

# 紫外線硬化樹脂モデルを用いた股関節手術の分析とシミュレーション

提供者：国立埼玉病院臨床研究部  
逸見 治

報告に先立ちまして、伊丹先生を初め、関係者の方々に深謝申し上げたいと思います。どうもありがとうございました。

スライド、お願いします。

我々は1988年以来、三次元CT画像を用いた手術シミュレーションシステム、SurgiPlan (図1)を開発し、股関節疾患の病態解明と手術シミュレーションを行ってまいりました。

SurgiPlanは、名古屋大学情報工学部で形成外科用に開発されました、Nagoya University Craniofacial Surgical Plan-

ning System (NUCSS) というスーパーコンピュータ用のシステム (図2) を、整形外科用に、しかもワークステーション上で操作できることを目的として開発したものです。

本システムにつきましては、共同演者の泉田が平成5年の研究成果報告にて報告いたしましたでしたが、もう1度概略を説明したいと思います。SurgiPlanの機能は、二次元データ処理と三次元データ処理に分けられますが、ここでは三次元データのシミュレーション機能について述べます(表1)。

まず、三次元表示された骨片にカラーリ

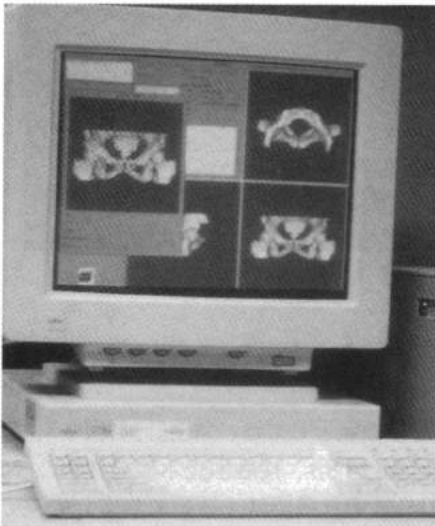


図1 Surgiplan

表1 Surgiplan

- 1) 2次元データ処理
  - a) CT画像解析
  - b) シミュレーション前処理
    - i) しきい値による分離
    - ii) 手入力による分離
- 2) 3次元データ処理 (シミュレーション実行)
  - a) 表示制御
    - i) 視点方向の設定
    - ii) グリッド (格子) 表示
    - iii) 画質指定
    - 他
  - b) シミュレーション
    - i) 骨切り
    - ii) 骨片移動
    - iii) 計測
    - iv) 属性指定

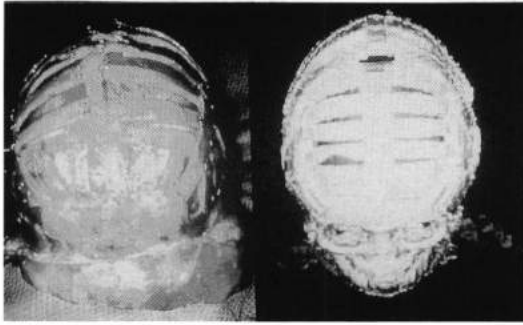


図2 Nagoya University Craniofacial Surgical Planning System(NUCSS)

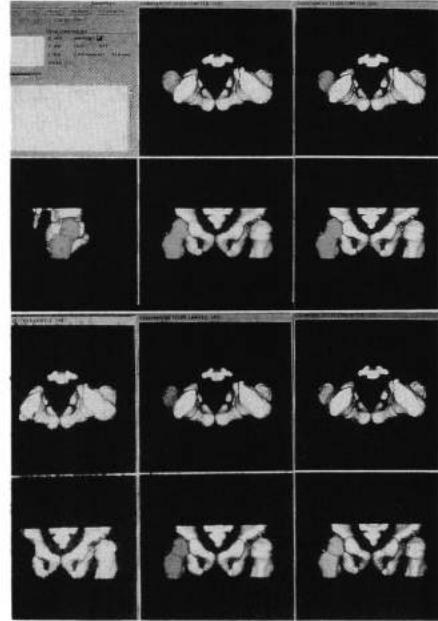


図3 色付け機能

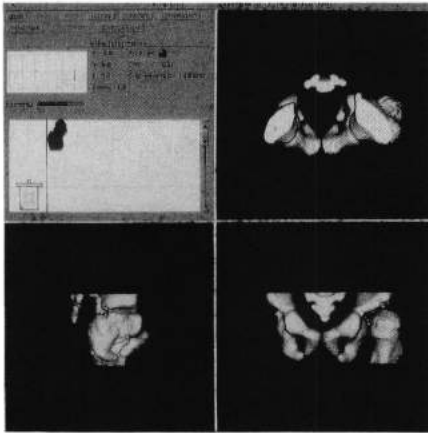


図4 非表示

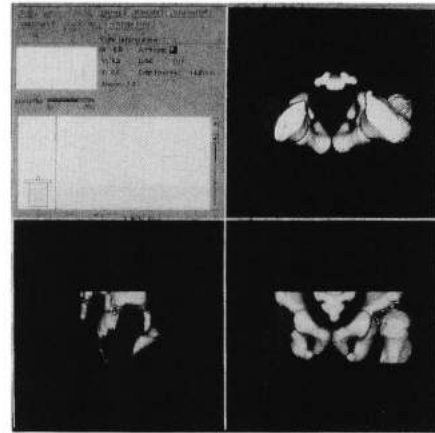


図5 表示

ングをしたり(図3)、骨片を待避させたり(図4)、再び表示させたり(図5)、また、2個の骨片を一つのグループにするグルーピング(図6)などの属性指定の機能があります。

評価機能としては、角度計測(図7)、距離計測(図8)、接触面表示機能(図9、図10)、骨切り機能は4種類ありまして、それぞれが股関節手術に必要な骨切り法を想定して開発されました(図11)。

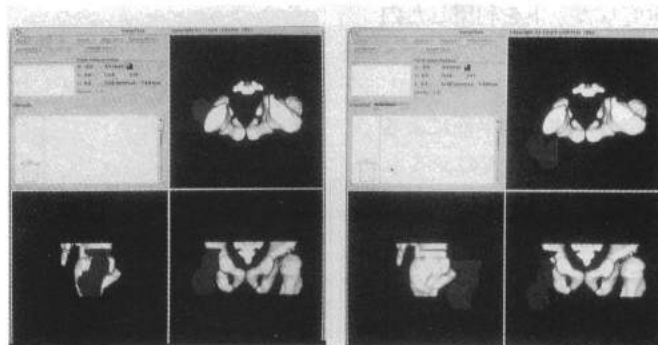


図6 グループ機能

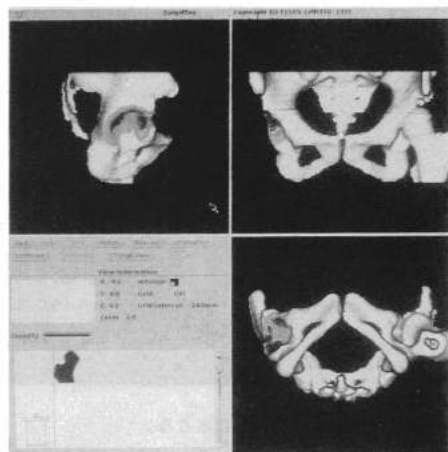
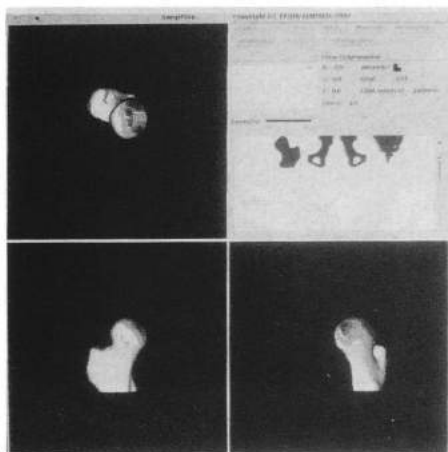
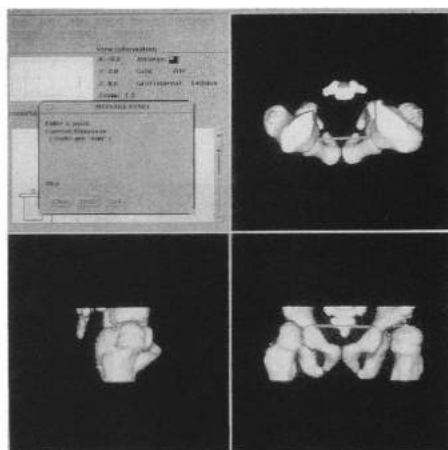
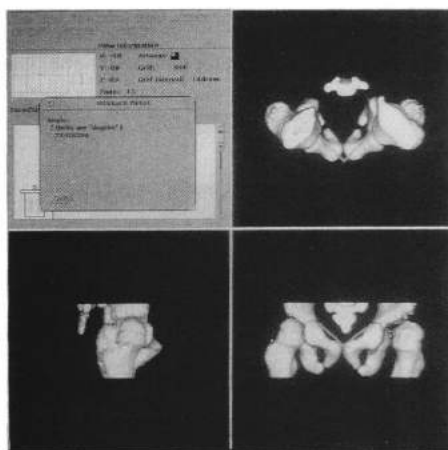


図9 接触面表示（骨頭側）

図10 接触面表示（臼蓋側）

これは画面に垂直なカットを利用した内反骨切り術のシミュレーションのスライドです(図12)。

これは3点を指定して決まる平面によるカットを利用したソルター手術のシミュレーションのスライドです(図13)。

これは骨片の表面の点列を指定してカットする方法で、ペンバートン手術のシミュレーションを行ったスライドです(図14)。

これは球の中心点と半径を指定してカットする方法で、球と骨が交わる面で骨切りを行い、RAOのシミュレーションを行ったスライドです(図15)。

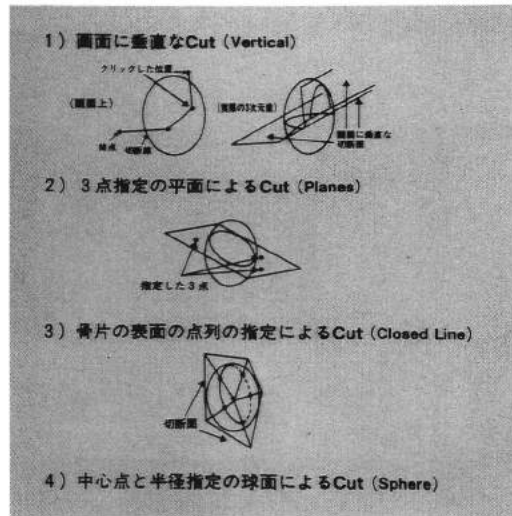


図11 骨切り法

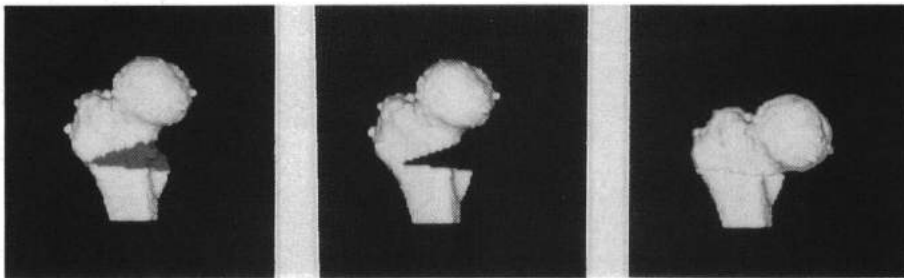
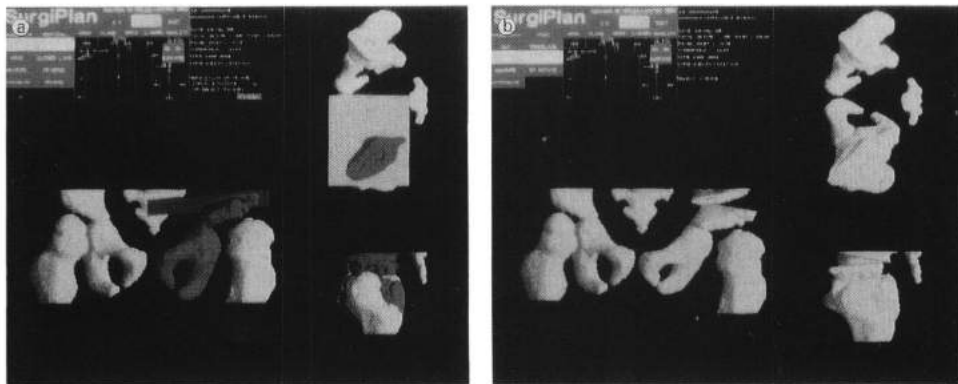


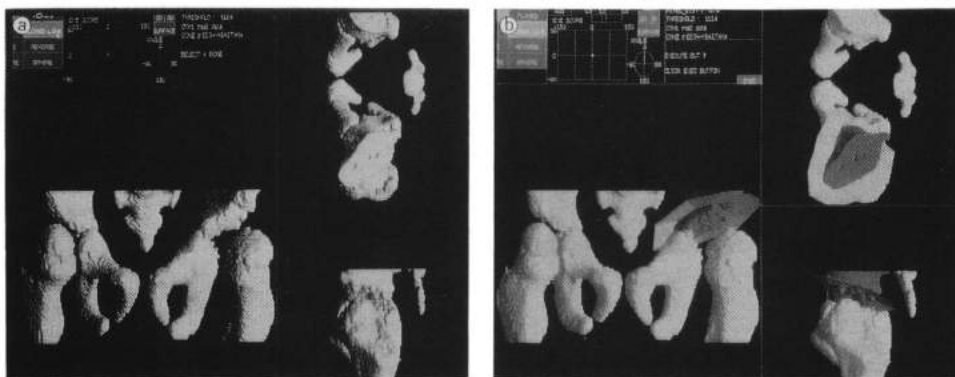
図12 内反骨切り術のシミュレーション



a. 骨切り面を入れたところ。

b. 骨切りが完成したところ。。

図13 ソルター手術のシミュレーション



a. シミュレーション前図。左側に骨頭肥大と側方位がみられる。

b. ペンバートン手術の骨切り線を入れたところ (closed line)

図14 ペンバートン手術のシミュレーション

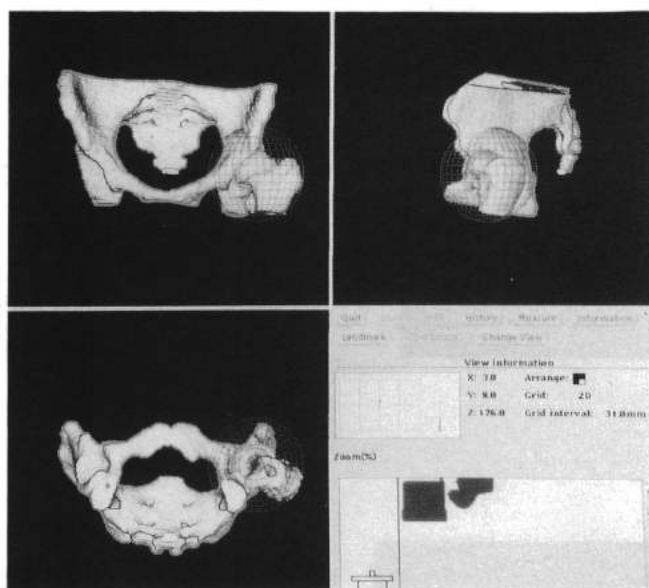


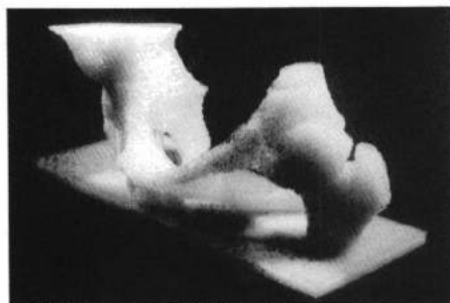
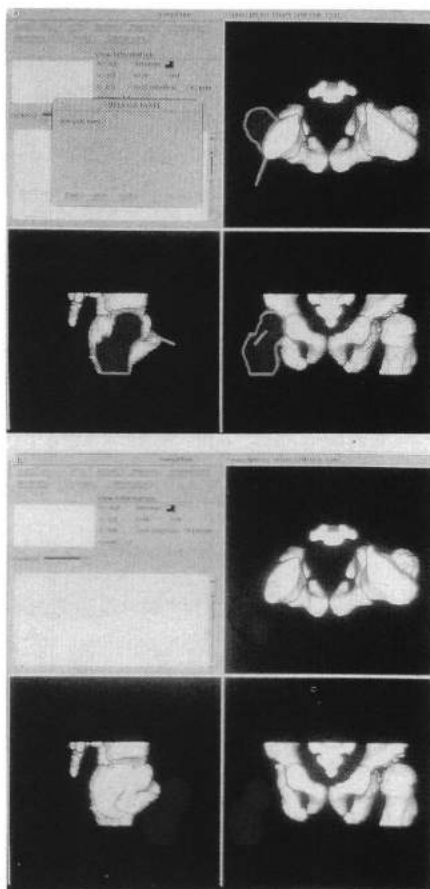
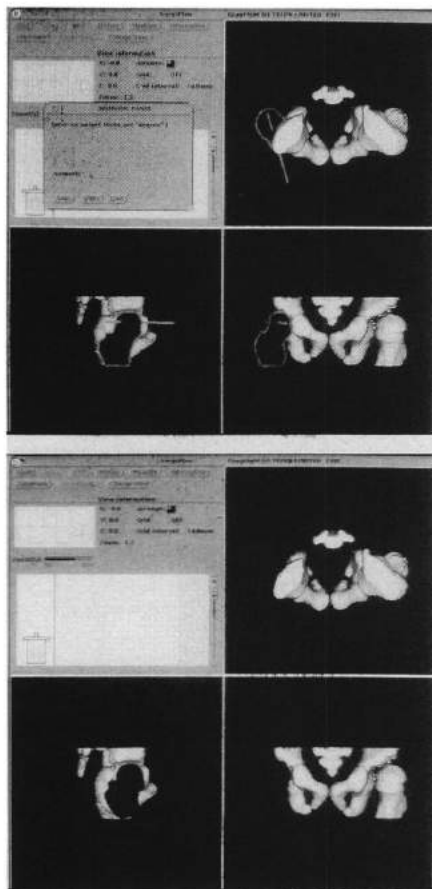
図15 RAOのシミュレーション(半径50mm)

また、骨片の移動方法には、このような回転移動(図16)と平行移動(図17)があります。

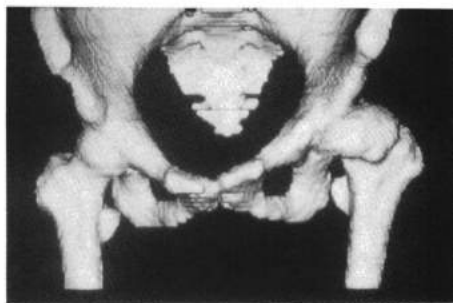
しかし、コンピュータグラフィックスを用いたこのシステムは、現実感という点で課題を残しており、我々はこの点を踏まえ、さらに1992年から紫外線硬化樹脂を用いた

モデルを作成し、手術成績の向上に努めてきました(図18)。

実体モデルの作成方法は、CTデータをSurgiPlanに読み込み、三次元画像を作成します。さらにSurgiPlan上で紫外線硬化樹脂モデル作成のための支持脚データを手入力で入力します(図19)。



紫外線硬化樹脂モデル



三次元CT画像

図18

ここにあるのが支持脚ですが(図20)、これは基板と離れた骨片が存在する場合に、モデル作成中に散逸してしまうことを防いだり、張り出しの大きい部分がモデル作成中に垂れ下がってしまうことを防ぐためのものです。

こうして作成したデータを帝人製機に送り、三次元光造形システム SOLIFORM (図21)で紫外線硬化樹脂モデルを作成しました。

モデルは紫外線レーザー光を照射することにより硬化する樹脂の薄い層を1層ずつ積み重ねることにより作成されます(図22)。紫外線硬化樹脂の液体が入ったタンク内にテーブルがありまして、一番下の第1層が紫外線レーザー光で硬化します。そうすると、スライスの厚さの分だけテーブルが下がって、そして次の第2層を硬化させます。そして、第1層の上に積み重ねるわけですがこれを順次繰り返して、積層していくわけ

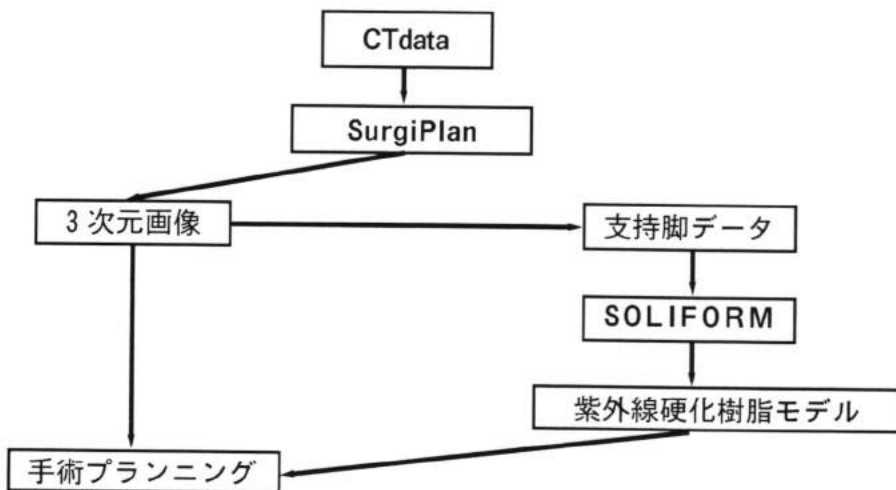


図19

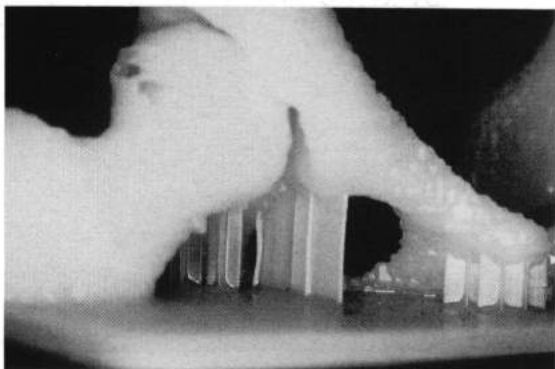


図20

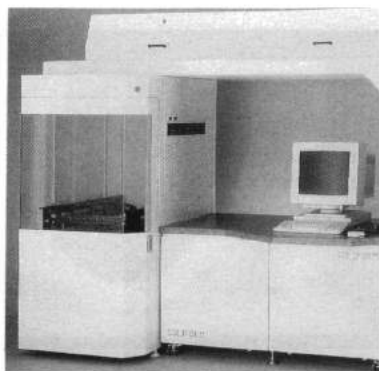


図21 SOLIFORM (帝人製機)

です。

我々が用いている紫外線硬化樹脂には2種類あり、一つはSOMOS 2100という樹脂で、黄白色で比較的柔軟で、カッターなどで切ることも可能です(図23)。

もう一つは、SOMOS 3100という樹脂で、ごらんのように、透明で、非常に堅いのですが、切ったりすることは不可能です(図24)。

初期には二つの素材で作成していましたが、現在は柔軟な方のSOMOS 2100で作成しております。

対象及び方法。対象は全例女性で19例です。年齢は3歳から47歳まで、平均18.8歳でした。施行した手術は寛骨臼回転骨切り術単独が11例、寛骨臼回転骨切り術と大転子下降術との併用が2例、ペンバートン手術が4例、ソルター手術が1例、キアリ手術が1例です。

CTの撮影は、成人の場合、股関節高位を1.5ミリ、あるいは2ミリスライスで、それ以外の部分は3ミリスライスで連続的に行いました。

小児の場合は2ミリスライスで撮影しま

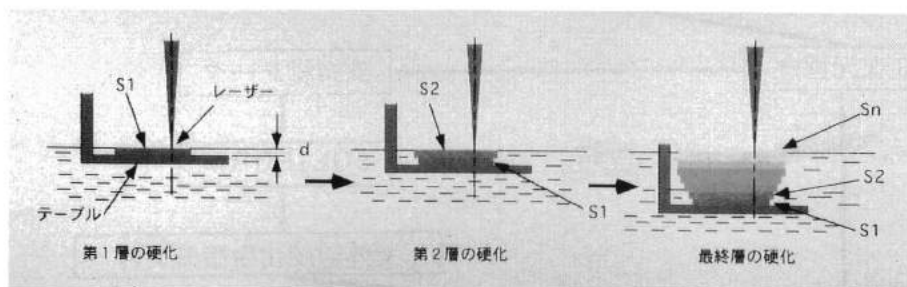


図22 光造形のプロセス

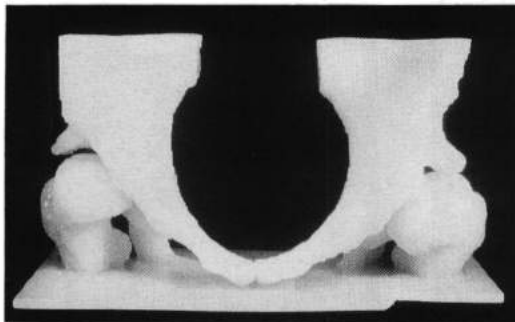


図23 SOMOS 2100

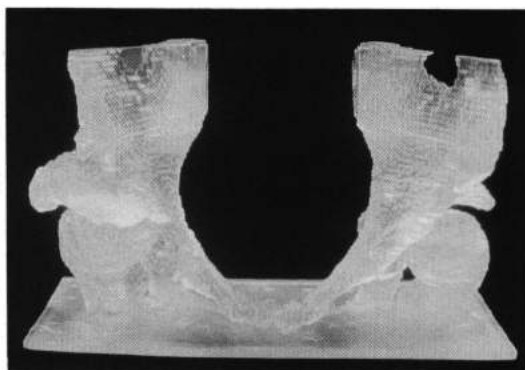


図24 SOMOS 3100



した。

方法は、SurgiPlan で三次元画像を作成し、ワークステーション上でシミュレーションを行うとともに、紫外線硬化樹脂モデルを作成し、病態の分析と術前プランニングを行い、実際の手術に際しては、モデルを滅菌して術野に持ち込み、手術の成績の安定化を図りました。

代表的症例を供覧します(図25)。症例は19歳の女性で、左先天性股関節脱臼で、乳児期に他医でギプス固定を受けており、平

成5年8月ごろより左股関節痛が出現し、同年9月受診しました。単純X線では、左臼蓋形成不全と骨頭の偏平化、頸部の短縮を認め、CE角は2度、AHIは54%でした。臨床的に可動域制限が少なく、機能撮影、関節造影にて適合性が悪くないことから、寛骨臼回転骨切り術の適応を考慮し、三次元CTを撮影しました(図26)。

三次元CTでは、単純X線像に比べて、臼蓋による骨頭前外側の被覆が不良であることが明らかであり、SurgiPlan の接触面



症 例 19歳. 女性  
主 訴 左股関節痛  
現病歴 左先天性股関節脱臼にて乳児期にギプス固定された。  
平成5年8月頃より左股関節痛出現。  
平成5年9月受診。

図25

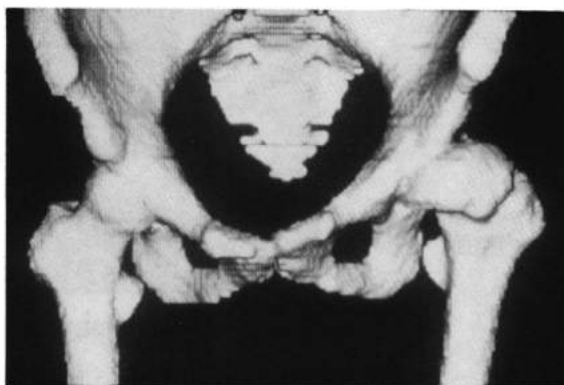


図26 三次元CT画像

表示機能を用いると、さらに被覆不良状態は明瞭でした(図27)。

光硬化樹脂モデルでは、骨頭は完全な球状ではなく、前外側が欠損した状態であることが判明しました。また、実際に骨頭を外転屈曲させると、骨頭と寛骨臼の適合性は良好でした(図28)。

次に、寛骨臼回転骨切り術のシミュレーション用に開発された骨切りコマンド“sphere”を用いて、骨切りのシミュレーションを行いました。田川式彎曲ノミの曲率半径と同じ半径50mmで骨切りを行うと、骨切りの球の中心を骨頭中心よりも若干前

方にしないと坐骨柱が薄くなってしまうことがわかりました(図29)。

骨切りされた寛骨臼骨片を大腿骨頭とともに前外方へ30度回転させると良好な被覆が得られました。このとき、寛骨臼骨片の移動距離を骨切り面で計測すると、前方へ10mm、外側へ25mmでした(図30)。

平成6年2月、寛骨臼回転骨切り術を施行しましたが、この症例ではモデルを滅菌して術野に持ち込み、可能な限り予定した骨切り線通りに骨切りする様務めました(図31)。

術後単純X線像では、C E角は35度、A



上面



正面



内側面

図27 接触面表示

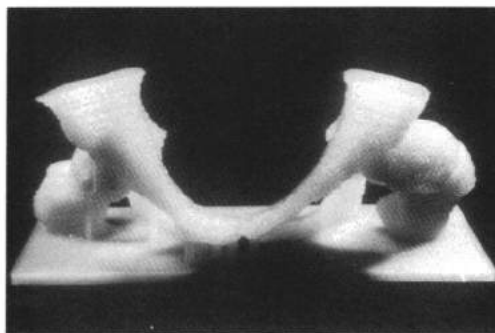
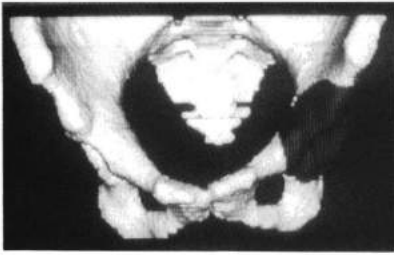
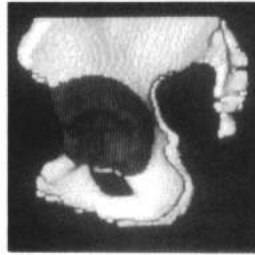


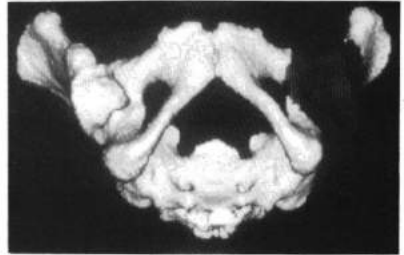
図28 紫外線硬化樹脂モデル



正面

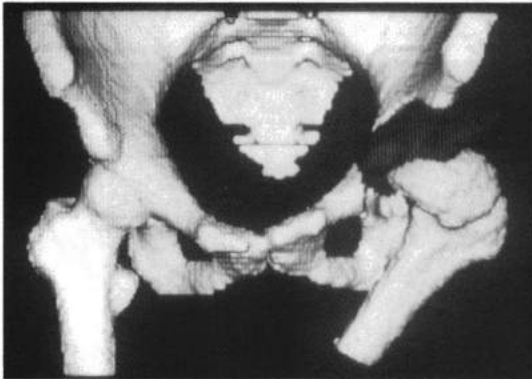


左側面

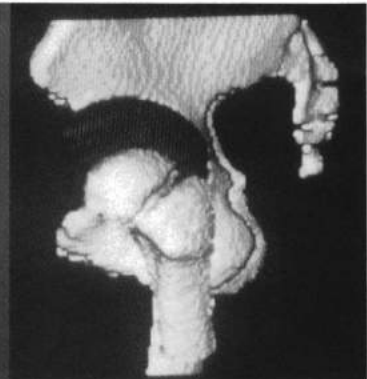


底面

図29 骨切りシミュレーション(1)



正面



左側面

図29 骨切りシミュレーション(2)

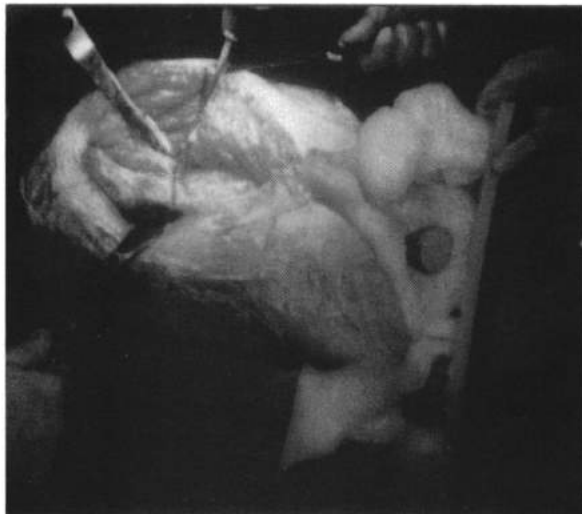


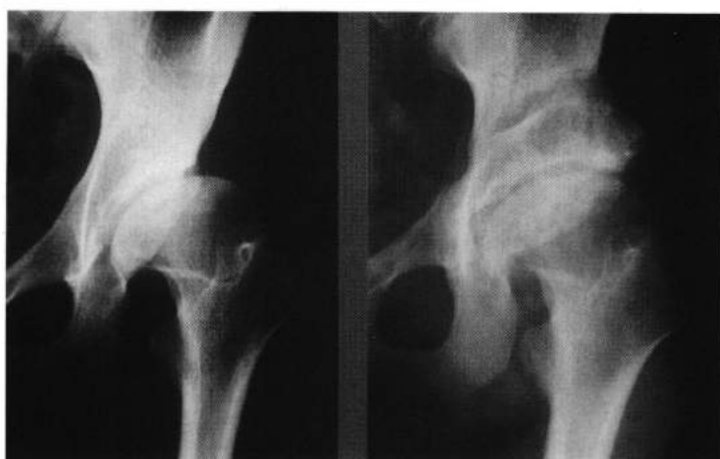
図31 術中写真

HIは81%と良好な被覆が得られており、また適合性も良好で、ほぼ術前プランニングどおりの結果が得られたと考えています(図32)。

症例2は4歳の女児で、健診で左側の先天性股関節脱臼を見過ごされ、2歳2カ月時に家族が跛行に気づき、初めて先天性股関節脱臼と診断されました。約1カ月間、over head tractionを施行した後、全身麻酔下に徒手整復を行い、経過観察を行いました。

単純X線では、左大腿骨頭は亜脱臼位にあり、左の臼蓋は形成不全を呈しており、CE角は0度でした。三次元CTでも健側では大腿骨頭が寛骨臼の中にしっかり保持されているのに比べ、患側の骨頭は側方に約5mmに偏位しており、大腿骨頭を外すと、患側の寛骨臼は健側に比し、広く浅く、荷重部の外側は二重になっていました(図33、34)。

実体モデルでは、寛骨臼は全周にわたり形成不全を呈しており、骨頭は前外方に亜



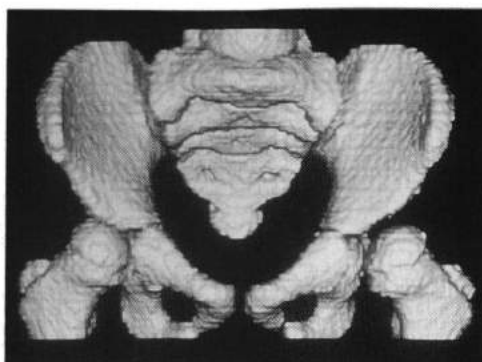
術前

術後

図32



単純X線像



三次元CT像

図33

脱臼していることがわかりました(図35)。

次に、SurgiPlan 上で骨切りのシミュレーションを行いました。まず、大腿骨を待避させ、ペンバートン手術のシミュレーション用に開発した骨切りシミュレシ

ョン法の一つであるclosed line を用いて腸骨の内壁と外壁に骨切りのポイントを順次マーキングし、臼蓋骨片を切り取りました(図36, 37)。

次に、大腿骨を再度画像内に表示し、臼



図34 三次元CT画像

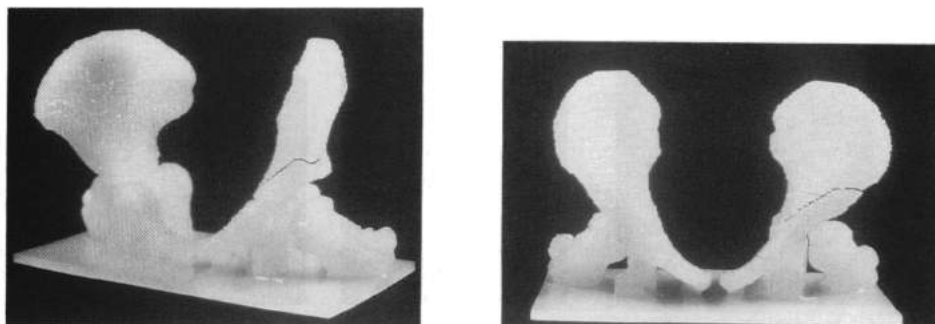


図35 紫外線硬化樹脂モデル

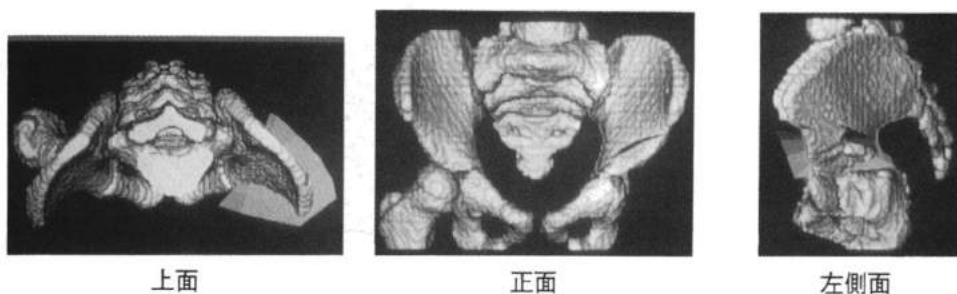
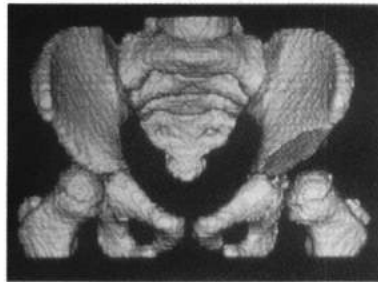


図36 骨切りシミュレーション(1)

蓋骨片と大腿骨を同時に動かせるようにグルーピングし、Y軟骨を軸として、臼蓋骨片を30度前外側へ回転させると、C/E角が正常値以上の30度となりました(図38)。このとき、骨切り部での移動距離を計測すると、約20mmでした(図39)。

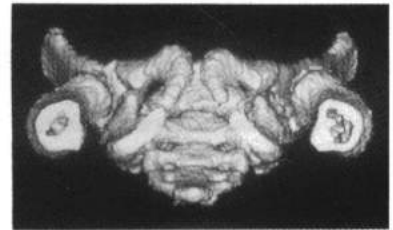
平成5年3月、次いでペンバートン手術を行いました。手術中はモデルを滅菌処理して術野に持ち込み、モデルにあらかじめ書き込んだ予定骨切り線を参考に、できるだけこれに忠実に腸骨の骨切りを行いました。腸骨骨片の移動は術後のロスを見込ん



正面



左側面



底面

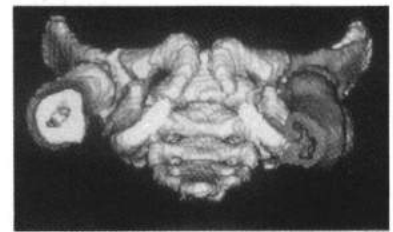
図37 骨切りシミュレーション(2)



正面



左側面



底面

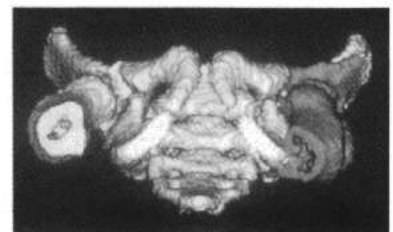
図38 骨切りシミュレーション(3)



正面

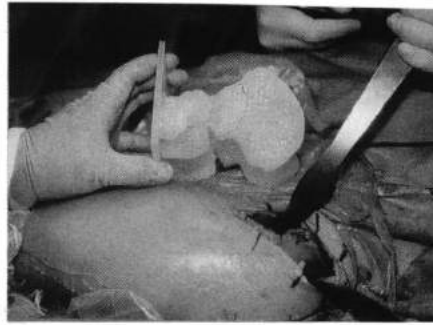


左側面



底面

図39 骨切りシミュレーション(4)



側面

図40 術中写真

正面



術前



術後

図41

で23mmの幅の三角形の骨片を挿入し、2本のKirshnerワイヤーで固定しました(図40)。

術後の単純X線ではC E角は32度と改善し、臼蓋の被覆は良好で、関節の適合性も改善しました(図41)。

結果及び考察：我々はこれまで三次元CT画像を用いて、股関節手術の術前プランニングを行ってきましたが、三次元CT画像はいわゆる三次元的二次元画像であるために、立体感という点で不満がありました。写真の立体感を考えていただければすぐわかると思います。この点を補うために、

我々は1992年より、紫外線硬化樹脂モデルを併用し始めました。

三次元CTによるシミュレーションの利点は、納得がいくまで繰り返し作業が行なえること、各種計測評価機能を用いて定性的及び定量的評価が可能なこと。一方、モデルは、立体感がコンピュータグラフィックスに比べてはるかに優れているために、グラフィックスでは気付かない変形や不適合性などがよくわかることです(表2)。例えば実際的な問題としては、RAOを行う場合、寛骨臼の後下縁と坐骨陥凹部との

表2 三次元CT画像 (SurgiPlan)と紫外線硬化樹脂モデルの比較

	三次元CT画像 (SurgiPlan)	紫外線硬化樹脂モデル
長所	繰り返しシミュレーションが可能 各種計測評価機能がある	立体感に優れる 術野に持ち込める
短所	立体感に問題がある	シミュレーションを 行うとすれば1回のみ



図42

距離に比較的個人差が大きく、ここが小さい場合には骨切りに注意を要することがわかりました。このことは単純X線ではもちろん、単純CT、さらには三次元CTでもわかりにくく、モデルで初めて観察されたことでした(図42)。

また、実体モデルを術野に持ち込むことによって、より術前プランに忠実な手術が可能となり、安全性、手術成績に向上に寄与すると考えます。三次元CTと実体モデルそれぞれの利点は相補うものであり、三次元CTとモデルの両者を用いることにより、相乗効果が得られると考えています(表2)。

また、我々は小児の骨盤骨切り術にもこの手法を応用しましたが、三次元CTと実

体モデルの利点は成人と同様でした。しかし、小児の場合、成人に比して関節軟骨が厚く、また、小児の骨盤骨切り手術は骨や軟骨のたわみを利用するため、骨の情報で作成される三次元CTや樹脂モデルの応用は、成人例に比しやや困難と思われる点も見受けられました。このことは今後も検討していかなければならないと考えています。

また、モデル作成上の問題点として、分離したはずの骨片同士が癒着する場合があること、モデル表面形状が粗造であること、モデル作成までに時間がかかってしまうことや、コストの問題などが挙げられます。また、シミュレーション上の問題として、実際の手術器具を用いて、光硬化樹脂の素材を切ることがやや困難なことなど、なお



改善すべき点を残しております。モデル作成上の問題については、モデルの表面を平滑にするためのソフトの改良を帝人製機と検討中であります。また、関節内の観察などができなくなってしまうますが、モデル完成までの時間短縮のために、分離をせずにモデルを作成することも開始しています。モデルの作成のコストについては、需要と供給の関係、企業努力、あるいは患者負担が受けられるかどうかなどの問題があって、簡単には解決できない問題であります、逆にモデルの利点である現実感をコンピュータグラフィックスの中に仮想現実感、すなわちバーチャリアリティという形で解決していこうという試みも既に始めております。

**まとめ** 三次元CTと紫外線硬化樹脂モデルを用いて、股関節手術の分析とシミュレーションを行いました。三次元CTと紫外線硬化樹脂モデルのそれぞれの利点は相互補完的であり、両者を用いることにより、安全かつ確実な手術が可能でした。

小児の場合、成人に比して骨成分が少なく、骨の情報で作成される三次元CTや樹脂モデルの応用は成人例に比しやや困難と思われる点が見受けられました。紫外線硬化樹脂モデルは、作成に要するコスト、精度等になお解決すべき問題を残しておりますが、有用な手法であり、今後も検討を続けていきたいと考えています。今後も諸先生方のご指導、ご鞭撻を賜りたいと存じます。どうもありがとうございました。

【伊丹】ただいまの発表に質疑、ご討論はございませんでしょうか。

だんだんとリサーチレベルから臨床レベルへと近づいてはいつているようですけれども、もう少しみんなが気軽にシミュレーションを使えるようになる時代が早く来ることを望んでいます。

どうもありがとうございました。

これで助成金によります研究成果報告を終わりたいと思います。どうもありがとうございました。