

側壁反射を利用した斜め規則波の造波方法

今井 貫爾*・池谷 毅**・秋山 義信***
南 誠信****・岩瀬 浩二****

1. 緒 言

世界の主要な水理研究機関に幅の小さい多数の造波板で構成された多方向不規則波造波装置が設置され、造波方法に関する研究（例えば、高山ら，1989）や実証的な研究が盛んに実施されつつある。これは、波の多方向性を十分考慮して、海岸・海洋構造物の耐波設計技術を再構築しようとする動きとみることができる。

多方向不規則波は、波高・周期・波向きがそれぞれ異なる多数の斜め規則波の重ね合わせとして表現される。従来、多方向不規則波造波装置で斜め規則波を造る場合、実験波の有効領域を広く確保するために、幅の広い水槽もしくは側壁の消波が十分な水槽になるべく長い造波板列を持った造波装置を配置することが行われてきた。ところが、この方法では施設や費用の面での制約が多く現実的な手法とは言えないと考えられる。

本報では、造波装置の置かれる水槽の側壁からの反射波を考慮し、これを積極的に利用することにより、有限長の造波装置を用いて水槽の任意の位置に目標とする斜め規則波を造波する合理的な手法について述べる。さらに新しく導入したリンク型の多方向不規則波造波装置を紹介するとともに、これを用いて上記の手法を検証した結果についても報告する。

2. 側壁反射を利用した斜め規則波の造波理論

有限の水槽と造波板を用いた従来の造波方法では、図-1に示すように回折や側壁からの反射波のために実験波の有効領域は造波板前面の狭い範囲に限られていた。ところが、水槽側壁の反射を取り込んだ制御を行うと図-2に示すように従来の2倍以上の範囲を実験領域として利用することができる。

側壁の反射を利用して広い範囲に同一の特性を持つ波浪場を造り出すアイデアは、Funke and Miles (1987) によって提案され、Dalrymple (1989) はこれを取り入れた

解析を行っている。ここでは、より一般的な造波理論について述べる（今井ら，1989；今井ら，1990）。

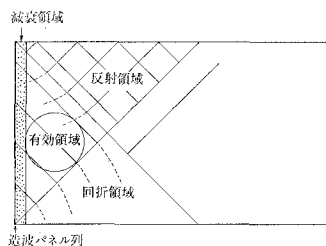


図-1 従来の実験有効領域

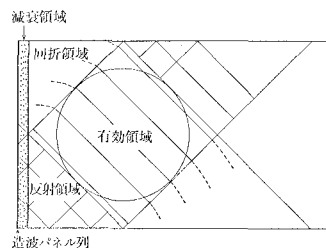


図-2 側壁反射を利用した実験有効領域

(1) 解析の仮定と基礎方程式

本報で解析の対象とするのは、長周期の波を安定して造波することができるピストン型とする。完全反射の側壁を有する水槽に置かれた有限長の多方向造波装置を扱うこととし、座標の定義を図-3に示す。

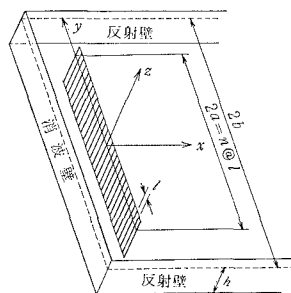


図-3 座標の定義

* 正会員 Ph.D 鹿島建設技術研究所
** 正会員 工博 鹿島建設技術研究所
*** 正会員 工修 鹿島建設技術研究所
**** 正会員 鹿島建設技術研究所

解析の前提として以下の仮定を行う。

- ①流体は非粘性，非圧縮の完全流体とする。
- ②流体の運動は非回転とする。
- ③水面の運動，造波板の運動は微小であるとする。
- ④水深は一定であるとする。
- ⑤造波板は不透過であるとする。
- ⑥側壁は完全反射壁とする。
- ⑦消波壁は完全消波壁とする。

上記の仮定の基に，流体の運動は速度ポテンシャル ϕ を用いて表現される。さらに，支配方程式は以下のラプラスの方程式となる。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

ここに， x, y, z は図-3に示すデカルト座標系である。

速度ポテンシャルを用いると，水面変動 η ，及び x, y, z 方向の流速 u, v, w は以下の式で表わされる。

$$\eta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} \Big|_{z=0} \quad (2)$$

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (3), \quad v = \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (4), \quad w = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (5)$$

ここに， t は時間， g は重力加速度である。

(2) 境界条件と解析法

上記の仮定のもとに，境界条件は以下の通りとなる。

$$z=0: \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

$$z=-h: \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

$$y=\pm b: \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

$$x=0: \frac{\partial \phi}{\partial x} = \begin{cases} \frac{\partial x_p}{\partial t} & |y| \leq a \\ 0 & a < |y| \leq b \end{cases} \quad (9)$$

ここに， a は造波板全列半幅， b は水槽半幅， x_p は造波パネルの運動変位である。

変数分離型の解を仮定し，解周波数 $\omega = 2\pi/T$ の周期解を求める。よって，速度ポテンシャルは

$$\Phi = \phi(x, y) Z(z) e^{-i\omega t} \quad (10)$$

と仮定できる。式 (10) を基礎方程式 (1) に代入し，境界条件式 (6)，(7) を考慮すると，速度ポテンシャルの関数形として

$$\Phi = \{\phi_0(x, y) \cosh k(h+z) + \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n(x, y) \cos \nu_n(h+z)\} e^{-i\omega t} \quad (11)$$

となる。ここに，角周波数 ω と k 及び ν_n との間には，以下の分散関係式が成り立つ。

$$\omega^2 = gk \tanh kh \quad (12)$$

$$\omega^2 = -g\nu_n \tan \nu_n h \quad (13)$$

また式 (11) 中の ϕ_0, ϕ_n は以下の式を満足する必要がある。

$$\frac{\partial^2 \phi_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_0}{\partial y^2} + k^2 \phi_0 = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial^2 \phi_n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_n}{\partial y^2} - \nu_n^2 \phi_n = 0 \quad (15)$$

一方，速度ポテンシャルの y 方向の関数形は境界条件式 (8)，すなわち側壁における完全条件反射を満足する関数列として次式とする。

$$\phi_0 = \sum_{m=0}^{\infty} \{\phi_{0m}^e(x) A_{0m} \cos \lambda_m y + \phi_{0m}^s(x) B_{0m} \sin \gamma_m y\} \quad (16)$$

$$\phi_n = \sum_{m=0}^{\infty} \{\phi_{nm}^e(x) A_{nm} \cos \lambda_m y + \phi_{nm}^s(x) B_{nm} \sin \gamma_m y\} \quad (17)$$

ここに，

$$\lambda_m = \frac{m\pi}{b} \quad (18), \quad \gamma_m = \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\pi}{b} \quad (19)$$

式 (16)，式 (17) をそれぞれ式 (14)，式 (15) に代入して整理すると，速度ポテンシャルは以下の形となる。

$$\begin{aligned} \Phi = & \left[\sum_{m=0}^{\infty} \left\{ A_{0m} e^{i\sqrt{k^2 - \lambda_m^2} x} \cos \lambda_m y + B_{0m} e^{i\sqrt{k^2 - \gamma_m^2} x} \sin \gamma_m y \right\} \right. \\ & \cdot \cosh k(h+z) \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \left\{ A_{nm} e^{-\sqrt{\nu_n^2 + \lambda_m^2} x} \cos \lambda_m y + B_{nm} e^{-\sqrt{\nu_n^2 + \gamma_m^2} x} \sin \gamma_m y \right\} \\ & \left. \cdot \cos \nu_n(h+z) \right] \cdot e^{-i\omega t} \quad (20) \end{aligned}$$

(3) 速度ポテンシャル解

波浪場の速度ポテンシャルは，境界条件式 (9)，すなわち造波板の速度と水粒子速度の流速とを等しくする条件を満足するように，式 (20) 中の係数 ($A_{0m}, B_{0m}, A_{nm}, B_{nm}$) を定めれば最終的に確定する。ここでは，様々な構造の造波装置の内，鉛直方向にはピストン型を，横断方向については任意の構造を仮定しているため，造波板の変位は以下の式となる。

$$x_p = \sum_{m=0}^{\infty} (C_m \cos \lambda_m y + D_m \sin \gamma_m y) e^{-i\omega t} \quad (21)$$

ここで，式 (20)，(21) を式 (9) に代入し，直交関係を利用して，水深方向に積分すると，造波板の運動と速度ポテンシャルとの間に以下の関係が得られる。

$$A_{0m} = \frac{-\omega}{\sqrt{k^2 - \lambda_m^2}} \frac{4 \sinh kh}{2kh + \sinh 2kh} C_m \quad (22)$$

$$B_{0m} = \frac{-\omega}{\sqrt{k^2 - \gamma_m^2}} \frac{4 \sinh kh}{2kh + \sinh 2kh} D_m \quad (23)$$

$$A_{nm} = \frac{i\omega}{\sqrt{\nu_n^2 + \lambda_m^2}} \frac{4 \sin \nu_n h}{2\nu_n h + \sin 2\nu_n h} C_m \quad (24)$$

$$B_{nm} = \frac{i\omega}{\sqrt{\nu_n^2 + \gamma_m^2}} \frac{4 \sin \nu_n h}{2\nu_n h + \sin 2\nu_n h} D_m \quad (25)$$

よって、造波板の変位がわかれば式 (22)～式 (25) により、作られる波浪場を算定することができる。

(4) 斜め規則波の設計

ここでは、斜め規則波を上記の理論式を用いて設計する方法について示す。

造波板からあるはなれた距離 ($x=x_d$) の位置で一定の波高を有する斜め波が進行している状況を考える。この波は $x=x_d$ において、以下の水面変動を有する。

$$\begin{aligned}\eta &= He^{i(k \cos \theta x + k \sin \theta y - \omega t)} \\ &= He^{i(\sqrt{k^2 - A^2} x + A y - \omega t)} \dots\dots\dots (26)\end{aligned}$$

水槽内でこれを実現させるためには、水槽内で生ずる波浪場を表す速度ポテンシャルが、 $x=x_d$ において式 (26) であらわされる水面変動に符合するものであれば良い。速度ポテンシャルとして、進行波成分のみを考慮するものとするれば、条件は次式となる。

$$\eta|_{x=x_d} = -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi_p}{\partial t} \Big|_{x=0, x=x_d} \dots\dots\dots (27)$$

$$\begin{aligned}\Phi_p &= \left\{ \sum_{m=0}^{m_a} \hat{A}_{0m} e^{i\sqrt{k^2 - \lambda_m^2} x} \cos \lambda_m y \right. \\ &\quad \left. + \sum_{m=0}^{m_b} \hat{B}_{0m} e^{i\sqrt{k^2 - \lambda_m^2} x} \sin \gamma_m y \right\} \\ &\quad \cdot \cosh k(h+z) \dots\dots\dots (28)\end{aligned}$$

m_a : $k > \lambda_m$ なる最大の m

m_b : $k > \gamma_m$ なる最大の m

式 (22) から (25) を求めたと同様に、関数の直交関係を用いて、複素係数 $\hat{A}_{0m}$ 、 $\hat{B}_{0m}$ を求めれば、

$$\hat{A}_{0m} = \begin{cases} -\frac{Hg}{\omega} & m=0 \text{ and } A=0 \\ -\frac{Hg}{\omega b} \frac{e^{i\sqrt{k^2 - A^2} x_d} \sin Ab}{e^{i k x_d} A} & m=0 \text{ and } A \neq 0 \\ -\frac{2Hg}{\omega b} \frac{e^{i\sqrt{k^2 - A^2} x_d}}{e^{i\sqrt{k^2 - \lambda_m^2} x_d}} \cdot \frac{(-1)^m}{A^2 - \lambda_m^2} A \sin Ab & m \neq 0, k > \lambda_m \dots\dots\dots (29) \end{cases}$$

$$\hat{B}_{0m} = \begin{cases} -\frac{2 H g i}{\omega b} \frac{e^{i\sqrt{k^2 - A^2} x_d}}{e^{i\sqrt{k^2 - \gamma_m^2} x_d}} \cdot \frac{(-1)^m}{A^2 - \gamma_m^2} A \cos Ab \dots\dots\dots (30) \end{cases}$$

となる。

さて、斜め波の速度ポテンシャルと、造波板変位との間には、式 (22)、(23) の関係があるから、 $x=x_d$ で目標とする波浪場を作り出す造波パネルの変位は次式となる。

$$\hat{x}_p = \sum_{m=0}^{\infty} (\hat{C}_m \cos \lambda_m y + \hat{D}_m \sin \gamma_m y) e^{-i \omega t} \dots (31)$$

$$\hat{C}_m = -\frac{\sqrt{k^2 - \lambda_m^2}}{\omega} \frac{2kh + \sinh 2kh}{4 \sinh^2 kh} \hat{A}_{0m} \dots\dots\dots (32)$$

$$\hat{D}_m = -\frac{\sqrt{k^2 - \gamma_m^2}}{\omega} \frac{2kh + \sinh 2kh}{4 \sinh kh} \hat{B}_{0m} \dots\dots\dots (33)$$

3. 波浪場可視化システム

波浪実験を行う場合、水槽内に発生する波浪場を事前に把握しておくことは、例えば実験有効範囲の確認、最高波面の確認等の理由で極めて重要である。多方向波浪場は、非定常 3 次元の現象であるため、その特徴を表わすためには、アニメーションが適している。そこで、多方向不規則波造波装置により作り出される波浪場の可視化システムとしてアニメーションを作成した。本可視化システムの構成を図 4 に示す。

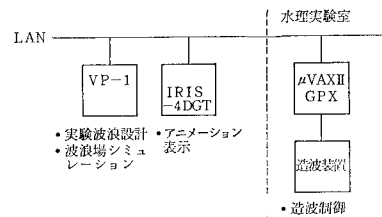


図 4 波動場可視化システムの概要

アニメーションの作成は、Silicon Graphics 社製のグラフィックワークステーション (G.W.S.) IRIS-4D GT により、また、実験造波設計、造波解析は convex 社製のスーパーミニコン VP-1 により行なわれる。両者は、ローカルエリアネットワーク LAN により結ばれており、データファイルの授受は LAN を通じて行なわれる。また、実際の造波装置を制御するミニコン (μ VAX) もネットワーク上に連結されており、同一の造波信号による数値実験と物理実験とが簡便にできる。

造波可視化システムは以下の特徴を持つ。

- ① 水面形の 3 次元カラーコンターがリアルタイムで表示される。
- ② 水面上の 3 次元流速ベクトルがリアルタイムで表示される。
- ③ 視点の位置、角度、視角、時間及び鉛直方向スケールをダイヤルによりリアルタイムで変更可能。
- ④ 方向スペクトルを 3 次元カラーコンターにより表示される。

波動場可視化システムにより、作り出された斜め規則波のアニメーションの一場面を写真 1～写真 3 に示す。写真 1、2 は側壁反射を利用しない場合であり、写真 3 は側壁反射を考慮した場合である。

4. 多方向不規則波造波装置

1990 年、鹿島建設技術研究所の水理実験場内の平面水槽 (幅 20 m、長さ 58 m、深さ 1.6 m) に米国 MTS 社

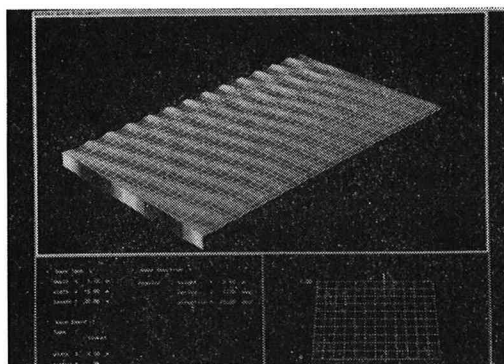


写真-1 従来法により作られる波浪場(水面変動)

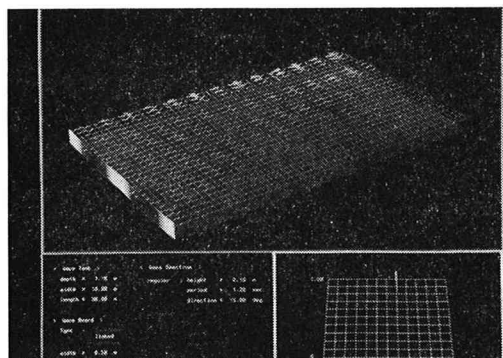


写真-2 従来法により作られる波浪場(流速分布)

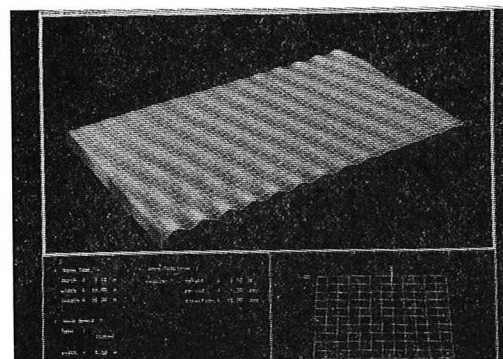


写真-3 側壁反射を利用した波浪場(水面変動)

製の多方向不規則波造波装置を導入した。この装置は幅50 cm、高さ2 mの造波板が36枚リンクされたものであり、全長は18 mである。造波形式はピストン型であり、37台の電動モーターにより駆動される。写真-4に造波装置の全景を示す。また、写真-5に斜め規則波の造波状況を示す。なお、本装置は、空気圧を用いて本体を浮かすことのできるエアバックシステムにより水槽内の任意の位置に移動することが可能である。

造波板の移動部は、図-5に示すように二重になった

ステンレス製の造波板の間にシリコン製の板が挟み込まれており、従来の離散型の造波板に比べて、より連続変形に近い運動が可能な構造となっている。

造波板の最大ストロークは50 cmであり、最大波高は、規則波の場合、水深1 mで40 cm、水深1.2 mで50 cmである。造波モードには2通りある。一つは、造波板の変位時系列を与えて造波する方法である。もう一つは、各造波板に取り付けられた37本の抵抗線式波高計から、造波板前面の水位をフィードバックして、水位

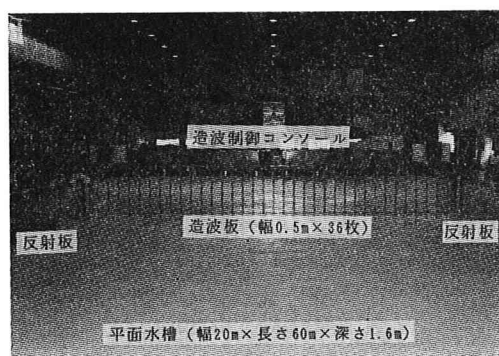


写真-4 多方向不規則波造波装置

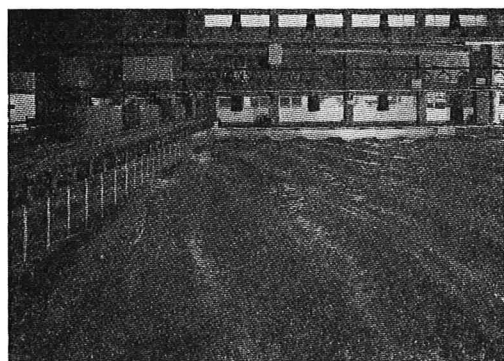


写真-5 斜め規則波の造波状況

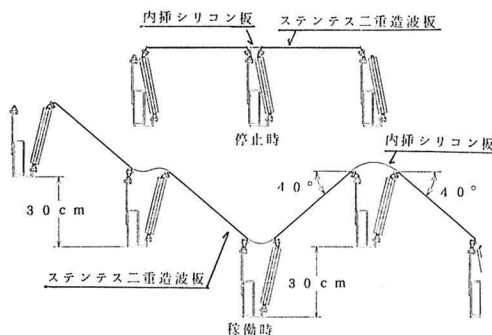


図-5 造波板の連結部の構造

制御により波高の時系列を入力して造波する方法である。水位制御のモードを使用すれば、水槽内の模型や水槽端部からの反射波を吸収しながら、目標とする波のみを長時間連続して造波することができる。

造波可能な波は、規則波・斜め規則波、不規則波・斜め不規則波、多方向不規則波等の線形波の他に、5次のストークス波と3次のクノイド波の非線形波も直接造波することができる。また、孤立波（津波）も造波することができる。

造波信号の作成や造波板の制御及び実験で計測したデータの取得と1次処理は、水理実験棟内に設置したミニコン（DEC社製 μ VAX II-GPX）を使用して行う。ただし、このミニコンは、ローカルエリアネットワークLANによって、研究所内でさらに高速で大型のコンピュータと結ばれているため、大量の造波信号の作成と膨大な実験データの処理は他のコンピュータによって実行することができる。

5. 検証実験

2. で述べた側壁反射を利用した造波方法の妥当性を検証するため、前述した多方向不規則波造波装置を使用した実験を行った。側壁反射を利用した場合と利用しない従来の造波信号を変位制御モードで作成し、斜め規則波を造波して、目標位置における波高分布を計測した。

側壁反射を利用した場合と利用しない場合の目標位置における水槽幅方向の波高の計算結果と実験結果の一例について図-6に示す。横軸は水槽幅方向の位置、縦軸は計算と実験で得られた波高を目標波高で割った無次元波高である。斜め規則波の造波目標位置は、造波板から12 mの位置である。水深は1.0 mであり、波高10 cm、周期1.0 secと2.0 sec、波向き45°である。これより、側壁を利用した場合と利用しない場合とも計算値は実験値と良好な一致を示していることがわかる。また、計算値および実験値とも水槽全幅にわたって、一様な波高を示している。

6. 結 語

水槽の側壁反射を積極的に利用し、水槽の任意の位置に目標とする斜め規則波を造波する合理的な手法を開発した。さらに、多方向不規則波造波装置を用いた室内実験により、この手法の妥当性が検証された。今後は、本手法を多方向不規則波実験により検証するとともに、斜め

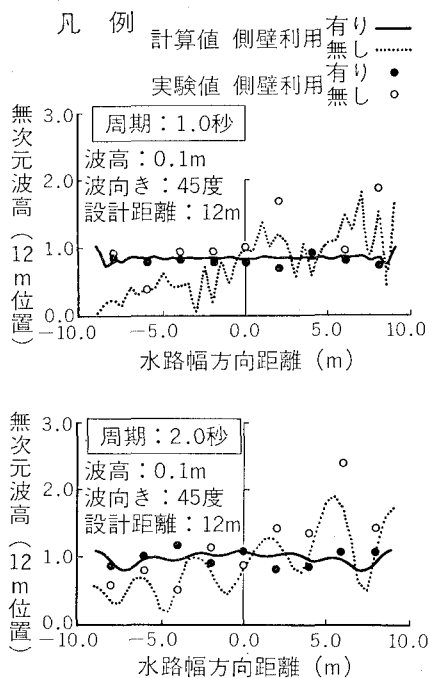


図-6 水槽幅方向波高分布

波の吸収制御についても研究を行って行く予定である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり東京大学工学部磯部雅彦助教授から種々の有益なご助言を賜りました。ここに、深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 今井貫爾・池谷 毅・岩瀬浩二 (1990): パネルセグメント型造波装置の造波特性, 鹿島建設技術研究所年報, 第38号, pp. 147-154.
- 今井貫爾・利糖吉彦・池谷 毅・吉原裕美 (1989): パネルセグメント型造波装置の構造と造波特性, 第44回土木学会年次学術講演会概要集 (第II部門), pp. 620-621.
- 高山知司・平石哲也・立石義博 (1989): 多方向不規則波の造波信号発生法に関する検討, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 153-157.
- Dalrymple, R. A. (1989): Directional wavemaker theory with sidewall reflection, Journal of Hydraulic Research, Vol. 27, No. 1, pp. 23-34.
- Funk, E. R. and Miles, M. D. (1987): Multi-directional wave generation with corner reflectors, Technical Report. TR-HY-021, NRC No. 28081, 17p., National Research Council Canada