慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	基礎的物理学は生物学を消去するか： 分子生物学的説明についての考察から
Sub Title	Does fundamental physics eliminate biology from the field of basic science? : from consideration of explanation in molecular biology
Author	石田, 知子(Ishida, Tomoko)
Publisher	三田哲學會
Publication year	2013
Jtitle	哲學 No.131 (2013. 3) ,p.27- 40
JaLC DOI	
Abstract	Can all biological phenomena be explained only by fundamentalphysics? If this reductive project succeeds, biology can be eliminatedfrom the field of basic science. One standard way to accomplish thisproject consists of two stages: first, physico-chemistry explains all biologicalphenomena (1st-stage), then fundamental physics, especiallyquantum physics, explains physico-chemical phenomena (2nd-stage).In this model of reduction, molecular biology seems to play an essentialrole in the first stage. Is this model of reduction plausible? If molecularbiology needs non-physical setups for explanation, the answeris"no". Then, reduction fails, so biology is autonomous. In this paperI explore whether there are such setups in molecular biology. I'll arguethat there are such setups. In molecular biological explanation,such non-physical setups, knowledge concerning higher system (higher than molecular mechanism, like heart) and evolution, isneeded. At present, thus, there seems to be no realistic way to eliminatebiology.
Notes	投稿論文
Genre	Journal Article
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN00150430-00000131-0027

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

投稿論文

基礎的物理学は生物学を消去するか

——分子生物学的説明についての考察から——

石　田　知　子*

Does Fundamental Physics Eliminate Biology from the Field of Basic Science? From consideration of explanation in molecular biology

Tomoko Ishida

Abstract

Can all biological phenomena be explained only by fundamental physics? If this reductive project succeeds, biology can be eliminated from the field of basic science. One standard way to accomplish this project consists of two stages: first, physico-chemistry explains all biological phenomena (1st-stage), then fundamental physics, especially quantum physics, explains physico-chemical phenomena (2nd-stage). In this model of reduction, molecular biology seems to play an essential role in the first stage. Is this model of reduction plausible? If molecular biology needs non-physical setups for explanation, the answer is "no". Then, reduction fails, so biology is autonomous. In this paper I explore whether there are such setups in molecular biology. I'll argue that there are such setups. In molecular biological explanation, such non-physical setups, knowledge concerning higher system (higher than molecular mechanism, like heart) and evolution, is needed. At present, thus, there seems to be no realistic way to eliminate biology.

* 慶應義塾大学科目担当員　E-mail: ishida.tmk@gmail.com

1. はじめに

「基礎的物理学によって世界のあらゆる現象を説明する」という夢は，少なくない数の科学者や哲学者に共有されている．この壮大な還元プロジェクトが本当に達成された暁には，現象の説明や予測には基礎的物理学さえあれば原理的には十分だということになる．このとき，科学の他の分野—生物学や化学，地球科学，社会科学など—はみな，基礎的物理学によって消去可能なものとなるだろう．だが，このようなことは将来，本当に起こりうるのだろうか？ この問いに直接答えることは難しい．この世界で起きる現象は非常に多岐にわたっており，それらを扱う学問分野も様々であるからだ．よって，本論では話題を限定し，生命現象（または生物学）と基礎的物理学—とりわけ量子力学—の関係を扱う．すなわち，全ての生命現象が基礎的物理学によって還元的に説明される見込みはあるのか，という問題を考えていく．もしこれが本当に可能であるならば，生物学は原理的には不要で，消去可能なものとなる．

他方，生物学者や生物学の哲学者を中心に，生物学は自律的な学問であると主張する論者もいる．彼らによれば，生命現象を扱うべく発展してきた生物学には独自性があり，生命現象を記述・説明する際には生物学が欠かせない[1]．よって，生物学は基礎的物理学によって消去されてしまうことはない．

それでは，どちらの言い分がより妥当であるのだろうか？　本論では，「すべての生命現象を基礎的物理学のみによって説明する」という還元プロジェクトの可否を検討することを通じて，この問いに答えたい．その際に鍵となるのは分子生物学である．分子生物学は，物理学や化学と生物学

[1] このことは，生命現象を統べる独自の法則がある，ということを必ずしも意味しない．たとえこの世界の全ての対象が基礎的物理法則のみに従っていたとしても，生命現象を説明・記述するためには生物学に独自の方法が必要とされる，という意味として，「自律性」という語をここでは理解したい．

をつなぐ役割を果たしているからだ．次節では，本論で想定されている還元の種類や特徴について論じる．3節では，生物学の自律性と進化論について簡単に論じる．4節では，分子生物学的説明の分析を通じて，生物学は自律的であることを示す．

2. 「還元」の意味

「還元」という語は，現在，様々な意味で使用されている．この節では，「すべての生命現象を基礎的物理学のみによって説明する」という還元プロジェクトにおける「還元」が，どのような種類のもので，どのような特徴を持つのかを簡単に確認したい．

第一に，本論で扱うのは認識的な問題である．なぜなら，この還元プロジェクトの可否を問うことは「我々は生命現象をいかに説明しているのか」，「生命現象はいかなる方法によって説明可能であるのか」などといった問題と密接な関係があるからだ．

Brigandt and Love（2012）によれば，生物学における認識的な還元は，理論的還元（theory reduction）と説明的還元（explanatory reduction）に大別される．理論的還元は，Nagel（1961）らによって定式化されたものであり，理論間の論理的関係に焦点があてられている．簡単に言うと，より基礎的な理論から他の理論が論理的に導出されるとき，前者の理論は後者を還元したといわれる．一方の説明的還元では，理論間の論理的関係は重要視されていない．それは，ある学問分野によって説明されている現象やメカニズム，理論の一部などを還元的に説明しようとする試みの総称である．本論が問題としているのは，基礎的物理学による生命現象の還元的説明の可否であり，理論間の論理的な関係ではない．よって，問題となっているのは説明的還元である[2]．

[2] ただし「すべての生命現象が基礎的物理学によって説明できるならば，生物学は原理的には不要なものとなる」ことからもわかるように，本論での議論は理

すべての生命現象を基礎的物理学のみによって説明することで生物学を消去しようとする試みは，認識的な還元の中でもかなり強い部類に含まれる．なぜなら，このプロジェクトを完遂し，生物学を消去するためには，生命現象を基礎的物理学と適切な初期条件のみから記述（ないし導出）可能なものにする必要があるからだ．もし還元的説明が部分的なものにとどまり，説明に生物学に独自の道具立てが残るならば，生物学は消去されない．

それでは，この強力な還元プロジェクトはどのように進められるのか．重要な役割を果たすと考えられている分野の一つに，分子生物学がある．分子生物学とは，物理化学的手法を使い，様々な生命現象を分子やイオンの物理化学的性質によって要素還元的に説明しようとする学問分野である．分子生物学は，このプロジェクトに欠かせない役割を果たしているようにみえる．まずはすべての生命現象が物理化学によって原理的に説明可能なものとなり，次にすべての物理化学的現象が基礎的物理学―この場合，量子力学―から説明できるようになれば，すべての生命現象は原理的に基礎的物理学のみから説明可能なものとなるだろうからだ．二段階からなるこのような還元は，標準的な還元モデルの一つである．このモデルを踏まえると，分子生物学は，生命現象を基礎的物理学のみによって還元的に説明しようとする壮大なプロジェクトの第一段階にあたることになる．ここでは，そのような還元プロジェクトを「標準的還元プロジェクト」と呼ぶことにしよう．

分子生物学は現在までに，説明的な還元を少なくとも部分的には達成してきた．分子生物学が様々な生命現象の下にある分子メカニズムを同定・記述してきたということに異論を唱える者はまずいないだろう．それで

論間の関係と無関係なわけではない．ただし，すべての生命現象が基礎的物理学によって説明可能なものになることと，生物学の理論が基礎的物理学の理論に還元されることは同じではない．

は，分子生物学がこのまま発展し，生物学的な分子メカニズムがすべて明らかにされたとき，生物学は原理的には不要なものとなるのだろうか？すなわち，分子生物学は生物学を消去し，生命現象の説明は物理学の各分野や化学だけでこと足りるようになるのだろうか？

3.　生物学の自律性と進化論

生物学が自律的な学問だという主張の根拠は，これまでに幾つも挙げられてきた．それらの多くは，①生物学の研究対象である有機体の複雑さ，ないし，②生物学が進化論という独自の理論を持つこと，のどちらか（あるいは両方）に関連している（Mayr 2004 など）．この節では，進化論と生物学の自律性について簡単に論じる（有機体の複雑さについては次節で扱う）．進化論が生物学に独自の理論であると考えられる理由は様々である．たとえば，進化論には自然選択や遺伝などの物理学に還元できない概念装置があることや，進化生物学が物理学とは違って歴史科学であるということなどが進化論の独自性の根拠として挙げられている（*ibid.*）．

ここで，生物学の様々な場面において進化が問題にされている，ということに注意しよう．例えば，動物行動学の祖であるニコ・ティンバーゲンは，生物の行動を理解するためには，その行動を引き起こすメカニズムなどに加えて，その行動が進化した理由について知ることが必要だ，と主張している[3]（Tinbergen 1963）．さらに，進化生物学者であるテオドシウス・ドブジャンスキーは「進化という観点をとらないなら，生物学におけるいかなるものも意味をなさない．（Nothing in biology makes sense except in the light of evolution.）」と述べてさえいる（Dobzhansky

[3] ティンバーゲンは，動物の行動を理解するためには以下の四つのことを明らかにする必要があると考えた．それらは，至近要因（その行動を生じさせるメカニズム），究極要因（その行動の機能，すなわち進化によってそれが形成された理由），発達要因（その行動が生物個体の一生の間にいかに発達するか），系統進化要因（その行動が祖先型からいかに進化してきたか）である．

1973)．ドブジャンスキーの金言は，生物学のあらゆる分野に進化論の影が差しているということを示唆している．このとき，進化論が自律的な学問分野であるならば，生物学全体がそうであることになるだろう．進化論という自律的な道具立てが生物学のあらゆる分野において必要とされているならば，生物学独自の道具立てを持たない分野は存在しないことになるからだ．

それでは，本当にこの金言は正しいのだろうか？　本当に生物学の全ての分野で，進化という観点が必要とされているのだろうか？　分子生物学は，この金言に対する反例であるように見える．前述の通り，分子生物学は，生命現象を分子やイオンの物理化学的性質によって説明する．そして，少なくとも日々の研究活動は，進化のことなど考慮しなくても続けられるように見える．もし本当に進化という観点が分子生物学に必要ないならば，分子生物学の先には進化論を含む生物学を基礎的物理学によって消去する道が開かれているように見える．分子生物学がすべての生命現象を還元的に説明するならば，進化（もちろん，生命現象の一種である）も物理化学のみによって説明されるようになるだろう．このとき，生物学全体の自律性の根拠となっていた進化論の自律性は，分子生物学によって崩される．進化論は進化を説明するのに不可欠な学問分野ではなくなるからだ．反対に，分子生物学にさえ進化という観点が必要であるならば，進化論ひいては生物学全体の自律性は擁護される[4]．分子生物学が進化論を必要とするならば，進化論を分子生物学によって消去することは不可能だからだ[5]．

[4] ただし，この結論は論理的に導出されるわけではない．生物学は自律的ではないという主張の確からしさが減少し，反対に生物学が自律的だという主張がより確からしいものとなるだけである．

[5] より一般的には，分子生物学に生物学の他の分野の知識が必要とされているとき，標準的還元プロジェクトは失敗する．生命現象を物理化学によって還元的に説明し，生物学を消去する試みの要であるべき分子生物学に，消去されるはずの生物学の知識が含まれていたならば，この還元プロジェクトを完遂することはできないからだ．

4.　分子生物学はいかに生命現象を説明するか

4-1　分子生物学的説明

分子生物学はどのように生命現象を説明しているのだろうか．分子生物学は，分子レベルで働くメカニズムの同定・記述を通じて，生命現象を説明し，明らかにしようとしている．それでは，メカニズムとは何か．メカニズムとは，特定のふるまいを行う系であり，時空間上に適切に配置された複数の構成要素からなる．構成要素はそれぞれ決まった性質を持ち，特定の仕方で互いに相互作用する．メカニズムのふるまいは，これらの相互作用の結果として生じる[6]．

分子生物学によって記述されるメカニズムの構成要素には，タンパク質や核酸（DNA, RNA）などの生体高分子や各種のイオン，水や酸素などの低分子などがある．これらの構成要素はそれぞれ決まった物理化学的性質を持っており，それらの性質が構成要素のふるまいや相互作用の仕方を決定する．物理化学的性質には，分子の極性やイオンの電荷などの電気的な性質，分子の化学結合の強さなどのエネルギー的性質，分子の構造的性質などがある．これらの性質がどのように構成要素のふるまいや相互作用を決めるのかを，例を挙げて説明しよう．DNA 複製メカニズムは，DNA や DNA ヌクレオチド，DNA ポリメラーゼなどからなる，塩基配列を保存しながら二本鎖 DNA を複製するメカニズムである．複製の際，ほどけてむき出しになった二本鎖 DNA のそれぞれの塩基には，ほどける前にそれらと対応していたものと同じ種類の塩基がそれぞれ結合する．たとえば，元の二本鎖 DNA の塩基配列の一方が ATCCGTA だった場合，他方は TAGGCAT という配列を持っている．このとき，二本鎖 DNA がほどけると，一方には端からそれぞれ T, A, G, G, C, A, T という塩基を持った

[6] メカニズムの定義についての議論は，Machamer et al.（2000），Glennan（2002），Craver（2007）などを参照のこと．

ヌクレオチドが順に並び，他方には A, T, C, C, G, T, A と並ぶ．ヌクレオチドと一本鎖 DNA のこのようなふるまいは，A と T, C と G が水素結合によって互いに結びつきやすいという性質，すなわち相補性によって生じる．そして，相補性は，主に塩基の構造的な性質と極性から説明されている．

これだけ見ると，分子生物学は生命現象を徹頭徹尾，物理化学によって説明しようとする試みであるように見える．だが，本当にそうであるのだろうか？　以下では，分子生物学的な説明においては，物理化学だけでなく，生物学的な道具立ても利用されていることを示したい．ポイントとなるのは以下の二点である[7]．

(1)　分子メカニズムは上位システム内に位置づけられていなければならない
(2)　分子メカニズムのふるまいは進化という観点から理解されなければならない

4-2　生物学的システムの複層性

明らかに，有機体は適応的で，高度に制御・統制された一つのシステムである．我々の体内では，循環器系が身体を構成する各細胞に酸素や栄養分を届け，不要物を回収している．内分泌系や自律神経系は，体内環境を一定の状態に保っている．これらのシステムはそれぞれ異なった適応的な機能を持っているが，互いに関連している．たとえば，循環器系の構成要素である心臓の拍動のペースは，自律神経系や内分泌系によって調節されているし，自律神経系や内分泌系を構成する細胞は循環器系によって運ば

[7] これらはそれぞれ，前節で紹介した生物学の自律性の根拠に関連している．(1) は，有機体の複雑さに関係がある．(2) はもちろん進化論の存在に関係している．

れる酸素や栄養分が絶たれれば，遅かれ早かれ死滅してしまう．

我々は有機体という複雑なシステムを，互いに関連したサブシステムに区切り，さらにそれらを可能な限り下位のシステムに分割して理解している．たとえば，一人の人間というシステムは，前述の通り，循環器系，呼吸器系，内分泌系などのサブシステムから構成されている．これらのサブシステムは，それぞれさらに下位のシステムに分けることができる．たとえば，循環器系は心臓を中心とする血管系，リンパ系などの下位システムに分かれる．血管系の中心的な器官である心臓の主な機能は規則的に拍動し，血液を全身に送り出すことである．心臓を拍動させるのに中心的な役割を果たすのは刺激伝導系である．刺激伝導系は特殊心筋と呼ばれる心筋細胞からなり，洞房結節，房室結節，ヒス束などからなる．中でも，洞房結節を構成する心筋細胞は外からの刺激によらずに周期的に興奮しており，心臓拍動のペースを作り出していると言われている．洞房結節の興奮はまず刺激伝導系を伝わり，その興奮がさらに心室に伝わることで心臓は規則的に拍動している．心筋細胞にはカルシウムやカリウムなどの陽イオンを選択的に透過させるイオンチャネルや，ATP を消費しながら各種のイオンを能動輸送するポンプなどがある．洞房結節の周期的興奮を生みだすメカニズムは，これらのタンパク質や各種の陽イオンなどからなっている．このように，人間という一つのシステムを下位のシステムに分解していくと，以下のようになる：

人間→循環器系→心臓→刺激伝導系→洞房結節→チャネルなどからなる分子メカニズム[8]

分子生物学が同定・記述する分子メカニズムは，ほとんどの場合，このよ

[8] もちろん，これは複層的なシステムをかなり単純化したものである．

うな複層的システムの最も下位にある[9].

有機体が複層的なシステムであるということは，分子生物学的説明の被説明項は上位システムのふるまいであることを示唆している．たとえば，洞房結節は周期的に興奮するが，このふるまいを説明するのはイオンチャネルやポンプなどからなる分子メカニズムである．実際，ほとんどの分子メカニズムは，上位システムのふるまいをミクロレベルで説明するために同定されている．このような仕方で，分子生物学的な説明は，複層的なシステムの中に位置づけられている．

ここで，有機体という複層的なシステムに関して，注意すべき点を二つ指摘しておこう．第一に，システムの構成要素とは，システムの任意の部分（任意の方法でシステムを分解したときに生じる部分）ではなく，システムの特定のふるまいに貢献する機能的な単位である．たとえば，刺激伝導系は心臓の構成要素であるが，心臓の右心室の壁の任意の領域―星型やハート型など，好きな形を右心室上に描いてやればよい―はそうではない．刺激伝導系とは違って，右心室の任意の領域は機能的なひとかたまりではないからだ．ここから，生物学的なシステムは決まった仕方でしか分解されない，ということがわかる．

第二に，生物学的なシステムの場合，各層のサブシステムはみな適応的であるということにも注意が必要である．たとえば，心臓は適応的なシステムである．心臓は規則的に拍動することで血液を循環させて物質交換の効率を良くし，有機体の生存や繁殖を有利にするからだ．心臓の構成要素である刺激伝導系や洞房結節も適応的である．なぜなら，それらの働きは心臓を正常に機能させるために欠かせないからだ．心臓の構成要素は，心臓の適応的なふるまいを通じて，有機体の適応度を上げることに貢献している．

[9] 本論では，「メカニズム」と「システム」はほぼ同義である．メカニズムの複層性については，Machamer et al.（2000），Craver（2007）などを参照のこと．

4-3　生物学的システムと進化

適応的な上位システムを構成要素に分解することは，適応的な分子メカニズムを発見する一番の早道であり，ほとんどの分子メカニズムは実際にこのような仕方で発見されている．だが，これは発見法についての事実にすぎない．分子メカニズムが適応的な上位システムの構成要素であることは，分子メカニズムの同定に上位システムについての知識が不可欠であることを意味しない．上位システムについての知識なしに分子メカニズムを同定することは，おそらく可能である．たとえば，心臓や刺激伝導系の正しい機能を知らずとも，洞房結節を詳しく調べれば，それが周期的に興奮していることがいつかは観察されるはずだ．そして，適切な実験を考案し，実行することができれば，遅かれ早かれそれを可能にする分子メカニズムも同定されるだろう．

我々は，洞房結節の周期的興奮というふるまいが，有機体という複層的な系のなかにどう位置づけられるかを知っている．洞房結節は，循環器系の構成要素である心臓というシステムの拍動のリズムを作り出している．だが，以下のような仮定が正しかったとしよう．まず，刺激伝導系は存在せず，心臓を規則的に拍動させるメカニズムは全く異なるものであるとする．そして，洞房結節細胞の周期的な興奮は，生物時計の副産物であり，周期的な興奮そのものに有機体の適応度を上げる効果はないとする．このとき，洞房結節を周期的に興奮させる分子メカニズムは，適応的であるとは言えないだろう．さらに，このメカニズムは適応的な上位システムの一部ではあるが，構成要素ではない．このとき，洞房結節の周期的興奮の分子メカニズムを同定・記述することに学問的な意義はあまりないように見える．なぜだろうか．この仮想的な世界では，この分子メカニズムについての知識は他の生物学的な知識と意味のある仕方でつながっていないからだ．この世界では，洞房結節の周期的興奮メカニズムを適応的な上位システム内にうまく位置づけることはできない．よって，このメカニズムにつ

いての知識は，生物学的な他の知識から孤立してしまう．そのため，あまり重要であるとは言えないのである．分子生物学的な説明は，進化という観点から評価を受け，上位システム内に組み込まれてはじめて，有意義なものとなるのだ[10]．

これまでに述べてきたことを簡単にまとめてみよう．まず，分子生物学の扱う分子メカニズムは，上位システムの任意の部分ではなく，構成要素でなければならない．この判定に必要なのは，進化という観点である．よって，分子生物学には上位システムや進化についての知識が必要とされる．上位システムについての知識は，解剖学や生理学などの伝統的な生物学が与えてくれる．生命現象の分子生物学的な説明には，進化論や伝統的生物学の知識が織り込まれているのだ．

4-4　還元の種類

分子生物学的な説明には物理化学だけでなく，生物学的な知識も必要とされていた．このことは，分子生物学は標準的還元プロジェクトに貢献しない，ということを意味している．だが，それでも分子生物学が還元主義的なリサーチプログラムであることに変わりはない．それでは，これらの二つの還元の違いは何であろうか？

重要な違いの一つに，還元が行われる方向がある．前述のとおり，標準的還元プロジェクトは，より基礎的な理論のみから生命現象を説明しようとしている．これは，ボトムアップ式の還元である．基礎的理論と初期条件というより基礎的な説明の道具立てから被説明項である現象を導出しようとしているからだ．このとき，還元された分野の概念装置や説明の道具立ては，基礎的理論による説明に少しも残らない．他方，分子生物学で行

[10] もちろん，この仮想的な世界でも洞房結節の周期的興奮を分子生物学的に説明することに全く意味がないわけではない．ただし，その説明は適応的な分子メカニズムが示された上で，その一部の働きの副産物として言及される程度の扱いにすぎないだろう．

われているメカニズム的還元では，ミクロレベルのメカニズムはマクロレベルにある上位システム内に位置付けられる．また，上位システムや進化についての知識は，還元的説明の前提の一部となっている．ここでは，還元的な説明に，還元される分野―生物学，すなわち進化論や伝統的生物学―の概念装置や知識が残ることが許されている[11]．このような還元は，マクロレベルの事項を，よりミクロな現象を扱う理論（強い還元論者にとっては，より基礎的な理論）と対応付ける，トップダウン式の還元であると言えるだろう．

5.　結論

分子生物学は物理化学的手法を使った，要素還元的なリサーチプログラムである．だが，そこで行われている還元は，メカニズム的還元であり，標準的還元プロジェクトとは一線を画している．よって仮に，すべての生命現象の背後にある，すべての分子メカニズムが分子生物学によって同定されたとしても，生物学が消去されることない．なぜなら，分子生物学的な説明には，進化論や生理学・解剖学などの伝統的生物学の知識が前提とされているからだ．複雑な世界の中から生命現象を切り出し，説明するためには，基礎的物理学とは全く異なった，生物学という自律的な学問が必要なのである．

参考文献

Brigandit, I and A. Love (2012) “Reductionism in biology” The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Summer 2012 Edition) URL＝〈http://plato.stanford.edu/archives/sum2012/entries/reduction-biology/〉

Craver, C. F. (2007) *Explaining the brain*. Oxford Univ. Press.

Dobzhansky, T. (1973) “Nothing in biology makes sense except in the light of

[11] ただし，この前提知識は必ずしも説明項に直接現れない．むしろ，暗黙のうちに前提とされていることがほとんどだろう．

evolution" American Biology Teacher: 125–129.

Glennan, S. (2002) "Rethinking mechanistic explanation" *Philosophy of Science* 69: S342–S353.

Machamer, P., L. Darden, C. Craver (2000) "Thinking about mechanisms" *Philosophy of Science* 67: 1–25.

Mayr, E. (2004) *What makes biology unique?: Considerations on the autonomy of a scientific discipline*. Cambridge Univ. Press.

Nagel, E. (1961) *The structure of science: problems in the logic of scientific explanation*. World.

Tinbergen, N. (1963) "On aims and method of Ethology" *Zeitschrift für Tierpsychologie* 20: 410–433.