

課題番号 7

BRCA1 による新規薬剤耐性機構を利用した PARP 阻害剤・白金製剤の感受性予測法の開発

[1] 組織

代表者：河合 賢朗

(山形大学大学院 医学専攻
外科学第一講座)

対応者：千葉 奈津子

(東北大学加齢医学研究所)

分担者：

元井 冬彦 (山形大学大学院 医学専攻
外科学第一講座)

田中 喬之 (山形大学大学院 医学専攻
外科学第一講座)

研究費：物件費 20 万

[2] 研究経過

相同組換え(Homologous recombination: HR) 修復は、DNA 二本鎖切断の修復経路である。HR の機能不全 (HR deficiency: HRD)となった腫瘍細胞は、DNA 単鎖切断修復因子である Poly [ADP-ribose] polymerase (PARP)を標的とした PARP 阻害剤や、白金製剤などの DNA 傷害性薬剤に高感受性である。

所内対応者の千葉らは、CRISPR/Cas9 システムを用いて、簡便で定量性の高い新規 HR 活性の測定法 Assay for site-specific HR activity (ASHRA)を開発した (Yoshino and Endo et al. *Sci Rep* 2019)。

ASHRA を用いて、遺伝性乳がん卵巣がん症候群 (HBOC) の原因遺伝子で、重要な HR 因子である BRCA1 の多数のバリエーションの HR 活性を測定し、薬剤感受性との相関を検討することにより、BRCA1 が転写因子 Activating transcription factor 1 (ATF1) のコアクチベーターとして機能し、ATF1 高発現細胞で PARP 阻害剤・白金製剤に耐性を引き起こすという新しい薬剤耐性機構を明らかにした (Endo and Yoshino et al. *Cancer Res Commun* 2021) (図 1)。

ATF1 高発現細胞は、BRCA2 などの他の HR 因子の異常による HRD の状態でもこれらの薬剤に耐性を示し、ATF1、ATF1/BRCA1 の下流因子が

PARP 阻害剤、白金製剤の感受性を予測するバイオマーカーになることが示唆された。

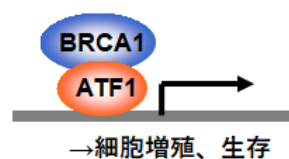


図1 新たなPARP阻害剤、
白金製剤耐性機構

本研究は、ATF1/BRCA1 による薬剤耐性の特異性を解析するとともに、ATF1/BRCA1 の標的遺伝子の同定を試み、これら因子のバイオマーカーとしての有用性を明らかにし、より正確な感受性予測を可能にする PARP 阻害剤・白金製剤の感受性予測法を開発することを目的とした。

研究は、分担者である田中喬之 大学院生が、研究代表者と研究の進捗状況について連絡を取り、千葉研究室で主に実施した。

[3] 成果

(3-1) 研究成果

前年度、ChIP-seq 解析により ATF1/BRCA1 下流遺伝子の候補として同定した X 遺伝子について解析し、ATF1 低発現細胞である MCF7 細胞で、重要な HR 因子である RAD51 の発現抑制により HRD とした細胞で、X を発現すると、ATF1 の発現と同様に、PARP 阻害剤であるオラパリブに耐性となり、一方、BRCA1 の発現抑制では、ATF1 の発現では耐性にならず、X の発現でのみオラパリブに耐性となることを明らかにし、X が ATF1/BRCA1 に非依存的にオラパリブに耐性を引き起こすことが明らかにした。

本年度は、ATF1 の高発現により、BRCA1 の発現依存性に、X の遺伝子発現が上昇することを明らかにし、X の発現がタンパク質レベルでも上昇することを明らかにした。

さらに、類血管腫型線維性組織球腫や明細胞肉腫

などで *ATF1* と *Ewing sarcoma breakpoint region 1 (EWSR1)* が融合遺伝子を形成し、*EWSR1::ATF1* 融合タンパク質を発現するため、この融合タンパク質について解析した。*EWSR1::ATF1* を発現させると、*ATF1* と同様に、*X* の発現が上昇し、*RAD51* の発現抑制により *HRD* としてもオラパリブ耐性を示し、この融合遺伝子を有する腫瘍では、この融合タンパク質が *PARP* 阻害剤や白金製剤に耐性を示す可能性が示された。

(3-2) 波及効果と発展性など

PARP 阻害剤は、*HR* 因子の異常により *HRD* となった腫瘍細胞に合成致死を引き起こす分子標的治療薬である。近年、本邦でもオラパリブ、ニラパリブが承認され、乳がん、卵巣がん、膵がん、前立腺がんで使用されている。これらの薬剤には、*BRCA1/2* 遺伝子検査や *HRD* スコアが感受性予測のコンパニオン診断薬として用いられている。しかし、これらによる患者層別化では耐性症例が含まれ、効果予測は不十分な状況であり、さらに詳細に患者を層別化するコンパニオン診断薬が求められている。

白金製剤は *DNA* 架橋剤で、従来より、肺がん、大腸がん、頭頸部がん、胃がん、卵巣がん、胆道がん、膵がん、子宮頸・体がん、原発不明がんなど多くの悪性腫瘍の化学療法におけるキードラッグである。しかし、耐性症例は存在し、かつ腎毒性、消化器毒性などが他の抗がん剤に比較してかなり重篤であることも臨床的に問題であり、耐性症例をあらかじめ除外することは重要である。白金製剤により生じる *DNA* 架橋の修復には *HR* 経路が必要なため、*PARP* 阻害剤と同様、白金製剤は *HRD* の腫瘍に有効であることが明らかになっているが、現在のところ、効果予測には活かされていない。

本研究で開発される感受性予測法は、千葉教授らが明らかにした *PARP* 阻害剤・白金製剤の新たな耐性機構で機能する分子をバイオマーカーにするものであるため、現在行われている *BRCA1/2* 遺伝子検査や遺伝子パネル検査、*HRD* スコアで感受性と予測されてしまう症例に存在する、耐性症例を同定するものである。よって、従来法のみで層別化する方法に比べて、より精密な層別化が可能になる。

バイオマーカーとしての使用法は、ヒト組織のホルマリン固定パラフィン包埋 (FFPE) 切片スライドの免疫染色を想定しており、安価な診断薬となり、安全性も問題がない。

さらに、*ATF1/BRCA1* の下流因子をバイオマー

カーとする場合は、*ATF1/BRCA1* の転写活性化能に依存しないため、*HRD* の有無に関わらず耐性と予測されるため、耐性と判断された際は、高額で時間を要する *BRCA1/2* 遺伝子検査や *HRD* スコアによる *HRD* を評価するための検査を実施する必要がなく、医療コストの大きな低減になる。

また本研究では、*EWSR1::ATF1* 融合タンパク質が *PARP* 阻害剤に耐性を示すことが示された。実際、ほとんどが *EWSR1::ATF1* 融合遺伝子を有する明細胞肉腫は、従来の肉腫に対する化学療法に抵抗性であることが示されており、*EWSR1::ATF1* が腫瘍形成に加えて薬剤耐性にも寄与することが示された。

以上より、本研究の成果をもとに *PARP* 阻害剤・白金製剤の感受性予測法が開発されれば、多くの患者がその恩恵を受けることになり、がん治療に大きく貢献できると考えられる。

[4] 成果資料

<学会発表>

(1) 田中 喬之, 吉野 優樹, 遠藤 栞乃, 河合 賢朗, 元井 冬彦, 千葉 奈津子. *ATF1/BRCA1* の転写活性化による *PARP* 阻害薬耐性化の分子機構. (口頭発表) 第 5 回一般社団法人日本遺伝性乳癌卵巣癌総合診療制度機構 (JOHBOC) 学術総会 2025 年 5 月 17 日 東京 優秀演題賞受賞

また、本研究成果は、2026 年 5 月に行われる第 6 回日本遺伝性乳癌卵巣癌総合診療制度機構学術総会のシンポジウムで以下のように発表の予定である。吉野 優樹, 田中 喬之, 沖野 真帆, 菊田 心, 遠藤 栞乃, 河合 賢朗, 元井 冬彦, 千葉 奈津子. 相同組換え修復活性の変化を伴わない *PARP* 阻害薬耐性化機構 ~*BRCA1/ATF1* 経路~