

平成25年度エンライトニングセミナー 若手プレゼンテーション 優秀賞紹介

(2013年7月5、6日開催 日本アイソトープ協会 ライフサイエンス部会、理工学部会主催)

γ 線によるがん細胞の 上皮間葉移行 (EMT) 誘導への TRP チャネル活性化の関与

佐々木 理恵

Sasaki Rie

(東京理科大学大学院 薬学研究科)



1 背景・目的

放射線治療は、細胞に対する放射線の傷害作用を利用してがん組織を消滅させたり増殖を抑えることができ、臨床での有効性からも信頼のおかれているがん治療法の1つである。一方で、正常組織の炎症、線維化、周辺組織の腫瘍化といった有害な副作用も報告されている。さらに、放射線から逃れたがん細胞は悪性度を増し、転移能や浸潤能が増強するといった実験例もある。

その根底にあるメカニズムとして上皮間葉移行 (Epithelial-Mesenchymal Transition: EMT) が挙げられる。EMTとは、上皮細胞が間葉細胞へと変化し、遊走能や浸潤能を獲得する形態形成プログラムであり、細胞間結合の融解やアクチンなどの細胞骨格の再構築、細胞運動性の向上などを伴う。生理学的な機能としては、胚発生、組織の再生の促進や再構築、又は様々な病理的傷害に対する修復など、重要な役割を担っている。その一方で、病態生理学的なEMTは上皮癌による転移能の獲得を仲介する一面を持っている。

EMTにおける重要な修飾因子として、細胞や組織において増殖や分化を制御しているトランスフォーミング増殖因子 β 1 (transforming

growth factor- β 1: TGF- β 1) があり、がん細胞の増殖・浸潤・転移を促進することが報告されている。放射線によるEMT誘導にもTGF- β 1が関与する可能性が指摘されているが、そのメカニズムはいまだ明らかでない。

当研究室ではごく最近、放射線照射後のDNA損傷修復にTRPM2及びTRPV1チャネルが関与することを明らかにした。TRPチャネル (transient receptor potential channel) とは、温度変化、機械刺激、浸透圧、痛み、フェロモン、pH変化、酸化ストレスなどの刺激により活性化されるカチオンチャネルであり、細胞におけるセンサータンパク質として機能する。莫大な機能的多様性を有するイオンチャネルファミリーを成しており、TRPC、TRPP、TRPV、TRPM、TRPML、TRPAの6つのサブファミリーに分類される。これらは、様々ながん細胞における発現が認められており、上皮癌の形成や進行のほか、増殖やアポトーシス、浸潤・転移などにも関与するといった報告がある。このようにTRPチャネルの生理的機能は多岐にわたると考えられている。

そこで本研究では、ヒト肺基底上皮腺癌細胞であるA549細胞を用いて、放射線によるがん細胞のEMT誘導と、TGF- β 1シグナルや

TRP チャンネルとの関連を解明することを目的として検討を行った。

2 結果

A549 細胞に 2 Gy の γ 線を照射したところ、紡錘状の形態や仮足の形成といった EMT 様の変化がみられた。臨床での放射線治療では、1 回当たり数 Gy という線量を用いられることや、また細胞へのダメージを考慮し、本実験では 2 Gy の線量を用いることにした。

次に細胞遊走能の変化について、transwell chamber を用いて検討を行ったところ、 γ 線照射及び TGF- β 1 の添加によって遊走能は有意に亢進された。また、細胞骨格を形成し運動に関与するアクチンについて、Rhodamine-Phalloidin 染色を用いて観察を行ったところ、 γ 線の照射によって繊維状アクチンの形成がみられた。そこで、TGF- β 1 受容体阻害薬である SB431542 を処置した結果、細胞運動能の低下が認められた。また、ELISA 法を用いて細胞培養上清中 TGF- β 1 濃度を測定したところ、 γ 線照射による上清中 TGF- β 1 濃度の有意な増加が認められた。以上の結果より、 γ 線による細胞遊走に TGF- β 1 シグナルが関与していることが示唆された。

次に、TRPM2 及び TRPV1 チャンネルと γ 線誘導 EMT との関連性を検討した。TRPV1 チャンネル阻害薬である CPZ (capsazepine) の処置、及び siRNA の細胞内導入による本チャンネルの発現抑制によって、EMT に伴う細胞遊走とアクチンリモデリングは有意に抑制された。一方、TRPM2 チャンネル阻害薬である DPQ (3, 4-dihydro-5-[4-(1-piperidinyl)butoxy]-1(2H)-isoquinolinone) の処置では、 γ 線による運動能の増加に変化は認められなかった。そこで、TRPV1 チャンネルのアゴニストである CPS (capsaicin) を添加したところ、細胞遊走やアクチンリモデリングがより促進された (図 1)。

これらの結果より、 γ 線による EMT 誘導には TGF- β 1 に加え、TRPV1 チャンネルの活性化

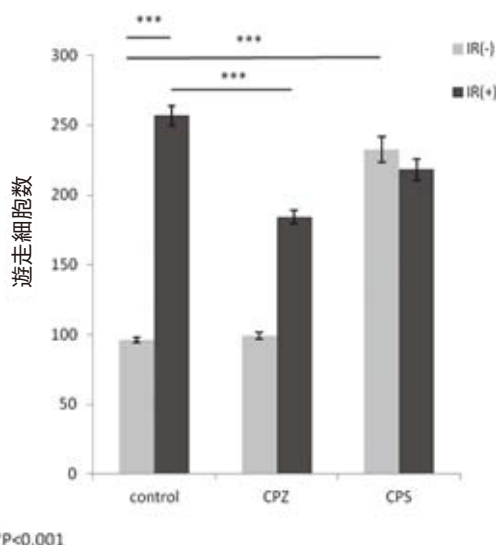


図 1 TRPV1 活性化による遊走能の亢進

が関与していることが示唆された。

3 考察・展望

γ 線による EMT 誘導に伴う細胞遊走は、TGF- β 1 シグナル経路を介して引き起こされる可能性が示唆された。TGF- β 1 は、細胞や組織の発展、分化、生存を制御している多機能サイトカインであり、がん細胞においても浸潤・転移を促進させる EMT の重要な制御因子であることが既に明らかとなっている。しかし、TGF- β 1 による EMT 誘導過程における、詳細な分子機構についてはいまだ議論の余地があり、様々なシグナル経路が考えられているが、その 1 つに Smad 経路がある。TGF- β 1 シグナルによって細胞内シグナル伝達因子である Smad2/3 がリン酸化され、EMT 関連因子が誘導されると考えられている。また一方では、PI3K や Ras-MAPK, RhoA などが関与する non-Smad 経路も示唆されている (図 2)。

放射線による EMT 誘導についても、TGF- β 1 シグナル伝達経路のみならず、non-Smad シグナル伝達経路についても今後検討していく予定である。

今回の結果から TGF- β 1 に加えて TRPV1 チャンネルの活性化と細胞遊走との関連が示唆された。TRPV1 チャンネルは、先に述べたようにカプサイシンや熱 ($\geq 43^{\circ}\text{C}$)、酸化ストレスなどにより活性化される非選択的カチオンチャンネルであり、炎症メディエーターである ATP や PGE2 の存在下において、活性閾値が低下することが知られている。

放射線による TRPV1 の活性化経路については明らかではないが、放射線が産生する ROS による酸化ストレスや、ATP 放出による活性閾値の低下などが関与している可能性も考えられる。しかし、EMT 誘導における TGF- β 1 と TRPV1 チャンネルの関連性につ

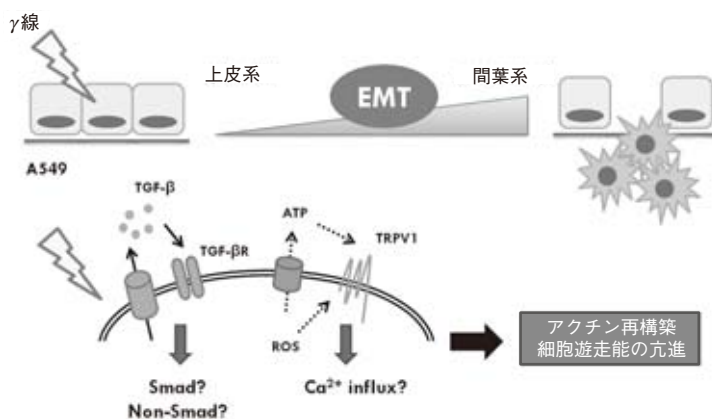


図2 放射線による EMT 誘導メカニズム

いてはまだまだ明らかではない。今後、これらのシグナル経路を含め、放射線による EMT 誘導に関与する因子をさらに検討し、がんの転移・浸潤メカニズムを解明していく予定である。

核内機能性 non-coding RNA の分解に関与する RNA 結合タンパク質 PUM1 の機能解析



秋月 源

Akizuki Gen

(東京大学大学院 薬学系研究科)

1 はじめに

RNA の量的制御は遺伝子発現制御の基盤となっており、適切な細胞機能の発現や調節の上で重要な制御ポイントとなっている。近年、タンパク質に翻訳されない RNA である non-coding RNA (ncRNA) が発見されてきている。

ncRNA は長さによって大きく2つに分類される。1つは、small ncRNA であり、代表例として micro RNA が挙げられる。もう1つは、long ncRNA であり、200 bp 以上のものを指す。

特に核内 long ncRNA は、近年特徴的かつ重要な生理的役割を有することが明らかになってきた。ncRNA は、それ自身が機能を持つため、その機能制御には ncRNA の量的制御がより重要になる。

細胞内において、RNA の発現量は「転写」と「分解」のバランスによって調節されている。このうち、核内 ncRNA の「転写」は mRNA と同様に、ゲノムである DNA から RNA ポリメラーゼ II によって転写されること

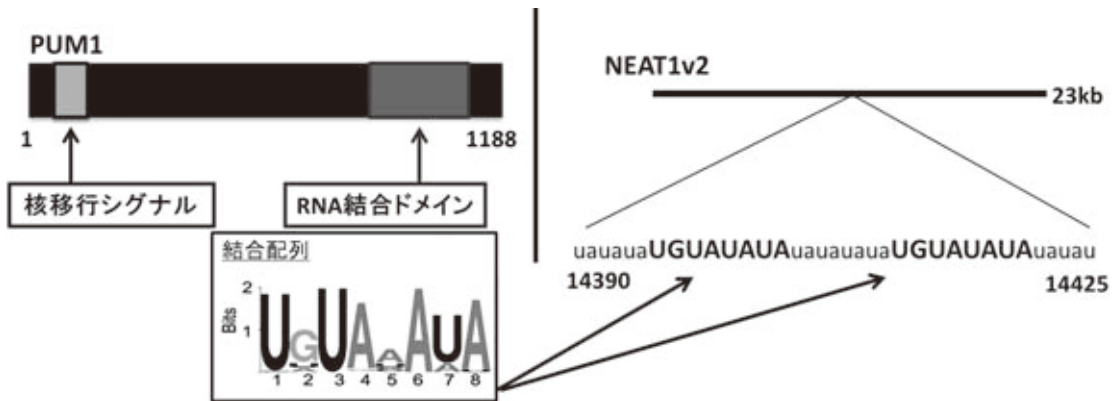


図1 PUM1のモチーフとNEAT1v2内の結合配列

から mRNA の知見が応用できる。

しかし、「分解」については mRNA が細胞質で分解されるのに対して、核内 ncRNA は核質で分解を受けている。よって、核内 ncRNA の分解段階はそれ独自の分解機構があると予測できる。

現時点では、核内における ncRNA 分解機構のメカニズムはほとんど分かっていない。ここで、RNA 分解では標的 RNA の認識を担う RNA 結合タンパク質が中心的役割を担っていると考えられるため、核酸結合ドメインを有するタンパク質を標的とする shRNA 発現ライブラリーを用いて、各遺伝子を系統的かつ網羅的に発現抑制し、核内機能性 ncRNA の分解に寄与する RNA 結合タンパク質の同定を試みた。

2 結果及び考察

shRNA 発現 vector を Hela 細胞に導入することで、約 900 種のタンパク質を系統的に発現抑制するスクリーニングを行った。その結果、発現抑制すると NEAT1v2 の発現量が 9.7 倍に増加する遺伝子として PUM1^{*1} を見いだした。NEAT1v2 はパラスペクルという核内構造体形成の必須因子である。パラスペクルは DNA 修復を行う因子などが局在しており、放射線照射によって受ける DNA 障害に応答すると考えられる。よって、パラスペクルの必須

構成因子である NEAT1v2 の量的制御に関与する PUM1 を解析することが重要となってくる。

PUM1 は細胞質において、mRNA の 3'UTR に結合し、その標的 mRNA の分解制御や翻訳調節をすることが報告されているが、核内 ncRNA に対する役割は全く不明である。

核内 long ncRNA である NEAT1v2 の分解に PUM1 が関与するという結果より、細胞質に局在する PUM1 の一部は核内にも存在するのではないかと考え、モチーフ解析を行った。

その結果、PUM1 の N 末、6~50 アミノ酸に核移行シグナルがあると予測され、PUM1 が核内にも存在すると予想された。

さらに、PUM1 の RNA 結合配列 (UGUAUAUA) が報告されているが、コンピューターサーチの結果、NEAT1v2 の配列中に 2 つタンデムにコードされていることが確認された (図 1)。

*1 PUM1 (pumilio homolog 1)

酵母から哺乳類まで広く保存されたタンパク質。胚発生、細胞分化時において標的を mRNA の 3'UTR に結合し、その標的 mRNA の分解制御や翻訳調節をしている¹⁾。

PUM1 自身は RNase 活性を有していないので、細胞質においては CNOT (CCR4-NOT) というデアデニラーゼとコンプレックスを作り、標的 mRNA の分解に関与している^{2,3)}。

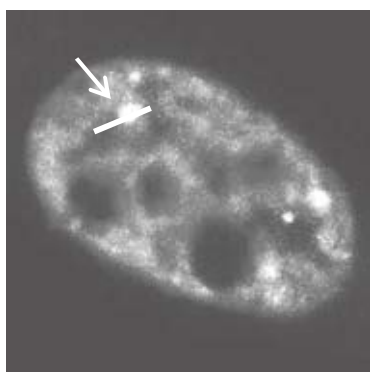


図2 核の FISH 画像

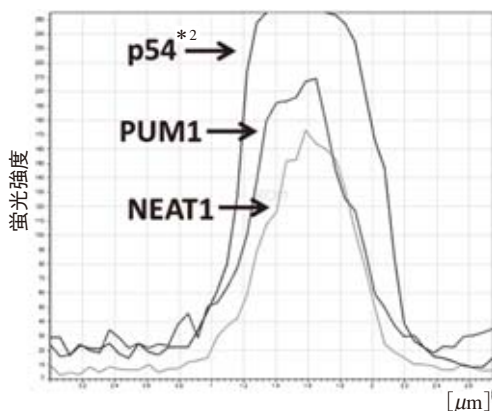


図3 図2の線上での各蛍光強度

そこで、核内の PUM1 が NEAT1v2 と結合し共局在しているのではないかと考え、RNA-FISH 法及び IF 法を用いて共焦点顕微鏡で PUM1 の局在を検討した。

その結果、NEAT1v2 を中心に形成されているパラスペckルに PUM1 も局在することが分かった (図 2, 3)。

以上の結果から、核内 PUM1 は NEATv2 と共局在し、その分解に関与していることが示唆された。

*2 p54 (NoNo)

パラスペckルを構成するタンパク質の1つ。転写、選択的スプライシングなど、様々な核内イベントに関与している⁴⁾。

3 今後の展開

この PUM1 による NEAT1v2 発現量調節が RNA 分解段階にあるかを再確認するため当研究室において開発された、修飾核酸 5'-Bromo-Uridine を用いた *in vivo* パルスラベル法を利用した新規 RNA 分解速度測定法 (BRIC 法)¹⁾ によって、RNA の分解速度の測定を調べる。また、PUM1 と NEAT1v2 が直接結合していることを RIP 法で検証する。

PUM1 は RNA 分解酵素活性を持たないので、核内において RNA 分解酵素と相互作用することが必須であると考えられる。そこで、核内 RNA 分解酵素複合体である EXOSOME と PUM1 が相互作用するかを免疫共沈降実験法で検証する。

加えて、PUM1 による NEAT1v2 発現量変動がどのような生理的意義を持つのかを、放射線などのストレス刺激を網羅的に解析し、PUM1 がどのように NEAT1v2 の安定性及びパラスペckル形成に影響を与えているかを検証していきたい。

【謝辞】

本研究を進めるに当たり、終始適切な助言を賜り、丁寧にご指導して下さった指導教員、東京大学アイソトープ総合センター研究開発部門、秋光信佳准教授に感謝いたします。

また本研究を行うに当たり、ご協力して下さった東京大学理学系研究科の程久美子先生、議論を重ねて下さったアイソトープ総合センターの研究室のメンバーに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Imamachi, N., *et al.*, BRIC-seq: A genome-wide approach for determining RNA stability in mammalian cells, *Methods*, **S1046-2023**(13), 00263-00266 (2013)
- 2) Spassov, D.S., *et al.*, Cloning and comparative sequence analysis of PUM1 and PUM2 genes, human members of the Pumilio family of RNA-binding

- proteins, *Gene*, **299**, 195–204 (2002)
- 3) Van Etten, J., *et al.*, Human Pumilio proteins recruit multiple deadenylases to efficiently repress messenger RNAs, *J Biol Chem*, **43**, 36370–36383

- (2012)
- 4) Shav-Tal, Y., *et al.*, PSF and p54 (nrb)/NonO-multi-functional nuclear proteins, *FEBS Lett*, **531** (2), 109–114 (2002)

トレーサ実験による栽培キノコの放射性セシウム移行の研究



入澤 歩, 他*
Irisawa Ayumi
(東北大学大学院 理学研究科)

1 はじめに

キノコ子実体への放射性のセシウム (Cs) 濃縮は 1960 年代に大気圏内核実験のフォールアウトが問題になった頃から指摘され¹⁾, 1986 年のチェルノブイリ原子力発電所事故以降はヨーロッパを中心に数多くの報告がなされてきた^{2,3)}。今回の福島第一原子力発電所事故後もキノコへの放射性セシウム濃縮が報告され, 食品への汚染が危惧された。例えば我々の宮城県内の自生キノコの測定からも⁴⁾, 厚生労働省の出荷制限基準値以上となるような放射能濃度を持つものが見付かった。東北地方のキノコ栽培においては, 福島県産の広葉樹オガコを用いることが多かったために, 濃縮率の高い品目を栽培した際, 出荷制限の規制を受けるのではないかと生産者側にも大きな不安が広がった。

そのため, 我々は生産者が安心して生産できるような, 栽培キノコにおける放射性セシウム移行率を極限まで抑える栽培技術の開発を行っている。これまでに検討を行った品目は, ナメ

コ, エリンギ, アラゲキクラゲ, シイタケ, ブナシメジである。菌床栽培条件を様々に変え, 200 組程度の移行係数を算出・比較し, それぞれのキノコについて栽培最適条件を検討している。培地の調製及びキノコの栽培は株式会社キノックスで行い, トレーサを用いた実験全般, 試料作成と放射能測定は東北大学で行った。

2 実験結果と考察

2.1 培地への添加剤の検討

表 1 に 100 Bq/kg 程度の混合培地を用いて 850 ml 菌床ポット (シイタケは 1.2 kg 袋菌床) 栽培を行った際のそれぞれのキノコの移行係数を示す。栽培は同条件のポット複数個で行い, 得られたキノコ子実体を合計し粉碎, 均一化した後に U8 容器に詰めて Ge 半導体検出器で放射能を測定した。移行係数はキノコ子実体の放射性セシウム (^{134}Cs , ^{137}Cs) 合計濃度 (Bq/kg, 生重量) を培地の放射性セシウム合計濃度 (Bq/kg, 乾重量) で除した値とした。なお, 培地の乾重量は含水率を 12% としたときの値に換算している。また, 今回の測定データはそれぞれの組の培地調製時に壊変補正をして移行係数を算出した。 ^{134}Cs , ^{137}Cs 放射能比は 2011

* 木野康志 (東北大学大学院理学研究科)
鳴原 隆, 木村栄一 ((株)キノックス)
関根 勉 (東北大学高等教育開発推進センター)

表1 菌床栽培キノコの移行係数とその統計誤差
収穫した子実体を混合、粉砕し均一化した後測定を行った

	ナメコ	アラゲキクラゲ	エリンギ	ブナシメジ	シイタケ
栽培ポット数	12	12	8	8	25
移行係数	0.71±0.08	0.093±0.008	0.18±0.014	0.11±0.01	0.58±0.04

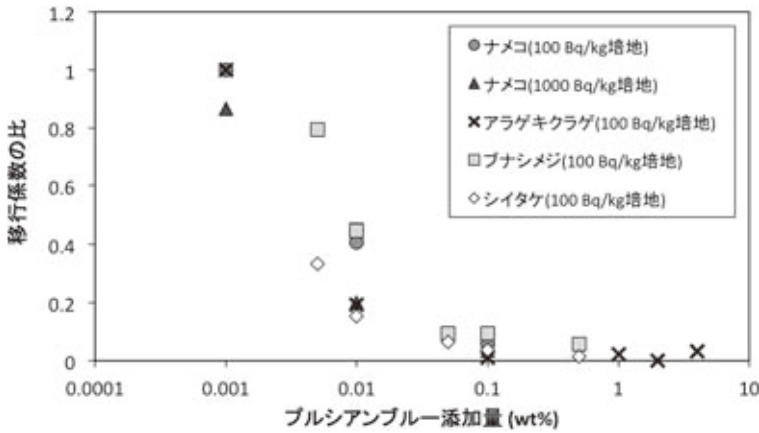


図1 プルシアンブルー添加栽培時の移行係数の比

年3月の放出時に壊変補正するとほかの報告と同様の約1:1であった。

表1の値から、キノコの種類により移行係数は大きく異なることが分かる。

移行係数の低減方法としては、培地中にカリウムのようなキノコのセシウム吸収と競合する物質を添加する方法、また、培地中にプルシアンブルーやゼオライトのようなセシウム吸着材を加える方法が挙げられる。

図1に培地に通常の栄養材とともにセシウム吸着材としてプルシアンブルーを加えた際の移行係数の比を示した。縦軸は、添加条件での移行係数を表1の移行係数で除した数値、横軸は添加量を対数表示した。ナメコに関しては100 Bq/kgの培地、1,000 Bq/kgの培地の2種類を用いて同様の栽培を行った。培地放射能濃度に関係なくプルシアンブルー添加量を増やすことにより移行係数が低下していることが分かる。しかし、添加量を増やすとキノコの生長が阻害

され、1%以上の添加ではほとんど子実体が形成されなかったため、添加量のバランスが重要である。一方、アラゲキクラゲ、ブナシメジ、シイタケでも、プルシアンブルー添加により移行係数の低下が見られ、かつ、少なくとも0.5%以下の添加量では、添加量に対して収量の変化はほとんど見られなかった。

2.2 トレーサ実験

取り込み機構を調べるため複数の放射性核種を含むトレーサ (^{137}Cs , ^{22}Na , ^{152}Eu) を用いた移行実験を行った。菌糸の蔓延したエリンギ菌床栽培ポット表面を菌掻きし、露出させた培地表面から全長の半分程度の深さ7 cmの地点にトレーサをそれぞれ約1,000 Bqずつ含んだ水溶液を合計1 ml注入し10日間育成を行った。

育成後、エリンギの柄を水平方向及び垂直方向にスライススライミングプレートで濃度分布を観測したところ、ほぼ均一であった。それぞれの核種の濃度を測定すると、移行係数の比は $^{137}\text{Cs} : ^{22}\text{Na} = 1 : 1.4$ 、一方、Euの移行は見られないという結果が得られ、今回の条件では化学的に明らかに挙動の異なる ^{152}Eu だけでなく、同じアルカリ金属元素である ^{137}Cs と ^{22}Na でもわずかに差が見られた。キノコのセシウム蓄積機構の1つとして、ある種のキノコは多座配位子となり得る成分を含んでおり、それがセシウムと錯形成するという報告がある⁵⁾。また、

これとは別に我々は自生キノコの採取と測定も行っており、その中で稀に ^{110m}Ag を濃縮している種があった。それらはまた違った成分や機構による濃縮を行っていると考えられるため、複数の元素のトレーサ実験を行い分析することで微量元素の濃縮機構解明の一助となる可能性がある。

また、今回の実験での ^{137}Cs 移行は、培地への注入量と最終的に子実体に含まれていた ^{137}Cs を比較すると、注入量の20%程度が移行していたことが分かった。一方、汚染オガコを用いたエリンギ菌床栽培では計算すると全放射性セシウム量に対し5%程度の移行であった。ポット内のRI分布の違いも今後検討していく必要があるが、エリンギへの移行について、菌糸が木材を分解するとはいえ、オガコからの水分中へ溶け出すセシウム量が大きく効いている可能性がある。そこで栽培前のオガコの水洗処理を検討した。オガコの除染効率は今後木材中の放射性セシウム分布の移行に伴って変化すると考えられる。しかし、全ての除染はできなくとも、溶けやすい状態の放射性セシウムが流れるため見掛けの除染量よりも大きな効果が上げられると期待される。除染後のオガコを用いた実証実験を今後行っていく予定である。

3 まとめ

栽培キノコにおける放射性セシウム移行係数低減を目的とし、トレーサ実験及びプルシアンブルー添加条件の検討、オガコの除染実験を行った。これらの結果を組み合わせることで、比較的放射能濃度の高いオガコを原料としても非常に放射性セシウム含量の低い安全なキノコの栽培が可能となると考えられる。

【謝辞】

本研究は平成24年度JST復興促進プログラム「キノコ栽培における放射性汚染物質の移行率低減技術の開発」の助成を受けました。感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Grüeter, H., *Naturwissenschaften*, **51**, 161-162 (1964)
- 2) Duff, M.C. and Ramsey, M.L., *J. Environ. Radioactivity*, **99**, 912-932 (2008)
- 3) Yoshida, S. and Muramatsu, Y., *RADIOISOTOPES*, **46**, 450-463 (1997)
- 4) Irisawa, A., Kino, Y., and Sekine, T., *Proc. 13th Workshop Environmental Radioactivity*, (In press)
- 5) Aumann, D.C., Clooth, G., Steffan, B., and Steglich, W., *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, **28**, 453-454 (1989)

福島第一原子力発電所事故起源の放射性ヨウ素同位体比の推定

三宅 泰斗

Miyake Yasuto

(東京大学大学院 工学系研究科原子力国際専攻)



1 緒言

2011年3月に生じた福島第一原子力発電所事故により、多量の放射性物質が環境中に放出

された。その中でも、 ^{131}I は事故後高い放射能を持ち、人々の甲状腺癌の原因となり得るため注意すべき核種の1つである。しかし、 ^{131}I は

半減期が約 8 日と短いため、事故後数か月で測定することができなくなってしまう。一方で、同じ核分裂生成物である ^{129}I は ^{131}I と同位体であるため、化学的に同一の挙動を示すと考えられる。さらに、半減期が 1,570 万年であり、今後も測定可能なので、事故時の ^{131}I との同位体比を知ることができれば、 ^{129}I を測定することで、 ^{131}I の事故当初の分布を再構築ができると考えられる。

福島第一原子力発電所事故では、事故後早期に原子力発電所周辺から土壌が採取され、 ^{131}I や ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 等の放射能が測定された¹⁾。これらの試料中の ^{129}I を測定すれば、事故時の放射性ヨウ素同位体比 ($^{129}\text{I}/^{131}\text{I}$ 比) を推定することが可能である。以上から、本研究では、福島第一原子力発電所周辺から採取され、 ^{131}I が既に測定された土壌について、加速器質量分析法 (Accelerator Mass Spectrometry, AMS) により ^{129}I を測定し、事故時の ($^{129}\text{I}/^{131}\text{I}$) 比を推定した。

2 実験方法

2.1 加速器質量分析 (AMS) について

AMS とは、加速器を組み込んだ質量分析法であり、通常の質量分析では不可能な同重体の分離ができ、極微量の長半減期の放射性同位体を高感度に検出することが可能である。AMS で得られるのは、極微量な放射性同位体と安定同位体の同位体比であり、 ^{129}I を測定する場合には、 ^{129}I と ^{127}I の同位体比を測定することになる。 ^{129}I は AMS 以外の手法では検出できないか、効率や感度で大きく劣るため、 ^{129}I の測定に AMS は非常に有用である²⁾。AMS による測定は東京大学タンデム加速器施設 (Micro Analysis Laboratory Tandem Accelerator The University of Tokyo, MALT) の AMS ビームラインを用いた。

2.2 土壌の前処理方法

採取された土壌試料は全 50 点であり (図 1)、乾燥後、内径 5 cm、高さ 5 cm の U8 容器に入れられ、 ^{131}I 、 ^{134}Cs や ^{137}Cs の放射能が γ 線測定により求められた¹⁾。AMS において必要な試

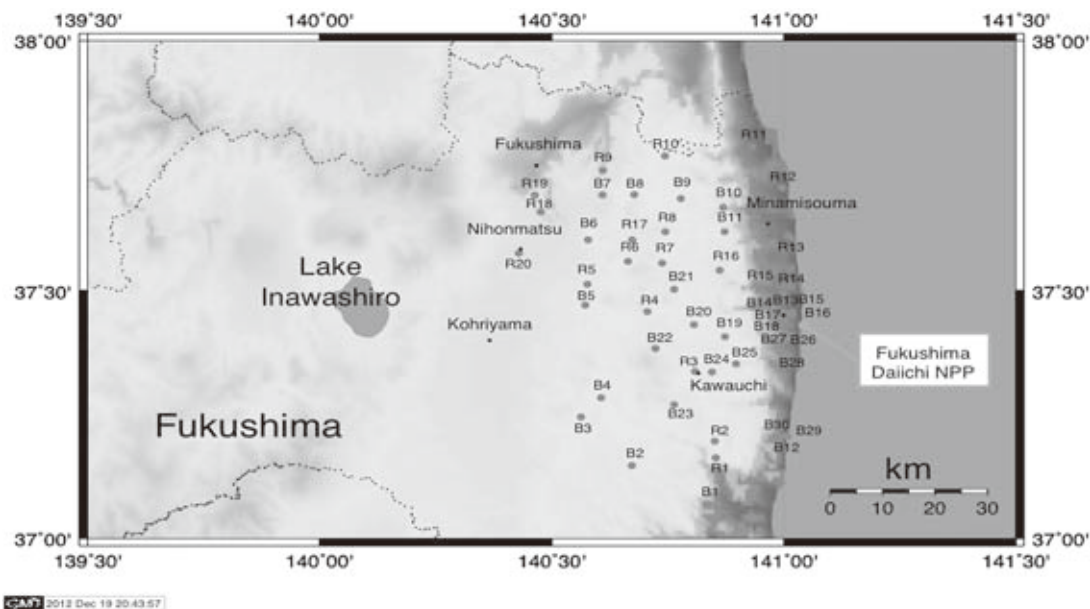


図 1 試料採取地図

料の量は1 g以下であり、U8容器内の土壌は100~140 gほどであるため、土壌の均質化が非常に重要である。そのため、まずは乳棒と乳鉢を用いて土壌を均質化した。そこから0.1~0.4 gの試料を測り取り、管状炉を用いて熱加水分解法によりヨウ素を土壌からアルカリ溶液へ分離した。ここで、ヨウ素がトラップされた溶液の一部を分取し、ICP-MSにより、土壌自体に含まれている安定同位体の ^{127}I を測定した。残りの溶液には、濃度既知の ^{127}I をキャリアとして加えた後、四塩化炭素を溶媒とする溶媒抽出によりヨウ素を精製した。最後に、硝酸銀を加えヨウ化銀の沈殿を作成し、MALTにてAMSで ^{129}I と ^{127}I の同位体比($^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$)を測定した。これとICP-MSで求めた ^{127}I の濃度により、土壌中の ^{129}I を求めた。

3 結果及び考察

γ 線測定で測定された ^{131}I とAMSで測定した ^{129}I は良い相関を示し、 ^{131}I の値を事故時点の2011年3月11日に補正すると、50点の平均の $^{129}\text{I}/^{131}\text{I}$ 比(原子数比)は 26.1 ± 5.8 となった(図2)。この結果をORIGEN2コードの計算結果と比較したものが図3となる。ORIGEN2コードとは、核種崩壊生成計算コードであり、福島第一原子力発電所1~4号機の2011年3月11日時点、及び、その後の放射性核種量が評価された³⁾。本研究で ^{129}I を測定した土壌は、 ^{131}I のほか、 ^{134}Cs や ^{137}Cs も γ 線測定により測定されており¹⁾、図3では、放射性セシウムの同位体比($^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$)と放射性

ヨウ素の同位体比($^{129}\text{I}/^{131}\text{I}$)の原子数比での関係が、実測値のものとORIGEN2コードの計算結果によるものでそれぞれ示されている。各核種の値は2011年3月11日に補正されており、実測値については各地点での $^{129}\text{I}/^{131}\text{I}$ と

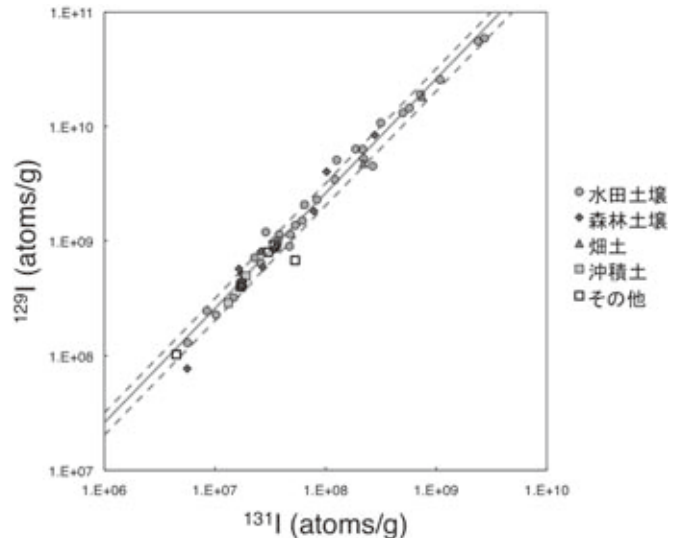


図2 ^{129}I と ^{131}I の関係
(^{131}I の値は2011年3月11日に補正。図中の直線が平均値である $^{129}\text{I}/^{131}\text{I}=26.1$ を、破線は $\pm 1\sigma$ の値をそれぞれ示す)

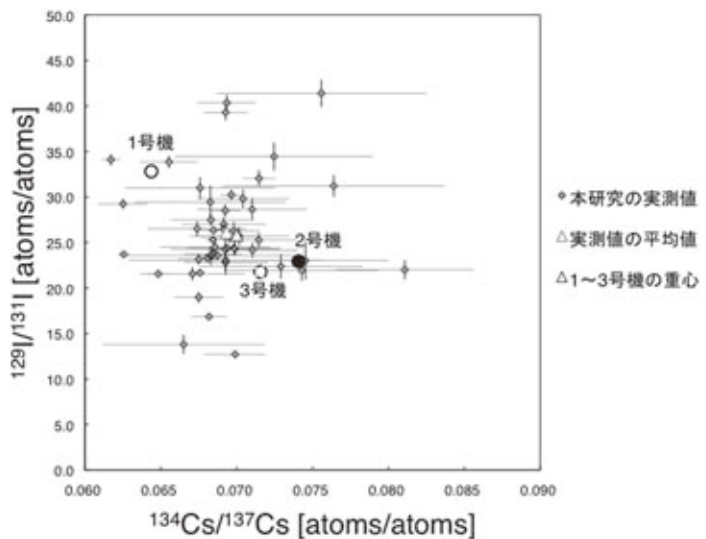


図3 実測値とORIGEN2コードの計算結果との比較
(各核種の値は2011年3月11日に補正)

$^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$, 及びそれらの平均が示されている。ORIGEN2 コードの計算結果では福島第一原発の1~3号機での $^{129}\text{I}/^{131}\text{I}$ と $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$, 及びそれらの重心が示されている。比較の結果, 実測値の50点の平均値は計算結果と矛盾しないことが分かった。

4 今後の展望

本研究では, 福島第一原子力発電所事故により放出された ^{129}I と ^{131}I の事故当初の同位体が推定され, ORIGEN2 コードの計算結果とも矛盾しないことが分かったが, 同位体比にはまだバラつきがある。今後は, 事故に関する知見を

更に得るべく, 採取地域による同位体比の違いの調査や, ほかに ^{36}Cl などAMSで測定可能な他核種の測定を試みる予定である。

参考文献

- 1) Fujiwara, T., *et al.*, Isotopic ratio and vertical distribution of radionuclides in soil affected by the accident of Fukushima Dai-ichi nuclear power plants, *J. Environ.*, **113**, 37-44 (2012)
- 2) 松崎浩之, 加速器質量分析の原理, 真空, **50** (7), 467-474 (2007)
- 3) Nishihara, K., *et al.*, Estimation of Fuel Compositions in Fukushima-Daiichi Nuclear Power Plant, JAEA-Data/Code, 2012-018 (2012)

雷バーストを対象とした γ 線スペクトロメータの概念検討



有元 康浩

Arimoto Yasuhiro

(名古屋大学大学院 工学研究科)

1 はじめに

雷活動に起因すると考えられる放射線レベルの上昇が, 地上, 雷雲中, 更には雷雲上空の超高層領域まで様々なフィールドで観測されている¹⁻³⁾。雷活動とともに観測されるのは, γ 線領域のエネルギーを有する数 MeV の高エネルギー光子であり, 数ミリ秒から数十秒程度持続するため, 雷バーストと呼ばれている。冬季雷の発生頻度が高い日本海沿岸では, この雷バーストが, 原子力関連施設周辺に多く設置されている環境放射線モニターの信頼性を低下させる一因となっている。そこで, 雷雲中での放射線発生メカニズムの解明やモニタリング信頼性向上のため, 雷由来の高エネルギー光子と環境放射線の弁別法に関する研究が進められており, 大

型 NaI(Tl) シンチレーション検出器を用いた測定により, 高エネルギー光子のエネルギー情報が得られている。しかしながら, 雷バーストの発生メカニズムはいまだ不明な点が多いため, より詳細な情報を得るために高エネルギー光子の発生位置(飛来方向)に関する精密測定が可能な検出器の開発が求められている。コリメータにより検出器に指向性を与える方法では, 測定対象が数 MeV の高エネルギー光子であることから, コリメータの大型化や重量増加, また検出効率の低下をもたらし, 望ましくない。そこで, 本研究では角柱状シンチレータを用いることで, 軽量, 高検出効率な指向性 γ 線スペクトロメータを提案, 基礎実験とモデル計算に基づく設計検討の下に, 雷バースト測定に対する

適用可能性を評価した。

2 基礎実験

測定対象がバースト状の高エネルギー γ 線であると予想されるため、高密度 (6.63 g/cm^3)・高Z (54.4) で自己放射能のない $\text{Gd}_3\text{A}_{12}\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}$ (GAGG(Ce)) シンチレータをスペクトロメータの構成要素として選定した。GAGG(Ce) は潮解性を持たないことから、角柱状に加工することが容易である。

角柱状 GAGG(Ce) の入射方向依存性を調べるための基礎実験を行った。実験体系を図 1 に示す。角柱状 GAGG(Ce) ($5.8 \times 5.8 \times 42 \text{ mm}^3$) と ^{137}Cs 線源の位置 θ を変化させて得られたエネルギースペクトルを図 2 に示す。 $\theta=0^\circ$ の場合の 150 keV 以上のエネルギー付与事象の計数は、 $\theta=90^\circ$ の場合の約 70% となった。これは、シンチレータロッド長軸方向の自己遮蔽の影響で検出効率が減少したものと思われる。また、

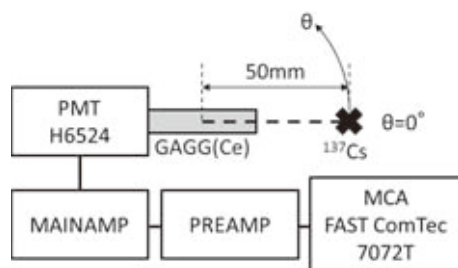


図 1 実験体系

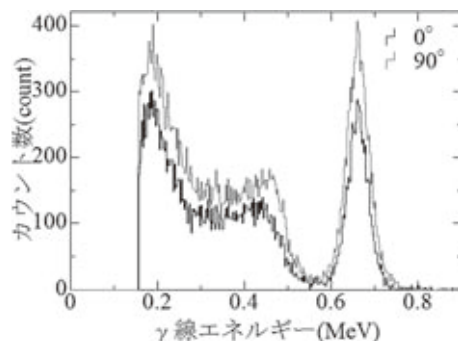


図 2 測定で得られたスペクトルの例

この角柱状 GAGG(Ce) のエネルギー分解能は、662 keV に対し、9.5% (FWHM) であった。

3 検出器の設計検討

角柱状 GAGG(Ce) 1 本の応答に着目すると、 γ 線が長軸方向から入射する場合にカウントが少なくなるため、図 3 に示すように、シンチレータを等間隔扇形に配置した検出器を考案した。雷バースト高エネルギー光子は遠方の雷雲より飛来すると予測されるため、検出器に対しては並行ビームとして入射すると考えられる。扇形検出器は設置した平面上で入射方向を推定するため、設置角度を $0 \sim 180^\circ$ とした検出器を 3 セット (Z 軸周りは設置角度を $0 \sim 360^\circ$) 設置すれば、全天を測定対象とすることが可能となると考えられる。

1 セットの扇形検出器の応答は、全てのシンチレータの総カウントに対し入射方向に対応したシンチレータのカウントが減少するため、各シンチレータの計数を比較することにより平行ビーム入射方向の推定が可能と考えられる (図 4)。

以上の基本コンセプトに対し、扇状検出器 1 セットの検討を実施した。各シンチレータは、

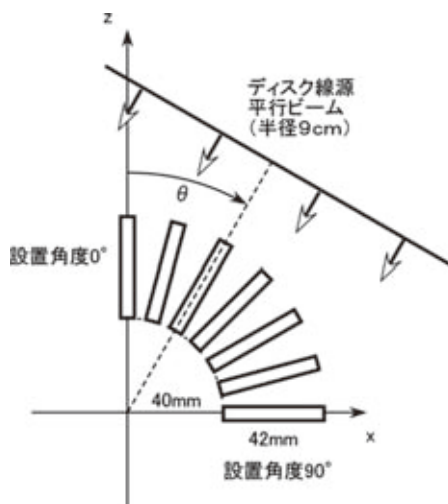


図 3 扇形検出器の概念図

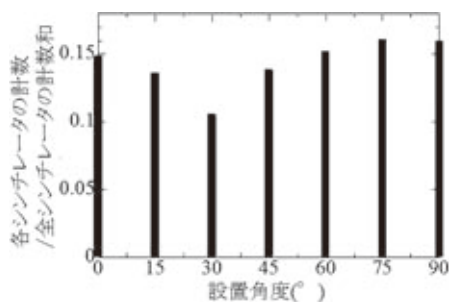


図4 30°方向からγ線平行ビームを入射させた場合のカウンtr比

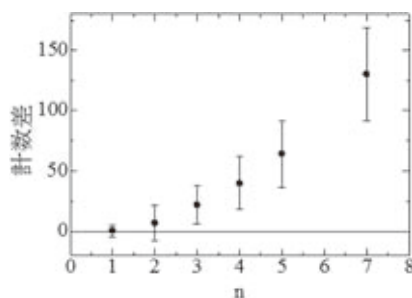


図5 GAGG(Ce) 5.8×5.8×42 mm³の各辺の長さをn倍とした計算結果

入射方向推定のために計数に付随する統計誤差を考慮した上で、有意な入射方向による計数差が得られる大きさが必要である。文献4)により示される高エネルギー光子のエネルギースペクトルをモデル計算に組み込み、図1で示されるシンチレータのサイズをn倍にして90°と0°の計数差を計ったところ、60秒のバーストに対し指向性検出器として有意な計数差を得るためには、角柱状シンチレータのサイズをn=3すなわち17.4×17.4×126 mm³にする必要があるという結果が得られた(図5)。

4 まとめ

雷バーストを対象とした角柱状シンチレータを用いた指向性γ線スペクトロメータを提案した。GAGG(Ce)シンチレータを構成要素と選定し、基礎実験により特性を明らかにし、これを基にモンテカルロシミュレーション計算に基づく設計検討を行った結果、雷バーストに対し適用できる見込みを得た。今後、検出器の最適設計と試作検出器による特性評価を実施していく

予定である。

【謝辞】

本研究を遂行するに当たり、(独)日本原子力研究開発機構 鳥居建男様、名古屋大学 井口哲夫様・河原林順様・富田英生様のご協力・ご支援をいただきました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Moore, C.B., Eack, K.B., Aulich, G.D., and Rison, W., Energetic radiation associated with lightning stepped-leaders, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2141–2144 (2001)
- 2) Parks, G.K., Mauk, B.H., Spiger, R., and Chin, J., X-ray enhancements detected during thunderstorm and lightning activities, *Geophys. Res. Lett.*, **8**, 1176–1179 (1981)
- 3) Fishman, G.J., Bhat, P.N., Molozzi, R., *et al.*, Discovery of Intense Gamma-Ray Flashes of Atmospheric Origin, *Science*, **264**, 1313–1316 (1994)
- 4) Torii, T., Takeishi, M., and Hosono, T., Observation of gamma-ray dose increase associated with winter thunderstorm and lightning activity, *J. Geophys. Res.*, **107** (D17), 4324–4352 (2002)