

— 総説 —

4次元超音波（4D）による胎児行動の観察

香川大学医学部母子科学講座周産期学婦人科学

秦 利之

概 要

最新の3次元超音波診断装置では、胎児が立体像のまま子宮内で動く様子をまるでビデオを見ているかのようにほぼリアルタイムに、しかも鮮明に観察することができるようになってきた。最新の3次元超音波は毎秒20～28枚の画像を表示することができ、いわゆる4次元超音波（リアルタイム3DあるいはLIVE 3D）と言われる装置である。子宮内の胎児行動（動き）を観察することによって得られる最大のメリットは、ヒトにとって最も重要な臓器である脳と中枢神経系の機能と発達の過程を直接観察そして正確に評価できることである。本稿では4次元超音波（4D）を用いた子宮内における胎児行動の観察の現状と展望について述べることにする。

はじめに

子宮内の胎児行動（動き）を観察することによって得られる最大のメリットは、ヒトにとって最も重要な臓器である脳と中枢神経系の機能と発達の過程を直接観察そして評価できることである¹⁾。従来、2次元超音波を用いた胎児行動の観察の報告は認められていたが、最も大きな問題点はモニター上に表示されている2次元平面の胎児の動きは評価できるが、その平面外の胎児の動きはまったく評価できないという点であった²⁾。つまり、2次元超音波では多くの胎児の動きが見逃されていることになり、正確に胎児行動を評価できていないことが生じている可能性が指摘されていた。胎児をリアルタイムに3次元で観察することができれば（4次元超音波を用いれば）、子宮内の胎児行動（動き）を正確に評価可能であり、ひいては胎児の脳

と中枢神経系の機能と発達の過程を直接観察そして評価できると考えられる。

最新の3次元超音波診断装置では、胎児が立体像のまま子宮内で動く様子をまるでビデオを見ているかのようにほぼリアルタイムに、しかも鮮明に観察することができるようになってきた。最新の3次元超音波（GE 横河 730 Expert）では毎秒4～6枚、最大1秒間に25枚の画像を表示することができ、最も新しい3次元超音波（Philips SONOS 7500）では毎秒20～28枚の画像を表示することができるようになってきている（いわゆる4次元超音波と言われる装置である）。

過去10年間、胎児の健全な発達を評価するための手段としての胎児行動学に関する研究は、2次元超音波を用いることによる大きな制約のためほとんど脚光を浴びなかった³⁾。4次元超音波を用いれば、簡単に妊娠第1三半期および第2三半前期では胎児の全身像を観察することが可能であり、また妊娠第2三半期後期および第3三半期では顔などの全体像を観察でき、ヒトにとって最も重要な臓器である脳と中枢神経系の機能と発達の過程を直接評価できる。

1. 妊娠前半期における胎動の観察

妊娠前半期の胎児中枢神経系の発達において、胎児の神経反射は頭を横に曲げる単純な動きから、上肢、下肢、躯幹などの複雑な動きへと変化してゆく⁴⁾。例えば、口の開閉は妊娠10週ぐらいから、嚥下反射は妊娠12週ぐらいから、嘔吐反射は妊娠18週ぐらいから観察されるようになる⁵⁾。妊娠20週以前の胎児の反射は中脳、脳幹下部、脊髄によって制御されていると推測されている⁶⁾。2次元超音

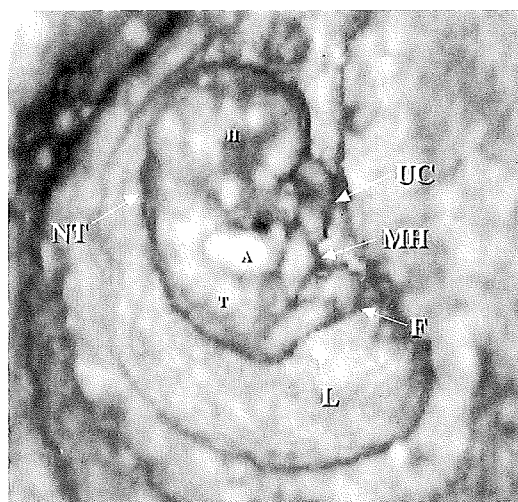


図1 妊娠9週6日の胎児3次元超音波像。

A: 上肢、F: 足、A: 頭、L: 下肢、MH: 生理的臍帯ヘルニア、NT: nuchal translucency、T: 駆幹、UC: 臍帯。

表1 妊娠初期の胎芽および胎児の動きの観察

妊娠週数	n	Gross body movements	Limb movements	Complex limb movements
7 - 8 週	31	12 (38.7 %)	0 (0 %)	0 (0 %)
9 - 10 週	26	11 (42.3 %)	7 (26.9 %)	0 (0 %)
11 - 12 週	19	16 (84.2 %)	12 (63.1 %)	8 (42.1 %)

(Kurjak A, et al. J Perinat Med 2002 ; 30 : 57-62¹³⁾ より一部改変)

波を用いた妊娠前半期の胎動の観察に関する報告はいくつかある^{7~10)}。胎児は母体が胎動を自覚するだいぶ前から活発に動いており¹¹⁾、妊娠8~10週頃よりもう全身の動きが観察されている¹²⁾。

Kurjak et al.¹³⁾ は4次元超音波(彼らの論文にはデータの取込み時間は記載されていないのではっきりとは言えないが、使用された装置から推測すると通常毎秒4~6枚の画像表示で行われたものと思われ、正確に言えばダイナミック3Dであろう)を用い、妊娠6~12週の胎芽および胎児の動きの観察を行い(図1)、3つの胎動のパターンを報告している。7~8週頃より大きな駆幹運動が認めら

れはじめ、10週より四肢の運動、11週以降に複雑な四肢の動きが観察されるようになってくる(表1)。さらに、4次元超音波を用いると駆幹および四肢の動きは2次元超音波よりも1週間早く観察できると述べている。

我々は妊娠14週から18週の胎児を対象として4次元超音波(正確に言えばダイナミック3D)を用い60分間胎児行動の観察を行い、その行動パターンを評価した¹⁴⁾。60分間の観察時間の内、11例の胎児はすべて同様の行動パターンを示し、最も頻繁に認められた行動は腕の運動であり、最も少なく観察されたのは口の動きであった(図2)。また、

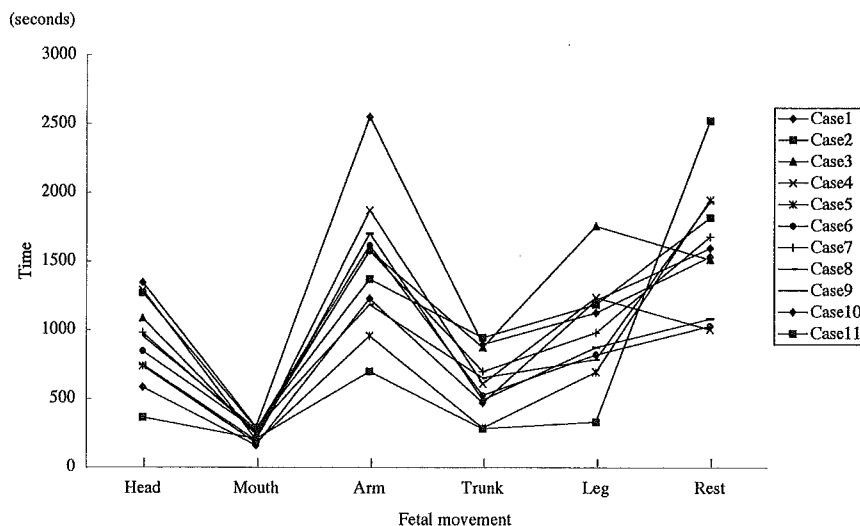


図2 それぞれの胎児における胎児行動パターン
(Kuno et al., J Ultrasound Med, 2001 ; 20 : 1271-1275 より引用¹⁴⁾)

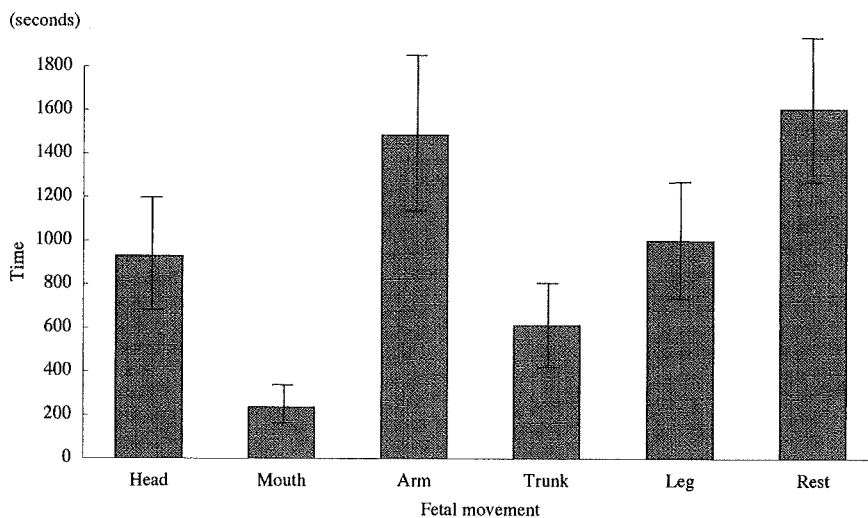


図3 観察期間中に認められたそれぞれの胎動の平均時間
(Kuno et al., J Ultrasound Med, 2001 ; 20 : 1271-1275 より引用¹⁴⁾)

それぞれの胎児の動きは他の動きと同期かつ同調して生じていることが明らかとなった。それぞれの動きの平均時間は、頭部の動きが 929 ± 310 秒、口の動きが 235 ± 47 秒、腕の運動が 1484 ± 493 秒、駆幹の運動が 612 ± 228 秒、下肢の運動が 1000 ± 368 秒であった (図3)。観察期間中に占める活動期

(胎動の認められる期間)が 59.4%、休止期が 40.6%であった。しかし、使用した4次元超音波診断装置の画像取込み時間は約1~2秒であり速い胎児の動きや微妙な胎児の動きを捕らえることができない点、以前として偽リアルタイム像である点など、改良すべき問題点が残されていた。

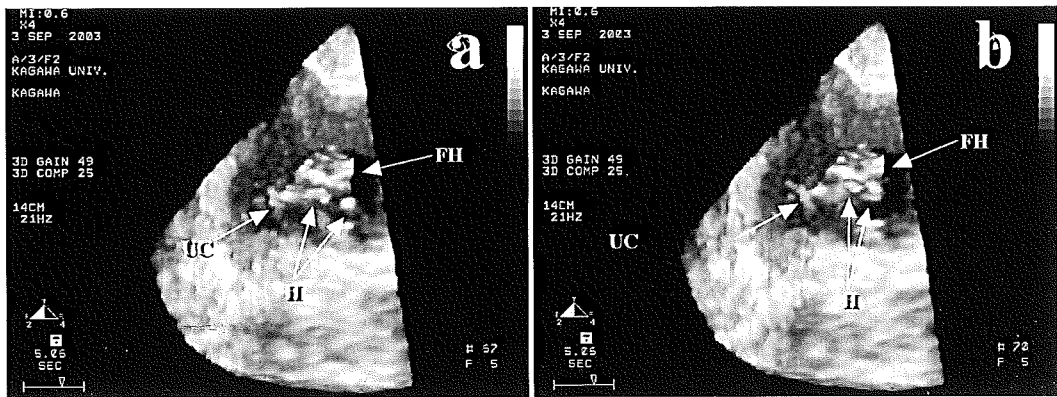


図4 4次元超音波による妊娠13週胎児の胎動の観察

まるで“かくれんぼ”をするかのように顔の前で両手を合わせる胎児の行動が、リアルタイムに観察できる(a→b)。画像表示は1秒間に21枚である。FH: 頭、H: 腕、UC: 臍帯。

図4は最新の4次元超音波診断装置(Philips SONOS 7500)を用い、毎秒21枚の画像表示を行った妊娠13週の胎児4次元超音波像である。まるで“かくれんぼ”をするかのように顔の前で両手を合わせる胎児の行動が、リアルタイムに観察できる。経腹法であるので解像力にやや劣るが、妊娠初期の胎児が子宮内で動く様子を生き生きと観察することが可能となってきた。今後、妊娠前半期における胎動の再評価が、胎児行動学の分野における大きな研究テーマとなつてゆくことが期待される。

2. 妊娠後半期における胎動の観察

妊婦は妊娠16～20週頃に胎動を自覚するようになってくる。妊婦の胎動の自覚は子宮内の胎児のwell-beingの評価にとって重要である。胎動の減少は胎児が危険な状態に陥っていることを示すサインの一つであることは周知の事実である¹⁵⁾。2次元超音波を用いた妊娠後半期の胎動の観察に関する報告は数多くなされている^{16,17)}。

3次元超音波を用いた胎動の観察に関する報告は、1998年、我々が妊娠33週胎児の開口運動を観察したものが最初である¹⁸⁾。しかし、使用した3次元超音波診断装置の画像取込み時間は約5秒であり、非常にゆっくりした口の動き(たぶん胎児のあくびのような動き)を捉えたものであった。1999年、Kozuma et al.¹⁹⁾は妊娠24週から35週の

胎児を対象として4次元超音波(画像の取込み時間が約1秒であるので正確に言えばダイナミック3D)を用い5分間胎児の顔の観察を行い、その口の動きについて検討している。その結果、観察した67例の正常胎児のうち13例(19.4%)にさまざまな口の動きが認められたことを報告している。4次元超音波はその後さらに進化し、毎秒4～6枚の画像を表示することができるようになり、従来の2次元超音波で観察できた胎児のあくび、指しゃぶり、嚥下運動に加えて、笑い顔(smiling)、泣き顔(crying)、瞬き(eyelid movement)も同定できるようになってきた^{3), 20)}。Kurjak et al.²¹⁾は同機種種の4次元超音波(正確に言えばダイナミック3D)を用い、妊娠30～33週の胎児の顔の観察を行い、その表情について検討している。彼らによると、4次元超音波を用いることにより胎児の顔の表情を容易に観察することができ、またさまざまな種類の顔の表情を同定することが可能であったと報告している。特に、笑い顔(smiling)としかめつら(scowling)の鑑別が容易であったとしている。また、妊娠30～33週では喉と口が同時に動く運動が優位に観察され、反対に口のみ動きは有意に頻度が少ないことを明らかにしている。

最新の4次元超音波(Philips SONOS 7500)では毎秒20～28枚の画像を表示することができるようになってきており(これがリアルタイム3次元



図5 4次元超音波による正常胎児の頭部の回転および伸展の連続運動 (a→i)
 画像表示は1秒間に20枚である。(Philips Medical Systems より提供)

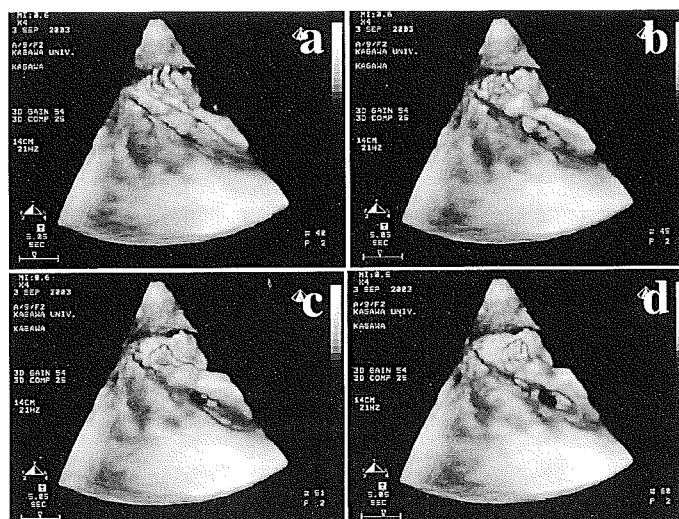


図6 4次元超音波による妊娠23週胎児の手指および腕の運動 (a→d)
 画像表示は1秒間に21枚である。

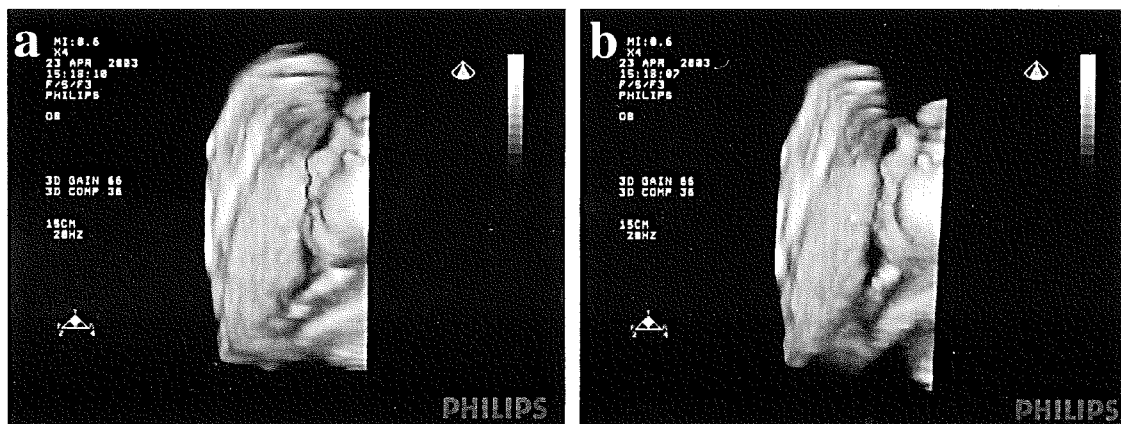


図7 4次元超音波による胎児の笑い顔（smiling）（a→b）
 画像表示は1秒間に20枚である。（Philips Medical Systems より提供）

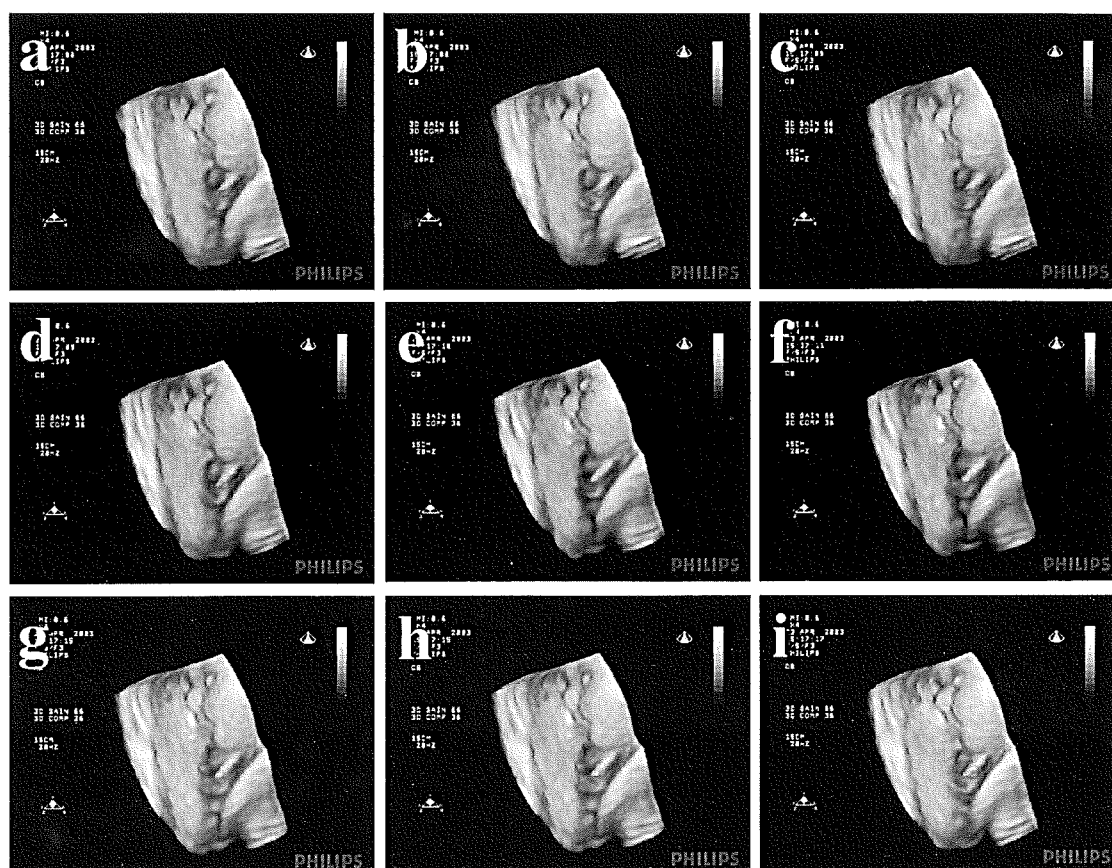


図8 4次元超音波による胎児の眼球運動の観察（eye movement）（a→i）
 画像表示は1秒間に20枚である。（Philips Medical Systems より提供）

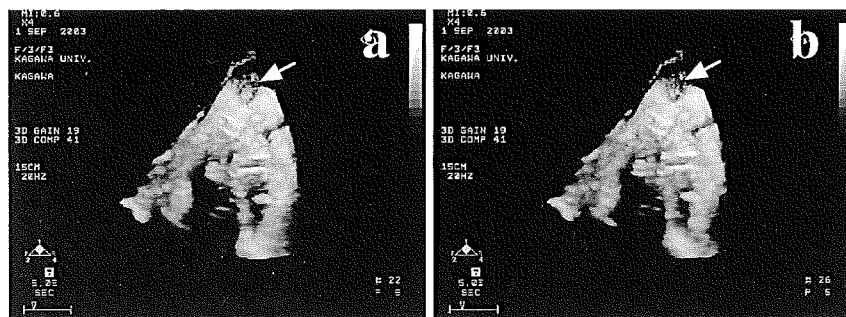


図9 4次元超音波による妊娠38週胎児の瞬き (eyelid movement) (矢印) (a→b)
画像表示は1秒間に20枚である。



図10 4次元超音波による胎児のあくびの観察 (yawning) (a→i)
画像表示は1秒間に20枚である。(Philips Medical Systemsより提供)

超音波、真の4次元超音波と言われる装置である)、
妊娠後半期の胎児が子宮内で動く様子、あるいは
顔の表情をリアルタイムに観察することができる

(図5－図10)。我々が妊娠20～38週の正常胎児
17例を対象として行った検討では、瞬きが3例
(17.6%)に観察され、1例では2回連続した瞬き

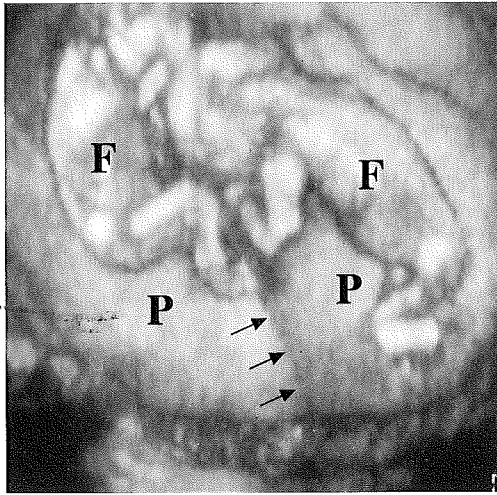


図 11 妊娠 15 週の 2 絨毛膜 2 羊膜性双胎妊娠の 3 次元超音波像

子宮内の胎児の接触の様子が明瞭に描出されている。また、2つの胎盤の境界(矢印)もはっきりと同定できる。F:胎児、P:胎盤。

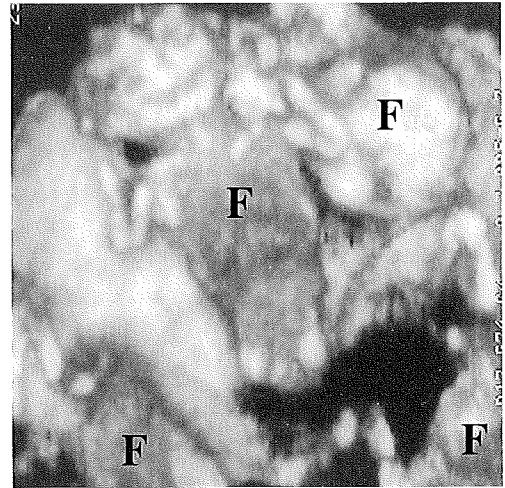


図 12 妊娠 16 週の 4 胎妊娠の 3 次元超音波像
子宮内の胎児の接触の様子が明瞭に描出されている。
F:胎児。

が認められた。また、17 例中 9 例 (52.9%) で、さまざまな口の動きが観察された。さらに、3 例 (17.6%) で舌を突き出したり、舌打ちするような動きが認められ、その際舌状体も同定できた。今後、4次元超音波を用いた妊娠後半期における胎児行動、特に顔の表情などの再評価が必要となってくるものと思われる。

3. 多胎妊娠における inter-human contacts の観察

ヒトにとって肉体的な接触 (physical contact) は、神経学的そして精神的な発達、ひいては人生の質、ゆたかさにとって重要である。双胎妊娠はヒトが子宮内において初めて肉体的な接触を持つという現象を観察できる格好のモデルである²²⁾。Arabin et al.²³⁾ の 2 次元超音波を用いた妊娠前半期の双胎妊娠の観察によると、一方の胎児が刺激 (肉体的な接触) すると他方の胎児がそれに呼応してしばしば反応することを報告している。これは胎児の皮膚にある感覚受容体の機能が存在することを示しており、また感覚システムと運動システム

がどこかですでに連結していることを示唆するものである²¹⁾。さらに、双胎妊娠では胎児間の接触が子宮内における刺激の大部分を占めており、これはまた胎児の子宮内環境の一部であり、将来の胎児の発達に大きな影響を及ぼす可能性のあることを示している。しかしながら、単胎妊娠と同様に 2 次元超音波を用いた場合、双胎妊娠においてもモニター上に表示されている 2 次元平面の胎児間の接触は評価できるが、その平面外の胎児間の接触はまったく評価できないという制限が生じてくる。4次元超音波を用いればこの問題も一挙に解決することができる。

3次元超音波を用いた双胎妊娠における胎児間の接触の観察に関する報告は、1998年、我々が妊娠 9～36 週の 13 例の多胎妊娠の子宮内の様子を観察したものが最初である²⁴⁾。しかし、使用した 3次元超音波診断装置の画像取込み時間は約 5 秒であり、非常にゆっくりとした胎児間の接触を捉えたものであった (図 11、図 12)。しかしながら、そのような制約があるにもかかわらずさまざまな胎児間の接触の様子を観察することが可能であっ

た。今後、4次元超音波を用いると子宮内の双胎妊娠の胎児間の接触の詳細な観察ができるようになり、胎児の神経学的そして精神的な発達の解明に大きく役立つことが期待される。

おわりに

4次元超音波を用いた胎児行動に関する研究は、胎児の健全な発育（胎児の well-being）を評価できる可能性を持っており、また脳の機能を評価することによって子宮内における今後の胎児の正常な発達の予測も可能となってくることが予想される。これは観察時点での胎児の状態の評価ばかりでなく、その後の脳の正常な発達の予測そして出生後の児の予後の評価にもつながる可能性を秘めている。つまり、正常胎児ばかりでなく子宮内胎児発育遅延あるいは胎児ジストレスなどの胎児の脳の機能評価そして出生後の児の予後の評価にもつながる可能性があり、ひいては子宮内における胎児治療の発見につながる可能性があり大きな意義があると確信している。

文 献

- 1) Hepper PG. Fetal behavior: why so sceptical? *Ultrasound Obstet Gynecol* 1996 ; 8 : 145-148.
- 2) Jorgensen NP, Marsal K, Lindstrom K. Quantification of fetal motor activity in early pregnancy. *Eur J Obstet Gynecol Reprod Biol* 1989 ; 30 : 11-18.
- 3) Campbell S. 4D, or not 4D : that is the question. *Ultrasound Obstet Gynecol* 2002 ; 19 : 1-4.
- 4) Hooker D. *The Origin of Overt Behavior*. Ann Arbor, MI : University of Michigan ; 1944.
- 5) Tuck SM. Ultrasound monitoring of fetal behaviour. *Ultrasound Med Biol* 1986 ; 12 : 307-317.
- 6) Humphrey T. Function of the nervous system during prenatal life. In: Uwe S (ed): *Perinatal Physiology*. New York, NY : Plenum ; 1978 : 751-796.
- 7) Shawker TH, Schuette WH, Whitehouse W, Rifka SM. Early fetal movement : a real-time ultrasound study. *Obstet Gynecol* 1980 ; 55 : 194-198.
- 8) de Vries JIP, Visser GHA, Prechtl HFR. The emergence of fetal behaviour I. Qualitative aspects. *Early Hum Dev* 1982 ; 7 : 301-322.
- 9) de Vries JIP, Visser GHA, Prechtl HFR. The emergence of fetal behaviour II. Quantitative aspects. *Early Hum Dev* 1985 ; 12 : 99-120.
- 10) Goldstein I, Zimmer EA, Tamir A, Peretz BA, Paldi E. Evaluation of normal gestational sac growth: Appearance of embryonic heartbeat and embryo body movements using the transvaginal technique. *Obstet Gynecol* 1991 ; 77 : 885-888.
- 11) Jorgensen NP, Marsal K, Lindstrom K. Quantification of fetal motor activity in early pregnancy. *Eur J Obstet Gynecol* 1989 ; 30 : 11-18.
- 12) Sival DA. Studies on fetal motor behaviour in normal and complicated pregnancies. *Early Hum Dev* 1993 ; 34 : 13-20.
- 13) Kurjak A, Veccek N, Hafner T, Bozek T, Funduk-Kurjak B, Ujevic B. Prenatal diagnosis : what does four-dimensional ultrasound add? *J Perinat Med* 2002 ; 30 : 57-62.
- 14) Kuno A, Akiyama M, Yamashiro C, Tanaka H, Yanagihara T, Hata T. Three-dimensional sonographic assessment of fetal behavior in the early second trimester of pregnancy. *J Ultrasound Med* 2001 ; 20 : 1271-1275.
- 15) Herman U Jr, During P, Amato M, Sidtopoulos D, Schneider H. Outcome of fetuses with abnormal biophysical profile. *Gynecol Obstet Invest* 1989 ; 27 : 122-125.
- 16) Roodenburg PJ, Wladimiroff JW, van Es A, Prechtl HFR. Classification and quantitative aspects of fetal movements during the second half of normal pregnancy. *Early Hum Dev* 1991 ; 25 : 19-35.
- 17) Arabin B, Riedewald S. An attempt to quantify characteristics of behavioral s. *Am J Perinatol* 1992 ; 9 : 115-119.
- 18) Hata T, Yonehara T, Aoki S, Manabe A, Hata K, Miyazaki K. Three-dimensional sonographic visualization of the fetal face. *Am J Roentgenol* 1998 ; 170 : 481-3.
- 19) Kozuma S, Baba K, Okai T, Taketani Y. Dynamic observation of the fetal face by three-dimensional ultrasound. *Ultrasound Obstet Gynecol* 1999 ; 13 : 283-284.
- 20) Azumendi G, Kurjak A. Three-dimensional and four-dimensional sonography in the study of the fetal

- face. *Ultrasound Rev Obstet Gynecol* 2003 ; 3 : 160-169.
- 21) Kurjak A, Azumendi G, Vecsek N, Kupesic S, Solak M, Varga D, Chervenak F. Fetal hand movements and facial expression in normal pregnancy studied by four-dimensional sonography. *J Perinat Med* 2003 ; 31 : 496-508.
- 22) Arabin B, Gembruch U, van Eyck J. Intrauterine behavior. In : Keith LG, Papiernik E, Keith DM, Luke B (eds) : *Multiple Pregnancy - Epidemiology, Gestation & Perinatal Outcome*. Carnforth, UK : Parthenon Publishing ; 1995 : 331-349.
- 23) Arabin B, Bos R, Rijlaarsdam R, Mohnhaupt A, van Eyke J. The onset of inter-human contacts: longitudinal ultrasound observations in early twin pregnancies. *Ultrasound Obstet Gynecol* 1996;8:166-173.
- 24) Hata T, Aoki S, Miyazaki K, Iwanari O, Sawada K, Tagashira T. Three-dimensional ultrasonographic visualization of multiple pregnancy. *Gynecol Obstet Invest* 1998 ; 46 : 26-30.