

10 曳航時における巡視船の曳航索張力

海洋開発工学部 *原 正一、山川賢次

星野邦弘、湯川和浩

推進性能部

長谷川純

1. はじめに

荒天下において遭難した船舶等を曳航する際、曳航索には曳船と被曳船の相対運動により動的な張力がかかり、索が切断して2次災害を引き起こす事故が多々発生している。また、曳航時の被曳船に発生する不安定挙動（ふれまわり運動）の予測は、曳航索張力を正確に推定するために重要である。著者らはこれまで船舶等の曳航時における曳航索張力を計測するための模型実験、実機実験を実施し、理論解析との比較検討を行ってきた。

毎年実施されている海上保安大学校の訓練船「こじま」による曳航実験の際に、計測の機会を得たのでその結果を報告する。本実験の目的は、曳船と被曳船の相対位置を正確に計測し、曳航時及び旋回時の索張力との関係を明らかにすることである。この実験結果と数値計算との比較を行い、曳航時の索張力の推定手法を確立することが最終目標である。

2. 実験の概要

2. 1 実験方法

曳航実験には、表-1に示す訓練船「こじま」と呉海上保安部の巡視船「みささ」を使用した。実験海域は、呉沖約30kmの宮島付近である。実験日程は、平成12年12月13日～14日であり、曳

表-1 使用した船舶の主要寸法

	訓練船「こじま」	巡視船「みささ」
長さ	107m	60m
幅	14m	7.8m
深さ	7.3m	4.3m
喫水	4.4m	2.65m
総トン数	3000t	600t
出力	8000PS	3000PS

航実験の計測は12月14日の1日であった。

実験状態を表-2に示す。曳船「こじま」による直進曳航及び旋回曳航（船首曳航）（表中実験番号①～④）と曳船「みささ」による「こじま」の直進曳航及び旋回曳航（船尾曳航）である。「こじま」の被曳船の船尾に索をとり曳航する船尾曳航は、船尾の推進器に曳航索が絡む事故も考えられ、過去の実機実験では中々実現しにくかったが今回初めて試みることができた（実験番号⑤、⑥）。最後の実験状態では、「こじま」の曳航索を船尾から船首に移し変えて「こじま」の船首曳航を実施した。曳航索は、直径65mm、長さ165mのポリエチレンロープ（単位重量：2.125kg/m）を2本繋いで使用した。

2. 2 計測項目及び計測方法

計測機器を使用した計測項目は、曳航索張力と

表-2 実験状態

実験番号	時刻	速力 (kt)	こじま	みささ	舵角(°)	曳船
①	1240～1255	0～8	直進	直進		こじま
②	1255～1311	6	変針	追従		こじま
③	1315～1333	7	右旋回	直進	7	こじま
④	1336～1348	7	左旋回	直進	7	こじま
⑤	1400～1432	2, 4, 6	直進	直進		みささ
⑥	1440～1448	2	直進	旋回	7	みささ
⑦	1516～1544	3～5	直進	旋回	7, 15, 30	みささ



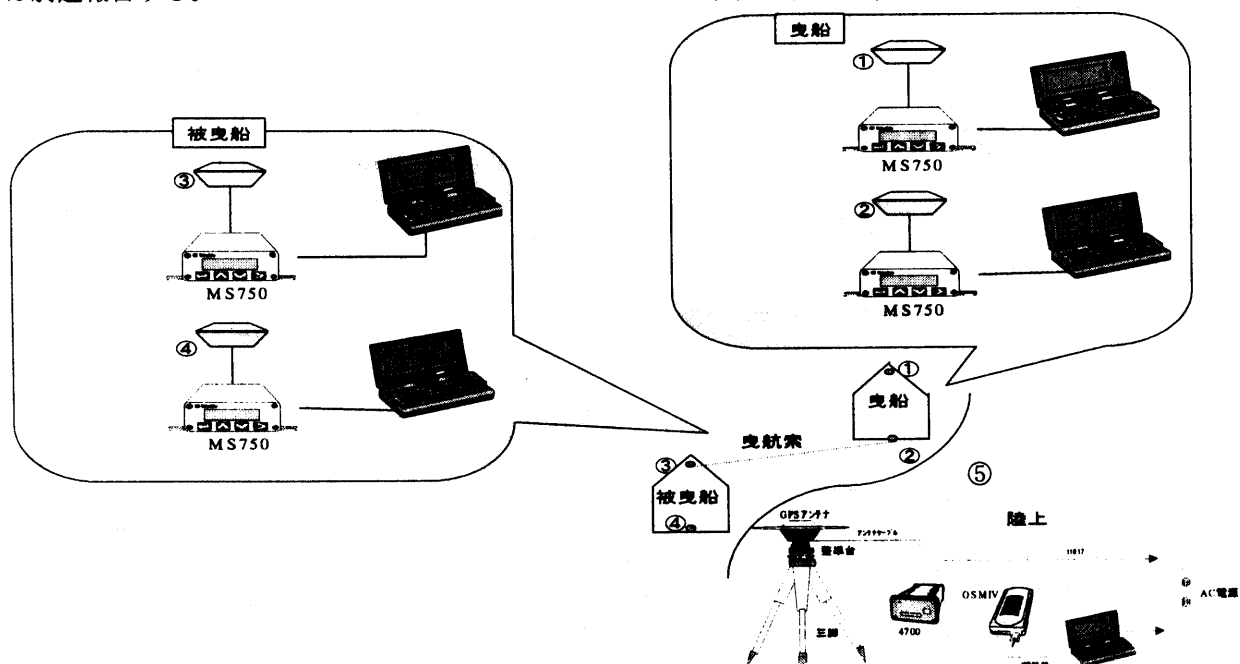
写真－１ 船首の張力計設置状況

曳船及び被曳船の位置である。この他に、船舶に設置されている風速計による風の計測、波高及びうねりの目視観測、ログ速力、索の張り具合（曳航索が水面に接するまでの距離）の目視観測、被曳船が「こじま」の際の船体中心からの曳航索角度を計測した。これは、船尾ブルワークに目盛りを打ち、一定時間間隔で曳航索位置の値を目視観測した。波浪計測を行うのが通常であるが、実施海域が瀬戸内海という静穏海域であるため特に実施しなかった。さらに、曳船の推進性能関係のデータ（機関出力、回転数、プロペラ翼角）も一定時間間隔で記録したが、詳しい解析結果については別途報告する。



写真－２ 船尾の張力計設置状況

索張力は、JISF3303 スタッド付き第 3 種直径 50mm チェインを用い、その平行部にストレインゲージを貼って防水加工した張力計を使用して計測した。計測は、「みささ」にチェインリンクをセットすることが困難なため、「こじま」の船首尾に一つずつ設置した。船首側の張力計の設置は、2つのボラードに 1 本ずつ布帯ベルトを巻きつけ、シ



図－１ KGPS を利用した計測システム

ジャックルを介して張力計を取り付けた(写真-1)。曳航索は、パナマチョークを通り船外へ出した。また、船尾側については、船尾の曳航ビットのフックにシャックルを介して張力計を吊るした(写真-2)。また、「こじま」に設置されている張力計の出力を取り出して記録し当所の張力計と比較した。

2 隻の船舶の位置計測に関する装置の配置図を図-1に示す。KGPS (キネマティック GPS) 及びパソコンをそれぞれ5台用意して、曳船及び被曳船の船首尾に1台ずつ設置し(トリンプル製 MS750)、海上保安大学校校舎の屋上に基準局としてKGPSを1台(トリンプル製 4700)設置した。装置は、受信機とアンテナが対になっており、アンテナは「こじま」については船首突端と船尾の曳航フックの真上の位置のヘリデッキ上に設置した。ヘリデッキ上にアンテナを設置する際は、三脚を用いて風等で転倒しないように土嚢を三脚上部から吊り下げた。「みささ」側については、曳航フックがブリッジ上にあるために設置スペースの制約からアンテナの設置位置が船体中央より1.57m 右舷よりに設置した。

データ収録は、2つの張力計についてはサンプリング周波数 100Hz とし、KGPS については 1Hz である。パソコンどうしの同期については、パソコンの時刻を合わせることでデータ解析の際に処理した。KGPS のデータ解析は、図-1の①～⑤でそれぞれ位置を取得し、基地局⑤により①～④の座標位置を検出した。①～④の時間、X、Y (日本平面直角座標系で座標変換した値)、H (高さ) のデータを解析し、①②及び③④より曳船及び被曳船の方位を求めた。

3. 実験結果及び考察

実験当日は、天候は晴れで風速が2~4m/sec であり、海上の波はほとんどないといった好天であった。また、図-2及び図-3に KGPS の精度チェックのために「こじま」及び「みささ」のそれぞれの船首尾に設置したアンテナ間の距離を縦軸にとり、その時間経過を示した。これより両船の位置情報が非常に不安定な領域と比較的安定な領域があることが判明し、安定領域でも細かな変動が絶えず観測された。図-2の

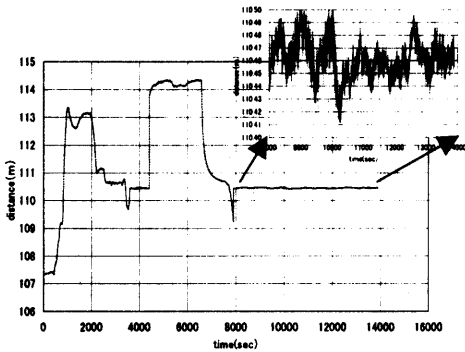


図-2 「こじま」の船首尾間の距離の変化

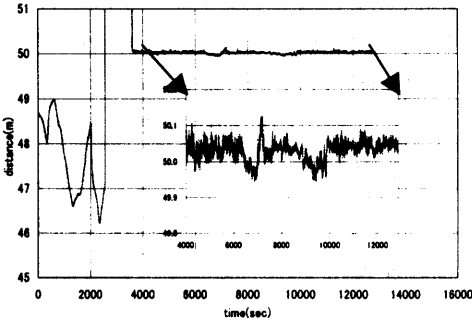


図-3 「みささ」の船首尾間の距離の変化

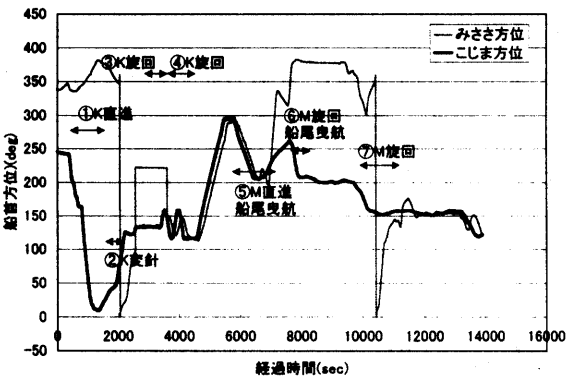


図-4 曳船及び被曳船の船首方位の時間経過

「こじま」の場合、最大で 10.6cm の変動が観測され、実際の距離の約 0.1%である。また、図-3の「みささ」の場合、最大で 19.6cm の変動があり、0.4%にあたる。この誤差の原因は、曳船及び被曳船と基準局との距離が大きく、基準局による位置補正が保証されなかったことによるものと考えられる。

図-4に KGPS による「こじま」及び「みささ」の船首方位の時間経過を示す。実験番号⑤及び⑥については、船尾曳航であるので2船の方位に 180° 程度ずれがある。2船の船首方位については、船に設置された方位計によっても読み取り観測しており、1° 以

上の誤差はなく KGPS のデータと一致していた。KGPS の計測による船首方位の誤差は、今回の実験が2船の相対的な距離を計測することが目的であるため許容範囲である。また、船尾曳航の際ふれまわり運動は見られず、「こじま」は安定して追従していることがわかる。

図-5及び図-6に、「こじま」に設置した張力計と著者らが設置した張力計による索張力の比較を、時間経過を横軸にとって示す。両者は概ね一致しているが、図-6の計測開始から9000sec 付近経過した時点で突然前者の示す索張力が小さくなった。しかしながら、両者が一旦零近くまで小さくなったあとで正常に戻っており、原因は不明である。

ポリエチレン製の曳航索は比重が 0.95 で水に浮くので、曳航索に張力がさほどかからない場合図-7のように空中部分の索のみについてはカタナリー形状を保持する。図のように曳船と被曳船の曳航点をそれぞれ A 及び B とし、AB の水平距離を l_1 とする。また、A 点及び B 点から水面に接するまでの曳航索長さをそれぞれ l_a 及び l_b 、それぞれに対応する水平距離を d_a 及び d_b とする。A 点及び B 点の水平曳航索張力をそれぞれ T_a 及び T_b とし、索張力を T_A 及び T_B とする。さらに、水面上に浮かぶ索長さを l_c として、次式成り立つ。

$$l_a = \sqrt{h_a(h_a + 2\frac{T_a}{w})} \quad (1)$$

$$d_a = \frac{T_a}{w} \sinh^{-1} \frac{wl_a}{T_a} \quad (2)$$

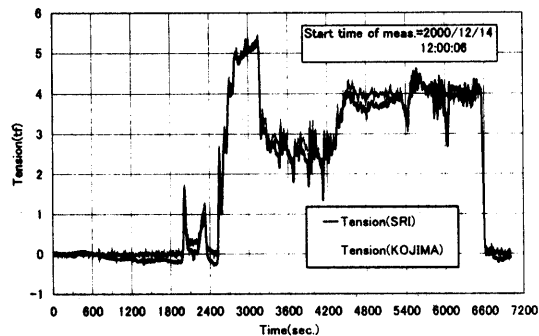


図-5 曳航索張力の時間経過（前半）

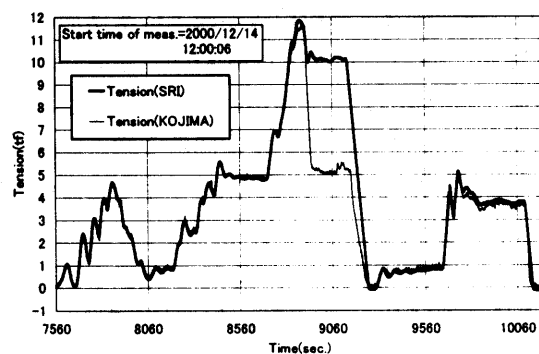


図-6 曳航索張力の時間経過（後半）

$$l_b = l - l_a - l_c = \sqrt{h_b(h_b + 2\frac{T_b}{w})} \quad (3)$$

$$d_b = l_1 - l_c - d_a = \frac{T_b}{w} \sinh^{-1} \frac{w(l - l_a - l_b)}{T_a} \quad (4)$$

ただし、

$$T_a = T_b \quad (5)$$

$$T_A = \sqrt{T_a^2 + (wl_a)^2} \quad (6)$$

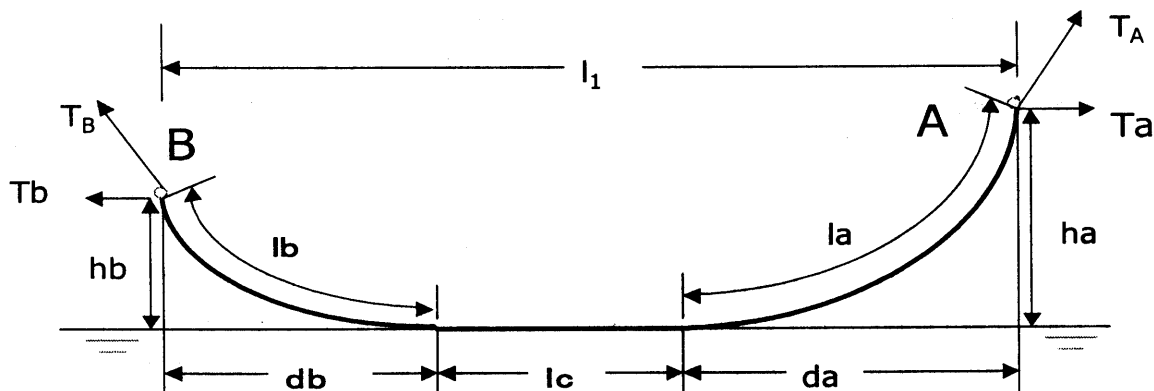


図-7 曳航時の曳航索の模式図

$$T_B = \sqrt{T_b^2 + (wl_b)^2} \quad (7)$$

曳航索の伸びを考慮して、曳航索のばね定数を k 、索の全長が l' と仮定すると、索長と曳航索張力との間に次式が成り立つ。

$$l' = l + \frac{\sqrt{T_a^2 + (wl_a)^2}}{k} \quad (8)$$

さらに、索が張ってくると索の中央部が水面から離れ空中に索全体が浮く状態となる。索の最下端の水面からの垂直距離を h' とすると、(1) 式及び(3) 式は次のようになる。

$$l_a = \sqrt{(h_a - h')(h_a - h' + 2\frac{T_a}{w})} \quad (9)$$

$$l_b = \sqrt{(h_b - h')(h_b - h' + 2\frac{T_b}{w})} \quad (10)$$

$$l_c = 0 \quad (11)$$

$$l_1 = d_a + d_b \quad (12)$$

以上より、索の水平距離 l_1 と索張力 T_B 、 l_a 、 l_b 及び h' の関係を図-8 に示す。これより曳船と被曳船の距離が大きくなると徐々に d_a と d_b の距離の差が出始めて、 l_c が零になった後は両船の曳航点の水面からの高さの違いによりその差が大きくなることが分かる。 l_c は 353m の点で零になり、その後 h' が増加している。目視観測の結果から最大索張力が発生した点では、約 1m 程度水面上に索が飛び出していたことがわかっており計算結果ともほぼ一致している。

曳航索の張り具合を目視観測で記録した結果を、横軸に経過時間、縦軸に被曳船「こじま」の曳航フック位置から索が接水する位置までの距離 (l_b) 及び索張力を図-9 に示す。実験状態は、「みささ」の直進曳航(船尾曳航)で実験番号⑤である。

曳航索張力と2船の水平距離の目視観測の結果は、よく対応していることがわかる。最大索張力の 11.6tf となった後、索のヒステリシスのためにその前後の索張力がほぼ同じであるにもかかわらず水平距離が最大張力発生後のほうが大きくなっている。索張力がピー

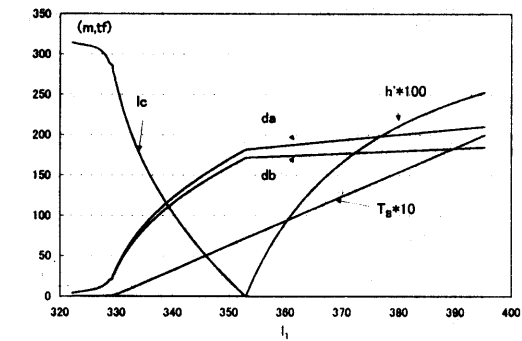


図-8 2 船間の距離に対する索形状と索張力

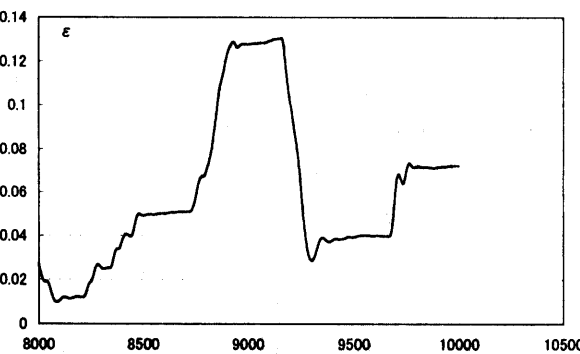
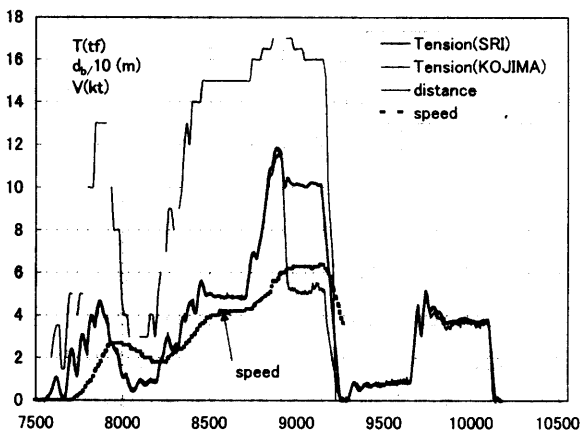


図-9 曳航索張力と索の張り具合

クに達する8900sec 前後で索はすべて海面上にでているのでデータの欠損がある。図中に曳航速度を示したが、6ktの設定で船に加速がつき増速の過程で索張力にピークがでたものと考えられる。図-9 の下段の図に、KGPS によって計測された2船間の水平距離を伸び率に換算し、その時間経過を示した。索の伸び率と索張力との相関は非常によいことがわかる。図-10 に KGPS による2船間の水平距離の代わりに索の伸び率 $\epsilon((l'-l)/l)$ を横軸にとり、索張力との関係を示した。これより、目視観測結果との対応はよ

いこと、負荷時と除荷時の勾配がほぼ等しく塑性伸びが観測できることなどの合成繊維索のヒステリシス特性が表現できているので絶対距離ではなく索の伸びと索張力の関係を調べることができると判断した。これよりポリエチレン合成繊維索のヒステリシスの特性がわかり、索の弾性定数は 3.125(tf/m)であり、最大で 12.5%の伸びであった。また、著者らが過去に実施した曳航実験におけるポリエチレン曳航索の弾性定数 2.8(tf/m)と比較しても妥当な値と考えられる。この実験では、最大で 10tf 程度の索張力が発生し、索の伸び率は 10%程度であった。図-8 の索張力は、計測結果から得られた索の弾性定数を使用して求めたものであるが、仮定から曳航索張力が 2 船間の距離に対して直線状に増加している。

4. まとめ

海上保安大学校の曳航実験に参加して、曳航索張力及び KGPS による曳船、被曳船の水平距離の計測の機会を得て、数値計算とともに両者の比較を行った。今回実施した KGPS の計測の精度には、実験条件等の原因で目的のレベルには達し得なかったが、索張力と 2 船間の水平距離との関係について、大直径の合成繊維索の伸び特性が明らかとなった。今年度において、特別研究「荒天下における航行不能船舶の漂流防止等に関する研究」で波浪中における実機曳航実験を実施して、再度 KGPS による計測を試みる予定である。

謝辞

海上保安大学校の訓練船「こじま」の曳航実験の参加に関して快諾いただき、計測のための準備にご尽力され、解析に関して貴重なご助言を賜りました道本順一教授に心より感謝の意を表します。また、実験に際してご協力いただいた日當博喜教授、山田多津人助教授に感謝いたします。船舶の位置計測にあたり、計測機器の借用及びデータ解析に関してご協力いただきましたトリンプルジャパン(株)の濱田文子課長と実験の計測補助をしていただいた服部道典氏にお礼申し上げます。

巡視船「みささ」及び訓練船「こじま」の関係者の皆様のご協力に感謝致します。さらに、実験時には訓練中の海上保安大学校訓練生の方々に交

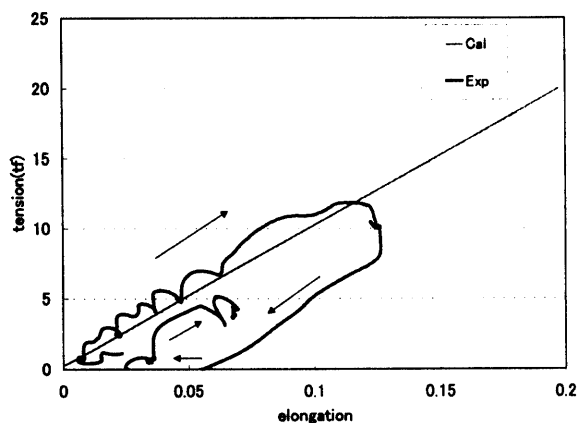


図-10 曳航索張力と 2 船間の水平距離の関係

替で観測作業をお手伝いいただいた。目視観測は貴重なデータであり、感謝する次第である。

参考文献

- 1) 原正一、山川賢次、星野邦弘、湯川和浩、損傷船舶の曳航に関する研究、関西造船協会誌第 233 号、平成 12 年 3 月
- 2) H. Shin, K. Yamakawa, S. Hara ;Laboratory Test on Synthetic Fiber Ropes, Proceedings of OMAE, 1994
- 3) 道本順一、日當博喜、寺本定美、田中明、荒天下における曳船と被曳船の運動に関する研究（その 3、曳航索の形状変化を考慮した索張力変動の計算）、海上保安大学校研究報告、第 44 号第 1 号、平成 10 年
- 4) 山川賢次、原正一、山本勉、中村克則、金子純蔵、曳航が巡視船の船体及び曳航索に及ぼす影響に関する研究、船舶開発技法第 20 号、平成 6 年 9 月
- 5) 山川賢次、原正一、山本勉、中村克則、金子純蔵、曳航が巡視船の船体及び曳航索に及ぼす影響に関する研究（第 2 報）、船舶開発技法第 21 号、平成 7 年 9 月