

複雑化するシステムと増大するリスクに 技術者はどう対応すべきか

How should the engineers deal
with the complicated systems and the increasing risks?

橋本英樹

社団法人日本技術士会中部支部 E T の会
技術士（金属部門・総合技術監理部門）

Hideki HASHIMOTO

Engineering Ethics Study Group,
The Institution of Professional Engineers, Japan, Chubu Branch

【Key words】

1. システム (system)
2. シンプル (simple)
3. 技術を俯瞰する能力 (holistic perspective of technology)
4. コミュニケーション能力 (Communication Ability)

【概要】

近年、自動車をはじめとした工業製品は、使う側にとって非常に快適なものとなっている。それと同時に工業製品を構成する「システム」は極めて複雑になっている。中でも特に複雑なシステムの一つとして挙げられるのはガソリンと電気で動くハイブリッド自動車として新しい時代を切り拓いたトヨタ自動車のプリウスである。2010年2月、三代目プリウスのABS（アンチロックブレーキシステム）のリコールがあった。

本稿では、三代目プリウスのABSのリコールを事例として、システムの複雑化が進むことによりもたらされる課題について考察する。その上で現代の技術者が増大するリスクに対し、どのように対応すべきかについて考える。

1. 国土交通省の発表内容

わが国で2009年から始まったエコカー減税と政府からの補助金（～2010年9月末）、ガソリン価格高騰、そして低燃費車に対する消費者からの高い評価も追い風となり、トヨタ自動車の三代目プリウスは日本国内で最も売れる自動車となった。またエコカーの象徴の一つとなった。ところが2010年2月、この三代目プリウスのABSに不具合があるとしてリコールされた。

国土交通省のホームページには、「ABS（アンチロックブレーキシステム）の制御プログラムが不適切なため、ABS作動完了後の制動力が作動直前の制動力より低下することがある。そのため、ブレーキをかけている途中で凍結や凸凹路面等を通してABSが作動すると顕著な空走感や制動遅れを生じることがあり、そのまま一定の踏力でブレーキペダルを保持し続けた場合には運転者の予測より制動停止距離が伸びるおそれがある。」と記述がある。しかし、この記述からだけでは何が問題であったのかを全く理解できない。そこで、本稿ではまず、鉄道車両、特に電車のブレーキシステムの仕組みと比較しながら、三代目プリウスのブレーキシステムの仕組みと、今回のABSのリコールは何が問題であったのかを考える。

2. 鉄道車両での自動空気ブレーキシステムの仕組み

鉄道のブレーキシステムには1800年代中頃まで、満足と言えるようなブレーキシステムが装備されていなかった。当時使われていたブレーキシステムは、手ブレーキ、鎖ブレーキ、真空ブレーキというもので、現在のブレーキのように十分なブレーキ力が得られるというものではなかった。当時は鎖を用いた英国式連結器（ねじ式連結器）が多く使われていたが、これは現在の自動連結器などとは異なり、決して頑丈なものではなかった。そのため、連結器が外れて列車全体のブレーキが効かなくなる事故も多発していた。そこで1866年、アメリカ人ジョージ・ウエスチングハウスが画期的なブレーキシステムである「直通空気ブレーキ装置」を開発した。さらにその問題点を解消した「自動空気ブレーキ」を1874年に完成させた¹⁾。

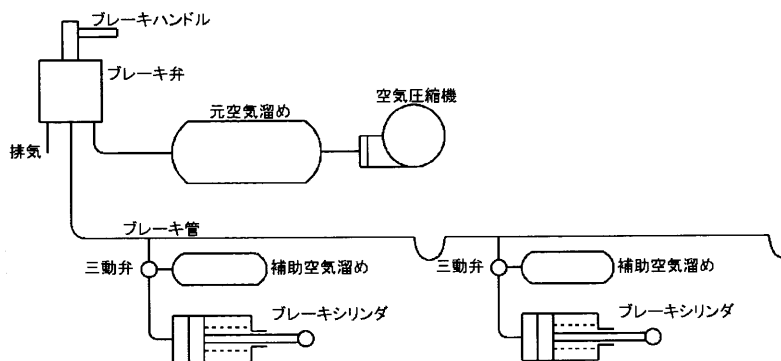


図1 自動空気ブレーキの仕組み

自動空気ブレーキでは走行時にはブレーキ管に常時圧縮空気を送り込んでおき、同時に各車両の「補助空気溜め」に空気を溜めておく。ブレーキをかけるときには運転席にあるブレーキ弁で、ブレーキ管の圧縮空気を抜く。同時に補助空気溜めとブレーキシリンダの間に取り付けてある制御弁(三動弁)がブレーキ管の圧力低下を検知して切り替わる。すると補助空気溜めからブレーキシリンダに空気が流れ、ブレーキがかかる(図1)。

この自動空気ブレーキにも欠点がある。空気の圧力のみを利用するため、編成が長くなると、運転席のある先頭車でのブレーキ弁操作に対し、編成最後尾の車両のブレーキ力発生に遅れが生じてしまうのである。これを解消するため、後に電気指令を併用するシステムに発展した。電空併用ブレーキ、あるいは電磁直通空気ブレーキと言われるものである(図2)²⁾。

自動空気ブレーキは、シンプルな構成によるものであったが、フェールセーフの機能も備えていた。そのため広く世界中に普及した。そして発明から140年近く経過した現在でも世界中で使われている。この発明により、鉄道の事故は劇的に減少した。このことは、シンプルなシステム構成であることが、安全を担保するという観点から考えたときに重要であるということを端的に示している。

わが国で完全な電気だけで制御する「電気指令式」のブレーキが採用されたのは1967年の大阪市交通局の30系電車が最初である。

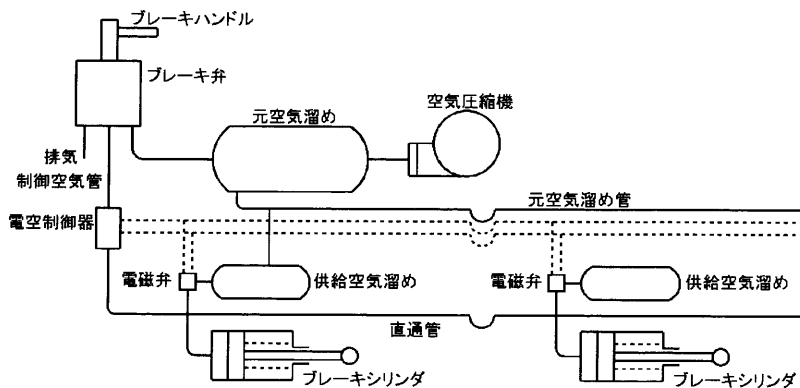


図2 電磁直通空気ブレーキの仕組み

広辞苑第六版にシステムとは「複数の要素が有機的に関係しあい、全体としてまとまった機能を発揮している要素の集合体。組織。系統。仕組み。」とある。つまり簡単な、あるいは単純な要素を複数の組み合わせでまとまった機能を提供するためのものと理解できる。

鉄道車両のブレーキシステムからも分かるように、かつて技術者が提供してきた人工物を構成するシステムは非常にシンプルなものであった。

3. 電力回生ブレーキと回生協調ブレーキ

電力回生ブレーキとは、ブレーキ力を得るために搭載しているモーターを発電機として利用し、運動エネルギーを電力に変換するものである。その際に発生する抵抗力をブレーキ力としている。発生させた電力は、電車の場合は架線に戻す。架線の無い気動車（ディーゼルカー）や自動車の場合はバッテリーに蓄電する。現在では新幹線N700系の場合、デジタルATSとの組み合わせで270km/hからのブレーキ力の全てを電力回生ブレーキのみでまかなうことができる技術レベルにある。

電力回生ブレーキ自体は決して新しいものではない。例えば、1937年に当時の愛知電気鉄道（現在の名古屋鉄道）に登場した3400形電車では直流の直巻電動機を用いた他励回生による電力回生ブレーキを既に搭載していた。後

に電力回生ブレーキは取り外されている。これは当時、列車の運行本数が少なかったことも原因と考えられる。回生した電力は架線に戻すが、その列車の近くに回生して生まれた電力を加速して使う電車が存在しなければ、十分なブレーキ力が得られない。これを回生失効と呼ぶ。電車の場合、列車の運行本数が少ない路線では、電力回生ブレーキは無力である。現在の鉄道は列車の運行密度が高いために、回生失効は発生しにくいだが、絶対に発生しないとは言えない。そこで空気ブレーキとの併用による「電空協調ブレーキシステム」を搭載している。通常はできる限りブレーキ力を電力回生ブレーキでまかない、必要なブレーキ力に対し、不足する分を空気ブレーキから得ている。

電気自動車やハイブリッド車の場合も、電力回生ブレーキと油圧ブレーキを併用している。トヨタ自動車のプリウスの場合、電車と同様にこれら2種類のブレーキを協調させる「回生協調ブレーキ」としている。ただし自動車の場合、他社の電気自動車やハイブリッド車の場合、回生協調ブレーキを搭載するケースは少なく、油圧ブレーキは単独で働く。プリウスでは可能な限り電力回生ブレーキを使い、運動エネルギーを電気エネルギーとして回収し、より燃費を向上させることが目的で回生協調ブレーキを搭載している。

自動車に搭載した電力回生ブレーキでも、搭載している電池が完全に充電されている状態では回生失効が生ずる。そのため、現在の電池の充電状態から電力回生ブレーキをどのくらいかけることができるかの情報を持っている。

プリウスの場合、鉄道車両とは異なり特別な訓練を受け、特別な免許を交付されたプロが運転するわけではない。つまり素人が運転するのである。そのため、できるかぎりブレーキの感覚は一般の自動車に近い方が良いと考えられてきた。ところが、海外の自動車メーカーにはアクセルペダルを踏むと走り、アクセルペダルを緩めるとそれだけで電力回生ブレーキが働くという電気自動車も存在する。この場合、従来の自動車に対して大きな違和感もある。逆に大きな違和感を出すことで、この電気自動車を従来のガソリン車やディーゼル車とは全く異なる乗り物であることを運転者に強く意識させることにつながっている。この場合も回生協調ブレーキとはしていない。このように現状では回生協調ブレーキを採用するかしないかは各自動車メーカーにより判断が分かれている。

4. ハイブリッド車の種類

ガソリンエンジンまたはディーゼルエンジンと電気モーターを併用したハイブリッド車のシステムには大きく分けて「シリーズハイブリッド」, 「パラレルハイブリッド」, 「シリーズ・パラレルハイブリッド」の三種がある。

4-1 シリーズハイブリッド

エンジンによる発電機を搭載し、モーターで走行する自動車または鉄道車両である。エンジンを最も効率が良い条件で、さらに一定回転で使うことができるため燃費効率に優れる。発電された電力はモーターを直接駆動するほか、蓄電池にも充電される。蓄電池から走行に十分電力が供給できる場合は、エンジンを停止させることも可能である。モーターを利用した電力回生ブレーキも利用可能で、回生された電力は蓄電池に充電される。

一般に見ることのできるのは、自動車では三菱ふそうトラック・バスの路線バス用車両であるエアロスター・エコハイブリッドである(写真1)。名鉄バスが名古屋市内の基幹バス2号線などに導入した。また、鉄道車両ではJR東日本が小海線(小淵沢~小諸)に導入したキハE200系などがある。走行システムは電車と共通であり、電車の技術を最大限に活用することができる。バスの場合も鉄道車両の場合も大容量のリチウムイオン電池を搭載している。

シリーズハイブリッドは、他のハイブリッドシステムと比較して仕組みがシンプルであるということが特徴と言える。また、モーターのトルクはエンジンに比べて大きいことから、トランスミッション(変速機)は不要となる。



写真1 シリーズハイブリッドシステムを搭載したバス

4-2 パラレルハイブリッド

パラレルハイブリッドの主役はエンジンである。エンジンは回転数が低い状態でのトルクが低いことから、速度がゼロの時に最もトルクが大きいモーターでアシストするという考え方である。あくまでもエンジンが主役であるため、トランスミッションを搭載している。本田技研工業のインサイトやCR-Zなどが採用している。本田技研工業のシステムの場合、モーターだけでの走行を考えていない。

一方、2010年秋に登場の日産自動車の新型フーガでは、「1モーター2クラッチフルハイブリッドシステム」と呼ばれる新開発の方式を採用する。パラレルハイブリッドでありながら、モーターのみでの走行も可能である。モーターのみで走行する際は、エンジンを完全に停止させることが可能である。

4-3 シリーズ・パラレルハイブリッド

トヨタ自動車のプリウスが採用しているハイブリッドシステムである。「ストロングハイブリッドシステム」とも呼ばれる。この方式では、エンジンだけ、モーターだけ、あるいはエンジンとモーターの両方での走行が可能である。モーターだけで走行する際はエンジンを完全に停止させることができる。自動車の速度が上がるとエンジンとモーターを効率よく利用して走行することができるが、これを実現するための動力分割（混合）機構が必要となる。

そのための複雑な機構を搭載することが必要で、車両重量の増大が、燃費性能向上に対してマイナス要因となる。

5. ABS (アンチロックブレーキシステム) とは

ABS (アンチロックブレーキシステム) とは、「あえてブレーキを効かせないことでブレーキを効かせる」というブレーキシステムである。自動車では急ブレーキをかけた際、安定した姿勢で止まるための仕組みとして利用されている。元々鉄道車両においてブレーキをかけた際、車輪の回転がほぼ停止し、レールの上を滑走してしまったとき、レールとの摩擦により車輪踏面に「フラット」と呼ばれる擦り傷ができることを防止するための仕組みとして1920年代にイギリスで開発されたものである。鉄道では「滑走防止装置」と呼ばれる。車輪にフラットができると、車両の乗り心地が悪くなるだけでなく、車両やレール、道床にダメージを与えることになる。そのため、一度フラットができた車輪は車輪旋盤を使って研削し、円形に戻さなければならない。1930年代からドイツのBOSCHが研究を開始しているが、自動車に採用されたのは1970年代後半からである。航空機には早くから採用された。逆噴射ができないプロペラ機では着陸時にタイヤにブレーキをかけるが、着陸時にタイヤがロックしてしまうとバーストしたり、滑走路を真っ直ぐに着陸できなくなったりするため、これらの問題への対応が目的であった。

日本では東海道新幹線の0系車両(1964年)で最初に採用された。これは先述したフラット防止のほか、ブレーキ距離を縮めるために「滑走再粘着制御」が不可欠であったということもある。ブレーキ力を得るには、車輪とレールとの粘着力(摩擦力)を最大限利用しなければならない。しかし、車輪とレールとの間で滑走が生ずると粘着力がゼロとなり、ブレーキ力が得られなくなる。そこで、複数の車軸の回転数を比較し、滑走の前兆が認められた車軸のブレーキをゆるめて車輪の回転数を回復させる制御を行い、粘着力を得ることで再びブレーキを効かせるのである。自動車のABSも全く同じ制御を行っている。

わが国の自動車では1969年東名高速道路の全線開通と同時に走り始めた国鉄の夜行高速バス「ドリーム号」(東京～大阪間)に採用された機械式AB

Sが最初である。当時の国鉄技術研究所が開発したものである。しかし、機械式ABSは構造が非常に複雑で高価であったため、当時は一般の自動車に搭載することができなかった。

6. 三代目プリウスのブレーキシステムを読み解く

ここでは三代目プリウスの回生協調ブレーキシステムにおいて発生していた問題について、何が生じていたのかについて鉄道車両の回生協調ブレーキシステムとの比較も交えながら読み解いてゆきたい。

6-1 何が生じていたのか

プリウスのブレーキシステムは油圧ブレーキと電力回生ブレーキによる回生協調ブレーキが採用されている。また、急ブレーキをかけた際に安定した姿勢で停止できるようにするため、油圧によるABSも搭載している。これは初代プリウスから同じである。

三代目プリウスについても国土交通省の型式認定を受けている。つまり今回問題とされたABSを含めたブレーキシステムを含め、国は安全性に問題はなく、道路運送車両法の定める保安基準を満たしているという判断をしている。当然のことながら、最大加速度からのブレーキ力についても全く問題は無い。しかし、冬期に低速で軽くブレーキペダルを踏んで停止しようとしているとき、アイスバーン等の上を通過するなどの条件が重なった場合、四輪のうちのいずれかのタイヤが空転すると、ABSが動作する（ここまでプリウスなどのハイブリッド車以外の自動車でも同じ）。このABSが効き始めた瞬間、ブレーキ力が抜けるような感じになるという現象が生ずるということが2009年12月頃から米国のWebサイトなどに報告されるようになった。

二代目プリウスではABSモードに入ると、瞬時に回生協調ブレーキが切れ、その0.4秒後に油圧ブレーキによるABSが動作しはじめる。ところが三代目プリウスでは0.2G前後のブレーキ力になるように軽くブレーキペダルを踏んだ状態でABSモードに入ると、油圧ブレーキに切り替わる瞬間、さらに0.06秒遅れて油圧ブレーキが効き始める。このとき、一瞬「ブレーキ力が抜けたような運転感覚」が生ずる。結果として、目の前の交差点が赤信

号で停止しようとしているとき、ブレーキの効きが遅れるために目標としていた停止位置よりも70cm程先に停止してしまうということになる。もちろん、ブレーキペダルを踏み増すことで目標とした位置に停止することができる。

この現象は極めて限られた条件でのみ発生するもので、これを再現させることは非常に難しい。しかし、路面が凍りやすい冬期には発生する確率が高まる。このことを雑誌「ベストカー」の2010年1月26日号の中で指摘された³⁾。その中でこの問題に遭遇した場合の対処療法も掲載された。この段階ではトヨタ自動車から全く情報が出てこなかった。その後、この雑誌の記事を見た朝日新聞の記者が米国で苦情が出ていることを確認し、同年2月3日、記事として新聞に出た。この朝日新聞の記事は事実関係のみを報道するものであった。これに対してトヨタ自動車はその日のうちにこの現象が生じていることを認め、国土交通副大臣に対して対策を検討中であるということを報告した。また、同年2月5日にはこの現象についてのトヨタ自動車社長の記者会見が行われた。その後、同年2月9日に国土交通省にリコールを届け出た上で記者会見を行い、発生している現象を詳しく説明した。

6-2 ブレーキ・バイ・ワイヤ

プリウスの回生協調ブレーキでは「ブレーキ・バイ・ワイヤ」と呼ばれる仕組みを使っている。ここで言う「ワイヤ」とは、電線という意味である。ブレーキ力の要求値はブレーキペダルに取り付けられた角度センサで読み取り、電気信号として制御コンピュータに入力している。制御コンピュータは入力されたデータを瞬時に演算し、電力回生ブレーキと油圧ブレーキに振り分ける。これは油圧か空気圧かの違いはあるものの、鉄道車両の電磁協調ブレーキの考え方と全く同じである。最近の鉄道車両は一般的には「電気指令式」、つまりブレーキ・バイ・ワイヤとなっている。

図3はプリウスにおけるブレーキ・バイ・ワイヤのシステムでの各機器の関係の概略を示している。図の上半分を「バーチャル側」、下半分を「リアル側」と呼んでいる。回生協調ブレーキモードでは、バーチャル側とリアル側の油圧系統は通常、遮断弁により切り離されている。

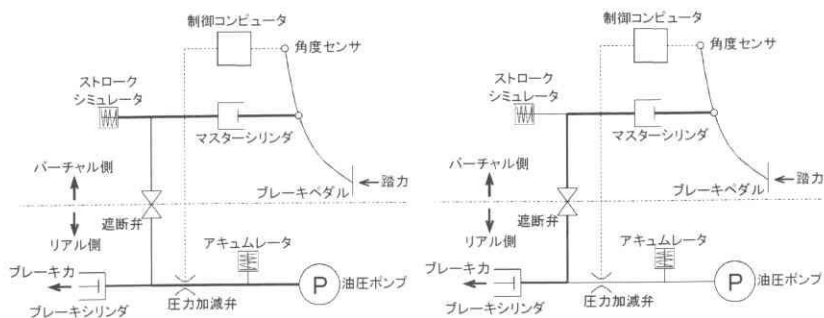


図3 プリウスでのブレーキ・バイ・ワイヤの基本的な装置の関係

左：通常の動作時の油圧系統とブレーキの関係

右：緊急時（急ブレーキ時）の油圧系統とブレーキの関係

出典：日経BP社刊『不具合連鎖「プリウス」リコールからの警鐘』（2010年3月）

p42 図3 「ブレーキ・バイ・ワイヤの基本的な装置の関係」（左），

p47 図6 「緊急時、リアル側とバーチャル側を直結する」（右）から転載

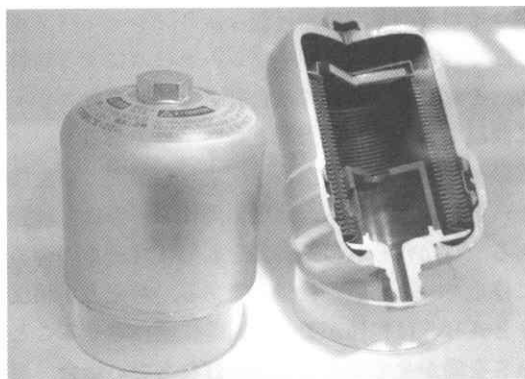


写真2 アクキュムレータ（左：外観，右：カットモデル）

ブレーキ・バイ・ワイヤを採用している自動車では、ブレーキを踏んだことによりマスターシリンダで発生した油圧が実際のブレーキに作用しているわけではない。そのため、何か押す対象がなければブレーキを踏んだ感覚が得られない。そこでバーチャル側はブレーキペダルを踏むとマスターシリンダを介してストロークシミュレータと呼ばれる「ばね」を押して、ブレーキペダルを踏んだ感覚が得られるような構造となっている。

通常のブレーキ力は、制御コンピュータから油圧加減弁を開閉させることで電動の油圧ポンプまたはアキュムレータ（写真2）からの油圧をブレーキシリンダのピストンに加えることにより得られる。

6-3 油圧を発生させるメカニズム

エンジンで走る自動車の場合、エンジンが吸気する際に発生する負圧を利用したブースタにより油圧を昇圧させている。つまり走行中にエンジンが切れると油圧を昇圧できないため、ブレーキが効かなくなる。

ハイブリッド車のうち、プリウスのようにエンジンを完全に止めてしまうことのできるものでは、油圧の昇圧させるためにエンジンの発生する負圧を利用できない。プリウスでは高压の油圧をブレーキシリンダに供給するための電気式油圧ポンプを持っている。

6-4 ドライバーのブレーキ操作とABSの動作

プリウスのドライバーの多くは、可能な限りブレーキペダルを弱く踏んでブレーキをかけ、できるだけ電力回生ブレーキのみによる制動力で停止したいと考えている。それにより走行する自動車の持つ運動エネルギーをより多くバッテリーに回収でき、より低燃費となるからである。

ところが四輪のうちのいずれの空転が発生した瞬間、回生協調ブレーキモードがABSモードに切り替わる。回生協調ブレーキは、制動力を得ようとする仕組みである。一方、ABSは制動力を緩めて自動車の姿勢を安定させ、その上で安全に停止させるという仕組みである。考え方が相反するため、回生協調ブレーキとABSは相性が悪く、同時に動作させることは難しい。

一般的にABSを働かせて停止しなければならない場合、運転者が生命の危険を感じながら必死でブレーキペダルを踏みこむはずである。従って、本来はハイブリッドではない車と同様のブレーキ動作となる。ただし、低速で走行していてもタイヤ四輪のうちの一つでも空転を検知するとABSモードに入ってしまう。これはハイブリッド車に限らず全てのABSを装備している自動車で生ずる。例えば冬期に低速で走行している際、アイスバーンや濡れたマンホールの蓋などにタイヤが乗り上げた瞬間などに発生することがありうる。

6-5 二代目プリウスの回生協調ブレーキ

二代目プリウスではブレーキがABSモードになると瞬時に回生協調ブレーキを切り、油圧ブレーキのみのモードとなる。そのとき、今まで回生ブレーキが負担していたブレーキ力を制御コンピュータが瞬時に計算し、油圧ブレーキに振り替える。

その際、圧力加減弁（電磁弁）を開き、アキュムレータに溜めてあった油圧を各車輪のブレーキピストンに送り込む。アキュムレータの油圧を使い切れば、電動ポンプが動き出して油圧を作る。仮に電源の故障があった場合は、キャパシタに蓄えてあった電気を油圧モーターに供給できる。また、ブレーキペダルを強く踏めば、マスターシリンダの油圧で車が止まる。

6-6 三代目プリウスの回生協調ブレーキとリコール前の問題

三代目プリウスでは、ブレーキがABSモードに入ると瞬時に回生協調ブレーキモードを切る。このとき、それまで回生ブレーキが負担していたブレーキ力を突然、油圧ブレーキのみで負担することになる。ここまでは二代目プリウスと同じである。

三代目プリウスでは、ABSモードに入ったとき、つまり最大のブレーキ力を発揮しなければならないと考えられるとき、パーチャル系とリアル系の油圧回路を分けている遮断弁を開く。このとき、ドライバーはブレーキペダルを命がけて踏んでいるはずである。ブレーキペダルとマスターシリンダは直結しているため、ブレーキペダルを強く踏み込めばそれによりマスターシリンダで発生した油圧がブレーキシリンダのピストンに作用し、車を停止させることができる。

ところが、ブレーキペダルを軽く踏んでいる状態でABSモードに入った場合、マスターシリンダの油圧がブレーキシリンダのピストンに作用しない。

図4は回生協調ブレーキにおける制動力と制動距離の関係を示すものである。制動力は電力回生ブレーキと油圧ブレーキの比率が定性的に分かる図になっている。この図から分かるのは、ブレーキ力がゼロの状態からある程度の制動力になるまでは電力回生ブレーキのみが作用する。油圧ブレーキが効き始めるのは約0.3Gのブレーキ力をドライバーが要求したところからであ

る。つまり、約 0.3G までのブレーキ力であれば、運動エネルギーを電気として効率よく回収することができることが分かる。

ちなみに鉄道車両の場合、ブレーキ指令により先に空気ブレーキが立ち上がり、遅れて電力回生ブレーキが立ち上がる。このとき、電力回生ブレーキによるブレーキ力が増加すると同時に空気ブレーキ力を弱める。電力回生ブレーキだけで十分なブレーキ力が得られる状態では、空気ブレーキ力はほぼゼロになる。ただし、空気ブレーキ力がほぼゼロの状態でも制輪子が軽く車輪踏面にさわっている状態を保持し、電力回生ブレーキによるブレーキ力が減少した時には直ちに空気ブレーキ力を発揮できるようになっている⁴⁾。すなわち、鉄道車両と三代目プリウスでは電力回生ブレーキと空気ブレーキ

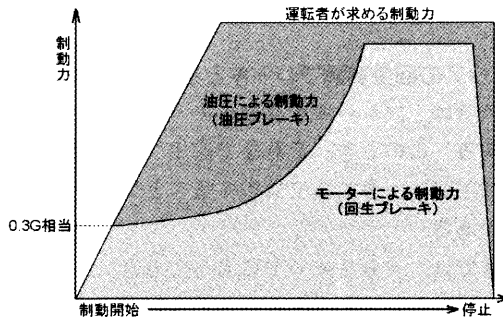


図4 回生協調ブレーキでの運転者の制動力要求値と制動距離との関係
(トヨタ自動車の資料に筆者が「0.3G相当」とした部分を加筆)

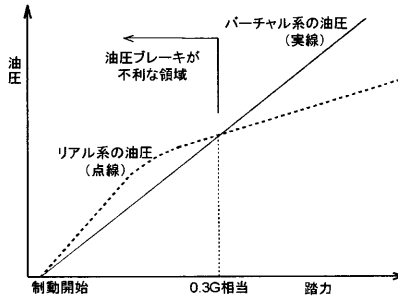


図5 バーチャル側とリアル側のブレーキ力と油圧の関係

(トヨタ自動車が2月9日の記者会見で使用した資料に筆者が「リアル系の油圧」「バーチャル系の油圧」と加筆，原図ではこの図の点線が赤の実線，実線が青の実線で描かれていた)

または油圧ブレーキの立ち上がる順番が逆になっているだけでなく，鉄道車両の場合は電力回生ブレーキを空気ブレーキで常時バックアップするという設計思想になっている。つまり，回生失効発生によるブレーキ力が無くなることへの配慮を特に重視したフェールセーフの設計になっている。この設計思想は自動車にも持ち込まれるべきではないか。

図5は三代目プリウスのバーチャル側とリアル側のブレーキ力と油圧との関係である。図4と合わせて図5を見ると理解しやすい。約0.3Gまでのブレーキ力の場合，バーチャル側よりもリアル側の油圧が高いことが分かる。バーチャル側とリアル側の油圧は構造上，同じにすることができない。これらの油圧がクロスするところが約0.3Gのブレーキ力の点であり，これ以上のブレーキ力を要求したとき，はじめて電力回生ブレーキと油圧ブレーキが同時に働くことになる。約0.3Gまでのブレーキ力を要求しているときにABSが働き，バーチャル側とリアル側の油圧回路を分離している遮断弁を開くと，バーチャル側よりもリアル側の油圧が高いため，リアル側の油圧はバーチャル側へと逃げてしまう。つまり実際にブレーキシリンダのピストンに作用している油圧が下がってしまう。その瞬間，ブレーキ力が低下する。このときドライバーはブレーキ力が「一瞬抜ける」という感覚に陥る。

一瞬油圧が下がるとこれを油圧センサが検出する。そこから電動の油圧ポンプを動かして油圧を上げる。このブレーキ力が回復するまでの時間が0.06秒である。その結果、時速20km/hでブレーキペダルを30Nの踏力でブレーキをかけているとき（約0.2Gのブレーキ力）、70cm程制動距離が伸びる。

二代目プリウスでは、ABSモードに入った瞬間、遮断弁を開くのではなく、圧力加減弁（比例弁）を開き、アキュムレータに蓄えてあった油圧をブレーキシリンダのピストンに作用させ、ブレーキ力を確保している。アキュムレータの油圧を使い切ると、電動の油圧ポンプを動かして油圧を上げる。このときにポンプから振動や騒音が出る。三代目プリウスではこの振動や騒音を発生させないようにするため、このような仕組みとした。

6-7 三代目プリウスのリコール後

三代目プリウスはこの問題に対して2010年2月9日、国土交通省にリコールを届け出た。その内容はブレーキ制御のプログラムを変更し、遮断弁を開くのではなく、二代目プリウスと同様に圧力加減弁を開いてアキュムレータの油圧を各車輪のブレーキシリンダのピストンに作用させる方式にするというものである。油圧が下がれば、油圧ポンプを動かすということも二代目プリウスと同じとした。そのため、油圧ポンプが動作して、油圧を上げるときには振動や騒音が発生することとなった。

なお、緊急時にはドライバーがブレーキペダルを強く踏み込むことで、マスターシリンダの油圧が各車輪のブレーキシリンダのピストンに作用するため、高速・高加速度からのブレーキ力はリコール以前と同様に問題はない。

7. 三代目プリウスで生じた問題と消費者の視点

三代目プリウスでは生じた問題は、低速で軽くブレーキをかけている領域でABSモードに入った場合のみ生じていた。この問題は再現させることすら困難であった。そのため、ドライバーの「違和感」あるいは「フィーリングの問題」ではないかということを開発した技術者は考えていたと思われる。この問題について、2010年2月2日、運転者の感覚と車の動きが少しず

れているという意味で、「フィーリングの問題」という言葉でトヨタ自動車による説明があった。

しかし、三代目プリウスは一般の消費者が運転する。その多くは運転の素人であり、特別な訓練を受けたプロのドライバーではない。そのため、技術者が設計した時点で想定していた以外の使い方をされてしまう可能性もあり、その点でリスクが高まる。もちろん、技術者は設計の時点でリスクアセスメントを行い、製品を市場に出す前の段階でリスクの低減を図る義務がある。従って、自らが市場に出した製品に対して、その不具合にユーザーの「違和感」、あるいは「フィーリングの問題」と考えることは許されない。

このようなことは、三代目プリウスに限らず技術者が関わる全ての人工物において発生しうると理解すべきである。技術者が自ら生み出した製品を使う側の視点を忘れたとき、事故は発生する。消費者が従来からの経験上安全であると考えている範囲と、技術者が安全面で実際にカバーした、あるいはカバーできた範囲が異なっている場合もあるからだ。

8. ユーザーの「フィーリングの問題」とPL法

製造物がユーザーの意図通りに動作しない場合、それを技術者や製造したメーカーがユーザーの「違和感」あるいは「フィーリングの問題」としてしまうと、それにより発生した事故はユーザーの責任となってしまう。もしもメーカー側が発生した問題の原因をユーザーの「フィーリングの問題」とし続けたならば、その問題はPL法の問題に置き換わってしまう。

PL法はユーザーを保護する目的で作られた法律である。製造物に予め「違和感」や「フィーリングの問題」があり、設計上、それを取り除くことができなかったならば、メーカーはユーザー保護の観点でその製品に「適切な注意喚起の表示」をしておかなければならない。一般的には「PLシール」と呼ばれるものを製品に貼り付けておくケースが多い。

P L法の第二条2に欠陥についての定義がある。

(定義)

第二条

2 この法律において「欠陥」とは、当該製造物の特性、その通常予見される使用形態、その製造業者等が当該製造物を引き渡した時期その他の当該製造物に係る事情を考慮して、当該製造物が通常有すべき安全性を欠いていることをいう。

また、P L法の第四条2にはメーカー側の免責について記述がある。

(免責事由)

第四条

2 当該製造物をその製造業者等が引き渡した時における科学又は技術に関する知見によっては、当該製造物にその欠陥があることを認識することができなかったこと。

P L法で欠陥とは「製造物が通常有すべき安全性を欠いていること」と定義されている。三代目プリウスのABSの問題では、制動距離が伸びてしまうということは、「通常有すべき安全性」を欠いていると言えるため、P L法では「欠陥」と判定される。一方、2009年秋までの段階では技術的に全く認識できなかったため、免責事由に記載の要件に該当したと判断される可能性もある。

しかし、2010年1月末の時点で新しい電子制御プログラムを搭載した製品が市場に投入されている。この時点ではABSの問題が原因で事故に対して免責事由に記載されている要件から明らかに外れる。

特定の人が使う生産設備などの場合、どうしても本質安全にできない箇所には、適切な注意喚起の表示を行うことで問題発生を回避するという考え方もある。しかし、三代目プリウスの場合は素人が使うものであるため、注意喚起だけで対応することは困難である。さらに中古車として流通する可能性

もあるため、中途半端な対応は後に問題を残す可能性もある。PL法上の問題にまで発展させないという意味からも、ABSの問題へのリコールによる対応は正解であったと言える。リコール制度には、ユーザーに対する法的強制力もあるからである。

もちろん欠陥の有無に関わらず、「疑わしきは消費者の利益に！」との考え方に基づきリコール制度を活用することが国から強く求められている⁵⁾。

リコール実施前後のタイミングで三代目プリウスへの注文数が一時的に減ったが、その後回復している。また、この問題によりプリウスに対する消費者からの評価は下がったわけではなかった。現在でもわが国で最も売れている乗用車は三代目プリウスである。さらに現在では次世代のプラグインハイブリッドのプリウスへの期待も高まっている。

9. 現代の技術が持っているリスクと消費者のリテラシー

プリウスなどに搭載されているトヨタ自動車のハイブリッドシステムは極めて高度で複雑な制御を行っている。そしてそれを見事に使いこなしている。世界的な視野で見てもトヨタ自動車の高い技術力に追従できるメーカーは皆無である。しかし、ハイブリッドシステムの各構成要素を協調させるためのプログラムが非常に複雑で膨大であるということが一つの課題になっている。

近年の自動車は電子制御無しには成立しない。例えばエアコン、パワーウィンドウ、カーナビゲーションシステム、エアバック、ABS、横滑り防止装置など、数え上げればきりが無い。現在では50個～100個のマイコンが使われ、1000万行近くにも及ぶ制御プログラム、そして大量のセンサ類と機器を組み合わせて快適な運転環境を実現している。今や自動車は走るコンピュータであり、電子制御の無かった時代に戻ることはできない。三代目プリウスでのABSのリコール問題は、消費者に最近の自動車において電子制御が不可欠なものであることを理解させることとなった。また、人が作る電子制御のシステム、とりわけその膨大なプログラムにはバグが存在する可能性があるということ、そして複雑な制御システムを搭載している場合、よりリスクが高まるということを消費者に認識させた。さらに技術者には製品が市場で使われる際、技術者の想定外の使い方をされてしまう可能性もあり、その

上技術者の「抜け」が重なると技術者にも、また消費者にも想定外の動きとなる可能性があることを認識させた。

また、「コンピュータ制御によるブレーキシステムという最新技術を『誰もが当たり前で操作できるはず』という技術者側の思い込みが落とし穴になった。欠陥ではないと技術を誇るあまりに運転者の感覚や反応への気配りを欠いた。」という指摘もある⁶⁾。

自動車の電子制御をはじめ、技術者が社会に提供する最新技術には「負の側面」の存在する可能性があることを今回の問題は、消費者に改めて認識させる結果となった。その一方で、消費者はそれを拒否することが難しいということも明らかにした。これは自動車に限らず、全ての技術分野で共通する。全ての技術者にとって、他人事として済ませてはいけない問題である。

システムが複雑化する中、正常に動作するそれぞれのシステムを連関させ同時に動作させたとき、技術者の想定外の動作となり、それが思わぬトラブル発生の引き金になる可能性は否定できない。もちろん、技術者にとって想定外の事象はリスクアセスメントをする以前の問題として、それをリスクとして認識することが困難である。

また、現在進行形の技術に関して消費者が持つ不安に対し、メーカーや技術者が説明するとき、そのレスポンスの速さが重要になる。消費者に対するレスポンスの速さが専門家としての誠意として消費者から捉えられるからである。そのような中で、技術者やメーカーは消費者から試されることになる。

現代の複雑化する技術に対し、それを提供する側には消費者に対する説明責任と説明する能力、つまりコミュニケーション能力が求められている。そして、それを使う側には最新の技術に対するリテラシー（読み解く能力）が求められている。現状ではそれらのどちらも十分ではない。その現実到我々は直面している。最新技術により提供されるものは、従来提供されていたものとは「仕組み」が異なる「性質の違ったもの」である可能性もある。そこには設計の段階では見えにくいリスクが潜んでいることもある。

鉄道やバス、航空機など、高度なシステムを駆使している乗り物の場合、特別な訓練を受けた「プロ」が運転することで安全を担保し、リスクの低減を図ろうとしている。一方、「素人」が運転することの多い自動車の場合、最新技術を搭載する前に可能な限りリスクを低減しておかなければならない。

その際、技術者は消費者の技術に対するリテラシーに配慮した上で、最新技術をどの段階で、どこまで提供しても良いのかを考えることも求められている。

10. 自動車と鉄道のブレーキシステムの比較

自動車のブレーキシステムの中心には人が介在する。つまり「人による危険検出型」である。これは自動車のブレーキシステムにおける最大の不備である。鉄道のブレーキシステムでは、軌道回路、閉塞区間、閉塞信号を利用した信号システムと、ATSにより危険を排除するシステムを構築している。

自動車と鉄道では、「止まる」ということを通じた安全に関する理念が対極にある。しかし鉄道のブレーキシステムが現在のレベルに達するまでには19世紀から世界中での様々な大事故の経験があった。わが国での鉄道事故として記憶に新しいのは2005年4月25日のJR西日本福知山線での事故である。この事故はわが国の鉄道史上、死者、負傷者の合計が7番目に多いものであった。それ以前には、1991年5月14日の信楽高原鉄道事故、1962年5月3日の三河島事故などもあり、現在の安全は多数の犠牲者を出した苦い歴史の上成り立っていることを忘れてはならない。

11. まとめ

技術者には人工物を介して不特定多数に不利益を与えない倫理が必要である。そして技術者として自分自身がやった仕事为社会に与える影響を想像する能力が必要である。それを実践する上で重要なことは、シンプルな考え方に徹することである。システムをシンプルにすることは、問題発生の可能性を低減させるための大きな手段となりうる。システムが複雑であることはそれ自体が不具合発生のお温床になるからだ。しかし、これは極めて難しい。

近年新たに開発されている様々なシステムの多くは、多数の要素技術の集合体である。その要素技術はさらに細かな要素技術の階層構造により形成されている。その階層構造も非常に深い。その上、一つのシステムを構成する要素技術の開発業務の多くが設計段階から外注化されており、分業も進んで

いる。そのことがシステムをさらに複雑化している。個々の要素技術は他の要素技術と複雑に連関している。その結果、誰もが予想していない動きをする可能性をはらんでいる。しかもシステムが複雑になればなるほど故障の可能性が増え、故障の内容も複雑になる。

システムが複雑化、高度化すればするほど、人はシステムに頼るようになる。しかしそのシステムが一旦故障すると、その復旧は人間が行わなければならない。その際にミスが生じやすい。そのミスをどう防ぐのか、そのようなことも現代の技術にとって大きな課題として存在する。

仮に、システム全体を俯瞰する能力を技術を統括する立場のリーダーだけが持っていたとしてもそこには限界があり、そこで発生する「抜け」を阻止することは困難である。さらにユーザーは設計者の想定外の使い方をすることもあり、そこには技術者の想定外のトラブルを生ずるリスクをはらんでいる。三代目プリウスではそれらが問題となったとも言える。しかしブレーキシステムの問題という「抜け」を阻止できなかったことに対し、それに関わった一人ひとりの技術者は「怠慢」であると責められても仕方がない。地上を走る乗り物にとってブレーキシステムは、安全を確保するために最も重要なものであるからだ。

今、新しいものを開発する技術者にはシステムの複雑化に伴うリスクの増大に正面から取り組むことが強く求められている。しかし、システムの複雑化の進行を阻止することは困難である。それに対し、システムを可能な限りシンプルにすることを目標に、全ての技術者が目の前の課題に取り組むということが最低限必要である。それが「抜け」の発生を減少につながるはずだ。

本稿で取り上げた三代目プリウスの事例は技術者に貴重な教訓を与えてくれた。全ての技術者は、この事例からできるだけ多くのことを学ばなければならない。それこそが、今、技術者にとって求められる倫理的な行動の一つである。

技術者は作った新しい「もの」を作る。それは人類にとって新しい環境である。消費者（公衆）は専門家である技術者を信じるしかない。消費者と専門家との間には技術に対するリテラシーに大きな溝があることを忘れてはならない。そのことに配慮できる美德とその溝を埋めるべく説明するためのコ

コミュニケーション能力、つまり技術者と消費者との間の双方向での意思疎通や理解を図るための能力を技術者は鍛え続けることが求められている。

【参考文献】

- 1) 山之内秀一郎：『なぜ起こる鉄道事故』（文庫版），朝日新聞社，2005年7月
- 2) 宮本昌幸：『図解・鉄道の科学 安全・快適・高速・省エネ運転のしくみ』，ブルーバックス B-1520，講談社，2006年6月
- 3) 日経 Automotive Technology, 日経ものづくり, 日経エレクトロニクス, Tech-On! 編：『不具合連鎖 「プリウス」リコールからの警鐘』，日経BP社，2010年3月
- 4) 宮本昌幸：『図解・電車のメカニズム 通勤電車を徹底解剖』，p205-206,ブルーバックス B-1660，講談社，2009年12月
- 5) 経済産業省 商務流通グループ 製品安全課編：『消費生活用製品のリコールハンドブック 2010』，p31, 経済産業省，2010年
- 6) 「経済気象台」，朝日新聞 2010年2月17日朝刊