

平成 26 年度
博士論文

AUG コドンの正確な解読に寄与する
 N^4 -アセチルシチジンの生合成と機能

Biogenesis and function of N^4 -acetylcytidine
in tRNA responsible for accurate AUG decoding

指導教員 鈴木勉 教授

東京大学大学院工学系研究科
化学生命工学専攻
鈴木研究室

37-127133 谷口 貴昭

【緒言】

あらゆる生物において、遺伝情報を正確に翻訳することは、正常な機能を持つタンパク質を合成する上で必須である。タンパク質合成においてアダプター分子として働く tRNA には、転写後にさまざまな化学修飾が施されている。中でも、アンチコドン 1 文字目 (wobble 位) の修飾は翻訳精度の維持に重要な役割を担っている。一般に、一種類の tRNA は wobble 対合を用いて、隣り合う複数のコドンを読み解く事が多く、同じコドンボックス内においてプリンで終

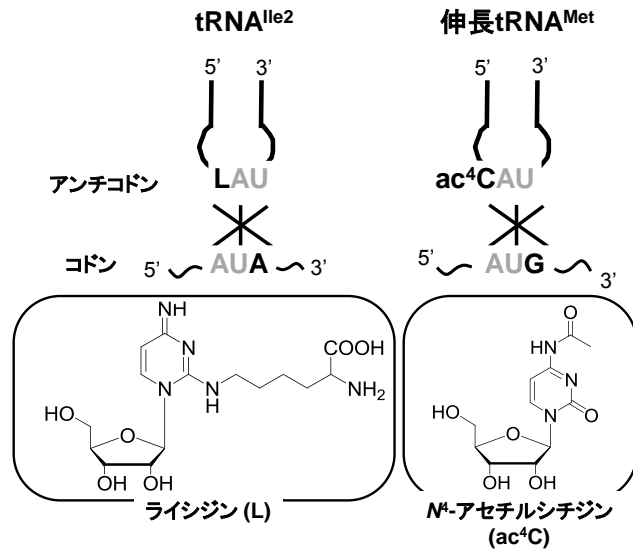


Fig. 1
バクテリア AUA/AUG コドン解読システム

わるコドンは通常、同一種の tRNA によって解読される。AUN (N は A,U,G,C) コドンボックスは、唯一プリンで終わるコドンが異なるアミノ酸を指定している。すなわち、AUA はイソロイシン(Ile)を指定し、AUG はメチオニン(Met)を指定している。しかし、AUA と AUG コドンの読み分けは難しく、バクテリアはこの二つのコドンを読み分けるために特別な機構を有している。

AUA コドンは、ライシジン(L)修飾を wobble 位に持つ tRNA^{Ile2} によって解読されている (Fig. 1)。L 修飾は、シチジンの 2 位にリジンの ε-位が共有結合した修飾塩基であり、CAU アンチコドンを持つ tRNA^{Ile} 前駆体に、当研究室で同定された修飾酵素 Tils (tRNA^{Ile} lysidine synthetase)によって導入される[1]。この修飾が導入されることにより、tRNA のコドン認識能は AUG から AUA へと変化し、アミノ酸受容能は Met から Ile へと変化することで、AUA コドンを Ile として解読できるようになる。一方、AUG コドンは、大腸菌においては N⁴-アセチルシチジン(ac⁴C)を wobble 位に持つ伸長 tRNA^{Met} によって解読されている (Fig. 1)。ac⁴C 修飾はシチジンの 4 位のアミノ基がアセチル化された修飾塩基であり、バクテリア、真核生物、古細菌の tRNA と rRNA に幅広く存在する事が知られている。当研究室の先行研究において、ac⁴C 修飾酵素である TmcA (tRNA^{Met} cytidine acetyltransferase)が同定されている[2]。TmcA は GNAT ファミリーに属するアセチルトランスフェラーゼであり、アセチル CoA と ATP を基質として、tRNA に ac⁴C を導入する。TmcA のホモログは真核生物と古細菌に広く分布するが、バクテリアでは γ-プロテオバクテリアの一部にのみ見られる。枯草菌が属するファーミキューテス門は TmcA ホモログを

有さず、tRNA^{Met}に ac⁴C 修飾も見つかっていなかった。ところが、枯草菌から伸長 tRNA^{Met}を単離し、液体クロマトグラフィー質量分析法(LC/MS)を用いて解析したところ、wobble 位に ac⁴C が存在する事を見出した(Fig. 2)。この事は、枯草菌には新規 tRNA アセチル化酵素が存在する事を示唆している。そこで、私は、この新規 tRNA 修飾酵素を同定し、ac⁴C 修飾の持つ役割を解明する事を目的に本研究を行った。

【実験と結果】

(1) 枯草菌新規 ac⁴C 修飾酵素の同定

まず初めに、枯草菌 tRNA^{Met}における ac⁴C 修飾酵素遺伝子を探索するために比較ゲノムの手法を用いた。比較ゲノムとは、ゲノム配列が決定された複数の生物種に対して、共通に存在する遺伝子を抽出する事により、目的の遺伝子を絞り込む手法である。ファーミキューテス門と近縁関係にあるマイコプラズマ数種を培養し、伸長 tRNA^{Met}を相補的な DNA プローブを用いて単離した。LC/MS を用いて修飾塩基の解析を行ったところ、*Mycoplasma arthritidis*、*Mycoplasma hyorhinis*、*Mycoplasma mobile*、*Mycoplasma pulmonis*に ac⁴C 修飾が検出さ

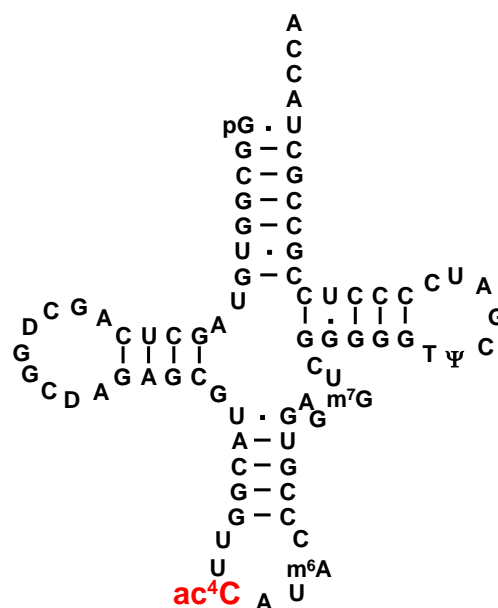


Fig. 2 枯草菌伸長 tRNA^{Met}の二次構造

れたのに対して、*Mycoplasma gallisepticum*には ac⁴C が検出されなかった。また、大腸菌には TmcA が存在するため新規 ac⁴C 修飾酵素遺伝子は存在しないと考えた。これらの結果に *Mycoplasma capricolum*には ac⁴C が存在しないという報告を加えた条件で、比較ゲノムを用いて候補遺伝子の絞り込みを行った。その結果、*tmcAL* が最も信頼された候補遺伝子として見出された。そこで、枯草菌 *tmcAL* 欠損株を作製し ac⁴C が欠失しているかを調べた。作製した *tmcAL* 欠損株は低温感受性を示した。*tmcAL* 欠損株から tRNA^{Met}を単離し、RNase T₁を用いて G 特異的に切断した後に、LC/MS を用いて解析を行ったところ、野生株(WT)で見られていた ac⁴C 修飾は *tmcAL* 欠損株では完全に欠失していた。これにより、*tmcAL*を枯草菌 tRNA^{Met} 新規 ac⁴C 修飾酵素遺伝子として同定する事に成功した。

(2) TmcAL による tRNA アセチル化の反応機構

続いて、大腸菌を用いて組み換え TmcAL を作製し、*in vitro* ac⁴C 修飾再構成反応を行った。基質には *tmcAL* 欠損株から単離した tRNA^{Met} を用いた。酵素や ATP 非存在下では ac⁴C は検出されなかったが、ATP を加えたところ ac⁴C 修飾が一部検出された。しかし、通常、アセチル化反応の基質として用いられるアセチル CoA を加えても ac⁴C 修飾の割合は増加しなかった。驚いたことに、酢酸イオンを反応溶液に加えたところ、ac⁴C 修飾率の顕著な増加が見られた。また、安定同位体標識された酢酸イオンを用いて修飾再構成実験を行った結果、安定同位体標識された分だけ質量が増加したマスペクトルが観察された。これにより、TmcAL はアセチル CoA ではなく、酢酸イオンと ATP を用いて tRNA のアセチル化を触媒している事が明らかになった。酢酸イオンを加えていない条件でも ac⁴C 修飾が観察されたのは、酢酸イオンが反応溶液に混入していたためと思われる。

TmcAL ホモログはファーミキューテス門、フソバクテリア、サーモトガ、半数程度のマイコプラズマ、メタン生成古細菌の一部に分布していた。また、TmcAL はクラス I アミノアシル tRNA 合成酵素と同じ HIGH モチーフを持つヌクレオチジルトランスフェラーゼスーパーファミリーに属しており、Rossmann fold 様ドメインを持っている。アミノアシル tRNA 合成酵素は反応中間体としてアミノアシルアデニレートを合成する。したがって、アミノアシル化の反応機構から Fig.3 の

ような TmcAL による触媒機構を予想した。TmcAL は、まず酢酸イオンと ATP からアセチルアデニレート (Ac-AMP) を反応中間体として合成する。その後、Ac-AMP のアセチル基が tRNA 34 位のシチジン 4 位のアミノ基に転移し、その際に AMP が放出されるという機構である。この反応機構を証明するため AMP と無水酢酸からアセチルアデニレートを有機合成し、修飾再構成反応を行った。その結果、アセチルアデニレートを加えた所、ATP 非存在下でも ac⁴C 修飾が再構成された。また、ATP の加水分解物を薄層クロマトグラフィーを用いて解析したところ、tRNA 依存的に AMP と PPi が生成された。これにより TmcAL によるアセチル化は、Fig. 3 の反応機構によって行われていることが証明された。この結果から、私は、同定した酵素を TmcAL (tRNA^{Met} cytidine acetate ligase) と命名した。

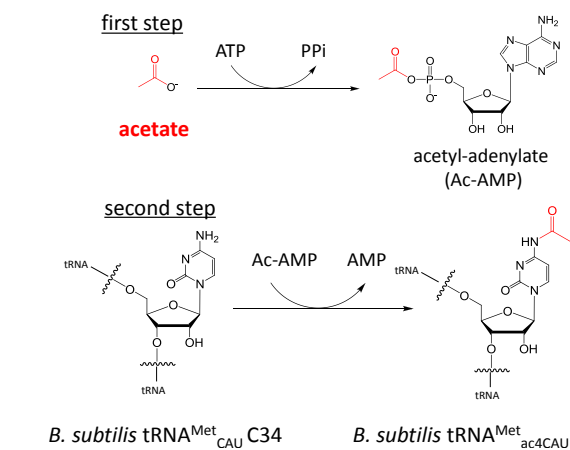


Fig. 3 TmcAL による tRNA アセチル化反応機構

(3) TmcAL による tRNA 基質識別機構

枯草菌において、CAU アンチコドンを持つ tRNA として、伸長 tRNA^{Met} の他にも、開始 tRNA^{Met} と tRNA^{Ile2} 前駆体が存在する。しかしながら、ac⁴C 修飾は伸長 tRNA^{Met} にのみ導入されている。TmcAL がどのような仕組みでこれらの tRNA を識別しているのかを調べるために、tRNA の変異体解析を行った。T7 プロモーターを用いた *in vitro* 転写反応によって、tRNA 変異体を取得した。これらの tRNA 変異体を用いて *in vitro* ac⁴C 修飾再構成反応を行った。伸長 tRNA^{Met} の変異体に関しては、アンチコドンループの塩基を一塩基置換しても、ac⁴C 修飾率にそれほど影響は見られなかった。しかし、U32C/C38A 変異体において全く ac⁴C 修飾が導入されなくなった。逆に、開始 tRNA^{Met} と tRNA^{Ile} においては野生型の配列では全く ac⁴C 修飾は導入されなかったが、これらの tRNA に C32U/A38C 変異を導入すると ac⁴C の修飾能を獲得することがわかった。これらの結果により、TmcAL は、主として tRNA 32 位と 38 位の塩基を識別する事が判明した。大腸菌 tRNA^{Met} は C32 と A38 を持つので、TmcA と TmcAL は基質認識においても異なる機構をとっている。

(4) ac⁴C は AUA コドンの誤翻訳を防止する

これまでに *in vitro* の実験により ac⁴C の役割は AUA コドンの誤翻訳の防止であると考えられてきた[3]。そこで、まず、*tmcAL* と AUA コドンの翻訳に必須な *tilS* との間に遺伝学的相互作用が存在するかを調べた。*tilS* は必須遺伝子であるため欠損できない。そこで、IPTG 依存的に *tilS* を発現する株を用いて生育を調べた。その結果、*tmcAL* 欠損株では *tilS* の発現を抑制すると野生株に比べ、顕著な生育阻害が見られた。これにより、*tmcAL* と *tilS* との間の遺伝学的相互作用を見出す事が出来た。次に、*in vivo* において実際に ac⁴C が AUA コドンの誤翻訳防止に寄与しているかを調べた。枯草菌野生株、*tmcAL* 単独欠損株、*tilS* 発現抑制株、*tilS* 発現抑制/*tmcAL* 欠損株を培養し、それぞれの菌体からタンパク質を抽出した。SDS-PAGE でタンパク質を分離後にバンドを短冊状に切り出し、トリプシン消化後、LC/MS を用いて、Ile のコドンである AUA コドンが誤って Met に翻訳されたペプチド断片が存在するかを解析した。野生株や *tmcAL* 単独欠損株では誤翻訳されたペプチド断片は全く観測されなかった。一方で、AUA コドンの翻訳に必須な *tilS* の発現を抑制した株においては、誤翻訳断片がわずかに検出された。ところが、驚くべきことに、*tmcAL* 欠損株において *tilS* の発現を抑制すると、誤翻訳断片の著しい増加が観察された。また、誤翻訳は AUA コドンのみにおいて起こっており、他の Ile のコドン(AUC と AUU)では起こっていないことも CID スペクトルの解析から判明した。これまでに 16 種類のペプチド断片において、AUA コドンにおける Ile から Met への誤翻訳を観測している。

【結言】

通常、生体内におけるアセチル化反応にはアセチル CoA が基質として用いられる。しかしながら、本研究において同定する事に成功した新規 tRNA アセチル化修飾酵素は、酢酸イオンを基質としていた。大腸菌と枯草菌では、全く異なる機構で、同じ tRNA の同一部位に ac⁴C 修飾を導入していることを明らかにした。このことは、バクテリアにおいて ac⁴C 修飾の機構が収斂進化したことを示している。

また、*tmcAL* 欠損株において、AUA コドンの解読に必須な遺伝子である *tisL* の発現を抑制すると、AUA コドンに Met が導入される誤翻訳が頻繁に起こることを見出した。この事は、tRNA^{Ile2} の L 修飾と tRNA^{Met} の ac⁴C 修飾が協同的に AUA コドンの誤翻訳を防止していることを示している。すなわち、私は本研究において *in vivo* における ac⁴C 修飾の持つ生理学的意義を明らかにすることができた。

【参考文献】

- [1] Soma et al., *Mol Cell*, 12, 689-698 (2003)
- [2] Ikeuchi et. al., *EMBO J.*, 27, 2194-2203 (2008)
- [3] Stern and Schulman, *J. Biol. Chem.*, 253, 6132-6139 (1978)

【発表状況】

投稿論文

- 1) Taniguchi, T., Miyauchi, K., Nakane, D., Miyata, M., Muto, A., Nishimura, S. and Suzuki, T. *Nucleic Acids Res.*, 41, 2621-2631 (2013)
- 2) Bhaskaran, H., Taniguchi, T., Suzuki, T., Suzuki, T. and Perona, J. J. Structural dynamics of a mitochondrial tRNA possessing weak thermodynamic stability *Biochemistry*, 53, 1456-1465 (2014)
- 3) Taniguchi, T., et al., (in preparation)

学会発表

- 1) The 16th annual meeting of the RNA society and The 13th annual meeting of the RNA society of Japan, Kyoto, Japan, June 14-18, 2011, (ポスター発表)
- 2) Joint Congress of The 5th meeting of the Asian organization for Mycoplasmaology(AOM) The 38th meeting of the Japanese society of Mycoplasmaology (JSM), Nagasaki, Japan, October 19-21,2011, (口頭発表(シンポジウムセッション)、招待

講演)

- 3) 24th tRNA Conference, Olmué, Chile, December 2-6, 2012, (ポスター発表)
- 4) 25th tRNA Conference, Kyllini, Greece, September 21-25, 2014, (口頭発表)
- 5) 第 12 回日本 RNA 学会年会, 東京, 2010 年 7 月 27-29 日 (ポスター発表)
- 6) RNA フロンティアミーティング 2011, 大府, 愛知, 2011 年 8 月 30 日・9 月 1 日 (口頭発表)
- 7) 第 87 回日本生化学会, 京都, 2014 年 10 月 15-18 日(口頭・ポスター発表)
- 8) RIKEN Symposium/15th Tokyo RNA Club, 和光, 2014 年 10 月 1 日

受賞など

- 1) 2011 年度東京大学大学院工学系研究科長賞(研究) 2012 年 3 月
- 2) Sidney Altman Endowment Travel Award (24th tRNA Conference, ポスター賞) 2012 年 12 月
- 3) 2013 年度日本学術振興会特別研究員(DC2)採用
- 4) 第 87 回日本生化学会大会若手優秀発表賞 2014 年 10 月