

肺癌に対する非血管系 IVR

平 木 隆 夫

岡山大学学術研究院医歯薬学域 放射線医学

キーワード：肺癌 (lung cancer), インターベンショナルラジオロジー (interventional radiology), 非血管系 (non-vascular)

Non-vascular interventional radiology for lung cancer

Takao Hiraki

Department of Radiology, Faculty of Medicine, Dentistry and Pharmaceutical Sciences, Okayama University

はじめに

岡山大学病院放射線科では、肺癌に対する非血管系の interventional radiology (IVR) を古くより積極的に行ってきた。中でも CT ガイド下で病変に針を刺入して行う経皮的肺生検とラジオ波焼灼療法 (RFA) においては、世界的にも有数の拠点と言える。本稿では、岡山大学病院放射線科で行っている肺癌に対する CT ガイド下の肺生検と RFA の手技の実際と研究成果を紹介する。

CT ガイド下経皮的肺生検

肺癌の組織学的診断方法としては、気管支鏡を用いて行う経気管支的生検と CT を用いて行う経皮的生検がある。両者には一長一短あるが、実臨床では経気管支的生検が困難な場合 (肺野末梢の小病変など) に CT ガイド下肺生検が施行されることが多い。なお、肺生検は組織診断のみならず、近年の個別化医療における遺伝子変異の検索においても大変有用である。

1. 手 技

CT ガイド下経皮的肺生検の適応範囲は広く、不適応症例は稀であるが、高度の凝固異常や出血傾向、手技中に息止めが出来ないほどの高度の呼吸機能障害、認知症などで術中の安静が保てない場合は適応外としている。

手技の方法に関しては、まずカンファレンスにて計画を立てる。術前の CT 画像を参照して、生検針の病変への刺入経路や患者体位を決定する。刺入経路は、病変に最短距離で到達できる経路を基本とするが、葉間胸膜や肺内の比較的太い血管や気管支の穿刺はできるだけ避けるように計画する。また造影 CT が施行されている場合は肋間動脈や内胸動脈など胸壁の動脈の走行も確認し、手技の際には穿刺を避けるように心掛ける。

生検は、古くは吸引生検による細胞診が主流であったが、近年はカッティングニードルを用いたコア生検による組織診が主流である。我々は20ゲージ (G) コアキシャルニードルシステムを使用したコア生検を行っている。はじめに19G 導入針を病変に刺入し、次に導入針の中に20G 生検針を挿入して病変から組織を採取する。このシステムの利点は、一回の導入針の刺入により何度でも繰り返して生検針による組織採取ができることにある。

2022年 5 月27日受理

〒700-8558 岡山市北区鹿田町 2-5-1

電話：086-235-7313 FAX：086-235-7316

E-mail：hiraki-t@cc.okayama-u.ac.jp

◆ プロフィール ◆



1995年 3 月 岡山大学医学部医学科卒業
2001年 3 月 岡山大学大学院医学研究科修了
2002年 5 月 オレゴン健康科学大学 Dotter研究所
2007年 9 月 岡山大学医学部・歯学部附属病院 放射線科 助教
2012年 4 月 岡山大学病院 放射線科 講師
2017年 4 月 岡山大学大学院医歯薬学総合研究科 放射線医学 准教授
2021年10月 岡山大学学術研究院医歯薬学域 放射線医学 教授
現在に至る

手技に使用する画像システムはIVR-CTである。IVR-CT (図1 A) は、CT と血管撮影装置が一体となった日本発のシステムである。そのCTは、通常の診断専用のCTと異なり、撮影時には寝台ではなく、CTガントリが移動するように設計されている (スライディングガントリCT)。岡山大学病院では2000年4月にIVR-CTにCT透視が実装された。CT透視 (図1 B) は、術者がフットスイッチを踏むと即座にCT撮影が行え、撮影されたCT画像がリアルタイムにモニター上に表示できる機能である。術者はコントローラを用いてCTガントリの位置を調整し、任意の断面のCTを撮影できる。CT透視の導入により、CTガイド下の

IVRは飛躍的に容易かつ短時間に施行できるようになった。しかし、一方でCT装置の近くでCT撮影しながら手技を行う術者は被曝を伴う欠点もあり¹⁾、被曝低減には最大限の注意を払う必要がある。

手技は気胸のリスクがあるため患者を入院させて行っている (通常2泊3日)。手技前には、ペンタジンと塩酸ヒドロキシジンの点滴静注で意識下鎮静を行う。CT寝台に患者を既定の体位で寝かせた後、関心領域付近の患者の体表にカテーテルを貼り付けてCTを撮影する。CT画像上でカテーテルをマーカーとし、針の穿刺点および刺入ルートを最終決定する。患者体表の穿刺点に油性マジックで印を付け、その後その付近を消毒し、清潔シートをかぶせて準備完了である。

患者をCTガントリ内に入れて穿刺点の断面をCT透視で確認する。穿刺点周囲に局所麻酔を施した後に、導入針を病変近傍まで進めていく。まず導入針先端を穿刺点皮下に5～10mmほど進め、鉗子を用いて導入針を把持した後、CT透視で観察を行う。CT透視上で、針先が病変に向かうように針の角度を修正する。その後、CT透視を切ってから、針を数cm進め、その後再びCT透視で針先を確認する。この工程を繰り返して導入針の先端を病変直前まで進める。次に導入針の内針を抜去し、生検針を導入針の外筒内に挿入する。その後、CT透視で針先端が病変に向かっていることを確認した後、生検針のプランジャを押して、スタイレットを出す。再度CT透視を行い、ノッチが病変内に刺入されていることを確認する (図2)。その後、プランジャを強く押してファイアし、生検針を抜去して組織を採取する。十分な量の組織を採取できるまで、組織採取を繰り返す。

十分な組織が採取された後には、全肺をCT撮影し、気胸や出血、大循環内に空气の迷入がないかどうかを確認する。また、手技3時間後と翌朝に胸部レントゲン撮影を行い、気胸を評価する。

2. 成績

岡山大学病院放射線科における1,000例の手技において成績をまとめた²⁾。肺癌診断における感度は94%、特異度99.9%、正診率95%であった。誤診のリスクとして、病変が悪性であること、病変の大きさが1.0cm以下もしくは3.1cm以上であること、病変が下葉にあること、採取された組織切片が2個以下であることが挙げられた。別の検討では、病変はすりガラス影であっても正診率は95%³⁾、8mm以下の小病変であっても96%⁴⁾

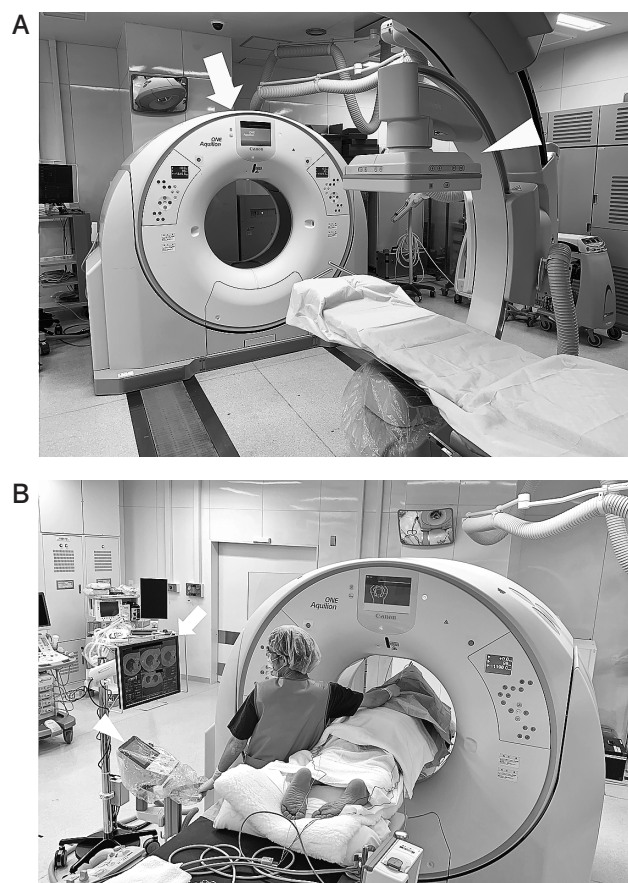


図1 岡山大学病院 IVR センターにある IVR-CT (A) と CT透視機能を用いた手技 (B)

A: IVR-CT は、CT (矢印) と血管撮影装置 (矢頭) が一体となったシステムである。CT は、撮影時にガントリが地面のレールに沿ってスライドするように設計されている (スライディングガントリCT)。B: 術者はフットスイッチを踏むことでいつでもCT撮影を行うことができる。撮影されたCT画像がリアルタイムに表示されるモニター (矢印) を確認しながら、病変へ針の刺入を行う。術者はコントローラ (矢頭) を用いてCTガントリの位置を調整することで、任意の断面のCTを撮影できる。

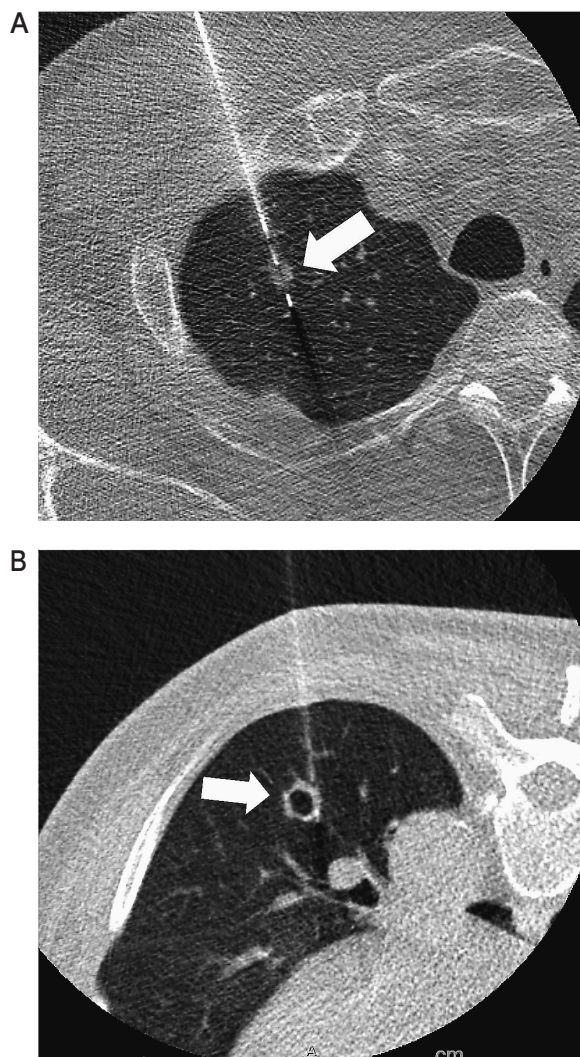


図2 CTガイド下経皮的肺生検

A：右肺上葉の6 mm 大の結節（矢印）に生検針が施入されている。生検結果は扁平上皮癌であった。B：左肺下葉の12mm 大の薄壁空洞性結節（矢印）の壁に生検針が施入されている。生検結果は扁平上皮癌であった。

と高率であった。また経気管支的生検で陰性であった病変に対しても94%の正診率で診断可能である⁵⁾。

合併症として最も多いのは気胸である。我々の検討⁶⁾では、その発生頻度は約40%であった。気胸例の約10%において胸腔ドレーン留置を要した。気胸のリスク因子としては、病変が下葉にあること、生検針の肺実質を貫く距離が長いこと、生検針が胸膜に対して斜めに刺入されていること、胸部外科手術の既往がないことが挙げられた。胸腔ドレーンを要する気胸のリスク因子としては、肺気腫があること、生検針の肺実質を貫く距離が長いことであった。したがって、胸膜に接した病変の場合、正常肺を介さずに直接病変に針を刺

入した方が気胸は発生しにくい⁷⁾。

本手技における重篤な合併症として空気塞栓症が挙げられる。空気塞栓症は、肺内の空気もしくは外気が肺静脈内に迷入し、左心から全身循環に流れることである。空気が冠動脈や脳動脈に流れると重篤となり、文献的には死亡例も報告されている。従来極めて稀な合併症とされており、単発の症例報告が散見される程度であったが、2007年に我々は初めての複数例（4例、頻度0.4%）の空気塞栓症を報告した⁸⁾。その後、我々は11施設における11年間の2,216手技で発生した10例の空気塞栓症から、空気塞栓症のリスク因子を解析した⁹⁾。その結果、手技中に肺内出血が生じること、下葉の病変への手技であること、生検針が太いことがリスクと判明した。なお、岡山大学病院放射線科において空気塞栓症による死亡例は現在（2022年5月）まで発生していない。

CTガイド下RFA

RFAは電極針に通電を行い、発生したラジオ波により病変を熱凝固壊死させる治療法である。肝癌においては超音波ガイドに広く行われているが、岡山大学病院放射線科では2001年から肺癌に対してCTガイド下のRFAを開始した。

1. 手 技

肺RFAにおいても凝固異常や出血傾向のある患者は不適応としている。それ以外にも主要臓器機能の低下が顕著な症例では不適応である。腫瘍因子としては、3 cm以上のサイズの病変では、治療効果に限界があるため、現在ほとんど行っていない。多発していることの多い転移性肺癌では、片肺3個くらいまでを治療適応の目安としている。手技は、全例入院治療で行っている。

使用する電極針であるが、初期の頃は肝癌のRFAで広く使用されている単針形状の電極針（Cool-tip針；Medtronic社）を用いていたが、現在はほとんどの症例において傘状に針が展開するタイプの電極針（LeVeen針；Boston Scientific社）を使用している（図3）。LeVeen針は、展開する傘の径が2 cm、3 cm、3.5 cmおよび4 cmと4種類あり、治療する腫瘍の大きさによって使い分けている。

我々は、手技前からフェンタニルによる鎮静を行っている。麻酔は、多くの場合局所麻酔で施行可能であるが、胸膜下の病変など焼灼中に強い痛みが予想され

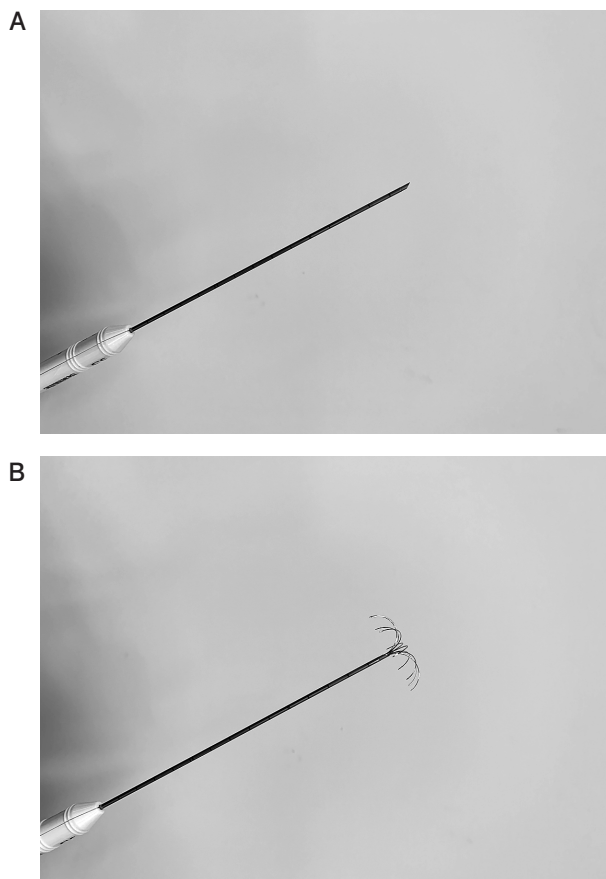


図3 展開型電極針 (LeVein)
A：展開前。単針の状態で病変に刺入する。B：展開後。病変に刺入後に針の根本にあるブランジヤを押すと針が傘状に展開する。この状態で腫瘍の焼灼を行う。

る場合は硬膜外麻酔を用いることもある。なお焼灼中の胸痛を軽減するために人工気胸を作成することも有用である¹⁰⁾。麻酔を導入後、電極針を病変内に刺入するが、その方法は上述のCTガイド下肺生検の場合と同様である。針先を病変に刺入したら、針を展開し、その後通電を行う。我々は、低電圧で開始し、徐々に電圧を上げていく通電方法をとっている。2回のroll-off（インピーダンスが無尽大まで上昇する現象）が出現するまで通電を行う。焼灼域が十分に広がるまで、必要に応じて場所を変えながら焼灼する。焼灼後はCTを撮影し、焼灼域の広がりや合併症の有無を確認する。

術後の発熱や気胸など有害事象が落ち着くまで入院にて経過観察する。

2. 成績

局所効果の評価はCTで行う。RFA直後には、治療マージンとして焼灼された腫瘍周囲の肺実質は、すり

ガラス影となり、焼灼された腫瘍を取り囲み、“目玉焼き”様の像になる。すりガラス影は収縮機転を伴いながら次第に濃厚化し、やがて腫瘍と一塊となり、治療後早期は、治療前の腫瘍よりも大きな塊として描出される¹¹⁾。その後、焼灼域は経時的に縮小を続け、最終的には帯状や索状の陰影となることが多い。局所再発の評価には、焼灼域の経時的な変化を注意深く観察することが必要である。局所再発は、焼灼域辺縁に増大する結節が出現し、認識されることが多い。局所再発病変を早期に発見できれば、再RFAで十分に救済可能である¹²⁾。

我々の初期の成績では局所制御率は1年72%、2年60%、3年58%であった¹³⁾。局所再発のリスク因子として、単変量解析では、腫瘍が大きいこと、気管支や血管と接していること、使用した電極針がCool-tip針であることであった。多変量解析では、腫瘍が大きいこととCool-tip針の使用が独立したリスク因子であった¹³⁾。その後、LeVein針のみを用いて治療した成績もまとめたが、局所制御率は、1年86%、3年76%であった¹³⁾。初期2年の局所制御率は2年65%であったが、その後の症例では85%と成績は向上しており、learning curveが示唆された¹⁴⁾。

肺癌はときに大動脈や心臓に接していることがあるが、そのような場合にRFAは実行可能であるか、また有効であるかを後ろ向きに検討した¹⁵⁾。そのような症例でもRFAは実行可能ではあったが、局所制御率は1年9%と不良で局所制御は困難であることが示された。これは大血管の血流によるcooling effectや拍動に伴う熱分散により温度が上がりにくいためと考えられる。腫瘍の種類によるRFAの局所効果の差も検討した¹⁴⁾。原発性肺癌と4種類の原発巣からの転移性肺癌（原発巣：大腸癌、腎癌、肝癌、原発性肺癌）で局所効果を比較したが、多変量解析の結果では腫瘍の種類による局所効果は有意な差はみられなかった。すりガラス肺癌に対する局所制御率においては、3年の局所制御率は78%と思ったよりも再発が多かった¹⁶⁾。

生存成績においては、我々はI期非小細胞肺癌の50例（29男、21女；平均年齢75歳；IA期38例、IB期12例）の成績をまとめた¹⁷⁾。50例の計52個の腫瘍に対して52回の治療セッションが施行された。CTCAE grade 2および3の有害事象は、12%および6%で生じた。経過観察期間の中央値は37ヶ月で、全生存率は1年94%、2年86%、3年74%、5年61%であった。疾患

特異的生存率は、1年100%、2年93%、3年80%、5年74%であった。IA期とIB期を比較したが、生存率に統計学的な有意な差はなかった。我々は岡山大学病院において臨床病期I期の非小細胞肺癌に対してRFA (n=38)、定位照射 (n=58)、部分切除 (n=193)を受けた症例の予後を後ろ向きに評価した¹⁸⁾。部分切除と比較して、RFAは入院期間は短く、重篤な有害事象もみられなかった。5年の全生存率および非再発生存率はRFAで58.9%および39.9%、定位照射で42.0%および34.9%、部分切除で85.5%および75.9%であり、部分切除において有意に予後が良好であった。しかし、交絡を調整するとRFAと部分切除、定位照射との間で有意な差はなくなった。

次に転移性肺癌についてであるが、最も頻度の高い大腸癌の肺転移において我々は84例で後ろ向き検討を行った¹⁹⁾。中央値37.5ヶ月の観察期間で、1年95%、3年65%、5年52%であった。治療前のCEA高値と治療時に肺外転移があることが予後不良因子であった。次に肝細胞癌の肺転移であるが、我々がまとめた多施設における33例のデータ²⁰⁾では、中央値14ヶ月の経過観察で、1年85%、3年52%、5年21%であった。平均生存期間は37ヶ月であった。肝内に viable な肝細胞癌があるかどうか、肝硬変かどうか、Child-Pugh grade、AFP値が有意な予後因子であった。

また、我々は5種類の原因巣からの5個以下のオリゴ肺転移の計123例のRFA症例において生存成績の比較を行った²¹⁾。原因巣は、大腸癌 [n=52]、原発性肺癌 [n=33]、肝癌 [n=16]、食道癌 [n=4]、腎癌 [n=8]であった。経過観察期間中央値46ヶ月で、5年全生存率および非再発生存率は全123例で62%および25%であった。単変量解析では、全生存率において、他の4種類の癌腫と比べて大腸癌で有意に良好で、食道癌で有意に不良であった。しかし、非再発生存率は原因巣の癌腫による有意な差はみられなかった。その他に、肉腫や頭頸部の腺様嚢胞癌からの肺転移に対してもRFAを行っている^{22,23)}。

3. 有害事象

RFAの有害事象として発熱があるが、それに対する検討も行った²⁴⁾。約20%の症例で術後に高度炎症 (CRP20以上)をきたす。焼灼域外に浸潤影が生じる、いわゆるRFA後肺炎は約40%で生じ、RFA後肺炎と高度炎症とは関連があった。いずれも閉塞性肺疾患がリスク因子であった。RFA肺炎とは別に器質性肺炎を

生じることもあり、その頻度は0.4% (3/840)であった²⁵⁾。2例はステロイドで治療され、1例では保存的に治療された²⁵⁾。

肺RFA後に生じる気胸と胸水の検討も行った²⁶⁾。気胸は約50%の頻度で生じ、そのうち胸腔ドレーン留置を要するものは約20%であった。治療後の胸水の出現頻度は約20%であった。別の研究により胸水は術中の胸膜温度と関連していることが分かったが、気胸と胸膜温度とは関連はなかった²⁷⁾。胸腔ドレーンを留置しても air leakage がなかなか止まらない病態として、気管支胸腔瘻が挙げられる。0.6%の頻度で生じたが、治療に難渋することが多い²⁸⁾。

神経、血管、横隔膜などの周囲組織の熱損傷も合併症として重要である。RFA前後の胸部レントゲン撮影を全例で見直したところ、1.3% (10/786)で治療側の横隔膜が治療後に挙上しており、横隔神経の障害によるものと思われた²⁹⁾。そのうち8例では治療した腫瘍は横隔神経が走行していると思われる部位の1 cm以内であった²⁸⁾。通常、肺RFA後には呼吸機能 (肺活量、1秒量)は治療前から平均5%ほど低下³⁰⁾する程度だが、横隔神経障害が生ずるとそれ以上に低下するので、呼吸機能の良くない患者においては特に注意が必要な合併症である。

肺尖部腫瘍を治療した場合に15% (4/26)の頻度で腕神経損傷が生じる³¹⁾。横隔膜が損傷され、横隔膜に穴があくと横隔膜ヘルニアをきたしうる³²⁾。腸管が嵌頓すれば、手術が必要となる。肺動脈近傍の腫瘍を焼灼すると、肺動脈壁損傷によると思われる偽性動脈瘤を生じることがある³³⁾。これは容易に破裂し、多量の喀血により致死的となることもある³⁴⁾。術後に焼灼域に空洞を形成し、空洞は時に破裂することもある³⁴⁾。さらに空洞内にアスペルギローマを形成することもある³⁵⁾。晚期合併症として腫瘍播種があるが、頻度は0.3%であった³⁶⁾。

おわりに

CTガイド下肺生検は、小病変であっても正診率が極めて高い検査である。現在は経気管支的生検が困難な場合に施行されることが多いが、経気管支的生検と比べて正診率が高く、しかも短時間で施行できるため、もっと積極的に施行されるようになることが期待される。肺癌に対するRFAは、長らく保険適用されていなかったため、施行する施設は限定的であったが、2021

年12月によりやく保険適用となり、更なる普及が期待される。原発性肺癌の治療においては、手術や放射線治療などの標準治療ができない患者の代替治療として、また標準治療後の再発や重複癌などの救済治療としての役割が期待される。転移性肺癌の治療においては、小病変であればRFAは部分切除術の代替治療として期待できる。これらのCTガイド下のIVRでは術者が被曝するのが欠点であるが、現在術者が遠隔操作で針を刺入でき、被曝を回避できるロボットの開発³⁷⁻⁴⁰⁾が進んでおり、2022年5月現在、医師主導治験を実施中である。

文 献

- 1) Matsui Y, Hiraki T, Gobara H, Iguchi T, Fujiwara H, et al.: Radiation exposure of interventional radiologists during computed tomography fluoroscopy-guided renal cryoablation and lung radiofrequency ablation: direct measurement in a clinical setting. *Cardiovasc Intervent Radiol* (2016) 39, 894-901.
- 2) Hiraki T, Mimura H, Gobara H, Iguchi T, Fujiwara H, et al.: CT fluoroscopy-guided biopsy of 1000 pulmonary lesions performed with 20-gauge coaxial cutting needles: diagnostic yield and risk factors for diagnostic failure. *Chest* (2009) 136, 1612-1617.
- 3) Inoue D, Gobara H, Hiraki T, Mimura H, Kato K, et al.: CT fluoroscopy-guided cutting needle biopsy of focal pure ground-glass opacity lung lesions: diagnostic yield in 83 lesions. *Eur J Radiol* (2012) 81, 354-359.
- 4) Zhao Y, Matsui Y, Hiraki T, Iguchi T, Tomita K, et al.: Computed tomography fluoroscopy-guided cutting needle biopsy of pulmonary nodules ≤ 8 mm: A retrospective study including 117 nodules. *Eur J Radiol* (2020) 125, 108903.
- 5) Matsui Y, Hiraki T, Mimura H, Gobara H, Inoue D, et al.: Role of computed tomography fluoroscopy-guided cutting needle biopsy of lung lesions after transbronchial examination resulting in negative diagnosis. *Clin Lung Cancer* (2011) 12, 51-55.
- 6) Hiraki T, Mimura H, Gobara H, Shibamoto K, Inoue D, et al.: Incidence of and risk factors for pneumothorax and chest tube placement after CT fluoroscopy-guided percutaneous lung biopsy: retrospective analysis of the procedures conducted over a 9-year period. *AJR Am J Roentgenol* (2010) 194, 809-814.
- 7) Iguchi T, Hiraki T, Matsui Y, Tomita K, Uka M, et al.: CT-guided biopsy of lung nodules with pleural contact: Comparison of two puncture routes. *Diagn Interv Imaging* (2021) 102, 539-544.
- 8) Hiraki T, Fujiwara H, Sakurai J, Iguchi T, Gobara H, et al.: Nonfatal systemic air embolism complicating percutaneous CT-guided transthoracic needle biopsy: four cases from a single institution. *Chest* (2007) 132, 684-690.
- 9) Ishii H, Hiraki T, Gobara H, Fujiwara H, Mimura H, et al.: Risk factors for systemic air embolism as a complication of percutaneous CT-guided lung biopsy: multicenter case-control study. *Cardiovasc Intervent Radiol* (2014) 37, 1312-1320.
- 10) Hiraki T, Gobara H, Shibamoto K, Mimura H, Soda Y, et al.: Technique for creation of artificial pneumothorax for pain relief during radiofrequency ablation of peripheral lung tumors: a report of seven cases. *J Vasc Interv Radiol* (2011) 22, 503-506.
- 11) Hiraki T, Gobara H, Mimura H, Toyooka S, Fujiwara H, et al.: Radiofrequency ablation of lung cancer at Okayama University Hospital: a review of 10 years of experience. *Acta Med Okayama* (2011) 65, 287-297.
- 12) Hiraki T, Mimura H, Gobara H, Sano Y, Fujiwara H, et al.: Repeat radiofrequency ablation for local progression of lung tumors: does it have a role in local tumor control? *J Vasc Interv Radiol* (2008) 19, 706-711.
- 13) Hiraki T, Sakurai J, Tsuda T, Gobara H, Sano Y, et al.: Risk factors for local progression after percutaneous radiofrequency ablation of lung tumors: evaluation based on a preliminary review of 342 tumors. *Cancer* (2006) 107, 2873-2880.
- 14) Hiraki T, Gobara H, Mimura H, Sano Y, Tsuda T, et al.: Does tumor type affect local control by radiofrequency ablation in the lungs? *Eur J Radiol* (2010) 74, 136-141.
- 15) Iguchi T, Hiraki T, Gobara H, Mimura H, Fujiwara H, et al.: Percutaneous radiofrequency ablation of lung tumors close to the heart or aorta: evaluation of safety and effectiveness. *J Vasc Interv Radiol* (2007) 18, 733-740.
- 16) Iguchi T, Hiraki T, Gobara H, Fujiwara H, Matsui Y, et al.: Percutaneous radiofrequency ablation of lung cancer presenting as ground-glass opacity. *Cardiovasc Intervent Radiol* (2015) 38, 409-415.
- 17) Hiraki T, Gobara H, Mimura H, Matsui Y, Toyooka S, et al.: Percutaneous radiofrequency ablation of clinical stage I non-small cell lung cancer. *J Thorac Cardiovasc Surg* (2011) 142, 24-30.
- 18) Iguchi T, Hiraki T, Matsui Y, Mitsuhashi T, Katayama N, et al.: Survival outcomes of treatment with radiofrequency ablation, stereotactic body radiotherapy, or sublobar resection for patients with clinical stage I non-small-cell lung cancer: a single-center evaluation. *J Vasc Interv Radiol* (2020) 31, 1044-1051.
- 19) Matsui Y, Hiraki T, Gobara H, Iguchi T, Fujiwara H, et al.: Long-term survival following percutaneous radiofrequency ablation of colorectal lung metastases. *J Vasc Interv Radiol* (2015) 26, 303-310.
- 20) Hiraki T, Yamakado K, Ikeda O, Matsuoka T, Kaminou T,

- et al.: Percutaneous radiofrequency ablation for pulmonary metastases from hepatocellular carcinoma: results of a multicenter study in Japan. *J Vasc Interv Radiol* (2011) 22, 741-748.
- 21) Omae K, Hiraki T, Gobara H, Iguchi T, Fujiwara H, et al.: Long-Term survival after radiofrequency ablation of lung oligometastases from five types of primary lesions: a retrospective evaluation. *J Vasc Interv Radiol* (2016) 27, 1362-1370.
- 22) Sato T, Iguchi T, Hiraki T, Gobara H, Fujiwara H, et al.: Radiofrequency ablation of pulmonary metastases from sarcoma: single-center retrospective evaluation of 46 patients. *Jpn J Radiol* (2017) 35, 61-67.
- 23) Iguchi T, Hiraki T, Gobara H, Fujiwara H, Matsui Y, et al.: Radiofrequency ablation of lung metastases from adenoid cystic carcinoma of the head and neck: retrospective evaluation of nine patients. *J Vasc Interv Radiol* (2015) 26, 703-708.
- 24) Masaoka Y, Hiraki T, Gobara H, Iguchi T, Fujiwara H, et al.: Fever after lung radiofrequency ablation: prospective evaluation of its incidence and associated factors. *Eur J Radiol* (2015) 84, 2202-2209.
- 25) Hiraki T, Gobara H, Kato K, Toyooka S, Mimura H, et al.: Bronchiolitis obliterans organizing pneumonia after radiofrequency ablation of lung cancer: report of three cases. *J Vasc Interv Radiol* (2012) 23, 126-130.
- 26) Hiraki T, Tajiri N, Mimura H, Yasui K, Gobara H, et al.: Pneumothorax, pleural effusion and chest tube placement after radiofrequency ablation of lung tumors: incidence and risk factors. *Radiology* (2006) 241, 275-283.
- 27) Tajiri N, Hiraki T, Mimura H, Gobara H, Mukai T, et al.: Measurement of pleural temperature during radiofrequency ablation of lung tumors to investigate the relationship to occurrence of pneumothorax or pleural effusion. *Cardiovasc Intervent Radiol* (2008) 31, 581-586.
- 28) Sakurai J, Hiraki T, Mukai T, Mimura H, Yasui K, et al.: Intractable pneumothorax due to bronchopleural fistula after radiofrequency ablation of lung tumors. *J Vasc Interv Radiol* (2007) 18, 141-145.
- 29) Matsui Y, Hiraki T, Gobara H, Uka M, Masaoka Y, et al.: Phrenic nerve injury after radiofrequency ablation of lung tumors: retrospective evaluation of the incidence and risk factors. *J Vasc Interv Radiol* (2012) 23, 780-785.
- 30) Tada A, Hiraki T, Iguchi T, Gobara H, Mimura H, et al.: Influence of radiofrequency ablation of lung cancer on pulmonary function. *Cardiovasc Intervent Radiol* (2012) 35, 860-867.
- 31) Hiraki T, Gobara H, Mimura H, Sano Y, Toyooka S, et al.: Brachial nerve injury caused by percutaneous radiofrequency ablation of apical lung cancer: a report of four cases. *J Vasc Interv Radiol* (2010) 21, 1129-1133.
- 32) Hiraki T, Gobara H, Masaoka Y, Toyooka S, Kanazawa S: Diaphragmatic hernia after percutaneous radiofrequency ablation of lung tumor. *J Vasc Interv Radiol* (2011) 22, 1777-1778.
- 33) Sakurai J, Mimura H, Gobara H, Hiraki T, Kanazawa S: Pulmonary artery pseudoaneurysm related to radiofrequency ablation of lung tumor. *Cardiovasc Intervent Radiol* (2010) 33, 413-416.
- 34) Hiraki T, Gobara H, Fujiwara H, Ishii H, Tomita K, et al.: Lung cancer ablation: complications. *Semin Intervent Radiol* (2013) 30, 169-175.
- 35) Hiraki T, Gobara H, Mimura H, Sano Y, Takigawa N, et al.: Aspergilloma in a cavity formed after percutaneous radiofrequency ablation for lung cancer. *J Vasc Interv Radiol* (2009) 20, 1499-1500.
- 36) Hiraki T, Mimura H, Gobara H, Sano Y, Fujiwara H, et al.: Two cases of needle tract seeding after percutaneous radiofrequency ablation for lung cancer. *J Vasc Interv Radiol* (2009) 20, 415-418.
- 37) Hiraki T, Kamegawa T, Matsuno T, Sakurai J, Kirita Y, et al.: Robotically driven CT-guided needle insertion: preliminary results in phantom and animal experiments. *Radiology* (2017) 285, 454-461.
- 38) Hiraki T, Matsuno T, Kamegawa T, Komaki T, Sakurai J, et al.: Robotic insertion of various ablation needles under computed tomography guidance: accuracy in animal experiments. *Eur J Radiol* (2018) 105, 162-167.
- 39) Hiraki T, Kamegawa T, Matsuno T, Sakurai J, Komaki T, et al.: Robotic needle insertion during computed tomography fluoroscopy-guided biopsy: prospective first-in-human feasibility trial. *Eur Radiol* (2020) 30, 927-933.
- 40) Komaki T, Hiraki T, Kamegawa T, Matsuno T, Sakurai J, et al.: Robotic CT-guided out-of-plane needle insertion: comparison of angle accuracy with manual insertion in phantom and measurement of distance accuracy in animals. *Eur Radiol* (2020) 30, 1342-1349.