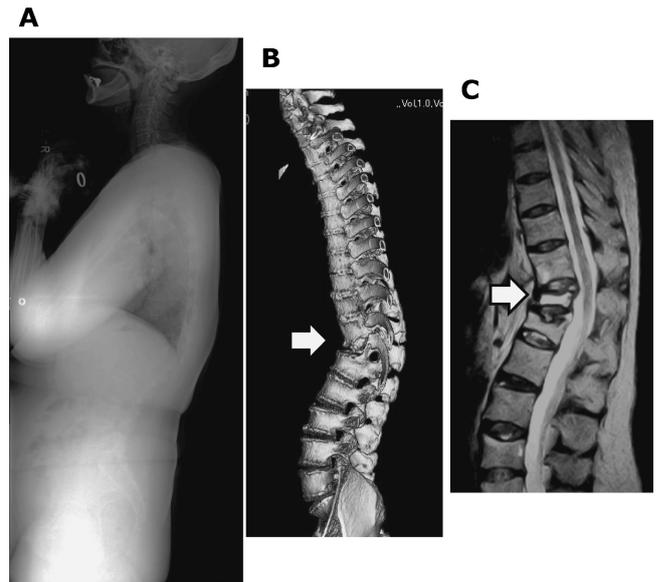


図3-1 骨粗鬆症性第12胸椎偽関節。立位側面 X 線(A)および CT 再構築画像(B)にて、胸腰椎移行部に圧迫骨折と後弯を認める。MRI T2 強調矢状断像(C)では、同部が圧潰し、偽関節となっている。

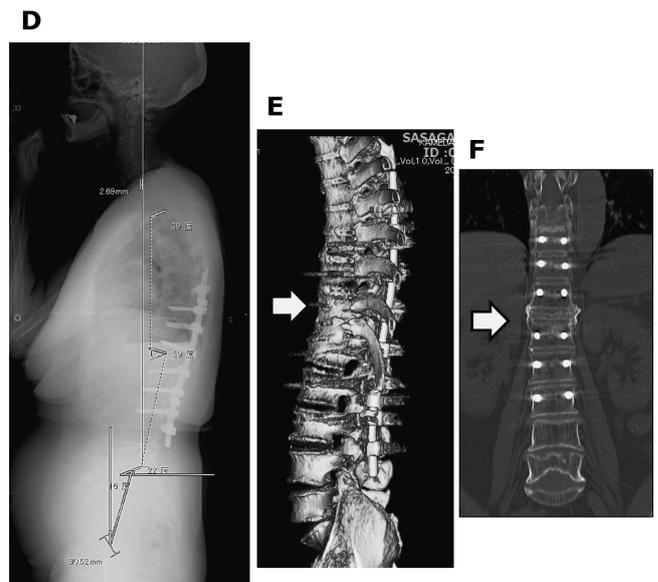


図3-2 脊柱矯正・固定術を施行し、術後3年。腰曲りや背部痛はなく、日常生活を不自由なく送っている(D)。CT 再構築画像(E, F)にて、偽関節部は骨癒合し(矢印)、インプラントは折損なく脊椎の一部となっている。

(2) 腰椎前方椎体間固定術

腰椎・腰仙椎部は、体幹の大部分の荷重を受け、かつ可動域が大きく、繰り返しのストレスを受け続けるため、腰椎椎間板ヘルニアや腰部脊柱管狭窄症などの変性疾患の好発部位である。前方手術の適応は、腰椎椎間板症など、病変部位が前方に局限し、神経圧迫症状の無い場合に行われる。椎間板の変性髄核および線維輪の一部を切除し、移植骨を充填したケージを挿入するもので、残った椎間板線維輪を緊張させ、その反力で固定力を得るのが基本的作用である⁽¹⁶⁾。

症例：58歳女性 腰椎椎間板症

数年来、ぎっくり腰を繰り返していたため受診。MRI T2矢状断像にて、L5/S 椎間板に椎間板の著しい変性を認め、腰椎椎間板症と診断(図4A)。内部に移植骨を充填するタイプの椎間ケージを用いて前方固定術を施行。術後2年、隣接する椎体間で骨癒合し、腰痛は軽減した(図4B, C, D)。

(3) 胸腰椎前方再建術

椎骨の破壊が大きい場合には、その椎体を全切除し、人工椎体またはケージ⁽¹⁷⁾で置換し、さらにスクリューシステムで補強する方法。神経圧迫が存在する場合には、圧迫原因と除去(除圧術)を併せて行う。

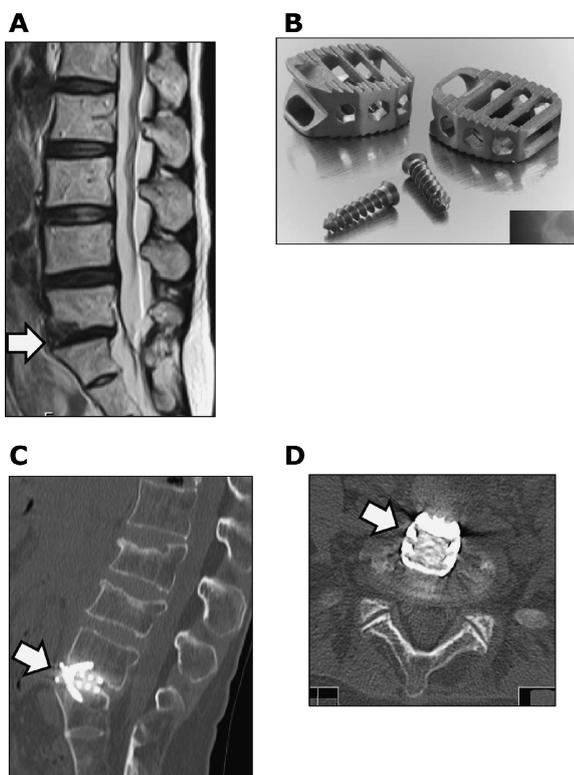


図4 腰椎椎間板障害に対する前方固定術。
58才女性、MRI T2 強調矢状断像にて、L5/S 椎間板に椎間板の著しい変性を認める(矢印A)。内部に移植骨を充填するタイプの椎間ケージ(B)を用いて前方固定術を施行。術後2年、隣接する椎体間で骨癒合し、腰痛は軽減した(C: CT矢状断像, D: CT横断像)。

症例：75歳男性 第12胸椎粉碎骨折

高所より転落して受傷。腰背部痛と両下肢のしびれのために歩行不可能。MRI T2 強調矢状断像にて第12胸椎粉碎骨折と診断(図5A)。椎体置換ケージ(図5B)を用いた前方除圧・固定術を実施した。術後2年骨癒合を得て、後遺障害なく日常生活を送っている(図5C, D)。

5. 脊椎外科インプラントのニーズ：今後の展望

脊椎に限らずあらゆるインプラントの必要条件としては、生体毒性がない、生体親和性が良い、使用法が簡便で周辺機器が少ない(ユーザーフレンドリー)、目的に応じた強度を有する、などが挙げられよう。脊椎固定術において最も多く使用されるインプラントは、椎弓根スクリューである。本スクリューは、後方から椎弓根を通して前方の椎体に刺入するものであり、その固定性は主に椎弓根部の骨皮質形状によって決まる⁽¹⁸⁾。強力な固定性を得るためには、インプラントは

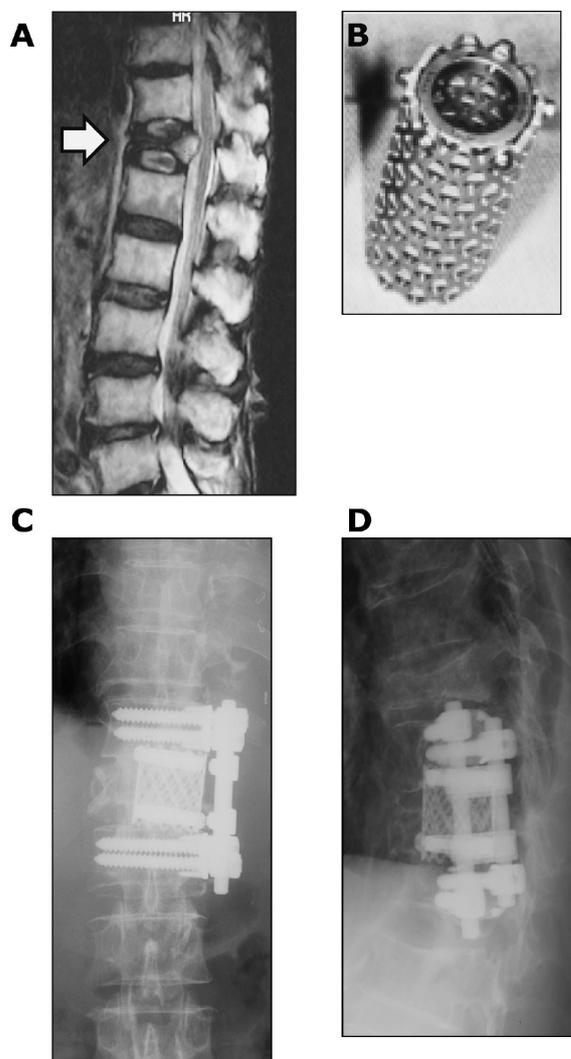


図5 胸・腰椎前方再建術。
75才男性、高所より転落して受傷。腰背部痛と両下肢のしびれのために歩行不可能。MRI T2 強調矢状断像にて第12胸椎粉碎骨折と診断(A)。椎体置換ケージ(B)を用いた前方除圧・固定術を実施し、術後2年骨癒合を得た(C, D)。

より大きな形状となる。従来の椎弓根スクリュー製品は全て欧米製品であり、もともと体格の異なる欧米人用に作られた大きな形状であった(図6A)。そのため、日本人、とくに高齢者に用いるとインプラントが突出して愁訴となることがよくあった(図6B)。したがって、我が国で使用するインプラントは、日本人の体格にあった小さな形状(low profile)が望ましい。我々は、日本人およびアジア人の体型にあった low profile なトータルスパインシステムを制作している(図7)。インプラントを小さくすれば力学的強度は低下するので、必要十分な強度を担保できる範囲内でカスタマイズすることが望まれる。

椎弓根スクリューシステムを用いた多椎間固定を行う場合、スクリューは様々な方向に刺入されるので、ロッドの連結を容易にするためにスクリューヘッドとシャフト部が自由に動く構造(ポリアキシャルスクリュー)が望ましい(図8A, B)。シャフトの形状は、刺入し易く、かつ早い、二条螺子構造が主流になりつつある(図8B)。さらに良好な脊椎配列を得るためには、ロッドを曲げなければならない。曲げるとロッド強度は落ちるので⁽¹⁹⁾、何度曲げても必要強度が担保されるような材質が望まれる。

インプラントを用いた脊椎手術は、椎間固定すなわち骨癒

合を目指すことが多い。椎間固定術の場合、インプラントの役割は骨癒合完成までの“補助”であり、骨癒合が完成しなければ、どのような強固なインプラントであろうと、いずれ破綻する(図9)。見方を変えれば、インプラントは、強いほど良いというものではなく、骨癒合完成まで破綻しなければ良いのである。したがって、インプラントの形状および力学特性は、用いる部位および術式によって異なるべきものである。

インプラントを用いれば脊柱の安定性は高まるが、どの程度の強度を獲得すれば必要かつ十分なのかは難しい問題である。あまりに固定強度が強すぎると隣接椎間の障害⁽²⁰⁾や固定範囲内での椎体骨粗鬆化が生じうる。この対策として、インプラントの連結部に可動性を持たせる術式、制動術がある(図10)⁽⁶⁾。本術式は、椎弓根スクリューにポリエチレン製バンドを連結して椎間の制動を得ようとするものである。制動される椎間には、わずかな動きが残るので、隣接椎間への負担が軽減し、椎間障害発生リスクは軽減するが(図11)⁽²¹⁾、椎間関節が保たれていることが条件であり⁽⁷⁾⁽⁸⁾、適応病態は限られる。

インプラントを用いた脊椎固定術を成功させるための必要条件の一つとして、その受け皿となる骨が健全であることが挙げられる。したがって、骨が脆弱な場合にはスクリューの

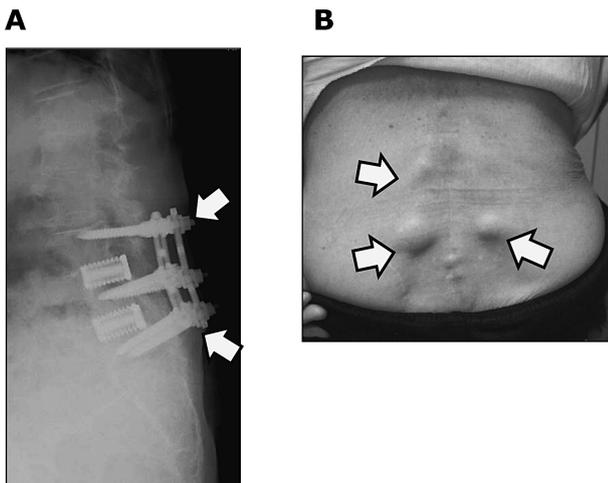


図6 従来の外国製インプラントによる腰椎固定術後14年の高齢者。



図7 手術に使用されている各社の椎弓根スクリューヘッド。A: 側面像, B: トップビュー

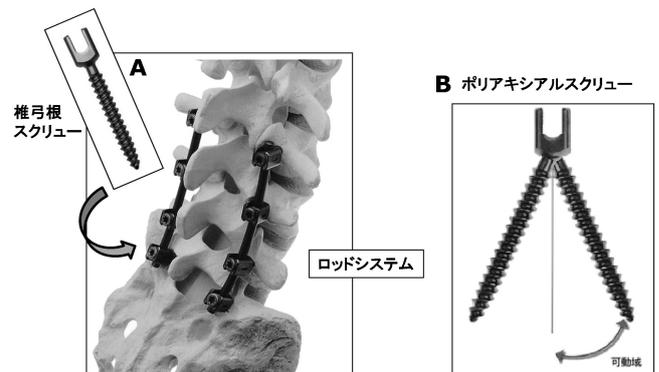


図8 椎弓根スクリューシステム。

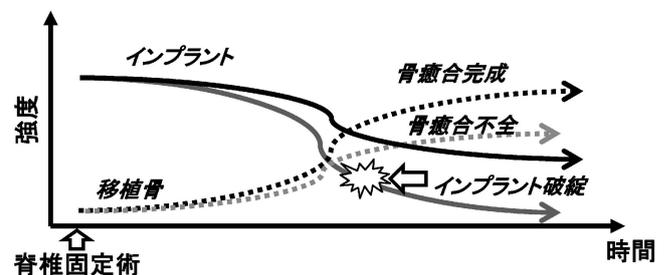


図9 インプラントを用いた脊椎固定術におけるインプラント(実践)と骨(点線)の荷重分担の経時的変化。手術直後は、インプラントが負荷を担うが、骨癒合が進むにつれて移植骨強度が高まり、インプラントの担う荷重は徐々に小さくなる。順調に骨癒合が進めば、インプラントと骨とが分担する荷重は均衡状態となり、インプラント折損は生じない(黒線)。しかし、骨癒合が順調に完成しないと(グレー線)、インプラントの強度低下するとともに、その負担が増大し、疲労限界を超えると、破綻する(矢印)。

