

キカイのチームメイトと共に課題に挑む

Solving Challenges Together with The Artificial Teammates

山 田 茂 雄

要 約 自らの考えと決断で行動する主体性を持ち、人間と互いに考えや思いを察しあい協調する能力を備える自律ロボットやソフトウェアエージェントが世に現れれば、それらは私たちが問題を乗り越え課題を達成するための強力なパートナーとなる。それら「キカイ」は私たちのチームの一員として工場の生産ラインで皆と肩を並べて物を作ったり、課題を前に皆で考えアイデアを創ったり・答えを探したり・決断したり、地震や原発事故など災害対応ではレスキュー隊の一員として皆で回り、現場の状況を理解し、息を合わせて行動して任務を全うしたりする。その来たるべき世界を展望し、キカイの知能と能力との関連を考察してそれら世界を実現せしめる問いを立て課題を導出する。

Abstract If autonomous robots and software agents — that have the independence to act based on their own thoughts and decisions, and have the ability to cooperate with humans, perceive in thoughts of partners — appear in the world, they will be our powerful partners to surmount the problems and achieve the goals. As a member of our team, those “artificial team-mates” work side-by-side with us on the factory production line to make products. We, humans and the artificial team-mates, jointly think to solve problems, generate ideas, search for answers and make decisions. Once a disaster such as earthquakes, a nuclear accident happened, we all work together as a member of the rescue team to respond to that, understand the situation, anticipate partner’s next tasks, act jointly and fulfill our mission. The vision of the world to come and the key of intellectual capabilities to realize it, as well as the technological challenges to engineer them, are presented.

1. はじめに

世の中には人間のちからだけ、あるいは技術の恩恵だけでは解けない問題や課題がある。たとえば津波により電源を失い炉心溶融に至った原子炉を安全に廃炉する課題や未知のウイルスが引き起こす感染症の爆発的流行と入院症例のケアの問題、自動運転車が市街地の中を歩行者や自転車・他の車両と道路を共用し、無事に目的地まで自律走行する課題などがそれである。生身のからだは機械のように強靱でなく、また毒物や感染、放射線などに対し脆弱であり人が活動できる環境は狭い。先に例示したような困難な課題に私たちは科学技術のちからを用いて立ち向かう。事故を起こした原子力発電所には状況を把握するために遠隔操作により過酷な環境の中を原子炉格納容器まで自走してゆき炉心の状態を観察するロボットを投入し、世界規模で広がっているウイルス感染症 COVID-19 の患者を受け入れる病院には隔離病棟内のウイルスを不活性化するために院内を端から端まで巡回し紫外線を照射してゆくロボットを導入して医療従事者が病院内で感染することを抑止する。インターネットショップで受注した品物をすぐさま個人宅に届けるために物流拠点から送り先まで自走して荷を運ぶロボット車を導入し、物流現場ではたらく人を過酷な作業から開放する。だが複雑かつ不確かに変化し予期せぬ

出来事に満ちあふれる現場ではこれらロボットは時に無力となる。なぜならそれらはあらかじめ想定した条件のもとで動くようプログラムされた自動装置であって主体性を持たないからである。主体性は決断力、すなわち直観と自らの価値観とで行動を決めるちからであり、合理的に答えを導き出せない状況でも止まらずに前に進むちからの源である。現実にはロボットの能力と人の決断力とを合わせてどうにか問題や課題に取り組むことができるようになる。

自らの考えと決断で行動し、人間と互いに考えや思いを察しあい協調するちからを備える自律ロボットやソフトウェアエージェントが世に現れれば、それらは私たちが問題を乗り越え課題を達成するための強力なパートナーとなる。ここではそれらを「キカイ」と呼ぶ。本稿では、キカイと人が協調して問題や課題に取り組むという世界を展望し、キカイの知能と能力との関連を考察してそれら世界を実現せしめる問いを立て課題を導出する。

2. キカイのチームメイトと共に課題に挑む

私たちの日常には予期できないことが起こる。そのような不確かな環境で活動するキカイは己の機能や考え方・知識に関する弱点を知り、それを補う手立てを自ら導き出し行動する。時に自力では解決できない状況に陥れば周囲の人や他のキカイから力を借りて問題を乗り越え、また時に他者の問題解決に力を添える。この、人間とは異なる知能や身体的能力を持つ、他者の気持ちと考えを理解する能力と状況を即断し行動するちからを備えるキカイは、私たちと共に困難な問題や課題へ立ち向かうチームの一員となる。

本章ではそういう来たるべき世界を三つのケースシナリオで示す。ひとつは人と肩を並べて物を作る、ひとつは皆で考えアイデアを創る・答えを探す・決断する、ひとつは皆で回り現場で状況を理解し息を合わせて行動して任務を全うする、である。

2.1 作る：食品加工ラインの協働ロボット

美味しいものを今すぐに食べたい。そんなニーズに応えるべくコンビニエンスストアの棚に並ぶお弁当やサンドウィッチ・おにぎりなどの中食は食品加工工場で生産される。鮮度の高いものをそのまま冷凍せずに消費者の元に届けるために消費期限は短く、一度に作る数量も少ない。また、ひとつの生産ラインで何種類もの食品を生産する。食品材料は生ものであるので、準備し・ラインに運び・加工し・冷蔵保管庫へ格納という一連の常温での工程に許される時間は短い。そのため材料は都度必要なだけの量を準備し加工してゆく。

現在、高度な機械化が進んでいるが人でなければできない工程も多くあり、そこではラインではたらく人たちが臨戦態勢でのぞむ。流れ作業でミートソーススパゲッティを作るラインでは、ベルトコンベアに人が容器皿を並べ、そこに茹で上がったパスタ麺を人が計量しつつ盛り付け、その隣でロボットがソースを上注ぐ。それを人がヘラで綺麗に均し、その上にロボットが粉チーズを振りかける。ロボットが透明な蓋を被せてミートソーススパゲッティ弁当がほぼ完成する。金属検知器を通過した後に人がお弁当の見栄えを目視でチェックし、盛り付け不良の品があればねる。最後に蓋に製造シールを貼り、箱に詰めてゆく。チームの中には格段に高品質で時間あたりの生産能力が高いチームがある。そのチームでは、流れ作業の中で自分がミスすればそれを次工程のチームメイトに伝え、また、前工程のチームメイトの作業に齟齬を見つければ寡黙にそれを修正しつつ自分の作業工程を進める。

今日ラインに導入されている協働ロボットは人と隔離されずに同じ空間で作業を分担し、

ソースを注いだり容器を蓋で閉じたりするタスクを担っているが、それらは人と協調することではなく、単に場を共有しているにすぎない。それらに代わる、他者の気持ちと考えを理解する能力と状況を即断し行動するちからを備えるキカイはそのようなベストチームの一員として迎えられるだろう。肩を並べて食品材料を順に容器へ詰めてゆく加工工程の生産ラインでは、キカイは「失敗作は出さない」という目標をチームの皆と共有し、パートナーの発する現場のことばからその考えや思いを察して相手の失敗をリカバリーする。また、パートナーが今何をしているのかを捉えて次の動きを予期し、それを見越して己の作業を進めてゆく。このようなチームの挙動は誰かが定めた規則で律されたものではない。それはキカイと人たちがチームの目的を記憶に留め、作業の失敗を互いに補い合いながらそれを達成するチームのコミュニケーションから自然に生まれてくる（創発する）。キカイは初めてラインに投入された時点では現場で発せられることばの意味を理解しないが、皆と肩を並べて作業を進める中でそれらことばの示す意味、すなわちそれが発せられた時には己にどのような行動を期待されているのかを学んでゆく。そうしてキカイはベストチームの一員へと成長してゆく。

製品出荷の締め切り時刻までに全量を生産し終えることと品質を保つことはチームの誰もが常に気に留めることである。人とは異なり、キカイのチームメイトはそのからだの延長にも感覚器を持ち、ラインのベルトコンベアに埋め込まれたセンサーから重さを捉えたり、設備の制御装置や検査器からは現在の生産速度や生産高などの指標データを読み出したりする。天井に設置された光学センサーでライン作業の工程全体を俯瞰し、戻しや手直しなどの事象を捉えて品質の変動傾向を察知する。キカイはこれら指標の時系列から予測モデルを学び、それを用いて現時点での全量生産完了時刻を推定し、また品質の低下や障害発生の予兆などを捉える。さらにはそれらをチームメイトと共有し、最適な生産速度を維持できるようにラインを統率するリーダーを支える。

こうして私たち消費者は、新鮮で美しく盛り付けられた好みの一品をいつでも欲しい時に手に入れ、美味しくいただくことができる。

2.2 創る・答えを探す・決断する：「キカイの参加者」がいる会議

私たちがチームで問題や課題に挑むときにはそれを皆で共有し・プランを練り・決断し・実行するという過程を踏む。課題の共有から始まりプランの決断に至る中では皆で集い、討議を通じて自分の考えや思いを述べたり相手の考えを察したりする。そこにキカイが一員として加わり議論が加速する。図1はキカイの参加者のいるそのような場面のスケッチである。ある不動産デベロッパーが新しく開発するリゾートのコンセプトを皆で固めている。壁や天井はドーム型ディスプレイと一体化しており立地場所のパノラマ風景が描き出されている。向かって右側の二人は互いにことばを交わしながらコンセプトの幹となるキーワードをホワイトボードに書き出している。真ん中では、3人がホログラムを囲んでことばやジェスチャーを使って建物の外観を検討している。そこは単なる静的な空間ではなく、人が意見を交わし共に考える過程に積極的にはたらきかける手だてと知能とを備えたキカイのいる空間である。「もっと、もっと、斬新なアイデアを創りたい」「対立する考えの中から納得のゆく決断をしたい」「より優れた解決法を見つけないか」——このような「皆で考える」という活動に空間を身体とするキカイが加わり共考（co-thinking）活動が活性化するよう場にはたらきかける。それは、皆が話したり書き出したりすることばを捉え、議論の流れに乗って関連する情報リソースを示したりパノ

ラマ風景を書き換えたりして新たな気づきへの糸口を示す。まだ世の中には存在しない新奇なものやコト（サービス）について考えるときにはこれまでの経験に囚われない広い観点での思考の拡散が必要となる。しかし、私たちには「固定観念にしばられるために新しい観点から思考できない」という思考の固着^[12,14]があり、どうしても狭い観点で物事を考える傾向が強い。キカイの思考にはそのような固着はなく、人の苦手な偏りのない類推の具体例を示して思いもよらない観点から刺激を出すことができる。さらには、このような思考の跳躍だけではなく、共通性のある他の例を示すことで「別の物に置き換えて考えてみる」という思考を活性させる。

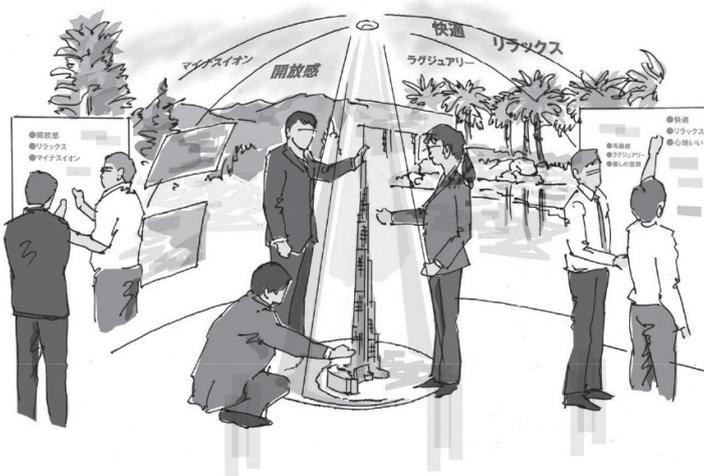


図1 キカイの参加者のいる会議のスケッチ

キカイは当事者として議論に参加するのみならず、ファシリテータとしての役割も担う。グループワークのファシリテーション技術のひとつに、「スクライブ (scribe)*1」と呼ばれるものがある。スクライブの役割を担う人が、議論される内容の要点をその場で文字や図画として壁面ボードなどに逐次書き出してゆく。それを眺めればこれまで交わされた議論の文脈を一望することができる。スクライブには議論の流れの中で要点を捉えてそれを簡潔なことば（文字）に要約したりイラストとして描いたりする専門的な知識と素養が求められ、キカイにはこのスクライブの役割を担うことが期待される。

地球規模の気候変動など人類が直面する複雑な問題に対する解をたくさんの人で深く考えて決断するときには、問題や候補解を皆で系統立てて整理し理解し、分析し、一番有効な策を決断するという過程を経る。このような問題領域では皆が物理的な空間を共にして議論する形態は相応しくなく、インターネットなどの情報空間内で同時並行にて議論を進める。現代ではWebフォーラムやWiki、ブログ、Twitterなどを通じて、たくさんの人々が参加する世界規模の討議が行われているが、それらのアプローチが必ずしも成功しているとは言えない。それらの抱える問題には、議論が進む中で論点がバラバラに散らばってしまい論点が偏ったり重複したりして網羅的な議論ができないことや、論点とは関係のない書き込みやスパムなどのノイズが多く混入し有用な意見がノイズの中に埋もれてしまうことなどがある。Kleinら^[2,3]はこの問題に対し、議論の論点を(1) issue = 提起する課題 (2) idea = それを解決するアイデア (3) argument = そのアイデアに賛同するまたは反対する意見、の三つのカテゴリーに分け、それ

らを木構造ネットワークのノードとして配置して整理し討論を可視化する手法（図2 argument map）の有効性を見出している。このようなマップをインターネット情報空間内に置き、そこに皆で考えをポストして討議を進める。特定の国家や民族・団体などを代表せず中立性を持つと皆が認めるキカイ——インターネット上のソフトウェアエージェント——が討議を管理するモデレータとなり、新たにポストされた論点の掲載を承認し、それが相応しい場所に置かれるようにマップを整えてゆく。こうして人とキカイとで整理された討論の軌跡は特定のイデオロギーや価値観に偏ることなく、課題を解くために皆が合意できる決断へと導く。

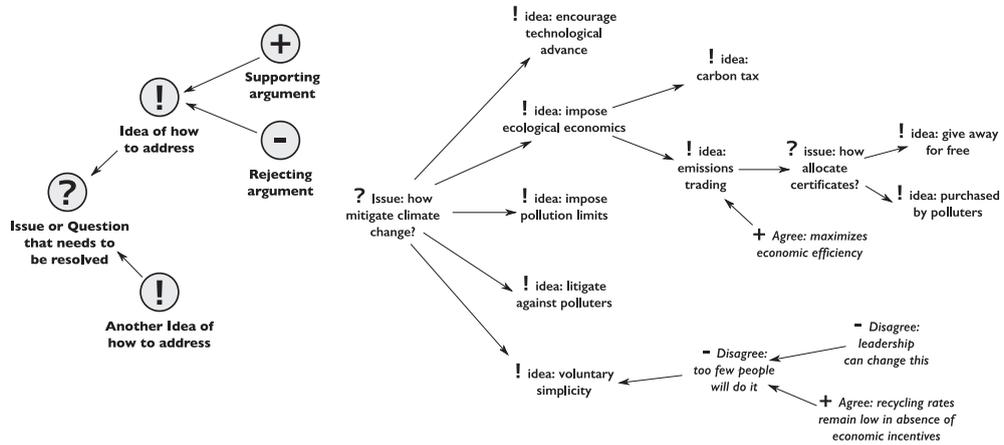


図2 Argument map の例 (出典: Klein et al. [3, 2])

2.3 図る・理解する・息を合わせる：大規模災害時のレスキュー部隊

首都が直下型地震に見舞われ広域で建物が倒壊している。鉄道などの公共輸送機関の機能は麻痺し、道路は障害物や高架橋の落下などにより至る所で分断されている。無線通信基地局の設備にも被害が及びモバイル機器の通信状態は芳しくない。そのような状況下で、倒壊した建物の瓦礫の下敷きになっている生存者を救出すべくキカイと人の混成チームから成るレスキュー隊が活動する。多数の自律飛行ドローンが上空から建物の倒壊状況を広範囲にサーベイし、生存者のいる可能性を評価して地図にマークしてゆく。また、倒壊物や不動態などで道路が塞がれ分断されている中、通行可能な区間を部隊が把握できるよう、道路の状態をサーベイする。地上では、それら情報を頼りにレスキュー部隊が生存者のいる可能性の高いターゲットを目指して前線基地からの最短ルートを探し出し現場へ向かう。倒壊現場では瓦礫の中に閉じ込められた生存者を探し出す活動と救出した重傷者の救命処置と搬送、怪我人への応急手当てなどの救護活動が並行して進められている。

時々刻々と変化してゆく状況のもとで一刻を争うレスキュー活動では、隊員の一挙一動をリアルタイムに統率する中央集権型の指揮系統は機能しない。そこではチームの皆が状況をすべて把握しているということは望めず、さらには互いに意図を確認しあう手段と機会も限られる。隊員は断片的な情報と自分の目を頼りに状況を理解し、作戦に基づき己のとるべき行動を決めて主体的に動き任務を全うする。また隊員にはあうんの呼吸で連携し俊敏に行動することが求められる。

それが人であれキカイであれ良いチームメイトはパートナーがどうしようとしているのかを

考え、その動きを見越して行動する。おのおのがそのように動けるよう、作戦開始前のブリーフィングで、誰が・いつ・何を・どのようにするのかという作戦を確認しあって皆がそれに合意する。作戦実行時には現場で状況を理解し、それに即して自分が実際にとるべき行動を決める。行動の中では、リアルタイムにパートナーのタスクの進行状況や動きを捉え、いま何をしているのか・次に何が必要となるのかを察し、その動きを見越して自分の動きを動的に決めてゆく。また、チームのおのおのはチームメイトのとる行動から互いの好みや癖を学びとり、それらを加味して行動し、自分がいつ・どの行動をとることがチームにとり有益なのかを学んでゆく。こうしてチームは信頼の絆で結ばれたパフォーマンスの高いチームへと成長してゆく。

3. それをどうして実現させるか

前章では、自らの考えと決断で行動する主体性と、考えや思いを人と察しあう能力とを備えるキカイが、人と共に問題を乗り越え課題を達成する世界を展望した。キカイは皆と肩を並べて物を作ったり、皆で考えアイデアを創ったり・答えを探したり・決断したり、皆で図り、現場の状況を理解し、息を合わせて行動し任務を全うしたりするチームの一員として行動する。だが、そのようなものは未だ世に存在しない。筆者は人と協調して行動するロボットすなわちキカイに求める要求を知能という観点から考察した^[13]。それらは、(1) 直観的な思考すなわちコモンセンス^[4,5,11]で世界を捉え行動する、(2) 予期せぬ未知の状況に遭遇しても己の考えや行動を内省し自らゴールを生成し行動する、(3) 自然なことばのやりとりで考えや思いを人や他のロボットと互いに推しはかる、(4) 人々や他のロボットらと協調して行動しゴールを達成する、(5) 人の感情と付き合う、である。これら要求を糸口として、本章ではキカイの知能と能力との関連を考え、展望した世界実現に向けた大きな課題となる問いを立てて、その答えとなる達成すべき課題を導出する。

3.1 皆と肩を並べて物を作る

2.1 節で述べた流れ作業の食品加工ラインで人と並んで食材を盛り付けてゆくキカイの実現には大きな課題となる問いがいくつかある。ひとつは、茹で上がったパスタ麺や刻みネギのような柔らかくかたちの定まらない食材を掴んだり盛り付けたり修正したりするスキルをどうして獲得するかという問いである。

問い1 (新たな課題を試みスキルを獲得し発達する)。キカイは、未だ試みたことのない新たな課題(どのように駆動機構を動かせば目的とする状態に達するかを知らない課題)に対して、その達成に至るための有益な動作を自ら見出し(学び)、それをスキルとして獲得し発達してゆくことができるだろうか。◇

この問いは、過去に経験してきた感覚-運動知識を新たな課題を解くために用いる知識統合の問題を含んでいる。私たちは、手足を使って物を動かしたり積み上げたり紐を結んだりボールを投げたりするときに、深く考えることなく自然にからだは動く。それは生まれた時から今日に至るまでの間の感覚-運動体験を通じて〈現在の状態+行動→期待される状態〉というコモンセンス知識を獲得してきた故である(図3)。どう体を動かせば目的とする状態に達するかを知らない、初めて取り組む課題に対しても、それまでに獲得したコモンセンス知識を用いてさまざまな体の動かし方を試しながら課題をうまくこなす動作を学んでゆく。このようなコモンセンス知識をいかにして人工的なエージェントが獲得できるのか——それは人工知能研究

における未解決問題のひとつとなっている。キカイすなわちエージェントが物を掴んだり置いたりするためにその腕先に装着されるハンドは人間の手とは異なる素材・機構でデザインされ実装される。エージェントがそれを使って食材を掴んだり皿に盛り付けたり修正したりする動作を学びとることを実現するために、ロボット工学ではそれを強化学習や模倣学習などの機械学習の手法で解く。強化学習の場合にはランダムに初期化された行動方略^{*2}から駆動機構の動作の試行と学習が始まり、試行のための行動選択もランダムである。エージェントの設計者はその行動が引き起こした外界の変化を鑑みて、都度、それがどの程度「良い」かを算出しそれに応じた量の報酬をエージェントに与える。エージェントは得られた報酬から行動の価値を評価し方略を見直す。このような試行ステップ：「方略に基づいて行動を選択→行動しその価値を評価→方略を見直す→…」の繰り返しを通じてエージェントは課題を解く有効な行動方略^{*3}を見つける（学習してゆく）。しかし、エージェントが目的とする動作を試行錯誤の繰り返しから学び取るという強化学習のシナリオにはいくつかの問題がある。ひとつには、実世界ではエージェントが動作を学ぶための報酬が外部から与えられることは極稀であり、時に全く報酬が得られず学習が進まないという問題である。またひとつには、新たなゴールを加えるとそれまで学習した動作ができなくなる（忘却してしまう）という問題である。再利用可能な「使えるモデル」とはどんなモデルなのか。それは、「現在の状況において行動 $a_{i=1,2,\dots,n}$ を取るとき、それぞれこの先どのくらいの報酬が期待できるか」という知識のモデルではなくて、「現在の状況にてその行動を取るとどうなるのか」というコモンセンスの知識モデル（図3）である。したがって、先の問いに対し考え得る解のひとつは、つぎの二つの課題を達成することとなる。



図3 If + Do Then 知識（出典：[5]）

課題 1.1 (感覚-運動のコモンセンス知識獲得). 開いた世界の中でキカイが自らの好奇心を原動力に感覚-運動体験を繰り返して感覚-運動のコモンセンス知識：〈if 世界の状態 + do 行動 → then 世界の新たな状態〉を学び獲得してゆく。◇

課題 1.2 (発達的なスキル獲得). キカイが、未だ試みたことのない新たな課題（どのように駆動機構を動かせば目的とする状態に達するかを知らない課題）に対して、既に有する感覚-運動のコモンセンス知識を用いてその達成に至るための有益な動作列を自ら見出し（学び）、それを新たなコモンセンス知識すなわちスキルとして獲得する。そうして、さらなる高度な課題を達成できるよう発達してゆく。◇

ここにもうひとつの問いが重なる。それは、キカイが目の前に存在する物や今起きている出来事を人のように捉えられるかという問いである。

問い 2 (直感的な思考で人のように世界を捉える). キカイが直感的な思考で世界の状態やその変化を人のように捉えることができるか。◇

人はどのように世界を知覚し捉えるのか。私たちは世界を捉えた心的なモデルを持っている。それは目の前にあるものを知覚したり状況を認識したりそれらについて考えたりするとき

の基底をなしている。それらの中でつぎに示すような一般的で広く適用できるものは私たちの直観的な認識や思考すなわちコモンセンスの基底をなしている：〈手に持っているモノを離せば落ちる〉〈こぼした水は元には戻らない〉〈水はモノを支えずに包み込む〉〈モノは落ちる（逆はない）〉〈背の高いモノは倒れる〉…。人はこの世に生まれたときにはまだそのような心的モデルを持っておらず、からだどころが発達してゆく中で日々の体験からそれらを獲得し形成してゆく^[8]。さらには、それらは私たちの中で「当たり前のこと」として共有されている。コモンセンスは世界を直観的に捉えて考える能力である。人はそれを持つことで熟考せずとも目の前にあるものの特性を推測したり、物事の変化を予期したり、過去に起こったであろう事象を推測したり、チームメイトのゴールを察したりすることができる。

ここで、問いにある「人のように世界を捉える」ということばの示すところに注意したい。それは必ずしも人と同じように世界を捉えることを示すものではない。人とキカイはいずれも感覚-行動体験を通じてコモンセンスを獲得してゆくが、その基底を成す心的モデルは両者の間で異なる。なぜなら人とキカイとでは物やそれらの変化の持つ意味が異なるからである^[10]。それゆえに、目の前にある物や今起きている出来事に対して、その特性の捉え方や事の変化を予期する対象も異なったものになる。すなわち、両者の間で「当たり前のこと」が異なってくる。たとえば、皿に盛るパスタ麺は人にとっては食べる物であって、皿から落ちてしまえばそれでおしまいとなる。だが、キカイにとってはそれは形の定まらない紐状のものが絡んでいる塊であり、それはどこに置いてもかわらない。さらにはそれを皿の上に「美味しそうに見えるよう、見栄え良く」盛るという作業の要求に対する捉え方も異なってくる。しかしながら、たとえキカイが人と同じように世界を捉えずとも、世界に関する心的モデルを自らの感覚-運動体験を通して構築し（学び）、物の力学的特性やよくある出来事などを直感的に捉えることはキカイが複雑なタスクを自在にこなすための核となる能力である。したがって、問いへの答えは次の課題を達成することとなる。

課題 2.1 (直感的な思考で人のように世界を捉える知覚機構)。キカイが人のように世界を捉え複雑なタスクを自在にこなすことができるよう、コモンセンス知識を用いて直観的な思考で世界を捉える知覚機構を設計する。それは単純に物を知覚するだけではなく、周辺に「何が」ありそれらを含めて世界の状態がどう変化するかを予期することができる知覚機構である。◇

さらなるひとつの問いは、人とキカイとのコミュニケーションに関するものである。

問い 3 (現場の中で交わされる人の自然なことば遣いを学びチームで任務を全うする)。前工程と後工程の人やキカイたちが作業の失敗を互いにリカバリーし合いながらチームで任務を全うするコミュニケーションをどうして実現するか。◇

ここに、コミュニケーションとは相手の考えや思いを見込み合いながら共に目的を全うする集団活動である。流れ作業の中でうまく食材を乗せられずにベルトコンベアが進んでしまったときには後工程の相手にそれを伝えたい（失敗したからその皿をラインから除外してほしい）。反射的に出る「ヨケトイテ！（除けといて！）」と云うことばがけでその思いが相手に伝わる（かもしれない）。この、現場の中で交わされる人の自然なことば遣いをキカイが獲得することはできるか。それはいわゆる自然言語処理技術の扱う問題とは異なる問題である。「自然なことば」は単に発声に留まらず、時には皿を指差すジェスチャーであったりする。それは何かを示すために人の発する「サイン」である。

サインは何を指し示すのか。その「意味」は何か。パース^[7]はサインとその意味とを対応づ

ける心的作用を記号過程 (semiosis {Sémeiösis}) と呼び、それをつぎのように説明する。

“A sign, or representamen, is something which stands to somebody for something in some respect or capacity. It addresses somebody, that is, creates in the mind of that person an equivalent sign, or perhaps a more developed sign. That sign which it creates I call the interpretant of the first sign. The sign stands for something, its object. It stands for that object, not in all respects, but in reference to a sort of idea, which I have sometimes called the ground of the representamen.” (Peirce: CP 2.228**)

(サインあるいは表意体は、ある人にとって何らかの観点もしくは何らかの能力において何かの代わりをするものである。サインは誰かに語りかける、つまりその誰かのところの中に等価なサインもしくはさらに展開されたサインを作り出す。その作り出されたサインを私は第一のサインの解釈項と呼ぶことにする。サインはあるもの、つまりその対象の代わりをする。サインがその対象の代わりをするのはすべての観点においてではなく、ある種の思念との関係においてであり、それは私が表意体の基と呼んできたものである。)

記号過程ではサイン (表意体)・対象・解釈項という三つの相関項の関係をこころの中につくりだす (図4)。サイン (表意体) が示す対象を解釈・理解するためにこころの中につくりだされた解釈項は、別の新たなサインとなり、それが次の新たな記号の解釈過程を生み、さらにその過程でつくられた解釈項が... という再帰的な解釈の連鎖の中からサインの意味が生まれてくる。もし運が良ければ、それはサインを発した人の意味するところと一致する。流れ作業の中、隣の前工程の人から「ヨケイテ！」と声をかけられたとき、その意味することをどう捉えるべきか。それは「自分が何か物を除ける」サインであって、「自分がどこかに避ける」ことではない。今、自分は前工程で皿に盛り付けられた食材の上にさらに別の食材を盛り付ける作業をしているのだから、「自分が皿をコンベアから除ける (取り除く)」ことだろう。これ

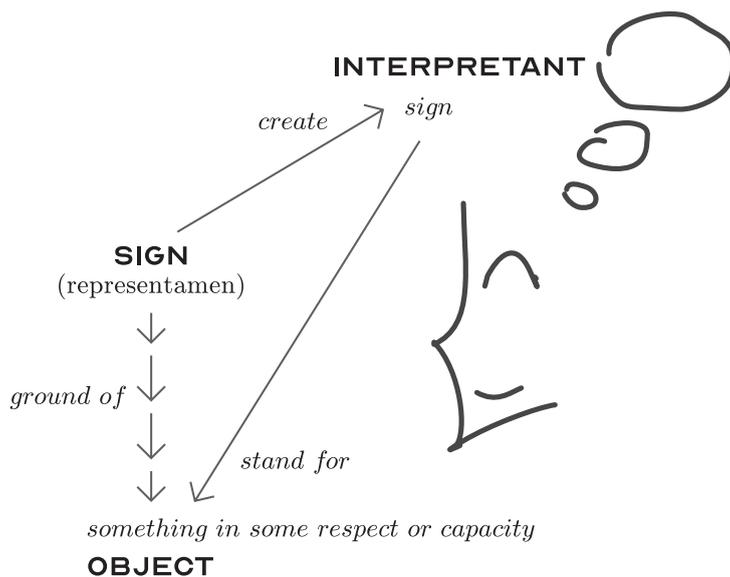


図4 記号過程

までに何度も皿に盛り付ける作業をしているので皿がどういうものかを知っているが、世の中には「皿」という物は存在せず、それは、「あの皿」や「この皿」と具体的に触れることのできるものでなければならない。目の前に「盛り付けに失敗した皿」が流れてきたので、「自分がその盛り付けに失敗した皿をコンベアから除ける（取り除く）」というサインと捉える。それは不良品を出さないというチームのゴール達成に合致し、ここにコミュニケーションが成立する。この過程は秒オーダーの時間で完了する。コンベア上を流れる皿の速度は工程あたり数秒程度のペースであり、もしサインの理解にそれ以上の時間を要すればその間に皿は次工程へ流れていってしまい、コミュニケーションは失敗に終わる。

前工程と後工程の人やキカイたちと作業の失敗を互いにリカバリーし合いながらチームで任務を全うするコミュニケーション能力は、現場の中で交わされる人の自然なことば遣い、すなわちチームメイトの出すサインの意味を捉え、またサインをチームメイトに出す能力に他ならない。このようなサインの意味はあらかじめ合意により決められるのではなくて、共にものを作る過程の中で自然に生まれてくる。したがって、キカイはその能力を現場での経験を通じて学び獲得せねばならない。

課題 3.1 (現場の中で交わされる人のサインを学びつつ主体的に行動)。現場で交わされるチームメイトのサインとそれが示す「世界のあるべき状態」との関連を学び、そこに到達するよう主体的に行動する。キカイはパートナーとの共同作業の中で、(i) 相手の発する自然なことばがけやジェスチャーなどをサイン（表意体）として知覚し、(ii) チームのゴールに照らしてそのサインの示す「世界のあるべき状態」をイメージして、(iii) そこに達するよう（感覚-運動のコモンセンス知識を用いて）主体的に行動する。サインを発したパートナーは、(iv) キカイの行動と自分の意図との間に食い違いがあれば、そのことをフィードバックする。こうしてキカイはサインと「世界のあるべき状態」との関連づけを共同作業の体験を通じて獲得してゆく。◇

3.2 皆で考える：アイデアを創る・答えを探す・決断する

私たちにとってことばは考えるための道具であり、また他と協調して活動するための自然なインタフェースでもある。先の3.1節の中でのものづくりの現場で使われる自然なインタフェースとしてのことばであるサイン（表意体）の意味をキカイが獲得する課題に触れたが、ここではことばの持つもうひとつの側面すなわち考える道具としての側面について考える。

ことばを使って考える能力がキカイに備われば、私たちとキカイの混成チームで共に考え、課題を実現するためのアイデアを練ったり・問題の答えを求めたり・目的を達成するための実行プランを作ったりすることができるようになる。しかしここに大きな課題となる問いがある。**問い4 (人がその考えを示すことばをキカイは人のようには解釈できないことを回避する)**。皆で討議し考える場で人は己の考えを発話や板書などのことばにして発する。しかしキカイはそのことばの意味することすなわち人の考えたことを人と同じようには捉えることができない。人とキカイの混成チームで共に考えることが成立するよう、この問題をどうして回避するか。◇

キカイは何ゆえに人と同じようにはことばを捉えることはできないのか。私たちには意識がある。それは自己言及的な閉じた系であり、己が見たり・聞いたり・読んだり・感じたりするものは、その閉じた系の文脈で知覚・解釈される。また系が閉じている故、その内部で起こっ

ている現象を外から直接観測したり他者に見せたりすることはできない。目の前にないもの（目に見えず実際に触れて感じることはできないもの）や現在進行中ではない過去や未来のことなどの想像上のものごと、さらには自分の意識の中にある主観的な体験や考えや思いなどを対象として他者に示すためには、それらをことば——サイン（表意体）——にして示さねばならない。先に述べた記号過程を別の形で模式化する図5にて、話者Sは示したい対象 i_0 をサイン e_0 として発し、それを受けたチームメイトRはそのサインの意味するところを理解するために意識の中に解釈項 i_1 を作り出す。それが新たな別のサインとなってそれを解釈するために新たな解釈項 i_2 を作り出し、さらにそれが新たな別のサインとなり...、最後にそれらを合わせてサインの示す対象 i'_0 がRの意識の中に生まれる。話者Sの発したサイン e_0 をチームメイトRが解釈した対象 i'_0 は話者の示したい対象 i_0 とは似て非なる別のものであり、この過程を通じてチームメイトたちが互いに全く同じ理解に至る（同じ意識を持つ）という究極的な相互理解の状態に到達することはない。だが、人は直観的に世界を捉えるコンセンスを共有しており皆それぞれの意識の中に似たような解釈項を作り出すので（サインの背景にある省略されている様々な事柄をコンセンスが補う）サインの解釈がまちまちになることも稀である。ここに、チームメイトRが先に示したスクライブやモデレータなどの役割を担うキカイであった場合にはどうなるのか。3.1節で論じた食品加工ラインで人と並んで食材を詰めてゆくキカイがチームメイトの出すサインの意味を理解する記号過程との違いは、話者が発するサインの示す対象がキカイ自身の感覚や動きに結びつかない点にある。討議の中で人が発するサインの示す対象すなわち話者の考えはソフトウェアエージェントであるキカイにとっては我が事にはなりえず、そこから人と似たような解釈項を作り出せない（故に人と同じようにはことばを捉えることはできない）。

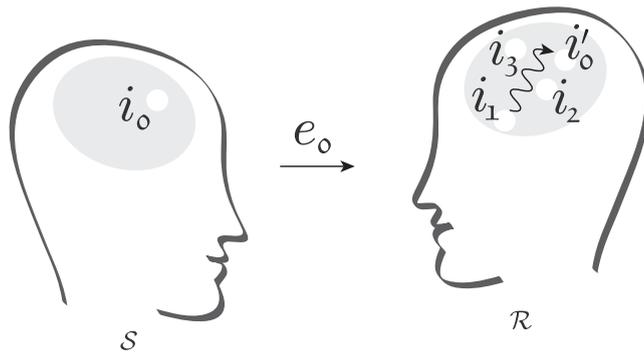


図5 ことばを用いた話者とチームメイトとの対話

ことばを使って「考える」対象の中には、問題の答えを求めたり、プランを作ったりするなど、演繹・帰納・アブダクション（仮説の形成・仮定の推定）などの論理的推論や類推などの思考過程に納まることがある。それらについて考えるときに、人は論理的・数学的（Logical-Mathematical）な知能^[1]を用いて概念的・抽象的な思考でパターンや関係性を考える。人は7才頃になるとそのような論理的な思考を始めると考えられるが^[8]、大人になってもそのような思考ができない人もいる。キカイはこれら思考法を記号を用いた（symbolic）推論や機械学習を用いた統計的推測で扱うことができ、人が数分から数時間かけて帰結する問題を短時間で解

く、その推論のための公理や規則をキカイが自ら学ぶ（形式化された表現を見出す）ことは未解決の課題として残されているが、それが実現すればキカイはとてもしも頼りになるチームメイトとなる。ここに、キカイは人の使うことばすなわち記号（symbol）を規則的に操作して合理的に帰結することを出力するが、その過程においてはそれら（symbol）の意味を解釈しないし、その必要もないことを留意しておく。人のことばを使う（＝処理して出力する）ことと、その意味を理解する（＝我が事として捉える）ことは異なる個別の課題である。

論理的・数学的な思考能力に長けるキカイのチームメイトであるが、たとえば「地球規模の気候変動を抑えるためにはどうすればよいか」「誕生日のお祝いに皆で贈るプレゼントは何にしようか」などの正答というものがない問題には答えを導き出すことはできない。課題を実現させるアイデアを創り出したり・いくつかあるオプションの中から選択したり・対立する考えのある中で合意し決断したりする問題に正答はなく、それらに関わる人たちが意見を交わしながら共に考えて答えを導き出す。このような対面でのワークショップやインターネットでの議論の場にてキカイのチームメイトはどのような役割を担えるか。人はことばを使って意見を交わし共に考える。2.2節に示したように、ワークショップの場ではそのような人の発することばを手がかりにキカイがスクライブの役割を担って発言の要点をその場で要約しそれを文字や図画として壁面ボードなどに逐次書き出してゆく。また、インターネットでの議論の場ではキカイが argument map のモデレータの役割を担って新たにポストされた論点の掲載を承認し、それが相応しい場所に置かれるようにマップを整える。キカイは人の発することばの意味を人と同じようには捉えることはできず、このような役割をキカイが全うするには能力に限界がある。だが、討議に加わるのでなければ、キカイは人が喋ったり書き出したりすることばを——その意味を捉えずとも、記号（symbol）に対する規則的な操作で——要約したり分類したりあるいは補間したりすることができよう。すなわち、そのようなテキスト操作を以ってキカイのチームメイトはスクライブやモデレータの役割を全うできる。さらには、そのように整理されたことばの意味を、人は、捉えることができる。

本節で立てた問い4への答えを導くヒントはミンスキーら^[4.5.6.9]が試みた一連の探究の中にある。それらは私たち日常世界のさまざまな分野で形式化されたモデルを見出し（学び）、推論する仕組みを実現させる試みを含んでいる。

課題 4.1（日常世界のさまざまな分野における推論ライブラリ）。空間的な領域や社会的領域、言語の領域などをはじめとする私たち日常の世界に関するさまざまな分野を推論するエージェントのライブラリを構築する。それはベイズ確率推論・定理証明・類推・事例ベース推論・ニューラルネットワーク・プロダクションルールなどの基礎的な推論機構のライブラリを用いて構築する。◇

課題 4.2（日常世界のさまざまな分野で形式化されたモデルを見出す）。エージェントが物体のかたちや、よくある出来事構造、格フレームのような意味構造、視覚と言語との関連など、幅広いレンジにわたる規則性を学習する仕組みを構築する。◇

3.3 皆と行動する：図る・現場で状況を理解する・相手の動きを見越して動く

問い5（あうんの呼吸で行動する人とキカイのチームを創る）。人間のチームは長い間行動を共にすることで相手の意図を明に確認せずともその動きを見越してあうんの呼吸で動けるようになる。この、相手の動きを見越して行動する能力がチームの任務遂行能力を高める鍵となっ

ている。キカイであるチームメイトは人とそのような関係をどうして作れるか。◇

現実の世界は不確かさを排除できない。2.3節に描かれている大規模災害時のレスキュー隊のシナリオの中にその不確かさを見て取れる。それはひとつには、隊員は被害の全容を把握することができず部分的な状況しか知り得ないこと（「全てを知る神」の視点で状況を捉えられない）、ひとつには、隊員はチームメイトの考えや思いを十分に確かめあうことができないこと、ひとつには、チームメイトは必ずしも予期したとおりには行動しないこと、ひとつには、風雨や雷などの天候をはじめ、自然の状態は完全には予測できないこと、である。これら不確実性はパートナーの動きを予期することを難しくする。

この問題について考える。キカイがパートナーの動きを見込んで動くためには相手がどんな状況下でどう行動するかを予期するための事前知識、すなわち相手の行動ポリシーに関する知識を必要とする。チームの中の誰かが絶対的な決定権を持つ中央制御とは異なる非中央集権的なマルチエージェントのコーディネーションを作戰帳（playbook）と呼ぶ。「どんな状況のときに誰がどう動くか」という行動ポリシーが作戰帳に示されている。たとえチームメイトと互いに意思を確認できない状況においても皆で作戰帳に基づき機動的に行動しチームの目的を達成する。

チームは任務開始前に集まり、どんな状況下で誰がどう行動するかを確認しあい（ブリーフィング）、合意してそれを作戰帳とする。ここにひとつの疑問が出てくる。果たしてキカイのチームメイトは会議の場で話に加わることができるか。3.2節でキカイであるスクライブやモデレータは討議の中で交わされる人のことばの意味を人と同じようには捉えることはできないことを示したが、それはそれらサインが示す対象とキカイ自身の感覚や動きとが結びつかない（我が事にならない）からであった。しかし、作戰帳を確認しあう場では「どんな状況のときに誰がどう動くか」という行動ポリシーを確認する。キカイも行動を共にするチームの一員であり、話題となるキカイの行動ポリシーが己の動きを律する（我が事である）。故に、限られた範囲ではあるが、議論の中で皆が交わすサイン（ことば）の示す意味を自分の行動と結びつけて人と同じように捉えることができるだろう。キカイが感覚-運動のコモンセンスを獲得する（課題1.1, 1.2）際に人がその行動に対してことばを補う、すなわち、行動とそれを示すときに人が使うサインとを紐付けることによってサインの意味を行動と同時に獲得できる。

課題5.1（ブリーフィングでチームメイトの行動ポリシーを確認し合う）。 任務開始前にチームで作戰を確認しあう合意形成の過程はことばを使う対話で進められる。そこでは「想定される状況に対して誰がどう動くか」という作戰がレクチャーされ、皆でおのおのの行動ポリシーを確認しあう。キカイは人の間で交わされる発話を基にチームメンバーの誰が・どの状況下で・何を・どのようにすることをコミットしたかを把握し、合意された作戰をモデル化する。◇

ブリーフィングにより、任務を遂行する作戰とチームのおのおのの行動ポリシーが確認できた。しかし、現実世界の不確かさの問題は残っており始終想定どおりに作戰が進むことは望めない。チームには状況に応じて行動を切り替え対応することが常に求められる。厳しい環境の中で最小限のコンタクトでパートナーがどうしようとしているのかを察し、己の次の動きを決めねばならない。

課題5.2（最小限のコンタクトでパートナーの動きを予期し己の次の動きを決める）。 パートナーとのコンタクトの機会が限られ考えや思いを十分に確かめあうことができない中で、キカイはパートナーが今何をしているのか、状況をどのように知覚し何をしようとしているのか

(どのような状態にさせたいのか)をその動きと行動ポリシーに関する知識から察して、相手が次にどう動くか・そこで何が必要かを予測する。さらには、それを見越してチームの任務を全うするよう主体的に行動する。◇

時に相手は予期したとおりには動かず、己の行動は無下となり協調行動は失敗する。現場でその状況をどう捉えるかは主観的な認識であり、それを相手と共有できなければこうした「思い違い」を招く。また、人にはそれぞれ癖や好みがありそれが主体的な行動に影響する。チームのおのおのはチームメイトのとり行動からそれらを学びとる。さらにはそれらを加味して行動し、自分がいつ・どの行動をとることがチームにとり有益なのかを学んでゆく。こうしてチームは徐々に信頼の絆で結ばれたパフォーマンスの高いチームへと成長してゆく。

課題 5.3 (相手の行動選択における好みや癖を学びその行動ポリシーに関する知識を精緻化する)。キカイはチームメイトである人それぞれの行動選択における好みや癖を協調行動の体験や行動観察などを通して学びとる。またそれらを加味してパートナーの行動ポリシーに関する知識を精緻化する。◇

この精緻化の過程は過渡的なものとなる。キカイの行動は行動ポリシーの精緻化により変容する。パートナーはその行動変容に応じて相手すなわちキカイの行動ポリシーに関する知識を精緻化する。そしてその行動が変容する(キカイの行動変容に合わせて己の行動を変える)。この段階的な精緻化を実現させるひとつの可能性として考え得る方法は次のとおりである。(i)キカイがチームメイトとの協調行動の体験や行動の観察から相手の行動ポリシーに関する知識を学ぶ。それはキカイがパートナーの動きを見込んで動くために相手がどんな状況下でどう行動するかを予測するための事前知識となる。(ii)次に、それらを基に己の行動ポリシーを見出す(最適化)。それは他のチームメイトの動きに合わせてながら己の行動がチームの目的を達成する最適な行動であるようなポリシーである。(iii)それに即して現場で行動する。(iv)この、キカイの自律行動が協調行動をとるパートナーの行動ポリシーに影響を与える。相手も同様にキカイの行動からその行動ポリシーを学び、それを加味して自分の行動ポリシーを調整する。(i)から(iv)までのステップを繰り返すことにより、人とキカイの混成チームは相手の動きを見越してあうんの呼吸で行動するチームへと成長してゆく。

4. お わ り に

私たちの日常には予期できないことが起こる。そのような不確かな世界で主体性を持ち自らの考えと決断で行動し、人間と互いに考えや思いを察しあい協調するキカイの出現と、私たちがそれらをパートナーとして受け入れ、問題を乗り越え課題を達成する世界を展望した。来るべき世界にてキカイは私たちと共にチームの一員として行動する。それらは工場の生産ラインで皆と肩を並べて物を作ったり、課題を達成するために皆で考えアイデアを創ったり・答えを探したり・決断したり、レスキュー隊の一員として皆で図り、現場の状況を理解し、息を合わせて行動して任務を全うしたりする。

だが、そのようなものは未だ世に現れていない。その実現に向けた大きな課題として立てた問いは、キカイが新たな課題を試みスキルを獲得し発達すること(問い1)、直感的な思考で人のように世界を捉えること(問い2)、現場の中で交わされる人の自然なことば遣いを学びチームで任務を全うすること(問い3)、さらには、人がその考えを示すことばをキカイは人のようには解釈できないことを回避すること(問い4)、あうんの呼吸で行動する人とキカイ

のチームを創ること（問い5）、である。

キカイが私たちの良いチームメイトとなるためには、人が持つ多様な知能——ここでは特に、相手のことばを聞きとったり言語を使って考えたりする言語的知能をはじめ、からだを効果的に用いる身体動作的知能や人を理解し共に行動する対人的知能など——の原理解明とそれらをキカイに工学的に作り出す技術の確立、すなわち、ここに問いへの答えとして導出した課題（1.1から5.3）の達成が鍵となる。キカイのチームメイトが活躍する世界の実現に向けてそれら課題に挑み、キカイのパートナーを世に送り出したい。

最後に、人類は科学技術のちからで疫病や天災など困難な問題に挑み、生活を豊かにしてきた。しかし未だたくさん問題が残されており、さらには地球規模での気候変動や疾病の流行、格差や食料の枯渇など、より困難で複雑な問題も増えるだろう。私たちがキカイのパートナーと共にそれらを乗り越え、持続的発展が可能な成熟した社会と健康で幸福な豊かな暮らしを未来の子供たちに残せることをこころから願う。

謝辞 例示した食品加工ラインにおける課題は三井業際研究所次世代ロボットビジネスネットワークでの活動を通じて学んだ知見から考察したものである。貴重なノウハウや経験を共有いただいた日本製粉株式会社の本田敦氏、ならびに、共に議論を重ねた委員の方々はこの場を借りて感謝の意を表す。

-
- * 1 スクライブ (scribe) とは、未だ印刷技術が一般的ではなかった時代に、手紙や文書などを手書きにて書き写す人を指す。
 - * 2 方略、または、ポリシーは、ある状況に面したときにどう行動するかを定めるもの。外界の状態空間を S 、エージェントのとり得る行動を A とするとき、強化学習の行動方略 $\pi: S \times A \rightarrow \mathbb{R}$ は、外界の状態 s においてエージェントが行動 a を選択すると、その先どのくらいの報酬を得られるかの期待値 (*i.e.*, 状態 s における行動 a の価値) を表す二つの変数をとる関数。 π はエージェントが行動を選択する指針となる。
 - * 3 この行動方略がエージェントプログラムのパラメータとなる。
 - * 4 Peirce: CP 2.228 CHAPTER 2 DIVISION OF SIGNS §1. GROUND, OBJECT, AND INTERPRETANT[7]より引用。

- 参考文献**
- [1] H. Gardner. Frames of Mind: The Theory of Multiple Intelligences. Basic Books, 1983.
 - [2] Mark Klein and Luca Iandoli. Supporting collaborative deliberation using a large-scale argumentation system: The mit collaboratorium. SSRN Electronic Journal, 02 2008.
 - [3] Mark Klein, Paolo Spada, and Raffaele Calabretta. Enabling deliberations in a political party using large-scale argumentation: A preliminary report. 05 2012.
 - [4] Marvin Minsky. The Society of Mind. Simon & Schuster, Inc., New York, NY, USA, 1986.
 - [5] Marvin Minsky. The Emotion Machine: Commonsense Thinking, Artificial Intelligence, and the Future of the Human Mind. Simon & Schuster, Inc., New York, NY, USA, 2006.
 - [6] Bo Morgan. A substrate for accountable layered systems, 2013 Doctoral Dissertation. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, Program in Media Arts and Sciences School of Architecture and Planning, Cambridge, MA, 2013.
 - [7] Charles S. Peirce. Collected Papers of Charles Sanders Peirce. Harvard University Press, Cambridge, edited by charles hartshorne and paul weiss edition, 1931.

- [8] Jean Thomas Piaget. *The Child's Conception of the World*. Paladin, London, 1973.
- [9] Pushpinder Singh. *EM-ONE: An Architecture for Reflective Commonsense Thinking*. 2005 Doctoral Dissertation. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, Cambridge, MA, 2005.
- [10] Jakob von Uexküll. 日高敏隆 (訳). *生物から見た世界*. 岩波文庫, 東京, 2005.
- [11] M. ミンスキー, 竹林洋一 (訳). *ミンスキー博士の脳の探検—常識・感情・自己とは—*. 共立出版, 東京, 2009.
- [12] 今井敏博. 思考の固着を克服することについての先行経験の差による影響—数学的な問題を用いて—. 同志社女子大学学術研究年報, Vol. 61, pp.43-48, 2010.
- [13] 山田茂雄. 人と協調して行動するロボットの知能. *ユニシス技報*, 日本ユニシス, Vol.35 No.2, 通巻 125 号, 2015 年 9 月, pp.145-153.
- [14] 中原和洋. アイデア創出の促進および阻害要因の解消. *ユニシス技報*, 日本ユニシス, Vol.38 No.4, 通巻 139 号, 2019 年 3 月, pp.307-320.

執筆者紹介 山田 茂雄 (Shigeo Yamada)

1983 年日本ユニバック(株) (現 日本ユニシス(株)) 入社. 知的エージェントや認知アーキテクチャの研究開発に従事. ACM, IEEE 会員.

