

特集 小児の肺機能の画像による評価／臨床的応用と最近の進歩

3. 超高速CTを用いた小児肺機能の評価

重田 誠, 望月 博之¹⁾

群馬県立小児医療センター アレルギー科, 群馬大学医学部 小児科¹⁾

Evaluation of Lung Function in Children with Use of Ultrafast Computed Tomography

Makoto Shigeta, Hiroyuki Mochizuki¹⁾

*Department of Allergy, Gunma Children's Medical Center
Department of Pediatrics, Gunma University School of Medicine¹⁾*

Abstract

Computed tomography (CT) is a useful imaging technique for evaluation of pulmonary diseases, but conventional CT is not useful for evaluation of pulmonary function. So far, the method of diagnosis for a functional image of the lung included only a technique of nuclear medicine. Ultrafast CT(UFCT) has recently been applied to the diagnosis of pediatric pulmonary disease. This technique offers a minimally invasive method for a quantitative and dynamic imaging evaluation in infants and children. The use of dynamic CT employing a rapid sequence of scans allows measurement of dynamic lung attenuation changes during respiration. Using this technique, UFCT is useful for pulmonary functional analysis.

In this review, recent findings of UFCT are described focusing on pediatric pulmonary functional diagnosis.

Key words : Bronchial asthma, Chronic lung disease (CLD), Lung function, Ultrafast computed tomography (UFCT)

はじめに

胸部CTは呼吸器疾患の形態的診断法として重要な位置を占めているが、肺における換気や血流の機能的な診断能力には乏しい。従来は、非侵襲的に肺の換気や血流の状態をダイナミックに捉えられる画像診断としては、呼吸器核医学的方法しかなかった^{1,2)}。しかし超高速CTは従来のCTと異なり単に形態的診断にとどまらず、肺の機能的診断も一部は可能である^{3,4)}。

超高速CTは、まだ導入されている施設も少

ないが、従来法の胸部CTとは異なったメリットがあり、特に小児の呼吸器疾患の診断に関して有用な点が多い。本稿では、小児の肺機能的診断との関連を中心に超高速CT検査の実際と最近の知見について述べる。

超高速CTについて

超高速CTは本来、心拍動という速い動きを画像化するために開発されたCT装置であり⁵⁾、スキャン時間が短く、短時間に多数の連続撮影が可能なのがその特徴である。メカニ

カルスキャン方式ではなく、電子ビームによるエレクトロニック・スキャン方式であるため、1スライス50~100msecとスキャン時間が非常に短い。そのため呼吸や心拍、体動などによる影響を受けにくく、特に、心拍動や呼吸運動が画質に大きな影響を及ぼす縦隔や肺の病変では、従来型CTと超高速CTの画質の差は歴然としている。

これまでの内科領域での超高速CTの呼吸器疾患への応用としては、1)肺野における腫瘍性病変の検索：連続高分解能CTとして3次元的な形態の評価や、肺野結節での経時的造影効果、腫瘍性病変の胸膜への浸潤を検討。2)肺門部の病変の検索：心拍動の影響をほとんど受けないため、肺門部の気管支、血管の明瞭な画像が得られる利点を活用。3)びまん性肺疾患の評価：連続高分解能CTとして3次元の形態評価や肺の局所の状態を評価、などが計画されている^{6,7)}。

超高速CTにおける小児の呼吸器疾患への応用としては、肺の2次小葉レベルまで解剖学的に検討できることに注目し、連続撮影により肺野の最大吸気時、最大呼気時における画像の比較をしたり、シネCTとして動的に評価することが行われている^{8,9)}。また超高速CTは短時間に撮影が可能であるため、従来のCTで必要とされた鎮静・麻酔操作があまり必要なく、検査に協力的でない患者にも簡便に利用できる利点がある。

また超高速CTの問題点としては、1)時間分解能を高めると空間分解能が低下する。2)連続撮影を行うと被曝が多くなる。3)設備が高額なため一般に普及していない。4)装置がデリケートであり故障が比較的多い、という点がある。しかしながら、超高速CTは呼吸数や心拍数が多い小児では、成人の対象に比して、鮮明な画像を得るためにはるかに効果があると思われる。また、被曝に関して我々がファントムで検討したところでは、最大皮膚線量は従来法のCTの平均的使用の設定では9 mGy/スライスであったが、超高速CT(イマトロンC-150)の肺の平均的使用の設定として、3 mmスライス、

スライス時間0.1秒とすると1.82mGy/スライスであった。我々は大動脈上縁、気管分岐部、右横隔膜上縁の3点をルーチンな観察点と定め、1点につき各8スライスの連続撮影を行っているため、各点の被曝量は各々 $8 \times 1.82 = 14.56$ mGyとなる。これは従来のCTの2スライス程度であり、我々の撮影条件では過剰な被曝にはならないものと思われる。しかしながら対象が小児であるため、常に被曝を減らすことを念頭に置いて検査を進めるべきであり安易なdynamic studyなどは慎まなければならない。

超高速CTと肺機能診断

上記の形態的診断に加えて超高速CTでは、短時間の連続撮影が可能であることを活かし、局所肺機能診断法として以下のような解析が可能である。

1) 局所肺の換気およびコンプライアンスの評価^{3,4)}

肺は呼吸運動を行う動的な臓器であり、正常肺であれば、呼吸運動の周期にあわせて局所肺も比較的均一に伸縮すると考えられる。しかし病変が生ずると局所的にコンプライアンスが低下したり、あるいは逆に気道狭窄のためにair trappingが生じることもある。したがって吸気のCT像のみでは明らかでない病変や非特異的变化と考えられる変化が動的画像や呼気CT像を撮像することによって検出可能になったり、あるいは病変の性状に関する新たな情報が加わる場合がある。客観的な指標としては、局所肺における関心領域を用いる。そのCT値の変化から肺のコンプライアンスの変化やair trappingの存在部位を評価することが可能である。

撮像方法には2つの方法があり、一つは呼気dynamic CTで、シネ画像として動的に評価する方法である。この方法は呼吸運動を切れ目のない連続画像として評価できるメリットがあるが、呼吸運動中にスライス面が変化するため同一局所肺での変化が評価しにくい欠点がある。もう一つの方法は、吸気の連続画像と呼気

の連続画像を撮像し、2組の画像から同一の局所肺を抽出し、そのCT値の変化から肺の伸縮性を評価する方法である。

この吸気、呼気における画像の評価は、従来法のCTやヘリカルCTなどでもある程度可能であるが、成人と異なり吸気、呼気で息がとれにくい小児では、超高速CTの方が明らかに優れている。

2) 局所肺血流の評価^{10,11)}

呼吸停止下に造影剤をbolusに注入し、その直後から超高速CTで連続画像を撮像すると、肺における時間-濃度曲線が得られる。この曲線をガンマ関数に近似することにより、平均通過時間などの血流に関する定量的な指標を得ることができる。呼吸器核医学的手法を用いても局所肺血流の評価がある程度可能であるが、CTという最も微細な形態診断が行える装置で、局所肺血流という機能評価ができる意義が大きく、形態的診断と局所血流の変化という2つの情報を同時に評価することが可能である。

臨床応用の実例

1. 気管支喘息への応用

気管支喘息児の発作時の動的な肺換気状態の評価には、従来の胸部CTは使用することはできなかった。気管支喘息の発作時の肺機能検査では中、大気道の閉塞の指標であるFEV_{1.0}、PEFRの低下や小気道の指標であるMMF、 \dot{V}_{50} 、 \dot{V}_{25} の低下などが認められる。しかしこの肺機能検査では、肺のどの部分に気道狭窄が生じたかの情報を得ることはできない。運動誘発試験や吸入誘発試験時などの換気血流の動的な状態を把握するためには、従来は^{81m}Krを用いた換気血流検査などの方法しか存在しなかった²⁾。Fig.1に気管支喘息児の気道過敏性試験であるメサコリン吸入誘発試験時に^{81m}Krによる換気血流検査を行った結果を示す。(1)の吸入前の状態からメサコリンの吸入誘発に伴って肺の換気の欠損が出現し、(3)それに続いて血流の欠損が生じるが、その程度は弱く、発作による急性の換気障害によって、換気血流の不均衡が

起ることを示しており、これが発作時の酸素分圧低下の主因と考えられている。これらの短時間における非常にダイナミックな肺換気動態の変化は、超高速CTを用いることにより核医学的手法を用いなくとも評価することができる。

Fig.2は喘息の小発作時の超高速CT画像(a)と気管支拡張剤吸入後の画像(b)であるが、吸入後air trapping領域の低下が認められており、気管支拡張剤吸入前後における局所気管支の拡張の状態についても評価が可能である。

被曝の問題もあり、現実的ではないが超高速CTを用いて肺換気動態の連続的な評価を行い、それを肺内でマッピングすることにより、従来は不可能であったCTによる動的肺機能評価も理論的には可能である。

気道過敏性は、現在気管支喘息の本態的な病態と考えられているが、その測定に関しては、特に低年齢の乳幼児では困難なことが多い。これらに対しても超高速CTは肺の動的病態評価の可能性を開くものと考えられる。

2. 慢性肺疾患への応用

小児の慢性肺疾患(chronic lung disease: CLD)は極低出生体重児に多発する疾患であり、極低出生体重児の救命率が年々改善されているにもかかわらず、発症率の明らかな低下が認められない状態にある。Northway¹²⁾らの示すようにCLDの胸部X線所見は、その時期により異なるが、きわめて長い変化を示す。しかしその予後を大きく左右する肺高血圧の状態を胸部単純X線像から判断するのは不可能であり、心電図や心エコーによる肺高血圧の定期検査を必要とする。また初期の肺X線像が必ずしもその児の臨床的重症度や予後の判定に役立たない場合もある。我々は、超高速CTを用いて、比較的早期からCLDの児の胸部CT像を撮像し、さらに肺局所での換気やair trappingの状態の評価を行っている。Fig.3(上)の症例は、8ヵ月の男児で、厚生省分類I型の慢性肺疾患の児である。超高速CTでは、ほぼ全肺野にわたり、線状陰影が認められ、気腫状変化が

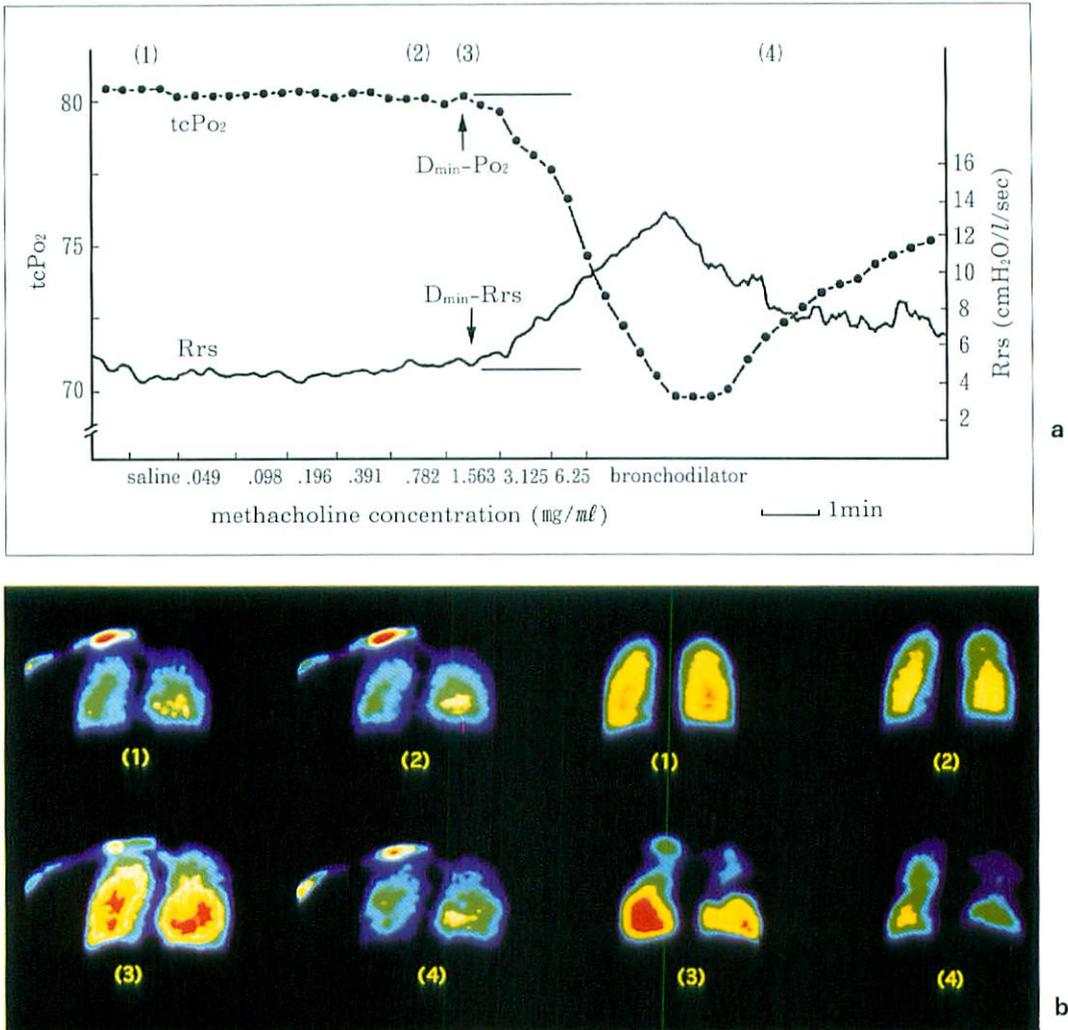


Fig. 1

- a : Measurement of threshold in methacholine inhalation challenge ($D_{min-Rrs}$, D_{min-PO_2}) by oscillation and $tcPO_2$ method. With inhalation of an incremental challenge of methacholine, respiratory resistance (Rrs) increased. When Rrs reached about twice the baseline value, inhalation of methacholine was stopped and, instead, bronchodilator was inhaled. (1),(2),(3),(4) : points of pulmonary ventilation and perfusion examination with ^{81m}Kr .
- b : Pulmonary ventilation and perfusion image use of ^{81m}Kr during methacholine inhalation challenge. (1) Before inhalation challenge, (2) 1 min before threshold, (3) threshold point, (4) after bronchodilator inhalation.

散在していた。Fig.3(下)は気管分岐部における、超高速CT画像と関心領域を設定した場合の時間-CT値曲線を示す。正常と思われる領域Aは呼吸で高吸収域、吸気で低吸収域を示すのに対して、領域Cは呼吸による変化はほとんど認められず、固定性のair trappingの存在

が示唆される。

また肺局所の変化をスコア化(UFCT-score)することによりCLDの臨床スコアと比較を行った¹³⁾(Table.1)。その結果は、臨床スコアとの有意な相関を示し、予後判定やその後の変化のパラメーターとして有用であると思われた。

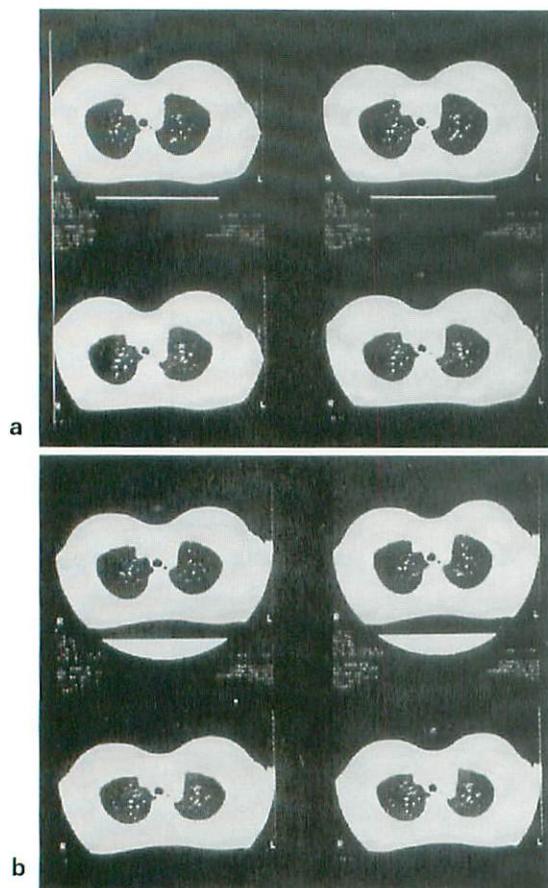


Fig.2 Serial ultrafast CT scans of 3mm sections in a patient with asthma.

a : Mild asthma attack occurs.

b : After bronchodilator inhalation

3. 他の肺疾患への応用

1) 閉塞性細気管支炎(Bronchiolitis Obliterans : BO)

BOは、近年増加傾向にあるびまん性汎細気管支炎(DPB)に似た気道の閉塞性障害を示すが、病変の起こる場所はDPBより高位に位置するため、病巣の数は少なくとも障害が強く突然死する危険性があるといわれている¹⁴⁾。BOの原因として、アデノ、ライノ、コロナ、RS、インフルエンザ、麻疹、ムンプス、サイトメガロ、HLVなどのウイルス感染症、マイコプラズマ感染症、膠原病、薬物反応、臓器移植などが報告されている¹⁵⁾。

Fig.4の症例は、マイコプラズマ肺炎後、胸

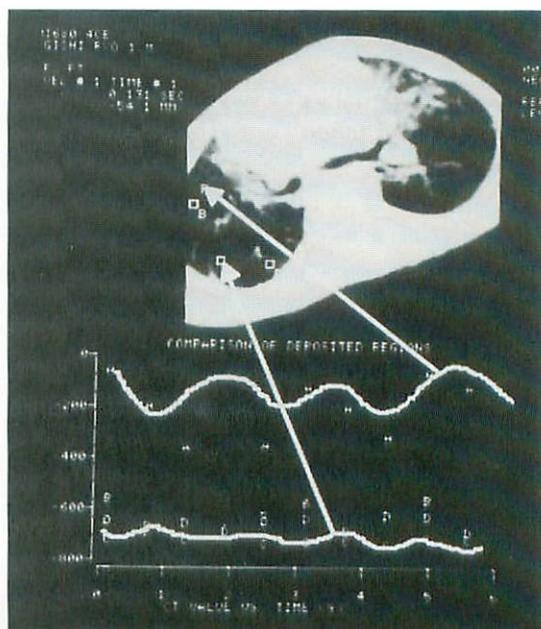


Fig.3 Ultrafast CT image of an 8-month-old boy with chronic lung disease.

Lung attenuation was measured within regions of interest (ROIs: A, B, C, D) selected in the lung, the 10 images obtained in the supine positions.

部聴診で持続する呼吸音の低下や喘鳴が認められ、呼吸器核医学検査で、air trappingが末梢領域にびまん性に生じていると推測されたことからBOが疑われた。Fig.4は、超高速CTによるdynamic studyを示す。図のように吸気(上段左)から呼気(下段右)の画像を比較すると、右肺のほぼ全肺野、左肺の上葉と下葉の一部に呼吸による影響を受けないlow densityの部分が見られたことから、これらの領域におけるair trappingが示唆され、びまん性の末梢気道の閉塞性変化が推測された¹⁶⁾。この症例は、従来型の胸部CTを前病院で施行されているが、その時には病変を指摘することはできなかった。

BOはしばしば臨床症状から疑われ、確定診断のため肺生検による病理学的な検討が行われる。病理組織的には、肉芽組織による気管支壁の肥厚による閉塞が起こるとされているが¹⁷⁾、病変が局所的であるため、開胸肺生検や経気管支鏡的肺生検で標本を採取しても病的所見が得

Table 1(a) Bronchopulmonary dysplasia clinical scoring chart

Variable	Score			
	0	1	2	3
Respiratory rate (No./min)	≤40	41-60	61-80	≥81
Dyspnea (retractions)	none	mild	moderate	severe
Required FiO ₂ (%) for SaO ₂ >90%	21	22-30or 0.5 L/min*	31-50or 0.5-1.0 L/min*	51or 1.0 L/min*
PCO ₂ (mmHg)	≤45	46-55	56-70	71≤
Growth rate (g/day)	25≤	15-24	5-14	≤4

Note : Clinical score is the summation of values for the five categories, the maximum being 15 points.

* Inspired O₂ flow by nasal canula.

Table 1(b) UFCT scores and clinical scores in infants with bronchopulmonary dysplasia

Case No.	Age (months)/Sex	GW*	BBW** (g)	Clinical Score	UFCT score				
					Total***	a	b	c	d
1	1/F	26	958	4	1.83	0.75	1.00	0.08	0
2	1/F	29	1380	1	0.90	0.10	0.50	0	0.30
3	2/M	30	1410	3	1.00	0	0.86	0.14	0
4	4/M	25	800	1	0.58	0.17	0.42	0	0
5	4/F	26	750	2	0.25	0.25	0	0	0
6	4/M	26	920	3	1.17	0.58	0.58	0	0
7	4/F	27	824	3	0.50	0.17	0.25	0	0.08
8	6/M	23	495	3	2.00	0.80	0.80	0	0.40
9	8/F	34	2250	7	2.28	1.00	0.78	0.06	0.44
10	13/M	28	1234	3	2.00	0.67	1.00	0	0.33
11	26/M	31	2024	3	1.38	0	0.38	0.25	0.75
12	34/M	26	705	6	1.89	1.00	0.58	0	0.32

* Gestational week. ** Birth body weight.

*** Total UFCT score is the summation of UFCT scores for each finding.

られないことがある。多発性のair trappingの診断については呼吸器核医学的検査でも可能であるが、肺の形態的診断と換気機能の診断を同時に行うことが可能な超高速CTは、このようなびまん性の閉塞性肺疾患の診断に新たな可能性を示すものであり、特に小児の場合、非侵襲的な検査として非常に有用であると思われる。

2) 肺分画症

嚢胞性肺疾患は肺炎などの感染症を機に、胸部X線で発見されることが多いが、最近では出生前の胎児エコーなどで発見されることもある。嚢胞性肺疾患の鑑別において、肺分画症の診断には分画肺の存在と大動脈系から分岐した異常動脈の存在を証明することが必要である。

Fig.5の症例は、11ヶ月の女児で、10ヶ月時

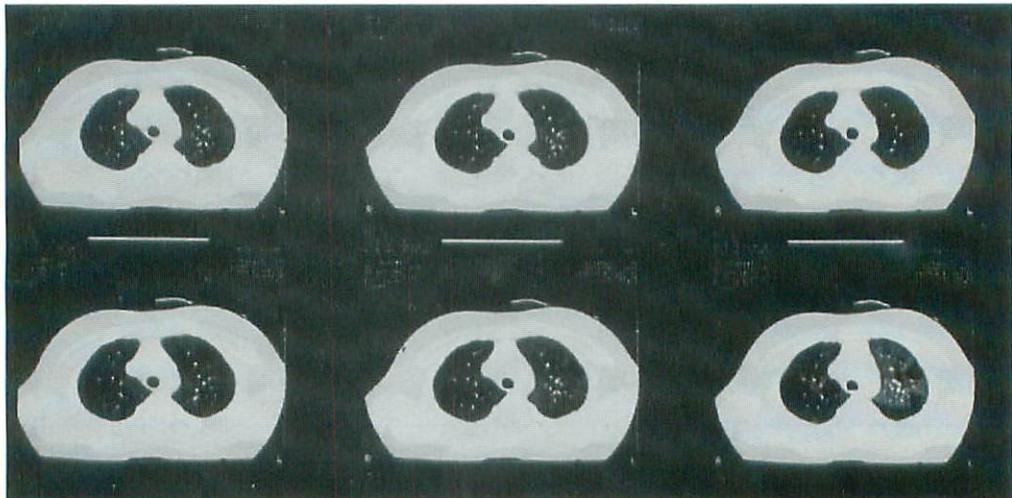


Fig.4 Serial ultrafast CT scans of 3mm sections in a patient with bronchiolitis obliterans.

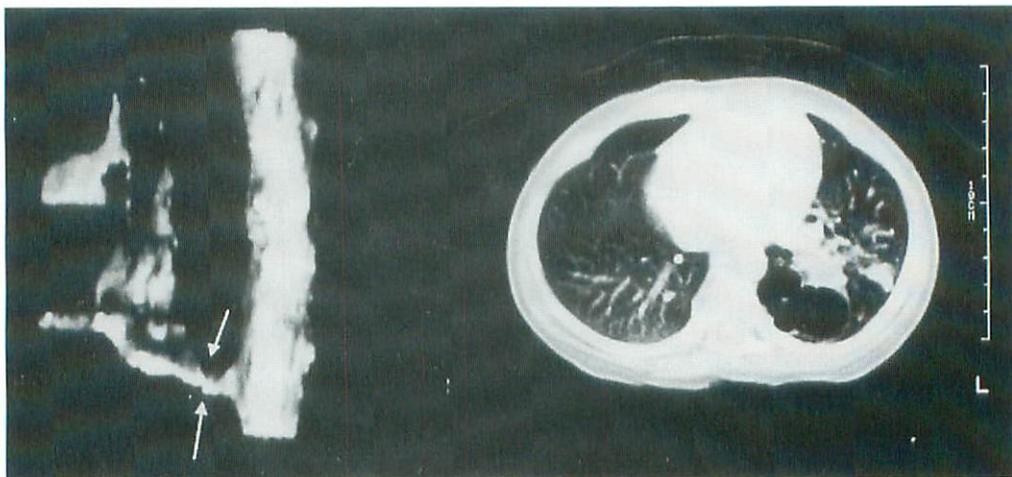


Fig.5
a : 3D image of ultrafast CT in a patient with pulmonary sequestration.
(arrows) is aberrant artery.
b : Ultrafast CT image of same patient.

に肺炎の診断を受けたが、肺炎軽快後も左下葉に嚢胞状の異常陰影が認められた児である。単純超高速CT像では、同部に多嚢胞性の病変を認め、造影剤注入によるdynamic studyでは下行大動脈より病変部に流入する異常血管(矢印)を認めたため、肺分画症と診断した。外科的治療を行い、左下葉に嚢胞様部分と径6mmの異常動脈を確認した¹⁸⁾。

分画症の診断には、現在胸部MRIが有力な

検査法であるが、CTと比して撮影時間が長く、特に乳幼児では撮影しにくい欠点がある。超高速CTは乳幼児においても呼吸や体動の影響を受けにくく、また血管系の情報についても造影剤静注後の経時的な検討を行えば、分画肺の異常血管のみならず還流静脈の情報も得ることが可能であり、乳幼児における検査として非常に有用であった。

これら以外にも、これまでに我々は超高速

CTを用いて、Swyer-James症候群、気管支異物、気管軟化症などの気管、気管支の異常、また造影剤の注入によるdynamic studyを利用した肺動脈欠損症などの脈管系の異常について検討し、診断上有意義であることを報告してきた¹⁹⁾。気管軟化症や上気道狭窄においても呼吸に伴う気道の断面積の変化を多断層的に、ほぼ同時に観察できることから超高速CTの検討が有意義であると報告されている²⁰⁾。

おわりに

超高速CTは、スキャン時間が短く、短時間に多数の連続撮影が可能であるため、呼吸や心拍による影響を受けにくく、小児の呼吸器疾患の評価を行う上で優れていると思われる。また超高速CTは、形態的診断のみならず肺の機能診断にも有用であり、従来のCTや肺機能検査から得られる解剖学的、生理学的解析を補足する情報が得られることから、侵襲性のある検査に頼らずに小児の臨床的な診断を行う上で有意義であると思われる。

●文献

- 1) 島田孝夫：^{81m}Kr持続吸入法を用いた喘息例の局所換気量の経時的測定。臨床放射線 1991；36：51-64。
- 2) 重田 誠，森川昭廣：呼吸器核医学検査。小児科臨床 1997；50：262-269。
- 3) Webb WR, Stern EJ, Kanth N, et al：Dynamic pulmonary CT findings in healthy adult men. Radiology 1993；186：117-124。
- 4) Stern EJ, Webb WR：Dynamic imaging of lung morphology with ultrafast high-resolution computed tomography. J Thorac Imag 1993；8：273-282。
- 5) Lipton MJ, Hoggins CB, Farmer D, et al：Cardiac imaging with a high-speed cine-CT scanner Preliminary results. Radiology 1984；152：579-582。
- 6) 村田喜代史，高橋雅士，森正 幸，他：超高速CTの肺疾患への応用。画像診断 1994；14：655-669。
- 7) 村田喜代史，高橋雅士，森正 幸，他：肺門部病変における超高速CTの有用性の検討。臨床放射線 1993；38：15-24。
- 8) Brasb RC：Ultrafast computed tomography for infants and children. Radiol Clin North Am 1988；26：277-286。
- 9) Stern EJ, Frank MS：Small-airway disease of the lungs-findings at expiratory CT. A J R 1994；163：37-41。
- 10) Ringertz HG, Brasch RC, Gooding CA, et al：Quantitative density-time measurements in the lungs of children with suspected airway obstruction using ultrafast CT. Pediatr Radiol 1989；19：366-370。
- 11) Swensen SJ, Morm RL, Schueler BA, et al：Solitary pulmonary nodule；CT evaluation of enhancement with iodinated contrast material：a preliminary report. Radiology 1992；182：343-347。
- 12) Northway WH, Rosan RC, Porter DY：Pulmonary disease following respirator therapy of hyaline membrane disease. N Engl J Med 1967；276：1379-1383。
- 13) Kubota J, Ohki Y, Inoue T, et al：Ultrafast CT scoring system for assessing bronchopulmonary dysplasia：Reproducibility and clinical correlation. Radiotron Medicine 1998；16：164-174。
- 14) Tablan OC, Peyes MP：Chronic interstitial pneumonia. Am J Med 1985；79：268-270。
- 15) Ezri T, Kunichezky S, Eliraz A, et al：Bronchiolitis obliterans-current concepts. Q J Med 1994；87：1-10。
- 16) 小山晴美，望月博之，森川昭廣他：超高速CT所見からマイコプラズマ肺炎後の閉塞性細気管支炎の可能性が考えられた1症例。日本小児科学会雑誌 1996；100：79-83。
- 17) Panitch HB, Callahan CW Jr, Schidlow DV：Bronchiolitis in children. Clin Chest Med 1993；14：715-731。
- 18) 渡辺正之，小林壽恵，重田 誠，他：超高速CTにより診断しえた肺葉内肺分画症の一例。日小呼吸学会誌，1997；8：133-137。
- 19) 望月博之，荒川浩一，徳山研一，他：Swyer-James症候群と考えられた症例における超高速CT所見 日本小児呼吸器疾患学会雑誌 1996；7：4-6。
- 20) 相沢信行，盛谷和政，瀧時 貴，他：超高速CTによる上気道狭窄の診断。臨床放射線 1993；33：9-13。