

西成活裕氏

東京大学先端科学技術研究センター教授



●プロフィール にしなり・かつひろ

1967年東京都生まれ。東京大学工学部卒業、同大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻博士課程修了。その後、ドイツのケルン大学理論物理学研究所などを経て現職に。専門は数理物理学(非線形動力学)と渋滞学。世界で初めて「渋滞学」を提唱し、2006年に出版した『渋滞学』(新潮社)で講談社科学出版賞、日経BPビズテック図書賞を受賞し注目を集める。現在は物流分野への応用まで広がる研究の傍ら、数多くの企業の業務改善についてアドバイスをを行い、20年の東京オリンピック・パラリンピック組織委員会のアドバイザーも務める。その他の著書に『無駄学』(新潮社)、『とんでもなく役に立つ数学』(朝日出版社)、『シゴトの渋滞学』(新潮社)、『東大の先生! 文系の私に超わかりやすく数学を教えてください!!』(かんき出版)などがある。

利他の心、全体最適の発想が より良い社会につながる

“高速道路などの自然渋滞はなぜ起こるの?”と、皆さんも一度は疑問に思ったことがあるのではないのでしょうか。数学の基礎研究から社会に役立つ実用的な「渋滞学」にたどり着き、その見識を社会のさまざまな“停滞”解消に応用されている東京大学教授の西成活裕氏。「渋滞」のメカニズムとその回避方法を知ることによって、視野が広がり、車だけではない世の中のさまざまな流れが見えてくると言われています。本年の技術対談では、渋滞学とは何か、そしてその今後の応用展開の可能性について伺うとともに、製鉄所の生産・物流効率化へのヒント、研究者へのエールをいただきました。

日本製鉄(株) 代表取締役副社長

井上 昭彦



利他の心を導き

人間の意識を変える「渋滞学」

井上 今回の西成先生との対談をご依頼する前まで、実は「渋滞学」という学問の存在をあまり知りませんでした。ご著書『渋滞学』で、走行する車が車間距離を40メートルとって走れば渋滞はなくなる」と書かれており、そのメカニズムと応用展開に大変興味を持ちました。初めに、「渋滞学」というのは何なのか、改めて教えていただけますか。

西成 ひとことと言うと、文字どおり渋滞について数学的な視点から調査・研究し、その解消方法を探る学問です。これまで各分野でさまざまな努力がなされてきた渋滞解消に関する知見を、分野横断的な発想で考える研究でもあります。また、車だけでなく、歩く人の流れや生産ライン、物流の滞り、ひいては組織の遅い意思決定なども一種の渋滞です。そうした流れの停滞を統一的に扱う試みが私の渋滞学です。



車については、今お話のあった40メートルより車間距離が詰まると、減速の連鎖反応が起きて渋滞に至ります。最も渋滞が起こりやすい場所は自然に減速して後続車との車間が詰まりやすい上り坂。例えば、中央自動車道にある小仏トンネルの実験では、時速約17キロで渋滞にはまったとき、3台のペースメーカー車がそれぞれ40メートルの車間距離をとり連なって走ること、時速27キロまで速度が上がりました。車間距離が渋滞を吸収し徐々に緩和していくわけです。

井上 ご著書のなかで、渋滞学の基礎的な数理モデルとして使われているASEP(※1)による渋滞のメカニズムの説明が大変わかりやすく、目から鱗でした(下図参照)。訴求力があるので自動車運転教習の講習などでも使ったら良いと思いました。また、ここ君津・富津地区に約2万人の日本製鉄関係の従業員がいるので、皆に見せて広めても良いかなとも思います。

西成 ぜひお願いしたいですね。車の渋滞の場合、最終的には人間の意識変化が重要です。人間は早く先に行くためには前に詰める方が良いだろうという直感、欲求があるのでなかなか受け入れられませんが、自分のことだけを考えず、利他を考えて車間をゆったりとれば巡り巡って最後は自分もハッピーになりますし、そういう社会が理想ですね。

原理と実用の両立。 その答えが「渋滞学」

井上 西成先生は学生時代に航空宇宙工学を専攻され、そこから渋滞学へたどり着かれました。

その経緯をお聞きしたいのですが、そもそも子どものころはどんな少年だったのですか。

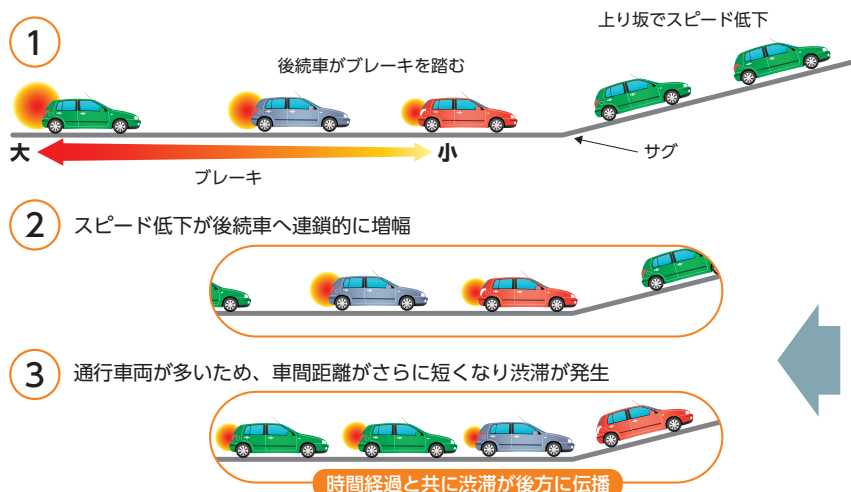
西成 父は電子系の技術者で、実験の一環として自宅でICをはんだ付けしてラジオ製作などをしていました。家のなかを歩いていると足の裏にICが刺さったりしましたが(笑)、小学生の私も理系の事象に興味を持つようになり、コイルとコンデンサーを使って自分でもラジオをつくりました。そのラジオから音が聞こえたときはうれしかったですね。でも、自分は部活で楽器を演奏していたこともあって、そもそもなぜ音が聞こえるのかが不思議で、そこから実際のものづくりよりも、基礎となる「原理」に興味が出て「オームの法則」などの本を読み漁りました。また、当時アニメドラマの『宇宙戦艦ヤマト』が流行っていて、神秘的な宇宙の果てはどうなっているんだろうと考えたりしていました。

井上 そこから渋滞学へ、というのはなかなか結び付きませんが、その後何か転機があったのですか。

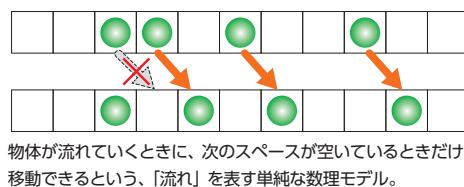
西成 宇宙や星、自然科学の原理原則への興味から、物理学をやるうと思って東京大学に入学しましたが、母から「あなたの勉強って社会の役に立つの？」と聞かれ、うまく説明できずに絶句してしまいました。当時学んでいた水や空気の流れを数学的に分析する流体力学の説明が母には通じない。それに自分でも学んでいてちょっと違うんじゃないかと思い始めていました。原理原則を学びながら社会に役立つことをやる。そうすれば自分の興味も満たせるし、親にも胸を張って説明できると考えました。

そんな悩みを持つときに、遠くから眺め

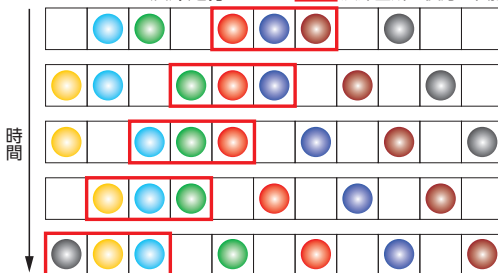
渋滞のメカニズム 例：自然渋滞が起こりやすい上り坂



ASEPのメカニズム



ASEPによる渋滞走行モデル □ 渋滞箇所が後方に伝播



※1 ASEP : Asymmetric Simple Exclusion Process(非対称単純排除過程)。

た道路の車の流れが水の流れに見えた。そのときにピンときて、水の流れを分析する流体力学を、車や人、物などまったく新しい世界で使えないか、社会のさまざまな流れに対して科学で何かできないかと思ったんです。それなら好きな研究をしながら社会の役にも立てる。そこから「洪滞学」という名称も生まれました。

井上 「洪滞学」は過去にはなかった学問だけに、学会などで認められて注目されるまで相当なご苦労があったのではないのでしょうか。

西成 おっしゃるとおりです。最初は物理・数学の学会で「流体力学の分析手法を使って洪滞の研究をやる」と壇上で説明し始めると、聴講者のほとんどが席を立っていなくなる状況でした。物理学者も数学者も興味を示してくれず、悔しいというかショックでした。国に研究費を申請しても数学と交通両方の知識を持って審査できる教授がいなくて、結局研究費は自腹です。

そんな周囲からまったく認められない時期が5〜6年続き挫折しかかったときに、尊敬する先輩が「人生は諦めるかやり抜くかだけ。できないというのは諦めただけで、やり抜けばできないことはない。4〜5年の研究じゃあまだ甘い。まずは7〜8年やれ」と。そのアドバイスでもう数年続けようと決心しました。

井上 松下幸之助さんも「成功の秘訣は、成功するまで諦めないこと」と言っていますが、そのとおりですね。

西成 諦めずに続けているうちに、学会でも退席する人が減り、「よく聞くと西成先生の話はまともで、例えばこれに使えるんじゃないか」と言ってくれる味方が増えました。共同研究や取材の

依頼もあり、そこから一気に形勢が逆転して、テレビやさまざまなメディアで取り上げられるようになり、その後出版した『洪滞学』が私の人生を大きく変えるきっかけとなりました。発売翌月の学会は立ち見が出るほど大盛況で驚きました。

全体最適を導く手法を 社会に発信

井上 洪滞学の観点は、さまざまな社会の事象に通じるとおっしゃっています。例えば、大型台風上陸時に堤防を決壊・越流させない川の流れの分析や、私たちのような製造業の生産ライン、物流の効率化にも活かされますね。

西成 私は今そういったことを皆さんと考えたいと思っています。社会の流れは人、車、物に大別できます。これまで約30年取り組んできた研究と100件以上の国・自治体・企業との共同プロジェクトを通して、洪滞を解消するアイデアも蓄積されています。

最近では、東京オリンピック・パラリンピック競技大会組織委員会のメンバーとして、開催時の「混雑の解消・緩和」をテーマにアドバイスさせていただいています。例えば駅から競技場まで人を誘導するルートについて、混んで詰まったときはルートを切り替え、移動距離をあえて延ばして人が流れるようにするなど、混雑の状況に応じて選択できる複数の誘導ルートを決めています。川の防災も同様に、流れを止めるという発想ではなく、複数の別の流れ（ルート）をバンプアーとして確保するなど、決壊・越流を防ぐ対策をあらかじめ決めておくことが大切です。



走行実験の指揮をとる西成先生



音楽好きでも知られる西成先生。中学時代は吹奏楽部に所属

井上 私たち日本製鉄も「国土強靱化対策」の一環として、堤防の決壊防止への効果が期待される鋼矢板などの土木製品をはじめ、多彩な鉄鋼製品を提供していますが、洪滞学の着想は、1カ所の決壊を防ぐと、別の場所が決壊・越流するケースもある。理想は、インフラ整備を行った上で、川があふれずに海までちゃんと流れるようにすることだと思います。「洪滞学」は、そのためにどうしたらいいのかを考える強力なツールになりますね。

西成 そうだと思います。特定の部分だけをうまく流してもトータルでどこが決壊・越流するなら流さないほうが良い可能性もあります。洪滞学は「全体最適」がキーワードなんです。

近年は、工場からの相談も受けます。流れという意味では生産ラインも同じで、1つの工程だけ頑張ると全体として流れが悪くなって在庫が増えるケースがあります。部分最適ではなく、例えば、多能工化※2により、あるネック工程の仕事をして別の人が受けて持てるようにすることでトータルのラインバランスを考えるほうが、実は改善になるという事例が山ほどあります。

井上 日本製鉄でも工程間の半製品の滞り（在庫）をいかになくすかが1つの課題です。各ラインの生産性とキャパシティを前提に問題を解くのか、キャパシティを別の工程に振り分けるのか、そうした前提次第で答えは大きく変わりますね。

西成 企業規模が大きくなるほど担当部署ごとの部分最適に走りやすくなります。例えば、機械は部分であるモジュールを組み合わせれば動きますが、生物は脳や胃、腸など部分を並べて組み合わせても全体として機能せず、そこにプ

ラスアルファがあるからこそ生命体です。企業の組織や生産工程も同じで、すべてに相関があり各部分を足し合わせただけでは全体にならない。部分最適だけの追求は何かを見失う可能性があります。

井上 かつて日本がものづくりで欧米に追いつこうとしている時代に、日本製鉄でも各セクション、あるいは製鉄所間が競い合って生産性を高めた時期もありますが、今はそれだけではだめだという感覚を皆が持っています。例えば、5つのセクションがラインになっている場合、2つ目の生産性を落として犠牲バントを打たせたほうが、後の流れが良くなり生産性上がるケースもあるわけですね。工程の責任者は自分のセクションの成績が下がることに抵抗があるかもしれないませんが、それを上の人間がきちんと評価してあげる。そういうことに踏み込んでいかなければいけませんね。

西成 過去に相談を受けた企業で、営業部門が目標売上の3倍の数字を出した結果、営業がバンバン発注するので物流コストが上がり、最終的に企業トータルで赤字になった事例もあります。極端に言うとうと、営業が頑張らないほうが良かったということです。企業が大きくなると一番大事な全体が見えにくくなります。

洪滞学の考え方は、特定の部分だけが洪滞すると、トータルのスループットが落ちるので、どこが律速ポイントになっているのかを考え、そこをうまくコントロールしてバッファークとなるゆとりをとって全体最適化する、いわば急がばまわれです。ときには頑張らないという逆説的な改善も有効ですね。



企業や自治体などからの講演依頼も多い

エネルギーが循環する ダイナミックなものづくり

井上 本日はこの対談の前に、日本製鉄の君津製鉄所と研究開発拠点である富津REセンターをご見学いただきました。ご感想があればお聞かせください。

西成 実は御社の製鉄所の見学は2回目なんです。小学生のときに八幡製鉄所を見学しましたが、正直なところ熱かったこと以外は何も覚えていません（笑）。今日は改めて製鉄所をじっくり

※2 多能工化：作業者が他の工程も受け持つことができるように教育・訓練すること。

日本製鉄 君津製鉄所・富津REセンター見学風景



第4高炉前



製鋼工場



熱延工場



富津REセンター

り拝見し、まず製鉄所のスケールの大きさを見て、それ自体がひとつの街、社会だなと思いました。東京の千代田区と同じ面積だという敷地規模の大きさ、製鋼工場や熱延工場の熱とダイナミックなものづくりの姿に感動しましたし、圧延工程では鋼板の厚みや温度などが精密に制御されていて、鉄づくりが大変な進化を遂げていると感じました。また、排熱回収や水の循環利用など、環境・省エネルギー対策について徹底されており驚きました。

井上 水の循環・利用率は90パーセントで、製造工程で発生するガスはエネルギー源として100パーセント活用し、使用電力の81パーセントは工場から出る排熱やガスを利用して自家発電しています。また、工場内で発生するダストに含まれる鉄分は集塵機で回収して原料として100パーセント再利用しています。製鉄・製鋼工程で発生する副産物のスラグは、セメントや道路の舗装材として利用されるだけでなく、近年では藻場を再生する「海の森づくり」の資材として高く評価されています。さらに自治体が回収した容器包装プラスチックも、コークス炉を利用して100パーセントリサイクルしており、日本製鉄全体で日本の回収量の約3割を再資源化しています。これらの取り組みは、エネルギー大量消費型産業である鉄鋼業としての使命だと考えています。

西成 ものすごい努力ですね。あともう1つ工場を見学して思ったのは、人間（職人芸とAI（人工知能）の関係です。一部AIなども導入されていると思いますが、鋼板の品質管理をはじめ、最終的には人の目で判断している。現在は多くの企業で工場を無人化し積極的にAIを導入していますが、それでいい会社とそれではだめな会社があると確信しました。AIは人間に置き換わるのではなく、人間をサポートする方向に向かうべきだと思います。例えば「5年前に似たようなことがあった」など、人間は長年の経験値からいろいろな前提がわかった上で物事を考えますが、その職人の勘のような前提までをAIに入れるのは無理です。AIに「フレーム問題」※3は絶対に解けないと思います。工場のものでありながら、人間はいろいろなことがわかった上で判断する職人芸の塊であり、企業の無形資産だと改めて実感しました。

※3 フレーム問題：限られた処理能力しかないAIは、現実には起こり得る問題すべてに対処できず、何がフレームかについて判断できないことを示すもので、第一次・第二次AIブームの壁となった問題。

多くの物が行き交う 製鉄所の物流を考える

井上 製鉄所見学時に、西成先生のご専門「渋滞学」の観点から興味を持たれたことがあれば教えてください。

西成 「物流」ですね。溶銑を入れた400トン近くのトローピードカーが線路を走る姿を見て、製鉄業の物流に大変興味を持ちました。製鉄所全体としてどのくらいの物流量があるのですか。

井上 鉄鋼業の物流は、重量ベースで日本全体の数十パーセントを占める膨大な量です。1965年に操業を開始した君津製鉄所の線路の総延長はJR山手線の2周分もありますが、その後はプロセスの連続化も進み、君津の後に稼働した大分製鉄所では、効率的なレイアウトで物が流せるようになっていきます。また名古屋製鉄所では、製鋼以降を無軌道台車やキャリアパレットの道路輸送に切り替えて最短ルートで物を運ぶ仕組みにしています。いずれにせよ、鉄鋼業にとって原料ヤードから製銑、製鋼、圧延と鉄を運ぶ物流効率の向上は、製造時の熱効率も左右するため、常に大きなテーマですね。

西成 どこがボトルネックで、いかに最適化すればリードタイムが短縮できるのか。お話を聞いて研究者魂に火が付きました(笑)。物流面だけで言えばミニ高炉での多品種少量生産も考えられますが、生産効率を考えると難しいですね。
井上 昨年4月にはインテリジェントアルゴリズム研究センターをつくり、スケジューリングを含めた生産最適化に向けて数値計算のさらなる

活用を進めています。生産効率を高めるため、鉄鋼製品を多彩なバリエーションがある品種ごとにロットを組んで連続生産しながら、一方で物流効率を高めて構内在庫を極限まで圧縮するというトレードオフの難題に対して、今後ぜひお知恵をお借りしたいと思っています。

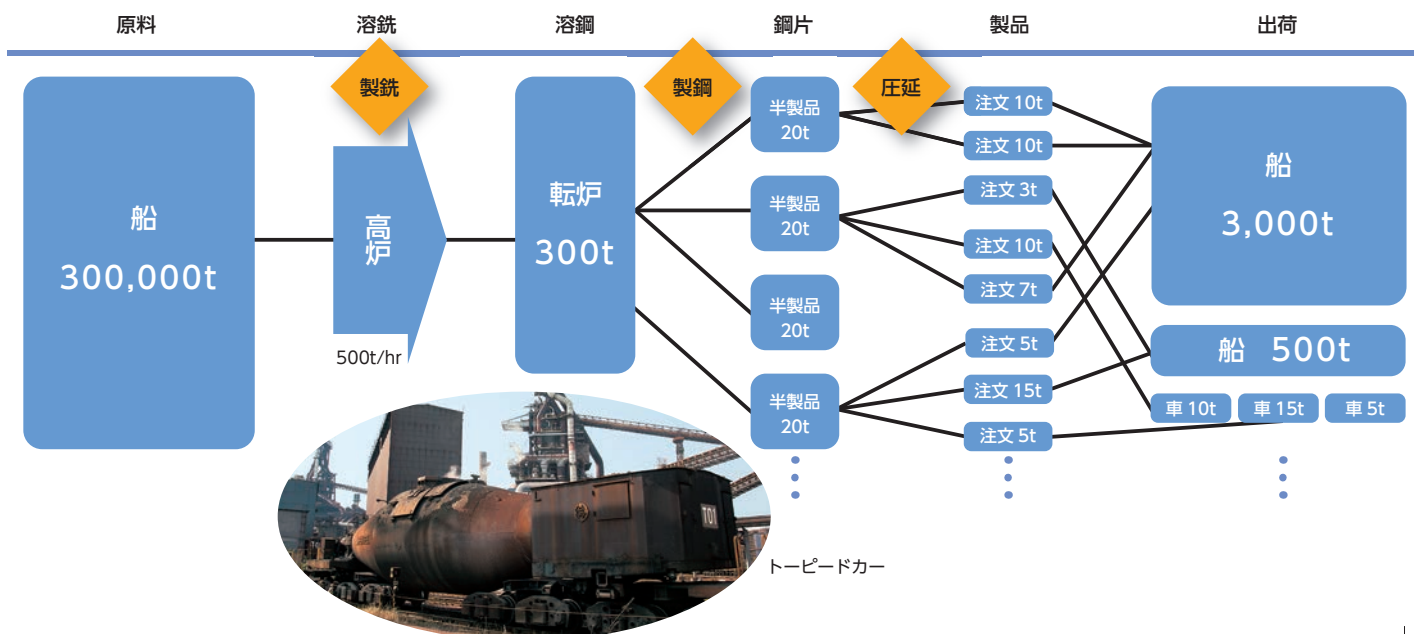
西成 製造する品種によってボトルネックが変わり、多くの制約条件があるなかで相当難しい組み合わせをすでに最適化されているのだと思います。本来は一品ずつつくればいいのですが、組立産業のようにはいきませんね。

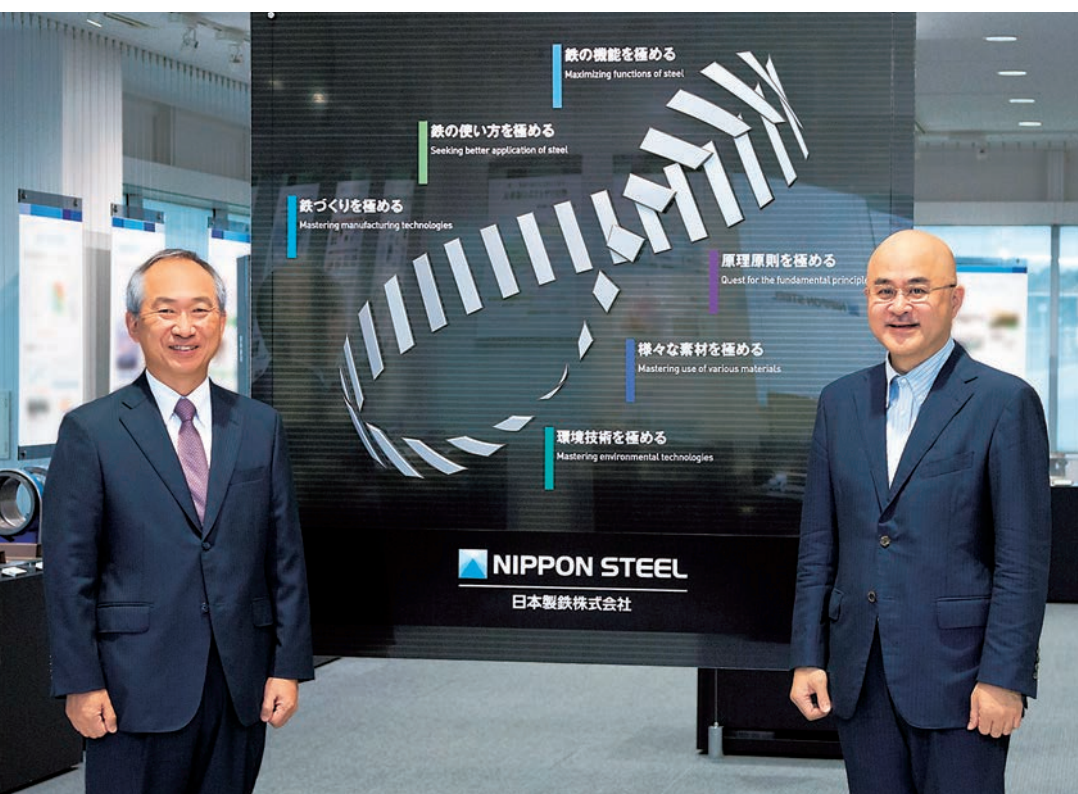
井上 私たちも既存の生産設備を効率的に動かすというだけでなく、君津の構内に試験炉がある「COURSE 50」の水素還元技術開発も含めて、今までと違った新たな製鉄プロセス開発などのブレイクスルーも視野に入れて、一貫で見たときにどのようにつくるのが最も効率が良いかという、本来あるべき理想形を議論しておく必要があると感じています。

社会を支え続ける基幹産業 日本製鉄へのエール

井上 本日のお話のなかで、私たちのものづくり、特に生産・物流の高効率化への貴重なご意見を伺うことができました。引き続きいろいろ教えていただければうれしく思います。西成先生の今後の取り組みについてお聞かせいただけますか。
西成 先ほどの製鉄所構内のお話も含めて、物流の世界で東京大学から情報発信できないかと考えているところです。今一般的に、物流は社会のインフラとして最も重要でありながら、低

高炉から多彩な製品をつくり分ける製鉄プロセスの例





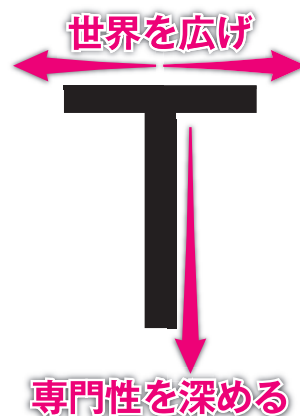
い位置付けにあるような気がします。アマゾンなどのネット販売が社会に定着するなかで、実は物流はデータサイエンスやAIが活用できる最先端分野だと思っています。国際物流も含めて世の中の物の流れが増えてドライバーも不足している社会のなかで、何か役に立てないかという強い思いがあり、今はリソースを物流にシフトしています。

東京大学では従来、経営や経済の観点から物流を研究した事例はありますが、理系の立場から先進物流を考える機会がなかったため、本年7月、AIやデータベースを使って数学的、科学的に物流を研究する場をつくり、社会に役立つ人材の育成に取り組み始めました。先ほどの生産と物流の相関などについて、設備故障率や高級品の混在率など詳細を掌握した上で、数学的にデータ分析して企業活動をサポートする人材です。

井上 一方でそうした人材の活躍の場をつくるのは企業の役割ですね。

西成 ぜひお願いします。物流の科学的な知識を身につけた理系の大学院生を、物流の問題を抱えている企業に輩出して社会の役に立つてもらいたいですね。

大学にできることはそうした人材供給だと思っています。海外を見渡すと、今はスタンフォード大学や中国の清華大学の人材がベンチャー企業をつくって物流の新たなソリューションを生み出しています。私も来年4月から大学院生向けにこれまで日本では焦点があまり当たらなかった物流の講義を立ち上げます。東京大学の歴史で初めてのことです。井上 将来が楽しみです。最後に日本製鉄グループの社員、研究者へメッセージをいただければうれしく思います。



※4 T型人間：何か1つの専門分野に精通して、下方に深い知識を持ちつつ、他の分野に対しても横方向に広がる幅広い知見を持つ人材。

西成 今後の技術革新や多様な時代変化のなかで、専門性も大事ですが、知識の幅を持った「T型人間」(※4)がより重要になってくると思います。日ごろ学生にも言っていますが、自分と関係ないものは世の中にはなく、すべてがつながっている。多様な分野の人間と交流しながら思考を広げていくことが大切です。専門は忘れるぐらいどんどん広げて、一組織のなかにも全体を見渡せるような視野を持つてほしいと思います。御社は日本を背負って立つ企業です。ぜひ懐と視野の広い社員の方々が活躍して日本をもっと良くしていただければと思います。また産学連携という意味で、一緒に何かをやってお役に立てればと考えています。

井上 こちらこそよろしくお願いします。本日は日本製鉄のものづくりにとって示唆に富むお話を伺い勉強になりました。今後もし指導いただければうれしく思います。本日はお忙しいなかお時間をいただきありがとうございました。

(この対談は、2019年10月18日に、日本製鉄富津REセンターで開催されました)