高校化学 L01 第 170 講 タンパク質の構造と性質

この講でできるようになること

- タンパク質がアミノ酸のつながりからできる天然高分子であることを説明できる。
- タンパク質の立体的な形が性質や働きに関係することを説明できる。
- 変性と加水分解の違いを説明できる。

タンパク質とは何か

タンパク質は、多数のアミノ酸がペプチド結合によってつながった天然高分子である。生体内では、筋肉や酵素などさまざまな働きを担っている。

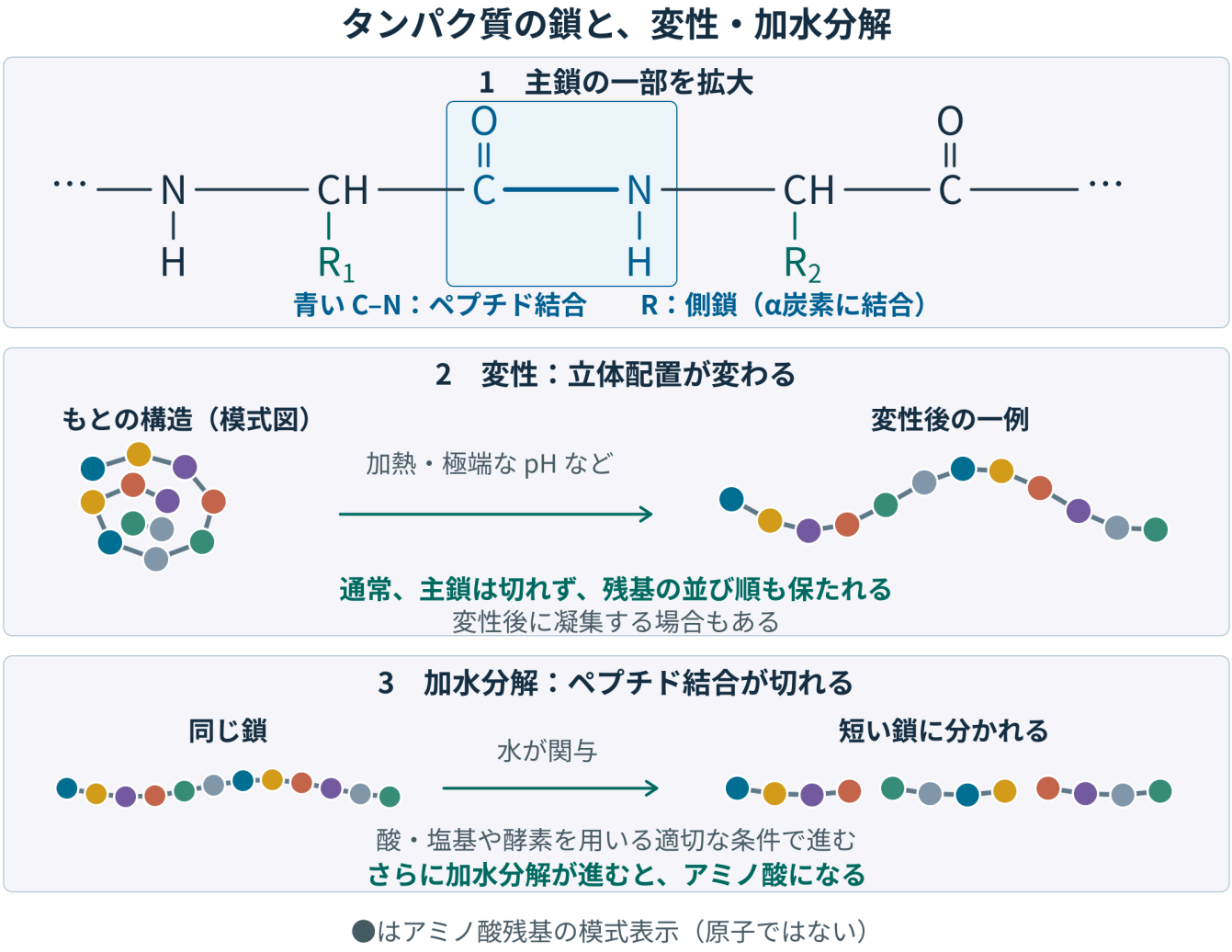

図 1　タンパク質の主鎖と変性・加水分解の違い

アミノ酸は、アミノ基 $-NH_2$ とカルボキシ基 $-COOH$ をもつ化合物であり、種類によって側鎖の部分が異なる。アミノ酸の並び方の違いによって、できるタンパク質の性質や働きも変化する。

ペプチド結合は、1 つのアミノ酸のカルボキシ基と、別のアミノ酸のアミノ基の間でできる結合である。ペプチド結合は、$-C(=O)-NH-$ の中のカルボニル炭素と窒素を結ぶ $C-N$ 結合であり、単なる炭素原子と窒素原子の結合すべてを指すわけではない。

タンパク質の形と性質

タンパク質は、アミノ酸が直線状につながっただけではなく、鎖が折り畳まれて立体的な形をつくっている。この形は、アミノ酸の並び方や側鎖の性質によって決まる。

タンパク質の働きは、その立体的な形と深く関係している。例えば、酵素は特定の物質と結びつく形をもつことで、特定の反応に関わることができる。

そのため、タンパク質の形が変化すると、本来の性質や働きが失われることがある。

この図は、タンパク質の性質を決める要素の違いを示したものである。熱や pH 変化による変性では、主に折り畳まれた立体配置が変化する。一方、加水分解ではペプチド結合そのものが切断され、より小さいペプチドやアミノ酸へ分解される。

タンパク質の変性

タンパク質に熱、酸や塩基による pH 変化などの影響を与えると、立体的な形が変化することがある。この現象を変性という。

変性によって、タンパク質は元の性質や働きを失う場合がある。ただし、通常の変性ではアミノ酸の並び方そのものが変化するわけではなく、ペプチド結合でつながった主鎖は保たれている。

また、変性したタンパク質がすべて完全に伸びた状態になるわけではなく、すべての変性が必ず不可逆的に進むわけでもない。条件によっては、元の状態に戻る場合もある。

変性と加水分解の違い

変性と加水分解は、どちらもタンパク質に変化を与える現象であるが、変化する部分が異なる。

現象	主な変化	アミノ酸のつながり
変性	タンパク質の立体的な形が変化する	通常はペプチド結合を保つ
加水分解	水の作用でペプチド結合が切れる	アミノ酸や小さいペプチドに分かれる

卵白を加熱すると白く固まる現象は、タンパク質の立体的な形が変化した例である。このような観察は、タンパク質の構造と性質の関係を理解する手掛かりになる。

ポリペプチドとタンパク質の基本構造

タンパク質は、多数のα-アミノ酸がペプチド結合でつながった天然高分子である。多数のアミノ酸残基が連なった鎖をポリペプチドと呼び、タンパク質は 1 本または複数本のポリペプチド鎖を基本として、それぞれ固有の性質や働きをもつ。

タンパク質の性質は、アミノ酸の並び方だけでなく、鎖がどのように折り畳まれているかにも関係している。タンパク質の構造は、理解のために次の 4 つの段階で見ることができる。

- 一次構造：ポリペプチド鎖をつくるアミノ酸の配列である。
- 二次構造：主鎖の$\mathrm{C=O}$部分と$\mathrm{N-H}$部分に関わる水素結合で安定化される局所的な配置であり、代表例としてαヘリックス（らせん状）やβシート（並んだ鎖部分）がある。
- 三次構造：1 本のポリペプチド鎖全体が折り畳まれてできる立体的な形である。
- 四次構造：複数本のポリペプチド鎖が組み合わさった構造である。

ただし、すべてのタンパク質が四次構造をもつわけではない。四次構造は複数のポリペプチド鎖からできる場合に見られる構造である。

©ミライコーチング

これらの構造を支える結合には違いがある。アミノ酸同士をつなぐペプチド結合は主鎖を形成する共有結合である。一方、二次構造などの安定化には水素結合が関係する。

変性では通常、一次構造であるアミノ酸配列やペプチド結合は保たれたまま、折り畳まれた立体的な形が変化する。そのため、タンパク質本来の性質や働きが失われることがある。

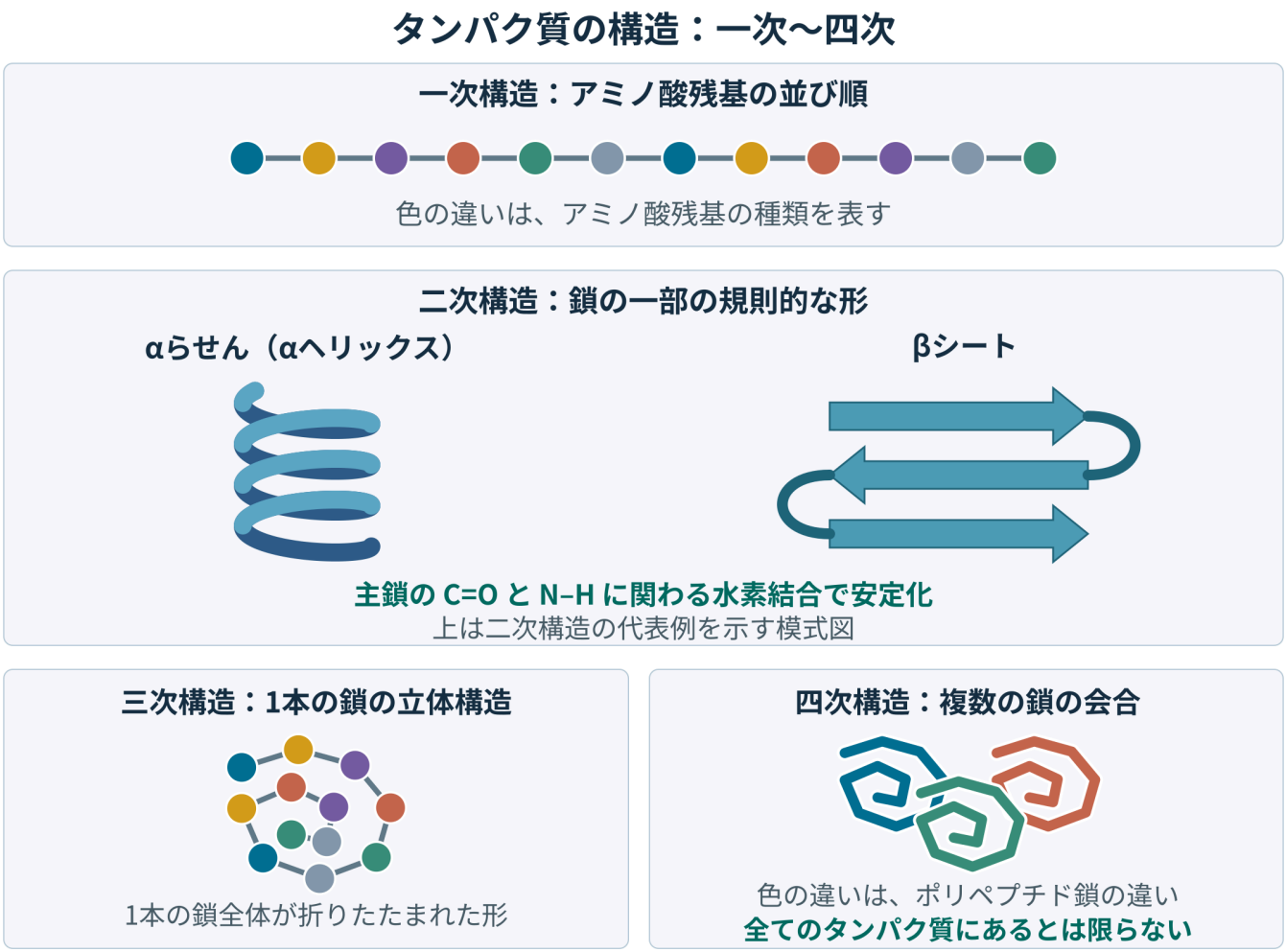

図 2　タンパク質の構造を四つの段階で見る

卵白の加熱による変性と凝固

卵白は、タンパク質を多く含む身近な試料である。卵白を加熱すると、タンパク質の立体的な形が変化し、分子同士が集まりやすくなる。その結果、透明感のある状態から白く固まった状態へ変化する。



図 3　卵白の加熱前（左）と加熱後（右）の実験のイメージ

加熱前の卵白は透明〜半透明で淡黄色の流動状である。加熱後は不透明な白色の凝固物になる。この変化は、タンパク質の変性によって立体構造が変わり、分子同士が集まったことによる。

卵白の加熱による凝固は、冷却しただけでは元に戻らない。

タンパク質の代表的な検出反応

タンパク質は、含まれる構造の特徴を利用して検出できる。代表的な反応として、ビウレット反応とキサントプロテイン反応がある。

©ミライコーチング



図 4　卵白試料の実験のイメージ。左はビウレット反応、中は濃硝酸で加熱後、右は冷却後にアルカリ性にした状態

ビウレット反応

ビウレット反応では、タンパク質試料をアルカリ性にした後、少量の硫酸銅(II)水溶液を加えると紫〜赤紫色を示す。

この呈色は、銅(II)とペプチド部分がつくる錯体によるものである。通常、反応には 2 個以上のペプチド結合が必要である。

そのため、グリシンのような単一アミノ酸やジペプチドは通常、陰性となる。ビウレット反応はタンパク質の確認に利用されるが、タンパク質だけに完全に特有の反応であると考えてはいけない。

また、ビウレット反応では加熱を必要としない。青色から赤色の沈殿を生じる糖類の反応とは区別する必要がある。

キサントプロテイン反応

キサントプロテイン反応では、卵白などの試料に濃硝酸を加えて加熱すると黄色を示す。さらに冷却後、アルカリ性にすると橙黄色になる。

この呈色には、チロシンやトリプトファンなどの反応しやすい芳香族側鎖が、濃硝酸によってニトロ化されることが関係する。

該当する側鎖を含まないタンパク質などは陰性となるため、すべてのタンパク質が陽性になるわけではない。

©ミライコーチング

反応	条件	観察される色	関係する特徴
ビウレット反応	アルカリ性＋硫酸銅(II)水溶液	紫〜赤紫	ペプチド結合をもつ部分
キサントプロテイン反応	濃硝酸で加熱後、冷却してアルカリ性	黄→橙黄	芳香族側鎖をもつアミノ酸

濃硝酸やアルカリ、加熱を扱う実験は、保護具を着用し指導下で行う。加熱後は冷却してからアルカリを加える。家庭での実施は行わない。

例題 1

問題

次の A〜D は、タンパク質の構造の特徴を表したものである。A はアミノ酸の並び、B はαヘリックスやβシートのような局所的な配置、C は 1 本のポリペプチド鎖全体の折り畳み、D は複数のポリペプチド鎖の組み合わせを示している。

(1) A〜D に対応するタンパク質の構造を、一次構造〜四次構造から選んで答えよ。

(2) アミノ酸をつなぐペプチド共有結合と、主鎖の$\mathrm{C=O}$部分と$\mathrm{N-H}$部分などの間にできる水素結合の違いを説明せよ。また、すべてのタンパク質が四次構造をもつか答えよ。

解答・解説

(1) A：一次構造　B：二次構造　C：三次構造　D：四次構造

A の一次構造は、ポリペプチド鎖を構成するアミノ酸の配列である。

B の二次構造は、主鎖部分間の水素結合によって生じる局所的な配置であり、αヘリックスやβシートが代表例である。ここでいう主鎖部分間とは、同じポリペプチド鎖内の主鎖部分同士の場合も含む。

C の三次構造は、1 本のポリペプチド鎖全体が折り畳まれてできる立体的な形である。

D の四次構造は、複数のポリペプチド鎖が組み合わさってできる構造である。

(2) ペプチド結合は、アミノ酸同士をつなぐ共有結合であり、ポリペプチド鎖の主鎖を形成する結合である。一方、水素結合は主鎖部分間の配置を保ち、二次構造などの形成に関係する弱い相互作用である。

そのため、変性では通常、ペプチド結合によるアミノ酸配列は保たれたまま、水素結合などに関係する立体的な構造が変化する。

また、すべてのタンパク質が四次構造をもつわけではない。四次構造は複数のポリペプチド鎖が組み合わさる場合に見られる構造であり、1 本のポリペプチド鎖だけからなるタンパク質も存在する。

©ミライコーチング

例題 2

問題

図 3 は、卵白を加熱する前後の様子を示したものである。加熱前の卵白は透明〜半透明で淡黄色の流動状であり、加熱後は不透明な白色の凝固物になった。

(1) 卵白を加熱したときの観察結果の違いを、タンパク質の変性と凝固の関係に触れて説明せよ。

(2) この変化では、通常アミノ酸配列やペプチド結合がどうなるか。加水分解との違いに触れて説明せよ。

解答・解説

(1) 卵白を加熱すると、タンパク質の立体的な形が変化する変性が起こる。その結果、タンパク質分子同士が集まりやすくなり、凝固して不透明な白色の固体状になる。

(2) 通常の変性では、タンパク質の一次構造であるアミノ酸配列や、それをつなぐペプチド結合は保たれる。

一方、加水分解では水の作用によってペプチド結合そのものが切断され、タンパク質はより小さいペプチドやアミノ酸へ分解される。

したがって、変性は主に立体構造の変化であり、加水分解はアミノ酸をつなぐ結合の切断であるという違いがある。

©ミライコーチング

例題 3

問題

卵白アルブミンを含む別試料について、図 4 に示す検出反応を行った。

(1) 試料をアルカリ性にした後、少量の硫酸銅(II)水溶液を加える試験について、試験名、観察される色、検出に関係する部分を答えよ。

(2) 試料に濃硝酸を加えて加熱し、冷却後にアルカリ性にする試験について、試験名、各段階で見られる色、関係するアミノ酸側鎖の種類を答えよ。

解答・解説

(1) 試験名：ビウレット反応

観察される色：紫〜赤紫色

検出に関係する部分：ペプチド結合をもつ部分

ビウレット反応では、アルカリ性の条件で銅(II)とペプチド部分が錯体をつくることで呈色する。通常、2 個以上のペプチド結合が必要であるため、単一のアミノ酸やジペプチドは通常、陰性となる。

(2) 試験名：キサントプロテイン反応

濃硝酸を加えて加熱した段階：黄色

冷却後にアルカリ性にした段階：橙黄色〜橙色

関係するアミノ酸側鎖の種類：芳香族側鎖をもつアミノ酸

キサントプロテイン反応では、チロシンやトリプトファンなどの反応しやすい芳香族側鎖が濃硝酸によってニトロ化されることが、呈色に関係する。

演習問題

演習 1

タンパク質の構造について答えよ。

(1) アミノ酸の並び方、αヘリックスやβシートのような局所的な配置、1 本のポリペプチド鎖全体の折り畳み、複数のポリペプチド鎖の組み合わせを、それぞれ一次構造〜四次構造に対応させよ。

(2) 1 本のポリペプチド鎖からなるタンパク質と、複数本のポリペプチド鎖からなるタンパク質では、四次構造の有無にどのような違いがあるか説明せよ。

演習 2

卵白を加熱したところ、透明〜半透明の流動状の状態から、不透明な白色の凝固物へ変化した。

(1) この観察結果を、タンパク質の変性と凝固の関係に触れて説明せよ。

(2) 加熱による変化と、タンパク質の加水分解との違いを、アミノ酸配列やペプチド結合に触れて説明せよ。

©ミライコーチング

演習 3

タンパク質試料とジペプチド試料に対してビウレット反応を行った。

(1) タンパク質とジペプチドでは、ビウレット反応の結果にどのような違いが生じるか。また、その理由を説明せよ。

(2) ビウレット反応で紫色を示す原因となる、タンパク質中のどの部分が関係しているか説明せよ。

演習 4

卵白アルブミンを用いてキサントプロテイン反応を行った。

(1) 濃硝酸を加えて加熱した後、冷却してからアルカリ性にしたときの色の変化を順に答えよ。

(2) キサントプロテイン反応が起こる理由を、関係するアミノ酸側鎖の種類に触れて説明せよ。

演習 5

(1) 次の 2 つの主張について、正しいか誤りかを判断し、理由を説明せよ。

「変性すると必ずペプチド結合が切れる」

「すべてのタンパク質がキサントプロテイン反応陽性になる」

演習問題の解答・解説

解答 1

(1) アミノ酸の並び方は一次構造、αヘリックスやβシートのような局所的な配置は二次構造、1 本のポリペプチド鎖全体の折り畳みは三次構造、複数のポリペプチド鎖の組み合わせは四次構造である。

二次構造では、主鎖部分間の水素結合が関係する。この主鎖部分間には、同一のポリペプチド鎖内の主鎖部分同士も含まれる。

(2) 1 本のポリペプチド鎖だけでできるタンパク質では、複数鎖の組み合わせがないため、四次構造をもたない。

一方、複数本のポリペプチド鎖が組み合わさって働くタンパク質では、四次構造が見られる。

解答 2

(1) 卵白を加熱すると、タンパク質の立体的な形が変化する変性が起こる。その結果、タンパク質分子同士が集まりやすくなり、凝固して不透明な白色の状態になる。

(2) 通常の変性では、タンパク質の一次構造であるアミノ酸配列や、それをつなぐペプチド結合は保たれる。

一方、加水分解では水の作用によってペプチド結合が切断され、タンパク質はより小さいペプチドやアミノ酸へ分解される。

したがって、変性は立体構造の変化であり、加水分解はペプチド結合の切断による分解である。

©ミライコーチング

解答 3

(1) タンパク質は通常、ビウレット反応で紫色を示す。一方、ジペプチドは通常、陰性となる。

これは、ビウレット反応には通常 2 個以上のペプチド結合が必要であるためである。ジペプチドに含まれるペプチド結合は 1 個であり、反応に必要な条件を満たさない。

(2) ビウレット反応の紫色は、アルカリ性条件で銅(II)とペプチド部分がつくる錯体による呈色である。

そのため、アミノ酸が多数つながったタンパク質では、複数のペプチド結合をもつ部分が反応に関係する。

解答 4

(1) 濃硝酸を加えて加熱すると黄色になる。

その後、冷却してからアルカリ性にすると橙黄色〜橙色になる。

(2) チロシンやトリプトファンなどの反応しやすい芳香族側鎖が、濃硝酸によってニトロ化されることが呈色に関係する。

そのため、該当する芳香族側鎖を多く含むタンパク質では反応が見られやすい。一方、該当する残基が少ない、または含まれないタンパク質では陰性となる場合もある。また、すべての芳香族側鎖が同じ強さで呈色するわけではない。

解答 5

「変性すると必ずペプチド結合が切れる」

誤りである。

通常の変性では、タンパク質の立体構造が変化するが、一次構造であるアミノ酸配列やペプチド結合は保たれる。これに対して、加水分解では水が関与してペプチド結合が切れる。

「すべてのタンパク質がキサントプロテイン反応陽性になる」

誤りである。

キサントプロテイン反応は、主にチロシンやトリプトファンなどの芳香族側鎖に関係する。そのため、該当する芳香族側鎖をもたない、または少ないタンパク質では陰性となる場合がある。

©ミライコーチング