

題名	「なぜ？」と思う心
Title	The Center of "Why?"
著者名	アラン・カーティス・ケイ
Author(s)	Alan Curtis Kay
言語 Language	日本語・英語 Japanese, English
書名	稲盛財団：京都賞と助成金
Book title	Inamori Foundation: Kyoto Prize & Inamori Grants
受賞回	20
受賞年度	2004
出版者	財団法人 稲盛財団
Publisher	Inamori Foundation
発行日 Issue Date	9/10/2005
開始ページ Start page	114
終了ページ End page	196
ISBN	978-4-900663-20-4

「なぜ？」と思う心

アラン・カーティス・ケイ



故上林彌彦氏に捧ぐ
人格者、文明の推進者、同僚、そしてよき友
1943-2004

今回、稲盛財団から私たち受賞者に、これまでの人生を振り返り、「今の道に進んだきっかけ、内に秘めた思い、自分の哲学」をテーマに講演を行うようにとの依頼がありました。しかし、これはかなり難しいことです！ソーントン・ワイルダーの劇に登場する古い占いマシンもこう言っています。「未来について語ろう。なんと容易なことか。だが、過去は、一体誰に語れるというのだ？」

過去に比べれば、まだ起きていない未来について語るほうが簡単です。未来については曖昧でいられますし、それでいて、全般的な外れのことを言う心配ありません。しかし、過去は厄介なものです。というのも、すでに起こってしまったからです。過去はとても複雑で様々なことが絡み合っているため、多くのことを省略しなければならず、長い話でも最初から最後まで筋道立てて話すのは難しいことなのです。

本、そしてまた本

私の人生で最も重要なことは、とても幼い頃に起きました。それは、学校に通い始める数年前から本を上手に読め



「未来について語ろう。なんと容易なことか。だが、過去は、一体誰に語れるというのだ？」
ソーントン・ワイルダー

The Center of “Why?”

Alan Curtis Kay



Dedicated to Yahiko Kambayashi: a wonderful human being, advancer of civilization, colleague and friend. 1943-2004

The Inamori Foundation asked us to look back into our past to talk about our motivations, inner feelings and philosophy. This has been quite a challenge! The old mechanical fortune-teller in a Thornton Wilder play says: “I tell the future: nothing easier,” then asks “...but who can tell the past?”

The future is somewhat easier to tell because it hasn't happened yet. We can be vague about it and still be in the right neighborhood, but the past is messy because it has happened; it is very detailed and the details all mesh together so it's difficult to make even long talks coherent because so many things have to be left out.

Books and More Books

I think the most important thing that happened to me in my entire life happened very early: learning to read fluently several years before I went to school. My earliest memories are of books. It is almost impossible to read widely and not encounter many different perspectives on the same ideas, even for childish reading. For example, one of the earliest adult books I read all the way through—perhaps



“I tell the future: nothing easier. But who can tell the past?”
— Thornton Wilder



About 4 years old

るようになったことです。私の一番古い記憶は、本にまつわるものです。たとえ子供でも、いろいろな本を読むようになると、1つの物事には様々な見方があることに気づくようになります。例えば、4、5歳の頃に初めて最後まで読み通した大人向けの本の1つは、父が持っていたエディス・ハミルトンの『神話 (Mythology)』という本でした。この本で最も重要なのは（幸運にも、私は最後まで読んだのです）、古代スカンジナビアの神話に関する最後の部分で、この本の前半で登場した神話（ほとんどがギリシャ神話）との興味深い比較が行われていました。

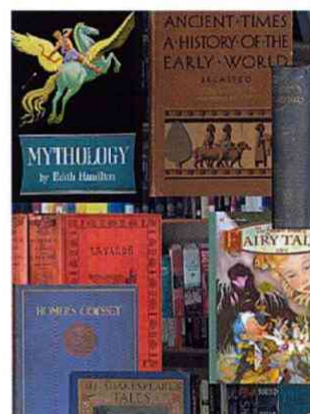
この時初めて、同じ事柄でも人が違えば語られる話も違うということを私は知ったのです。もっと重要なことにも気づきました。物事にはいろいろな見方があり、それらはすべて文章に表すことができる。だから文章に表されている（または話された）からといってそれをそのまま受け入れなければならない特別な理由はなく、よく知る必要があるということでした。数年後に私が気づいたことは、どのような主張にも否定の「not」を付け加えることができるので、口では何とでも言えるのだということです。つまり言葉には、宇宙 (universe) で実際に起きていることは含まれていないのです。そしてもっと深遠な事実にも気づきました。言葉そのものやアイデアを表現したり考えたりする能力には限界があり、その結果、我々の状況を支える様々な要素の理解が難しくなっているのではないかということです。

「1冊だけ」

学校に通い始める頃には、私はすでにたくさんの本を読んでいた。しかし驚いたことに、学校では1つの教科に1冊の本しか使わないのです。先生にとって教科書は、あらゆる意見や質問に対する究極の権威だったのです。私



4歳の頃



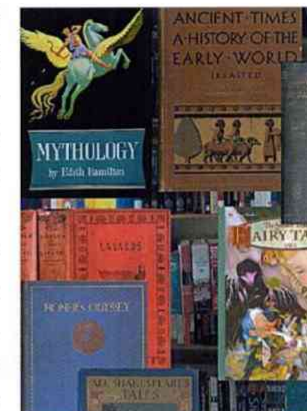
教科書は退屈で、学べることは限られていた

around the age of four or five—was my father's copy of Edith Hamilton's *Mythology*. The most important part of this book (and fortunately I got to the end!) was the very last section on Norse mythology that provided an interesting comparison with the mostly Greek myths presented in the front of the book.

For the first time I got a sense that different groups made up different stories for the same topics. More importantly, there was more than one point of view, and they could all be written down, so there was no particular reason to accept anything that was written down (or spoken) at face value; more was needed. A few years later I realized, because the word “not” could be added to any assertion, that one could say anything in language—that is: language didn't contain what was actually going on in the universe. A deeper realization came further on: there might be limitations in language itself and our ability to represent ideas and think about them that could preclude us from actually understanding the foundations of our situation.

The “One Book”

I had already read many books by the time I was old enough to go to school. But I was surprised to find that in school there was just **One Book** about each subject: The **TextBook** that the teacher used for the **Final Authority** for all opinions and questions. I had started 1st grade a year early at the age of 5 and was quite small for my age, so we can imagine a tiny child with a little high-pitched voice continually raising his hand and saying “But I read in a book that it's not what you said, but could be this way.” Pretty quickly I realized that the teacher did NOT want to discuss any of these interesting ideas AT ALL. In fact she seemed to get angrier and angrier the more I raised my hand. I couldn't articulate



School Books were limited and boring

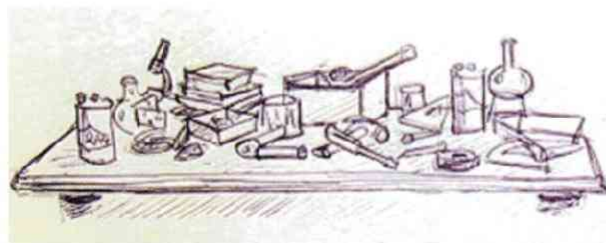
は同級生たちよりも1年早く、5歳で入学したうえに、年齢の割に小柄でした。想像してみてください。小さな子供がずっと手を挙げて、甲高い声でこう言う姿を。「でも僕が読んだ本にはそんなこと書いてなかったよ、本当はこうだよ」。ほどなく私は、担任の先生がそうした面白いアイデアについて話し合うつもりなど毛頭ないことに気づきました。事実、先生は私が手を挙げるたびに苛立ちを募らせていくようでした。当時の私には言葉で表現することはできませんでしたが、この学校では様々なアイデア、特に私のアイデアが興味の対象とされないことは明らかでした。しかし私が本を通して得たのは、何かを学びたいければ、自分でできるということでした。それだけに学校にいることは私にとっていささか苦痛でした。もっとも、すべてが苦痛というわけではありませんでしたが。

9歳：学習についての異なる考え方

しかし、4年生の時の担任だったメアリィ・クアーク先生は、最初からそれまでの先生とは対照的でした。教室には前の学校と全く違うところがありました。右側の後ろのほうに古いダイニングテーブルがあり、その上にガラクタがところ狭しと置かれていたのです。工具にワイヤー、ギヤに電池、そのうえ本もありました。



メアリィ・クアーク先生：
4年生と6年生の時の担任



クアーク先生は、このテーブルについて何も話してくれませんでした。やがて私は、何があるのか知りたくてテ-

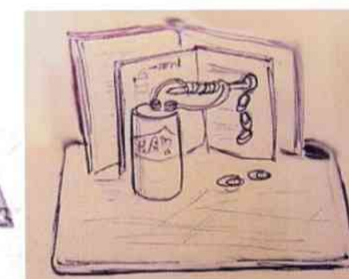
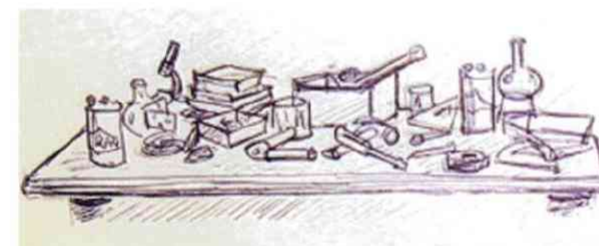
it at the time, but it was clear that this school was not interested in ideas, especially mine. But, through books, I found that if I wanted to learn something, I could do it myself, and so school was only somewhat painful, not completely painful.

Nine Years Old: A Different View of Learning

But in 4th grade the teacher, Miss Mary Quirk, was quite different from the start. And there was something very different in her classroom. There was an old dining table towards the back on the right hand side that was completely covered with various kinds of junk: tools, wires, gears, batteries, and books.



Mary Quirk, my 4th and 6th grade teacher



Miss Quirk never mentioned this table. Eventually, I started to poke around to see what was on it. As a confirmed book rat I first looked at the books. One of them was about electricity and looked very interesting. That afternoon during an English class I set up my English book with the smaller electricity book behind it, and the large dry cell battery, nail, wire, and paper clips behind that. I wound the bell wire around the nail as it showed in the book, connected the ends of the wire to the battery, and found that the nail would now attract and hold the paper clips!

I let out a shriek: "It works!" The class stopped. I hunched down expecting some form of punishment as had often happened to me in my previous school. But

ブルの上のものをあれこれ触り始めました。自他共に認める本好きだった私は、真っ先に本を手に取りました。1冊はとても面白そうな電気に関する本でした。その日の午後、英語の授業中に、私は英語の教科書を開いて机の上に立てると、手前にそれより小さい電気の本を開き、その前に大型乾電池、釘、ワイヤー、紙クリップを置きました。私は本を見ながらワイヤーを釘に巻き、その両端を電池につなぎました。すると、紙クリップが釘にくっついたのです！

私は思わず、「やった！」と叫んでしまいました。教室は静まり返りました。叱られると思った私は肩を丸めました。前の学校ではそうなることが多かったからです。しかし、クアーク先生は私を叱ろうとはしませんでした。先生は授業を中断して、「どうやったの？」と私に尋ねたのです。私は電気の本のことを話し、紙クリップのくっついた釘を見せました。すると先生は、「すごいじゃない！他にはどんな実験が載っているの？」と私に聞きました。次のページには、電磁石を使った電信装置の作り方が紹介されていました。先生が他の生徒に、その実験をやってみたいかと尋ねると、何人かがやってみたいと答えました。すると先生は、「午後からの授業は実験にして、みんなで一緒にこの装置を作ってみましょう」と言ったのです。

それからは同じようなことが何度もありました。私たちはテーブルから面白そうなものを見つけてはいろいろと試してみたものでした。クアーク先生は、生徒に何を見つけたか説明させては、面白そうだから一緒に試してみたい子はいないかと尋ねるのです。ほどなく私たちのクラスでは、授業時間の半分近くを私たち自身が選んだ実験に費やすようになりました。少しでも長く実験したいと思うあまり、私たちは朝早く登校するようになりました。ところが、いつも先生のほうが早いのです。先生に勝てる者など誰もいなかったというわけです！

Miss Quirk did nothing of the kind. She stopped the class and asked, “How did you do that?” I explained about the electricity book and showed my electromagnet holding the paper clips. She said: “Wow, that’s great! What else is in the book?” I showed her that the next project was to make a telegraph with the electromagnet! She asked if others in the class were interested in this, and some were. She said, “OK later this afternoon we’ll have time for projects and you all can work together to do the next things in the book.” And that’s just what happened!

This happened many times. Children would find stuff on the table that really interested them and make something. Miss Quirk would get the child to show it and see who else was interested to work on it. Pretty soon about half of our class time was devoted to these self chosen projects. We started showing up earlier and earlier for school in the hopes we could spend more time on them. She was always there. We could never beat her to class!

Most of my ideas about how elementary school education should be done are drawn from the way Miss Quirk ran her classroom. She took subjects that would be interesting to the children and integrated real mathematics, science and art together for her curriculum.

Still later when I lucked into a terrific grad school at the University of Utah, my first thought was that this was just like 4th grade! And then I realized that Mary Quirk had made 4th grade just like a great graduate school! This is a critical insight. Children are in the same state of *not knowing* as research scientists. They need to go through many of the same processes of discovery in order to make new ideas their own. Because discovery is really difficult and has taken hundreds of years, the difference is that children have to be scaffolded carefully (but not using the Socratic method, it “leads the witness” too much). Instead

小学校教育のあり方に関する私の意見は、そのほとんどがクアーク先生の指導方法から思いついたものです。先生は、生徒が興味を持つテーマを取り上げ、本当の数学、科学、そして芸術をカリキュラムに取り入れてくれました。

その後、私は幸運にもユタ大学の素晴らしい大学院に入学できたわけですが、そこでの第一印象は、まるで小学校4年生の時みたいだということでした。そして気づいたのです。メアリィ・クアーク先生は、小学校4年生の私たちに立派な大学院と同じような授業をしておられたのだと。これは重要な発見でした。子供たちは、「何も知らない」という点で研究者と同じなのです。新しいアイデアを自分のものにするためには、両者とも発見という同じプロセスを経なければなりません。何かを発見するということはきわめて難しく、何百年もの歳月を必要とします。そのことから生まれる両者の違いとは、子供たちにはしっかりした基礎を築いてあげる必要があるということです（ただし、ソクラテス式問答法は、誘導尋問のようになってしまうおそれがあるため、避けるべきでしょう）。そうした基礎は、子供たちの目の前にさり気なく、しかし本人たちが気づかないうちに築いておくべきであって、そうすることにより子供たちは、自らの足で最後の飛躍をすることができるのです。この点に関して、メアリィ・クアーク先生はまさに天才的でした。興味深かったのは、先生が何を知っているのかが私たち生徒には全くわからなかったことです。先生が考えていたのは、「私たちが何を知っていて、何を発見できるか」ということだけだったのです。

10歳：真空は本当に吸い込む？

地元のあるデパートには、カウンターからレジ係のオフィスにレシートとお金を運ぶ気送管システムが備わっていました。ある日、それがどんな仕組みで動いているのかを知

the scaffolding has to be set up as close encounters and careful but invisible sequencing to allow the children to make the final leaps themselves. This was the genius of Mary Quirk. It was interesting that we never found out what she knew. She was *focused on what we knew and could find out*.

Ten Years Old: Do Vacuums Really Suck?

One of the local department stores had a pneumatic tube system for moving receipts and money from counters to the cashier's office. I tried to figure out how they worked and asked the clerks about it. They knew all about it. "Vacuum," they said, "Vacuum sucks the canisters, just like your mom's vacuum cleaner." But how does it work, I asked? "Vacuum," they said, "Vacuum, does it all." This was what most adults called "an explanation"!

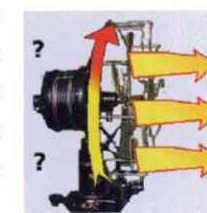
So I took apart my Mom's Hoover vacuum cleaner to find out how it worked. There was an electric motor in there, which I had expected, but the only other thing in there was a fan! How could a fan produce a vacuum, and how could it suck?

We had a room fan and I looked at it more closely. I knew that it worked like the propeller of an airplane, but I'd never thought about how those worked. I picked up a board and moved it. This moved air just fine. So the blades of the propeller and the fan were just boards that the motor kept on moving to push air.

But what about the vacuum? I found that a sheet of paper would stick to the back of the fan. But why? I had heard that air was supposed to be made up of particles too small to be seen. So when you got a gust of breeze by moving a board, you were knocking little particles one way and not another, like rowing with an oar. But where did the sucking of the paper on the fan and in the vacuum cleaner come from?



About 10 years old



りたくて、店員に尋ねてみました。その機械については何でも知っていたからです。「真空さ」と彼らは答えました。「真空がキャニスター（缶）を吸い込むのさ。ママが使っている掃除機と同じだよ」。でもなぜそんなことができるの、となおも私が尋ねると、彼らは、「真空だって」と言うのです。「真空が全部やってくれるんだよ」。たいていの大人たちに言わせれば、これで「説明」したことになるのです！

そこで私は、母が使っていたフーバー社の掃除機を分解し、仕組みを調べました。予想した通り、中には電動モーターがありました。ところが、他にはファン以外何もないのです。なぜファンで真空状態が生まれるのでしょうか？ どうすればゴミを吸い込むことができるのでしょうか？

我が家には扇風機があったので、それを詳しく調べてみることにしました。それが飛行機のプロペラのように動くことは知っていましたが、仕組みについては考えたこともなかったのです。そこで、1枚の板を持って動かしてみました。見事に空気を動かすことができました。つまり、プロペラの翼も扇風機の羽根も、モーターによって空気を押し出すために動き続ける板と同じということになります。

では、どのようにして真空状態はできるのでしょうか？ 私は、扇風機の後ろに紙がびったりくっつくことに気が付きました。でも、なぜ？ 私は、空気が目に見えない細かな粒子から成っていることを知っていました。板を動かすと風が起こるのは、オールで船を漕ぐように、小さな粒子が一定方向に押し出されるからです。しかし、扇風機に紙がくっついたり、掃除機がゴミを吸い込んだりするのとはなぜなのでしょう？

その時、突然ひらめいたのです。空気の粒子は、すごい速さで常に動き回り、お互いにぶつかり合っているはずだと。板や扇風機の羽根で空気の粒子を遠くに押しやると、扇風機の近くでは空気の粒子が減ってしまいます。そのた



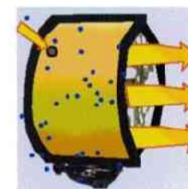
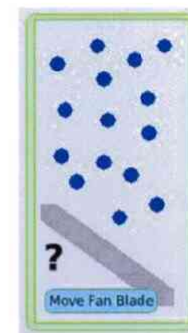
10歳の頃



Suddenly it occurred to me that the air particles must be already moving very quickly and bumping into each other. When the board or fan blades moved air particles away from the fan there were less near the fan and the already moving particles would have less to bump into and would thus move towards the fan. They didn't "know" about the fan, but they appeared to.

The "suck" of the vacuum cleaner was not a suck at all. What was happening is that things went into the vacuum cleaner because they were being "blown in" by the air particles' normal movement, which were not being opposed by the usual pressure of air particles inside the fan!

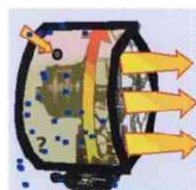
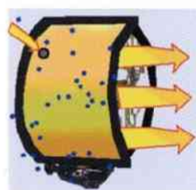
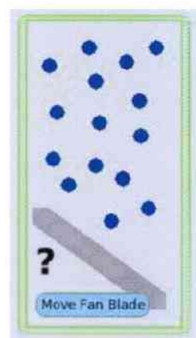
When my father came home that evening I exclaimed, "Dad, the air particles must be moving at least a hundred miles an hour!" I told him what I'd found out and he looked in his physics book. In there was a formula to compute the speed of various air molecules at various temperatures. It turned out that at room temperature ordinary air molecules were moving much faster than I had guessed: more like 1,500 miles an hour! This completely blew my mind! I'm pretty sure this was the first time I ever thought like a scientist and was able to resist commonsense and exert enough will to do an actual experiment about a phenomenon that really interested me.



め、常に動き回っている粒子は、他の粒子にぶつかって弾き飛ばされることなく、扇風機の近くまで移動してくるのです。店員たちは、掃除機のファンについて知っているように見えて、実は何も知らなかったのです。

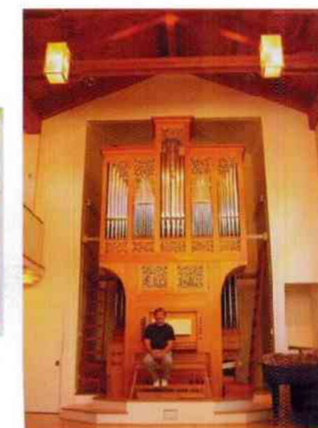
掃除機も「吸い込んでいる」ように見えて、実は吸い込んではいなかったのです。つまり、ゴミが掃除機に入ったのは、空気の粒子の通常の動きで「風が吹き込んだ」ためですが、それはファンの内側には通常の空気の粒子による抵抗がなかったからです。

その晩、父が帰宅すると、私は大声で言いました。「空気の粒子は時速100マイル以上で動いてるはずだよ！」私がその日発見したことを話すと、父は物理の本を持ってきました。そこには温度別に、様々な空気の粒子の速度を算出できる数式が載っていました。その時わかったのですが、通常の空気の粒子は、室温において、私の予想を遥かに超える速度で動いていたのです。なんと、時速1,500マイルです！本当にびっくりしました！私が科学者のように考え、常識を疑い、本当に興味を持った現象を実際に実験してみようと思ったのは、多分、この時が初めてだったのです。



Painting and Music

My mother was an excellent draftsman and played the piano, so I also got interested in art and music.



A few weeks ago, while playing the pipe organ in my house with the great music flowing through me, I realized that I did not like the original lecture I had sent to the Inamori Foundation. I was playing and feeling this wonderful music but had not tried to explain that the answer to “why?” for me is the “music of computing.” I changed this talk so I could try to explain why and how many scientists, mathematicians, and technologists are attracted to the aesthetic nature of these fields.

絵画と音楽

母はデッサンがとても得意で、ピアノも弾けたので、私も美術や音楽に興味を持ちました。



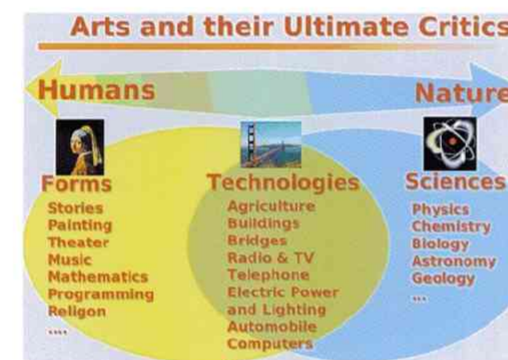
数週間前自宅でパイプオルガンを弾いていると、その素晴らしい音楽がまるで体の中を流れていくようでした。その時私は思ったのです。稲盛財団に提出した講演原稿ではだめだと。これほど美しい音楽を奏で、体で感じている私が、自分にとっての「なぜ？」に対する答えが「コンピューティングの奏でる音楽」であることを説明しようとしていなかったからです。そこで私は内容を変更し、どれほど多くの科学者や数学者、そして技術者が、こうした分野の美しさに魅せられているのか、そしてそれはなぜなのかについて説明してみることにしました。

「なぜ」の核心は芸術にあり

芸術とは「人間が作るすべてのもの」であり、これには信念（私たちは「現実」と呼びたがります）も含まれます。科学や技術を芸術だと考える人はそれほど多くありませんが、実際にはこの3つはすべて芸術なのです。左側には私たちに最も馴染みの深い芸術が位置し、これに科学と技術を加えた3つの分野で京都賞が授与されるのです。

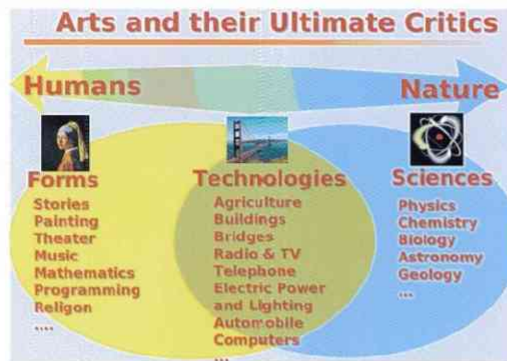
The Center of “Why?” Is Art

Art is “all the stuff that people make,” and this includes our beliefs (which we like to call “reality”). Most people don't think of science or technology as Art, but all three of these areas are actually art forms. The Fine Arts we are most familiar with are on the left hand side, and adding technology and science makes the three categories of prizes given by the Kyoto Prize committee.



One way to look at this vast area is to consider the ultimate critics of each art form. Most of what people call “Art” is the shaping of forms, and the ultimate critics are human beings. The forms are quite arbitrary and have no connection to the physical universe. For example, we can say: “It is the case that: blah blah blah,” and we can also insert a not into every sentence so we can say: “It is not the case that: blah blah blah.” So we can say anything, which is almost the same as saying nothing.

At the other extreme, on the right hand side, we have the sciences, whose ultimate critic is Nature. Our opinions and hopes don't matter over here, because Nature is just the way it is, not the way we'd like it to be. The *arts of science* are to find ways not to be fooled, to make the invisible more visible, and to create theories that are the best maps we can make of what we can't get at



このような広い分野については、それぞれの分野で最大の批評家は誰かということを考えてみるのも1つの方法です。人が「芸術」と呼ぶものは、ほとんどの場合何かを形作ることであり、最大の批評家は人間です。その形態は自由に決めることが可能で、物理的宇宙とは全く関係がありません。例えば、「事実にかくかくしかじかだ」とも言えますし、どの文章でも否定語の「not」を挿入して「事実にかくかくしかじかではない」と言うこともできるのです。つまり、どんなことでも言えるのですが、それは何も言っていないのと同じなのです。

それと対極の右端には科学が位置します。科学における最大の批評家は自然であって、私たちの意見や希望は重要視されません。自然は自然でしかなく、私たちがこうあってほしいと願うものではないのです。「科学の芸術」とは、騙されない方法を見つけ、目に見えないものが見えるようにし、私たちの手で直接にはたどり着けないことを知るための最高の地図となる理論を導き出すことなのです。また科学は非常に巧妙です。自然界に存在するものとは本質的に無縁な数学、物語、コンピューティングといった表現システムを使わなければならないからです（しかも私たちは、簡単に騙される脳を使わなければならない！）。

そして中央には、橋や飛行機といった自然に従わなけれ

directly. Science is very tricky because we have to use representation systems like mathematics, stories and computing that have no intrinsic relation to what's out there in Nature (and we have to use our own easily fooled brains!).

In the middle we have creations that have to heed Nature—such as bridges and airplanes—that we'd like to not break easily! But they also have visual forms that we'd like to be pleasing. The Technologies are very interesting art forms: they combine the traditional Arts with the new scientific Arts!

Technologies

One of the great human traits is the ability to Love so deeply that one desires to merge with one's beloved. It is the greatest experience in life to have this happen and be reciprocated. Artists are people who can enter into Love with the expressing of ideas and feelings as well as with other humans. Portraying Art as an Act of Love is the only way I know how to describe what the process feels like.

Glassblowing is an interesting example of an art form that is also a technology. A Venetian glassblower friend of mine once told me that if he could he would eat the molten blobs of glass on the end of his glassblowing pipe! I understand completely what he meant by that: he wanted to *become* his Art. The myth of Pygmalion falling in love with his creation applies strongly to such people.

No other reason is needed for doing Art. Pascal said: "The Heart has its reasons that Reason cannot know." Artists can't not do their Art: this is their basic personality trait.



ばならない創造物が位置します。こうしたものは、簡単に壊れてもらっては困るのです。しかし、これらにも私たちが魅力的であってほしいと願う形があります。技術とは、伝統的な芸術と新しい科学の芸術を結び付けている非常に興味深い芸術形態です。

技術

人間の最も優れた特性の1つに、深く愛するという能力があります。こうした特性があればこそ、人は最愛の人と一緒にでありたいと願うのです。この想いが実現し、報いられることが人生最高の経験なのです。芸術家は、他の人間だけでなく、アイデアや感情の表現にも愛を注ぐことができる人たちです。芸術を愛の行為として捉えることでしか私にはそのプロセスでどのような気持ちが生まれるのかを説明することはできません。

吹きガラスは、技術であると同時に一種の芸術でもあるという興味深い一例です。ベネチアガラスの職人をしているある友人がかつて私に言ったことがあります。できるものならガラス吹きパイプの端についている溶けたガラスの塊を食べてしまいたいと！私には彼の言わんとすることがよくわかりました。彼は自分の芸術そのものになりたかったのです。こうした人たちは、自分の作品に恋をしてしまうピュグマリオンのような存在なのです。

芸術に他の理由は要りません。パスカルの言を借りれば、「心には理性ではわからない理屈がある」のです。「芸術家は、創造せずには生きていけない」。これが彼らの基本的な特性なのです。

現代の「吹きガラス」

ガラスは、大部分が二酸化ケイ素である砂を原料としています。今日のコンピュータ・チップも、ほとんどがシリ

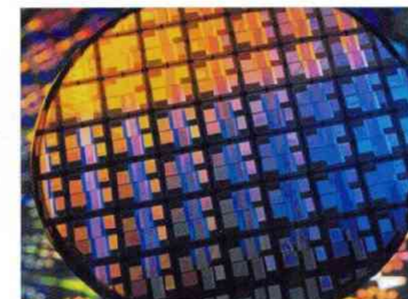


Modern “Glassblowing”

Glass is made from sand which is mostly silicon dioxide. Computer chips today are also mostly made from silicon, and here is a modern glassblower—Bob Noyce, one of the inventors of the integrated circuit.



Bob Noyce

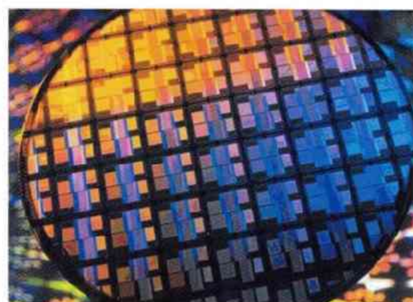


We can see that the silicon wafers are quite pretty physically, but their real beauty is more like the beauty of the printing press: it's the patterns that are impressed on the material that carry the real art—and again like the printing technologies, the patterns can be very subtle and far reaching.

コンでできており、ここに現代のガラス職人とも言える、集積回路の発明者の1人、ボブ・ノイスがいます。



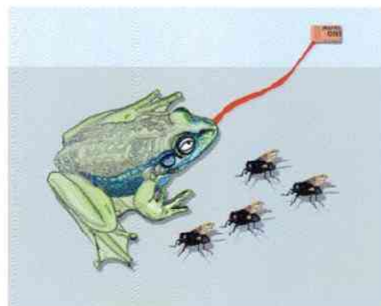
ボブ・ノイス



シリコンウエハーは物理的にとても美しいものですが、その真の美しさは印刷機の持つ美しさに近いものがあります。真の芸術をもたらすのは、その物質に刻み込まれたパターンであり、印刷技術同様、そのパターンはきわめて繊細で、広範囲に及ぶものなのです。

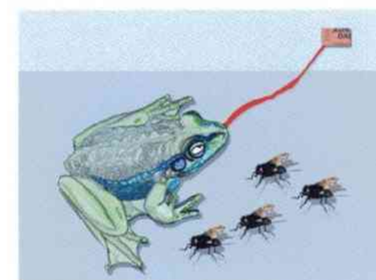
科学は巧妙！

生物が進化するのには生き延びるためであって、必ずしも宇宙を正しく理解するためではありません。例えばカエルの脳は、細長い形の動く物体を食べ物として認識します。ですからカエルがいつも食べているハエを少量のクロロホルムで麻痺させてカエルの前に置いても、カエルはそれがハエだと気づかず、食べようとはしません。



Science Is Trickier!

Living organisms are shaped by evolution to survive, not necessarily to get a clear picture of the universe. For example, frogs' brains are set up to recognize food as moving objects that are oblong in shape. So if we take a frog's normal food—flies—paralyze them with a little chloroform and put them in front of the frog, it will not notice them or try to eat them.



It will starve in front of its food! But if we throw little rectangular pieces of cardboard at the frog it will eat them until it is stuffed! The frog only sees a little of the world we see, but it still thinks it perceives the whole world.

Now, of course, we are not like frogs! Or are we?

We Are More Like Frogs Than We Would Like To Think!

When Shakespeare had Puck say, "What Fools these Mortals be!" he meant not so much the modern connotation that we are idiots, but instead that we are all easily fooled. In fact, we like to be fooled! Much of the literary, theatrical and magical arts are possible because we are able to be fooled and like to be fooled.

But we are also easily fooled when we are trying not to be, for example, when we are trying to learn about universe, or even just to draw. The great drawing teacher



Betty Edwards

食べ物が目の前にあるのに、餓死してしまうのです！
しかし、細長く切った小さなダンボールをカエルに投げて
やると、カエルは満腹になるまで食べ続けます！カエルは
私たちが見ている世界のほんの一部しか見ることができま
せんが、それでも世界のすべてを知っていると思っている
のです。

もちろん、私たちはカエルとは違います！いや、それと
も同じなのではないでしょうか？

私たちは、想像以上にカエルのように考える！

シェークスピアがパック（小妖精）に「人間はなんてバ
カなのでしょう！」と言わせていますが、これは現在使わ
れているような「間抜け」という意味ではなく「誰でも簡
単に騙される」という意味なのです。事実、私たちは騙さ
れるのが好きです！文学、戯曲、魔術が存在するのは、私
たちが騙され、また騙されることが好きだからといっても
過言ではありません。

しかし私たちは、騙されまいとしても簡単に騙されてし
まいます。例えば宇宙について学ぼうとか、絵を描こうと
する時でさえもそうなのです。優れたデッサンの教師であ
るベティ・エドワーズ先生は、授業の初日に必ず2つのテー
ブルを見せて生徒に説明します。絵を描くのが難しいの
は、慎重に手を動かすことができないからではなく、ヒト
の脳が世界中の対象を認識しようと躍起になるあまり、光
でできた形として対象を捉えることができないからだ。

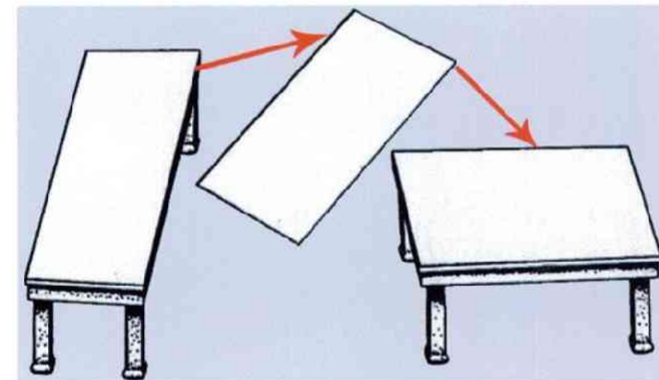
それを説明するため、先生は2つのテーブルの表面が大き
さも形も同じだと言います。この時点で先生の言うことを信
じる者など誰もいません。すると先生は、1つのテーブルの
表面を持ち上げて回転させると、もう1つのテーブルにびっ
たり合うことを証明して見せたのです。私は同じことを何百
回も試しましたが、未だにその理由がわかりません！



ベティ・エドワーズ先生

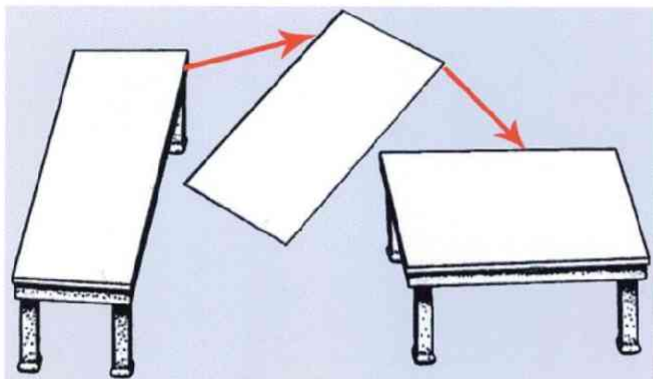
Betty Edwards always shows these two tables on the first
day of her art course, and explains to the students that
the reason people have difficulty drawing is not because
they can't move their hands carefully, but because their
brains are too eager to recognize objects in the world
rather than the shapes made of light.

To illustrate this, she tells them that the table tops
are exactly the same size and shape. No one believes
here. She then moves the top from one table, rotates it
and shows that it exactly fits on the other table. I've been
doing this example hundreds of times and I still can't see
this!



Amazingly, the size and shape of the two table tops are exactly the same!

What artists do to get around these problems is to
measure using instruments to get a more accurate sense
of what's out there. And this is what scientists do also.
There's a nice saying from the Talmud: We see things
not as they are, but as we are. That is, whenever we're
looking out into the world, we're always seeing ourselves,
we're not really seeing what's out there. We have to learn
very carefully how to see what's out there.



驚くことに、2つのテーブルのサイズは全く同じなのです！

芸術家は、こうした問題をうまく回避するために道具を使って計測を行い、そこに存在するものをより正確に把握しようとしています。科学者もまた同じことをするのです。タルムード（ユダヤ教の律法集）にはこんな名言があります。「私たちは、ものをあるがままの姿ではなく、私たちの立場で判断している」。私たちが世界を見る場合、必ず私たち自身を見ているのであって、そこに存在するものを見ているわけではありません。私たちは、存在するものの見方を慎重に学ぶ必要があるのです。

科学とは、表現と「そこに何がある？」との関係

ここに2枚の地図があります。両方とも大変詳しく、もっともらしく描かれています。



Science Is a Relationship between Representations and “What’s Out There?”

Here are two maps, both with lots of detail, both convincingly drawn.



On the right is one of India made in the 19th century, carefully made by English surveyors. The other on the left is of Tolkien’s Middle Earth, where the action of the fantasy *Lord of the Rings* takes place.

There is no way we can tell from just looking at these maps which ones are “real” and which ones are made up. We need other processes to help—these other processes are the Art of Science.

We can also start getting the idea that the maps are not going to be an actual depiction of reality, but a kind of “accurate as possible” depiction of the shadows that we can pick up with our senses and with the aid of instruments.

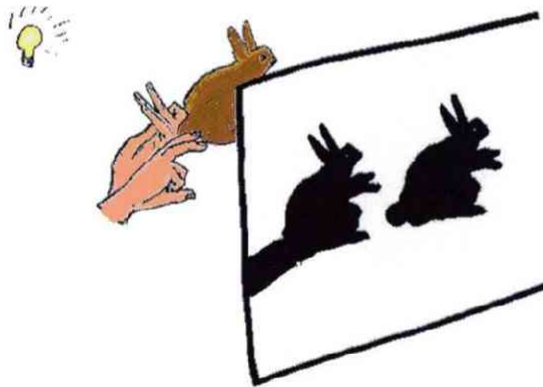
Let’s take gravity as our phenomenon and represent it as a bunny rabbit. The shadow of the bunny is what we can experience and measure about gravity on Earth.

右側は、19世紀にイギリスの測量技師が苦心の末完成させたインドの地図の1つです。左側は、トールキンのファンタジー小説『ロード・オブ・ザ・リング（指輪物語）』の舞台となった中つ国です。

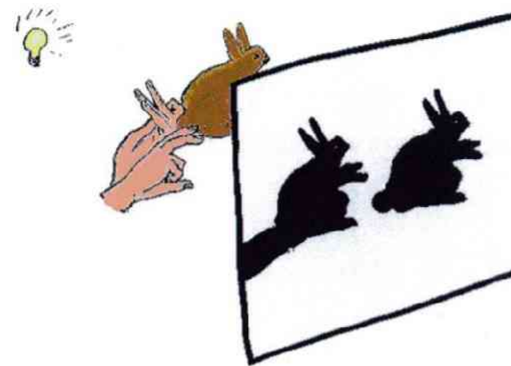
両方を見ただけではどちらが「本物」なのかは分かりません。私たちには、それを知る助けとなる他のプロセスが必要であり、こうしたプロセスが科学の芸術なのです。

また、私たちには地図とは現実を実際に表現するものではなく、私たちが自分の感覚や道具の力を借りて捉えることのできる影を、「できるだけ正確」に描いたものだということが徐々にわかるようになります。

ここで、重力を現象として捉え、それを子うさぎとして表現してみましょう。子うさぎの影とは、私たちが地球上の重力について体験し、測定できるものです。

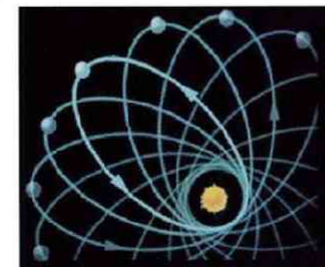


では、同じ影を持つモデルを作ってみましょう。ここで作るのは、手で操る影人形—これをニュートンの重力の法則と考えてください—ですが、たいいてい場所で、本物そっくりの子うさぎの影ができます。ニュートンはモデルを作るために数学を使用しました。しかしよく見ると、本当の子うさぎの影には丸いしっぽがあるのにニュートンのモデ



We can then try to make a model that will cast the same shadow. Here we make a hand shadow puppet—think of it as Newton's Theory of Gravity—that makes a pretty good shadow bunny in most places. Newton used Mathematics to make his model, but if we look carefully enough we can see that the shadow of the real bunny has a round tail and the Newton model has an arm sticking out!

The “arm on the bunny” took a while to find, but the orbit of the planet Mercury is not in accord with Newton's theory, so Newton's model is not as perfect as we'd hoped.

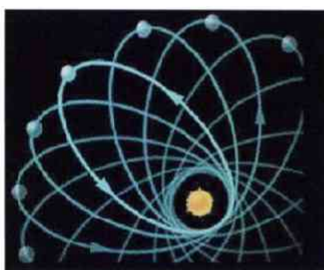


The orbit of Mercury precesses in a way that Newton's model doesn't predict (highly exaggerated)

Einstein had to take a very different approach from Newton in order to put the round tail on the human shadows.

ルのうさぎからは腕が突き出しているのがわかります！

ニュートンのモデルの「うさぎの腕」の発見までには少し時間がかかりましたが、水星の軌道が、ニュートンの理論に当てはまらないことから、ニュートンのモデルは私たちが期待したほど優れたものではないということがわかります。



水星の軌道は、ニュートンの法則では予測できないような歳差運動をします（ここでは誇張されています）

アインシュタインは、人間の影に丸いしっぽをつけるためにニュートンとは対照的なアプローチを取らなければなりませんでした。

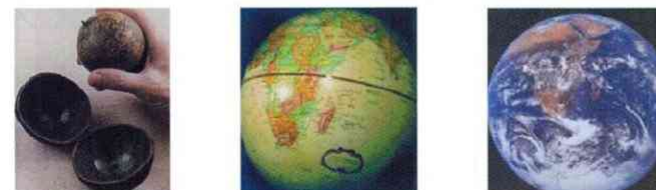
彼は人生におけるあらゆる瞬間を覚えておかなければならない、という趣旨の言葉を遺しています。つまり「現実と真実を慎重に区別するべきだ」というのです。彼は、言葉、特に数学で、真実を作りだすことができると言いたかったのです。この場合の真実とはそれ自体に過ぎないため、完全な一貫性を持たせることができるからです。ところが、数学や他の表現システムを「そこに存在するもの」にあてはめようとすると、実際の真実から離れてしまい、おおよその地図作りで間に合わせることになってしまうのです。

科学の重要性は、苦心の末に弾き出された近似値をいかにうまく扱うかということにあるともいえます。表現は、これまでの物語のようなものですが、質的には新しい物語

He said something that we should try to remember every moment of our lives: “You should be careful to distinguish what is true from what is real.” He meant that we can make true things in languages—especially mathematics—because it is only about itself, and can be made very consistent. But when we try to apply mathematics and other representational systems to “what’s out there,” we depart from actual truth and have to make do with approximate mappings.

The importance of science is partly how well it is able to do with careful approximations. The representations are still story-like but a qualitatively new kind of story. If we look at this in the larger sense, it means that for efficiency’s sake, evolution set us up to think that our perceptions and beliefs are reality, and we act that way. In the last few hundred years using science we’ve found over and over again that this is not the case: we are constantly fooling ourselves. This means that a very good strategy for life is to insert slow thought between perception and quick action, because our initial perceptions and reactions are often wrong and dangerous.

The ability of the Scientific Arts to “make the invisible a little more visible” has been quite remarkable. By the 18th century, people in Europe delighted in carrying around pocket globes that depicted the Earth as it would be seen from space, even though the internal combustion engine and airplanes had not been invented yet.



です。これをより大局的に見れば、効率性を考慮するがゆえに私たちは進化によって自らの理解や信念こそが現実であると考えようになり、またそのように行動しているというわけです。この数百年間で、私たちは科学を用い、それが真実でないことに幾度も気づくようになりました。私たちは、自分たち自身をずっと欺いてきたのです。つまり人生にとって非常に素晴らしい戦略とは、認識した後にゆっくり考え、その後すばやく行動することだということです。私たちの最初の認識と反応が間違っていたり、危険だったりすることは多いのです。

科学的芸術の「見えないものを少しでも見えるようにする」という能力は、これまでずっと注目に値するものでした。すでに18世紀のヨーロッパでは、内燃エンジンや飛行機こそ発明されていなかったものの、これが宇宙から見た地球とばかりに、人々は小さな球体を持ち歩いて楽しんでいました。



200年後、人類がついに宇宙へ飛び立ち、地球にカメラを向けた時も驚きの声はありませんでした。一体全体、18世紀にどうやって地球の姿を知ることができたのでしょうか？ 1つには、「知る、そして見つけ出す」ということが意味する概念そのものが変化したことを挙げることができます。

今日、目に見えないもので最も重要なのは、私たち自身です。ほとんどの人は、自分たちやその社会が作り上げた

Two hundred years later, when we finally did go out into space and turned a camera back on the Earth, there were no surprises. How was it possible to know this in the 18th century? In part because the very notion of what it meant to “know and find out” had changed.

The most important invisible thing today is ourselves. Most people live in stories made up by them and their societies, and they call these stories “reality.” We are the most dangerous force on Earth, to ourselves and the environment. It is the main aim of education to provide not information or techniques, but a better set of perspectives for better seeing the invisible.

You can't learn to see until you realize you are blind. Education is to help people realize they are blind and show them how to see a little.

The Beauty of Mathematics

Now let's take a look at the several kinds of beauty in mathematics: both internal, as a set of harmonious relationships, somewhat like music, and in the ways it has been used to depict the external universe.

For example, Newton's theory of gravitation is very beautiful, and how he arrived at it was quite beautiful. The poet Keats said “Beauty is Truth, and Truth Beauty.” And many thought that Newton's theory was True because it was beautiful and worked so well. But in spite of its beauty and usefulness—we use it today to accurately send spaceships around the solar system—the orbit of Mercury and many other recent observations show that it is not the whole story about gravity. Einstein's theory, which is also quite beautiful, supplies more of the story, but not all of it.

Many of these beautiful mathematical theories are difficult to explain to a general audience. But some can be understood much more directly.

$$F = G \frac{mM}{d^2}$$

$$E = mc^2$$

$$e^{i\pi} + 1 = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi\rho$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}$$

$$A^2 + B^2 = C^2$$

物語の中で生きていて、こうした物語を「現実」と呼んでいます。私たち人間は、自分自身や環境にとって、地球上で最も危険な存在です。教育の主な目的とは、情報や技術ではなく、見えないものを少しでも見えるようにするためのより優れた視点を提供することです。

目が見えないことに気づかなければ、見ることは身につきません。教育とは、人々に目が見えないことを気づかせ、どのようにすれば少しでも見えるようになるかを教えることなのです。

数学の美しさ

では、数学の持つ様々な美しさについて見てみることにしましょう。それはどこか音楽に似て、調和のとれた関係としての内的宇宙であると同時に、外的宇宙を表現するためにも用いられてきました。

例えば、ニュートンの重力の法則は実に美しく、また彼がこの理論に到達したプロセスも非常に美しいものです。詩人キーツは「美こそ真、真こそ美」と言いました。さらに、ニュートンの理論は大変美しく、しかも役に立つため、多くの人が真実だと考えました。しかし、その素晴らしさや実用性—今日、私たちはこの理論を利用して太陽系の他の星へロケットを正確に飛ばしているのですから—にもかかわらず、水星の軌道や最近行われた他の多くの観測から、彼の理論が重力に関する理論全体の一部にすぎないことがわかっています。アインシュタインの理論もきわめて美しく、さらなる物語を提供してくれますが、やはりそれがすべてではありません。

このように美しい数学理論の多くは一般の人に説明するのが難しいのですが、中にはすんなりと理解できるものもあります。

例えば、ピタゴラスの定理は非常に画期的なものです。

$$F = G \frac{mM}{d^2}$$

$$E = mc^2$$

$$e^{i\pi} + 1 = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi\rho$$

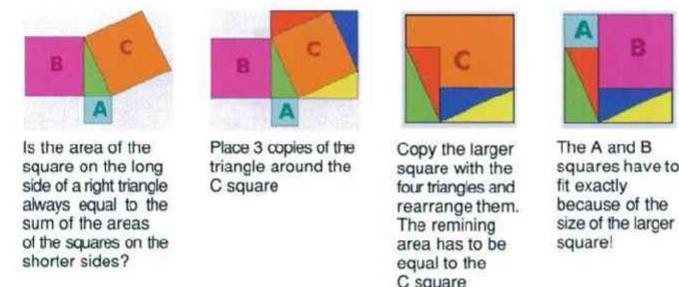
$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{1}{c} \dot{\mathbf{B}} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{c} \dot{\mathbf{E}} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}$$

$$A^2 + B^2 = C^2$$

For example, the proposal of Pythagoras is quite startling. There are many proofs of it, including this one, which might be the original from 2,500 years ago.

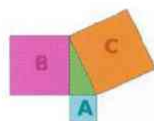


We can surround the C square with 3 more of the triangles to make a larger square whose area is the C square plus 4 triangles. We copy this and move the triangles. The odd shaped orange area still has to be the area of the C square. We see that we can move the A and B squares to exactly cover this area. Bingo!

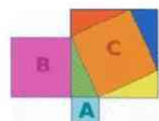
We can reflect that this will work for any right triangle regardless of shape.

This is very beautiful!

それを証明する方法はたくさんあり、もとを辿れば2,500年前にまで遡るものもあります。



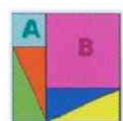
直角三角形の長辺に接する正方形の面積は、三角形の残り2つの辺に接するより小さい正方形2つの面積の和に等しいのでしょうか？



正方形Cの三角形と接していない面に、同じサイズの直角三角形のコピーをおきます



正方形Cと4つの直角三角形でできる大きな正方形をコピーし、並べ替えます。三角形に隠されていない、残りのエリアの面積は正方形Cと同じです



正方形Cの形が変わったため、この残りのエリアに正方形AとBがぴったり収まります

正方形Cの周りをさらに3つの三角形で囲むと、正方形Cと4つの三角形をあわせた面積の大きな四角形ができます。これをコピーして、三角形を移動します。不規則な形をしたオレンジの部分は、正方形Cの面積のままです。AとBの正方形を移動すると、この部分にぴったりと当てはまります。ほらね！

これは形に関係なく、どんな直角三角形にも応用できます。

見事でしょう！

コンピューティングの美しさ

コンピューティングの一部は、特殊な数学です。この新しい芸術における最初の美しい作品の1つは、1950年代後半に生まれました。私にとっての英雄であり、また京都賞受賞者として本日ここにお見えのジョン・マッカーシーが、きわめて強力なプログラミング言語の関係を記述するため、非常に簡潔で新しい数学的方法を発見したからです。



ジョン・マッカーシー

The Beauty of Computing

One of the parts of computing is a special kind of mathematics, and one of the earliest beautiful creations in this new art came in the late 1950s, when John McCarthy—one of my heroes, and a Kyoto Prize Laureate who is here today—found a very compact and new mathematical way to write down the relationships of a very powerful programming language.



John McCarthy

```

apply(f, a) =
  [atom(f) -> {if(f, CAR) -> cons(f, CDR)
               if(f, CON) -> cons(f, CDR)
               if(f, TOM) -> atom(CAR)
               if(f, EQ) -> if(f, CAR, CDR)
               T -> apply(cons(f, CAR), CDR)}
  if(car(f) = LAMBDA) -> eval((add(f) (cons(cons(f, CAR)
                                                    if(car(f) = LAMBDA) -> apply(cons(f, CAR), CDR)
                                                    cons(f, CAR))
                                                    cons(f, CAR))
                                T -> apply(cons(f, CAR), CDR))
                                cons(f, CAR))

eval(ea) = [atom(ea) -> if(assoc(ea),
                                atom(ea) ->
                                  {if(car(ea) = QUOTE -> car(ea)
                                   if(car(ea) = COND -> cons(car(ea), CDR)
                                   T -> apply(cons(car(ea), CDR), CDR))
                                T -> apply(cons(car(ea), CDR), CDR)]

pairs and assoc have been previously defined.

eval(ea) = [eval(cons(ea)) -> eval(cons(ea))
            T -> eval(cons(ea))

and
eval(ea) = [eval(ea) -> NIL;
            T -> cons(eval(car(ea)), eval(cdr(ea)))]

```

When I first understood this as a student in the 60s, I was quite overcome by the beauty and power of this way of looking at things. I thought of this as the Maxwell's Equations of computing! It had a huge effect on the way I thought about many things. To me, this is the essence of what a computer science should be!

I spent quite a bit of the last few months trying to find a way to explain the meaning of John's short program to this Kyoto Prize general audience, but wasn't successful. Like much other great and beautiful mathematics, it is not that it is hard, but there is a fair amount of context that is needed to follow the arguments. In fact, most of the professional computing world today does not yet understand the implication of this half page of Art from 40 years ago, and this has really held back the entire field.

```

apply(n,a) =
  [atom(n) → {eq(n,CAR) → car(n);
               eq(n,CONS) → cons(n);
               eq(n,ATOM) → atom(n);
               eq(n,QUOTE) → quote(n);
               T → apply(n,a)};
   eq(car(n),CONS) → eval(cons(n),apply(car(n),a));
   eq(car(n),ATOM) → apply(car(n),a);
   eq(car(n),QUOTE) → cons(car(n));
   T → apply(car(n),a)]

eval(n,a) = [atom(n) → car(n);
             atom(car(n)) → car(car(n));
             {eq(car(n),QUOTE) → car(n);
              eq(car(n),CONS) → cons(car(n));
              T → apply(car(n),eval(car(n),a))}]

paths and arcs have been previously defined.

evcon(n,a) = (eval(cons(n),a) → eval(cons(car(n),a);
T → evcon(car(n),a))

and
eval(n,a) = [atom(n) → n;
             T → cons(eval(car(n),a),eval(cdr(n),a))]

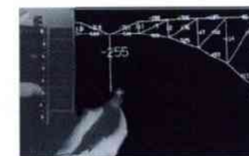
```

1960年代まだ学生だった私は、この方法を初めて理解し、そのものの見方の美しさとすごさにすっかり圧倒されてしまいました。私はこれをコンピュータ版のマクスウェルの方程式だと思いました！私が多くのことを考えるうえで、このことから非常に大きな影響を受けました。私にとって、この方法こそがコンピュータ・サイエンスのあるべき姿なのです。

この数カ月というものの、ジョンが考案した短いプログラムが持つ意味を、本日お集りいただいた皆さんにわかっていただく方法はないかといろいろ考えましたが、無理ではなく、それを理解するにはかなり多くの背景を知らなければならぬからです。事実、今日の専門的なコンピューティングの世界では、40年前にできた半ページのこの芸術の意味が理解されていないといっても過言ではなく、そのことが、この分野全体の進歩を妨げているのです。

幾何学の例にもなりますが、偉大なコンピューティング芸術のより簡単な方法に関するシステムに、アイヴァン・サザーランドが1960年代初頭に作成した「スケッチパッド」

An easier work of great computer art to appreciate—a kind of parallel to the geometry example—is Ivan Sutherland's "Sketchpad: A man-machine graphical communication system" from the early 60s. It was the first example I saw in graduate school that showed how special, different and important computers could be.



Ivan Sutherland

What it could do was quite remarkable, and completely foreign to any use of a computer I had encountered. The three big ideas that were easiest to grapple with were: it was the invention of modern interactive computer graphics; images were described by making a "master drawing" that could produce "instance drawings"; control and dynamics were supplied by "constraints," also in graphical form, that could be applied to the masters to shape and inter-relate parts. It was the first to have clipping and zooming windows—one "sketched" on a virtual sheet about 1/3 mile square!

Just by sheer lucky chance, grad school at the University of Utah in 1966 was one of about 15 Advanced Research Project Agency projects (sponsored by the US government) that were engaged in what they called the "ARPA Dream": the destiny of computing was to become an interactive intellectual partner and intercommunications medium for everyone on Earth.

Work was afoot to create an "intergalactic network" (now called the Internet) that would link all of the computers on the planet. There was quite a challenge of scalability, since no one had ever built such a network for data.



Dave Evans, Head of the University of Utah Computer Science Department, and my mentor

ド・対活型図形処理システム (Sketchpad: A man-machine graphical communication system)」があります。これは、コンピュータがこれまでにない、特別でしかも重要な存在になりうるかについて感じさせるシステムとして、当時、大学院生だった私が最初に出会ったものでした。



アイヴァン・サザランド

スケッチパッドを使えばあっと驚くようなことができ、しかもそれは、私がそれまで経験したコンピュータの使い方とは全く違っていました。スケッチパッドの最もわかりやすい3つの優れたアイデアとは、それが現代の対話型コンピュータ・グラフィックスの発明だったこと、画像作成が原画をもとにした再描画を可能にするように設計されていたこと、そして制御や力学的な構造解析が拘束条件に対応していたことや、さらにそれらの描画が原図にも内部構造に対しても可能になっていたことです。切り取りやズームウインドウが初めて実現し、1/3平方マイルほどの仮想シート上でスケッチが可能になったのです。

幸運にも1966年当時、ユタ大学大学院では高等研究計画局の約15のプロジェクト（米国政府が支援）の1つである「ARPAドリーム」というプロジェクトを手がけていました。それは、未来のコンピュータが対話可能な知能をもった相手となるだけでなく、地球上のすべての人にとって相互通信媒体にもなるというものでした。

研究では、地球上のすべてのコンピュータを結ぶ「銀河間ネットワーク（現在のインターネット）」の開発が進んで



デーブ・エバンス：ユタ大学コンピュータ・サイエンス学部長で、私のよき指導者



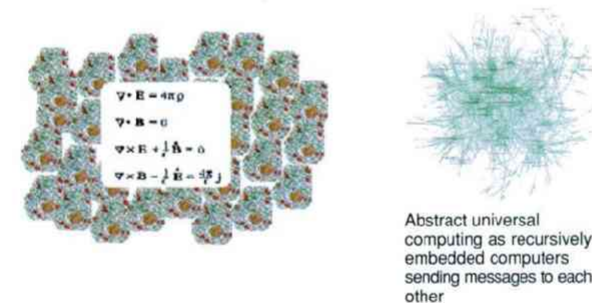
JCR Licklider "Lick," Bob Taylor, and The ARPANet



The Simula paper, Dahl and Nygaard

Right after seeing Sketchpad, I was introduced to a little-known simulation language, Simula, from Norway and gradually realized that it was a very powerful way to program Sketchpad-like structures.

My undergraduate concentrations had been in pure mathematics and molecular biology, and I suddenly saw the analogies between biology, mathematics, computer graphics and networking.

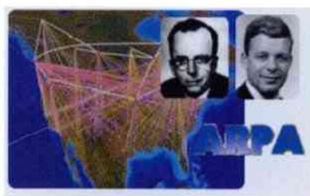


Abstract universal computing as recursively embedded computers sending messages to each other

This gave me a mental image that everything in computing could be represented by little computers communicating with each other.

I designed a system that could do this and started experimenting with it. When someone asked me what I was doing, I said "object-oriented programming." Now I wish that I'd come up with a more suggestive term!

いました。それ以前にはこうしたデータ用ネットワークが開発されていなかったため、この試みは拡張性への大きな挑戦でした。



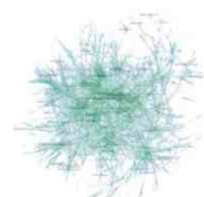
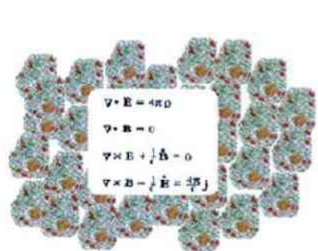
JCRリックライダー（リック）、ボブ・テイラーそしてARPAnet



Simulaに関する論文と、その著者であるダールとニガード

スケッチパッドに出会った直後、私はノルウェーのSimulaというあまり知られていないシミュレーション言語を知りました。そしてこれが、スケッチパッドのような構造をプログラムするきわめて強力な手段だということが徐々にわかってきました。

大学時代に純粋数学と分子生物学に没頭していた私が、突然、生物学、数学、コンピュータ・グラフィックス、そしてネットワークの共通点に気づいたのです。



抽象的なユニバーサルコンピューティングの例：再帰的に組み込まれ、互いにメッセージを送るコンピュータ

これをきっかけに私は、コンピューティングのすべてが互いに通信する小さなコンピュータによって説明できる、というイメージを思い描くようになりました。

私は、このイメージを実現するためのシステムを設計し、実験に取りかかりました。何を研究しているのかと尋

Doug Engelbart and “Thought Vectors in Concept Space”

While I was working on objects, Utah was visited by the amazing Doug Engelbart. His notion of the ARPA dream was that the destiny of oNLine Systems (NLS) was the “augmentation of human intellect” via an interactive vehicle navigating through “thought vectors in concept space.”



Doug Engelbart, the father of personal computing using his system NLS



NLS controls showing the first mouse and a chord keyboard for the left hand

What his system could do was incredible. Not just hypertext, but graphics, multiple panes, efficient navigation and command input, interactive collaborative work, etc.



Immersive collaborative screen sharing in 1968!



Having a meeting using NLS as communications and shared context

An entire conceptual world and world view. The impact of this vision was to produce in the minds of those who were “eager to be augmented” a compelling metaphor of what interactive computing should be like.

Two other amazing works of computer art that had recently been created were my vote for the first personal computer—the LINC of Wes Clark (one of the design requirements was that it be shorter than the person using

ねられると、「オブジェクト指向プログラミングです」と答えました。今にして思えばもっと思わせぶりの名前にすればよかったと思います。

ダグ・エンゲルバートと「概念空間の思考ベクトル」

オブジェクトの開発中に、なんとダグ・エンゲルバートがユタ大学を訪問しました。彼のARPAドリームの概念は、将来のオンライン・システム (oNLine Systems; NLS) で、「概念空間の思考ベクトル」の中を移動する乗り物のような対話式手段を利用して、「人間の知性の拡大」を実現するというものでした。



自らの開発したNLSを操作するパーソナル・コンピューティングの父、ダグ・エンゲルバート



NLSのコントローラ：世界初のマウスとコードキーボード（左側）

彼のシステムには信じられないようなことができる可能性がありました。ハイパーテキストだけでなく、グラフィック、複数のペイン、効率的なナビゲーションやコマンド入力、対話型コラボレーションなど、概念世界と世界観のすべてが包含されていたのです。

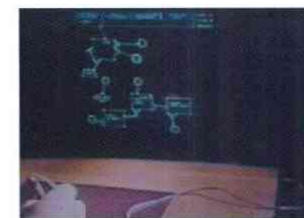


1968年の没入型のコラボレーション機能をもつ共有画面です！



NLSを通信・共有環境として会議を行う

it!)—and the first pen-based system, the beautiful GRAIL system from RAND Corporation.



So this was a very Romantic time when my mentor Dave Evans introduced me to his friend Ed Cheadle, who was working on “a little machine” to fit on a desktop and interact with engineers. I suggested we try to make it work for professionals in many fields, and that was the start of a pleasant collaboration on the FLEX Machine that we termed a “Personal Computer.”

Here is a self-portrait drawn on its own display. It had windows and pen based tablet input, and looks pretty familiar.

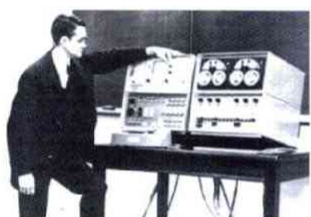


Ed Cheadle and Alan Kay: FLEX machine self-portrait, ca. 1968

While we were working on the FLEX machine, I started visiting interesting uses of interactive computers for end-users, and the most startling visit was to Seymour Papert's early work with children and LOGO.

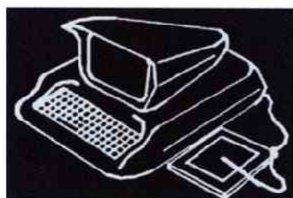
このような構想は、「知性の拡大」を渴望する人々の心に、対話型コンピュータのあるべき姿を強く印象付けました。

近年開発されたコンピュータ芸術の驚くべき研究成果を他に2つ挙げるとすれば、ウェス・クラークが設計した最初のパーソナル・コンピュータ—LINC（設計にあたって求められたことの1つは、それを使う人間の背丈よりも高さが高いことでした!）と、初のペン入力システムであるRAND社の見事なGRAILと呼ばれるシステムでしょう。



ですから、私の良き指導者であるデーブ・エバンスが友人のエド・チードルに紹介してくれた時は、まるで夢のようでした。彼は、技術者との情報交換を可能にするデスクトップ型の「小さな機械」の開発に携わっていました。私が多くの分野の専門家向けにその機械の実用化を提案したことで、FLEXマシン開発という楽しい共同作業が始まり、私たちはこの機械を「パーソナル・コンピュータ」と名付けたのです。

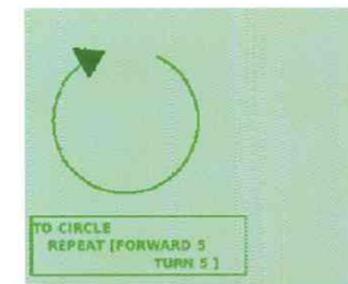
これはディスプレイ上に描かれた自画像です。この機械はウィンドウがあって、ペン型タブレットでの入力可能な、お馴染みのものです。



エド・チードルとアラン・ケイが開発したFLEXマシンによる自画像



Seymour Papert, with an early turtle and some eager children



The program to draw a circle in LOGO is so simple that children can invent it

Papert was a mathematician who had also studied with the child cognitive psychologist Jean Piaget. He had a great insight: that the special nature of the computer could bring quite of bit of real and important mathematics within the reach of children, and would create a Mathland, where mathematical language would have great meaning for children.

This completely blew my mind! I thought this was the greatest idea anyone had ever had for what the computer was really good for, and I immediately started to think about a computer like the FLEX machine, but for children.

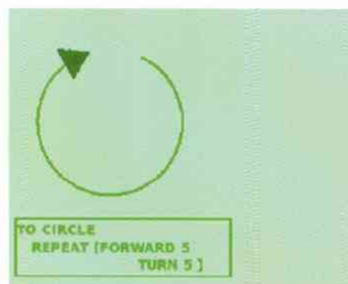
On the airplane back to Utah I drew a little cartoon showing two children learning physics on their children's computer—which I called a Dynabook—by making the game of Spacewar, using a special programming language as a new kind of highly expressive and powerful mathematics.



FLEXマシンの開発中に、エンドユーザー向け対話型コンピュータに興味深い方法で活用していた人々を訪問するようになりました。中でも最も衝撃的だったのは、子供たちにLOGOを使わせる研究をしていたシーモア・パパートを訪問したことです。



シーモア・パパート、初期のタートル(グラフィック機能)と熱心な子供たちと共に



LOGOで円を描くプログラムは、子供でも簡単に発明できるほど簡単なものです

パパートは数学者でしたが、かつて児童認知心理学者のジャン・ピアジェのもとで学んだこともありました。彼は深い洞察力の持ち主でした。コンピュータの特長を生かせば、重要な本物の数学がほとんど子供たちの手の届く範囲に入り、数学的言語が子供たちにとって大きな意味を持つ「数学の国 (Mathland)」が実現されると考えたのです。

これには本当に驚きました！コンピュータの特長をこれほど生かしたアイデアはかつてなかったと思った私は、すぐさま子供向けのFLEXマシンのようなコンピュータの開発を考えるようになりました。

ユタに帰る飛行機の中で、私はちょっとしたマンガを描いてみました。2人の子供が表現力がとても豊かで強力な新しい数学である特殊なプログラミング言語を駆使してダイナブック (Dynabook) という子供用コンピュータで宇宙戦争というゲームを作り、物理学を勉強する姿です。

I had been thinking of computers as tools, but this made me realize that the computer is a medium of expression—like reading and writing amplified by the printing press.

I had been a professional musician and so I also made the connection to this as a *new kind of instrument whose music is all ideas*.

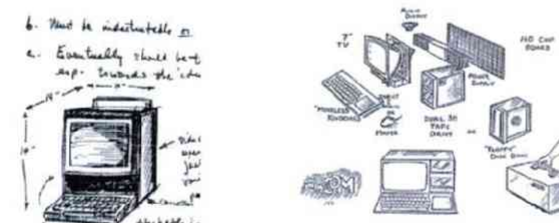
We have intimate relationships with the media that represent our ideas and this insight had a great effect on me.



We have intimate relationships with our tools for art; shouldn't this also be the case for computers?

Then, at Xerox PARC in the early 70s, about two dozen of us young ARPA computer scientists got a chance to really invent personal computing and networking on a much larger and more practical scale.

I went there to try to make a practical version of a children's computer—an “interim Dynabook”—until the real Dynabook technology came along. Here are sketches of ideas from 1970 and 1971.



In the meantime, there was the need for a new kind of object-oriented language that could be programmed by young children.

I had been thinking about it, but was interrupted by a hallway bet about “how large would a description of the world's most powerful computer language be?”

Having understood John McCarthy's LISP by then, I said, “Half a page!” They said, “Prove it.” Two weeks



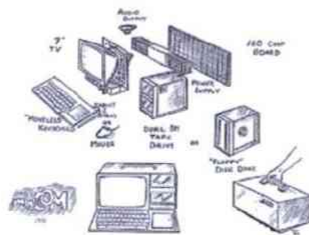
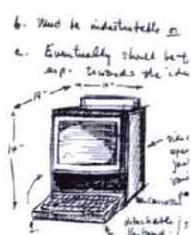
それまでの私は、コンピュータを道具として考えていましたが、印刷機のおかげで読み書きが簡単にできるようになったように、コンピュータも一種の表現媒体だと気づいたのです。

私はプロの音楽家でもあったため、「あらゆるアイデアを奏でる新たな楽器」としてコンピュータを位置づけたのです。

私たちは、自分たちのアイデアを表現してくれるメディアと密接な関係にあります。こうした発想は私に大きな影響を与えました。

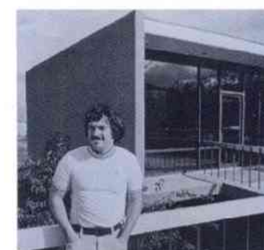
やがて1970年代初めに、私たちARPAの約20人あまりの若手コンピュータ科学者は、ゼロックスのパロアルト研究所 (PARC) で、より実用的で大規模なパーソナル・コンピューティングおよびネットワークングを実際に開発するというチャンスに恵まれました。

私がそこに移ったのは、実用的な子供用コンピュータ、つまり「暫定ダイナブック」を開発し、最終的には真のダイナブック技術を実現しようと思ったからです。ここに1970年から1971年にかけてのアイデアをスケッチしたものがあります。



私たちは、芸術の道具に対して
そうであるように、コンピュー
タとも親しい関係になってもよ
いのではないのでしょうか？

later I had this for the kernel of a new kind of object-based language, using some of John's techniques, but put in directly executable form.



Xerox PARC in 1972



Dan Ingalls

One month later my colleague Dan Ingalls had programmed this into one of our minicomputers and we suddenly had a working, very high level, simple and powerful dynamic object language!

[illegible]

The kernel of Smalltalk. How small powerful "computer math" can be



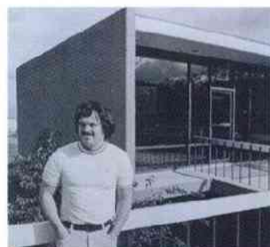
Chuck Thacker

And a few months after that, we suddenly had an interim Dynabook: the Alto personal computer, built by Chuck Thacker and jointly designed by him and a few more of us, including Butler Lampson.

ところで、子供たちにもプログラミングできる新しいオブジェクト指向言語が必要でした。

私はそのことをずっと考えていましたが、「世界で最も強力なコンピュータ言語をどのくらいの長さで説明できるか？」ということが仲間内で賭けの対象となった時には、思わずムキになってしまいました。

すでにジョン・マッカーシーのLISPについて理解していたので、私は「半ページでできるさ！」と言いました。すると仲間は「やってみろ」と言ったのです。2週間後、ジョンの技術の一部使用しながらも直接実行形式の、新しいオブジェクトベース言語の核をなす設計を完成させました。



ゼロックスのパロアルト研究所 (PARC) にて。1972年



ダン・インガルス

```

eval (lambda (exp)
  (cond ((number? exp) exp)
        ((symbol? exp) (lookup exp 'env))
        ((application? exp)
         (let ((operator (eval (car exp) env))
               (operands (map (lambda (exp) (eval exp env))
                               (cadr exp))))
           (apply operator operands)))
        ((lambda? exp)
         (let ((parameters (cadr exp))
               (body (caddr exp)))
           (lambda (args)
             (eval (subst body parameters args) env)))
         )
        ((closure? exp)
         (let ((parameters (cadr exp))
               (body (caddr exp))
               (env (cadddr exp)))
           (lambda (args)
             (eval (subst body parameters args) env)))
         )
        (else (error "unknown expression type: ~s" exp))))

lookup (symbol) (env)
  (cond ((null? env) (error "unbound variable: ~s" symbol))
        ((symbol=? symbol (car env)) (cadr env))
        (else (lookup symbol (cddr env))))

subst (body parameters args)
  (cond ((null? parameters) body)
        ((symbol=? (car parameters) (car body)) (car args))
        (else (cons (subst (cadr body) parameters args)
                      (caddr body))))

```

Smalltalkのカーネル：パワフルなコンピュータ数学は、こんなに小さなものなのです

1カ月後、同僚のダン・インガルスが私たちのミニ・コンピュータの1つにこれをプログラミングしたことで、突如として正常に機能し、レベルが高く、しかもシンプルでパワフルなオブジェクト言語が完成したのです！



Butler Lampson



Gary Starkweather



Bob Metcalfe



Dave Boggs

Gary Starkweather had just created the first workable laser printer and it was incredible even by today's standards: a page a second at 500 pixels/inch.

Bob Metcalfe and Dave Boggs were just starting the Ethernet to connect all this together.

And Dan Ingalls and I were shortly joined by computer scientist and educator Adele Goldberg to start making experiments for children. A major milestone was putting the first Altos in a school in 1975.



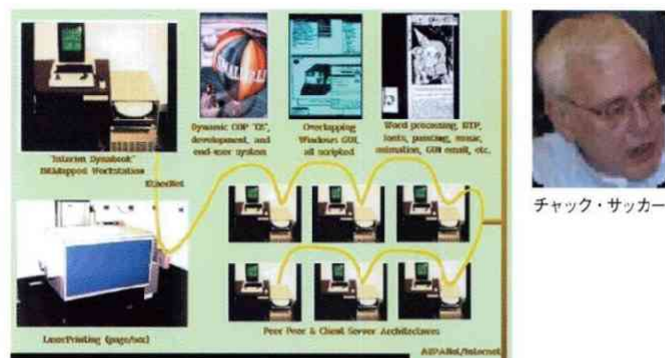
Adele Goldberg

Over the next few years of the mid 70s, more than a thousand Altos were built and put into use. This was a very serious experiment!

As Butler Lampson has pointed out, no one else was interested in personal computing at the time, so we had the entire field to ourselves for quite a few years. Much of this work was done by about 25 people, and two keys to success were the ability of these scientists to (a) cooperate with each other when this was a good idea—much of this is due to the lab manager, psychologist Bob Taylor—and (b) to be really simple about how they went about bringing reality to these grand ideas.



Bob Taylor



チャック・サッカー

その数カ月後、これまた突如として暫定ダイナブックができあがりました。それがチャック・サッカーが開発し、バトラー・ランプソンを含む私たち数人が共同設計したAltoパーソナル・コンピュータです。



バトラー・ランプソン

ゲイリー・スタークウェザー

ボブ・メトカーフ

デイブ・ボグス

当時ゲイリー・スタークウェザーが初めての實用可能なレーザープリンタを開発したばかりでしたが、その性能は1秒間に1ページ、1インチあたり500ピクセルという今日の水準と比べても信じがたいほどでした。

ボブ・メトカーフとデイブ・ボグスは、これらすべてを接続するためのイーサネットの開発に着手したばかりでした。

ほどなくしてダン・インガルスと私は、コンピュータ科学者であり教育者でもあるアデル・ゴールドバーグと共に子供向けの実験を開始します。1975年にAltoが初めて学校で使用されたことは画期的なことでした。

What Children Can Do

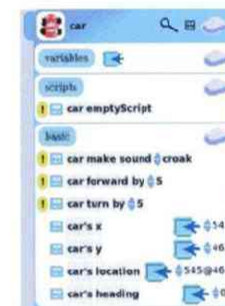
Now let's leave the past and take a look at what children can do today with their “dynamic media for creative thought.” In fact, I'm using a little two pound laptop—just as we thought 35 years ago we would have by now—to give this presentation.

One way to think about children is that they all are artists until they're talked out of it by society, and if you want to educate children, try to keep their artistic motivations intact, don't try to be too practical with them at first. Instead, try to get them really interested in ideas. As Einstein said “Love is a better Teacher than Duty!”

A project that nine-, ten- and eleven-year-old children really love is to design and make a car they would like to learn how to drive. They first draw their car (and often put big offroad tires on them like this).

So far this is just a picture. But then they can look “inside” their drawing to see its properties (for example, where the car is located and heading) and behaviors (the ability to go forward in the direction it is heading, or change its heading by turning. These behaviors can be pulled out and dropped on the “world” to make a script, which can be set “ticking” by clicking on the clock. The car starts moving in accordance with the script. If we drop the car's pen on the world, it will leave a track (in this case a circle), and we see that this is Papert's LOGO turtle in disguise—a turtle with a costume and easy ways to view and control it.

To drive the car, the children find that changing the number after **car turn by** will change its direction. Then they draw a steering wheel (the very same kind of object as the car, but with a different costume) and see that if they could put **steer's heading** right after **car turn by**... this might allow the steering wheel to influence the car. They can pick up **steer's heading** (the name for the





アデル・ゴールドバーグ

その後1970年代半ばの数年間で、1,000台以上のAltoが生産され、使われました。ですからこれはきわめて重大な実験だったのです！

バトラー・ランプソンが指摘したように、当時パーソナル・コンピュータに興味を抱いた人が他には誰もいなかったため、かなり長い期間その分野全体を私たちが独占的に研究していました。研究の大部分を約25人で行いましたが、成功に結びついた2つのポイントとはこうした科学者たちが (a) 良いアイデアが生まれるとお互いに協力したこと (これが可能だったのは、研究所のリーダーであった、心理学者のボブ・テイラーに拠るところが大きいのです)、そして (b) こうした素晴らしいアイデアの実現に非常にシンプルなアプローチをとったことです。



ボブ・テイラー

子供たちにできること

さて、視点を過去から現在に変え、今日の子供たちが「創造的思考のためのダイナミックなメディア」で何ができるのかを見てみましょう。ここでは、重さ2ポンドの小さなノートパソコンを使います。35年前に私たちが、将来手にするだろうと考えていたパソコンです。

子供を理解するための一つの見方は、つまらないことを社会から吹き込まれるまでは誰もが芸術家だということです。そして彼らを教育する場合には、その芸術的意欲を損なうことなく、最初は遊びの要素を加えてやることです。また、様々なアイデアに本当の興味を持たせてやりましょ



heading numbers that the steering wheel is putting out) and drop it into the script. Now they can steer the car with the wheel!

The children have just learned what a variable is and how it works. Our experience indicates that they learn it deeply from just this one example.

They quickly find that it is hard to control the car. They need to introduce a “gear” into the wheel’s connection to the car. They can get the needed advice from a teacher, parent, friend, or from a child thousands of miles away via the mentoring interface over the Internet. They open the expression in the script, and divide the numbers coming out of the steering wheel by 3. This *scaling* makes turns of the steering wheel have less influence. They have just learned what divide (and multiply) are really good for.

Maria Montessori would recognize what just happened. The children think they are playing (and they are), but they are playing in an environment that has 21st century toys that embody 21st century ideas. They play for their own reasons—and children differ in why they play, and what they want to play at—but they all learn the powerful 21st century ideas, and even more important: they start learning the most powerful ways of thinking about the ideas.



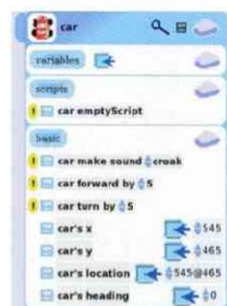
う。アインシュタインも言っています。「義務よりも愛情こそがより素晴らしい教師である！」と。

9歳から11歳までの子供たちが大好きなプロジェクトは、自分たちが運転したい車を設計し、作ることです。彼らは最初に自分たちの車の絵を描きます（するとよく、このように大きなオフロード用のタイヤを付けます）。

ここまではただの絵にすぎません。やがて彼らは絵の「内部」を覗き込み、特性（例えば、車の位置や行き先）や行動（目指す方向に前進する、あるいは曲がることで方向転換する能力）が見えるようになります。こうした行動を抽出し、「ワールド」にドロップすると、時計をクリックすることで「チクタク」が設定でき、作動する車のスクリプトを作成することができます。車はスクリプトに従って動き始めます。車に付いているペン機能を「ワールド」で作動させると、跡（この場合は円）が残ります。つまりこれは、車の形をして、簡単に見たり制御したりできる、パパーットのLOGOで使われていた「タートル」にあたるのです。

子供たちは、車を運転する場合に、車をまわす（car turn by）の後ろの数字を変えると、方向転換できることに気づきます。続いてハンドル（車とほとんど同じ種類のオブジェクトですが、見た目が異なります）を描き、車をまわす（car turn by）の後のハンドルの向き（steer's heading）を正しく設定できれば、ハンドルで車の方向を変えることができますとわかります。彼らはハンドルの向き（steer's heading）（ハンドルを回す方向の数値につけられた名称）を選択して、それをスクリプトにドロップします。さあ、これでハンドルを使って運転ができるようになりました！

こうして子供たちは、変数とは何か、そしてそれがどのような役割を果たすのかを学びました。私たちの経験によれば、このわずか1つの例だけでも子供たちは奥深いところまで学ぶことができるのです。



Jenni's Big Race, ... err, Pig Race

Then we turned the kids loose to think up a project all by themselves. Jenni liked to introduce her slant on things whenever possible (her cars we done as pencils with wheels), and she decided that it would be really fun to make a pig race.



Jenni, Age 11



The start of the Pig Race



The race. How does Jenni get the pigs to stay in their lanes?

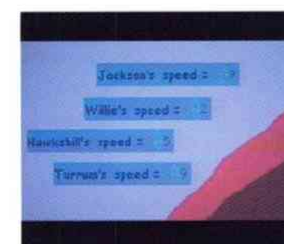
Here is her narrative as she explained her project for the Squeakers DVD.

Here we go for the annual pig race. It looks like it's a rough time today. The pink pig crashing into the wall.

(I also have a watcher here that tells me what speed they're going.)

Oh and the blue pig's coming in the lead. I have my own pig. I named it Jackson. And usually it loses, but, oh look, the black pig is catching up, leaving the white pig in the dirt!

She wanted a real track for her pigs and needed to figure out how to keep each pig in its lane. She had a wonderful idea that the nostrils of her pigs would be perfect as sensors to tell when it was trying to escape its lane!



Watchers showing the speed of the different pigs



Jackson Pig Winning

すぐに彼らは車の動きを制御することの難しさを知ります。そこで車とハンドルのつながりに加え、「ギヤ」を取り入れる必要が生まれます。子供たちは教師、親、友達、あるいはインターネット上の指導用インターフェースを使って、何千マイルも離れたところにいる子供から必要なアドバイスを受けることができます。彼らはスクリプトを開き、ハンドルから発信された数を3で割ります。この「スケーリング」によってハンドルを回してもそれほど車の動きに影響を与えることはなくなります。彼らは割る（そして掛ける）ことが何に役立つのかを知ったのです。

マリア・モンテッソーリなら、何があったのかがわかるでしょう。子供たちは遊んでいるつもりですし実際にもそうなのですが、彼らは、21世紀のアイデアを具現化した21世紀のおもちゃで遊んでいるのです。彼らは自分なりの理由を持って遊んでいます。なぜ遊ぶのか、そして何を使って遊びたいのかは個人によって異なりますが、誰もが21世紀の強力なアイデアを学んでいるのです。そしてそれ以上に重要なのは、こうしたアイデアについて彼らが最も強力な考え方を学び始めることなのです。

ジェニーのビッグ・レース…もとい、ビッグ・レース

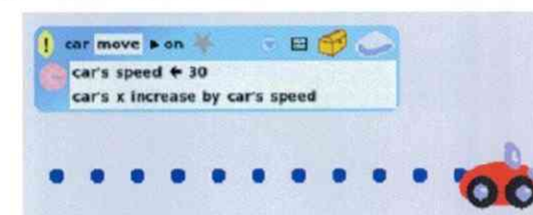
その後、子供たちには、1つのプロジェクトを彼らの自由に考えさせました。ジェニーはできるだけ自分の好みを取り入れたいと思い（彼女の車は、車輪付きの鉛筆のようなものです）、ブタに競争させればきっと楽しいだろうと考えました。



ジェニー、11歳

Quite a bit of doing is “just doing,” so it is a good idea to also reflect on what just happened. One way to do this is to have the objects leave trails that show what they were doing over time.

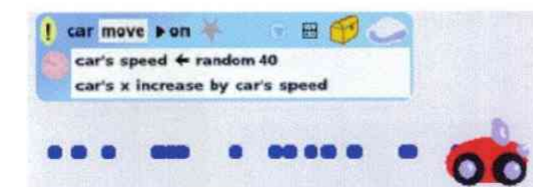
If the speed is constant then the trail of dots is evenly spaced, showing that the same distance was traveled in each little tick of time.



If we increase the speed each tick of the clock, we'll get a pattern that looks like this. This is the visual pattern for uniform acceleration.



If we change to speed to be random each time, we will get an irregular pattern of distance traveled for each tick.



Random speeds are great for races!

Real Science With Children

So far we've been doing mathematics. To do science we have to look at the outside world. A nice example for 11-year-olds is to investigate what happens when we drop



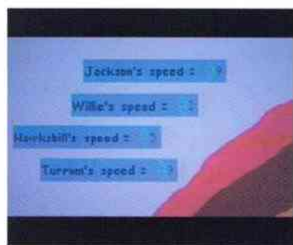
ビッグ・レースの始まりです

このレースで、ジェニーはどうやって
ブタがトラック内に留まるようにした
のでしょうか？

以下が、彼女がSqueakers DVD用に、自分のプロジェクトについて説明した時の話です。

さあ、毎年恒例、ビッグ・レースの始まりです。今日は激しいレースになりそうです。ピンクのブタが壁に激突しました。(ここにはウォッチャーがいて、どれだけスピードがでているかを教えてくれます)。おっと、青いブタがリードしています。私もブタを飼っています。名前はジャクソンといって、たいていは負けるのですが…、おや、黒いブタが追い付いてきました。白いブタは泥の中に置き去りにされています！

彼女は、本物の競技用トラックが欲しくなりました。となると出走するブタにコース内を走らせる方法を見つけなければなりません。そこで彼女は素晴らしいアイデアを思いついたのです。ブタがコースを外れかけた時にそれを知らせるセンサーには、ブタの鼻がぴったりだということです！



ウォッチャーがそれぞれのブタのスピードを教えてくれます



ブタのジャクソンの勝利

objects of different weights.

The children think that the heavier weight will fall faster. And they think that a stopwatch will tell them what is going on.

But it is hard to tell when the weight is released, and just when it hits.

In every class, you'll usually find one "Galileo child." In this class it was a little girl who realized: well, you don't really need the stop watches, just drop the heavy one and the light one and listen to see if they hit at the same time. This was the same insight that Galileo had 400 years ago, and apparently did not occur to any adult, (including the very smart Greeks) for our previous 80,000 years on this planet!

To really understand in more detail what is going on with gravity near the surface of the Earth, we can use a video camera to catch the dynamics of the dropping weight.

We can see the position of the ball frame-by-frame, 1/30th of a second apart. To make this easier to see we can just pull out every fifth frame and put them side by side:



The "Galileo Girl" explains a simple way to see if different weights fall at the same or different speeds

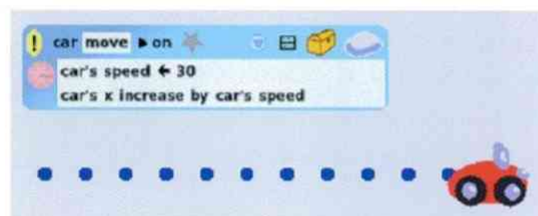


The stacked up frames that reveal the acceleration pattern

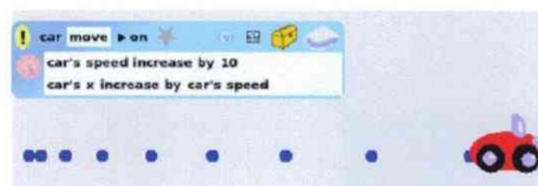
Another good thing to do is to take each frame and paint out the non-essential parts and then stack them. When the children do this, most of them will immediately say, "Acceleration!" because they recognize that the vertical spacing pattern is the same as the horizontal one they

たいていの場合、何かをしても「ただやるだけ」なので、何が起ったのかをじっくり考えてみるのも良いことです。長い時間をかけてやってきたことをよく見えるようにするため、少し脇道にそれることも一つの方法でしょう。

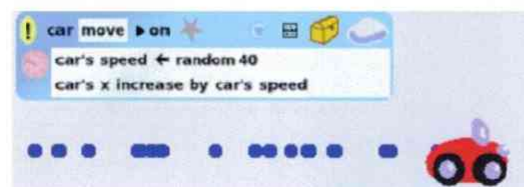
速度が一定の場合、軌跡を描く点の間隔は均等ですから、時間が刻まれるわずかな瞬間に進む距離はいつも同じだということがわかります。



時間が進むにつれて加速する場合は、このようなパターンを描きます。これは均一に加速した場合に見られるパターンです。



そして速度の変化が一定でない場合、瞬間速度は不規則なパターンを描きます。

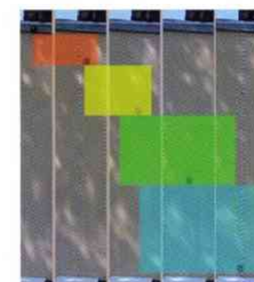


不規則な速度はレースにはもってこいです！

played with using their cars several months before.

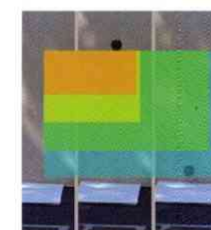
But, what kind of acceleration? We need to measure.

Some children will measure directly on the spread frames, while others will prefer to measure the stacked frames.



The translucent rectangles help because the bottom of the balls can be seen more accurately. The height of a rectangle measures the speed of the ball at that time (speed is the distance traveled in a unit of time, in this case about 1/5th of a second).

When we stack up the rectangles we can see that the difference in speed is represented by the little strips that are exposed, and the height of each of these strips appears to be the same!



These measurements reveal that the acceleration appears pretty constant, and they made such scripts for their car months ago. Most quickly realize that since the ball is going vertically, they have to write the script so that it is the vertical speed that is increased and the

本物の科学を子供たちと

ここまでは、数学の話をしてきました。科学に関しては、外の世界を観察する必要があります。11歳の子供たちにぴったりの方法は、異なる重さの物体を落としたらどうなるかを調べることです。

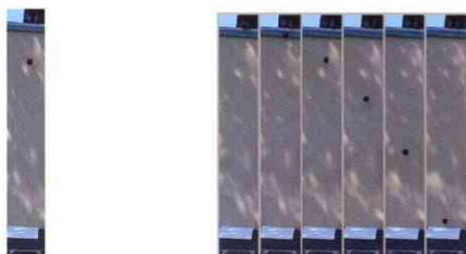
子供たちは重いものほど速く落下して、ストップウォッチを使えば何が起きているのかがわかると考えます。

しかし、いつもおもりを落としたのか、そしていつ地面に到達したかを判断するのはなかなか大変です。

たいていどのクラスにも「ガリレオ・チャイルド」が1人はいるものです。そのクラスの場合は小さな女の子で、彼女はストップウォッチなどなくても重いものと軽いものを落としてから耳をすませておけば2つが同時に地面に到達したかどうかがわかると気づいたのです。これは400年前のガリレオと同じ発想で、それまでの8万年、どの大人にも（とても賢明なギリシャ人ですら）思いつかなかったようなことなのです！

地表近くの重力によって何が起きているのかをさらに詳しく理解するには、ビデオカメラを使って落下するおもりの動態を記録します。

1/30秒ごとに1コマの割合でボールの位置を見ることができます。もっとわかりやすくするために、5コマごとに抜き出し、並べてみます。

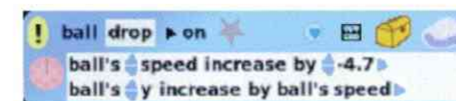


異なる重量の物体が同じ、もしくは異なる速度で落ちるかを調べる簡単な方法を説明する「ガリレオ・ガール」



加速パターンが分かるように並べられたフレーム

vertical position y that is changed. They paint a small round shape to be the simulated ball, and write the script:



Now, how to show that this is a good model for what they have observed? Eleven-year-old Tyrone decided to do as he did with his car months before: to leave a dot copy behind to show that the path of his simulated ball hit the very same positions as the real ball in the video.

Here is what he had to say when explaining what he did and how he did it for the Squeakers video:

And to make sure that I was doing it just right, I got a magnifier which would help me figure out if I had it—if the size was just right.

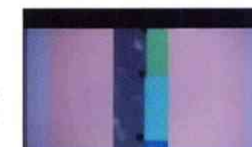
After I'd done that I would go and click on the little basic category button and then a little menu would pop up and one of the categories would be Geometry, so I clicked on that.

And here it has many things that have to do with the size and shape of the rectangle. So I would see what the height is... I kept going along the process until I had them all lined up with their height.

I subtracted the smaller one's height from the bigger one to see if there was a kind of pattern anywhere that could help me out. And my best guess worked: so in order to show that it was working, I decided to make—to leave—a dot copy (so that it would show that the ball was going at the exact right speed. And acceleration.)

An investigative work of beauty by an 11-year-old!

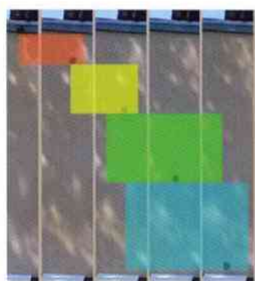
By the way, in the United States about 70 percent of the college kids who are taught about gravity near the surface of the Earth fail to understand it. It's not because



他にも各コマの不必要な部分を塗りつぶし、コマを重ねるという方法があります。この作業を始めたとき、ほとんどの子供が「加速だ!」と叫びます。垂直方向の間隔パターンが、数カ月前の車のプロジェクトの時の水平方向の間隔パターンと同じだと気づくからです。

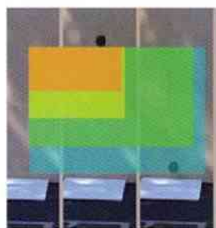
しかし、どのような加速なのでしょう? それを計測しなければなりません。

コマを並べて直接測る子供もいれば、コマを重ねて測る子供もいます。



この場合、半透明の長方形が役に立ちます。ボールの一番下をより正確に見ることができるからです。長方形の高さで、その時点のボールの速度が測定できます(速度とは一定の時間内—この場合は1/5秒—に進んだ距離のことを言います)。

長方形を重ねていくと細長い形が現れますが、これが速度の違いを表わしているのです。しかも、この細長い形の高さは同じように見えます!



the college kids are somehow stupider than the fifth graders; it's because the context and the mathematical approach most college kids are given to learn these ideas are not well suited to the ways they can think.

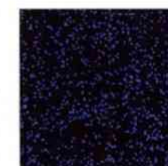
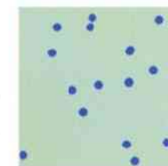
Now that the kids have captured gravity, they can immediately make many games. In Lunar Lander, the gravity script that the children have just created will pull down the spaceship and crash it if it moves too fast. The rocket motor script can oppose gravity and a careful pilot can balance them to land the spaceship safely!



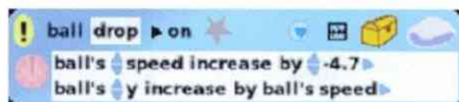
The Beauty and Importance of Complex Systems

We are all very aware now that one of the simple things that computers can do is to copy things quickly and cheaply.

Because of this we can explore very complex systems by just scripting the behavior of one item and making many copies. For example, if we make lots of little dots, we can explore the behavior of contagious processes, such as rumors and disease. Here the scripts are very simple, and cause a dot to change color when it collides with an "infected" dot. The size of the arena for collisions determines the delays between collisions, and allows us to explore matters of life and death, such as really understanding the characteristics of epidemics: fast deadly ones like typhoid, which are very noticeable; and slow, deadly ones such as AIDS (which is deadly in part because the onset of an AIDS epidemic is not dramatic). A poor understanding of slow, deadly epidemics in many parts of the world is one of the main causes of the AIDS disaster. People have to reach beyond their common sense into the "uncommon sense" of models for disasters in order to help their imagination spur them to early action. The computer will eventually create an even larger change in how humans think about ideas than the printing press.



こういった測定により、加速がきわめて一定であることがわかり、そして子供たちは数カ月前にこのようなスクリプトを自分たちの車のために作っていました。たいていの子供はボールは垂直方向に移動するため、垂直速度が大きくなり、垂直座標の y が変化するスクリプトを書かなければならないということにすぐ気がつきます。彼らはボールの形をまねた小さな丸を描き、スクリプトを書きます。



では、子供たちの観察した成果がわかりやすく示された例をご紹介します。11歳のタイロンは、数カ月前の車のプロジェクトの時と同じ方法を使うことにしました。ビデオの本物のボールと全く同じ位置を通ることを証明するため、彼のプログラムのボールの通り道に点を残したのです。

自分がやったことやその方法について、彼がSqueakersビデオ用に説明した話をご紹介します。

それで、僕のやったことが本当に正しいんだってことを確かめるために、拡大鏡を使ったんだ。これを使えば、大きさが合っているかどうかちゃんとわかるからね。

それから、ベーシック・カテゴリーに進んで、その小さなボタンをクリックすると小さなメニューが現われる。そのカテゴリーの1つが幾何学だから、それをクリックしたんだ。

ここには、長方形の大きさや形に関係することがたくさんあるんだ。だから、高さを調べて…それぞれの高さにぴったり合うまでプロセスどおりにやったんだ。

僕は、大きい長方形の高さから、小さい長方形の高さ



Lots of Things in the Universe Are Springy!

Now, for the last set of ideas I'd like to show how easy observations of the real world plus very simple models plus the great power of the computer to do many simple things very quickly can reveal a whole new world of art and science.

One of the problems with classical science is that it reused common words—like know, theory, force, etc.—for very new ideas. New words should have been chosen.

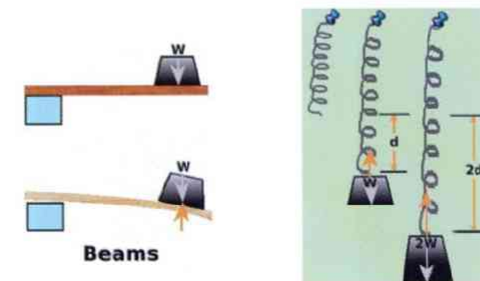


For example, the weight of an object is thought of in science as a force in the direction of the source of gravity. But if we place a weight on a sturdy table so that it moves no further, most people do not think of the table exerting an upwards force that balances the downward force of the weight.

If we try a table made from a flimsy wood, like balsa, we will see the table bend until it either breaks or is able to exert a balancing upwards force.

If we try this on a paper table, it will simply collapse down to the floor, which exerts the upwards force.

Beams have the same characteristics. And all these are examples of “springy things.”



を引いて、どこかにヒントになるパターンがないか調べてみたんだ。そうしたら、僕の勘がばっちり当たったのさ。僕のやり方が正しかったことを示すために、点を残しておくことにした（そうしておけば、ボールが正しい速度で進んだことがわかるからね。それが加速度だよ）。



11歳にしてなんと見事な研究でしょう！

ところでアメリカでは、地表近くの重力について学んだ大学生の約70%が、内容をきちんと理解していません。彼らが5年生よりもどういうわけか頭が悪いからではなく、こうしたアイデアを学ぶ際の状況や数学的アプローチが、彼らの思考方法にそれほど適していないからです。

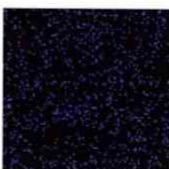
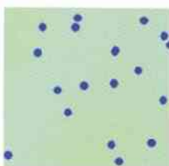
重力について理解した子供たちは、早速たくさんゲームを作ります。月着陸船というゲームでは、子供たちは作ったばかりの重力スクリプトで宇宙船を着陸させるのですが、宇宙船の動きが速すぎると宇宙船は地面に激突してしまいます。ロケットモーターのスクリプトでは、重力に抵抗することが可能なため、慎重なパイロットならバランスをとりながら宇宙船を無事に着陸させることができるのです！



複雑なシステムの美しさとその重要性

コンピュータに可能な単純作業の1つが、安くすばやくコピーすることができるということで誰もがよく知っています。

そのため、1項目の性質についてスクリプトを作り、たくさんコピーするだけできわめて複雑なシステムを試してみることができます。例えば、小さな点をたくさん作れば噂や病気といった伝染性のプロセスについて調べることが可能です。ここにあるスクリプトは非常に単純で、「感染した」点と衝突すると、点の色が変わるようになっていま

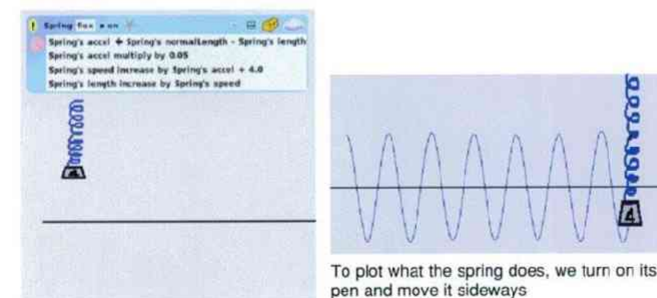


If we look at a spring with a weight hung on it we can measure how much it stretches until it is able to balance the force.

If we put on twice the weight, most springs will stretch very close to twice as much. This gives us a way to simply describe the force of the spring: it is proportional to the length it is stretched.

Now we can use the ideas about acceleration and speed we learned from the falling weight. But the acceleration is not constant now because it is proportional to the stretch of the spring. What can we do?

What is really nice here is that we can get the computer to compute very small, little movements in which we can pretend the acceleration is constant. Then we can measure the stretch of the spring and do this again. This gives us a very simple but good model of the spring, and is a great example of how easy it is for young children to learn the ideas of calculus with the environment of a computer.



Even better, once we've made one spring, we can get the computer to copy it over and over to get more springs.

Here is a movie all engineers see in college of a bridge with a 100-mile-an-hour wind blowing across it. It is quite startling to see how elastic the steel bridge is!

Let's make a simple bridge from two springs and a weight. If we turn on gravity and the spring models we



Tacoma Narrows Bridge in the wind

す。衝突した領域の大きさで衝突と衝突の間の遅延時間が特定され、伝染病の特徴を正しく把握する場合はじめ、生死に関わる重大な問題に役立てることができます。つまり、腸チフスのように非常に顕著な兆候が現われ、すぐに死にいたる病気や、エイズ（エイズが死にいたる病である1つの理由として、劇的に発病しないことがあげられます）のように徐々に死にいたる病気についても検討できるようになるのです。徐々に死にいたる病の恐ろしさが世界の多くの国々で十分に理解されていないことこそ、エイズの悲劇の主たる原因なのです。私たちが豊かな想像力を持ち、悲劇に対してすばやい行動がとれるようになるには、常識を超えて、そうした悲劇のモデルが持つ「非凡さ」を理解しなければなりません。いつの日かコンピュータは、アイデアに関する人間の考え方を、印刷機よりも大きく変えることでしょう。

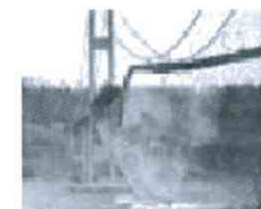
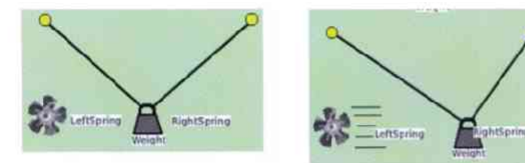
宇宙に存在する多くのものに弾力あり！

さて、様々なアイデアの最後にお話ししておきたいのは、現実の世界、非常に単純なモデル、そして多くの単純なことをあっと言う間に処理するコンピュータの偉大な力に注目すれば、芸術と科学の新しい世界の全容が明らかになるということです。

古典的科学の抱える問題の1つに、全く新しいアイデアに対して、知る、理論、力といったありきたりな単語を繰り返し用いてきたことがあります。新しい言葉を選択するべきだったのです。



see this: If we turn on the wind, we see that it will find a balance. But if we gust the wind by turning it on and off, we start to see behavior like the bridge.



Tacoma Narrows Bridge shaking itself apart because it was too springy and started to resonate in the wind

But now let's make a real bridge! Since real bridges are in our 3D world, we need a 3D world to make our model—and we see that we've been in a 3D world the whole time!



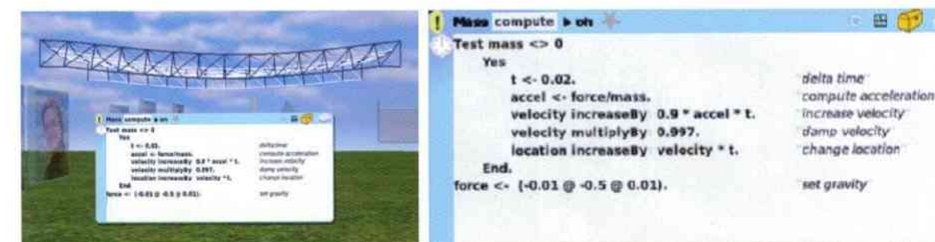
We are really in a 3D Computer World



Manifest a 3D bridge

But now let's make our bridge work. This structure is the same as the simple one we built with two springs and a mass, but now we are using the power of the computer to make many copies of the springs and the weights to make a bridge structure.

Let's first turn on gravity. This will make the bridge sag a bit—notice that it is a bit springy.



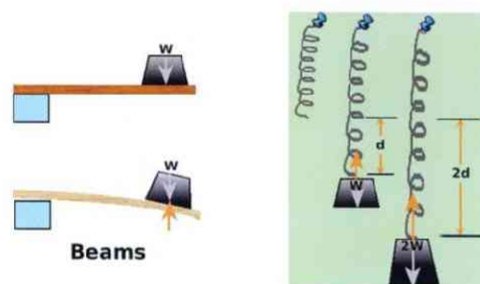
Turning on gravity to affect the masses in the bridge The gravity script

例えば科学では、物体の重さを重力源の方向における力として考えます。ところが頑丈なテーブルに置いたおもりが動かないのは、テーブルが、おもりの持つ下向きの力に釣り合う上向きの力を働かせていると考える人はほとんどいません。

バルサのような弱い木でできたテーブルで試してみた場合、テーブルは壊れてしまうか、あるいは下向きの力と釣り合う上向きの力を働かせるようになるまで曲がってしまうのです。

これを紙のテーブルで試すと、上向きの力を働かせる床に簡単に壊れ落ちてしまいます。

梁も同じ特徴を持っています。そして、これらはすべて「弾力のあるもの」の例なのです。



おもりのぶら下がったばねを観察すると、力の釣り合いが取れるまでにどれだけ伸びるかを計測することができます。

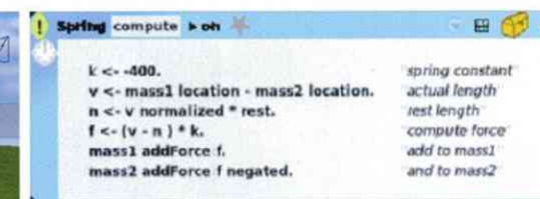
ばねのおもりを2倍にすると、たいていの場合、ばねはほぼ2倍に伸びます。これで、ばねの力を単純に表現する方法がわかります。伸びた長さに比例するのです。

さてここで、おもりの落下から学んだ加速度と速度に関するアイデアを使うことができます。しかし、加速度は一定ではありません。ばねの伸びに比例するからです。ではどうすればよいのでしょうか？

Now let's look at the script for the springs. Let's make them more springy by changing the stiffness number to -400 .



Making the bridge structure springy



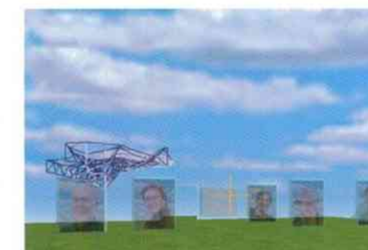
The spring script

We can see the bridge sag and bounce a little more.

Now we'll turn on a gusting wind that is like the one that started the suspension bridge in the movie oscillating. This has a few more details, but is still easy and small.



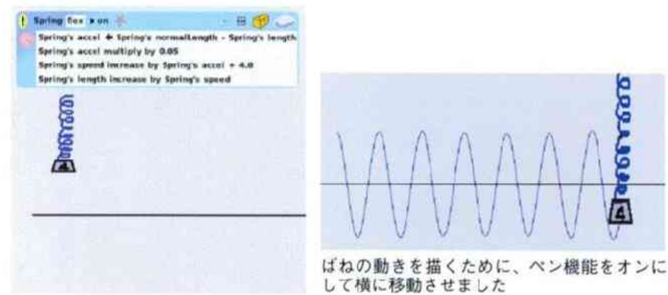
The wind starts the bridge oscillating



From the side with strong wind

The simulated bridge really starts oscillating violently, very similar to the movie of the real bridge! Let's move around to the side so we can look down it. It is so flexible and elastic that it looks kind of like a cloth fabric to me. And that pops up an idea. Let's detach one end of the bridge, gradually put a texture on it, and see what happens in the wind and gravity. We get a nice surprise! It's a flag!

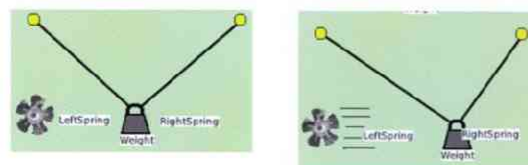
この場合、実に素晴らしいのは、コンピュータを使えば、加速度を一定と仮定したうえできわめて小さな動きを計算できることです。次に、ばねの伸びを計測し、もう一度それを繰り返します。こうすることで非常に単純ですが、立派なばねのモデルができるのです。これは、コンピュータ環境でいかに簡単に小さな子供たちが微積分学のアイデアを学ぶことができるという好例です。



さらにすごいことに、ばねを1つ作ってしまえば、繰り返しコピーすることによってさらに多くのばねを作ることができるのです。

今からお見せるのは、橋梁工学を学ぶすべての者が見る映像で、風速100マイルの風が橋に吹き付ける様子を撮影したものです。橋にこれほど弾力があるなんて、驚きじゃありませんか。

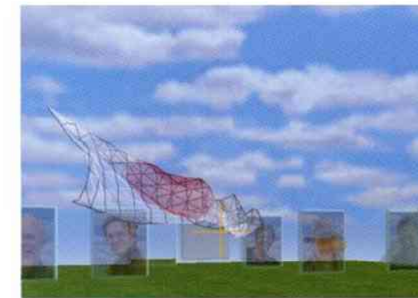
それでは、2つのばねと1つのおもりを使って簡単な橋を作ってみましょう。重力をかけると、このようになります。風が吹けば釣り合いをとろうとすることがわかります。しかし、突風が吹いたり止んだりすれば、先ほどの橋のような状況を見せ始めます。



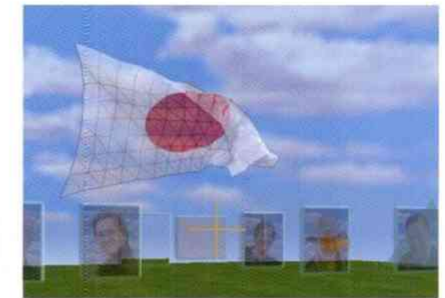
風に揺れるタコマ海峡橋



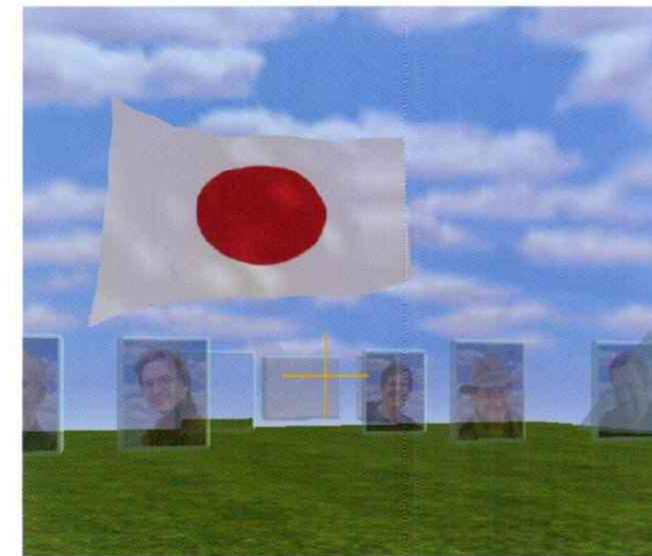
崩壊するタコマ海峡橋：橋にあまりにも弾性があり、風との共振を起こしたことが原因です



The bridge unfolding and starting to show a texture



The texture becomes more intense and the structures fade



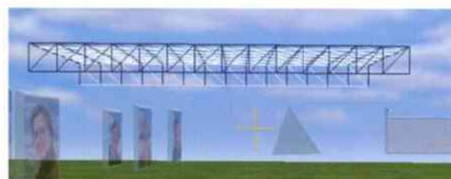
Surprise! A bridge and a flag are the same kind of physical object!

Cesare Pavese said: "To know the world, one must construct it." We can see that Computing is a new kind of Romantic Art Form where we make our ideas as Art, and the understanding of these ideas is Art.

The Greeks said that the Fine Arts were the imitation of Life—but we see that the Fine Arts of Computing are the *Imitation of Creation* itself! It is this Romance that attracts children to build their ideas and helps them learn to think better than most adults do today.

This is our Romance and this my answer to the question "why?"

それでは今度は本物の橋を作りましょう！本物の橋は三次元の世界にあるので、モデルの製作には三次元の世界が必要です。おや、私たちはずっと三次元の世界にいたのですね！

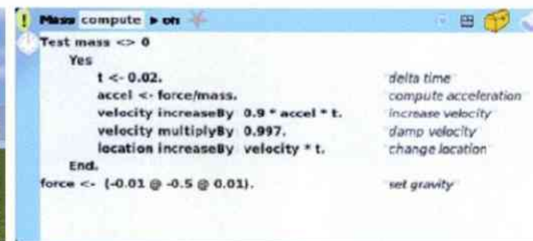


3Dの橋を出現させます

私たちは本当に3Dコンピュータの世界にいるのです

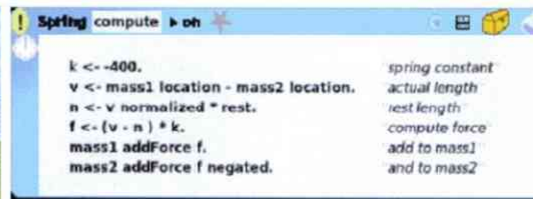
今度は、実際に橋を架けてみましょう。構造は、先ほど2つのばねと1つのおもりで作ったものと同じですが、今は橋を作るために、コンピュータの威力を利用して、ばねとおもりのコピーをいくつも作っておきます。

まず、重力をかけてみます。橋は少したわみます。少し弾力があることにお気づきでしょう。



橋の質量に作用させるため、重力を加えています 重力のスク립ト

では、ばねのスク립トを見てみましょう。この弾性の数値を-400に変えて、さらに弾力を持たせましょう。



橋の構造に弾力性を持たせます

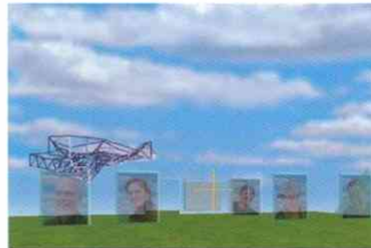
弾力のスク립ト

さっきよりも橋がたわみ、少し弾んでいるのがわかります。

次に、先ほどのタコマ海峡橋崩壊の映像のように、突風を吹かせてみましょう。先ほどまでよりはもう少し細部に迫ってきましたが、まだまだ単純なものです。

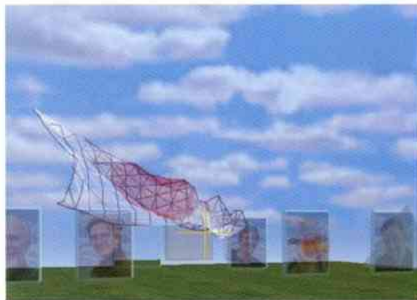


風が橋を振動させ始めます

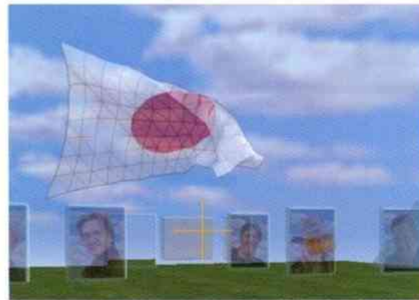


強風の中、横からの図

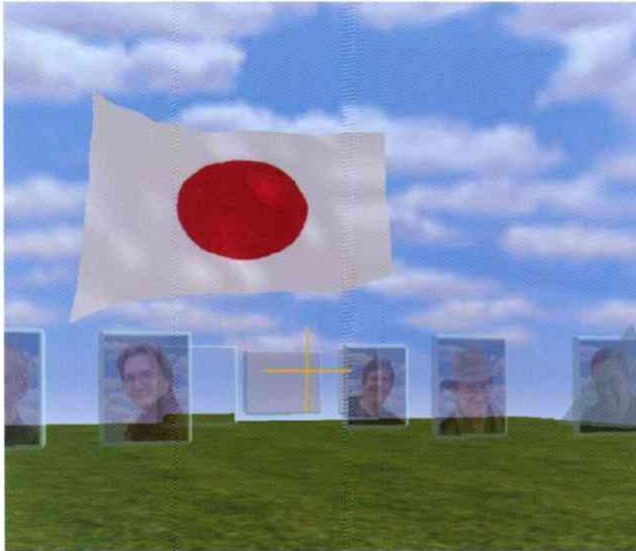
風を受けた橋は、ますます振動を増し、ますます実際の崩壊の映像に近づいてきました！次に、脇に回って、上から見てみることにしましょう。とてもしなやかで弾力性に富み、布きれのように見えます。それで、ある考えが浮かびました。橋の一方の端をはずし、徐々に質感を加え、風と重力の中で何が起こるのか見てみましょう。驚いたことに旗になりました！



橋が広がり、質感がでてきます



橋の構造が消え、ますます質感がでてきます



なんと橋と旗は同じ種類の物体だったのです！

チエーザレ・パヴェーゼはこう言っています。「世界を知るためには、世界を造らなければならない」。私たちにわかっているのは、コンピューティングが新しい形態の夢多き芸術であり、そこでは私たちのアイデアやアイデアを理解することが芸術なのです。

「芸術は人生の模倣である」。かつてギリシャ人はこう言いました。しかしコンピューティングという芸術は、「創造の模倣」そのものなのです！そしてこのロマンこそが、子供たちを魅了してアイデアを沸きあがらせ、現代の大人以上によく考えることを学ぶきっかけを与えるものなのです。

これが私たちにとってのロマンであり、「なぜ？」という問いかけに対する私の答えです。

稲盛財団 2004——第20回京都賞と助成金

発 行 2005年9月10日

制 作 財団法人 稲盛財団

〒600-8411 京都市下京区烏丸通四条下ル水銀屋町620番地

Phone: 075-353-7272 Fax: 075-353-7270

ISBN4-900663-20-4 C0000