

宇宙X線衛星「すざく」の誕生

牧島 一夫 (物理学専攻 教授)

7月10日、JAXA (宇宙航空研究開発機構) のミュー5型ロケット6号機により、重量1.7トンのAstro-E2衛星が打ち上げられ、「すざく (朱雀)」と名づけられた (図1)。「はくちょう」(1979)、「てんま」(1983)、「ぎんが」(1987)、「あすか」(1993)に続く日本5機目のX線天文衛星で、2000年に打上げ失敗したASTRO-Eの再挑戦機である。再起に向けた皆様のご支援に、深く感謝したい。

JAXA・宇宙科学研究本部の前身は、本学の宇宙航空研究所である。1981年に東大より独立し、全国共同利用の宇宙科学研究所 (宇宙研) となった。本研究科ではそれ以来、物理、地惑、天文、化学の4専攻で「学際理学併任講座」を設け、宇宙研の研究者を大学院の併任に迎え入れ、教育・研究上の緊密な連携を続けてきた。2003年10月、宇宙研が宇宙開発事業団などと統合してJAXAとなっても、この関係は堅持されている。「あすか」を用いた宇宙X線の観測的研究により、これまで国内で70件 (外国を含めると倍増) を越す博士学位が生まれているが、その約半数が、学際理学を含め本研究科 (物理、天文) で誕生したという事実が、この連携の有効性をよく物語っている。

衛星に搭載する観測装置の開発でも、本研究科とJAXAはきわめて効果的に連携している。私たちは「ようこう」や「あすか」の搭載装置を開発し、「すざく」では、釜江常好名誉教授 (物理; 現スタンフォード大教授) らの発案になる硬X線検出器 (HXD) を、同教授はじめ、JAXA、広島大、埼玉大、理研、青学大、金沢大などと協力して開発してき

た。ASTRO-E時代も含め、HXDの開発に貢献した大学院生は実に15学年、私たちの研究室だけでも延べ30名に及ぶ。

HXDは結晶シンチレータと半導体検出器を組み合わせ、放射線バックグラウンドを極限まで除去することで、10~600 keVの広い帯域で優れた感度をもつ (図2)。大小のブラックホールへ降着する物質の診断、さまざまな天体での粒子加速の研究、サイクロトロン共鳴を用いた中性子星の磁場計測、超新星爆発で合成された同位体の探査、MeV領域でのガンマ線バースト観測など、多くのテーマに威力が期待されている。

「すざく」の打ち上げは大きな喜びだが、ひと時も気を緩められない衛星運用の始まりでもある。周回衛星は静止衛星と異なり、交信時間が限られているため、遠隔操作は緊張と不安の連続である。残念なことに、観測開始を目前に控えた8

月8日、搭載装置の目玉であるX線カロリメータ (XRS) が突如、機能を停止してしまった。XRSは固体ネオン (温度15 K)、液体ヘリウム (4 K)、断熱消磁という3段の冷却系により、60 mKの超低温を実現し、X線光子のエネルギーを0.1%の精度で測定する画期的な装置である。そのヘリウムが、予測できない熱流入のために気化し、失われてしまった (原因は調査中)。この打撃は大きい。X線CCDカメラと私たちのHXDは幸い無事で、CCDでは8月13日に感激の「第1ショット」が得られ、またHXDも同19日に稼動を開始した。

こうして2001年3月に「あすか」が大気圏に再突入して以来、しばらく途絶えていた自前のデータが、戻って来たのである。これら貴重な装置を用い、世界の追従を許さない研究成果を挙げるべく、一層の努力を続けたい。



図1: 「すざく」を搭載し、鹿児島県内之浦より発射されたミュー5型ロケット。
JAXA提供。



図2: 組み立て中の「すざく」とHXD (黒い箱)。
JAXA提供。

高感度赤外線撮像で捉えた最も深い宇宙

吉井 讓 (天文学教育研究センター 教授), 美濃和陽典 (天文学教育研究センター 博士課程3年)

近傍の宇宙空間には、1千万光年を一边とする立方体の中におよそ一個の銀河が存在しており、現在の銀河は約130億年前に作られたと考えられている。この銀河の進化については、数多くのモデルが提案されており、おおまかには、銀河は合体衝突を激しく繰り返して成長していったというモデルと、一つ一つの銀河は形成されたあと、お互いに独立に静かに進化していったというモデルの二つにわけられる。しかし、どちらのモデルがより正しいのかを含め、銀河の成長過程は、いまだ観測的には明らかにされていない。遠方の銀河を鮮明に観測し、この成長過程を明らかにすることは、観測的天文学の重要なテーマの一つである。

銀河の骨格を成す古い星からの光は、おもに波長0.4ミクロン以上の可視光で放射される。80億光年以上の遠方にある銀河は、宇宙の膨張に伴い、我々から遠ざかっているため、そこから出される可視光はドップラー効果により赤外線として観測される。そのため遠方宇宙の探査では、赤外線波長での深い撮像観測が重要となる。そのような観測は、これまで主にアメリカのケック望遠鏡、ヨーロッパのVLT (Very Large Telescope)、日本のすばる望遠鏡といった地上の大望遠鏡を用いて行われてきた。しかし、地上からの観測は、地球大気の揺らぎに影響されるため、遠方の銀河を検出する感度でも、また、その構造を見るために必要な空間分解能でも、すでに限界に到達していた。

吉井を代表者とする東京大学、京都大学、国立天文台、ハワイ大学のグループは、すばる望遠鏡の補償光学システム(AO)に、小林尚人(天文学教育研究センター助教授)が中心となって開発した

近赤外線撮像分光装置(IRCS)を取りつけて、すばる望遠鏡が重点的に観測をすすめている「すばるディープフィールド」と呼ばれる空の領域で、高感度の赤外線撮像を行った。「補償光学」とは、地球大気の揺らぎによりぼけた星像をシャープに戻す技術であり、それをういた結果、波長2.12ミクロンの赤外線において、従来のものより2倍以上も深い世界最高の感度を達成し、最も深い宇宙の画像を取得することに成功した(図1)。得られた画像は、空間解像度でハッブル宇宙望遠鏡を凌ぎ、赤外線波長では最も鮮明に遠方銀河を捉えることに成功した。

この観測データをもとに、遠方の宇宙空間における単位体積あたりの銀河の個数を見積もったところ、約100億年前の宇宙にまで遡っても、その個数は現在

と大きく変わらないことが分かった。このことは、ほとんどの銀河は大きな衝突・合体をせず独立に進化をとげてきたことを示唆している。

今回の観測では、補償光学による高い感度と空間解像度を生かし、80億光年よりも遠方の宇宙において、銀河の形態を鮮明に捉えることに成功した(図2)。今後、補償光学を用いて遠方銀河の形態を定量化する研究が、盛んになると期待される。今回の成果は、この新しい手法が有効であることを世界に先駆けて証明し、遠方銀河の形態の起源を明らかにする研究に、最初の道筋をつけたものである。

本研究は、美濃和が主筆者の論文として、The Astrophysical Journal, 629, 29 (2005)に掲載されている。

(2005年7月21日プレスリリース)

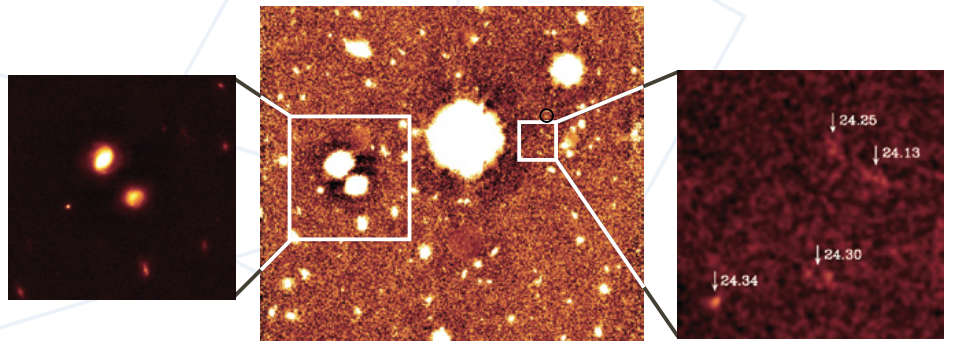


図1: 今回得られた赤外線でも最も深い画像(中図)。視野は1平方角。画像の中心にある明るい星は、補償光学で乱れた波面を補正するための参照星である。図中の黒丸は、今回観測した中で最も暗い24.7等級の銀河を示している。補償光学による高い空間分解能により、遠方銀河の姿を鮮明に捉えることができるようになった(左図)。また、世界で最高感度の赤外線撮像を行ったことで、これまでの観測では検出できなかった非常に暗い銀河をはっきり検出することができるようになった(右図)。図中の数字は見かけの明るさ(等級)である。

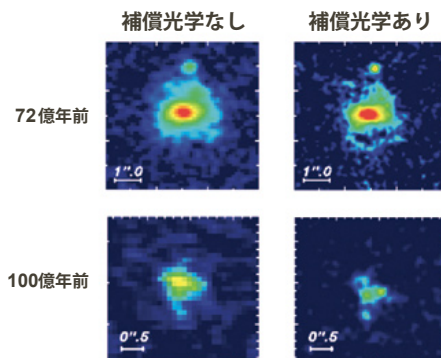


図2: 赤外線でも観測された遠方銀河の形態。右側には本研究で補償光学を用いて観測した銀河の画像を、左側には補償光学を用いていない観測で撮られた同じ銀河の画像を示す。空間解像度の大幅な向上により、100億光年という非常に遠方にある銀河であっても、その構造を鮮明に捉えることができています。

地球風で月に記録された初期地球史

小嶋 稔 (地球惑星科学専攻 名誉教授)

1969年から72年まで6回のアポロ月飛行(一回は失敗—アポロ13号)を通じ、のべ数百キロの月試料(主に表層砂)が地球に持ち帰られた。月砂採集の目的はむしろ月そのものの理解のためであるが、同時に月の表層砂に打ち込まれた太陽風を分析し、太陽の元素とその同位体組成を調べることもあった。この結果、それまでの望遠鏡によるスペクトル観測では不可能だった太陽構成元素(実際には感度の制約からH, N それに He, Ne, Ar の軽希ガス)の同位体比を測定することに成功した。しかしアポロ実験は新たな問題もつきつけた。太陽にはほとんど存在しないいくつかの同位体(^{40}Ar , フィッション Xe^*)に加え、予想をはるかに上回る量のN(加えてその大きな同位体比異常)が見いだされたのである。

多くの研究者は当初、これらの異常な同位体は月内部から流出した成分が再び月表面に定着(インプラント)したものと解釈した。しかし、我々は再インプラントは物理的に極めて困難なことを示し、フィッション Xe の起源として、系外惑星の初期太陽への落下を提案した[文献1]。しかし ^{40}Ar とNについては説明ができなかった。最近に至りさらに精度の高い月砂の分析値が相次いで発表された。これらのデータを基に、三浦弥生(東大地震研)、フランク・ポドセク(F. A. Podosek ワシントン大・地球惑星科学部)と筆者は、月砂の分析値の再評価を試み、N, ^{40}Ar に加え若干の軽元素は、地球大気に起源をもつことを結論した[文献2]。

現在の地球大気は、地球重力で強く地球に縛られていて、最も軽い元素のHとHe以外は、地球から逃げるのはほとんど不可能である。月砂に観測される地球起源のN, ^{40}Ar 等は一体どうやって月まで運ばれたのだろうか? 私達は仮に地球の磁場が極端に弱かったとすると、太陽風が地球近くまで接近して上方大気を剥ぎ取

り、その一部が月まで運ばれるのではないかと考え、「地球風」の仮説を提唱した。事実、磁場の無い金星からはかなりのイオンの流出が観測されている。私達の提案をうけ、名古屋大学・太陽地球環境研のグループ(関華奈子, 寺田直樹, 品川裕之)は、数値計算を試みた。近似として現在の電離層モデルを用い、地球磁場をゼロとした場合、太陽風は地表約500km近くまで侵入し(現在の地球磁場下では約70,000km), 500km以上に存在するイオンを剥ぎ取ってしまうことが結論された[文献2]。さらに月—地球間の距離が過去では現在よりかなり近かった(40億年前では現在の半分程度と推定されている)とすると、剥ぎ取られたイオンの約0.3%が(40億年前の)月に到達することになり、実際に月の砂に観測されるNや ^{40}Ar の量を充分説明できる[文献2]。

それでは、月砂中のNや ^{40}Ar の存在は過去に地球磁場が存在しない時期があったことを示す証拠なのであるか? 現在、地球磁場の存在は35億年前までたどることができる[文献3]。しかし、それ以前については皆目見当もつかない(地球最古の岩石は約40億年で古地磁気情報をこれ以前に求めるのは不可能であろう)。アポロ計画で採取された砂のほとんどは月の“盆地(basin)”からである。“盆地”の形成は砂の放射年代測定やクレーター年代学から38~39億年に集中していることが結論されている。これは、月のcataclysmと呼ばれる大規模かつ集中的な隕石落下によると考えられている。とすると、アポロ試料の砂の年代も39億年前後と想定できる。さらにこの考えの延長として、地球磁場の出現を39億年前後に求めることもあながち不合理ではなからう。

磁場の無かった地球から流出する大気

成分には酸素なども含まれることが期待される(もし初期大気に存在すれば)。月砂の研究は初期地球大気の酸素の成長、ひいては光合成反応と生命の誕生などの基本的問題の解明にも、ユニークな手掛りを与えてくれるかもしれない。

以上、たいへん大胆な説を提案したが、最後にこれを検証する具体策について述べよう。月—地球間の潮汐力により、月と地球の相互運動は極めて強固にカップルされ、月と地球は過去約45億年間、同じ面で向き合ってきたと推論されている。とすると地球風の影響の及ぶのは地球側(near side)だけとなるはずである。したがって月の裏側(far side)の砂試料中の地球成分の比較は上記仮説の決定的な検証を与えよう。月裏側の試料収集計画(これまで皆無)を強く提唱したい。

(2005年8月4日プレスリリース)

※ 核分裂起源の Xe

【謝辞】

東大を定年で辞めてから15年になります。この間現役時代とさほど変わらずに研究を続けて来られたのも、地球惑星科学教室の皆様のおかげで始めて可能だったと痛感しております。とりわけこの13年間研究室セミナーに快く迎えてくださった杉浦さん、比屋根さん、それに研究室の皆さんには深く感謝しております。また、この研究では阿部豊さん、浜野洋三さんには、幾つかの貴重な御教示を戴きました。最後に先月発表のネイチャー論文(本稿の主題)の記者会見をあっという間に(正確には1時間足らずで)アレンジくださったゲラー・ロバートさんの行動力にはまたまた驚嘆しました。併せてお礼申し上げます。

【文献】

1. Ozima, M., Miura, Y. N., and Podosek, F.A., ICARUS, 170, 13-23, (2004)
2. Ozima, M., Seki, K., Terada, N., Miura, Y.N., Podosek, F.A., and Shinagawa, H., Nature, 436, 655-659, (2005)
3. Yoshihara, A., and Hamano, Y., Precambrian Research, 131, 111-142, (2004)

眼の感度調節：Gタンパク質に結合した脂質のダイナミックな役割

深田 吉孝（生物化学専攻 教授）

我々の眼は、星降る夜から真夏の炎天下まで、1億倍も違う強さの光環境において、物を見ることができる。これは、周囲の光強度に応じて視覚の感度を変えることができるためであるが、カメラでいえば、超高感度フィルムを含め様々な感度のフィルムを臨機応変に使い分けることに対応する。これほど幅広いダイナミックレンジをもつ生体シグナルの変換システムは、他に例をみない。私たちは今回、このように高度な感度調節特性が、光シグナルを視覚情報へと変換する、いわゆるシグナル伝達タンパク質に結合している脂質のわずかな違いに基づくことを明らかにした。

生体膜でのシグナル伝達に欠かせないGタンパク質^{*}には、イソプレノイドと呼ばれる脂質が共有結合しており、この脂質が結合していないGタンパク質は生体シグナルを正常に伝達することができない。Gタンパク質に結合しているイソプレノイドには、多数派のゲラニルゲラニルと少数派のファルネシルの2種類があり（図の上部参照）、これらの脂質は、シグナル伝達の「場」である細胞膜にGタンパク質をつなぎとめる「アンカーの役割」を持つと考えられてきた。しかし、Gタンパク質の種類によって2種類のイソプレノイドが使い分けられていることの生理的な意味は、両者の役割の違いがわからなかったため、長いあいだ謎であった。

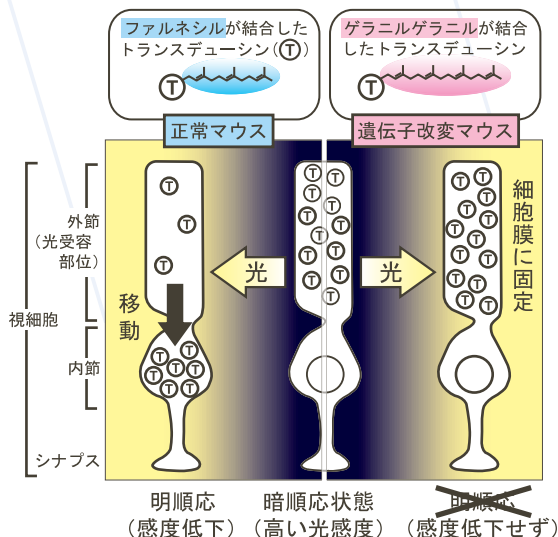
2種類のイソプレノイドは互いに構造が似ているが、その化学的な性質の違いにより、ファルネシルはゲラニルゲラニルよりもタンパク質を細胞膜につなぎとめる力が弱い。脳をはじめ多くの組織に存在するGタンパク質にはゲラニルゲラニルが結合しているが、興味深いことに、視覚を担う視細胞に存在するGタンパク質であるトランスデューシンにはファルネシルが結合している。この両者の使い分けの生理的意義を明らかにするため、当研究室の葛西秀俊君（大学院生）は遺伝子改変技術を駆使し、光シグナルを伝達するトランスデューシンに本来結合しているファルネシルをゲラニルゲラニルに置換したマウスを作製した。このマウスに、さまざまな強さの光刺激を与えて視細胞からの電気応答を記録し、視細胞の光感度を測定した。さらに、周囲の環境の光強度を変えて同じように光感度を測定し、光環境に対する馴れ（明順応）の効率を解析した。その結果、暗闇で順応させた場合の光感度は正常であったが、明るい場所に移した時の電気応答に異常が見られ、光感度が低下しにくいことが分かった。この原因を調べたところ、周囲の環境の光強度に応じて起こるはずのトランスデューシンの細胞内移動に異常が見られた。正常なマウスにおいては、連続して光刺激を受けると（つまり明るい環境では）、光シグナル伝達が起こる視細胞の外節（図）から内節へとトランスデューシンが移動する結果、外節で光シグナルが伝達されにくくなって感度が低下する。これが明順応の一つの分子メカニズムである。葛西君が作製

した変異マウスでは、この細胞内移動が起こりにくくなっていた。この違いは、イソプレノイドがファルネシルよりも膜結合力の強いゲラニルゲラニルに置換されたことにより、刺激にตอบสนองしてGタンパク質が細胞膜から離れる（逃げる）ことができず、光シグナル伝達を弱められなかったことによると推測される。

我々が夜空の星を数えたり、夏の炎天下でテニスがができるのは、 10^8 倍（1億倍）も違う光環境に応じて視感度を速やかに切り替えられるからである。神経伝達物質のシグナル伝達や他の感覚と比べて、このように幅広いダイナミックレンジをもつ視覚のシグナル伝達特性が、Gタンパク質に結合した脂質のわずかな違いによって達成されているということは驚くべきことであり、タンパク質に結合したイソプレノイドが動的な調節的役割を果たすことを明瞭に示した研究成果と言える [Kassai et al., Neuron, 47: 529-539 (2005)]。

（2005年8月18日プレスリリース）

^{*} グアノシン 5'-三リン酸 (GTP) またはグアノシン 5'-二リン酸 (GDP) と特異的に結合し、結合した GTP を GDP に加水分解する酵素の活性をもつタンパク質ファミリーは GTP 結合タンパク質と総称される。このなかで、ホルモンや神経伝達物質などの細胞外情報物質が結合する細胞膜上の受容体と共役し、細胞内へのシグナル伝達・増幅因子として機能するものを、特に Gタンパク質と略称する。



図：視細胞のGタンパク質であるトランスデューシン(T)は、視細胞が光刺激を受けて明順応すると外節から内節に移動し、外節での光シグナル伝達が起こりにくくなる（図の左）。ところが変異マウスでは、この細胞内移動が妨げられ、外節での光シグナルの伝達効率が高い状態に保たれるため、明順応しにくい（図の右）。

生命の「エラー除去装置」の働く仕組みを解明

横山 茂之 (生物化学専攻 教授)

生命の活動の大部分はタンパク質が担っている。そのタンパク質は20種類のアミノ酸のいくつかがつながってできている。バリンとスレオニン(図A)はその20種類のアミノ酸のうちの2つである。この2つは大きさと形がよく似ている。そのため、本来ならバリンが使われるべき部分に誤ってスレオニンが使われるということが時々起こる。ところがこのような時には「エラー除去装置」である「校正反応ドメイン」がはたらく。「校正反応ドメイン」は「エラー」であるスレオニンのみを認識し、分解して取り除く。今回私達の研究室では、この「エラー除去装置」がどのようにして「エラー」(スレオニン)のみを除去して、正しく作られたもの(バリン)は除去しないかを原子レベルで明らかにした。これにより生命の「エラー除去装置」のはたらく仕組みが解明された。

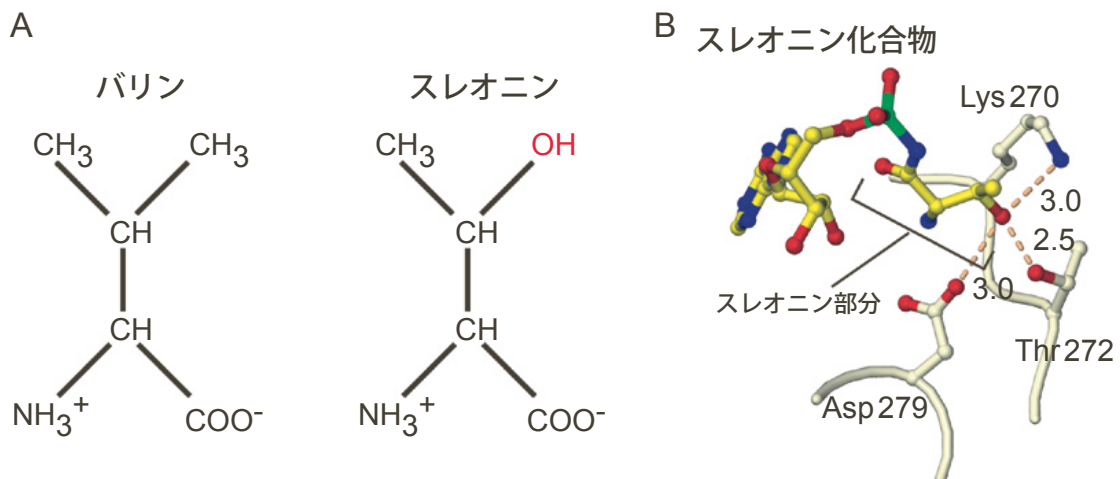
DNAの塩基配列はタンパク質のアミノ酸配列へと変換される。この変換の仲介役となるのが転移RNA(tRNA)である。変換が「遺伝暗号表」通りに規則正しく行われるには、特定のアミノ酸が正

しいtRNAと結合していなければならない。つまり、バリン用のtRNAにはバリンがついている必要がある。バリン用のtRNAにバリンを結合させるのはバリン用の合成酵素(ValRS)である。ところがValRSは1,000回に1回くらいの割合でバリンによく似たアミノ酸であるスレオニンを誤ってバリン用のtRNAにつけてしまう。この「エラー」を放置すると本来はバリンが入るべき場所にスレオニンが入った変異タンパク質ができてしまい、生命にとっては大問題となってしまう。そこで大問題となる前に「エラー除去装置」である「校正反応ドメイン」がバリン用tRNAに結合したスレオニンを切り離し、エラーを除去する。この「エラー除去装置」により、1,000回に1回起こる「エラー」も発見され、除去される。しかし、この「校正反応ドメイン」がどのようにして「エラー」であるスレオニンのみを除去しているのか、また正しいバリンは除去しないのかについては分かっていなかった。

今回、私達の研究室ではValRSの「校正反応ドメイン」がスレオニン化合物

と結合した状態の構造を大型放射光施設SPring-8を利用して明らかにした。その結果、「校正反応ドメイン」のLys270, Thr272, Asp279といった親水的なアミノ酸残基(それぞれ側鎖にNH₃⁺基, OH基, COO⁻基, を持つ)が、親水的なスレオニン側鎖(OH基を持つ)を認識する仕組みが明らかになった(図B)。「校正反応ドメイン」の結合部位がこのような親水的環境のために、親水性のスレオニン(OH基)のみを結合し、疎水性のバリン(CH₃基を持つ)は結合しないということが分かった。そうしてこの「校正反応ドメイン」は結合したスレオニン、すなわち「エラー」のみを分解、除去することにより、「エラー除去装置」としてはたらくのである。このような仕組みのおかげで、我々の体内のタンパク質ではその設計図であるDNAにバリンと書かれた場所には正確にバリンのみが入り、スレオニンは入らないのである。

(The Journal of Biological Chemistry 2005年8月19日号に掲載)



図：A. バリンとスレオニンの化学構造。

B. 校正反応ドメインにスレオニン化合物が結合した様子。図中数字は原子間距離 (Å単位)。