

透過堤を用いた現地港湾における長周期波対策

Countermeasure using Permeable Breakwater for Long Period Waves in a Harbor

平石哲也¹・平山克也²・原崎恵太郎³・永瀬恭一⁴・押村嘉人⁵

Tetsuya HIRAISHI, Katsuya HIRAYAMA, Keitaro HARASAKI,
Yoyoichi NAGASE and Yoshihito OSHIMURA

Large horizontal motion of moored large vessels and breaks of mooring ropes are mainly induced by long period waves traveling into harbor. One of the most popular countermeasures is the construction of breakwaters. Meanwhile they say the construction of hard breakwater may disturb the seawater exchange between the outside and inside of a harbor. A permeable breakwater becomes suitable if it becomes effective to reduce the long period wave in the harbor. An experiment studying the wave transmission coefficient in the permeable breakwater for long swells and a numerical simulation estimating that in long period waves is carried out in this paper. The harbor tranquility for long period waves in the target port increases when the long period wave transmission coefficient becomes about 0.1 to 0.4.

1. はじめに

周期 30 s ~ 300 s を有する長周期波が, 台風や低気圧の接近時に, 太平洋や日本海に面する港湾に伝播すると, 港内で係留船舶の動揺が引き起こされ, 荷役障害が各地で生じることがある. 長周期波対策の一つとして, 港内での多重反射抑止とともに, 防波堤の新設, 延伸等が提案されている (沿岸技術研究センター, 2004). しかし, 防波堤等で港湾の遮蔽効果を高めることは, 一方で港湾を閉鎖することになり, 海水交換が妨げられ, 水質の悪化や養殖施設への影響が生じることが懸念されており, 海水交換を阻害しないように透過堤を設置して, 長周期波の対策を図る必要が生じている.

これまで透過堤は長周期波に対しては効果がないと考えられ, 周期 30 s 以上の波に対する透過率等の特性は検討されてこなかった. たとえば, 石積み堤の透過率計算式 (近藤・竹田, 1983) では, 周期 T が 30 s 以上では, 計算値は 0.9 に漸近するのみである. スリットを有する透過堤の実験 (松本ら, 1976) でも 40 s 以上の周期帯は対象周期を外れている. そこで, 本研究では, まず代表的な透過堤として (a) 碎石による捨石堤および (b) 円形の通水孔を設けた有孔型ケーソン堤を対象として, 長周期波に対する透過率と反射率を模型実験と数値計算で調べることを目的とした. 次に, 透過堤を設置した場合のモデル港湾での長周期波静穏度を計算し, 静穏度を確保できる最適透過率を求め, 対応できる透過堤構造について堤幅や空隙率について考察を行う.

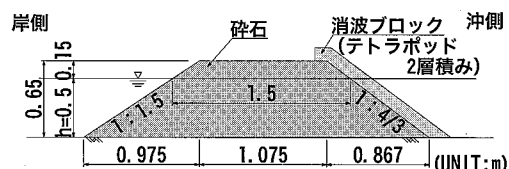
2. 対象とした透過堤構造

(1) 透過堤の模型

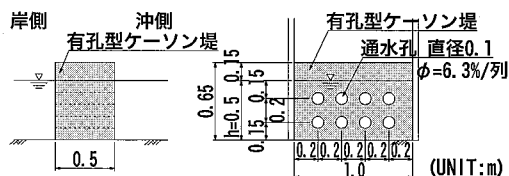
図-1 に対象とした (a) 捨石堤および (b) 通水孔付きケーソン堤の模型断面を示す. 捨石堤は, 現地で代表粒径 40 cm の碎石層で構成される緩傾斜堤で, 静水面上の幅 B を現地で 20 m および 30 m とした. ケーソン堤は, 幅 B を 10 m とし, 直径 1 m の円形の通水孔を上・下 2 列に分けて複数個設け, 水面下のケーソン断面積に対する通水孔断面積を空隙率 (ϕ) と定義し, $\phi=6.3$ および 12.6 % とした.

(2) 実験条件

実験は, 長さ 60 m の水路で, 縮尺 1/20 で現地換算



(a) 碎石による捨石堤の断面 (水面を横切る幅を, 堤体の幅 B とする) (数値は模型サイズ)



(b) 有孔型ケーソン堤の断面図と正面図 (堤体幅は 10m で一定とし, 空隙率 $\phi=6.3\%$ のときは上段か下段列を開放し, $\phi=12.6\%$ のときは上下段すべてを開放する)

図-1 対象とした透過堤の模型

1 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部
2 正会員 博(工) 内閣府政策統括官付参事官補佐
3 正会員 工修 (株)エコー 沿岸デザイン本部
4 正会員 博(工) (株)フジタ 技術センター
5 正会員 (株)フジタ 技術センター

周期 $T=8, 12, 20$ s のうねりと $T=45$ s の長周期波を規則波として作用させ、2種類の透過堤について、波の反射率および透過率を測定した。実験では、造波装置の性能から水路で造波できる周期に限られる。船体動揺に影響を与える長周期波の周期は45 s より長い場合（沿岸技術研究センター，2004）が多く、より長い周期に対する検討が必要と考えられる。そこで、45 s までを検証として実験で調べ、それ以上の周期帯は計算のみで推定することにした。

図-2 に捨石堤を例として、容量式波高計の配置を示す。沖側の ch2 および ch3 は、入反射波分離推定法（合田ら，1976）で沖側入射波高を求めるために用いた。防波堤沖側の ch4 および ch5 でも入反射波分離推定法で、防波堤に作用する入射波および反射波を求めた。防波堤岸側の ch6 および ch7 においては透過波と水槽端からの反射波を解析した。防波堤の反射率 K_r および透過率 K_t は、それぞれ（防波堤沖側での反射波高 / 入射波高）および（防波堤岸側での透過波高 / 防波堤沖側での入射波高）として求めた。表-1 に実験条件を整理した。

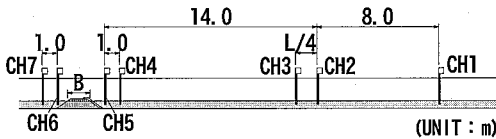


図-2 水槽における模型および波高計の配置

表-1 実験の条件

実験ケース	現地諸元				模型諸元			
	周期 T (s)				周期 T (s)			
捨て石堤 $B=20$ m	8.0	12.0	30.0	45.0	1.8	2.7	6.7	10.0
捨て石堤 $B=30$ m	8.0	12.0	30.0	45.0	1.8	2.7	6.7	10.0
ケーソン堤 空隙率 6.3%(下段)	8.0	12.0	30.0	45.0	1.8	2.7	6.7	10.0
ケーソン堤 空隙率 6.3%(上段)	8.0	12.0	30.0	45.0	1.8	2.7	6.7	10.0
ケーソン堤 空隙率 12.6%	8.0	12.0	30.0	45.0	1.8	2.7	6.7	10.0

3. 実験および数値解析の結果

(1) 数値解析手法

実験周期より長い長周期波の透過率および反射率を推定するために用いた数値解析手法は、3次元で水-空気混相を対象として波面解析が可能な MARS (Multi-Advection Reconstruction Solver) 法である。この手法は、これまでに長周期波対策護岸の性能検証で活用し（平石，2005），津波や高潮の臨海部への氾濫解析では、模型実験や現地痕跡高との検証を行った（Hiraishi and Yasuda，

2006）。本計算の捨て石堤においては、砂礫層内の圧力損失を次式で示す Dupuit-Forchheimer 則で計算した。

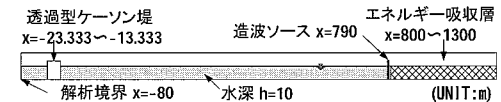
$$\frac{\Delta h}{l} = \frac{u}{g} (\alpha + \beta |u|) \quad (1)$$

$$\alpha = \alpha_0 \frac{(1-\lambda)^2}{\lambda^3} \frac{v}{d_0^2} \quad (2)$$

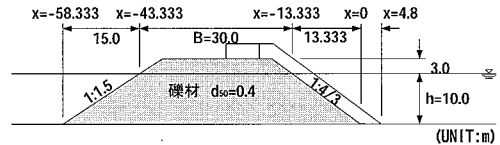
$$\beta = \beta_0 \frac{(1-\lambda)}{\lambda^3} \frac{1}{d_0} \quad (3)$$

ここで、 $\Delta h/l$ ：圧力損失水頭、 u ：層内流速、 λ ：透過層の空隙率、 d_0 ：中央粒径、 g ：重力加速度、 v ：動粘性係数、 α_0 および β_0 ：材料で決まる係数である。Dupuit-Forchheimer 則の係数については、捨て石堤表層のテトラポッドに関しては、近藤・竹田（1983）を参考に乱積の値として $\alpha_0=2100$ 、 $\beta_0=2.2$ とした。また、テトラポッドのカタログデータより $\lambda=0.5$ とし、代表径は体積 V より代表径を $\sqrt[3]{V}$ として算出した。捨て石材の α_0 、 β_0 ならびに砂礫層の空隙率 (λ) は、 $\alpha_0=2400$ 、 $\beta_0=3.6$ 、 $\lambda=0.40$ とした（平石（2005））。数値計算では、実験周期に加えて $T=60$ および 100 s を計算した。規則波の波高 H は 1 m で一定とした。

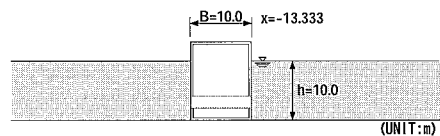
図-3 は、数値解析に用いた水路および透過堤の模式で、岸沖方向では、外洋部分で 2 m、構造物周辺は 1 m、鉛直ならびに横断方向は $12 \sim 25$ cm である。実験では透過堤前面と直背後の水位差は、両者を繋いだ管路の自然流下で調整していたが、計算では別途管路を設けることが困難であり、計算中に透過堤背後の水位が高くなる場合があった。特に、有孔型ケーソン堤で周期が長くなると、背後の水位が高くなるために計算が不安定になった。不安定になったケースでは、1.5 倍程度に背後の解析境界を延長して、できるだけ水位差が生じないように工夫した。



(a) 計算領域の全体図



(b) 捨て石堤の計算モデル



(c) 有孔ケーソン堤の計算モデル

図-3 数値計算での対象地形と透過堤の模式

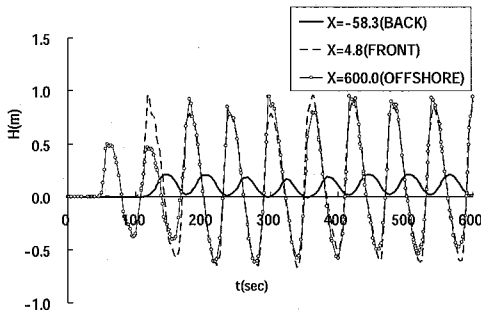
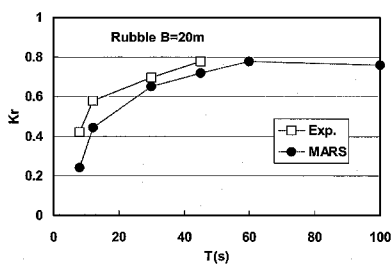


図-4 数値計算で得た波形の例(捨て石堤 ($B=30\text{m}$), $T=60\text{s}$)
(透過堤前面(FRONT), 直背後(BACK)および沖波(OFFSHORE)
での波形を示す)

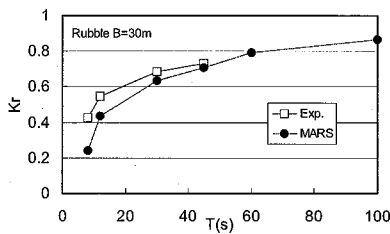
図-4 は、数値解析で得た代表点の波形である。実験の手法と同様に、波高計配置点と一致する計算点での波形から入射反射分離計算を行い、 K_r および K_t 推定した。

(2) 実験および数値計算結果の比較

実験で求めた各種透過堤の K_r および K_t さらに数値計算で得た同様の結果をまとめて示す。図-5 に捨て石堤の反射率に関する実験値 (Exp) と計算値 (MARS) の比較を示す。図-6 は、有孔型ケーソン堤の反射率について実験結果と計算結果を比較したものである。捨て石堤に関しては、奥行き $B=30\text{m}$, 20m とともに $T=8$ から 30s の短周期の部分で解析値が小さい傾向がみられるが、両者はよく対応していることがわかる。透過型ケーソン堤では開口率 $\phi=6.3\%$ の場合には、周期 $T=30\text{s}$ において実験値より反射率が低くなっているが、そのほかの場合には良好な一致が見られる。開口率 $\phi=12.6\%$ の

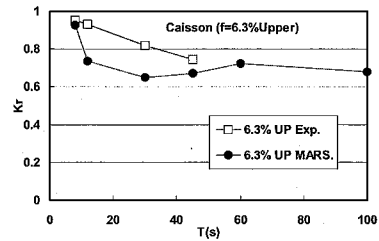


(a) 堤幅 $B=20\text{m}$

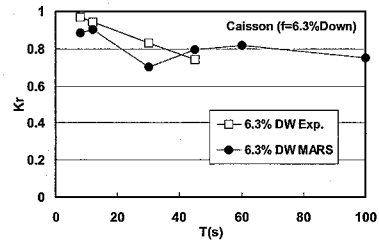


(b) 堤幅 $B=30\text{m}$

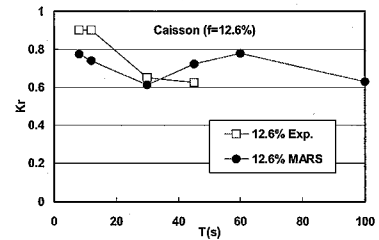
図-5 捨て石堤の反射率



(a) 上段開放



(b) 下段開放



(c) 上下段開放

図-6 有孔型ケーソン堤の反射率

場合には、周期 $T=45\text{s}$ 以下で、両者とも $K_r=0.6 \sim 0.9$ の反射率となっている。 $T=100\text{s}$ の長周期波では $K_r=0.63$ まで低下している。

次に透過率を比較して示す。図-7 および図-8 に解析ケース毎に示す。捨て石堤に関しては、奥行き $B=30\text{m}$, 20m とともにすべての周期で、解析値がやや小さい傾向がみられる。しかし、周期が長くなると透過率が大きくなる様子はよく再現されており、数値解析モデルの精度は高い。透過型ケーソン堤では、周期 $T=8\text{s}$ の場合に良好に一致しているが、そのほかのケースでは、空隙率によって一致度が異なる。そこで、計算波形を観察すると、計算初期には波が透過しているが、計算時間が経過すると背後域の水位が上昇して波が透過しにくくなるケースが現れた。この場合には、共振が見られた場合も含めて、前述したように背後水域を長くして波高解析を行った。結果を見ると、上下ともに通水孔を有する場合や、下段のみに通水孔を有する場合には、ほぼ実験値の変化傾向と一致し、数値解析結果から長周期波の透過率を推定できる。通水孔が上段にある場合には、周期が長くなると透過率が小さくなるが、これは透過した海水により、ケーソン背後の水域の平均水位

が上昇し、それによる変動水圧が上方の通水孔からの海水侵入を妨げるためと考えられる。

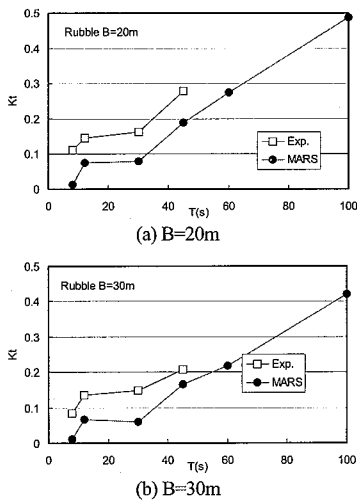


図-7 捨石堤における透過率の比較

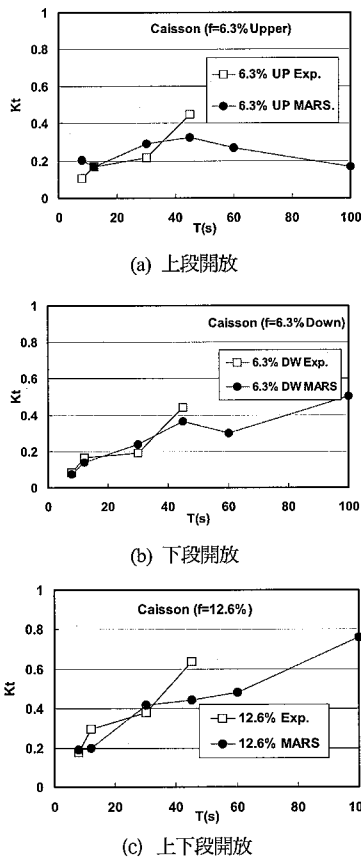


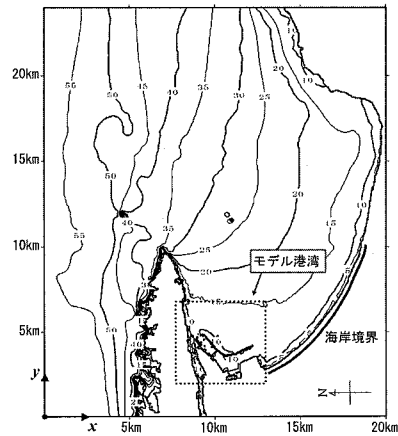
図-8 有孔型ケーソン堤の透過率の比較

4. モデル港湾の長周期波対策

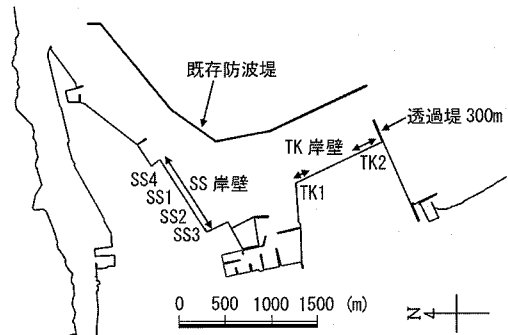
(1) 静穏度の計算法

図-9に対象とした港湾地形および透過堤を設置する位置を示す。図中の岸壁SS1～SS4およびTK1, TK2における長周期波荷役稼働率を、荷役許容波高を15cmとしてブシネスク型の非線形波浪計算法(平山, 2002)で計算した。沖波風波の条件および頻度分布は、類似地形を持つ現地港湾での観測値から求めた。風波の波高および周期から長周期波標準スペクトル形(沿岸技術研究センター, 2004)を求め、モデル港湾沖の長周期波の出現頻度分布とした。なお、透過堤に相当する格子境界では、波のエネルギーを吸収するスポンジ層を設けて、スポンジ層内のエネルギー吸収強度を変化させて、透過率を再現した。ただし、エネルギー吸収強度と透過率の関係は波周期によって変化するので、あらかじめ仮想水路での試験計算で両者の関係を求めておき、目標とする透過率に応じて適切なエネルギー吸収強度を用いた。

図-10にエネルギー吸収強度と2次元水路での透過率の関係を示す。計算では、格子幅 $\Delta s=50\text{m}$ 、防波堤設置位置の水深10mとした。図には周期30, 60および



(1) モデル港湾の周辺地形と計算領域



(2) 透過堤計画位置

図-9 モデル港湾の位置と港形

100 sにおいて透過率とエネルギー吸収強度を示している。本計算法では計算領域にスポンジ層を挿入して反射率の調整を行っている。ここでは、スポンジ層でのエネルギー吸収式として、次式を用いている。

$$\sigma(x) = \frac{r\sigma_m}{2(\sinh r - r)} \left[\cosh\left(\frac{rx}{F}\right) - 1 \right] \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 F : 吸収帯の幅 (風波の場合は2~3波長)、吸収層の強度 $\sigma_m = \theta\sqrt{g/h}$ (通常 $\theta=1$)、 $r=3$ である。エネルギー吸収層は境界で反射波が生じることを防ぐために設置されるが、本研究では、計算領域の中に設置して透過壁を評価する。長周期波を対象としているので、吸収層の幅 F を波長程度にはできない。そこで、一つの計算格子の幅で F を表し、エネルギー吸収係数 $\sigma(x)$ を大きくすることによって透過率を変化させた。以下にエネルギー吸収係数として示しているものは $\sigma(x)$ の値である。図-10に示すように、周期が短く、格子幅が相対的に広い場合には、非線形波浪方程式中の分散項の数値誤差が顕著になり、エネルギー吸収係数が0の場合でも透過率が小さくなる。しかし、現地での長周期波の周期範囲である $T=60 \sim 100$ sでは、エネルギー吸収係数を変化させることによって、透過率を0~1.0まで設定することができ、本計算でも活用できた。

(2) 静穏度の計算結果と最適透過率

図-11は、対象岸壁での荷役稼働率の計算結果で、横軸に透過率、縦軸に荷役稼働率を示した。 $K_t=1.0$ の場合には対策をしていないので、荷役稼働率はいずれの岸壁でも低い。 K_t が1.0から低下する、すなわち防波堤を不透過にするほど、港内の荷役稼働率は上昇し、対策の効果が上がることが判る。ただし、 $K_t=0$ すなわち完全に不透過な防波堤を設置すると荷役稼働率は低下する。これは、港内での多重反射が生じて、岸壁全面の長周期波高が大きくなるためである。最も荷役稼働率が向上するのは $K_t=0.1 \sim 0.4$ のときで、最適な透過率を有する透過堤を設置することにより荷役稼働率も最適にするこ

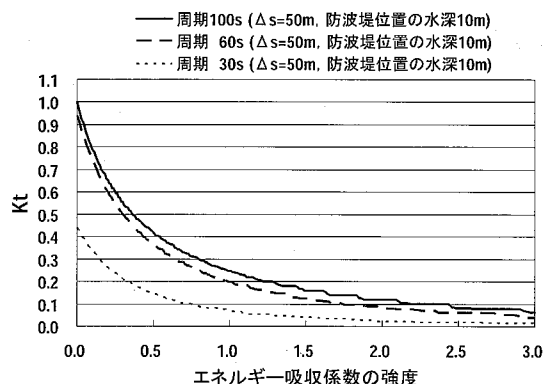


図-10 エネルギー吸収強度と2次元水路での透過率の関係

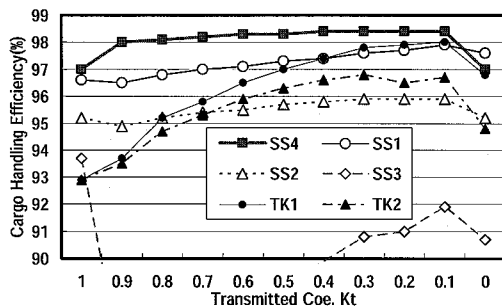


図-11 周期100sの長周期波による対象岸壁での荷役稼働率 (横軸: 透過率, 縦軸: 荷役稼働率, 凡例は岸壁位置)

とができる。SS3岸壁で荷役稼働率が90%以下になるのは、岸壁が隅角部に位置し、反射波が収斂するためである。

最適透過率が設定できれば、前章の考察から、捨石堤を採用した場合の堤幅 B 、あるいはケーソン堤の空隙率 (ϕ) を決定でき、構造を決めることができる。捨石堤とケーソン堤の選択は、施工費と施工性からなされる。

5. まとめ

本研究では、透過堤の実験から、捨石堤の場合には、周期45s以下での計算値と実験値はよく一致し、有孔型ケーソン堤でも、両者はほぼ一致した。したがって数値解析法の妥当性が検証でき、実験範囲より長い周期では数値解析で透過率を評価できた。さらにモデル港湾での荷役稼働率を計算し、適切な透過率を有する透過堤の設置が港内の荷役稼働率向上にも有益になることが判った。現地の設計では、最適透過率を確保できるように、捨石堤の幅あるいはケーソン堤の空隙率を求めればよい。

参考文献

- 沿岸技術研究センター(2004): 港内長周期波影響評価マニュアル, 沿岸開発技術ライブラリー No. 21, 86p.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池治(1976): 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No. 248, 24p.
- 近藤俊郎・竹田英章(1983): 消波構造物, 森北出版, pp. 110-111.
- 平石哲也(2005): 長周期波対策護岸の最適化に関する検討, 港湾空港技術研究所報告, 第44巻, 第1号, pp. 23-41.
- 平山克也(2002): 非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究, 港湾空港技術研究所資料, No. 1036, 162p.
- 松本輝寿・永井康平・武智雅敏(1976): 直立消波透過型防波堤の波浪および通水特性に関する実験的研究, 第23回海岸工学講演会講演集, pp. 112-116.
- Hiraishi T. and T. Yauda (2006): Numerical simulation of tsunami inundation in urban areas, Journal of Disaster Research, Vol. 1, No. 1, pp. 148-156.