



冬期の転倒予防を目指したスマートシューズの開発

- 歩行中の路面判別に向けた基礎的検討 -

Development of smart shoes aimed at preventing falls in winter

- Experimental Investigation for determining the road surface while walking -

泉谷論司¹, 昆恵介¹, 松崎博季¹, 三田村保¹

¹Satoshi IZUMIYA, ¹Keisuke KON, ¹Hiroki MATSUZAKI, ¹Tamotsu MITAMURA

¹北海道科学大学

¹Hokkaido University of Science

1. はじめに

近年, 日本は超高齢化社会に突入し, 高齢者の健康寿命の延伸が政策に挙げられている¹⁻²⁾. 高齢者を取り巻く環境には, 転倒によるケガの発生, その後の活動意欲の低下・寝たきり化などが挙げられ, これらを防止するための予防は非常に重要な課題と位置付けられている³⁻⁴⁾. しかしながら, 北海道に代表される積雪寒冷地では, 冬に雪が積もり, 融解と再凍結を繰り返すことで路面状況が悪化し, 非常に滑りやすい凍結路面等が発生しやすくなるため, 同地域では更なる転倒リスクの増加が問題視されている⁵⁻⁶⁾.

これまでに, 道路管理や車両の自動運転化に伴う路面計測技術が多く報告されているが⁷⁻⁸⁾, 高齢者(歩行者)が歩く際の歩道に着目した検討は非常に少ないのが現状である. また“滑りやすい路面がどこで発生しているか”が判明した後に, Web上やアプリ等で警戒を促す検討⁹⁾はされている一方で, これらの情報から直接的に歩行をアシストするような方法は未だなく, 生活スタイルが多様化する現在においては, 十分な検討がされているとは言えない.

そこで本研究は, 冬の歩行中の転倒予防を目指し, 歩行中の凍結路面の判別と靴底のスパイクピンをコントロール可能な冬式スマートシューズの開発に着手した¹⁰⁻¹¹⁾.

本発表では, この開発に向け製作したスマートシューズ(以下, プロトシューズ)が, 冬の歩行中に遭遇する乾燥・凍結路面の判別を可能とするかを明らかにすることを目的として行った, 冬期間の歩行実験で得られた結果を述べる.

2. 方法

2.1 対象者

計測は, 健康な成人男性3名(年齢: 23±1歳)に協力いただいた(対象者の情報は表1を参照). 若い人を対象とした理由は, 計測上で起こりうる歩行時の転倒や転倒後の健康リスクを考慮したためである. なお, 本研究は北海道科学大学倫理委員会の承認を得て行っており(承認番号186), 対象者の方々に事前に十分な説明をしてから同意を得て, 後述の計測を行った.

2.2 計測環境

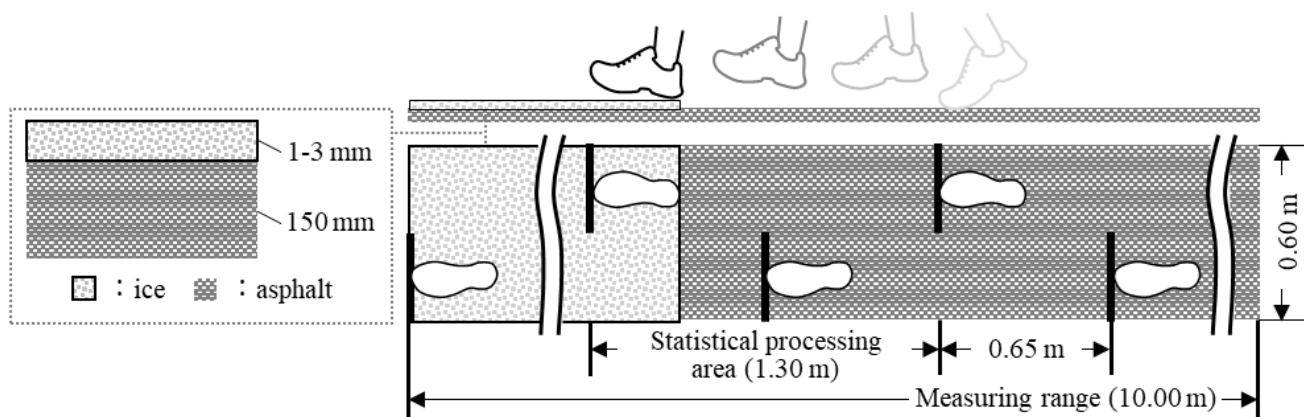
対象者が歩く歩行路は, 次ページの図1に示したとおりである. この歩行路の前半部分は, 乾燥した道(以下, 乾燥路面)であるが, 続く後半部分は冬期間に自然発生した雪及び凍結が見られる道(以下, 凍結路面)である.

表1 対象者情報¹⁰⁾

	Avg.	SD.
Age (y.)	23.0 ±	1.0
Height (cm)	171.3 ±	3.5
Weight (kg)	73.3 ±	12.7
Foot Length (cm)	25.3 ±	1.2
Foot Width (cm)	9.9 ±	0.6
Heel Width (cm)	6.2 ±	0.6

※出展: Satoshi. I: IJNTR. 2019

Table 1 Participant information より引用

図1 歩行路の設定と計測イメージ¹⁰⁾

※出展：Satoshi. I: IJNTR. 2019

Fig. 2 Configuration of walking path (road condition)より引用

歩行路の長さは約 10.00m とした。内訳としては、十分な歩きだしが出来るように約 3.00m の助走路を設け、計測区間として約 4.00m を確保し、さらに歩き終わりの際に十分な停止動作が出来るよう、約 3.00m を確保している。道幅については、対象者が平常時と同じ歩き方ができることを確認した約 0.60m を採用している。

歩行路の周囲環境は、付近に中規模施設の出入口があり、早朝や夕方には人の行き来が多くなる環境である。このため、計測は日没後の帰宅時間帯（18 時以降）に実施し、気温の低下と共に再凍結が起こりやすいタイミングで行った（計測時の外気温は約 -4°C 、湿度は 80% ※降雪直前のため湿度は高めであった）。

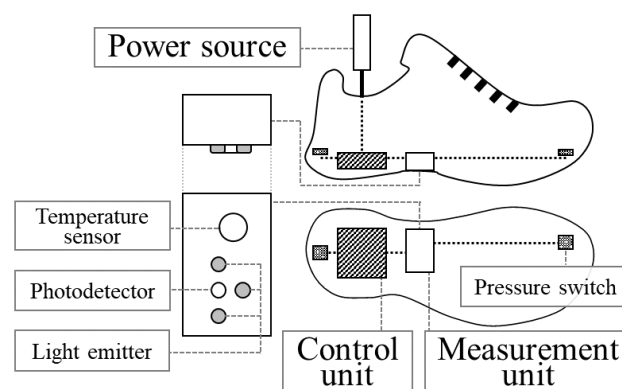
なお、歩行路の温度確認には、KYOWA 製の校正用温度計測器（EDX-10B & EDX-13A）を使用しており、後述するプロトシューズ内の温度センサとの比較に利用した。

2. 3 プロトシューズの構成

計測で使用したプロトシューズの構成を図 2 に示す。この靴は主に計測部 (Measurement Unit)、制御部 (Control Unit)、電源部 (Power Source) の 3 部構成からなる。

一つは、靴底に設けた窓（透過性の高いアクリル板）から路面の計測を行う計測部である。この内部には、滑りやすい道として認識されている凍結路面等に見られる、氷層・水膜に高吸収な波長（1450nm）¹²⁾に対応した LED（光源：光る部品）と PD（受光素子：光を受け取る部品）を組んでいる。また、路面温度を計測できるように、放射温度センサ（オムロン製）も組込んでおり、これらが計測した情報を下記の制御部へ送っている。

二つ目の制御部では、計測部が得た路面の情報（反射光量：照射した光が路面で反射して返ってきた量・路面温度等）を小型のマイクロコンピュータ（Arduino micro）で受け取り、記憶媒体（microSD カード）に転送・保存を行っ

図2 プロトシューズの内部の構成¹⁰⁾

※出展：Satoshi. I: IJNTR. 2019

Fig. 1 Device configuration より引用

ている。この制御部にプログラムを書き込むことで、計測部の各センサ等を制御することや、得たデータを処理することが可能である。

三つ目は、各部に電力供給する電源部である。本計測では、制御部の記憶媒体を取り出す必要があったために、靴内部の取り出しスペースの確保が求められた。このため、図 2 に示した構成のように、電源部を靴内部に入れずに取り外しが容易な下腿部側面（くるぶし周辺）にバンドで固定している。

上記の構成で開発したプロトシューズを対象者に装着し、計測した。

2. 4 計測の流れ

計測の流れは以下のとおりである。なお、対象者は事前に数回、歩行路上を試歩行し、十分に移動可能なことを確認している。

計測の初めに、プロトシューズを対象者に装着して電源を入れる。電源が起動した後は、制御部内でデータの処理

や保存をする準備時間が必要なため、予め設定した時間が経過するまで待機させる。経過後、対象者に歩行開始の合図を出し、歩行路上の移動を開始する。歩行路の追走路まで対象者が移動したことを確認後、プロトシューズの電源を停止する。

以上の流れを1 試行とし、各対象者で15 回ずつ計測を実施した(計45 試行)。なお、対象者への指示として、歩き始めは右足から開始するよう教示している。また、対象者間の歩行を可能な限り合わせるため、メトロノームを使用して歩行率 100steps/min.) を音でガイドし、計測を行った。

2. 5 取得したデータの処理

計測によって取得したデータは、靴内の取り外しが可能な記憶媒体 (MicroSD カード) にテキストデータ (.txt) として保存しているため、これを PC 上の表計算ソフト Excel (Microsoft 社, ver.2016) を使用して処理・解析した。

着目点は、得られたデータから乾燥・凍結路面を判別出来るかどうかである。このため、後述する結果には乾燥路面上のみを移動したケース (以下、乾燥条件) と、途中から凍結路面上を移動したケース (以下、凍結路面) の2 条件を記載する。また、もう一つの着目点として、取得データの路面温度は実際の凍結路面の温度を捉えているのかをとりあげた。

3. 結果

3. 1 取得光量の結果

計測で得た光量の結果を図 3 に示す (全対象者の平均データ)。このグラフは、乾燥条件、凍結条件で得られたデータを重ねたものである。縦軸は、取得光量に応じた制御部の出力値 (a.u. arbitrary unit) を示し、横軸は歩いているときの片側の靴のつま先が離れてから (0%~) 踵が一度着き (40%)、再び離れるまで (100%) の期間 (歩行周期) を 100% に正規化したものである。

図 3 の結果より、歩行周期の 20% 付近から取得した光量に異なる増加傾向が確認された。この傾向は 40~60% 付近まで続いた後に、徐々に減少傾向へと移行していった。

具体的には、乾燥条件のみ (Dry road) を見ると、取得光量は 20% から急激に増加傾向を示し、40~60% 頃にピークを迎える。その後、60~80% に急激な取得光量の減少傾向を示した後に、取得光量が殆ど得られなくなった。一方、凍結条件のみ (Frozen road) を見ると、取得光量は 20% から増加傾向を示すものの、乾燥条件ほどの増加は見られず、60% 付近でピークを迎えている。その後は乾燥条件と同様、100% に向かって徐々に取得光量の減少が確認された。

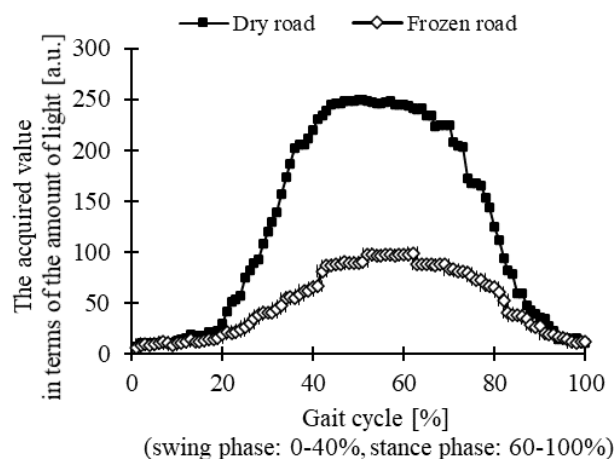


図 3 乾燥条件と凍結条件の取得光量の結果¹⁰⁾

※出展 : Satoshi. I. IJNTR. 2019

Fig. 3 Measurement result of reflected light より

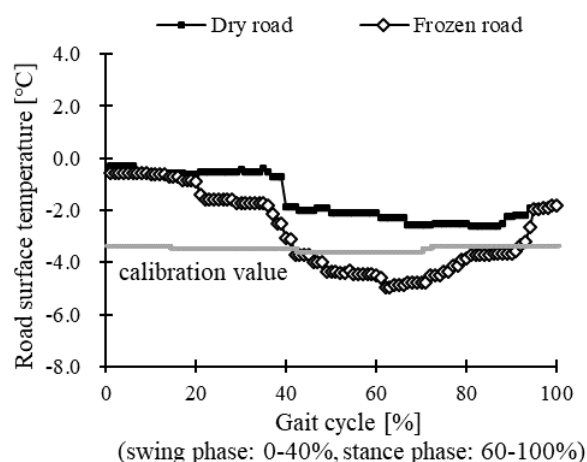


図 4 乾燥条件と凍結条件の路面温度¹⁰⁾

(校正値は凍結路面のみを示す)

※出展 : Satoshi. I. IJNTR. 2019

Fig. 4 Measurement result of road surface temperature より

3. 2 路面温度の結果

計測で得られた路面温度の結果を図 4 に示した (全対象者の平均データ)。“3.1 取得光量の結果”と同様、グラフは乾燥・凍結条件を重ねたものである。また、実際の凍結路面の温度を校正値としてグラフに示している。縦軸は路面の温度 (°C)、横軸は足が宙に浮いてから一度接地し、再び離れようとするまでの期間 (歩行周期) を 100% に正規化したものである。

図 4 の結果より、歩行周期の 20% 付近から各条件間に異なる傾向が確認された。この傾向は 40% 付近で顕著になり、80% あたりまで継続していた。

乾燥条件のみ (Dry road) に着目すると、取得した路面温度は 40% 付近まで一定の値を得ており、40% 以降もやや低温に移行したが、100% に至るまで大きな変動は見られな

かった。一方で、凍結条件のみ (Frozen road) を見ると、20%付近から取得した路面温度に低下が見られ、40%を境に急激な温度の低下が確認された。その後、60%あたりまで低下した後に80%付近で一定の温度を記録し、90%以降に取得温度の上昇が確認された。

4. 考察

4.1 取得光量が減衰する理由と判別への利用価値

図3に示した結果から、凍結条件の取得光量は乾燥条件ほど増加傾向を示さないことが分かった。この理由としては、靴～路面間の距離 (高さ) と靴内部のセンサの特性が影響したものと推察する。

図5に示したように、靴底の向きによっては、光の照射と反射、受光 (受け取り方) が変わってしまう。実際に図3の結果を見ても、靴が路面に近づく20%あたりから両条件とも取得光量が増加していることが分かる。また、靴底の殆どが路面に接地している期間 (50~80%) には、最大取得光量 (ピーク) が見られることから、靴底と路面間の距離 (計測距離) は、取得光量の増減に影響すると推察する。

しかしながら、凍結条件は乾燥条件ほどの増加傾向を示していない。この理由に、前述した靴内部のセンサの特性が影響したと考える。“2.3 プロトシューズの構成”でも述べたように、靴内部の計測部には、凍結路面に見られる氷層や水膜に高吸収なセンサを利用している。そのため、図6のように、同じ光を路面に当てても凍結路面等では氷層や水膜に光が吸収されることで、反射する光が減少し、靴が受け取る光量が減ってしまう。よって、結果のように条件間に異なる光量の増加傾向が見られたと推察した。

以上の点から、本研究のプロトシューズを装着した歩行中は、靴と路面間の距離によって取得光量に増減が見られると思われるが、凍結路面ではより取得光量に減少傾向が見られると予想される。よって、凍結路面で得られる最大取得光量を閾値として利用することで (例: 図3の60%付近の取得値)、閾値以上を乾燥路面、閾値以下を凍結路面として判別可能であると思われた (図7参照)。

4.2 歩行中の路面温度の計測

図4の結果から、歩いている最中であっても路面温度の計測が可能であることが確認された。計測では、実際に冬期間の屋外で計測したため、歩行及び氷点下の中での計測トラブルが予想されたが、結果を見ても各条件の路面温度に近い値を得られることが明らかとなり、歩行中の利用が可能であると思われた。よって、路面温度を使用する事で、取得光量だけでは判別が難しい屋内外の移動などに利用可能であると推察する。

なお、プロトシューズが得た凍結路面の温度が、実際の

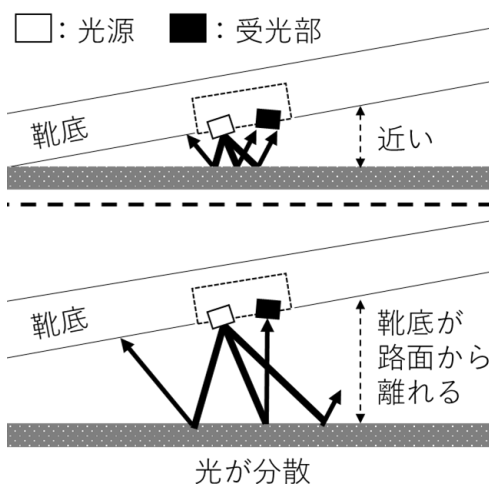


図5 計測距離が取得光量に影響するイメージ

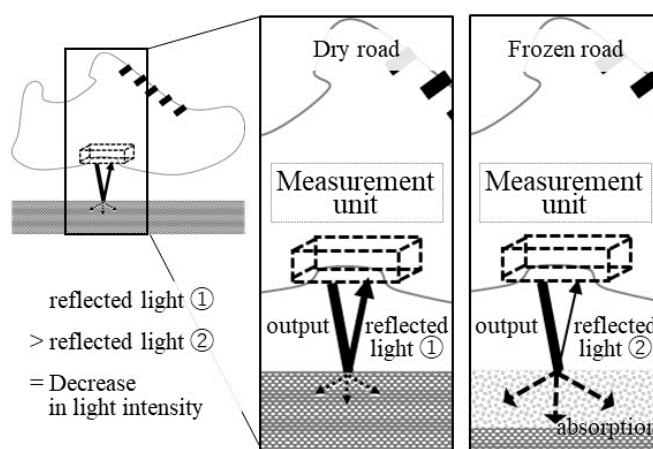


図6 凍結路面で取得光量が減少する原理イメージ¹⁰⁾

※出展: Satoshi. I: IJNTR. 2019

Fig. 5 Measurement result of reflected light より

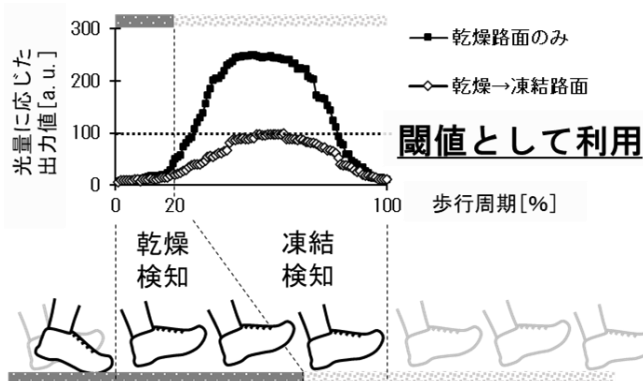


図7 閾値の設定 (判別の利用イメージ)

路面の温度 (校正値) に近い値を示すには、靴が接地する必要があると思われた (図4の40%付近に到達後、取得した路面温度は校正値に近い値を示しているため)。この点は、“いち早く次に踏む路面の状態を知ることが転倒対策の時間を稼げる”という本研究のコンセプトに関わるため、今後の課題と思われた。

5. まとめ

本研究は、冬の歩行中の転倒予防を目指し、歩行中の凍結路面の判別と靴底のスパイクピンをコントロール可能な冬式スマートシューズの研究に着手し、路面計測が可能なプロトシューズを開発した。本発表は、このプロトシューズが冬の歩行中に遭遇する乾燥・凍結路面の判別を可能とするかどうかを明らかにした。

実際に、冬期間の屋外に発生した乾燥・凍結路面上にて歩行計測を行った結果、条件間の取得光量に異なる傾向が確認されたため、判別への利用が可能であることが示唆された。また、歩行中に氷点下の路面温度も計測可能であることが明らかとなった。

以上のことから、開発したプロトシューズは、冬の歩行中に遭遇する乾燥・凍結路面の判別が可能であることが示唆された。

なお、課題として“より早い路面温度の計測”が必要と思われたため、今後は使用する部品の再検討と評価をしていきたいと考える。また、本発表の計測では、平均的な歩行を想定して条件を定め実施したものの、実際にはゆっくりと歩く人もいることが考えられ、歩行条件一つを取ってみても多様なケースが考えられる。このため、冬期間の歩き方のパターンから見たプロトシューズの評価をする必要があると思われた。

将来的な利用用途としては、歩道を中心とした道路管理における一指標としての価値があると思われ、また既に検討が進められている歩行者の位置情報と地図情報を組み合わせたリアルタイム型の“冬道ハザードマップ(図8参照)”のソースとしても、活用できると考えている。今後も更なる検討を進め、いち早く冬期間の転倒事故の減少に繋げていきたいと考える。

謝辞

本研究の計測に際し、協力いただいた対象者の皆様に心より感謝申し上げます。

文献

- 1) 内閣府 HP : 第 1 章 高齢化の状況 (第 1 節) . https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2018/html/gaiyou/s1_1.html [2020年10月26日]
- 2) 厚生労働省 HP : 政策レポート (介護予防) . <https://www.mhlw.go.jp/seisaku/2009/07/02.html> [2020年9月23日]
- 3) Murphy J, Isaacs B. : The post-fall syndrome A study of 36 elderly patients. *Gerontology*. 28. 265-270. 1982
- 4) Hunkyung K, Hideyo Y, Takao S, et al. : The Relationship between Fall-related Activity Restriction and Functional Fitness in Elderly Women. *The Japan Geriatrics Society*. 38.

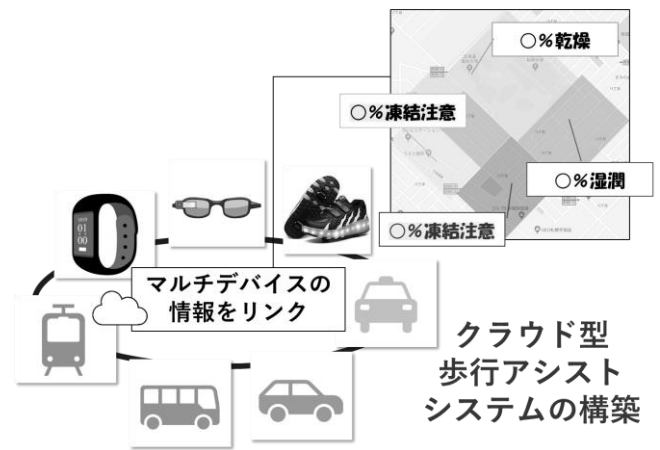


図8 冬式スマートシューズの活躍イメージ

805-811. 2001

- 5) ウィンターライフ推進協議会 : 札幌市の転倒事故の状況. <http://tsurutsuru.jp/toukei1.html> [2020年9月23日]
- 6) 札幌市 HP : 雪道の自己転倒・救急搬送. <https://www.city.sapporo.jp/shobo/kyukyu/yukimiti/yukimiti.html> [2020年9月23日]
- 7) Naoto T, Roberto T, Motoki A, et al. : A Practical Study on Sophistication of Winter Road Management. *Committee of Infrastructure Planning and Management*. 26. 901-911. 2009
- 8) 久保和幸, 藪雅行, 寺田剛 : 雪氷路面の分類方法に関する試験調査. 国立研究開発法人土木研究所 土木研究所成果報告書. 1-10. 2006
- 9) Naoto T, Roberto T, Motoki A, et al. : A Practical Study on Sophistication of Winter Road Management. *Committee of Infrastructure Planning and Management*. 26. 901-911. 2009
- 10) Satoshi I, Keisuke K, Hiroki M, et al. : Development of A Road Surface Discrimination Device for Preventing Falls during Winter Walking - Built-In to Shoes and Verification on Frozen Surfaces -. *International Journal of New Technology and Research*. 5. 57-61. 2019
- 11) Satoshi I, Keisuke K, Tamotsu M, et al. : Development of a shoe with a built-in road surface discrimination device for prevention of falls in winter - Examination on a simulated winter road -. *Bulletin of the Japanese Society of Prosthetics and Orthotics*. 36. 41-47. 2020
- 12) Toshiro N, Hajime N, Kazuhiko S, Osamu M. : Development of Road Surface Condition Detection System using Near-infrared Light - Absorption and Polarization Characteristics of Water. *The Society of Instrument and Control Engineers*. 46. 12. 746-753. 2010