若手企画パネル討論

SF のロボットを科学する

Future Robots in Frontier Research and Science Fictions

吉 田 和 哉*¹ 阪 口 健*² 梶 田 秀 司*³Kazuya Yoshida*¹ Ken Sakaguchi*² Syuji Kajita*³横小路 泰 義*⁴ 國 吉 康 夫*⁵ 横 田 和 隆*⁶Yasuyoshi Yokokoji*⁴ Yasuo Kuniyoshi*⁵ and Kazutaka Yokota*⁶

1. は じ め に

「ロボット」という言葉はSFの中に誕生した。1921年チェコの劇作家カレル・チャペックの作品「R.U.R」の中においてである。「労働」という言葉が語源となっているように、ロボットとはそもそも人間に代わって労働を代行してくれる存在として定義された。英語でいうならば「レイバー」である。

ロボットは影とひなたの顔を持つ。人類を労働から解放してくれる夢の存在。労役を担う役目としての暗い奴隷のイメージ。神の創造に背き、科学技術などという知恵を弄して生物もどきを作りだしたものは、必ず天罰として破局的結末を迎えるという、フランケンシュタイン・コンプレックスともあいまって、西洋の宗教的価値観の枠組では常にロボットは影の側面をひきずっている。

一方、日本では、特にアニメにおいて、ロボットのひなたの顔が発展を遂げた。子供たちの人気のヒーローとして、あるいは夢のシンボルとして。その原点は、いうまでもなく「鉄腕アトム」である。アトムを起点としたロボットキャラクターの展開は次章に詳述しよう。

「ロボット元年」と呼ばれた年があった。1980年、昭和55年である。この頃を契機に、産業分野、特に組み立て工場の中に、ロボットマニピュレータが大量に導入され始め、「産業用ロボット」という言葉が定着した。そして、日本は「ロボット王国」と呼ばれるようになる。幸いにも「フランケンシュタイン」ではなく「鉄腕アトム」の国であった日本は、ロボットの産業界への導入に大いなる成功を収めた。アトムという夢の側面と、経済の高度成長という現実の波長が、みごとに噛み合ったのである。

「ロボット元年」より10年以上を経過した今日、しかし

ながら、その波長に乱れが生じているのではないかと、我々は気づき始めている。アトムは依然として夢ではあるけれども、この10年間、技術はいっとうにアトムには近づいていないような、そんないらだちを感じ始めている。

かつて夢の代名詞であった「21世紀」という言葉が、もはや夢ではなく、目の現実として日に日に迫ってきている中で、我々の「ロボット」はどうあるべきなのだろうか。あるいは、ロボット研究者としての我々は何をなすべきなのか、いま厳しく問われているのではないだろうか。

本稿では、Science Fictionの世界を問題の糸口として、ロボット工学の最前線的话题を議論する。SFは現実ではない。しかしながら、ある先端的な概念に対して、その功罪、夢と現実、影とひなたについて、非常に多角的に吟味されている。SFとは1つの思考実験である。我々は、そこに何かを学ぼうというのである。

なお本稿は、ロボット学会創立10周年を記念して企画・実施されたパネル討論会の要旨、及びその準備過程において繰り広げられた討論の一端を、登壇者自身の手によって書き下ろし、ひとつの論文として構成したものである。

SFに夢を求めることは、したがって、我々の目的ではない。一方、SFに登場するロボットに無理な工学的解釈をつけることも、目的ではない。「ロボット」という概念はSFの中から誕生した。いま、そのSFを問い直すことによって、これからのロボット工学の方向性を模索しようというのである。

2. ビジュアル世代のSF ロボット

「ロボット」という単語を聞いてどのような形をイメージするかは、人によって異なる。これは、人によって衝撃を受けた作品が違うからだ。特に、小説と異なり、アニメや特撮など視覚的にインパクトのある作品から入った人は、イメージ的に大きな影響を受けているだろう。本章では、アニメや特撮といったビジュアル世界で、いかに魅力的なロボットが描かれてきたのかを紹介する。

原稿受付 1994年1月24日

*¹東京工業大学工学部 (1章、7章及び全体編集)

*²機械技術研究所 (2章担当)

*³機械技術研究所 (3章担当)

*⁴京都大学工学部 (4章担当)

*⁵電子技術総合研究所 (5章担当)

*⁶宇都宮大学工学部 (6章担当)

2.1 特徴あるロボットたち

(1) 人間的スタイル・人工知能型

初期のSFロボットの多くは、大型コンピュータに手足がはえたような無骨なスタイルで描かれていた。例えばSF映画『禁断の惑星』に出てくる「ロビー」のようなロボットである。このようなロボットに対して、人間的なバランスで描かれた最初のロボットは手塚治虫の『鉄腕アトム』ではないだろうか。

アトムは、天馬博士が亡くした息子の代わりに作った愛玩ロボットであった。したがって、外見や肌触りは非常に人間に近く、人間とのコミュニケーションもこなせるだけの知能をもったロボットとして描かれている。しかも、単に人工頭脳を持った“人型ロボット”に留まらず、10万馬力の力を持ち、空を飛ぶ科学の粋を結集したスーパーロボットであった。アトムは、開発者の天馬博士の手から、お茶ノ水博士へと引き取られ、数々の活躍をする優秀なロボットとして育てられていく。“完全無欠”のロボット、それがアトムのイメージである。

この作品を契機として、俗に言う“ロボットもの”が漫画家の手によって数多く描かれていくこととなる。今日までにさまざまなロボットのイメージが生み出されてきたのは、彼らのお蔭だと言っても過言ではない。なぜなら、作家は常に新しいアイデア（オリジナリティ）を具現化することを信条としたからだ。

(2) 巨人・遠隔操縦型

横山光輝の『鉄人28号』は意志を持たない巨大ロボットであり、簡単なりモコンにより遠隔操縦される。この新アイデアには、操縦者次第で善にも悪にもなるという伏線があった。彼は、音声指示の『ジャイアントロボ』、テレパシーで動く「ポセイドン」（バビル2世）へと、徐々に自律性の強いロボットを描いているが、操縦するスタンスは貫いた。ロボットはあくまでも道具であり操縦者に従うべきだとしているのである。

(3) 人格コピー型

平井和正原作、桑田二郎画の『8(エイト)マン』は、人格をコピーしたロボットだ。もはや助からない刑事の正義感や能力を惜しむあまり、ある博士が脳死寸前の彼の記憶を人工頭脳に写し換えてしまうのである。8マンはすべて機械で作られているが、東八郎という一人の人格を持ったそれまでにない特異な存在であった。ロボットと言うよりも、むしろ超人として描かれている。

放映当時は、恋人の目の前で正体を曝してしまった8マンが失踪するところで話が終わっていたのだが、1993年この続編が制作された。そのストーリーは、機械と人間の狭間で苦しんでいた東八郎が、自我崩壊を起こした末8マンの人工頭脳から自分を抹消し、機械の身体だけを博士に返し、さらには、この東八郎の記憶が宿っていた物に、新

表1 エポックメイキングな作品群

年代	作 品	特徴(作者)
1962	鉄腕アトム	手塚治虫 人間にそっくり 自分で考える
1963	鉄人28号	横山光輝 巨大ロボ・遠隔操縦 悪行可
1964	エイトマン	平井和正 (小説が原作) 人格をコピー
1965	サイボーグ009	石ノ森章太郎 人体機能強化
1967	ジャイアントロボ	横山光輝 音声指示
1972	マジンガーZ	永井豪 搭乗操縦型 全身に武器搭載
	ジャンボグA	円谷プロ アタッチメント操縦 (人間の動きトレース)
	人造人間キカイダー	石ノ森章太郎 アンドロイド 良心回路の設定
1973	ドラえもん	藤子・F・不二雄 ホームロボット 主人の願望成就
1974	ゲッターロボ	永井豪 変形合体 手持ち武器登場
	がんばれ!! ロボコン	石ノ森章太郎 失敗を教訓とする 3気筒ガソリンエンジン
	アナライザー (宇宙戦艦ヤマトより)	松本零士 無骨な格好 人間くさい行動
1979	機動戦士ガンダム	富野良幸・大河原邦彦 モビルスーツ 核融合炉
1981	ブラレス3四郎	牛次郎・神谷みのる キーボード操作 ラジコンキット
	(リアルロボット乱立時代)	
1988	機動警察パトレイバー	ゆうきまさみ・出渕裕 兵器ではない存在 リアリズム追求

たに別の人格を上書きすることによって新8マンが誕生する、というものである。

身体というハードウェアと、知能や人格というソフトウェアは分離可能であり、それぞれ独立にコピー、再生が可能であるという観点が興味深い。

(4) 巨人・操縦者搭乗型

永井豪の『マジンガーZ』は非常に有名な搭乗型の巨大ロボットで、パイルダー号という機動性のある飛行型コクピ

ットが頭部に合体するというものであった。本作品は、以後定番となる“侵略者から日本（地球）を守る”ことを目的にしており、全身が武器の固まりであった。また、初めての瞳を持たない“無表情”のロボットでもあった。

永井のアイデアで忘れてはならないのは“合体”である。『ゲッターロボ』は、3機の飛行機が変形合体して1体のロボットになる。しかも、3機の順番を入れ替えることで、3タイプのロボットになるのだ。彼の作品以後、変形合体が流行し、いろいろな作家達によってさまざまな変形合体が描かれ続けている。

永井の作品はまた「超合金」と名付けられた金属製のおもちゃを生み出した¹。この頃は、ブリキ製の淘汰され、ソフトビニール製の“いかにも人形”という感じのおもちゃが主流を占めていたが、再びロボットらしき質感のものが子供の手に入ったのである。しかも、超合金は各関節が動いてポーズを取り、直立し、腕やミサイルを飛ばすことができた。この超合金は爆発的に売れ、以後の巨大ロボットデザインを大きく左右することとなった。つまり、デザインの良し悪しが見え、かつ、おもちゃとしての立ち姿の安定性のある、足先が太い三角パース型のロボットが流行するようになる。

（5）人間型

一方、松本零士の『宇宙戦艦ヤマト』に登場する「アナライザー」は、電子機器の固まりのようなデザインでどう見ても人間には見えないが、恋をしたり（女性隊員のスカートめくりをして気を引く）、叶わぬ恋と悟って身を引いたり、軍医と酒を飲んだりと非常に人間くさいキャラクターとして描かれた。これは『スターウォーズ』の「R2D2」にも影響を与えた。

（6）機動服型

近年では漫画家以外の人たちが数々のロボットを世に送り出している。アニメ製作の監督とメカデザイナーである。そのような流れから生まれた『機動戦士ガンダム』（富野良幸原案、大河原邦雄画）の特徴は、学習機能を有した戦闘機型コクピットを中心としてさまざまなパーツ（上半身が別々のパーツとされている）や装備を用意したことである。これにより一人のパイロットでさまざまなタイプのロボットを同じ感覚で操縦できるという設定である。これは、人間の能力を拡大するツール（スーツ）として位置づけられる概念設定であり、工学的リアリティーも高い。ロボット工学に代表されるハイテク技術が積極的に導入されている点で意義深い。

ここに登場する多くのロボットは、“ロボット”ではなく“モビルスーツ”（機動服）と呼ばれた。この名称は、ロバート・A・ハインラインの『宇宙の戦士』というSF小説

で最初に使われた言葉である。

（7）リアル変形型

この頃より、実際におもちゃにしても変形合体に無理のない“リアルロボット”と呼ばれるロボットものが続々と登場し、第2次ロボットブームが始まった。代表的なものは『超時空要塞マクロス』に登場する「バルキリー」という戦闘メカだ。F14型ジェット戦闘機からガウォークという中間形態を経て、バトロイドという人型戦闘ロボットへと完全変形した。このメカを描いた河森正治は美大ではなく工学部出身のデザイナーであった。

（8）対戦テレビゲーム型

牛次郎原作、神矢みのる画の『ブラレス3四郎』は、パソコン操作で動くラジコンキットを内蔵した人間型のプラモデル（すなわちロボット）にレスリングをさせるという設定で、その開発、動作のティーチングや機能の拡充の楽しさを描いたものである。身長50[cm]程のブラレスラーをキーボードにより操るところが昨今のテレビゲームブームを反映している。現在で例えるなら『ストリートファイター2』のような対戦型テレビゲームを、実際のハードウェア動作で実現するロボットを作ろうというストーリーであり、この作品に刺激されてロボット開発を志した学生も多いのではないかと推察する。

（9）近未来リアリティ追求型

近年最も目をみはる作品は『機動警察パトレイバー』だ。漫画、オリジナルビデオアニメ（OVA）、音楽、テレビ、映画とあらゆるメディアで成功を収めている。近未来を舞台としているが、その実、現在の東京（世界情勢）を描くことで非常に現実味を帯びた世界観を現出し、その中でロボットを登場させている。ここで登場するロボットは「レイバー」と呼ばれ、土木・建築等の分野で使用される搭乗操縦型作業用ロボットである。「パトレイバー」は、レイバーによる犯罪対策用に作られたパトロールレイバーの通称である。作品は、このために設立された特殊車両二課の警官達の奮戦記を描いている。

パトレイバーは、その世界観から社会問題を浮き彫りにするだけでなく、ロボットの研究に関しても興味深い触れ方をしている。歩行時の揺動による乗物酔い（レイバー酔いと言っている）、それを和らげるためのショックアブソーバーの研究、そして操縦性の追求を描いている。また、大まかな操縦はジョイスティックやフットペダルで行い、細かい手作業にはマスタースレーブ方式に切り換え、その際、バーチャルリアリティを採用すべくシミュレートしたりと現在の我々の研究を随所に取り入れている。

2.2 今後への期待

アトムやマジンガーに憧れてロボット研究者になった人は意外と多い。現代の研究を作品中に反映させたガンダムやパトレイバーに触発されて、大学のロボット研究室に入

¹ 超合金とはマジンガーZのボディを構成するニュー金属（新材料）の呼び名であった

る学生も多いと聞く。

SF ロボットには童心を掻き立てる夢がある。これからの子供達にも新しい夢を与えることのできる作品が、今後もしみ出されていくことを期待している。また、SF ロボットを夢で終わらせることなく、現実のものへとつなげていくことが、我々の使命である。(阪口 健)

3. SF ロボットのメカ学：パトレイバー巨大2足歩行の不可思議

SF アニメーションの中で、巨大な人間型のロボットが活躍するものは数多い。「あのような巨大なロボットを建造することが可能なのだろうか？」研究者やエンジニアでなくとも、誰もがこんな疑問を抱くのではないだろうか。そこで、本章では純粋に工学的な立場からこのような巨大ロボットの実現可能性と設計について論じてみたい。

3.1 パトレイバーのメカニズム

具体的な考察の対象として、ゆうきまさみによるアニメ「機動警察パトレイバー」に登場するロボット「パトレイバー」を取り上げる。パトレイバー（正式名称 98 式 AV/イングラム）は、全高 8.02[m]、全備重量 6.62[t]の人間型のロボットである(図1の一番右)[1]。主人公は、胸の部分に設けられたコックピットに乗って操縦する。エネルギー源は超伝導コイルに蓄えられた電力であり、有機超電導体を利用したリニアアクチュエータによって動く。そのほか、細部にわたって緻密に技術的仕様が設定されている(表2)[2]。

3.2 巨大歩行ロボットを設計する

我々の問題意識は次のようなものである。「果たしてパトレイバーの大きさを持ち、2足歩行できる機械を建造す

ることは現代の技術で可能であろうか？」

表2の仕様はかなり良く考えられたものではあるが、残念なことに有機超電導体を用いたアクチュエータという、

表2 パトレイバー諸元

全 高	8.02 [m]	
全 幅	4.37 [m]	
重 量	空虚	6.02 [t]
	全備	6.62 [t]
自由度 (全 76)	腕部	7
	手部	20
	脚部	8
	首	3
	腰部	3
速 度	歩行	6 [m/s]
	走行	80 [Km/h]
連続稼働時間	直立静止時	3 [h]
	歩行時	1.25 [h]
アクチュエータ数	155	
電力チャージ時間	2 [min] 専門チャージャー使用)	
エネルギー貯蔵量	500 [KWh]	
トルク	指	10 [tcm]
	腕	100 [tcm]
	足	1000 [tcm]
外装材料	CFRP, 傾斜機能材料	
骨格構造材弾性率	1100000 [Kg/mm ²]

X-1 ティラノサウルス オオモア ヒト WHL-11 パトレイバー
©ゆうきまさみ／小学館

図1 X-1, 実在した2足走行生物達, ヒト, WHL-11, パトレイバー

現在の我々には手の届かない技術を前提としている（もちろん、現代の技術で有機超電導体アクチュエータを作ることができるかという問題設定も有り得ようが…）。そこで、我々はパトレイバーの幾何学的な寸法だけを出発点として考察を進めてみたい。

3.2.1 生物との比較

まずは、身長8.02[m]という数字のもつ意味を、実際の2足歩行生物と比較することで捉えてみよう。図1に、有名な白亜紀の恐竜ティラノサウルス、200年ほど前に絶滅したニューギニアの巨鳥オオモア、人間、パトレイバーを同縮尺で示す[3][4]。パトレイバーほどの身長をもち2本足で歩いた生物は地球の歴史上存在しなかった。

しかし、歩行の動力学に着目するならば、重要なのは頭頂の高さではなく、重心の位置である（歩行運動は脚と重心がなす倒立振り系で近似されるため）。パトレイバーが人間とほぼ同じプロポーションを持っていることから、その重心は、人間同様にほぼそのあたりにあると推定できる。一方、ティラノサウルスの重心は股関節付近にあった。両者の地面からの高さはいずれも4[m]前後である。すなわち、非常にラフな議論ではあるがパトレイバーとティラノサウルスの歩行は動力学的にみればほぼ等価と言えるのである。これは、パトレイバー・サイズの2足歩行ロボットの実現可能性に1つの裏付けを与えてくれる。

3.2.2 現実の2足歩行ロボット

次に、現実の2足歩行ロボットについて見てみよう。ここで取り上げるのは、1985年つくばで開催された科学万博において、実演展示を行った2足歩行ロボットWHL-11である[5]。このロボットは、早稲田大学理工学部の加藤研究室の指導のもと、日立製作所により開発された。図1の右から2番目にその外形とサイズを見ることができる。また、主要諸元を表3に示す。20年以上にわたる2足歩行ロボットの研究開発の歴史の中でも、WHL-11はいくつかの点でエポックメイキングなシステムであるといえる。第1の最も重要な特長は、歩行に必要な油圧ポンプ、油圧制御装置、制御コンピュータ等すべてを搭載した「自立」2足歩行ロボットである点である。駆動に必要な電力は外部からケーブルで供給されたが、このロボットにエンジンと発電機を搭載し、完全な自立型とすることは十分可能であろう（ケーブル給電は、博覧会場という環境とメンテナンス上の都合により選択されたと思われる）。

第2に、各脚は6自由度を持ち、左右方向のバランスをとった歩行や、方向転換が可能であった。特に方向転換に必要な鉛直軸回りの自由度は、今日の2足歩行ロボットでも省略されることが多い。この自由度を設けることが機構上難しく、また方向転換以前の研究課題がまだ山積み状況にあるからである。

第3に、このシステムは極めて信頼性の高い歩行を実現

表3 WHL-11 諸元

基本寸法	全 高	1.4 [m]
	脚 長	0.7 [m]
	全重量	120 [Kg]
駆 動 源	電動機	1.4 [KW]
	油圧ポンプ	7 [MPa], 10 [ℓ/min]
歩行仕様	歩 幅	50 [cm]
	一步の周期	10 [sec]
	速 度	150 [m/h]
	準動歩行, 方向転換可能	

した。準備期間を含め約8ヶ月にわたり、総計134,982歩、60[Km]以上を踏破した。この間、展示に支障をきたすトラブルを起こすこともなかったのである。

3.2.3 相似則による設計

WHL-11をパトレイバーの大きさに拡大するとき、何が起こるかを考えてみよう。2足歩行ロボットの代表長さとして、脚の長さつまり、腰関節-足首関節間の距離を採用する。パトレイバーでは約4[m]、WHL-11では0.7[m]である。これをそろえるため、WHL-11を5倍に拡大する(図1の一番左)。その結果は高さ7[m]、体重15[t]という、脚だけとはいえ、SFアニメに出演できそうな巨大ロボットが出来上がる。以下本章では、このロボットを仮にX-1と呼ぶことにする。

次にこのロボットの歩行スピード及び、必要な動力源に関する考察を行う。WHL-11では、安定な歩行を実現するために0.96[s]ごとの各関節角度をあらかじめ計算しておき、補間計算を行って20[ms]ごとのなめらかな運動軌跡を作りだした。相似な構造を持つX-1を歩行させるためにも、このデータが利用できるはずである。しかし、同じ歩行周期で大きさの異なるロボットを歩かせようとしても安定を保つことはできず15[t]の巨体は転倒してしまう。

幾何学的に相似な動物やロボットの歩行運動を比較するために、しばしばフルード数と呼ばれる無次元数が用いられる。フルード数は以下のように定義されている。

$$F = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad (1)$$

F : フルード数 (この2乗をフルード数とすることもある)

v : 平均歩行速度

g : 重力加速度

L : 脚長

この無次元数が、なぜ歩行運動に関係するかを理解するためには、フルード数が1となる場合を考えると分かりやすい。すなわち式(1)において、 $F=1$ のとき、

$$g = v^2/L = \omega^2 L$$

ω : 着地点-重心がつくる倒立振子の角速度

となって、歩行中重心に作用する重力と足首回りの遠心力が等しくなる。つまり、これ以上の速度では移動中に足を地面に着地させていることが不可能となり、「歩行」ではなく「走行」しなければならない。幾何学的に相似なシステムがフルード数の等しい速度で運動するとき、動力学的にも相似となり歩行の安定性が保証される[4]。

式(1)から、一般にフルード数を変化させないためには次のようにすればよい。

- (1) 脚長 L が n 倍になったとき、速度を $\sqrt{n}$ 倍にする。
- (2) 歩幅 n 倍、速度 $\sqrt{n}$ 倍とするから、一步の周期は $\sqrt{n}$ 倍となる。つまり、歩行周期を長くする必要がある。以上の結果を用いると、X-1 の歩行速度、必要な原動機の出力を推定することができる(表4)。必要な原動機のパワーは532馬力である。大型バスのエンジンでも400馬力程度であることを考えるとかなり大きな値だが、決して不可能な数値ではない。ここでは、単位重量当たりの出力がレシプロエンジンの10倍以上に達する航空機用ガスタービンエンジンを利用することにする。表5に具体的な仕様を示す[6]。エンジンの余力は、制御装置のための電力と、マニピュレーター系の駆動に利用するものとする。高さ7[m]、重量15[t]の巨大ロボットX-1は、搭載された913馬力のガスタービンエンジンによって油圧ポンプと発電機を作動させ、各脚6自由度、計12個のアクチュエータを駆動する完全自立型のロボットである。

3.3 準動歩行から動歩行へ

X-1 の時速0.34[Km]、フルード数にして0.02 という

表4 巨大ロボットの歩行

$n=5.7$		
歩行速度	$\sqrt{n}$ 倍	0.34 [Km/h]
一步の周期	$\sqrt{n}$ 倍	2.2 [s]
一步の歩幅	n 倍	2.5 [m]
関節角速度	$n^{-0.5}$ 倍	—
トルク	n^4 倍	—
消費パワー	$n^{3.5}$ 倍	39 [KW] (=532 馬力)

表5 X-1 に搭載されるエンジン

型 式	KT 5311(川崎重工)
常用出力	913 馬力
最高出力	1116 馬力
燃 料	ジェット燃料4号
出力回転数	6600 [rpm]
乾燥重量	225 [Kg] (含減速機)
寸 法	1.2 [m]×0.6 [m]×0.6 [m]
備 考	BELL 204 B 用

歩行速度はいかにも遅い。これは、採用している歩行形式が準動歩行と呼ばれる静歩行と動歩行の中間的な形態をとっていたためである。1985年の時点で博覧会展示という確実性を要求される目的を考えれば、準動歩行の採用は適切であった。

一方、1980年代は、国内の多くの大学において動的な2足歩行の制御技術が活発に研究された時代でもある[7]。80年代半ば頃から動的2足歩行の成功が報告されるようになり、今日では、さまざまな手法が提案されているものの、平坦地での動的2足歩行はほぼ確立した技術になりつつある[8]。最近の2足歩行ロボットの仕様を表6に示す。動歩行を採用することによって、フルード数は、科学万博のロボットよりも一桁上昇し、人間の歩行に比べても遜色のないものとなっている。ところで、我々の巨大歩行ロボットX-1を動歩行させるとき、その消費パワーはどう変わるのか？ 一般的に言えば、ある機械を10倍の速度で動かすためには10倍のパワーを要するはずである。しかしそれでは、5000馬力以上のエンジンが必要になってしまう。

しかし、実はそうはならず、動的な歩行ではむしろ消費パワーは減少するのである！ 歩行ロボットの運動は、ポテンシャルの山と谷を転がっていく質点で例えることができる。歩行中、胴体の持つ運動エネルギーとポテンシャルエネルギーは相互に交換し、理論上はエネルギーを消費することなく一定の周期で歩行は持続する。すなわち、動的歩行とは、重力場のポテンシャル・エネルギーを上手に利用した効率の良い歩行方式なのである。

これを鮮やかに立証したのが、Tad McGeer による実験であった。彼の開発した歩行ロボットは、アクチュエータをまったくもたないにもかかわらず、緩やかな斜面を時速2.5[Km]で歩き下ることができる。驚くべきことに、遊脚を前方に振り出す運動さえも脚の自由運動によって自然に作り出されるのである(図2)[9]。偶然ではあるが、McGeer の装置と科学万博のロボットの脚長は等しい。そこで、先ほどと同様にサイズを5倍してみると、歩行速度時速5.6[Km]、一步の周期1.6[秒]、歩幅2.5[m]という

表6 最近の2足歩行ロボット

名称 研究機関	BLR-G 3 電気通信大学	WL12 R IV 早稲田大学	Meltran II MEL [*]
駆 動 系	電動	油圧	電動
自 由 度 数	10	9	6
重 量	27.5 [Kg]	103.5 [Kg]	5 [Kg]
高 さ	1.02 [m]	1.8 [m]	0.4 [m]
脚 長	0.54 [m]	0.8 [m]	0.35 [m]
速 度	1.1 [Km/h]	2.1 [Km/h]	0.9 [Km/h]
フルード数	0.15	0.21	0.13

^{*} : 機械技術研究所の略称

図2 アクチュエーターなしの2足歩行（シミュレーション）

雄大な歩行が、わずか0.1馬力の動力で実現されることになる（消費パワーは斜面を下ることによる重力のポテンシャルエネルギーから算出した）。

このロボットは直進に必要な自由度しかもっていないし、多くのアクチュエータを付加すれば、現実にはもっと大きな動力が必要になることは確かである。しかし、最初の設問であるSFアニメに登場する巨大ロボットを製作することが、現在の技術によって十分可能なことは明らかであろう。

3.4 巨大2足歩行ロボット実現への展望

本章では、SFアニメ「パトレイバー」の大きさの2足歩行ロボットの工学的実現可能性について、現実の2足歩行ロボットを参考にしながら考察を行い、以下のように主張した。

- (1) 巨大2足歩行ロボットの設計には、動力学的な相似則が重要である。
- (2) 現代の技術により、パトレイバーのサイズの歩行ロボットは実現可能である。ここでは、約1000馬力のエンジン（ゼロ戦並み）を登載する設計を考えた。
- (3) 動的な歩行は、エネルギー効率の良い歩行である。

最近の研究により非常にわずかなエネルギーで歩くロボットの可能性が出てきた。

なお、本章に関して2点付け加えたい。第1に、「相似則による設計」の項において触れなかった材料強度の問題について。巨大化と同時に、強度を維持するため脚を太くする必要があるのでないかとの懸念がある。しかし、筆者の大ざっぱな見積りでは、この影響はロボットのプロポーションを大きく変化させるほどのものではない。

第2に、本章で考察したのはあくまで限定された環境下での歩行運動であって、人間のようにさまざまな地形に適応して歩くことのできる「自律性」をもった機械がすぐに実現可能だと主張しているわけではない。自律的な2足歩行の実現については、現在活発に研究が進められつつあるが、アニメーションに登場するロボットのようなダイナミックな運動制御が可能になるまでには、まだ多くの研究が

必要である。

（梶田秀司）

4. SFロボット操縦学：「進めっジャイアントロボ！」の以心伝心

ロボットにはさまざまな側面があるが、人間の能力を拡大するツールとしての側面を忘れるわけにはいかないであろう。このようなツールとしてのロボットの問題点はその操縦法である。本章では、SFロボット操縦学として「ジャイアントロボ」を題材にしながらロボットの操縦法について論じてみたい。表題にもあるようにここでは「以心伝心」が重要なキーワードとなる。広辞苑[10]によれば、以心伝心は以下のように説明されている。

- (1) 禅家で言語では表されない真理を師から弟子の心に伝えること。
- (2) 思うことが言葉によらず、互いの心から心へ伝わること。

(1)が本来の意味であろうが、現在では(2)の意味で使われる場合がほとんどであろう。以下ではこの「以心伝心」を1つのキーワードとして議論していきたい。

4.1 ロボットの操縦のレベル：手取り足取り型から以心伝心型まで

まず最初に、本章の題材として取り上げたジャイアントロボについて簡単に説明しておこう。原作は横山光輝であり、まず「少年サンデー」に連載された。しかし我々の記憶に残っているのは、昭和41年から約一年間テレビで放映された実写版であろう。ここでは紙面の制約もあり細かな説明は省くが、主人公の草間大作少年が操るジャンアントロボが、地球征服を狙う悪の組織が繰り出すさまざまな怪獣と戦うという設定である。

ジャンアントロボは、大作君の腕時計に内蔵された通信機を通して、音声で命令を与える。セキュリティ上、大作君の音声にのみに反応するようになっている。音声による命令自体は今となってはあまりめずらしくもないが、ジャイアントロボで興味深いのは、音声によるその操縦の方法である。大作君の発する命令のいくつかを以下に挙げる。

- (1) ロボ、あの怪獣をやっつけろ！
 - (2) ロボ、メガトンパンチ[†]だ！
 - (3) ロボ危ない！ よける！
 - (4) どうしたロボ、頑張れ！
- (1)の命令では、なんら具体的な指示を出していないし、(3)の命令に至っては何か危なくてどうよけたらよいのかは述べられていない。このように大作君は、戦いの現場を

[†] 大作君は、最初から誰にも教えられずにこのようなジャイアントロボの持つ技や武器を使うよう命令を発する。これは見方によれば、ジャイアントロボが大作君の脳に働きかけてそのような命令を言わしめることにより、子供である大作君に擬似操縦感を与えていると見ることもできる。しかしこのような議論は、今回の企画の趣旨から外れるのでここまでに留めておく。

図3 操縦のレベルと命令のサンプル時間 (文献[13]より)

実際に見守りながら(時としてその戦闘にかなり没入し), 時には具体的な動作を指示し, 時には叱咤激励しながらかなり大雑把な命令を発し, まさに以心伝心でロボットを操縦するのである。

図3に, 操縦型ロボットに与える命令の周期, 情報量と操縦のレベルとの関係を示す。これらは, 文献[13]などでこれまでもよく議論されていたことなので詳しく述べるつもりはないが, 通常命令の周期が長くなるほど命令の内容はより上位になり抽象度を増す。したがってその情報量も少なくなっていく傾向にある。ここではマスタ・スレーブマニピュレータに見るようなサーボレベルでの操縦を手取り足取り型と呼び, 命令の情報量が限りなく少なくなった図3の最上位のレベルの操縦法を以心伝心型と呼ぶことにする。先に述べたように本来の「以心伝心」とは言葉を一切介さない情報伝達なのであるが, ここでは言葉であれ何であれ命令のための情報量がきわめて少なくて済む場合としておこう。

さてここで問題となるのは, はたしてこのような以心伝心ロボットを作ることは技術的に可能なのかという点である。またもし仮に以心伝心型ロボットが実現されたときには, 他の章でも題材として取り上げられているパトレイバーのような手取り足取り型操縦ロボットは必要なくなるのであろうか? そこで本章では, 以下次の2つの設問に答えるべく考察をすすめることにしよう。

- (1) 「以心伝心」によるロボット操縦は工学的に可能か?
- (2) レイバー型操縦ロボットに未来はあるか?

4.2 オグメンテーション=人類の絶えなき夢

人類の永年の夢は, 「超人」になることと「下僕」を持つことであるという[12]^{*}。館によれば, 超人になることは自己の能力の拡大を意味し, サイボーグに通じるという。一方下僕をもつことはロボットに通じると指摘している。ただ多くの奴隷を使って建てられたというピラミッドなど

^{*} 筆者は, 人類の夢としてさらに人間自身を含む自然の理解というものがあると考えているが, これも理解した後はそれを統御し有効利用するというのであれば, 最終的には能力の拡大に通じるともいえるかもしれない。

^{**} 映画「エイリアン2」に登場するパワーローダーが代表例。米国カリフォルニア大パークレー校の Kazerooni らによって同様のものが実際に研究されている。

図4 オグメンテーション:さまざまな次元での人間の能力の拡大

の例を見ても分かるように, 下僕も数の効果で超人と同様に物理的な能力の拡大という側面を持っており, さらに個々に別々の仕事を命じることにより, 時間のスケールでの能力の拡大の側面も持っているといえる。すなわち人類の夢である超人も下僕を持つことも結局は広い意味での自己の能力の拡大の願望とみることができよう。

さて操縦型ロボットには大きく分けて, 直接タイプと間接タイプに分けることができる。直接タイプは操縦者である人間とロボットとが物理的に直接結合したタイプで, エクステンダ^{**}などがその例であり, 超人の流れである。一方間接タイプとは, マスタ・スレーブマニピュレータに代表されるように, 人間とロボットとの間には直接の物理的結合がない。この間接タイプでは, 直接タイプ同様超人にもなりうるし, ある程度の自律性を持たせたロボットを複数台用意することで下僕にもなりうる。

この考え方を図にしたのが図4である。図に示すように, 人間の能力の拡大にはスケール, 距離, 時間といったさまざまな次元のものが考えられる。図にはそれぞれの軸に対応するロボット関連の技術を併記した。またこの図に先の超人と下僕をあてはめるならば, 距離とスケールの軸方向への拡大に超人を, また時間と距離の軸方向への拡大に下僕をあてはめることができるだろう。

時間軸の拡大は, 他と比べると少々分かりにくいのでここで若干説明を加えておく。例えば教えこんだ作業を繰り返すティーチングプレイバックロボットでも, 教えこむのに要した時間より繰り返し作業の延べ時間が長ければ, これはある意味では時間軸での能力の拡大である。また熟練者の技能がロボットに移転され, その熟練者の死後にも技能が再生されれば, これも時間軸での能力(寿命)の拡大といえる。このように時間軸方向の能力拡大は, 他の2つの軸方向の拡大に比べて分かりにくいとその反面大きな可

図5 人間-ロボット間のコミュニケーションの様式の違い

能性を秘めており、ツールというよりはむしろメディアといった方が適当かもしれない。

このような人間の能力の拡張はしばしばオーグメンテーション(augmentation)と呼ばれているが[11], まさにこれが人類の絶え無き夢であるといえよう。したがって「ツール」もしくは「メディア」としてのロボットの理想も、図4のすべての方向への能力の拡大を実現できることであると言える。

4.3 以心伝心ロボットは可能か？

4.3.1 操縦のための人間-ロボット間コミュニケーション

さてここで、ロボットの操縦法を人間とロボットとのコミュニケーションという観点からながめてみよう。図5(a)に示すように、手取り足取り型のレベルでは、作業環境からの情報を操縦者である人間が自らの感覚器官を通して取り込み、また自らの運動制御機能により動作指令をロボットに与える。このような操縦形態ではまさにロボットを自分の手足の延長のように使う感覚が理想となる。この場合、ロボットは環境からの情報を忠実に操縦者に送るだけ、そして操縦者からの指令動作を忠実に実現するだけである。したがって状況把握や作業計画はすべて人間の側が行い、ロボット側では本質的な情報処理は行われない。結果としてロボットと操縦者間のコミュニケーションのための情報チャンネルは大容量のものが必要となる。

一方以心伝心型のレベルでは、ジャイアントロボでの「危ない！ よける！」や「ロボ、頑張れ！」といったかなり大雑把な命令で操縦するわけであるが、これを実現するためには図5(b)に示すように操縦者とロボットの間で状況の共有や注視点の共有がなされていなければならない。さらにこの共有知識をもとに操縦者が何を意図しているのかを抽出できなければならない。また命令実行に際しては、ロボット側には相応の自律性が必要なのは言うまでもない。次章で國吉氏が指摘しているように、人間同士や人間と機械とのコミュニケーションにおいては両者が共通の

知識を共有することによりコミュニケーションの情報量を減らすことができる。極端な言い方をすれば、言語に限らずコミュニケーションするためにはすべてある約束ごとが前提となっているともいえる。したがって以心伝心型では見かけ上、人間-ロボット間のコミュニケーションは疎になっているが、そのバックグラウンドではそれを補うだけの情報の共有が実現されていなければならないのである[†]。

さてそれでは最初の問いに対して答えることにしよう。以心伝心によるロボット操縦は、以下の機能が実現されれば可能である。

- (1) 状況の共有, 注視点の共有
- (2) 操縦者の意図抽出
- (3) 操縦者への「以心返心」

共有する知識には普遍的なものや動的なものもあり、さらにはきわめて私的なものも含まれる。特に操縦者のモデルのうち思考モデル、好み、性格、癖や行動パターンなどの私的な部分は、通常ロボット側が人間とのコミュニケーションを通して時間をかけて学習することにより獲得することになる。これは例えば人間の秘書の場合を考えてみれば分かりやすい。雇い主は長年雇ってきた秘書が突然いなくなると不便このうえないが、これは両者間で長年培ってきた状況の共有状態が、代替りの秘書ではすぐには実現できないからである。また有能な秘書とは、この雇い主との間の状況の共有状態をいち早く実現できる人と言えるかもしれない。このような共有する状況や操縦者のモデルといったもののパーソナルな側面は人間-機械間のコミュニケーションでは重要である。インスタントカメラが時として使いにくいのは、最大公約数的な使用者を想定しているからで、結局人間が機械に合わせる必要が生じてしまう。使いやすい機械となるためには、やはり使用者のパーソナルな癖や使用パターンを学習する機能が必要となるのではないだろうか？^{††}

[†] 電総研で開発された遠隔作業ロボットシステム MEISTER [14]は、ワールドモデルに基づいた作業実施を特徴とするが、この場合このワールドモデルを共有知識ととらえることができる。そこではモデルと実環境の不一致に対する頑健性の欠如が問題点として指摘されているが、これは人間側とロボット側の持つ共有知識が完全にシンクロしていない場合と見ることができよう。これはしばしば人間同士でも起こることである。

^{††} パソコンで有名なマッキントッシュ用のソフトウェアとして、米国 Charles River Analysis 社は、最近 “Open Sesame!” というユニークなユーティリティを発売した。これはユーザの操作を常に監視し、繰り返し作業を自動的に見つけだして操作パターンのデータベースを自動作成し、定型作業を代行するというものである。今のところ実現されている機能はまだプリミティブだが、日常の行動から学習をしてパーソナルなものに仕立てていくというコンセプトには注目したい。さらに去年 Apple 社が売り出した携帯用個人情報端末 Newton Message Pad では、手書き文字の認識機能を持つが、ユーザの書き癖を学習することによって認識率が徐々に上がってくるようになる。このような機能があれば使いやすくなるのはもちろんのこと、ユーザにとっては愛着が湧くことにもなる。

4.3.2 言語以外の情報チャンネルの利用

「以心伝心」が言葉を介さないコミュニケーションであるならば、コミュニケーションとして他の情報チャンネルを使うことも考えられる。人間同士でも相手の顔の表情や声色から言葉以上の情報を引き出している。工学的にも血圧や脈拍、脳波などのさまざまな生態情報から人間の精神状態や動作意図を抽出する研究が幾つか行われている。例えば Hiraiwa ら[15]は、脳の準備電位からニューラルネットにより、発声しようとする母音や動かそうとするジョイスティックの操作方向を識別することができることを報告している[†]。また最近では皮膚の微小な振動から快・不快の状態を判別できる可能性も報告されているようである。このような情報チャンネルは、以心伝心の実現のため（共有知識の獲得のためにも）の有用な情報ソースであろうし、人間同士以上の以心伝心状態が実現できる可能性をも持っていると言えよう。

4.4 レイバー型操縦ロボットに未来はあるか？

この2番目の問いに答える前に、どの時点でということをはっきりしておく必要がある。現在の操縦ロボットは、そのほとんどが手取り足取り型であり、より上位のものは研究室レベルのごく限られた状況の中でしか動作しないのが現状である。近い将来においてもこの状況が変わることはないだろうから、近未来では「当然ある。」と答えることができよう。なぜならそれ以外に方法がないからである。では前節で考察したように、以心伝心できる自律ロボットが仮にできた後ではどうだろうか？

以心伝心が、状況の共有や知識の共有を必要とする限り、必ずしも万能ではないといえる。したがって上位レベルの操縦と下位レベルの操縦とは相補的であるべきであり、これは佐藤ら[14]によって早くから指摘されている点でもある。すなわち操縦型ロボットシステムにおいては人間はさまざまなレベルでシステムに介入することが必要である^{††}。したがって2番目の問いに対しては、「レイバーのような手取り足取り型の操縦形態は、以心伝心型が実現された後にも存在意義がある。」と答えることができる。また状況に柔軟に対処するには、以心伝心型から手取り足取り型までさまざまな操縦形態のレベルを状況に応じて臨機応変に動的に変化できるようにするべきである。このことによって人間は図4のすべての次元において能力の拡大が実現できることになる。これはあらゆる意味でロボットを「手足のように使う」ことと言えるのではなかろうか。

4.5 以心伝心は私的な関係

本章では、ジャイアントロボットを題材として、ロボットの操縦法について考察してきた。ここで得られた結論を

[†] 残念ながら、認識率等の問題から現在の研究は中断されている。

^{††} 大作君は、時にはメガトンパンチなどの具体的な技のレベルにも介入している。

要約すると以下ようになる。

- ロボットの操縦はあらゆる意味での人間の能力の拡大（オーグメンテーション）と見ることができる。
- 以心伝心型を実現するためには、状況の共有や操縦者の意図抽出などの機能がロボット側に必要である。
- 状況に柔軟に対処するためには、以心伝心型から手取り足取り型までの操縦のレベルを動的に変化させることが必要である。

筆者が最後に改めて強調しておきたいのは、このような機能を実現するために必要な人間-ロボット間の関係のパーソナル性である。人間同士でも「以心伝心」もしくは「あうんの呼吸」の関係というものは、きわめてパーソナルな関係であると言える。ロボットに限らず、これまで機械の操作・操縦においては人間側が機械に合わせる場合が多かったが、これからはロボットが学習を通して人間とのパーソナルな関係を構築できる機能が必要であり、それがなければ本当の意味での以心伝心はできないであろう。

本章の冒頭でも述べたように以心伝心とは、本来心から心への情報伝達を意味する。それならば以心伝心ロボットは心を持ったと言って良いものなのだろうか？ またそのとき人間側がロボットに抱く感情は、永年使い込んだ道具に対する愛着に似た感情（体の一部）なのか、永年連れ添った伴侶に対する感情（愛情）になるのであろうか…。

（横小路泰義）

5. SF ロボット心理学：Short Circuit は知性の始まり？

本章では、主に映画「ショート・サーキット」に登場するロボット、「ジョニー・ファイブ」(図6左)を取り上げるこの映画のあらすじは、次の通りである：

「軍用に開発された知能ロボットが、充電中に送電線への落雷による電気ショックを受け、機能不調をきたす。その結果、赤ん坊レベルの知能になり、旺盛な好奇心が芽生

図6 ジョニー・ファイブ(左)と古典的知能観(右)

え、ものすごい速度で学習を始める。研究所からさまよい出て、ステファニーという女性と出会う。彼女と一緒に暮らすうちに、人間らしさ（恐怖、命の貴さ、美的感覚、ユーモア、臨機応変の賢さ）を獲得。開発元の会社に追いかけられ、ステファニーと共にさまざまな冒険をする。」

ジョニー・ファイブは、ビジュアルなSF作品に登場する知能ロボットの中では、以下の点で特異な存在である。

- 金属の皮を被った人間というイメージではなく、むしろメカメカしいのに、表情や振舞いが非常に人間的で、知性を感じさせる。
- 非常に強力な学習能力を示す。赤ん坊レベルから青年レベルまで知的に発達する過程が詳しく描かれている。
- 知的な行動や発達が、孤立状況や極限状況ではなく、日常生活における人間との交流の中で描かれている。
- 知性の描写のポイントが、現在の知能研究の視点から、非常に興味深い[†]。
- 機構設計上、興味深い点がある（図6左）^{††}。

実世界の中で素早く知的に行動するロボットや人間と円滑にコミュニケーションしながら行動するロボットなどが重要な研究テーマになっている今日、このような作品は、興味深い思考実験と見ることもできる。特に、この作品では、知性の描写のポイントが的確なので^{†††}、最新の知能研究に関連した議論がある程度可能である。

さて、知性に関する議論は、無制限に発散する傾向があるので、以後、以下の3つの視点に絞って議論を進める。

- (1) 物理的環境相互作用
- (2) 社会的環境相互作用
- (3) 知性の発現メカニズム

これら3つの視点を貫き、知性の構造を紐解く鍵として、「ループ」というキーワードを用いる。また以下の3つの問いに対して明確な答えを出そうと試みることで、抽象的議論を極力避けることにする。

- (1) 知能はコピーできるか？
- (2) パワーショベルとの以心伝心はあるか？
- (3) Short Circuit は知性のはじまりか？

5.1 古典的知能観

人工知能や知能ロボットの研究者の間で、10年ほど前

[†] 例えば、環境探索／相関学習 (exploratory/correlational learning)、模倣学習 (learning by watching)、素早い反応行動の関連付け、感情／感性／ユーモアの発達、人間とのコミュニケーション (表情、言語) など。

^{††} パラレルマニピュレータの首や、能動両眼カメラ、2自由度のまぶた、多指ハンド、腰、可変クローラなど。

^{†††} 普通の人間の子供の振舞い (例えば、テレビの登場人物の真似をする) をロボットに置き換え、やり過ぎない程度に「ロボット」的な脚色 (例えば、百科事典を10秒で読破する) を加えて面白おかしくしただけでもいえるが。

^{††††} 実際に作ってみると、このモデルベースト・アプローチはうまくいかず、システムを成功させるためには、インタラクティブな環境教示やスキル動作といった新しい技術が必要となった。

に支配的だった知能観を漫画的に誇張して描くと、図6(右)のようになる。知能の研究者は、知覚や動作の心配は他の研究者にまかせ、主に推論や判断の機能だけ考えていればよい(機能モジュール分解)、ということで、頭でっかちで肢体が極めてひ弱な知能観である。

当時の知能ロボット研究の1つの典型は、視覚から幾何モデルを自動生成し、モデル上で作業や動作の計画を行い、それに従って腕を動かし組立作業するというものであった。幾何モデルをインタフェースとして、機能モジュール分解を保証しようとした^{†††}。聴覚、嗅覚、首、胴体などは無視され、触覚、多指、脚などの研究でも、高次知能との関連は強調されなかった。

古典的知能観(図6右)は、ジョニー・ファイブ(図6左)とは、似ても似つかないイメージである。もっと身体のバランスがとれているべきだし、目を大きく見開き、あらゆる感覚を総動員して臨機応変に活発に行動するべきだし、さらには、もっと表情豊かであって欲しい。

また、日常生活に必須な知能という観点からは、組み立て作業などは極めて特異な部類に属する。最も基本的かつ重要な能力は動き回ること、これに加えて、簡単な物体操作、協調行動、コミュニケーション、学習などが必要であらう。

5.2 物理的環境相互作用

ジョニー・ファイブは、上位命令に従い確実に任務を遂行するよう作られたが、機能不良の結果、行動の統一性、合目的性が失われ、ふらふらとさまよい始める。

目的や計画を司る上位機能が破壊されても、低レベルの行動能力が残るのは何故か？

もしシステムのアーキテクチャが、図7(左)のような直列型であったら、計画モジュールが破壊されると一切の情報の流れが停止し、全く行動できなくなる。したがって、図7(右)のような並列型アーキテクチャ[17]のはずである。このアーキテクチャでは、システムを知覚から動作まで自己完結した行動単位にモジュール分解し、モジュール相互の明示的な結合を極力排除し、センサからアクチュエータに至る情報の流れを多数並列に、互いになるべく独立

図7 アーキテクチャによる部分的故障の影響の違い：直列型(左)と並列型(右)

になるように実現する（行動ベース・アプローチ）。こうすることによって、知覚から動作までのパスが短くなり反応性が向上すると同時に、システム全体のロバスト性も向上する。

この仕組みでは、一見各モジュールがばらばらな振舞いをして全体として意味のある行動ができないように思える。これに対する説明は、環境を通した相互作用によって行動の統合が創発されるというものである。つまり、あるモジュールによる行動の結果が環境の状態変化および知覚を経由して別のモジュールに影響を与え、ある行動が別の行動を引き起こしたり抑えたりすることで、自然と多様な行動全体の秩序が生まれる（というより、そうなるようにモジュールを作る）。

行動ベースの主張によれば、知能の構成要素は「行動」である。「行動」とは知覚→判断→動作→身体機構→現在の動作と他の行動と物理法則による環境変化→力や光や音などの物理法則→知覚生理過程…という「ループ」である。「ループ」である以上、そのどこが途切れ、あるいは変化してもいけない。すなわち、システム内部の情報処理だけでは無意味で、かならず環境と組みになって、相互作用して初めて知能が発生する（「環境への埋め込み」）、情報処理が不変でも身体や環境が変われば知的でなくなることもある、という見方である。この枠組は、単なるシステム設計論に留まらず、古典的知能観（環境に関する客観的表現を操作する能力としての見方）に決定的な変革を迫った。

ここで、冒頭の第一の問いに対する答えが明らかになる：「知能はソフトだけではないのでコピーできない」、したがって「エイトマン」の冒頭にあるシーン（東八郎の心がロボットのコンピュータに忠実にコピーされた）は、上述の知能観からは受け入れ難い。

環境埋め込みという行動ベースの特質はそのまま弱点でもある。つまり、環境の変化に弱い。単純な生物は、本来の棲息地と全く異なる環境では行動できず死んでしまう。人間でさえ、環境の変化に適応できず、著しく不活発になることがある。例えば、「散らかしていた机を他人に片付けられたら途端に仕事が滞った」、「転職してしばらくは仕事が手につかなかった」、「子供が転校してからふさぎ込むようになった」、「愛している人を亡くして呆然自失し、家に閉じこもった」などは、環境の激変によって行動の「ループ」が破壊され、一時的に行動不能になったと考えられる。人間でも、行動ベース的な要素が大きな部分を占めているのが分かる。

しかし、人間は、行動ベースを超越した要素を併せ持っていることもまた確かである。大抵の場合、人は新しい環境に適応し、再び活動を始める。また、決まり切った行動ばかりするのではなく、臨機応変に行動し、新しいことを思いつく。

強化学習によって行動モジュールを改善し、作業遂行能力を向上する研究がある[19]。しかし、全く新奇な行動モジュールを自律的に獲得する手法は今の所知られていない。「ジョニー・ファイブ」が最初に行った学習行動は、スイッチをいじって電灯を見つめるというものであった。このような、既存のループ（スイッチの操作）を核として、より大きな新しいループ（電灯の操作）を形成するタイプの学習は、行動モジュール獲得手法として有望である。

また、ジョニーは、追手に捕らえられ、主電源を切られて首から下の身体が動かせない状態のとき、手近のスパナをまぶたで取り上げ、自分の電源スイッチの上に落して起動してしまう。このような臨機応変さは、どうすれば実現できるだろうか？

5.3 社会的環境相互作用

行動ベースにおける各「ループ」は、環境を通した相互独立な物理過程として閉じており、システム内部では、ループ間の結合などの明示的な制御機構は持たないのが基本である。

ある。この結果として、外部（例えばロボットのユーザ）から直接システム内部に目標記述を与え、それに従って行動させるということはできない。外部から行動を制御する方法としては、環境を操作することで影響を与える（例えば、羊の群れを追うように）か、あらかじめ固定的な目的にあった行動が創発されるように設計しておくしかない。

前述のように、「ジョニー・ファイブ」の基本部分は行動ベースらしいが、人間であるステファニーのために料理を作ろうとしたり、彼女を追手から守ったり、さまざまな協調的行動をしったりする。

行動ベースの利点を活かし、しかも人間社会の中で有用なロボットを作るためには、どうすれば良いのだろうか。

1つの有望な可能性は、物理的環境相互作用に基づく行動ベースの自然な拡張として、社会的環境相互作用を導入することである。つまり、人間との間に「ループ」を成立させることである。

まず、「ファースト・コンタクト」について考えてみよう。ステファニーは、初めてジョニーに出会ったとき、相手を宇宙服を来た異星人と思い込む。そして、話しかけ、身振り手振りで意思疎通をはかろうとする。すると、ジョニーは、ステファニーのしぐさを真似する[†]。このフェーズは極めて重要である。特に何かが伝達できているわけではないが、自分の働きかけに相手が反応していることで、「通じ合えるかもしれない」と思う。

なにも異星人との遭遇でなくても、我々は日常的に上のプロセスを経験している。我々は道で出会った人と目が合うと、微笑みかけ、相手も微笑む。母親は、赤ん坊が生後

[†] その後、Forward！（前進）というキーワードが通じてジョニーが従ってしまうのでちょっとつまらないが。

2カ月くらいになって、自分の顔を目で追ったり、微笑み返すようになると、強く母子の絆を感じるという。こうして、以後のコミュニケーションの糸口となる最初のループが成立する。

社会的環境相互作用は、知覚→判断→行動／表情／発話→他者の知性→他者の行動／表情／発話→知覚…という流れである。自分も相手も能動的で互に変化し、双方向的な点で、このループは物理的相互作用よりも多様性に富み、動的に思える。

表情や音声の合成／認識など、従来からマン・マシンインタフェースの分野でいろいろ研究されてきているが、上のような意味での「ループ」はほとんど達成されていない。「ループ」の観点からいえば、例えば、完璧な日本語を流暢に、しかし相手にお構いなしに喋り散らすシステムよりは、片言でも、視線や指差しを交えて、人間と通じ合えるシステムの方が、はるかに優れている。もちろん、それが物理行動と関連付けられていなければ、ロボットとしては意味はないのだが。

社会的ループと物理的ループはどう関連付けられるのか？ 現段階ではあまり明らかになっていないが、言語コミュニケーションの状況依存性は広く認識されている。1つの例として、「それ」とか、「あ、後ろ!」のような指示語や省略の理解が、話者と聞き手が同じ状況を共有し、その中で注視点を言語によってガイドし、見たものに関して物理行動モジュールがその状況下で適切な動作を生成する(例えば、「それ」を取ったり、「後ろ」の敵を攻撃する)ことで達成されるというシステム“Sonja”がある[18]。状況と矛盾したり、無意味な言語的指示が与えられた場合、何も見つからないとか、活性化する行動モジュールがないなどの自然な形で拒否される。

上の例は、「以心伝心」に関して1つの示唆を与える。「以心伝心」は、決して相手の行動をトップダウンに制御することではなく、相手の高度な自律性が前提となる。共有状況(現時点のみでなく、これまでの経験を多分に含む)の中で、こちらの発したわずかなサインをきっかけに、相手の知覚、判断、行動が自発的に行われることで達成されるのである。もちろん、相手が忙しかったり、機嫌を損ねていたりすれば無視されるであろうが、それはやむを得ない代償である。

ここで、冒頭の第2の問いに対する答えが与えられた：「パワーショベル側にも相応の自律性がなければ以心伝心できない」

5.4 知性の発現メカニズム

フランケンシュタインからショート・サーキットまで、SF作品に登場するロボットにおける知性の起源は、「雷」に象徴される不可知な聖域とされることが多かった。知性の仕組みを研究する者としては、このような立場は受け入

れられない。落雷の電気ショックに起因する“Short Circuit”が、もし知性の起源の不可知性を象徴するものならば、第3の問いに対する答えは、「Short Circuit は知性の始まりではない」であるべきだ。

アイザック・アシモフのSF[20]のロボットは、メタ制約として設計原理に埋め込まれた「ロボット工学3原則」に基づいて行動する。これは、行動ベースシステムの合目的な設計論の1つの選択肢といえる。しかし、そのような設計原理の実現可能性や、知性の発達との兼ね合いを考えると、少なからず無理がある。

人間は社会のなかで行動しながら行動規範や協調戦略を学習する。ロボットにおいても、稼働環境に応じて行動規範等も異なるだろうから、トップダウンに行動原則を与えるよりも、実地に学習してくれた方がよいだろう。近年のSF([22]など)にも、そのようなストーリーが描かれているし、ジョニー・ファイブも、人間との交流の中で自分の行動規範を確立していく。

「四人のジレンマ」ゲームにおいて、「しつぺ返し」という一種の協調戦略を取るメンバーが最大の利益をあげるという事実が知られている[16]。これに立脚して、ロボットが社会行動しつつ自動的に「道徳」を獲得することの重要性が提唱され[21]、GAによる自動獲得手法も研究されている。しかし、より一般的な社会行動の学習に関しては、今のところ、有望な研究成果はほとんど出ていない。

従来、社会行動の学習と、物理行動の学習は互いに独立に検討されてきたように見える。特にロボットの研究において、社会性とは、物理行動の自律性が完成した上に構築されるものという暗黙の了解があったように見受けられる。しかし、人間の発達過程を見ると、極めて初期の段階から、物理相互作用と社会相互作用が同時に、絡み合いながら発達していくようである。微笑や音声的反応、あくびの伝染など、幾つかの純粹に社会的な反応は、むしろ物理的行動能力の発達に先行して観測される。コミュニケーションの状況依存性(前述)などを考慮すると、今後は、図8(左)の路線ではなく、図8(右)のように、ごく低レベルから自律性と社会性が相互に絡みつつ同時に発達するような学習についての研究が必要ではないか。

最後に、知性の発現メカニズムに関する提案を3つしよう。

第1は、注視点と競合解消の能動的変更による行動群の

図8 自律性-社会性平面における研究の方向。左は従来のアプローチ、右は今後のアプローチ。

制御である。元来、行動ベースモジュール群は互いに並列独立で、全体の振舞いを統一的に制御できないが、入力部に注意マップを、出力部に競合解消ネット（これは元来存在する）をおき、両者を能動的に変更すると、システム内の情報の流れを動的に制御できる[18]。

第2は、「脳内ループ」である。この第3のループは、脳内の環境を通るループと考えられる。人間の大脳新皮質では大量の余分な神経細胞があって、常時刺激を与えないと死んでしまうので、自己短絡(Short Circuit!)してループを形成しているという説がある。また、重要な記憶中枢である海馬にはループ回路があり、さまざまな感覚入力の特徴抽出処理後、このループに流れ込み、短期的に保持されつつ統合される（センサフュージョン）と言われている。脳内ループは、行動モジュール間に働くメタ制御を実現するメカニズムの候補としても、また、記憶のメカニズムとしても、重要である。

第3は、ループの多重コピーと変異に基づく学習である。分子進化の知見によれば、生物の遺伝子進化の推進力としては、(単純化されGAの基盤モデルとなった)交配と突然変異の組合せだけでは不十分で、遺伝子重複機構(染色体上で、ある遺伝子が繰り返しコピーされる)によって有用な情報が複製され、組換えによってその多様なバリエーションが生成されることによる効果大きい。同様の原理で、脳内の多数の遊休短絡ループが既存の行動モジュールをコピーし、わずかに変化することで、多様な新しい行動モジュールが獲得できる可能性がある。

脳という広大な内的環境の中で無限に自己増殖するループが、記憶や学習、臨機応変さ、意思や感情、創造性といった高次知性への鍵かもしれない。こうしてみると、冒頭の第3の問いに対する答を修正したくなる：「**Short Circuit (ループ) は知性の始まりである**」 (國吉康夫)

6. SF ロボット社会学：レイバーは災害復旧の救世主？

2章で述べられているように、SF小説、映画、アニメの世界では、今日まで実にさまざまなロボット達が描かれてきた。本章ではこうしたSFロボットを、現実の製品として企画、開発し、普及していくとしたら、その過程でどのような社会的問題や影響について検討を加える必要があるか考えてみる。ロボットを工場以外のさまざまな産業分野で導入したい、という需要は今後ますます増大すると考えられるなか、「絵に描いた餅」ではあるが具体的なSFのロボットを題材にすることによって、問題点や議論の糸口を見い出そうするわけである。

もとより筆者らはロボット工学者であって社会学については素人の域をでないが、技術者の視点から見て、社会的に容認されるロボットの実用化を検討する試みとして論を

進めたい。したがって、技術的な可能性として飛躍が大きすぎたり、戦闘ロボットのような、設定として今日の世界に当てはまりにくいものは取り上げず、ここでは、3章でも取り上げた、ゆうきまさみによるアニメ「パトレイバー」を話題の端緒とすることにする。

6.1 SF 巨大作業ロボットの可能性

「パトレイバー」は今世紀末から21世紀初頭の、「レイバー」と呼ばれる歩行型巨大作業ロボットが普及した日本を舞台とした物語である。この物語においては、東京湾中部地震の復旧作業、及び地球温暖化、海面上昇に伴う国家規模の海岸線保全プロジェクト等による建設ブームを背景とし、3K対策、野外作業の効率化の解決策として、汎用人間型作業機械すなわちレイバーが急速に普及し、建築・土木作業、鉱業、農業、海底作業、防災作業等に広く用いられている世界が描かれている。レイバーは大型のもので全高7[m]前後の巨大な2足歩行ロボットで、操縦者が搭乗して運転する形態をとっている。

近年現実にも、労働力不足の解消、省力化、自動化、作業環境／安全性の改善を目的とした建設用ロボットの研究開発は注目を集めており、すでに一部製品化に至ったものも現われてきているが[23]、レイバー型のロボットはそのSF的解釈、あるいは解答と言える。

さて、このような巨大作業ロボットは、実際に有効な用途があり、現実世界で受け入れられるような可能性を秘めた発想なのであろうか。「パトレイバー」では、さまざまな分野でレイバーが用いられているが、どれも現実のロボットの応用分野として期待がかけられ、研究・開発が行われている分野である。それらの事例の中には大型の2足歩行作業ロボットを用いる発想は現時点では見当たらないが、技術的に可能であるなら、その大きさ、パワーから有用なロボットたりえるのではないだろうか。特に、消防等の防災作業、地震、台風、洪水等の災害の復旧作業においては恩恵が大きいように思われる。

1993年夏の北海道奥尻島の地震とその後の津波の被害の復旧作業に見られたように、現在災害復旧に用いられている機械類は、建設機械の流用である。パワー・ショベルやブルドーザー等の建設機械は基本的には単機能であって、瓦礫や土砂の除去作業には適するものの、他の作業への応用性に乏しく、また、生存者の救出作業等、柔軟性や器用さを要求される作業での使用には限界がある。ハンドを有する作業ロボットの汎用性、柔軟性が作業や輸送に有効となり、少数の作業ロボットでも迅速な災害復旧に貢献できる可能性がある[†]。

[†] 災害救助を主題にしたSFテレビ番組としては「サンダーバード」(イギリスITC制作)が有名である。不思議なことに、「サンダーバード」は、火星に有人飛行を行い、超音速旅客機が飛び交うようなサイテック世界を描きながら、登場するロボットはチェスを指すものなどごくわずかである。

さらに脚機構を有することによって、想定される現場での作業に(2脚が最適であるかは別にして)適している、とすることができる。脚機構の、クローラ、車輪に対する優位性は広瀬らによって、地表支持点の任意選択性、離散的な支持点を構成する機能、接地面圧の低減化機能、無スリップ方向転換機能、確実に能動的な足場を構成する機能、にまとめられているが[24]、いずれも工事現場や鉱山、被災地等の不整地での作業に有利な機能である。

以下では、仮にレイバーのような作業ロボットを建設ロボットの発展形態として開発、普及していく場合について考えてみることにする。

6.2 巨大作業ロボットの開発の課題

本節では、巨大作業ロボットを製品として実現する場合における、社会的な影響や含意のある技術的課題について取り上げてみる。

6.2.1 巨大作業ロボットの安全性

巨大作業ロボットにおいては、その大きさ、パワーのゆえに、安全性について社会的な関心が寄せられることは必至である。使用者自身の安全、周囲に対する安全についてはもちろん、近年注目を集めている製造物責任の面からも安全性に対する配慮が、製品の企画、開発における重要なポイントの1つとなるだろう。安全対策は、後述する法律等の制度による規制や、運用者による運用面での対応もあるが、技術的には、正しい動作、期待される動作を保証する問題、フォールト・トレラントなシステムの開発、フェイル・セーフの作り込み、の問題としてとらえることができる。

こうした点から見た場合、ロボット研究の当初から常に目標の1つとして掲げられてきた知能化や自律化の技術を巨大作業ロボットに導入することには悲観的にならざるをえない。すなわち、自律型のロボットでは安全性を保証することが難しく、巨大作業ロボットは、作業者が遠隔操縦、あるいは搭乗して操作する形態のロボットとして設計されると考えられる。ロボットの操縦については4章で考察されているため、ここでは単純に「自動車を運転する程度の技能で操る」ことのできるシステムとしておく。自律型ロボットを排した理由は、現在の技術レベルで完全自律型のロボットを実用化できない、あるいは部分的な自律化、知能化したロボット・システムの安全保証についても今後の研究に待たれる部分が多い、といった純粋に技術的な問題に加え、自律システム、自動制御システムに対して、社会的に疑念や不信感がまだ根強くあると考えられるからである。

1993年10月の大阪市営の新交通システム「ニュートラム」の事故は、無人化システムの設計、フェイル・セーフ・システムの在り方等について、多くの考えるべき教訓を残したと言えるが、同時に事故当初のマスコミの報道や一般

市民の反応等には、自動制御システムに対する不安や、ひいては不信の念が見受けられた点は看過できない。操縦によって十分な安全を確保できるか、人間が対応するよりもロボットに自律性を持たせたほうが信頼性があるのではないか、という議論ももちろんであり、より高い安全性を技術開発によって確保していくことを考えることは技術者、研究者としての当然の使命である。しかし、現実的な製品開発を考えた場合には、そこに技術に対する社会の信頼、技術の社会への受容という視点を外してはならないだろう。

6.2.2 巨大作業ロボットのテラメカニクス

巨大作業ロボットが投入される現場は、土木業、鉱業をはじめ災害の被災地はもちろん、単に不整地であるのみならず、地盤が軟弱であることが予想される。脚機構、特に大型の2足歩行機構における軟弱地盤の歩行や足場の確保についての定量的な解析はまだないようであるが、クローラ式、車輪式車両の場合についてはテラメカニクス(走行力学)の分野でまとめられている[25]。前述の脚機構の優位性のうち、「接地面圧の低減化機能」、「能動的な足場を構成する機能」がこの問題に関連してくると思われるが、巨大作業ロボット実現のための要素技術開発という点でも、そして、現在のロボット技術と巨大作業ロボットと現実(地表)の三者の間の文字どおりの「接点」としても興味深い分野である。

6.3 巨大作業ロボットの普及への課題

本節では巨大作業ロボットが普及していく過程で直面するであろう社会的な課題や、人間の社会生活に及ぼす影響について見ていきたい。

6.3.1 社会生活への影響

論を進めるに当たっては、科学技術の導入によって社会生活が多大な影響を受けた事例を参考にできると考えられる。近世以降で考えれば、電気、ガス、原子力等のエネルギー、鉄道、自動車、飛行機といった輸送手段、電話、通信衛星、ラジオ、テレビジョン等の通信メディア等がすぐに思い浮かぶ。ほかにもトランジスタ、集積回路、計算機等もあるだろう。

巨大作業ロボットは、これらのどれにもびたりと当てはまるわけではないが、類似の技術を探せば、消費財やメディアではないこと、要素技術ではないこと、公共用途を含め事業に主に用いられるが大衆に対してサービスを提供するものではないこと、等の性質から、あえて言えば自動車ということになるだろうか。

自動車は人々に移動の自由をもたらし、輸送の新しい手段を提供した。その自由と利便さゆえに国家が公共事業として道路を建設することを人々は受け入れた。自動車産業の動向は国の経済動向を語るときに欠かせない話題であり、世界的に見ても自動車製造及び使用が、金属、石油等の資源の消費に占める割合は大きい。自動車の普及と道路

の整備はガソリン・スタンドやドライブ・イン、整備工場等の産業を産み出した。一方で大気汚染や騒音等の公害、道路開発による自然破壊といった害悪も人間社会に持ち込んでしまった[26]。

巨大作業ロボットは乗用車のように一般大衆が日常で使用する性質の機械ではないと考えられるため、特種車両に近い存在と見ることができる。そのため、社会的影響については次の相反する2つの可能性が予想される。

- 何らかの社会的な影響があるとしてもその影響の及ぶ範囲が比較的限られる。
- 作業ロボットの持つ社会的影響が、特殊なものとして、より鮮明に認識される。

後者の可能性の場合、巨大作業ロボットの普及が、自動車の場合に見られた道路建設のような公共投資を必要とした場合、一般大衆がその便益を必ずしも直接享受しないことから、投資や制度の改変を正当化することが難しくなる可能性につながると思われる。特にその影響が好ましいものでない場合には社会問題として受け取られるであろう。

6.3.2 法制度

前節において巨大作業ロボットは、自動車や特種車両を運転できる程度の技能で操作可能であるような機械であることを設定したが、その場合、操作がある程度容易であることから、作業ロボットがさまざまな分野に普及する可能性が高くなる半面、安全性の面から見て法的、制度的な規制が必要になると考えられる。なおここで取り上げる規制、制度といったものは、本章で想定する巨大作業ロボットが自律ロボットではないため、ロボットの行動規範ではなく、使用者である人間に対して適用されるものであることに注意する。

「パトレイバー」においては、レイバーを操縦するためには教習所において講習を受けた後免許を取得するといった制度が想定されているが、これはまず妥当な制度と言ってよいだろう。さらに建設機械とのアナロジーで考えるなら、安全講習等が、製造者あるいは使用業種ごとに運営されることが望ましい。また、巨大作業ロボットが、故意に犯罪行為に用いられる可能性が懸念される場合には、銃刀等の規制に見られるような、より厳格な法制度を世論が望むこともありうると思われる。

現在産業用ロボットに関する安全については、労働安全衛生法やJISの安全規則があるが、巨大作業ロボットの応用可能性を考えれば、こうした既存の制度の拡張のみで予想される問題点を網羅することは難しく、新たな立法や関連法の改正等も必要になることは十分予想される。

一方で既存制度による規制が巨大作業ロボットの普及に妨げとなる部分が見つかった場合、製造者側としては規制の緩和を望む場合もでてくるかもしれない。近年我が国の

各種規制、許認可制度の緩和を望む声は内外ともに大きい。巨大作業ロボットのための規制緩和は、単に技術普及のためだけの緩和であってほしくはない。

6.3.3 人間疎外

日本において他の先進諸国に比べて産業用ロボットの普及が進んだことの理由の一つとして、日本の工場労働者がロボットの導入に抵抗を比較的に見せなかったということが、よく挙げられている。欧米諸国においては、歴史的に見て19世紀初頭のイギリスにおけるラッドライト運動に代表されるような、機械一般に対する不信感や懐疑心、レイオフに対する不安、職能別労働組合といった組合組織のありかた等の理由によって抵抗が大きく、ロボット化が日本に比べて遅くなったと言われる。では我が国においては、作業ロボットの導入は産業用ロボットの場合と同様スムーズに行われるであろうか。

ラッドライト運動そのものは、純粋に経済的な背景を理由で発生したとするのが現在の解釈ではあるが、直接的な行為としては機械の打ち壊し、という暴動行為となって現われた。したがって、一般大衆の社会に対する漠然とした不安感の原因として「具体的に目に見える」機械を敵視したり、攻撃したりした側面は、新しい科学技術の普及を考える際には、大衆や、より大きくは社会全体のありうる反応として、見過ごすことができない。

SFの世界では、チャペックの「R.U.R」、フリッツ・ラングの手になる映画「メトロポリス」等に代表されるように、科学技術やそれによってもたらされる弊害や悪といったものをロボットが象徴している作品が見受けられる点は興味深い。その意味で、「ロボット」という言葉そのもののや、そこから想起されるイメージと、現実製造され、導入されていく機械としてのロボットとの間の擦り合わせが必要とされると思われる。

ラッドライト運動もここで挙げたSFにしても、文化的には欧米文化であり我が国にとっては異質である、と考えることもできるが、人間疎外の問題として以下のような点は我が国も無縁ではすまされないと考えられる。

労働者の疎外：工場の組み立てラインの自動化、ロボット化によって女子工員数が激減したことは指摘されているが、巨大作業ロボットの導入によっても何らかの形での雇用上の影響、あるいは雇用構造の変化は起こることは、絶対的に労働力が不足している場合でないかぎり不可避であろう。

特に建設・土木現場等においては、日雇い労働者の占める割合が大きい。ロボットの導入による効率化によって雇用上の影響をまず受けるのは、こうした人々であると考えられる。作業用ロボット導入の動機が、労働者不足の解消、労働条件の改善にあり、労働者自身の利益になることであっても、効率化によって「職を奪われた」という印象

を結果的にもたらすような事態になった場合、社会的な雇用問題となる可能性がある。工場へのロボット導入に際しては、こうした問題は配置替えや社員教育によって、すなわち企業内努力によって解決されてきたが、会社組織に属しない労働層に対しては同様のアプローチを用いることは困難であると考えられる。

巨大作業ロボットが操縦型のロボットであり、人間の作業者を直接置き換える存在ではないにしても、労働者がロボットを操縦する技能を身に付けていけない限り、技能のない労働者にとって作業ロボットの普及は失業を意味することになる。

大衆の疎外：我々人間は、自分より大きなものに対峙したときに畏怖感や恐怖感を感じることがある。その対象を、山、海、滝等の自然、象、クジラ等の大型動物、建築、乗り物、大型機械等の人工物に分類して考えてみると、直感的には、自然物よりも人工物、静止しているものよりも動くもの、に対してよりネガティブなイメージや恐怖感や威圧感を感じ取る傾向があるように思われる。

「パトレイバー」においては、レイバーを悪用した犯罪の取り締まりのために、対抗策として警察用の装備を持ったロボットを用いることが主題となっている。今日の日本警察においては、警察行為は制服警官、私服警官、機動隊員によって行われ、大型の装備といってもパトカーや機動隊の小型装甲車であるが、欧米ではこれらに加えて騎馬警官が群衆整理、暴徒管理に用いられている国もある。歴史上世界各地で、馬、象、ラクダといった動物を戦闘に用いてきたことを思い起こせば、騎馬警官はその機動性ととともに、(戦車等の軍事車両ほどではないにせよ)その大きさゆえの威圧感によって威力を発揮していると考えられる。その半面「民衆対権威」といった図式をいたずらに助長してしまうことは否定できない^{*}。

したがって、巨大作業ロボットが、直接民衆、群衆を対象として作業を行うことを想定しない場合でも、その巨大な存在自体が与える心理的な影響は、検討すべき重要な課題であると考えられる。大きさそのものをごまかすことはできないから、外見を工夫することによって印象を和らげる、というのはまず考えられる手法であろうが、形状、色彩、音等多面的なアプローチを必要とするであろう。

6.4 巨大作業ロボットは災害復旧の救世主か

本章では、「パトレイバー」に見られるような巨大作業ロボットを実現する場合に想定される、社会的な影響や問題点について概観した。本章で取り上げた内容は、網羅的であることはもとより意図していないが、具体的な製品とし

ての作業ロボットを開発する際には無関心ではいられない問題であると考えられる。さまざまな分野でロボット技術の応用の要請や可能性が検討され、開発努力が進められている今日、そうしたロボット達は、産業用ロボットよりも広範で大きな社会的影響力を持つ場合が多々でてくるだろう。日本社会において産業用ロボットに対する受容性が高かったからと言って、作業ロボットのような、一般大衆の日常生活の場で目にする機会があるロボットの場合にも、同じような寛大な反応を期待することはできない。ロボットを企画、開発、販売するときに、製造者はこうした問題を、技術開発によって解決するのか、社会や制度を変えたり、あるいはそうした変化を促すことによって解決するのか、具体的な個々の問題について決断を下さなければならない。

そして社会的に合意の得られる解決方法が見いだされたときに、災害復旧の救世主として、巨大作業ロボットが我々の目の前に出現するのかもしれない。(横田和隆)

7. お わ り に

ロボットは複合の学問である。

これは単に、旧来から言われている、機械力学や制御工学、あるいは計算機科学などの境界領域である、という意味にとどまらない。もっと広い視点に立って、生命の本質を探求する科学「サイエンス」と、科学的知見を人間生活に役立てる道具となす工学「エンジニアリング」との総合であると言っても過言ではない。

しかし、この2つをもってしても「ロボット」を包含するには十分でない我々は考える。サイエンスとエンジニアリングという、物質に視点を置く二極構造の中からは、「その研究は興味深いけれど、果たして役に立つのですか？」という葛藤の尺度しか見えてこない。

では、いったい何が欠けているのか？

思考や想像を通して心を豊かにする価値観、すなわち本稿の題材としたフィクション性やアミューズメント性を、堂々とした尺度として加えなければならないのではないだろうか。これまでの科学・技術的観点では、空想や娯楽は何かうしろめたい存在であったが、これらを積極的に取り入れ、育む価値観を導入しなければならないと、我々は主張する。

この第3の価値観、それを「ファンタジア」^{**}と呼ぶことにしよう。

ロボットとは「サイエンス」「エンジニアリング」そして「ファンタジア」の3者が重なり合う総合の学問であり、本論文はその実践への第一歩なのである。(吉田和哉)

^{*} 数年前ロンドンで人頭税反対のデモが暴動に転じた際、当局が騎馬警官の一群を投入したニュース映像は衝撃的であった。

^{**} この語は博物学者・荒俣宏[27]による。

参 考 文 献

- [1] ゆうき: “少年サンデーコミックス「機動警察パトレイバー 1」”, 小学館, 1988.
- [2] 鹿野他: “機動警察パトレイバー デジタル・ライブラリー”, vol. 01 (CD-ROM), バンダイビジュアル, 1993.
- [3] B. H. Newman: “Stance and gait in the flesh-eating dinosaur *Tyrannosaurus*,” *Biological Journal of the Linnean Society* 2, pp. 119-123, 1970.
- [4] アレクサンダー, 坂本訳: “恐竜の力学”, 地人書館, 1991.
- [5] 加藤他: “全油圧駆動による 2 足歩行ロボットの実現, 油圧と空気圧”, vol. 17, no. 1, 1986.
- [6] 国産エンジンデータブック, 91 年度版, 山海堂.
- [7] [特集]二足歩行ロボット, 日本ロボット学会誌 vol. 1, no. 3, 1983.
- [8] [特集]歩行ロボット, 日本ロボット学会誌 vol. 11, no. 3, 1993.
- [9] T. McGeer: “Passive Dynamic Walking,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 9, no. 2, April, 1990.
- [10] 広辞苑 第 4 版, 岩波書店, 1988.
- [11] 岩田: “人工現実感のもとらすメカトロニクスの新展開”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '92 講演論文集, vol. A, pp. 903-907, 1992.
- [12] 館: “テレロボティクスの世界”, 日本ロボット学会誌, vol. 11, no. 6, pp. 770-772, 1993.
- [13] 佐藤, 平井: “知的遠隔作業システム”, ロボット工学ハンドブック (日本ロボット学会編), コロナ社, pp. 594-599, 1990.
- [14] 佐藤, 松井, 平井: “人間との協調作業を特徴とする遠隔作業ロボットシステム”, 日本ロボット学会誌, vol. 9, no. 5, pp. 602-613, 1993.
- [15] Hiraiwa et al.: “EEG Topography Recognition by Neural Networks,” *IEEE Magazine, Engineering in Medicine and Biology*, vol. 9, no. 3, pp. 39-42, 1990.
- [16] R. Axelrod: “The Evolution of Cooperation,” Basic Books, 1984.
- [17] R. A. Brooks: “A robust layered control system for a mobile robot,” *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. RA-2, pp. 14-23, 1986.
- [18] D. Chapman: “Vision, Instruction and Action,” MIT Press, 1991.
- [19] S. Mahadevan and J. Connel: “Automatic programming of behavior-based robots using reinforcement learning,” *Artificial Intelligence*, vol. 55, pp. 311-365, 1992.
- [20] I. アシモフ, 小尾訳: “われはロボット”, 早川書房, 1953.
- [21] 広瀬: ロボットについての対話”, 日本ロボット学会誌, vol. 7, no. 4, pp. 385-390, 1989.
- [22] J. P. ホーガン: 未来の二つの顔, 創元推理文庫, 1979.
- [23] 例えば吉澤他: “自立移動式バイラテラルマニピュレータの開発”, 第 11 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1003-1004, 1993.
- [24] 広瀬, 米田: “実用的 4 足歩行機械の開発に向けて”, 日本ロボット学会誌, vol. 11, no. 3, pp. 360-365, 1993.
- [25] 室: “テラメカニクス—走行力学—” 技報堂出版, 1993.
- [26] 宇沢: “自動車の社会的費用”, 岩波新書 B 47, 岩波書店, 1974.
- [27] “アテネの学堂”, ジャストシステム, p 297, 1993.

付 録

本パネル討論会を企画, 実行するにあたり, 約 30 名の準備委員会を組織し, 総数 900 通を超える e-mail 討論を繰り返してきた。以下にそのごくごく一部を収録する。

●まずは前哨戦…?

吉田和哉(東京工業大学): ここではちょっと, ロボットの意志, 意識, 感情について議論してみたいのですが, 皆

さんいかがですか?

三浦純(大阪大学): 私自身はロボットが, いわゆる意識, 感情を持つ必要はないと思っていますが, 人間とのコミュニケーションなどを考えると扱う必要がありますかねえ。ほかの方はいかがですか?

國吉康夫(電子技術総合研究所): 僕は, ロボットに, 意識や感情はあるべきだという立場をとります。

ちょっと分かりにくい議論になりますが, 人間と密に接するロボットというのを考えたとき, そのロボットに意識や感情というものが無いということはありませんと主張しましょう。この主張は, ロボットに「意思回路」やら「感情回路」やらが必要だといっているのでは, 全然ありません。意志, 感情は, ほかの多くのプロセスのアクティビティの総体として創発されるものでしょう。

主張のポイントは 2 つあります。第 1 は, 意識や感情は, 基本的には, 他者との相互作用(社会生活)を前提として成立する, ということです。個体の中に絶対的に存在するようなものではなく, 他者とのインタラクションの上で成立する概念ではないか。

三浦: なるほど, ここまでは賛成。

國吉: 第 2 の点は, 人間とつき合うには, 「意識」や「感情」が必要だということ。人間の対象理解能力の大半は, 社会的行動をうまくこなすための能力, すなわち, 相手の行為を理解する能力に基盤をおいている。この重要な部分として, 相手の感情や意思を読みとり, それに対して的確に振舞うという能力がある。したがって, 逆にいえば, 感情や意識を読み取りようがないのにもかかわらず, 複雑な機能や操作を要求するシステムは, 人間にとって極めて扱いにくい。知能ロボットぐらいに複雑なシステムを, シロートに使うには, ユーザが読みとり思い描く人格のようなものと, そのシステムの振舞いとが自然に対応していることが要求される。

三浦: これには反対します。人間の社会生活において相手の行為を理解する能力が重要であるというのは, 確かにその通りですが, 人間がロボットを使うときに, ロボットに対して人格的なものを思い描くとは限らない。

要は, 人間からみて, 「ロボットが何をやっているか(やろうとしているか)分からない」状態が, 人間にとって扱いにくいのでしょうか。ですから, ロボットの「意図」が人間に伝われば十分ではないのですか?

例えば, 自動車を運転するとき, ウインカー, ブレーキランプ, パッシングなどで運転者の「意図」は結構伝わりますよね? そういう「意図」あるいは「状態」の伝達のプロトコルがちゃんとしていけばいいんじゃないか, ということです。

國吉: ええ, 僕の言いたいことは, 基本的に同じなのですが, その「意図」や「状態」を, 「意志」, 「感情」と言

い替えた方が自然かなと思うわけです。

吉田：でも、ウインカーは運転者の「意志」であって、自動車やロボットの「意志」ではない。問題はここなんです。仮に自動運転の車ができたとして、その車（ロボットと呼んでよい）が「意志」「感情」をもってそれらを表現することが、本当に必要ですか？ 不必要だと私は思います。ロボット側の動作状態（この次にどう動こうとしているか）が外からちゃんと見えている、ということは人間との共存において必要不可欠ですが、そしてそれをロボットの「意図」と呼んでも構いませんが、それは「意志」や「感情」とは別ものではないですか。

國吉：1つ反論ですが、自動車のライトのような単純なものであっても、そのプロトコルはそう簡単じゃない。

例えば、実際にプログラムを書くことを考えてみて下さい。実は、ライトの観測だけでは、駄目だったりします。回りの状況と組み合わせて意味をなす場合がほとんどなので、単純なテーブル参照ではだめでしょう。ユーザとの間で明示的に取り決めをすとしても、同じことです。状況を考慮しないで済むように、すべての情報を明示的に列挙するプロトコルを書こうとすれば、破綻することは分かりますよね。

三浦：ですから実際はある限定された条件のもとで機能するように、プロトコルを設計する。しかし、実環境において、設計範囲を超えた局面に遭遇したとき、もはや双方にとって明示的でなくなる。周囲の状況から、意味を推測してやらなければならない…

吉田：ええ、そのように、自分が期待した状況設定に反して、明示的でないシグナルが観測されたとき、それこそが「意志」とか「感情」であると、私は感じます。つまり、合理的約束で説明できない行動、こちらの推測を働かせないと意味付けできない行動、あるいはその原因が「意志」ないしは「感情」であると。そしてロボットには、そのような行動はとって欲しくない。

坪内孝司（東京大学）：ロボットに「意志」「意識」を持たせることが必要、不必要などという議論より、むしろ実際の環境の中でロボストに行動を実現できる枠組にはいかなる技術開発が必要なのか、といった具体的方向に議論を発展させるべきではないかと思うのですが、いかがなものでしょうか？

例えば、これまでの議論に関係する具体的例として「山彦」というロボットがあると思います。「山彦」には音声合成モジュールがのっていて、ロボットの内部状態を声に出すようにしています。右に障害物を見つければ「右」、前に障害物を見つければ「前」といわせるようにすれば、今動かしているプログラムがどこを走っているかの見当をつけることができ、デバッグの足しにできると考えたわけです。

三浦：これは立派なコミュニケーションの一例だと思い

ます。プログラムがどこを走っているかわかる、ということとはすなわちロボットの「状態」(どこに障害物を見つけた)や「意図」(いまどのように行動(しようと)しているか)が人間側に伝わるということですね。

坪内：これは…、つまるところ人間-ロボットコミュニケーションにおいて、人間同士のコミュニケーションと同レベルの言語が使えると便利ですよ、という話ですね。

三浦：もちろん、言葉は便利ですが、そうでなくても、先に例示した自動車のウインカーなどの、ある確立(?)したプロトコルに従って、こちらに伝えてくれればいいのではないかと。

坪内：おっしゃる通り、ロボットから発され、人間が知覚できるサインなら何でもいいですね。コミュニケーションとは結局、そういうプロトコルを作り上げる過程と、作り上げたプロトコルを用いて相手の言うことを解釈する過程の2つからなるということができましようか…

鹿野司(サイエンスライター)：これまでの議論を聞いてみると、工学的に、感情や意識とはなにかを定義しなおす必要があるのではと思います。ロボットに感情や意識というものを組み込むとするなら、ターゲットとなる問題の側から考えて、感情や意識とは工学的にはこういう意味だと定義しなおし、そこから実装の方法を探るという感じではないでしょうか。

臨床心理学のなかで、ぼくがいちばん気に入っているアドラー心理学では、「感情が原因で行動が引き起こされるわけではなく、感情は目的をもって創り出される」といいます。例えば、心の中から止めようのない怒りの感情が噴出してきて怒鳴るわけではなく、自分の思い通りに他者を操作するために怒りがつくられている、と考えるわけです。

例えばロボットの進路を塞いでいる人がいるとき、ロボットは「すみませんが、ここを通りたいのでどいていただけませんか?」と言ったとします。そのとき、その人がどかないと、ロボットはボリュームを少し上げて、同じ依頼を繰り返します。ひょっとして、最初の依頼が聞こえなかったのかもしれないから。でも、これが何度か繰り返されて、ボリュームがどんどん上がるといのは、ロボットの怒りの表現かもしれない。この繰り返し回数を学習でやらせると、怒りっぽいロボットとか、冷静なロボットとかできるかもしれませんね。

● 3 原則を皮切りに議論は核心へ…

梶田秀司(機械技術研究所)：前から思っていたのですがアシモフの3原則ってやつは、ロボットSFをつまらなくしている元凶と言えます。ありや、技術者の発想と言うよりは法律家の発想だ！

そもそも、「第1条 ロボットは人間に危害を加えてはならない、また危険を看過することにより人間に危害を及

ばしてはならない。」からして、フレーム問題の格好のお手本。ある行動が人間に危害を及ぼすかどうかを延々と計算し続けることによって、結局ロボットは何1つ行動を始められない。このようなルールをエクスプリシットに記述して、動作するシステムは、基本的にありえない。

國吉：いや、その解釈は違う。ご存知のように、アシモフ以前のロボットSFがお定まりの「ロボット奴隷の人類に対する反逆、人類を支配」といったフランケンシュタイン・コンプレステーマだったのを覆して、「人間と共に歩むロボット」の視点を可能にしたという意味で、3原則は大変に意義深いものです。この視点は、今日のロボティクスの目指す所とも共通点があり、先進的ともいえます。

フレーム問題ではという指摘ですが、アシモフのロボットは、決して、明示的なルール記述を展開して行動を生成しているわけではなく、むしろ、全体としてある規範に従う仕組みになっている。この点は、かなりはっきりと読みとれます。つまり、例のポジトロン頭脳というやつ設計理論の数学体系そのものに、3原則が埋め込まれているという記述があります。これはつまり、独立なモジュールとして「3原則モジュール」なるものがあるのではなく、すべての行動プログラムの動作を支配する基本原理として3原則が埋め込まれているという主張で、これは現在の計算機科学の流行である、制約ベースのプログラミングと似たような考え方です。

鹿野：普通の人が人に危害を加えないのは、3原則的な法律がそれを禁じているからでは「ない」でしょう。そうでなくても、人はおのずとそういう道を選ぼうとします。それはたぶん、そういう生き方が、不必要な衝突を避け、多くの協力者を得て、社会生活を営んでいくうえで、もっとも効率の良い方法だからではないでしょうか。

つまり、3原則的なルールは、外界からア・プリオリに強制されるのではなく、各個人が学習によって自分の頭の内部で作らだし、納得づくでそれに従っているのだと思います。ルールというものは本来、そうでなくてはならないもので、外部から無条件にこうせよと命ぜられたものは、抜け道を必ず見つけようとします。たとえば、中学高校などの服装規定といったワケノワカラン校則は、すでにフレーム問題化しているのではないのでしょうか。

國吉：僕が言いたいのはまさにこの点で、そういう「ルール」が頭の中のどこかに書いてある（ないし結線されている）のではなく、システム全体の動作原理の理論体系の柱として埋め込まれている点です。

こういうやり方は、行動を制約するのではなく、むしろ行動を導き、創り出す方に働くはずで。

鹿野：そもそも3原則というのは結局「人間奴隷の3原則」で、相手（ロボット）に対する信頼を著しく欠いているという点で、限界があるなあと思います。まあ、これは

ヨーロッパ人のロボットに対する（かつての）見方の反映なんでしょうけど。

実際に、人間に利益があるようなロボットを創るには、コミュニケーション論的にみて、こういうアプローチは全く非効率的だと、ぼくは思います。ロボットツール論、機械論の方たちは、ロボットに「知的なパートナー」や「友人」を求める必要はないと主張しますが、ロボットをツールとしてとことん便利なものにしようとする、協力的コミュニケーションの帰結としておのずと知的なパートナーになるのではないかと考えています。

國吉：ところで、ルディー・ラッカーの「ソフトウェア」に出てくるロボットは、GAベースのA-LIFE(現実のLIFE?)そのものです。面白いのは、もともと3原則を持つよう設計されたのに、進化の過程でそれを破るコードを獲得する点です。そして、人類に反逆して独立の世界を作る。古典的ロボット反逆ものと決定的に違うのは、このロボット世界が、人類の世界と対等に、共存共栄する（貿易、情報などで緊密に依存）という世界像を描いている点です。これは面白い。「ロボットは人間の命令に従わない限り、人間と共存する余地はない」というイメージを覆すものです。

梶田：モラヴェックが言っている人間の意識のロボットへの移し替えとかが出てくるやつですよ。ところで、モラヴェックは「脳は一種の機械であり、『心』とか『意識』というのは脳のその物理的な動作状態にすぎない」と主張しています。「魂」を仮定したがる2元論者への寓話としての意味がありますね。つまり「君の意識だって原理的にはコンピュータの中にコピーできるんだよ」という。

國吉：実はこの移し替えというやつが、僕には納得いかないのです。人間の心は、完全にソフトウェアで表現可能で、だから計算機上にコピーできるという（それが本の題名でもある）のですが、本当にそうだろうか？

知能というものは、環境との相互作用までひっくりめて理解しなければ意味がないので、脳の機能だけを独立に取り出してうんぬんしても、意味をなさないというのが僕の主張です。

吉田：私は、工学的、あるいは科学的に見て、どうやって、生物の内部に行動規範みたいなルールが作り出されていくのかという、メカニズムを探ることが、最も重要だと考えています。

例えば、種として存続するという最もファンダメンタルな行動規範は、進化（淘汰）という学習（一種の Try and Error ですよ）のプロセスを経て構造として遺伝子にインプリメントされてきた。一方、高等生物に見られる社会的規範のようなものは、文化（すなわちソフトウェア資産）として、親から子へと代々伝承されている。しかし、遺伝子にしても文化にしても、それ（例えば塩基配列）を直接

に演繹したところで具体的な個々の行動を引き出すことは、到底不可能である。ましてやその逆も。あまりにも途中の飛躍が大きすぎる。しかし、だからこそ我々はその間を埋めていかなければならない。それが、科学するものの任務であり、重要な動機である。

そこで登場するのがロボット工学者であって、ロボットに1つずつ行動のルールを教え込んでいくことは、我々が無意識のうちに学習してきた道徳や文化のようなものを1つずつ解釈していくことにほかならないのではないか。

このように考えるようになったのは、実は MIT の Brooks や東大の三浦先生の昆虫規範型の研究を見ていてなんですが、あの研究は、神様になって進化の道筋を再現しているのに匹敵するのではないかと。工学的に構造と機能の関係を理解し、機械的にそれを模倣するというのは、ロボットひいては生物の行動規範に対するアナリシス。

ところが、シンセシスの枠組はない。よくよく考えてみると、実は神様もシンセシスはしていないのではないかと？

ダーウィンの進化論の立場では、獲得形質は遺伝できない。言いかえると、こういう機能を持ちたい（高い木に届くために首を長くしたい）という欲求があっても、どこをどのように設計変更（シンセシス）すれば良いかの解析解はない。で、実用解は、設計パラメータや制御回路のコネクションをちょっとずつ変えたモデルをいっぱい作って動かしてみて、一番良かった（生存競争に勝ち残った）奴を採用しようというアルゴリズムすなわち“GA”ということになる。Brooks のロボットと“GA”という言葉が出会った瞬間、これはまさに「神の仕業の具現」への挑戦だなあと直観しました。

ロボット学会誌 11 巻 6 号の編集後記に、私はロボット＝ツール論を展開しましたが、実はこれは上の話と矛盾しません。研究者が「知能」というと、あるいは SF という流れで知能という、反射や本能といった非常に初歩的なインタラクションの部分ジャンプして、自律的に文章

を作ってくれるような知能、お願いしただけで手紙を書いてくれるロボット…みたいなところに行ってしまうような気がしたんです。われわれのアプローチは、これではいけないと思っています。

國吉：同感です。特に「知能」についていうならば、環境や人間とインタラクションできない「孤立した知能」では意味がない。

僕は、いままでそういうインタラクティブな知能の基盤に、「高度な自律的知能」が必須だと思ってました。自分の面倒が自分で見られるようになって始めて世間に目を向けるというわけです。これは常識的な考え方です。

しかし最近それは違うと思うようになった。知能を発達的に見たとき、非常に初期の段階で、根本的なところで、環境的あるいは社会的な要素というものが入っていなければならないと思い始めました。この見方は、新しい知能のイメージにつながると思います。

10 周年記念若手企画討論会 準備委員会

吉田和哉（東京工業大学）、菅野重樹、高西淳夫（早稲田大学）、浅間 一（理化学研究所）、横井一仁、前川 仁、梶田秀司、本間敬子、阪口健（機械技術研究所）、北垣高成、國吉康夫（電子技術総合研究所）、坪内孝司（東京大学）、木村 浩、佐野明人（電気通信大学）、横田和隆（宇都宮大学）、小菅一弘（名古屋大学）、横小路泰義（京都大学）、永井 清（立命館大学）、升谷保博、平井慎一、三浦純（大阪大学）、登尾啓史（大阪電気通信大学）、大須賀公一（大阪府立大学）、澤田千尋（日本 IBM 東京基礎研究所）、榊泰輔（安川電機製作所）、山下敏明（NEC 機能エレクトロニクス研究所）、上野浩史（清水建設宇宙開発室）、津坂祐司、松田幸子（豊田中央研究所）、岩城 敏（NTT ヒューマンインターフェース研究所）、鹿野 司（サイエンスライター）