

学校教育における「DNA二重らせん構造モデル」の課題と その改善に関する研究

Studies on the Improvement of DNA Double Helix Structure Model for Science Class in Secondary School Education

西野 秀昭

川畑 雛子

Hideaki NISHINO

Hinako KAWABATA

福岡教育大学・

福岡教育大学

理科教育ユニット・生物教室

(現 同仁グローバル・分析員)

(令和元年9月30日受付, 令和元年12月12日受理)

要 約

J.D.Watson と F.H.C.Crick によって提案された DNA 分子の二重らせん構造モデルによると, 内部の塩基対から外部のホスホジエステル結合のリン原子までの内側の角度が 134° 程であることによって, 二本のらせん間には大きな溝(主溝)と小さな溝(副溝)が存在している。副溝側からは, 塩基対が異なっても, 二本鎖 DNA に作用する酵素タンパク質が認識する水素結合受容体・水素結合供与体・水素原子の並び方が同じになり, 塩基対の区別ができない。しかし, 主溝側からは水素結合受容体・水素結合供与体・水素原子やメチル基(AとTの場合)の並びから塩基対の種類を区別可能である。このことから二本鎖 DNA が一本鎖に解離しなくても塩基配列を読み取れるという主溝の存在意義について考察が可能である。しかし一般に流布している DNA 分子の二重らせん構造モデルには, これら主溝と副溝が反映されていないものが少なからず見受けられる。そこで本研究では, 主溝と副溝を反映した紙で作る既存モデルの普及を目指し, 紙でできていながらも堅牢で, プラスミドのような閉環した DNA 二重らせんモデルも作成可能な工夫や改善を行うとともに, 主溝側から見る, 又は触ると塩基対の区別ができる大型の学習モデルの提案も行った。

キーワード: DNA, 二重らせん構造, モデル, 主溝, 副溝

1 目 的

Watson と Crick (1953) によって提案された DNA 分子の二重らせん構造モデル(図1)によると, 内部の塩基対から外部のホスホジエステル結合のリン原子までの内側の角度が 134° 程となることによって, 二本のらせん間には大きな溝(主溝)と小さな溝(副溝)が存在している(図1)。制限酵素や遺伝子調節因子などの DNA に作用するタンパク質は, DNA の二本鎖が一本鎖に解離しなくても, 水素結合受容体・水素結合供与体・水素原子(以上を以降, 「水素結合に関わる原子」と称する)・メチル基の並び方から塩基対の塩基配列を読み取ることができ, その結果, 特定の塩基配列を二本鎖のままに認識が可能とな

る(Bruce 他, 2002)(表1)。その際, 副溝側からは塩基対が異なっても, 水素結合に関わる原子・メチル基の並び方が同じになり, 塩基対の区別ができない一方, 主溝側からは水素結合に関わる原子・メチル基の並びから塩基対の種類を区別できることから, DNA の特定の塩基配列を認識して機能する酵素や遺伝子発現調節因子は主溝側から塩基の並び方を識別している(図2)。主溝と副溝が存在する DNA 分子の二重らせん構造モデルからは, このような主溝の存在の意義について考察をすることも可能になると考えられる。しかし教科書等や市販模型等で, DNA 分子の二重らせん構造モデルやその描写には, Watson と Crick (1953) による二重らせんモデルによって

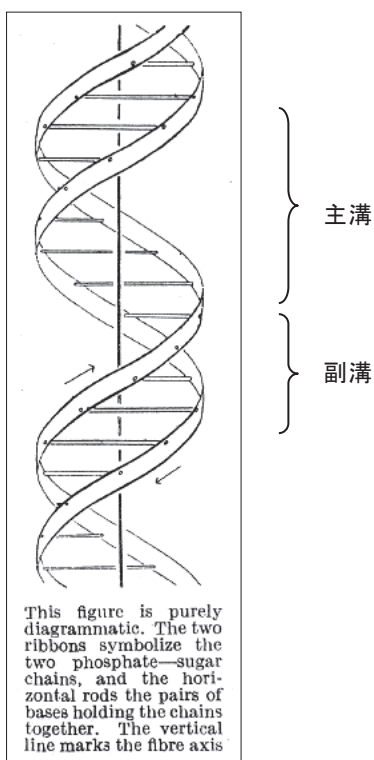


図1 WatsonとCrickによるDNA分子の二重らせん構造モデルでの主溝と副溝

WatsonとCrick(1953)の図を改変。

示された主溝と副溝が反映されていないものが見受けられる。例えば、図3は第41回日本分子生物学会年会のプログラム表紙であるが、分子生物学の専門誌でも、主溝と副溝が反映されていないDNA二重らせん構造が描かれるという現状がある。例えば図4のように、市販模型でも同様の問題が見出されるものもあり、比較的高価に販売されている。また、高等学校の生物教科の教科書の図や付録に同様の問題が見出されるものがある。例えば、高等学校生物基礎(第一学習社)の付録や表紙裏の挿絵、改訂版生物基礎(数研出版)の付録等である。

中等教育理科においてDNA二重らせん構造モデルが活用されるのは、高等学校であるが、その基盤になる学習は中学校にある。即ち、中学校第3学年「生命の連続性」単元の「遺伝の規則性と遺伝子について」では、交配実験の結果などから形質の現れ方の規則性を見だし、染色体にある遺伝子を介して親から子へ形質が伝わること及び分離の法則について理解させることをねらいとし、遺伝子の本体がDNAであることを取り扱う(文部科学省, 2017)とされている。この事を踏まえ、高等学校生物基礎では、「(DNAは)塩基の相補性によって形成される2本鎖構造であること、塩

表1 DNA二重らせん構造のまま特定の塩基配列を認識して機能する酵素や遺伝子発現調節因子の例

	酵素・タンパク質因子	認識するDNA塩基配列
細菌	EcoRI	5' -G/AATTC-3' * 3' -CTTAA/G-5' *
	NotI	5' -GC/GGCGC-3' * 3' -CGCCGG/CG-5'
	BamHI	5' -G/GATCC-3' 3' -CCTAG/G-5'
	lac リプレッサー	5' -AATTGTGAGCGGATAACAATT-3' 3' -TTAACTCGGCTATTGTAA-5'
	CAP	5' -TGTGAGTTAGTCACT-3' 3' -ACACTCAATCGAGTGA-5'
	λリプレッサー	5' -TATCACGCCAGAGTA-3' 3' -ATAGTGGGGTCTCCAT-5'
酵母	Gal4	5' -CGGAGACTGTCTCCG-3' 3' -GCCTCTGACAGAGGC-5'
	Mat α2	5' -CATGTAATT-3' 3' -CATGTAATT-5'
	Gcn4	5' -ATGACTCAT-3' 3' -TACTGAGTA-5'
	キイロシヨウジョウバエ	Kruppel
哺乳類	Bicoid	5' -GGGATTAGA-3' 3' -CCCTAATCT-5'
	Spl	5' -GGGCGG-3' 3' -CCCGCC-5'
	Oct-1 Pou domain	5' -ATGCAAAAT-3' 3' -TAGGTTTA-5'
	GATA-1	5' -TGATAG-3' 3' -ACTATC-5'
	MyoD	5' -CAAATG-3' 3' -GTTTAC-5'
	p53	5' -GGCAAGTCT-3' 3' -CCCGTTCAGA-5'

Bruce 他 (2002) p.383 の TABLE7-1 を引用・改変。

制限酵素の認識配列の「/」は、制限酵素が加水分解するホスホジエステル結合の箇所を示す。

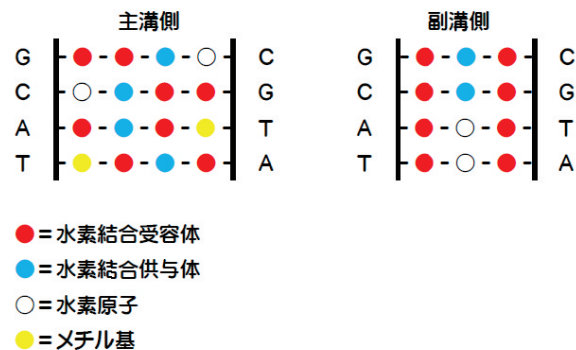


図2 主溝側と副溝側からの塩基対の見え方

主溝側からなら、G-CとC-G、A-TとT-Aを区別できるが、副溝側からはできない。Bruce 他 (2002) から引用・改変。



図3 DNA分子二重らせん構造の描写において主溝と副溝が反映されていない例

背景のDNA二重らせん構造モデルと思われる描写で、らせんの間隔が均等に描かれている。



図4 DNA分子二重らせん構造モデルの市販品において主溝と副溝が反映されていない例

左が6,000円、右が10,000円で販売されている(税抜き)(ナリカHPより引用)。

基の配列が遺伝情報となること」を扱い、高等学校生物では遺伝子の発現調節に様々なタンパク質が関わっていることを学ぶこととされている(文部科学省, 2018)。このように中学校から高等学校にかけてDNAの構造と機能の学習が実施されることから、DNA二重らせん構造の描写や模型などのモデルは科学的根拠に基づいた適切な表現がなされなければならないと考えられる。

そこで本研究では、学校教育におけるDNA分子二重らせん構造モデルのこのような課題を解決するための、既存の、紙で作るDNA分子二重らせん構造モデルの構造維持が脆弱な点を改善・工夫し、安価で科学的根拠に基づいたDNA分子構造モデルを提案することとした。即ちDNA分子における主溝と副溝が反映されている、紙で作る既存モデルの普及を目指し、紙できていながらも形が比較的堅牢で、プラスミドのような閉環したDNA二重らせん構造モデルも作成可能な工夫・改善とともに、主溝側から見る、又は触ると塩基対の区別ができる大型の学習モデルの提案も行う事とした。

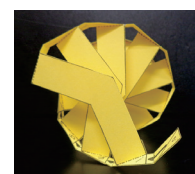
2 方法

主溝と副溝が明確にされた、紙で作るDNA分子二重らせん構造既存モデルの工夫・改善: 『DNAの冒険』(トランスナショナル・カレッジ・オブ・レックス(以降, トラカレ), 1998)で紹介された、画用紙で作るDNA分子二重らせん構造モ

A 横から



B 真上(下)から



C 構造維持の脆弱性

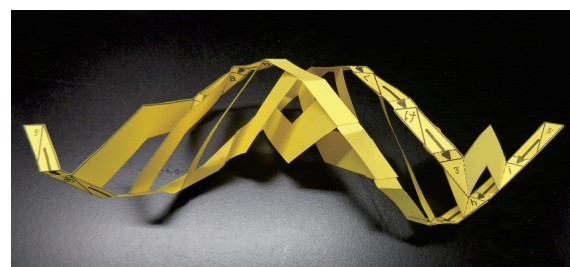


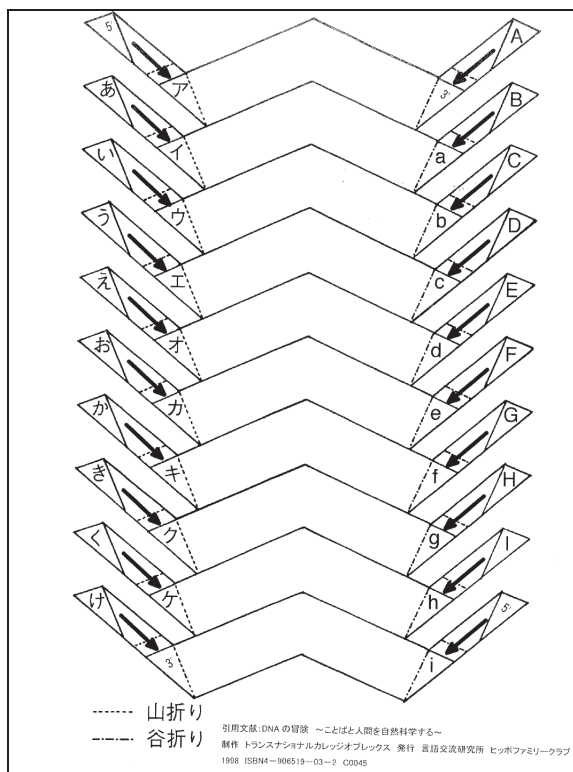
図5 ヒッポモデル作成例

A: 1ピッチ(10塩基対分)作成した場合。らせんの左側が主溝, 右側が副溝。B: 塩基対の小さい角度側が副溝で, その反対側が主溝となる。C: らせん塩基対の角度が90°ではなく、伸びて潰れたような状態。

デル「ヒッポモデル」(図5A, B)を工夫・改善することとした。ヒッポモデルを採り上げることにしたのは、次のような利点①・②・③と、工夫・改善が必要と考えられる④・⑤・⑥がその理由である。

①主溝と副溝が意識され, 10塩基で一回転(1ピッチ)し, 科学的根拠に基づいている。

A 印刷用型紙(トラカレ,1998より引用)



B 実際の型紙

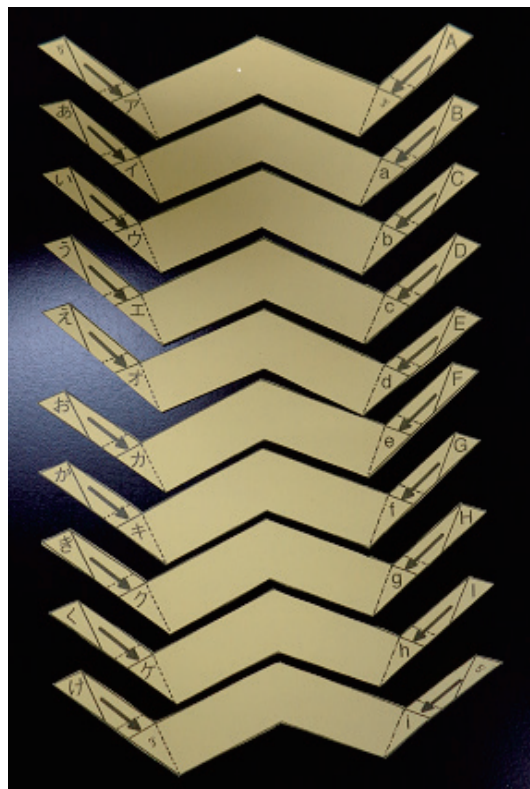


図6 ヒッポモデルの型紙

A: この印刷用の型紙を画用紙にコピーする。B: 型紙を画用紙から切り出したもの。10塩基対分。

② DNAの半保存的複製も、実際にモデルを複製させて学ぶことができる。

③ 原図のコピーを切り貼りするのみで、安価に作成できる。

④ らせん塩基対の角度を90°に保つための工夫・改善が必要である(図5C)。

⑤ 1ピッチ分を複数つなげると、閉環した環状構造(例えば、プラスミドDNA)の作成も可能と考えられ、検討の価値がある。

⑥ 二重らせん構造のまま、主溝側から酵素や遺伝子調節因子タンパク質が特異的な塩基配列を読み取る仕組みを示すことができる工夫・改善が必要である。

④・⑤・⑥の課題は、本研究において工夫・改善の検討を行う。

ヒッポモデル(トラカレ, 1998): 次の材料などを用いて作成手順に従って作成する。

【材料など】『DNAの冒険』の付録(ヒッポモデル)の型紙を印刷した画用紙(図6), ハサミ, のり。

【作成手順】型紙を印刷した画用紙の切り取り線に沿って、塩基対単位をハサミで切り取る。

「・・・」を山折り, 「- - -」を谷折りにし, 折り目をつける。のりしろにのりを塗り, 次の方法を基準として型紙どうしをつなげる。「アルファベット」: のりしろ「A」にのりを塗り, のりしろ「a」の裏側に貼り付ける。「B」以降, 「b」以降も同様。「かなカナ」: のりしろ「あ」の裏側にのりを塗り, のりしろ(ア)に貼り付ける。「い」以降, 「イ」以降も同様。

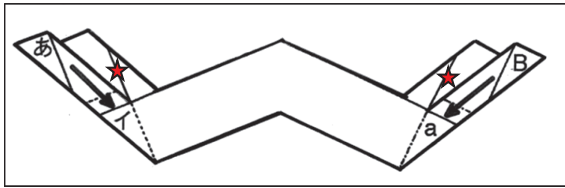
ヒッポモデルへの高校生の評価: 平成30年度福岡教育大学オープンキャンパス(2018年7月21日土曜日)で来訪した高校生43名にヒッポモデルを作成してもらい, 作り易さに関して5段階評価と作成時間をアンケート調査した。

堅牢性向上型ヒッポモデル「ヒッポモデルK」: 次の材料などを用いて作成手順に従って作成する。

【材料】『DNAの冒険』の付録(ヒッポモデル)の型紙に部分パーツを追加, 「ヒッポモデルK」とし, 印刷した画用紙(図7A), ハサミ, のり。

【作成手順】ヒッポモデルと同じ。ただし, 塩基対とらせんが90°の角度がつくように追加部分パーツをのり付けする(図7B)。

A 切り取った塩基対(追加部分パーツ★付)



B 追加部分パーツを90°の角度でらせんへ貼り付け



図7 堅牢性を向上させるための追加部分パーツを導入したヒッポモデルKの塩基対部分

追加部分パーツを隣の塩基対までに渡って貼り付けている(Bの、確認用に赤く塗った部分)。

ヒッポモデルKへの評価：2019年1月23日水曜日4限、5限「遺伝学実験」にて、理科教師を目指す学生8名にヒッポモデルKを作成してもらい、堅牢性の視点でヒッポモデル(ストロー通しで堅牢化)と比較してもらった。

閉環した環状プラスミドDNAモデルをヒッポモデルKで作成：ヒッポモデル1ピッチ分を複数個つなげて、閉環した環状プラスミドDNAを作成し、構造が保たれるか検証する。

大型モデル塩基対の作成手順：ここでは、「水素結合に関わる原子・メチル基をモデルに貼り付けられるようにすること」、「真上から見ても、真横からみても水素結合に関わる原子・メチル基の役割が判断できるようにすること」に重点を置いて作成する。モデルに貼り付ける水素結合に関わる原子・メチル基を本研究では「パーツ」と呼ぶ。

【材料(本体)】ダンボール、ガムテープ、マジックテープ、ビニールテープ、セロハンテープ、竹ひご、ハサミ、ダンボールカッター。

【作成手順(本体)】本来の塩基対型紙を5倍に拡大コピーして段ボールに貼り付け、ダンボールを切りとる。ダンボールが折れないようにするた

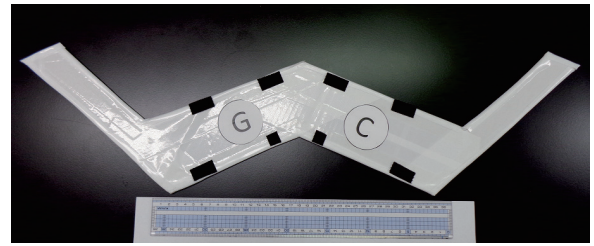


図8 大型モデル(本体)

C-G, A-T, T-Aの塩基対も同様。定規は全長37cm。



図9 塩基対のパーツ

左から、水素供与体(青)、水素受容体(赤)、水素原子(黒)、メチル基(黄)の各パーツ。折り曲げた部分の裏にマジックテープが貼ってある。定規は37cm。

め、段ボールの裏面に竹ひごを貼り付けて平面を保てるように補強し、全体をガムテープで巻く。さらに縁にビニールテープを巻き、各塩基を示すG・C・A・Tを貼る。最後にパーツをつける部分にマジックテープを貼る(図8)。

【材料(パーツ)】ダンボール、ガムテープ(白色)、マジックテープ、ビニールテープ(白色)、セロハンテープ、色紙(赤、青、黒、黄)、ハサミ、ダンボールカッター、ワイヤー。

【作成手順(パーツ)】各塩基対の水素結合に関わる原子やメチル基の役割ごとで形を分け、ダンボールを切りとる(図9参照)。上から2cmのところに切れ込みを入れ折り目をつける。各色紙を役割の形に切る。針金を約7.5cmに切り、先端から約1.5cmの部分を曲げ、ダンボールの側面に貼ることで折り目を固定する。ダンボールの両面に色紙を貼り、縁にビニールテープを貼る。本体につける部分にマジックテープを貼る(マジックテープの下にはビニールテープを先に貼っておく)。最後に水素結合受容体(NとO、赤)や水素結合供与体(H、青)、水素原子(H、黒)やメチル基(CH₃、黄)を記入する。

表2 ヒッポモデルへの高校生の評価

評価	人数
作りやすい	26
やや作りやすい	13
どちらとも言えない	1
やや作りにくい	0
作りにくい	0
無回答	3
計	43

表3 ヒッポモデル（ストロー通し）とヒッポモデルKへの大学生の評価

モデル	得点
ヒッポモデル（ストロー通し）	16
ヒッポモデルK	16

「しっかりしている = 2点, ややしっかりしている = 1点, どちらとも言えない = 0点, ややしっかりしていない = -1点, しっかりしていない = -2点」と点数化し, 8名の評価を集計している。



図10 閉環した環状構造のDNA二重らせん構造モデル（ヒッポモデルKを12個連結）

3 結果と考察

ヒッポモデルへの高校生の評価：平成30年度福岡教育大学オープンキャンパスへ訪れた高校生43名にアンケート調査を行った（表2）。

その結果, 「作りやすい・やや作りやすい」と43名中39名が回答した。ヒッポモデルの作成にかかった時間は, だいたい30~40分ほどであった。ヒッポモデルへの感想として, 主溝と副溝の存在に初めて気がついたとの記述が多くを占め, 「知らなかったことを視覚的に知ることができた」「話を聞くだけの授業よりとても楽しく学習できた」との意見は, ヒッポモデルを用いてDNAの構造と機能を高校生が理解する方向へ導けることを示していると考えられた（表2）。

らせんと塩基対の角度を90°に保つための工夫・改善：ヒッポモデルの型紙に追加部分パーツを導入（図7）して構造の堅牢化を試みて, 堅牢の程度を, 理科教師を目指す大学生にアンケート調査した。また, プラスミドDNAの作成を意識して閉環した二重らせん構造を作成できるか試み, 教員研修会の際に高等学校生物教員等に口頭で評価を得た（後述）。

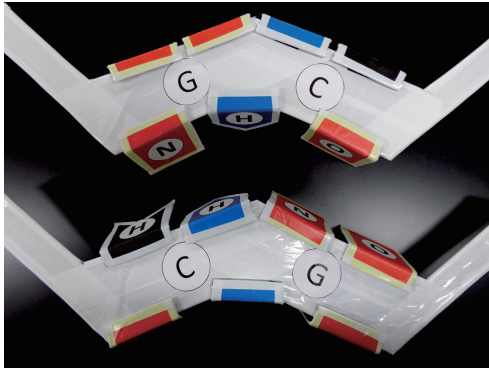
ヒッポモデルKへの大学生の評価：ヒッポモデルKに対して, 理科教師を目指す学生へアンケート調査を行った。その結果, 中心軸としてスト

ローを通して構造を補強したヒッポモデルと, らせんのリボンと塩基対が垂直な関係を保つ工夫がなされたヒッポモデルKが同得点の支持を得た（表3）。

しかしヒッポモデル（ストロー通し）は, プラスミドのような環状構造モデルを作成する際には, ストローがあるために滑らかな円が描けないことが予想されることから, ヒッポモデルKによってプラスミドの模型を作成することとした。このようなモデルを使うことによって, ヒッポモデルKは複製が可能なこと（トラカレ, 1998）から, このプラスミド模型も複製させることが可能になることに加えて, 制限酵素による認識部位の加水分解の様子も再現できるモデルとなりうると考えられた。

閉環した環状プラスミドDNAモデルをヒッポモデルKで作成：図10のように, 1ピッチ12個分のヒッポモデルKで作成した。大きな環状構造となると, ヒッポモデルKでも扱いが難しくなるかもしれない。大きな環状構造にする場合には, クリスマスリースのように内部を針金などで構造を保持すると壁などにも掛けられると考えられる。また, プラスミドの複製や大腸菌のゲノムDNAの θ 型複製の仕組み理解などの教材に供する場合は, 大き目の机の上に置いて複製させることで視覚

A 塩基対 G-C と C-G を上から見た場合



B 塩基対 G-C と C-G を副溝側から見た場合



C 塩基対 G-C と C-G を主溝側から見た場合

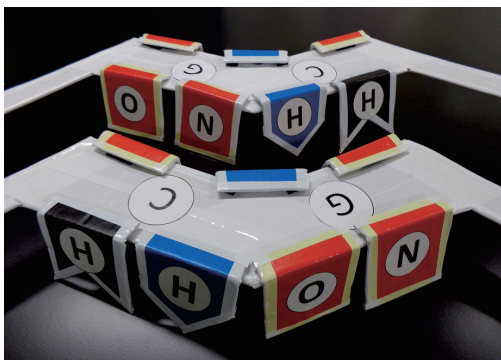
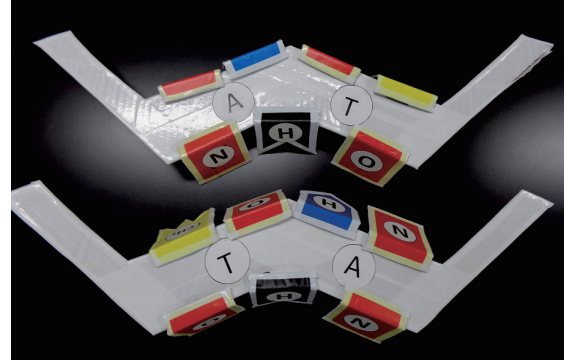


図 11 G と C の塩基対を上・副溝・主溝の各側から見た場合の水素結合受容体 (赤), 水素結合供与体 (青), 水素原子 (黒) の見え方と形

的に複製の仕組み理解につながると考えられた。学校での学習効果はアンケート調査や授業への導入で検証が必要であるが、令和元年8月1日木曜日の福岡県高校生物教員研修（福岡県キャリアアップ155講座）では生物教員等に概ね好評であった。大型ヒッポモデルK塩基対の作成：ヒッポモデルの塩基対を5倍に拡大コピーして型紙を作成した（図11，図12）。いずれの塩基対も主溝側から見れば色の違い，又は触れれば形の違いが分かる。しかし，副溝側からはG-CとC-Gの区別がつかず，A-TとT-Aも同様である。このように

A 塩基対 A-T と T-A を上から見た場合



B 塩基対 A-T と T-A を副溝側から見た場合



C 塩基対 A-T と T-A を主溝側から見た場合

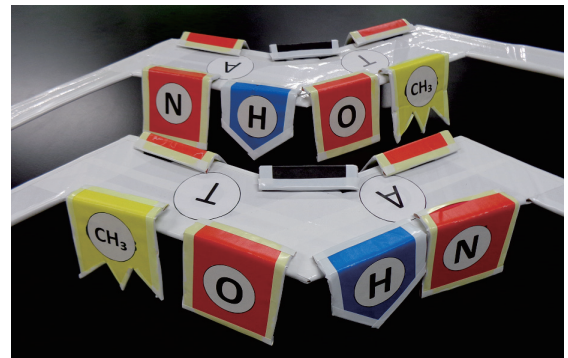


図 12 A と T の塩基対を上・副溝・主溝の各側から見た場合の水素結合受容体 (赤), 水素結合供与体 (青), 水素原子 (黒), メチル基 (黄) の見え方と形

水素結合に関わる原子，メチル基を色分け・形分けすることで，モデルの作成ではなく，生徒がその特徴を観察し主溝の役割を推量・仮説を立て，また，生徒が酵素の立場から触覚で形の違いを理解する事ができるモデル教材としての有効性を有していると考えられる。即ち，酵素や遺伝子調節因子の立場から生徒が主溝側・副溝側から見た場合は視覚で，触れた場合は立体構造で塩基配列が異なる事を理解できると考えられた。高等学校生物科目などでの学習効果は，アンケート調査や授業への導入で検証が必要である。

4 まとめ

DNA の分子構造モデルの、主溝と副溝を有する構造及び機能を学ぶための工夫・改善したモデルを提案した。その際に、DNA の塩基配列を認識して酵素や遺伝子調節因子が DNA 分子に作用する事を理解できるモデルを目指した。更に、DNA の二重らせん構造において、副溝側からでは塩基対の種類を識別できないが、主溝側からなら塩基対を区別できる、大型の観察用モデルも作成した。このモデルでは、塩基対の種類を区別するための、水素結合に関わる原子・メチル基を、色で区別するだけでなく、形でも区別できるようにして、酵素や遺伝子調節因子タンパク質が塩基対の種類を区別する仕組みを学べるように工夫した。

参考文献

- ・ Bruce Alberts, 他 5 名 (2002), MORECULAR BIOLOGY OF THE CELL, 4th ed., 380-386. Garland Science, Taylor & Francis Group,

New York

- ・ 文部科学省 (2017), 中学校学習指導要領解説 理科編, 117-118, 大日本図書
- ・ 文部科学省 (2018), 高等学校学習指導要領解説 理科編 理数編, 113-147, 実教出版
- ・ トランスナショナル・カレッジ・オブ・レックス (トラカレ) (1998), DNA の冒険 - ことばと人間を自然科学する - 第 7 版, 第 1 章 I-24-I-41, 言語交流研究所 ヒッポファミリークラブ
- ・ Watson, J.D., and Crick, F.H.C., (1953) Molecular Structure of Nucleic Acids A Structure of Nucleic Acid, Nature, 171, 737

附 記

本研究は、科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）（基盤研究（C）「次期改訂理科教科書の生命生物観察実験の再現性と科学性に資する根拠データベース構築」課題番号 16K01021）の交付を受けて行えた成果である。