

IV-45

ミリ波レーダ技術を活用した冬期道路の安全走行支援システムの
開発とフィールド実験

開発土木研究所 防災雪氷研究室 正員 ○金子 学
正員 加治屋安彦
正員 福澤 義文

1 まえがき

北海道の冬期道路は、滑りやすい雪氷路面や吹雪等による視程障害のため非常に厳しい環境にある。特に、視程障害時の事故は後続車からの発見が遅れやすいため、多重衝突事故に発展する事例も少なくない。多重衝突事故は長時間にわたり道路交通に障害を生じさせ、社会生活に与える影響も非常に大きい。このため、防雪柵や防雪林等、各種の対策施設の整備が行なわれてきたが、非常に厳しい気象条件や用地上の制約等により、従来の手法では十分な効果が得られない場合もあることから、事故を効果的に防ぐ新たな施設の開発が急務となっている。

こうしたことから開発土木研究所では、北海道の地域特性に根ざした寒地型ITS技術の研究開発の一環として、冬期道路の安全走行支援システムの開発を行なってきた。この中で、吹雪や雪煙により十分な視界が得られない条件下を想定し、ミリ波レーダにより前方道路上の停止車両や障害物を検知し、情報板や発光施設により後続車両に危険警告を行ない、事故を防止するシステムの開発を行なっている。

本論文では、ユーザーニーズ調査の結果に基づく冬期道路の安全走行支援システムの構成と、試作システムの冬期における検証実験の結果について報告する。

2 ユーザーニーズ調査に基づく安全支援場面の検討

効果的な事故防止対策の開発にあたっては、実際の道路上におけるドライバーの事故や、事故に類する経験（ヒヤリ体験）について調査し、事故要因を把握することが重要であるため、道内の一般のドライバーを対象にアンケート調査を実施した。その結果、1574通の回答が得られ、冬道運転には多くの運転者が負担を感じており、年輩者ほど冬道運転に消極的であること、冬道では大多数の運転者がヒヤリ体験や、運転中の厳しい視界不良を経験していること等がわかった。なお、このアンケート調査の詳細については、平成10年2月の土木学会北海道支部年次技術研究発表会に報告した¹⁾が、安全支援場面に関係する部分について、以下に述べる。

冬道でのヒヤリ体験の要因としては、凍結路面を挙げる回答が40%と最も多く、吹雪や地吹雪、車両による雪煙等の視界不良も合計で約40%となっており、この2つがヒヤリ体験の主な要因であることがわかった。ヒヤリ体験は、交差点付近と平坦路で目立って多く、下り坂、カーブがこれに次いでいた(図-1)。また、60歳以上の高齢者の場合、他の年齢層に比べ、トンネルの前後を挙げる回答が多かった。ヒヤリ体験時の状況では追突の恐れが最も多く(45%)、正面衝突(17%)、路外逸脱(14%)がこれに次いでいた。冬期路面状況下では、路面の摩擦係数の低下により、制動停止距離が非常に長くなる場合があるため、信号の表示状態や停止車両の有無等、前方の状況を通行車両に予告する施設が有効と考えられる。

また、運転中に吹雪等による視界不良を経験した場所(図-2)は、平坦路が目立って多く、視界不良時に危険を感じた要因としては、前方車両への追突(37%)が最も多く、次いで路外逸脱(24%)、対向車との衝突(17%)、後方からの被追突(14%)等となっていた。視界不良時にはドライバーは事故の危険を感じながら運転していることから、視認し難い前方の停止車両等の存在を、後続車に知らせる施設

*Development of and Field Test on Millimeter Wave Radar Technology Based Intelligent Winter Highway Systems.
by Manabu Kaneko, Yasuhiko Kajiya, Yoshifumi Fukuzawa*

が有効と考えられる。

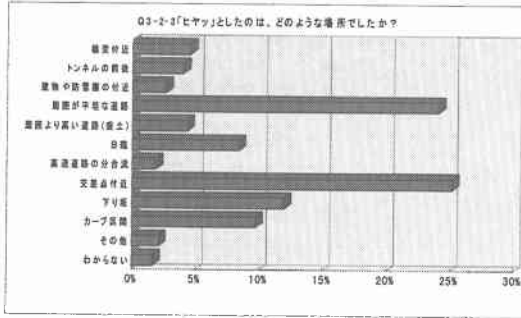


図-1 ヒヤリ体験の場所

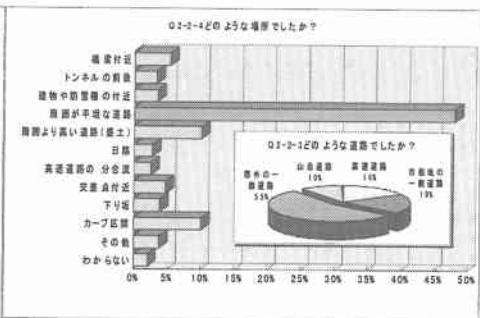


図-2 視程障害を経験した場所

これらの結果に基づき、ヒヤリ体験頻度の高かった交差点、平坦路、カーブ区間、トンネルと、ヒヤリ体験の頻度はやや少ないものの、速度差が大きく交通流に乱れを生じやすい高規格道路の合流・分岐部の5つの箇所について安全走行支援システムの構成を検討した。その結果、平坦路、トンネル及び交差点、高規格道路の分岐・合流部については、停止車両等の障害物の検知が特に有効と考えられ、ミリ波レーダ技術を活用した冬期道路の安全走行支援システムの開発に着手した。

3 安全走行支援システムの概要

3.1 平坦路用安全走行支援システム

平坦路においては、ヒヤリ体験、運転中の視界不良の経験がともに多く、安全支援の必要性が高い。こうした場面では、視線誘導や障害物に関する検知・警告が重要であるため、自発光式デリニエータに視程計を組み込み、視界不良の程度に応じて発光輝度を調整し、効果的な視線誘導を行なうとともに、ミリ波レーダにより路上の障害物を検知し、デリニエータの警報発光や情報板により後続車に危険警告を行なうインテリジェント・デリニエータ・システム²⁾ (図-3)を開発し、改良と実験を行なった。

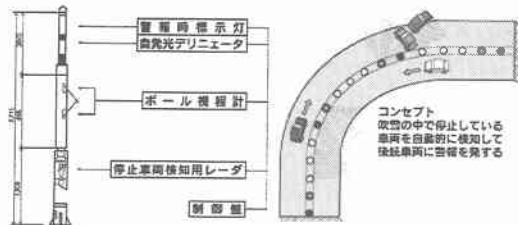


図-3 インテリジェント・デリニエータシステム

このシステムは、自発光式デリニエータに視程計を組み込み、視界不良の程度に応じて発光輝度を調整し、効果的な視線誘導を行なうとともに、ミリ波レーダにより路上の障害物を検知し、デリニエータの警報発光や情報板により後続車に危険警告を行なうインテリジェント・デリニエータ・システム²⁾ (図-3)を開発し、改良と実験を行なった。

3.2 トンネル及び交差点用安全走行支援システム

トンネル等の道路構造物周辺では、高齢者のヒヤリ体験が多く、今後の急速な高齢化を考え併せると安全支援の重要性が高い。高齢者の場合、明るさが急変するトンネル

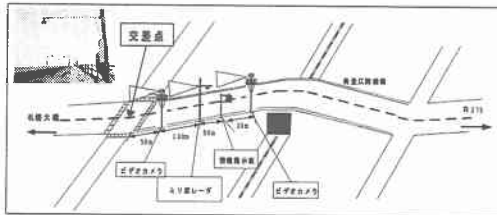


図-4 交差点用安全走行支援システム

写真-1 車載用レーダ



の出入口付近等では目の暗順応に時間を要し、障害物の認知が難しいと考えられる。このため、レーダによりトンネル内の低速車や停止車両を検知し、情報板等によって後続車に知らせるシステムが有効と考えられた。また、このようなシステムは、トンネルだけでなく、見通しの悪い交差点や高架橋下の道路にも有効であると考えられたため、これらのシステムの開発に着手した。トンネルでは機器を設置するための余分な空間が少ないことから、小型化が重要と考えられ、車載用レーダを応用することとした(写真-1)。なお、車載用レーダは今後、量産によるコスト低減と広範囲な適用に期待が持てる。

3.3 高規格道路の合流・分岐部用安全走行支援システム

高規格道路の分岐・合流付近では、ヒヤリ体験の頻度はやや少なかったものの、走行速度が高く、交通流に乱れが生じやすいことから、滑りやすい路面や視界不良の条件下では、安全支援の重要性が高いと考えられる。

このため、合流部の本線車両をレーダにより検知し、合流車両に情報を知らせ、また、分岐部での前方車両を検知し、存在を後続車に伝えるシステムを検討した(図-5)。

このシステムでは、高い走行速度に対応するため、検知限界距離300mを目標にレーダの開発を進めた。

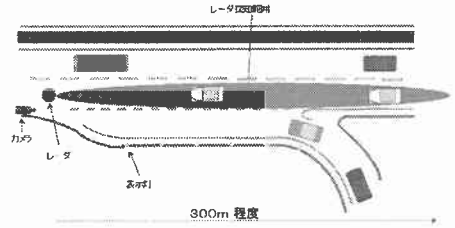


図-5 合流部用安全走行支援システム

3.4 複合センサー・システム

レーダにより障害物の検知を行なう場合、標識や看板等からの反射や雑音によって、検知に誤りを生じることや、レーダ反射が小さい検知対象物を見落とす場合がある。一方、可視カメラの画像から障害物の検知を行なう場合、吹雪等の視界不良時や照明の無い夜間の検知が困難なことや、路面状況や影により画像処理が難しい等の問題がある³⁾。

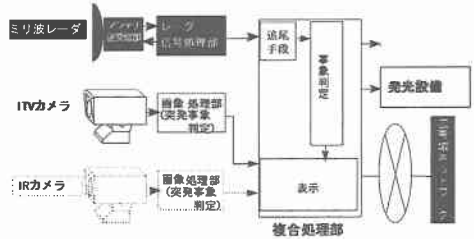


図-6 複合センサー・システム

このように、単独のセンサーでは検知に誤りを生じやすい環境を想定し、ミリ波レーダと可視カメラや赤外線カメラを組み合わせ、検知の信頼性を高める複合センサー・システムの開発を行なった(図-6)。

4 安全走行支援システムの検証実験

平坦路用のシステムは国道40号開源で、トンネル及び交差点用のシステムは国道 337号当別で、高規格道路の合流部用のシステムと複合センサー・システムは、開発土木研究所石狩吹雪実験場にて、それぞれ検証実験を行なった。代表例として、以下にトンネル及び交差点用のシステムと、複合センサーシステムの例について記述する。

4.1 トンネル及び交差点用安全走行支援システムの検証実験

(1) 実験方法

本システムの検証実験は、札幌市近郊の一般国道 337号当別町の交差点付近にて、平成11年3月24日に行なった。レーダには 60.5GHz帯の送信出力 3mWの FM-CW式の車載用ものを使用し、交差点から150m離れた歩道上のポールの高さ4.1mの部分に設置した。検知では、レーダの送信波と受信波を合成して得られるビート信号周波数から、通過中の車両の距離と速度を求め、

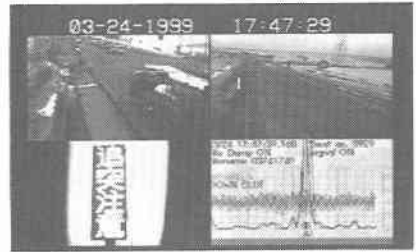


写真-2 実験状況

交差点に向かう車両の速度が約15km/h以下の場合を「低速車有り」、交差点手前に1台の停止車両を検知した場合を「停止車両有り」、複数の停止車両を検知した場合を「渋滞」と定義した。レーダによる検知情報は、交差点の200m手前に設置した道路情報板に表示することとした(写真-2)。なお、表示板設置位置は、現地の制限速度(60km/h)と、滑りやすい雪氷路面の摩擦係数(0.1)から計算した制動停止距離(184m)に基づいて設定した。また、システムを実際に運用した場合、道路管理者はシステム稼働状態や現地状況について遠隔管理することが必要となるため、ミリ波レーダ、情報板、道路監視カメラをLAN接続し、デジタル通信回線により川崎市にある共同研究者の工場と接続し、遠隔制御及びカメラ映像の確認を行なった。

(2) 実験結果

道路上の停止車両や低速車両の検知について、ミリ波レーダによる検知情報と、付近に設置した道路監視カメラのビデオ映像を比較照合し、15km/h以上の通過車両を検知した場合を「誤検知」、低速車や停止車両を検知できない場合を「未検知」として評価を行なった。結果の概略について表-1に示す。また、検知情報が正しく情報板に表示されたか否かについても、情報板を撮影したビデオ映像との照合により評価したところ、検知情報は全て正しく表示されており、誤りは見られなかったため、結果一覧表からは省略した。

通過車両台数 900台の内、検知対象となる車両は 426台、実際に検知した台数は 425台となっていた。この内、通過車両に対する誤検知が大型車両で1件、普通車で2件、渋滞時の未検知が普通車で4件あり、通過車両台数に対して正しく検知した割合は99.2%と、ほぼ良好な結果が得られた。

誤検知の原因について、ビデオ映像と検知データから原因を調べたところ、複数の車両が特定の速度で近接走行した場合に発生していた。レーダによる車両検知では、ビート信号をFFT処理し、送信周波数の上昇区間のスペクトラムと、下降区間のスペクトラムを各々求め、それぞれのピーク周波数を一対として、和分から距離を、差分から速度を求めているが、誤検知はピーク周波数の片方に、異なる車両によるピーク周波数を採用していたことが原因とわかった。また、未検知については、手前側の大型車両に先行車が隠された場合と、道路の縦断的な窪みによって車両からの反射が低下した場合に生じていた。これらに関し、アルゴリズムに改良を加えた結果、誤検知は解消し、未検知についても機能上支障が無い程度まで、改善効果が得られた。

この実験では、一般車両の速度測定と、被験者による車両走行試験により、情報板の表示が運転に与える影響についても調査したが、実験時は視程が200mを大きく上回っており、情報板位置から交差点付近が見通せる状況であったため、車両の挙動変化は特に見られなかった。今後は悪天候下や、さらに状況の厳しい地点にて検証実験を行ないたい。

4.2 複合センサー・システム検証実験

(1) 実験方法

ミリ波レーダは、距離及び速度の測定性能に優れるものの、ビーム幅が狭いため広範囲の対象物を捉えることが難しい。一方、赤外線カメラや可視カメラは、広い範囲の対象物を捉えることができるものの、画素数の制約によって、遠距離の測定では精度が低下する。また、平成9年度の実験(表-2)から、ミリ波レーダは視界の良否に拘わらず、遠距離

(200m以上)の車両の検知が可能であるが、レーダ反射の小さい歩行者や落下物の検知では検知限界距離が短いことや、赤外線カメラや可視カメラの車両の検知限界距離は、ミリ波レーダより短い(約150m)ものの、歩行者や落下物の検知性能に優れていること、可視カメラに見られる視程障害時及び夜間の性能低下が赤外線カメラでは小さいことがわかっている。

このように、異なった特徴を有するミリ波レーダと赤外線カメラやITVカメラを組合せ、検知情報を比

表-1 実験結果

普通車	通過車両	低速車両	停止車両	渋滞車両	計
車両台数	296	21	12	255	584
検知した台数	2	21	12	251	284
誤検知台数	2				2
未検知台数		0	0	4	4

大型車	通過車両	低速車両	停止車両	渋滞車両	計
車両台数	178	10	4	124	316
検知した台数	1	10	4	124	139
誤検知台数	1				1
未検知台数		0	0	0	0

合計	通過車両	低速車両	停止車両	渋滞車両	計
車両台数	474	31	16	379	900
検知対象台数	0	31	16	379	426
検知した台数	3	31	16	375	425
正解数(率%)	471	31	16	375	893(99.2%)
誤り(率%)	3	0	0	4	7(0.8%)

表-2 各センサーの性能比較

検知最大距離	ミリ波レーダ	赤外線カメラ	ITVカメラ
視程良好時	普通車	200-250m	150m
	歩行者	100m	150m
	落下物	100m	100m

検知最大距離	ミリ波レーダ	赤外線カメラ	ITVカメラ
視程障害時 (夜間、視 程35-60m)	普通車	200-250m	100m
	歩行者		100m
	落下物		

較・照合することにより精度の向上を図ったのが、複合センサー・システムであり、上述の実験により有効性が高いと考えられた、ミリ波レーダと赤外線カメラの統合処理による検知実験を、開発土木研究所石狩吹雪実験場において、平成11年3月8～12日に行なった⁴⁾。本システムには 59.5GHz、6mWの FM/CW式レーダと、8万画素、毎秒30フレームの非冷却型赤外線カメラを用いており、ミリ波レーダは200m、赤外線カメラは20～120mまでを検知範囲とし、実験場内の門型支柱（高さ6.3m）に設置した（写真-3、図-7）。なお、検知対象は普通乗用車とした。



写真-3 設置状況

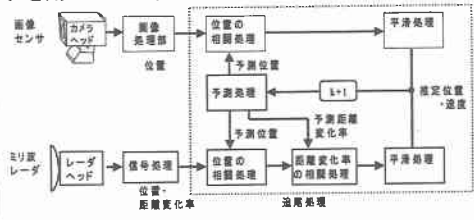


図-7 実験システム

(2) 実験結果

実験時の気象条件は小雪（視程500m）から、吹雪（視程20m以下）までであり、冬期環境下における有効性に関する十分なデータを取得できた（図-8）。ミリ波レーダは、視程良好時から視程50mまでの吹雪環境下において、200m以上の距離から車両を検知でき、視程20m以下の激しい吹雪では検知距離がやや短くなる（約180m）ものの、有効に車両を検知できることがわかった。また、赤外線カメラとITVカメラ（可視センサ）は、120m以内を検知対象として設置したこともあり、検知限界距離はミリ波レーダと比べて短いものの、至近距離までの広い範囲の車両を検知できた。しかし、視程50m以下の強い吹雪の下では検知限界距離が短くなり、この傾向は特にITVカメラの場合に顕著となっていた。

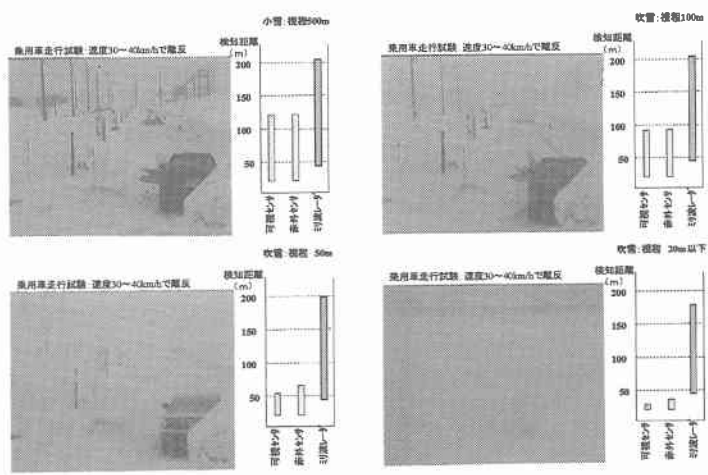


図-8 実験時の映像と各センサーの検知範囲

センサーからの角度が大きくレーダによる検知が難しい近距離では赤外線カメラを、また、赤外線カメラによる検知が困難な遠距離ではミリ波レーダを主に用い、統合処理により検知を行なう実験では、視程良好時から視程50mの吹雪時までの環境下において、距離20mから200mの範囲の車両を連

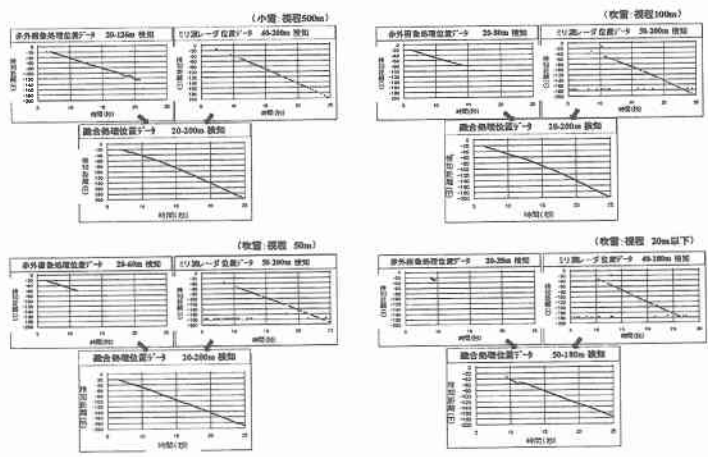


図-9 ミリ波レーダと赤外線カメラの検知データの統合処理

統的に検知することができた（図－9）。また、視程20m以下の激しい吹雪の状況下では、赤外線カメラの検知限界距離とミリ波レーダの検知開始距離との間に間隙があるため、統合処理データに一部非直線的な部分が生じるものの、PDAによる車両追尾アルゴリズムによって、不検知の無い良好な検知結果が得られた。なお、ミリ波レーダの道路周辺からの反射による雑音がレーダ単体では見られたが、赤外線カメラとの統合処理によって良好に解消されていた。

5 まとめ

これまで述べてきたように、冬期道路における事故防止の目的で、ミリ波レーダを活用した各種の安全走行支援システムを開発し、冬期における検証実験を行なった。その結果、ミリ波レーダは冬期の視界不良時における停止車両等の障害物の検知に有効であり、実用化が可能な水準に達していることがわかった。後続車両に対する情報板等による危険警告は、事故防止に有効と考えられるが、視界不良時の道路上において危険警告の効果評価を行なうことが今後必要と考えられる。また、より精度の高い検知が必要な場合や、レーダ反射の小さい歩行者や落下物、2輪車等を検知対象に含む場合、夜間や厳しい視程障害の環境下ではミリ波レーダと赤外線カメラ等との統合が効果的であることがわかった。この他、路側のシステムをデジタル通信回線により事務所と接続する実験では、遠隔操作、遠隔監視が有効に行なわれ、今後の道路監視の自動化、省力化が期待される。

現在、道路の高度情報化を進めるITS（高度道路交通システム）については、21世紀の先端的国家プロジェクトとして、中央においてもスマートウェイ推進会議が2003年の第二東名～名神などを皮切りに、2004年以降の地域特性に応じた展開を提言しており、関連する技術の標準化が進められている。開発土木研究所では、冬期道路の走行支援技術に関する研究や、寒冷地AHSに関する検討などのITSプロジェクトの全国展開に係るシステムアーキテクチャ詳細化作業を建設省土木研究所との協同により行っており、今後は、これらの全国的な動きとの整合を図りつつ、パイロットシステムの開発等、実用化に向けた総合的な調査を進めることとした。

謝辞

ミリ波レーダ技術を活用した安全走行支援システムの開発は、開発土木研究所と株式会社アンリツ、富士通株式会社、三菱電機株式会社、明星電気株式会社との共同で実施した。関係各位に謝意を表する次第である。

参考文献

- (1)金子学, 加治屋安彦, 福澤義文ほか: 冬期道路とヒューマン・ファクターに関する研究(第1報) — ドライバー・ニーズ調査の結果から —, 土木学会北海道支部論文報告集第54号(B), 1998.2
- (2)加治屋安彦, 福澤義文, 石本敬志ほか: インテリジェント・デリニエータ・システムのフィールド実験結果 — 冬期交通のためのITS技術の研究開発 —, TRB第4回道路除雪と雪氷対策技術に関する国際シンポジウム, 1996.8
- (3)千葉隆広, 石本敬志, 加治屋安彦: 冬期道路の安全走行支援システムに関する研究(第2報) — 画像処理によるインテリジェントITVカメラの開発について —, 土木学会北海道支部論文報告集第54号(B), 1998.2
- (4)岡田隆光, 春山鉄男, 加治屋安彦: 画像センサとミリ波レーダによる道路監視システム用車両追尾方式, 第6回ITS世界会議, 1999.11