

## 論文の内容の要旨

論文題目 出芽酵母新規タンパク質発現系を用いた細胞内プロテアソーム活性の増強

氏名 松崎 哲郎

### 【序論】

26S プロテアソームはユビキチン修飾を受けたタンパク質の分解を実行する 33 種のサブユニットからなる巨大な酵素複合体であり、分解されるべき基質を捕捉する 19S regulatory particle (RP)と、ペプチダーゼ活性を有する 20S core particle (CP)から構成される。

遺伝学的に、あるいは薬剤によってプロテアソーム活性を低下させたときの表現型は様々な生物で解析されている。一方、プロテアソーム活性を上昇させたときの表現型を解析した研究は少ない。しかし、このような研究は高いプロテアソーム活性を示すがん細胞の病態理解につながると期待される。

細胞内のプロテアソーム活性を上昇させる方法として、(1)全サブユニット共通の転写因子の過剰発現、(2)特定の単一サブユニットの過剰発現、が報告されている。しかし、(1)ではプロテアソームと関連のない遺伝子の発現も誘導される、(2)では全サブユニットの転写が促進されることによって生じる生理的なプロテアソーム活性上昇を反映していない、といった問題点がそれぞれある。

これらの問題点を踏まえ、出芽酵母において全 33 種類のサブユニットを同時に過剰発現させることを最終目標とし、本研究では CP サブユニット 全 14 種類または RP サブユニット 全 19 種類の同時過剰発現細胞を樹立し、細胞内プロテアソーム活性上昇時の表現型を調べた。

### 【結果と考察】

#### 10 種類の栄養要求性を持つ株の樹立

前項の通り CP と RP はそれぞれ 14、19 種類のサブユニットで構成されるため、19 種類のタンパク質を共発現できる実験系を構築すれば全 CP または全 RP サブユニットの同時発現が実現できる。出芽酵母で 19 種類ものタンパク質を同時発現させた例は過去にない。

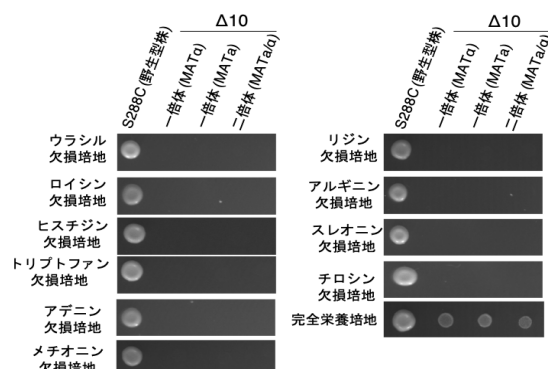


図 1.10 種類の栄養要求性を持つ株の樹立  
Δ10 はいずれかの栄養素を欠いた培地では生存できない。

本研究では2つのタンパク質を同時発現できるプラスミドを10種類作製し、出芽酵母に保持させることで19種類のタンパク質の同時発現を実現する。これには①プラスミドを保持させるための10種類の栄養要求性を持つ株 ( $\Delta 10$  と呼称)の樹立、② $\Delta 10$ の栄養要求性に対応し、2つの発現用クローニングサイトを持つプラスミド10種類が必要である。まず①を実現するために野生型株の栄養素合成酵素10種類を欠損させ10種類の栄養要求性を持つ株  $\Delta 10$  を樹立した (図1、以下では二倍体株の  $\Delta 10$  を使用した)。

### 出芽酵母内で最大20種類のタンパク質を同時発現できる実験系の樹立

続いて②を実現するために、ガラクトースで発現誘導可能な pESC プラスミドシリーズの既存のもの4種に加え、これを改変した pESC-ADE、pESC-MET、pESC-LYS、pESC-THR、pESC-ARG、pESC-TYR の6種類を新たに構築して合計10種類とした。これら10種類のプラスミドを  $\Delta 10$  へ導入し、10種類の栄養素を欠損させた培地で培養したところ、これら全てを保持できることを確認した (図2、矢頭)。1つのプラスミドで2種類のタンパク質を発現できることから、10種のプラスミドを保持した株では最大20種類のタンパク質の同時発現が可能となる。

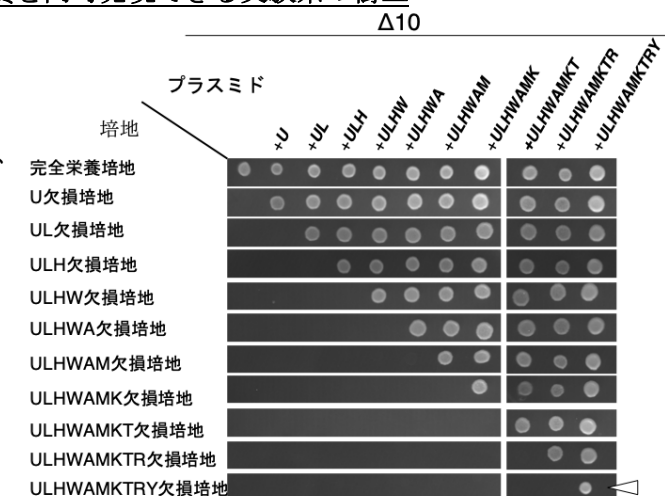


図2. 出芽酵母への10種類のプラスミドの導入  
10種類のプラスミドを順次  $\Delta 10$  へと導入し、10種類の栄養素がない培地でも増殖することが確認された (矢頭)。U = ウラシル、L = ロイシン、H = ヒスチジン、W = トリプトファン、A = アデニン、M = メチオニン、K = リジン、T = スレオニン、R = アルギニン、Y = チロシン。プラスミドのアルファベットは各栄養素の合成酵素 (マーカー) を示す。(U = ウラシル合成酵素 *URA3* を有するプラスミド)

### 全CPまたはRPサブユニットの過剰発現によりそれぞれCP、26Sプロテアソーム由来のペプチダーゼ活性が上昇する

全10種類のプラスミドへCPあるいはRPサブユニットを全てクローニング後  $\Delta 10$  へ導入した (それぞれCP過剰発現株、RP過剰発現株と呼称)。ガラクトース含有培地でサブユニットの発現を誘導したところ、CP過剰発現株、RP過剰発現株ではそれぞれ細

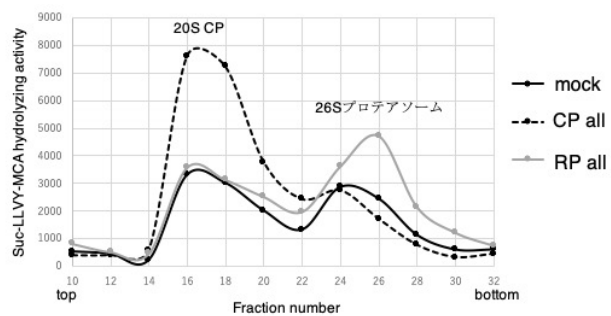


図3. 新規発現系を用いた細胞内プロテアソーム活性の上昇  
Mock株 (空ベクター)、CP過剰発現株 (CP all)、RP過剰発現株 (RP all) をガラクトース含有培地で培養後、細胞を破碎した。細胞破碎液をグリセロール密度勾配遠心法で分画後、各フラクションのペプチダーゼ活性を測定した。

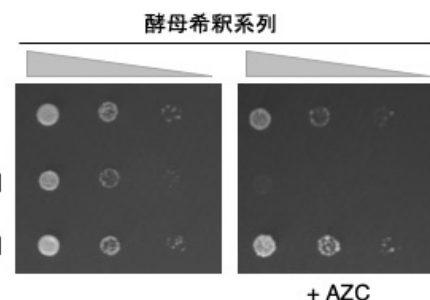
胞内 CP、26S プロテアソームのペプチダーゼ活性増加が見られた (図 3)。また細胞破碎液を native-PAGE で展開しウエスタンブロット法で CP、26S プロテアソームの量を調べたところ、活性に比例し CP 過剰発現株では CP、RP 過剰発現株では 26S プロテアソームの量がそれぞれ増加していた。

### CP の過剰発現は変性タンパク質ストレスへの耐性を弱める

プロテアソームは変性タンパク質の除去にも働いている。従って、今回樹立した CP 過剰発現株、RP 過剰発現株は変性タンパク質によるストレスへの耐性が增強していると予想される。この可能性を検討するため、タンパク質変性を引き起こすアミノ酸アナログ

azetidine-2-carboxylic acid (AZC)含有培地での各過剰発現株の増殖を調べた。その結果、26S プロテアソーム活性が増加する RP 過剰発現株

は予想通り mock 株に比べ早く増殖し、変性タンパク質ストレスへの耐性が增強していることが示唆された。しかし、遊離 CP 活性のみが増加する CP 過剰発現株は予想に反して AZC 含有培地で増殖せず、変性タンパク質ストレス感受性を示した (図 4)。



**図 4. CP 過剰発現株は変性タンパク質ストレスに感受性を示す**

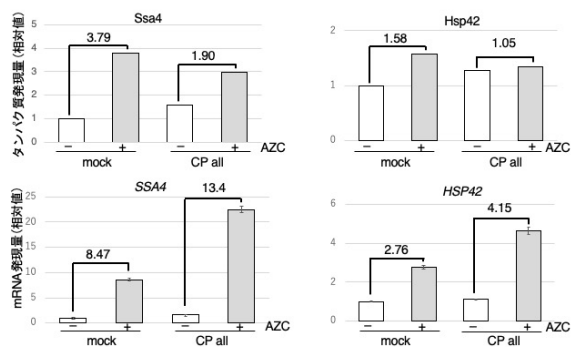
Mock 株、CP 過剰発現株 (CP all)、RP 過剰発現株 (RP all)の希釈系列を各々ガラクトース含有培地 (±AZC)にスポットし、27°Cで培養した。

### CP 過剰発現株では変性タンパク質ストレスによるヒートショックタンパク質の発現誘導が低下する

RP と結合していない CP はユビキチン非依存的な分解を実行するなど、26S プロテアソームに比べ非選択的なタンパク質分解を実行する性質がある。そこで、CP 過剰発現株では過剰な CP によってストレス応答に必須の役割を担うタンパク質がユビキチン非依存的に分解を受けていると考えた。AZC 存在下での CP 過剰発現株で発現が低下しているタンパク質を網羅的に調べるために、mock (±AZC)、CP 過剰発現株 (±AZC)の 4 サンプルに対し tandem mass tag (TMT)を利用したプロテオーム解析を行なった。得られた発現量のデータから AZC 処理時のタンパク質発現量の比 (AZC 処理時の CP all)/(AZC 処理時の mock)を算出した。さらに、定常時でも CP 過剰発現株で発現量が少ないタンパク質を除外するため、上記比率を定常時での発現量比 CP all/mock で除して補正した値 [(AZC 処理時の CP all)/(AZC 処理時の mock)]/(CP all/mock)を各タンパク質に対して算出した。

この値が小さいもの上位 5%を選び、gene ontology (GO) term で分類すると、最も p 値が低い GO term は unfolded protein binding (10 タンパク質)であり、そのうち 8 タンパク質は変

性タンパク質の形成抑制、および分解に関わるヒートショックタンパク質であった (Ydj1、Hsp82、Hsp104、Hsp26、Hsp42、Ssa1、Ssa2、Ssa4)。これらのタンパク質の発現量データを調べると、mock、CP 過剰発現株でも AZC 処理により発現量が増加していたが、その上昇率は CP 過剰発現株で低下していた (図 5、上段)。次に、この AZC による誘導不全が転写誘導の異常によるものか定量 PCR で調べたところ、CP 過剰発現株でも正常に転写が誘導されていた (図 5、下段)。従って、CP 過剰発現株での AZC によるヒートショックタンパク質誘導不全は転写レベルではなく、タンパク質レベルで生じていることが分かった。



**図 5. CP 過剰発現株では AZC ストレス時のヒートショックタンパク質発現誘導が低下している。**  
 (上段) プロテオーム解析で得られた各細胞 ( $\pm$ AZC)でのヒートショックタンパク質 (Ssa4、Hsp42)発現量。  
 (下段) 各細胞 ( $\pm$ AZC)でのヒートショックタンパク質(SSA4、HSP42)の mRNA 量。平均値 $\pm$ 標準偏差を示す (triplicate)。

## 【総括】

本研究では CP または RP の全サブユニットを過剰発現する出芽酵母株を構築するために、最大 20 種類のタンパク質発現を可能にする実験系を構築した。本実験系は組換えタンパク質発現、特にタンパク質複合体の発現および精製にも応用でき、従来大腸菌では再構成が不可能であったタンパク質複合体の精製が期待される。実際、全 CP あるいは全 RP サブユニットを過剰発現するとそれぞれ CP、26S プロテアソームの量と活性が顕著に増加し、過剰発現したサブユニットが正常なプロテアソーム形成に寄与していることが証明された。

プロテアソーム活性上昇に伴う表現型の解析では、CP の過剰発現で変性タンパク質ストレスに脆弱となることが明らかとなった。さらに CP 過剰発現株ではストレス依存的なヒートショックタンパク質の発現誘導が低下しており、これは転写誘導障害によるものではなかった。CP 過剰発現株では過剰な CP によってヒートショックタンパク質が分解を受けており、その結果 AZC による細胞毒性が生じているものと思われる。

今後は CP 過剰発現が変性タンパク質ストレス感受性を強める分子機構を解明するとともに、 $\Delta 10$  の発現系をさらに発展させ、最終目標である 33 種類の全プロテアソームサブユニットの過剰発現を実現させる。