フルカラー生体連続断面画像からの自動組織抽出法の検討 - ウマ卵巣内部の可視化の試み -

竹本 智子^{*}⁺, 横田 秀夫⁺, 平野 悠子[§], 中村 佐紀子⁺, 木村 順平[#] 南保 泰雄⁺, 津曲 茂久[#], 三宅 陽一[§], 姫野 龍太郎^{*}⁺, 三島 健稔^{*}⁺

*埼玉大学大学院 理工学研究科 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255

*独立行政法人 理化学研究所 生体力学シミュレーション特別研究ユニット 埼玉県和光市広沢2 - 1

> [#]日本大学生物資源科学部 獣医学科 神奈川県藤沢市亀井野 1866

⁺JRA 日高育成牧場 北海道浦河郡浦河町字西舎 535-13

> [§] 带広畜産大学 獣医学科 北海道帯広市稲田町西 2-11

e-mail: satoko@me.ics.saitama-u.ac.jp

1. はじめに

生体の三次元立体像を構築して内部構造を可視化する研究が近年さかんに行われている.三次元立体像では生体組織の自由な視点からの観察や,組織別の表示,さらにそれらの体積や角度等の計測が容易であり,生体内部構造の解明に極めて有用である.三次元立体像の構築には,まず生体内部の情報を画像として取得する必要がある. 一般には X線 CT (Computed Tomography)やMRI(Magnetic Resonance Imaging)などからの画像が用いられるが,空間分解能や取得方法の性質上の問題から撮影することが出来ない組織もある.例えば軟組織は X線や核磁気に反応しないために撮影が難しかった.そこで近年,生体内のフルカラー連続断面画像が入手可能である3次元内部構造顕微鏡(以下 3D-ISM)^(1~2)が開発された.従来の画像取得装置による画像は解像度がミリオーダーであったのに対し,この装置はミクロンオーダーの精度で画像を取得出来る.また,破壊検査ではあるが生体の色情報を取得することが可能であるため,フルカラーの高精細な生体三次元立体像の構築が期待出来る.

画像からの各組織領域の抽出は,三次元立体像の構築に必要な処理である.現在, 3D-ISM で取得した画像からの領域抽出は,解剖学的知識をもつ専門家が手作業で行っている⁽³⁾.しかしながら,3D-ISM 画像は枚数が最大一万枚,約十億ボクセルにの ぼるため,全てを手作業で行うことは現実的ではない.実際,一組織の抽出にも数週 間を要しており,自動化のための技術が強く望まれている. 著者らは現在,ウマ卵巣の内部構造を明らかにする研究⁽⁴⁾を行っている.ウマの卵 巣は他の哺乳類と比べ,特異的な構造をしている.通常,哺乳類の卵巣内は主に皮質 と髄質に分けられ,内側を血管が配置する髄質,その外側を卵胞および黄体が配置す る皮質が覆っているが,ウマだけは皮髄質の位置が逆転していることが知られている ⁽⁵⁾.しかしながら,ウマの卵巣は他の哺乳類と比較し大型で組織学的手法での卵巣内 部の観察が困難であるため,これまで内部構造の理解が難しく卵胞の発生やその配置, 成長の様子等が不明であった.

そこで 3D-ISM から取得したウマ卵巣のフルカラー連続断面画像を用いて,コンピ ュータ内にウマ卵巣の三次元立体像を構築し,卵巣内構造物の空間配置を可視化する ことを試みる.これにより卵巣内構造物の形状やそれらの空間配置を提示することが 出来ると考える.特に本稿ではウマ卵巣内部の構造物で最も重要とされる卵胞に注目 し,その自動抽出手法についての検討を行った.以下では,まず 3D-ISM でのウマ卵 巣の断面画像取得について述べる.その後,今回検討した抽出手法について説明し, 最後にその結果を示す.

2.3D-ISM によるウマ卵巣のフルカラー連続断面画像取得

3D-ISM は生体試料のフルカラー連続断面画像を自動的に取得出来る装置である. この装置は凍結包埋した試料を最小約10µmの薄さで切削し,その断面を CCD カメ ラで上部から撮影する.切削断面そのものを撮影するため取得した画像間の位置合わ せが不要である.

実験には 10%ホルマリン溶液にて固定後,OCT コンパウンド(サクラファインテック(株))で凍結包埋したウマの卵巣を用いる.それを 3D-ISM にて 30µm ごとに切削して 1900 枚の断面画像を入手した.ウマ卵巣の写真を図1,取得した断面画像の一部を図2に示す.各画像のX,Y方向分解能はそれぞれ 188µm,Z方向分解能は 30µm である.

図3は取得した卵巣の断面画像の一枚において,卵胞と血管の位置を示したもので ある.卵胞は図中の(0)で示した排卵窩と呼ばれる管から一つずつ排卵すると言わ れている.専門家の予想では,これらの卵胞は排卵窩に対して放射状に配置している とされるが,この断面画像からはその様子を伺い知ることは出来ない.これに対し, 卵胞領域の抽出後に構築出来る卵巣の三次元立体像では,卵巣外側を半透明にして卵 胞のみを表示することなどが可能であり,空間配置理解の一助になることが期待出来 る.

3D-ISM 画像からの領域抽出は,高精細なフルカラー画像であることで情報が冗長 になり,X線CT 画像やMRI 画像などのグレースケール画像よりも難しくなるケース が多い.さらに,今回対象とした卵胞には,周囲の皮質と色が酷似していて境界が明 確ではないものや,他の卵胞と密接して存在するものがある.また,同一卵胞でも位 置により色が異なる.卵巣内部にはこのような卵胞が多数存在しており,それらの大 きさは数 pix.から数万 pix と様々である.本研究で用いた画像には 55 個の卵胞が存在 していた.当然のことながら,これらの卵胞を一意的な閾値で抽出することは不可能 であった.



図 1. ウマ卵巣 (巻頭カラーFig.1 にも掲載)



図 3. 卵巣断面画像のうちの1枚 F: Follicle (卵胞) V: Vessel (血管) O: Ovulation Fossa(排卵窩) (巻頭カラーFig. 2 にも掲載)





Section=1050



1200





1500



1650

図 2. 3 次元内部構造顕微鏡によるウマ卵巣の断面画像(一部抜粋) (X,Y 方向分解能 188 µ m, Z 方向分解能 30 µ m)

3. 各卵胞に対する領域抽出

本手法は()各卵胞の開始・終了断面,()抽出処理の開始領域とする教師断面,()計算領域サイズ,()閾値移動パラメータの設定を必要とする.()は図4に示すように、No.1からNo.55までの卵胞の存在断面No.を専門家が指定した. ()の教師断面 M_n は,各卵胞の開始・終了断面のほぼ中央とし,卵胞領域を専門家が指定した(図5).その後, M_n に隣接する断面では自動的に領域抽出を行う.卵胞は領域の分離・結合・穴の発生がないトポロジカルな性質が保存される組織である. そのため M_n から M_{start} までと, M_n から M_{end} までそれぞれ一回ずつの処理により領域抽出が完了する.このとき M_n 以外の断面では,それに隣接する断面での抽出結果を開始領域として利用する.

各断面では,開始領域境界上の各画素*P*_iを中心とする局所的な計算領域*W*_iにおいて, 卵胞領域内と領域外を判別する(図6).このとき()の計算領域サイズは各断面で の卵胞の面積によって変化させた.また,計算領域*W*_iでの領域判別終了後は隣接する *W*_{i+1}で判別を行う.最終的に全ての計算領域での判別が終わった時点で,それまでの 判別結果を集計し,その結果に基づいて現断面での卵胞領域を抽出する.以下から各 計算領域内での判別基準について述べる.

・ 判別基準

領域判別に有効と考えられる特徴量には画像の色情報,テクスチャ特徴,明るさの情報などが挙げられるが,ここでは色情報に注目する.デジタル画像で用いられる RGB 表色系は R,G,B それぞれの色ベクトルの相関が強く,領域分割や色の分析には不向きとされている⁽⁶⁾.一方,HSV 表色系は人間の判断基準に近い色表現であり各色ベクトルの相関の問題もない.そこで卵胞領域とそれ以外の領域の判別には,RGB 表色系から HSV 表色系に変換した画素値を特徴量として用いた.

また,HSV 表色系による画素値を特徴量として用いることの妥当性について,ベ イズ誤り確率を用いて検証した.ベイズ誤り確率とは特徴空間上での「異なるクラ スの分布の重なり度合い」を意味し,理論的には以下の枠組みで定式化される⁽⁷⁾.

識別する*K*個のクラスを $C = \{C_k\}_{k=1}^{K}$,識別対象を計測して得られた特徴ベクトルの 空間(特徴空間)を $X = \{x \in R^D\}$ で表す.*D*は特徴空間の次元数である.ここで識別 対象がクラス C_k に属している確率(事前確率) $P(C_k) (\sum_{k=1}^{K} P(C_k) = 1)$ と,条件付 き確率密度分布 $p(x|C_k) (\int p(x|C_k)dx = 1)$ が事前に確率統計的知識として得られる 場合を考える.まず,事後確率 $P(C_k|x)$ は次のベイズ公式で計算される.

$$P(C_k \mid x) = \frac{P(C_k)p(x \mid C_k)}{p(x)}, \qquad \sum_{k=1}^{K} P(C_k \mid x) = 1$$
(3.1)

但し,

$$p(x) = \sum_{k=1}^{K} P(C_k) p(x \mid C_k), \qquad \int p(x) dx = 1$$
(3.2)

はxの確率密度分布である.さて,ここで特徴ベクトルxに基づき対象がどのクラス に属するかを決定する関数(決定関数)をd(x)で表し,クラス C_k の対象をクラス C_i に決定したときの損失を $r(C_i | C_k)$ で表すと,損失の期待値(平均損失)は,

$$R[d] = \sum_{k=1}^{K} \int r(d(x) | C_k) P(C_k | x) p(x) dx$$
(3.3)

で表すことが出来る.これを最小とする決定関数 d(x)を求めるのがベイズ決定理論である.誤った識別に対して均等な損失を与える場合は損失関数が,

$$\cdot (C_k \mid C_j) = 1 - \delta_{jk} \tag{3.4}$$

で与えられ,これを最小とする識別関数は

$$d(x) = C_k \quad if \quad P(C_k \mid x) = \max_i P(C_j \mid x) \tag{3.5}$$

となる.これは事後確率が最大となるクラスに決定する識別方式であり,これによる 最小の誤識別確率 R_{Rove}は,

$$R_{Bayes} = 1 - \sum_{x} P(x) \max_{j} P(C_j \mid x) dx$$
(3.6)

で表される.式(3.6)では各クラスの重なりが大きいほど右辺の第二項が小さくなるため, *R_{Bayes}が大きいほど間違ってクラスを識別する可能性が高いことを意味する*.

以上の考えに基づき,卵胞領域とそれ以外の領域の判別に関して,画素のH(Hue: 色相),S(Saturation:色彩),V(Value:明るさ)値それぞれを特徴量としたときの評価を行った.評価対象は図7の断面画像において,卵胞の境界上の画素 $P_i(1 \le i \le 164)$ を中心とする各計算領域 $W_i(1 \le i \le 164)$ (ここでは19×19 pix.)とする.専門家により予め判別した卵胞領域の情報を利用し,H,S,V値それぞれのベイズ誤り確率を求め図8に示した.この結果からH値だけ誤り確率が高いことがわかる.つまり,H値は卵胞領域とそれ以外で色の重なりが大きく特徴量として不適当であると言える.またS,V値は両領域での色の重なりが少ない.評価を行った計算領域は十分小さいため,その内部では卵胞領域の占める割合とそれ以外が占める割合がほぼ同じである.これらのことから計算領域内でのS,V値の濃度ヒストグラムは,卵胞領域とそれ以外の違いが明確に現れる双峰性であると考えられ,領域判別はそれらのヒストグラムの谷を発見することと等価となる.





図 4 専門家が提示した卵胞の存在断面

図 5 抽出処理の開始断面(*M_{start}*)と終了断 面(*M_{end}*),及び専門家による教師設定 断面(*M_n*)



図 6 各卵胞における開始領域境界上の 画素 *P_i*,及び計算領域 *W_i*



図 7 ベイズ誤り確率の評価を行った 卵胞の拡大図,及び注目画素 P_iを 中心とした計算領域 W_i (但し1≤i≤164)



図8 注目画素 P_i(図7)を中心とする計算領域 W_iにおけるベイズ誤り確率.
 評価は HSV 表色系による画素値について実施.
 (但し1≤i≤164)

・ 判別手法

各計算領域内での S, V値による濃度ヒストグラムで, 卵胞領域とそれ以外を明確 に識別する閾値を決定する手法には,自動閾値選定法(判別分析法)⁽⁸⁾を利用した. これは,背景とパターン領域に関するクラス内分散とクラス間分散の比が最大になる ように閾値を決定する手法である.

各画素が区間[1,*L*]の範囲の濃淡値*g*をもつようなグレースケール画像を考えたとき, 画像の濃淡値分布はヒストグラム $\{h(g)|g=1,...,L\}$ で与えられる.これを全画素数 $N = \sum_{g=1}^{L} h(g)$ で正規化し,その正規化ヒストグラムを $\{p(g) = h(g)/N\}$ とする.今, 閾値 *k*によって各画素を2つのクラス $C_1 \ge C_2$ (対象領域と背景)に分類することを 考える.ここで C_1 は濃淡値が[1,...,k]の範囲, C_2 は[k+1,...,L]の範囲にある画素の集 合であるとすると,各クラスの生起確率はそれぞれ,

$$\omega_1(k) = \sum_{g=1}^k p(g)$$
, $\omega_2(k) = \sum_{g=k+1}^L p(g)$ (3.7)

で表される.また,各クラスの平均レベルは次式で表される.

$$\overline{g_1}(k) = \sum_{g=1}^k gp(g) / \omega_1(k) , \quad \overline{g}_2(k) = \sum_{g=k+1}^L gp(g) / \omega_2(k)$$
(3.8)

このとき各クラスの分散はそれぞれ,

$$\sigma_1^2(k) = \sum_{g=1}^k \left(g - \overline{g_1}(k) \right)^2 p(g) / \omega_1(k) , \quad \sigma_2^2(k) = \sum_{g=k+1}^L \left(g - \overline{g_2}(k) \right)^2 p(g) / \omega_2(k)$$
(3.9)

となる.一方,全平均および全分散は

$$\overline{g}_T = \sum_{g=1}^k gp(g) = \sum_{j=1,2} \omega_j(k) \overline{g_j}(k)$$
(3.10)

$$\sigma_T^2 = \sum_{g=1}^{L} \left(g - \overline{g}_T \right)^2 p(g) = \sigma_W^2(k) + \sigma_B^2(K)$$
(3.11)

となる.ここで,

$$\sigma_W^2(k) = \sum_{j=1,2} \omega_j(k) \sigma_j^2(k)$$
(3.12)

$$\sigma_B^2(k) = \sum_{j=1,2} \omega_j(k) (\overline{g_j}(k) - \overline{g_T})^2$$
(3.13)

はそれぞれ,平均クラス内分散および平均クラス間分散である.ヒストグラムから最 適な閾値を選択する際には,

$$\eta(k) = \sigma_B^2(k) / \sigma_T^2 \tag{3.14}$$

で設定されるη(k)を最大とする閾値 k^{*}を求めればよい.これはまた,2値化して得られる画像ともとの画像の平均2乗誤差を最小とすることと等価となるため,最小2乗 基準を用いていることにもなる⁽⁹⁾.

本研究では各計算領域で特徴量 S, V 値それぞれについて上記の計算を実行し, 卵 胞領域とそれ以外を判別する閾値とした.また,各卵胞の開始・終了断面付近では卵 胞とその周囲の皮質の色が特に酷似していたため,濃度分布ヒストグラムに双峰性が 見られず分布の歪みがみられることがある.そのときは

 $T^* = \overline{g}(1 - \lambda) + k^* \lambda, \quad (0 \le \lambda \le 1)$ (3.15)

による閾値を利用した.これにより,ヒストグラムに明確な双峰性が見られない場合 でも最適閾値を決定することが出来る⁽¹⁰⁾.式(3.15)では濃度分布が左右対称に近づ くと*k**とgの値が近くなるため,もし濃度分布の歪みが少ない場合であっても閾値決 定に悪影響を与えることがない.そこで開始・終了断面付近では(3.15)式のλを()の閾値移動パラメータとして設定した.

以上から各計算領域内での卵胞領域は判別出来る.計算領域は隣接する計算領域と 互いに重なり合うため,計算領域内のほぼ全ての画素で複数回の領域判別が施されて いる.そこで各計算領域で得られた判別結果を集計し,各画素は判別された回数の多 い領域に属するものとした.領域境界付近では量子化によるノイズが特に多く領域判 別のエラーが発生しやすいが,これにより誤った判別を減らすことが出来ると考えら れる.

4. 実験結果

ウマ卵巣の断面画像(640×480 pix.,1900 枚中)に存在する 55 個の卵胞に対し,これ までに述べた提案手法を適用し卵胞領域の抽出を行った.各卵胞の抽出は,教師設定 断面から開始または終了断面まで自動で行う.処理中は専門家が抽出結果を逐一観察 しており,もし過抽出などの正しい抽出処理ができなかった場合はその断面で教師を 再設定して再度処理を行った.その結果に対し3次元画像解析ソフトウェア VoxelViewer(東芝機械)によるボリュームレンダリングを行い,卵巣の三次元立体像 を構築した.図9(a)に卵巣の三次元立体像,図9(b)に卵巣外側を半透明にして 卵胞の空間配置を可視化したものを表示する.これらの立体像により,専門家は卵胞 が排卵窩に向かって発育するという方向性を示すことを形態的にとらえることがで きた^(11~12).また,この立体像において,卵胞の重心位置と排卵窩領域を指定すること で,より正確な空間距離の測定も可能となるなど,これらの立体像の有効性は大きい と言える.



図 9 (a) ウマ卵巣の三次元立体像 (b) ウマ卵巣内部を可視化した三次元立体像 画像()~()は 60°ごとに回転させて表示 (巻頭カラーFig.3にも掲載)

・検証

本手法による抽出結果(PM)を数値的に検証するため,専門家による抽出結果(MI) と比較した.まずPMでは卵胞領域に属すると判別したが,MIではそれ以外に属す るとした画素の数をFalse Positive (FP)とする.一方,PMでは卵胞領域以外に属す るが,MIでは卵胞領域に属すると判別した画素の数をFalse Negative (FN)とする. 次にMIが卵胞領域とみなした画素数でFNを割ったものをFalse Negative Rate(FNR) とする.同様に,MIが卵胞以外とみなした画素数でFPを割ったものをFalse Positive Rate (FPR)とする.これらから,各断面での判別正解率(Answer Rate:AR)を

$$4R = 1 - \left(\frac{FPR + FNR}{2}\right) \tag{4.1}$$

と定義した.以上の計算を無作為抽出した卵胞について行った.図10はその卵胞の存在断面 No.及び評価を行った4断面 ($M_a \sim M_d$)の No.を示している.専門家による教師は No. 675 の断面で設定する.その後,±Z方向それぞれに連続する断面において,提案手法による自動抽出処理を行った.この卵胞は 1900 断面中で No.550 から No.800 の 250 断面に渡って存在するが,ここでの評価は No. 575, No. 625, No. 725, No. 775 の4 断面に対してのみ行った.表1は抽出正解率を示しており,教師断面から離れても約 95%の高い精度で領域判別が実施されたことがわかる.また,評価の対象とした卵胞では過抽出などが起こらなかったため,教師断面は No. 675 だけでよく,残りの断面では自動的に処理が行われた.処理にかかった時間は No. 675 ~ No. 800, No. 675 ~ No. 550 ともに1分程度であった.そのため教師設定時間を考慮しても抽出処理時間は 10 分程度であり,全てを手作業で行う場合と比べ,飛躍的に短縮されたことになる.



Section	Follicle Size (pix)	FP(pix)	FN (pix)	AR (%)
M _a	336	7	28	94.75
M_{b}	1079	2	75	96.43
M _c	1198	1	92	96.16
M J	818	8	66	95.48

表1 提案手法の抽出正解率

図 10 評価を行った卵胞の存在断面 No.

 M_{start} : 卵胞の開始断面

 M_{end} : 卵胞の終了断面

 $M_a \sim M_d$:評価実施断面

5.まとめ

3D-ISM 画像は生体のフルカラー連続断面画像を取得出来る装置であり,これらの 画像を利用した生体の高精細な三次元立体像構築が期待されている.しかしながら, 立体像構築に必要な領域抽出は,3D-ISM 画像が高精細かつフルカラーになり情報が 冗長になったために,X線CTやMRIなどによる画像からの領域抽出よりも難しくな るケースが多い.

本稿では 3D-ISM で取得したウマ卵巣の断面画像から,卵胞領域を抽出する手法に ついて検討した.ウマの卵巣は他の哺乳類と比べ特異的な構造をしていることが知ら れていたが,大型であるために切片観察法など従来の組織学的手法を用いることが出 来ず,内部構造が不明であった.そこでウマ卵巣の断面画像から卵巣内構造物の一つ である卵胞の領域を抽出し,三次元立体像を構築することを試みた.

3D-ISM 画像は断面間が数十µm と小さいために,断面間で画像の変化が微小であ る特徴がある.これを利用して,ある断面での領域抽出には隣接する断面での抽出結 果を開始領域とすることが出来る.そこで本稿で検討した手法は,各断面の開始領域 境界上の画素を中心とした局所領域内について,断面間に発生した微小変化を追従す るものであった.局所領域内部は主に卵胞とその周りの皮質が占めている.本手法は それらの判別にフルカラー画像のS(Saturation:彩度)とV(Value:明るさ)値の情 報を利用した.ほぼ全ての局所領域でS,V値それぞれの濃度ヒストグラムは卵胞と それ以外の領域を明確に識別可能な双峰性であったため,自動閾値選定法を用いるこ とで卵胞領域の抽出に成功した.

卵胞領域とそれ以外の色が酷似している部分では,濃度ヒストグラムに歪みが生じており,現在は手動によるパラメータ設定で閾値を変化させている.今回の実験では55個の卵胞すべてについて,パラメータ設定を必要とした位置の情報を記録している. それらの情報を分析することでパラメータの自動設定も容易であると考えられる.

生体には設計図がなく未だに内部構造が不明なものが多い.本研究では一例として 3D-ISM で入手したウマ卵巣の断面画像から三次元立体像の構築を行い,これまでは 不明であった卵巣内部の卵胞の空間配置を明らかにすることに成功した.

本稿での結果から, 3D-ISM 画像から各組織の領域抽出を行い構築した生体の三次 元立体像の有用性は示された.今後,ウマ卵巣に限らず様々な対象に対しても検討を 行っていく.

参考文献

- 小林賢知,樋口俊郎,青木勇他:"3次元内部構造顕微鏡の開発",精密工学会誌, 61(1), pp.100-106, 1995.
- 2) 横田秀夫, 工藤謙一, 樋口俊郎他: "3次元内部構造顕微鏡による凍結生体試料の 観察と計測", 低温生物工学会誌 Cryobiology and Cryotechnology, Vol. 44, No.1, pp.1-9, 1998.
- 3) 覚正信徳, 中村佐紀子, 横田秀夫他: "人眼球の高精度3次元形状の抽出", 理研シンポジウム COMPUTATIONAL BIOMECHANICS, pp.224-232, 2004.
- 4) J. Kimura, A. Tsukise, H. Yokota, Y. Nambo, T. Higuchi: "The Application of Three-Dimensional

Internal Structure Microscopy in the Observation of Mare Ovary", Anatomia Hisotologia Embryologia, Vol. 30, pp.309-312, 2001.

- 5) Budras. K. D., and S.Röck: "Atlas der Anatomie Des Pferdes", Hannover: Schlütersche-Verlagsanstalt und Druckerei GmbH & Co., pp. 76-77, 1997.
- 6) H.D. Cheng, et. al.: "Color image segmentation: advances and prospects", Pattern Recognition, Vol. 34, pp.2259-2281, 2001.
- 7) 大津展之, 栗田多喜夫, 関田巌:「パターン認識(理論と応用)」, 朝倉書店, 1996.
- 8) N. Otsu: "A thresholding selection method from gray-level histogram", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 9, No. 1, pp. 62-66, 1979.
- 9) 大津展之: "判別および最小2乗基準に基づく自動しきい値選定法", 電子通信学 会論文誌, Vol. J63-D, No. 4, pp.349-356, 1980.
- 10)斎藤泰一,山田博三: "判別しきい値選定法の一改良",情報処理学会論文誌, Vol. 22, No. 6, pp.596-599, 1981.
- 11) 平野悠子,木村順平他: "三次元内部構造顕微鏡装置(3D-ISM)を用いたウマ卵 巣の観察~卵巣内構造物の三次元化および空間的位置関係の検索~",第 97 回日 本繁殖生物学会大会予稿集,2004.
- 12) KIMURA Junpei, HIRANO Yuko, TAKEMOTO Satoko, NAMBO Yasuo et. al.: "Three-Dimensional Reconstruction of the Equine Ovary", Anatomia Histologia Embryologia, Vol. 34, pp.48-51, 2005.