

# 高性能 UOE 鋼管溶接部自動超音波探傷装置

## Highly Efficient Automatic Ultrasonic Inspection System for Weld Seam of UOE Pipe

飯塚 幸理 基盤技術研究所 計測制御研究部 主任研究員 工博  
松藤 泰大 福山製鉄所 プロセス制御部 技術開発グループ 統括スタッフ  
前田 孝三 福山製鉄所 プロセス制御部 技術開発グループ 統括スタッフ  
岩倉 進 福山製鉄所 溶接管部 技術開発グループ

Yukinori Iizuka  
Yasuhiro Matsufuji  
Kozo Maeda  
Susumu Iwakura

当社は福山製鉄所溶接管工場のUOE鋼管溶接部自動超音波探傷装置を更新した。新しい超音波探傷装置は、(1)最大20チャンネルまで同時に探傷可能なマニピュレータ、(2)肉厚中央部狙いの新探傷チャンネル、(3)高精度シーム追従センサを備え、多様化・厳格化していく客先品質要求に100%応えられる設計となっている。

*NKK has developed a new automatic ultrasonic inspection system for weld seam of UOE pipe. The features of the system are two manipulators that can be used max.20ch probes, a high sensitivity detection technique for center minute defect and a high accurate seam-tracking sensor. We believe the specification of the system will perfectly meet various and strict customer's inspection needs.*

### 1. はじめに

天然ガスなどエネルギー需要の世界的な高まりから、ラインパイプ用 UOE 鋼管の需要が増している。近年のラインパイプにはますます厳しい使用条件が課せられ、それに伴い高い品質が要求されている。UOE 鋼管の品質検査には、厚板原板超音波探傷試験、溶接部の超音波探傷試験および放射線透過試験、さらに管端円周部の超音波探傷試験や磁粉探傷試験などが行われている。中でも、溶接部超音波探傷試験の検出精度は品質保証上最も重要な役割を担っており、需要家の要求レベルも高い。

当社では、このたび、福山製鉄所溶接管工場の溶接部自動超音波探傷装置を全面更新した。この更新工事においては、多様化・厳格化していく客先品質要求に100%応えられるように探傷装置を設計し、種々の新技術<sup>①②③</sup>を導入してこれを具現化した。本稿では、この新しい溶接部自動超音波探傷装置の概要について述べる。

### 2. 装置概要

#### 2.1 仕様策定の方針

福山製鉄所溶接管工場では稼働当初からクラウトクレーマー製の SNUP 方式（縦きず探傷、横きず探傷、カップリングチェックなど）による自動超音波探傷装置を用いてきた。この方式は世界的に多くの実績を持ち、顧客からも高い信頼を得ており、今回の更新においても SNUP 方式を採用することとした。さらに溶接欠陥の検出能力を極限まで高めた仕様とし、探傷装置の高機能・高精度化を図った。

具体的には、以下の目標を設定した。

- (1) 最大 20 チャンネルまで同時探傷可能
- (2) 肉厚中央部狙いチャンネル付加（微小溶込不良検出）
- (3) 高精度シーム追従
- (4) ダイナミックキャリブレーションにて  $S/N > 10\text{dB}$

本装置の外観を Photo 1、システム構成を Fig.1、仕様を Table 1 に示す。以下、本装置の仕様について詳述する。

#### 2.2 探傷方式

探傷方式は溶接鋼管の溶接部自動探傷において一般的な斜角探触子によるパルス反射法とし、探触子固定、管搬送方式とした。探傷機本体には、高い S/N (Signal to Noise ratio) が得られる当社独自開発の同期加算平均処理<sup>①</sup>、チャープ波パルス圧縮処理<sup>②</sup>が適用可能なものを採用した。



Photo 1 View of the automatic ultrasonic inspection system for weld seam of UOE pipe

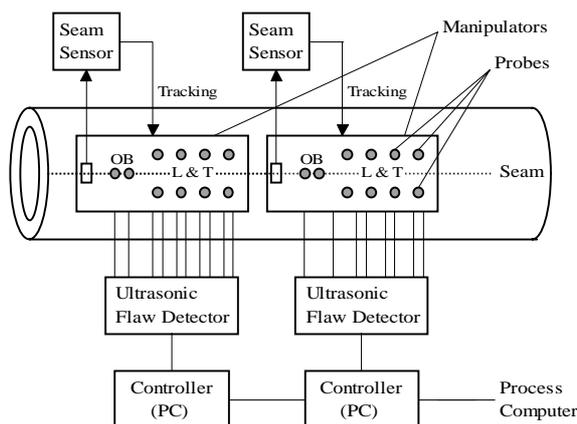


Fig.1 Configuration of the system

Table 1 Specification of the system

Item	Specification
Pipe size	Diameter : 400mm~1422mm Thickness : 6.4mm~50.8mm Length : 5.5m~19m
Line speed	1mpm~30mpm
Inspection method	Pulse reflection method Single probe technique Double probe technique
Pulsar & receiver (Krautkramer)	0.5MHz~10MHz/-3dB Max. gain : 100dB PRF 1kHz/ch
Test frequency	4MHz
Number of channel	L&T : max. 16ch OB : max. 4ch
Probe	Composite type L&T: 8mm×9mm OB : 10mm Angle of refraction L&T : 65deg.~75deg. OB : 45deg. Inclination to weld axis L : 90deg. T : 45deg.
Detectability	φ 1.6mm drilled hole
Pulse pitch	0.166mm/pulse at 10mpm
Coupling method	L,T : Water gap(0.5mm) OB : Water column (40mm)
Coupling check	Pulse reflection method AGC available
Seam tracking	Eddy current method ±1mm

### 2.3 探触子

縦きず用 (L : Longitudinal), 横きず用 (T : Transverse, OB : On bead) 探触子が Fig.1 に示すように 2 つのマニピュレータに備えられ, L, T は最大 16ch, OB は最大 4ch 配置可能である。L, T それぞれの探触子は自由に溶接線距離を変更して探傷スキップを定めることができる。外径, 肉厚, 屈折角, スキップ数を制御用 PC に入力することで, 自動的に探触子位置が設定される。

探傷屈折角は外径, 肉厚に応じて定め, 探触子の交換で設定する。通常, L, T 探傷の内外面用では 60° ~ 70°, OB 探傷では 45° である。L 探傷で肉厚中央狙いを行う場合は, 83° 程度まで可能である。この肉厚中央狙いの探傷法は今回新たに開発した 3)。

2 マニピュレータ方式の採用により, さまざまな客先検査仕様に柔軟に対応して探触子を配置させることが可能となっている。また, 1 マニピュレータだけを探傷に使う場合は, 待機中のマニピュレータを次ロット用に設定し, 較正までしておくことで, 組み換え・調整時間なしに次ロットの探傷を行うことも可能である。Fig.2 に探触子配置の例を示す。

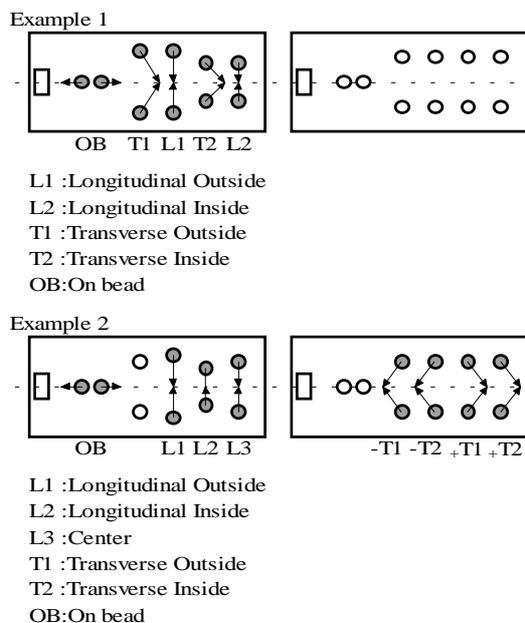


Fig.2 Examples of probe arrangement

### 2.4 カップリング

L, T 用探触子についてはギャップ法, OB 用探触子については局部水浸法を採用した。

L, T 用探触子には, カップリングチェック用垂直探触子が組み込まれている。OB 用探触子は 2 つの探触子が向かい合わせになっており, 探傷用の探触子をカップリングチェックにも用いる。すべてのチャンネルは, カップリングチェックを行った後に斜角探傷を行うようになっており, カップリング不良が生じた場合にはアラームが発生する。

### 2.5 探傷装置の調整と較正

調整・較正が確実に行えるように, 探傷条件 (探触子位置, ゲート位置) の演算プリセット機能, 自動ゲート設定機能, 自動感度較正機能を有している。

自動ゲート設定については, L 探傷を例にとると, ビード中央および両端に加工された人工きずを用い, それらすべての人工きずからのエコーが検出できるように自動的に探傷ゲートの位置と幅が設定される。これによって, 溶接部全幅にわたって適切に探傷ゲートを設定することができる。

自動感度較正は, 較正サンプルに加工された人工きずのエコー高さが目標値になるように, 自動的に感度を設定するものである。

## 2.6 シーム追従

溶接部を信頼性高く探傷するためには、走行する溶接管の溶接部中心位置を精度良く検出して探触子を追従させることが極めて重要である。そこで、渦流法でビード中心を求める新たな高精度シーム検出センサを開発<sup>4)</sup>、採用した。

## 2.7 超音波ビーム簡易作図機能

さまざまな探傷条件でも超音波ビームの入射を確実にし、最適な探傷が実施できるように、探傷装置の制御用 PC にて超音波ビームの簡易作図を行えるようにした。入射点をマウスでドラッグすることにより、超音波ビームの伝播経路を自由に把握することができる。Fig.3 に画面例を示す。

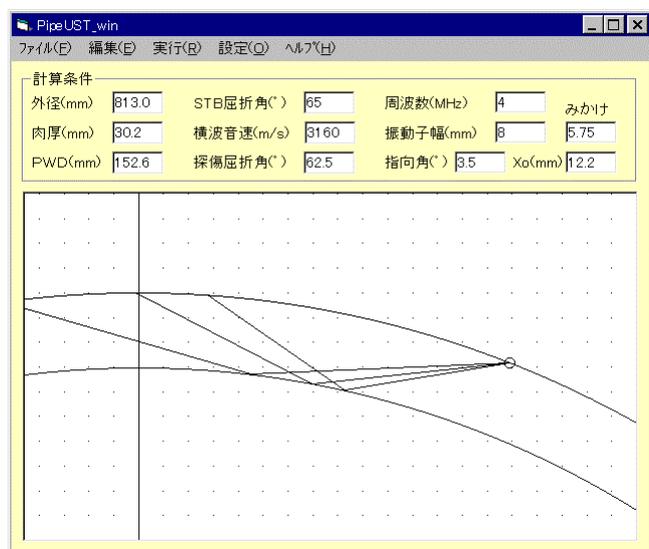


Fig.3 Ultrasonic beam pass display

## 3. 探傷性能向上技術

探傷性能の追求にあたり、本装置に採用した主な新技術は以下のとおりである。

- (1) 高 S/N 化のためのチャープ波パルス圧縮法
- (2) 肉厚中央部狙いのための垂直入射探傷法
- (3) 高精度シーム検出センサ

### 3.1 チャープ波パルス圧縮法

一般に現在の超音波探傷では、送信信号にインパルス状のスパイクパルス波が用いられている。この方式はエコーの時間分解能が優れている点にメリットがある。しかし、オンライン探傷のように探傷装置の周りにさまざまなノイズ源があるような環境で S/N を上げるためには高い電圧が必要であり、探触子や回路の耐圧から限界がある。電圧を高くする代わりにトーンバースト波(数サイクルの正弦波)のような時間方向に長い平均電力の大きい信号を用いる方式もあるが、時間分解能が悪化する問題がある。これに対し、時間方向に長い送信信号を用いてかつ高い時間分解能を得る方法としてパルス圧縮技術が知られている。当社ではこれを超音波探傷で実用するためにリアルタイムでデジタル演算する技術を開発した<sup>2)</sup>。

Fig.4 にチャープ波パルス圧縮の原理を示す。周波数を掃引したチャープ波を送信信号として用いる。受信信号は図のようにパルス幅が長いままであるが、これをインパルス応答が送信信号と逆の遅延特性を持つように設計されたパルス圧縮フィルタに通す。この結果、時間軸上で広がっていたエコー信号は 1 点の位置に集まり、振幅が増大すると同時にパルス幅が短く「圧縮」される。このとき、送信信号とは全く関係ない波形である電気的なノイズはそのような効果はないため低いレベルのままであり、S/N が大きく改善される。

パルス圧縮フィルタは FIR (Finite Impulse Response) フィルタ素子による相互相関で実現できる。このとき、送信信号  $S_t(t)$ 、探触子のインパルス応答  $f(t)$ 、受信信号  $S_r(t)$ 、パルス圧縮後の信号  $S_c(t)$  それぞれの関係を周波数領域で表わすと次のようになる。

$$\begin{aligned}
 S_c(j\omega) &= S_t^*(j\omega) \cdot S_r(j\omega) \\
 &= S_t^*(j\omega) \cdot F(j\omega) \cdot S_t(j\omega) \quad \dots\dots(1) \\
 &= S_t^*(j\omega) \cdot S_t(j\omega) \cdot F(j\omega)
 \end{aligned}$$

ただし、\*は共役複素数を示す。式(1)から、圧縮されたエコーの波形は、チャープ波  $S_t(t)$  の自己相関関数  $S_t^*(j\omega) \cdot S_t(j\omega)$  を送信パルスとした場合に等しいことがわかる。これは、チャープ波パルス圧縮を用いた超音波探傷装置は、従来のスパイクパルスの代わりに「チャープ波の自己相関関数」を送信信号に用いた超音波探傷装置と等価であることを意味している。波形の一例として、Fig.5 にチャープ波の自己相関関数と従来のスパイクパルスの波形、およびスペクトラムを示す。チャープ波の自己相関関数は中心周波数と帯域幅がコントロールされた波形であり、スパイクパルスに比較してチャンネル間ばらつきの少ない音場や距離振幅特性が得られる。

本技術により電気ノイズの S/N は約 20dB 改善され、さらに電縫管溶接部超音波探傷で実績のある同期加算平均処理<sup>1)</sup>も適用できるため、本探傷装置では電気ノイズに関してほぼノイズレスな性能が得られている。

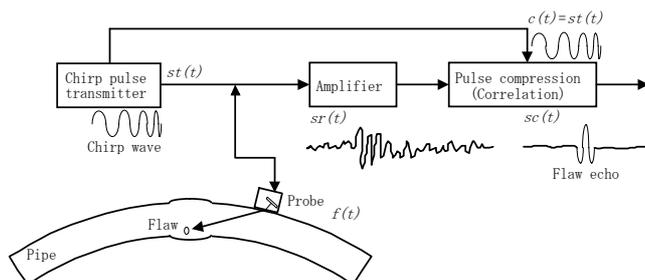


Fig.4 Principle of the chirp pulse compression

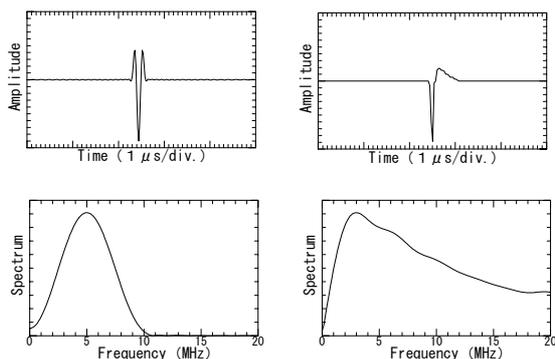


Fig.5 Example of the auto-correlation of a chirp pulse and a conventional spike pulse

### 3.2 垂直入射探傷法

従来適用されてきた屈折角  $60^\circ \sim 70^\circ$  の斜角探傷法では、肉厚中央部を狙う場合、Skip は 0.25 または 0.75 に設定されるが、この条件では、溶込不良のような面状欠陥に対して斜め入射となり、検出感度の点で不利である。そこで、溶接部肉厚中央部の面状欠陥を高感度に探傷する技術を開発した<sup>3)</sup>。

Fig.6 に示すように欠陥に対して超音波ビームを垂直入射すると、溶接裏波からのエコーが小さくなる一方、欠陥から正反射のエコーが得られるため、高い S/N で検出できる。この探傷を行うためには、式(2)で定められる屈折角の探触子を、式(3)で定められる溶接線-探触子距離に配置すれば良い。

$$\theta = \sin^{-1}\left(1 - \frac{t}{D}\right) \quad \dots\dots(2)$$

$$PWD = \left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) \cdot \frac{D}{2} \quad \dots\dots(3)$$

D : Diameter, t : Thickness

しかしながら、式(2)より、 $t/D$  が 6%以下になると屈折角は  $70^\circ$  を越え、たとえば 1%では屈折角  $82^\circ$  での探傷が要求されることになる。従来の斜角探傷法は屈折角  $70^\circ$  以下が一般的であり、 $70^\circ$  以上では、音圧往復通過率が大きく低下することや、見かけの振動子幅が小さくなることによる感度低下が大きく、外来ノイズに弱くなるという課題があった。そこで、前述のチャープ波パルス圧縮探傷法を適用することにより S/N を改善し、「垂直入射法」のオンライン探傷を実現した。

垂直入射条件を満たすためには小刻みな屈折角の探触子が多数必要となり、さらに探傷の諸条件下では設定した垂直入射条件からずれる場合も予想される。これらの課題に対しては、探触子入射角の微調整機構を設けるとともに、ビーム指向角に適切な広がりを持たせるようにして解決した。

オンライン実験の結果、本技術は方形平面きずに換算し

て  $1 \times 1\text{mm}$  の微小欠陥を検出できる S/N が得られることを確認した。

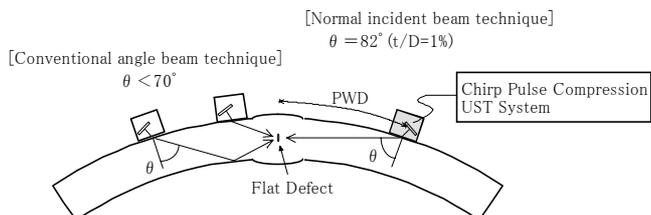


Fig.6 Configuration of the new angle beam testing technique

### 3.3 高精度シーム検出センサ

従来型の渦流式シーム検出センサは、溶接部上方の管母材部より一定の距離だけ離れた位置に、2 個の渦流センサを配置したもので、両者の差分出力の正負から位置ずれを検出していた。この方式では、鋼管サイズやビード形状によるリフトオフ変動が精度に影響するため、これらの問題がない新しいシーム検出センサを開発した<sup>4)</sup>。

Fig.7 に本シーム検出センサの構成を示す。今回開発したシーム検出センサは、まず、用いている渦流センサ形状に特長がある。E 型形状フェライトコアの両脚部に、コア中央部の差交磁束の向きが互いに逆向きになるよう一次コイルを巻き、これに交流電流を流す。コア中央部には、その部分での磁束変化を検出する二次コイルを巻いている。これにより、本渦流センサは、それ自体で空間差分型センサとして機能する。

次に、この E 型渦流センサを、回転ディスク下面に配置し、 $3\text{r/s}$  の速度で常時回転させる。上述したように本渦流センサは差分型センサとして機能するので、溶接ビードを通過する際、左右の溶接ビード肩部において極性の異なる 2 つのピーク信号が現れる。これら 2 つのピーク信号の発生タイミングから、渦流センサが左右のビード肩部を通過するタイミングの検知が可能となる。さらに、回転ディスク上方に、光電センサを 2 つ配置し、渦流センサ位置に黒線を引くことで、光電センサ位置を渦流センサが通過するタイミングを検出する。

以上のような 4 つのタイミング信号を演算することで、溶接部中心線が渦流センサ回転中心軸に対し、左右どちらにずれているかの情報のみならず、ずれ量の検出も可能となる。また、渦流センサからのピーク信号出力タイミングを用いて演算する方法であるので、従来型センサのように管諸元やビード形状の影響を受けない。このセンサによるずれ情報に基づいて、マニピュレータが溶接部中心に位置するように制御する。

オンラインでの実験の結果、本シーム検出センサにより  $\pm 1\text{mm}$  以内の精度で溶接部を追従できることを確認した。

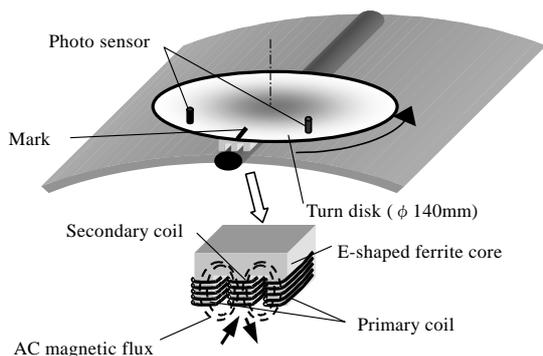


Fig.7 Principle of the seam detector

#### 4. 探傷結果例

Fig.8 に人工きずサンプルによる探傷試験結果の一例を示す。使用した鋼管のサイズはφ 813.0mm, t30.2mm である。L1 は外面狙い, L2 は内面狙い, L3 は肉厚中央狙いで, L1, L2 は 5%Notch に, L3 はφ 3mm 横穴にビームを合わせた。

Fig.8 から, 溶接線上だけでなく, 溶接部両脇まで, サンプル管に付与されたすべての人工きずが検出されていることがわかる。S/N をまとめると Table 2 に示すように極めて良好で, φ 1.6mm 縦穴の S/N は L1~L3 すべて 10dB 以上が得られている。

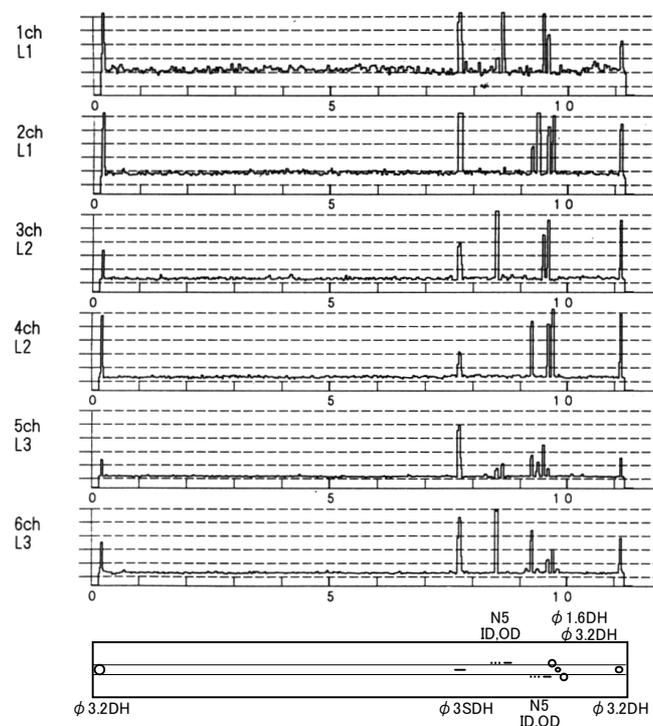


Fig.8 Results of a dynamic test

Table 2 Results of a dynamic test

Channel	Artificial defect	Signal	Noise	S/N
L1(OD)	N5OD	127%	30%	12.5dB
	φ 1.6DH	85%	25%	10.6dB
L2(ID)	N5ID	127%	10%	22.1dB
	φ 1.6DH	92%	8%	21.2dB
L3(Center)	φ 3SDH	89%	6%	23.4dB
	φ 1.6DH	26%	6%	12.7dB

#### 5. おわりに

本溶接部自動超音波探傷装置は, 当社の非破壊検査技術を結集して開発した最新鋭の装置であり, 多様な超音波探傷ニーズに対応できるような仕様となっている。本装置により, 高い品質レベルの製品を提供できるものと確信している。

#### 参考文献

- 1) Iizuka, Y. et al. "Real time digital signal processing of on-line ultrasonic flaw detection". Proc. of the 1995 IEEE IECON, pp.867-871(1995).
- 2) Iizuka, Y. "High signal-to-noise ratio ultrasonic testing system using chirp pulse compression". Insight, Vol.40, No.4, pp.282-285(1998).
- 3) 橋本ほか, "高感度鋼管溶接部超音波探傷技術(その1)(面状欠陥高感度探傷法)". CAMP-ISIJ. Vol.13, p.1041(2000).
- 4) 松藤ほか, "高感度鋼管溶接部超音波探傷技術(その2)(高精度溶接部中心位置検出器)". CAMP-ISIJ. Vol.13, p.1042(2000).

<問い合わせ先>

基盤技術研究所 計測制御研究部

Tel. 044 (322) 6289 飯塚 幸理

E-mail address : iizuka@lab.keihin.nkk.co.jp

福山製鉄所 プロセス制御部 技術開発グループ

Tel. 0849 (45) 3327 松藤 泰大

E-mail address : Yasuhiro\_Matsufuji@ntsgw.tokyo.nkk.co.jp