

ヌクレアーゼ抵抗性化学修飾核酸の開発研究

松田 彰

Development of Highly Nuclease-resistant Chemically-modified Oligonucleotides

Akira MATSUDA

*Faculty of Pharmaceutical Sciences, Hokkaido University, Kita-12, Nishi-6,
Kita-ku, Sapporo 060-0812, Japan*

(Received June 28, 2010)

Chemical modification of therapeutic oligodeoxyribonucleotides (ODNs) is necessary to avoid not only degradation by endo- and exo-nucleases but also recognition by sensors such as an innate immune system. We have been developing modified nucleosides having an aminoalkyl linker at the pyrimidine nucleobase or sugar moiety. ODNs containing 5-*N*-(6-aminoethyl) carbamoyl-2'-deoxyuridine (**7**) were thermally stabilized about 3°C per modification and were about 160 times more stable to hydrolysis by snake venom phosphodiesterase (a 3'-exonuclease) than unmodified ODNs, but not by endonucleases. On the other hand, ODNs containing 4'-*C*-(aminoethyl)thymidine (**14b**), which was synthesized by a newly developed radical cyclization-ring-enlargement reaction by us, were 87 times more stable to hydrolysis by DNase I (an endonuclease) and 133 times more stable in 50% human serum than unmodified ODNs. The highly stereoselective synthesis of 4'-thioribonucleosides (^SNs) was also developed using a Pummerer reaction. Human thrombin RNA aptamer (CII-1-37) containing 4'-thiouridine and 4'-thiocytidine was obtained by SELEX with a K_d value of 4.7 nM, while a previously known RNA aptamer (RNA-24) has a K_d value of 85 nM. Studies of the modification pattern-RNAi activity relationships by using ^SNs have been carried out against luciferase genes. We found that siRNAs, which have 4 residues of ^SNs on both ends of the sense strand and 4 residues on the 3'-end of the antisense strand, were the most effective. 4'-ThioRNA is about 1100 times more stable in 50% human plasma than unmodified RNA. However, oligoribonucleotides (SMONs) containing 2'-*O*-methyl-4'-thioribonucleosides were 9800 times more stable in 50% human plasma than unmodified RNA. Since SMON duplexes were thermally more stable than unmodified ON duplexes, therefore they would be quite suitable to use for oligonucleotide therapeutics.

Key words—nuclease; oligonucleotide; amino linker; radical cyclization; RNA interference; aptamer

1. はじめに

低分子創薬は徐々に困難になりつつあると言われて久しい。容易に創薬できる標的の枯渇が主要な原因と考えられている。それを補完すべく、従来比較的困難であった高分子創薬が注目されている。従来とは異なる標的に対する創薬が可能であるからであろうか。高分子創薬の主役として期待されているのは、タンパク質と核酸であるが、タンパク質による抗体医薬開発が一步先んじ、核酸医薬開発は困難を極めているのが現状である。それは、1) われわれの細胞では、外来病原体である細菌やウイルスなど

を非自己と認識する自然免疫が発達し、特に、それらの遺伝子である DNA や RNA を感知するシステムがエンドソームのみならず細胞質内にかなり巧妙に張り巡らされているからである。投与した核酸医薬が非自己とみなされると抗菌・抗ウイルスの自然免疫が活性化され、狙った効果ではなく望ましくない効果 (off-target 効果) の発現につながり、場合によっては死に至る。一方、2) われわれの細胞中にある核酸が上記のシステムに捕まると自己免疫病になるので、不必要な核酸は十分に分解されねばならない。¹⁾ これらを担う酵素が核酸分解酵素 (ヌクレアーゼ) である。²⁾ したがって、核酸医薬は自然免疫系に感知されず、しかも、ヌクレアーゼによる分解から逃れなければ十分な活性発現ができないことになる。さらに、リン酸アニオンの集合体である核酸は細胞膜透過し難いのでそれを克服するキャリ

北海道大学大学院薬学研究院 (〒060-0812 札幌市北区北 12 条西 6 丁目)

e-mail: matuda@pharm.hokudai.ac.jp

本総説は、平成 22 年度日本薬学会賞の受賞を記念して記述したものである。

アが必要であるとともに、狙った細胞器官や臓器に送達する仕組みの開発も不可欠である。これらが車の両輪のごとくはたらくことにより核酸創薬が現実化する。

さて、核酸創薬につながる細胞機能調節法としては、まず、1970年代後半に生まれたアンチセンス法を挙げることができる。mRNAをセンス鎖とし、その配列に相補的なアンチセンス分子をWatson-Crick型の水素結合により2本鎖を形成させるとアンチセンス鎖がDNAの場合には、RNase HがmRNAを切断し翻訳阻害を引き起こす。³⁾ mRNAの高次構造を予測するのが現在の技術・知識でも簡単ではないので、どの配列を標的にすべきか(2本鎖部分は熱的に安定で標的にし難い)を決定するのがかなり大変であるが、原理的には単純である。同時期に2本鎖DNAに対して第3鎖をHoogsteen型水素結合で結合させ転写阻害を起こすアンチジーン法の原理も提案された。⁴⁾ リボザイムは、酵素活性を持つRNA(のちに、酵素活性を持つDNAも開発された)であり、mRNAを加水分解し翻訳阻害を起こす。⁵⁾ 1990年代前半には、核酸を用いる分子進化工学的手法が開発され、天文学的な数の配列混合物から標的と結合できる配列を持った分子を選択し、標的に対する結合の選択圧を徐々に上げるなどの工夫をして強固に結合できるアプタマーを得ることができるようになった。⁶⁾ 転写因子は標的DNAのプロモーター領域の結合配列を認識し結合することで遺伝子発現を開始するが、同じ結合配列を持つ短鎖おとりDNA 2本鎖(デコイDNA)を高濃度に共存させると、転写因子がデコイにトラップされるために転写阻害を起こす。⁷⁾ また、1990年代後半には2本鎖長鎖RNAが線虫の標的遺伝子をノックダウンするRNA干渉法が発見され、2000年初めに短鎖RNA 2本鎖(siRNA)が動物細胞にも使用可能であることが示された。⁸⁾ 標的遺伝子のノックダウン法としては、アンチセンス法よりも低濃度で効果を示すことから注目を集め、バイオベンチャー企業による臨床試験も始まっている。このような歴史の中で、アンチセンス医薬の臨床試験は数百行われたにもかかわらず、1998年に米国でエイズ患者のサイトメガロウイルス性網膜炎治療薬(Vitravene, 21 mer ホスホロチオエート型DNA)が眼内注射薬として認可されたのみである。

2004年になり加齢性黄斑変性症に対する治療薬(失明予防)として初のアプタマー薬Macugenが眼内注射薬として認可された。

ところで、遺伝子本体であるDNA分解に関与するヌクレアーゼについては比較的古くから知られており、細胞内には各種エンドヌクレアーゼが豊富に存在し、特にアポトーシス時にこれらがはたらき複製単位で遺伝子を分解しゲル電気泳動でラダー状に観察されることが有名である。一方、血液中にはエキソヌクレアーゼ活性が高く、培養細胞を用いる実験では添加する血清中にこの活性が含まれている。RNAに対する分解酵素(エンドヌクレアーゼ)は、古くからRNase AやRNase T1などがRNA配列決定に重要な役割を果たしてきたが、細胞内外のRNA分解に実際に関与するRNaseについてはRNA干渉のメカニズムとの関連で現在それらの研究が精力的に行われている。RNAの加水分解は、酵素によって活性化された2'-水酸基がリン原子を攻撃することで反応が開始されるが、DNAには2'-水酸基が存在しないために酵素によって活性化された水がリン酸ジエステル基を直接切断するか、一度、酵素にリン酸基を転移してから活性化された水がそれを加水分解するメカニズムが提唱されている。²⁾ しかし、現実的にどの酵素が核酸分解に関与しているかが不明な時点で、提唱されているメカニズムから抵抗性を考えるのは難しいので合成したオリゴヌクレオチドの5'-末端を³²Pでラベルし、ヒト血清又は血漿中、及び、細胞抽出液中での安定性をゲル電気泳動法で調べるのが現実的である。

本稿では、ヌクレアーゼ抵抗性DNA分子(アンチセンス法)及び、ヌクレアーゼ抵抗性RNA分子(アプタマー、RNA干渉)の探索研究中に得られたわれわれのグループの知見を中心に述べる。

2. アミノアルキル側鎖を持つDNAオリゴマーの開発

プトレッシン、スペルミンやスペルミジンなどのポリアミンは核酸と結合しその構造を熱的に安定化することが古くから知られている。しかし、それらはポリカチオンとして核酸のリン酸アニオンを中和し、溶液のイオン強度を下げることでリン酸アニオン同士の反発を低下させることによるが、結合様式は明らかになっていない。ポリアミンが結合した核酸のX線結晶解析を行ってもポリアミンの結合位

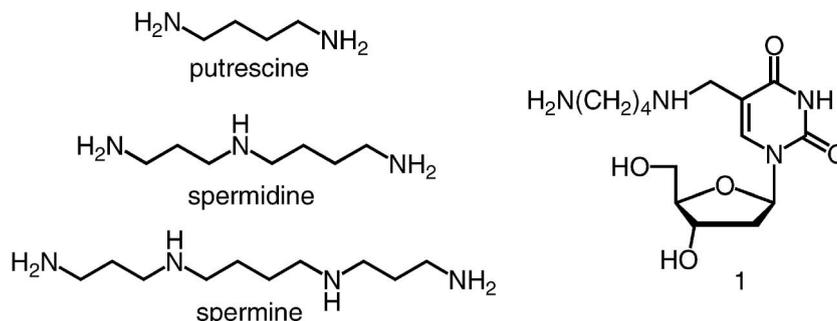


Fig. 1. Structures of Polyamines and α -Putrescylthymidine

置が不明確である。一方、バクテリオファージ ϕ W-14 の DNA 中のチミジンの約 50% が α -プトレスニルチミジン (**1**, Fig. 1) に置換されており、熱的安定性を向上させるとともにヌクレアーゼに対して抵抗性を示すことが知られている。⁹⁾ そこで、オリゴデオキシヌクレオチド (ODN) にアミノアルキル側鎖を導入すれば、ヌクレアーゼと正常な位置での結合を阻害することで抵抗性を示すとともに、末端アンモニウム基によるリン酸アニオンの中和効果により 2 本鎖 ODN の熱的安定性を高めるのではないかとの仮説をたて、1) ヌクレオシドと末端アミン間の距離、及び、2) ヌクレオシド上のアミノアルキル側鎖の結合位置を変えた ODN を網羅的に合成し、それらの熱的安定性とヌクレアーゼ抵抗性を解析した。¹⁰⁾

2-1. ピリミジン 5 位へアミノアルキル側鎖を導入したオリゴヌクレオチドの合成と性質 種々のアミノアルキル側鎖をウラシル 5 位に結合させるときに、それらを持つ ODN を 1 本ずつ個別に合成するのは非効率的である。そこで、その煩雑さを解消する新手法を開発した (Fig. 2).^{11,12)} まず、ODN 合成中には化学的に安定であるが、最終的に目的とするアミノアルキル基を導入できるヌクレオシドユニットとして **3** を考案した。オリゴヌクレオチド固相合成では最終段階で、樹脂からの脱着と同時に核酸塩基及びリン酸部の保護基の除去を濃アンモニア水で行っているため、その代わりにアルキルジアミンで処理すると上記の反応に加えて、エステルからアミドへの変換が一挙に可能になるはずである。さらに、固相上に ODN を結合した **5** のまま、それらを長さの異なるアルキルアミンの種類に応じて分割し個別にアルキルアミンと反応させれば目的とする ODN **6** を一挙に別々に合成することが可能にな

るはずである (Fig. 2)。また、分割せずに数種類ずつの長さの異なるアルキルジアミンと反応させると combinatorial chemistry 的な展開も可能になる。そこで **3** を 5-ヨード-2'-デオキシウリジン誘導体 (**2**) から Pd 触媒を用いる CO 挿入反応で合成し、ODN 中の望みの位置に 1-5 個導入し ODN **5** を得、それぞれにエチレンジアミン又はヘキサレンジアミンを反応させ、対応する ODNs (**6a, b**) を合成した。合成した ODNs 2 本鎖の熱的安定性を調べたところ、エチレンジアミンを含む ODN は 1 残基導入あたり約 2°C の、また、ヘキサレンジアミンを含む ODN は 1 残基導入あたり約 3°C の 50% 融解温度 (T_m) を上昇させた。末端アミノ基をアセチル化すると熱的安定性は全く得られなくなるので、ODN 2 本鎖の熱的安定性は、末端アンモニウムがいかにか効率的にリン酸アニオンを中和できるかにかかっていることが明らかになった。また、**7** (Fig. 3) を 1 個含む自己相補的な 12 mer ODN 2 本鎖の X 線結晶解析を行ったところ、5 位カルバモイル基 NH と 4 位カルボニル基間で 6 員環の水素結合を形成し末端アミノアルキル基の方向を規定しているとともに、末端アンモニウムがリン酸アニオンと静電的な相互作用をしている結晶像を見出した。¹³⁾ **7** を含む ODNs のヌクレアーゼに対する安定性を調べたところ、3' 末端に含む場合は、3'-エキソヌクレアーゼやそれを豊富に含む子牛血清中では極めて安定 (未修飾 ODN の半減期は 13 分であるのに対して 48 時間以上) であったが、**7** を鎖内に複数個含む場合でもエンドヌクレアーゼに対する抵抗性はほとんど向上しなかった。¹⁴⁾ 一方、リボヌクレオシドの 2'-水酸基をメチル化した 2'-OMe 体を含む ODN はエンドヌクレアーゼ抵抗性を示すことが知られている。そこで、**7** の 2'-OMe 体 **8** を合成し、

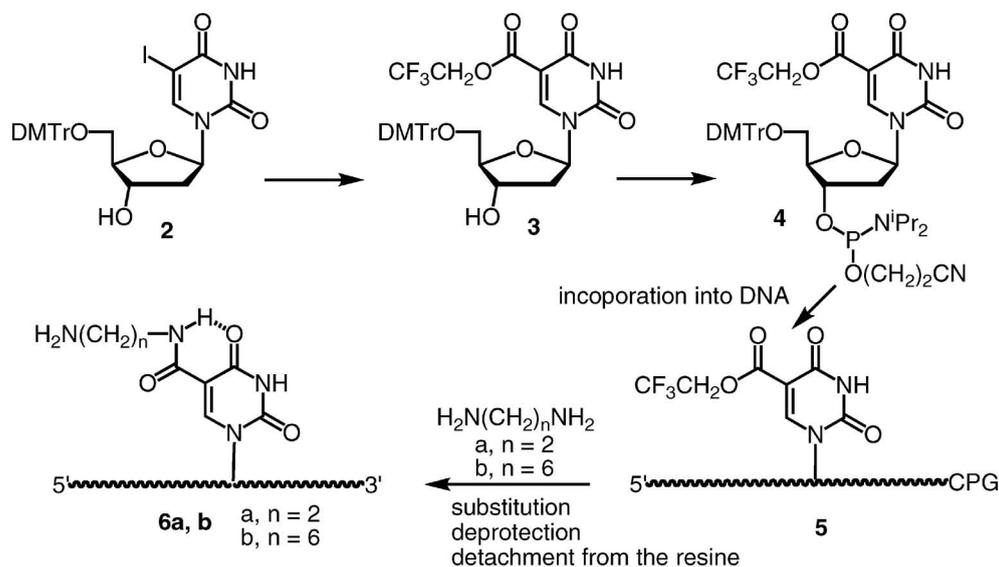


Fig. 2. An Outline of the Post-synthetic Modification Method

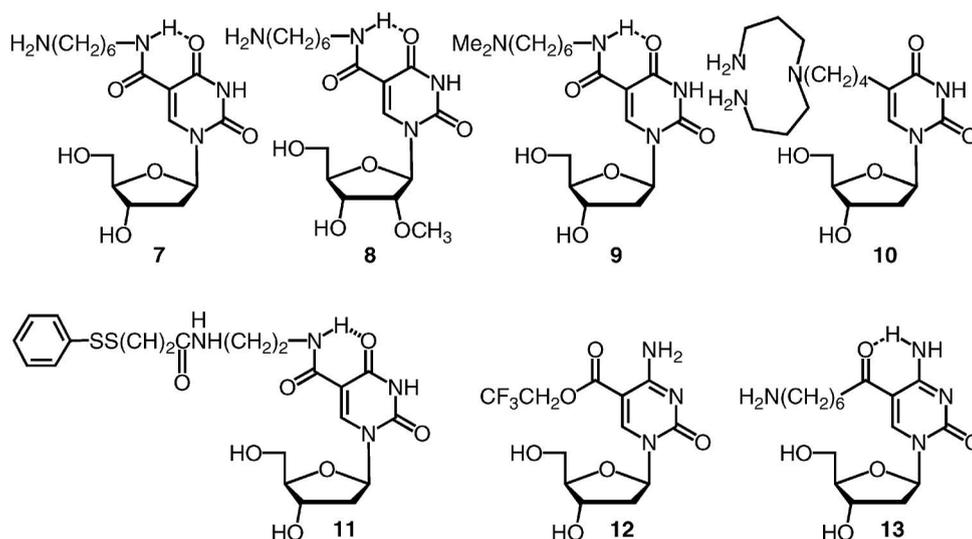


Fig. 3. Structures of Various 5-Substituted Pyrimidine Nucleosides

それを含む ODNs のエンドヌクレアーゼに対する抵抗性を調べたが、その効果は期待したほどではなかった。¹⁵⁾

しかし、ウラシル 5 位にカルボニル基を介するアミノアルキル側鎖の導入は ODN 2 本鎖の熱的安定性を獲得する方法としては優れている。そこで、熱的安定性を得るための末端ジメチルアミノ体 **9** と **7** を同一鎖内に共存させた ODN を合成してから、葉酸、脂肪酸やコレステロール等の膜透過性基を **7** の末端アミノ基に反応させる方法も開発した (Fig. 3).¹⁶⁾ さらに、**7**^{17,18)} や **10**¹⁹⁾ を含む ODNs は DNA

3 本鎖を安定化することも見出した。また、**11** を 5'-末端に含む ODN を酸素酸化して得られる 2 量体は比較的短鎖のオリゴプリン配列を交互に持つ 2 本鎖 ODN に対して熱的に安定な 3 本鎖を形成した。^{20,21)} 一方、シトシン 5 位にカルバモイル基を介してアミノアルキル基を結合させるとアミノアルキル基の方向が変わると考えられた。そこで、5-ヨード-2'-デオキシシチジンから合成した **12** を 1 個含む ODN を合成し、先と同様にエチレンジアミンとヘキサレンジアミンを反応させてそれぞれ対応する ODNs を得た。これらを含む 2 本鎖 ODNs の熱的

安定性を調べたところ、エチレンジアミンを含む ODN はむしろ安定性を下げたが、ヘキサンジアミンを反応させて得た **13** 含む ODN は **7** を 1 個含む ODN よりも高い熱的安定性を示した。²²⁾ しかし、**12** の場合は、トリフルオロエチル基の脱離能が低く、複数個を ODNs に導入した場合に純粋なジアミン置換 ODNs を得ることが可能ではなかったため、さらに反応性の高い誘導体の工夫が必要である。

2-2. 糖部 4' 位へアミノアルキル側鎖を導入したオリゴヌクレオチドの合成と性質 当時、ODNs の 3'-エキソヌクレアーゼに対する抵抗性獲得法は既にいくつか知られていた。しかし、細胞内に取り込まれた後では、エンドヌクレアーゼ抵抗性が重要である。

典型的なエンドヌクレアーゼである制限酵素と DNA 2 本鎖との共結晶像が報告されている。多くの場合、酸性アミノ酸や塩基性アミノ酸側鎖が ODN のマイナーグループ側に存在していることから、糖部 4'-位へのアミノアルキル基の導入により、末端アンモニウムと電荷を持ったアミノ酸残基との静電的な相互作用で正常な位置での結合が阻害される結果エンドヌクレアーゼによる加水分解から逃れられるのではないかと仮説をたてた。そこで、チミジン 4' 位にアミノメチル基、アミノエチル基、及び、アミノプロピル基を導入することにした (Fig. 4)。4'-アミノメチルチミジン **14a**²³⁾ は既知化合物であり 3'-エキソヌクレアーゼに対するある程度の抵抗性を示すことが定性的に報告されてい

たが他の化合物 **14b**, **14c** については新規 (合成法については後述) であり定量的な検討を行うことにした。²⁴⁻²⁶⁾ 先のウラシル 5 位置換体の場合のように **14a-c** を導入位置及び導入個数を変えて数種類合成し、まず、ODN 2 本鎖の熱的安定性を調べた。アミノメチル体 **14a** の導入は 1 個あたり 0.9°C の T_m 値の上昇を、アミノエチル体 **14b** の場合は 1.1°C 、アミノプロピル体 **14c** の場合は 0.8°C 上昇させた。しかし、一方の鎖を RNA にした場合は 1 個あたり $0.10\text{--}0.15^{\circ}\text{C}$ 低下させたが、ODN 鎖長が 18 mer の場合で T_m 値が 70°C 以上あり、この程度の T_m 値の低下はアンチセンス法に適用しても問題はないと考えられた。そこで次に、5' 末端を ^{32}P でラベルした ODNs を調製し、エンドヌクレアーゼ及びヒト血清中での安定性を調べた。エンドヌクレアーゼとして牛豚臓由来の DNase I を用いたところ、未修飾の ODN 1 本鎖の半減期が 20 分であるのに対して、3' 末端を含み **14a** を 5 個導入した ODN のそれは 27.0 時間、同じ導入様式で **14b** 及び **14c** を導入した ODNs の半減期はそれぞれ 28.9 時間と 27.7 時間であった。一方、同じ ODNs を用いて 50% ヒト血清 (非加熱) 中での半減期を調べたところ、未修飾体は 27 分であるのに対して、**14a-c** を含む ODNs のそれは、1.7 日、2.5 日、7.3 日と極めて安定であった。²⁶⁾ この当時、アンチセンス法に応用可能な ODN の開発では、もっぱら 3'-エキソヌクレアーゼ抵抗性獲得に主眼がおかれていたので、エンドヌクレアーゼに強力に抵抗性を示す化学修飾は稀であっ

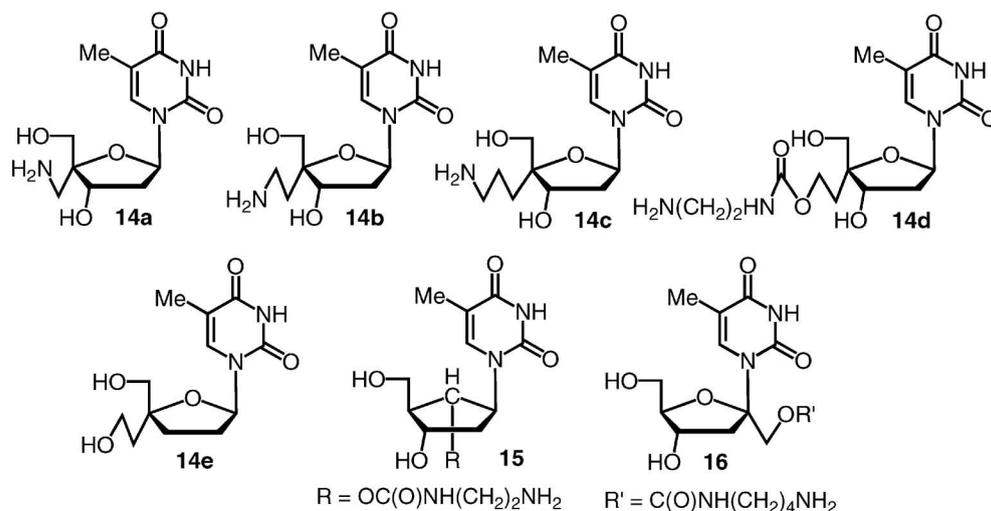


Fig. 4. Structures of Sugar-modified Nucleosides Having Aminoalkyl Linkers

た。なお、**14b**を含むODNはマラリア原虫コハク酸脱水素酵素のmRNAを標的にするアンチセンス法で効果を示した。^{27,28)}一方、**14b**, **14c**を含むODNsは熱的に安定なDNA 3本鎖を形成するのに対して、**14a**や**14d**を含むODNsは熱的に安定な3本鎖を形成しなかった。²⁹⁾また、ヘアピンODNのヘアピン部に**14e**を導入すると安定なヘアピン構造をとることも明らかになった。³⁰⁾

その他、マイナーグループ側に位置する炭素環チミジン5'位(**15**)³¹⁾やヌクレオシド1'位(**16**)^{32,33)}にアミノアルキル基を導入した化合物を含むODNsを合成し、それらの性質を調べたが十分なヌクレアーゼ抵抗性や熱的安定性を示さなかった。

アミノアルキル側鎖を持つODN 2本鎖の熱的安定性とエキソ及びエンドヌクレアーゼに対する抵抗性をTable 1にまとめた。^{10,34)}ヌクレオシド部分のアミノアルキル側鎖導入位置によってODNの熱的安定性やヌクレアーゼ抵抗性が異なることが明らかになった。熱的安定性は末端アンモニウム基のリン酸アニオンの中和効果によると考えられるが、ヌクレアーゼ抵抗性の獲得は、予想したように導入した末端アンモニウム基により、正常な位置でのヌクレアーゼとの結合を阻害しているのかどうかについてはさらなる検討が必要である。

2-3. 新規ラジカル環化-環拡大反応の発見と展開 従来、ヌクレオシドC4'位へ二炭素を一気に導入する方法は知られていなかった。上述した**14b**の合成過程で新規なラジカル環化-環拡大反応を発見した。^{35,36)}その反応の概略をFig. 5に示す。炭素-ケイ素結合は炭素-酸素結合より長く、また、ケイ素上の置換基の立体障害でBaldwin-Beckwith則か

ら逸脱した6-endo環化が進行するのではないかとの仮説をたて、まず、モデル化合物として市販の2-ブロモインダノールをビニルシリル体(**17**)へ誘導しベンゼン中Bu₃SnHとの反応を検討した[Fig. 5(A)].³⁷⁾環化成績体を玉尾酸化し開環したところ、**18**と**19**が生成した。予想した**19**の生成が観察され、6-endo環化が進行したようにみえた。そこで、D化実験等により反応機構を調べた。ラジカル中間体(**20**)が経路bで6-endo環化すればD体**23**を与えるが、経路aで5-exo環化する場合はD体**21**を与えるはずである。そこで、Bu₃SnDを用いたラジカル反応を行い、先と同様に玉尾酸化したところD体**24**と**25**が得られた。D体**25**は**22**の玉尾酸化で得られるはずであるので、単純な6-endo環化反応は進行していないことが推察された。Figure 5(B)に示すように中間に生成するラジカル**26**から経路cで遷移状態**27**を通り、さらに環拡大反応で**28**が生成する場合と、**26**が一度開環(経路d)し、生成するシリルラジカルが6-endo環化(シリルラジカルの6-endo環化反応は知られている)して**28**が生成する2通りが考えられた。そこで、どちらの経路で反応が進行するかを調べるための基質としてD体**31**をデザインした[Fig. 5(C)]. **31**から生成する5-exo環化体(**33**)は、経路cを通る場合は**34**を経て**35**に環拡大した後にBu₃SnHと反応し環内にDを含まない**36**のみを生成する。一方、経路dで反応が進行する場合は、シリルラジカル**37**が両方の二重結合と反応できる(二重結合に対するラジカル付加のアイソトープ効果はk_D/k_H=1.12である)ために最終産物としては**36**と**39**の混合物を与えるはずである。そこで、**31**をラジカル環化反応に付し、玉尾酸化の後、生成物の単離精製を容易にするために水酸基をベンゾイル化して構造を調べたところ、**39**の生成は全く認められず**36**のみが得られた。したがって、本ラジカル環化反応は、いったん生成した5-exo環化体(**33**)がシラシクロプロピルラジカル(**34**)から環拡大反応を起こす新規なラジカル環化-環拡大反応であることが明らかになった。本反応の際にBu₃SnH濃度が高い場合(0.01 M)は、中間体**26**がもつばら還元され、玉尾酸化後に1-エタノール体(**18**)を選択的に合成できるが、比較的低濃度(0.002 M)のBu₃SnHを用い、高温条件では玉尾酸

Table 1. Thermal Stability and Nuclease-resistance Properties of the ODNs Containing the Nucleoside Analogues with the Amino Linkers

modified nucleosides in ODNs	7	8	14b	15	16
Thermal Stability					
DNA-DNA	+++	ND	+	+	-
DNA-RNA	+	+++	-	---	---
Nuclease Resistance					
3'-exonuclease	+++	+++	+++++	+	+
endonuclease	±	++	+++++	+	+

+ : high, - : low, ND : not determined.

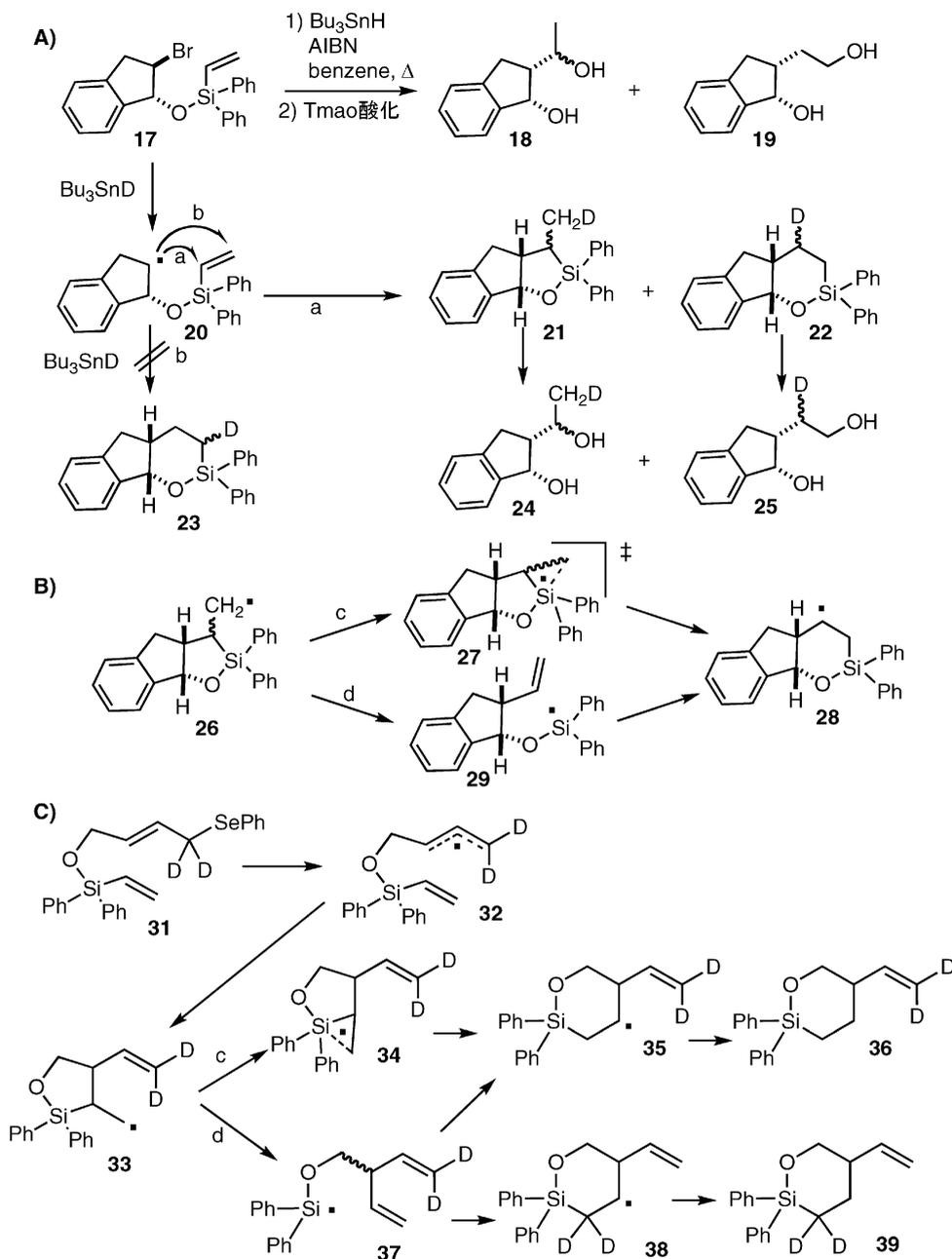


Fig. 5. Development of a New Radical Cyclization-ring-enlargement Reaction

化後に 2-エタノール体 (19) を選択的に与えることが分かった。^{38,39)}

上記の反応をチミジン (40) から 9 工程で誘導したビニルシリル体 (46) に適用したところ、先のモデル実験の結果を忠実に反映し 4'-C-(1-エタノール) 体 (47), 及び 4'-C-(2-エタノール) 体 (48) を高収率で作り分けることができた (Fig. 6). 化合物 48 の一級水酸基をアミノ基に変換し、さらに、ホスホアミダイト体 (49) に変換して前節で述べたオリゴヌクレオチドに導入した。一方、4'-

アミノプロピル体は、先の中間体 (45) の 3'-水酸基をアリルシリル化し 50 に変換後、ラジカル環化反応に付し、玉尾酸化したところ 52 が高収率得られたことから 7-endo 環化体 (51) を経由して得られたと考えられる。化合物 52 は同様にアミダイト体 (53) に誘導後 DNA 合成に使用した。

さて、以上述べたラジカル環化-環拡大反応は、ビニルシリル基を水酸基の隣の炭素にアルコール体として移動させた反応であった。もし、同じ酸化状態のまま (ビニル体として) 隣に移動できれば新たな

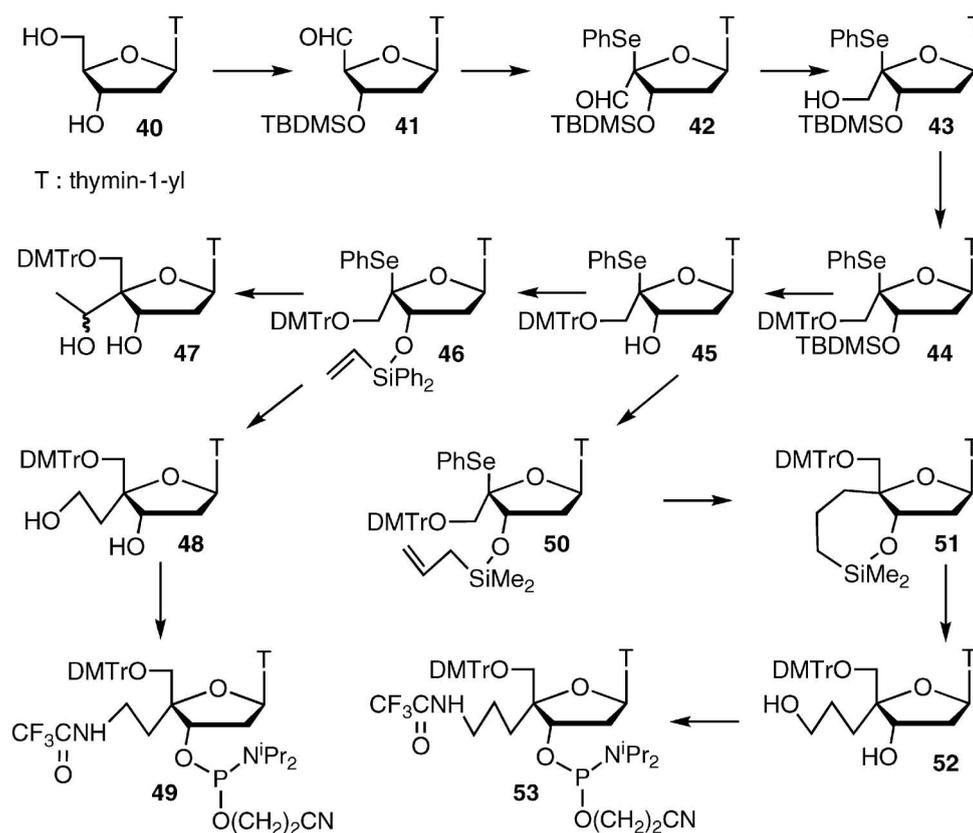


Fig. 6. Synthesis of 4'-C-branched Thymidines via Radical Reactions

な官能基変換が可能である。そこで、**54**のラジカル環化反応を、中間に生成するラジカルを還元しないように照射下 $(\text{Bu}_3\text{Sn})_2$ で反応を行い、そのラジカル中間体が別分子のヨード基を引き抜きヨードメチル体 (**55**) を生成させ (ラジカルアトムトランスファー反応)、続いてフッ素イオン処理すると予想したビニル体 (**56**) が得られた (Fig. 7)。⁴⁰ 本反応を使用してビニル基を糖部に持つヌクレオシド **57**,⁴⁰ **58**,⁴¹ **59**⁴² を合成することができた。同様の発想から、エチニルシリル体 (**60**) に対してラジカル開始剤として Et_3B を用いた場合に収率よくエチニル基を隣接位に転移させた **62** に変換することも可能であった。⁴³⁻⁴⁵ われわれは、既に 4'-エチニル体 (**63**) を 4'-ヒドロキシエチル体から合成し、抗 HIV 活性⁴⁶ を示すことを報告していたが、本法の開発によりその合成が比較的容易になった。また、**64** も容易に合成することが可能であった。以上のように、本ラジカル環化反応は、水酸基をビニル又はエチニルシリルエーテル体に誘導し、隣接位に水酸基とシス配置で炭素置換基を種々の酸化状態で導入可能である優れた方法である。本法を使用した

C-グリコシドの立体選択的合成法⁴⁷⁻⁵³ も開発したが誌面の都合上割愛する。

3. 4'-チオ核酸の化学的及び酵素合成法の開発と医薬化学的展開

RNA 干渉の発見は驚きであり、アンチセンス法の創薬展開に行き詰まっていた核酸医薬化学研究に大きなインパクトを与えた。そこで、われわれは、修飾核酸の化学合成のみならず酵素合成も視野に入れ、天然型 RNA と構造的に大きく異なる 4'-チオ RNA (^sRNA) に着目した。⁵⁴ 原料となる 4'-チオリボヌクレオシドは古くから知られる化合物であり、核酸塩基と対応するチオ糖との縮合により合成される。しかし、従来法は、縮合の立体選択性のみならず収率も満足できるものではなかった。

一般に糖と核酸塩基を縮合する場合は、糖部 2 位アシル基による隣接基関与を利用して β 体を選択的に合成する。しかし、チオ糖の反応中間体では 1 位の δ^+ 性が小さく、電子供与性の大きな隣接関与基の必要性が計算化学から示唆された。⁵⁵ そこで、D-リボース (**65**) から合成したチオ糖⁵⁶ の 2 位水酸基を 2,4-ジメトキシベンゾイル体 (**66**) に誘導して

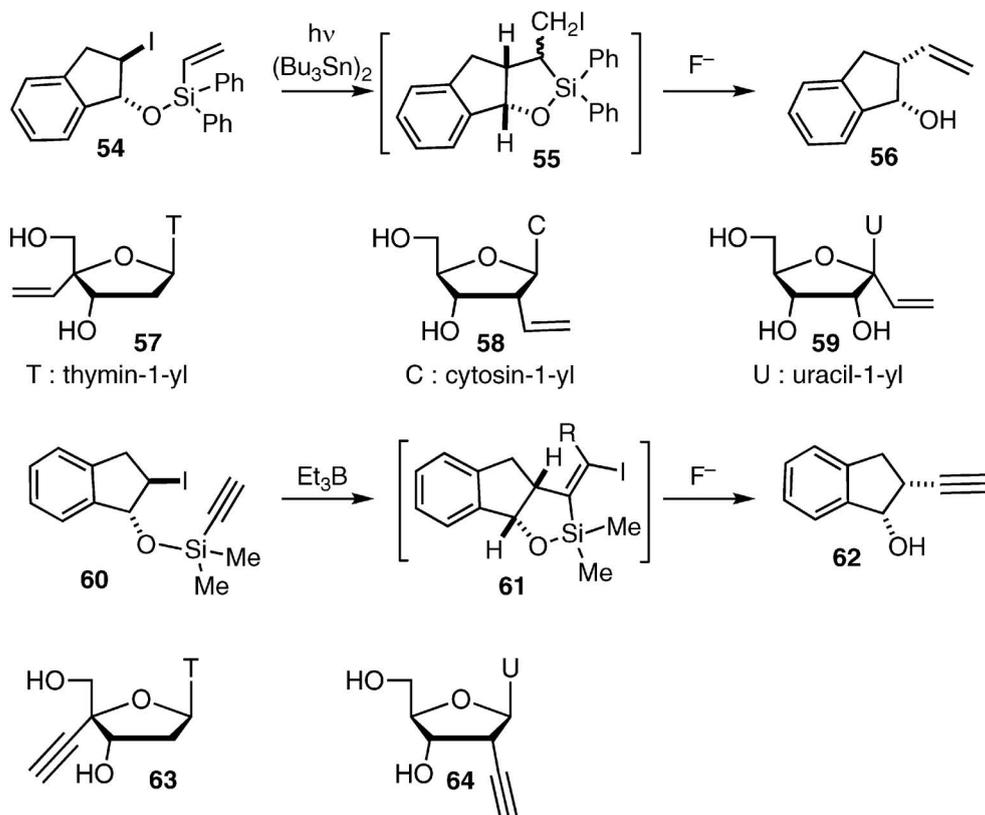


Fig. 7. Development of New Radical Reactions through an Atom Transfer Reaction

ルイス酸として TMSOTf 存在下に Pummerer 反応を行ったところ上記の問題点を一気に解決し、4 種類の 4'-チオリボヌクレオシド (67) の立体選択的合成を初めて達成できた (Fig. 8).⁵⁷⁾

化合物 67 を脱保護して得られる 68 を出発原料にして、^sRNA 化学合成のためのホスホロアミダイト体 (69),⁵⁸⁾ 酵素合成のための 5'-三リン酸体 (70, ^sNTP),⁵⁹⁾ 2'-O-メチル-^sRNA (SMRNA) を合成するための 71, 及びそのホスホロアミダイト体 (72)⁶⁰⁾ を合成した。さらに、4'-チオ DNA (^sDNA) を合成するために 68 を対応する 2'-デオキシ体 (73)⁶¹⁾ に誘導後、そのホスホロアミダイト体 (74)⁶²⁾ 及び 5'-三リン酸体 (75, d^sNTP)⁶³⁾ に変換した。

3-1. 4'-チオ核酸の化学合成と性質 先に合成したホスホロアミダイト体 (69, 72, 74) を用いて ^sRNA, SMRNA 及び ^sDNA を固相合成し、未修飾 RNA 及び DNA と物理化学的性質及びヌクレアーゼ抵抗性を比較した。同じ配列を持つ 15 mer 2 本鎖の熱的安定性を T_m 値 (pH 7.0, 100 mM NaCl) で比較すると、^sRNA : ^sRNA \approx SMRNA : SMRNA >

^sRNA : RNA > RNA : RNA > ^sDNA : ^sDNA > DNA : DNA > ^sDNA : DNA となった。⁶⁰⁾ CD スペクトルから ^sRNA 及び SMRNA 2 本鎖は未修飾 RNA とほぼ同じ A 型構造をとっていると考えられた。一方、NMR による構造解析⁶⁴⁾ の結果、及びグループバインダーとの結合実験⁶²⁾ から、^sDNA 2 本鎖は未修飾 DNA がとる B 型ではなく A 型に近い構造であった。

一方、50% ヒト血漿中で未修飾 1 本鎖 RNA (15 mer) が 10 秒以下で完全に加水分解を受ける条件下で、1 本鎖 ^sRNA の半減期は 3.1 時間 (1100 倍以上安定) であった。さらに、1 本鎖 SMRNA のそれは 27.2 時間 (9800 倍以上安定) と極めて安定であった。⁶⁰⁾ 一般に、2'-O-メチルリボヌクレオシドを含む ^MRNA はヌクレアーゼに対して安定であると考えられているが、配列・鎖長を同じくしてその安定性を比較したところ半減期は 7.5 時間であった。したがって、^MRNA は未修飾の RNA よりは 2700 倍以上安定であるが、SMRNA は ^MRNA よりもさらに 3.6 倍安定であることが明らかになった。⁶⁰⁾ 1 本鎖 ^sDNA もエンドヌクレアーゼに対して未修飾

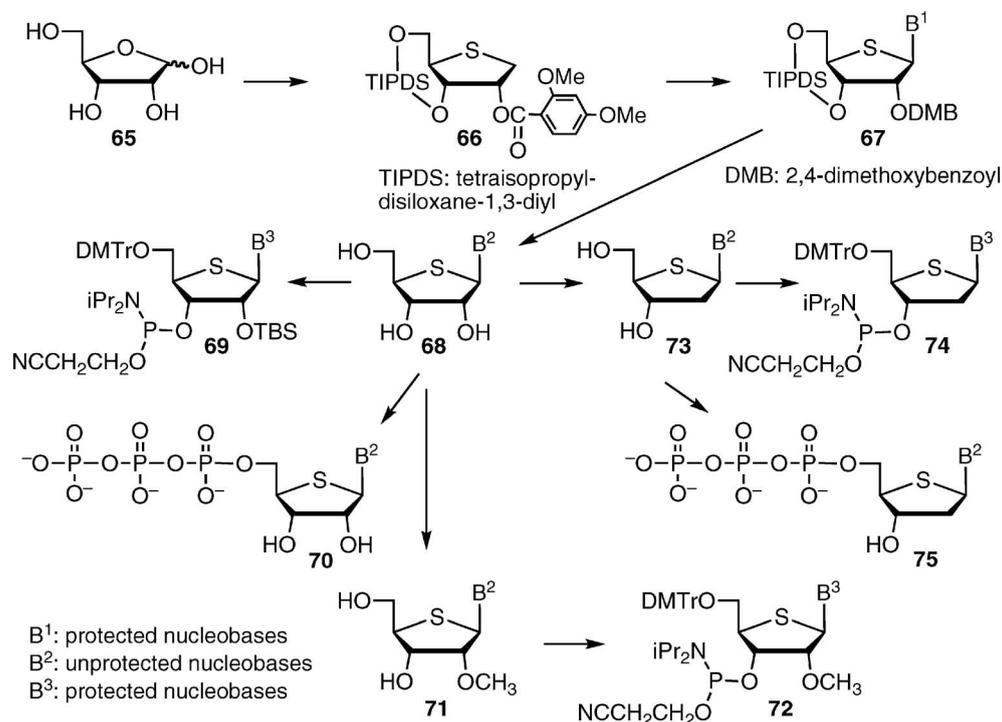


Fig. 8. Synthesis of Various 4'-Thionucleosides and Nucleotides

DNA よりも 480 倍安定であった。⁶²⁾

天然の核酸と 4'-チオ核酸の構造上の違いは、構成する糖部環内酸素原子が硫黄原子に置換されているだけであるにもかかわらず、なぜこのようにヌクレアーゼ抵抗性を示すのかは極めて興味深い。特に、4'-チオリボヌクレオシドは、リボヌクレオシドと同様に 2'位に水酸基を持つにもかかわらずかなり安定である。一般に、リボヌクレオシド C4'-O4'-C1'のなす二面角は 110°であり、C1'-O4'間及び C4'-O4'間の距離は約 1.4 Å であるが、4'-チオリボヌクレオシドでは、C4'-S4'-C1'のなす二面角は 95°であり、C1'-S4'間及び C4'-S4'間の距離は約 1.8 Å である。RNA の加水分解には RNase が対応する。2'-水酸基の近傍にヒスチジンのイミダゾール基などが存在し、2'-水酸基を活性化してリン原子を攻撃させる。したがって、上述した構造上のわずかな違いで水酸基の位置が異なり、近傍のアミノ酸側鎖との距離やリン原子への反応し易さが異なってくると推察される。2'-水酸基がメチル化された場合は、RNase では加水分解できないために DNA を加水分解するエンドヌクレアーゼが対応する。しかし、⁵M RNA も ⁵S DNA も DNA に一般的な B 型構造ではなく、RNA に一般的な A 型構造をとるので

活性化された水分子の攻撃が起こり難く、酵素-リン酸エステル結合も形成され難いと考えたとヌクレアーゼ抵抗性がよく説明できる。

3-2. 4'-チオ核酸の酵素合成とヌクレアーゼ抵抗性アプタマー及び shRNA 発現 DNA デバイスへの応用 アプタマーは核酸の分子進化工学的考え方に基づいて (SELEX 法) 獲得される分子認識剤であり「核酸抗体」とも呼ばれることがある。抗体医薬は高価であり、その生産性も高くない。もし、抗体が持つ抗原に対する中和能だけが要求されるのであれば (現在まで、抗体が持つ抗体依存性細胞障害活性や補体依存性細胞障害活性を持つアプタマーは知られていない)、標的 (抗原) に対して結合するアプタマーは比較的低分子量であり、ヌクレオチド配列さえ分かれば合成器により何度も再生産が可能であり、安価に供給もできるので抗体の代わりになり得る。

現在までに加齢性黄斑変性症治療薬として VEGF に結合する Macugen が既に臨床使用されているが、構成するヌクレオチドは 2'-OMe 体及び 2'-F 体に置換されておりある程度のヌクレアーゼ抵抗性が獲得されている。この場合、最初に未修飾 RNA アプタマーを得てから、修飾ヌクレオチドの

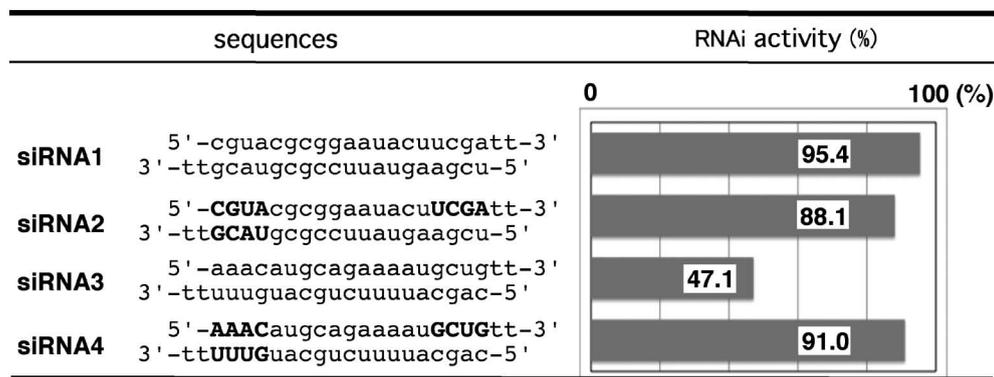


Fig. 10. Sequence and RNAi Activity of siRNA That Was Modified with 4'-thioribonucleosides (bold) Directed against *Photinus* Luciferase (siRNAs 1, 2) and *Renilla* Luciferase (siRNAs 3, 4) When NIH/3T3 Cells Were Treated with 25 nM Modified siRNAs

に高いSMRNAを用いて同様の実験を行った場合は、約1.5倍に作用の延長が観察された。一方、これらのRNAはいくらヌクレアーゼ抵抗性が高いといっても、いずれは加水分解される。したがって、その場合に生成する修飾ヌクレオシドの毒性が問題になる。ヌクレオシドは一般的には代謝活性化（主にリン酸化されヌクレオチドに代謝される）を受けるので、修飾ヌクレオシドが代謝される場合には種々の核酸代謝酵素の阻害につながり細胞毒性を示す可能性がある。SMRNAの構成ヌクレオシドである4種類の2'-O-Me-4'-チオリボヌクレオシドはいずれも100 μMの濃度でがん細胞（CCRF-CEM細胞、ヌクレオシド系代謝拮抗剤に感受性が高い細胞）に細胞毒性を示さなかった。したがって、SMRNAは、核酸創薬の材料として好都合であると考えられ、現在、*in vivo*試験を検討中である。

4. おわりに

アンチセンス創薬時代からRNAi創薬時代にかけてのわれわれのヌクレアーゼ抵抗性核酸創薬の試みについて駆け足で述べた。4'-C-アミノアルキル化したDNAや2'-O-Me-4'-チオRNAは多くの点で優れた性質を持つことが明らかになった。アンチセンス創薬時代には不明であった多くの重要な生物学的発見（特に自然免疫に関する発見）が近年相ついでいること、及び、核酸化学の発展により毒性（off-target効果）を回避した核酸創薬が可能になる時代に突入している。今後、機能性核酸の細胞内器官及び組織・細胞特異的な送達法の開発が必要であるが、それらの研究もかなり進展しつつある。核酸創薬はリスクであるがゆえにチャレンジングであ

る。だからこそ、アカデミックで基礎研究を展開する意味がある。アンチセンス創薬時代には、雨後の竹の子のように設立されたバイオベンチャーが、投資家対策で臨床試験を慌てて行い失敗を続けた。しかし、RNAi創薬時代では、大手製薬会社から十分な資金援助を受けた核酸創薬欧米バイオベンチャーが慌てずにしかも着実に駒を進めつつある。日本は抗体医薬開発競争で欧米に大きく遅れた。この轍を二度と踏まないように、国家戦略として日本独自の核酸創薬を中心とした高分子創薬を進めたいものである。

謝辞 終わりに臨み、本研究は引用論文に記載の多くの学生諸君・教員の努力の賜でありこの場を借りて深く感謝します。

REFERENCES

- 1) Kawai T., Akira S., *Nature immunol.*, **11**, 373–384 (2010).
- 2) Yang W., *Quart. Rev. Biophys.*, doi: 10.1017/S0033583510000181 (2010).
- 3) Frank Bennett C., Swayze E. E., *Annu. Rev. Pharmacol. Toxicol.*, **50**, 259–293 (2010).
- 4) Jain A. K., Bhattachary S., *Bioconjugate Chem.*, **21**, 1389–1403 (2010).
- 5) Mulhbach J., St-Pierre P., Lafontaine D. A., *Curr. Opin. Pharmacol.*, **10**, 551–556 (2010).
- 6) Bouchard P. R., Hutabarat R. M., Thompson K. M., *Annu. Rev. Pharmacol. Toxicol.*, **50**, 237–257 (2010).

- 7) Gambari R., Borgatti M., Bezzetti V., Nicolis E., Lampronti I., Dechechi M. C., Mancini I., Tamanini A., Cabrini G., *Biochem. Pharmacol.*, **80**, 1887–1894 (2010).
- 8) Jackson A. L., Linsley P. S., *Nat. Rev. Drug Discov.*, **9**, 57–67 (2010).
- 9) Kropinski A. M. B., Bose R. J., Warren R. A. J., *Biochemistry*, **12**, 151–157 (1973).
- 10) Matsuda A., Ueno Y., Takenaka A., “Frontiers in Nucleosides and Nucleic Acids, Thermal stability and nuclease-resistance properties of oligonucleotides having an aminoalkyl side chain at the nucleobase and sugar moieties,” eds. by Schinazi R. F., Liotta D. C., IHL Press, Tucker, 2004, pp. 549–576.
- 11) Ono A., Haginoya N., Kiyokawa M., Minakawa N., Matsuda A., *Bioorg. Med. Chem. Lett.*, **4**, 361–366 (1994).
- 12) Haginoya N., Ono A., Nomura Y., Ueno Y., Matsuda A., *Bioconjugate Chem.*, **8**, 271–280 (1997).
- 13) Juan E. C. M., Kondo J., Kurihara T., Ito T., Ueno Y., Matsuda A., Takenaka A., *Nucleic Acids Res.*, **35**, 1969–1977 (2007).
- 14) Ueno Y., Kumagai I., Haginoya N., Matsuda A., *Nucleic Acids Res.*, **25**, 3777–3782 (1997).
- 15) Itoh T., Ueno Y., Komatsu Y., Matsuda A., *Nucleic Acids Res.*, **31**, 2514–2523 (2003).
- 16) Nomura Y., Ueno Y., Matsuda A., *Nucleic Acids Res.*, **25**, 2784–2791 (1997).
- 17) Ueno Y., Mikawa M., Matsuda A., *Bioorg. Med. Chem. Lett.*, **7**, 2863–2866 (1997).
- 18) Ueno Y., Mikawa M., Matsuda A., *Bioconjugate Chem.*, **9**, 33–39 (1998).
- 19) Nara H., Ono A., Matsuda A., *Bioconjugate Chem.*, **6**, 54–61 (1995).
- 20) Ueno Y., Ogawa A., Nakagawa A., Matsuda A., *Bioorg. Med. Chem. Lett.*, **6**, 2817–2822 (1996).
- 21) Ueno Y., Nakagawa A., Matsuda A., *Nucleosides Nucleotides*, **17**, 283–289 (1998).
- 22) Nomura Y., Haginoya N., Ueno Y., Matsuda A., *Bioorg. Med. Chem. Lett.*, **6**, 2811–2816 (1996).
- 23) Wang G., Seifert W. F., *Tetrahedron Lett.*, **37**, 6515–6518 (1996).
- 24) Shuto S., Kanazaki M., Ichikawa S., Minakawa N., Matsuda A., *J. Org. Chem.*, **63**, 746–754 (1998).
- 25) Ueno Y., Nagasawa Y., Sugimoto I., Kojima N., Kanazaki M., Shuto S., Matsuda A., *J. Org. Chem.*, **63**, 1660–1667 (1998).
- 26) Kanazaki M., Ueno Y., Shuto S., Matsuda A., *J. Am. Chem. Soc.*, **122**, 2422–2432 (2000).
- 27) Ikemoto N., Kim H.-S., Kanazaki M., Ueno Y., Shuto S., Matsuda A., Wataya Y., *Nucleic Acids Sympo. Ser.*, **42**, 89–90 (1999).
- 28) Ueno Y., Tomino K., Sugimoto I., Matsuda A., *Tetrahedron*, **56**, 7903–7907 (2000).
- 29) Atsumi N., Ueno Y., Kanazaki M., Shuto S., Matsuda A., *Bioorg. Med. Chem.*, **10**, 2933–2939 (2002).
- 30) Yamamoto Y., Shuto S., Tamura Y., Kodama T., Hoshika S., Ichikawa S., Ueno Y., Ohtsuka E., Komatsu Y., Matsuda A., *Biochemistry*, **43**, 8690–8699 (2004).
- 31) Ueno Y., Karino N., Matsuda A., *Bioconjugate Chem.*, **11**, 933–940 (2000).
- 32) Dan A., Yoshimura Y., Ono A., Matsuda A., *Bioorg. Med. Chem. Lett.*, **3**, 615–618 (1993).
- 33) Ono A., Dan A., Matsuda A., *Bioconjugate Chem.*, **4**, 499–508 (1993).
- 34) Ueno Y., Matsuda A., *Yuki Gosei Kagaku Kyokai Shi*, **61**, 890–899 (2003).
- 35) Shuto S., Kanazaki M., Sugimoto I., Ichikawa S., Nagasawa Y., Ueno Y., Abe H., Minakawa N., Sueda M., Kodama T., Nomura M., Matsuda A., “Recent Advances in Nucleosides: Chemistry and Chemotherapy, Development of new radical reactions with a vinylsilyl group and their application to the synthesis of branched-chain sugar nucleosides,” ed. by Chu C. K., Elsevier Science B. V., Amsterdam, 2002, pp. 21–55.
- 36) Matsuda A., *Farumashia*, **38**, 293–295 (2002).
- 37) Shuto S., Kanazaki M., Ichikawa S., Matsuda A., *J. Org. Chem.*, **62**, 5676–5677 (1997).
- 38) Sugimoto I., Shuto S., Matsuda A., *Synlett*, 1766–1768 (1999).
- 39) Shuto S., Sugimoto I., Abe H., Matsuda A., *J. Am. Chem. Soc.*, **122**, 1343–1351 (2000).
- 40) Sugimoto I., Shuto S., Matsuda A., *J. Org. Chem.*, **64**, 7153–7157 (1999).
- 41) Sueda M., Shuto S., Sugimoto I., Ichikawa S., Matsuda A., *J. Org. Chem.*, **65**, 8988–8996 (2000).
- 42) Kodama T., Shuto S., Nomura M., Matsuda A., *Chem. Eur. J.*, **7**, 2332–2340 (2001).

- 43) Sukeda M., Ichikawa S., Matsuda A., Shuto S., *Angew. Chem., Int. Ed. Engl.*, **41**, 4748–4750 (2002).
- 44) Sukeda M., Ichikawa S., Matsuda A., Shuto S., *J. Org. Chem.*, **68**, 3465–3475 (2003).
- 45) Sukeda M., Matsuda A., Shuto S., *Tetrahedron*, **61**, 7865–7873 (2005).
- 46) Sugimoto I., Shuto S., Mori S., Shigeta S., Matsuda A., *Bioorg. Med. Chem. Lett.*, **9**, 385–388 (1999).
- 47) Shuto S., Ichikawa S., Abe H., Matsuda A., *Yuki Gosei Kagaku Kyokai Shi*, **66**, 50–59 (2008).
- 48) Yahiro Y., Ichikawa S., Shuto S., Matsuda A., *Tetrahedron Lett.*, **40**, 5527–5531 (1999).
- 49) Shuto S., Terauchi M., Yahiro Y., Abe H., Ichikawa S., Matsuda A., *Tetrahedron Lett.*, **41**, 4151–4155 (2000).
- 50) Shuto S., Yahiro Y., Ichikawa S., Matsuda A., *J. Org. Chem.*, **65**, 5547–5557 (2000).
- 51) Terauchi M., Matsuda A., Shuto S., *Tetrahedron Lett.*, **46**, 6555–6558 (2005).
- 52) Terauchi M., Yahiro Y., Abe H., Ichikawa S., Tovey S. C., Dedos S. G., Taylor C. W., Potter B. V. L., Matsuda A., Shuto S., *Tetrahedron*, **61**, 3697–3707 (2005).
- 53) Terauchi M., Abe H., Tovey S. C., Dedos S. G., Taylor C. W., Paul M., Trusselle M., Potter B. V. L., Matsuda A., Shuto S., *J. Med. Chem.*, **49**, 1900–1909 (2006).
- 54) Minakawa N., Hoshika S., Inoue N., Kato Y., Matsuda A., *Frontiers in Organic Chemistry*, **1**, 79–102 (2005).
- 55) Naka T., Nishizono N., Minakawa N., Matsuda A., *Tetrahedron Lett.*, **40**, 6297–6300 (1999).
- 56) Minakawa N., Kaga D., Kato Y., Kobayashi K., Tanaka M., Sasaki T., Matsuda A., *J. Chem. Soc., Perkin Trans. 1*, 2182–2189 (2002).
- 57) Naka T., Minakawa N., Abe H., Kaga D., Matsuda A., *J. Am. Chem. Soc.*, **122**, 7233–7243 (2000).
- 58) Hoshika S., Minakawa N., Matsuda A., *Nucleic Acids Res.*, **32**, 3815–3825 (2004).
- 59) Kato Y., Minakawa N., Komatsu Y., Kamiya H., Harashima H., Matsuda A., *Nucleic Acids Res.*, **33**, 2942–2951 (2005).
- 60) Takahashi M., Minakawa N., Matsuda A., *Nucleic Acids Res.*, **37**, 1353–1362 (2009).
- 61) Inoue N., Kaga D., Minakawa N., Matsuda A., *J. Org. Chem.*, **70**, 8597–8600 (2005).
- 62) Inoue N., Minakawa N., Matsuda A., *Nucleic Acids Res.*, **34**, 3476–3483 (2006).
- 63) Inoue N., Shionoya A., Minakawa N., Ogawa N., Matsuda A., *J. Am. Chem. Soc.*, **129**, 15424–15425 (2007).
- 64) Matsugami A., Ohyama T., Inada M., Inoue N., Minakawa N., Matsuda A., Katahira M., *Nucleic Acids Res.*, **36**, 1805–1812 (2008).
- 65) Minakawa N., Sanji M., Kato Y., Matsuda A., *Bioorg. Med. Chem.*, **16**, 9450–9456 (2008).
- 66) Hoshika S., Minakawa N., Kamiya H., Harashima H., Matsuda A., *FEBS Lett.*, **579**, 3115–3118 (2005).
- 67) Hoshika S., Minakawa N., Shionoya A., Imada K., Ogawa N., Matsuda A., *ChemBioChem*, **8**, 2133–2138 (2007).