

◆ 報 文 ◆

大型車の振動特性が橋梁に及ぼす動的影響に関する調査

中洲啓太* 石尾真理** 玉越隆史*** 中谷昌一****

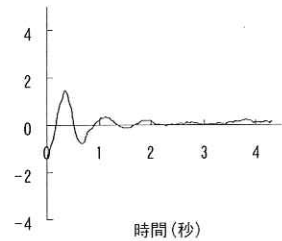
1. はじめに

近年、国際物流ネットワークにおいて、ISO規格の国際海上コンテナの標準化が進められており、我が国においても、物流の国際化に対応するため、車両の大型化に対する要請が強まっている。しかしながら、車両の大型化は、橋梁などの道路構造物の耐久性に重大な影響を及ぼすため、その検討にあたっては、大型化の影響を適切に考慮しながら実施する必要がある。

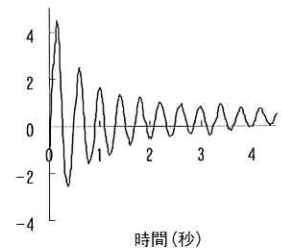
一方、最近では、乗員の疲労や積荷の損傷を軽減するため、車体と車軸との間に設けられる緩衝装置に、エアサスペンション(図-1(a)参照、以下、「エアサス」という)を使用した車両が増加してきている。欧州等においては、エアサス搭載車両は、従来型のリーフサスペンション(図-1(b)参照、以下、「リーフサス」という)搭載車両よりも道路構造物に及ぼす動的影響を低減する効果が高いとの報告がある¹⁾。そして、エアサスをロードフレンドリー(道路に優しい)サスペンションとして、軸重や車両総重量が緩和されている事例もある²⁾。

このような状況を踏まえ、国総研橋梁研究室では、実際の大型貨物車を用いた橋梁走行試験等を行い、サスペンションの振動特性と橋梁各部に及ぼす動的影響の関係について、基礎的な特性およびその評価のあり方を明らかにするための調査を実施した。そして、我が国の軸重制限がネックとなり、国内でフル積載輸送をする上で不都合を生じているISO規格の国際海上コンテナ(40ft)を搭載したセミトレーラ(以下「海コントレーラ」という)を対象として、更新に費用と時間を要する多軸化(図-2(b)参照)ではなく、トラクタ駆動軸の軸重緩和(図-2(c)参照)による解決を可能とするため、軸重緩和の条件や認証試験方法に関する検討を実施した。

これらの調査検討の結果を踏まえ、平成15年5月には、所定の条件を満足する海コントレーラ連結車の2軸トラクタについては、駆動軸重が11.5tfまで緩和され、国内でフル積載状態での走行が可能となった(国土交通省道路局道路交通管理課長・企画課長通達)。ここでは、一連の試験

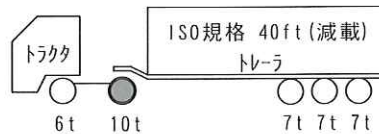


(a) エアサスとその振動波形

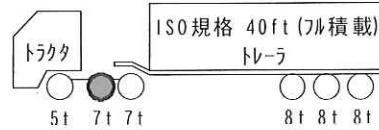


(b) リーフサスとその振動波形

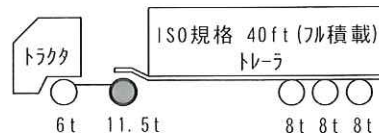
図-1 サスペンションと振動波形の例



(a) 一般的な2軸トラクタでは減載が必要



(b) 多軸化によるフル積載化



(c) 軸重緩和によるフル積載化

図-2 海コントレーラ(40ft)連結車の例

Surveys on Dynamic Effects of Large-sized Vehicles on Bridges

調査の概要と結果について報告する。

2. 大型車の走行が橋梁部材に及ぼす動的影響

2.1 調査概要

サスペンションの振動特性と橋梁各部に及ぼす動的影響の関係について、基礎的な特性およびその評価方法を明らかにするため、国内を走行する代表的な大型貨物車を用いて、国総研構内の試験橋梁（鋼単純鈹桁・支間30m）を使った走行試験を実施した。試験車両は、サスペンション形式や駆動軸の軸重をパラメータとした3軸トラックおよび4～6軸のセミトレーラとした。なお、エアサスは、構造が多種多様であるため、メーカー毎にAからDの4タイプを選定した。橋梁部材応答の測定は、各部材の影響線形状の違いを考慮して、主桁、床版等において実施した。表-1および

表-1 試験車両の一覧(トラック・Tシリーズ)

番号	軸数	サスペンション	軸重	総重量
T-①	3	リーフサス	10t	25t
T-②	3	エアサス (A)	10t	25t
T-③	3	エアサス (A)	11.5t	25t
T-④	3	エアサス (B)	11.5t	25t
T-⑤	3	エアサス (C)	11.5t	25t
T-⑥	3	エアサス (D)	11.5t	25t

表-2 試験車両の一覧(セミトレーラ・Sシリーズ)

番号	トラック			トレーラ		総重量
	軸数	サスペンション	軸重	軸数	サスペンション	
S-①	2	リーフサス (A)	11.5t	2	リーフサス	36t
S-②	2	エアサス (A)	11.5t	2	エアサス	36t
S-③	2	リーフサス (B)	10t	2	リーフサス	36t
S-④	2	リーフサス (B)	11.5t	3	リーフサス	42t
S-⑤	2	エアサス (B)	11.5t	3	リーフサス	42t
S-⑥	2	リーフサス (C)	10t	3	リーフサス	36t
S-⑦	3	リーフサス (D)	10t 以下	3	リーフサス	44t

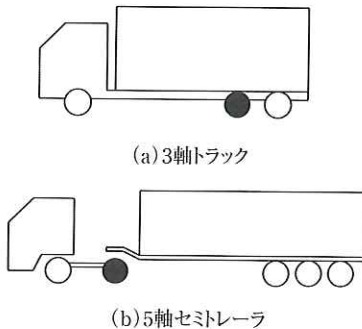
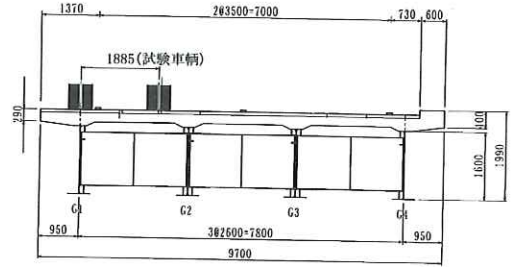
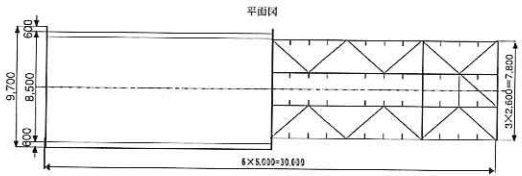


図-3 試験車両の概略 (●は駆動軸を示す)



(a) 断面図



(b) 平面図

図-4 試験橋梁の概略

び表-2に試験車両の一覧、図-3に試験車両の概略、図-4に試験橋梁の概略を示す。

2.2 主桁に及ぼす影響

図-5に総重量が等しく、軸重およびサスペンション特性の異なる3軸トラックが試験橋梁を40km/hで走行したときの主桁支間中央部下フランジのひずみ波形を示す。なお、図-5の横軸は、橋梁入口に前軸が達したとき10mとなるように原点を設定している。橋梁部材の応答は、各軸毎の影響線の重ね合わせである静的な応答に、車両振動に伴う動的な変動分を加えたものとみることができ、主桁の応答は、走行速度や橋梁の支間長の影響を受けるものの、一般に静的変動の周期が動的変動の周期に対して十分に長く、部材の応答波形に動的変動の影響が顕著に現れている。その結果として、車両振動の少ないエアサス搭載車両は、リーフサス搭載車両よりもひずみ応答の最大値が低減される傾向にあることがわかる。

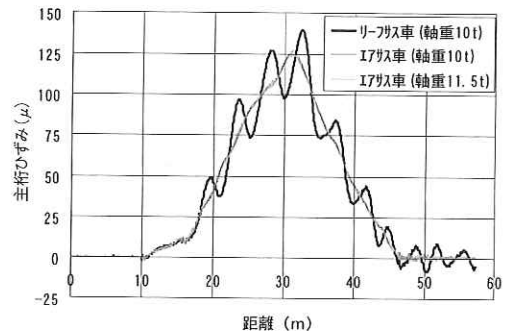


図-5 主桁下フランジ支間中央部のひずみ

2.3 床版に及ぼす影響

図-6および図-7に5軸のセミトレーラが40km/hで試験橋梁を通過したときの輪荷重走行位置直下の床版下面におけるひずみ応答を示す。床版のひずみについては、影響線形状が鋭く、測定位置直近を車軸が通過するときだけ大きく応答するため、主桁と異なり、サスペンションの振動特性の影響を部材応答から読み取りづらくなっていることがわかる。

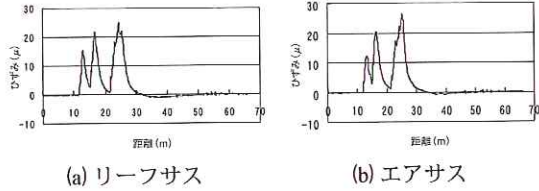


図-6 床版下面のひずみ応答（橋軸直角方向）

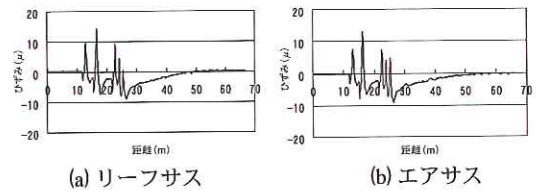


図-7 床版下面のひずみ応答（橋軸方向）

2.4 動的影響の評価

上述の測定結果より、橋梁各部に及ぼす動的影響の形態は、車両の通過に対する応答時間が、主桁のように長い部材と、床版のように短い部材とで大きく異なることがわかった。

車両通過による応答時間が長い部材は、振動による荷重変動の影響が部材応答波形に顕著に表れるため、橋梁部材の応答から、車両の振動特性を反映した動的影響の違いを評価することができる。しかしながら、車軸通過時の応答時間が短い部材は、車軸が測定点を通過したときの瞬間的影響だけしか測定できず、車両振動の影響は、ある位相部分の重ね合わせとしてしか得ることができない。図-8は、試験で得られた動的変動のピーク値を衝撃係数 $((\varepsilon_{max} - \varepsilon_{smax}) / \varepsilon_{smax})$ （ここに、 ε_{max} ：応答の最大値、 ε_{smax} ：静的応答の最大値）の形で表し、その頻度分布を示したものである。これより、床版における衝撃係数は主桁よりもバラツキが大きく、負の値を生じていることが特徴的である。このことから、床版の応答が常時変動しながら移動する車両荷重のある位相部分の影響が現れた結果になっている様子が理解できる。そのため、床版について、車両の振動特性を反映した動的影響を部材側の応答から適切に評価

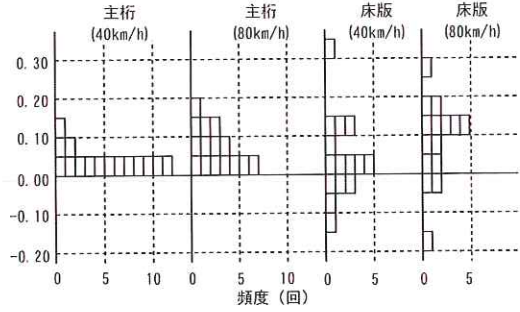


図-8 動的応答のピークのバラツキ

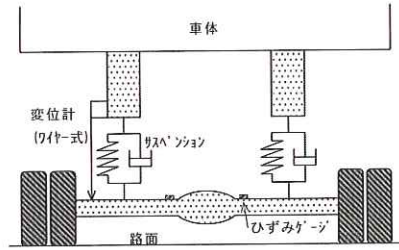


図-9 動的軸重測定用のひずみゲージ貼付位置

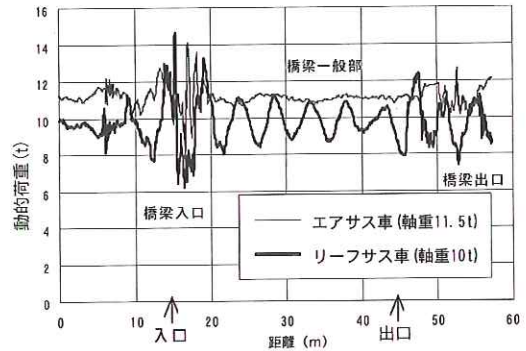


図-10 橋梁走行時の動的影響比較

するためには、測定回数を相当増やす必要がある。さらに、測定点周辺の路面性状等の影響を受けるため、部材側の測定から一般性の高い計測結果を得ることは困難といえる。

そこで、車軸が床版に及ぼす動的影響は、走行中にタイヤが路面に与える一軸あたりの動的な荷重（以下、「動的軸重」という）により評価することとした。なお、動的軸重は、図-9に示すように車軸に取り付けたひずみゲージにより測定した。図-10は、サスペンション特性が異なる車両について、試験橋梁を通過する際の動的軸重の時間変化を示したものである。動的軸重に着目することにより、エアサス搭載車両とリーフサス搭

載車両とで常時路面に与えている荷重変動の振幅が大きく異なっている様子、橋梁の伸縮装置部と橋梁一般部とで荷重の特性が異なっている様子などがわかり、車両の振動特性を反映した動的影響の差異の把握が容易となる。

3. 海コントレーラ連結車駆動軸の動的影響評価

3.1 調査概要

海コントレーラ駆動軸の軸重緩和の検討にあたっては、軸重の影響を顕著に受け、応答時間の短い床版のような部材に対する影響評価が重要となる。ここでは、前述した試験橋梁走行試験で得られた知見を踏まえ、床版に対する影響を動的軸重に着目して評価することとし、一般性の高いデータを収集するため、多様な路面性状を含んだ一般道路を走行させて測定した。また、走行中の車両の振動特性の分析および車両の振動モデルを用いた数値解析により、動的影響を簡易に評価する試験方法についても検討した。

試験車両は、国内を走行する海コントレーラ連結車の中から、市場占有率や動的影響の大きさを考慮して、表-3に示す8車両を選定した。車両I-①～I-④は、駆動軸が現行の車両制限内で最大級の動的影響を及ぼすと考えられるリーフサス搭載の海コントレーラ連結車（減載・駆動軸重10t）であり、車両I-⑤～I-⑧は、その対照用のエアサス搭載の海コントレーラ連結車（フル積載・駆動軸重11.5t）である。写真-1に試験車両の例を示す。

走行ルートとしては、路面の平坦性や周波数特性（パワースペクトル密度）が全国の道路条件を代表するとみなすことができる国総研周辺の一般道路（一周約30km）を選定した。走行速度は、40km/hを標準とした。図-11に走行ルートの概略、写真-2に走行中の試験車両を示す。なお、図中の①から⑫の区間は、路面凹凸や動的軸重の分析に用いる詳細なデータを取得した区間である。



写真-1 試験車両の例

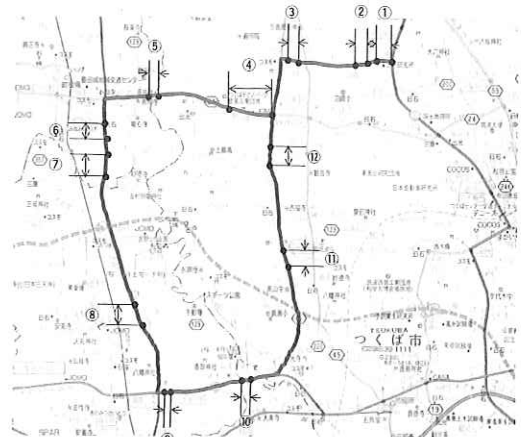


図-11 一般道路の走行ルート



写真-2 試験ルートを走行する試験車両

表-3 試験車両の種類(Iシリーズ)

番号	トラック			トレーラ	
	軸数	サスペンション	軸重	軸数	サスペンション
I-①	2	リーフサス(A)	10t	2	リーフサス
I-②	2	リーフサス(A)	10t	3	リーフサス
I-③	2	リーフサス(B)	10t	2	リーフサス
I-④	2	リーフサス(B)	10t	3	リーフサス
I-⑤	2	エアサス(A)	11.5t	3	リーフサス
I-⑥	2	エアサス(B)	11.5t	3	リーフサス
I-⑦	2	エアサス(C)	11.5t	3	リーフサス
I-⑧	2	エアサス(D)	11.5t	3	リーフサス

3.2 一般道路走行による動的軸重の比較

図-12は、一般道路走行時の動的軸重の頻度を現行の車両制限内で最大級の動的影響を及ぼすと考えられるリーフサス車両（軸重10t）とその対照用として実施したエアサス車両（軸重11.5t）について、それぞれ示したものである。なお、データの整理にあたっては、速度違反防止用の段差をはじめ特異と考えられる区間を除去している。

この結果より、動的軸重の変動幅はエアサス搭載軸よりもリーフサス搭載軸の方が大きいため、最大値に着目するとエアサス搭載軸とリーフサス搭載軸とで、静的軸重では1.5tの差があるにもかかわらず、その最大値はほぼ同等となっているこ

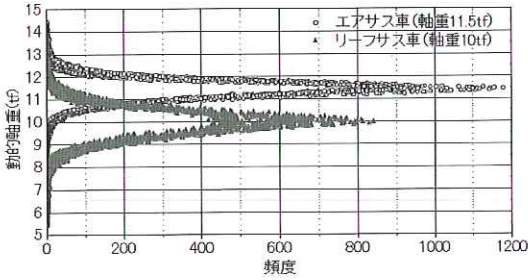


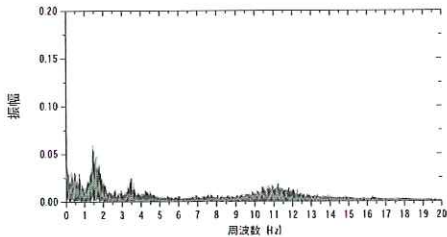
図-12 動的軸重の頻度分布

とがわかる。

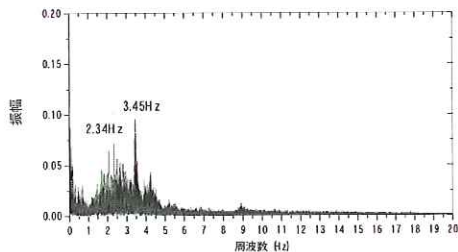
車両のある軸が道路構造物に及ぼす影響は、動的効果を含む荷重の最大値が構造物に支配的な影響を及ぼすと考えられ、動的軸重の最大値が同等であれば、道路構造物に及ぼす影響も同等であるとみなすこととした。

3.3 走行中の振動特性の把握

車両走行中の振動性状を把握するため、一般道路走行時の動的軸重を周波数分析した結果を図-13に示す。一般に車軸部の振動は、サスペンションより上部(車体等)が振動するバネ上振動(1~4Hz)と、サスペンションより下部(タイヤ等)が振動するバネ下振動(10~12Hz)に大別されるが、走行中の動的軸重の周波数分布より、エアサスで1~2Hz、リーフサスで2~4Hzのバネ上振動モードが支配的であることがわかる。



(a) エアサス登載軸



(b) リーフサス搭載軸

図-13 動的軸重の周波数分布

3.4 一自由度モデルを用いた表現

3.3の結果を踏まえ、サスペンション特性を反映した動的影響の差異の評価は、図-14に示す一自由度モデルを用いて行うこととした。一自由度振動の運動方程式および軸重の計算式は、それぞれ、式①、②のように表される。軸重は、減衰比および円固有振動数の関数になっており、動的影響の評価にあたっては、サスペンションの減衰比及び周波数を精度良く測定することが重要となる。

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = k\phi + c\dot{\phi} \quad \text{①}$$

$$P = c(\dot{z} - \dot{\phi}) + k(z - \phi) = c\dot{y} + ky = -m(2hm\dot{y} + n^2y) \quad \text{②}$$

ここに、 m : 質量 c : 減衰係数 k : バネ係数

z : バネ上質点絶対変位

y : バネ上質点相対変位

ϕ : 路面凹凸変位 P : 軸重

h : 減衰比 n : 円固有振動数

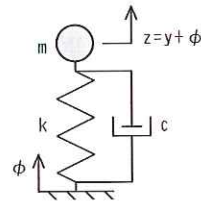


図-14 一自由度振動モデル

3.5 簡易な認証試験法の提案

上述の検討結果を踏まえ、この振動モードが卓越し、ほぼ正確に減衰比と振動数を測定できる方法の一例として、図-15に示す人工段差を5km/h程度の低速で通過し、その際の動的軸重波形を解析する方法を提案した。写真-3に動的影響の簡易測定試験の様子を示す。

図-16は、この方法で求めたサスペンションの減衰比および振動数をプロットしたものである。海コントレーラの駆動軸の場合、振動特性がエアサス搭載車とリーフサス搭載車で差別化されることがわかる。図-16にプロットされた車両では、エアサス搭載車とリーフサス搭載車で駆動軸重の最大値はほぼ同じとなっており、プロットされた

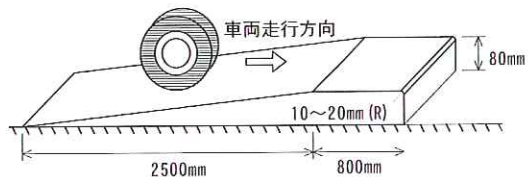


図-15 簡易試験用の人工段差

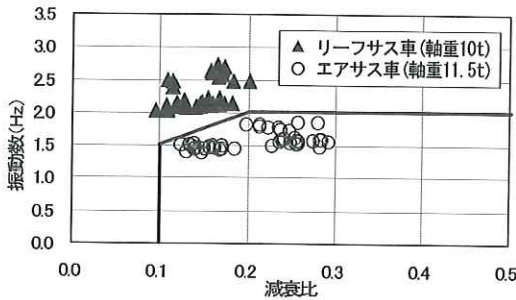


図-16 駆動軸の振動特性



写真-3 動的影響の簡易試験法の例

エアサス搭載車の振動特性に近似した特性を有する場合、すなわち図-16の太線よりも右下の領域に位置するとき、その動的軸重最大値はプロットされているリーフサス搭載車のそれと同程度にしかならないと評価できる。

4. おわりに

本調査では、部材固有の影響線形状により異なる大型車による動的影響の特性を踏まえ、ISO規格の国際海上コンテナを牽引するトラクタの駆動軸を対象として、現行車両制限内の車両が及ぼす

動的影響の最大レベルを超えないこととする軸重緩和条件を設定し、その上で簡易な段差等を用いて人為的に発生させた着目軸の振動波形を解析する認証試験方法を提示した。これにより、ISOコンテナを定格最大積載状態で国内輸送が可能となる条件が示され、我が国の物流の効率化に寄与することが期待される。今後は、これを契機に車両と構造物相互の関係についての知見をさらに蓄積し、道路構造物の保全と有効活用を両立できる制度の拡充や車両の開発および普及の促進を図るとともに、車両荷重や橋梁部材応答の実特性を反映した道路橋のより合理的な設計法の確立・基準化のために活用していきたい。

参考文献

- 1) OECD Road Transport Research Programme : Dynamic Interaction between Vehicles and Infrastructure Experiment, DSTI/DOT/RTR/IR6 (98) 1/FINAL, 1998
- 2) EC指令, 92/7/EEC, 1992年2月
- 3) 中谷昌一、玉越隆史、中洲啓太、石尾真理：大型車の振動特性が橋梁に及ぼす影響に関する調査(I), 国総研資料179号, 2004年4月
- 4) 中谷昌一、玉越隆史、中洲啓太、石尾真理：大型車の振動特性が橋梁に及ぼす影響に関する調査(II), 国総研資料180号, 2004年4月
- 5) 中谷昌一、玉越隆史、中洲啓太、石尾真理：大型トレーラが橋梁に及ぼす動的影響に関する調査, 第57回土木学会年次学術講演会概要集, 2002年9月
- 6) 中谷昌一、玉越隆史、中洲啓太、石尾真理：国際海上コンテナ搭載トレーラの動的影響評価, 第58回土木学会年次学術講演会概要集, 2003年9月
- 7) 中谷昌一、玉越隆史、中洲啓太：海上コンテナ用セミトレーラ連結車の軸重緩和について, 土木技術資料 Vol.45, No.11, 2003年11月

中洲啓太*



国土交通省国土技術政策
総合研究所道路研究部橋
梁研究室研究員
Keita NAKASU

石尾真理**



国土交通省国土技術政策
総合研究所道路研究部橋
梁研究室研究員
Mari ISHIO

玉越隆史***



国土交通省国土技術政策
総合研究所道路研究部橋
梁研究室長
Takashi TAMAKOSHI

中谷昌一****



道路局国道・防災課保全
企画官(前国土交通省国
土技術政策総合研究所道
路研究部橋梁研究室長)
Shoichi NAKATANI