

5. ハイブリッド車等の静音性対策に関する 世界統一基準のための調査研究

環境研究領域
自動車安全研究領域

※坂本 一朗 宝渦 寛之
関根 道昭 森田 和元

1. まえがき

ハイブリッド車及び電気自動車等は、低炭素社会を進める上で、普及促進を図ることとされており、近年急増傾向にあり、今後さらに増加が見込まれる。一方、これらの自動車は、モーターのみで走行している時は、構造的に従来のエンジン音及び排気系の音が発生しないため、車両の接近に気付かず危険を感じるとの意見が、視覚障害者団体やユーザー等から国土交通省に寄せられた。そのため、国土交通省は、モーターのみで低速走行を行うハイブリッド車等が備えるべき車両接近通報装置（以下「AVAS」(Acoustic Vehicle Alerting System) という)の要件を定めた「ハイブリッド車等の静音性に関するガイドライン」¹⁾（以下、「ガイドライン」という。）を、世界に先駆けて公表した。ガイドラインでは、規制内容等の必要な検討を行った上で、新車に可能な限り早期に AVAS の義務付けを行うこととしている。AVAS の基準化については、国連欧州経済委員会自動車基準調和世界フォーラム (UN/ECE/WP29) における騒音専門家会議 (GRB) 及びその下に設置された GTR (世界統一基準) のためのインフォーマル会議で作業が行われている。

本報告では、GTR に向けて日本で行ってきた調査研究の概要と、インフォーマル会議における日本の活動の概要について述べる。

2. 基準化に当たっての基本方針

国土交通省は、ハイブリッド車等の静音性対策を検討するに当たって検討委員会を設置し、公開で検討を行った。検討委員会の委員は、視覚障害に関する専門家、人間工学に関する専門家といった学識経験者の他、視覚障害者団体、消費者団体等の委員から構成され、様々な立場からの意見を踏まえて報告書がまとめられた。国土交通省は、報告書において提言された対

策の普及を図るため、AVAS の要件を定めたガイドラインを公表し、GRB の場において日本のガイドラインについて繰り返し説明を行うとともに、ガイドラインに基づく接近音のデモを行った。その結果、日本のガイドラインは、GRB へ参加している各国の政府代表の支持を得ることができ、2011 年 3 月の WP29 において、日本のガイドラインをベースにした「国際基準のガイドライン」が承認された。そのため国土交通省は、基準化に当たっては国際基準のガイドラインをベースにすることを基本方針としている。

3. 基準化のための調査内容及び結果

ガイドラインでは、車両接近通報音（以下「接近音」という）の音量や周波数特性等について、定量的な規定はされていないため、接近音の要件を定量的に規定する必要がある。ここでは、音量と周波数特性を規定するための調査内容とその結果について述べる。

3. 1. 接近音として必要とされる認知性の要件

ガイドラインでは、接近音の音量に関して、「内燃機関のみを原動機とする車両が時速 20km で走行する際に発する走行音の大きさを超えない程度のもの」と記載されており、上限についてのみ定性的に規定されている。しかし、接近音の基準化のためには、車両の接近を認知できるための必要最小限の音量を規定する必要があり、そのためには、まず、接近音に必要とされる認知性の要件を定める必要がある。

米国では、2013 年 1 月に NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) からハイブリッド車等の最小騒音規定に関する NPRM (Noticed of proposed rulemaking) (以下「NPRM」という。)が公表された。これには、接近音の要件として、8つの 1/3 オクターブバンド中心周波数帯域における最低騒音レベルを規定している。さらに、騒音レベルを規

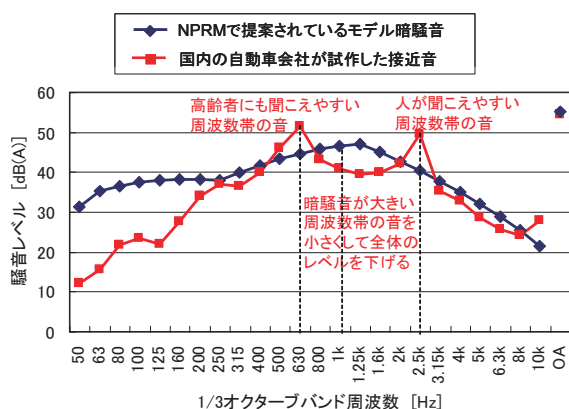


図 1 国産乗用車に搭載されている接近音と NPRM で提案されているモデル暗騒音の 1/3 オクターブ周波数分析結果

定するために、モデル暗騒音を提案しており、接近音はモデル暗騒音の中でも聞こえる必要があるとされている。また、最低騒音レベルを検討するに当たって、時速 10km/h の車両における安全上必要な認知距離は、停止距離の観点から 5m としている⁴⁾。

そこで、接近音として必要とされる要件は、NPRM で提案されているモデル暗騒音の中で、10km/h で走行している車両から発生される接近音が 5m 以上手前で認知できることとして、音量や周波数特性を定量化することとした。

3. 2. 接近音の周波数特性の検討

図 1 に、NPRM で提案されているモデル暗騒音と、国内の自動車会社が試作した接近音の、1/3 オクターブバンドの周波数特性を示す。

一般に、正常な聴力を有する成人は、2kHz から 5kHz までの音に対しては感度が良い。従って、この周波数帯域にある音は認知されやすいと考えられる。一方、高齢者は、2kHz 以上の音に対する聴力が低下する傾向にある。従って、聴力の低下の少ない 1kHz 以下の低い周波数帯域に、ある程度以上のレベルの音が存在すれば、高齢者にとってもその音は認知されやすいと考えられる。また、接近音が認知されるためには暗騒音よりも大きいレベルでなければならない。一般に、暗騒音は 1kHz 前後のレベルが大きい。接近音が認知されるためには暗騒音のレベルよりも大きいレベルでなければならないため、暗騒音のレベルが小さい周波数帯域の音を出せば、必要以上に大きな音を出す必要がなく、環境騒音の悪化を回避できると考えられる。この考えに基づき、日本は、1/3 オクターブバンドで 1.25kHz 以上と、800Hz 以下のそれぞれに、

少なくとも 1 つの卓越したバンドを有することという「2 バンドコンセプト」を接近音の周波数特性の要件としている。図 1 に示す自動車会社が試作した接近音はその典型的な例で、2.5kHz と 630Hz に卓越したバンドを有しており、それ以外のバンドのレベルは小さくなるように設計されている。現在、国内で市販されているハイブリッド車等に搭載されている接近音は、2 バンドコンセプトに基づいている。

3. 3. 接近音の音量の検討

前述の通り、時速 10km/h で走行している車両から発生される接近音は 5m 以上手前で認知できることとした。そこで、2 バンドコンセプトに基づく接近音のサンプルをいくつか試作し、認知性試験によって、音量の検討を行った。

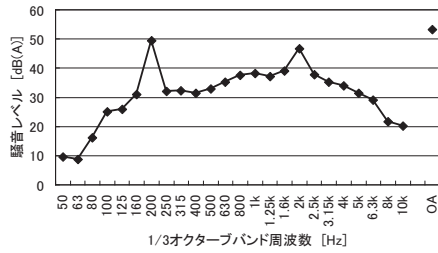
3. 3. 1. 接近音のサンプルの概要

可聴域の周波数帯において、1.25kHz 以上と 800Hz 以下から、それぞれ一つの 1/3 オクターブバンドを選ぶとその組み合わせは数多くあるため、今回は 1.25kHz 以上からは 2kHz と 5kHz の 2 つを、また、800Hz 以下からは 200Hz と 800Hz の 2 つを選び、その組み合わせとして、200Hz + 2kHz、200Hz + 5kHz、800Hz + 2kHz、800Hz + 5kHz の 4 種類の接近音のサンプルを作成した。選択した周波数のバンドは、国内で市販されている自動車に搭載されている接近音を参考にした。図 2 に接近音のサンプルの周波数特性を示す。接近音の音量は、2 バンドのレベルがほぼ同じレベルになるようにした上で、オーバーオール音量を 46dB(A)、52dB(A)、58dB(A)を目標に調節した。周波数が 4 種類、音量が 3 種類で、計 12 種類の接近音のサンプルを作成し、それぞれの認知性を評価した。また、比較のために、10km/h 走行時における接近音の要件として NPRM で提案されている 8 バンドのレベルを満たす接近音（以下「NPRM 接近音」という）についても評価を行った。図 3 にその周波数特性を示す。

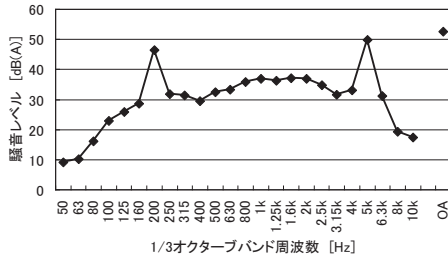
3. 3. 2. テストコースにおける認知性試験

暗騒音が 30dB(A)以下の十分に静かなテストコース（日本自動車研究所城里テストセンター NV・多用途路）において、認知性試験を行った。

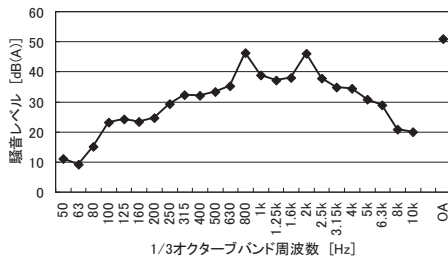
走行時の騒音が小さい電気自動車の前端に小型スピーカを取り付け、スピーカから接近音のサンプルを発生させた。この車両を、テストコースの車両中心線上を、接近音を発生させながら 10km/h の速度で走行



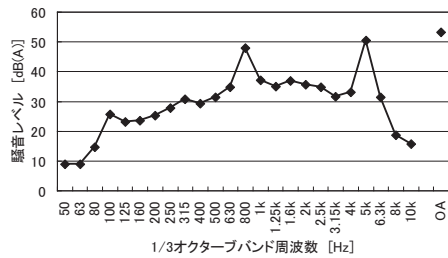
(a) 200Hz-2kHz



(b) 200Hz-5kHz



(c) 800Hz-2kHz



(d) 800Hz-5kHz

図2 認知性試験で使用した接近音のサンプルの周波数特性

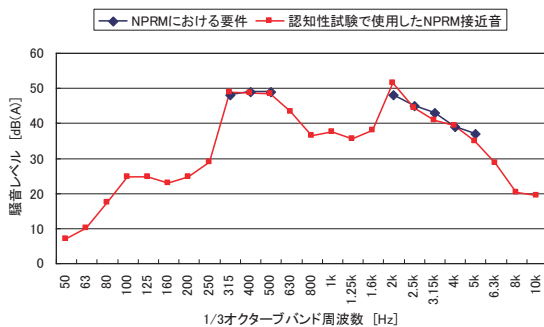


図3 NPRMにおける接近音の要件と認知性試験で
使用した NPRM 接近音の周波数特性の比較



図4 認知性試験の様子

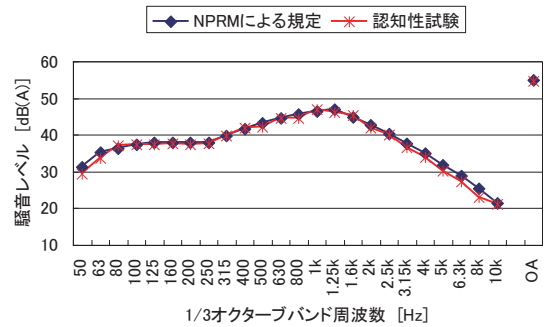


図5 認知性試験で使用した NPRM 暗騒音の
周波数特性と NPRM における規定との比較

させた。図4に認知性試験の様子を示す。参加者の耳の位置が、車両走行線から2m、高さ1.2mとなるようにし、参加者に提示する暗騒音の条件を統一するため、スピーカからNPRMで提案されているモデル暗騒音を発音し、被験者の耳元で55dBとなるように調整した。図5にNPRMで規定されているモデル暗騒音の周波数特性と、認知性試験の時にスピーカから発生させた暗騒音の周波数特性を比較した結果を示す。両者はよく一致していることが分かる。認知性試験の参加者は、20歳代から50歳代の健常者16名（平均年齢40.3歳）で、交通安全環境研究所における人間を対象とする実験に関する倫理規程に基づいて実施した。参加者はアイマスクを装着して椅子に座り、接近音に気がついたら手元のスイッチを押してもらい、そのときの被験者と車両との距離を求め、それを認知距離とした。

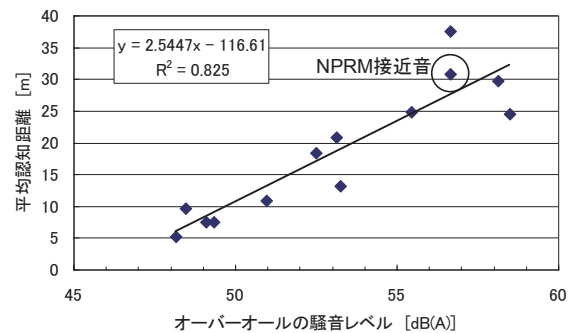


図6 接近音のサンプルのオーバーオールの
騒音レベルと平均認知距離との関係

図 6 に、今回用いた 12 種類の接近音のサンプル及び NPRM 接近音について、16 名の平均認知距離を示す。2 バンドの接近音のサンプルにおける平均認知距離は 58dB(A) で約 30m、52dB(A) で約 15m、46dB(A) で約 7m であった。NPRM 接近音における平均認知距離は約 30m であった。接近音のサンプル及び NPRM 接近音の平均認知距離とオーバーオール騒音レベルの関係は、図 6 に示すように、ほぼ比例関係にあることがわかった。本実験で使った 2 バンドコンセプトに基づく接近音のサンプルでは、ほとんどの条件で 5m 以上の認知距離が確保されており、騒音レベルが 52dB(A) を超える場合の認知距離は 10m 以上であった。

3. 3. 3. リアルワールドに近い暗騒音環境下における認知性試験

テストコースでの認知性試験は、暗騒音が非常に小さい場所において、NPRM のモデル暗騒音をスピーカから発生させることによる人工的に統制した環境において、2 バンドのサンプル音の認知性の特性を把握することを目的として行った。しかし、リアルワールドでは暗騒音は時々刻々と変化しているため、リアルワールドにより近い環境における認知距離を測定するための試験を行った。実施場所は、交通安全環境研究所構内の直線路で、敷地外の片側 2 車線の幹線道路からの道路交通騒音が届く位置で行った。なお、研究所内の機器動作音等が時折届くことがあった。

認知性試験の参加者は、所外から募集した 20 歳代から 40 歳代の一般参加者 30 名（平均年齢 33.4 歳）及び視覚障害者 3 名（20 歳代、30 歳代、40 歳代）である。試験に用いた電気自動車及び発音システムは、前項のテストコースで使用したものと同一である。ただし、接近音のサンプルは、1.25kHz 以上からは 2kHz と 5kHz の 2 つを、また、800Hz 以下からは 500Hz と 800Hz の 2 つを選んだ。前項のテストコースでの試験では低い周波数帯から 200Hz を選択したが、この周波数帯は NPRM 接近音には含まれていないため、本実験では 200Hz の代わりに 500Hz を使用した。認知性試験は、図 7 に示すように、10 名の実験参加者に対して同時に測定を行った。参加者は 1m 間隔で一列に並んで立ち、参加者の列から 2m 離れた走行線に車両中心が来るように電気自動車を走行させた。速度は 10km/h とした。図 8 に認知性試験の様子を示す。参加者には、目を閉じて接近音に気がいたら手元の

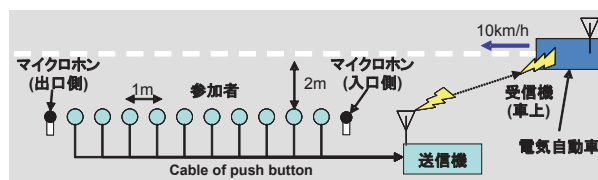


図 7 認知性試験の概要



図 8 認知性試験の様子

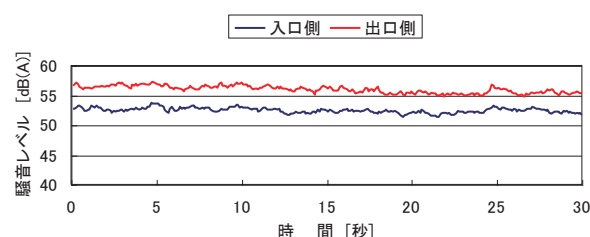
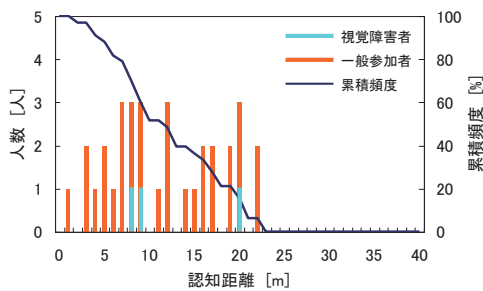


図 9 暗騒音の騒音レベルの変化の一例

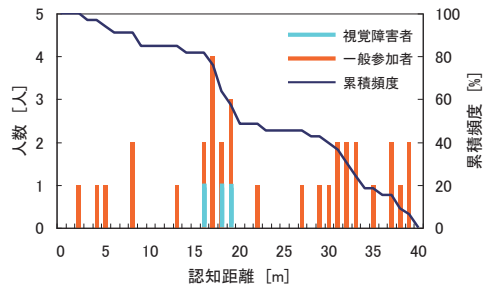
スイッチを押してもらった。手元のスイッチを押すと、その信号が車上へ送信され、参加者と車両との距離が計測される。また、試験中の暗騒音を、参加者の列の両端から 1m 離れた位置に設置したマイクロホンによって測定した。図 9 に、暗騒音の測定結果の一例を示す。この間の騒音レベルの平均は、入口側 51.8dB(A)、出口側 54.6dB(A) で、両者に約 3dB(A) の差があった。

接近音のサンプルの音量は、オーバーオール騒音レベルが 52dB(A) のものだけを用いた。比較のため接近音が無いときの認知距離も調べた。

前項では、平均認知距離を求め、認知距離が 5m 以上あることを確認したが、ばらつきを考慮すると 5m 未満の認知距離の結果があると考えられる。そこで、認知距離の頻度を求めた。図 10 に、参加者 33 名の認知距離の分布を、800Hz+2kHz と 500Hz+5Hz について示したものである。認知距離の件数を計数する際に、小数点以下は四捨五入した。いずれの条件においても視覚障害者と一般参加者の認知距離に違いは認められなかった。次に、認知距離の累積頻度を求めた。その結果を図 11 に示す。2 バンドの接近音のサン



(a) 800Hz-2kHz



(b) 500Hz-5kHz

図 10 認知距離の人数と累積頻度

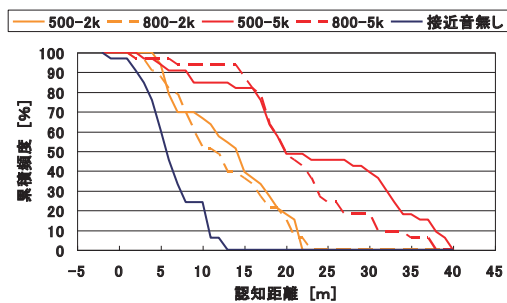


図 11 接近音のサンプル及び接近音が無い場合の累積頻度の比較

ルでは 5m の位置において、ほとんどの条件で 90% 以上の参加者が反応した。一方、通報音がない場合は約 60% であったため、接近音の付加によって認知距離が改善されたことが示された。

上記の結果を基に、GTR のためのインフォーマル会議において、接近音の周波数特性については、1/3 オクターブバンドの 800Hz 以下と、1.25kHz 以上のそれぞれに 1 つ以上卓越したバンドを持つことを日本から提案している。音量については、米国や欧州の提案も考慮に入れて検討を行っている。

4. 視覚障害者のための体験会の実施

上記で述べた認知性試験の結果を基に、ハイブリッド車や電気自動車を市販している日本の自動車メー

カー 4 社が、それぞれ独自の接近音の試作を行った。周波数特性は日本の提案に基づいており、音量は認知性試験の結果を参考にして各社が設定した。

視覚障害者の方々に、日本で検討を行っている接近音の要件について理解を深めてもらうため、試作した接近音を聞いてもらう体験会を実施した。体験会の実施場所は、暗騒音が比較的静か（暗騒音のレベル：45～48dB(A)）である海上技術安全研究所の敷地内で行った。体験会には、視覚障害者 14 名および付添人（健常者）6 名、計 20 名が参加した（平均年齢 63.4 歳、標準偏差 7.4 歳）。視覚障害者のうち、全盲の者は 10 名、弱視の者は 4 名であった。図 12 に示すように、参加者には、直線路において車両走行中心線から 2m 離れた位置に、車両走行中心線側を向いて、1m 間隔で 5 名ずつ、2 列に並んで立ってもらった。車両は参加者の列から外側に 50m 離れた位置からスタートし、参加者列の中心を走行して、列を通り抜けた後さらに 50m 走行した。走行条件は以下の通りである。図 13 に体験会の様子を示す。

- (1) ハイブリッド車及び電気自動車 4 台が、接近音ありで、10km/h の定常走行で走行（通過条件）
 - (2) 接近音無しで(1)の通過条件で走行
 - (3) ハイブリッド車及び電気自動車 4 台が、接近音ありで、参加者の手前の停止線で一旦停止し、数秒後に再度発進（停止条件）
 - (4) 接近音無しで(3)の停止条件で走行
- 上記の走行を各々往復で行った後、接近音について

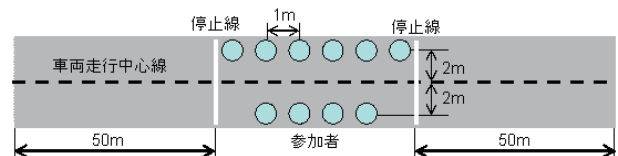


図 12 体験会の配置概要図



図 13 体験会の様子

表 1 印象評価の結果

	走行条件	接近音の有無	分かったと回答			分からなかったと回答		①②③の合計	④⑤の合計	①②③の合計人数の割合
			①	②	③	④	⑤			
視覚障害者(14名)	通過条件	無し	1	2	7	4	0	10	4	71.4
		あり	1	1	10	2	0	12	2	85.7
	停止条件	無し	0	0	3	8	3	3	11	21.4
		あり	0	1	11	2	0	12	2	85.7
健常者(6名)	通過条件	無し	4	0	2	0	0	6	0	100.0
		あり	3	1	2	0	0	6	0	100.0
	停止条件	無し	0	2	2	2	0	4	2	66.7
		あり	1	3	2	0	0	6	0	100.0

の印象評価について、①とてもよく分かった、②よく分かった、③まあまあ分かった、④ほとんど分からなかった、⑤全く分からなかった、の選択肢から選んでもらった。予め上記の選択肢を参加者に伝え、個々の車両の音の評価ではなく、走行パターンごとの車両の接近に対する印象を評価するように指示した。

印象評価の結果を表 1 に示す。停止条件の接近音無しの結果のみ、3名の視覚障害者が全く分からないと回答した。その他の条件では、全く分からないと回答した人はいなかった。印象評価において、分かったと回答（選択肢の①、②または③と回答）した人の比率は、通過条件で接近音無しの場合は 71.4%であったが、接近音ありでは 85.7%となった。また、停止条件では、21.4%が 85.7%となった。従って、接近音を付加することにより、視覚障害者の 85%が車両の接近が分かったと回答し、接近音による認知性の向上が確認された。

5. GTR のためのインフォーマル会議の活動

2012 年 6 月の WP29 では、日欧米が共同スポンサーとして世界統一基準（GTR）のためのインフォーマル会議を設置することが承認され、米国が議長、日本が副議長、EC が事務局を担当することとなった。最初のインフォーマル会議は 2012 年 7 月に行われ、日本から、GTR の検討に当たっては、国際基準のガイドラインをベースとすべきとの提案を行った。この提案に対して、ガイドラインでは発音を一時停止するためのスイッチ（ポーズスイッチ）の装着を認めているが、米国提案の NPRM ではその記載がないため米国の支持は得られなかったが、European Commission (EC)、ドイツ、フランス、世界自動車工業会 (OICA) の代表から賛同を得た。また、これまで述べてきた調査結果をインフォーマル会議で報告し、接近音の要件について日本提案を主張しているところである。しか

し、接近音の周波数特性について日本と EC は 2 バンド以上を主張しているが、NPRM では、図 3 に示すように 8 バンドを要求しており、両者の間で妥協案を見つけることは難しい状況となっている。また、日本と欧州においても、2 バンドのレベルの要件について一部異なる主張をしている。このような状況において、調査結果の技術的なデータに基づき、日本の主張を行っている。

5. まとめ

ハイブリッド車等が低速でモーターのみで走行している時は、静かすぎて接近に気が付かないため、自動車から音を出して接近を知らせることとなり、車両接近通報装置の基準化を行うに当たって、接近音として必要な要件を検討した。ある程度の暗騒音の中でも聞こえやすく、高齢者の聴覚特性も考慮して、日本は 2 バンドのコンセプトを提案している。また、音量については、安全上必要な要件を満たしつつ、大きすぎない音量を検討しているところである。

現在、世界統一基準を目指して GTR のためのインフォーマル会議において日欧米を中心に議論を行っている。自動車から音を出すことについて、各国の考え方は価値観や文化観によって異なるため、統一の基準を作ることは容易ではない。日本として譲れないところは主張をしつつ、各国が受け入れ可能な GTR を目指して、日本の関係団体をはじめ、欧米等関係各国と協力していくつもりである。

参考文献

- 1) ハイブリッド車等の静音性に関する対策のガイドライン、国土交通省ホームページ、<http://www.mlit.go.jp/common/000057788.pdf>
- 2) T. Tabata, et al., Development of Nissan Approaching Vehicle Sound for Pedestrians Vehicle Performance Engineering Department, Proceedings of inter-noise 2011, (2011-8)
- 3) JASIC, Status Report on Activities in Japan regarding the Guideline on Measures against Quietness issue of HV, etc., 8th QRTV Informal meeting, QRTV-08-02, (2011-8)
- 4) National Highway Traffic Safety Administration, Minimum Sound Requirements for Hybrid and Electric Vehicles, [http://www.nhtsa.gov/staticfiles/rulemaking/pdf/](http://www.nhtsa.gov/staticfiles/rulemaking/pdf/Quiet_Vehicles_NPRM.pdf) Quiet_Vehicles_NPRM.pdf, (2013)