

2011年東北地方太平洋沖地震津波によるクロマツ海岸林被害の 数値シミュレーションを用いた検討

—青森県三沢市の事例—

野口宏典^{1*}・佐藤創²・鳥田宏行³・真坂一彦³・阿部友幸³・木村公樹⁴・坂本知己¹

Numerical simulation of effect of inundation flow caused by the 2011 Tohoku earthquake tsunami on the *Pinus thunbergii* coastal forest

- A case study of Misawa City of the Aomori Prefecture -

Hironori Noguchi^{1*}, Hajime Sato², Hiroyuki Torita³, Kazuhiko Masaka³, Tomoyuki Abe³,
Kouki Kimura⁴ and Tomoki Sakamoto¹

Abstract: The *Pinus thunbergii* coastal forest in Misawa City of the Aomori Prefecture was partially damaged by the 2011 earthquake tsunami, which occurred off the Pacific coast of Tohoku. Using the numerical simulation of the inundation flow caused by the tsunami, we investigated the cause of the partial damage and the mitigation of the inundation flow by the coastal forest. The results of the numerical simulation showed that the maximum inundation depth and maximum discharge flux at the inland edge of the coastal forest were reduced by the coastal forest, and the tree damage index, which was calculated as the ratio of the turning moment to the section modulus at the stem base, accounted for the approximate distribution of the damage to the coastal forest.

1 はじめに

海岸林は津波氾濫流を弱めるなどして津波災害を軽減する効果をもたらすことは古くから知られてきた(例えば, 首藤, 1985)。海岸林のこの効果は, 2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う津波が東日本の太平洋沿岸地域に広範囲に渡って大きな被害をもたらして以降, 改めて注目されている。

近年, 海岸林の津波減衰効果に対する研究手法として, 津波氾濫流の数値シミュレーションが用いられ発展してきた(例えば, 原田ら, 2000)。数値シミュレーションは, 海岸林の密度や樹高等の状態が異なる場合の津波氾濫流への影響の予測を行なうことができるため, 海岸林を整備・管理する上で非常に有用な手法となり得る。しかし, 数値シミュレーションの発展してきた近年は2011年の大津波まで日本国内では海岸林帯を越えて来るような津波は発生していなかった。このことから, 2011年3月の大津波に

対して, 海岸林はどれだけ氾濫流を弱める効果をもたらしたのか, また, 海岸林自体が津波の氾濫流を受けてどのように被害を受けたのかを数値シミュレーションを用いて検討しておくことは, 海岸林を復旧・整備していく上で有用なことだと考えられる。

そこで本研究では, 海岸林が津波氾濫流を弱める効果を数値的に明らかにすること, および, 津波氾濫流による樹木被害の要因を明らかにすることを目的とした。これらの目的のためには, 津波氾濫流により部分的に被害を受けた海岸林が適しているものと考え, 2011年3月の東北地方太平洋沖地震津波の氾濫流が林帯を越えて内陸まで遡上したが, 樹木の被害は海側林縁から林帯の途中までの部分的なものであった海岸林を対象に, 海岸林を遡上する津波氾濫流の数値シミュレーションを行ない, 海岸林の有無による津波氾濫流の様子の差異や, 樹木の曲げモーメントをもとに樹木の被害分布について検討した。

2 方法

2.1 対象地

青森県三沢市織笠のクロマツ海岸林では, 2011年3月11日の津波の氾濫流が海岸林帯を通り抜け, 内陸側の住宅地まで到達した。この津波氾濫流によって, 海側林縁から海岸林帯の途中までの範囲の樹木に幹折れ, 根返り, 傾き等の被害が発生した。佐藤ら(2012)は海側林縁から内陸側林縁までに渡って設定した長さ270 m, 幅2 mの带状区内のクロマツの樹高, 胸高直径, 被害状況等の調査を2011年8月に行なった。その結果, 海側林縁から内陸側に向かって約100 mの範囲に被害は集中しており, 带状区を汀線からの距離で10 m毎に区切った区画毎に計算した本数被害率は明瞭に変化していた(図1, 図2c)。被害形態は, 傾きが最も多く大部分を占め, 次いで幹折れ, 根返りの順であった。また, クロマツの樹高, 枝下高, 胸高直径(ともに, 带状区を汀線からの距離で

¹ (独) 森林総合研究所

For. and Forest Prod. Res. Inst., 1 Matsunosato, Tsukuba, 305-8687 Japan

² (地独) 道総研 林業試験場 道南支場

Donan Station, For. Res. Inst., Hokkaido Research Organization, 372-2 Kikyo, Hakodate, 041-0801 Japan

³ (地独) 道総研 林業試験場

For. Res. Inst., Hokkaido Research Organization, Koshunai, Bibai, 079-0198 Japan

⁴ (地独) 青森県産業技術センター 林業研究所

For. and Forest Prod. Res. Inst., Aomori Prefectural Industrial Technology Research Center, 46-56 Shinmichi, Kominato, Hiranai, Aomori, 039-3321 Japan

*Corresponding author: noguh@ffpri.affrc.go.jp



図1：被害の有無が明瞭に分かれた箇所

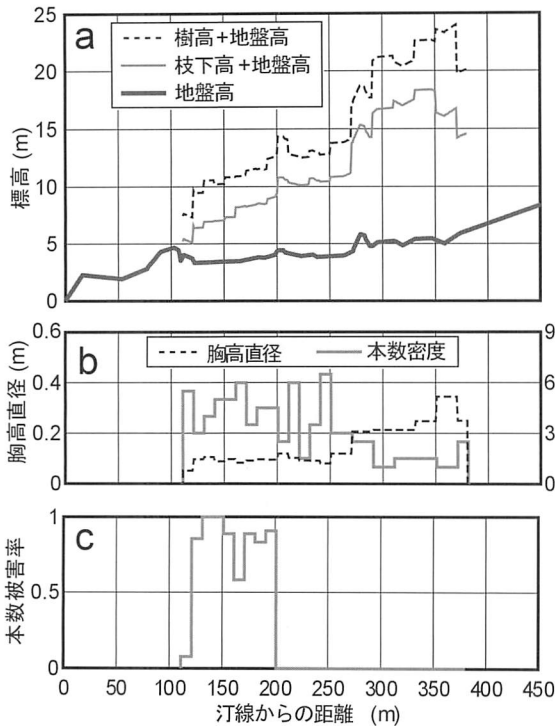


図2：地盤高，樹高，枝下高 (a)，胸高直径，本数密度 (b)，本数被害率 (c) の分布

樹高，枝下高，胸高直径，本数密度，本数被害率は，带状区を汀線からの距離で10 m毎に区切った区画の平均値を表示している。

10 m 毎に区切った区画毎の平均値) はともに内陸側に行くとき大きくなる傾向があり，带状区を汀線からの距離で 10 m 毎に区切った区画毎に計算した本数密度は内陸側で小さくなる傾向があった(図2a, b)。

2.2 津波氾濫流の数値シミュレーション

2.2.1 シミュレーションモデル

津波氾濫流の数値シミュレーションの支配方程式には，連続式(式(1))と運動方程式(式(2))からなる浅水方程式を用いた。運動方程式には，原田ら(2000)と同様に樹木による流体力項を付加し，津波氾濫流に対する海岸林の抵抗を表現した。

$$\frac{\partial(\eta+h)}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ = - \frac{gn^2}{D^{7/3}} M |M| - F / \rho \end{aligned} \quad (2)$$

ここで， η ：水面と静水面の差 (m)， h ：静水面までの水深 (m)， M ：単位幅当たりの流量 (m^2/s)， D ：水面から底面までの距離 (m)， g ：重力加速度 (m/s^2)， n ：Manning の粗度係数， F ：単位土地面積あたりの樹木への流体力 (N/m^2)， ρ ：水の密度 (kg/m^3)，を表す。Manning の粗度係数は 0.025 とした(原田・今村, 2003)。樹木による流体力は慣性力と抗力からなる次式で表すことができる。

$$F / \rho = C_M \frac{V_t}{V} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{1}{2} C_D A_t \frac{M |M|}{D^2} \quad (3)$$

ここで， C_M ：慣性力係数， V ：単位土地面積に存在する水の体積 (m^3/m^2)， V_t ：単位土地面積に存在する浸水した樹木の体積 (m^3/m^2)， M ：線流量 ($\text{m}^3/\text{sec}/\text{m}$)， C_D ：抗力係数， A_t ：単位土地面積に存在する浸水した樹木の流れ方向への投影面積 (m^2/m^2) を表す。式

(3) の慣性力係数には原田・今村(2003)が算定した 1.7 を用い，抗力係数は野口ら(2012)の実物クロマツを用いた実験結果から，幹が 0.85，枝が 0.81，葉が 0.056 とした。幹，枝，葉それぞれの抗力係数を用いるため，抗力項(式(3)の右辺第2項)を次式のようにした。

$$\begin{aligned} \frac{F_D}{\rho} = \frac{1}{2} (C_{DS} A_{HS} + C_{DB} A_{HB} \\ + C_{DL} A_{HL}) \frac{M |M|}{D^2} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで， F_D ：単位土地面積あたりの樹木の抗力 (N/m^2)， C_{DS} ， C_{DB} ， C_{DL} ：幹，枝，葉の抗力係数， A_{HS} ， A_{HB} ， A_{HL} ：単位土地面積に存在する浸水した幹，枝，葉の投影面積 (m^2/m^2) を表す。

浅水方程式は staggered leap-frog 差分法により解くこととし，汀線に直交する方向の計算格子間隔は 1.0 m，時間間隔は 0.02 秒として計算を行った。計算の際の地形は，陸上は測量結果(図1a)にもとづ

いて設定し、海底は汀線から 20000 m 沖までは勾配 1/200, 20000 m より沖側は深さ 100 m で一定として設定した。津波の入力は、汀線から 20000 m 沖から沖側を正弦波の形に半周期分隆起させることにより与えた。正弦波の波長は、最寄りの検潮所である八戸での 2011 年 3 月 11 日の潮位観測記録 (気象庁提供) から、津波が汀線に到達してから汀線の水位が元に戻るまでの時間が 15 分程度になるように調整した。正弦波の振幅は、内陸側林縁での浸水高が実際の浸水の痕跡と高さともうように調整した。

海岸林の樹木被害の要因を検討するために、津波氾濫流の数値シミュレーションの結果を用いて、樹木の根元が受ける曲げモーメントの計算を次式によって行なうこととした。

$$M_0(x) = \int_0^D F(x, z) z dz \quad (5)$$

ここで、 x : 汀線からの距離 (m), $M_0(x)$: 汀線からの距離 x のクロマツ樹幹の根元にかかる曲げモーメント (Nm), z : 地盤高からの高さ (m), D : 水深 (m), $F(x, z)$: 汀線からの距離 x (m) に位置する樹木の地盤高からの高さ z (m) の部分にかかる流体力 (N) を表わす。

2.2.2 クロマツの投影面積

野口ら (2008) の海岸林でのクロマツ枝葉の空間分布の測定結果から、クロマツ 1 本あたりの枝と葉それぞれの水平方向への投影面積を算出し、枝下高直径と投影面積の関係をべき乗式で近似した (図 3)。

$$A = a d_c^b \quad (6)$$

ここで、 A : クロマツ 1 本あたりの枝または葉の投影面積 ($m^2/本$), d_c : クロマツ幹の枝下高での直径 (m), a, b : べき乗式の係数を表わす。

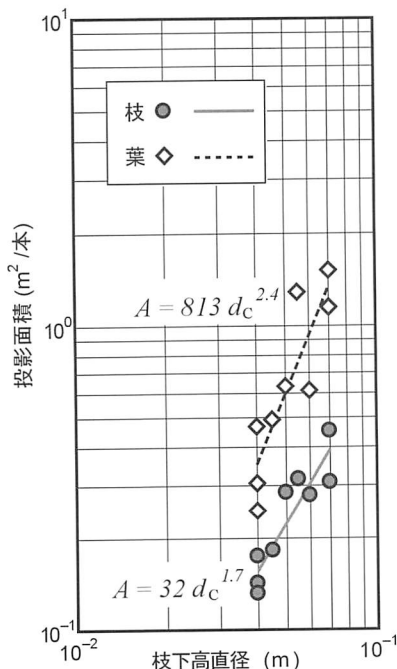


図3: クロマツの枝と葉の投影面積と枝下高直径との関係

式 (6) に、対象地とする海岸林の海側林縁から内陸側林縁までに渡って設定した長さ 270 m, 幅 2 m の帯状区内のクロマツを測定した結果 (佐藤ら, 2012) を用いることにより、クロマツ 1 本あたりの枝、葉の投影面積を推定し、その値を樹冠長で除することにより鉛直分布の推定を行なった。枝下高の直径には胸高直径と高さの一次式により推定した値を用いた。推定投影面積の鉛直分布は、帯状区を汀線からの距離で 10 m 毎に区切った区画毎に推定し、津波氾濫流の数値シミュレーションに用いた。津波氾濫流に対する林帯の効果を検討するために、林帯が無かったと仮定した場合についても数値シミュレーションを行なった。

3 結果と考察

3.1 数値シミュレーションによる津波氾濫流の様子

浸水高は、各地点の最大値を海側林縁 (汀線からの距離 110 m) から内陸側林縁 (汀線からの距離 380 m) で平均すると、林帯が有る場合が 7.7 m, 林帯が無い場合が 7.9 m となり、内陸側林縁での最大値は、林帯が有る場合が 7.9 m, 無い場合が 8.1 m となり、海岸林帯の存在により低下していた (図 4a)。浸水高から地盤高を差し引いた値である浸水深は、各地点の最大値を林帯で平均すると、林帯が有る場合が 3.3 m, 林帯が無い場合が 3.5 m となり、内陸側林縁での最大値は、林帯が有る場合が 1.8 m, 無い場合が 2.0 m となった。

線流量は、各地点の最大値の林帯での平均値は、林帯が有る場合が $3.9 m^2/sec$, 無い場合が $4.3 m^2/sec$ となり、内陸側林縁での最大値は、林帯が有る場合

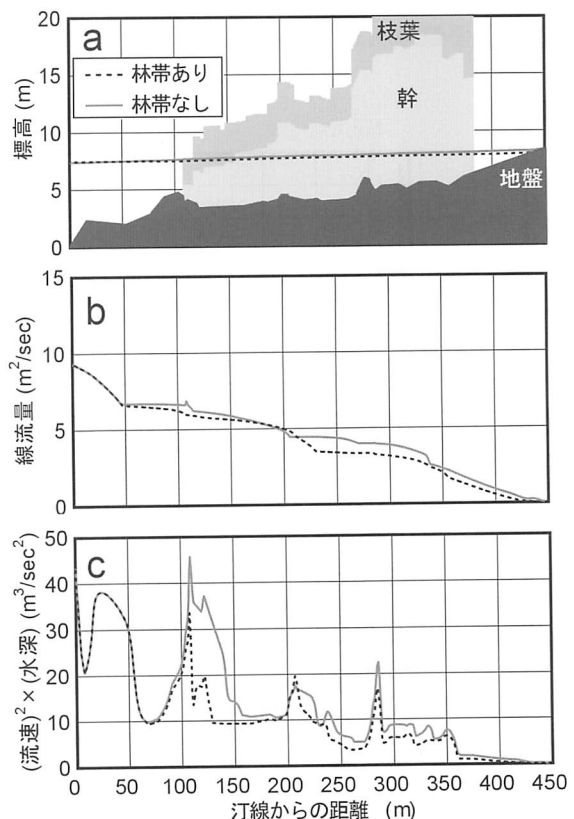


図4: 浸水高 (a), 線流量 (b), 流体力の指標 (c) の各地点の最大値

が $1.0 \text{ m}^2/\text{sec}$ 、無い場合が $1.4 \text{ m}^2/\text{sec}$ となり、林帯の存在により低下していた (図 4b)。

建物等の物体が氾濫流から受ける流体力の指標として、一定の幅を持つ物体が立っている場合の抗力 (式 (1) の右辺第 2 項) を想定して、流速の二乗に水深を乗じた値を計算した。この指標の各地点の最大値の林帯での平均値は、林帯が有る場合が $8.0 \text{ m}^3/\text{sec}^2$ 、無い場合が $12.0 \text{ m}^3/\text{sec}^2$ となり、内陸側林縁での最大値は林帯が有る場合が $1.0 \text{ m}^3/\text{sec}^2$ で、無い場合が $1.7 \text{ m}^3/\text{sec}^2$ となり、林帯の存在により低下していた (図 4c)。

津波が汀線に到達してから内陸側林縁に到達するまでに要する時間は、林帯が有る場合では 193 秒で、林帯が無い場合が 180 秒となり、氾濫流の遡上は林帯の存在によって遅らされた。

3.2 樹木の被害と根元での曲げモーメントの関係

樹木の根元にかかる曲げモーメントの最大値は、林帯内で上下動があるものの、海側林縁付近で特に大きく、内陸側林縁で最小となった (図 5a)。なお、曲げモーメントの計算に用いる樹木の投影面積には、帯状区を汀線からの距離で 10 m 毎に区切った区画毎に平均した値を用いた。

次に、樹木被害発生の指標について検討した。樹木の幹を円柱と見なすと、幹折れが発生するモーメント (幹折れ限界曲げモーメント) は次式で表わされる。

$$M_f = \sigma_f Z \quad (7)$$

ここで、 M_f : 幹折れ限界モーメント (N m)、 σ_f : 曲げ破壊強度 (N/m^2)、 Z : 断面係数 (m^3) を表わす。円柱の断面係数は次式で表わされる。

$$Z = \frac{\pi}{32} d^3 \quad (8)$$

ここで、 Z : 断面係数、 d : 幹の直径 (m) を表わす。この断面係数が大きいほど幹折れしにくくなることを意味する。計算上では、曲げモーメントを断面係数で除した値が大きいほど、幹折れ被害が発生しやすいことを表わす。対象とした海岸林では、幹折れ以外の被害形態として、根返りと傾きが発生していた。根返りや傾きはこれらに対する耐性が幹折れに対する耐性よりも小さい場合に発生するものと考えられる。近藤ら (2006) は、根返りへの耐性を表わす限界モーメントは近似的に胸高直径の 3.3 乗に比例するとしている。このことと傾きを根返りの軽度なものと考えることにより、本研究では、胸高直径の 3 乗に比例する断面係数を被害に対する耐性を表わす値とし用いることとし、断面係数で曲げモーメントを除した値は、幹折れだけでなく、根返りと傾きに関する指標にもなり得るものと考えて、樹木被害発生の指標として用いた。なお、断面係数の計算に用いる幹の直径には、帯状区を汀線からの距離で 10 m 毎に区切った区画毎に平均した値を用いた。

樹木被害発生の指標は多少の上下動はあるものの、海側林縁で特に大きく、内陸側に向かって減少していく傾向を示した (図 5b)。この傾向は、最前線部の本数被害率とその内陸側に比べて低くなっていた被害実態とは合わない。この原因としては、最前線部が前砂丘の背後に位置し被害が多かった箇所比べて地盤高が高く、根がよく発達し根返りや傾きへの耐性が高くなっていた可能性や、最前線部の樹木は他より小さいために可撓性が高く曲げ破壊強度が高くなっていた可能性等が考えられた。汀線から 200 m 付近を境とした本数被害率の明瞭な変化に対しては、樹木被害発生の指標が内陸側に向かって低くなっていく傾向により説明できるものだと考えた。つまり、200 m 付近の被害発生指標の値が、被害が発生する最小限のものであり、200 m 付近より内陸では、被害発生指標がその値を下回るため、被害が発生しなかったものと考えた。

式 (7) の関係から、幹折れが発生する曲げモーメントを断面係数で除した値は曲げ破壊強度と称される。クロマツの立木の曲げ破壊強度は報告例が見つからなかったが、アカマツの乾燥材の曲げ破壊強度は、東野ら (1996) により、低いもので $2.0 \times 10^7 (\text{N}/\text{m}^2)$ 程度と報告されている。樹種や乾燥材と立木との違いもあるため、単純に比較することは憚られるが、本研究の被害発生の指標と比較すると、幹折れ被害は海側最前線部でのみ発生し、被害木に占める幹折れの割合は小さいものと推定された。佐藤ら (2012) の調査によると、実際の被害形態の割合は傾きが約 81 % と大部分を占めており、幹折れの割合は 14 % と小さかった。

4 まとめ

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震津波により内陸側林縁まで浸水したものの、樹木の被害は海側林縁から林帯の途中までの部分的なものであった海岸林を対象として、津波氾濫流の数値シミュレーションを行なった。

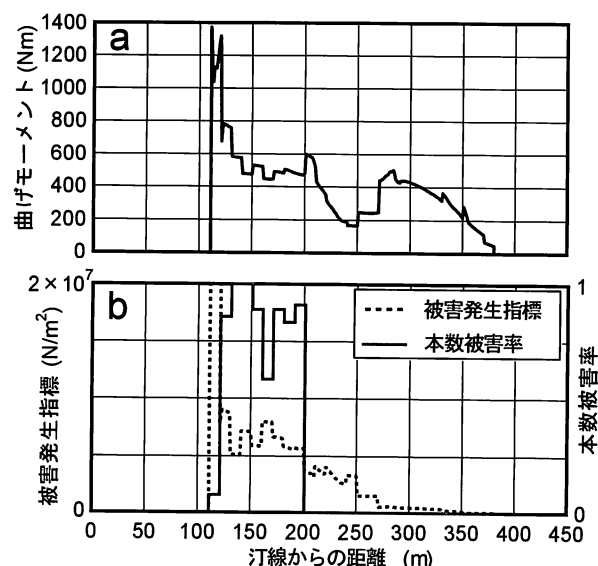


図 5: 曲げモーメントの各地点の最大値 (a)、樹木被害の指標と本数被害率 (b)

曲げモーメントの計算に用いる樹木の投影面積および、被害発生指標の計算に用いる幹直径には、帯状区を汀線からの距離で 10 m 毎に区切った区画毎に平均した値を用いた。

その結果、浸水深や線流量が海岸林の存在により抑えられた様子が数値的に推定できた。また、樹木の被害範囲の分布が海側林縁付近から林帯の途中までの部分的なものであったことは、最前線部の狭い範囲で被害が少なかったことを除いては、数値シミュレーションによる津波氾濫流の計算結果を用いて計算した樹木の根元が受ける曲げモーメントを断面係数で除した値の分布傾向により説明できた。このことから、樹木に被害が発生した要因は、樹木にかかる曲げモーメントが被害発生の限界モーメントを上回ったことであったと考えられた。

謝辞

2名の査読者には有益なご指摘をいただいた。ここに記して感謝の意を表す。なお、本研究の一部に林野庁からの委託事業「海岸防災林による津波被害軽減効果検討調査」の予算を使用した。

引用文献

- [1] 原田賢治・油屋貴子・Latief Hamzah・今村文彦 (2000) : 防潮林の津波に対する減衰効果の検討, 海岸工学論文集, 47, 366-370.
 [2] 原田賢治・今村文彦 (2003) : 防潮林による津波減衰

効果の評価と減災のための利用の可能性, 海岸工学論文集, 50, 341-345.

- [3] 東野正・中野正志・高芝俊雄 (1996) : アカマツ正角材の曲げ破壊強度性能, 岩手県林業技術研究センター報告, 6, 29-48.
 [4] 近藤観慈・小山美香・野々田稔郎・林拙郎 (2006) : 海岸クロマツ林の津波を想定した外力に対する根系抵抗力, 日本森林学会大会学術講演集, 117, G03.
 [5] 野口宏典・坂本知己 (2008) : 海岸クロマツ枝葉の空間分布, 関東森林研究, 59, 249-252.
 [6] 野口宏典・佐藤創・阿部友幸・鳥田宏行・真坂一彦・木村公樹・坂本知己 (2012) : 数値実験による海岸林の津波氾濫流減衰機能の検討—水路実験によるクロマツ抵抗特性と被災地の林分・地形条件を用いて—, 日本森林学会大会学術講演集, 123, D6.
 [7] 佐藤創・鳥田宏行・真坂一彦・阿部友幸・野口宏典・木村公樹・坂本知己 (2012) : 東北太平洋沖地震津波によるクロマツ海岸林被害に及ぼす林分構造の影響—青森県三沢市の例—, 海岸林学会誌, 11, 印刷中.
 [8] 首藤伸夫 (1985) : 防潮林の津波に対する効果と限界, 第32回海岸工学講演会論文集, 32, 465-469.

[受付 平成24年8月30日, 受理 平成24年10月15日]