



## 呼吸器画像を4次元的に理解する 第3回 画像ベース形態計測について

北岡 裕子

株式会社 JSOL エンジニアリング事業部 学術顧問

### はじめに

画像の形態情報と生体機能の関連を論ずる際に必要なのは、形態の定量化、すなわち、形態計測である。3次元画像が現代ほど普及していなかった1970年代前後、幾何統計学の手法を用いて、2次元断面から3次元構造を推定する研究が、組織標本を扱う基礎研究者によってなされた。解剖学者のE.R.Weibel<sup>1,2)</sup>、日本では病理学者の諏訪紀夫<sup>3)</sup>が著名である。筆者は幸運にも彼らに教を乞う機会に恵まれた。現代は3次元画像データが直接取得できるようになったので、難解で煩雑な幾何統計学手法は顧みられなくなった。しかし、現実には診療で用いられている画像データの多くは、組織標本であれ、臨床画像であれ、3次元再構成なしの断面(断層)像である。本講座では、2次元像で何がわかり、何がわからないかについて、簡単な幾何学図形を用いて説明する。そして、気道系や血管系など、頻回に分岐する樹状構造の形態計測についてコンピュータモデルを用いて論じる。

### 1. 2次元像から3次元構造を推定する

我々が3次元物体を目にする際、その形状は3種類の2次元像で認識される。表面像、投影像、そして断面像である。表面像と投影像によって全体像が把握され、断面像によって内部構造が観察される。しかし、人体内部の臓器の場合は、表面観察は不可能で、投影像(透視像)も隣接臓器との重なりを免れない。非侵襲的な方法で臓器構造を知るには、ほとんどの場合、断層像が唯一の手段である。我々が臨床画像でよく目にする構造は、血管や気道のような線状構造と小葉や細胞のような多面体である。そこで、簡単な例として、円柱と立方体について幾何学的に考えてみる。

図1は円柱をいろいろな方向から投影した際の像である。右端の像だけでは、円柱であることはわからないが、他の投影像を組み合わせると、正確な長さは不明ではあるが、円柱であることはわかる。また、直径はどの投影像でも不変で、直径の計測に関しては、投影像で正しい値が得られること

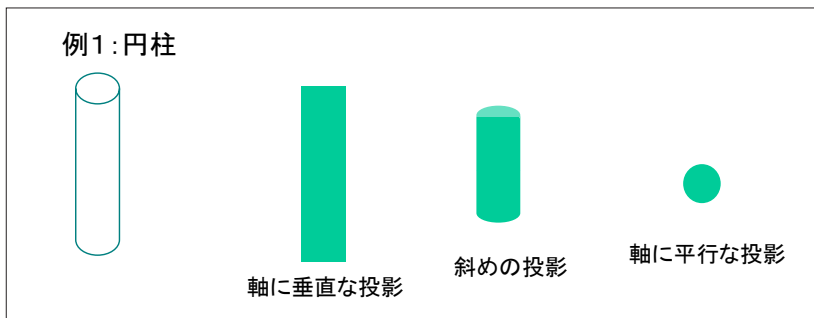


図1. 円柱の投影像

連絡先：〒460-0002 名古屋市中区丸の内 2-18-25  
株式会社 JSOL エンジニアリング事業部 学術顧問 北岡 裕子  
TEL：052-202-8181 FAX：052-2028172

がわかる。ただし、当然ながら、断面が正円ではなくいびつな形状であれば、投影像だけでは正しい形態計測が不可能である。そもそも直径という概念は円に対して成立する概念である。形状が円に近似できる場合にだけ「直径を計測する」という行為に意味がある。

図2は、立方体の投影像である。投影方向によって、様々な投影像を呈し、投影像だけでは、元の形状が立方体であるとは推定できない。もちろん、一辺の長さを推定することもできない。立体幾何学に精通していなければ、六面体と推定するのも困難である。投影像の面積は、正面からの投影の際に最小となり、立方体の面の面積と等しい。しかし、斜めに投影されると面積は増大し、最大で $\sqrt{3}$ 倍となる。投影面積でもって体積を推定する場合、投

影面積の比が2倍以内の場合は、元の立方体の体積が異なるとは言い難いことがわかる。なお、立体が球であれば、どこから投影しても投影像は常に同じ円である。そして、投影像の円の直径は球の直径と等しい。

## 2. 断面像から全体像を推定する

図3は円柱をいろいろな方向で切断した際の断面像である。形状も大きさも投影像よりも多様である。ただし、右端二つのような円柱の長軸方向の断面の出現確率は低く、多くの場合、円柱の全周が円もしくは楕円としてあらわれる。それゆえ、元の形状が円柱であると推定できる。楕円の短径(円は長径と短径が等しい楕円)が本来の円柱の直径と等しいので、円柱の直径は、断面像でも正しく計測

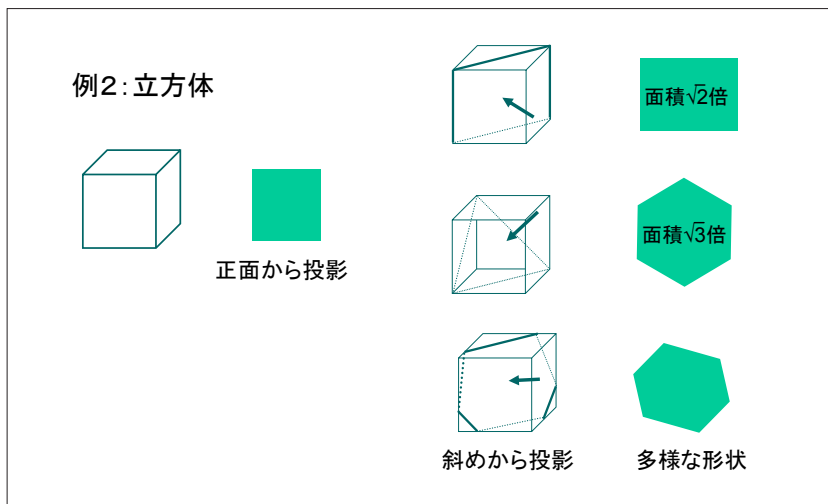


図2. 立方体の投影像

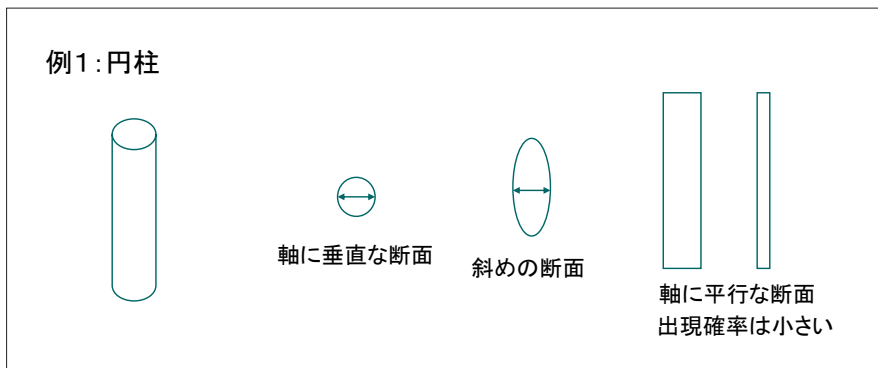


図3. 円柱の断面像

できることがわかる。

図4は立方体の断面像である。投影像よりもはるかに多様で、元の形状を推定することは不可能である。立方体の面に平行な断面は、同じ大きさの正方形であるが、斜めの断面は、3角形、4角形、5角形、6角形がある(6面体なので、7角形以上はない)。断面積の最小値は0で、対角線を通る面で切断された際に断面積が最大となり、 $\sqrt{2}$ 倍になる。したがって、断面像だけで元の立方体の大きさを比較することはきわめて危険である。

以上をまとめると、円柱に関しては、投影像であれ断面像であれ、本来の構造が円柱であると判断できる。長さを知ることはできないが、直径を知ることができる。他方、立方体に関しては、それが立方体であることすら2次元像から推定することはできない。このちがいは何が原因なのだろうか？

3次元空間において立体を定義する方法について考えてみよう。ある点からの距離が $r$ よりも小さい点の集合が球である。円柱は「ある線分からの距離が $r$ より小さい点の集合」である。球の場合、半径( $=r$ )を決めれば大きさが決まる。円柱の場合は、線分のベクトル(=方向と大きさ)と断面の半径、合計4個の数値で定まる。立方体はどうか。「ある正方形の面分との距離が面分の辺の長さの半分よりも小さい点の集合」と定義できる。

正方形の面分の向きと大きさを決めるには5個の数値が必要である(正方形の辺のベクトルと面分の法線ベクトル)。

ここで重要なのは投影の方向や断面の方向に伴って、ベクトルの相対的な方向が変わることである。図1-図4で示したように、投影像や断面像の形状が変わるのはこのためである。球をどこから投影しても同じ形に見えるのは、球を定義するのにベクトルは不要だからである。同様に、円柱の半径は、中心軸のベクトルとは独立した量なので、投影像や断面像であっても不変である。しかし、立方体を規定する5個の数値はすべて方向と関連しているため、2次元像では、これらの値が変化してしまうのである。したがって、立方体のような塊状の形状に対しては、2次元的な計測は無力で、3次元空間で計測をしなければならない。

### 3. 樹状構造の形態計測

これまでの考察は、血管系や気道系の個々の枝が円柱に近似されるとの前提で展開した。しかし、実際の血管系、気道系は、頻回に分岐を繰り返す樹状構造であり、円柱とみなしうる部分と分岐部からなる。樹状構造の形態計測については、樹状構造の幾何学モデルを通して考察する必要がある。

筆者は1999年に発表したヒト気道3Dモデルに

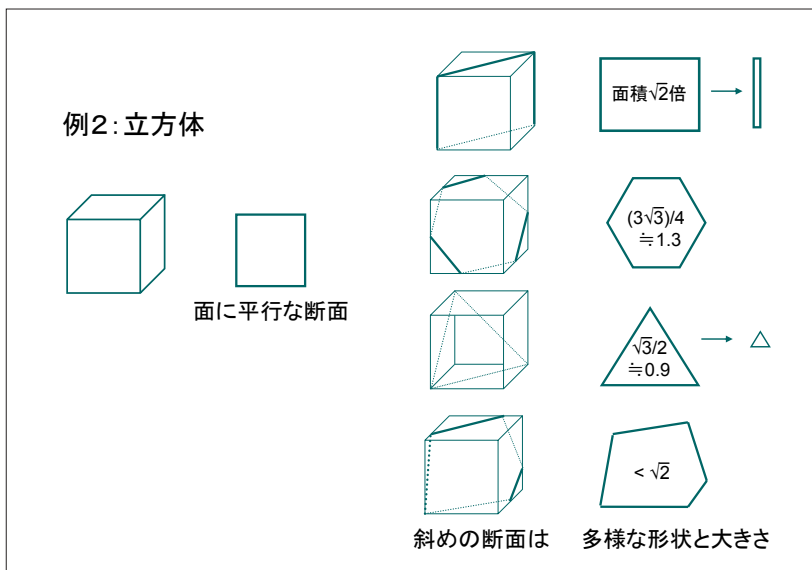


図4. 立方体の断面像

改良を加えて、気道壁が滑らかにつながった気道樹の4Dモデルを作成した。図5は、総数3,557本からなる、最大吸気位の気道樹モデルで、内径によって色分けされている。図5右は、2mm厚の水平断層像が全体の半透明表示と重畳されている(右上:肺全体、右下:部分拡大)。図6は、同じ

モデルを気管からの分岐回数によって色分けしたもので、分岐部はすべて青色で表示されている(右下の断層像を下肺野)。2mm厚の断層像にあらわれる気道は、気管以外はほとんどすべての枝で分岐部を含んでいることがわかる。分岐部の占める容積の割合は約40%である。分岐部において

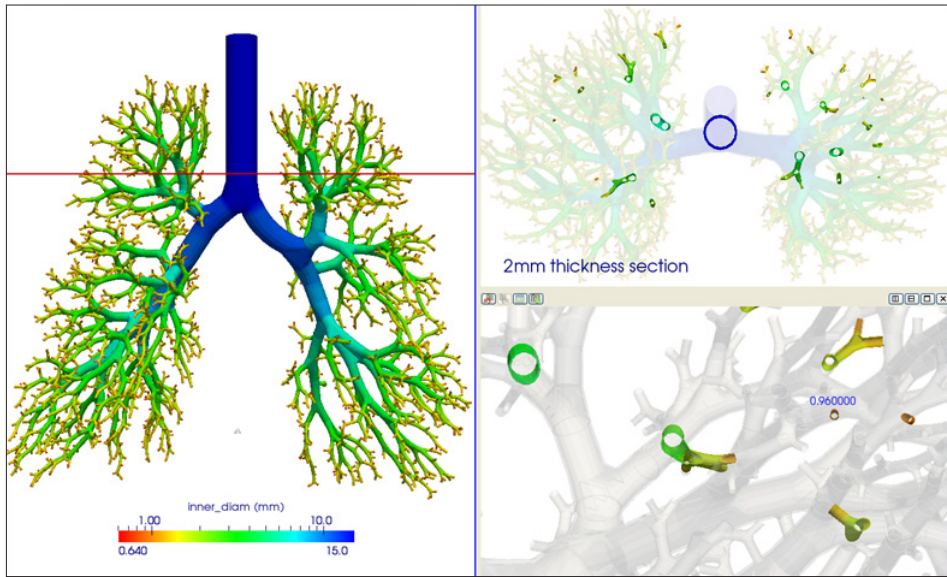


図5. Kitaokaの3D気道モデル. 内径の色表示

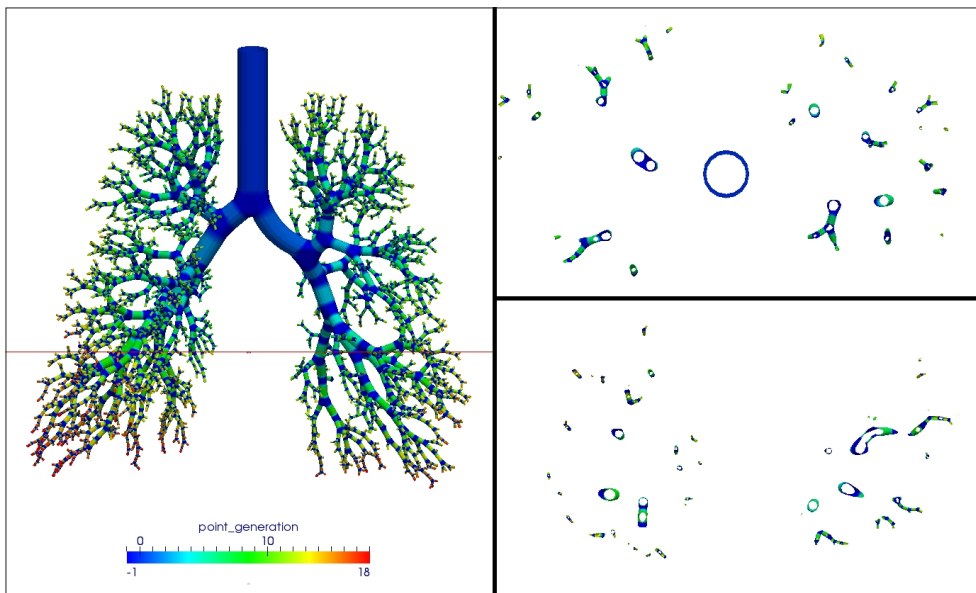


図6. Kitaokaの3D気道モデル. 分岐次数の色表示(分岐部は青色)

は直径が定義できないので、当然ながら直径を正しく計測することはできない。直径のかわりに3次元計測によって枝と直交する断面の面積を計測する場合も、分岐部においては計測すべき断面が存在しないので、分岐部を避けて計測部位を決定する必要がある。実際の臨床CT像では、ピクセルサイズやノイズ、心拍動などの影響が加わるので、たとえスライス厚が0.5mmであっても、気道の内径が3mm以下の気道を正確に計測することは、事実上不可能であろう。

樹状構造の形態計測には、個々の枝の計測の問題とは別に、どの枝を計測するか、という問題がある。動脈系と気道系は分岐するごとに内径が小さくなり、壁の解剖学的な性質も変化してくる。どのレベルの枝の計測値であるかが、きわめて重要である。3DCT画像による気道の形態計測研究では、区域気管支を一律に3次気管支とし、分岐回数と計測値の関係を調べた報告が多数なされている<sup>46)</sup>。しかし、この方法には二つの問題がある。ひとつは分岐回数の算定方法である。分岐回数を決めるには、中枢から末梢に向かって分岐の順番を調べなければならない。X線検出器の回転面に水平に走行する枝は、部分容積効果の影響で抽出さ

れない場合があるが、その場合は、抽出された姉枝は親枝と融合するため、分岐次数は本来の分岐次数よりも小さくなる。さらに、後に続く末梢枝もすべて誤った分岐次数が割り振られてしまう。もうひとつの問題は、区域枝から6次分岐のうち、ただ一つのルートが選択され、計測されていることである。すべての枝が抽出されていたならば、 $2^3=8$ 本のルートがあるはずであるが、どのようにして一本のルートが選択されたのか論文中に記載がなく、恣意性を否定できない。抽出されたすべての枝を計測対象にすべきである。

#### 4. 臓器モデルによる形態計測シミュレーション

画像解析方法の妥当性を検証するために物理ファントムが用いられる。しかし、樹状構造のような複雑な形状の物理ファントムを作成するのは容易ではない。物理ファントムのかわりにコンピュータモデルを用いて、X線吸収係数の空間分布を算出すると、**図7**のような仮想CT画像を作成することができる。バーチャルファントムである。コンピュータモデルであれば、パーツのサイズ変更や病的モデルの作成などが自在なので、対象の幾何学的特性に応じた新しい画像解析方法の開発に有用と考えられる。

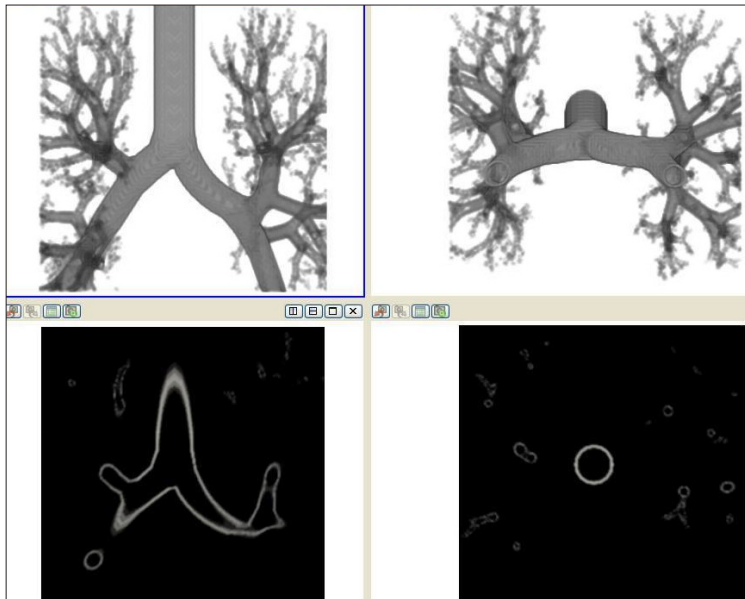


図7. 気道モデルの仮想CT画像



たとえば、図8は、Kitaoka 3Dモデルの右上葉枝に対して、部分容積効果による枝の抽出ミスを実シミュレートした画像である(上:正面像、下:側面像)。分岐次数がミスカウントされたために色が変わった枝がいくつかある。注意深く観察すると、ミスカウントされた枝の長さは異常に長いことに気が付く。そこで、筆者は、通常の経路長(絶対経路長)とは別に、枝の長さ・内径比の累積を、相対経路長と定義し、これによって枝を特徴づけることを考案した。絶対経路長  $x$  における内径を  $D$  とすると、相対経路長(Relative Path Length: RPL)は次式で表される。

$$RPL = \int dx/D(x)$$

気道系には、サイズに関わりなく同じ分岐パターンが繰り返される自己相似性があり、長さ・内径比は平均で約3あることが知られている<sup>1)</sup>。したがって、

相対経路長の値は本来の分岐次数にほぼ比例し、枝の誤抽出の影響を受けない。また、3D画像から抽出されたすべての枝に対して適用できる。筆者は実画像で検証する機会を得ていないが、本手法は気道だけでなく、動脈系全般に適用可能と考えられる。

本講座で紹介した気道モデルを含め、気管から肺胞までの4Dモデルを生成するフリーアプリケーションを、個人ホームページで公開している。名付けてLung4Cerである(<http://www7b.biglobe.ne.jp/~lung4cer/>)。4CerはCataChiCalaCli-erの略で、英語のforcer(促成栽培農家)の意を掛けている。形態モデル生成だけでなく、計算流体力学バージョンや呼吸機能バージョンも用意している。お試しいただければ幸甚である。

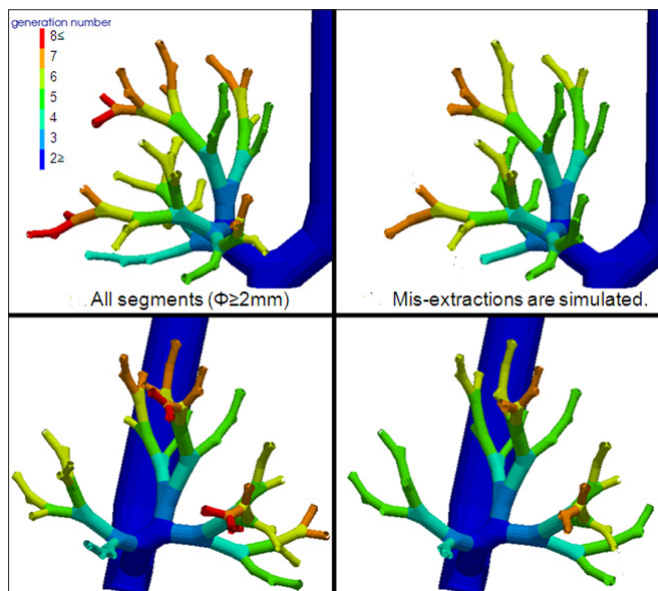


図8. 気道モデルによる気管支誤抽出シミュレーション

## 参考文献

---

1. Weibel, E.R. Morphometry of the Human Lung. New York: Academic Press, 1963.
2. Weibel, E.R. Stereological methods. London, Academic Press, 1979.
3. 諏訪紀夫. 定量形態学－生物学者のための stereology. 東京, 岩波書店, 1977.
4. Hasegawa M, et al. Flow limitation and airway dimensions in chronic obstructive pulmonary disease. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2006; 173: 1309-1315.
5. Matsuoka S, et al. Airway dimensions at inspiratory and expiratory multisection CT in chronic obstructive disease: Correlation with airflow limitation. *Radiology* 2008; 248: 1042-9.
6. Hasegawa M, et al. Relationship between improved airflow limitation and changes in airway caliber induced by inhaled anticholinergic agents in COPD. *Thorax* 2009; 64: 332-8.

ダウンロードされた論文は私的利用のみが許諾されています。公衆への再配布については下記をご覧ください。

### 複写をご希望の方へ

断層映像研究会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。

本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、(社)学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が社団法人日本複写権センター（(社)学術著作権協会が社内利用目的複写に関する権利を再委託している団体）と包括複写許諾契約を締結している場合にあっては、その必要はございません（社外頒布目的の複写については、許諾が必要です）。

権利委託先 一般社団法人学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 3F FAX：03-3475-5619 E-mail：info@jaacc.jp

複写以外の許諾（著作物の引用、転載、翻訳等）に関しては、(社)学術著作権協会に委託致しておりません。

直接、断層映像研究会へお問い合わせください

Reprographic Reproduction outside Japan

One of the following procedures is required to copy this work.

1. If you apply for license for copying in a country or region in which JAACC has concluded a bilateral agreement with an RRO (Reproduction Rights Organisation), please apply for the license to the RRO.

Please visit the following URL for the countries and regions in which JAACC has concluded bilateral agreements.

<http://www.jaacc.org/>

2. If you apply for license for copying in a country or region in which JAACC has no bilateral agreement, please apply for the license to JAACC.

For the license for citation, reprint, and/or translation, etc., please contact the right holder directly.

JAACC (Japan Academic Association for Copyright Clearance) is an official member RRO of the IFRRO (International Federation of Reproduction Rights Organisations).

Japan Academic Association for Copyright Clearance (JAACC)

Address 9-6-41 Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107-0052 Japan

E-mail info@jaacc.jp Fax: +81-33475-5619