

ディーゼルエンジンのクリーン化

トラックやバスなど大型車のほとんどが、ディーゼルエンジンを搭載している。ディーゼルエンジンは、ガソリンエンジンに比べ熱効率高く、耐久性にすぐれるなどの特徴を持っている。最近では、ディーゼルエンジン車が排出する窒素酸化物 (NOx) や粒子状物質 (PM: Particulate Matter) を削減するという社会的な要請が高まり、排出ガス規制は年々厳しくなっている。現在、排出ガスクリーン化のための多角的な技術開発が進められている。



世界で最も厳しい排出ガス規制といわれる平成17年規制 (新長期規制) の導入に伴い、規制に適合し、環境性能の優れたトラック用ディーゼルエンジンの開発が進んでいる (写真: いすゞ6UZ1-TCSエンジン)

19世紀末に誕生したディーゼルエンジン

2001年、自動車NOx・PM法 (自動車から排出される窒素酸化物及び粒子状物質の特定地域における総量の削減等に関する特別措置法) が施行された。これは首都圏などの特定地域内を走行する車両に車両代替やPM減少装置装着の規制を義務付ける法律である。また2003年以降、東京都などの自治体が独自条例によりディーゼル車規制を始めた。排出ガスに含まれるNOxやPMにより、ディーゼル車の環境影響を懸念する声クロアアップされることになったが、ディーゼルエンジンが環境によくないというのは本当だろうか。今回は、トラック用ディーゼルエンジンを中心に、その特徴やクリーン化技術について紹介する。

ディーゼルエンジンの名前の由来となっているドイツのルドルフ・ディーゼルが、ディーゼルエンジンに関する論文を発表したのは1892年のことであった。その後1924年には初のディーゼルトラック、1936年には初のディーゼル乗用車が発表された。ちなみにガソリンエンジンの開発は1876年、ガソリン乗用車の開発は1886年のことであった。

日本では、1907年海軍が研究用エンジンとしてディーゼルエンジンを製作したのが最初といわれているが、民間では、1917年に自家発電用ディーゼルエンジンが完成し、その後船舶、鉄道、航空

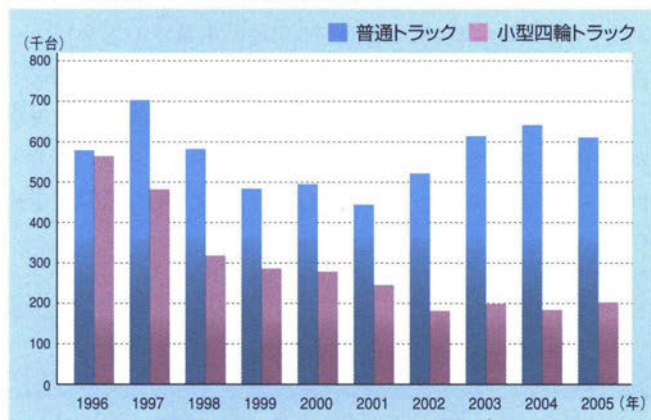
機などに搭載されるディーゼルエンジンの研究開発が行われた。1933年には、初の自動車用ディーゼルエンジンが開発され、その後軍需用として生産された。国産ディーゼル乗用車の市販は、戦後の1957年が最初である。

ディーゼルエンジンの基本原理について、ルドルフ・ディーゼルは、2つの点を挙げている。1つは、空気だけをまず燃焼室に入れ、空気が圧縮された後に燃料を噴射する、という「不均一混合」である。2つ目は、ガソリンエンジンのように点火プラグを使わず、空気の圧縮率を高めることにより燃料の発火点を超える高温にして着火するという「自己着火」である。このような考え方に基づいたディーゼルエンジンは、開発当時のあらゆる内燃機関の中で最も高い26.2%という高い熱効率 (燃焼時に発生する熱量に対し、動力に転換された熱量の比率) が得られ、その後広く使用されることになった。

すぐれた熱効率と、高い経済性

ディーゼルエンジンの最も大きな特徴は、熱効率が高いことである。現在ではガソリンエンジンの熱効率32%に比べ、ディーゼルエンジン (直噴式) は46%程度といわれている。熱効率が高いため、燃料の熱量を効率よく動力に変えることができ、燃費効率も高くなる。

■ディーゼルトラックの生産台数の推移



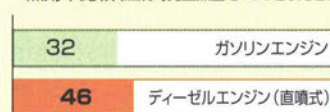
((社)日本自動車工業会資料より作成)

また耐久性にすぐれ、エンジン寿命が長いことも大きな特徴である。一般的なガソリンエンジン車の走行寿命が約10～30万kmであるのに対し、ディーゼルエンジン車は約30～100万kmであるといわれている。ディーゼルエンジンは、エンジン内の高圧力と高温に耐えられるように設計されており、寿命が長いこと経済性にすぐれ、商用車への搭載に適しているといえる。

燃料に軽油を使うことも特徴のひとつである。軽油はガソリンより着火温度が低く、ガソリンが400～500℃であるのに対し、軽油300～400℃である。高圧力下のエンジンシリンダ内では着火温度はさらに下がり、瞬時に着火することができる。もちろん、軽油はガソリンより安価で、経済的である。

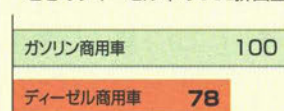
このような特徴を生かし、ディーゼルエンジンはトラック・バスなどに多く搭載されている。日本では、年間約80万台のディーゼルトラックが生産されており、とくに大型車*ではほとんどがディーゼルエンジン車である。

■ガソリンエンジンとディーゼルエンジンの熱効率比較(燃焼時発生熱量を100としたとき)

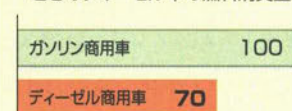


ディーゼルエンジンはガソリンエンジンに比べ熱効率が高いという特徴を持つ。つまり燃料の熱量を効率よく動力に変えられるので燃費効率がよくなり、CO₂排出量も少なくて済む。

■ガソリン商用車を100としたときのディーゼル車のCO₂排出量



■ガソリン商用車を100としたときのディーゼル車の燃料消費量



((社)日本自動車工業会、いすゞ自動車(株)資料より作成)

ディーゼルエンジンはトラックだけでなく、鉄道車両、建設機械、農業用機械、船舶、発電、その他電源などのエンジンとしても使用される。ディーゼルエンジンは回転数、馬力、外形などによりさまざまな種類があり、用途に応じて使用される。大きいものではタンカーやコンテナ船など1隻で数万馬力の出力を持つエンジンもある。

同時に低減することが困難なNO_xとPM

排出ガスでも、ディーゼルエンジンとガソリンエンジンには違いがある。燃料である軽油もガソリンも、原料は石油であり、排出ガスに含まれる成分はほとんど同じである。しかしながら成分の比率が異なる。一般に、排出ガス中の成分として、ガソリンエンジンはCO₂、CO、HC(炭化水素)を多く排出し、ディーゼルエンジンはNO_xやPMを多く排出する。PMとは、ディーゼルエンジンが排

ヨーロッパで高まるディーゼルエンジンへの評価

ディーゼル車の環境への影響について、日本とヨーロッパの考え方には大きな違いがあるといわれている。日本では、ガソリンエンジンに比べディーゼルエンジンは、酸性雨の原因となるNO_xや、人の肺などに沈着するおそれがあるPMの排出が多く、環境汚染や健康被害を引き起こすという印象が強い。ヨーロッパでは、ディーゼルエンジンのCO₂排出量が少ない、耐久性にすぐれるなどの理由から、ガソリンエンジンよりも環境によい、というイメージが定着している。一説では、ヨーロッパでは地球温暖化に対する危機感が日本より強く、CO₂削減への関心が高いために、このような違いがあるのではないかとされている。

ヨーロッパでは、多くの自動車メーカーがディーゼル乗用車に古くから取り組んでおり、ディーゼル乗用車の台数は着実に増加し、とくに1990年代に入るとさらに伸びている。乗用車におけるディーゼル比率は多くの国で20%程

度に達し、とくにフランスでは軽油に対する税制措置もあり40%に達している。

最近では、日本の自動車メーカーもディーゼル乗用車の開発に以前より積極的に取り組むようになっており、排出ガスのクリーン化技術がさらに進むことにより、ディーゼルエンジンのイメージが徐々に変化することも予想される。

●乗用車の燃料別保有構成比



データは、フランス、ドイツは1月現在、日本は12月現在
(「世界自動車統計年報2006」(社)日本自動車工業会資料より作成)

* 大型車:道路交通法では「総重量8t以上、最大積載量5t以上または乗車定員11人以上の自動車」を大型自動車という。

出する粒子状物質の総称である。

このうちCO₂については、消費燃料が増加すれば排出量が増加するので、熱効率がよいディーゼルエンジンからの発生は少ない。またガソリンエンジンでは、NO_x、HC、COを同時に浄化する三元触媒を使用することができるが、ディーゼルエンジンの排出ガス中には酸素が多く、三元触媒において、NO_xをN₂に還元するための触媒の反応性が低下するため使用することができない。

ディーゼルエンジンの排出ガス中のNO_xは、大気中の窒素が酸素とともにエンジンに吸入され、燃焼により分解して、酸素と結びついて生成される。NO_xは、完全燃焼に近くなるほど生成されやすく、また高温下では窒素と酸素の反応が促進されるという性質がある。

PMは、黒煙、硫酸化合物(サルフェート)及び可溶性有機成分(SOF)などの成分からなる。また大気中に浮遊する粒径10 μ m以下のSPM(Suspended Particulate Matter)もPMに含まれる。PMは、ディーゼルエンジンの燃焼時に酸素が不足していたり、燃焼温度が低かったりすることにより排出量が増加する。

NO_xは高温で発生しやすく、PMは低温で発生しやすい性質を持っている。このように発生しやすい条件がまったく違うため、この2つを同時に低減するのは非常に困難な課題であり、これを解決するための研究開発が長年にわたり続けられている。

ディーゼル車の排出ガス規制は1972年から黒煙の規制が始まり、1974年には黒煙に加えCO、HC、NO_xの規制値が加えられた「昭和49年度排出ガス規制」が施行され、以後、NO_x低減の規制が順次施行された。1993年にはPMの規制が追加され、同時に重量車(当時規則では車両総重量2.5t超を指す)については濃度規制から重量規制に変更となった。

2005年10月に「平成17年規制(新長期規制)」が導入された。この規制では、従来規制に比べNO_x排出量を約40%、PMの排出量を約85%にまで抑えることとしている。新長期規制の規

制値では、1972年以前に比べてNO_xは約10分の1、PMは約30分の1と低い水準(車両総重量3.5t超の重量車の場合)となった。これは、欧米の規制と比べてもきわめて厳しい水準である。

すでに2005年4月には、2009年から始まる新たな排出ガス規制が答申されている。この規制では、ディーゼル車にもガソリン車と同レベルの水準を求めており、NO_xやPMの大幅な低減が求められている。

最適燃焼のための高圧噴射の仕組み

ディーゼルエンジンの排出ガスをクリーン化するための方策は、大きく「燃焼の最適化」と「排気後処理」の2つに分けられる。さらにこれらの技術をきめ細かく制御するため、高度な電子制御システムが不可欠となっている。このうち、燃焼最適化の技術を中心に説明する。

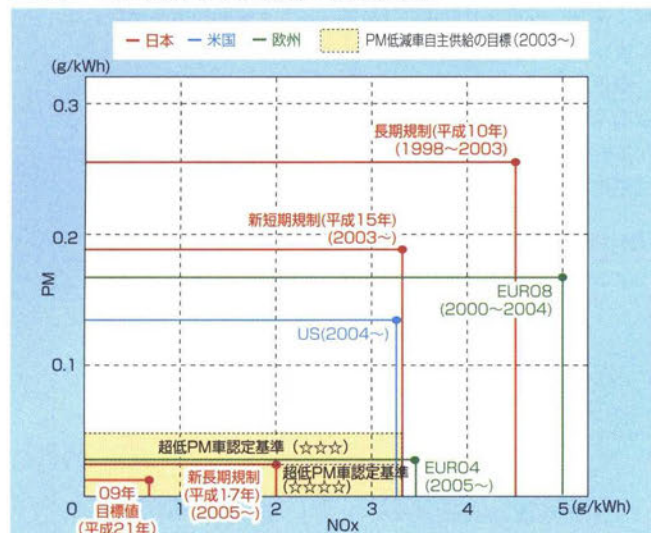
燃焼最適化のためには、燃料噴射圧力を向上させることが重要である。燃料噴射を高圧化することにより燃料が微粒化し、燃料と空気が良く混合して完全燃焼でき、PM発生量を低減させることができる。そのためには、噴射ポンプで燃料に圧力をかけて送り出し、噴射ノズルから燃料を微粒化して噴射する必要がある。噴射するタイミングを最適にするため、電子制御式油圧タイマーなどが使用されている。

1990年代後半に開発されたコモンレール式燃料噴射装置では、燃料の噴射圧力を従来より高めることにより、最適な燃焼を得ることができるようになった。あらかじめ高圧にした燃料をコモンレールパイプの中にためておき、必要に応じて噴射ノズルから噴射する。噴射ノズル先端には微小な穴があいており、電磁バルブの開閉によって燃料が噴射される。コモンレールシステムでは、燃料を送り出すタイミングや噴射量を緻密に制御できる。最近のシステムでは、1回の燃焼サイクルで複数回の噴射を行うことが可能であり、緩やかに燃焼させて温度上昇を抑えることにより、NO_xを低減できる。また燃料を微粒化し完全燃焼に近づけることにより、PM排出量の削減が図れる。

最近では噴射圧力をさらに高め、180MPa以上のコモンレールシステムが開発され、すでに一部のディーゼル乗用車に搭載されている。これには、鋼材中の介在物形態を制御し、高疲労強度と被削性を兼ね備えた合金鋼(次ページコラム)が採用されている。

このほか、燃焼最適化のための技術として、ターボチャージャ、EGR(Exhaust Gas Recirculation、排出ガス再循環装置)システムなどの開発が進められている。ターボチャージャでは、排気を利用してタービンブレードを回転させ、この力で吸気を圧縮してエンジンシリンダに高密度の空気を押し込むもので、大幅に空気の充填効率を高めることができ、エンジンの高出力化が図れる。

■ディーゼル車排出ガス規制等・日米欧比較

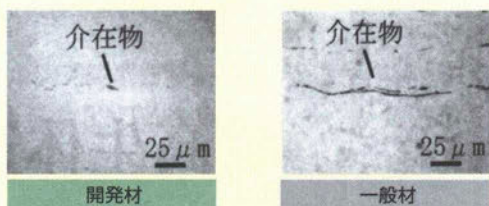


(日本自動車工業会資料より)

180MPa級コモンレールシステム用合金鋼の開発

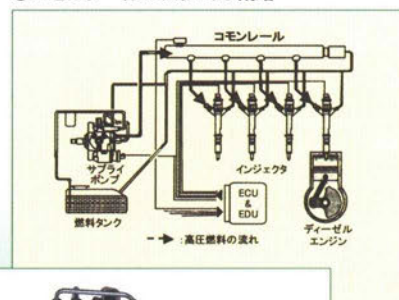
現在、実用化最高レベルの噴射圧力180MPaを持つコモンレールシステムでは、使用される材料に、燃料の高圧噴射に耐えられる高疲労強度と、ドリルによる深穴の加工に対応する被削性が求められた。疲労強度を高めるためには、材料中の介在物サイズを低減する必要があるが、従来、介在物サイズ低減のために、被削性を犠牲にして介在物を形成する元素(O、N、Sなど)の含有量を低減していた。今回は、疲労破壊の起点となる酸化物や窒化物系の介在物を極小化するとともに、快削性介在物である硫化物等の形態を制御することで高疲労強度及び被削性を両立させた。

●一般材と開発材の介在物の比較



上の写真のとおり、一般材に比べ開発材では介在物サイズが小さくなっている。極大介在物サイズは一般材55μmに比べ開発材18μmであり、疲労強度においてもすぐれた特性を有している。〔「介在物形態制御により高疲労強度と被削性を両立させた合金鋼の開発と製品への適用」清水ら、まてりあ第44巻第1号より転載〕

●コモンレールシステムの概略



180MPaコモンレールシステム。応答性にすぐれたピエゾ素子を採用し、最短噴射間隔はわずかに1万分の1秒である。(資料提供: (株)デンソー)

最近のターボチャージャーは高回転化する傾向にあるが、エンジンの低回転時に排気の進入口を狭め高回転時には広げられる可変ノズルターボ、ターボによって圧縮され高温になった空気をインタークーラで冷却して空気密度を高めるインタークーラ付きターボなども開発されている。EGRシステムは、排気を還流させて吸気とともに燃焼室に戻すことで燃焼温度を下げ、NOxを減らすシステムである。排気を冷やしてから燃焼室に再循環するクールEGRや、一度排出された排気をシリンダ内に戻すパルスEGRなどのシステムも開発されている。

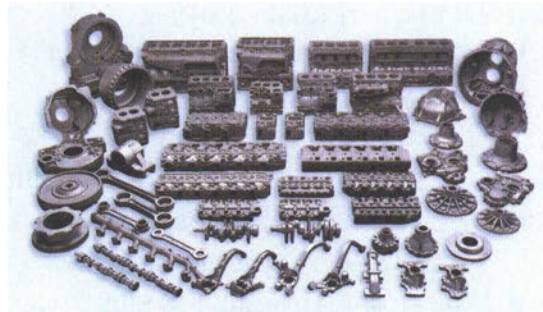
高圧燃焼を支えるシリンダブロック

高圧燃焼に対応し、エンジンの構造、使用される材料の検討も進められてきた。エンジン本体は以前から鋳鉄が使われてきたが、いっそうの高圧燃焼に耐えるために、エンジンシリンダヘッドの高強度化やシリンダブロック構造の高剛性化が必要となる。

従来、ディーゼルエンジン本体のシリンダブロックには、耐熱性や強度にすぐれ、複雑な形状を作りやすいことから、合金鋳鉄(FC250、300など)が多く使用されてきた。最近では、最大圧力が高いエンジンに対応するため、より高強度なCV鋳鉄* (Compacted/Vermicular鋳鉄) などが使用されるようになってきている。これは一例だが、このほかにも鉄鋼材料による鋳鉄や鍛造品などが、部品の要求特性によって使い分けられ、エンジンの

構造をつくりあげている。

燃焼最適化だけでなく、排出ガスの後処理技術の開発も進んでいる。たとえばDPF (Diesel Particulate Filter) は、高耐熱性のセラミック壁に微細孔を持つフィルターが付いたもので、ここに排出ガスを通してPMを捕集する。自治体によるNOx・PM規制条例で、指定された粒子状物質減少装置の装着義務がある場合があり、この対応としてDPFが注目された。また新しい後処理技術として、尿素水を触媒に噴射して反応させることにより、水と窒素として排出するという尿素選択還元システムなどが登場している。



ディーゼルエンジンの燃焼圧力の高圧化に適応し、高剛性なエンジン構造と耐久性が求められている。これに応え、鋳鉄のシリンダヘッドやクランクケース(上)でも強度、耐熱性などの向上が図られている。また強度、寸法精度にすぐれた各種の鍛造品(下)も多く使用されている。(写真提供: テクノメタル(株))

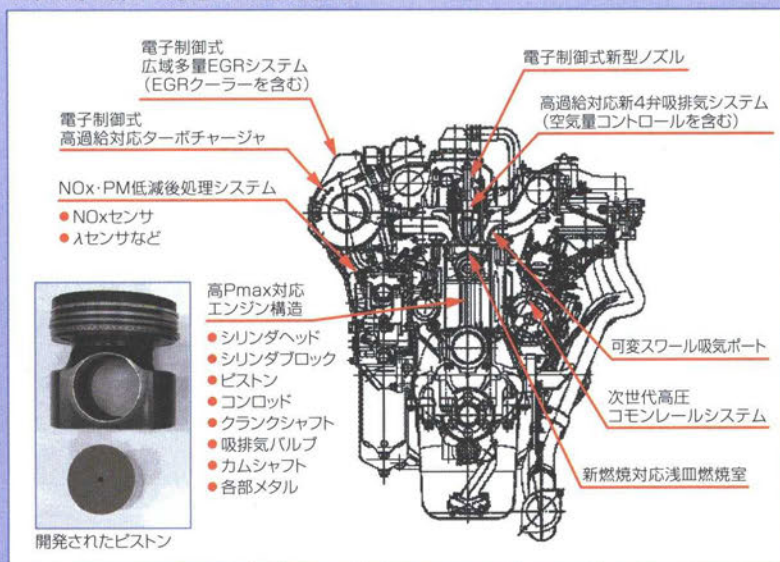


* CV鋳鉄: 鋳鉄組織中の黒鉛の形態がねずみ鋳鉄と球状黒鉛鋳鉄の中間の特性を持つ材料。強度が高いうえ、熱伝導性、振動減衰性能、切削性などにすぐれる。

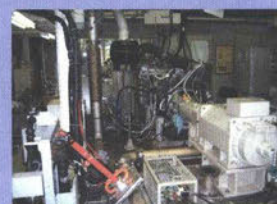
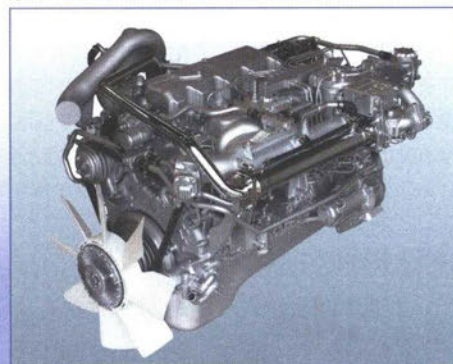
スーパークリーンディーゼルエンジンプロジェクト

国土交通省による次世代低公害車開発促進プロジェクトの一環として、(独)交通安全環境研究所が中核となり実施しているプロジェクトである。第1期(2002~2004年度)では、次世代コモンレールシステム、電子制御式広域多量EGRシステム、高過給対応ターボチャージャー、高Pmax対応エンジン構造など多くの要素技術が開発された。これに続く第2期(2005~2007年度)では、2009年以降のポスト新長期規制を想定した規制に適合できるように厳しい達成値を設定し、現在実用化研究が実施されている。

●第1期で新しく開発された要素技術



●スーパークリーンディーゼルエンジン



スーパークリーンディーゼルエンジンプロジェクトでの性能試験(大型ディーゼルエンジンダイナモメータ)

●エンジンの開発達成値(D13モード)

排出ガス:過渡JE05モードにてポスト新長期挑戦レベルを狙う

	現行規制	後処理後	(エンジンアウト)	挑戦レベル
NOx(g/kWh)	2.0	0.2	0.7	0.23
P M(g/kWh)	0.027	0.01	0.05	—
燃費	—	2002年現行車と同等以上を確保		

次世代のクリーンエンジン実現を目指して

ディーゼルエンジンの排気性能と燃費性能を大幅に向上させることを目的として、スーパークリーンディーゼルエンジンの開発プロジェクトが実施されている。これは、国土交通省による次世代低公害車開発促進プロジェクト(2002~2004年度、第1期)と次世代低公害車開発実用化促進プロジェクト(2005~2007年度、第2期)の一環として実施されているプロジェクトである。

開発にあたり、このプロジェクトで目指すスーパークリーンディーゼルエンジンとは、「軽油を燃料としたディーゼルエンジンで、2010年前後に適用されると予測される各種要素技術により低エミッションを実現しようとするもの」とされた。そして、車両総重量25tクラスのトラックで、低硫黄軽油(硫黄分10ppm以下)を使用し、排出ガス中のNOxは新長期規制値の10分の1以下、PMは新長期規制値の2分の1以下を達成することが目標とされた。

すでに発表されている第1期の成果の中から、鉄鋼材料とかかわりのある技術の例を紹介する。「次世代コモンレールシステム」では、現在の最高レベルである180MPa以上を達成すべく、噴射ノズルには直径0.3mm程度の微小な孔を持つ噴射ノズル

が開発された。また高過給下で、エンジン部品は従来にない高圧力にさらされることになるため、たとえばピストンではアルミニウムでは強度が不足するため、強度の高い鋳鉄製が採用された。またピストンピンでは、径や肉厚を大きくするなど、形状が工夫された。コンロッドでも十分な強度と軽量化を両立できるような設計を実施している。

エンジンの開発だけでなく、燃料のクリーン化も進んでいる。

日本では、東京都など自治体の強い要請を受け、2005年から硫黄分を10ppm(0.0010wt%)以下に低減したガソリン、軽油の販売が開始している(従来基準は500ppm以下)。軽油がクリーン化することにより排出ガスがクリーン化できるだけでなく、ディーゼル乗用車の普及を促進する効果も期待されている。

ディーゼルエンジン車では、その特徴を生かしつつ、環境保全や地球温暖化対策の取り組みが進められている。今後も地球環境や社会経済と調和していくため、さらなる技術開発が注目されていくことだろう。

●取材協力 (独)交通安全環境研究所
●取材・文 杉山 香里