

学籍番号

名前

(1) 以下のRNAをタンパク質に翻訳せよ。アミノ酸は一文字表記とする。

GAAGCCUCAUAC

CAUGCGCCACCCUAU

GGACGUGAAGCUACA

UUUAUCA AUGAA

(2) 人工遺伝暗号を作る仕組みについて説明せよ。

使用する単語：遺伝暗号、tRNA、コドン、翻訳、アミノ酸

2018年7月4日

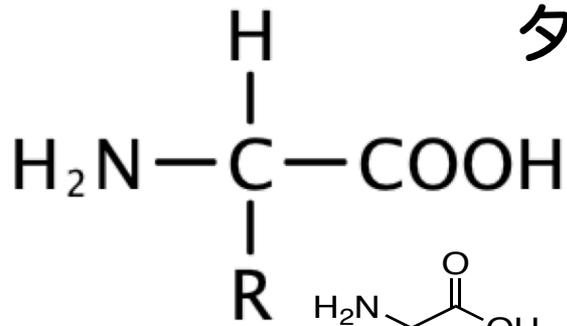
人工遺伝暗号の構築と創薬への応用

名古屋大学工学研究科
化学生物工学専攻 村上 裕 教授

本日の講義

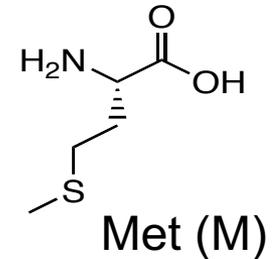
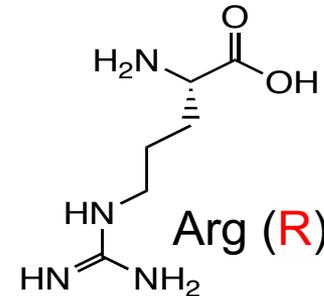
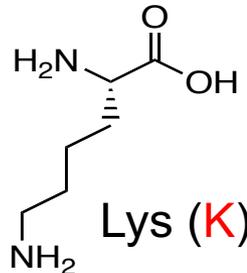
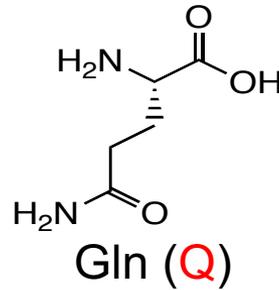
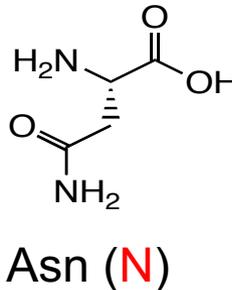
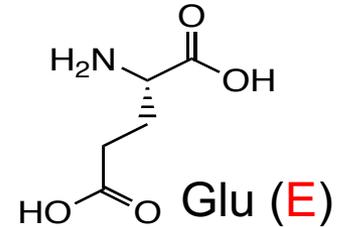
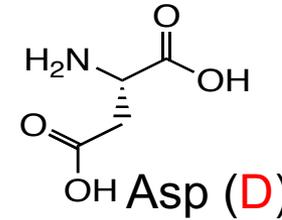
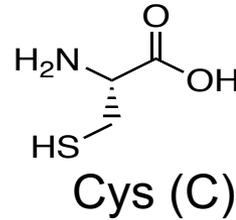
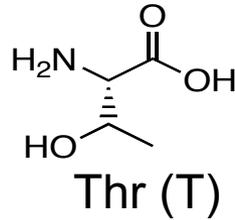
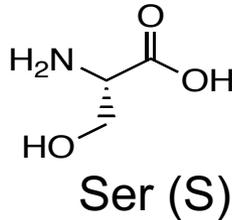
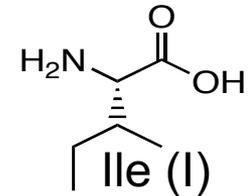
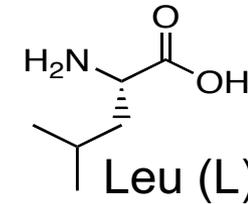
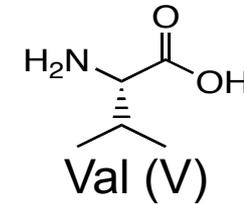
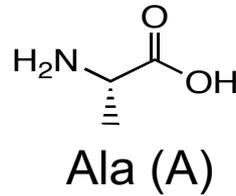
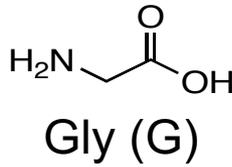
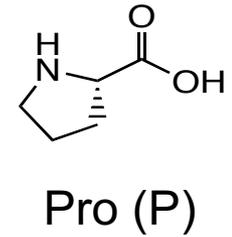
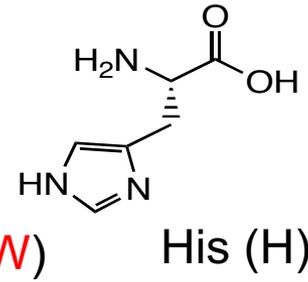
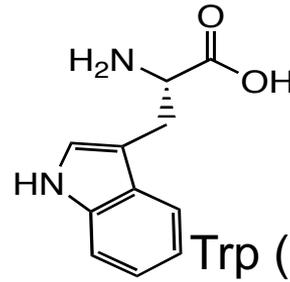
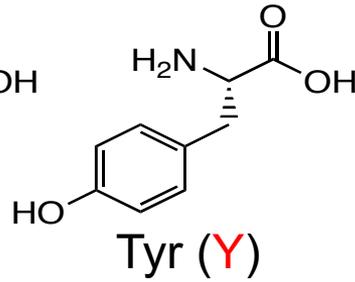
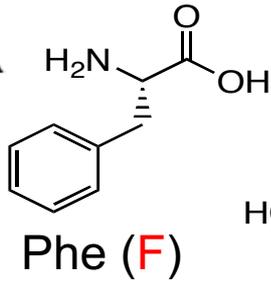
1. セントラルドグマと遺伝暗号
2. 生物化学を使った人工遺伝暗号の構築
3. 人工遺伝暗号の創薬への応用

タンパク質を構成するアミノ酸

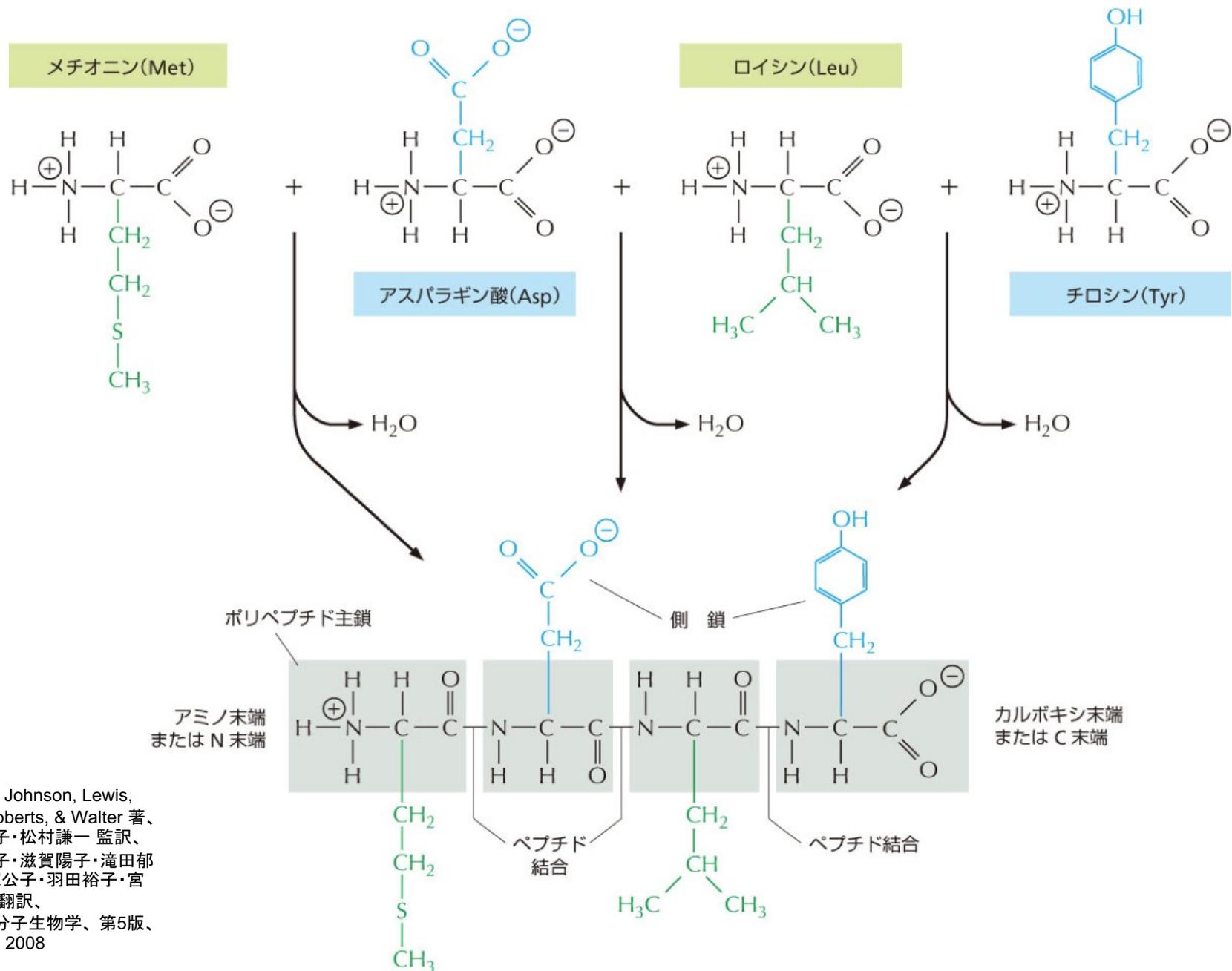


20種類の天然アミノ酸 (タンパク質性アミノ酸)

<https://health.joyplot.com/HealthWordsWiki/?%E3%82%A2%E3%83%9F%E3%83%8E%E9%85%B8>, 2019/03/05



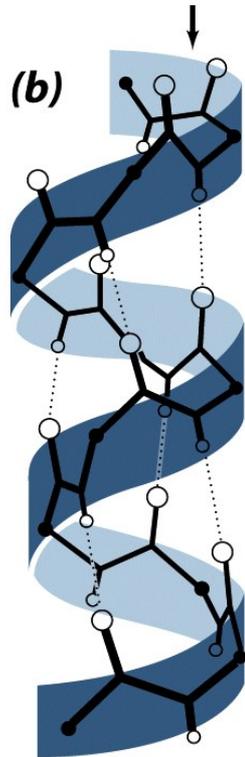
タンパク質の構造要素



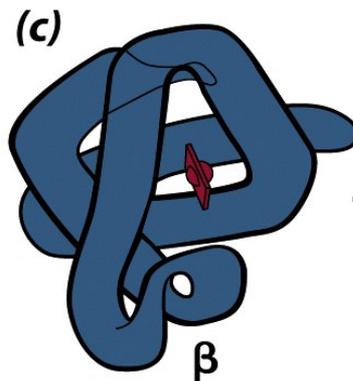
タンパク質

(a) - Lys - Ala - His - Gly - Lys - Lys - Val - Leu - Gly - Ala -

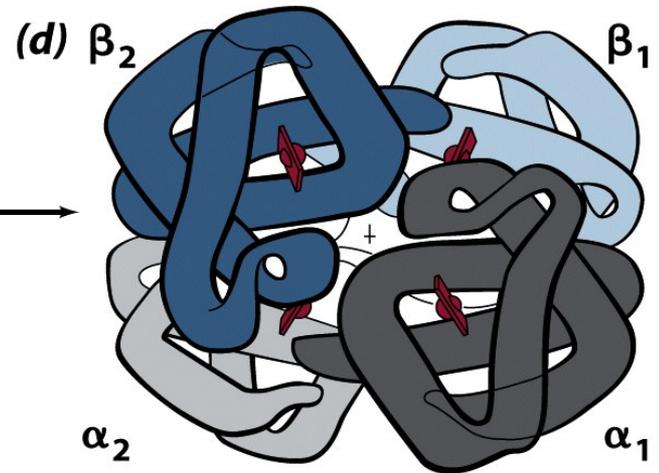
一次構造 (アミノ酸の配列, 20種類のタンパク質性アミノ酸)



二次構造
(α ヘリックス等)



三次構造
(一本のポリペプチドからなる高次構造)



四次構造
(複数のポリペプチドからなる高次構造)

タンパク質は20種類のアミノ酸からなっている。

例えば100個のアミノ酸からなるタンパク質の配列の可能な組み合わせは？

100個のアミノ酸からなるタンパク質の平均分子量を 10^4 として
全て1分子ずつ合成すると？

タンパク質は20種類のアミノ酸からなっている。

例えば100個のアミノ酸からなるタンパク質の配列の可能な組み合わせは？

20X20X20 …X20

① ② ③ … ⑩

$$20^{100} \doteq 10^{130}$$

100個のアミノ酸からなるタンパク質の平均分子量を 10^4 として
全て1分子ずつ合成すると？

タンパク質は20種類のアミノ酸からなっている。

例えば100個のアミノ酸からなるタンパク質の配列の可能な組み合わせは？

20X20X20 …X20

① ② ③ … ⑩

$$20^{100} \doteq 10^{130}$$

100個のアミノ酸からなるタンパク質の平均分子量を 10^4 として
全て1分子ずつ合成すると？

$$10^{130} \times 10^4 / (6 \times 10^{23}) \doteq 10^{110} \text{ g}$$

ちなみに地球の質量は $6 \times 10^{27} \text{ g}$

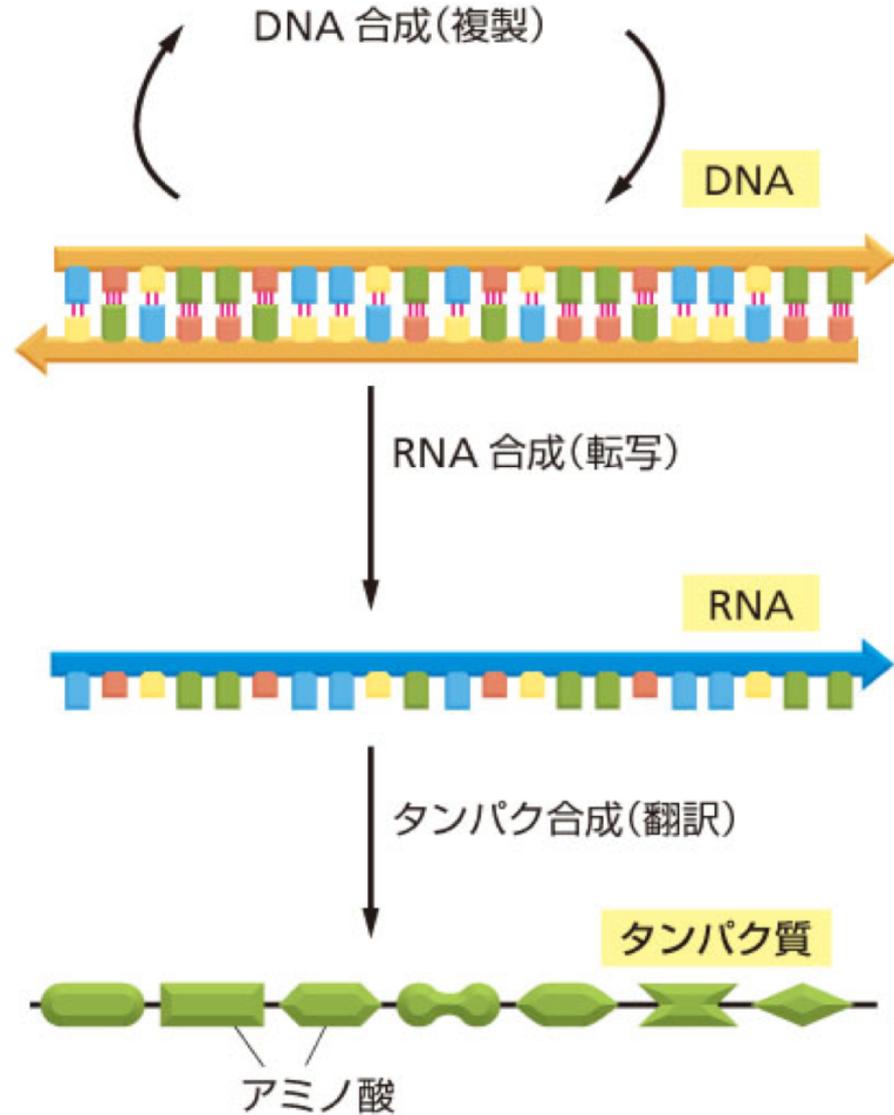
どうやって生物は任意のアミノ酸の並びをもつタンパク質を
正確に合成しているのか？

翻訳によるタンパク質の鋳型依存的な合成

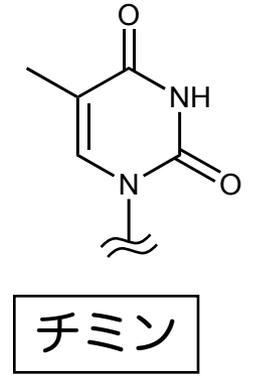
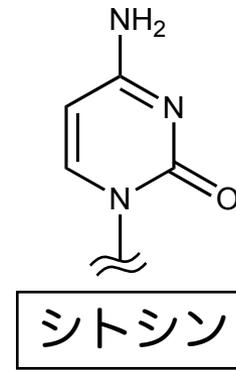
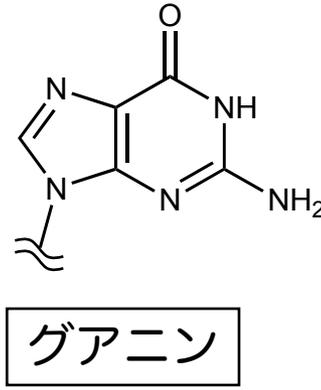
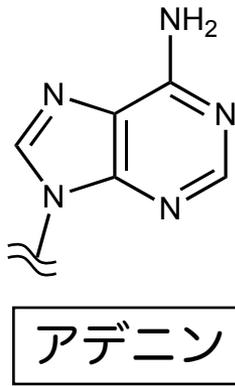
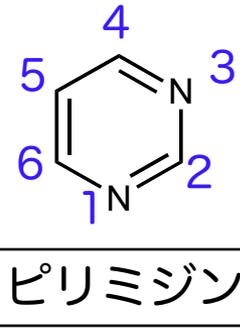
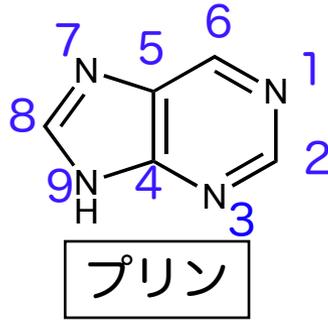
1. セントラルドグマと遺伝暗号

セントラルドグマ

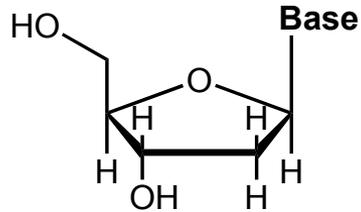
DNAの配列が設計図
になって、タンパク質
が作られる。



DNAの化学構造



塩基



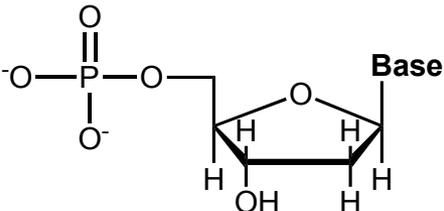
デオキシ
アデノシン

デオキシ
グアノシン

デオキシ
シチジン

デオキシ
チミジン

デオキシヌクレオシド



デオキシ
アデノシン
ーリン酸

デオキシ
グアノシン
ーリン酸

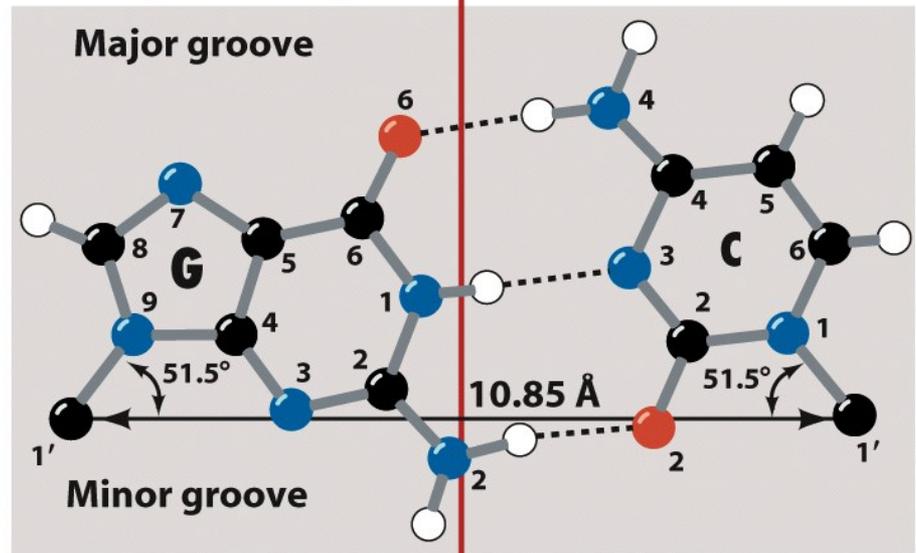
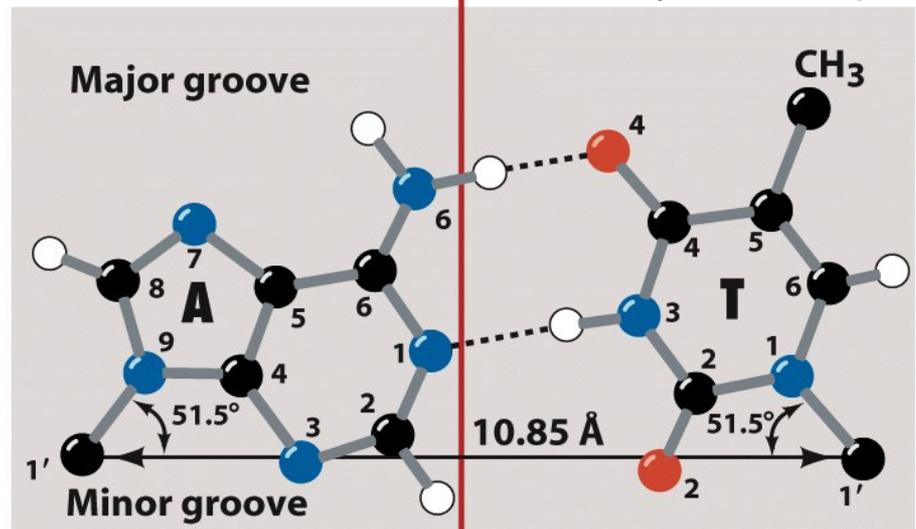
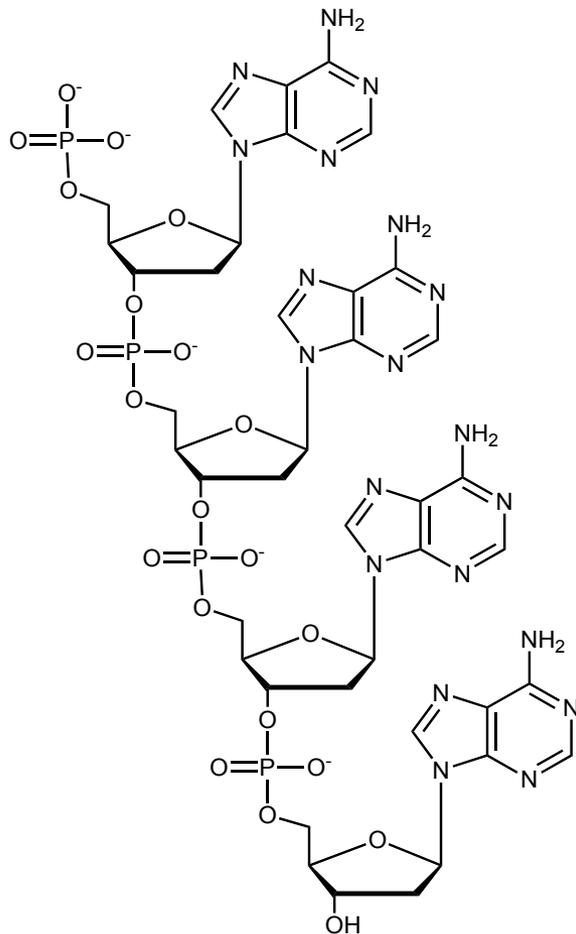
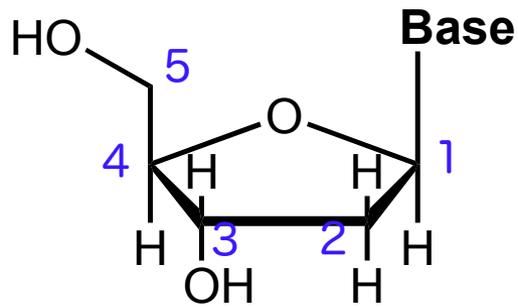
デオキシ
シチジン
ーリン酸

デオキシ
チミジン
ーリン酸

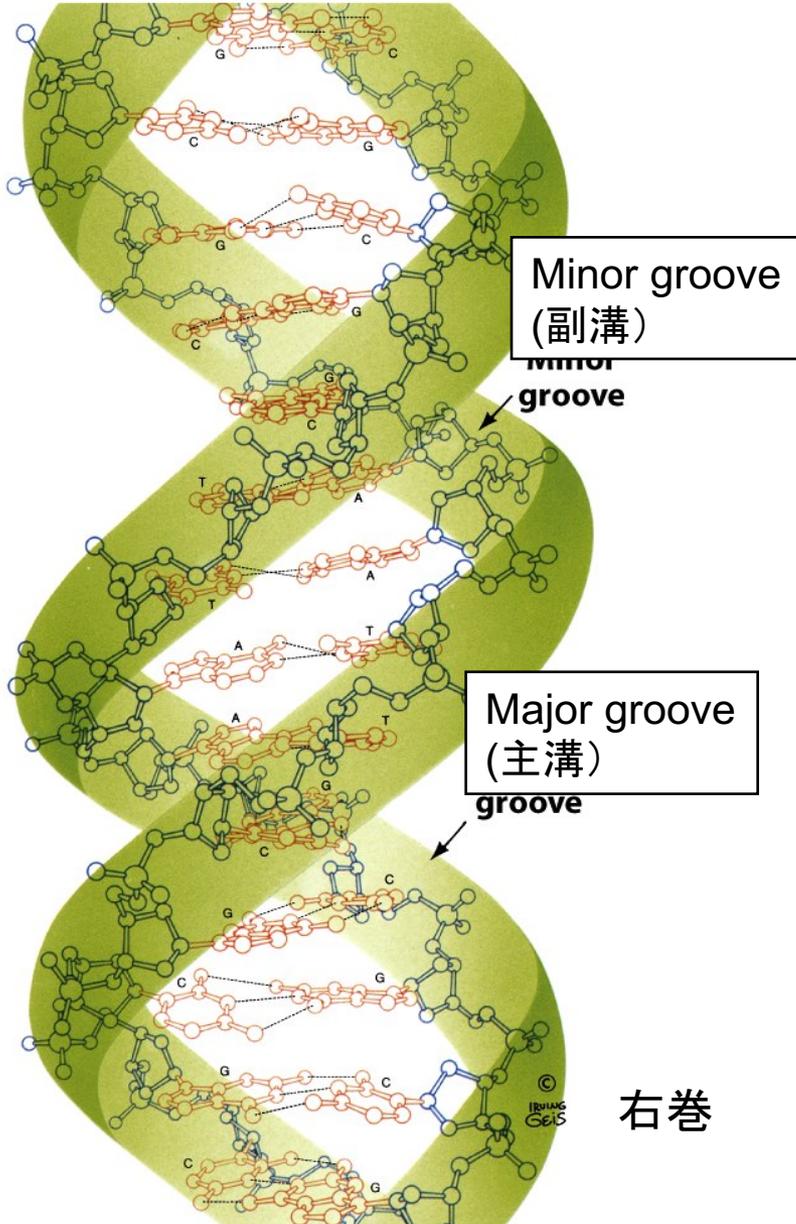
デオキシヌクレオチド

DNAの構造

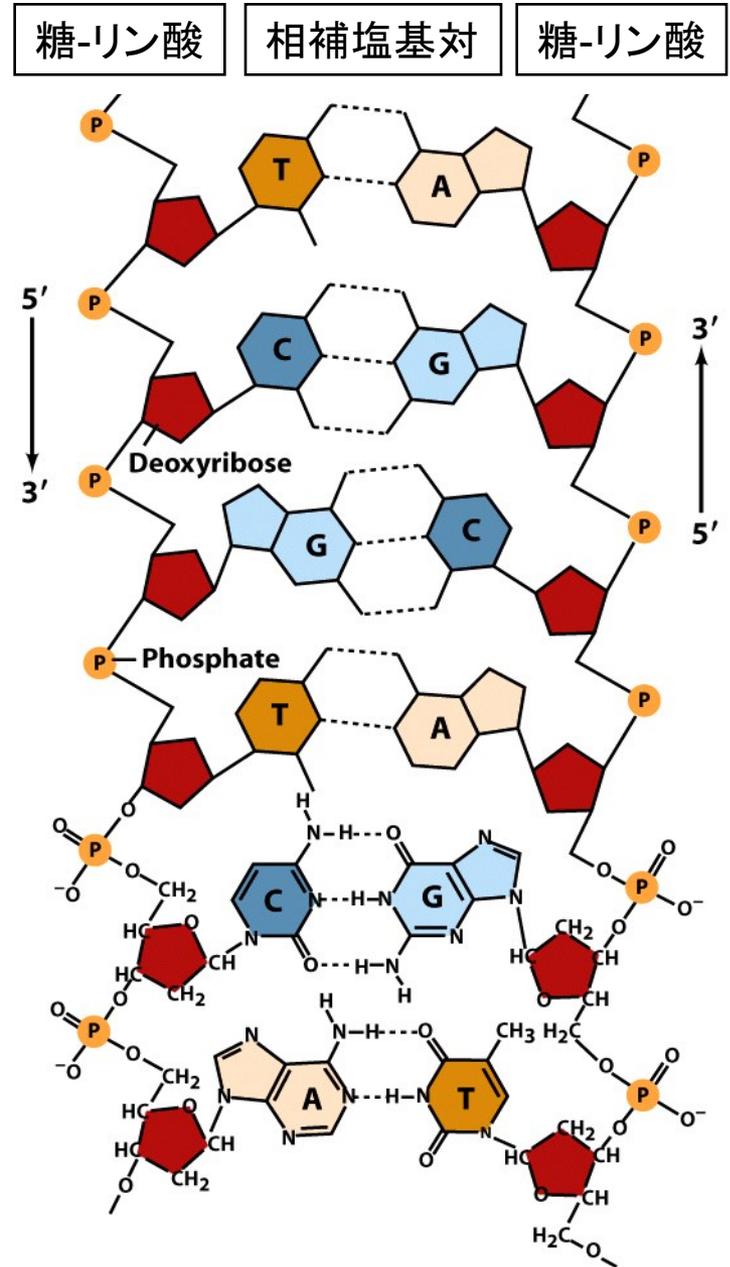
Donald Voet & Judith G.Voet, biochemistry, 3rd edition, p.88, 2004



DNA



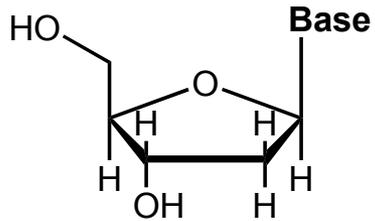
Illustration, Irving Geis. Image from the Irving Geis Collection/Howard Hughes Medical Institute. Rights owned by HHMI. Reproduction by permission only.



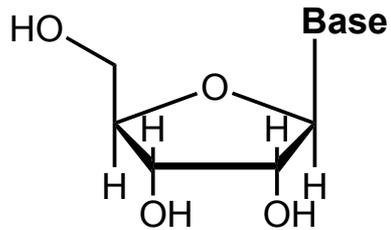
© 2008 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

セントラルドグマ

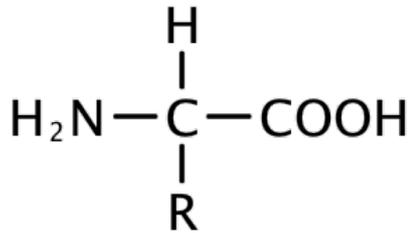
Alberts他 著、
中村他 監訳、
青山他 翻訳、
細胞の分子生物学、第5版、
p.331、2008



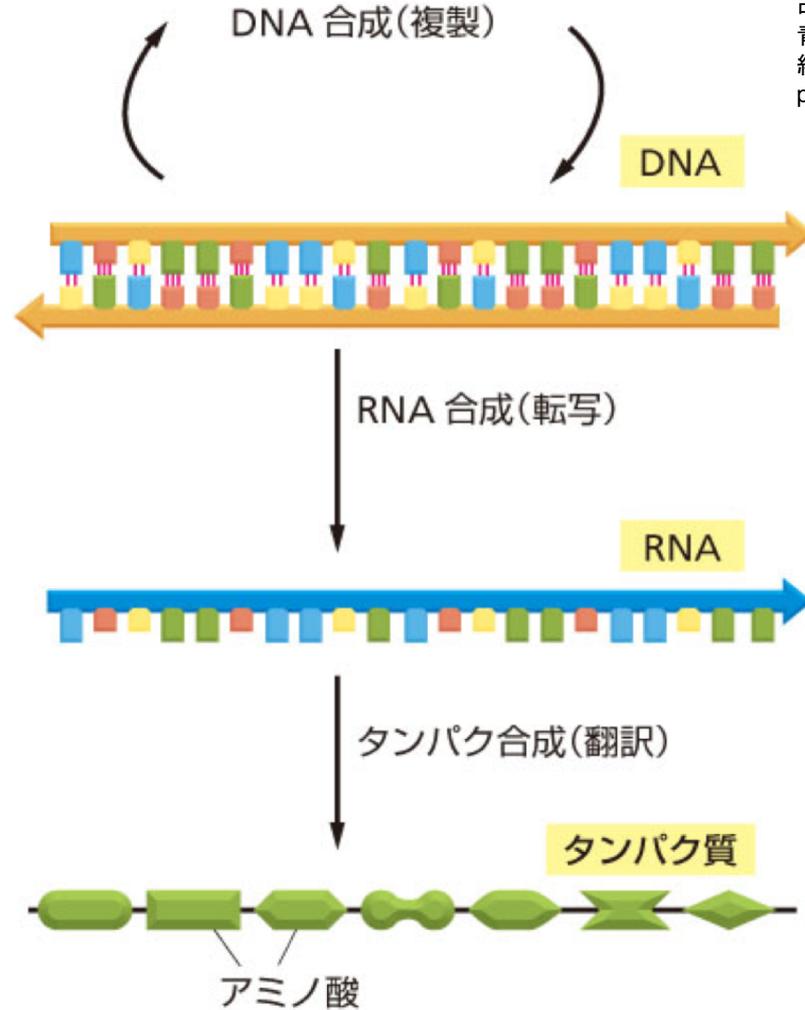
DNA
A, T, G, C
4種類



RNA
A, U, G, C
4種類



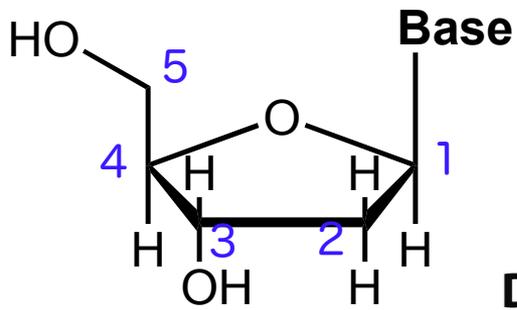
アミノ酸
20種類



情報(DNA/RNA)は4種類の化合物->タンパク質は20種類のアミノ酸からなる。

→どうやって20種類からなるものを、4種類のもので表すか？

コドンとアミノ酸



DNA 5' — A-G-A-G-G-T-G-C-T — 3'
3' — T-C-T-C-C-A-C-G-A — 5'

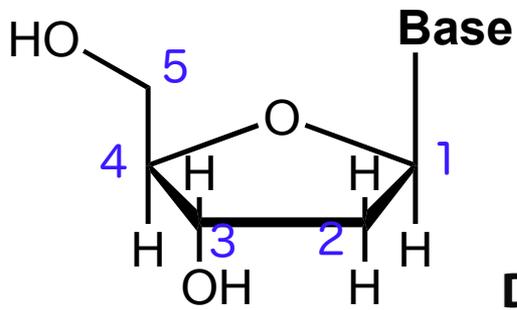


mRNA 5' — A-G-A-G-G-U-G-C-U — 3'



Protein — Arginine — Glycine — Alanine —

コドンとアミノ酸

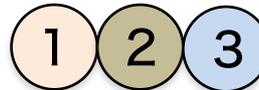


DNA 5' — A-G-A-G-G-T-G-C-T — 3'
3' — T-C-T-C-C-A-C-G-A — 5'

mRNA 5' — A-G-A-G-G-U-G-C-U — 3'

Protein — Arginine — Glycine — Alanine —

4 x 4 x 4 = 64 種類の組み合わせ



コドン

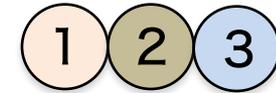
普遍遺伝暗号：コドンとアミノ酸の対応表

(ほとんどの生物で共通)

Table 27-1 The "Standard" Genetic Code^a

First position (5' end)	Second position				Third position (3' end)
1	U	C	A	G	3
U	UUU Phe <chem>c1ccc(cc1)C</chem>	UCU	UAU Tyr <chem>c1ccc(cc1)C(=O)O</chem>	UGU Cys <chem>SCC</chem>	U
	UUC	UCC	UAC	UGC Cys <chem>SCC</chem>	C
	UUA Leu	UCA Ser <chem>CC(O)C</chem>	UAA STOP	UGA STOP	A
	UUG	UCG	UAG STOP	UGG Trp <chem>c1ccc2c(c1)c(c[nH]2)C</chem>	G
C	CUU	CCU	CAU His <chem>Cc1c[nH]cn1</chem>	CGU	U
	CUC	CCC	CAC	CGC	C
	CUA Leu <chem>CC(C)C</chem>	CCA Pro <chem>C(C)C(=O)O</chem>	CAA	CGA Arg <chem>CC(N)C(=O)N</chem>	A
	CUG	CCG	CAG Gln <chem>CC(C)C(=O)N</chem>	CGG	G
A	AUU	ACU	AAU	AGU	U
	AUC Ile <chem>CC(C)C</chem>	ACC	AAC Asn <chem>CC(N)=O</chem>	AGC Ser <chem>CC(O)C</chem>	C
	AUA	ACA Thr <chem>CC(O)C</chem>	AAA	AGA	A
	AUG Met ^b <chem>CSCC</chem>	ACG	AAG Lys <chem>CC(C)C[NH3+]</chem>	AGG Arg	G
G	GUU	GCU	GAU	GGU	U
	GUC	GCC	GAC Asp <chem>C(=O)C(=O)[O-]</chem>	GGC	C
	GUA Val <chem>CC(C)C</chem>	GCA Ala <chem>CC</chem>	GAA	GGA Gly <chem>C</chem>	A
	GUG	GCG	GAG Glu <chem>C(=O)C(=O)[O-]</chem>	GGG	G

$$4 \times 4 \times 4 = 64$$



コドン

20種類のアミノ酸
終結
が割り当てられている。

Donald Voet & Judith G.Voet,
biochemistry, 3rd edition, p.97, 2004

^aNonpolar amino acid residues are tan, basic residues are blue, acidic residues are red, and polar uncharged residues are purple

^bAUG forms part of the initiation signal as well as coding for internal Met residues.

学籍番号 名前

(1) 以下のRNAをタンパク質に翻訳せよ。アミノ酸は一文字表記とする。

GAAGCCUCAUAC

CAUGC GCCACCCUAU

GGACGUGAAGCUACA

UUUAUCA AUGAA

学籍番号 名前

(1) 以下のRNAをタンパク質に翻訳せよ。アミノ酸は一文字表記とする。

GAA-GCC-UCA-UAC

CAUGC GCCACCCUAU

GGACGUGAAGCUACA

UUUAUCA AUGAA

学籍番号 名前

(1) 以下のRNAをタンパク質に翻訳せよ。アミノ酸は一文字表記とする。

GAA-GCC-UCA-UAC

CAUGC GCCACCCUAU

GGACGUGAAGCUACA

UUUAUCA AUGAA

	U	C	A	G	
U	F L	S	Y Stop	C Stop W	U C A G
C	L	P	H Q	R	U C A G
A	I M	T	N K	S R	U C A G
G	V	A	D E	G	U C A G

学籍番号 名前

(1) 以下のRNAをタンパク質に翻訳せよ。アミノ酸は一文字表記とする。

GAA-GCC-UCA-UAC
E - A - S - Y

CAUGC GCCACCCUAU

GGACGUGAAGCUACA

UUUAUCA AUGAA

	U	C	A	G	
	F	S	Y	C	U
U	L		Stop	Stop W	C A G
	L	P	H	R	U
C			Q		C A G
	I	T	N	S	U
A	M		K	R	C A G
	V	A	D	G	U
G			E		C A G

学籍番号 名前

(1) 以下のRNAをタンパク質に翻訳せよ。アミノ酸は一文字表記とする。

GAA-GCC-UCA-UAC
E - A - S - Y

CAU-GCG-CCA-CCC-UAU

GGA-CGU-GAA-GCU-ACA

UUU-AUC-AAU-GAA

	U	C	A	G	
	F	S	Y	C	U
U	L		Stop	Stop W	C A G
	L	P	H	R	U
C			Q		C A G
	I	T	N	S	U
A	M		K	R	C A G
	V	A	D	G	U
G			E		C A G

学籍番号 名前

(1) 以下のRNAをタンパク質に翻訳せよ。アミノ酸は一文字表記とする。

GAA-GCC-UCA-UAC
E - A - S - Y

CAU-GCG-CCA-CCC-UAU
H - A - P - P - Y

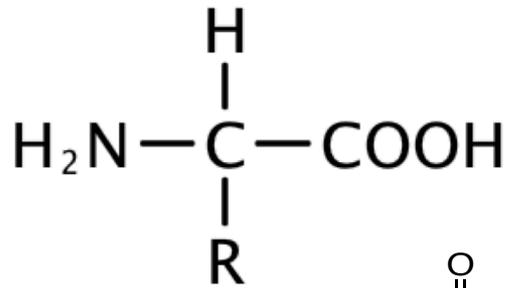
GGA-CGU-GAA-GCU-ACA
G - R - E - A - T

UUU-AUC-AAU-GAA
F - I - N - E

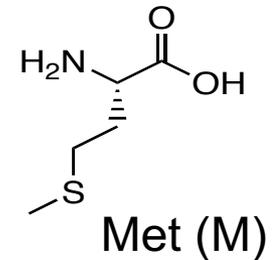
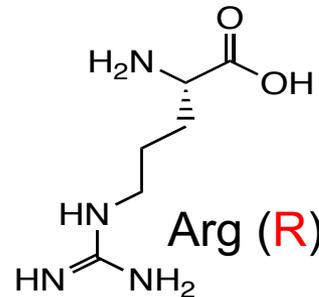
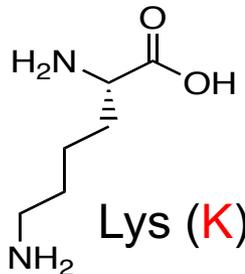
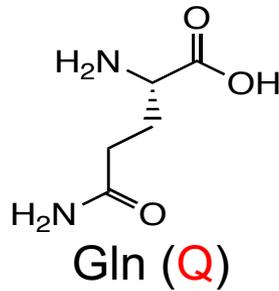
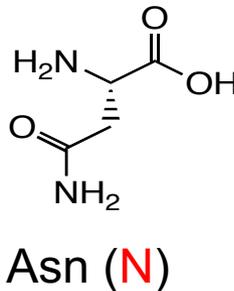
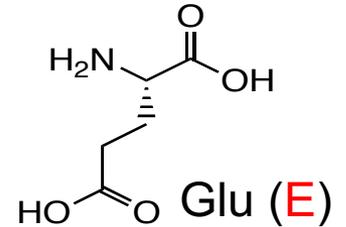
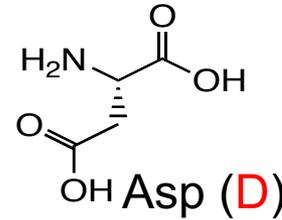
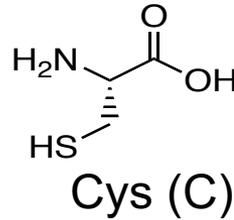
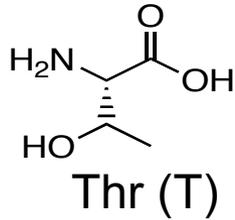
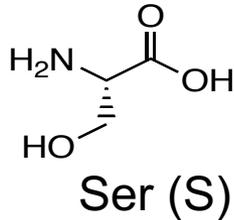
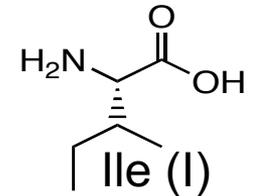
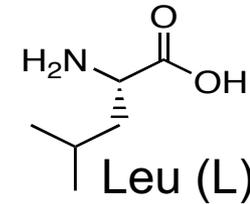
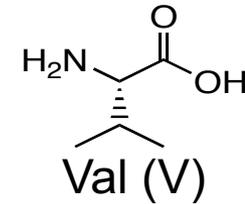
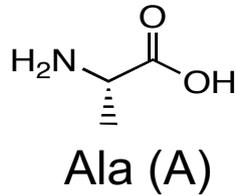
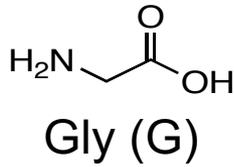
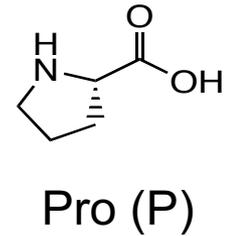
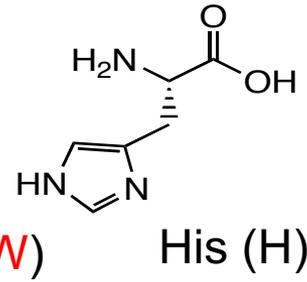
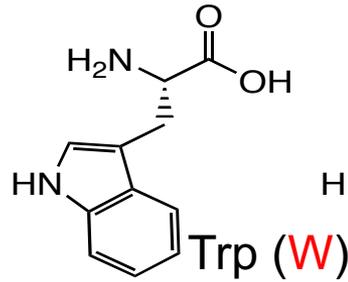
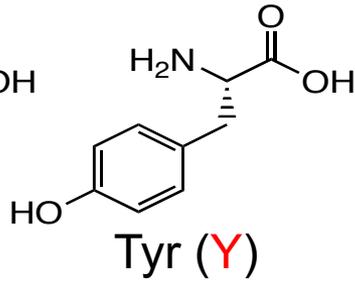
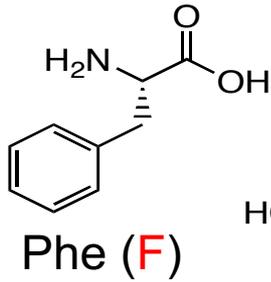
	U	C	A	G	
U	F L	S	Y Stop	C Stop W	U C A G
C	L	P	H Q	R	U C A G
A	I M	T	N K	S R	U C A G
G	V	A	D E	G	U C A G

2. 生物化学を使った人工遺伝暗号の構築

タンパク質を構成するアミノ酸



20種類の天然アミノ酸 (タンパク質性アミノ酸)



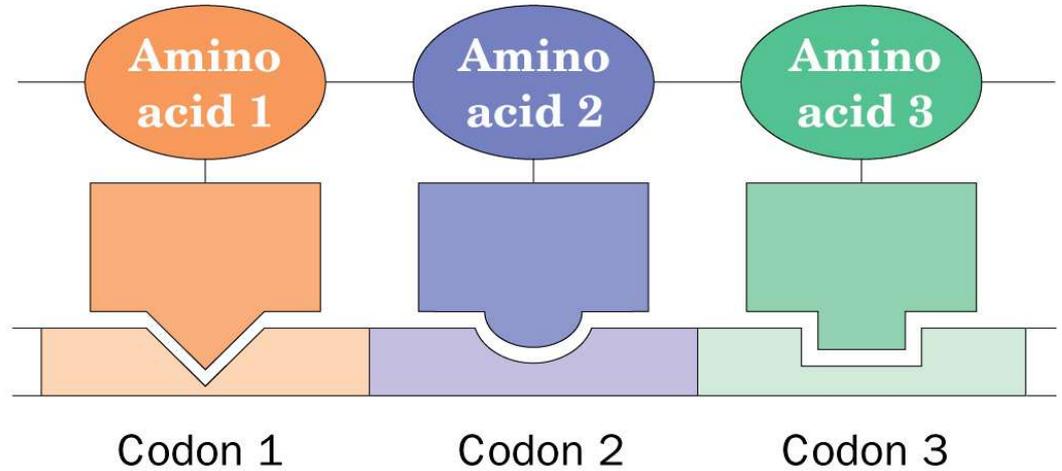
アミノアシルtRNA

アミノアシル
tRNAがコドンと
アミノ酸の対応
関係をつくる。

タンパク質

アダプター

mRNA



結合したアミノ酸
(Phe)



3' 末端

5' 末端

受容腕

Alberts et al. 著、
中村桂子他 訳、細胞の分子
生物学、第5版、p.368、
2008

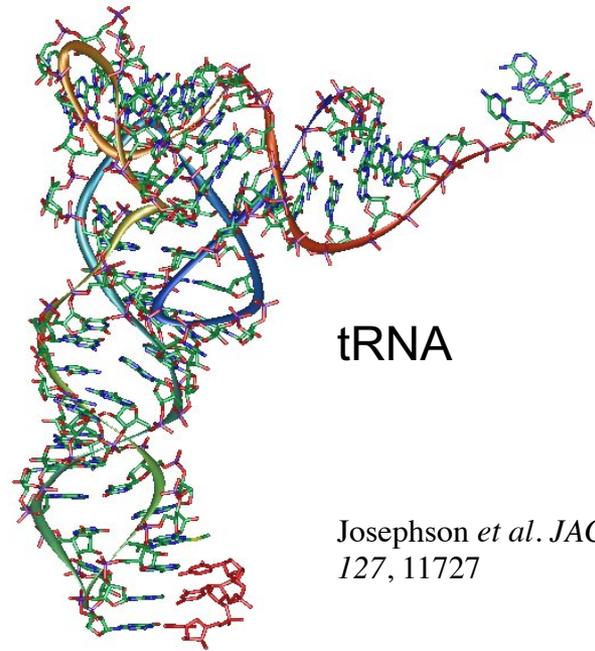
Dループ

Tループ

アンチコドン
ループ

アンチコドン

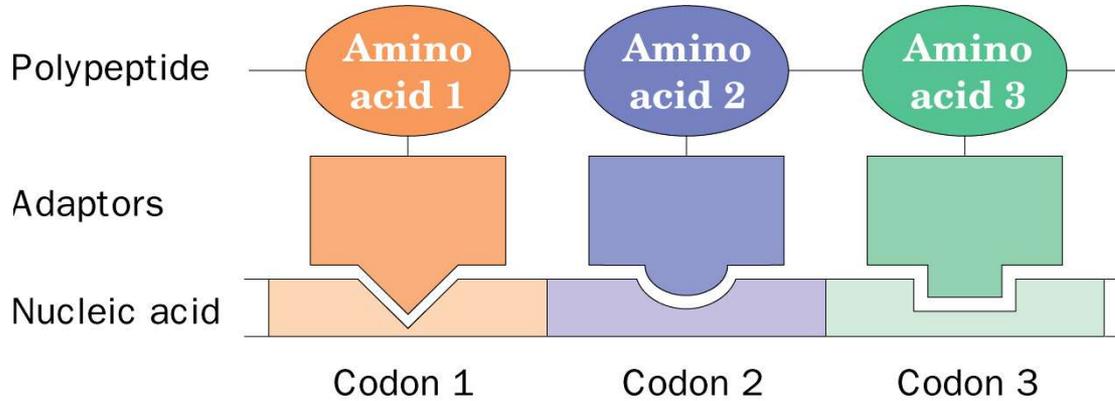
クローバーの葉



tRNA

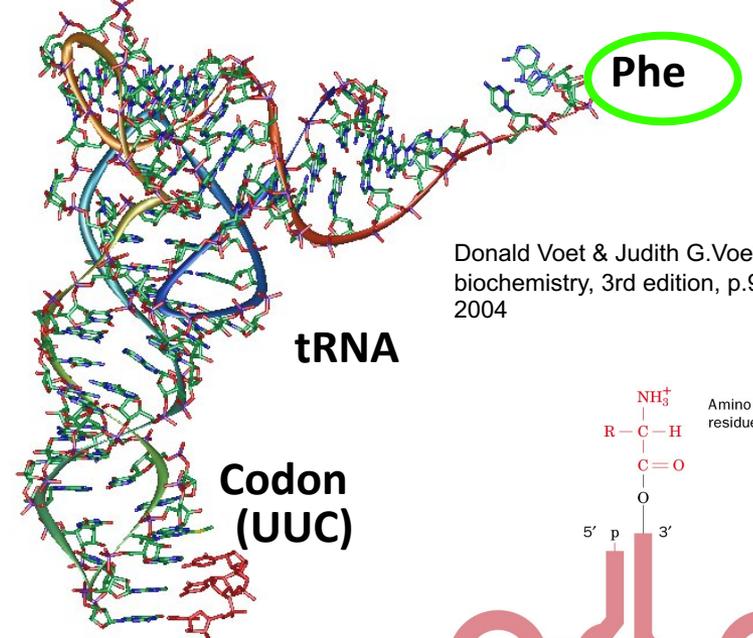
Josephson *et al.* JACS (2005)
127, 11727

tRNAの役割



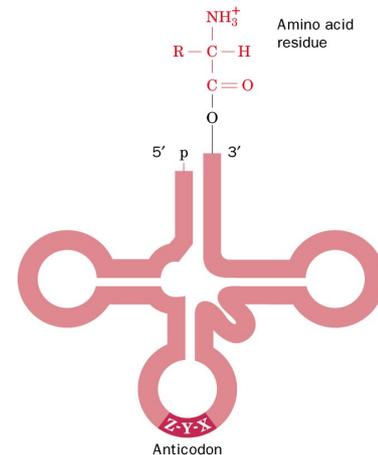
細胞の分子生物学 第4版 Bruce Alberts著 中村桂子、松原謙一 訳 2004

	U	C	A	G	
U	Phe Leu	Ser	Tyr Stop	Cys Stop Trp	U C A G
C	Leu	Pro	His Gln	Arg	U C A G
A	Ile Met	Thr	Asn Lys	Ser Arg	U C A G
G	Val	Ala	Asp Glu	Gly	U C A G



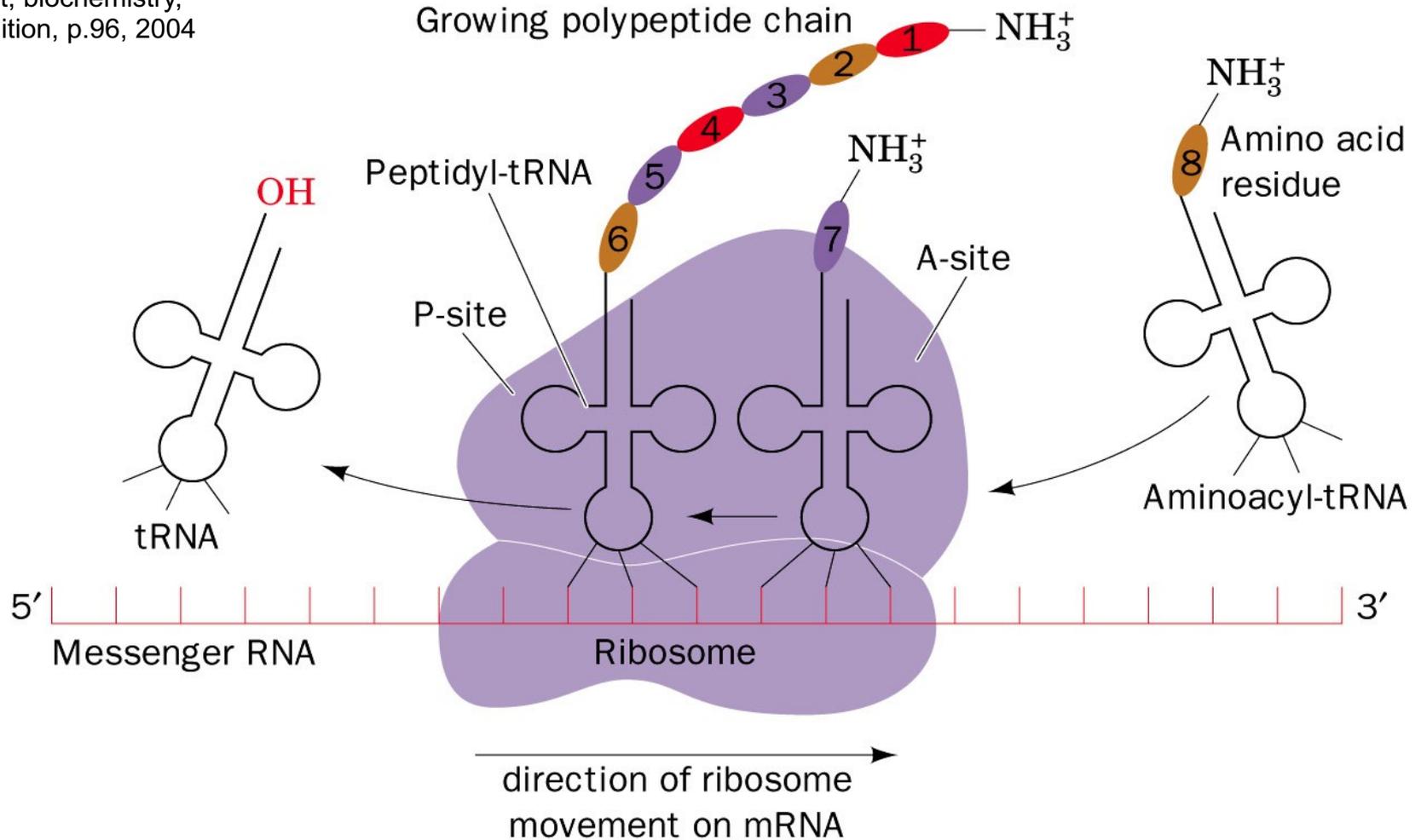
Donald Voet & Judith G.Voet, biochemistry, 3rd edition, p.95, 2004

Anticodon (GAA)



リボソーム（ペプチドの合成装置）

Donald Voet & Judith
G.Voet, biochemistry,
3rd edition, p.96, 2004



Q どうやって非タンパク質性アミノ酸を遺伝暗号に組入れるか？

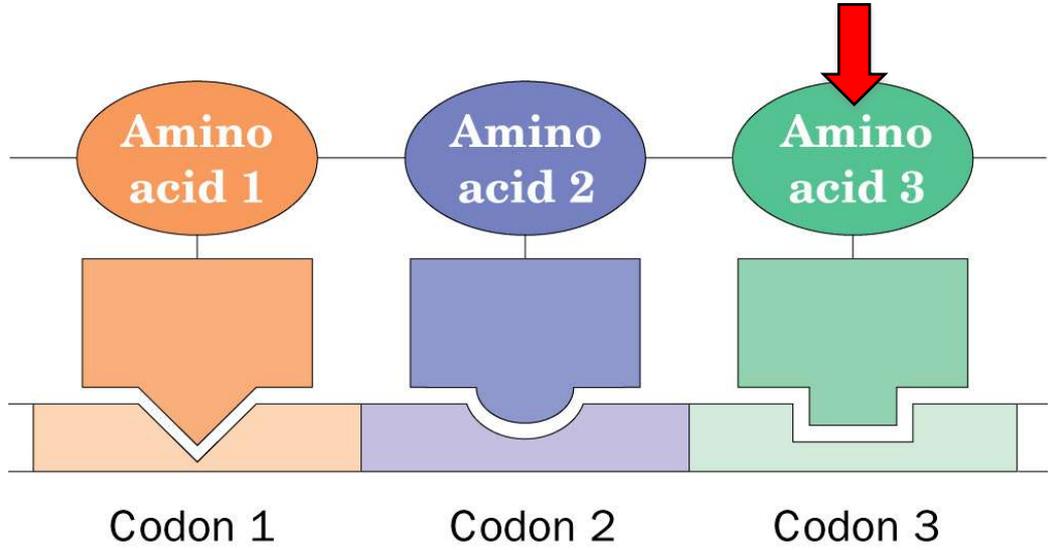
A これを非タンパク質性アミノ酸に置き換える。

アミノアシル
tRNAがコドンと
アミノ酸の対応
関係をつくる。

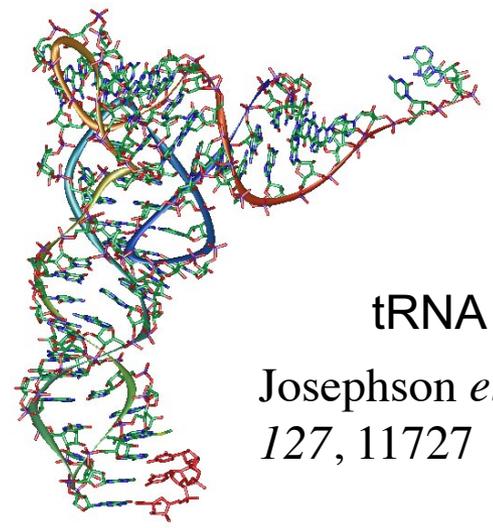
タンパク質

アダプター

mRNA



細胞の分子生物学 第4版 Bruce Alberts著 中村桂子、松原謙一 訳 2004



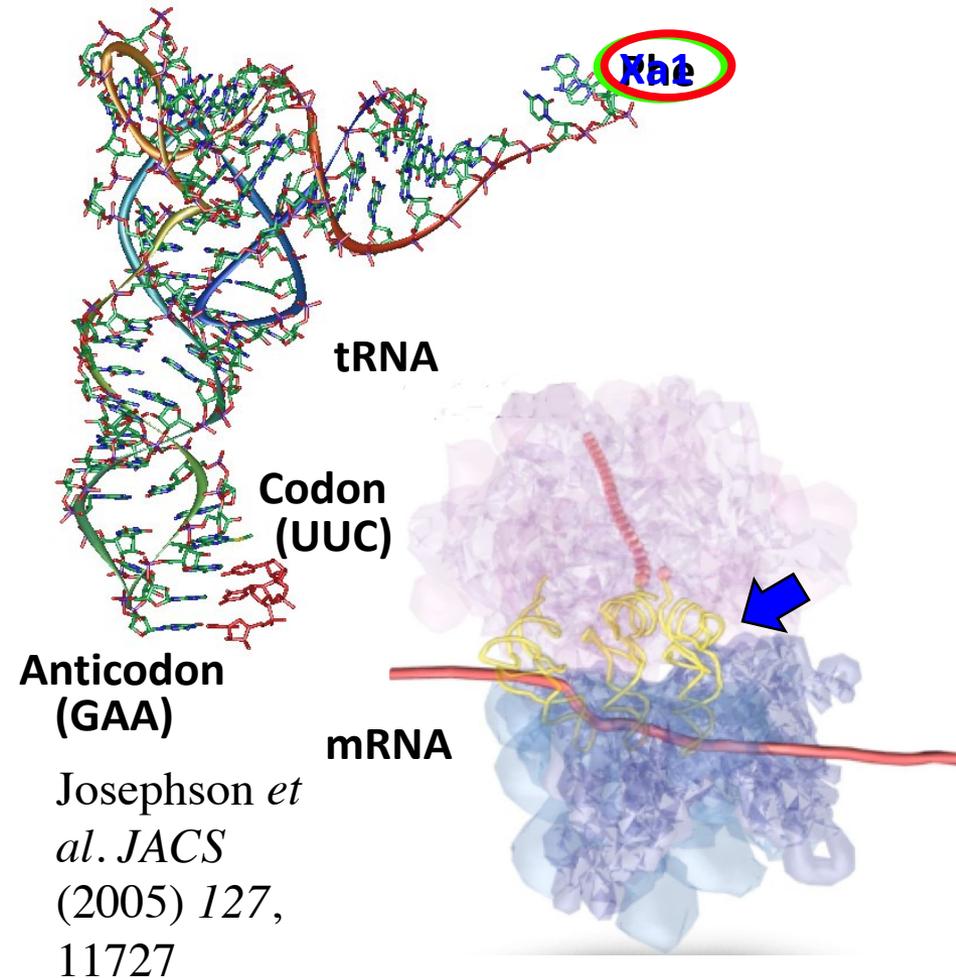
tRNA

Josephson *et al.* *JACS* (2005)
127, 11727

遺伝暗号のリプログラミング

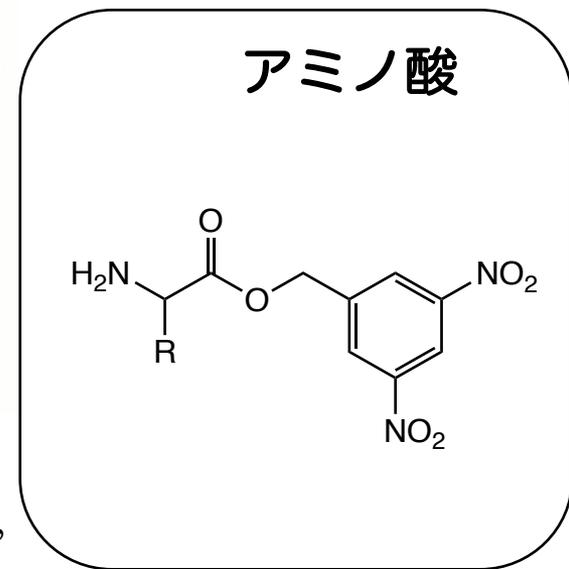
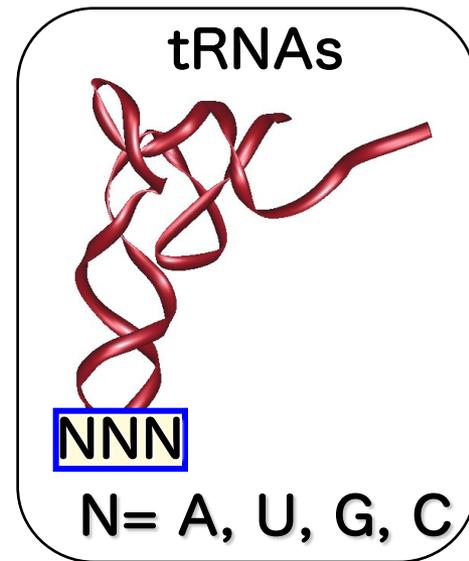
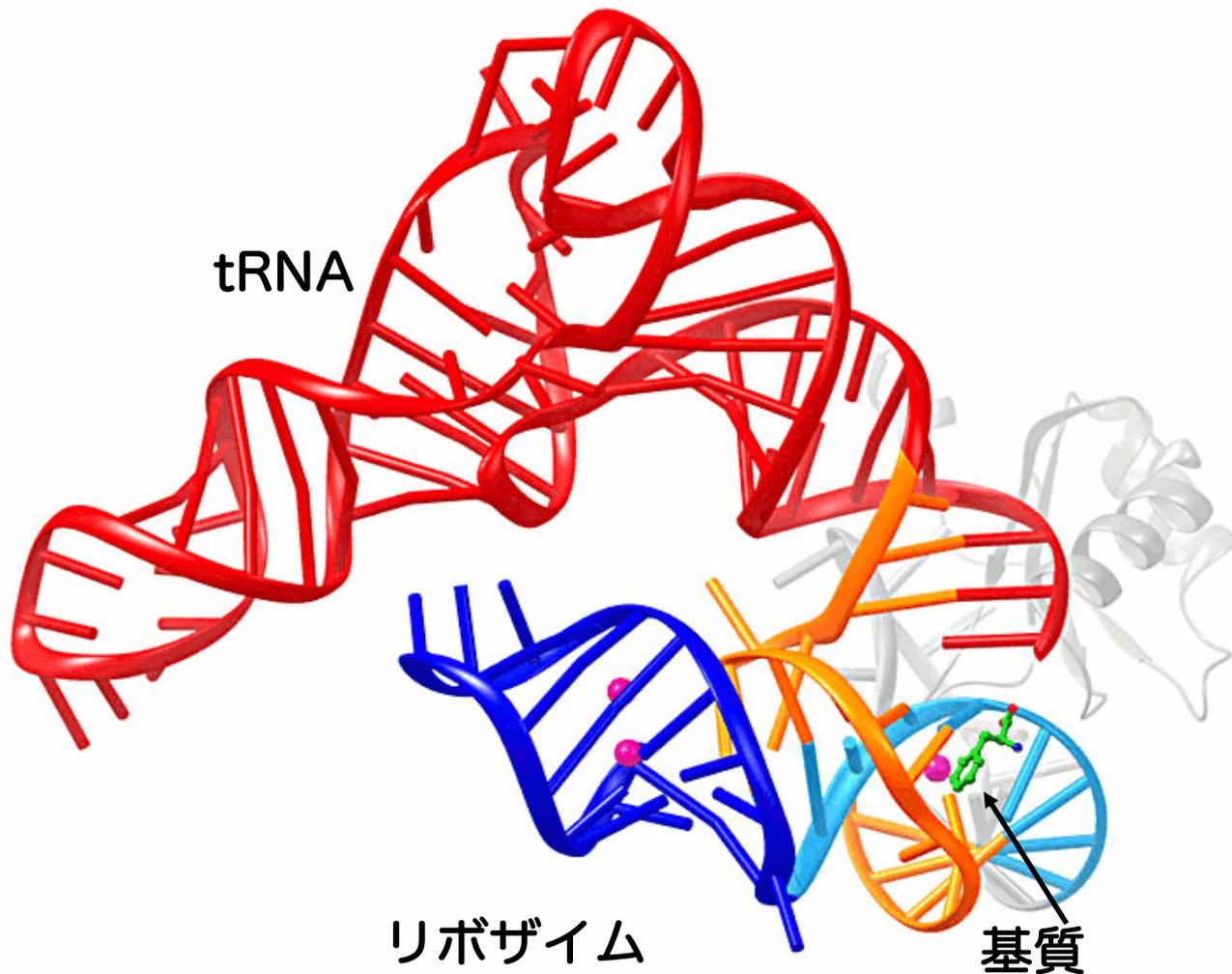
	U	C	A	G	
U	Rba Leu	Ser	Tyr Stop	Cys Stop Trp	U C A G
C	Leu	Pro	Ka4 His	Arg	U C A G
A	Ile Met	Xa3	Asn Lys	Ser Arg	U C A G
G	Xa2	Ala	Asp Glu	Gly	U C A G

Forster *et al.* *PNAS* (2003) 100, 6352



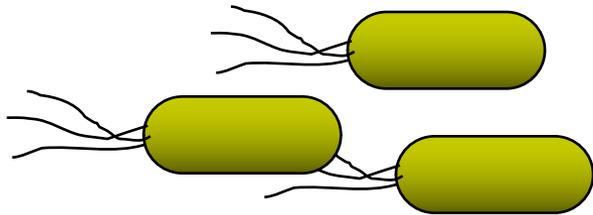
Murakami *et al.* *Nature Methods* (2006) 3, 357

人工酵素を用いたアミノアシルtRNAの作製



Xiao, H.; Murakami, H.; Suga, H.; Ferre-D'Amare, A. R.*,
Nature 2008, 454, 358-61.

無細胞翻訳系によるペプチドの合成

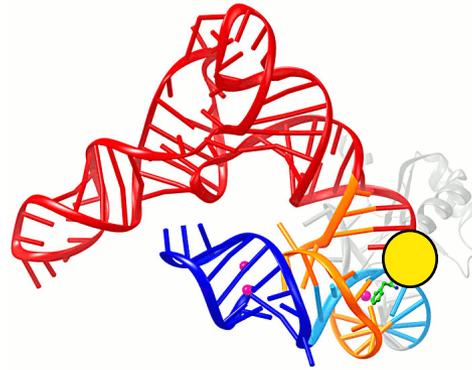


E. coli

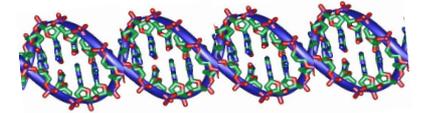
抽出・精製

リボソーム
アミノアシルtRNA合成酵素など
翻訳に必要なRNA, 蛋白質

ATP, GTP, CTP, UTP, 一部のアミノ酸
など、翻訳に必要な低分子化合物



非タンパク質性アミノ酸-tRNA

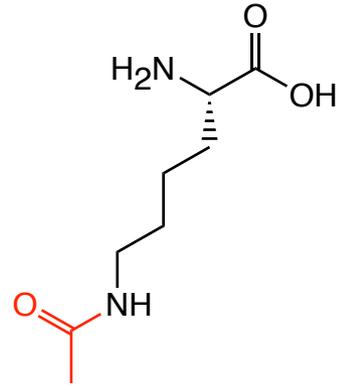
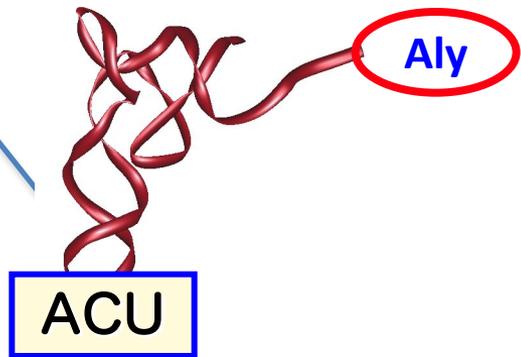
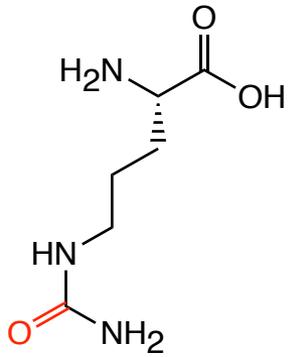
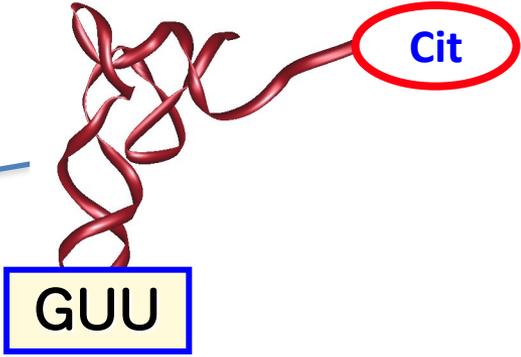
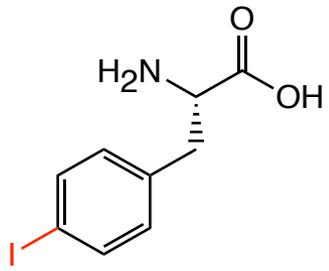
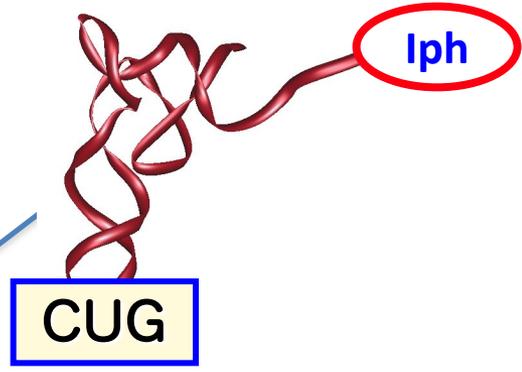


鋳型DNA



リプログラミングした遺伝暗号

	U	C	A	G	
			Tyr		U
U			Stop	Stop	C
			Iph		A
C					G
			Cit	Aly	U
A	Met	Thr	Lys		C
			Asp		A
G					G

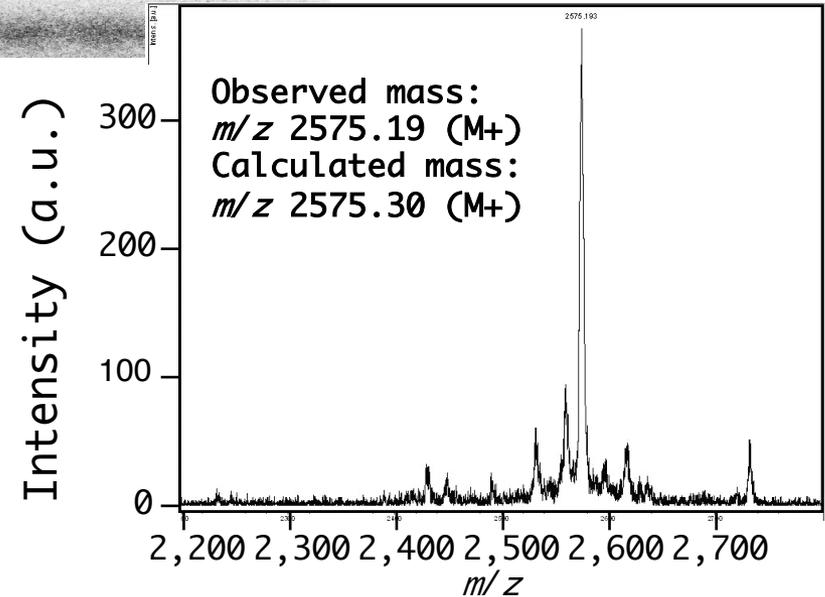
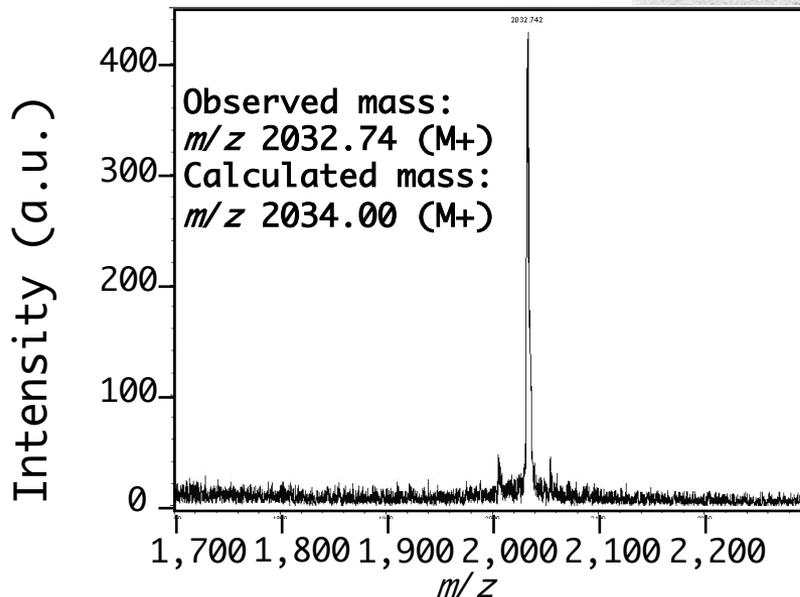
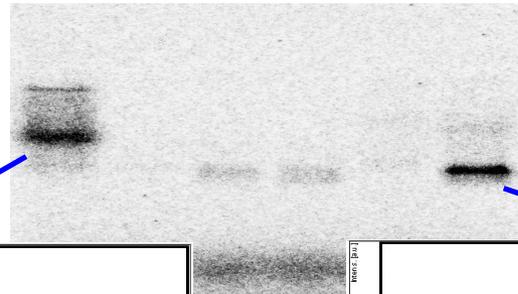


遺伝暗号のリプログラミングによるペプチドの合成

Natural	Met	Ser	Ser	Asn	Asn	Gln	Gln	Thr	Thr	Flag	STOP
	AUG	<u>AGU</u>	<u>AGU</u>	<u>AAC</u>	<u>AAC</u>	<u>CAG</u>	<u>CAG</u>	ACC	ACC	<i>flag</i>	UAA

Non-natural	Met	Aly	Aly	Cit	Cit	Iph	Iph	Thr	Thr	Flag	STOP
-------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------

Ser, Asn, Gln	+	-	-	-	-
ACU	-	-	+	+	+
Acylation of tRNA ^{Asn} _{xxx}					
GUU	-	+	-	+	+
CUG	-	+	+	-	+



3. 人工遺伝暗号の創薬への応用

現在の薬開発



- ・ ターゲット探索
- ・ 薬剤候補のスクリーニング
- ・ 動物や培養細胞を用いた有効性・安全性の研究

化合物ライブラリーと活性を調べる方法（スクリーニング）
が薬剤候補の創出の成否を握る。

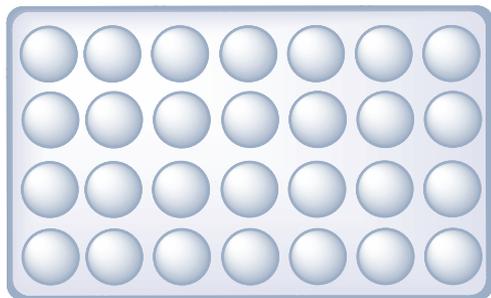
化合物ライブラリー

- ・ それぞれの企業の独自ライブラリー
- ・ 公共機関の化合物ライブラリー

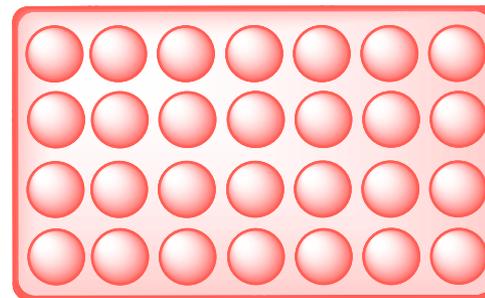
+

・ 自動分析装置

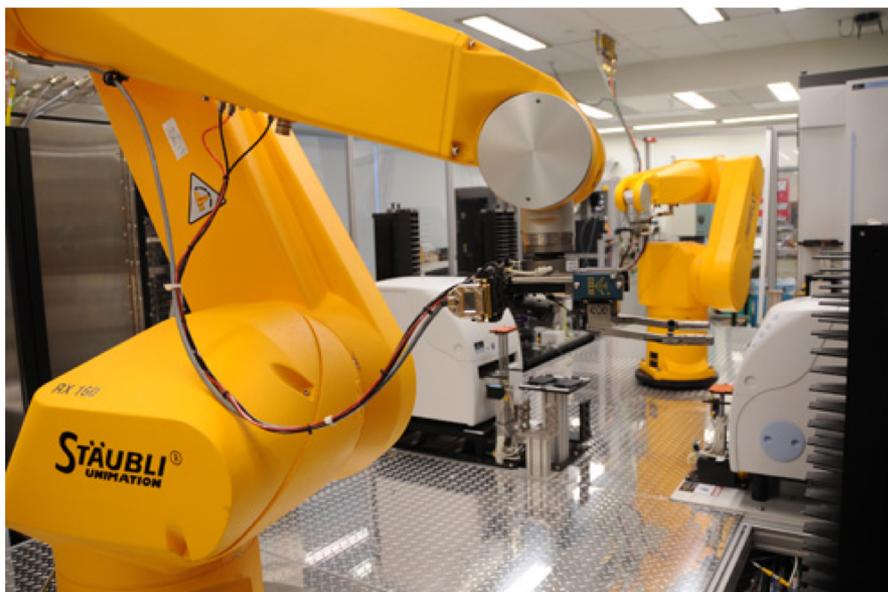
活性な化合物のスクリーニング



化合物群: $10^3 \sim 10^6$ 種類



アッセイ系: 個々の活性を調べる。



ロボットを用いて200万種類の化合物の活性を、3日で調べることができる。
(人が一人で8時間はたらくと12年かかる。)

<https://www.gettyimages.dk/detail/news-photo/in-a-photo-taken-in-september-2009-a-robot-arm-collects-dna-news-photo/112834023> 2019年7月8日アクセス

大規模な化合物ライブラリーの制限

- ・ライブラリーとして化合物は数百万種類程度である。
- ・化合物の種類を増やすと管理費／スクリーニング費が膨大になる。

大学や小さな企業でも使用可能な方法論を作りたい。

ペプチドライブラリーの合成

mRNA (単一のものの場合)

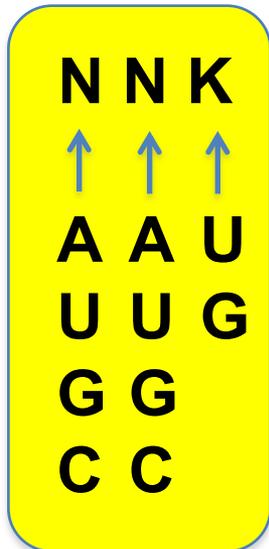
5'-UTR-AUG-CGU-CCU-GCU-AAU-GCU-UGC-3'UTR
Met His Pro Ala Asn Ala Cys



mRNAライブラリー (合成DNAから混合物として調製)

5'-UTR-AUG-NNK-NNK-NNK-NNK-NNK-UGC-3'UTR
Met Xxx Xxx Xxx Xxx Xxx Cys

(ペプチドは混合物として翻訳合成)



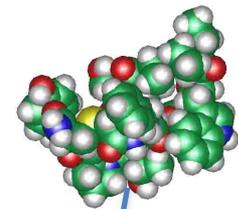
ペプチドの理論的な多様性

5残基 $(20)^5 = 3 \times 10^6$

12残基 $(20)^{12} = 4 \times 10^{15}$

	2nd				3rd
1st	U	C	A	G	
U	Phe Leu	Ser	Tyr Stop	Cys Trp	U C A G
C	Leu	Pro	His Gln	Arg	U C A G
A	Ile Met	Thr	Asn Lys	Ser Arg	U C A G
G	Val	Ala	Asp Glu	Gly	U C A G

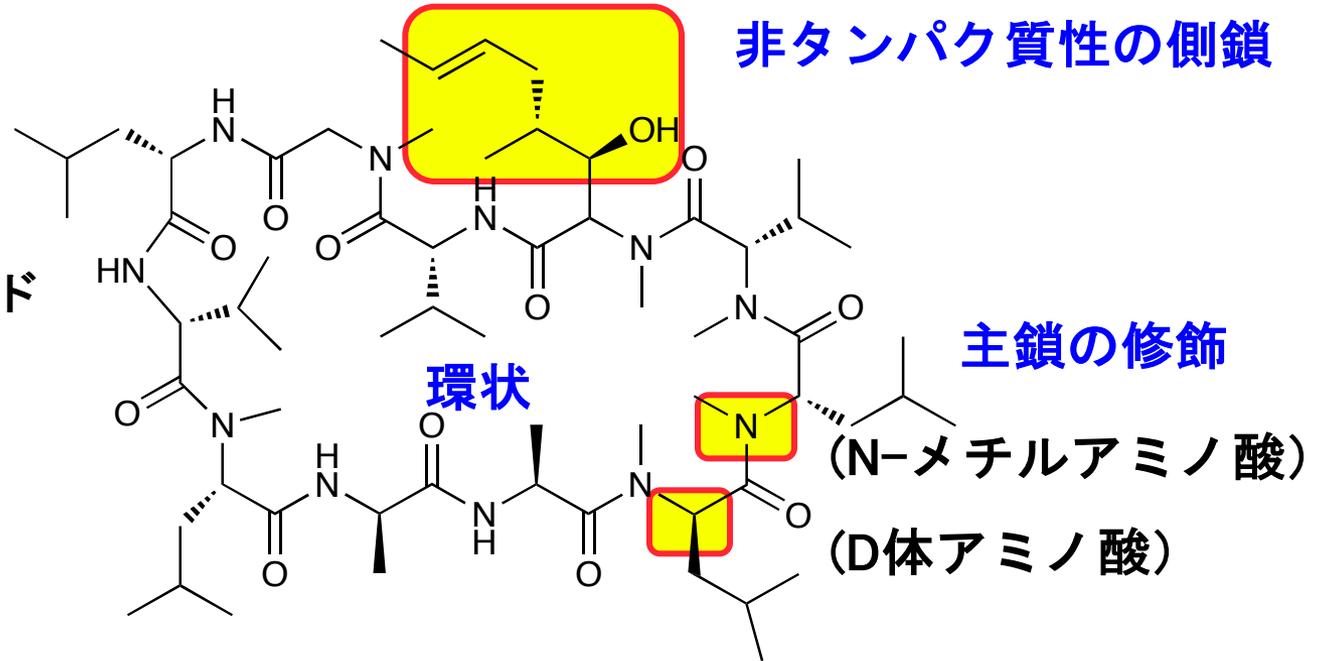
ペプチド



遺伝子

天然から得られた薬剤ペプチド

シクロスポリン：
真菌が産生するペプチド
免疫抑制剤として使用



特殊な構造

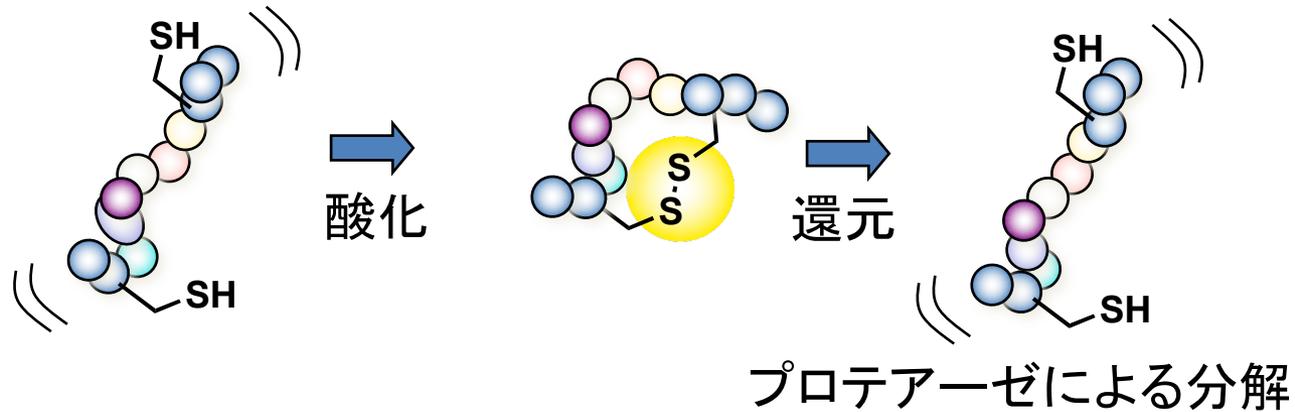


生体での安定性の向上・細胞膜透過性の増大

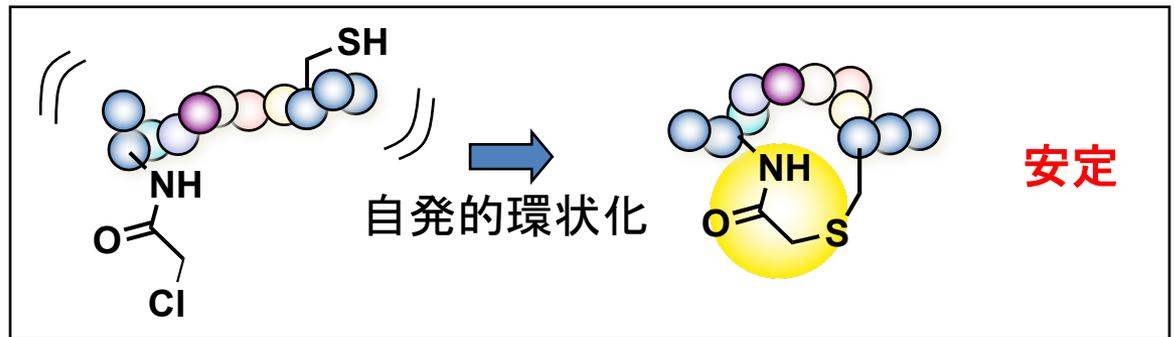
薬剤候補として有望

生体内で安定な環状ペプチド

通常のペプチドでは
Cysの側鎖のSHを用いて環状化→簡単に還元
されて分解してしまう。

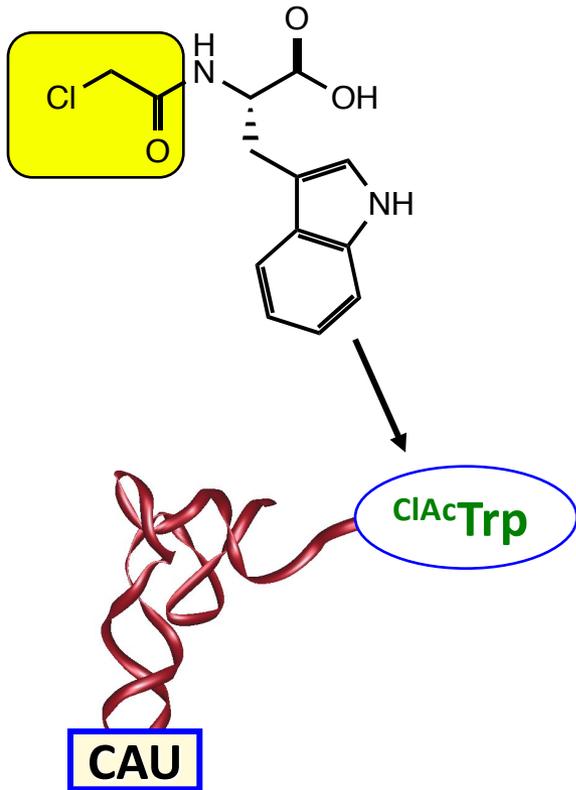


生体内で安定な
環状ペプチド



環状ペプチドの翻訳合成

19 アミノアシルtRNA合成酵素
19 タンパク質性アミノ酸

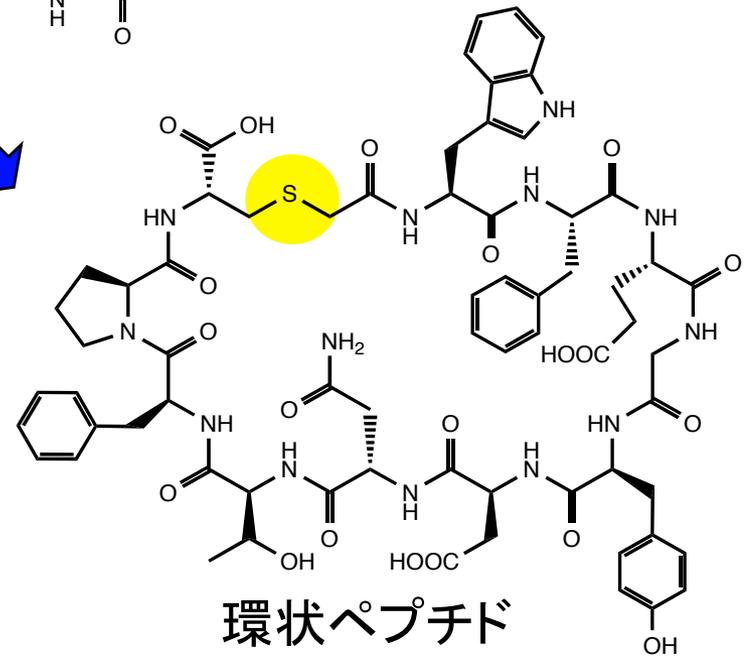
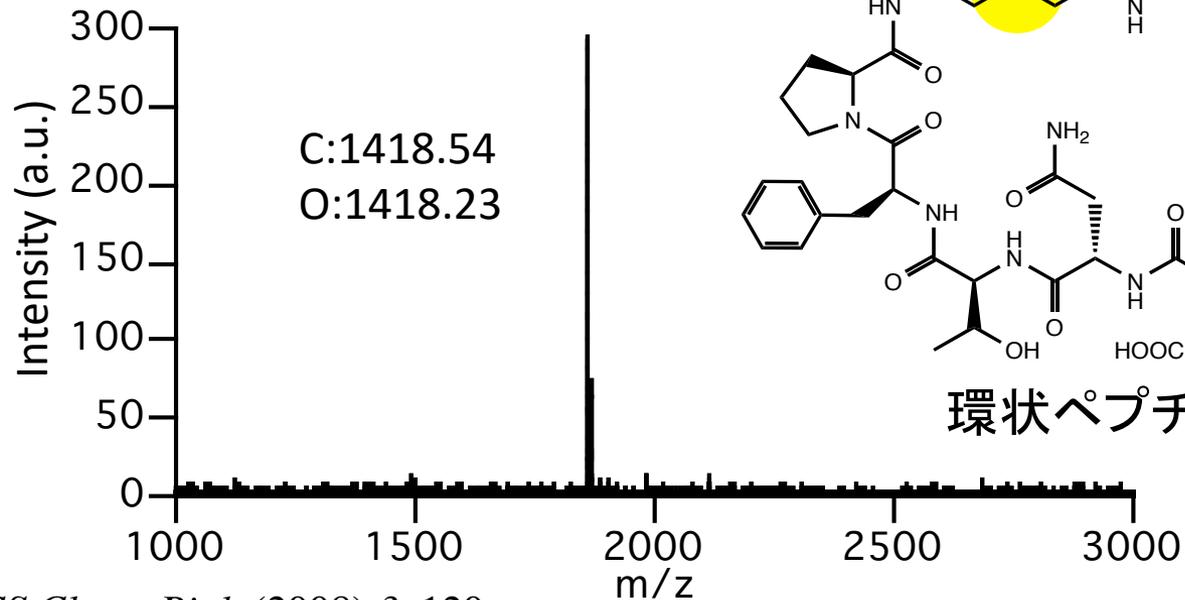
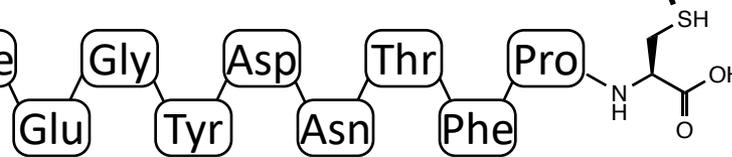
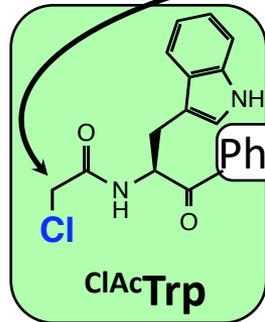


	U	C	A	G	
U	Phe Leu	Ser	Tyr Stop	Cys Stop Trp	U C A G
C	Leu	Pro	His Gln	Arg	U C A G
A	Ile ClAcTrp	Thr	Asn Lys	Ser Arg	U C A G
G	Val	Ala	Asp Glu	Gly	U C A G

Goto *et al.* ACS Chem. Biol. (2008) 3, 120

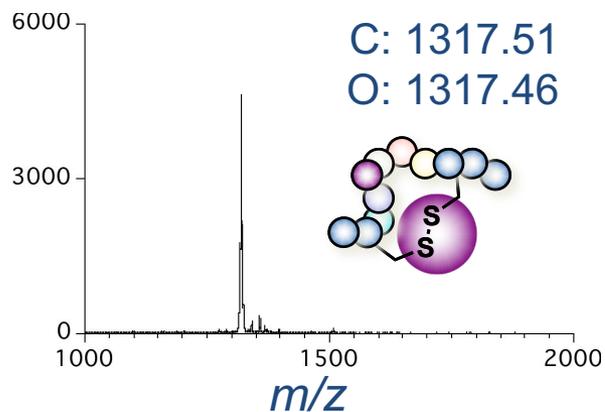
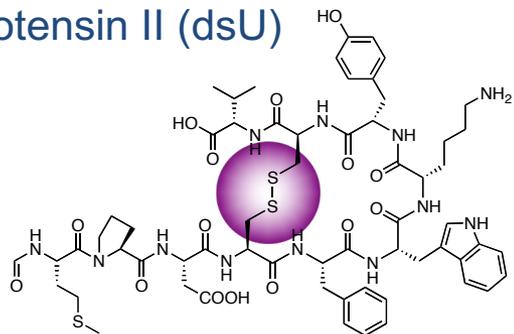
環状ペプチドの翻訳合成

mRNA AUG UUU GAA GGU UAU GAC AAU ACC UUU CCG UGC UAA
特殊ペプチド ClAcTrp Phe Glu Gly Tyr Asp Asn Thr Phe Pro Cys STOP

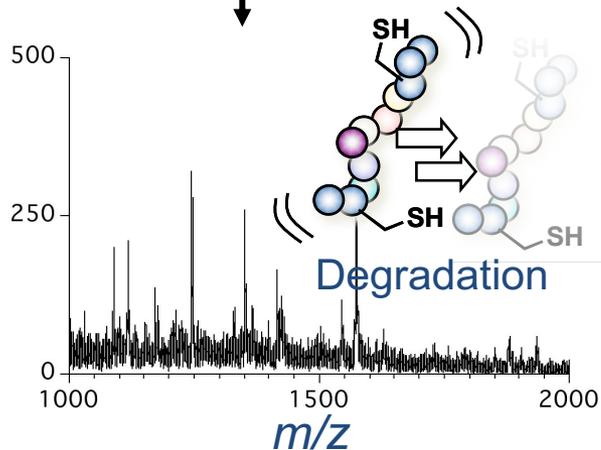


環状ペプチド(ウロテンシンII 誘導体)の安定性

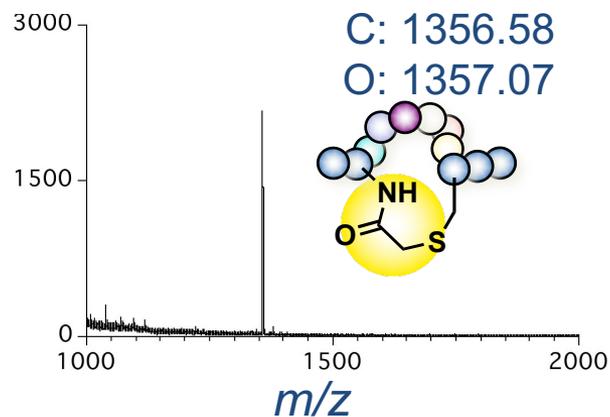
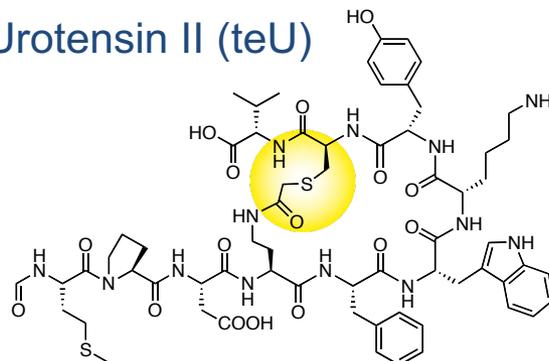
Urotensin II (dsU)



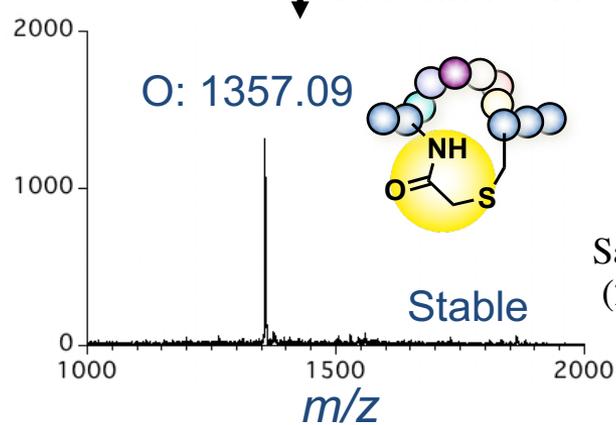
DTT
Proteinase K



Urotensin II (teU)



DTT
Proteinase K



Sako *et al.* *ACS Chem. Biol.*
(2008) 3, 241

ペプチドライブラリーの合成

mRNA (単一のものの場合)

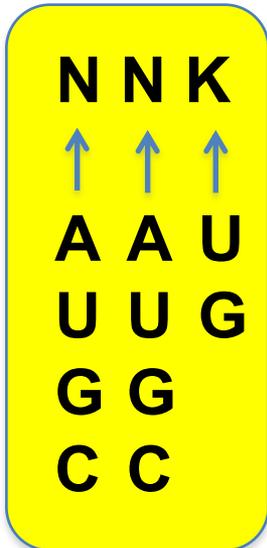
5'-UTR-AUG-CGU-CCU-GCU-AAU-GCU-UGC-3'UTR
 ClAcPhe His Pro Ala Asn Ala Cys



mRNAライブラリー (合成DNAから混合物として調製)

5'-UTR-AUG-NNK-NNK-NNK-NNK-NNK-UGC-3'UTR
 ClAcPhe Xxx Xxx Xxx Xxx Xxx Cys

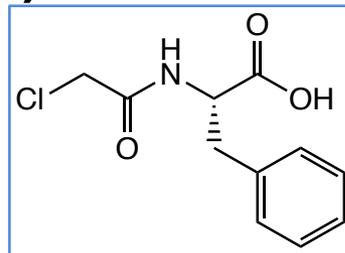
(ペプチドは混合物として翻訳合成)



ペプチドの理論的な多様性

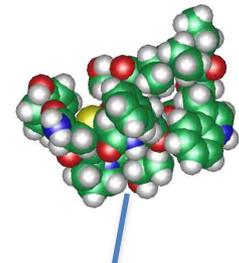
5残基 $(20)^5 = 3 \times 10^6$

12残基 $(20)^{12} = 4 \times 10^{15}$



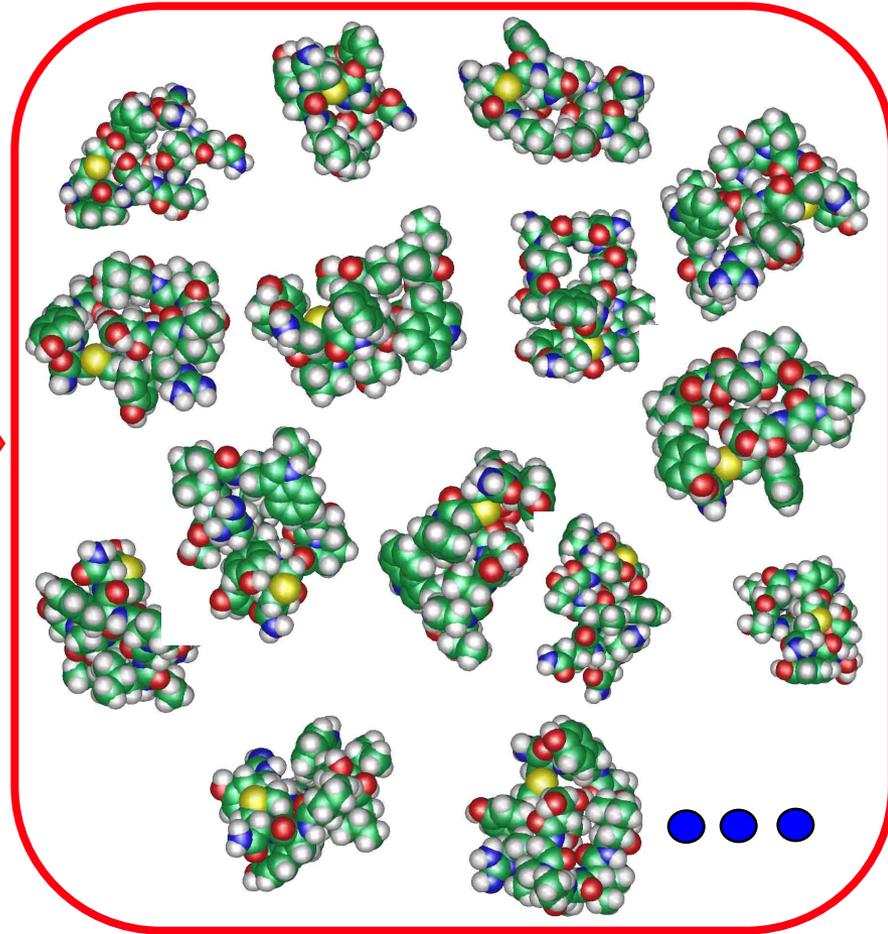
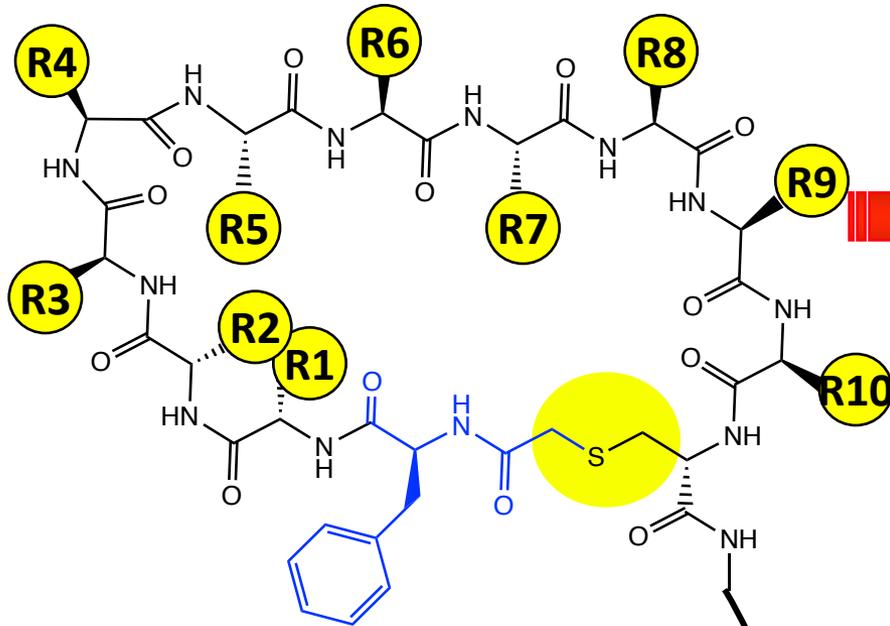
	2nd				3rd
1st	U	C	A	G	
U	Phe Leu	Ser	Tyr Stop	Cys Stop Trp	U C A G
C	Leu	Pro	His Gln	Arg	U C A G
A	Ile ClAcPhe	Thr	Asn Lys	Ser Arg	U C A G
G	Val	Ala	Asp Glu	Gly	U C A G

ペプチド



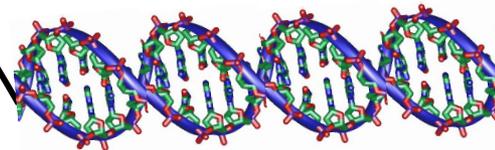
遺伝子

環状ペプチドライブラリー



多様性 $\sim 10^{13}$

(翻訳は2 μM のmRNAで
100 μL で行う。ペプチドを
もつmRNAは10%程度。)

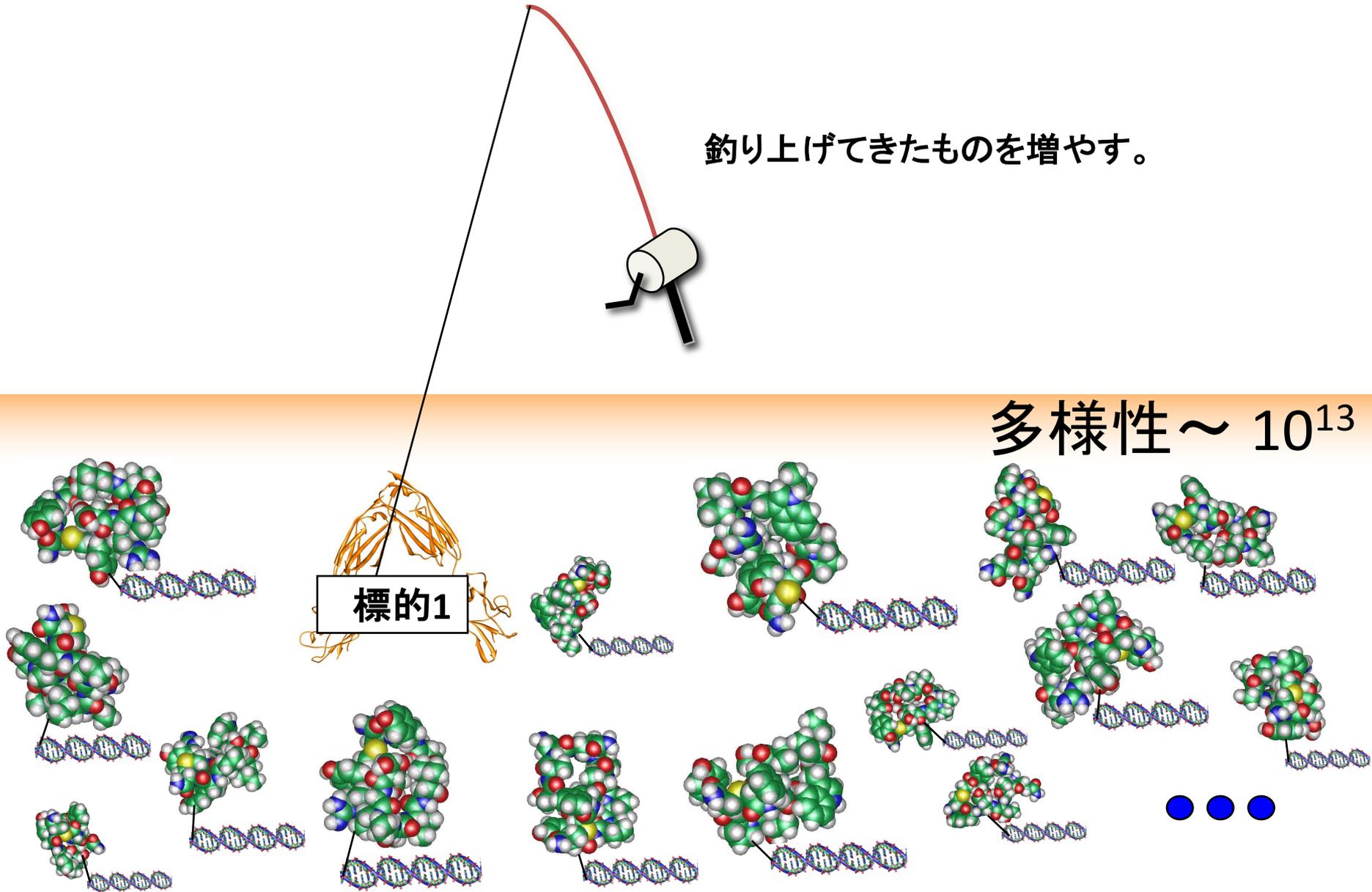


DNA/RNA

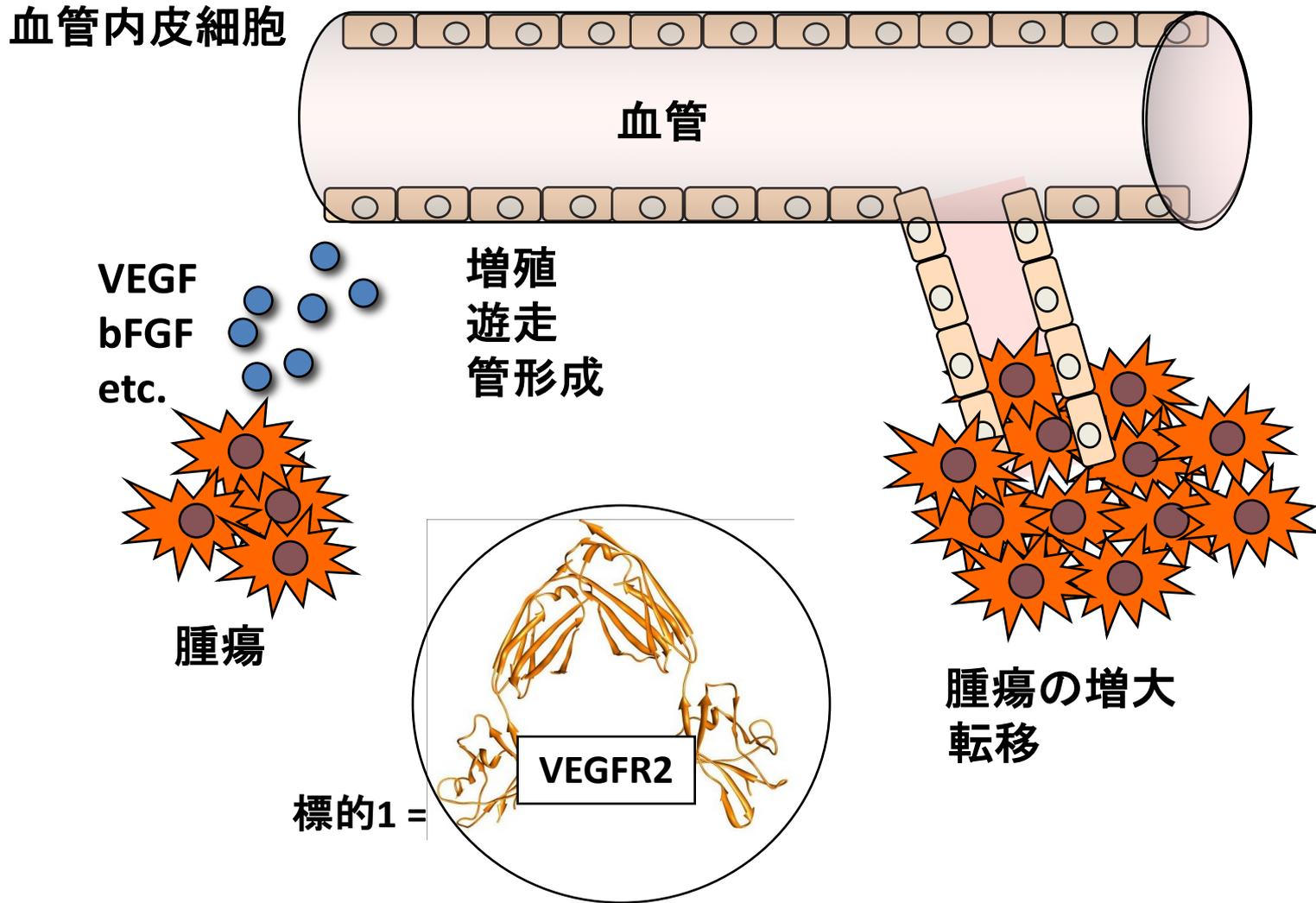
*遺伝子とペプチドをつなげる手法は省略

薬剤標的に結合する環状ペプチドの選択

釣り上げてきたものを増やす。

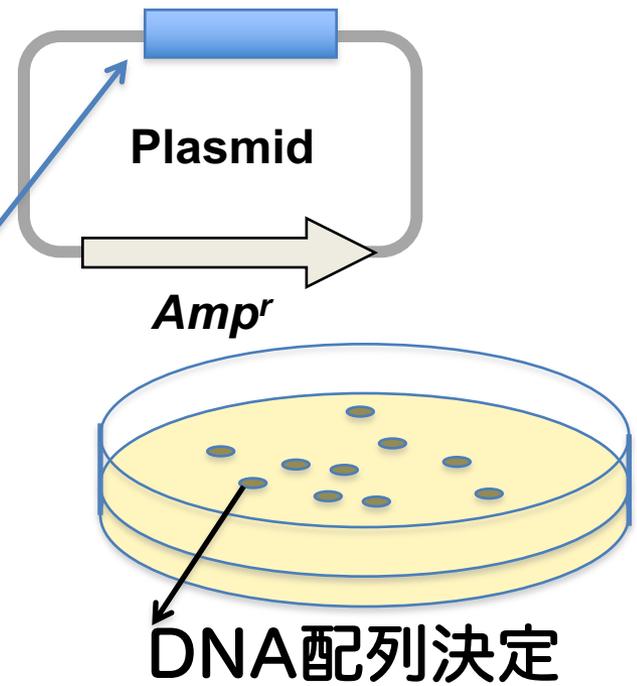
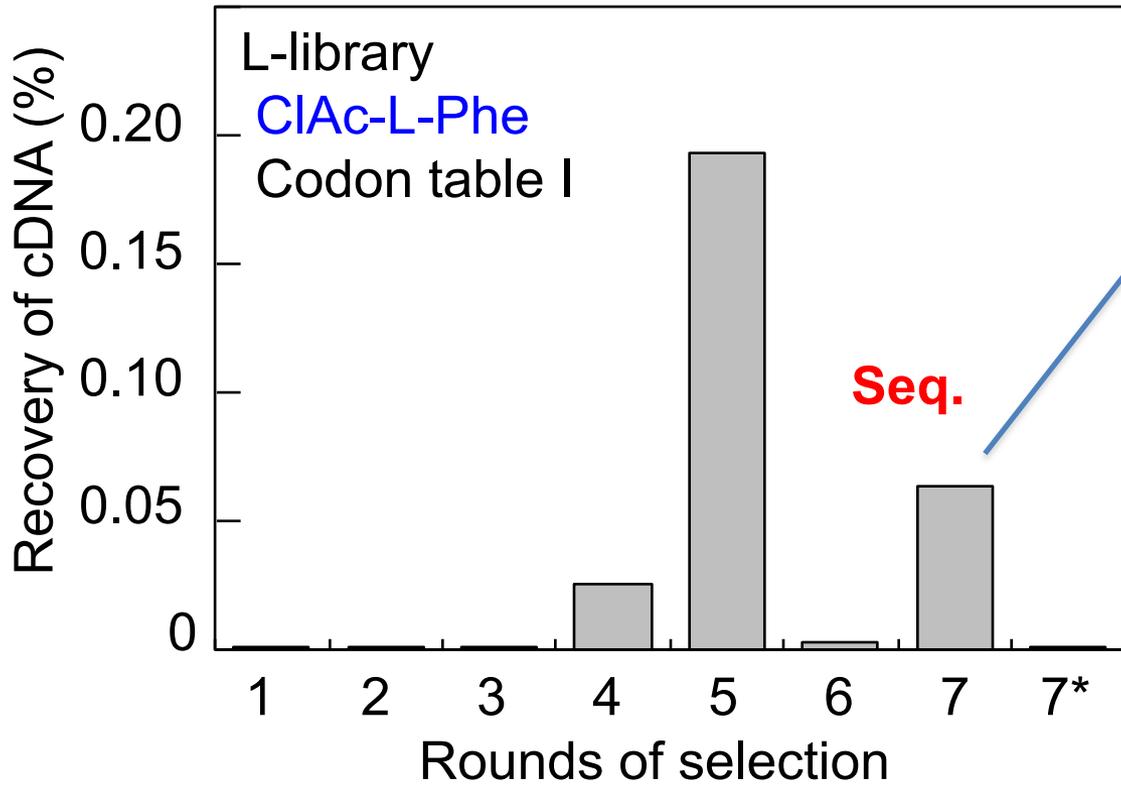
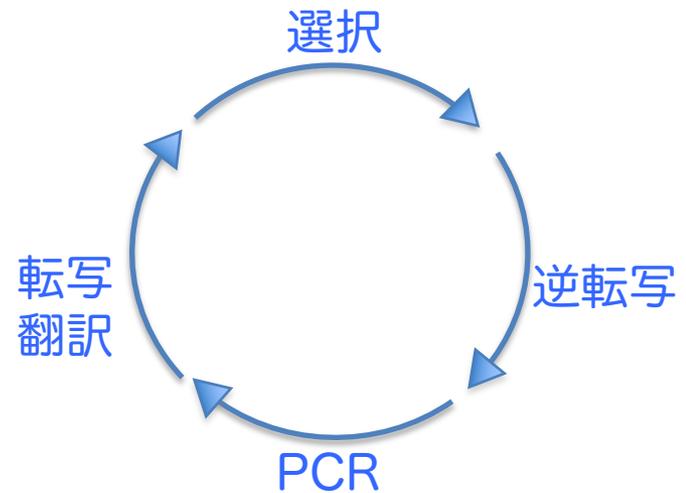
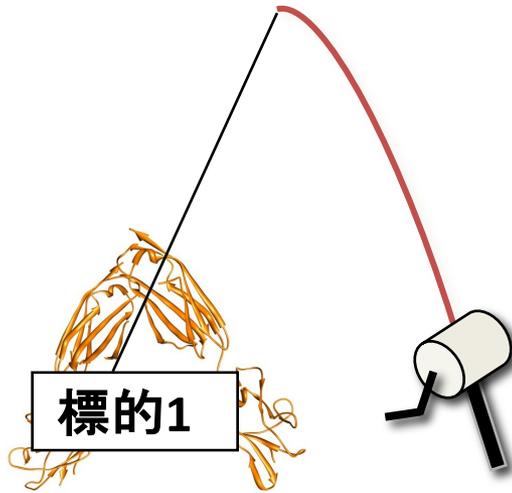


腫瘍の増大・癌の転移に際しての血管新生の役割



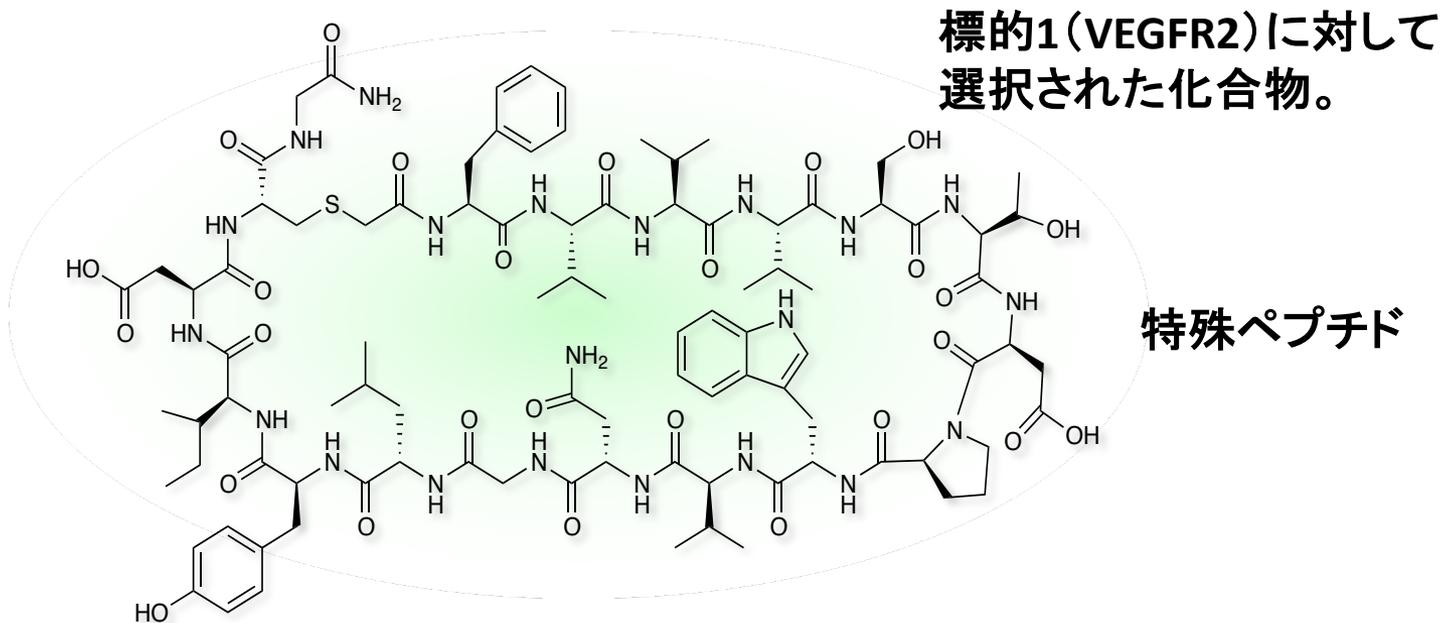
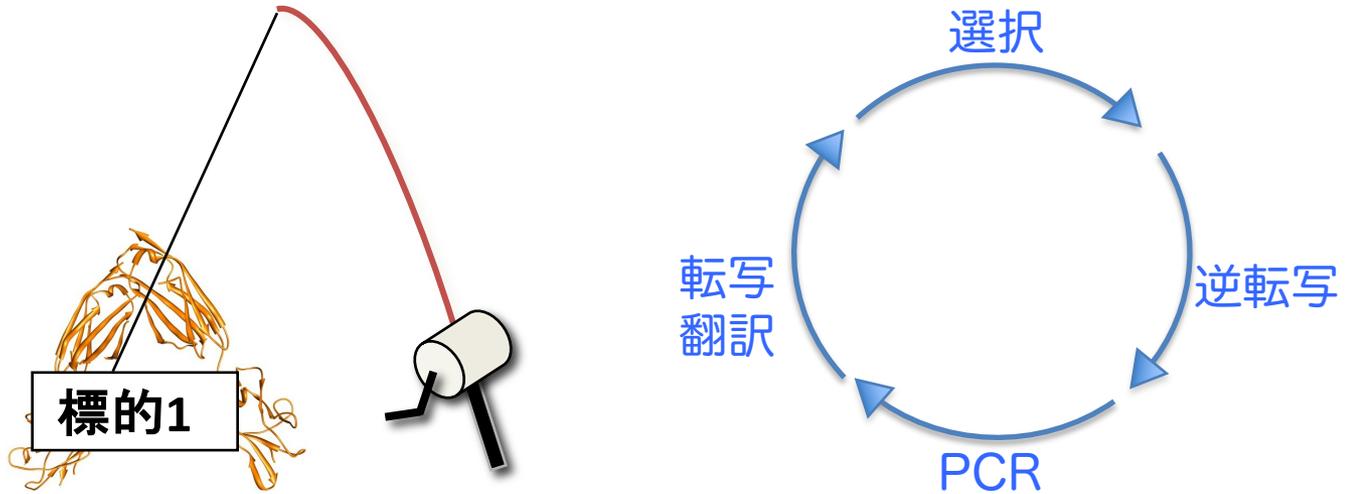
VEGFR2: 血管内皮細胞増殖因子受容体2

VEGFR2に結合する環状ペプチド進化の推移



*はターゲット無しビーズ

VEGFR2に結合する環状ペプチド



試験管内血管新生の阻害

クラボウ 血管新生キット

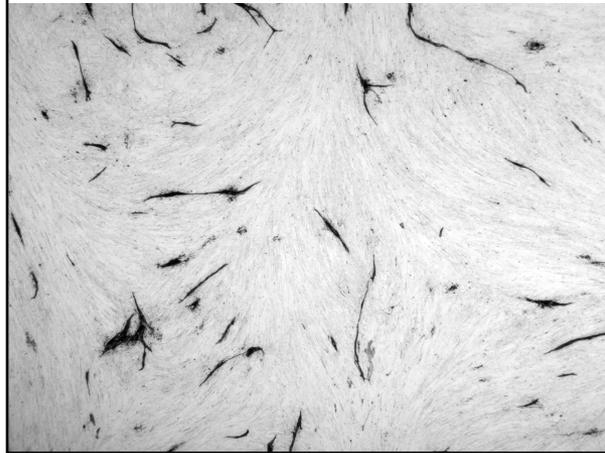
ヒト臍帯静脈内皮細胞と線維芽細胞を同時に11日間培養した。このとき、培養液には、10 ng/ μ Lの血管内皮細胞増殖因子を加えた。培養後に細胞を固定化し、抗CD31抗体で免疫染色した。

特願2012-193453

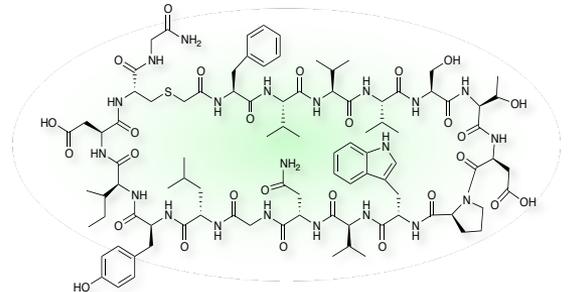
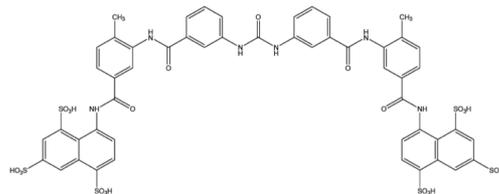
コントロール実験



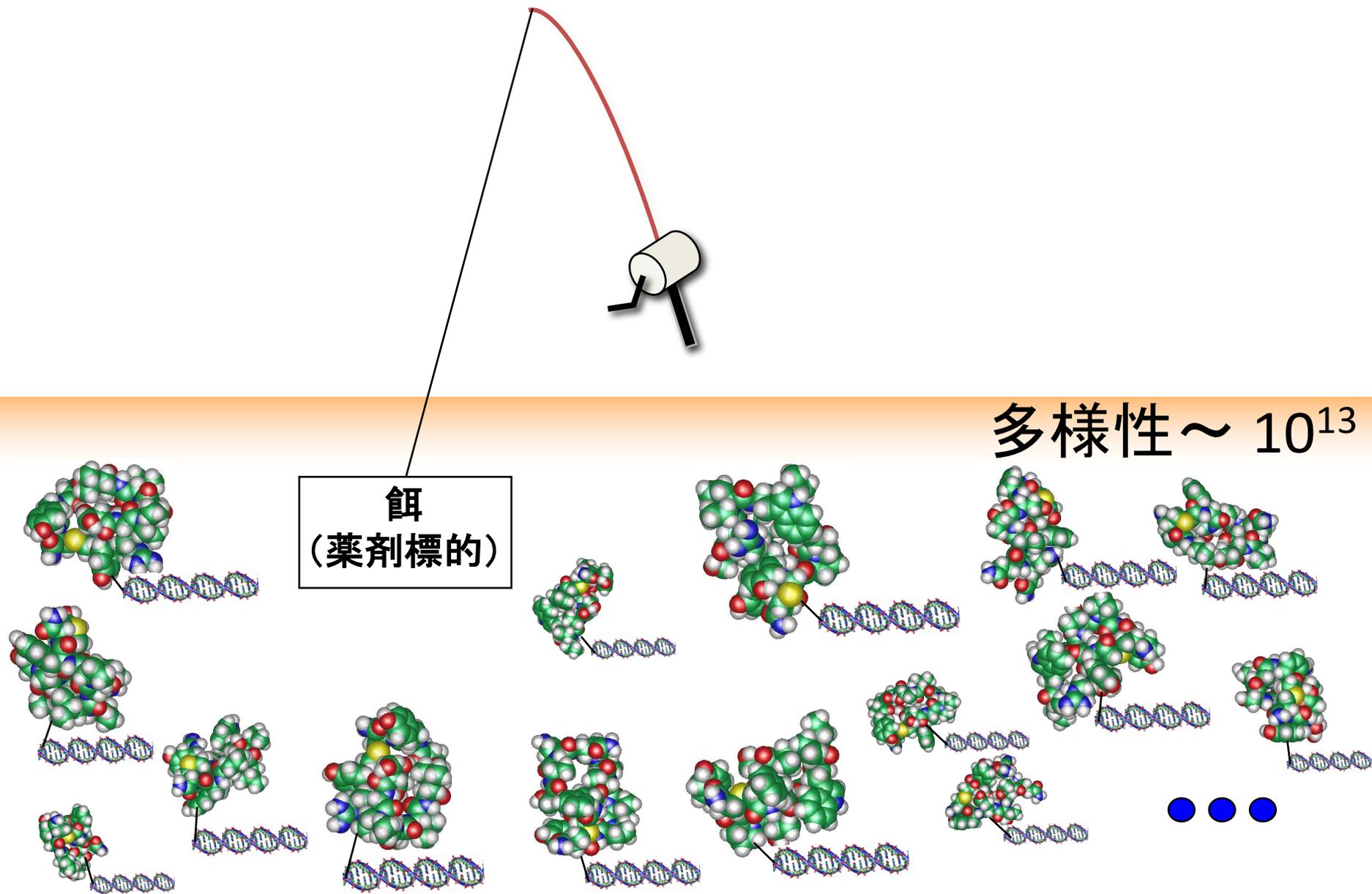
50 μ M スラミン



10 μ M 特殊ペプチド

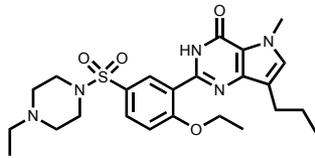


様々な標的に結合する特殊ペプチドの選択



薬剤候補

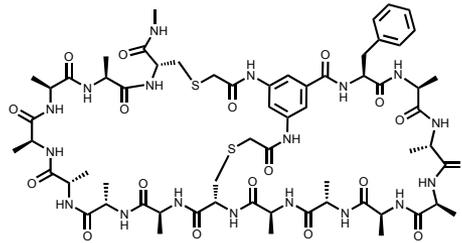
低分子化合物



分子量

50-1,000

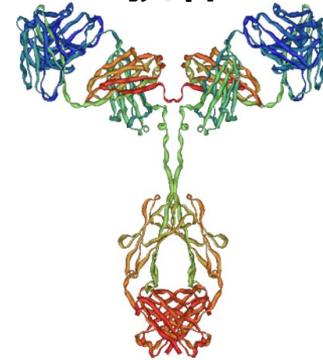
特殊環状ペプチド



(4-20 aa)

500-2,500

抗体



50,000-150,000

人工遺伝暗号に関する他の研究

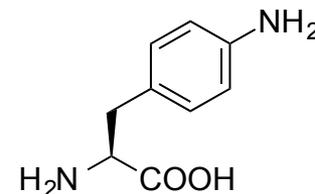
21種類の蛋白質性アミノ酸を持つ大腸菌の創製

J. AM. CHEM. SOC. 2003, 125, 935–939

Generation of a Bacterium with a 21 Amino Acid Genetic Code

Ryan A. Mehl, J. Christopher Anderson, Stephen W. Santoro, Lei Wang, Andrew B. Martin, David S. King,[†] David M. Horn,[‡] and Peter G. Schultz^{*,†}

Contribution from the Department of Chemistry, The Scripps Research Institute, 10550 North Torrey Pines Road, La Jolla, California 92037



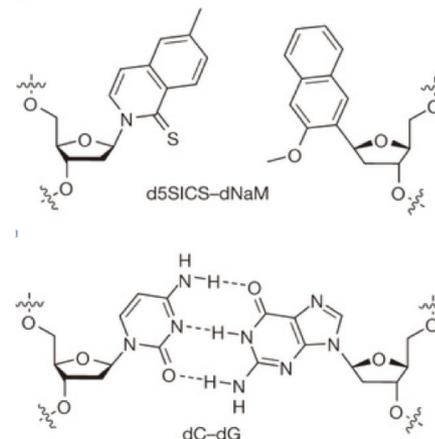
人工塩基

LETTER

doi:10.1038/nature13314

A semi-synthetic organism with an expanded genetic alphabet

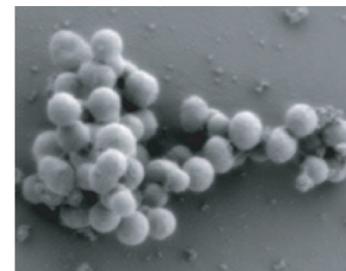
Denis A. Malyshev¹, Kirandeep Dhami¹, Thomas Lavergne¹, Tingjian Chen¹, Nan Dai², Jeremy M. Foster², Ivan R. Corrêa Jr² & Floyd E. Romesberg¹



ゲノムの全化学合成

Creation of a Bacterial Cell Controlled by a Chemically Synthesized Genome

Daniel G. Gibson *et al.*
Science **329**, 52 (2010);
DOI: 10.1126/science.1190719



学籍番号

名前

(1) 以下のRNAをタンパク質に翻訳せよ。アミノ酸は一文字表記とする。

GAAGCCUCAUAC

CAUGCGCCACCCUAU

GGACGUGAAGCUACA

UUUAUCA AUGAA

(2) 人工遺伝暗号を作る仕組みについて説明せよ。

使用する単語：遺伝暗号、tRNA、コドン、翻訳、アミノ酸