

放射線, 低温プラズマおよび超音波によるフリーラジカル生成

名古屋大学 低温プラズマ科学研究センター

近藤 隆*

名古屋大学 未来材料・システム研究所

熊谷 純

名古屋大学・大学院工学研究科

安田 啓司

名古屋大学 低温プラズマ科学研究センター

井上 健一, 橋爪 博司, 田中 宏昌, 石川 健治, 堀 勝

Ionizing radiation, ultrasound, and low-temperature plasma are three physical factors which generate free radicals in the liquid phase or ultimately produce reactive oxygen species (ROS) in the cells for their biological action, as summarized. Radiation can induce ROS production in the liquid phase and intracellularly. Ultrasound also induces ROS in the liquid phase, but this is attributed to the occurrence of cavitation, which means more than a specified amount of ultrasound intensity (acoustic pressure). However, intracellular ROS generation due to ultrasound is unlikely due to intracellular viscosity. The low-temperature plasma induces efficiently ROS in aqueous solutions and subsequently introduces ROS intracellularly. Here, the similarities and differences between radiation chemistry, sonochemistry, and plasma chemistry are explained. Further, the evidence for free radical formation in the liquid phase and their role in the biological effects induced by ionizing radiation, ultrasound, and low-temperature plasma are discussed.

Keywords: ionizing radiation, low-temperature plasma, ultrasound, ROS, RNS

Comparison of free radical formation induced by ionizing radiation, low-temperature plasma, and ultrasound

Takashi KONDO* (*Center for Low-temperature Plasma Sciences, Nagoya University*), Jun KUMAGAI (*Institute of Materials and Systems for Sustainability, Nagoya University*), Keiji YASUDA (*Graduate School of Engineering, Nagoya University*), Ken-ichi INOUE, Hiroshi HASHIZUME, Hiromasa TANAKA, Kenji ISHIKAWA and Masaru HORI (*Center for Low-temperature Plasma Sciences, Nagoya University*),

〒464-8603 名古屋市千種区不老町

TEL: 052-788-6075, E-mail: kondou.takashi.i2@f.mail.nagoya-u.ac.jp

1 はじめに

近年, 多くの物理的因子が医学の診断・治療に応用されている。特に電磁波放射線である X 線は診断・治療に必須であり, 新たに粒子放射線である陽子, 重粒子, 中性子等もがん治療に利用され, いわゆる難治性がんでは画期的な治療成績をあげている。

プラズマもすでに治療に使われている。胃や鼻腔表面の組織凝固壊死を誘導するアルゴンプラズマを用いた熱凝固装置である。これらは熱プラズマであるが, 近年, 低温大気圧プラズマ (以下低温プラズマ) 技術の発展が目覚ましく, 多くの研究報告がなされ, 医療応用を目指した開発が進められている¹⁾。利用目的も多岐にわたり, 殺菌・滅菌, 細胞増殖制御, 遺伝子導入, 吸入療法, 止血, がん治療, 創傷治療等がある。

超音波は広く診断に利用されてきており, 加えて微小気泡の利用は造影超音波として発展し, 最近では組織の硬さを画像として表すエラストグラフィが臨床利用されている。一方, 治療への応用も進んできた。例をあげると, 理学療法からがんのハイパーサーミア治療へと利用され, その後は集束超音波治療 (High Intensity Focused Ultrasound; HIFU), 低強度パルス超音波 (Low Intensity Pulsed Ultrasound; LIPUS) を用いた治療が注目される²⁾。

これらに共通するのは放射線, 低温プラズマおよび超音波を水に照射すると水中にフリーラジカルが生成することである。しかし, その生成機序は異なり, 生成する活性種の種類も異なる³⁾。本稿では, これらの違いについて比較し, 概説する。

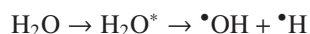
2 放射線によるフリーラジカル生成

放射線が物質中を通過すると、飛跡に沿って不連続にエネルギーを放出する。電磁波である X 線の場合には、物質との相互作用による光電子やコンプトン電子が飛跡を作る。これらの電子は飛跡の中で、電離と励起を不連続に起こす。ここで生じた一次電子は、二次電子にエネルギーを与え、直径約 2 nm の球状の中に 60 eV–80 eV のエネルギーを付与し、いくつかのイオン対（スパー）を作る⁴⁾。生体の約 80 % は水であり、生体では放射線のエネルギーの 8 割が水に吸収され、電離と励起を起こす。ここでの化学反応は Fig. 1 に示したが、初期にはスパー内に $\cdot\text{OH}$ 、 $\cdot\text{H}$ 、水和電子 (e_{aq}^-)、 H_3O^+ が生じ、さらに再結合を含めた反応が起き、 H_2O_2 、 H_2 等が生じる。これらの反応は 10^{-7} 秒という極めて短時間に起こるので、微視的には不連続な反応であっても、系全体としては均一かつ連続的な反応と思われる。

大気下の水が放射線と相互作用した場合、活性窒素 (Reactive nitrogen species; RNS) はほとんど生成しない (Table 1)。放射線は大気中または溶存している N_2 よりもイオン化ポテンシャルが低く量的にも圧倒的に多い H_2O と相互作用する。荷電粒子の場合は直接 H_2O の電子と、 γ 線や X 線の場合は 2 次電子が H_2O の電子と相互作用し、イオン化あるいは励起を起こす。励起の割合は 10 % 程度と思われる。仮に、 N_2 がイオン化されても H_2O のイオン化ポテンシャルの方が低いために H_2O に電荷移動し、 N_2 がラジカルになる機会はない。また、 N_2 の電子親和力はほぼゼロかマイナスで、まず電子を受け取ることはできない。それに比べ O_2 は電子親和力がプラスの値を持ち、電子を受け入れ O_2^- アニオンになる。 N_2 は価電子の σ 、 π 軌道がすべて満たされているので、電子を受け取る傾向も手放す傾向も小さい。したがって、 N_2 は電子親和力が小さいだけでなく、第一イオン化エネルギーも大きいことによって RNS が生成しにくい。

以下に水の放射線分解とその後の代表的反応について記載する。

水分子の励起 (Excitation)



水分子の電離 (Ionization)

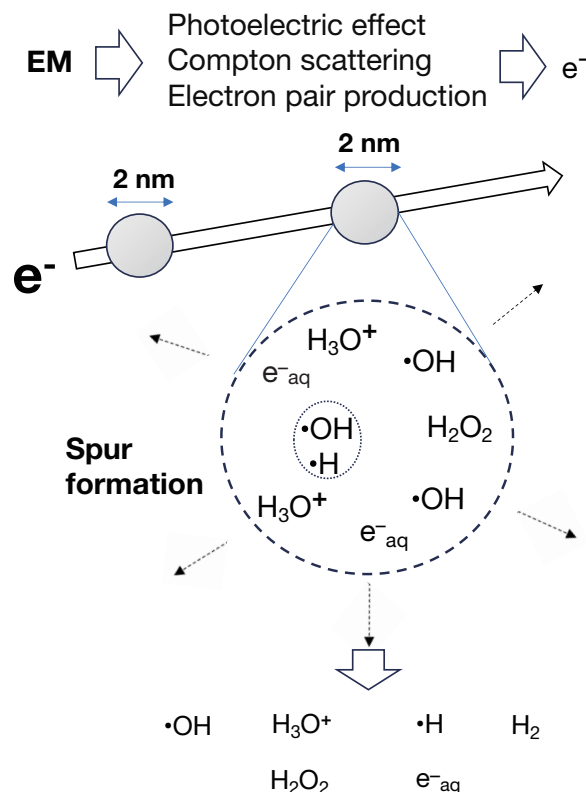
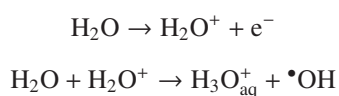
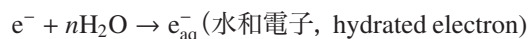
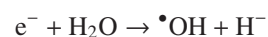
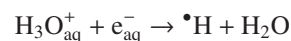


Figure 1. Free radical generation induced by ionizing radiation of photon in water. Electromagnetic wave (EM) induces photoelectric effects, Compton scattering, and electron pair production. Generated electrons and reactive species form “spur” and diffuse to be homogeneous.



イオンやラジカルの再結合 (Recombination of ions and radicals)



酸素があれば

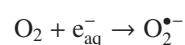


Table 1. Characteristics of ionizing radiation, low-temperature plasma, and ultrasound.

Mode	Ionizing radiation	Low-temperature plasma	Ultrasound
Energy	high (more than 0.1 keV)	low (~1 eV)	very low (less than 10^{-4} eV)
Thermal effect	very small	small	large
Mechanical effect	no	no	large
Reactive species	ROS, e_{aq}^-	ROS, RNS, e_{aq}^- , excited gas	ROS ¹ , RNS ¹
Effect of gases	large effect of oxygen ²	large ³	large ⁴
Reaction in gas phase	no	large	no
Distance dependency	small	large	large
Bio-effects of exposed Solution ⁵	none or small	very large	none or small
Effect of shape of container	none or small	very large	very large
DNA damage			
Solution	DSB<SSB	DSB<SSB	SSB<DSB ⁶
Cell	DSB<<SSB ⁷	0~DSB<<SSB	SSB<DSB

¹ Depend on occurrence of inertial cavitation.

² Oxygen effect and the maximum of oxygen enhancement ratio is 3.

³ RNS formation depends on nitrogen. Formation of ROS is inversely dependent of ionizing energy of gases.

⁴ Cavitation activity depends on the specific heat ratio of gas, γ , which is equal to c_p divided by c_v .

⁵ Plasma-treated solution contains plasma-activated medium (PAM), plasma-activated lactate solution (PAL), plasma-activated water (PAW), etc.

⁶ DSB (double strand break of DNA) is due to mechanical effects of ultrasound, and its yield is superior than SSB (single strand break).

⁷ Ionizing radiation induces ca. 1,000 SSB/cell/Gy and ca. 40 DSB/cell/Gy.

還元性活性種である水和電子や水素原子から $O_2^{\bullet-}$ が生成する。

3 低温プラズマによるフリーラジカル生成

低温プラズマとはおおむね常温常圧で生成するプラズマである。同様の意味で大気圧プラズマ, 低温大気圧プラズマ, 非平衡大気圧プラズマ, 非熱大気圧プラズマと称する場合もある。また, 使用する気体により Ar プラズマや He プラズマと称する場合もある。本条件では高電圧放電によるプラズマで生成した活性種が担体気流で急速に液相面に運ばれ溶液中に活性種が生成する。そのため気液界面の反応が重要であるとともに多量の活性種が生成する (Fig. 2)。

一例として低温アルゴン (Ar) プラズマと放射線

(X 線) の生物効果について, ヒトリンパ腫細胞株 U937 を用いてアポトーシス (細胞死) を指標に両者を比較した⁵⁾。その結果 Ar プラズマ 1 分間の照射では 15 % アポトーシスが誘発された。また, X 線では同様の効果を得るのに吸収線量で 7.5 Gy (J/kg) が必要であった。Ar プラズマと X 線により生成された代表的活性酸素種である OH ラジカルを DMPO (5,5-dimethyl-1-pyrroline-*N*-oxide) をスピン捕捉剤として用い, EPR (Electron Paramagnetic Resonance) -スピン捕捉法で定量的に比較した。Ar プラズマ 1 分間照射時の OH ラジカル量は約 5.8×10^{-5} M であった。また, X 線照射で同様の収率を得るには, 225 Gy を必要とした。したがって, 液中における OH ラジカル生成量を同じ生物学的効果 (アポトーシスが 15 % 生成する条件) で比較すると, X 線より 30 (225/7.5) 倍多

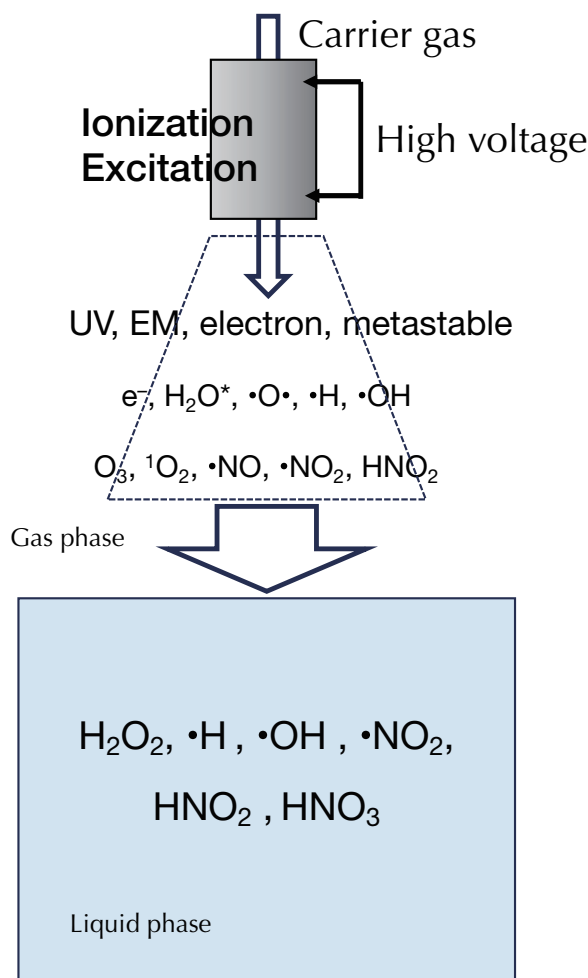


Figure 2. Free radical generation induced by low-temperature plasma. First, low-temperature plasma produces ultraviolet(UV), electromagnetic waves (EM), electrons, meta-stables, and various reactive oxygen and nitrogen species in the gas phase. Second, reactive oxygen and nitrogen species, and these reaction products are formed in the liquid phase.

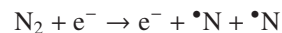
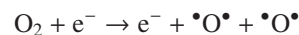
いことになる⁶⁾。同様に He プラズマについて、別なヒト白血病細胞株 Molt-4 細胞を用いても比較したが、この場合には約 24 倍多いとする結果を得た⁷⁾。これらの結果は、低温プラズマは細胞外に多量に OH ラジカルを生成するが、それらのアポトーシスへの寄与は低いといえる。一方で、低温プラズマの短時間照射により、多量の活性酸素種が水溶液中に生成可能なことは、プラズマ活性溶液の作成に効果的といえる。大気圧プラズマでは活性窒素種も生成し、生物学的にも重要な役割を担う。まず、窒素分子と電子との反応によ

り、 $N_2 + e \rightarrow e + N + N$ の反応が起きる。プラズマ領域内では、励起窒素分子 ($N_2(A)$) も生成され、気体の流れで周囲に拡がっていく過程で、酸素分子との反応 ($N_2(A) + O_2 \rightarrow NO + N + O$) で NO と N および O を生成する。さらに、 $N + O_2 \rightarrow NO + O$ でも NO は生成される。このように空気 (N_2 と O_2 の混合条件下) では、 N_2 と水表面上で、プラズマの気相反応により NO が容易に生成され、RNS が生成する。これらの反応経路の温度依存性に強く影響を受けて、ガス温度が 1000K 以上を境にして、温度が高いほど NO の生成は多くなる。解離した原子は、さらに反応 ($N + O_2 \rightarrow NO + O$, $N_2 + O \rightarrow NO + N$, $N + O \rightarrow NO$) し、生成した NO がさらに酸素と反応し、窒素酸化物 (N_2O , NO, NO_2 , NO_3 , N_2O_5 など) を生成する。NO や NO_2 は OH との反応で、水に溶解しやすい HNO_2 や HNO_3 を生成する。NO はスーパーオキシドとの反応 $NO + O_2^- \rightarrow ONOO^-$ により、細胞毒性の強いパーオキシナイトライトを生成する。以上、活性窒素種の生成は放射線にはない大気圧プラズマの重要な特徴である⁸⁾。

一般的に点線源から放出された放射線は距離の 2 乗に反比例して線量率が下がるが、気体との相互作用は小さくその線量率減少はわずかである。一方、低温プラズマでは気体との相互作用による影響は極めて大きい。Takeda らによれば、低温プラズマによる活性種生成は mm 単位の距離により変化し、プラズマジェット内では OH ラジカルや O 原子は減少し、逆に NO は増加する。さらに、ジェット外では OH ラジカルはさらに減少、消失するが、O 原子の減少程度は緩和される⁹⁾。

以下に低温プラズマを水に照射した際の気相および気液界面での代表的反応について記載する。

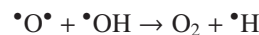
電子と水分子、酸素分子および窒素分子とが反応する。

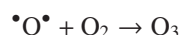


これらの再結合反応

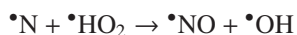
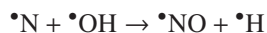


酸素原子との反応

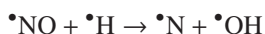




窒素原子との反応が起こる。



一酸化窒素との反応や



酸素分子との反応もある。



以上、低温プラズマの特徴として、多量の活性酸素種を生成するとともに活性窒素種を生成し、生体作用で大きな役割を果たす。

4 超音波によるフリーラジカル生成

超音波の生物影響を担う作用として、熱作用と非熱作用があり、後者はキャビテーション（空洞現象）作用と非キャビテーション作用に分類される。このうちキャビテーションは超音波の生物作用を担う特徴的作用である。これは液体や溶液中に周期的な高圧と低圧の圧力場が生じ、負の圧力が液体を維持するのに必要な力に打ち勝ったときに空洞（cavity）を生じる現象である。キャビテーションは、non-inertial（非慣性型、安定型）キャビテーションと inertial（慣性型、崩壊型、過渡的）キャビテーションとに分けられる。後者の場合、キャビテーション気泡は、周期的に変化する音圧中で断続的に膨張と収縮を繰り返した後、最終的に圧壊する。この圧壊時には、局所的に数千度という高温あるいは数百気圧の高圧が生じる。これらの極限環境は水分子を直接分解し、 $\cdot\text{OH}$ および $\cdot\text{H}$ が生成する^{10,11)}。また、キャビテーション気泡の圧壊は気泡近傍の液体にも影響し、衝撃波を発生させる等、流体力学的機械的作用を発生させる。非キャビテーション作用には、音波の伝播にともなう、放射圧、放射力、放射トルクや音響流があり、超音波作用の特徴である。

超音波による化学反応は、inertial キャビテーション

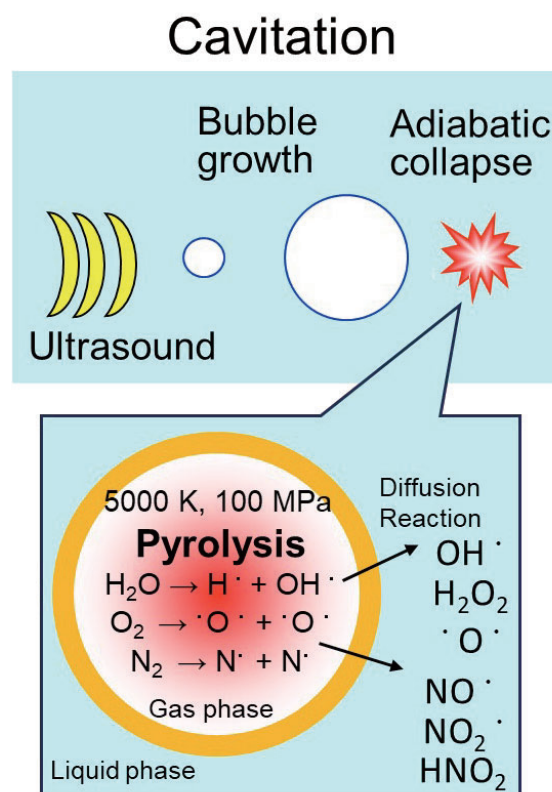


Figure 3. Free radical formation induced by ultrasound is due to inertial cavitation. Chemical reaction occurs in three regions, gas phase inside the bubble, interfacial region, and liquid phase.

気泡の生成に依存し、この気泡の 1) 中心部高温気相、2) 周囲液相と気相の中間相、および 3) 気泡周囲の液相の 3 領域で進行することが示唆されている (Fig. 3)。また、非揮発性溶質が気泡周囲に集積すれば、2) において直接熱分解され、新しいラジカル種が生成することが報告されている¹²⁻¹⁴⁾。

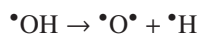
以下に超音波を水に照射した際の気相での代表的反応について記載する。

Inertial キャビテーションにともなう水分子の熱分解 (Pyrolysis) で

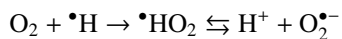
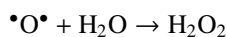
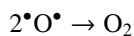
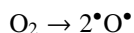


が生成する。その後、これらの再結合反応が起きる

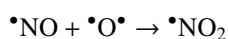
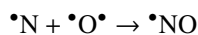
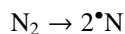




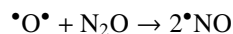
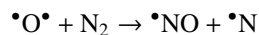
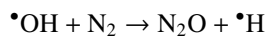
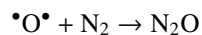
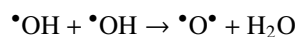
酸素存在下では以下の反応が起こる.



窒素があれば



超音波に特徴的な高温反応場では



の反応もある^{15,16}.

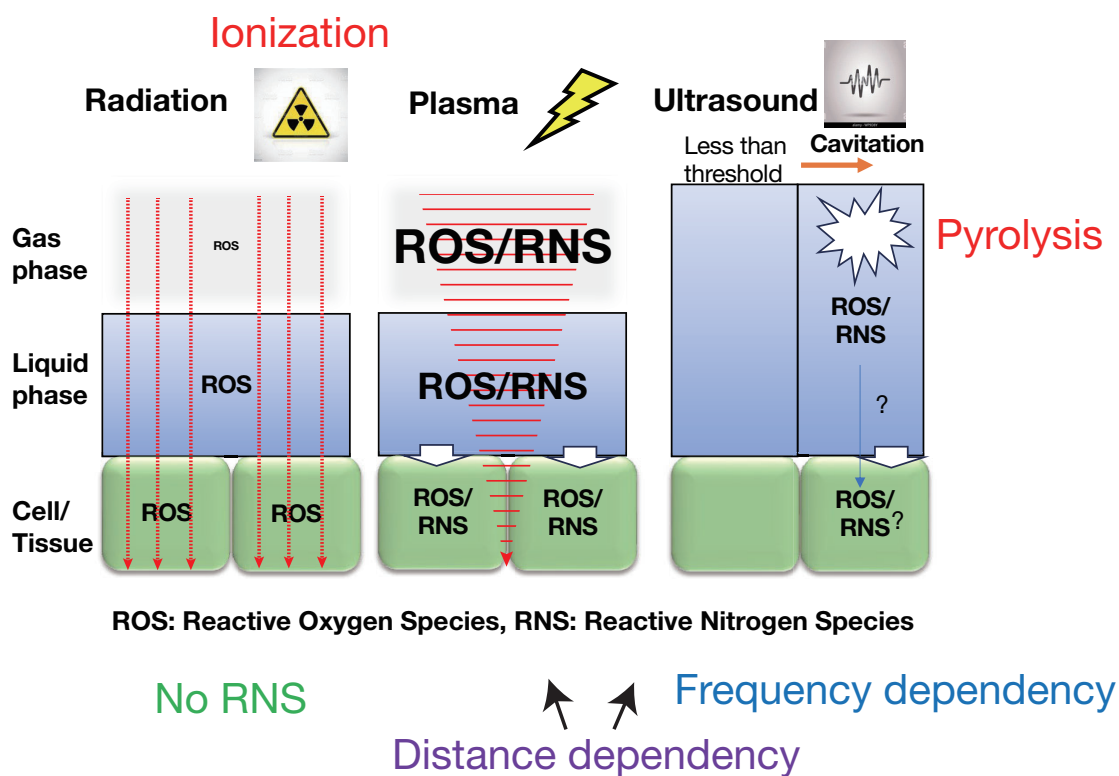


Figure 4. Summary of free radical formation induced by ionizing radiation, low-temperature plasma, and ultrasound. Free radical formation by radiation and plasma is due to ionization and excitation, and pyrolysis plays an important role in ultrasound. Reactive nitrogen species (RNS) are formed in plasma and ultrasound, but not in radiation. Free radical formation by plasma depends on distance quantitatively and qualitatively. Free radical formation by ultrasound is due to the occurrence of inertial cavitation. Therefore, no free radical was observed under the threshold.

5 放射線、低温プラズマおよび超音波によるフリーラジカル生成と生物作用

放射線、低温プラズマおよび超音波の3種の物理的因子の気相、液相および細胞内の活性酸素種の生成とその生物作用について、Fig. 4 および Table 1 にまとめた。

放射線は液相および細胞内で、励起と電離を誘発し、活性酸素種を生成する。

大気圧プラズマの場合には、相対的に多量の活性酸素が液相に生成する。プラズマ照射によって、直接どの程度の活性酸素種が細胞内にできるか今後の検討が必要であるが、多量に生成した活性酸素種の拡散および流入により、細胞内で認められても不思議ではない。大気圧プラズマによる活性酸素種生成能は発生装置、用いる担体気体に依存し、また生成機序も複雑であり、その解明は今後の課題である。

超音波は液相中に活性酸素種を生成するが、これは、キャビテーションの発生に依存するので、一定以上の超音波強度（超音波音圧として表す場合もある）を必要とする。すなわち、キャビテーション発生の音圧しきい値以下では、活性酸素種の生成は認められない。また、この音圧しきい値以上で液相中に活性酸素種が生成する場合でも、細胞組成は液相のそれと異なり、キャビテーションの発生は起こりにくいため、細胞内に活性酸素種が直接生成する可能性は低い。

生物作用を考えると、これら細胞外に生成した活性酸素種は細胞膜に作用し、また、細胞内に生成した活性酸素種はDNAやタンパク質に作用し、細胞の初期応答の原因となる。さらに経時的には細胞内小器官の機能変化を誘導する。特にミトコンドリアの変化は重要であり、二次的な細胞内活性酸素源として働き、その後の生物作用において主要な役割を果たす。たとえば、超音波では機械的作用により、また、熱作用では代謝異常を介してミトコンドリアから細胞内に活性酸素が生じる。このように、細胞内活性酸素生成は、ストレスの種類や付加後の時間によっても生成様式が異なる。今まで、放射線では $\bullet\text{OH}$ が放射線による増殖死の原因とされてきた。しかし、指標を放射線誘発アポトーシスにした場合には、 $\bullet\text{OH}$ が再結合して生成する過酸化水素が重要であることが判明した¹⁷⁾。これらの物理的因子を治療に利用する場合、より精緻な細胞内活性酸素種生成機構の解明とその制御が、今後重要となろう。なお、超音波の生物影響については機械的作用が主であり、これによりDNA損傷とその応答を誘

発することが判明した¹⁸⁾。細胞内活性酸素種と合わせた機序の解明が重要となる。

〈参考文献〉

- 1) K. Ishikawa, K. Takeda, S. Yoshimura, T. Kondo, H. Tanaka, S. Toyokuni, K. Nakamura, H. Kajiyama, M. Mizuno, M. Hori, *Free Radic. Res.*, 57 (2023) 239.
- 2) T. Kondo, Chapter 9. Application of ultrasound in medicine and biotechnology, in: F. Grieser, P.-K. Choi, N. Enomoto, H. Harada, K. Okitsu, K. Yasui (Eds.) *Sonochemistry and the Acoustic Bubble*, Elsevier, Inc, New York, 2015, pp. 207–230.
- 3) M. U. Rehman, P. Jawaaid, H. Uchiyama, T. Kondo, *Arch Biochem Biophys.*, 605 (2016) 19.
- 4) E. J. Hall, A. J. Giaccia, *Radiobiology for the Radiologists 8th edition*, Walter Kluwer, Philadelphia (2019).
- 5) Z. G. Cui, T. Kondo, L. B. Feril Jr., K. Waki, O. Inanami, M. Kuwabara, *Apoptosis* 9 (2004) 757.
- 6) H. Uchiyama, Q. L. Zhao, M. A. Hassan, G. Andocs, N. Nojima, K. Takeda, K. Ishikawa, M. Hori, T. Kondo, *PLoS One* 10(2015)e136956.
- 7) R. Moniruzzaman, M. U. Rehman, Q. L. Zhao, P. Jawaaid, Y. Mitsunashi, S. Imaue, K. Fujiwara, R. Ogawa, K. Tomihara, J.-I. Saitoh, K. Noguchi, T. Kondo, M. Noguchi, *Free Radic. Biol. Med.*, 129 (2018) 537.
- 8) K. Ishikawa, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 61 (2022) SA0802.
- 9) K. Takeda, K. Ishikawa, H. Tanaka, M. Sekine, M. Hori, *J. Phys.*, D50 (2017) 195202.
- 10) P. Riesz, T. Kondo, C. Murali Krishna, *Ultrasonics* 28 (1990) 295.
- 11) P. Riesz, T. Kondo, *Free Radic. Biol. Med.*, 13 (1992) 247.
- 12) T. Kondo, C. Murali Krishna, P. Riesz, *Radiat. Res.*, 118 (1989) 211.
- 13) T. Kondo, P. Riesz, *Free Radic. Biol. Med.*, 7 (1989) 259.
- 14) T. Kondo, C. Murali Krishna, P. Riesz, *Int. J. Radiat. Biol.*, 57 (1990) 23.
- 15) V. Misik, P. Riesz, *J. Phys. Chem.*, 100 (1996) 17986.
- 16) E. J. Hart, C. H. Fischer, A. Henglein, *J. Phys. Chem.*, 90 (1986) 5989.
- 17) T. Kondo, Chapter 1, The mechanism of radiation induced cell death and its application for cancer therapy, in T. Shimizu, T. Kondo (Eds.) *Cellular Response to*

Physical Stress and Therapeutic Applications, Nova Science Publishers, Inc. New York, 2013, pp.1.

- 18) Y. Furusawa, M. A. Hassan, Q. L. Zhao, R. Ogawa, Y. Tabuchi, T. Kondo, Ultrason. Sonochem., 21 (2014) 2061.

〈著 者 略 歴〉

近藤 隆：名古屋大学低温プラズマ科学研究センター客員教授。愛知県幸田町出身，福井医科大学医学部助手（この間，米国 NIH 国立がん研究所放射線腫瘍学部門留学），神戸大学医学部講師を経て1997年より富山医科薬科大学医学部放射線基礎医学講座教授，その後統合により富山大学大学院医学薬学研究部教授，2015年同学長補佐，2019年同特別研究教授，2022年より現職。日本ハイパーサーミア学会阿部賞，アジアハイパーサーミア腫瘍学学会賞，日本超音波医学会菊池賞，同松尾賞，日本放射線影響学会賞，放射線影響研究功績賞，日本ソノケミストリー学会賞，同功績賞等受賞。

熊谷 純：名古屋大学未来材料・システム研究所准教授，北海道函館市出身。1995年米国ヒューストン大学博士研究員，1997年日本原子力研究所先端基礎研究センター博士研究員，1998年名古屋大学工学研究科助手，2001年同講師，2004年同助教授，2007年同准教授，2013年同エコトピア科学研究所准教授，2015年より現職。専門：放射線化学。趣味：音楽鑑賞。

安田 啓司：名古屋大学大学院工学研究科准教授。1997年名古屋大学大学院工学研究科博士課程修了，名古屋大学大学院工学研究科助手を経て，2008年より，現職。2014年永井科学技術財団学術賞等受賞，2023年環境大臣表彰者 地域環境保全功労者表彰。専門：超音波工学，化学工学。趣味：ウォーキング。

井上 健一：名古屋大学低温プラズマ科学研究センター研究員。1993年東京都生まれ，2018年–2019年民間企業勤務の後，2022年東京大学大学院新領域創成科学研究科博士課程修了，同大学にて学振特別研究員（PD）を経て，2023年より現職。専門：プラズマを用いた材料表面改質プロセス研究。

橋爪 博司：名古屋大学低温プラズマ科学研究センター

特任講師。2001年名古屋大学大学院生命農学研究科博士前期課程修了（修士（農学）），2011年名古屋市立大学薬学研究科博士後期課程修了（博士（薬学）），名城大学理工学部博士研究員，2014年名古屋大学特任助教，2022年より現職。専門：低温プラズマの農業応用研究。

田中 宏昌：名古屋大学低温プラズマ科学研究センター教授。1976年愛知県幸田町生まれ，1999年東京大学理学部物理学科卒業，2004年同大学院理学系研究科物理学専攻博士後期課程修了（博士（理学）），2004年米国カリフォルニア大学アーヴァイン校イ研究室，2010年カナダトロント大学ブーンおよびモファット研究室，ポストドクトラル研究員，2011年名古屋大学大学院工学研究科附属プラズマナノ工学研究センター研究員，2014年同未来社会創造機構特任講師，2017年特任准教授，2019年同低温プラズマ科学研究センター准教授，2019年教授，現職にいたる。第23回プラズマ材料科学賞奨励部門賞，Young Scientist Award，The 10th Asian-European International Conference on Plasma Surface Engineering (AEPSE2015)，第8回わかしゃち奨励賞優秀賞，Plasma Science Award，11th Asia-Pacific Conference on Plasma Science and Technology，25th Symposium on Plasma Science for Materials。専門：プラズマ生命科学。

石川 健治：名古屋大学低温プラズマ科学研究センター教授。民間企業の研究所勤務を経て，2006年東北大学より博士（工学），2009年より名古屋大学プラズマナノ工学研究センター特任准教授，2018年に九州大学プラズマナノ界面工学センター特任教授を経て，2021年より現職。専門：プラズマプロセッシングにおけるプラズマと表面の相互作用，プラズマ誘起ラジカル電子スピン共鳴による検出，第11回プラズマエレクトロニクス賞等受賞。

堀 勝：名古屋大学低温プラズマ科学研究センター特任教授。1958年岐阜県岐阜市生まれ。1981年早稲田大学理工学部電子通信学科卒，1983年同大学理工学研究科修士課程修了，1986年名古屋大学大学院工学研究科電子工学専攻博士課程修了（工学博士），1986年（株）東芝総合研究所，1992年名古屋大学助手，1994年講師，1996年助教授，1997年ケンブリッジ大学客員研究員，2004年教授，2009年名古屋大学工学研究科附属プラズマナノ工学研究センター長，

2013 年同大学プラズマ医療科学国際イノベーションセンター長、2019 年同大学低温プラズマ科学研究センター長、2024 年より現職。文部科学大臣表彰・科学技術賞（2010 年）、産学官連携功労者科学技術政策担当大臣賞（2011 年）、プラズマ材料科学賞（12 年）、応用物理学会フェロー表彰（2012 年）、The Plasma Medicine Award（2018 年）、K-T Rie Award（2019 年）、AAPPS-

DPP Plasma Innovation Prize（2020 年）、DPS Nishizawa Award（2021 年）、Reactive Plasma Award（2022 年）、紫綬褒章（2022 年）、中日文化賞（2023 年）、応用物理学会業績賞（2024 年）等。専門：低温プラズマ科学とその応用、趣味：スキー、園芸。